

POLITECNICO DI MILANO
FACOLTÀ DI ARCHITETTURA E SOCIETÀ
Corso di Laurea in Architettura
Laurea Magistrale



**INFLUENZA DELLA REGOLARITÀ SUL COMPORTAMENTO
SISMICO DEGLI EDIFICI**

Relatore: Prof. Maria Giuseppina Limongelli

Tesi di Laurea di:
Angelo Salvi
Matricola: 786436

Anno Accademico 2013-2014

Indice

Introduzione e scopo della Tesi	11
CAPITOLO - 1 - La Regolarità Strutturale	15
1.1 I sistemi strutturali	19
1.2 - La regolarità degli elementi costruttivi	23
1.2.1 Impalcato.....	23
1.2.2 Schema Trave - Pilastro.....	25
1.2.3 Tamponamenti.....	25
1.2.4 Centro delle Masse e Centro delle Rigidezze	27
1.3 - Fondamenti della Regolarità.....	28
1.3.1 - Regolarità' in Pianta	28
1.3.2 I Problemi Dimensionali (forma)	29
1.3.3 I Problemi Distributivi (forma)	30
1.3.4 La Distribuzione delle Rigidezze	32
1.3.5 La Distribuzione delle Masse	33
1.3.6 - Regolarità in Elevazione	33
1.3.7 I Problemi Dimensionali (forma)	33
1.3.8 I Problemi Distributivi (forma)	34
1.3.9 La Distribuzione delle Rigidezze	35
1.4 - Criteri di Regolarità Secondo le Norme Tecniche	36
1.5 - Effetti della Mancanza di Regolarità	39
1.5.1 Irregolarità in Pianta	39



1.5.2 Non Simmetrica.....	40
1.5.3 Variazione della Resistenza e della Rigidezza Perimetrali	41
1.5.5 Struttura Troppo Lunga	43
1.5.6 Effetti dei Tamponamenti in Pianta	43
1.5.7 Irregolarità in Elevazione.....	44
1.5.8 Colonne Tozze.....	44
1.5.9 Arretramenti Verticali	45
1.5.10 Effetto Martellamento.....	47
1.5.11 Piano Debole o Soffice	51
1.5.12 Effetti dei Tamponamenti in Elevazione	55
1.5.13 Conclusioni	56
1.6- Effetti legati alla Disomogeneità del Terreno	57
1.6.1 Conclusioni.....	60
CAPITOLO – 2 - La Regolarità Strutturale e l'Architettura Moderna.....	61
2.1- Influenza della Configurazione Architettonica sul Comportamento Sismico	61
2.2 - I Cinque Punti di le Corbusier e il Comportamento Sismico.....	65
CAPITOLO – 3 - La Regolarità nelle Norme	72
3.1 - Il problema sismico in Italia	72
3.2 - Le Norme Tecniche Italiane per le Costruzioni in Zona Sismica.....	78
3.2.1 Evoluzione delle norme tecniche.....	78
3.2.2 Excursus del verificatosi nella storia passata.....	78
3.2.3 Le Norme di 1 ^a Generazione	79
3.2.4 Le Norme di 2 ^a Generazione	83
3.3 - Le Norme Edilizie in Italia.....	85



3.4 Confronto tra Normativa Tecnica e Regolamenti Edilizi in Italia	94
3.5 Problematiche Legate ai Centri Storici e Linee Guida Sovrintendenza	98
3.6 - Le Norme Tecniche Europee per le Costruzioni in Zona Sismica	100
3.6.1 Criteri di regolarità in pianta secondo l'Eurocodice 8.....	101
3.6.2 Criteri di regolarità in elevazione secondo l'Eurocodice 8.....	101
3.7 - Le Norme Tecniche Estere per le Costruzioni in Zona Sismica	102
3.7.1 Normativa Americana.....	104
3.7.1.1 Rischi Accettabili.....	105
3.7.1.2 Importanti Caratteristiche di Progettazione per la Costruzione in Zona Sismica	106
3.7.1.3 Criteri di irregolarità in pianta secondo l'Uniform Building Code	107
3.7.1.4 Criteri di irregolarità in elevazione secondo l'Uniform Building Code	108
3.7.1.5 Applicazione da Parte di Stati e Comuni.....	108
3.7.1.6 Conclusioni Riguardo la Normativa Americana.....	109
3.7.2 Normativa Giapponese.....	109
3.7.2.1 Codice Sismico Attuale da Adottarsi per la Realizzazione di Edifici.....	112
3.7.2.2 Conclusioni Riguardo la Normativa Giapponese	114
3.7.3 Normativa Turca	114
3.7.3.1 A - Irregolarità di Piano Articoli correlati	116
3.7.3.2 B – Irregolarità in elevazione Articoli correlati.....	116
3.7.3.3 Conclusioni Riguardo la Normativa Turca.....	117
3.7.4 Paragone tra Normative Estere e Normativa Italiana	119
CAPITOLO – 4 - Nuove Tecniche di Intervento in Zona Sismica	120
4.1 Esempio di Intervento Con Isolamento Sismico.....	123
4.1.1 Il Progetto	124
4.1.2 Confronto tra Soluzione a Base Fissa e Soluzione Isolata.....	126



4.1.3 Conclusioni.....	126
CAPITOLO – 5 - Esempi di Costruito	128
5.1 Edificio 1.....	128
5.2 Edificio 2.....	136
5.3 Edificio 3.....	139
5.3.1 Opzioni di riabilitazione	141
5.3.2 Conclusioni.....	143
5.4 Edificio 4.....	143
Conclusioni della Tesi	149
Bibliografia.....	151



Indice Immagini

Figura 1 Regolarità e Irregolarità in elevazione.....	pag 16
Figura 2 Regolarità Progetto Centro Servizi Comune di Sulmona.....	pag 16
Figura 3 Strutture regolari e irregolari.....	pag 17
Figura 4 Telaio resistente a momento.....	pag 20
Figura 5 Telai con controventi concentrici o eccentrici.....	pag 21
Figura 6 Sistemi a parete singola o accoppiate.....	pag 21
Figura 7 Sistemi telaio-parete.....	pag 22
Figura 8 Sistemi a nucleo.....	pag 23
Figura 9 Irregolarità con grandi rientranze nella struttura.....	pag 24
Figura 10 Irregolarità con grandi rientranze nella struttura.....	pag 25
Figura 11 Influenza dei tamponamenti nella rigidità di una struttura.....	pag 26
Figura 12 Influenza dei tamponamenti su una struttura snella e una tozza.....	pag 26
Figura 13 Centro delle masse CM e Centro delle rigidezze CR.....	pag 28
Figura 14 Configurazioni regolari e irregolari.....	pag 29
Figura 15 Forme convesse(semplici) e concave (complesse).....	pag 30
Figura 16 Forme complesse e livello di rischio.....	pag 31
Figura 17 Distribuzione degli elementi irrigidenti simmetrici e non.....	pag 32
Figura 18 Forme complesse e livello di rischio.....	pag 35
Figura 19 Regolarità in pianta.....	pag 36
Figura 20 Rientri e sporgenze.....	pag 36
Figura 21 Rapporto lati rettangolo inscritta costruzione regolare.....	pag 37
Figura 22 Regolarità e irregolarità in elevazione.....	pag 37
Figura 23 Variazione di massa e rigidezza.....	pag 37
Figura 24 Restringimenti sezione.....	pag 38
Figura 25 Distanza da tenere tra gli edifici.....	pag 38



Figura 26 Eccentricità tra GR e GM.....	pag 40
Figura 27 pianta parte anteriore edificio “Casa dello Studente” dell’Aquila.....	pag 40
Figura 28 Esempi di non corrispondenza tra centro della resistenza e centro della rigidezza.....	pag 41
Figura 29 Problemi nei nodi.....	pag 42
Figura 30 Esempi di rinforzo della struttura in corrispondenza dei nodi.....	pag 42
Figura 31 Edificio troppo lungo.....	pag 43
Figura 32 Influenza dei tamponamenti sulla regolarità di un edificio.....	pag 43
Figura 33 Effetti di un sisma su una colonna tozza.....	pag 44
Figura 34 Eventuali soluzioni al problema. In caso di edificio in pendenza si può incrementare la lunghezza del pilastro riducendo la rigidezza mentre nel caso di tamponamenti che non coprono tutta l'altezza si possono ridurre le aperture o rendere portanti i muri adiacenti.....	pag 45
Figura 35 Dallas City Hall come esempio di arretramento invertito.....	pag 46
Figura 36 Tre soluzioni al problema della configurazione arretrata: 1)La struttura della base supporta la torre; 2)La struttura della torre sostiene la base attraverso resistenze orizzontali; 3)Le strutture della base e della torre sono separate.....	pag 47
Figura 37 Martellamento.....	pag 47
Figura 38 Effetti del martellamento.....	pag 48
Figura 39 Esempi di martellamento ed effetti.....	pag 50
Figura 40 Esempio giunti sismici utilizzati in una struttura.....	pag 51
Figura 41 Piano pilotis.....	pag 51
Figura 42 Esempio di piano debole con irregolarità di forma, e struttura - Terremoto dell'Aquila 2009.....	pag 52
Figura 43 Effetti del sisma del 1971 sull'Sylmar Olive View hospital.....	pag 52
Figura 44 Effetti di un sisma su un edificio con piano soffice.....	pag 53
Figura 45 Sylmar Olive View hospital.....	pag 54
Figura 46 piante tipo, sezione e foto del Palazzo Corvin dove si possono vedere le differenze di impostazione strutturale nelle due ali dell’edificio.....	pag 55
Figura 47 Differenti distribuzioni di tamponamenti.....	pag 56
Figura 48 Confronto stratigrafia del terreno di Onna e Monticchio.....	pag 59



Figura 49 Confronto stratigrafia del terreno di Castelnuovo e San Pio delle Camere.....	pag 60
Figura 50 Quattro planimetrie di nuovi musei la cui irregolarità in planimetria è evidente. In alto a sinistra, il Guggenheim Museum, Bilbao, Spagna, progettato da F. Gehry, 1998. In alto a destra, Il Museo Ebraico, Berlino, Progettato da D. Liebskind, 1999. In basso a sinistra, il Rosenthal Center of Arts, Cincinnati, progettato da Zaha Hadid, 2003. In basso a destra, il Nasher Sculpture Center, Dallas, progettato da R. Piano, 2003.....	pag 62
Figura 51 Fronte urbano.....	pag 63
Figura 52 Fronte unico-martellamento.....	pag 64
Figura 53 Parziale immobilità dei piani inferiori.....	pag 65
Figura 54 Maison Domino e Ville Savoye.....	pag 67
Figura 55 Esempi di "piano debole".....	pag 67
Figura 56 La pianta libera secondo Le Corbusier.....	pag 68
Figura 57 Esempio di facciata libera.....	pag 69
Figura 58 Effetto pilastro tozzo e esempio pratico.....	pag 70
Figura 59 Esempi di tetto giardino e piscina sul tetto.....	pag 70
Figura 60 Struttura del tetto verde.....	pag 71
Figura 61 Mappa della pericolosità sismica in Italia Accelerazione orizzontale di picco (in g) con periodo di ritorno pari a 475 anni.....	pag 76
Figura 62 Classificazione sismica al 2006.....	pag 77
Figura 63 Struttura di "Casa Baraccata".....	pag 81
Figura 64 Terremoto Messina 1908.....	pag 83
Figura 65 Esempio di fronte unico in centro storico.....	pag 95
Figura 66 Martellamento.....	pag 95
Figura 67 Portico di Piazza Cavour, Bologna.....	pag 96
Figura 68 Tipiche configurazioni irregolari di edifici scolastici.....	pag 98
Figura 69 Zone sismiche negli U.S.A.....	pag 102
Figura 70 Zone sismiche in Giappone.....	pag 103
Figura 71 Zone sismiche in Turchia.....	pag 104
Figura 72 Coefficiente sismico.....	pag 110



Figura 73 Percorsi per le costruzioni.....	pag 112
Figura 74 Effetti di un sisma su un edificio non isolato (a sinistra) e uno isolato (a destra).....	pag 122
Figura 75 Sistemi di isolamento alla base.....	pag 123
Figura 76 Scuola Quasimodo.....	pag 124
Figura 77 Pianta delle fondazioni e disposizione degli isolatori.....	pag 125
Figura 78 Fasi realizzative preliminari al taglio dei pilastri ed inserimento degli isolatori.....	pag 127
Figura 79 Pianta architettonica del piano terra Casa dello Studente.....	pag 129
Figura 80 In rosso il pilastro non inserito dal progettista.....	pag 129
Figura 81 Posizionamento originale dei pilastri Casa dello Studente all'Aquila.....	pag 130
Figura 82 Casa dello Studente all'Aquila.....	pag 133
Figura 83 Sezione della Casa dello Studente all'Aquila. La linea tratteggiata indica la separazione tra il piano sofficce e il resto dell'edificio mentre le linee diagonali indicano la linea di collasso dei solai.....	pag 134
Figura 84 Geometria del collasso dei solai compresi tra le travi 11-25 e 18-29.....	pag 134
Figura 85 Effetti sulla pianta strutturale della Casa dello Studente. In giallo è indicata l'area fortemente interessata tra le travi 11-25 e 18-29.....	pag 135
Figura 86 Prospetto edificio a Reggio Calabria con piano pilotis.....	pag 136
Figura 87 Pianta con evidenziata l'area del piano pilotis.....	pag 137
Figura 88 Effetti del sisma del 1971 sul Sylmar Olive View hospital.....	pag 138
Figura 89 Planimetria generale e prospetto frontale del complesso di Modica.....	pag 140
Figura 90 Foto dell'edifici a Modica.....	pag 140
Figura 91 Immagini del basamento "pilotis".....	pag 141
Figura 92 Schema generale del sistema di riabilitazione con isolamento alla base.....	pag 142
Figura 93 Disposizione dei controventi in pianta (sopra) e in altezza (sotto).....	pag 142
Figura 94 Scuola E. di Savoia.....	pag 144
Figura 95 Pianta piano terra (blocco aule) con indicazione dei giunti tecnici (linea rossa tratteggiata) e dei collegamenti interni (rossi ed esterni (blu)).....	pag 145
Figura 96 Pianta generale palestra con indicazione del giunto tecnico di separazione dal blocco aule.....	pag 146



Figura 97 Lesioni agli attacchi con il blocco aule in corrispondenza delle solette rampanti delle travi.....pag 146

Figura 98 Interazione pilastro-tamponamento rigido sotto finestra.....pag 147

Figura 99 Fenomeni di martellamento del giunto.....pag 148



Abstract

L'obiettivo di questa tesi è di approfondire lo studio del rapporto tra la regolarità degli edifici ed il suo comportamento sismico. Un buon comportamento di un edificio nei riguardi del sisma è fortemente influenzato dalla qualità della sua progettazione architettonica e dalle scelte relative alla configurazione in pianta ed in elevazione. In particolare la regolarità della struttura, intesa come semplicità strutturale e uniformità, ne condiziona incrementi di richiesta di resistenza e duttilità qualora essa venga a mancare. La mancanza di regolarità, dovuta alla distribuzione asimmetrica di masse, rigidità e resistenze è una delle più frequenti cause di danni durante i terremoti poiché genera rotazioni di piano che frequentemente la struttura non è in grado di sopportare. Frequentemente gli edifici più vulnerabili a maggiormente danneggiati dai terremoti in tutto il mondo sono quelli con una configurazione architettonica moderna che presentano forti irregolarità che ne influenzano negativamente il comportamento rendendo le costruzioni maggiormente vulnerabili nei confronti dell'azione sismica. L'influenza del Movimento Moderno sul comportamento sismico degli edifici verrà descritto nella tesi. Le norme tecniche per le costruzioni, sia nazionali, sia internazionali considerano attentamente il problema della regolarità fornendo specifiche prescrizioni relative alla regolarità in pianta e in elevazione. La stessa attenzione non è invece presente nelle norme edilizie che, in alcuni casi, arrivano a incoraggiare configurazioni assolutamente inadeguate a garantire un buon comportamento sismico delle costruzioni. Le discrepanze tra norme edilizie e norme tecniche e le cause della diffusione così capillare di configurazioni errate rispetto ad un buon comportamento sismico delle costruzioni, sono state analizzate nella tesi con riferimento all'evoluzione del quadro normativo italiano e messe in evidenza mediante un confronto puntuale tra le prescrizioni della normativa tecnica in merito al requisito di regolarità e i regolamenti edilizi adottati da alcuni Comuni a diverso rischio sismico.



Abstract inglese

The objective of this thesis is to investigate further the relationship between the regularity of the buildings and its seismic behavior. A good behavior of a building in respect of the earthquake is strongly influenced by the quality of its architectural design and choices about the configuration in plan and elevation. In particular, the regularity of the structure, intended as structural simplicity and uniformity, affects increments request of strength and ductility if it fails. The lack of regularity, due to the asymmetric distribution of mass, stiffness and resistance is one of the most frequent causes of damage during earthquakes because it generates rotations of plan that frequently the structure is not able to withstand. Frequently the most vulnerable buildings and most damaged by earthquakes in the world are those with a modern architectural configuration with significant deficiencies that adversely affect the behavior of making buildings more vulnerable to seismic action. The influence of the Modern Movement on the seismic behavior of buildings will be described in the thesis. The technical standards for buildings, both national and international carefully consider the problem of regularity by providing specific requirements for regularity in plan and elevation. The same attention is instead present in the building regulations that, in some cases, come to encourage configurations absolutely inadequate to ensure a good seismic behavior of buildings. The discrepancies between building regulations and technical standards and the causes of such widespread dissemination of incorrect configurations compared to a good seismic behavior of buildings, were analyzed in the thesis with reference to the evolution of the Italian regulatory framework and put in evidence by means of a detailed comparison between the requirements of technical regulations in regard to the requirement of regularity and building regulations adopted by some municipalities in different seismic risk.



Introduzione e scopo della Tesi

L'obiettivo di questa tesi è di approfondire lo studio del rapporto tra la regolarità degli edifici ed il suo comportamento sismico. Un buon comportamento di un edificio nei riguardi del sisma è fortemente influenzato dalla qualità della sua progettazione architettonica e dalle scelte relative alla configurazione in pianta ed in elevazione. In particolare la regolarità della struttura, intesa come semplicità strutturale e uniformità, ne condiziona incrementi di richiesta di resistenza e duttilità qualora essa venga a mancare.

La mancanza di regolarità, dovuta alla distribuzione asimmetrica di masse, rigidzze e resistenze è una delle più frequenti cause di danni durante i terremoti poiché genera rotazioni di piano che inducono valori elevati degli spostamenti di interpiano o zone in cui si concentrano le richieste di resistenza e duttilità che frequentemente la struttura non è in grado di soddisfare.

Frequentemente gli edifici più vulnerabili a maggiormente danneggiati dai terremoti in tutto il mondo sono quelli con una configurazione architettonica moderna, progettati e realizzati nel secolo scorso, che presentano forti irregolarità che ne influenzano negativamente il comportamento rendendo le costruzioni maggiormente vulnerabili nei confronti dell'azione sismica. L'influenza del Movimento Moderno sul comportamento sismico degli edifici e sulla diffusione internazionale di tale relazione è stata evidenziata da svariati ricercatori e verrà descritta nella tesi.

Le norme tecniche per le costruzioni, sia nazionali, sia internazionali considerano attentamente il problema della regolarità fornendo specifiche prescrizioni relative alla regolarità in pianta e in elevazione. La stessa attenzione non è invece presente nelle norme edilizie che, in alcuni casi, arrivano a incoraggiare configurazioni assolutamente inadeguate a garantire un buon comportamento sismico delle costruzioni.

Le discrepanze tra norme edilizie e norme tecniche e le cause della diffusione così capillare di configurazioni errate rispetto ad un buon comportamento sismico delle costruzioni, sono state analizzate nella tesi con riferimento all'evoluzione del quadro normativo italiano e messe in evidenza mediante un confronto puntuale tra le prescrizioni della normativa tecnica in merito al requisito di regolarità e i regolamenti edilizi adottati da alcuni Comuni a diverso rischio sismico.

La tesi è articolata in cinque capitoli: nel primo vengono descritti i criteri di regolarità in pianta e in elevazione e le possibili conseguenze di configurazioni irregolari. Il secondo capitolo descrive le possibili cause storiche che hanno condotto, in tutto il mondo, all'adozione di configurazioni irregolari in pianta e in elevazione frequente causa di forti danneggiamenti in occasione di sismi violenti. Nel terzo capitolo si



presenta l'evoluzione dei concetti di regolarità nell'ambito delle norme tecniche nazionali e in quelle edilizie proponendo un confronto tra i due corpi normativi al fine di evidenziarne alcune discrepanze. Il confronto con alcuni corpi normativi esteri, in relazione al concetto di regolarità è contenuto nello stesso capitolo. Nel quarto capitolo si vanno a trattare i sistemi innovativi di intervento su edifici in zona sismica, soprattutto in casi di irregolarità. Quindi viene introdotto il tema degli isolatori sismici e la loro applicazione in Italia su un esempio pratico. Nell'ultima parte della tesi sono riportati alcuni casi studio a titolo esemplificativo delle conseguenze cui può condurre la mancanza di regolarità e la mancanza di coerenza tra i diversi corpi normativi cui le costruzioni devono sottostare.



CAPITOLO - 1 -

La Regolarità Strutturale

La “*regolarità*” di un edificio, quindi della sua struttura, assume sempre un particolare rilievo anche quando esso (edificio) è soggetto esclusivamente a carichi verticali, ma diventa di assoluto rilievo in zona sismica. La “*regolarità*” condiziona infatti la capacità - possibilità di prevedere il comportamento della struttura, la qualità del suo comportamento, il costo necessario per renderla accettabile. Il termine “*regolarità*” racchiude due concetti distinti, anche se spesso associati l’uno all’altro: semplicità strutturale e uniformità (fig. 1, edificio in alto a sinistra) .

Col primo ci si riferisce all’esistenza di percorsi chiari e diretti per la trasmissione delle azioni (carichi verticali o azioni sismiche), dal punto in cui sono applicate fino alla fondazione, attraverso i diversi elementi, strutturali e non, che compongono l’edificio. La semplicità strutturale consente una facilità di dimensionamento, di modellazione della struttura, di analisi (risoluzione dello schema), di definizione dei dettagli costruttivi.

Col secondo si intende contemporaneamente una uniforme distribuzione dei carichi (verticali o sismici) ed una uniforme distribuzione degli elementi resistenti o, per lo meno, una stretta relazione tra distribuzione dei carichi e distribuzione degli elementi resistenti. In particolare in zona sismica occorre curare: a) l’uniformità delle masse, poiché l’azione sismica è proporzionale alle masse presenti; b), le rigidità, perché in fase elastica l’azione sismica si distribuisce tra gli elementi in proporzione alle rigidità; c) le resistenze e delle duttilità, perché queste condizionano il comportamento quando si supera la fase elastica.

La figura 1, in appresso, rappresenta, in alto a sinistra, l’unica tipologia di edificio regolare dal punto di vista strutturale, le altre, per contro, schematizzano strutture irregolari.



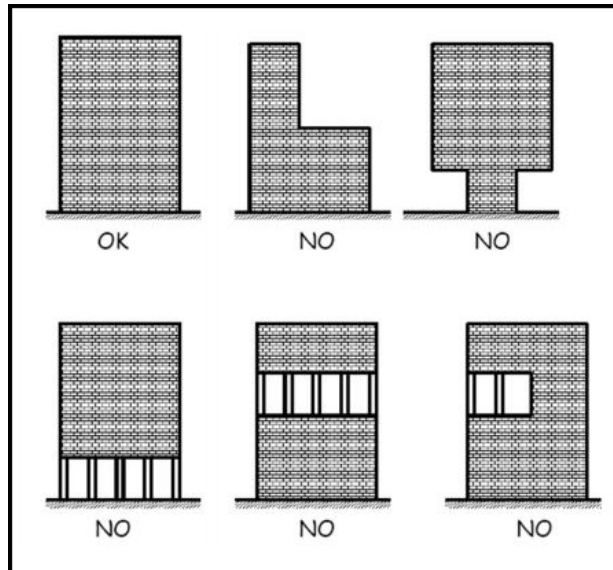


Figura 1 Regolarità e Irregolarità in elevazione

La regolarità geometrica (vedasi fig. 2) di un edificio, che interessa sia la configurazione strutturale quanto quella architettonica, non sempre è tenuta nella giusta considerazione nel progetto architettonico dello stesso. Quest'ultimo è spesso sviluppato, quale idea di ciò che si vuole realizzare, indipendentemente dalla definizione del sistema strutturale, che deve poi adattarsi a una morfologia già definita, senza poter più ricercare soluzioni ottimali per la funzione (statica – dinamica) che deve soddisfare. La risposta di un edificio all'azione sismica dipende, in modo determinante, dalla configurazione geometrica in pianta e in altezza dello stesso. Generalizzando, si può affermare che, maggiore è la regolarità, migliore, in termini di resistenza, sarà il comportamento della struttura durante il terremoto (vedasi fig. 3 sinistra).



Figura 2 Regolarità Progetto Centro Servizi Comune di Sulmona



Figura 3 Strutture regolari e irregolari

L'aspetto concettuale del progetto di un edificio è quindi di grande importanza in campo sismico. Concepire un edificio dove le forze laterali possono essere facilmente trasferite a terra senza eccessive deformazioni e con comportamento duttile ne assicura il buon funzionamento sotto l'azione sismica. Questo obiettivo può essere raggiunto se si seguono alcuni principi guida, come descritto dalla normativa italiana vigente: «*gli edifici devono avere quanto più possibile caratteristiche di semplicità, simmetria, iperstaticità e regolarità*» (dalla citata o.p.c.m. 20 marzo 2003 n. 3274, allegato 2, Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici, punto 4.3.1, Regolarità). In particolare: *semplicità strutturale*, che assicura l'esistenza di percorsi evidenti e diretti per la trasmissione delle forze sismiche, riducendo le incertezze insite nelle varie fasi di progettazione ed esecuzione, e quindi rende più affidabile la previsione del comportamento della struttura sotto sisma; *uniformità e simmetria*, che assicura una distribuzione bilanciata e adeguata degli elementi strutturali in pianta e in altezza, inducendo la struttura ad avere una risposta globale uniforme, pertanto si riducono i rischi legati alla presenza di eccentricità, zone di concentrazioni di sforzi e di elevata richiesta di duttilità; *iperstaticità*, che assicura una ridondanza di elementi strutturali e, quindi, una più favorevole e più ampia redistribuzione degli effetti dell'azione sismica e dissipazione di energia; *resistenza e rigidezza flessionali*, secondo due direzioni ortogonali che assicurano un buon comportamento della struttura qualunque sia la direzione del moto sismico (la presenza di due sistemi resistenti orditi secondo direzioni ortogonali e con valori di rigidezza e resistenza simili è estremamente importante se si considera l'aleatorietà del moto sismico, quindi l'impossibilità di prevederne la direzione di azione); *resistenza e rigidezza torsionali*, che assicurano limitati effetti torsionali nella

struttura e quindi riducono il rischio che spostamenti differenziati, dovuti a tali effetti nei diversi elementi strutturali, inducano sollecitazioni non uniformi; rigidezza e resistenza dei solai nel piano, che assicurano capacità di redistribuzione delle forze indotte dal sisma sul sistema proporzionale alle rigidezze e alle robustezze degli elementi resistenti nonché un comportamento globale uniforme; fondazioni adeguate, in grado di assicurare che l'intero edificio sia soggetto a un'uniforme eccitazione sismica, riducendo eventuali spostamenti dovuti a input non sincroni. Il soddisfacimento di tali requisiti permette di realizzare strutture che, durante sismi di media ed elevata intensità, hanno una capacità di deformazione anelastica e dissipazione di energia tali da permettere alla struttura di mantenere, anche dopo l'evento, la propria capacità portante, pur avendo ammesso danni negli elementi strutturali e non.

L'approccio progettuale da utilizzarsi per le costruzioni in zona sismica può quindi basarsi sul metodo tradizionale di aumentare la capacità di resistenza (e sui concetti prima introdotti di *semplicità, simmetria, iperstaticità e regolarità*), o su quello, tipico di un approccio più moderno alla progettazione sismica, di ridurre la rigidezza della costruzione, come ben argomentato da Ray W. Clough, uno dei padri fondatori della moderna ingegneria antisismica (R.W. Clough, J. Penzien, Dynamics of structures, 1975, 19932). Secondo Clough, il rischio sismico comporta una specificità di progettazione, in quanto un forte terremoto propone una combinazione di condizioni contrastanti, costituendo per molte strutture civili la più severa delle sollecitazioni, ma con una probabilità di manifestarsi molto bassa. In questa situazione l'impostazione ingegneristica ottimale può essere di progettare la struttura per scongiurare il crollo (per un terremoto della massima violenza possibile), accettando, tuttavia, l'ipotesi che lo stesso subisca danni (sostituire o riparare strutture danneggiate è meno costoso che costruirne di tanto resistenti da non subire danno). La sfida di una tale impostazione risiede nello sviluppare un progetto economico secondo cui un edificio suscettibile di essere danneggiato da un sisma sia sostanzialmente a prova di crollo. Clough ritiene che la soluzione di questo problema progettuale possa essere conseguita considerando un'altra caratteristica peculiare della sollecitazione sismica: l'intensità del carico sismico dipende dalle caratteristiche della struttura, a differenza di quanto avviene con gli altri carichi considerati nella progettazione strutturale (vento, gravità, carichi idrodinamici ecc.). Si può ottenere un'adeguata resistenza sismica sia aumentando la capacità di resistenza vera e propria sia riducendo la rigidità e, di conseguenza, gli sforzi a cui resistere. Rispetto ad altri settori dell'ingegneria civile, lo specifico approccio della progettazione sismica richiede una maggiore comprensione del comportamento strutturale degli edifici. Si deve concludere che anche cambiamenti secondari nel sistema d'intelaiatura o nella progettazione di dettagli costruttivi possono avere influenza determinante sulle



prestazioni rispetto alle sollecitazioni sismiche; l'aggiunta non commisurata di materiale non assicura comportamenti soddisfacenti, mentre di certo implica un diretto aumento dei costi.¹

I successivi tre argomenti vengono introdotti per una migliore comprensione delle problematiche trattate derivanti dalla irregolarità in pianta di un edificio.

1.1 I sistemi strutturali

L'analisi del comportamento dei principali sistemi strutturali, sotto forze laterali, permette di mettere in evidenza vantaggi e svantaggi delle diverse tipologie in relazione alla loro capacità deformativa e dissipativa.

1) Telai resistenti a momento (vedasi fig.4): sono costituiti da travi rigidamente connesse ai pilastri e costituiscono una delle tipologie comunemente utilizzate per realizzare edifici in cemento armato. La progettazione di edifici a telaio con l'ipotesi "shear type" è estremamente diffusa, grazie alla facilità di calcolo che questa presuppone, per contro è importante sottolineare sia che non è facile soddisfare pienamente tale ipotesi sia che un eventuale suo soddisfacimento non è auspicabile in un'ottica di progettazione secondo la gerarchia delle resistenze. Un edificio a telaio per avere una buona duttilità deve permettere la formazione di cerniere plastiche solamente nelle travi e alla base dei pilastri: ciò non si può realizzare in telai del tipo "shear type".

Si presta particolarmente all'applicazione del metodo delle gerarchie delle resistenze, invece, una struttura telaio in cui le colonne hanno resistenza superiore rispetto alle travi (modello trave debole-colonna forte), in modo che queste ultime possano ruotare, e si ha una buona regolarità nella distribuzione di rigidità e resistenze lungo l'altezza: tali caratteristiche assicurano che l'effetto delle forze laterali venga assorbito dall'intera struttura tramite una distribuzione uniforme del danno e minimizzazione delle deformazioni locali.

¹ Enzo Saviero, Bruno Briseghella, Tobia Zordan, *Edilizia Sismica (XXI secolo)*, 2010



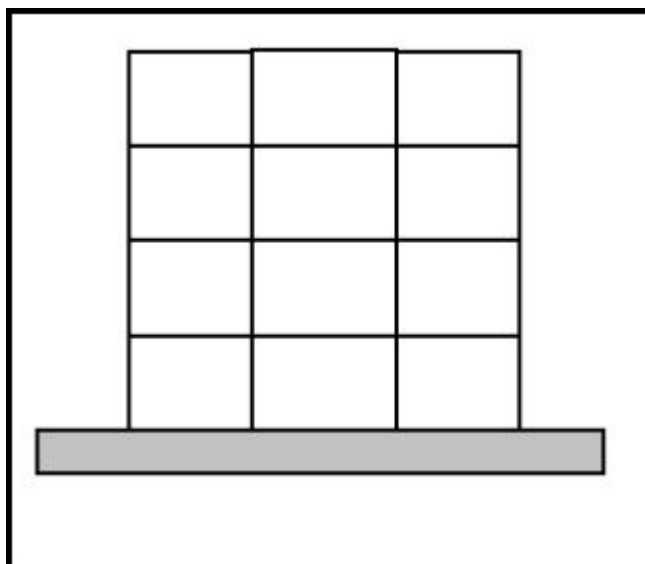


Figura 4 Telaio resistente a momento

2) Telai con controventi concentrici o eccentrici (vedasi fig.5): è la tipologia più utilizzata per la progettazione di edifici in acciaio con elevato numero di piani. Sotto l'azione di forze laterali gli elementi di controventi concentrici sono soggetti in prevalenza a forze assiali. Le zone dissipative sono pertanto concentrate nelle aste tese e la dispersione energetica risulta molto meno vantaggiosa rispetto a quella che si ottiene in elementi di tipo flessionale. A ciò si aggiunga che la dissipazione può realizzarsi solo a patto che la plasticizzazione delle aste tese non venga anticipata dal collasso dei giunti, quindi solo con collegamenti a completo ripristino. Le prove sperimentali hanno dimostrato che la duttilità dei controventi può essere aumentata facendo ricorso a controventi eccentrici. In particolare, i controventi a Y introduce un regime flessionale che si sovrappone al tipico regime assiale e aumenta la capacità dissipativa della travatura.

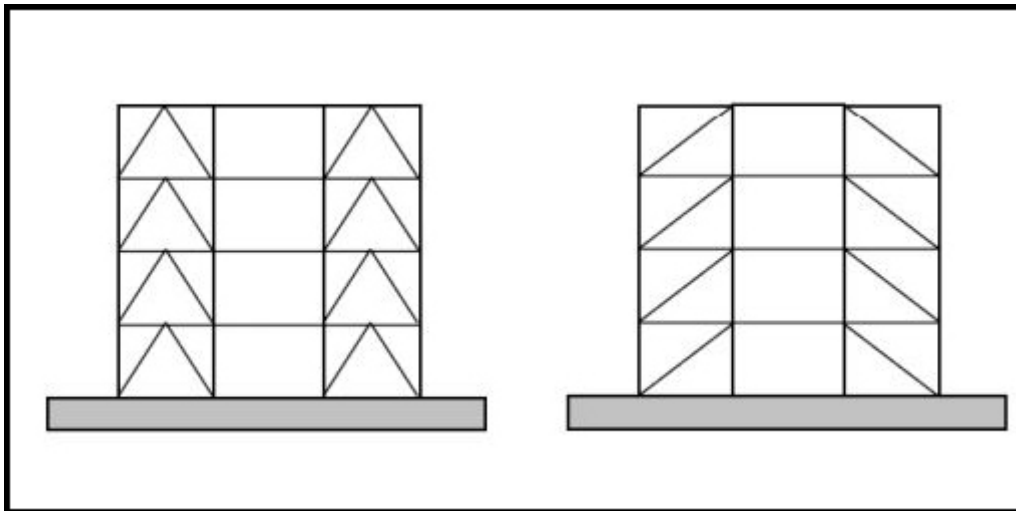


Figura 5 Telai con controventi concentrici o eccentrici

3) Sistemi a parete singola o accoppiate (vedasi fig.6): con resistenza necessaria a sopportare le forze orizzontali dell'azione sismica interamente attribuita a pareti strutturali in muratura o cemento armato. I carichi verticali sono affidati ad altri elementi strutturali. Sotto azioni laterali, si comportano come una mensola. Sono sistemi molto rigidi in grado di sopportare notevoli azioni sismiche a fronte però di elevatissimi momenti alla base. Questo comporta che la richiesta di duttilità locale in corrispondenza della base sia elevata e quindi che la crisi venga raggiunta a causa di un danno concentrato e non, come preferibile, a causa di un danno distribuito. L'utilizzo di pareti pone inoltre dei limiti in termini architettonici che possono solo parzialmente essere superati introducendo pareti accoppiate. In questo caso particolare attenzione deve essere posta nella progettazione delle travi di collegamento fra le pareti, che devono avere una elevata duttilità per deformarsi seguendo le pareti senza perdere la capacità portante nei confronti dei carichi verticali.

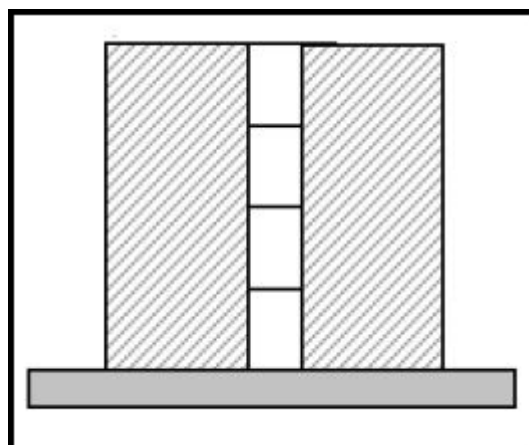


Figura 6 Sistemi a parete singola o accoppiate

Sistemi telaio-parete (vedasi fig.7): sono costituiti da telai accoppiati a pareti in muratura o cemento armato, i quali forniscono insieme la necessaria resistenza alle forze del sisma, mentre ciascuno porta la sua quota di carichi verticali. L'effetto dell'accoppiamento è quello di unire i benefici dei due sistemi: la duttilità del telaio e la rigidità della parete ovviando anche ai limiti architettonici presenti nei sistemi a parete. Il risultato è un edificio che mostra una risposta duttile con un'uniforme e significativa capacità di dissipazione di energia lungo tutta la struttura a deformabilità controllata. Anche in questi edifici si possono verificare condizioni di elevato rischio di concentrazioni di danno o di rottura fragile. Ad esempio, come nei sistemi a parete, in corrispondenza delle fondazioni del muro per effetto del momento dovuto al sisma si può manifestare un'elevata richiesta di duttilità con conseguente danno localizzato. Altri meccanismi di rottura localizzata si possono verificare nei casi di discontinuità del muro al di sopra o al di sotto di un certo piano.

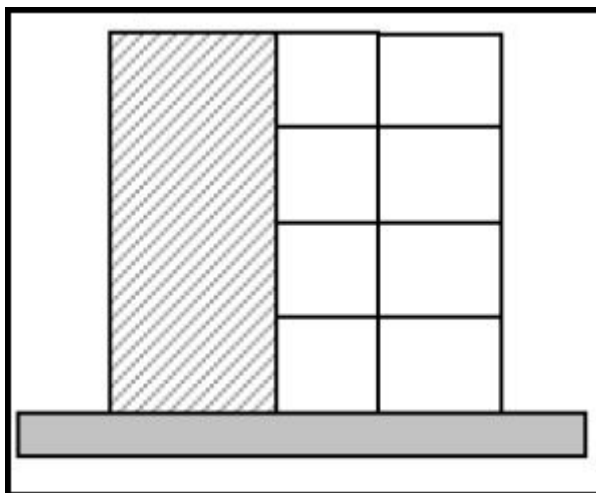


Figura 7 Sistemi telaio-parete

Sistemi a nucleo (vedasi fig.8): i nuclei in cemento armato, impiegati frequentemente in edifici in acciaio come nucleo-scala o ascensore, presentano caratteristiche simili alle pareti sopra descritte. Da queste si differenziano per due principali ragioni. Innanzitutto i nuclei offrono resistenza tridimensionale alle forze sismiche eccitatrici. In secondo luogo, la tridimensionalità del nucleo conferisce al sistema una rigidità ben superiore a quella che si otterrebbe con le pareti isolate. Questo fatto è molto importante dal punto di vista della distribuzione in pianta delle rigidità

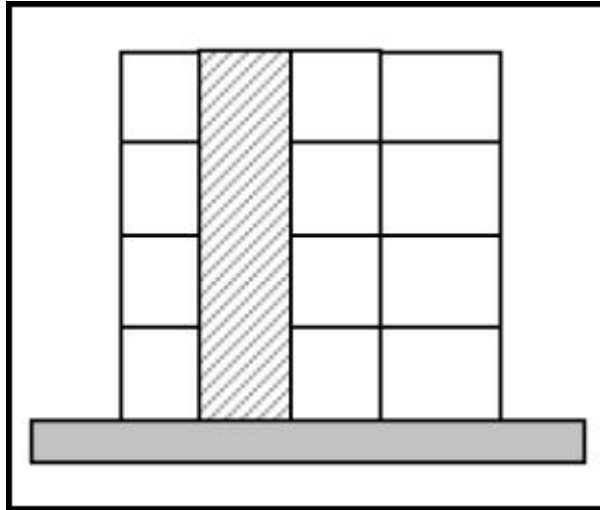


Figura 8 Sistemi a nucleo

1.2 - La regolarità degli elementi costruttivi

1.2.1 Impalcato

Il seguente capitolo viene introdotto per una migliore comprensione delle problematiche successivamente trattate derivanti dalla irregolarità in pianta di un edificio. Con il termine “*impalcato*” si intende l’insieme di solai e travi posti ad una stessa quota (solaio); il termine è usato, in particolare, quando tali strutture sono soggette ad azioni orizzontali; in tal caso la parte resistente di questo complesso strutturale è sostenuta, principalmente, dalla soletta. Per quanto riguarda l’effetto dei carichi verticali, in genere, si considera separatamente il solaio come trave continua appoggiata sulle travi (o vincolata con incastro parziale) e le travi come appartenenti al telaio spaziale caricate con l’azione uniforme trasmessa dal solaio. Per valutare il contributo dell’impalcato nei confronti delle azioni orizzontali, lo si potrebbe schematizzare come un insieme di lastre, collegate ai nodi del telaio spaziale. Ciò consentirebbe di tenere conto della deformabilità dell’impalcato nel suo piano, ma aumenterebbe notevolmente la complessità numerica dello schema. È quindi prassi comune considerarlo come un elemento infinitamente rigido nel suo piano e quindi un vincolo mutuo tra i nodi del telaio spaziale. Pertanto, in presenza di azioni sismiche, è necessario verificare la rigidezza e la resistenza dell’impalcato. La prima verifica (rigidezza) è necessaria solo se si è formulata l’ipotesi di impalcato infinitamente rigido nel suo piano; essa richiede di analizzare l’impalcato estratto dalla struttura e soggetto ad un insieme di azioni equilibrate, calcolarne la deformazione (con schema di lastra o, se una dimensione è predominante, con schema di trave deformabile a taglio)

ed infine confrontare le deformazioni relative tra impalcati adiacenti con gli spostamenti relativi forniti dalla risoluzione del telaio spaziale. La seconda (resistenza) è invece sempre necessaria; anch'essa parte dall'analisi dell'impalcato estratto dalla struttura e soggetto ad un insieme di azioni equilibrate (eventualmente utilizzando azioni ottenute mediante schemi limite per tenere conto di elementi trascurati nello schema risolutivo, quali i pannelli murari) e consiste nel calcolarne lo stato tensionale confrontando le tensioni con i valori ammissibili (o le caratteristiche di sollecitazione con i valori limite), valutando l'adeguatezza della sezione in calcestruzzo e l'eventuale necessità di armature aggiuntive per garantirne la resistenza. Nel caso dell'impalcato sono causa principale di irregolarità una forma poco compatta e la presenza di grosse rientranze o parti mancanti nell'impalcato, che riducono localmente la resistenza e rendono possibili grosse deformazioni localizzate (vedasi fig.9 e 10). Il suo comportamento può essere peggiorato sia dalla presenza di un numero molto basso di elementi resistenti verticali (singole pareti o nuclei irrigidenti), perché per riportare l'azione sismica a tali elementi nascono sollecitazioni e deformazioni rilevanti, e sia dalla brusca variazione della rigidezza degli elementi resistenti verticali (telai e soprattutto pareti) tra un piano e l'altro, che comporta la necessità di trasferire azioni rilevanti da un punto all'altro l'impalcato. Inoltre anche la presenza di elementi non strutturali, trascurati nel modello geometrico perché a vantaggio di sicurezza per travi e pilastri, può dar luogo ai problemi innanzi elencati; quindi è necessario tenerne sempre conto nella verifica di resistenza dell'impalcato, anche con semplici schemi limite. Vedasi successive considerazioni esposte per i piani piloti e per quanto emerso in seno alla perizia tecnica – C.T.U. – inerente il crollo della Casa dello Studente in Aquila.²



Figura 9 Irregolarità con grandi rientranze nella struttura

² Aurelio Ghersi, *La regolarità strutturale nella progettazione di edifici in zona sismica*

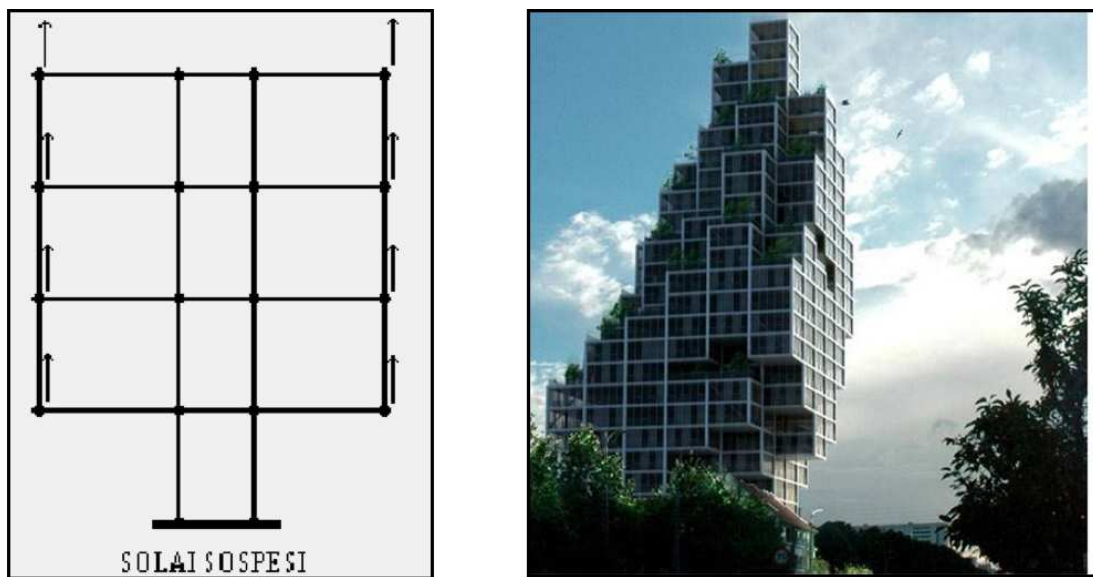


Figura 10 Irregolarità con grandi rientranze nella struttura

1.2.2 Schema Trave - Pilastro

L'uso di sezioni molto diverse, la presenza di travi che scaricano su altre travi o di pilastri che scaricano su travi ed altre irregolarità geometriche analoghe creano sia problemi di comportamento (cattiva trasmissione delle azioni da un elemento all'altro) che difficoltà di modellazione (perché lo schema di telaio, piano o spaziale, richiede che gli assi delle aste che si uniscono in un nodo convergano in un punto).

1.2.3 Tamponamenti

Le norme attuali continuano ad identificare le tamponature come “*elementi non strutturali*” alla stregua di sbalzi, antenne, etc., tuttavia poiché esse contribuiscono in misura sostanziale all'irrigidimento, all'irrobustimento, alla capacità di dissipare energia ed all'innescare dei meccanismi di crisi locale o globale, è opportuno segnalare l'importanza di una loro valutazione sismica, soprattutto in virtù dell'accentuato modo con cui essi governano la risposta dinamica della struttura. Infatti i tamponamenti influiscono sul sistema strutturale dello stesso in modo differente a seconda che:

1- questo sia più o meno flessibile (più è flessibile e maggiore sarà l'effetto delle tamponature). Vedasi fig.11.

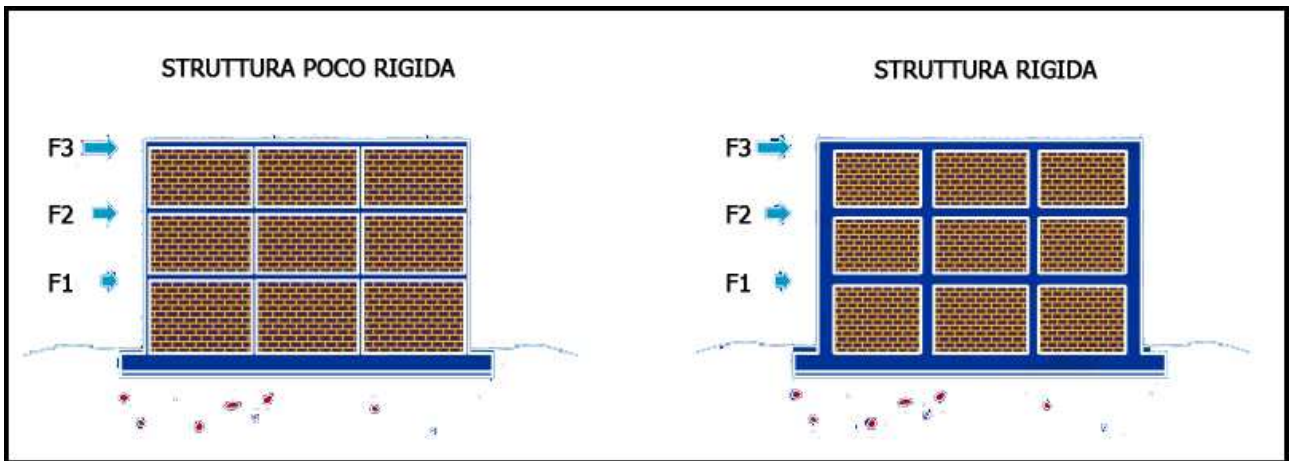


Figura 11 Influenza dei tamponamenti nella rigidità di una struttura

2- questo sia più o meno tozzo (più è tozzo il sistema strutturale, maggiore è l'effetto della tamponatura). Vedasi fig.12.

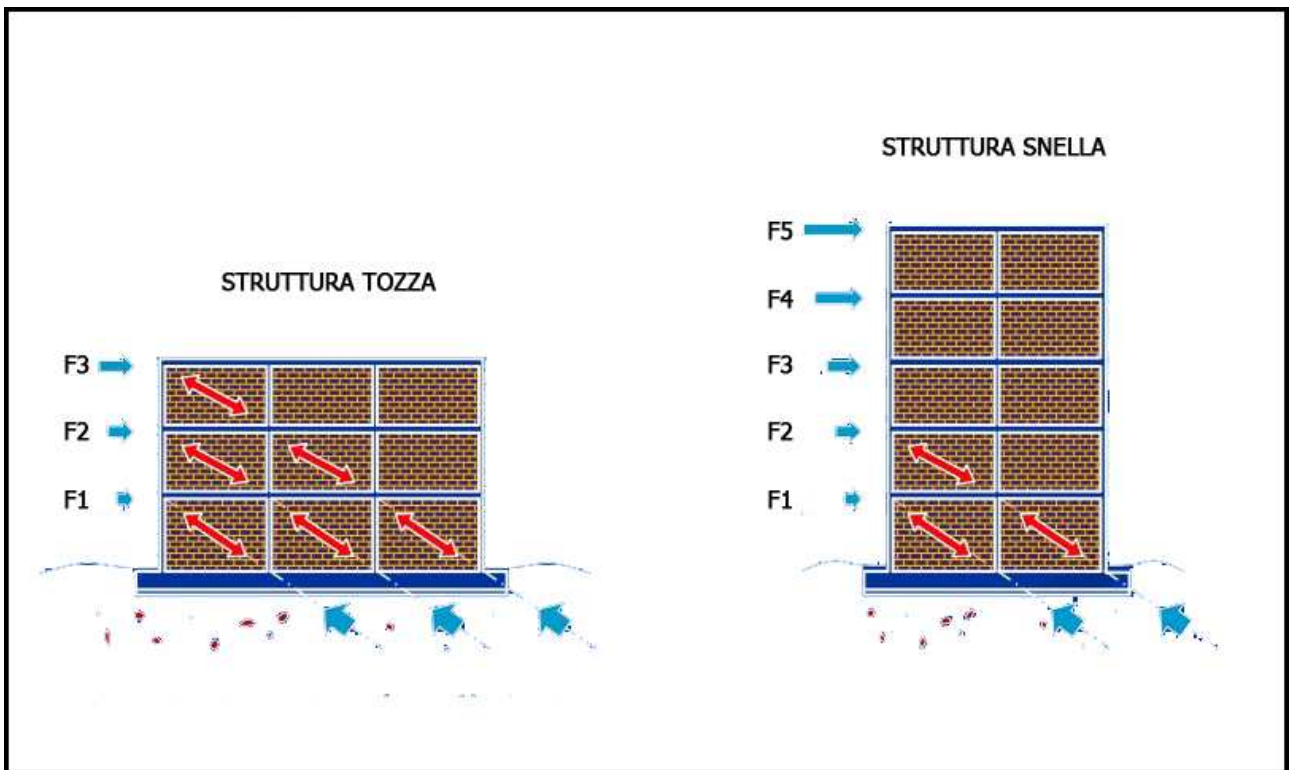


Figura 12 Influenza dei tamponamenti su una struttura snella e una tozza

La presenza delle tamponature modifica la risposta strutturale perché aumenta la rigidità dell'edificio, riduce il periodo di vibrazione e quindi può far incrementare il taglio alla base dovuto all'azione sismica.

Tuttavia la presenza di tamponature aumenta la resistenza del sistema (parte dell'azione sismica è portata dalle tamponature) e aumenta la capacità dissipativa dell'edificio³.

Tra gli effetti sismici negativi che possono essere dovuti all'interazione tra pannello murario e telaio in calcestruzzo, si possono citare i seguenti:

- Il distacco del telaio e la caduta delle tamponature a causa della scarsa rigidità fuori dal piano e della cattiva connessione;
- La formazione dei meccanismi di piano soffici, soprattutto nei piani intermedi ed inferiori, a causa della irregolare distribuzione in altezza delle tamponature;
- La plasticizzazione dei pilastri per la presenza di un notevole sforzo di trazione dovuto alle tamponature;
- La crisi delle strutture con distribuzione planimetrica regolare degli elementi portanti ma con irregolarità nella posizione delle tamponature;
- La rottura localizzata e fragile di elementi portanti a causa della presenza di aperture irregolari nelle tamponature, delle finestre a nastro e dell'ancoraggio non adeguato della tamponatura;
- La crisi funzionale di strutture strategiche che pur subendo un danno strutturale lieve hanno accusato però danni irreparabili nelle tamponature, tali da impedirne l'uso.

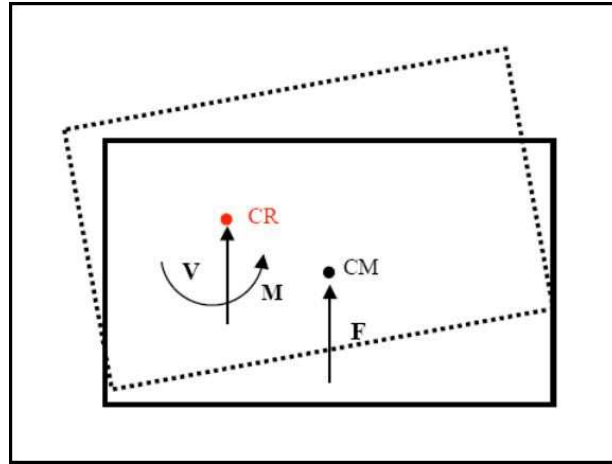
1.2.4 Centro delle Masse e Centro delle Rigidezze

Per la regolarità strutturale è utile introdurre due concetti fondamentali: il centro di massa ed il centro di rigidità. Per il singolo piano, il punto dove agisce la forza di inerzia è il centro di massa (CM). Il baricentro delle forze di taglio V è il centro di rigidità (CR). Se il centro di massa ed il centro di rigidità coincidono, il movimento teorico del piano sarà puramente traslatorio e, nell'ipotesi di solai rigidi nel piano, tutti i punti del piano subiranno un uguale spostamento. Invece, se il centro di massa ed il centro di rigidità non coincidono, forza agente (F) e forza resistente (V) non possono equilibrarsi senza che nasca anche un momento (M) e quindi venga anche indotta una rotazione relativa del piano (fig. 13). Ciò comporta sia un aumento della forza di taglio su alcuni elementi resistenti sia ulteriori spostamenti di interpiano che possono diventare eccessivi. La conoscenza, quindi, della posizione di centro di massa e

³ Dipartimento per le politiche integrate di sicurezza e per la protezione civile- Regione Marche, *Influenza delle tamponature sul rischio sismico*, 2008



di centro di rigidezza, nonché la minimizzazione della loro distanza, risulta un aspetto di fondamentale importanza per evitare effetti torsionali sfavorevoli e quindi eccessive deformazione degli elementi più lontani dal centro di rigidezza con conseguente richiesta non uniforme di duttilità (vedasi fig.12).



- **Figura 13** Centro delle masse CM e Centro delle rigidzze CR

1.3 - Fondamenti della Regolarità

Dal punto di vista planimetrico ed altimetrico gli elementi che maggiormente influiscono sul requisito di regolarità sono:

- la forma;
- la distribuzione delle rigidzze;
- la distribuzione delle masse.

1.3.1 - Regolarità' in Pianta

L'uniformità in pianta è caratterizzata da una regolare distribuzione degli elementi strutturali, che permette una trasmissione rapida e diretta delle forze d'inerzia prodotte dalle masse distribuite dell'edificio. Se necessario, l'uniformità può essere ottenuta dividendo l'intero edificio mediante appositi elementi di collegamento in unità dinamicamente indipendente.

In fig. 14 sono riportati esempi di configurazioni di piante di edifici, sia regolari, poiché compatte e simmetriche (sinistra), sia irregolari, perché non compatte, a causa del rapporto tra i lati dell'edificio troppo alto o di rientri troppo accentuati (destra).

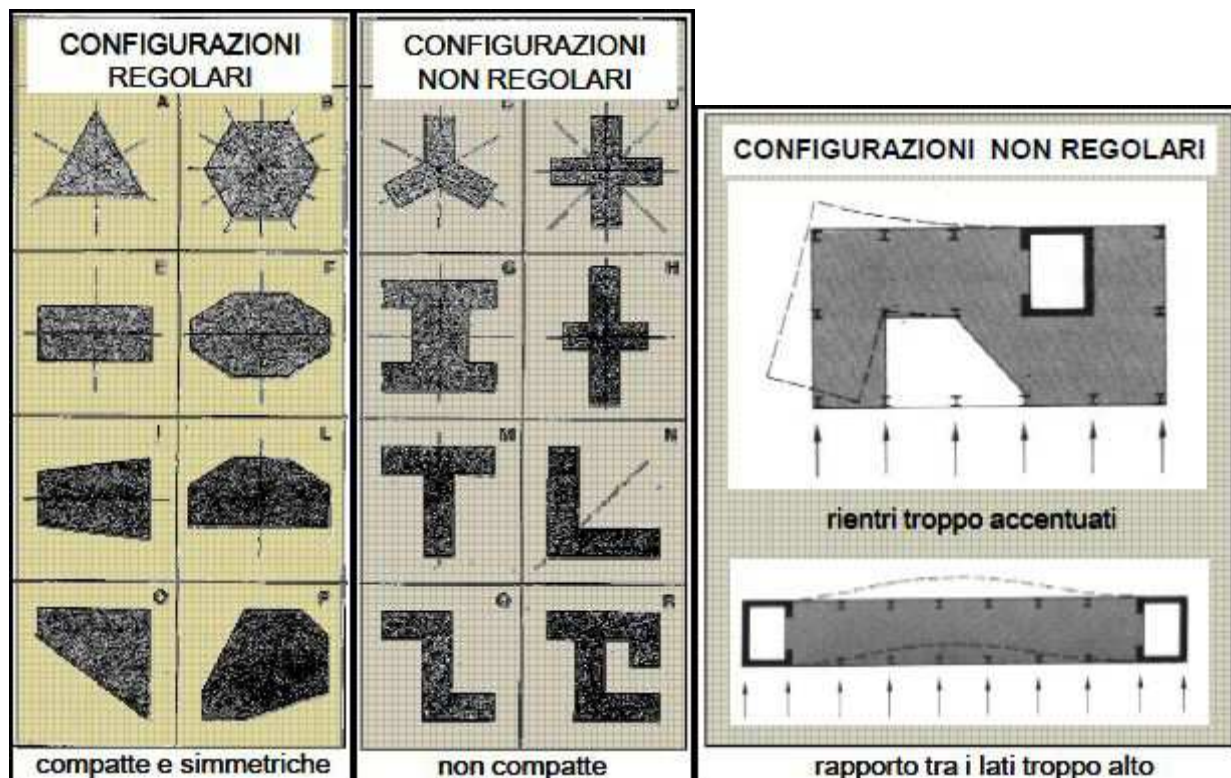


Figura 14 Configurazioni regolari e irregolari

1.3.2 I Problemi Dimensionali (forma)

Le dimensioni strutturali costituiscono in zona sismica un elemento di primaria importanza. Le forze inerziali dovute al terremoto sono infatti proporzionali alla massa della costruzione e pertanto al suo volume. Quanto più questo è grande, tanto maggiore è la sollecitazione sismica sulla struttura e pertanto maggiore è la necessità di progettare ed eseguire sistemi sismo-resistenti idonei. Pertanto pur riconoscendo il rilevante interesse di alcune opere strutturali dimensionalmente eccezionali in zone sismiche, appare motivata l'indicazione di limitare tali opere ai casi in cui sono necessarie, e, come orientamento, di realizzare organismi sufficientemente contenuti. Da un punto di vista planimetrico risulta dunque opportuno che l'area della superficie strutturale non assuma dimensioni eccessive. Di fatto la realizzazione di costruzioni, il cui sviluppo planimetrico è veramente rilevante, è spesso legato alla stessa finalità dell'opera e di conseguenza, talvolta, irrinunciabile. È tipico, in tal senso,

l'esempio dei grandi magazzini, dei centri industriali, dei centri d'acquisto, degli autoparcheggi, ecc. In questi casi è sovente necessario far ricorso ad opportuni accorgimenti tecnici fra i quali si segnalano in particolare:

1. la suddivisione del corpo strutturale mediante giunti di separazione;
2. la realizzazione di strutture fondazionali adeguatamente irrigidite;
3. l'irrigidimento dei diaframmi di piano;
4. l'incremento degli elementi resistenti verticali.

1.3.3 I Problemi Distributivi (forma)

La definizione della forma planimetrica della costruzione si rivela, il più delle volte, fondamentale nel comportamento sotto sisma della struttura. Questo argomento può essere affrontato in relazione a due soli concetti basilari: la simmetria e la semplicità della pianta. Per quanto concerne il primo concetto le costruzioni vengono normalmente classificate in relazione al numero di assi di simmetria che la pianta possiede.

Si distinguono in particolare:

1. le strutture con più di due assi di simmetria;
2. le strutture con due assi di simmetria;
3. le strutture con un asse di simmetria;
4. le strutture prive di assi di simmetria.

Per quanto attiene invece al concetto della semplicità, questo può essere reso esplicito definendo semplici le forme planimetriche convesse, complesse le forme planimetriche concave, come in fig. 15 sottostante .

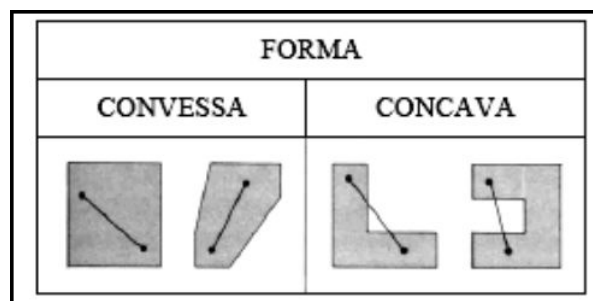


Figura 15 Forme convesse(simplici) e concave (complesse)

In questo modo la semplicità strutturale tende a identificarsi con l'assenza di angoli rientranti. In base a questa osservazione si dirà che una costruzione è tanto più semplice quanto minore è il massimo rapporto fra i lati della pianta che si affacciano sugli angoli rientranti e la dimensione trasversale della struttura. La realizzazione di configurazioni complesse induce livelli di rischio estremamente elevati. Nella fig. 16 sono riportate una sequenza di possibili forme planimetriche, contrassegnate da un "indice di rischio", crescente con il livello di pericolosità associato all'uso di tale forma. Quando non è possibile evitare una forma planimetrica complessa, risulta comunque consigliabile adottare uno fra i seguenti accorgimenti:

- 1) suddivisione del complesso strutturale mediante giunti di separazione;
- 2) irrigidimento della zona d'angolo;
- 3) distribuzione di elementi irrigidenti tale da uniformizzare lo stato deformativo della costruzione;
- 4) modifica della forma planimetrica, sostituendo gli angoli retti con angoli ottusi.



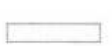










No.	Floor Plan	Remarks	fr_2	No.	Floor Plan	Remarks	fr_2
2.1		Symmetrical lay out. If no other aggravating factors are found the risk belongs to the best category.	1.0	2.8		H-type plan with higher damage probability in the corner regions.	2
2.2		Although this building is by itself regular, the non-uniform arrival of earthquake energy can lead to problems in long buildings.	1.2	2.9		Complex floor plan. The more wings are interconnected to a -back-bone- building the more likely becomes damage in general and at places of intersection.	2.2
2.3		Buildings with angles different from rectangular ones are sometimes found at street corners. Such plans invite torsional shaking.	1.3	2.10		Floor plan for halls, auditoriums, theatres, etc. which increases the risk of torsional shaking.	1.3
2.4		Buildings with a yard in the center or a patio may increase damage probability if differential shaking between the limbs may cause dangerous distortions in the corner sections.	1.3-2	2.11		Cylindrical buildings have become fashionable with some architects. If one of the towers is not stiffer or softer (special elevators or their arrangement), symmetry is good.	1.1
2.5		L-type floor plan with an enhanced risk of damage in the corner region.	1.3	2.12		Example of an asymmetric connection of circular floor plans leading to torsional problems.	1.3
2.6		T-type plan with increased damage probability at both sides of the intersection.	1.5	2.13		Curved buildings are asymmetric and in addition often long, both features increase exposure.	1.2
2.7		U-type plan which leads to an enhanced exposure in both corners.	1.8				

Figura 16 Forme complesse e livello di rischio

1.3.4 La Distribuzione delle Rigidezze

Si può affermare, in termini del tutto generali, che la collocazione planimetrica ottimale delle colonne comporta la realizzazione di una maglia quanto più fitta, simmetrica ed uniforme possibile. L'infittimento degli elementi verticali dà luogo, innanzitutto, ad un sostanziale incremento del grado di iperstaticità della struttura e ad un aumento conseguente del numero delle zone dissipative potenzialmente disponibili. Una ripartizione planimetrica delle colonne conforme ai principi della simmetria ha, inoltre, l'effetto di mantenere ravvicinati il centro di massa (CM) ed il centro di rigidezza (CR), in tal modo minimizzando le azioni sismiche di tipo torsionale.

In termini del tutto generali si può affermare che una distribuzione perimetrale simmetrica degli elementi irrigidentanti, siano questi strutturali o non strutturali, dà luogo a un'elevata rigidezza torsionale (fig. 17 a, b). Le distribuzioni asimmetriche di detti elementi comportano per contro un disassamento di grande entità fra il centro di massa ed il centro di rigidezza, in tal modo provocando l'insorgere di rilevanti coppie torsionali (fig. 17 c, d).

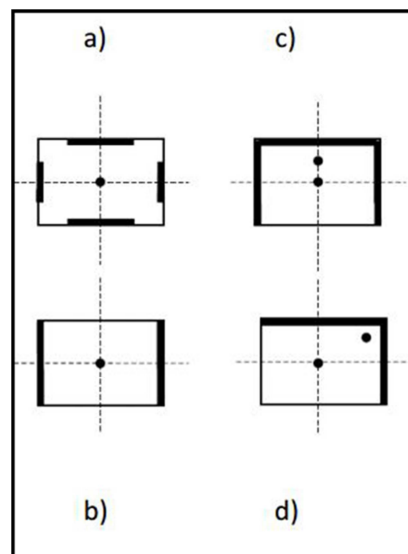


Figura 17 Distribuzione degli elementi irrigidentanti simmetrici e non

1.3.5 La Distribuzione delle Masse

Alcune configurazioni, pur essendo regolari in relazione alla forma ed alla rigidità, risultano, per contro, irregolari a causa della distribuzione planimetrica delle masse strutturali. Gli esempi più tipici di questa situazione sono rappresentati dalla presenza localizzata di apparecchiature pesanti, di grandi masse d'acqua contenute in serbatoi oppure in piscine, o ancora dall'impiego di parti di piano in qualità di archivi o di biblioteche. In termini del tutto generali si può affermare che la distribuzione planimetrica delle masse è tanto migliore quanto più essa è uniforme e simmetrica. Una distribuzione uniforme determina, in primo luogo, una migliore ripartizione delle forze inerziali di piano. Per quanto concerne invece il requisito della simmetria, esso ha l'effetto di mantenere ravvicinati il centro di rigidità ed il centro di massa.

1.3.6 - Regolarità in Elevazione

L'uniformità dell'edificio nello sviluppo verticale della struttura è altrettanto importante poiché in tal modo si tende ad eliminare la formazione di zone sensibili ove vi sia una grande concentrazione di sforzi o notevoli richieste di duttilità che potrebbero essere causa di un prematuro collasso. Ciò è possibile anche grazie a percorsi chiari e diretti per la trasmissione delle forze sismiche.

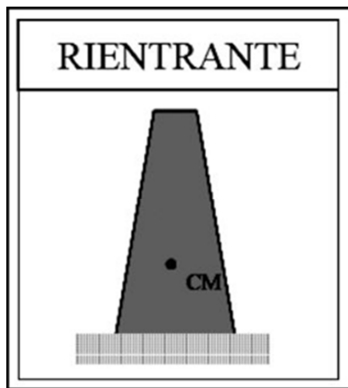
1.3.7 I Problemi Dimensionali (forma)

In termini del tutto generali si può infatti sostenere l'opportunità di evitare la realizzazione di costruzioni con altezza eccessiva oppure con forma troppo snella. Quanto più la costruzione è alta, tanto più questa nella norma diventa flessibile. Ciò comporta una riduzione dell'accelerazione eccitatrice cui fa seguito una conseguente diminuzione delle singole forze di piano. L'aumento dell'altezza dà luogo, per contro, ad un aumento del numero dei piani e, di riflesso, ad un aumento delle masse strutturali, cosicché la risultante delle forze inerziali tende globalmente ad aumentare. Uno sviluppo altimetrico della costruzione comporta un innalzamento del baricentro strutturale cui corrisponde un aumento conseguente del momento ribaltante.

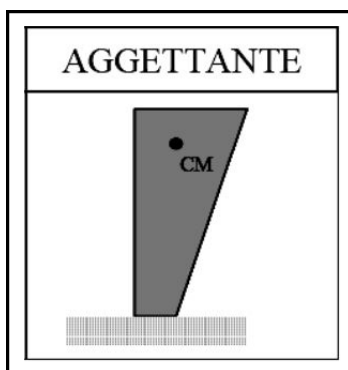


1.3.8 I Problemi Distributivi (forma)

La forma altimetrica delle strutture può essere analizzata facendo riferimento a:



1) Le costruzioni a forma rientrante, nelle quali la superficie della sezione orizzontale tende a ridursi con l'aumento della quota; tali configurazioni risultano ottimali nei riguardi delle azioni sismiche, in quanto producono un abbassamento del baricentro delle masse e, quindi, una sensibile riduzione del momento ribaltante. Inoltre, quanto più estesa è la pianta strutturale in rapporto all'altezza, tanto minore è lo stato tensionale indotto dal sisma sugli elementi di perimetro.



2) le costruzioni a forma aggettante, nelle quali la superficie della sezione orizzontale tende ad aumentare con l'incremento dell'altezza. Esse possiedono caratteristiche esattamente opposte a quelle delle strutture a forma rientrante, e debbono pertanto ritenersi pessime nei riguardi delle azioni sismiche. Per quanto attiene al concetto altimetrico della simmetria, analogamente al caso planimetrico, le costruzioni vengono normalmente classificate in base al numero dei piani verticali di simmetria che esse

possiedono.

Per il concetto altimetrico della semplicità, questo può essere reso esplicito definendo semplici le elevazioni convesse, complesse le elevazioni concave; in questi termini la semplicità tende ad identificarsi con l'assenza di angoli rientranti oppure aggettanti. La presenza di zone verticali rientranti dà luogo alle stesse problematiche già analizzate per le forme orizzontali rientranti. In questa situazione sono frequenti accentuate diversità di rigidità fra parti della stessa struttura che favoriscono l'insorgere di concentrazioni localizzate di azioni. In caso di angoli rientranti, l'esecuzione di adeguati giunti di separazione può eliminare totalmente ogni causa di irregolarità, riducendo il complesso strutturale iniziale ad un insieme di corpi di fabbrica indipendenti ad uno ad uno regolari. In situazioni del genere appare peraltro necessaria l'estensione dei giunti in fondazione. La fig.18 illustra un'ampia gamma di forme strutturali; caratterizzate da un indice di rischio crescente con il livello di rischio associato alla forma altimetrica.









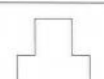

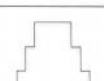

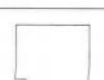
No.	Elevation	Remarks	fr_1	No.	Elevation	Remarks	fr_1
1.1		Both views are absolutely regular and symmetrical. If this holds for the entire building's structure and important non-structural parts, and foundations the risk is best.	1.0	1.8		Soft first floor on one side, more stiff on other one where walls fill space between columns. Depending on amount of irregularity this design can be dangerous.	1.5-5
1.2		Building in the shape of a pyramid for one or both elevations. If symmetry is observed in all other aspects, risk is similar to 1.1, ore even slightly better.	1.0 0.8	1.9		Mostly free-standing columns on ground floor resulting in soft storey there and stiff, top-heavy structure on top. Dangerous design. Very dangerous in case of resonance.	3-10
1.3		Inverted pyramid, sometimes with vertical walls for the ground floor. This structure is top-heavy and therefore not the best risk.	1.3	1.10		Free standing columns on one side, protruding upper storeys on other one. Considerable asymmetry results in substantial exposure. Dangerous to very dangerous design.	3-10
1.4		L-shaped elevation which results in an elevation of exposure in the transition zone, particularly where the lower section is attached.	1.3	1.11		Building on sloping ground. Considerable asymmetry results high risk of collapse.	5-10
1.5		Building of the shape of an inverted T. Enhanced exposure at the regions where the lower parts meet the tower.	1.5	1.12		Design found in halls, theatres, and the like. Substantial asymmetry can make serious failures of members quite probable.	3-10
1.6		Building with several setbacks leading to transitions of masses, stiffness, and damping at various floors and higher exposure there.	1.8	1.13		Sport stadiums are sometimes of this shape. If an earthquake occurs when they are packed to capacity, the risk is substantial.	5-10
1.7		Upper floor protruding. Frequent in rainy tropical regions for commercial buildings to cover part of the footwalk. Depending on relative importance of upper section risk may be increased quite substantially.	1.5-3				

Figura 18 Forme complesse e livello di rischio

1.3.9 La Distribuzione delle Rigidezze

Lo stato vibratorio causato dal terremoto genera un sistema di azioni interne che vengono convogliate, attraverso le membrature sismo - resistenti, verso le fondazioni. Ogni volta che il flusso tensionale incontra sul suo percorso un improvviso cambio di resistenza oppure di rigidezza ed, in particolar modo, un brusco indebolimento, in questa zona si genera uno stato localizzato di tensione ed un conseguente innesco potenziale di collasso. Questa situazione diventa più pericolosa quanto più ci si avvicina alla base della struttura, dal momento che l'intensità delle forze interne tende ad aumentare in prossimità del terreno. Lo studio di tale problematica può essere impostato analizzando, da un lato, le forme di indebolimento che coinvolgono un intero piano della costruzione e, dall'altro, le forme di indebolimento a carattere localizzato.⁴

⁴ Giacomo Boffi, *L'azione sismica*, 2012

1.4 - Criteri di Regolarità Secondo le Norme Tecniche

Le norme tecniche vigenti evidenziano chiaramente l'importanza della regolarità in zona sismica poiché da un'analisi delle stesse si evince come le costruzioni debbano presentare, quanto più possibile, una struttura iperstatica caratterizzata da regolarità in pianta e in altezza. A questo proposito vengono date indicazioni specifiche da rispettare.

Una costruzione è ritenuta regolare in pianta se sono rispettate le seguenti condizioni:

- La configurazione in pianta è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidezze; vedasi fig. 19.

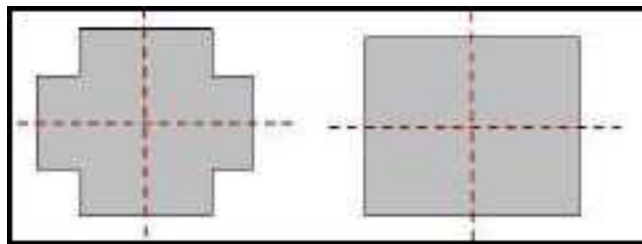


Figura 19 Regolarità in pianta

- La configurazione in pianta è compatta. Nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25% della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione; vedasi fig.20.

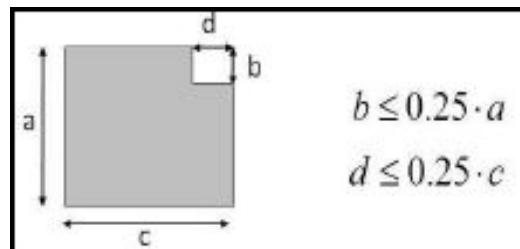


Figura 20 Rientri e sporgenze

- Il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4; vedasi fig.21.
- Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti;

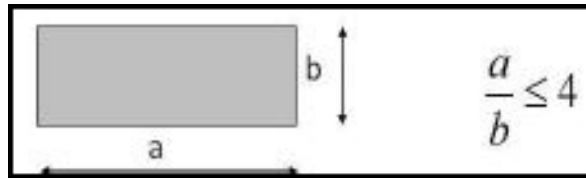


Figura 21 Rapporto lati rettangolo inscritta costruzione regolare

Una costruzione è ritenuta regolare in elevazione se sono rispettate le seguenti condizioni:

- tutti i sistemi resistenti verticali si estendono per tutta l'altezza della costruzione; vedasi fig.22, destra. (Irregolarità in elevazione: elementi sismo resistenti discontinui e piano debole – vedasi fig. 22, sinistra);

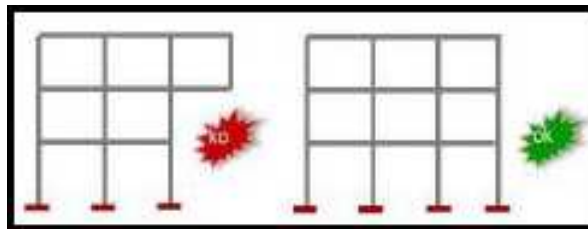


Figura 22 Regolarità e irregolarità in elevazione

- massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente: le variazioni di massa non superano il 25%, le variazioni di rigidezza sono comprese tra il 10% e il 30%; vedasi fig.23.

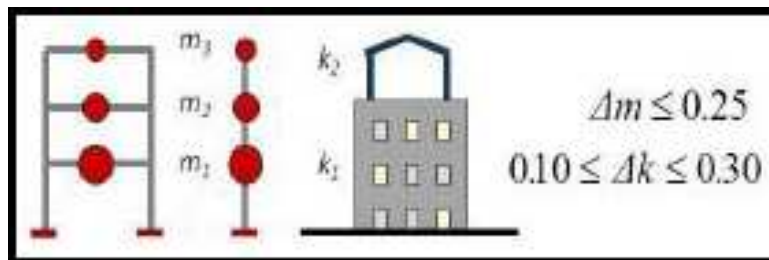


Figura 23 Variazione di massa e rigidezza

- eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione sono graduali e rispettano i seguenti limiti: il rientro non supera il 30% della dimensione del primo orizzontamento e il 20% della dimensione dell'orizzontamento sottostante; vedasi fig.24.

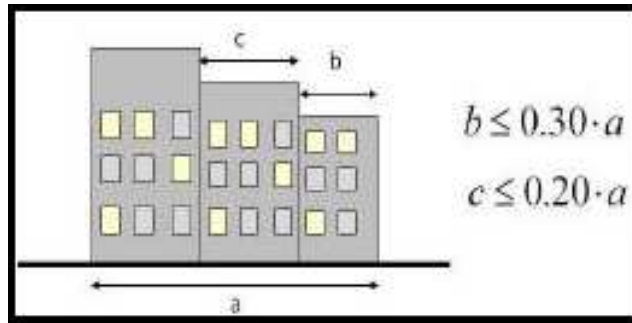


Figura 24 Restringimenti sezione

- La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento e comunque non può essere inferiore a 1/100 della quota dei punti considerati misurata dal piano di fondazione; vedasi fig.23, destra; (irregolarità in elevazione: non rispetto delle distanze fra costruzioni contigue – vedasi fig. 25, sinistra).

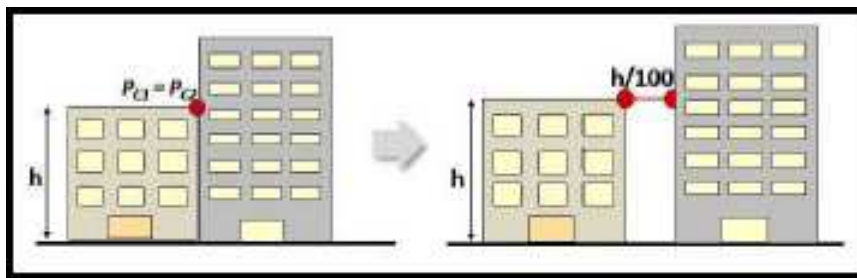


Figura 25 Distanza da tenere tra gli edifici

- Particolare attenzione va posta al dimensionamento dei distacchi se le costruzioni hanno apparecchi di isolamento sismico.
- Nelle strutture intelaiate progettate in CD “B” (bassa duttilità) il rapporto tra resistenza effettiva⁵ e resistenza richiesta dal calcolo non è significativamente diverso per orizzontamenti diversi (il rapporto fra la resistenza effettiva e quella richiesta, calcolata ad un generico orizzontamento, non deve differire più del 20% dall’analogo rapporto determinato per un altro orizzontamento); può fare eccezione l’ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;

Quindi, in caso di "*non regolarità strutturale in elevazione*", la norma dice di maggiorare la resistenza dell’edificio in modo che vi siano minori probabilità, durante

⁵ La resistenza effettiva è la somma dei tagli nelle colonne e nelle pareti compatibili con la resistenza a presso flessione e a taglio dei medesimi elementi.

l'azione sismica, che la struttura debba far ricorso a risorse di duttilità che sono limitate dalla stessa non regolarità in elevazione (sviluppo di meccanismi di piano del tipo "travi forti e colonne deboli"⁶ e/o del tipo "piano debole") in quei piani in cui il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza richiesta è cospicuamente più basso (il famoso 20%) che in altri piani.

1.5 - Effetti della Mancanza di Regolarità

La mancanza di regolarità in un edificio in zona sismica può portare a differenti problematiche legate al suo sviluppo in pianta e in elevazione:

1.5.1 Irregolarità in Pianta

Sostanzialmente, si considera irregolarità in pianta la non coincidenza tra baricentro delle masse e baricentro delle rigidezze. Questa è dovuta principalmente alla mancanza di simmetria della pianta architettonica, anche se un corretto dimensionamento delle sezioni degli elementi strutturali dovrebbe mirare a rendere lo schema "bilanciato", cioè a far coincidere i due punti anche in assenza di simmetria. Occorre inoltre tenere presente che, anche in caso di piante sostanzialmente simmetriche, i pannelli murari possono non rispettare tale simmetria; ciò si verifica, ad esempio, nel caso di edifici costruiti in adiacenza, nei quali le tamponature lungo le pareti cieche hanno una rigidezza diversa da quelle di facciata, abbondantemente sfinestate. A maggior ragione nel caso di edifici asimmetrici la disposizione dei pannelli murari può annullare gli sforzi del progettista di rendere lo schema bilanciato; ciò si verifica in particolare quando il contorno della pianta è molto frastagliato. A causa dell'eccentricità tra centro delle masse e centro delle rigidezze, il comportamento dinamico della struttura presenta un notevole contributo rotazionale che non viene colto correttamente dall'analisi statica, anche quando questa viene effettuata utilizzando uno schema strutturale tridimensionale. La rotazione indotta dinamicamente può essere infatti ben diversa da quella provocata da forze statiche, specialmente nel caso di strutture deformabili torsionalmente.

⁶ Meccanismi per travi forti – pilastri deboli: si manifestano in edifici caratterizzati da travi di elevata resistenza su pilastri di resistenza sensibilmente inferiore, da intendersi nel loro rapporto relativo rispetto alla richiesta derivante dall'applicazione dell'azione sismica.



1.5.2 Non Simmetrica

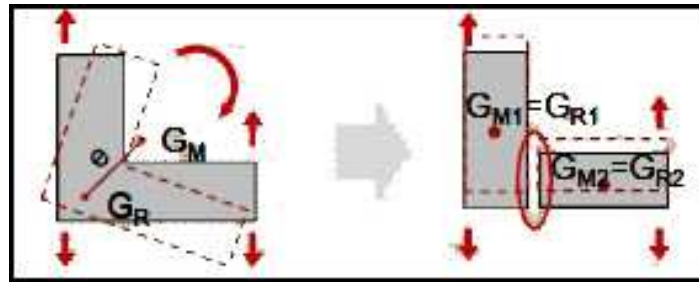


Figura 26 Eccentricità tra GR e GM

- Eccentricità (e) tra centro delle masse (GM)- Il centro di massa è il punto di applicazione di tutte le forze, è il baricentro di un corpo.; e centro delle rigidezze (GR)- Il centro di rigidezza invece è il punto in cui la reazione dell'edificio si concentra. Vedasi fig. 26. Per eludere questo problema si deve evitare la realizzazione di piante irregolari e asimmetriche (vedasi fig.27) cercando un'uniformità nella distribuzione delle parti portanti dell'edificio.

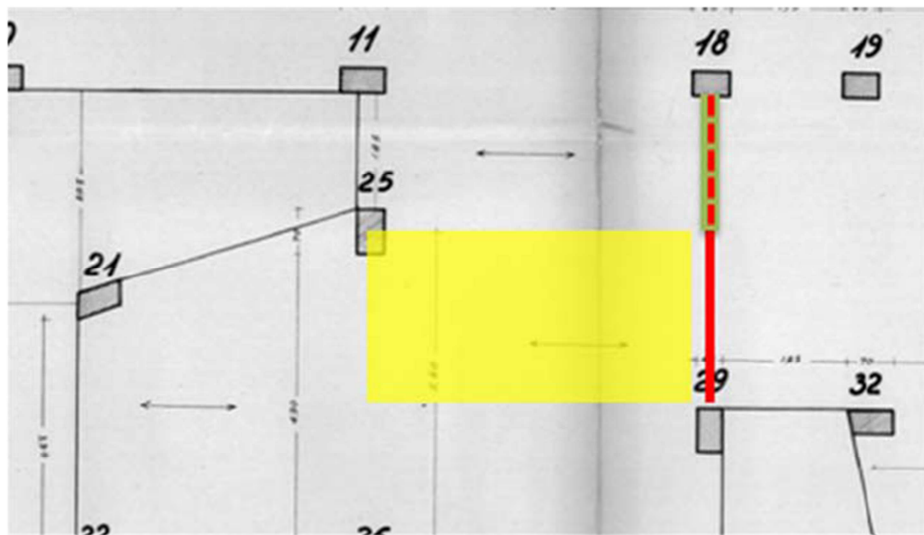


Figura 27 pianta parte anteriore edificio "Casa dello Studente" dell'Aquila

1.5.3 Variazione della Resistenza e della Rigidezza Perimetrali

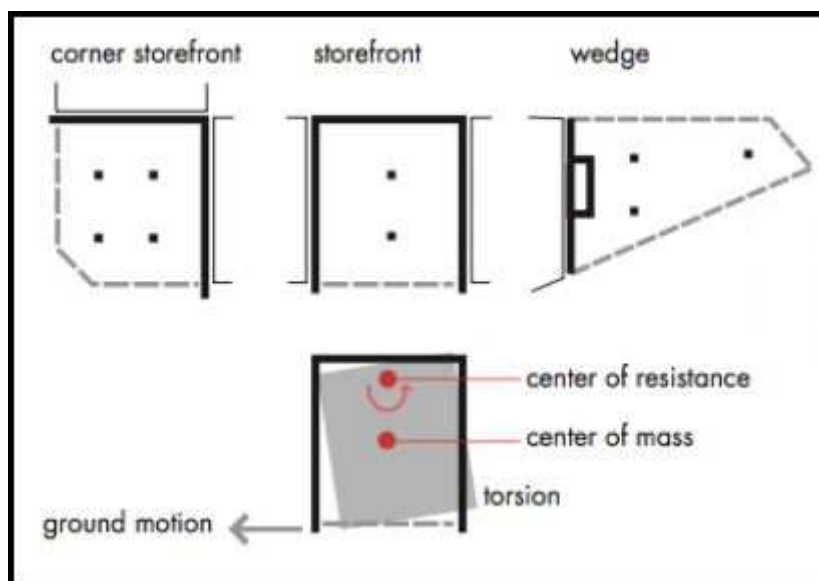


Figura 28 Esempi di non corrispondenza tra centro della resistenza e centro della rigidezza

- Se lungo il perimetro di un edificio è riscontrabile una netta variazione della resistenza e della rigidezza, il centro delle masse non coinciderà con il centro delle rigidezze e le forze di torsione porteranno la struttura a ruotare intorno al centro delle resistenze (vedasi fig. 28). Un esempio comune di perimetro non bilanciato è l'inserimento di una facciata libera nella geometria di un edificio come nei grandi magazzini, che sono edifici ampi e che presentano uno squilibrio nella resistenza su molti piani a causa della presenza di ampie vetrate.

La soluzione a questo problema è di ridurre la possibilità di torsione cercando di equilibrare le resistenze lungo il perimetro.

- 1) La prima strategia è quella di progettare una struttura a telaio avente approssimativamente la stessa resistenza e rigidezza lungo l'intero perimetro.
- 2) La seconda strategia può essere quella di aumentare la rigidezza dei fronti aperti aggiungendo un certo numero di pareti di taglio, in corrispondenza o

vicine alla facciata aperta, progettate in modo da approssimare la loro resistenza a quella fornita dalle altre pareti.

- 3) La terza strategia può essere quella di utilizzare robusti telai resistenti a momento o telai controventati in corrispondenza della facciata aperta, che approssimino la rigidezza delle pareti piene

Non compatta e angoli rientranti

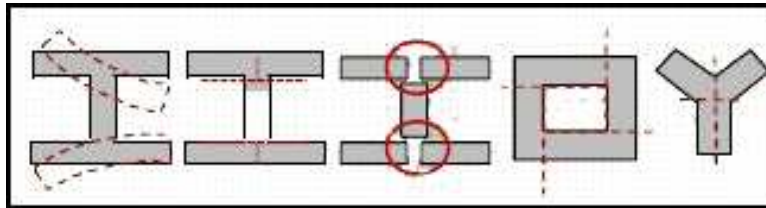


Figura 29 Problemi nei nodi

- Impalcato debole a causa dei problemi di torsione e flessione nei diversi volumi in un edificio dove vi sono problemi nei nodi di intersezione. Vedasi fig.29.
- Gli angoli rientranti caratterizzano solitamente gli edifici con planimetrie che assumono forme a L, T, H, etc., o combinazioni di queste forme. Queste configurazioni sono alla base di due problematiche. La prima è legata allo spostamento differenziale tra le differenti ali dell'edificio e alla concentrazione degli sforzi localizzati in corrispondenza dell'angolo rientrante a causa della presenza di elementi rigidi solitamente posti nei nodi. Il secondo problema è la torsione dovuta dalla non coincidenza tra centro delle masse e centro delle rigidezze.

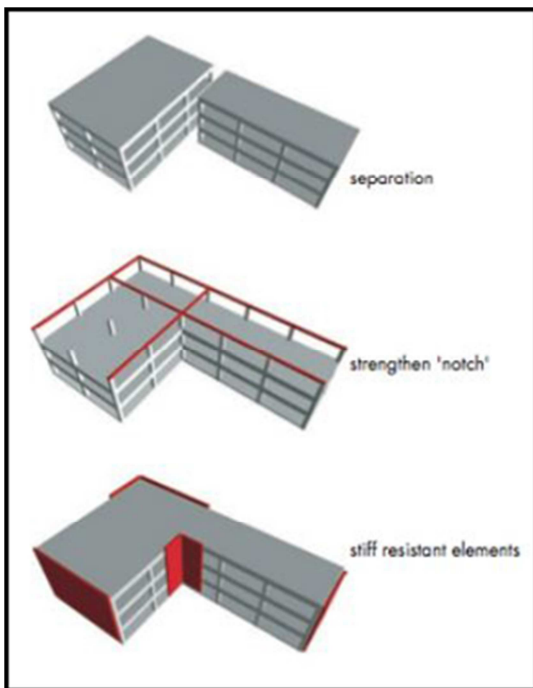


Figura 30 Esempi di rinforzo della struttura in corrispondenza dei nodi

Le soluzioni che si possono adottare per risolvere il problema sono:

- Giunto di disaccoppiamento sismico che separa le strutture permettendo una risposta indipendente alle forze verticali e orizzontali da parte delle diverse parti dell'edificio.
- Legare insieme l'edificio in maniera più resistente affinché venga garantita una distribuzione equilibrata delle rigidezze (vedasi fig. 30).

1.5.5 Struttura Troppo Lunga

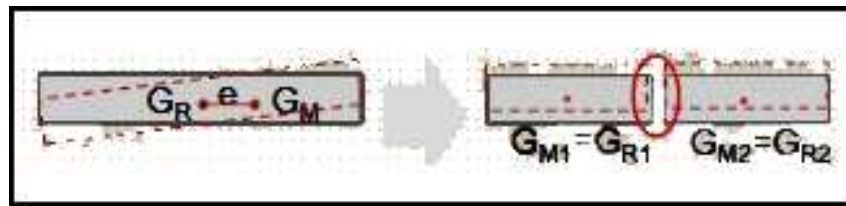


Figura 31 Edificio troppo lungo

- Si ha quindi un problema di Eccentricità (e) ed impalcato debole. Vedasi fig. 31, sinistra. Per risolvere questa problematica si può utilizzare il giunto di disaccoppiamento sismico, che in una struttura lunga separa in più parti la stessa uniformando i centri di massa e rigidezza e facendo sì che queste evitino torsioni. Vedasi fig. 31, destra.

1.5.6 Effetti dei Tamponamenti in Pianta

La presenza delle tamponature può modificare negativamente la risposta strutturale perché la distribuzione della rigidezza laterale dell'edificio in pianta risulta diversa da quella della struttura nuda (ovvero senza tamponature) quindi una distribuzione irregolare delle tamponature causa differenze nella rigidità in pianta. Vedasi fig. 32, tamponature indicate in rosso.

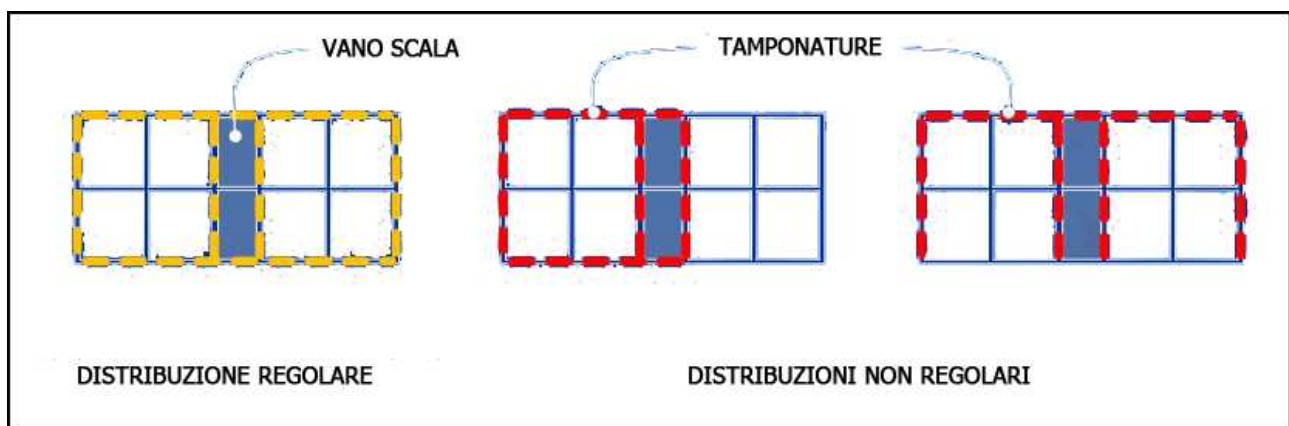


Figura 32 Influenza dei tamponamenti sulla regolarità di un edificio

1.5.7 Irregolarità in Elevazione

Si considerano irregolarità in elevazione tutte le brusche variazioni di rigidezza o di massa. Esse possono essere dovute a: 1) *cambiamento della pianta architettonica* da un piano all'altro; 2) *brusche variazioni degli elementi strutturali* (pilastri o pareti che cambiano sensibilmente dimensioni, o si interrompono, da un piano all'altro); 3) *diversa consistenza degli elementi non strutturali* (ad esempio un piano terra a pilotis o con negozi con grandi vetrine ed assenza quasi totale di tamponature perimetrali); 4) *variazione di massa* (ad esempio per la diversa destinazione d'uso o per la presenza di elementi particolari, quali piscine o giardini pensili).

1.5.8 Colonne Tozze

Questo problema si evidenzia quando si ha un edificio in pendenza oppure si è nel caso in cui i tamponamenti non si estendono per l'intera altezza dei pilastri adiacenti quindi risultano esserci forti sollecitazioni di taglio sulla parte di pilastro scoperto. Tutto ciò va sommato al fatto che la rigidità di tali parti di colonne è circa otto volte maggiore rispetto alle altre. Queste condizioni portano al collasso di tali colonne durante un sisma (vedasi fig.33)⁷.

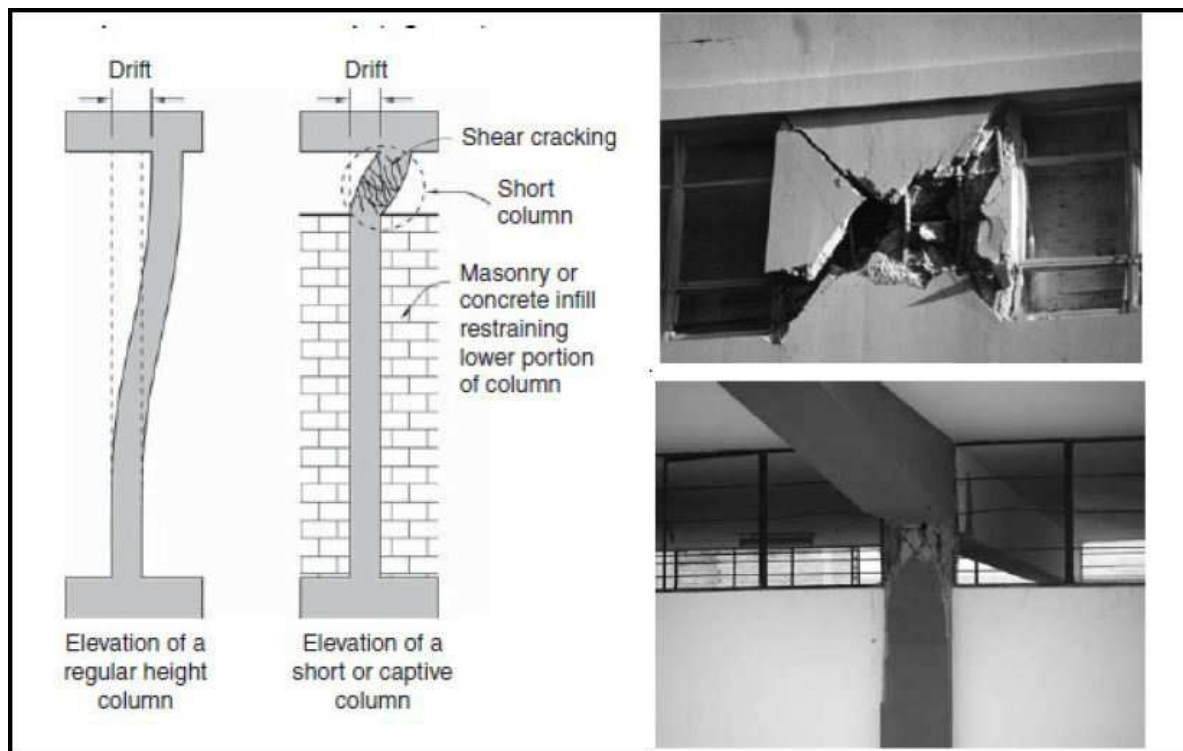


Figura 33 Effetti di un sisma su una colonna tozza

⁷ Francesco Zanghi, *Costruzioni in zona sismica*, 2012

Quindi si deve evitare di interrompere i tamponamenti prima della fine di un pilastro o ridurre la rigidezza della colonna tozza mediante l'incremento fittizio della lunghezza (vedasi fig.34).

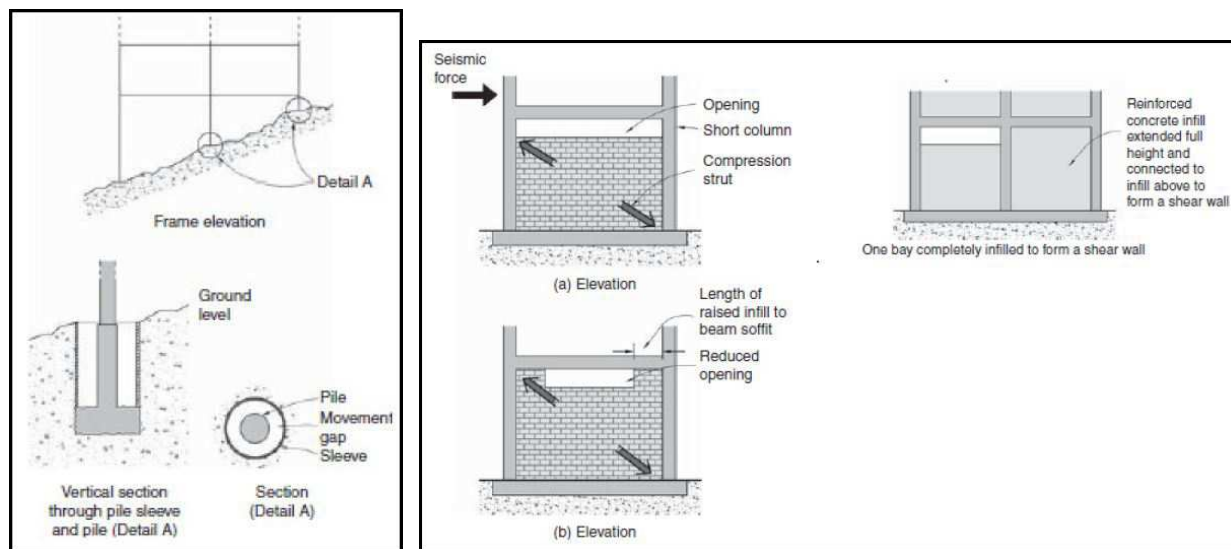


Figura 34 Eventuali soluzioni al problema. In caso di edificio in pendenza si può incrementare la lunghezza del pilastro riducendo la rigidezza mentre nel caso di tamponamenti che non coprono tutta l'altezza si possono ridurre le aperture o rendere portanti i muri adiacenti.

1.5.9 Arretramenti Verticali

- Le configurazioni arretrate consistono in una o più previste riduzioni dell'estensione del piano lungo l'altezza dell'edificio. Gli arretramenti variano in base alla proporzione tra la base e la copertura di un edificio in elevazione e in pianta e la tipologia costruttiva usata per ogni porzione dello stesso.

Una tipologia di arretramento che influisce maggiormente sulle prestazioni sismiche è la configurazione ad "arretramento invertito". Questa configurazione vede crescere l'edificio in larghezza con l'aumentare dell'altezza (vedasi fig. 35).

Il problema delle forme arretrate sta soprattutto nel più generale problema della discontinuità: l'improvvisa variazione nella resistenza e nella rigidezza. Nel caso di questa configurazione così complessa, è molto più probabile che si verifichi nel punto di arretramento, detto anche "incavo". La gravità degli effetti dell'arretramento dipende dalle proporzioni relative e dalla dimensione assoluta delle parti indipendenti dell'edificio. In aggiunta, la simmetria o asimmetria in pianta della torre e della base

influenza la natura delle forze. Se la torre o la base, o entrambe, sono asimmetriche, allora la struttura sarà sottoposta a forze di torsione.

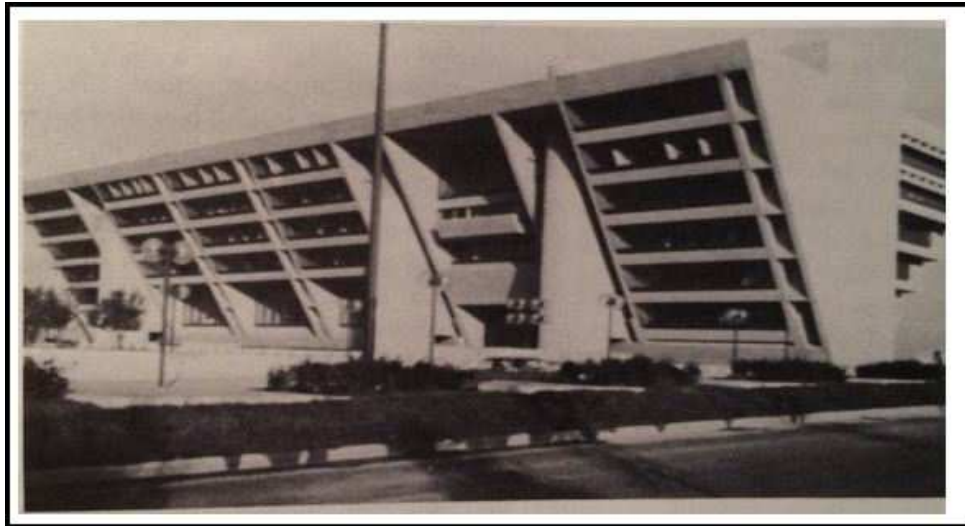


Figura 35 Dallas City Hall come esempio di arretramento invertito

Le soluzioni disponibili per tale configurazione irregolare sono le stesse riscontrate per le planimetrie ad angoli rientranti. La prima tipologia di soluzioni consiste nella separazione in pianta della struttura resistente al sisma, in modo tale che le diverse parti dell'edificio siano libere di reagire in modo indipendente (vedasi fig. 36). Se l'edificio non può essere separato bisogna porre particolare attenzione nell'evitare discontinuità degli elementi strutturali verticali, in modo tale che gli arretramenti possano essere collocati coincidenti con la dimensione di una sola campata. Alcuni grandi edifici, con arretramenti abbastanza gravosi, devono essere soggetti ad analisi specifiche oppure al limite sottoposti a studi approfonditi sul loro comportamento dinamico. In conclusione, devono essere evitati, in zone sismiche, gli arretramenti invertiti di ogni forma e dimensione.

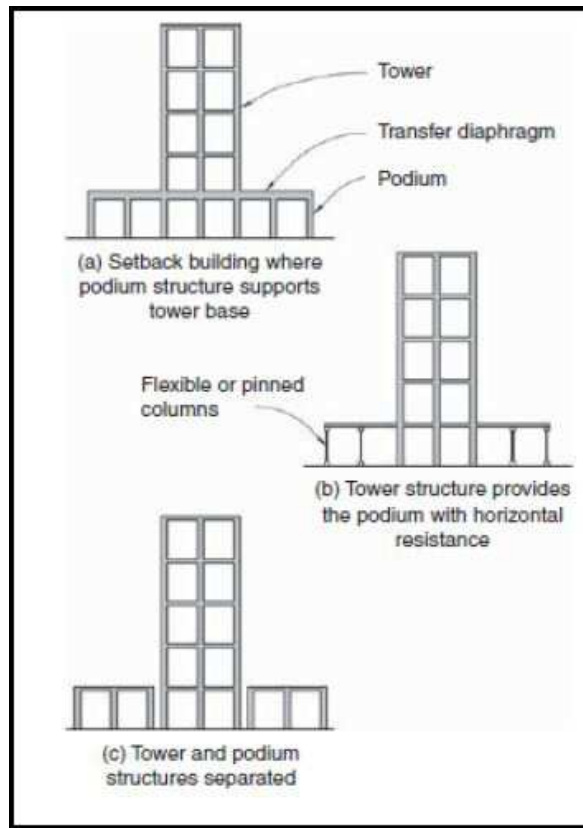


Figura 36 Tre soluzioni al problema della configurazione arretrata:
 1) La struttura della base supporta la torre;
 2) La struttura della torre sostiene la base attraverso resistenze orizzontali;
 3) Le strutture della base e della torre sono separate.

1.5.10 Effetto Martellamento



Figura 37 Martellamento

- Il diverso periodo di vibrazione di due edifici adiacenti porta, durante un sisma, ad ingenti danni poiché, non avendo un periodo di flessione uguale andranno a scontrarsi

ripetutamente; vedasi fig. 37, parte sinistra. Fotografie degli effetti del martellamento a fig.38.

La maggior parte dei danni riconducibili all'interazione tra edifici adiacenti è infatti dovuta a fenomeni di martellamento tra corpi di fabbrica con coperture a differente altezza e tra edifici strutturalmente non connessi in corrispondenza di singolarità geometriche. Casistica che si presenta anche nel momento in cui si procede alla ristrutturazione di un edificio di un fronte unico esistente prevedendone la totale demolizione e, nel far ciò, non si presti attenzione ai materiali ed a come è realizzata la struttura degli edifici adiacenti. Il fenomeno di martellamento può quindi determinare due tipiche conseguenze:

- 1) L'urto ripetuto dà luogo al danneggiamento localizzato delle parti a contatto;
- 2) L'urto ripetuto dà luogo ad una coppia ribaltante di alta pericolosità nei riguardi degli elementi perimetrali.

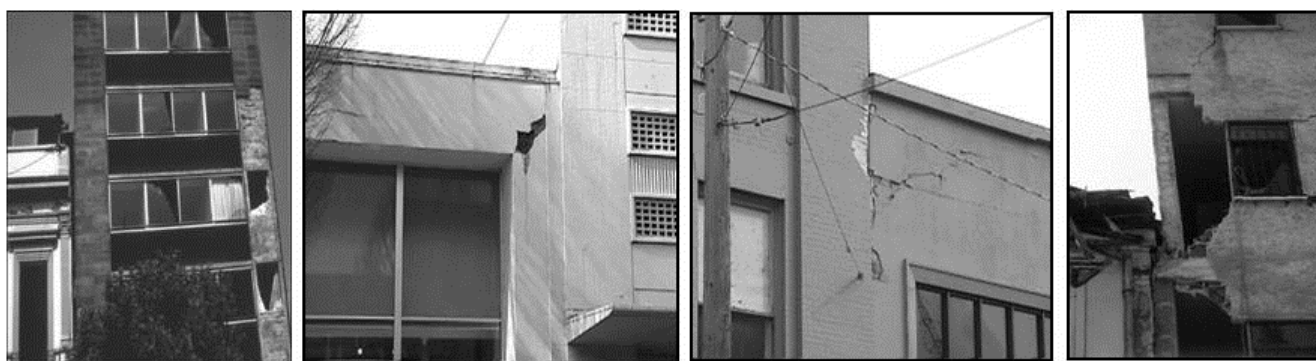


Figura 38 Effetti del martellamento

Il martellamento tra edifici adiacenti è causa di rilevante danneggiamento agli elementi strutturali e non strutturali ogni qualvolta manufatti con differenti caratteristiche dinamiche sono separati da giunti di insufficiente ampiezza (vedasi figure 39b e c). La maggior parte degli studi sull'argomento si basa su approcci teorici per schemi a un grado di libertà o su analisi di tipo parametrico per schemi piani a più gradi di libertà, ma solo pochi affrontano il problema della modellazione tridimensionale di edifici reali, dissimmetrici.

Edifici adiacenti, ubicati in aree sismiche, devono avere un giunto di separazione (*gap*) di ampiezza tale da permetterne la libera oscillazione (vedasi figura 39a); l'inadeguatezza o la totale mancanza del giunto può comportare, in occasione di eventi sismici, il fenomeno del martellamento (*pounding*) tra edifici adiacenti, che per differenti caratteristiche dinamiche oscillano non in fase. I resoconti sui danni a manufatti, a seguito di terremoti distruttivi, hanno evidenziato che il danneggiamento

da martellamento è stato sempre rilevante sugli elementi sia strutturali che non strutturali. La pericolosità del fenomeno è ormai un dato certo. L'analisi dei danni riscontrati in occasione dei terremoti di forte intensità dell'ultimo trentennio evidenzia, con chiarezza, che il martellamento tra edifici adiacenti è stato causa primaria o concausa importante di numerosi crolli o severi danneggiamenti documentati in letteratura. Esso è stato riscontrato in occasione di tutti i principali terremoti distruttivi, quali quello del Great Alaska (1964), del Friuli (Italia, 1978), di Loma Prieta (1989), di Northridge (Los Angeles, 1994), di Kobe (Giappone, 1995). In particolare è menzionato, come esempio di non previdenza, per il rilevante numero di casi di danneggiamento e crolli (circa il 40%) di cui è stato protagonista durante il terremoto di Città del Messico (Messico, 1985). Il rischio di danneggiamento per martellamento ha assunto rilevanza sociale per il gran numero di manufatti potenzialmente vulnerabili ed è conseguente alla: a) vastità del costruito come sistema continuo di manufatti adiacenti ancor prima dell'inserimento nelle normative di prescrizioni su tale fenomeno (*centri storici*); b) recente classificazione come aree a rischio sismico di territori precedentemente dichiarati non sismici; c) inadeguatezza delle normative succedutesi nel tempo, per insufficienza di dati conoscitivi e studi sul fenomeno; d) insufficiente ampiezza del giunto, sebbene realizzato secondo le norme vigenti, che si riscontra quando, per sopraggiunta necessità di ristrutturazione o per cambiamento di destinazione d'uso, si procede a nuova verifica sismica di edifici adiacenti con modelli di calcolo che tengono conto, ove necessario, del comportamento non-lineare della struttura e/o dell'interazione suolo-struttura.

L'osservazione sul campo degli effetti dell'urto reciproco tra manufatti adiacenti ha permesso di individuare le tipologie costruttive a rischio (edifici con differente altezza, differente sistema strutturale, differente configurazione planimetrica), ha spronato il legislatore ad emanare normative sull'ampiezza *smin* del giunto, ha stimolato i professionisti a mettere in atto accorgimenti per evitare i danneggiamenti sul costruito conseguenti alla sua assenza o inadeguatezza e ha suggerito indicazioni preziose per una migliore modellazione del fenomeno (speciali elementi di contatto). L'importanza del fenomeno è testimoniata dalle numerose ricerche a carattere teorico, numerico e sperimentale che sono state fatte sull'argomento, con maggior intensità, dopo il terremoto di Città del Messico; alcune dedicate alla comprensione del fenomeno negli aspetti essenziali, altre a modellare in modo soddisfacente il comportamento reale dei manufatti in regime di urto reciproco, altre ancora di tipo sperimentale per tarare i modelli, la maggior parte aventi come oggetto di studio sistemi bidimensionali. In particolare, le ricerche sono state finalizzate principalmente ad individuare:

a) il comportamento dinamico di sistemi che collidono, in funzione delle loro caratteristiche dinamiche (periodi T_i e rapporti di smorzamento ξ_i) e di quelle della forzante (T_f), delle caratteristiche di rigidezza e di smorzamento dell'elemento di



contatto (k_e e c_e), dell'ampiezza iniziale del giunto (s) e della configurazione in pianta ed in altezza dei manufatti;

b) l'ampiezza minima del giunto s_{min} da prescrivere per le zone a rischio sismico, quale requisito fondamentale per la realizzazione di nuovi manufatti o per interventi di adeguamento sul costruito;

c) i materiali da utilizzare e gli accorgimenti da intraprendere per limitare i danneggiamenti in presenza di un giunto di insufficiente ampiezza. Poco spazio è dedicato alla ricerca volta a prevenire il rischio da martellamento su manufatti esistenti (Skrikerud e Wolf, 1980); maggior impegno è invece stato dedicato all'esame in dettaglio di casi di danneggiamento riconducibile a tale effetto, tra i quali i più famosi sono l'Anchorage Westward Hotel, durante il sisma Great Alaska del 1964, il Noheji Middle School durante il sisma Tokachi-Oki del 1968 (Takayama, 1973), il Gran Hotel Managua, durante il sisma del Nicaragua del 1972, l'Olive Wiew Hospital, durante il sisma di San Fernando del 1971 (Mahin e altri, 1976).

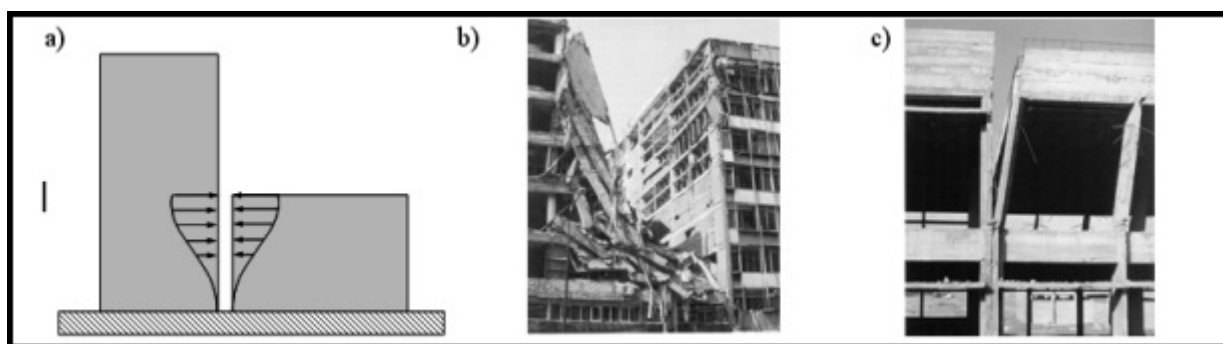


Figura 39 Esempi di martellamento ed effetti

Quindi, affinché non si verificano fenomeni di martellamento è necessario che i corpi adiacenti siano tanto più distanziati quanto maggiore è lo stato di spostamento relativo previsto. Esso tende ovviamente ad aumentare con l'altezza e la flessibilità delle strutture a contatto. A ciò si aggiunge l'utilizzo di giunti di disaccoppiamento sismico che separano le strutture evitando che queste entrino a contatto durante un sisma (vedasi fig. 40).

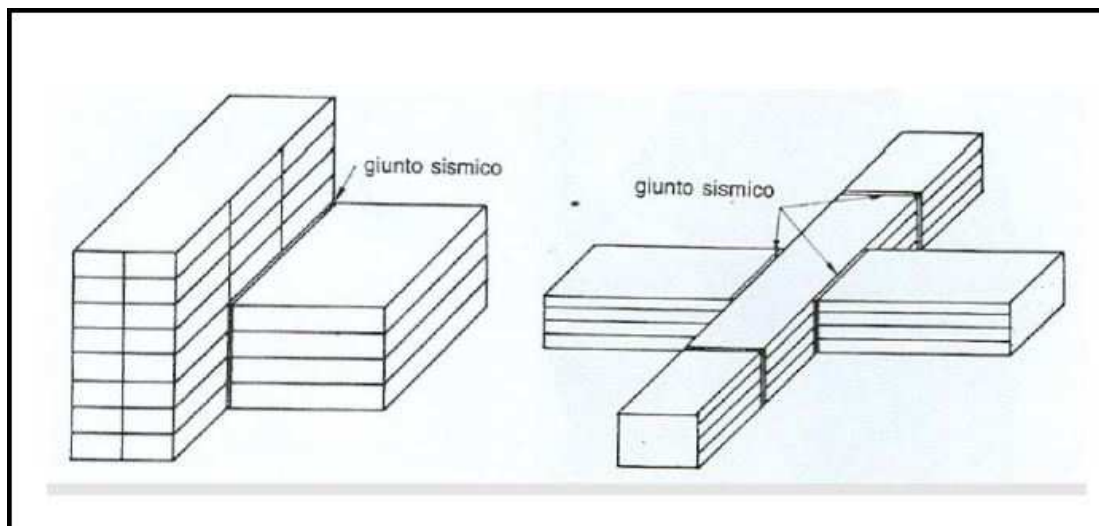


Figura 40 Esempio giunti sismici utilizzati in una struttura

1.5.11 Piano Debole o Soffice

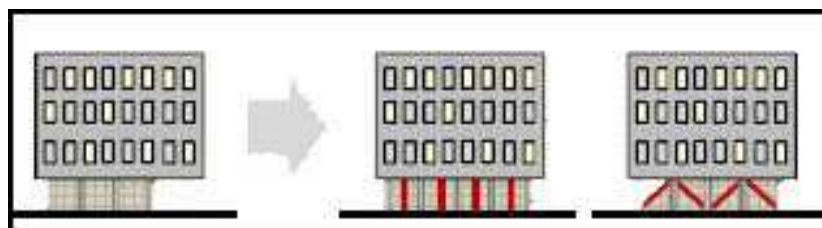


Figura 41 Piano pilotis

Il piano debole o piano soffice o soft storey è un meccanismo di collasso locale di edifici a telaio in calcestruzzo armato e in acciaio soggetti all'azione di un sisma. Si verifica quando le cerniere plastiche si localizzano all'estremità dei pilastri di un singolo piano. A questo meccanismo è preferibile quello in cui le cerniere plastiche si formano all'estremità delle travi poiché il collasso causato dal "piano debole", sistema ad "H", è poco duttile e quindi molto pericoloso (la struttura collassa molto rapidamente, non a caso negli edifici in cui si è verificato questo tipo di situazione si osserva che un piano è praticamente sparito, mentre i piani superiori sono solo leggermente lesionati).

La porzione più bassa dell'edificio, nel percorso di trasmissione delle forze al primo piano, può creare una situazione critica durante un sisma; vedasi fig. 41. La diversa rigidità tra il piano terra e il primo piano può causare ingenti danni e portare al collasso della struttura. Esempi a figg. 42 e 43.



Figura 42 Esempio di piano debole con irregolarità di forma, e struttura - Terremoto dell'Aquila 2009



Figura 43 Effetti del sisma del 1971 sull'Sylmar Olive View hospital

Il primo piano debole e l'irregolarità nei piani sono "regole" costruttive ampiamente utilizzate dagli architetti nei loro progetti dal momento che sono caratteristiche riconducibili ad uno dei cinque punti di Le Corbusier noto come " pilotis " (vedasi Cap. 2.2). Queste condizioni sono presenti, sia quando il piano terra di una struttura a telaio è privo di pareti, mentre le pareti non strutturali rigide sono presenti in quelle superiori, sia quando le pareti di taglio si trovano nei piani superiori e non seguono fino alle fondamenta , ma si interrompono al secondo piano. La figura sottostante (fig. 44, schemi a sinistra) mostra la deformazione causata in un edificio con una distribuzione regolare di rigidità a sinistra, e una deformazione con un piano sofficce, a destra e alcuni esempi (fig. 44, foto a destra) degli effetti su edifici con tale configurazione, a causa di terremoti in : Northridge , California (1994) ; Chichi , Taiwan , andIzmit , Turchia , nel 1999 ; and Bhuj , in India nel 2001.

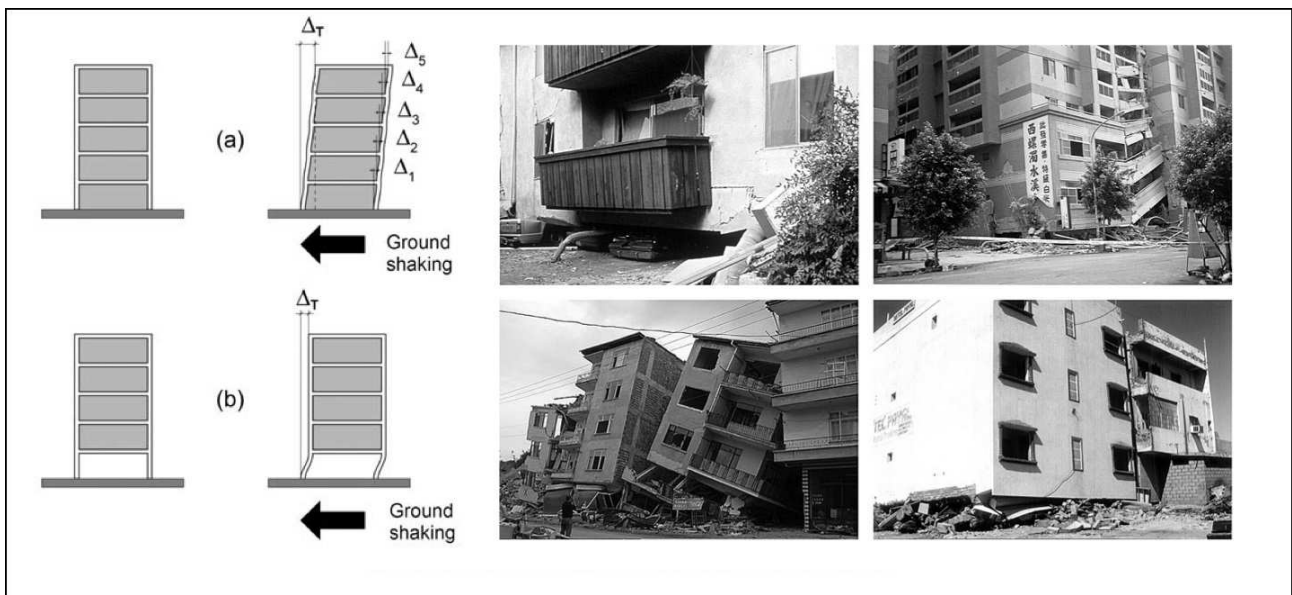


Figura 44 Effetti di un sisma su un edificio con piano sofficce

Emblematico è il terremoto che colpì l'edificio principale del Sylmar Olive View hospital del 1971 a San Fernando in California (vedasi fig. 45). Questo complesso consisteva in quattro corpi collegati attorno ad una corte centrale. Ciascun corpo aveva sei piani e una pensilina. L'edificio aveva grandi discontinuità nel sistema strutturale. Mentre i quattro piani superiori erano realizzati con pareti resistenti a taglio e telai resistenti a torsione, i due piani inferiori avevano solo un sistema a telaio resistente a torsione. Il sistema al piano consisteva principalmente in colonne in cemento armato

rinforzate a spirale. La forma e il rinforzo di queste colonne era diverso da piano a piano. Il grande “*movimento*” tra i piani indotto dal sisma, nell’unità di trattamento e cura, indusse significativi danni strutturali che, sommati a quelli di minor entità, portarono alla decisione di dover demolire l’edificio. *Questo per l’esistenza di un piano soffice al primo piano*; infatti la struttura, al piano sottostante – piano terra -, era composta da colonne mentre al secondo piano questa consisteva in muri in cemento con un differenziale comportamentale rispetto al sisma che le è risultato esserle “*fatale*”.



Figura 45 Sylmar Olive View hospital

Altro esempio degli effetti che possono determinarsi, in ragione di come è realizzato un edificio in termini di pianta della struttura, è quello riconducibile alle risultanze, che ebbe il terremoto a Caracas, Venezuela nel 1967, sul Palazzo Corvin (vedasi fig. 46). Questo edificio era realizzato secondo una pianta a forma di H (fig. 46, schemi a sinistra). I due corpi ospitavano residenze ed erano collegati centralmente da un blocco di distribuzione verticale. Nell’ala destra, il piano primo era stato lasciato aperto per il parcheggio, mentre nell’ala ovest erano ospitati appartamenti. La porzione a est collassò completamente mentre la parte ovest non subì danni dovuti al terremoto. La ragione per cui si è verificata una evidente differenza di risposta delle due porzioni dell’edificio, all’azione del sisma, è riconducibile, quale causa, alla distribuzione interna dell’edificio che mostra il piano terra.



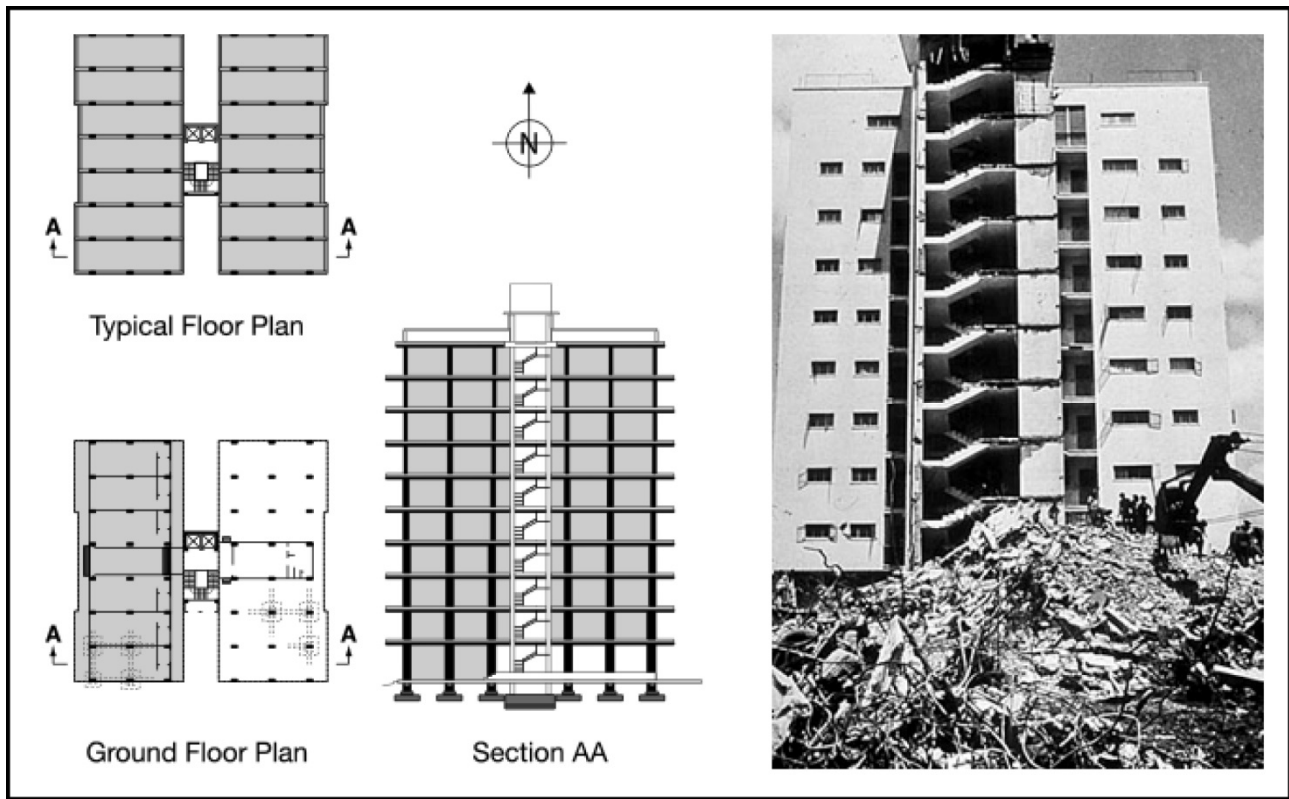


Figura 46 piante tipo, sezione e foto del Palazzo Corvin dove si possono vedere le differenze di impostazione strutturale nelle due ali dell'edificio.

1.5.12 Effetti dei Tamponamenti in Elevazione

La presenza delle tamponature può modificare negativamente la risposta strutturale poiché la distribuzione della rigidità laterale dell'edificio in elevazione risulta diversa da quella della struttura nuda (ovvero senza tamponature) quindi una distribuzione irregolare delle tamponature (fig. 47, schemi di edifici al centro e a destra) causa differenze di rigidità nella struttura in elevazione.

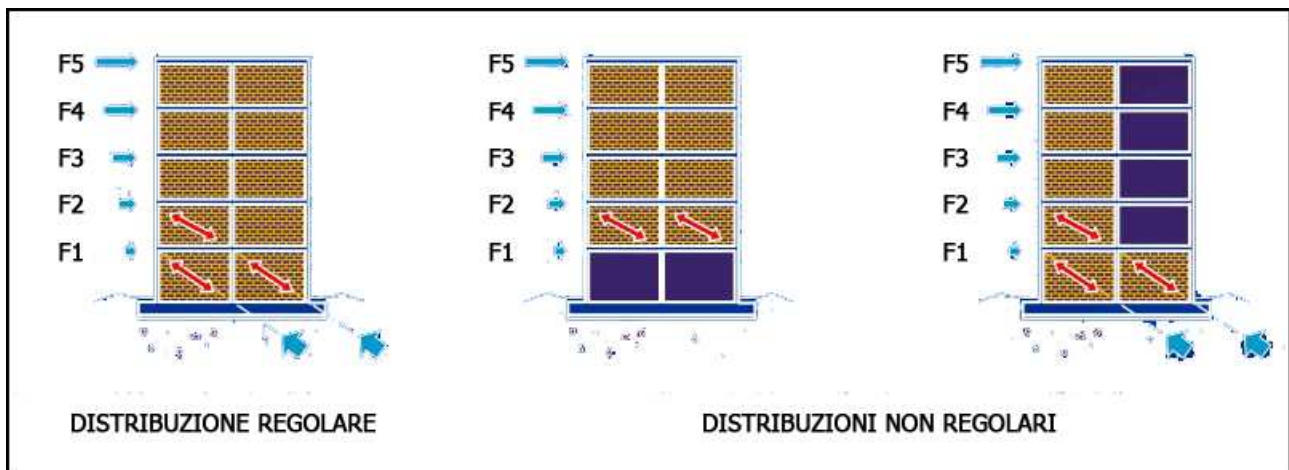


Figura 47 Differenti distribuzioni di tamponamenti

1.5.13 Conclusioni

L'influenza della regolarità strutturale, o della mancanza di essa, nella progettazione di edifici siti in zona sismica copre una vasta gamma di problemi della struttura, delle azioni a cui la stessa è soggetta e del relativo suo comportamento. Solo inquadrando ciascun aspetto nel giusto ambito è possibile comprendere realmente in che modo l'irregolarità condiziona la risposta strutturale e quali provvedimenti adottare per mantenere l'accettabilità di quest'ultima. La normativa dovrebbe recepire questi concetti ed indirizzare in maniera corretta il progettista strutturale. ⁸

La semplicità strutturale è caratterizzata dalla presenza di percorsi chiari e diretti per la trasmissione delle forze sismiche. Questo è un obiettivo importante da perseguire, in quanto la modellazione, l'analisi, il dimensionamento, i dettagli e la costruzione di strutture "semplici" sono soggette a molte meno incertezze e quindi la previsione del comportamento sismico è molto più affidabile.

La regolarità strutturale deve essere preferita per vari motivi quali:

- La progettazione è meno onerosa: nelle fasi di modellazione e di calcolo risulta più semplice rispettare la conformità con le norme tecniche;
- La costruzione è più economica: risulta più semplice reperire manodopera non specializzata per soluzioni particolari e componenti per la costruzione;
- Si ottengono performance strutturali migliori dal punto di vista sismico.

⁸ Teresa Guevara Perez, *Seismic Regulations Versus Modern Architectural and Urban Configurations*, 2010

Se l'irregolarità strutturale non può essere evitata occorre che:

- Il progettista sia consapevole delle implicazioni che generano le irregolarità e deve prendere provvedimenti per limitarle al minimo. Se necessario ciò può essere conseguito suddividendo la struttura, mediante giunti, in unità tra loro dinamicamente indipendenti;
- Il progettista ponga particolare attenzione agli effetti negativi delle irregolarità come concentrazione delle forze ed effetti torsionali (sia la causa che il rimedio di queste condizioni si trovano nella progettazione architettonica/strutturale, non nelle disposizioni delle norme tecniche);
- Le irregolarità particolarmente complesse richiedono soluzioni ingegneristiche avanzate e talvolta costose.

1.6- Effetti legati alla Disomogeneità del Terreno

Andando a monte del problema del costruire in zona sismica è importante trattare il tema dell'analisi del terreno dove edificare poiché ha importanti risvolti sulla progettazione di un edificio. La stratigrafia del terreno, quindi le sue caratteristiche geologiche, assumono rilevanza assoluta quando si disquisisce di risposta sismica di un edificio, poiché una differente composizione geologica del suolo corrisponde ad una diversa diffusione e accelerazione delle onde del sisma nello stesso. Questo, naturalmente, è tanto più rilevante quanto più è alto il "rischio" sismico dell'area su cui progettare un edificio. A tal proposito la normativa tecnica specifica i valori massimi di accelerazione di picco del terreno per gli edifici in muratura, ponendolo in relazione al numero di piani altrettanto, però, non viene regolamentato per le strutture in acciaio, legno o calcestruzzo armato. La normativa tecnica però compensa questa assenza fornendo dati locali riguardo i picchi di accelerazione e altri elementi stendendo una maglia sul territorio scandita con un passo di 5 km. I P.R.G., nel formulare scelte inerenti alla destinazione urbanistica delle aree di un dato territorio, dovrebbero fare particolare attenzione sia al loro possibile rischio sismico nonché delle caratteristiche geotecniche alle stesse (non adatte alla edificabilità). Appare inoltre doveroso evidenziare che non sempre i dati disponibili, inerenti le accelerazioni locali attese, risultano corretti (sottostimati) dal che ne deriva che una errata valutazione degli stessi può comunque determinare, a causa di un sisma, ingenti danni.

Generalmente l'accelerazione sismica di progetto viene determinata sulla base del metodo probabilistico, mentre l'amplificazione sismica locale dovuta alle



caratteristiche geotecniche della parte di terreno immediatamente sottostante le fondazioni (30-50 m di profondità), è valutata con un modello deterministico basato sull'analisi della risposta sismica locale del modello geotecnico di terreno con vari codici di calcolo disponibili in letteratura; vedi ad esempio il codice EERA, reperibile gratuitamente sul sito dell'Università di Berkeley.

E' importante capire come nella progettazione di edifici in zona sismica sia di vitale importanza una corretta analisi stratigrafica del terreno poiché questa ci fa comprendere le accelerazioni che la struttura dovrà sopportare. Ad esempio, costruire su un terreno ghiaioso (che conduce poco) avrà un effetto totalmente differente rispetto al costruire su di un terreno composto da pietra (che conduce molto). Inoltre, pur mantenendo una configurazione regolare che segua la normativa tecnica, la struttura potrebbe subire gravi danni essendo costruita ad esempio su due tipologie di terreno differente.

Data questa premessa si può quindi inquadrare il problema legato alla fallibilità della normativa italiana. Tale fallibilità può essere compresa analizzando la copiosa documentazione - registrazioni resasi disponibile in occasione dei recenti terremoti ove si sono riscontrati fattori di amplificazione sismica locale superiori a quelli previsti dalla normativa. Fenomeno, quello esaminato, che si enfatizza nel nostro Paese, rispetto ad altre realtà, in quanto la nostra formazione geologica presenta notevoli eterogeneità verticali ed orizzontali.



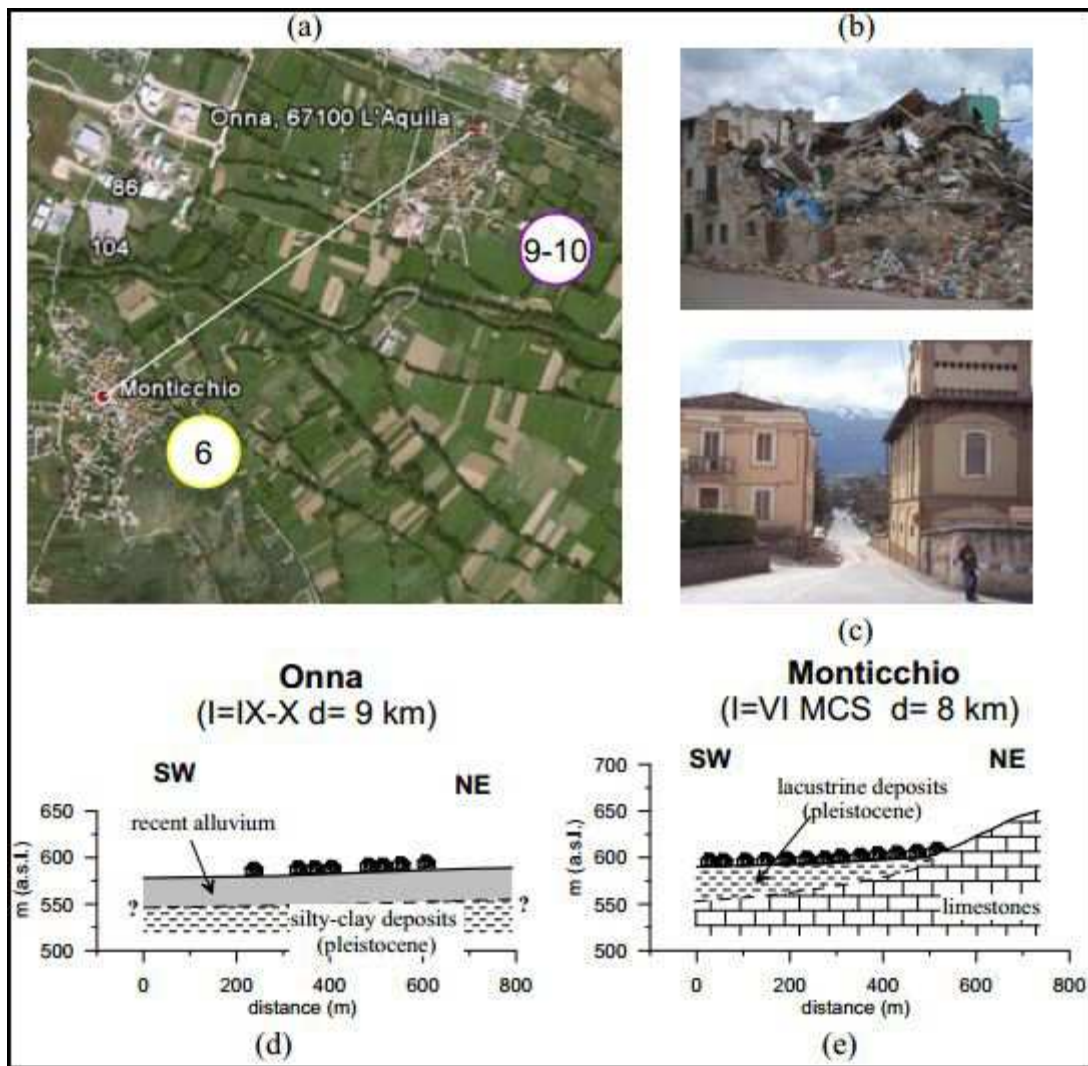


Figura 48 Confronto stratigrafia del terreno di Onna e Monticchio.

A titolo di esempio nella figura 48 è evidenziata la differenza di intensità sismica per due centri abitati poco distanti tra di loro (circa 2 km), che presentano, a causa del sisma registratosi (Terremoto in Abruzzo anno 2009), danni sostanzialmente diversi, in ragione di una differente amplificazione sismica locale nei centri medesimi. E' possibile notare come ad Onna, a causa della amplificazione dovuta al terreno, l'intensità ha raggiunto IX-X MCS, con distruzione totale del centro abitato, mentre a Monticchio la limitata amplificazione sismica locale ha determinato intensità VI MCS, senza produrre danni significativi, limitati, (fig. c soprastante) al solo crollo del cornicione di una palazzina. Analogamente, al caso sopra esposto, nella figura sottostante (fig.49), è possibile notare l'influenza della amplificazione sismica locale sulla intensità sismica e quindi sui danni causati (terremoto in Abruzzo anno 2009) nei centri abitati di Castelnuovo, ove l'intensità sismica ha raggiunto IX-X MCS causando una distruzione totale del centro abitato, e San Pio delle Camere, dove l'intensità sismica ha raggiunto V-VI MCS, non si sono registrati danni significativi.

Anche questi centri abitati sono distanti tra loro solo 2 km, a dimostrazione che l'amplificazione sismica locale può variare a causa della eterogeneità laterale del terreno anche a distanze limitate (vedasi fig.49). In entrambi i casi di Onna e Castelnuovo l'amplificazione sismica locale è stata ben maggiore di quella prevista da NTC 2008⁹.

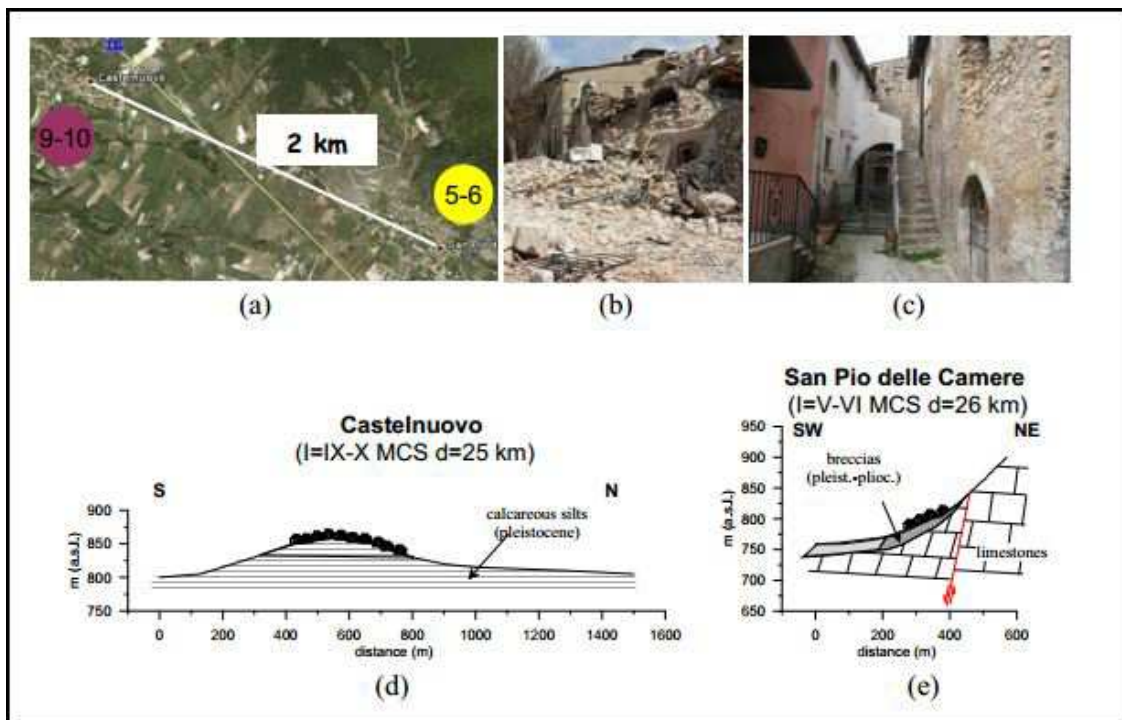


Figura 49 Confronto stratigrafia del terreno di Castelnuovo e San Pio delle Camere.

1.6.1 Conclusioni

Si può quindi concludere che la regolarità di un edificio in zona sismica è fondamentale ma risulta inutile se non coadiuvata da una corretta analisi della stratigrafia del terreno che indichi l'area di costruzione come omogenea. Inoltre l'attuale raccolta di dati inerenti le varie componenti di risposta a un sisma con un passo di 5 km risulta inadatto per la morfologia del territorio italiano, essendo questo molto eterogeneo e dunque presentando risultati differenti anche a distanze minori rispetto al passo sopracitato. Ciò implica una raccolta dati che andrebbe condotta localmente per non incorrere in eventuali problemi, come è già successo.

⁹ Michele Maugeri, Salvatore Grasso, *Innovazione dell'ingegneria geotecnica sismica*

CAPITOLO – 2 -

La Regolarità Strutturale e l'Architettura Moderna

2.1- Influenza della Configurazione Architettonica sul Comportamento Sismico

Avendo dato traccia di quali dovrebbero essere i criteri da seguire per un corretto “costruire” in zona sismica il presente capitolo analizza, ancorché per macro aspetti, come si sia giunti a determinati “*modi di costruire*” oggi, inquadrando, prima di tutto, ciò che ne ha posto le basi e lo ha dunque influenzato, cioè l'Architettura Moderna e i PRG delle differenti città.

In Francia, nel 1892, l'ing. F. Hennebique sviluppò un nuovo sistema strutturale, il “*Trabeato*”, e dimostrò le potenzialità del cemento rinforzato con barre d'acciaio. Questo nuovo materiale rese possibile realizzare strutture che crearono le basi per lo sviluppo della nuova architettura moderna. Mattone, malta, pietra e legno non furono, di fatto, più utilizzati a favore della nuova tecnologia costruttiva (Trabeato). L'architetto-ingegnere belga Auguste Perret costruì il primo edificio con il sistema “trabeato” nel 1903 in Rue Franklin 25 a Parigi. In questo edificio di 8 piani, Perret separa chiaramente la struttura in cemento armato che supporta l'intera costruzione e crea grandi intervalli tra le colonne e i muri esterni, la cui unica funzione era quella di separare lo spazio interno da quello esterno. Questo sistema strutturale ammette anche piani a pianta libera con sistemi di separazione interna che non hanno compiti di supporto di alcun peso permettendo così di poter modificare a piacimento, in ogni momento, le partizioni dello spazio. Ciò porta al determinarsi di una particolare situazione strutturale, già evidenziata nel capitolo precedente, quale è la presenza di un “*piano soffice*” quindi una differente rigidezza ai diversi piani di un edificio.

Nel 1914, l'architetto franco-svizzero Le Corbusier sviluppò il sistema denominato “Domino” per le case a basso costo, caratterizzato dalla standardizzazione delle componenti costruttive, la ripetizione di modelli di edificio, l'industrializzazione nella produzione dei componenti, la struttura in cemento armato, il sistema strutturale costituito da esili colonne chiamate *pilotis* e lunghe lastre che coprivano grandi spazi tra le colonne senza travatura. Il sistema consiste in lastre solide di cemento armato (gettate in opera o prefabbricate) che scaricano il peso sulle colonne e quindi al suolo. Le caratteristiche di questo modello di edificio costituirono un primo esempio di quello che dopo furono le basi dell'architettura moderna, chiamate poi “*i cinque punti dell'architettura moderna*”.

- 1) I Pilotis
- 2) Il tetto giardino



- 3) La pianta libera
- 4) Le finestre a nastro
- 5) La facciata libera

Le Corbusier applicò tali principi nel progetto della casa Citrohan 2 e li pose in essere nel 1925 con la costruzione del Padiglione dell'Esprit Nouveau. Nel 1919 l'architetto tedesco Walter Gropius fondò il Bauhaus, la scuola tedesca di architettura e arti applicate. Nel 1925 Gropius disegnò il Palazzo del Bauhaus a Dessau, costituito da diversi volumi che si raccordano formando una U asimmetrica, con un primo piano aperto e finestre a nastro che divennero un simbolo dell'architettura moderna.

Tali sistemi costruttivi sono quindi stati riportati sino ad oggi influenzando fortemente le configurazioni strutturali degli edifici e, non essendo state concepite con l'attenzione al problema sismico, hanno portato a situazioni di criticità in zona sismica.

Ad oggi non si riscontrano problemi legati ad edifici, quali i grattacieli, che perlopiù hanno percorsi di carico molto diretti e non hanno configurazioni significative da un punto di vista sismico. Altro discorso è invece quello riguardante gli edifici più bassi, poiché una ricerca sempre più personale delle configurazioni ha portato ad una grande libertà nell'invenzione di nuove forme, spesso irregolari (vedasi fig.50).

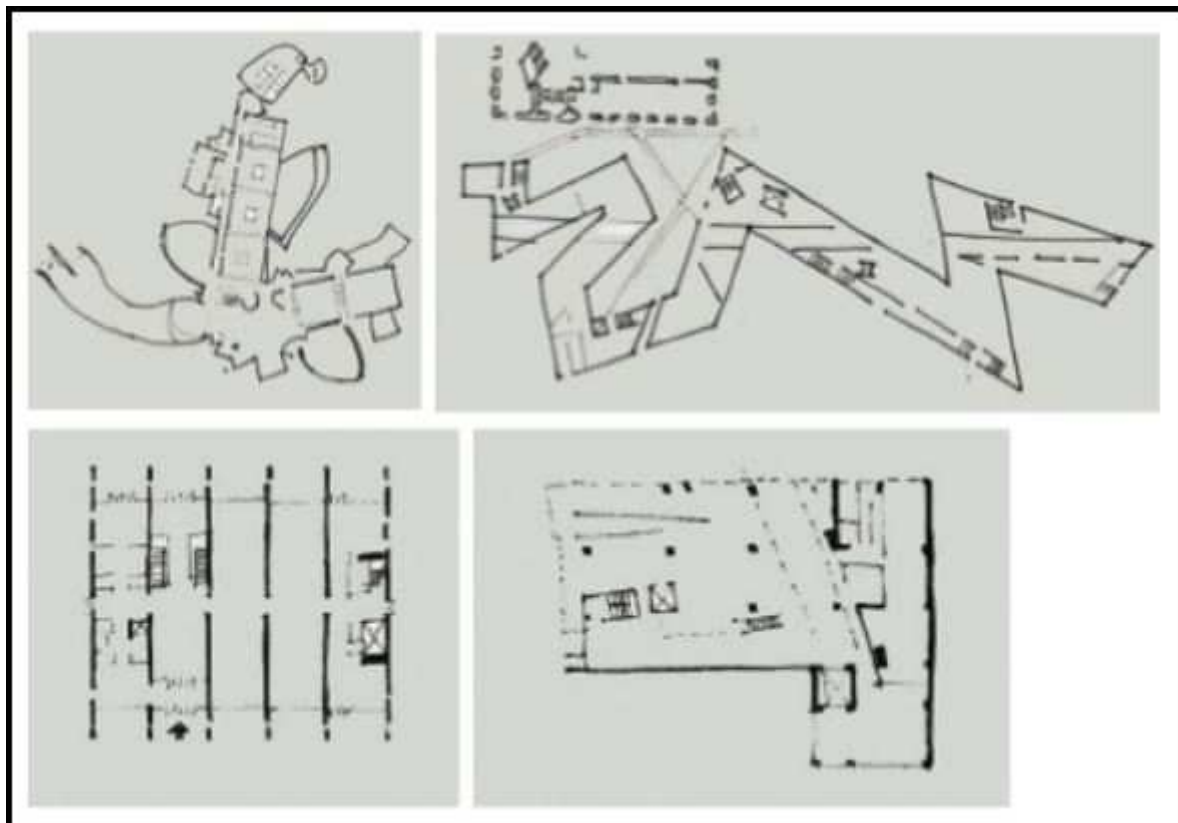


Figura 50 Quattro planimetrie di nuovi musei la cui irregolarità in planimetria è evidente. In alto a sinistra, il Guggenheim Museum, Bilbao, Spagna, progettato da F. Gehry, 1998. In alto a destra, Il Museo Ebraico, Berlino, Progettato da D. Liebskind, 1999. In basso a



sinistra, il Rosenthal Center of Arts, Cincinnati, progettato da Zaha Hadid, 2003. In basso a destra, il Nasher Sculpture Center, Dallas, progettato da R. Piano, 2003.

Altra problematica è legata ad un livello di pianificazione urbano, cioè i PRG che spesso però, in zona sismica, non presentano disposizioni particolari a queste riferibili e sono del tutto simili a quelli riconducibili all'adottato in aree non interessate dai citati fenomeni (sismici).

I paragrafi seguenti descrivono brevemente alcuni esempi di come i PRG nella maggior parte delle città contemporanee spesso incoraggiano l'uso di configurazioni non adatte a zone a rischio sismico.

La configurazione di Fronte urbano (edifici che delineano un fronte unico su strada, vedasi fig. 51) è costituito da edifici adiacenti gli uni agli altri in ogni blocco e allineati lungo la loro facciata principale parallelamente alla linea della strada come fosse un edificio continuo. Alcuni esempi sono illustrati nelle figure sottostanti. L'origine di tale modo di regolamentare il costruire deriva da criteri adottati nel 19° secolo quando importanti città dei paesi industrializzati occidentali quali Francia o Italia sottoposte a sostanziali interventi di riqualificazione urbana .

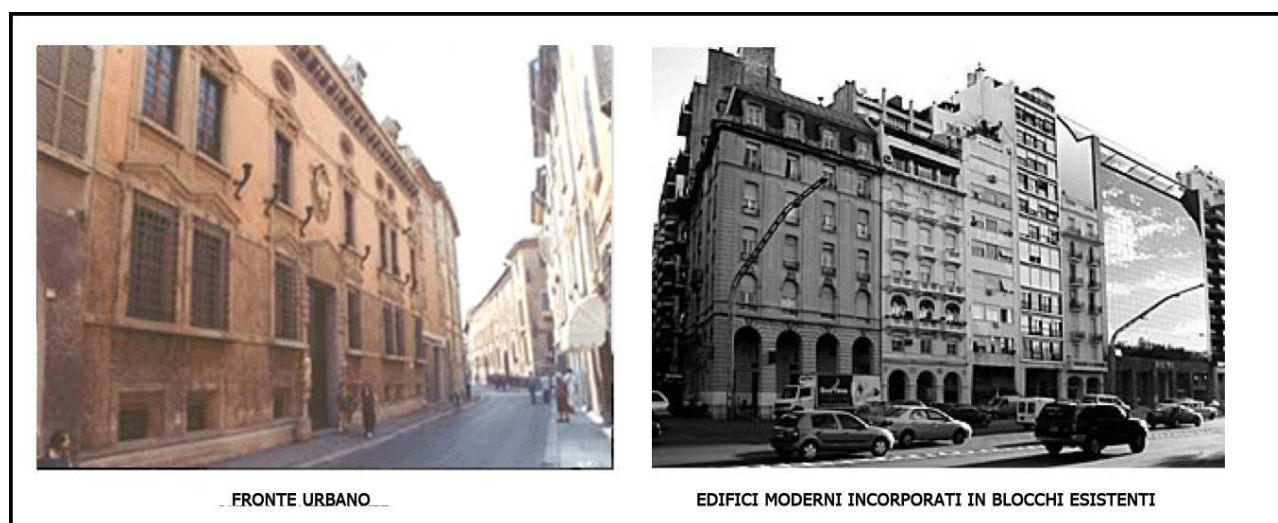


Figura 51 Fronte urbano

Seguendo la dottrina *faire laisser* (ciascuno fa come vuole), si generano PRG molto permissivi. Ogni edificio moderno è collocato nel blocco tradizionale esistente come unità strutturalmente indipendente come da esempio indicato nella figura sottostante.. Tuttavia tale *modus operandi* determina l'insorgenza di diversi problemi quando gli edifici vicini al nuovo costruito vengono ad essere ignorati quali possibili cause per reciproche interferenze (fig. 52).

Se, ad esempio, la struttura degli edifici vicini è costituita da muri portanti condivisi, particolare attenzione deve essere posta a non indebolire tali muri; la valutazione, di queste possibili conseguenze, deve essere fatta sugli effetti che le strutture esistenti possono produrre su quella nuova, e quella nuova su quelle esistenti.

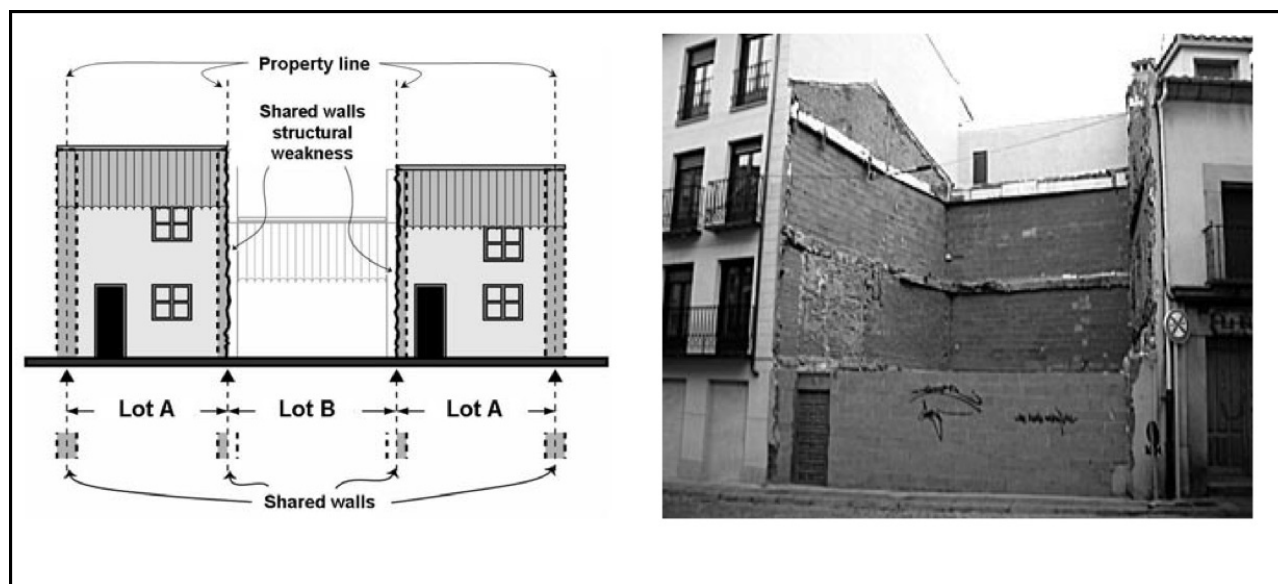


Figura 52 Fronte unico-martellamento

Particolare attenzione dovrebbe anche essere posta alla possibile interazione tra le pareti degli edifici. Il fenomeno conosciuto come “*martellamento sismico*” tra edifici adiacenti a causa di spostamenti interpiano può verificarsi quando: (a) edifici adiacenti hanno diverso periodo di vibrazione, quindi ogni edificio si muove, nello stesso intervallo di tempo, in modo diverso martellandosi vicendevolmente; (b) edificio adiacente ha una diversa altezza di interpiano.

Altro possibile problema generabile tra edifici adiacenti, senza giunti sismici, è “*l’immobilizzazione*” (impedita l’oscillazione dell’edificio) parziale di piani bassi di un alto edificio a causa di bassi edifici adiacenti che, rappresentando una situazione di irregolarità in elevazione, possono produrre danni nelle zone di transizione tra i piani bassi irrigiditi e la parte flessibile libera come illustrato in figura sottostante (vedasi fig.53).

In edifici d’angolo si possono determinare delle irregolarità torsionali a causa della distribuzione irregolare di rigidità; se, ad esempio, un edificio ha una pianta rettangolare, due facciate libere e non portanti e due “*facciate cieche*” più rigide, rispetto alle altre due, questo può generare eccentricità e rotazione su componenti orizzontali, che a sua volta può produrre effetti martellanti sugli edifici adiacenti; Se



una pianta è di forma triangolare, non vi saranno solo problemi di eccentricità, ma, se l'edificio è alto, potrebbero verificarsi effetti di ribaltamento.

Quanto detto sopra fa capire come in diverse città siano presenti problemi legati ad una non corretta regolamentazione che, in Italia come in altri paesi, ha come conseguenza episodi di “*martellamento*” o di “*immobilizzazione*” (vedasi fig.53) che danneggiano gli edifici. Ciò si verifica soprattutto nei centri storici dove spesso, all’abbattimento di un edificio non coincide la costruzione di uno nuovo che rispetta il “*modus costruendi*” di quelli adiacenti.

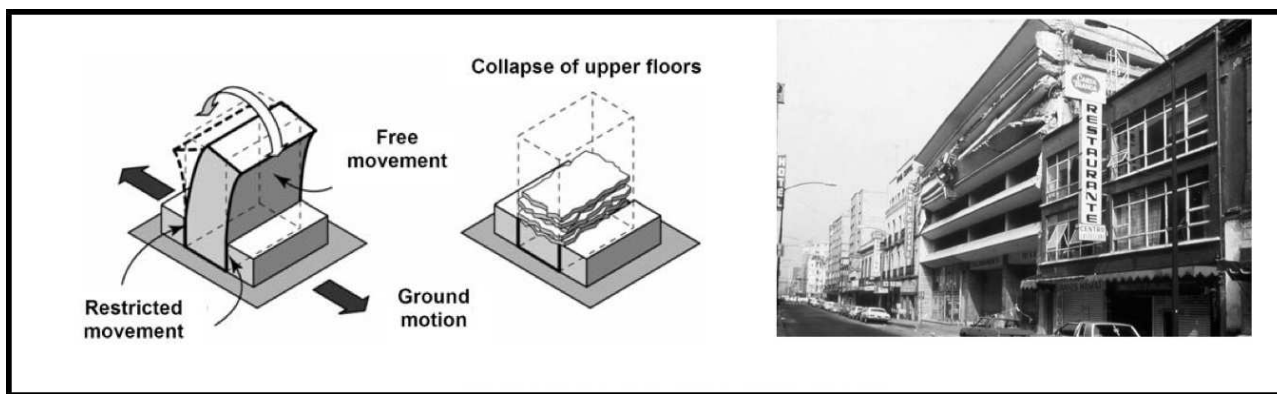


Figura 53 Parziale immobilità dei piani inferiori

Alla luce delle considerazioni esposte nei capitoli precedenti si può quindi dedurre come l’evoluzione dei materiali da costruzione, e delle capacità costruttive, non si sia orientato, almeno durante la fase inerente l’evoluzione dell’architettura moderna, a seguire dei principi costruttivi che tenessero conto della problematiche connesse alla sismicità ma, al contrario, a teorizzare irregolarità ed asimmetrie in pianta ed in alzato, piani soffici e deboli, irregolarità torsionali.

2.2 - I Cinque Punti di Le Corbusier e il Comportamento Sismico

Come già sopraccitato Le Corbusier è una figura fondamentale nello sviluppo dell’Architettura Moderna e i suoi “*5 punti*” sono alla sua base. Le Corbusier non si interessava però di morfologie antisismiche, perciò si evidenziano conseguenti problemi di applicazione in aree soggette a sismi. L’esempio più significativo riguarda lo schema dell’edificio su **pilotis** della “*Maison Domino*” (fig.54). Questo rappresenta il primo dei cinque punti della “*Nouvelle Architecture*”¹⁰. Con la premessa ora fatta, la “*Maison Domino*” è stata realmente una concezione innovativa, perché ha associato la composizione architettonica alle prestazioni di un nuovo materiale: il cemento armato. Il pilotis, grazie all’utilizzo del cemento armato, stacca le abitazioni dal livello del

¹⁰ Le Corbusier, *Vers une architecture*, Edition Crès, 1923.

suolo e permette la realizzazione di grandi spazi luminosi rappresentando una pietra miliare dell'architettura moderna.

Tale configurazione è particolarmente gradita in architettura, in quanto rende possibile la presenza di grandi spazi liberi al piano terra, che possono facilmente dar luogo a disposizioni razionali ed efficaci dal punto di vista distributivo (funzionale). Proprio in virtù del fatto che tale composizione è in grado di permettere attraenti ed agevoli soluzioni sotto tali punti di vista, è stata incoraggiata in Italia per la progettazione architettonica dei tipici edifici multipiano in cemento armato, e, negli ultimi 50 anni, è stata ampiamente utilizzata sia in zona sismica che non.

Di contro, il risultato della configurazione strutturale a "*primo piano debole*" è molto pericoloso dal punto di vista sismico, in quanto l'intero edificio si comporta come un corpo quasi rigido, per via delle tamponature inserite nelle maglie di telaio ai piani superiori, e solamente il primo livello assorbe le deformazioni laterali. Il comportamento laterale richiede la formazione di cerniere plastiche ai due estremi dei pilastri del piano debole e, di conseguenza, le deformazioni risultano concentrate in questi pochi elementi strutturali ai quali sono richieste grandi rotazioni, al di sopra della propria capacità di prestazione duttile. Dall'altro lato, grazie ad aggiornate analisi sismologiche, le norme italiane hanno introdotto negli ultimi anni sensibili estensioni delle zone sismiche, ultime delle quali nel 2003, così da determinare la presenza, in tali aree, di edifici residenziali, commerciali e pubblici, non solo non progettati per resistere a forze sismiche, ma, spesso, anche caratterizzati da configurazioni insicure come il "*primo piano debole*".

Nonostante il ben noto pessimo comportamento, *sotto attacco sismico*, della configurazione a piano debole – attestata dall'usuale danneggiamento subito in occasione dei terremoti mostrato negli esempi della fig. 55 – quest'ultimo è largamente presente negli edifici esistenti non progettati come resistenti al sisma.





Figura 54 Maison Domino e Ville Savoye



Figura 55 Esempi di "piano debole"

2) **“La pianta libera”**, che rappresenta il secondo dei 5 punti, è esemplificata da Le Corbusier iniziando dai muri portanti che, partendo dal sottosuolo, si sovrappongono formando il pianterreno e gli altri piani, fino al tetto (vedasi fig.56). Il sistema dei pilastri porta i solai, i tramezzi sono posti a piacere secondo le necessità e nessun piano è vincolato all'altro. Non esistono più pareti portanti ma solo membrane solide a piacere, ne consegue l'assoluta libertà di configurazione della pianta, che consente una grande economia di volume costruito e un rigoroso impiego di ogni centimetro quadrato, che compensano i maggiori costi di una costruzione in calcestruzzo armato.



Questo sistema porta a problemi di differenza di rigidità rispetto ai piani superiori, che spesso hanno configurazioni differenti, con la presenza di tamponamenti posti in maniera differenziata nei piani a causa della libertà di distribuzioni interne.

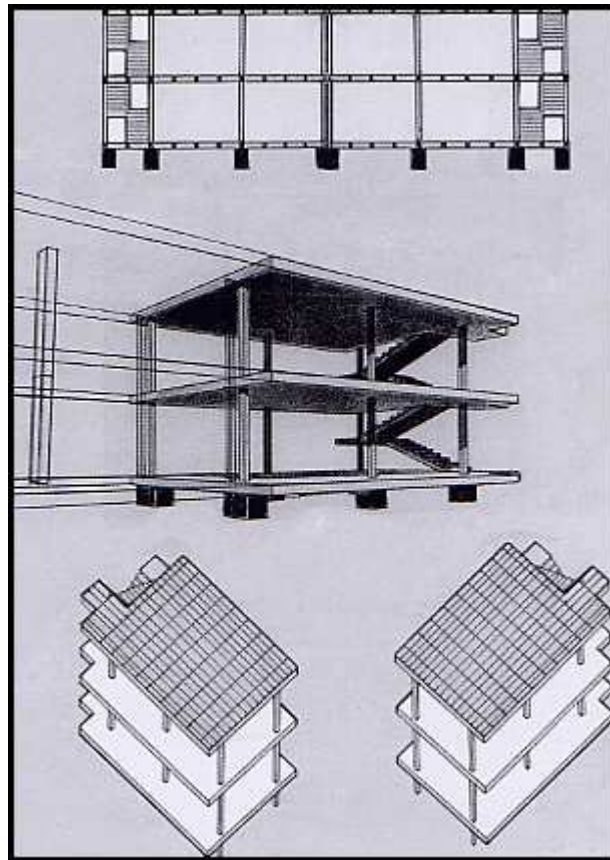


Figura 56 La pianta libera secondo Le Corbusier

3) **“La facciata libera”** permette di creare liberamente la facciata dell’edificio senza murature strutturali ed è anch’essa derivante dallo scheletro portante in calcestruzzo. Consiste nella libertà di creare facciate non più costituite di murature aventi funzioni strutturali, ma semplicemente da una serie di elementi orizzontali e verticali i cui vuoti possono essere tamponati a piacimento, sia con pareti isolanti che con infissi trasparenti (vedasi fig.57). L’utilizzo di tale sistema però può portare a situazioni di asimmetria strutturale dovute alla presenza di facciate trattate in modo differenziato (pareti vetrate e altre in cemento armato) che generano problemi di eccentricità tra centro delle masse e centro delle rigidzze.



Figura 57 Esempio di facciata libera

4)“**Le finestre a nastro**” hanno come obiettivo quello di donare maggiore illuminazione all’interno percorrendo l’intera facciata dell’edificio; inoltre consentono di uniformare gli interni agli esterni con un contatto più diretto tra le due parti.

Questo elemento risulta essere molto problematico in edifici in zona sismica poiché la presenza di una finestra a nastro in alto crea una differenza nelle condizioni di lavoro del pilastro della zona contrastata dal muro e di quella libera; la conseguenza negativa è la concentrazione del danno nella zona priva di tamponatura, a cui si aggiunge anche la scarsa duttilità disponibile in questo tratto di pilastro diventato geometricamente tozzo e quindi fortemente sollecitato a taglio (vedasi fig.58). Quindi si induce il meccanismo del “*pilastro tozzo*” (vedasi pag. 42)

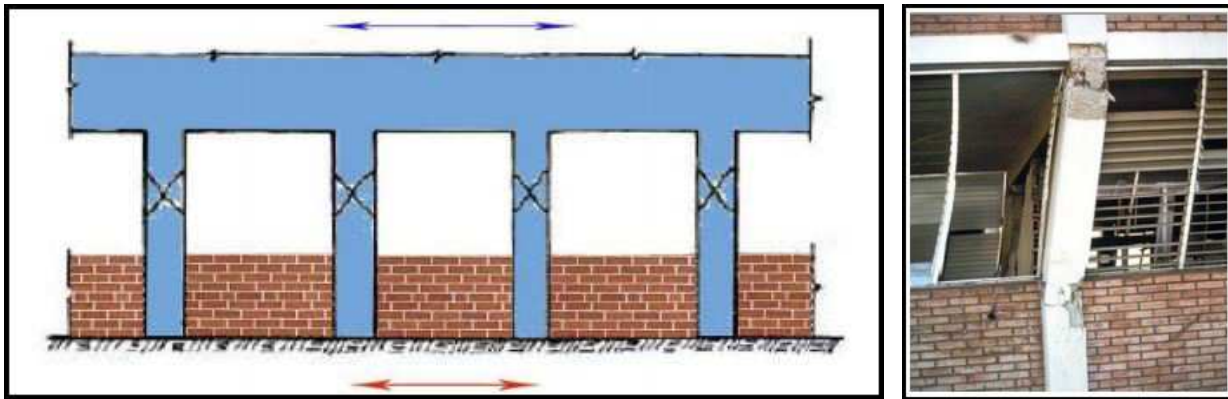


Figura 58 Effetto pilastro tozzo e esempio pratico

5) **“Il tetto giardino”**, secondo la concezione di Le Corbusier, serve a restituire all'uomo il verde, che non è solo sotto l'edificio, ma anche e soprattutto sopra. Tra i giunti delle lastre di copertura viene messo il terreno e seminati erba e piante, che hanno una funzione coibente nei confronti dei piani inferiori e rendono lussureggiante e vivibile il tetto, dove si può realizzare anche una piscina (vedasi fig.59 sinistra,). Il tetto giardino (vedasi fig.59 e 60) è un concetto realizzabile anche grazie all'uso del calcestruzzo armato: questo materiale rende, infatti, possibile la costruzione di solai particolarmente resistenti, in quanto si oppone alla cosiddetta trazione generata dalla flessione delle strutture (gravate del peso proprio e di quanto vi viene appoggiato), molto meglio dei precedenti sistemi volti a realizzare piani orizzontali.

In zona sismica l'utilizzo del tetto giardino comporta una problematica legata al forte peso in copertura, che genera un momento di ribaltamento con conseguenti gravi danneggiamenti dell'edificio in seguito ad un sisma.



Figura 59 Esempi di tetto giardino e piscina sul tetto

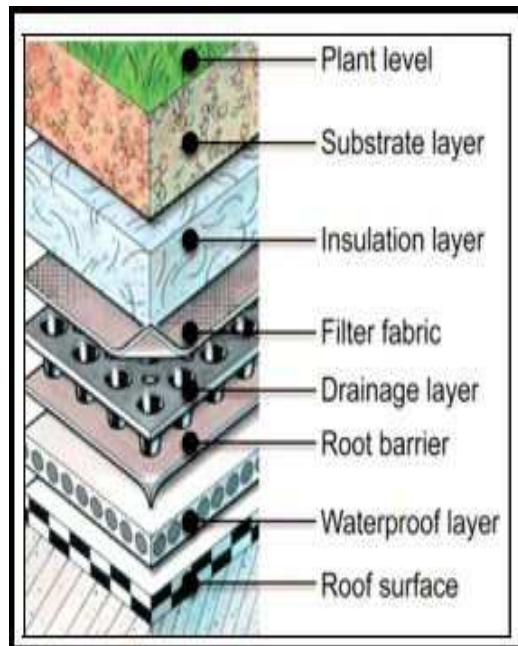
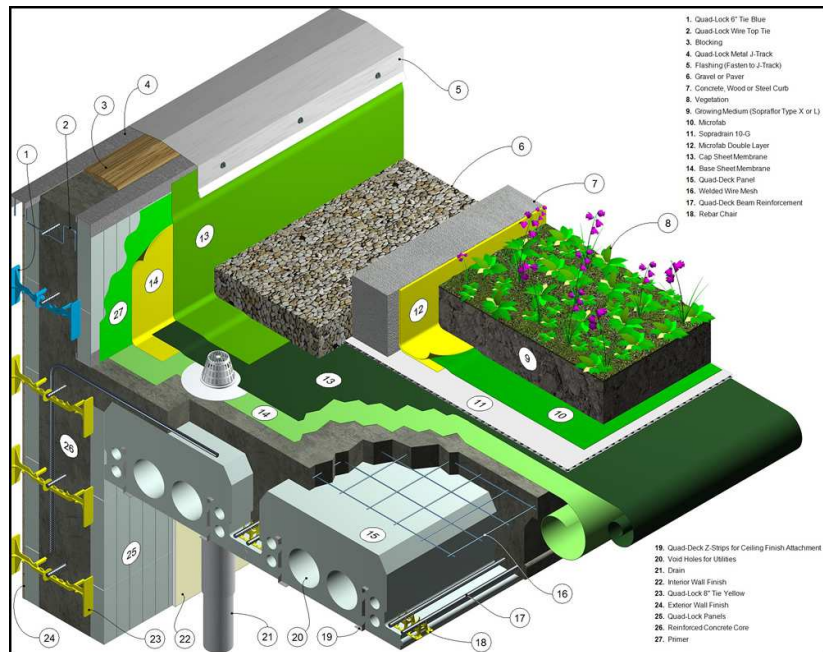


Figura 60 Struttura del tetto verde

CAPITOLO – 3 -

La Regolarità nelle Norme

Il più importante principio guida per la progettazione in zona sismica è quello della regolarità della struttura. Questo principio è chiaramente enunciato nell'Eurocodice 8, nel quale sono sanciti, in maniera esplicita, quelli che devono essere i criteri di una corretta progettazione in zona sismica e cioè:

1. Semplicità Strutturale,
2. Uniformità e Simmetria,
3. Iperstaticità
4. Resistenza e Rigidezza Bidirezionali,
5. Resistenza e Rigidezza Torsionali.

3.1 - Il problema sismico in Italia

Appare doveroso premettere, a quanto verrà esposto nel presente capitolo, che gli eventi sismici che si sono susseguiti negli ultimi anni nel territorio italiano, vedasi Friuli anno 1976 - Irpinia anno 1980 - Aquila anno 2009 – Reggio Emilia anno 2012 - hanno portato a ridefinire, sistematicamente, anno dopo anno, le zone dell'Italia a rischio sismico per poi, in buona sostanza, dover giungere ai nostri giorni dovendo considerare tutto il nostro “Paese” come zona sismica, anche se a rischio differenziato.

Che cosa è un sisma? in breve tale fenomeno consiste in sollecitazioni (sismiche) del terreno, che possono essenzialmente essere considerate come *“forze d'inerzia generate da insieme di accelerazioni trasmesse attraverso il sistema terreno-fondazione, che determinano, nelle costruzioni solitamente progettate e concepite per resistere ad azioni gravitazionali di tipo statico, regimi di sollecitazioni di tipo dinamico”*. Tali sollecitazioni, per terremoti di particolare intensità, possono portare al collasso i manufatti, quindi ingenti danni di cui va sottolineato, quale valore assoluto, la perdita di vite umane.

Nella valutazione degli interventi da porre in essere, al fine di annullare o quanto meno limitare gli effetti di un sisma sul costruito, risulta di particolare rilievo l'aver introdotto un “dato” - R- denominato < Fattore di Rischio >, quale “misura” dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, da valutarsi in base al tipo di sismicità, di



resistenza delle costruzioni e di antropizzazione del territorio. Questo “*dato*” risulta essere determinato valutando la combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell’esposizione di una determinata struttura inserita in uno specifico territorio secondo i seguenti criteri valutativi:

Gli elementi costitutivi del rischio sismico sono dunque:

- La pericolosità (P) che rappresenta la probabilità che un terremoto di una certa intensità si verifichi in un determinato territorio (area geografica) ed in un determinato intervallo temporale;
- L’esposizione (E) che indica il valore d’insieme di vite umane e di beni materiali (patrimonio storico, abitativo, lavorativo, socio – culturale ed ambientale) che, appunto in quanto esposto, può essere perduto o danneggiato in caso di verifica di un forte terremoto;
- La vulnerabilità (V) che consiste nella capacità dei beni esposti (vite umane e beni materiali) di sopportare il danno (la fragilità dei beni esposti al terremoto).

L’analisi del rischio sismico, costituito appunto dal prodotto dei tre fattori appena indicati, deve essere svolta attraverso l’attività di: a) previsione (che “*consiste nelle attività dirette allo studio ed alla determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, alla identificazione dei rischi ed alla individuazione delle zone del territorio soggette ai rischi stessi*” art. 3 comma 2 L. 225/92); b) prevenzione (che consiste nelle attività volte ad evitare o ridurre al minimo la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi di cui all’articolo 2 anche sulla base delle conoscenze acquisite per effetto delle attività di previsione” art. 3 comma 3 L. 225/92); ed è “*finalizzata alla tutela dell’integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell’ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi o da altri grandi eventi che determinino situazioni di grande rischio*” (art. 5 L. 401/01).

Il fattore “pericolosità” (P) è indicato normativamente nelle Mappe di pericolosità con un numero percentuale, ed ha definito la vulnerabilità (V) come la “*predisposizione della società ad affrontare l’evento*”.

L’uomo non può incidere sul fattore pericolosità (P) e, per mitigare il rischio sismico, per ridurre il valore di (R), deve necessariamente agire sugli altri due fattori, esposizione (E) e vulnerabilità (V).

$$R = P \times V \times E$$



Stante il premesso, per far fronte al quadro che si è delineato negli ultimi decenni e tentare quindi di ridurre in modo significativo il rischio sismico, si è concordi nel ritenere che una moderna strategia di prevenzione debba necessariamente essere basata su un approccio unitario che contempli rispettivamente:

1. La classificazione sismica del territorio;
2. La progettazione antisismica delle nuove costruzioni;
3. L'adeguamento degli edifici esistenti, in termini di strutture, tali da poterli rendere compatibili a poter sopportare azioni sismiche indotte.

La prima procedura è volta a stimare, su basi probabilistiche, le azioni sismiche e la loro distribuzione sul territorio nazionale (macro-zonazione), ovvero la pericolosità associata a ciascuna zona sismica.

La progettazione di nuove strutture e l'adeguamento del patrimonio edilizio esistente sono invece rivolte alla riduzione della vulnerabilità del costruito nei confronti dell'azione sismica. Tale approccio non può essere lasciato al libero arbitrio dei progettisti ma deve necessariamente essere inquadrato in specifici ambiti normativi. D'altra parte, il legame funzionale tra evento sismico e normativa è testimoniato dall'analisi storica, che dimostra come le norme di progettazione antisismica sono quasi sempre scaturite, e si sono progressivamente evolute, a seguito di terremoti particolarmente devastanti, instaurando una palese relazione **Causa - Effetto** tra evento sismico e norma corrispondente. In relazione a tale processo evolutivo ed alla natura stessa delle indicazioni contenute nei codici che si sono via via susseguiti, si può stabilire una classificazione convenzionale, e per quanto possibile cronologica, delle norme di progettazione antisismica così articolata:

- Norme di I generazione (fino al 1960): norme puramente prescrittive;
- Norme di II generazione (dal 1960 al 1980): norme prestazionali a singolo livello;
- Norme di III generazione (dal 1980 al 2000): norme prestazionali a doppio livello;
- Norme di IV generazione (successive al 2000): norme prestazionali multilivello.

I codici appartenenti alle prime due generazioni, la cui importanza è soprattutto legata a considerazioni di tipo storico, sono caratterizzati dalla contemporanea presenza di indicazioni di natura prescrittiva associate a raccomandazioni di natura prestazionale a singolo livello. In pratica si cerca di controllare unicamente la prestazione al collasso del sistema per terremoti particolarmente violenti (terremoti rari), valutando convenzionalmente la resistenza con il Metodo delle Tensioni Ammissibili (MTA). Lo stato attuale della codificazione è invece rappresentato dalle



norme di terza generazione, basate su un approccio prestazionale a doppio livello e nelle quali la sicurezza strutturale è valutata attraverso il Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite (MSSL). Le norme di quarta generazione rappresentano l'evoluzione della filosofia di progetto agli stati limite e costituiscono la punta più avanzata nel panorama della progettazione antisismica. Esse si basano su un approccio multilivello implementato attraverso una metodologia nota come Performance Based Design (PBD). Il metodo consiste nella scelta di un appropriato criterio di progetto tale da garantire, per uno specifico livello d'intensità sismica, che, con assegnate probabilità, il sistema non risulti danneggiato oltre certi valori limite, rappresentativi di opportuni livelli prestazionali. Prima di entrare nel merito dei contenuti delle diverse norme si ritiene opportuno un breve cenno alla problematica della classificazione sismica del territorio, anche in considerazione delle ricadute che tutto ciò comporta sul come progettare. Tale riconoscimento, in Italia, come in altri Paesi, avviene mediante una classificazione del territorio adottata dallo Stato ed inserita in un documento avente carattere normativo. L'analisi storica evidenzia come la classificazione sismica del territorio in Italia sia stata, fino al 1980, episodica. Infatti a partire dal 1909, in seguito al terremoto catastrofico di Messina, iniziarono, di volta in volta, ad essere inseriti in zona sismica i comuni che subivano danni significativi per effetto degli eventi sismici che si susseguivano. Solo a seguito del terremoto del Friuli del 1976 furono attivati studi sistematici per la valutazione della pericolosità sismica del territorio italiano, basati su una catalogazione storica di terremoti verificatisi nei secoli trascorsi di terremoti relativo a diversi secoli addietro e su un approccio probabilistico scientificamente valido. Fu così che il territorio italiano classificato in zona sismica, che nel 1980 copriva circa il 25% dell'intero territorio italiano, con la riclassificazione del 1981 arrivò al 45 % circa. Nel frattempo si sono ulteriormente sviluppati gli studi sulla sismicità storica e sulla conoscenza delle zone sismogenetiche italiane, così che recentemente si è proceduto alla classificazione dell'intero territorio nazionale che ha comportato un nuovo incremento delle zone a maggior rischio sismico. In pratica, se si escludono le zone a bassissima sismicità, definite come zone di IV categoria, è stato dichiarato sismico ben il 67% del territorio nazionale, con un incremento di circa il 50% del valore precedentemente stimato (in assoluto oltre il 22% rispetto alla precedente classificazione); vedasi fig.61 Mappa della pericolosità sismica in Italia Accelerazione orizzontale di picco (in g) con periodo di ritorno pari a 475 anni., Vedasi fig. 62 Classificazione anno 2006 delle Zone Sismiche.



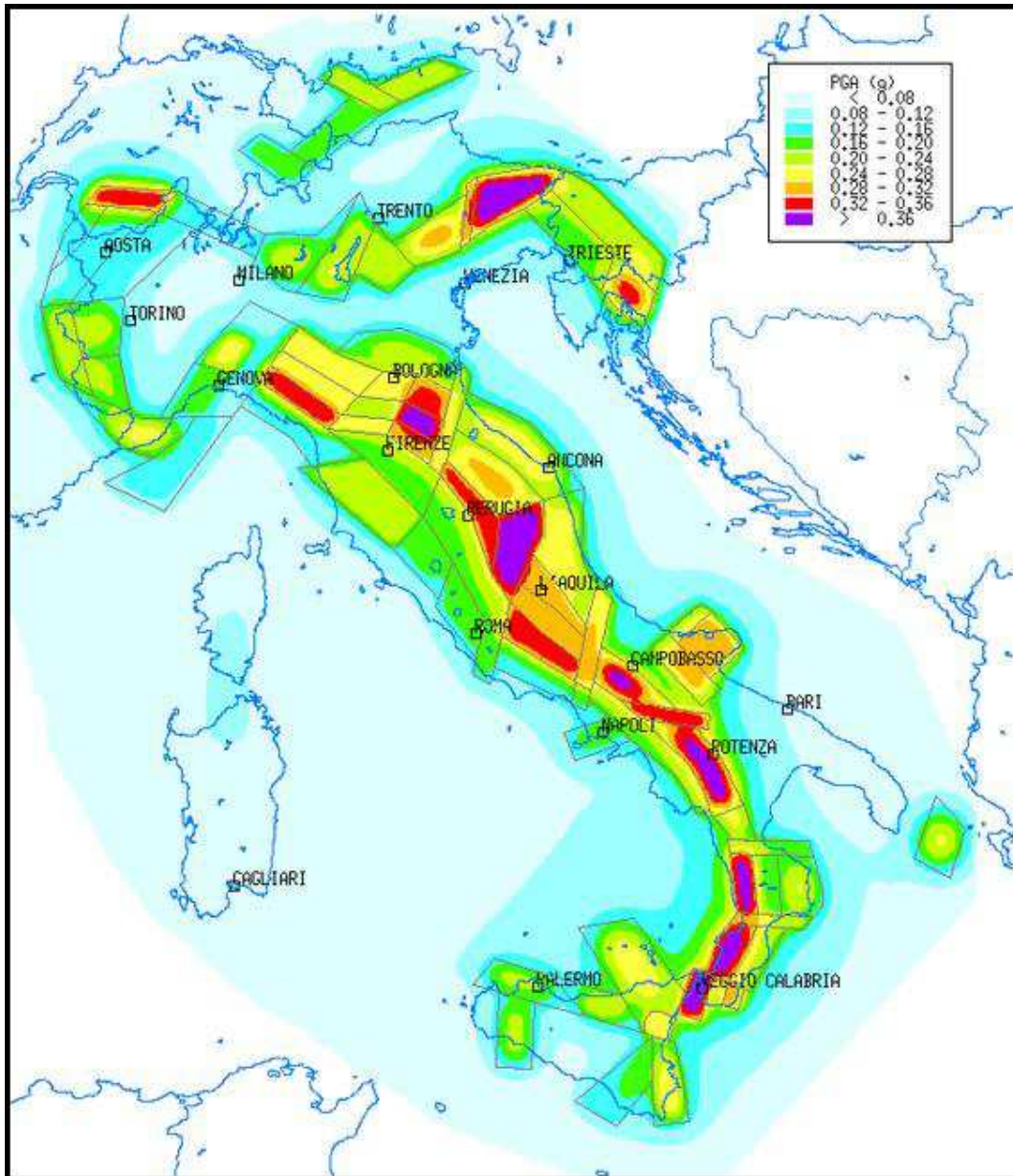


Fig. 61 Mappa della pericolosità sismica in Italia Accelerazione orizzontale di picco (in g) con periodo di ritorno pari a 475 anni.

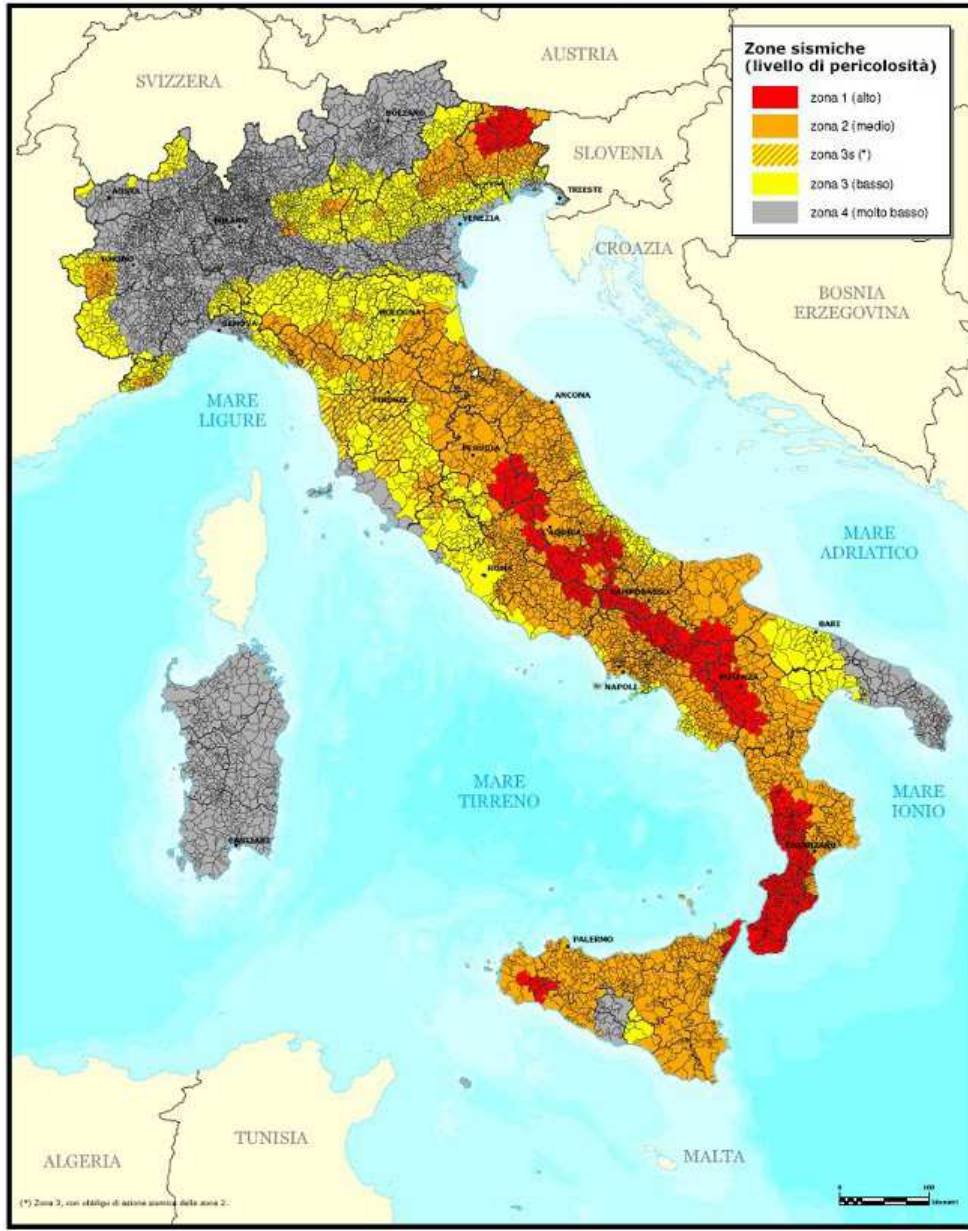


Figura 62 Classificazione sismica al 2006



3.2 - Le Norme Tecniche Italiane per le Costruzioni in Zona Sismica

3.2.1 Evoluzione delle norme tecniche

Per meglio comprendere l'evoluzione che ha subito la normativa italiana, riferibile alla regolamentazione del costruire in zona sismica, si espone una ricostruzione sintetica di fatti che si possono considerare come la presa di coscienza (necessità) del doversi dare regole per contrastare gli effetti di un sisma sul costruito. Tutto ciò sempre inquadrato nell'ottica di proseguire un percorso logico che dia man mano evidenza dell'importanza della regolarità strutturale nella normativa tecnica italiana.

3.2.2 Excursus del verificatosi nella storia passata

Sin dalla fine del '500 sono documentabili testimonianze della ricerca messa in atto per trovare un modo di realizzare edifici che potessero resistere ai sismi. Un esempio è lo studio fatto dall'architetto Pirro Ligorio in seguito alle scosse che colpirono Ferrara tra il 1570 e il 1574.

L'edificio da lui progettato, come sintesi delle Sue analisi, era una casa costruita con pietre e mattoni, articolata in sei vani (cinque dei quali rafforzati agli angoli) caratterizzata all'esterno da poderosi rinforzi angolari e da doppie arcate di mattoni con chiave di volta lapidea a protezione delle aperture sottostanti; da notare anche come, sopra le finestre, era posta l'ulteriore doppia protezione di una archeggiatura molto ribassata di mattoni e di un architrave di mattoni con concio lapideo centrale.

Altro esempio di risposta ad un evento sismico, quello della città di Noto (Sicilia) nel 1693, sono gli accorgimenti ivi adottati nella ricostruzione, quali:

- Il diverso rapporto tra altezza degli edifici e larghezza delle strade ricercato fin dall'immediato post-1693;
- La costruzione di ampie piazze, che rispecchia un atteggiamento volto a favorire la creazione di vie di fuga, da aprirsi negli spazi per lo più angusti dovuti all'antica formazione dei tessuti urbani, dovendo ricondurre, nella <ristrettezza> delle strade, la principale causa di morte, accertata dai tecnici dell'epoca;
- Il diffuso utilizzo di volte finte ("incannucciate") nell'apparecchiatura edilizia degli edifici storici del Val di Noto¹¹. Tale modalità costruttiva consente di raggiungere la

¹¹ In molti palazzi antichi i controsoffitti delle sale sono realizzati mediante leggere volte ad incannucciata. Esse derivano dalle vitruviane concamerationes, portate alla notorietà da Philibert de l'Orme nel suo Trattato del 1561 e denominate camera canna o camor canna nelle regioni dell'Adriatico centrale. Tali volte erano realizzate con le stesse tecniche indicate per i plafoni ma con l'impiego di canne lacustri intrecciate a formare una sorta di trama e



finalità di realizzare una volta che, risultando essere non spingente, appare meglio resistere ad un sisma (Nifosi, 1988, pp. 37 s.);

- Il ricorso ad un più ampio spessore murario nelle costruzioni, quasi sempre oggetto di un generalizzato ampliamento;

- L'impiego di poderosi pilastri, preferiti all'uso delle colonne, dato che, per opinione diffusa - non veritiera -, la sezione (orizzontale) rettangolare si pensava offrisse una maggiore resistenza nelle strutture verticali.

- Una forma regolare dell'edifici affinché la struttura fosse semplice e lineare.

Il 1783 poi generò una intensa produzione di progetti e trattati di architettura antisismica, che segnarono, in questo campo, il primato europeo della cultura scientifica del Regno di Napoli (Due Sicilie), riprendendo quelle che erano state le precoci intuizioni del napoletano Ligorio.

Sin dal '600 si può vedere come cominci a prender piede il concetto fondamentale di regolarità che verrà ripreso come punto cardine nei secoli successivi. In buona sostanza gli esempi esposti possono considerarsi, a tutti gli effetti, non già una normativa avente carattere "generale" a regolamentazione del come costruire per contenere gli effetti di un sisma ma piuttosto l'adozione di "Regole - Suggerimenti" edilizi aventi un campo di applicazione locale quindi il precorrere i tempi in termini di linee guida che interessano ambiti locali (comuni; ecc:).

3.2.3 Le Norme di 1^a Generazione

Con questa locuzione sono convenzionalmente ricomprese le norme del come costruire emanate fino al 1962 e inserite nella normativa edilizia. Con riferimento alla normativa sismica nazionale rientrano in questa categoria:

- le Istruzioni per la ricostruzione di Reggio Calabria del 1784;
- il R.D. n.193 del 1909;

ordito, sostenute e innervate da centine in modo da offrire appiglio allo strato di calce e gesso. Questi ultimi erano posti in opera a formare un unico masso intero sul quale si dipingeva l'affresco. La struttura di sostegno della volta è quindi realizzata mediante centine, costituite da tavole lignee accostate e chiodate tra loro al fine di delineare la curva direttrice della volta. Esse poggiano direttamente sulle pareti o in appositi incavi e sono generalmente irrigidite da listelli di dimensioni minori, disposti trasversalmente in modo che l'insieme abbia la capacità di sorreggersi autonomamente. Talvolta le centine sono invece sostenute mediante un sistema di tiranti lignei che le collegano a membrature superiori di un solaio o a quelle di una struttura posta a sostegno della volta stessa. Spesso l'orditura di tali volte è messa in evidenza dal differente comportamento termico delle parti piene (centine) rispetto alle parti di intonaco libere, che provoca un differenziato accumulo di polvere all'intradosso e ne mette in evidenza la tessitura.



- tutte le norme intermedie tra il 1909 ed il 1962, come il D.L.L. n.1526 del 1916 ed il R.D. n. 431 del 1927;
- la Legge n. 1684 del 1962.

Tali norme erano principalmente basate su un approccio di tipo “*prescrittivo*”, ovvero sulla definizione di una serie di indicazioni progettuali da rispettare per ridurre la vulnerabilità delle costruzioni.

Ad esempio, nelle Istruzioni per la ricostruzione di Reggio Calabria a seguito del terremoto del 1783, si fornivano alcune norme di edificazione necessarie a garantire: a) *la regolarità strutturale* (aspetto dell'edificio semplice ed elegante); b) *la riduzione delle sollecitazioni e delle spinte* (altezza limitata a due piani fuori terra e divieto di balconi e cupole); c) *un comportamento scatolare* (fasciatura di ferro); d) *la riduzione delle eccentricità tra baricentro delle masse e rigidzze* (scala centrale).

Altre indicazioni inerenti una “*risposta*” al sisma sono quelle derivanti dall'adozione della tipologia di costruzione civile denominata a “*casa baraccata*”.¹² “Il sistema della casa baraccata fu studiato proprio per superare i limiti degli edifici tradizionali in pietra calabresi (vedasi fig.63). I principi appresi sulle costruzioni in legno sono ben illustrati da Gianbattista Mori, che riporta come le osservazioni in situ evidenziassero che gli edifici scampati al terremoto erano quelli che avevano avuto un comportamento unitario e che questa unità era data dal fatto che ogni parte della struttura era ben collegata alle altre. Una delle soluzioni al problema di poter unificare la struttura è proprio quella discussa e illustrata da Vivenzio nella *Istoria de' Tremuoti*. ” *L'intero edificio, dal tetto alle fondazioni, appare tenuto insieme da una robusta intelaiatura lignea. I telai sono doppi, collegati da rinforzi trasversali, e prevedono elementi diagonali a croce che legano insieme i montanti ai bordi delle finestre con l'ossatura principale dell'edificio*”. L'obiettivo dichiarato di Vivenzio era di proporre che tali strutture fossero tutte in legno, con tetti leggeri in assiti di legno (in sostituzione delle pesanti coperture tradizionalmente usate nell'Italia meridionale), elementi di tamponamento e dettagli costruttivi in legno. Ma prevede anche che le cavità dei muri fossero riempite in pietra o conglomerato. Il tipo di edificio che egli illustra, perciò, si presenta non tanto come una costruzione lignea, ma come soluzione costruttiva mista. Le descrizioni di questa casa *antisismica* fornite da Vivenzio - che, fra l'altro, a Suo sostenere, avrebbe dotato l'area di edifici comodi e sani - sono tecnologicamente precoci rispetto a quanto verrà in seguito sviluppato da diversi punti di vista. In primo luogo, il principio di legare insieme come in un'unica unità strutturale l'intera costruzione rappresenta un'acuta comprensione del modo in cui gli edifici reagiscono ai terremoti.

¹² Stephen Trobiner, *La casa baraccata: un sistema antisismico nella Calabria del XVIII secolo*, in *Costruire in Laterizio* 56, pp. 111-112, 1997.



In secondo luogo, l'adozione di diagonali di controventatura che si sviluppano per l'intera costruzione per fornire resistenza alle azioni laterali è una soluzione estremamente efficace. Terzo luogo, la forma dell'edificio è simmetrica, e ciascuna delle parti di cui si compone, con quella centrale di dimensioni maggiori, è basata su un quadrato perfetto. Le unità laterali, scrive Vivenzio, contraffortano quella centrale, e se quest'ultima dovesse crollare, non si ribalterebbe sulla strada. Intuizioni, quelle del Vivenzio, che non sono suffragate da un perché scientifico per cui gli edifici con configurazione “*simmetrica rispondano meglio di edifici di forma irregolare alle sollecitazioni del terremoto.*”

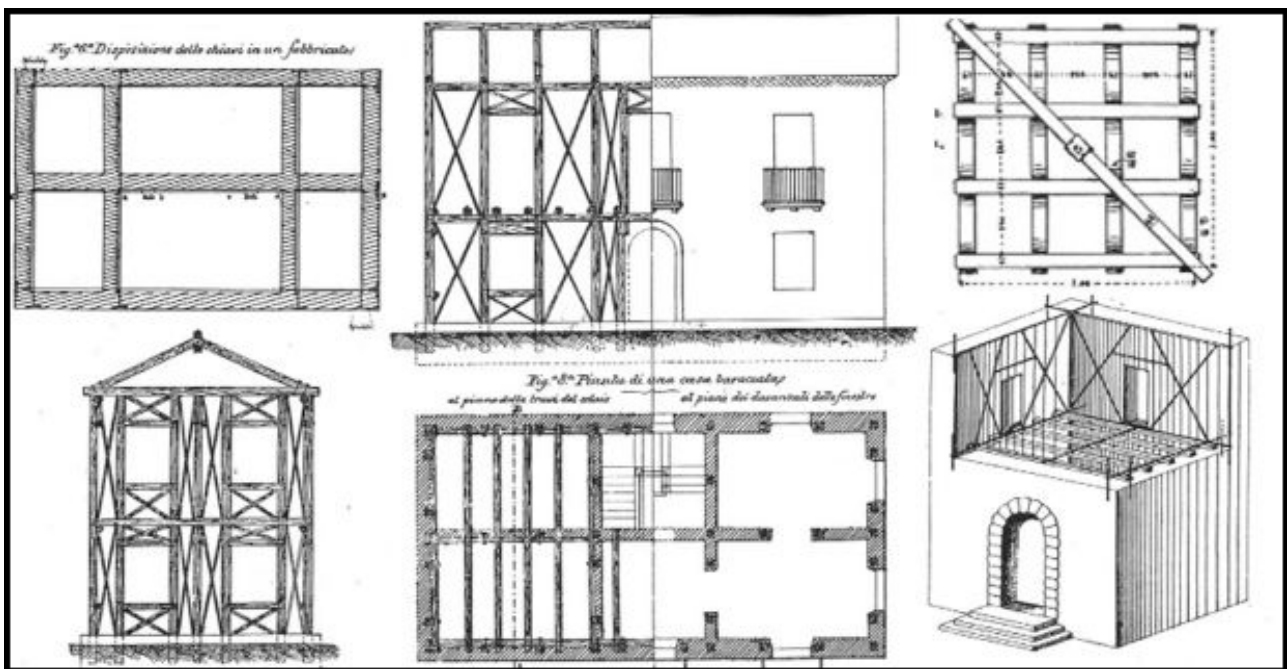


Figura 63 Struttura di “Casa Baraccata”

Da quanto esposto si può dedurre che vengono a formularsi prescrizioni, a carattere locale “Città di Reggio Calabria”, circa il come realizzare i nuovi edifici andandosi a formare una presa di coscienza inerente taluni aspetti del come progettare che sono riferibili a quella sopra citata “*regolarità*” quale requisito imprescindibile in zona sismica. Prescrizioni, quelle sovraesposte, che quindi non estendono i loro ambiti applicativi a carattere “nazionale” - es. Regno delle due Sicilie - ma sono interventi “puntuali”, come più volte verrà esposto, generatisi quali risposta, causa - effetto, di un sisma.

Nel 1883 il sisma di Casamicciola, isola d’Ischia, ha come conseguenza di indurre l’allora Governo, a fissare alcuni primi principi che, riguardanti la costruzione in una zona soggetta a sismi, pongono l’attenzione sulla posizione di dove costruire usando, come base per come realizzarle, le stesse della teoria della “*casa baraccata*” sopra

citata.¹³

In seguito a questo evento, il re Umberto I emanò il R.D. del 29 agosto 1884, n. 2600, con cui veniva approvato il Regolamento Edilizio Speciale per i comuni dell'isola d'Ischia. Tale provvedimento era molto simile a quello emanato dal governo delle Filippine dopo il terremoto disastroso che colpì Manila nel 1880. Nel regolamento, composto da trentanove articoli, si vietava la costruzione di nuove abitazioni in muratura se non con il sistema baraccato, con intelaiatura in legno o in ferro.

Anche in questo caso, nonostante che l'Italia avesse conseguito una unità quale nazione, vengono ad adottarsi non già norme aventi carattere generale da applicarsi su tutto il territorio italiano ma specifiche per un'area - Isola d'Ischia - quale ennesimo esempio di un intervento puntuale generato per "*rispondere*" agli effetti di un sisma.

Nel 1907 L'ing. Baratta¹⁴, commenta il nuovo regolamento sismico promulgato con R.D. del 16 Settembre 1906 a seguito del terremoto calabro dell'8 Settembre 1905, mettendolo a confronto con il regolamento precedentemente emanato, per l'Isola d'Ischia, a seguito del terremoto del 28 Luglio 1883. Egli, così facendo, di fatto dà inizio, nella Sua accurata disanima, ad affrontare un tema che oggi è classificato come "*micro zonazione sismica*".

La generalità di questa formulazione è stato oggetto di critica in relazione al fatto che all'epoca della sua promulgazione si sarebbero dovuti stabilire, in via preventiva ed in modo specifico come attuato per l'Isola d'Ischia, i limiti delle zone riconosciute più o meno pericolose, allo scopo di avere poi la certezza di una corretta applicazione (adozione) di detta norma nei piani regolatori dei centri abitati "*individuati*" come ricadenti in zone soggette ad eventi sismici. Tale norma, da individuare come la prima a carattere generale, quale applicabilità su tutto il territorio italiano, di fatto risulta carente nel dare quelle indicazioni che poi si sarebbero dovute adottare dai vari Regolamenti edilizi locali per cui all'atto pratico inutilizzabile ed inutilizzata.

Per quanto le critiche dell'Ing. Baratta siano da considerarsi appropriate non si può non riconoscere che, sebbene in modo schematico, la norma del 1906 nell'art.1 individua la necessità di dover operare una scelta delle aree, e nell'art.2 fornisce alcuni criteri di scelta per lo meno per quanto riguarda l'aspetto riferibile alle stesse. Quindi, in buona sostanza, già si prefigura quindi una micro zonazione del territorio.

¹³ articolo 5 della legge 2 marzo 1884, n. 1985

¹⁴ Mario Baratta (Voghera, 1868 – Casteggio, 1935) è stato un geografo italiano. Tra i suoi molteplici interessi spicca in particolare la sismologia storica, disciplina di cui è considerato il fondatore.



Il R.D. n.193 del 18 aprile 1909, emanato a seguito del terremoto di Messina del 1908 (vedasi fig.64), può essere considerato a tutti gli effetti come la prima normativa sismica in Italia. In tale Codice, infatti, venne, per la prima volta, introdotta una modellazione qualitativa delle azioni sismiche, costituita da un sistema di forze verticali ed orizzontali che simulavano, rispettivamente, la componente sussultoria ed ondulatoria dei terremoti e viene ribadita l'importanza della simmetria e regolarità delle strutture.



Figura 64 Terremoto Messina 1908

Con il Regio Decreto n.431 del 1927 venne invece introdotto il concetto di zona sismica ovvero di macrozonazione del territorio nazionale, suddiviso in modo empirico in due zone (prima e seconda categoria) a ciascuna delle quali competevano diverse forze sismiche di progetto. Le leggi che seguirono apportarono tutta una serie di modifiche e prescrizioni aggiuntive, tra le quali le più significative furono quelle sui limiti in altezza delle costruzioni e quelle sul valore delle azioni sismiche orizzontali.

L'excursus delle norme sopra esposte - Il R.D. n.193 del 18 aprile 1909 al R.D.L. del 1937, n. 2105 - viene presentato, riportandone gli aspetti salienti ivi trattati, per dare evidenza come nelle stesse, via via che venivano ed essere emanate, si spostava l'oggetto del normato da un intervenire in aree più o meno a carattere specifico (interessate da sisma) a un dettare regole che erano da porsi alla base dei regolamenti edilizi che i vari Comuni dovevano adottare.

3.2.4 Le Norme di 2^a Generazione

La revisione della normativa operata nel 1962 non portò nulla di innovativo circa il come dover costruire in zona sismica (si escludano aspetti marginali quali la limitazione dell'azione sismica verticale che fu applicata solo alle strutture a sbalzo),

eppure la cultura scientifica aveva fatto notevoli passi avanti. Nel 1959 era stato organizzato a Messina un convegno di Ingegneria Sismica, che aveva visto la partecipazione dei più noti studiosi americani, giapponesi ed italiani (particolarmente partecipi all'evento), eppure bisogna arrivare al 1974 per assistere ad un "sostanziale", aggiornamento delle norme sismiche adottate in Italia, quale definizione delle azioni da doversi considerare, finalmente consapevoli della realtà fisica del fenomeno - sisma -. Le norme di seconda generazione nascono in Italia con la legge n. 6 del 2 febbraio 1974. Questa legge ha innovato fortemente il quadro normativo che attiene alla sicurezza delle costruzioni, sia in generale che per le zone sismiche. Anzitutto è opportuno ricordare che questa legge ha risentito, durante la sua fase di formazione, degli effetti del processo di attuazione del decentramento amministrativo già avviato dal DPR 14 Gennaio 1972, n.8, in particolare per quanto riguardava il trasferimento delle competenze dello Stato, in materia urbanistica, alle Regioni. Di ciò ha dovuto tener conto la nuova legge nel disciplinare aspetti che potessero interferire con la disciplina urbanistica, generale e di settore (ad esempio, questioni riguardanti l'idoneità dei siti all'edificazione, le larghezze stradali, le altezze degli edifici in rapporto alla larghezza delle strade, gli intervalli di isolamento). Questa data è dunque significativa per capire come lo Stato cominci a delegare alcuni compiti a livello più locale, permettendo poi incongruenze nei piani redatti dalle stesse Regioni rispetto alla normativa nazionale. Le norme di II generazione mantengono la trattazione della regolarità in zona sismica e tale impostazione sarà seguita anche nelle successive redazioni sino alle attuali norme tecniche del 2008 in cui, come premessa alle trattazioni in dettaglio delle costruzioni in zona sismica, viene per l'appunto posto un capitolo dedicato alla regolarità delle costruzioni, perciò indicata come requisito fondamentale¹⁵. A tal proposito vedere il cap. 1.4.

Conclusioni Sviluppo Normativa Sismica

Ciò che si è voluto esporre, quale panoramica dell'evoluzione temporale della norma antisismica in Italia, ha la finalità di fornire un quadro che, pur in modo sintetico, dia evidenza di come questa si sia evoluta tenendo conto, sin da prima dell'unità d'Italia, del tema della regolarità. Elemento preso come indicazione imprescindibile del costruire in zona sismica.

¹⁵ NTC 2008, *Caratteristiche generali delle costruzioni-Regolarità*, Cap. 7.2.2



3.3 - Le Norme Edilizie in Italia

Dopo aver inquadrato l'iter di evoluzione nazionale della normativa tecnica, legandola al tema della regolarità e alla sua resa di coscienza, si devono comprendere i risvolti dell'applicazione di questa tematica in ambito locale. Per questo vanno analizzati i Regolamenti Edilizi comunali.

Le realtà locali e dunque i Regolamenti edilizi, in Italia, hanno acquisito maggiori margini decisionali sin dagli anni '70 con la delocalizzazione di alcuni poteri come la determinazione di altezze massime da rispettare, larghezza della sede stradale con relative distanze degli edifici che vi si affacciano ecc. Tra questi aspetti vi sono alcuni riconducibili alla regolarità della struttura (tema che non viene affrontato direttamente) quali l'utilizzo di piani pilotis, arretramenti di fronte e fronti unici su strada. Essendo regolamenti emessi a livello locale, essi presentano differenze sostanziali tra loro e si sono analizzati alcuni esempi. Nello specifico i Comuni di Avellino, Soncino, Messina e Reggio Calabria.

Per dar seguito a tale verifica sono stati presi in esame due elementi legati alle problematiche esposte precedentemente quali: 1) *altezze* e 2) *distanza tra edifici*.

Il primo Comune esaminato è quello di **Avellino** (zona sismica 2)¹⁶.

AVELLINO	NORME EDILIZIE	NORMATIVA TECNICA	CONSIDERAZIONI
Altezze	L'altezza di una parete esterna è la distanza verticale misurata dalla linea di terra (definita dal piano di marciapiede o di sistemazione esterna dell'edificio) alla linea di copertura (definita: per gli edifici coperti a terrazza, dal piano di calpestio	Per le tipologie strutturali: costruzioni di legno e di muratura non armata h massima 2 piani Per le altre zone h max secondo capacità deformative e	La normativa edilizia permette un arretramento in elevazione che favorisce un'irregolarità contraria a quanto permesso nella normativa tecnica.

¹⁶ Comune di Avellino, *Regolamento Edilizio*, 2007



	<p>del terrazzo stesso, e, per gli edifici coperti a tetto, dall'intradosso della falda a filo esterno muro, o, se la pendenza del tetto supera il 35% dalla metà della proiezione verticale del tetto).</p> <p>In caso di configurazioni complesse con le linee di terra e di copertura non orizzontali e a profilo variabile, si scompone la parete (con linee verticali) in elementi quadrangolari, triangolari e/o mistilinei, aventi un dislivello massimo di mt.2,40, e, per ogni elemento (visto come parete a se stante), si considera la media delle altezze.</p> <p>Una parete sopraelevata in arretrato rispetto ad un fronte esterno del fabbricato, non determina incremento dell'altezza della parete sottostante se l'arretramento è maggiore o uguale dell'altezza di sopraelevazione (linea di visuale libera $\geq 45^\circ$); se invece l'arretramento è inferiore alla altezza della sopraelevazione, questa altezza si somma a quella della parete sottostante, determinando così lo spostamento della sua linea di copertura al livello più alto della parete sopraelevata.</p>	<p>dissipative e della classificazione sismica del territorio.</p>	
--	--	--	--



Distanze edifici		La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento. Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base, può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $ag \cdot S/0,5g$.	Nelle norme edilizie comunali risulta assente ogni tipo di valutazione riguardante le distanze da rispettare tra gli edifici.
------------------	--	---	---

Conclusioni: Il regolamento edilizio comunale permette un arretramento del fronte che può portare ad asimmetrie nella struttura e ad una trasmissione delle forze non lineare, con conseguenti problemi già descritti nei capitoli precedenti. (vedasi cap. 1.4)



Il secondo comune esaminato è **Soncino** (zona sismica 2)¹⁷.

SONCINO	NORME EDILIZIE	NORMATIVA TECNICA	CONSIDERAZIONI
Altezze	Zona Storica urbana di recupero-7,5m Zona Storica agricola di recupero-7,5m Zona residenziale di vecchio impianto-10,5ml Zona residenziale di recente impianto intensivo-12ml Zona residenziale di recente impianto semintensivo-10,5ml Zone produttive di vecchio impianto-9ml Zone produttive di recente impianto-9ml Zona commerciale esistente-7ml Attrezzature urbane in zona di completamento-7ml Zona residenziale di espansione mediante ristrutturazione urbanistica-7,5ml Zona residenziale di espansione normale-9ml Zona produttiva di espansione-9ml Zona commerciale di espansione-10,5ml Zona produttiva commerciale di espansione-9ml	Per le tipologie strutturali: costruzioni di legno e di muratura non armata h massima 2 Per le altre zone h max secondo capacità deformative e dissipative e della classificazione sismica del territorio.	Nelle norme edilizie, in riferimento a quanto scritto nel PRG, vengono date indicazioni riguardanti le altezze degli edifici nelle diverse zone ma non vi è alcun riferimento ai materiali da utilizzare o alle capacità deformative, caratteristiche invece afferenti a quanto prescritto dalla normativa tecnica antisismica.

¹⁷ Comune di Soncino, *Regolamento Edilizio*, 2010



<p>Distanze edifici</p>	<p>Le costruzioni sotterranee e le costruzioni accessorie quali autorimesse, rustici, lavanderie, ecc. con altezza interna media non superiore a 2,40 ml. ed altezza esterna, misurata rispetto al marciapiede stradale, comunque non superiore a 2.70 ml., nonché le altre costruzioni accessorie prive di copertura come piscine, vasche, trincee, campi da gioco ecc. non costituiscono edificio, salvo che il riferimento sia costituito dal ciglio di una strada carrabile esistente o di progetto.</p> <p>Tali costruzioni accessorie potranno pertanto essere ammesse nel rispetto delle norme di Codice Civile, anche in confine con spazi pubblici e privati a condizione che mantengano, se fuori terra, rispetto agli edifici principali un distacco minimo pari a 3,50 ml ed osservino, rispetto alle strade, le distanze prescritte dalle norme di zona.</p> <p>Non costituiscono edificio neppure i silos, le ciminiere, gli elevatori e gli altri impianti tecnologici che, in zona produttiva o agricola, si accostino a edifici destinati a produzione, magazzino e allevamento di bestiame, salvo che il riferimento sia costituito dal ciglio di una strada carrabile esistente o di progetto, da un confine privato, da una parete finestrata di locali abitabili.</p>	<p>La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento. Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base, può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $ag \cdot S/0,5g$.</p>	<p>Nelle norme edilizie viene data la deroga per fini estetici per la realizzazione di fronti unitari. Tale indicazione favorisce fenomeni di martellamento che la debita distanza dettata anche nelle norme tecniche antisismiche evita.</p>
-------------------------	--	--	---



	<p>Per distanza si intende la distanza topografica (cioè misurata in orizzontale) minima intercorrente tra gli elementi considerati, esclusi corpi aggettanti non più di 1,50 ml, quali balconi aperti, mensole, pensiline e cornicioni di gronda.</p> <p>Per comprovati motivi estetici e/o funzionali, può essere inoltre richiesta la costituzione di fronti unitari degli edifici e/o l'edificazione a confine, al fine di costituire una cortina edilizia che dia continuità ai fabbricati.</p>		
--	--	--	--

Conclusioni: Il regolamento edilizio di Soncino permette, per eccezioni di valore estetico, di mantenere un fronte unico su strada ma, come già evidenziato precedentemente, in zona sismica si deve fare molta attenzione poiché avere un edificio con diverso periodo di oscillazione rispetto a quelli adiacenti, sia che siano di nuova costruzione oppure già esistenti, può portare a fenomeni di martellamento che vanno a minare la solidità strutturale portando ad un possibile crollo parziale o totale dello stesso.



Il terzo Comune esaminato è quello di **Reggio Calabria** (zona sismica 1)¹⁸.

REGGIO CALABRIA	NORME EDILIZIE	NORMATIVA TECNICA	CONSIDERAZIONI
Altezze		Per le tipologie strutturali: costruzioni di legno e di muratura non armata h massima 2 piani Per le altre zone h max secondo capacità deformative e dissipative e della classificazione sismica del territorio.	Nelle norme edilizie comunali si evince l'assenza di ogni tipo di indicazioni riguardanti le altezze massime consentite per gli edifici.
Distanze edifici		La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento. Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base, può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $ag \cdot S/0,5g$.	Nelle norme edilizie comunali si evince l'assenza di ogni tipo di indicazioni riguardanti le distanze da tenere tra gli edifici.

¹⁸ Comune di Reggio Calabria, *Regolamento Edilizio*, 2002



Conclusioni: Nell'art. 20 comma 3d della Legge Urbanistica Regionale viene indicato come necessario il rispetto delle condizioni di pericolosità sismica come definito dalla normativa tecnica¹⁹. Con tale scelta, in ogni Comune, nella fattispecie quello di Reggio Calabria, non si evidenziano indicazioni specifiche circa i due elementi sopra citati (altezza e distanza), evitando così di incorrere in possibili incongruenze.

Il quarto Comune esaminato è quello di **Messina** (zona sismica 1)²⁰, che ha un regolamento edilizio approvato con D.D.R. n. 686/2002 e n. 858/2003. Dall'esame di detta documentazione si evince che, trattando dell'altezza dei fabbricati (art.60), viene presa come base la normativa tecnica per le costruzioni in zone sismiche:

MESSINA	NORME EDILIZIE	NORMATIVA TECNICA	CONSIDERAZIONI
Altezze	Salvo quanto disposto dal P.R.G. e dalle vigenti norme tecniche per la costruzione in zone sismiche, nei fabbricati in angolo su strade di diversa larghezza è consentito nel fronte della strada più stretta e per uno sviluppo, a partire dall'angolo, pari alla larghezza della strada su cui prospetta, una altezza uguale a quella consentita dalla strada più larga. (cit. art.60)	Per le tipologie strutturali: costruzioni di legno e di muratura non armata h massima 2 piani Per le altre zone h max secondo capacità deformative e dissipative e della classificazione sismica del territorio.	Appare di tutta evidenza come nel caso delle altezze viene posto l'obbligo di dar seguito al previsto, nel merito, dalla normativa antisismica .

¹⁹ Norme per la tutela, governo ed uso del territorio – Legge Urbanistica della Calabria, 16 Aprile 2002

²⁰ Comune di Messina, *Regolamento Edilizio*, 2003



Distanze edifici		La distanza tra costruzioni contigue deve essere tale da evitare fenomeni di martellamento. Qualora non si eseguano calcoli specifici, lo spostamento massimo di una costruzione non isolata alla base può essere stimato in 1/100 dell'altezza della costruzione moltiplicata per $ag \cdot S/0,5g$.	Nelle norme edilizie comunali si evince l'assenza di ogni tipo di indicazioni riguardanti le distanze da tenere tra gli edifici.
------------------	--	--	--

Conclusioni: In questo caso non vengono posti limiti riguardo le distanze da mantenere, quindi si sottintende la visione esclusiva della normativa tecnica.

L'analogia in tutti i Comuni analizzati è una totale assenza di trattazione del problema pilotis legato alla regolarità strutturale in alzato. Tale sistema costruttivo risulta, anzi, essere favorito dalle comuni indicazioni che, ne escludono la tassabilità come SUL (superficie utile lorda), se utilizzato come piano terra aperto.



3.4 Confronto tra Normativa Tecnica e Regolamenti Edilizi in Italia

Dall'esame dei Regolamenti Edilizi analizzati, si giunge a poter concludere come non vi sia alcuna univocità di criterio adottato per stabilire, nel proprio territorio, quali siano i requisiti minimi inderogabili oggetto di specifica normativa.

In appresso si esaminano le incongruenze emerse dall'analisi di detti Regolamenti Edilizi e P.R.G. con lo scopo di focalizzare quegli aspetti del come il corretto costruire, in precedenza oggetto di specifiche considerazioni, risulti disatteso, in più casi, o trattato in modo da ritenersi improprio.

Elemento che appare meritevole di una specifica analisi, per come lo stesso è trattato nei Regolamenti Edilizi, è quello riferibile ai così detti *piani pilotis* ubicati al piano terra di un edificio. In questo caso, *tale spazio*, non risulta essere valutato (Regolamento – PRG), come riferibile alla cubatura edificata dell'edificio a cui appartiene, ma spazio posto al di fuori della stessa e quindi non oggetto e soggetto ai limiti (rispondenza alla norma) propri dell'edificabilità. Nello specifico si riporta, quale esempio ritenuto significativo, il previsto nel Regolamento Edilizio adottato dal Comune di Sanfront, provincia di Cuneo (zona sismica 3), che, come eccezione nel calcolo della SUL (Superficie Utile Lorda), stabilisce, all'art.18 punto 4 del Regolamento, di non annoverare : “ *i porticati, i "pilotis", logge, i balconi e i terrazzi.*”²¹ Questo comporta, quale ovvia conseguenza, che viene favorita tale pratica costruttiva per essere “*sfruttata*” per la realizzazione di parcheggi alla base degli edifici.

Tale “*dimenticanza*” e/ o superficialità di trattazione, come già ampiamente trattato nelle pagine precedenti, può provocare gravi problemi *di piano soffice* che minano alla base, in caso di sisma, l'integrità strutturale dell'edificio.

L'analisi dei Regolamenti Edilizi ha fatto emergere delle problematiche legate ad aspetti “locali”, riconducibili a singoli Comuni, come quello inerente l'arretramento degli edifici, casistica riferibile al Comune Avellino, che, come evidenziato nel cap. 1.5, deve annoverarsi tra le *irregolarità* della struttura in zona sismica. Tutto questo può comportare problemi di “*immobilizzazione*”, nel caso in cui si abbiano piani bassi più rigidi e parte libera più flessibile con conseguenti variazioni di rigidità e resistenza nella struttura. Tutti elementi negativi, in termini di resistenza, in una struttura sottoposta all'azione di un sisma.

Altro problema emerso è quello dei fronti unici permessi in zona sismica, anche se solo per esigenza di natura estetica, come nel caso del comune di Soncino. Anche in questa casistica, come già esposto nel cap. 1.5, permettere tale modo di costruire può causare gravi danni dovuti ad effetti legati al martellamento tra gli edifici. Questa Problematica è molto viva nel panorama dei nuclei storici italiani, dove è usuale trovare fronti compatti (vedasi fig. 65)

²¹ Regolamento edilizio di Sanfront, 3 giugno 2003 pag. 14



Figura 65 Esempio di fronte unico in centro storico



Figura 66 Martellamento

Fig.66

Sinistra: Lesioni per martellamento causato dalla differente altezza di edifici adiacenti;

Destra: Lesioni per martellamento tra edifici adiacenti in corrispondenza del cambio di asse della facciata.²²

²² Francesca Ceroni, *Il comportamento degli edifici in muratura sotto azioni sismiche*, Hevelius Webzine

Nel premettere che l'Italia è un "Paese" in cui il patrimonio edilizio, in particolar modo quello dei nuclei "centrali"- storici di tutte le città, è di rilevanza assoluta, sia in termini quantitativi che qualitativi (Monumenti; ecc.), viene a riscontrarsi una ulteriore carenza, nei Regolamenti Edilizi Comunali esaminati, che è quella riconducibile all'assenza di norme che regolino il come dover operare in ambito di restauri – ristrutturazioni dell'esistente, con specifico riferimento al patrimonio storico.

Con ciò si intende che non viene fornita alcuna indicazione del come approcciarsi ad interventi di adeguamento antisismico su edifici aventi importanza storica e non solo. Esempio emblematico di tale impostazione deficitaria riguarda i porticati (che strutturalmente minano la regolarità e la rigidità della struttura) di cui tutte le città italiane ne hanno ampie testimonianze. In tale caso sarebbe necessario che si prevedano, da codice, tipologie di interventi che, con metodologie che siano le meno invasive possibili e che siano differenziati per tipologie di porticati, pongano attenzione al problema della creazione di anomalie nella distribuzione di carico e di piano soffice.

Nel merito dell'argomento – Porticati – un esempio rilevante è rappresentato da quelli presenti nel Comune di Bologna. Qui si possono riscontrare anche tipologie di portico architravato su pilastri di mattoni dove non c'è traccia di elementi diagonali (saette) che aiuterebbero il pilastro lavorando a compressione e trazione alternativamente secondo il verso delle onde sismiche.



Figura 67 Portico di Piazza Cavour, Bologna

Nei portici ad arco come quello presente in Piazza Cavour (fig.67) l'effetto di ribaltamento provocato dalla spinta dell'arco è contrastato da pilastri massici. L'effetto resistente è reso più efficace nel caso di edifici di molti piani, sia perché i pilastri, in questo caso, devono essere molto più grandi ed anche perché il peso soprastante contribuisce alla stabilizzazione del pilastro stesso. Questo vantaggio però si riduce notevolmente in caso di terremoto, perché la grande massa muraria soprastante produce un effetto molto gravoso e stressante per le strutture. Si tratta di una tipologia particolarmente vulnerabile al sisma proprio perché 'spingente'.²³

Infine, ma certamente tematica non meno importante, rispetto all'esposto, è quella riferibile alle particolari attenzioni che la progettazione di un edificio dovrebbe riservare alla distribuzione interna dei volumi; aspetto, quest'ultimo, condizionato dalla funzione che deve soddisfare l'edificio. Aspetto per cui, essendo spesso i piani terra degli edifici dedicati a grandi negozi costituiti da piante libere o ospedali che necessitano di ampi spazi liberi, si favoriscono le condizioni di *piano soffice*. Anche in questo caso nulla è esposto nei Regolamenti edilizi, nello specifico, e la Normativa tecnica non contiene una trattazione sulla distribuzione interna degli edifici. Quindi tale argomento risulta completamente assente nelle trattazioni seppur rappresenta un tema importante nell'ambito della progettazione preliminare di un edificio.

In ambito italiano l'assenza di ogni regolamentazione riguardo le configurazioni interne architettoniche e strutturali in zona sismica ha contribuito al materializzarsi di questo problema negli edifici scolastici (fig.68). Questo perché molto spesso diverse funzioni debbono essere svolte in un edificio scolastico, cosicché diversi tipi di ambienti sono richiesti (aule, laboratori, palestra, teatro, aula magna). Se le differenti funzioni si svolgono nello stesso edificio, esso quasi sempre avrà forma irregolare e/o molto articolata, sia in pianta che in elevazione. L'irregolarità di forma degli edifici, che spesso si traduce in irregolarità strutturale, è una caratteristica molto sfavorevole alle loro prestazioni sotto sisma, determinando concentrazioni di danno in alcune specifiche parti o in singoli piani, fino a causarne il collasso. Oltre a ciò, altre peculiarità degli edifici scolastici, connesse alle funzioni svolte all'interno, influiscono in modo sfavorevole sul loro comportamento sismico. Gli edifici scolastici, infatti, necessitano di ampie finestre, per illuminare le aule e le palestre, e di ampie porte, oltre che di aule grandi e prive di "ostacoli" strutturali (pilastri), e dunque di grandi luci strutturali. Se si guarda alle conseguenze prodotte dalle grandi luci e dalle grandi aperture nella configurazione degli edifici in muratura, si evidenzia immediatamente come i maschi murari resistenti siano generalmente molto snelli e con un'area resistente talvolta inadeguata rispetto ai pesanti carichi verticali che debbono

²³ Fernando Lugli, *La sicurezza sismica dei portici: elementi di indirizzo per la tutela e la valorizzazione*



sostenere contemporaneamente all'azione del terremoto. Spesso gli edifici hanno lunghi corridoi che servono le aule e che separano completamente la facciata dal resto della struttura muraria. Per gli edifici in c.a., le ampie aperture nelle tamponature possono dar luogo a irregolarità in pianta, e dunque ad effetti torsionali d'insieme e in elevazione, e dunque al cosiddetto piano soffice, così da creare debolezze locali e domande di duttilità inammissibili. L'eccessiva altezza d'interpiano, spesso dettata dalla presenza della palestra e/o un'aula magna, aumenta la deformabilità della struttura e il pericolo di caduta dei pannelli di tamponatura sotto terremoti anche di bassa intensità. Nella fig.68 sottostante sono mostrate alcune configurazioni planimetriche di scuole superiori e inferiori, che mostrano le irregolarità in pianta, le ampie finestrate e le grandi luci strutturali che caratterizzano gli edifici scolastici.²⁴

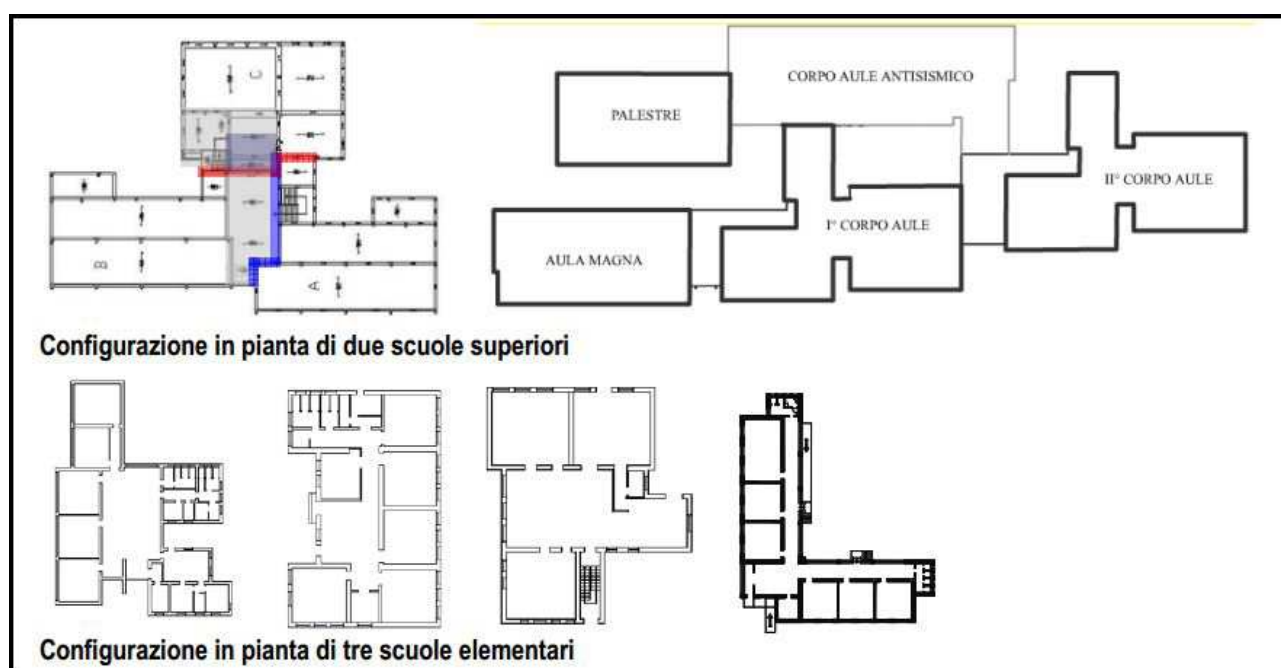


Figura 68 Tipiche configurazioni irregolari di edifici scolastici

3.5 Problematiche Legate ai Centri Storici e Linee Guida Sovrintendenza

Il tema della regolarità strutturale si confronta, in Italia, anche con delle realtà tipiche del nostro Paese, quali sono i centri storici. Questi ultimi presentano porticati

²⁴ Mauro Dolce, *La sicurezza sismica nelle scuole italiane*, 2004



al piano terra o asimmetrie in pianta o in elevazione, per le quali un blando intervento rischia di non risolvere adeguatamente il problema sismico, con effetti comunque distruttivi o dannosi.

La situazione diviene ancor più problematica se si considera che la legge²⁵, per i beni culturali tutelati, permette di derogare, in caso di restauro, alla normativa vigente.

Per i beni (edifici) tutelati, in caso di restauro, è sempre necessario attenersi ad interventi di miglioramento. Con il termine “miglioramento” si deve intendere l’esecuzione di opere in grado di far conseguire all’edificio un maggior grado di sicurezza, rispetto alle azioni sismiche, con un livello di protezione al sisma che non necessariamente sia uguale a quello previsto per le nuove costruzioni. Nel caso dei manufatti architettonici di interesse storico e culturale esistono, infatti, oggettive difficoltà a definire procedure di verifica dei requisiti di sicurezza, analoghe a quelle applicate per gli edifici ordinari, in quanto la loro varietà tipologica e la singolarità specifica dei “monumenti” (anche dovuta alla storia di ogni edificio) non consentono di indicare una strategia univoca ed affidabile di modellazione ed analisi. Per quanto riguarda gli interventi da attuarsi, non sempre è possibile quantificarne, con precisione, la reale efficacia ed è impossibile portare in conto, attraverso un procedimento esclusivamente quantitativo, le esigenze di conservazione. Da tutto ciò ne discende che, in tali situazioni, è inevitabile dover accettare un livello di rischio, in caso di evento sismico, più elevato rispetto a quello delle strutture ordinarie. Rischio considerato accettabile piuttosto che intervenire in modo difforme alle regole stabilite per la conservazione del patrimonio culturale.

Per ovviare a ciò risulta possibile adottare, in applicazione ai concetti espressi, la seguente procedura:

- La valutazione dell'indice di sicurezza sismica nella situazione attuale (funzionamento accertato): in questa fase si dovrà tenere debitamente conto anche di valutazioni qualitative su situazioni di vulnerabilità riconosciute, ma difficilmente quantificabili;

²⁵ Il “Codice dei beni culturali e del paesaggio”, Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, stabilisce all’articolo 4 che le funzioni di tutela del patrimonio culturale sono attribuite allo Stato ed esercitate dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali; ciò era già riconosciuto dall’articolo 16 della Legge n. 64, del 2 febbraio 1974 (Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche). Per quanto attiene agli interventi sui beni tutelati, l’articolo 29 del Codice, al comma 4 precisa che per i beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente il restauro comprende l’intervento di miglioramento strutturale, e al comma 5 dispone che il Ministero definisce, anche con il concorso delle regioni e con la collaborazione delle università e degli istituti di ricerca competenti, linee di indirizzo, norme tecniche, criteri e modelli di intervento in materia di conservazione dei beni culturali.



- La valutazione dell'indice di sicurezza sismica alla quale il manufatto può essere portato, con interventi compatibili con le esigenze di tutela delle proprie caratteristiche specifiche:

a) se l'indice di sicurezza sismica raggiungibile, che tiene conto della pericolosità del sito e della destinazione d'uso proposta, è compatibile, l'intervento di miglioramento è pienamente soddisfacente anche dal punto di vista della sicurezza, valutata attraverso un procedimento quantitativo;

b) se l'indice di sicurezza sismica raggiungibile è inferiore a quello auspicabile, ovvero sarebbero necessari interventi troppo invasivi, il progettista deve giustificare l'intervento ricorrendo anche a valutazioni qualitative, che dovranno essere esposte in una relazione esplicativa delle scelte fatte, ad integrazione della relazione di calcolo. In particolare, si possono verificare due diverse situazioni, che devono essere giustificate nella suddetta relazione.

L'obiettivo è quello di evitare opere superflue, favorendo quindi il criterio del minimo intervento, ma anche evidenziando i casi in cui sia opportuno agire in modo più incisivo.

In conclusione, prendendo come base tali considerazioni, si può dedurre che, se l'indice di sicurezza sismica raggiungibile risultasse inferiore a quello auspicabile e quindi non bastasse un semplice miglioramento delle capacità a "resistere", la Sovrintendenza si riserva la possibilità di valutare le conclusioni dei progettisti per valutare l'opportunità – necessità di dover agire sull'edificio. Questo risulta un problema nel caso degli edifici storici dove si voglia inserire una funzione d'emergenza, poiché si costringerebbe gli stessi ad essere de localizzati invece di adeguare l'edificio nel modo meno invasivo. Se questo fosse possibile, evitando problemi logistici, potrebbe funzionare, ma nel caso in cui questa possibilità non vi fosse, risulta una grave mancanza nelle indicazioni delle linee guida, poiché non si potrebbe de localizzare la funzione. Infine, le commissioni della sovrintendenza atte a valutare il progetto potrebbero non accettare comunque gli interventi precludendo i lavori.

3.6 - Le Norme Tecniche Europee per le Costruzioni in Zona Sismica

Una base comune a livello europeo che delinea i criteri per le costruzioni in zona sismica è rappresentato dall'Eurocodice 8, che si allinea alle norme nazionali vigenti e consente al professionista l'utilizzo di criteri di calcolo comuni ed adottabili anche



all'estero. Questo codice, come anche quello italiano, pone in risalto il problema della regolarità da garantire nelle strutture degli edifici, delineando principi specifici:

3.6.1 Criteri di regolarità in pianta secondo l'Eurocodice 8

1. La struttura dell'edificio deve essere approssimativamente simmetrica, rispetto a due direzioni ortogonali, per quanto riguarda la rigidezza laterale e la distribuzione della massa.
2. La configurazione della pianta deve essere compatta. La dimensione delle rientranze in una direzione non deve superare il 25% dello sviluppo in pianta del perimetro dell'edificio nella direzione corrispondente.
3. La rigidezza degli impalcati nel loro piano deve essere sufficientemente grande rispetto a quella laterale degli elementi strutturali verticali.
4. In presenza della distribuzione delle forze sismiche prescritta dal codice, applicata tenendo conto dell'eccentricità accidentale, per ciascun piano stabilisce che lo spostamento massimo, nella direzione dell'azione orizzontale, non deve superare del 20 % lo spostamento medio dell'impalcato.

3.6.2 Criteri di regolarità in elevazione secondo l'Eurocodice 8

1. Tutti i sistemi strutturali resistenti alle azioni orizzontali si devono sviluppare senza interruzioni dalle fondazioni fino alla sommità dell'edificio.
2. Piano per piano sia la rigidezza che la massa devono rimanere costanti o ridursi gradualmente dalla base alla sommità.
3. Allorché fossero presenti degli arretramenti si devono applicare le seguenti disposizioni:
 - a) nel caso di arretramenti graduali che conservino la simmetria assiale, l'arretramento ad un certo piano in una data direzione non deve essere maggiore del 20% della dimensione in pianta del piano precedente nella medesima direzione;
 - b) nel caso di unico arretramento entro il 15% dell'altezza totale del sistema strutturale principale partendo dal basso, esso non deve essere maggiore del 50% della dimensione in pianta del piano precedente nella direzione corrispondente. In tal caso, la Comportamento sismico degli edifici intelaiati in c.a. con irregolarità in pianta parte della struttura che cade nel perimetro descritto dagli impalcati dopo l'arretramento deve essere progettata in modo da sopportare almeno il 75% delle forze orizzontali di taglio che si svilupperebbero in tale zona in un analogo edificio senza la base allargata;



c) Nel caso in cui gli arretramenti non conservassero la simmetria, la somma degli arretramenti di tutti i piani in una data direzione non deve essere maggiore del 30% della corrispondente dimensione in pianta del primo piano ed i singoli arretramenti non devono essere superiori al 10% della dimensione in pianta del piano precedente

3.7 - Le Norme Tecniche Estere per le Costruzioni in Zona Sismica

In questo capitolo vengono trattate una serie di normative che, per analogia e argomento, si ritiene forniscano un quadro significativo di quanto previsto, in altre nazioni, circa la tematica inerente il presente studio (Tesi). Vengono esposti, nel seguito, tre esempi quali quelli riferiti agli U.S.A. (fig.69), il Giappone (fig.70) e la Turchia (fig.71).

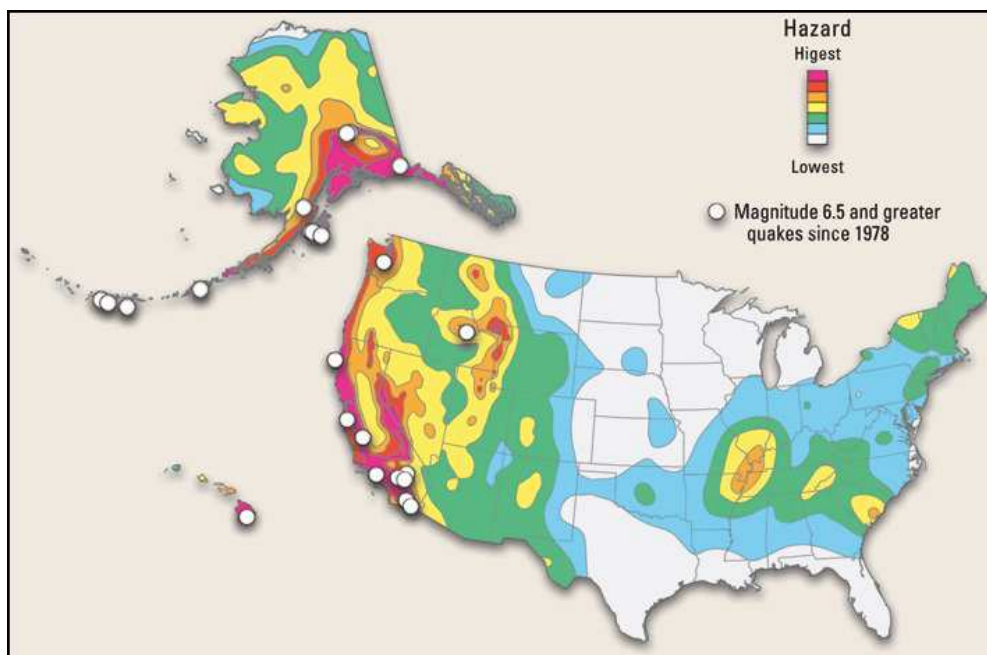


Figura 69 Zone sismiche negli U.S.A.

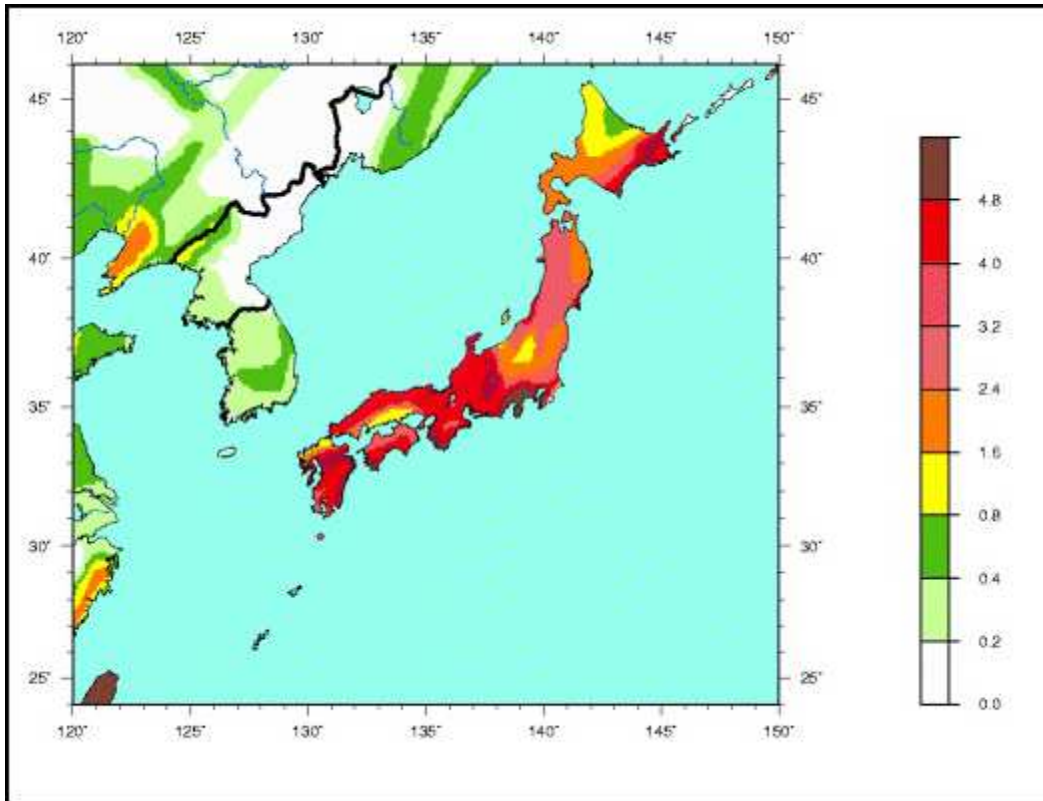


Figura 70 Zone sismiche in Giappone

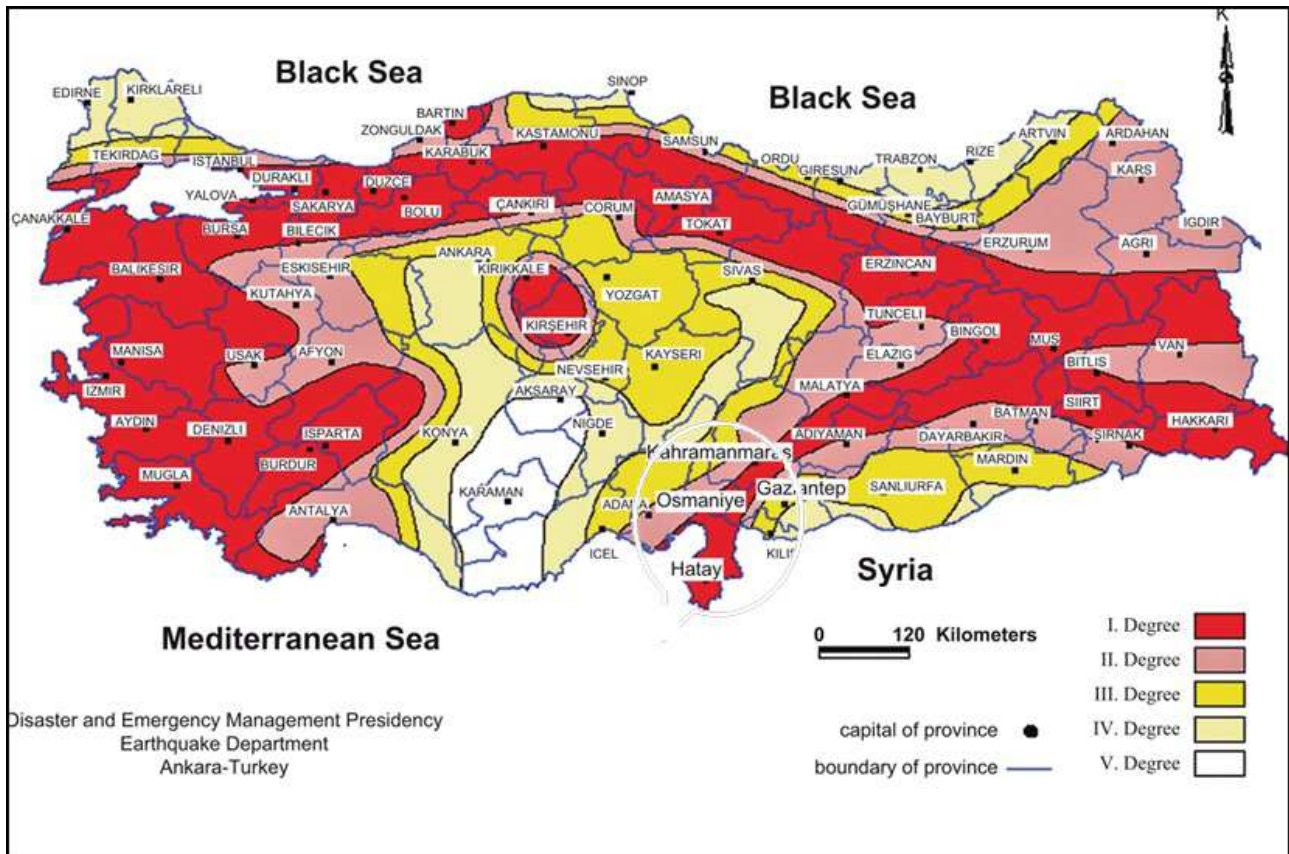


Figura 71 Zone sismiche in Turchia

3.7.1 Normativa Americana

Dalla metà del '900 3 organizzazioni hanno pubblicato Norme edilizie che sono state adottate da parte delle comunità statunitensi quali norme da seguire; ciascuno di questi è riferibile ad una macro area degli U.S.A.:

1- Il The Building Officials and Code Administrators International (BOCAI) ha pubblicato il National Building Code, che è assunto come base per le costruzioni negli Stati centrali e del Nord-Est.

2-Il The Southern Building Code Congress International (SBCCI) ha pubblicato lo Standard Building Code, che era comunemente adottato nel Sud-Est del Paese.

3-Il The International Conference of Building Officials (ICBO) ha pubblicato l'Uniform Building Code, che era comunemente usato negli stati a Ovest degli U.S.A.



Ciascuna delle tre norme tendeva a sviluppare – in termini di regole - particolari esigenze connesse con le aree in cui queste venivano ad essere applicate.

Il National Building Code, applicato dagli stati a Nord-Est e quelli centrali, si interessò prevalentemente degli aspetti della resistenza al fuoco e della costruzione urbana. Lo Standard Building Code è stato influenzato dai frequenti uragani negli Stati del Sud-Est, sviluppando quindi requisiti per contrastare l'azione del vento.

L'Uniform Building Code rifletteva, invece, l'interesse degli Stati ad Ovest e divenne quindi un punto di riferimento per lo sviluppo e l'adozione di requisiti per le costruzioni antisismiche.

Le tre organizzazioni continuarono a pubblicare i loro codici per più di 50 anni e, alla fine degli anni '90, aderirono ad un'unione sotto un'unica organizzazione chiamata International Code Council (ICC) che, nel 2000, pubblicò una singola serie di codici edilizi chiamati I-Codes. Questi codici sono stati elaborati per essere applicati sia livello nazionale che internazionale ed includono:

- 1- L'International Building Code (IBC) indirizzato a quasi tutti i tipi di edifici;
- 2- L'International Residential Code (IRC) indirizzato ad abitazioni per uno o due famiglie;
- 3- L'International Existing Buildings Code (IEBC) indirizzato agli edifici esistenti.

Ad oggi, tutti i 50 Stati che compongono gli Stati Uniti d'America hanno adottato codici edilizi basati sugli I-Codes. Alcuni hanno adottato i codici alla “*lettera*”, altri li hanno modificati o adottati solo in parte.

3.7.1.1 Rischi Accettabili

Per le normative edilizie vigenti negli U.S.A. i limiti di rischio accettabile per gli edifici sono i seguenti:

- 1- Una bassa possibilità (nell'ordine del 10%) di parziale o totale collasso di una qualsiasi struttura nel caso del sisma più intenso considerato dai codici edilizi. Questi rari effetti, dovuti ad un sisma di tale intensità, sono chiamati risk-targeted maximum considered earthquake (MCER) e la probabilità con cui si possono manifestare varia da Nazione a Nazione. Questo primo punto saldo di prevenzione al collasso serve a garantire, prima di tutto, la salvaguardia delle vite.



2- Limitare le possibilità di collasso a circa il 6% come risultato dell'MCEr per strutture dedicate ad assemblee pubbliche in una singola stanza o area (es. teatri o centri per convegni), per strutture con un grande numero di occupanti (es. edifici per uffici e stadi); e per strutture che ospitano un alto numero di persone con mobilità limitata (es. prigionieri) o chi la società ritiene sia particolarmente vulnerabile e importante da proteggere (es. asili).

3- Per strutture che contengono una grande quantità di materiali tossici, che possono essere un sostanziale rischio per il pubblico (es. fabbriche di prodotti chimici), si deve prevedere una bassa probabilità che, in caso di fuoriuscita di tali materiali, si danneggi la struttura.

4- Limitare le possibilità di collasso a circa il 3% come risultato dell'MCEr per strutture ritenute essenziali per la risposta ad emergenze a seguito di disastri naturali (es. polizia, pompieri e ospedali) e limitare le possibilità che le scosse di terremoto causino danni a queste strutture, alla loro parte meccanica, elettrica e ai condotti idrici, evitando che queste non si possano poi utilizzare nel dopo-terremoto.

5- Per tutte le strutture, minimizzare il rischio che, durante i terremoti, vengano a generarsi detriti derivanti da danni al rivestimento, ai soffitti o ai sistemi meccanici o elettrici che cadendo possano provocare lesioni agli occupanti.

6- Per quanto possibile, evitare perdite economiche associate a danni ai sistemi strutturali e non strutturali come risultato di eventi sismici moderati relativamente frequenti.

3.7.1.2 Importanti Caratteristiche di Progettazione per la Costruzione in Zona Sismica

Per soddisfare i requisiti di prevenzione al sisma la progettazione di un edificio deve, per quanto ivi trattato, poter rispondere ad alcuni principi. Questi includono:

- 1- Fondazioni stabili;
- 2- Percorsi di carico continui;
- 3- Adeguata rigidità e resistenza;
- 4- Regolarità;
- 5- Ridondanza;
- 6- Duttilità e resistenza;



7- Robustezza.

Queste disposizioni sono fondamentali in aree soggette ad alto rischio sismico. Nelle aree meno soggette a sismi possono essere derogate alcune di queste disposizioni.

Regolarità

Una struttura è considerata “*regolare*” se la distribuzione della sua massa, resistenza e rigidità è tale da consentirle di oscillare in modo uniforme quando sottoposta a scuotimento e cioè che il movimento laterale su ogni lato della struttura sia circa lo stesso. Le strutture regolari tendono a dissipare l’energia del sisma uniformemente in tutta la struttura, con conseguenti danni meglio distribuiti e più leggeri. In una struttura irregolare, invece, il danno può essere concentrato, causando danni locali ingenti.

L’Uniform Building Code, normativa americana, non riporta esplicitamente tale principio e prescrive che le strutture in zona sismica devono essere dotate di un’adeguata resistenza al fine di sopportare gli spostamenti laterali indotti dal moto del suolo, considerando la risposta inelastica della struttura stessa quale sua sovra resistenza, sua duttilità, nonché il tipo di sistema resistente alle forze laterali. La normativa italiana, infine, non contiene alcun principio guida. L’Eurocodice 8 e l’Uniform Building Code definiscono rispettivamente i criteri di regolarità e di irregolarità tanto in pianta quanto in elevazione. Nel 42° Capitolo III – Aspetti normativi - la normativa italiana fornisce, invece, una generica descrizione delle strutture irregolari.

3.7.1.3 Criteri di irregolarità in pianta secondo l’Uniform Building Code

1. Esiste irregolarità torsionale quando il massimo spostamento orizzontale di piano, ortogonale ad uno degli assi principali del sistema e calcolato, applicando le azioni orizzontali con la prescritta eccentricità accidentale, è superiore a 1.2 volte la media degli spostamenti orizzontali delle due estremità del piano.
2. Rientranze in una direzione maggiori del 15% della dimensione della struttura in quella direzione.
3. Discontinuità negli impalcati di piano o brusche variazioni di rigidezza fra essi, come aperture all’interno del perimetro degli stessi con area maggiore del 50% dell’intera area o come variazioni di rigidezza maggiori del 50% da un piano all’altro.



4. Discontinuità negli elementi resistenti laterali, come spostamenti di elementi verticali fuori dal piano, tali da modificare il percorso delle forze.

5. Presenza di elementi resistenti laterali disposti in modo non simmetrico o non parallelo rispetto ai due assi ortogonali principali del sistema resistente alle azioni orizzontali.

3.7.1.4 Criteri di irregolarità in elevazione secondo l'Uniform Building Code

1. Irregolarità di rigidezza: il piano soffice. Un piano soffice è quello in cui la rigidezza laterale totale è inferiore al 70% di quella del piano superiore, o minore all'80% della media delle rigidezze dei tre piani superiori.

2. Irregolarità di massa. Tale irregolarità dovrà considerarsi quando la massa di un piano qualsiasi è superiore al 150% della massa dei piani adiacenti.

3. Irregolarità geometriche verticali. Queste esistono quando la dimensione orizzontale di un sistema resistente laterale ad un qualsiasi piano è maggiore al 130% di quella ai piani adiacenti.

4. Discontinuità verticali. Sono considerate discontinuità verticali, negli elementi resistenti laterali, gli spostamenti degli stessi fuori dal piano, di quantità maggiori della loro altezza.

5. Discontinuità nella capacità resistente. Il piano debole. Un piano debole è quello nel quale la resistenza di piano nella direzione della forzante è minore dell'80% della resistenza del piano superiore.

3.7.1.5 Applicazione da Parte di Stati e Comuni

Le normative esposte in precedenza risultano essere molto simili a quanto trattato dalla Normativa tecnica italiana. Differente è l'applicazione della normativa nazionale americana a livello regionale e comunale.

L'applicazione del codice passa anche dall'amministrazione dei diversi Stati e dei diversi Comuni degli USA. In tal senso, il codice nazionale viene preso come base e assunto "in toto" o in parte a seconda delle esigenze. Un esempio di tale processo sono il CBC (California Building Code) e il regolamento edilizio di Los Angeles. Si può quindi notare come vi siano analogie rispetto alla regolamentazione italiana.

Il regolamento edilizio della città di Los Angeles pone immediatamente, come punto fondamentale della verifica sulle strutture degli edifici, il problema sismico secondo le



prescrizioni già indicate nel Regolamento tecnico statale e nazionale. Vengono comunque indicate alcune eccezioni per quanto riguarda parti del codice non adottate e le verifiche sostitutive o aggiuntive previste.²⁶

3.7.1.6 Conclusioni Riguardo la Normativa Americana

La normativa adottata in America (Codici), si completa, nella sua trattazione, estendendo l'oggetto del regolamento a:

- vari sistemi costruttivi che si prevede si possano adottare;
- diverse tipologie di sistemi di ritegni antisismici, che è ipotizzabile possano essere utilizzati.

In sintesi, si può concludere che il normato negli USA, circa il come costruire, è un insieme di regole e di linee guida, da porre in essere nel progettare, che si integrano pienamente nei codici stessi²⁷.

Pur tuttavia, rientra nella discrezionalità delle Regioni e dei Comuni di poter adottare solo parti di detta normativa nazionale. Tutto ciò è sostanzialmente diverso da quanto, come già posto in evidenza, è previsto potersi applicare in Italia.

In ragione della tematica trattata con la presente tesi, appare di tutta evidenza che la Normativa Americana, ancorché in modo diverso e con limiti e possibili deroghe, pone una particolare attenzione all'aspetto della "regolarità" che deve avere una costruzione, imponendo limiti alle possibili geometrie da realizzare.

3.7.2 Normativa Giapponese

Le prime prescrizioni e normative sulle costruzioni redatte dal Governo giapponese risalgono al 1919 con l'Urban Building Law e regolano l'edificazione delle costruzioni nelle 6 più grandi città del Giappone. Nel 1920 viene introdotto il Law Enforcement Order, che determina un'altezza massima degli edifici pari a 30,48m (100 piedi) e contestualmente fornisce norme per come realizzare edifici con strutture in legno, mattoni, cemento armato e acciaio. Nello stesso anno, vengono introdotte anche le Law Enforcement Regulations, che introducono concetti e dettano regole afferenti: lo stress ammissibile dalle strutture; la qualità dei materiali e i carichi permanenti e

²⁶ Los Angeles Municipal Code, 2013

²⁷ FEMA, *Earthquake-Resistant Design Concepts*, 2010



accidentali. Anche in questo caso, non viene fatta alcuna menzione di requisiti antisismici che dovrebbero soddisfare le costruzioni (nuove o da restaurare).

Quale “*effetto*” - conseguenza del terremoto distruttivo, che ha interessato la regione del Kanto nel 1923, nell’anno successivo (1924) viene operata una revisione delle Law Enforcement Regulations introducendo, per la prima volta, l’argomento delle forze sismiche di progetto:

- Massima accelerazione del terreno (Università di Tokyo) = 0,3G
- La sollecitazione ammissibile come fattore di sicurezza nella progettazione 3
- Coefficiente sismico = $0,3/3=0,1$ W (fig.72)

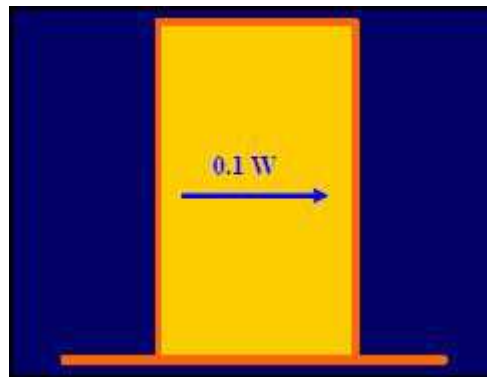


Figura 72 Coefficiente sismico

Norme che rimangono, in buona sostanza, immutate fino a dopo la seconda guerra mondiale, quando, per gli eventi bellici accaduti (massicci bombardamenti delle aree urbane ed industriali) si opera, nel Paese, una massiccia ricostruzione di edifici e infrastrutture.

Nel 1950 vengono introdotte nuove leggi per regolare l’edificazione di costruzioni:

- La Building Standard Law Per salvaguardare la vita e la salute delle persone. E per far questo vengono fornite norme minime da doversi rispettare riguardanti il sito, la struttura, le attrezzature e l’uso degli edifici;

- La Architect Law Per definire le qualifiche che dovevano soddisfare gli ingegneri per essere qualificati a progettare gli edifici e supervisionare i lavori di costruzione;

Con tali indicazioni, nasce, quindi, il primo vero e proprio Codice Edilizio in Giappone, facendo riferimento anche al Building Standard Law Enforcement Order e a linee guida dettate da AIJ Standards, Specifications e al JCI Guidelines, Specifications, Manuals.

Se si volesse trovare una prima analogia, tra il modo di intervenire in Giappone con quanto attuato in Italia - metodologia adottata per adeguare le norme sul costruire -, si può considerare che, come già messo in atto per quanto riguarda la normativa



antisismica italiana, anche in Giappone, le revisioni dei codici vengono adeguate solo a “valle” di un grave sisma, causa - effetto.

Nello specifico, il sisma del 1968 a Tokachi-oki di magnitudo 7.9 ha portato ad una revisione di emergenza della Building Standard Law nel 1971, andando a sviluppare ulteriormente i codici di progettazione sismica (es. aggiornando la regolazione della spaziatura dei ferri nelle colonne in cemento armato).

Nel 1981 vengono stilati determinati requisiti a cui debbono rispondere le strutture, quali:

- Esame della capacità di resistenza dei piani a collasso sotto effetto di forze laterali;
- Evitare la distribuzione irregolare delle rigidezze lungo il piano verticale, nonché l'eccentricità in pianta dell'edificio.

Nel 1998, dopo il terremoto di Kobe del 1995, viene nuovamente aggiornata la Building Standard Law e vengono introdotti i requisiti dati dalla Performance Based Design²⁸.

Infine, le disposizioni sismiche attinenti il Regolamento Edilizio del Giappone sono state significativamente riviste nel 2000 passando da un formato prescrittivo a un quadro basato su risultati fini ad espandere diverse alternative di progetto. In particolare, queste revisioni hanno ammesso l'applicazione di materiali di nuova concezione, elementi e sistemi strutturali nuovi. Tali disposizioni hanno inoltre incoraggiato gli ingegneri strutturali allo sviluppo e applicazione di nuove tecnologie di costruzione. Nel codice sono state riviste le definizioni precise per i requisiti di performance strutturale e le procedure di verifica sono state specificate sulla base di dati di risposta chiari e valori limite. Supponendo quindi che le proprietà dei materiali sono ben definite e il comportamento di una struttura è correttamente previsto, il codice dovrebbe essere applicabile a qualsiasi tipo di materiale e edificio, inclusi i sistemi di isolamento sismico.

Le nuove procedure portano alla valutazione e verifica delle prestazioni strutturali secondo un insieme di stati limite sotto carichi permanenti e accidentali, carichi di neve, le forze del vento e terremoti. Due stati limite devono essere considerati per la costruzione di strutture per garantire la sicurezza degli occupanti e limitare i danni dovuti ad un sisma. Per soddisfare tale requisito si deve progettare l'edificio in modo che questo non collassi né totalmente, né nei singoli piani. Lo stato limite ha lo scopo di prevenire e controllare i danni alla costruzione, anche se sono accettabili alcune deformazioni permanenti ai dispositivi che dissipano energia²⁹. Inoltre, nell'edilizia,

²⁸ Shunsuke Otani-Chiba University, *Historical Development of Building Codes in Japan*, 2007, Kobe

²⁹ Mistumasa Midorikawa - Izuru Okawa - Masanori Iba - Masaomi Teshigawara, *Performance-Based Seismic Design Code for Buildings in Japan*, 2001



vengono utilizzati materiali elastici in grado di assorbire le onde d'urto. Vengono stabiliti dei rapporti tra pianta e alzata, in modo che il baricentro della costruzione sia abbastanza basso da garantire una maggior stabilità. Si possono utilizzare materiali dal minor peso man mano che si aumenta con l'altezza. L'edificio deve avere una struttura simmetrica ed essere quanto più possibile privo di sporgenze. Inoltre, il terreno su cui verrà costruito un edificio deve essere solido e resistente, senza pericolo di cedimenti improvvisi.³⁰

3.7.2.1 Codice Sismico Attuale da Adottarsi per la Realizzazione di Edifici

Requisiti strutturali

Gli edifici devono soddisfare i requisiti strutturali designati secondo il tipo di struttura, superficie, altezza, ecc. come mostrato in fig.73 .

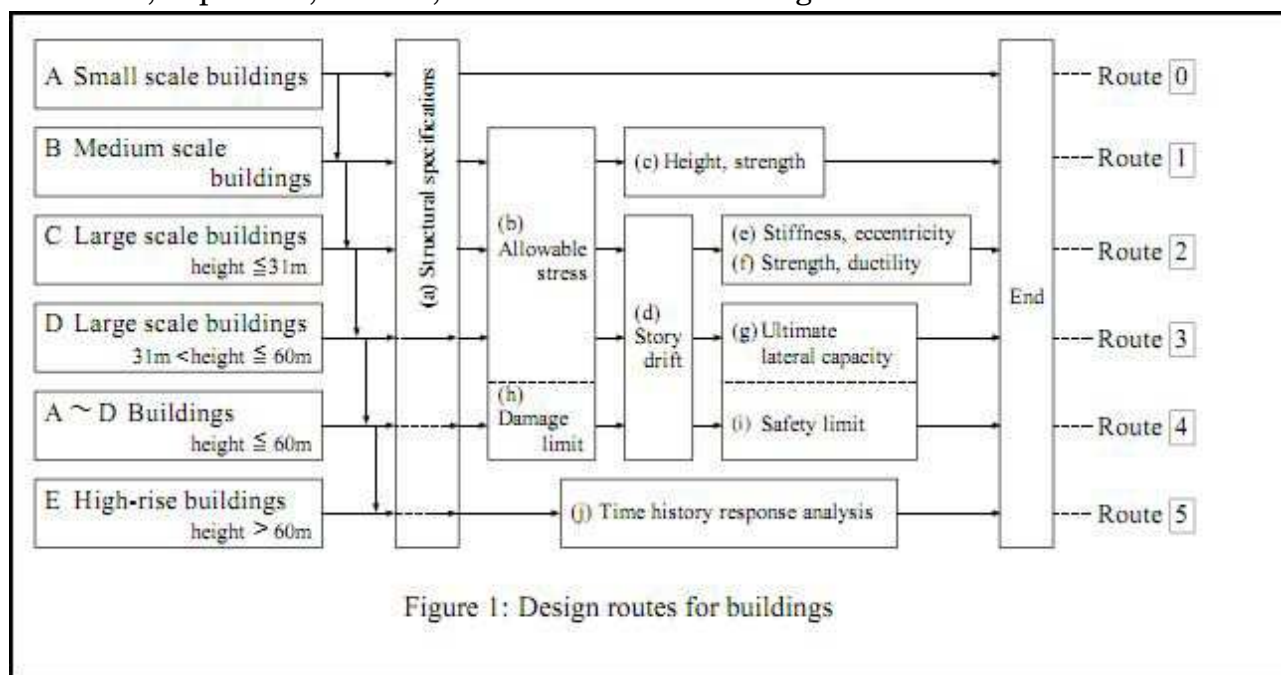


Figura 73 Percorsi per le costruzioni

- (a) le specifiche strutturali devono essere soddisfatte per tutte le costruzioni. (Alcuni di essi possono essere alleviati per il percorso 3, e la maggior parte di loro, tranne per la durabilità possono essere alleviati per i percorsi 4 e 5).
- (b) il calcolo dello stress ammissibile consiste nel verificare che lo stress causato dal taglio sismico laterale, per i movimenti dei terremoti moderati, non superi la tensione ammissibile per carichi temporanei. (Questo viene applicato per i percorsi 1 , 2 e 3).

³⁰ Elysa Fazzino, *Dalla California al Giappone, occhio alle norme antisismiche*, Sole 24 Ore, 9 Aprile 2009



- (c) le limitazioni di altezza , forza, ecc. hanno lo scopo di garantire (insieme con il calcolo della sollecitazione ammissibile e caratteristiche strutturali) la sicurezza sismica di edifici di piccola scala. (Questo si applica al percorso 1).
- (d) La limitazione di spostamento dei piani ha lo scopo di prevenire danni da sisma agli elementi non strutturali. (Questo si applica ai percorsi 2, 3 e 4).
- (e) La limitazione di rigidità ed eccentricità ha lo scopo di impedire la concentrazione di danni da terremoto ad una parte degli edifici. (Questo è applicato al percorso 2).
- (f) La limitazione di forza e duttilità ha lo scopo di dare adeguata resistenza e duttilità contro i movimenti dovuti al sisma. (Questo è applicato al percorso 2).
- (g) L'ultimo limite è legato alla verifica di capacità e prestazioni di un edificio ai movimenti laterali dovuti al sisma. (Questo è applicato al percorso 3).
- (h) Verificare che il danno dell'edificio rimanga entro il livello consentito per movimenti dovuti a terremoti rari. (Questo viene applicato al percorso 4).
- (i) Il limite di sicurezza è quello di verificare che l'edificio non crolli a causa di terremoti molto rari. (Questo viene applicato al percorso 4).
- (j) Analisi della risposta dei piani. (Questo viene applicato al percorso 5).

Struttura percorsi sismici:

Ogni sequenza di tutti i requisiti strutturali tra (a) a (j) forma un percorso di progettazione sismica, 0-5, come segue.

Percorso 0 non richiede alcun calcolo strutturale. La sicurezza sismica è realizzata da (a) specifiche strutturali. (Questo percorso è applicato a edifici di piccole dimensioni).

Percorso 1 richiede (b) il calcolo consentito per lo stress e alcune limitazioni (c) altezza, forza, ecc.

La sicurezza sismica è realizzata con il supplemento di (a) specifiche strutturali. (Questo percorso viene applicato a edifici di piccole e medie dimensioni).

Percorso 2 richiede (b) il calcolo delle tensioni ammissibili e le limitazioni di (d) spostamento di piano, (e) rigidezza ed eccentricità e (f) resistenza e duttilità. La sicurezza sismica è realizzata con il supplemento di (a) specifiche strutturali. (Questo percorso viene applicato agli edifici la cui altezza non superi 31 m).

Percorso 3 richiede (b) il calcolo delle tensioni ammissibili, (d) la limitazione dello spostamento dei piani e (g) il calcolo della capacità laterale finale. La sicurezza sismica è realizzata con il supplemento di (a) specifiche strutturali (alcuni di essi possono essere alleviati). (Questo percorso è applicato agli edifici la cui altezza non supera i 60 m).



Percorso 4 richiede verifiche per: (h) limitare i danni; (i) il limite di sicurezza; (d) la limitazione dello spostamento dei piani. La sicurezza sismica è realizzata con il supplemento di (a) specifiche strutturali che possono essere alleviate, ad eccezione per la durevolezza. (Questo percorso viene applicato agli edifici la cui altezza non superi 60 m).

Percorso 5 richiede un'analisi di risposta del piano (j) (per verificare la sicurezza sismica) e (a) le specifiche strutturali possono essere alleviate, tranne per la durevolezza. (Questo percorso viene applicato a tutti gli edifici, compresi quelli la cui altezza supera i 60 m).³¹

3.7.2.2 Conclusioni Riguardo la Normativa Giapponese

Soffermandosi unicamente sull'aspetto trattato con il presente studio – Regolarità Strutturale di un Edificio in Zona Sismica – si può concludere che, anche la normativa giapponese in tale materia, prima del 1981, appariva carente per poi, via via, subire sistematici aggiornamenti in cui, pur non trattando in modo specifico il così detto aspetto della “regolarità”, fissa parametri sull'attuazione di determinate verifiche delle strutture. Verifiche che, impongono condizionamenti alle costruzioni non in termini prescrittivi, ma di risultati che devono raggiungere. A quanto detto deve doverosamente aggiungersi l'indirizzo, dato dall'attuale normativa, nell'impiego di sistemi innovativi, la cui finalità è quella di dare una maggiore certezza del cosa potrebbe accadere ad un edificio in conseguenza di un evento sismico.

3.7.3 Normativa Turca

Molti terremoti catastrofici, nel corso della storia passata, hanno colpito varie Regioni della Turchia; tra questi riveste particolare rilevanza, per i danni prodotti, quello del 1939, denominato di Erzincan. Il valore massimo di magnitudo registrato di 7.8 ha causato la perdita di vite umane stimata in oltre 33.000 individui e la distruzione di circa 140.000 edifici.

Questo terremoto è considerato il punto di partenza di una normativa, di cui il Paese (Turchia) si è dotato, quali regole da applicare per una progettazione antisismica. Di conseguenza, è stato redatto nel 1940, dal Ministero dei Lavori Pubblici, il primo gruppo di disposizioni *legali esplicite* per come si debba procedere nel dar corso ad una progettazione che sia definibile antisismica. Disposizioni aggiornate, nel 1942, da un'altra versione delle stesse, completandole con una mappatura della zona sismica. Questo regolamento sismico è stato ulteriormente rivisto nel 1944 nell'ambito della

³¹ Yuji Ishiyama, Dr. Eng. Professor Emeritus, *Earthquake Damage and Seismic Code for Buildings in Japan*



legge n°4623. Legge, quest'ultima, che stabiliva tassativamente, che qualsiasi edificio costruito senza rispettare i requisiti del regolamento sarebbe stato demolito. Tuttavia questa clausola (ed anche le versioni future emesse) – pur nell'intenzione meritevole di plauso - è rimasta totalmente inevasa, in quanto inapplicabile, perché in essa non si indica chiaramente quale sia l'Autorità preposta a far rispettare tale disposizione. Il regolamento sismico è stato successivamente aggiornato, nel 1949 e nel 1953, per tener conto delle modifiche alla mappatura della zona sismica, non apportando alcun cambiamento significativo nel Codice; nel 1961 si è provveduto ad aggiornare il coefficiente di taglio alla base di un edificio. Le revisioni successive del 1968 e del 1975 hanno introdotto significativi miglioramenti, circa il come progettare, in riferimento ad aspetti connessi con gli effetti di un sisma. A tal fine si è fatto tesoro, per le società di ingegneria in Turchia, di quanto acquisito in campo internazionale, quali conoscenze nello specifico di questa materia. Per la prima volta, nel Codice del 1975 risultano essere trattati i concetti di duttilità e di livelli strutturali di un edificio. I principi della base design project sono stati introdotti dal codice del 1998, corredati da un importante dettaglio per i problemi di progettazione sismica .

In particolare, la versione più recente del Codice, emesso nel 2007, è stato un passo molto importante verso la progettazione secondo gli spostamenti attraverso i relativi requisiti per la valutazione sismica degli edifici esistenti³².

Ora la regolamentazione prevede un Codice che viene usato come base per tutte le costruzioni.

Il principio generale di resistenza ai terremoti, quali regole contenute in detto Codice, è quello di prevenire qualsiasi danno agli elementi strutturali e non strutturali di edifici per terremoti di bassa intensità, di limitare i danni ad elementi strutturali e non strutturali per terremoti di media intensità, e per impedire il complessivo o parziale crollo degli edifici a causa di terremoti ad alta intensità, al fine di evitare perdita di vite.

Linee guida generali per la costruzione di Sistemi Strutturali

- Il sistema strutturale della costruzione, così come ogni elemento strutturale del sistema, deve essere provvisto di una sufficiente rigidità, stabilità e capacità di assicurare un trasferimento ininterrotto e sicuro dei carichi sismici fino alle fondazioni.

- E' essenziale che i sistemi a solaio possiedano rigidezza e resistenza sufficiente per garantire il trasferimento sicuro dei carichi sismici laterali tra gli elementi del sistema

³² A. Ilki- Z. Celep, *Earthquakes, Existing Buildings and Seismic Design Codes in Turkey*, Arabian Journal for Science and Engineering, vol.37 n.2



strutturale. Nei casi in cui ci sia una risposta insufficiente a tali caratteristiche, opportuni elementi di trasferimento devono essere disposti sui solai.

- Al fine di dissipare una parte significativa dell'energia sismica immessa nell'edificio dal comportamento duttile del sistema strutturale, si devono utilizzare principi di progettazione *duttile*.

- La progettazione e costruzione di edifici irregolari deve essere evitata. Il sistema strutturale dovrebbe essere organizzato in modo simmetrico o quasi simmetrico e l'irregolarità torsionale dovrebbe essere evitata. A questo proposito, è essenziale che gli elementi strutturali rigidi, quali pareti strutturali, si collochino in modo da aumentare la rigidità torsionale dell'edificio. D'altra parte, le irregolarità verticali, generando piani deboli in qualsiasi piano, devono essere evitate.

3.7.3.1 A - Irregolarità di Piano Articoli correlati

A1 - Irregolarità torsione:

Nel caso in cui il fattore di torsione irregolare HBI, che è definito per qualsiasi delle due direzioni ortogonali come il rapporto tra il massimo spostamento relativo al piano terra, in qualsiasi piano per la relativa media di spostamento dei piani, è superiore a 1,2. [$HBI = (D_i)_{\max} / (D_i)_{\text{avr}} > 1.2$] allora gli spostamenti relativi dei piani sono calcolati considerando gli effetti di $\pm 5\%$ di eccentricità aggiuntive.

A2 - Discontinuità di piano:

In ogni piano;

I - Il caso in cui l'area totale delle aperture compresa quella di scale e vani ascensore è superiore a 1/3 della superficie lorda di pavimento,

II - Il caso in cui le aperture locali del solaio che rendono il trasferimento sicuro di carichi sismici difficili da elementi strutturali verticali,

III - I casi di brusche riduzioni della rigidità nel piano e forza di piani.

A3 - Proiezioni al piano:

I casi in cui le dimensioni di proiezioni in entrambe le due direzioni perpendicolari nel piano superano le dimensioni in pianta totali dell'edificio nelle rispettive direzioni di oltre il 20 %.

3.7.3.2 B - Irregolarità in elevazione Articoli correlati

B1 - interpiano Forza Irregolarità:

In edifici in cemento armato nel caso in cui il fattore di irregolarità HCI, che è definito come il rapporto tra l'area di taglio effettivo di qualsiasi piano e l'area di taglio effettiva del piano immediatamente sopra, è inferiore 0,80. [$h_{ci} = (A_e)_i / (A_e)_{i+1} < 0.80$] allora la definizione dell'area di taglio efficace in ogni piano è pari a:



$$A_e = A_w + A_g + 0.15 A_k$$

B2 – Irregolarità in interpiano (Soft Storey) :

Il caso in cui in ciascuna delle due direzioni ortogonali del terremoto, il fattore di irregolarità in rigidità h_k è definito come

$$[HKI = (D_i / h_i)_{avr} / (D_i + 1 / h_i + 1)_{avr} > 2.0 \text{ o}$$

$$HKI = (D_i / h_i)_{avr} / (D_i - 1 / h_i - 1)_{avr} > 2.0]$$

B3 - Discontinuità verticale degli elementi strutturali :

I casi in cui gli elementi strutturali verticali (colonne o pareti strutturali) vengono rimossi in alcuni piani e sostenuti da travi o colonne a soffietto sotto, o le pareti strutturali dei piani superiori sono supportate da colonne o travi sotto;³³

La normativa antisismica turca analizza le costruzioni in acciaio, cemento armato e mattoni, indicandone i requisiti necessari tenendo conto di tutti i nodi costruttivi.

3.7.3.3 Conclusioni Riguardo la Normativa Turca

Lo sviluppo che hanno avuto le regole via via adottate in Turchia, afferenti il come dover progettare per tener conto degli effetti prodotti su un edificio da azioni – coazioni prodotte da un sisma, si possono sintetizzare in appresso secondo la seguente elencazione:

1940:

- La prima serie di regole per la progettazione sismica è stata introdotta tenendo conto di un coefficiente di taglio alla base delle fondamenta di 0.10.

1944:

- Sono state incluse nuove zone sismiche (dopo la revisione nel 1942). Aspetto peculiare di queste norme risulta essere che è stato rivisto (ridotto) come valore 0,04-0,01 il coefficiente di taglio alla base di un edificio.

1961:

- Introdotta per la prima volta l' Interazione terreno – struttura; questa è stata presa in considerazione in base al tipo di struttura e la tipologie di terreno.

1968:

- Il concetto di duttilità era in qualche modo introdotto implicitamente attraverso colonne e travi di confinamento nelle vicinanze delle articolazioni. Ora è stato imposto il confinamento dei nuclei congiunti da barre trasversali.

- Sono state definite le dimensioni minime per le colonne, travi e pareti di taglio per la progettazione sismica.

- Sono state considerate caratteristiche dinamiche degli edifici nella valutazione della forza di taglio alla base.

³³ Turkish Earthquake Code, 2007



- È stata adottata la distribuzione triangolare inversa delle forze laterali.
- E' stata presa in considerazione l'irregolarità torsionale. La duttilità viene presa in considerazione a livello strutturale durante sia l'analisi che la progettazione.
- E' stata presa in considerazione la mappa della zona sismica rilasciata nel 1968.
- Sono state classificate delle strutture irregolari e regolari in base alla configurazione strutturale.
- E' stato introdotto il concetto di maggiore armatura longitudinale in corrispondenza delle zone terminali delle pareti.

Nel regolamento del 1998:

- Sono stati introdotti principi di progettazione di capacità.
- E' stata inclusa la definizione esplicita del terremoto di progetto in termini di probabilità di occorrenza.
- È stata data la definizione esplicita di prestazioni strutturali accettabili contro terremoto di progetto.
- E' stato definito lo spettro di progetto elastico.
- E' stato introdotto il fattore sismico di riduzione del carico in funzione della duttilità.
- Sono state incluse prescrizioni più dettagliate sul confinamento e regole esplicite per il rinforzo.
- Sono state definite e classificate le irregolarità.

Nel Regolamento – Codice del 2007:

- Viene introdotto un nuovo e ampio capitolo sulla valutazione della sicurezza sismica. Questo capitolo include l'analisi basata sulle prestazioni elastiche e anelastiche.
- Diverse tipologie di terremoti e prestazioni sono definiti per i vari tipi di edifici da progettare.
- Vengono fissati principi e particolari tecniche di adeguamento e Progettazione sia usando materiali convenzionali che avanzati.

In tema di “Regolarità Strutturale” si possono ripetere quelle che sono le linee guida dettate dalla vigente normativa, così come le stesse sovra esposte *“La progettazione e costruzione di edifici irregolari deve essere evitata. Il sistema strutturale dovrebbe essere organizzato in modo simmetrico o quasi simmetrico e l'irregolarità torsionale dovrebbe essere evitata. A questo proposito, è essenziale che gli elementi strutturali rigidi, quali pareti strutturali, si collochino in modo da aumentare la rigidità torsionale dell'edificio. D'altra parte, le irregolarità verticali, generando piani deboli in qualsiasi piano, devono essere evitate”*. Le conseguenze di tale indirizzo sono che la norma stabilisce prescrizioni del come procedere alle verifiche inerenti il rispetto di tale input.



3.7.4 Paragone tra Normative Estere e Normativa Italiana

Analizzando i dati emersi dall'esame delle normative estere (USA, Giappone e Turchia), posti gli stessi a confronto con la normativa vigente in Italia, è possibile formulare alcune osservazioni. Rispetto a quanto "regolamentato" negli Stati Uniti, si può notare come, in Italia, esista una pressoché netta separazione tra il previsto in seno alla normativa tecnica nazionale ed i Regolamenti Edilizi comunali. In America esiste una consequenzialità di prescrizioni e indicazioni tra le normative nazionali, quelle regionali e infine comunali.

Questi "passaggi" sono ben evidenti; infatti accade spesso, nella lettura dei vari regolamenti, che risultino essere rimarcate citazioni delle normative su scala più "grande" (Nazionale; Regionale) per essere assunte come elementi di base inderogabili degli stessi (Regolamenti). A quanto detto sono ammesse deroghe ove sia espressamente scritto che la normativa nazionale non è adottata. Questo poiché, al contrario del caso italiano, negli USA gli Stati hanno la facoltà di non utilizzare tutto il building code, soprattutto dovendo considerare la diversa conformazione del territorio degli Stati Uniti. In analogia rispetto alla normativa tecnica italiana l'Urban Building Code evidenzia l'importanza di un aspetto come la regolarità nella costruzione di edifici in zona sismica. In sintesi, si può affermare che negli USA c'è sempre chiarezza delle regole da dover seguire nella progettazione.

Il confronto con la normativa giapponese mette in evidenza l'esistenza di sostanziali differenze, rispetto a quella italiana, poiché in questo Paese è presente solo una normativa nazionale a cui attenersi, per cui non vi sono "scappatoie" o la possibilità di incorrere in differenti interpretazioni riguardo al come dover progettare in generale e tanto meno per ciò che attiene l'argomento sismico. Questo naturalmente implica un'assenza di differenziazione tra i diversi Comuni e una prospettiva di intervento unica. C'è però da evidenziare il fatto che una norma nazionale che vieti disposizioni irregolari e asimmetria non viene disposta fino al 1981, affrontando quindi in ritardo un problema già da tempo preso in esame in Italia. Aspetto importante di differenziazione è legato alle tecniche costruttive utilizzate, infatti, in Giappone, viene valorizzata la ricerca e la sperimentazione continua di nuove tecniche, al contrario di ciò che viene oggi attuato in Italia.

Ultimo confronto riguarda la normativa turca che, come quella giapponese, risulta essere fortemente legata alla condizione sismica del proprio territorio. Questa, ha molti punti di contatto con quella italiana nel tendere ad enfatizzare le problematiche legate all'irregolarità delle costruzioni e nel mostrare un'evoluzione simile a quella avvenuta nel nostro Paese, ma differisce sostanzialmente da questa per come la stessa è applicata, stante la mancanza di ogni tipo di "passaggio" nell'attribuzione di regole



del come dover costruire (assenza di Regolamenti Edilizi Comunali), come, per altro, già visto per la normativa giapponese.

CAPITOLO - 4 -

Nuove Tecniche di Intervento in Zona Sismica

E' importante capire l'importanza dello sviluppo di nuove tecniche nell'ambito di intervento sulle costruzioni in zona sismica poiché, in caso di irregolarità, non sempre si deve agire direttamente sull'edificio ma è possibile far sì che la struttura dello stesso non debba rispondere alle accelerazioni dovute ad un sisma risultandone quasi immune.

Un esempio delle nuove tecniche utilizzate che ha guadagnato molto spazio nella progettazione attuale nella costruzione di edifici in zona sismica e il recupero di strutture non regolari (vedasi cap. 4.2) è l'isolamento sismico.

La prima idea di isolamento sismico risale forse a 2500 anni fa. Molti templi greci, infatti, furono costruiti su strati di terreno soffice per la protezione dai terremoti, i principali esempi sono:

- il tempio di Artemide ad Efeso (eretto nel VI secolo a.C. e riedificato nel 416 a.C. dopo un incendio), fu costruito su strati alterni di carbone e velli di lana;
- il tempio Heraion di Olimpia (VI secolo a.C.) anche questo costruito su strati alterni di carbone e velli di lana;
- il tempio di Atena ad Ilion (III secolo a.C.) costruito su strati di sabbia e pietrisco.

La tecnica dell'isolamento sismico, mediante l'interposizione di strati di terreno soffice in fondazione, era ben conosciuta anche alla popolazione Inca del Perù, ne sono un esempio:

- le maestose mura della città di Cuzco (XIII secolo) le cui fondazioni sono realizzate su uno strato isolante di sabbia e sassi, profondo all'incirca un metro;
- il suggestivo monastero di Santa Catalina ad Arequipa (XVI secolo), anche questo con fondazioni realizzate su uno strato isolante di sabbia e sassi.

Nel 1870 Touvaillon progettò un edificio residenziale, inserendo tra la sovrastruttura dalla fondazione dei rulli, che potevano scorrere in apposite nicchie di geometria ellittica, al fine di garantire il ritorno alla posizione iniziale in caso di rotolamento del rullo.

Nel 1885 l'inglese John Milne progettò e realizzò una costruzione dotata di un particolare dispositivo di isolamento sismico, costituito da sfere che permettevano lo scorrimento della struttura.

Nel 1906 Jacob Bechtold propose una struttura sismo resistente, consistente in una piastra indeformabile, capace di sostenere l'edificio, semplicemente appoggiata su corpi sferici di materiale rigido.



Nel 1909 il medico inglese Jhoannes Avetican Calantarientes prevede l'interposizione di uno strato di talco fra la struttura e le sue fondazioni, capace di disaccoppiare il moto della struttura da quello del suolo. Con tale tecnica ottenne una cospicua riduzione delle accelerazioni pur se con rilevanti spostamenti.

In Italia, intanto, il famoso terremoto del 1908 distrusse Messina e Reggio Calabria, con ingente tributo in vite umane e spinse il Governo italiano a ricercare una soluzione per preservare i tipici edifici in muratura del Meridione da futuri eventi. Fu anche presa in considerazione l'ipotesi di dotare le costruzioni di dispositivi d'isolamento sismico, ricalcando i metodi utilizzati in tempi antichi, ovvero strati di sabbia e pietrisco tra suolo e struttura o anche sistemi di rulli interposti fra fondazione e sovrastruttura che ne permettessero lo scorrimento, ma non fu seguita, preferendo la via della rigidità e della resistenza, ossia quella di progettare edifici incastrati alla base, imponendo severe limitazioni in altezza e tenendo conto degli effetti del sisma attraverso una certa azione orizzontale.

Al contrario, Frank Lloyd Wright progettò l'Imperial Hotel a Tokyo, la cui costruzione fu completata nel 1921, prevedendo fondazioni su uno strato di terreno compatto, spesso poco più di 2 m, che a sua volta poggiava su uno strato di limi melmosi, profondo circa 20 m.

La prima applicazione moderna dell'isolamento sismico è quella della scuola Pestolazzi di Skopje, in Macedonia, ricostruita a seguito di un sisma nel 1960. Il sistema di isolamento utilizzato rappresenta il prototipo degli attuali dispositivi elastomerici.

Con la costruzione di impianti nucleari si rese indispensabile l'adozione di sistemi di protezione sismica di massima sicurezza e affidabilità. È in quest'ottica che nascono le prime applicazioni dell'era moderna dell'isolamento sismico. Si ricorda, infine, la prima applicazione italiana del 1981: la stazione dei vigili del fuoco di Napoli.

Per isolamento sismico, o isolamento alla base di un edificio, si intende l'inserimento, tra la struttura e le sue fondazioni, di opportuni dispositivi molto flessibili orizzontalmente, anche se rigidi in direzione verticale; di solito, tali dispositivi, sono isolatori in gomma armata, costituiti cioè da strati alterni di gomma ed acciaio solidarizzati mediante vulcanizzazione. L'inserimento degli isolatori consente di ottenere l'aumento del periodo proprio di vibrare della struttura per allontanarlo dalla zona dello spettro di risposta con maggiori accelerazioni. Ne conseguono i seguenti benefici ed effetti, rispetto ad un analogo edificio senza isolamento sismico:

La sensibile riduzione delle accelerazioni trasmesse dal sisma alla struttura, anche ai piani più alti, e quindi: a) minori forze sulla struttura: così si evita, non solo il collasso dell'edificio, ma anche il danneggiamento degli elementi strutturali, ovvero travi e soprattutto pilastri; b) le minori accelerazioni consentono di evitare danni anche a tutto ciò che è contenuto all'interno dell'edificio, e quindi di mantenerne la funzionalità anche a seguito di un terremoto violento; c) minore o nulla percezione umana delle scosse sismiche, grazie all'effetto "filtro" degli isolatori; d) la



riduzione degli spostamenti d'interpiano; in parole semplici, sotto l'azione del sisma l'edificio si muove come un blocco rigido al di sopra degli isolatori, nei quali viene concentrata quasi tutta la deformazione. Ciò consente di evitare il danno, non solo agli elementi strutturali, ma anche agli elementi non strutturali, come le tamponature (danni che comunque possono rendere inagibile un edificio costruito in modo tradizionale). (vedasi fig.74-75).

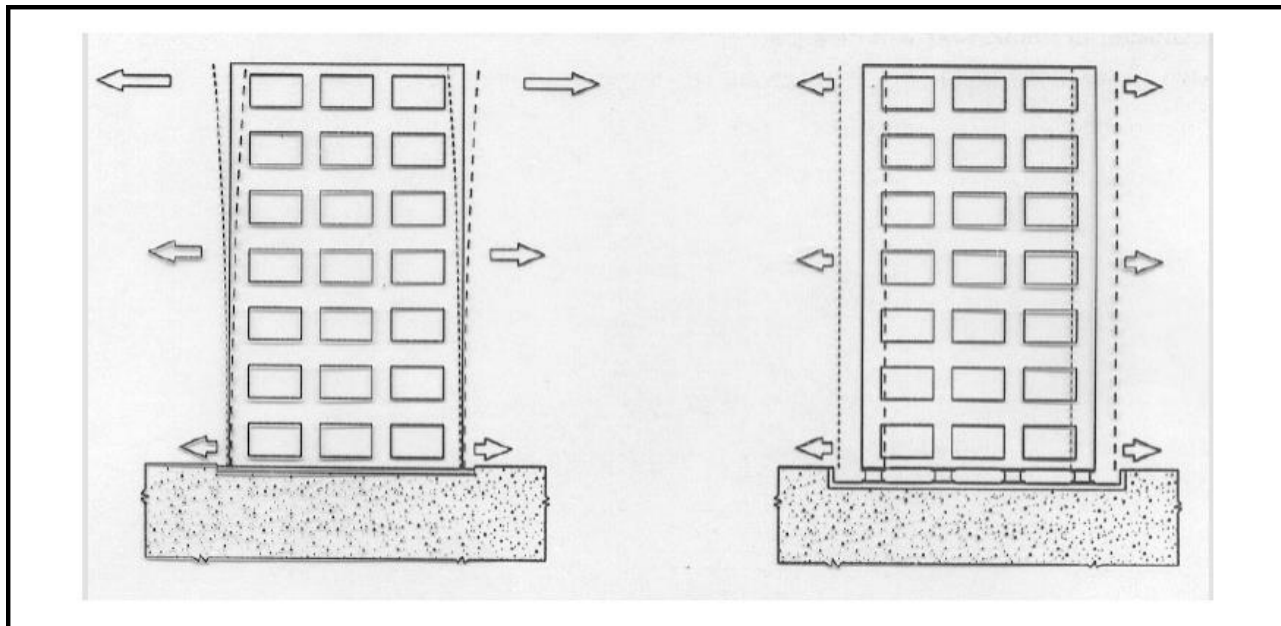


Figura 74 Effetti di un sisma su un edificio non isolato (a sinistra) e uno isolato (a destra)

Per apprezzare appieno questi benefici dell'isolamento alla base, occorre evidenziare che la progettazione sismica tradizionale, basata sul Capacity Designo "Gerarchia delle resistenze", ha, come obiettivo, quello di evitare il collasso dell'edificio e quindi la perdita di vite umane, ma prevede ed accetta il verificarsi danni ingenti, anche non riparabili. Ciò perché, con le metodologie tradizionali sarebbe antieconomico evitare completamente i danni o addirittura impossibile ridurre le accelerazioni al fine di mantenere la funzionalità dell'edificio e preservarne il contenuto. Va inoltre sottolineato che con le metodologie tradizionali è di solito impossibile ridurre le accelerazioni per mantenere la funzionalità dell'edificio e preservarne il suo contenuto. La maggiore peculiarità dell'isolamento alla base degli edifici è, dunque, la possibilità di eliminare completamente, o quantomeno ridurre sensibilmente, i danni a tutte le parti strutturali e non strutturali degli edifici e a tutto ciò che gli edifici contengono. Quest'ultimo aspetto è importantissimo per gli edifici che devono rimanere operativi dopo un violento terremoto, ad esempio gli ospedali o i centri operativi per la gestione dell'emergenza (centri di protezione civile, caserme dell'Esercito e dei Vigili del Fuoco, ecc.), oppure per tutti quegli edifici il cui contenuto ha un valore molto superiore a quello degli edifici stessi (musei, banche, centri di calcolo, ecc.). Come



è stato spesso ripetuto, con enfasi, nei convegni di Ingegneria Sismica, l'ospedale USC di Los Angeles, isolato alla base, non solo non subì danni strutturali durante il sisma del gennaio 1994, ma non si ruppe neppure una bottiglia nella sua farmacia, mentre un altro ospedale, analogo, non isolato, a pochi chilometri di distanza, subì notevoli danni alle apparecchiature interne. E' importante notare che, in un edificio isolato alla base, occorre realizzare un giunto sismico intorno all'edificio per consentirne gli spostamenti orizzontali, che possono aggiungere e anche superare i 200 mm. Nel caso dell'applicazione dell'isolamento alla base nell'adeguamento sismico di edifici esistenti, la necessità del giunto sismico impone, quindi, che non ci siano altri edifici adiacenti.



Figura 75 Sistemi di isolamento alla base

4.1 Esempio di Intervento Con Isolamento Sismico

Per capire meglio l'applicazione degli isolatori analizzati nel capitolo precedente si è preso un esempio di applicazione in Italia.

La scuola elementare "Quasimodo", ubicata a Riposto (zona sismica 2) a circa 30 km da Catania, è stata costruita in opera in c.a. sul finire degli anni 70. A causa delle inopportune originarie scelte progettuali, l'edificio si presenta da un punto di vista

strutturale (vedasi figg. 76 - 77), seppur con un asse di simmetria, irregolare in pianta in quanto sostanzialmente costituito da due corpi a pianta quadrata collegati da un disimpegno centrale contenente i collegamenti verticali. Il progetto di miglioramento delle prestazioni sismiche di un edificio come quello in oggetto, caratterizzato da insufficiente duttilità e resistenza, è stato ulteriormente complicato in questo caso dall'aver riscontrato calcestruzzi di qualità inferiore a quanto previsto in fase progettuale. Partendo da tali considerazioni e potendo sfruttare il piano seminterrato destinato a deposito si è optato per intervenire mediante l'isolamento sismico alla base dell'edificio.



Figura 76 Scuola Quasimodo

4.1.1 Il Progetto

Date le problematiche sopra descritte, e vista la configurazione dell'edificio dotato di piano interrato, la scelta più opportuna è risultata essere quella dell'adozione dell'isolamento alla base posizionando gli isolatori proprio al di sotto dell'impalcato a piano terra. Trattandosi di un edificio esistente l'obiettivo è stato di ridurre il più possibile il valore delle forze trasmesse alla sovrastruttura incrementando quanto più

possibile il periodo proprio di vibrare cercando al contempo di tenere sotto controllo gli spostamenti. La progettazione è stata ulteriormente complicata dalla irregolarità e dalle notevoli dimensioni planimetriche dell'edificio (circa 50 m) che hanno richiesto diverse iterazioni prima di pervenire alla soluzione definitiva.

La soluzione finale (vedasi fig. 77) ha previsto l'utilizzo di 33 isolatori elastomerici ad elevato smorzamento del tipo SI-N 400/108 disposti lungo il perimetro dell'edificio e 16 isolatori a scorrimento multi direzionali tipo "Vasoflon" posizionati in corrispondenza dei pilastri centrali con capacità di carico pari a 1750 KN e scorrimento orizzontale pari a ± 250 mm.

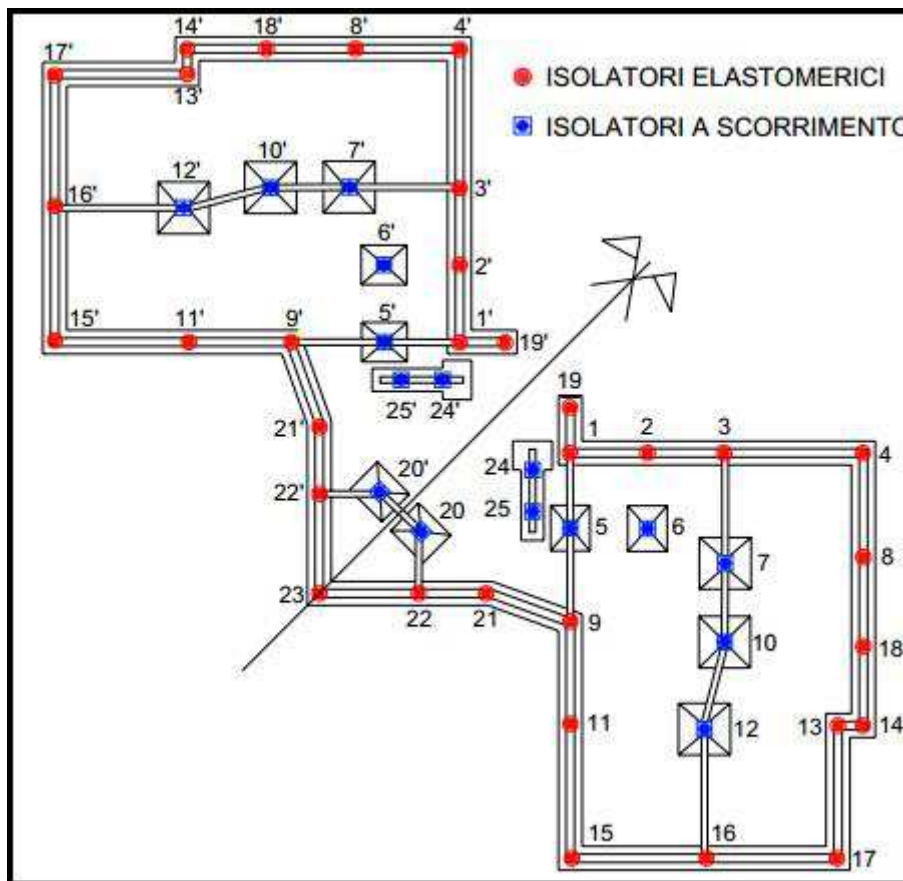


Figura 77 Pianta delle fondazioni e disposizione degli isolatori

La disposizione degli isolatori e degli appoggi è stata ottimizzata al fine di eliminare gli effetti torsionali onde ottenere dei modi di vibrare pressoché traslazionali.

Particolare attenzione è stata inoltre posta all'adeguamento dei giunti strutturali, degli impianti tecnologici e degli elementi non strutturali. A tal proposito va fatto notare come essendo l'edificio realizzato a ridosso di strutture esistenti (corpo ascensore, pensiline) è stato creato un giunto tale da consentire uno spostamento orizzontale massimo pari a 250 mm, mentre si è proceduto alla eliminazione di diverse scale di accesso diretto alle aule dal piano di campagna. Infine volendo consentire l'utilizzo del piano seminterrato per destinazioni anche diverse da deposito si è previsto l'avanzamento degli infissi verso l'esterno creando una soletta a sbalzo intorno l'edificio.

4.1.2 Confronto tra Soluzione a Base Fissa e Soluzione Isolata

Al fine di confrontare il comportamento della struttura isolata con quella a base fissa, sono state condotte una serie di analisi, utilizzando come input sismico uno spettro di progetto ricavato dalla vigente normativa, ed assumendo un fattore di struttura pari a 3,0. La riduzione di forze sismiche è evidente se ci si riferisce al taglio totale alla base dell'edificio che passa da circa 5.800 kN, nel caso della struttura a base fissa, a circa 2.900 KN nella struttura isolata. Oltre alle considerazioni basate sul tagliante alla base si è proceduti ad una estesa campagna di analisi non lineari le quali hanno consentito di determinare come mediante l'intervento proposto si è riusciti ad innalzare le caratteristiche resistenti della struttura da circa il 35% dello stato ante intervento ad un livello prossimo al 95% con l'intervento proposto.

4.1.3 Conclusioni

L'esempio qui proposto ha mostrato l'elevata efficacia della tecnica dell'isolamento sismico nel migliorare la protezione sismica degli edifici (vedasi fig.78). Inoltre, seppure tale tecnica non sempre sia applicabile, o rappresenta la migliore soluzione, in situazioni come il caso in oggetto ha consentito di effettuare l'intervento senza dover intervenire in maniera diffusa all'interno degli ambienti destinati alle attività



didattiche. Il costo dei soli lavori relativi all'intervento di miglioramento strutturale (inclusi anche finiture e ripristini), effettuato tramite l'intervento di isolamento sismico, è stato pari a circa 350 k € con una incidenza di circa 45 €/mc di edificio. Questi valori di costo, se rapportati anche al livello di incremento delle prestazioni sismo resistenti, consentono di affermare come la tecnica dell'isolamento sismico su edifici esistenti, rispetto ad altre tecniche di intervento, consente di raggiungere elevati rapporti in termini benefici-costi.



Figura 78 Fasi realizzative preliminari al taglio dei pilastri ed inserimento degli isolatori

CAPITOLO – 5 -

Esempi di Costruito

Per comprendere al meglio le problematiche evidenziate nei capitoli precedenti si procede, nel seguito, ad esaminare alcuni campioni del come progettato – costruito in Italia quali esempi di un realizzato che, per varie ragioni, si discosta dai principi di “regolarità strutturale” sovra esposti della normativa tecnica. Gli edifici, quali esempi da analizzare, sono stati scelti in quanto ubicati in zone ad alto rischio sismico (zone 1 e 2), cioè nella città dell’Aquila, di Reggio Calabria e Modica.

5.1 Edificio 1

Il primo edificio esaminato, che ha avuto un grande rilievo mediatico, è la “Casa dello Studente” all’Aquila (figg. 79, 80, 81 e 82). Il progetto originario, datato 1965 prevedeva, tra l’altro, al piano terra (sezione crollata), la presenza, nella zona di affaccio su via XX Settembre, di tamponatura esterna che, nel progetto di ristrutturazione del 1998, scompariva completamente per la sostituzione di essa con pareti vetrate. In questo modo, **il piano terra veniva trasformato in piano soffice**. Nella documentazione tecnica, ed in particolare negli innumerevoli progetti di ristrutturazione dell’edificio, dopo il progetto originario del 1965, **non vi è traccia alcuna di valutazione inerente l’adeguatezza statica e sismica delle strutture dell’edificio**³⁴.

³⁴ Domenico Liberatore, *Collassi degli edifici scolastici indotti dal terremoto dell’Aquila*, 2012



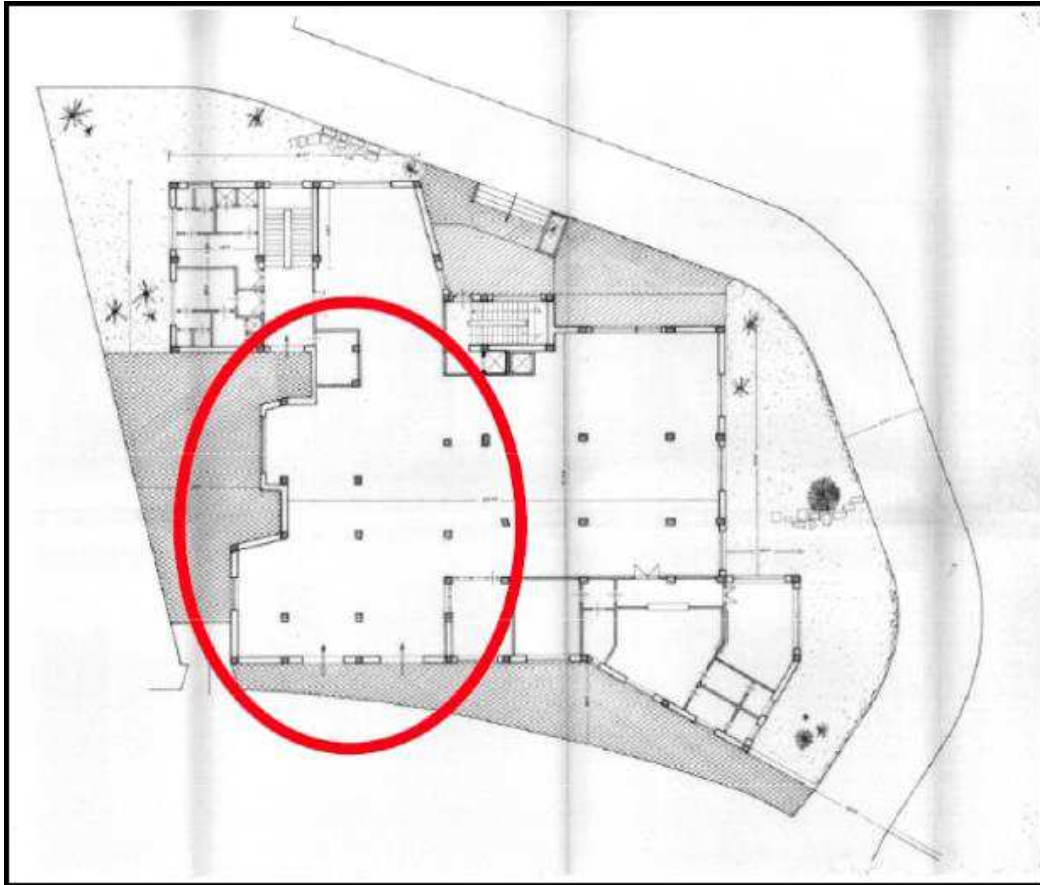


Figura 79 Pianta architettonica del piano terra Casa dello studente

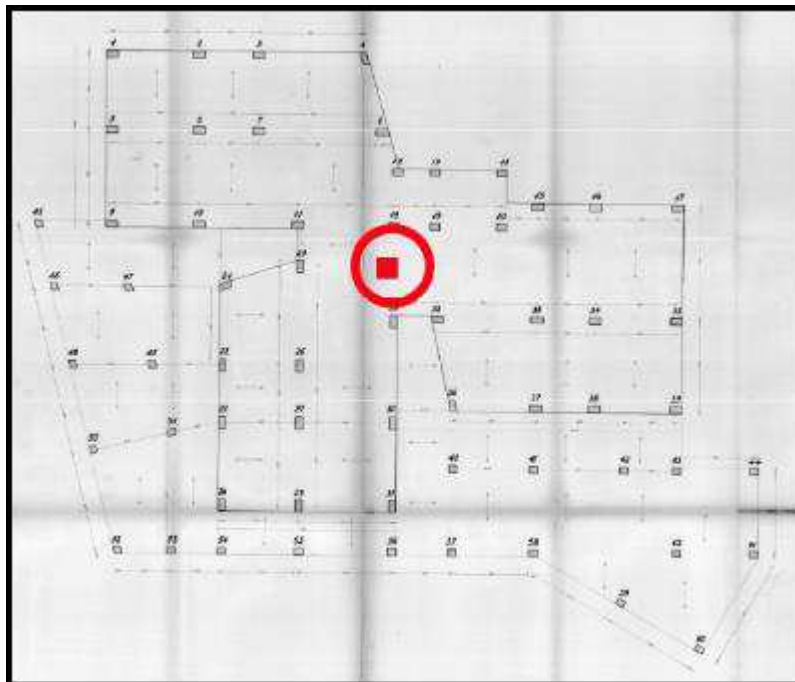


Figura 80 In rosso il pilastro non inserito dal progettista

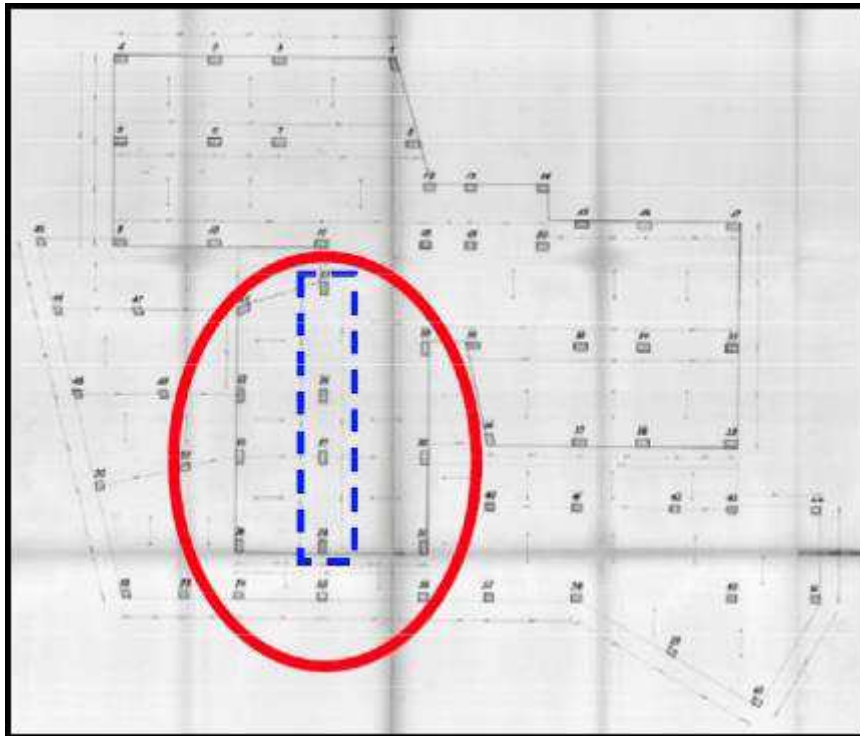


Figura 81 Posizionamento originale dei pilastri Casa dello Studente all'Aquila

Questa struttura è stata interessata da un grave crollo, cagionato dall'evento sismico del 6 aprile del 2009. L'origine di tale tragedia, così come risulta dalla C.T.U. (consulenza tecnica d'ufficio) datata 5 novembre 2011 a firma del prof Maria Gabriella Mulas, Consulente Tecnico nominato dal Tribunale dell'Aquila, deriva da un insieme di cause di cui alcune riconducibili ad un comportamento anomalo della struttura portante – travi e pilastri in c.a. e solai latero - cementizi – da associarsi ad “*irregolarità strutturali*” (rigidezze differenziali dell'edificio e non solo) non valutate né ad origine, ma aspetto importantissimo, né a seguito di interventi successivi di manutenzione straordinaria, che hanno sostanzialmente modificato la rigidezza dell'edificio. Risultanze esposte nella citata C.T.U., dal testo “*Nel caso dell'edificio 3 (Casa dello Studente) l'effetto della distorsione dovuto alla dislocazione, in verticale, fra i corpi è stato peraltro amplificato dalla situazione di non simmetria strutturale della zona di collegamento (si veda la Figura 9.15 < nel presente testo Figura 85>) e più precisamente:*

- a. dal mancato allineamento dei pilastri 21, 25 e 29,
- b. dalla presenza della rientranza fra i pilastri 10, 11, 21 e 25,
- c. dalla presenza della parete non strutturale che irrigidisce parzialmente la trave 18-29, aumentando la pendenza dei solai nella zona fra i pilastri 11, 18 e 25.....

Va rilevato che la previsione degli effetti dovuti alle cause a, b era al di fuori della portata del progettista delle strutture e delle prescrizioni della norma dell'epoca. Peraltro sia la forma non compatta della pianta sia le situazioni di

irregolarità strutturale ai punti a,b,c, rilevabili anche in assenza dei disegni del progetto strutturale, si sarebbero configurate come situazioni sfavorevoli, ai fini del comportamento sismico, agli occhi di un progettista strutturale che avesse valutato la consistenza dell'edificio in occasione delle ristrutturazioni operate in anni recenti." L'analisi è meritevole di interesse in quanto, come è noto da numerose osservazioni, la formazione ed il cedimento di un "piano debole" < nel presente testo fig.83> alla base di un edificio non sempre conduce al successivo collasso di elementi strutturali situati al disopra del piano che ha subito lo schiacciamento. Va tuttavia considerato che la tipica situazione prevede, nei casi documentati, il collasso del piano debole sull'intera area dell'edificio; nel caso qui in oggetto, il collasso è stato limitato all'ala Nord sia per la forma "non compatta" della pianta dell'edificio, sia perché nell'ala Nord stessa erano concentrati gli elementi più rigidi e resistenti nei confronti delle azioni sismiche Nord-Sud, mentre gli elementi verticali presenti nelle altre due ali, più deformabili, hanno subito gli stessi spostamenti relativi senza manifestare danni rilevanti."

Per quanto esposto, trovandosi in presenza di una struttura che presentava, di per sé, delle irregolarità strutturali posizione in pianta dei pilastri – piano soffice in corrispondenza dei pilastri 21, 25 e 29 (Figura 84) – che hanno generato il crollo dell'intera ala - appare assumere rilevanza assoluta l'intervento, progettato nel 2003 e realizzato nel 2004, inerente l'inserimento di una parete REI 60 posizionata, a tutti i piani tranne il piano terra, nel corso dei lavori di restauro e risanamento conservativo. Parete che, interferente con le travi 18-29, ha determinato una sostanziale modifica del comportamento, in termini di rigidità, dell'intera struttura in c. a ed il cui posizionamento avrebbe dovuto essere oggetto di attenta valutazione da parte dei progettisti. Ulteriori risultanze esposte nella citata C.T.U., dal testo, "In merito al ruolo giocato dalla parete REI (in parte) sottostante alla trave (Figura 9.15) occorre tuttavia considerare che la presenza di tale elemento, previsto come non strutturale ma dotato di notevole rigidità e resistenza, causa un totale cambiamento del regime statico della trave stessa; il suo inserimento sarebbe pertanto dovuto essere oggetto di attenta considerazione in relazione agli aspetti di sicurezza strutturale. Rileva in questa sede osservare che la presenza della parete REI ha anche amplificato gli effetti del collasso dovuto al cedimento del piano terra, ..." ed inoltre "In relazione all'inserimento della parete REI si stabilisce che, avendo essa modificato il regime statico dell'edificio oltre a influenzarne la cinematica in fase di crollo, tale inserimento avrebbe dovuto essere soggetto a verifica da parte dell'Ufficio del Genio Civile competente, se non altro in forma di accertamento preventivo" Ed inoltre "La zona (evidenziata in colore più chiaro – giallo - in Figura 9.9 <nel presente testo Figura 85>) compresa fra i fili dei pilastri 25,29 (a sud) e 11,18 (a nord) è drammaticamente soggetta allo spostamento relativo verticale dovuto all'abbassamento del corpo nord, con la conseguenza che il solaio sviluppa, oltre a deformazioni flessionali intollerabili,



significative azioni di trazione, che sono trasmesse alla trave di bordo 11-25. L'effetto di tali trazioni è visibile anche nelle lesioni del solaio compreso tra l'ascensore e la parete REI, realizzata in occasione dei lavori di Restauro e Risanamento Conservativo. L'effetto dello spostamento relativo è aggravato dalla presenza di tale parete, posizionata in corrispondenza della trave 18-29. La parete, pur non presente al piano terra, collabora ai vari piani con le travi nel sostenere la zona compresa fra i fili dei pilastri 25 (lato nord) e 18-19 (sud). Causa pertanto un incremento dell'inclinazione dei solai disposti fra i fili 11- 25 e 18-29 e, di conseguenza, delle azioni, trasversali al telaio, trasmesse al pilastro 25 (Figura 9.9 <nel presente testo Figura 85>).

Conclusioni

Le cause del crollo possono identificarsi in:

- Errata concezione strutturale (irregolarità in pianta - forma e scelte strutturali - , sistema resistente unidirezionale per ciascuna ala dell'edificio). Vedasi scelte progettuali – Figura n. 80 *“Il pilastro avrebbe dovuto trovarsi laddove si incontrano due travi, una in falso sull'altra. Mentre le altre due ali presentano, con la dovuta simmetria, un pilastro su tale allineamento, l'ala collassata non presenta tale pilastro e ciò costituisce una delle probabili cause dell'innescò del cinematismo di collasso.”*
- Carenze in fase di realizzazione (calcestruzzo scadente e disomogeneo, a copriferro insufficiente);
- Carenze della manutenzione e delle ristrutturazioni successive (assenza di controlli sulla resistenza sismica dell'edificio nei passaggi di proprietà, interferenze impianti-struttura, demolizione delle tamponature a piano terra e conseguente trasformazione in piano soffice).

Nel particolare:

Inserimento della parete REI 60 su tutta la “sezione” dell'edificio, pur risultando necessario per rispondere ad esigenze connesse ad un adeguamento alla normativa antincendio dell'edificio, ha comportato un cambiamento significativo della rigidità dello stesso, per cui - conclusioni a cui pervengono i periti - avrebbe dovuto essere soggetto ad una specifica preventiva verifica statica che ne avallasse la fattibilità, ove attuati interventi correttivi - integrativi da apportare all'esistente struttura. Infatti, in relazione all'inserimento della parete REI, si è stabilito (Periti nominati dal Tribunale dell'Aquila) che, avendo questa modificato il regime statico dell'edificio, ha influenzato, insieme ad altre cause, la cinematica in fase di crollo dello stesso³⁵.

³⁵ Prof. Ing. Maria Gabriella Mulas, *Relazione di perizia- Casa dello Studente*, Tribunale Penale di l'Aquila





Figura 82 Casa dello Studente all'Aquila

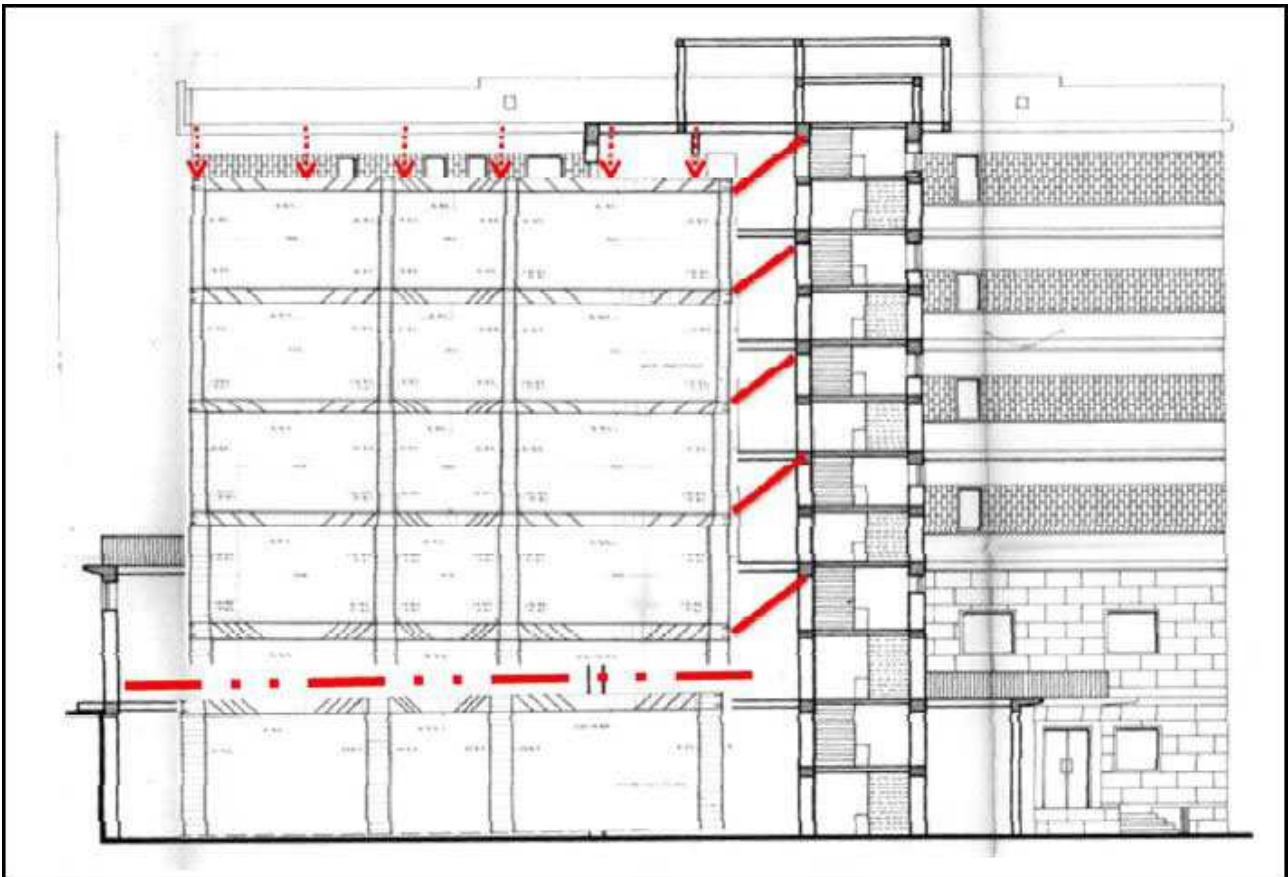


Figura 83 Sezione della Casa dello Studente all'Aquila. La linea tratteggiata indica la separazione tra il piano sofficce e il resto dell'edificio mentre le linee diagonali indicano la linea di collasso dei solai.



Figura 84 Geometria del collasso dei solai compresi tra le travi 11-25 e 18-29

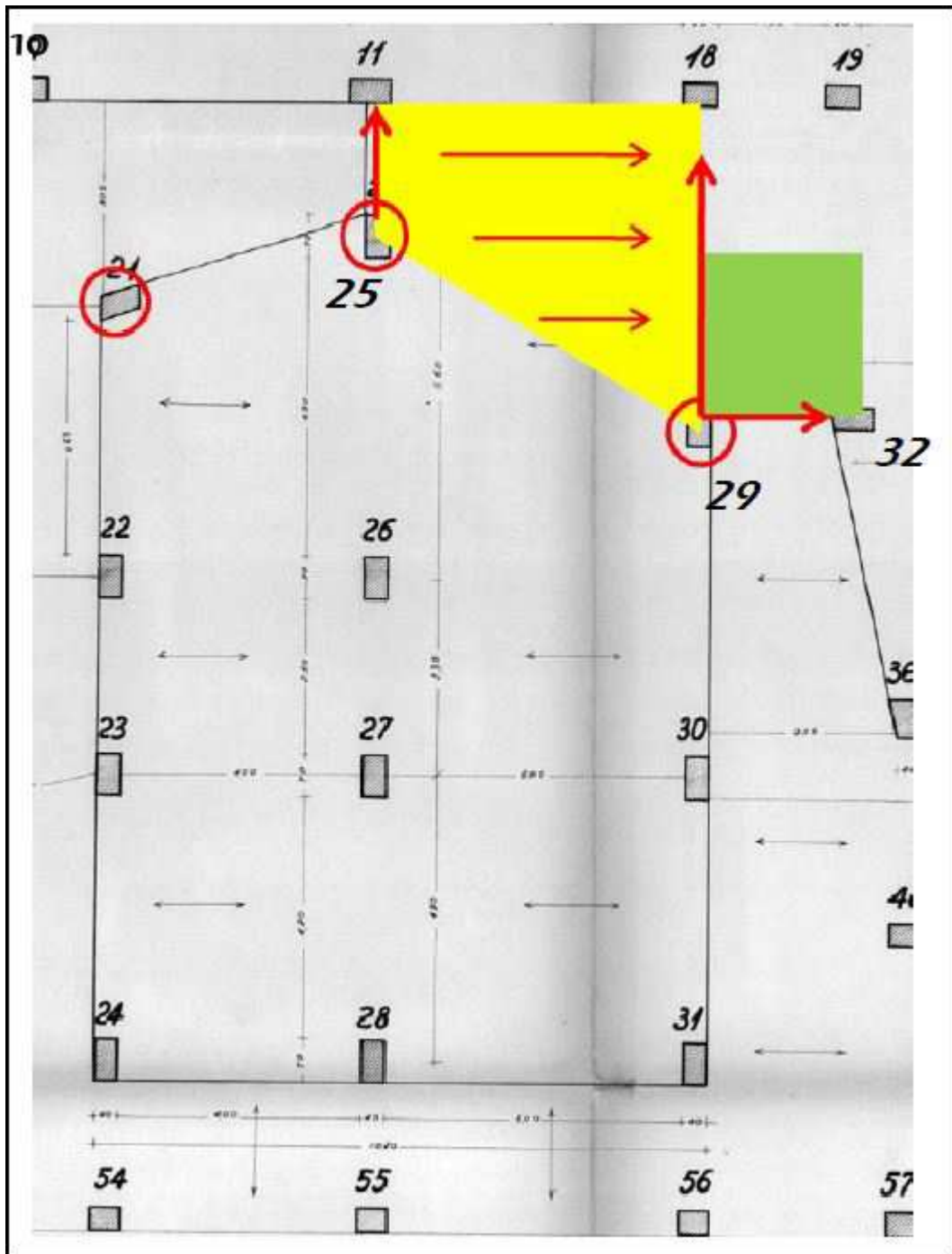


Figura 85 Effetti sulla pianta strutturale della Casa dello Studente. In giallo è indicata l'area fortemente interessata tra le travi 11-25 e 18-29

5.2 Edificio 2

Il secondo edificio preso in esame (fig. 86), in merito alla trattazione in argomento (mancanza di regolarità), è un edificio adibito a residenza privata ubicato nella città di Reggio Calabria (zona sismica 1). Questo edificio consiste in un'unità abitativa distribuita su più livelli ed in particolare:

- Piano interrato destinato a garage;
- Piano terra destinato a zona ingresso e pilotis; (fig.87).
- Piano primo destinato a zona giorno;
- Piano secondo destinato a zona notte e costituito da tre camere da letto ed un bagno;
- Piano terzo destinato a giardino d'inverno con un locale in parte destinato ad accogliere il serbatoio idrico ed in parte destinato a locale sgombero.

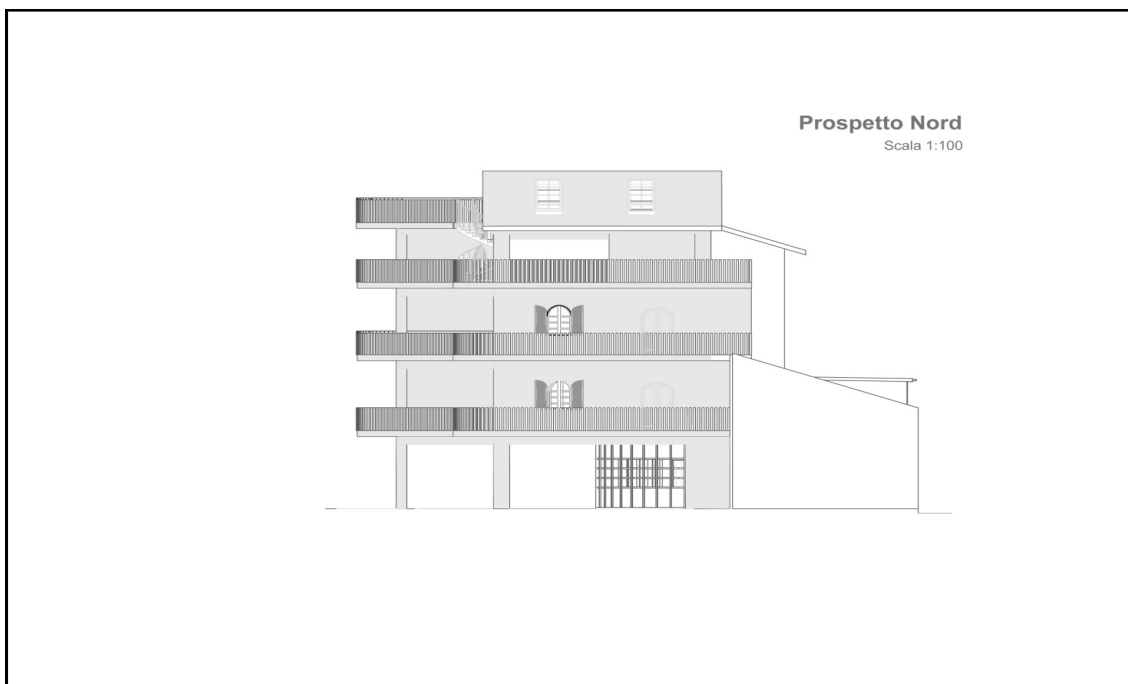


Figura 86 Prospetto edificio a Reggio Calabria con piano pilotis

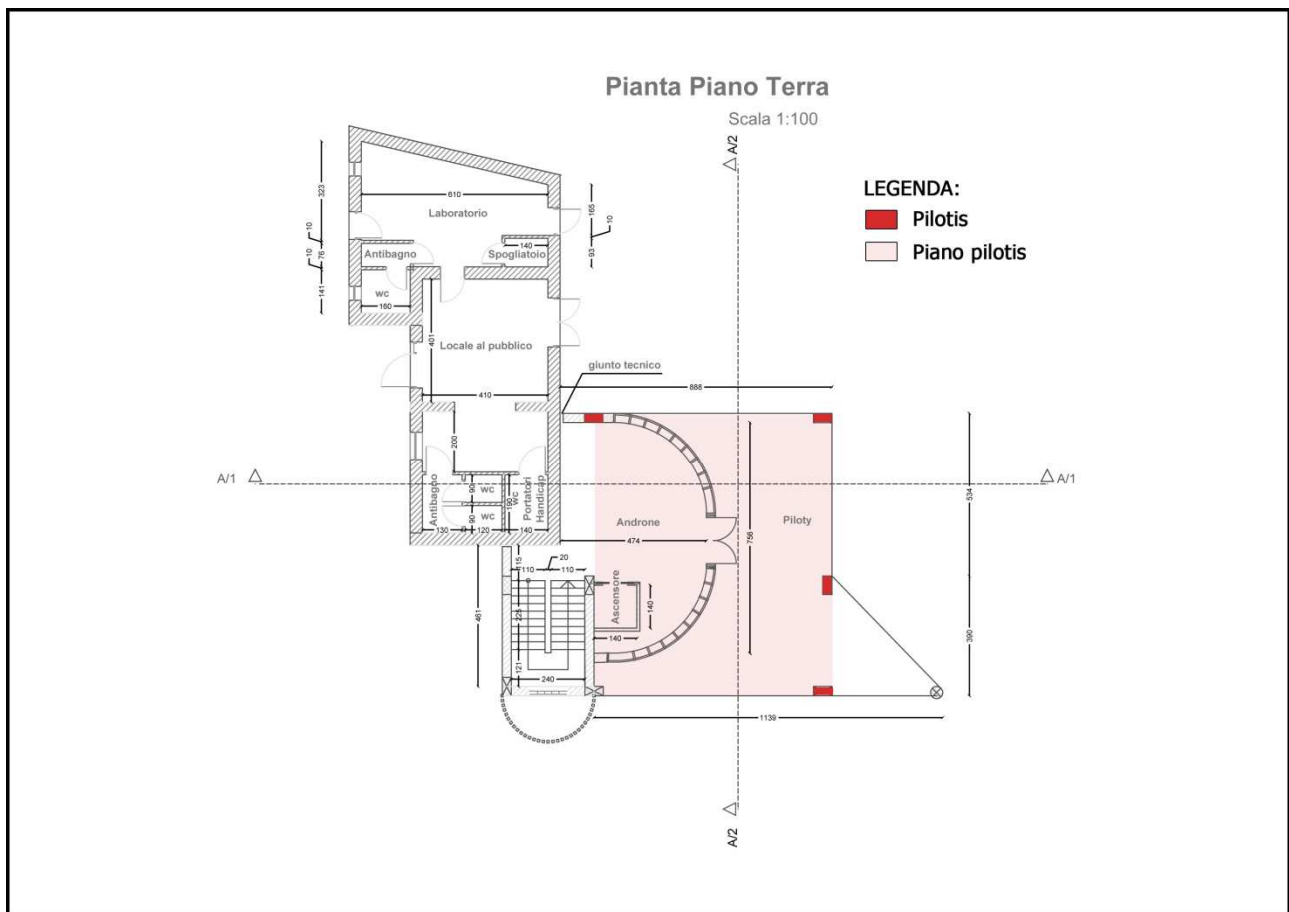


Figura 87 Pianta con evidenziata l'area del piano pilotis

Come si evince dalla descrizione del come è atteso doversi realizzare l'edificio e dall'esame degli stralci di progetto sopra esposti, nel piano terra si prevede di dover ricavare uno spazio - un piano pilotis - che, in un Comune, quale è quello di Reggio Calabria, in zona sismica classificata 1, risulta essere in aperto contrasto la così detta "regolarità verticale", che potrebbe determinare serie conseguenze al realizzato in caso di un evento sismico. Infatti, come ampiamente esposto in precedenza, tale scelta progettuale potrebbe essere causa di una risposta "negativa" della struttura, quindi del grave danneggiamento dell'edificio per il generarsi di un effetto, quello denominato "piano soffice".

Per correttezza di trattazione la scelta adottata dal progettista appare, per il normato in materia, senza dubbio ammissibile, per quanto stabilito da Norma Tecnica – vedasi il quadro precedentemente esposto al cap. 3.3 pag. 89 –; Normativa, che non esclude la possibilità che si possa procedere a scelte progettuali che prevedono piani terra "aperti", ma tutto ciò dovrebbe essere corredato da calcoli, particolarmente approfonditi con tutti i possibili rischi del caso.

A quanto detto, commentando il come è prevista sia realizzata la struttura – pilastri e travi in c.a. con solai latero - cementizi - , appare possibile formulare osservazioni che si traducono in dubbi del come si potrebbe comportare l'edificio sotto l'effetto di un sisma, analizzando, ancorché qualitativamente, le diverse rigidzze assunte dal corpo del fabbricato nei vari piani, in ragione della presenza e/o assenza di tramezzature che, come noto, influenzano in modo significativo la “rigidezza” di una struttura. Al fine di avere un' idea delle conseguenze che tutto ciò comporta, si ritiene opportuno riproporre quanto già esposto in precedenza a pag. 52, quale visualizzazione (fig.88) del possibile verificarsi in tale situazione per sisma.

Foto dell'edificio principale del Sylmar Olive View hospital colpito dal sisma del 1971 a San Fernando in California. (fig.88).



Figura 88 Effetti del sisma del 1971 sul Sylmar Olive View hospital

Conclusioni

L'edificio esaminato, pur evidenziando l'esistenza di un "piano soffice", non presenta, in senso normativo, un' irregolarità strutturale. Pur tuttavia, è stata fatta una scelta progettuale, che, per l'ubicazione in cui ricade l'edificio (Reggio Calabria – zona sismica di prima categoria), necessita di una particolare attenzione in termini di verifiche da porre in essere nel calcolo delle strutture, proprio per la presenza di “rigidezze” differenziali che non sono di semplice valutazione in termini di simulazione di effetti.

5.3 Edificio 3

La tipica situazione dell'effetto "pilotis" è enfatizzata in un complesso residenziale della città di Modica (Sicilia), a ragione della particolare configurazione che verrà descritta di seguito. Questo è costituito da due edifici residenziali che presentano un doppio piano debole le cui planimetrie sono riportate in fig. 89.

La struttura consiste di un sistema a telai, progettato 30 anni fa, senza alcun accorgimento nei confronti della resistenza sismica. Al tempo il sito non rientrava in alcuna zona sismica, mentre ora è stato incluso nella zona a rischio 2. L'edificio A (a destra nel prospetto) si sviluppa per 14 piani in altezza, mentre l'Edificio B (a sinistra nel prospetto) consta di 6 piani. Il numero specificato di piani parte, con un primo livello su pilotis, dal livello di un'ampia piattaforma pedonale, costituita da molte lastre, separate ognuna da giunti di espansione ridotti con gap approssimativo di 2cm, quindi non abbastanza per evitare fenomeni di martellamento sismico. L'intera piattaforma è sostenuta da un certo numero di colonne in cemento armato, che vanno a formare un altro sistema su "pilotis", direttamente fondato sull'affiorante suolo vulcanico. La fig. 90 mostra l'elevazione degli edifici sopra la piattaforma e la fig. 91 mostra il livello sotto la piattaforma che viene utilizzato come parcheggio.

Questo esempio risulta, quindi, emblematico per quanto riguarda le problematiche legate ad una "mala-costruzione", in opposizione a quanto dettato dal principio di regolarità in zona sismica³⁶.

³⁶ Unità E1- UNIPG, *Configurazioni strutturali per l'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi innovativi di protezione sismica*, 2006



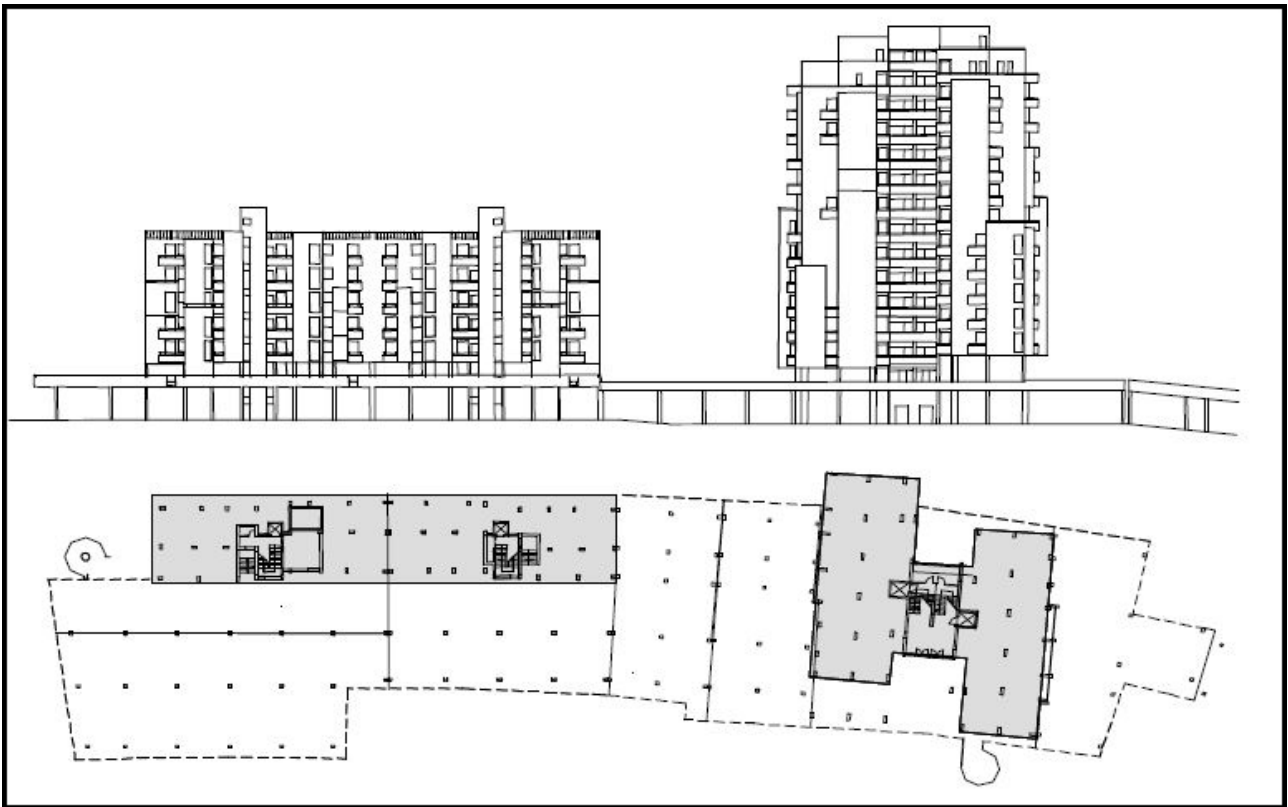


Figura 89 Planimetria generale e prospetto frontale del complesso di Modica



Figura 90 Foto dell'edifici a Modica



Figura 91 Immagini del basamento "pilotis"

5.3.1 Opzioni di riabilitazione

Per quanto riguarda i casi di studio analizzati possono essere ipotizzati differenti opzioni di riabilitazione nei casi di problematiche legate a piani pilotis, volti all'incremento della performance sismica del sistema strutturale degli edifici: si possono prendere in considerazione sia strategie innovative che convenzionali.

Opzione 1- Approccio tradizionale. Consiste nel rinforzo ed irrigidimento degli elementi strutturali esistenti. Inoltre può anche essere previsto l'inserimento di nuovi elementi quali, usualmente, pareti di taglio. Tale intervento richiede lavorazioni molto invasive e modifiche importanti finanche per le strutture di fondazione.

Opzione 2- Isolamento alla base (fig.92). Necessita di supporti provvisori per l'elevato, il rinforzo ed il taglio delle colonne di base, l'inserimento dei dispositivi d'isolamento, l'allargamento dei giunti tra differenti parti della piattaforma intorno all'edificio.



Figura 92 Schema generale del sistema di riabilitazione con isolamento alla base

Opzione 3- Controventi dissipativi (fig. 93). Prevede l'inserimento di controventi dissipativi in punti strategici tra telai in cemento armato lungo l'altezza dell'edifici. L'efficacia del sistema è limitata dal bisogno di mantenere lo scorrimento del piano entro determinati valori al fine di rispettare la duttilità disponibile degli elementi esistenti.

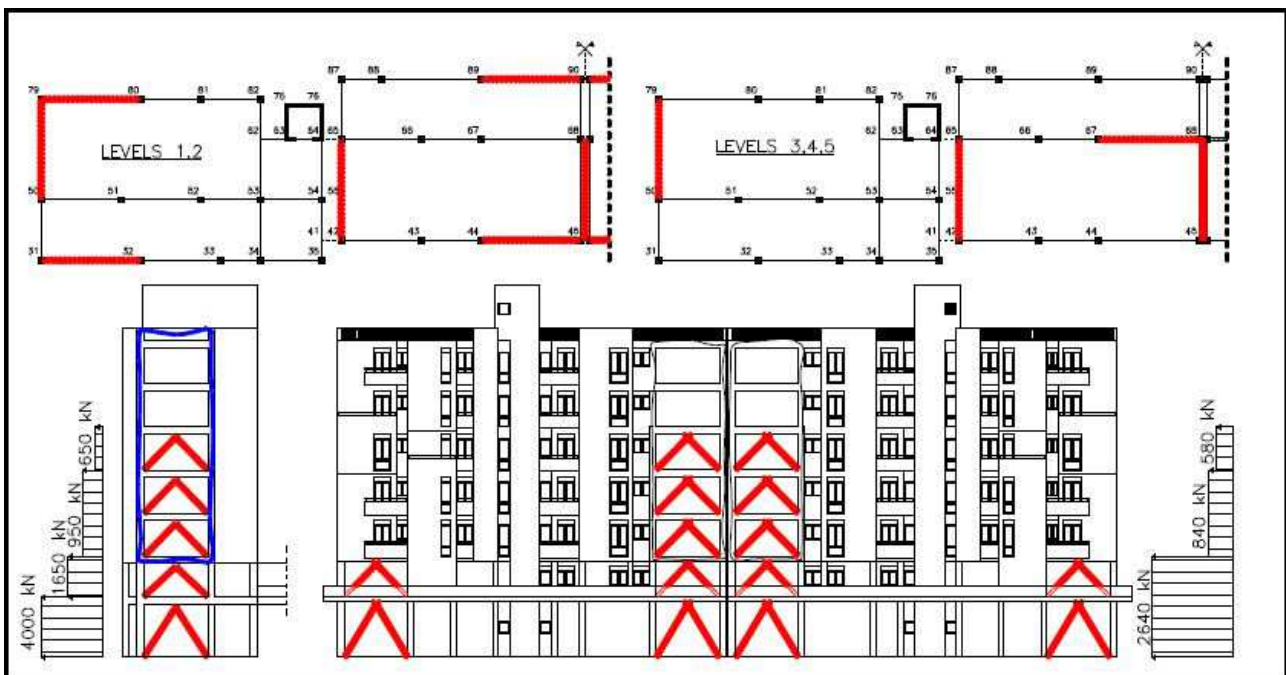


Figura 93 Disposizione dei controventi in pianta (sopra) e in altezza (sotto)

Opzione 4- Strategia di dissipazione sinergica. Prevede la combinazione di nuovi controventi dissipativi inseriti al livello di base ed il miglioramento delle capacità di dissipazione dei soli elementi in cemento armato esistenti a tale livello, in accordo la metodologia precedentemente presentata.

5.3.2 Conclusioni

La tipologia costruttiva proposta (edificio 3) ha la finalità di dare evidenza dell'esistenza, nel territorio italiano, di innumerevoli situazioni di "potenziale pericolo" dovute a:

- modifica della zonizzazione dal punto di vista sismico del territorio;
- scelte architettoniche adottate – regolarità strutturali – (piani pilotis ecc.).

Per trovare un rimedio agli "errori" del passato e soprattutto per evitare le conseguenze che ne potrebbero derivare, è stata vagliata la possibilità di trovare una soluzione, attraverso interventi più o meno impattanti, che, nonostante le irregolarità esistenti, garantiscano al fabbricato una sufficiente sicurezza strutturale sotto sisma.

5.4 Edificio 4

L'edificio preso ora in esame è un complesso scolastico situato a l'Aquila, L'Istituto Tecnico per le Attività Sociali E. di Savoia (vedasi fig.94).

Tale complesso si compone di due blocchi: il primo, più ampio e articolato, ospita le aule scolastiche, i laboratori e gli uffici della presidenza, mentre il secondo, ad un solo piano, è adibito a palestra. Le due parti sono separate da un giunto tecnico, come visibile nelle figure seguenti (vedasi figg. 95 - 96).





Figura 94 Scuola E. di Savoia

1) Il blocco aule presenta una forte irregolarità, sia planimetrica che in elevato, essendo composta, a sua volta, da più parti connesse solo in alcuni punti da giunti tecnici di modeste dimensioni: complessivamente la pianta presenta una forma ad L, con un angolo di circa 70° fra le due ali. Internamente sono presenti tre vani scala, che servono a collegare fra loro sia i vari piani che le due braccia della L, i cui piani di calpestio si trovano a livelli diversi (vedasi fig.95).

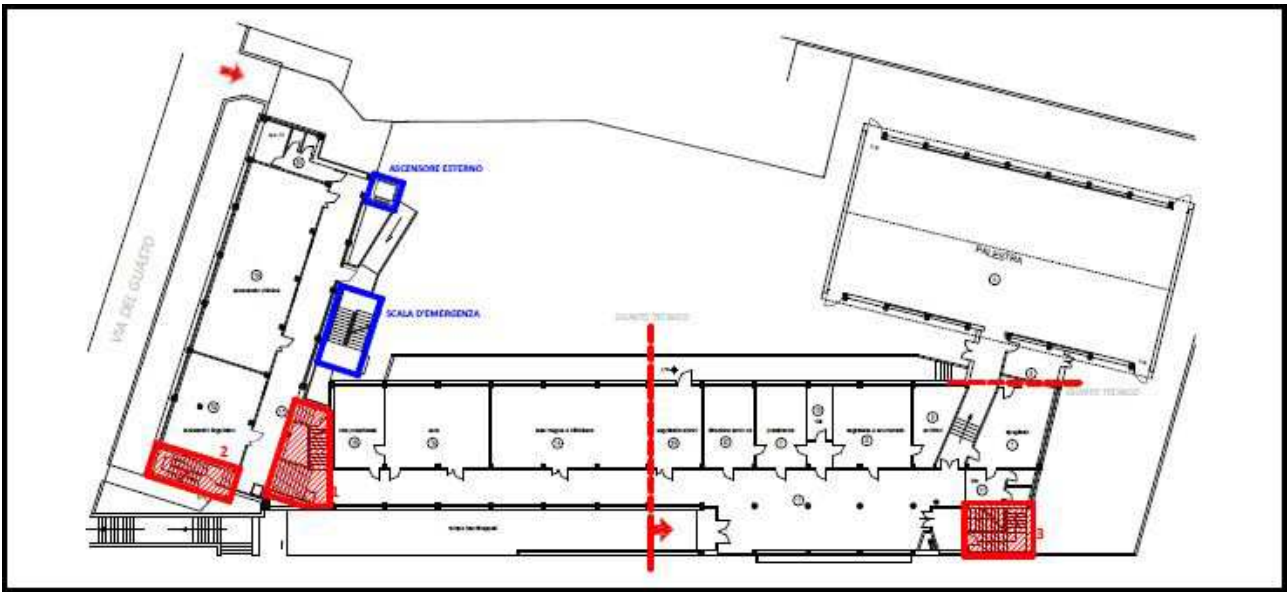


Figura 95 Pianta piano terra (blocco aule) con indicazione dei giunti tecnici (linea rossa tratteggiata) e dei collegamenti interni (rossi ed esterni (blu)

2) La palestra, di forma regolare rettangolare, è connessa ad un locale destinato ad ospitare gli spogliatoi, adiacente al giunto tecnico di separazione dalla aule scolastiche; ad essa si accede tramite una piccola rampa, essendo il piano di calpestio della palestra posto ad un livello leggermente superiore a quello del blocco aule. Nel complesso dunque, anche per la palestra si parla di irregolarità in pianta ed in elevazione (vedasi fig.96).

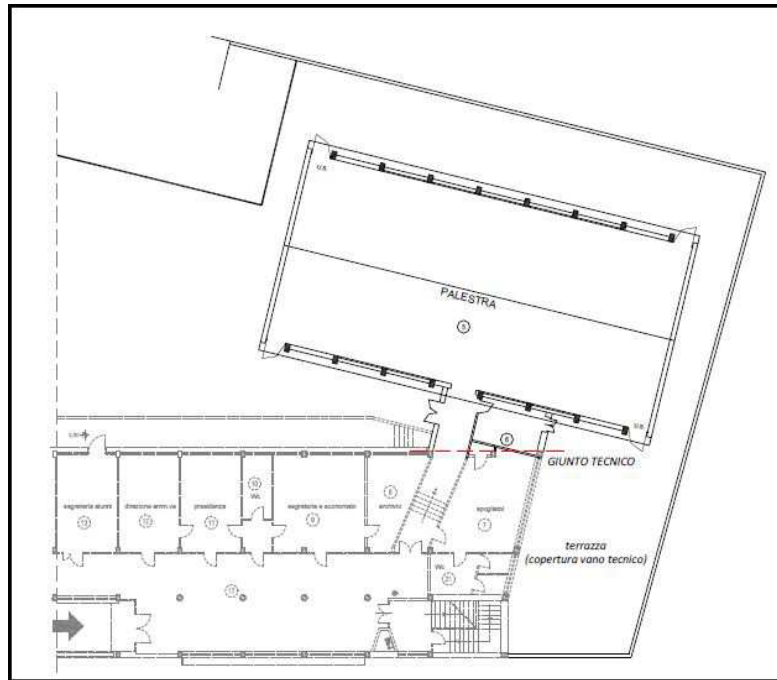


Figura 96 Pianta generale palestra con indicazione del giunto tecnico di separazione dal blocco aule

In seguito al sisma verificatosi nel 2009 il complesso ha riportato diversi danni riconducibili alla sua struttura irregolare.

In corrispondenza del blocco delle aule sono stati rilevati gravi ed estesi danneggiamenti agli elementi strutturali in c.a. quali travi, pilastri e scale, simili ad ogni piano; in particolare, in corrispondenza del vano scala 1 (quello più irregolare, senza alcun giunto strutturale), la struttura ha subito gravi lesioni (vedasi fig.97)



Figura 97 Lesioni agli attacchi con il blocco aule in corrispondenza delle solette rampanti delle travi

La presenza di tamponamenti rigidi sotto le ampie finestre a nastro ha provocato lesioni da taglio sui pilastri adiacenti a livello dell'attacco tra elemento strutturale portante e parete esterna (vedasi fig.98).



Figura 98 Interazione pilastro-tamponamento rigido sotto finestra

In corrispondenza dei giunti tecnici di separazione (sia quello del blocco aule, sia quello tra blocco aule e palestra) la struttura ha subito fenomeni di martellamento (vedasi fig.99)³⁷.

³⁷ W. Salvatore-S. Caprili, V. Barberi, *Rapporto dei danni provocati dall'evento sismico del 6 aprile sugli edifici scolastici del centro storico dell'Aquila*



Figura 99 Fenomeni di martellamento del giunto

Conclusioni

Questo esempio racchiude in sé diverse problematiche legate all'assenza di regolarità strutturale, quali il martellamento tra strutture, il piastrino tozzo e l'asimmetria della pianta. Appare di tutta evidenza il perché oggi l'edificio si presenti così gravemente lesionato a seguito del sisma del 2009.

Conclusioni della Tesi

In queste pagine si è analizzata l'importanza della regolarità nella costruzione di edifici in zona sismica. Attraverso i diversi capitoli si è giunti ad una sintesi del “*caso italiano*”, anche analizzando esempi pratici che presentino problematiche in tema di regolamenti edilizi. Ciò porta a poter concludere che il decentramento dei poteri, avvenuto sin dagli anni '70 del '900, ha dato sì la possibilità di un maggiore controllo, in termini di regole, a livello locale, ma ha altresì comportato la presenza di alcune indicazioni non adatte a zone a rischio sismico.

Dai dati raccolti sono emerse situazioni differenziate da zona a zona, ma con un comune denominatore. Esse possono riassumersi in incongruenze relative ad altezze degli edifici e distanze tra gli stessi. Risultano inoltre, nonostante l'ampia letteratura nello specifico, carenze normative per quanto riguarda i piani pilotis. Essendo infatti l'argomento non trattato dalla normativa tecnica, e spesso agevolato dai Regolamenti Edilizi Comunali, tale fenomeno genera situazioni di “*piano soffice*” o, a causa del permesso di costruire edifici realizzati con materiali differenti e affiancati, realizzando un fronte unico su strada, origina episodi di “*martellamento*”. A questo va aggiunta la situazione dei nuclei storici che, essendo tutelati dalla Sovrintendenza, a volte incorrono in danni evitabili provocati da sismi poiché non si è potuto operare attraverso un intervento, probabilmente più invasivo rispetto a uno più blando di miglioramento, che lo avrebbe però tutelato da gravi danni alle costruzioni.

E' quindi fondamentale ricordare come la scelta di un'appropriata configurazione del sistema strutturale – “regolarità” -, dalla quale dipende la reale performance sismica degli edifici, è uno degli aspetti più importanti nel campo della progettazione antisismica. Nonostante ciò, poca attenzione viene solitamente posta su tale aspetto nella progettazione sismica e, a dispetto della sua reale importanza, solamente alcune delle recenti normative sottolineano tale questione. Pertanto, il problema non è mai tenuto in debita considerazione nella corrente pratica professionale, a partire dal primo passo della progettazione architettonica, quando viene cioè definita la morfologia dell'edificio. Ciò implica che, spesso, il sistema strutturale non venga progettato come un reale sistema resistente ai terremoti che si integrano nel comportamento dell'intero edificio, ma semplicemente “calcolato”, ignorandone il reale comportamento dovuto alla forma ed alla configurazione sotto severi input sismici. Tale situazione anomala può dare luogo a conseguenze drammatiche all'atto del progetto di riabilitazione di edifici realizzati, ad origine, in zona non sismica e quindi caratterizzati da forme architettoniche note per essere inefficienti o spesso addirittura pericolose dal punto di vista sismico. Tali edifici richiedono una riabilitazione quando



il sito in cui sorgono viene successivamente identificato come sismico e la loro configurazione deve essere riesaminata, anche se conservata, con lo scopo di raggiungere gli obiettivi di resistenza senza collasso, subendo lo stesso danneggiamento atteso per gli edifici ordinari.

In conclusione, la situazione normativa italiana si gioverebbe di un sicuro miglioramento se, nella redazione dei Regolamenti Edilizi Comunali, si ponesse più attenzione al rischio sismico legato alla propria zona, evitando che si costruiscano edifici che non rispettino i fondamentali criteri di regolarità strutturale.



BIBLIOGRAFIA

- Enzo Saviero, Bruno Briseghella, Tobia Zordan, *Edilizia Sismica (XXI secolo)*, 2010.
- Aurelio Ghersi, *La regolarità strutturale nella progettazione di edifici in zona sismica*.
- Giacomo Boffi, *L'azione sismica*, 2012.
- Teresa Guevara Perez, *Seismic Regulations Versus Modern Architectural and Urban Configurations*, 2010.
- Stephen Trobiner, *La casa baraccata: un sistema antisismico nella Calabria del XVIII secolo*, in *Costruire in Laterizio* 56, pp. 111-112, 1997.
- DP 25/02/1935.
- RDL 1937/2105.
- Norme per la tutela, governo ed uso del territorio – Legge Urbanistica della Calabria, 16 Aprile 2002.
- Comune di Avellino, *Regolamento Edilizio*, 2007.
- Comune di Soncino, *Regolamento Edilizio*, 2010.
- Comune di Reggio Calabria, *Regolamento Edilizio*, 2002.
- Comune di Messina, *Regolamento Edilizio*, 2003.
- Regolamento edilizio di Sanfront, 3 giugno 2003 pag. 14.
- Fernando Lugli, *La sicurezza sismica dei portici: elementi di indirizzo per la tutela e la valorizzazione*.
- Francesca Ceroni, *Il comportamento degli edifici in muratura sotto azioni sismiche*, Hevelius Webzine.
- Codice dei beni culturali e del paesaggio, Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42.
- Michele Maugeri, Salvatore Grasso, *Innovazione dell'ingegneria geotecnica sismica*.
- Los Angeles Municipal Code, 2013.



- FEMA, *Earthquake-Resistant Design Concepts*, 2010.
- Shunsuke Otani-Chiba University, *Historical Development of Building Codes in Japan*, 2007, Kobe.
- Mistumasa Midorikawa - Izuru Okawa - Masanori Iba -Masaomi Teshigawara, *Performance-Based Seismic Design Code for Buildings in Japan*, 2001.
- Elysa Fazzino, *Dalla California al Giappone, occhio alle norme antisismiche*, Sole 24 Ore, 9 Aprile 2009.
- Yuji Ishiyama, Dr. Eng. Professor Emeritus, *Earthquake Damage and Seismic Code for Buildings in Japan*.
- A. Ilki- Z. Celep, *Earthquakes, Existing Buildings and Seismic Design Codes in Turkey*, Arabian Journal for Science and Engineering, vol.37 n.2. Turkish Earthquake Code, 2007.
- Lorenzo de Stefani, *Tecniche innovative per il miglioramento sismico di edifici storico-monumentali*, 2012.
- Domenico Liberatore, *Collassi degli edifici scolastici indotti dal terremoto dell'Aquila*, 2012.
- Prof. Ing. Maria Gabriella Mulas, *Relazione di perizia- Casa dello Studente*, Tribunale Penale di l'Aquila.
- Unità E1- UNIPG, *Configurazioni strutturali per l'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi innovativi di protezione sismica*, 2006.
- W. Salvatore-S. Caprili, V. Barberi, *Rapporto dei danni provocati dall'evento sismico del 6 aprile sugli edifici scolastici del centro storico dell'Aquila*.

