Di.Mo.Re. Srl – spin-off accademico dell'Università degli Studi di Bergamo

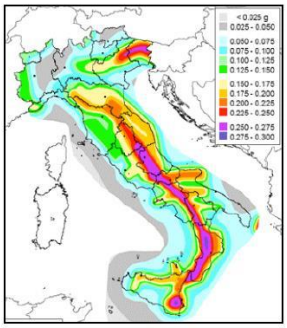
Seminario informativo: la vulnerabilità sismica delle strutture

Paolo Riva

Brescia, 03 novembre 2016

RISCHIO SISMICO

E' un concetto generale che comprende sia la probabilità dell'evento, sia le conseguenze che l'evento stesso potrebbe produrre. E' la misura dei danni che, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti), ci si può attendere in un dato intervallo di tempo.



PERICOLOSITA' P

La pericolosità sismica misura la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi una certa soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA). Dipende dal tipo di terremoto, dalla distanza dall'epicentro nonché dalle condizioni geomorfologiche. E' indipendente da ciò che l'uomo ha costruito.

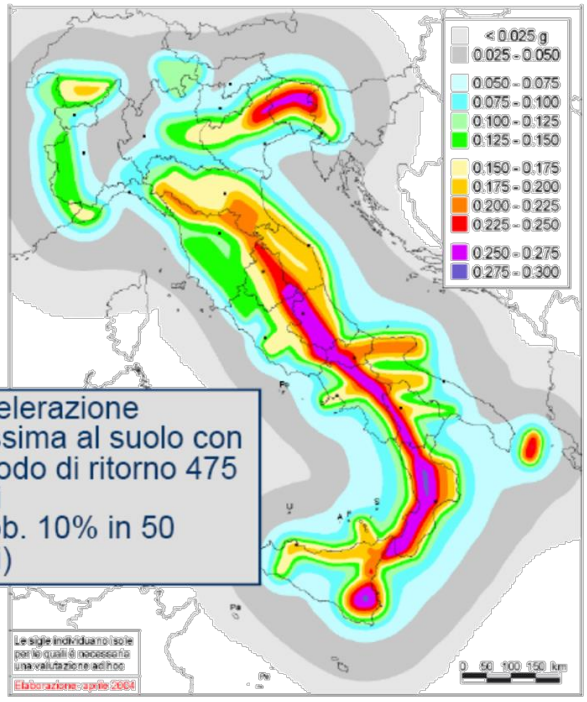
VULNERABILITA' V

La vulnerabilità esprime la probabilità che una struttura di un certo tipo possa subire un certo livello di danneggiamento a seguito di un terremoto di una determinata intensità. La misura è legata alla definizione e valutazione del danno, che a sua volta è legato alla perdita o riduzione di funzionalità dell'opera.

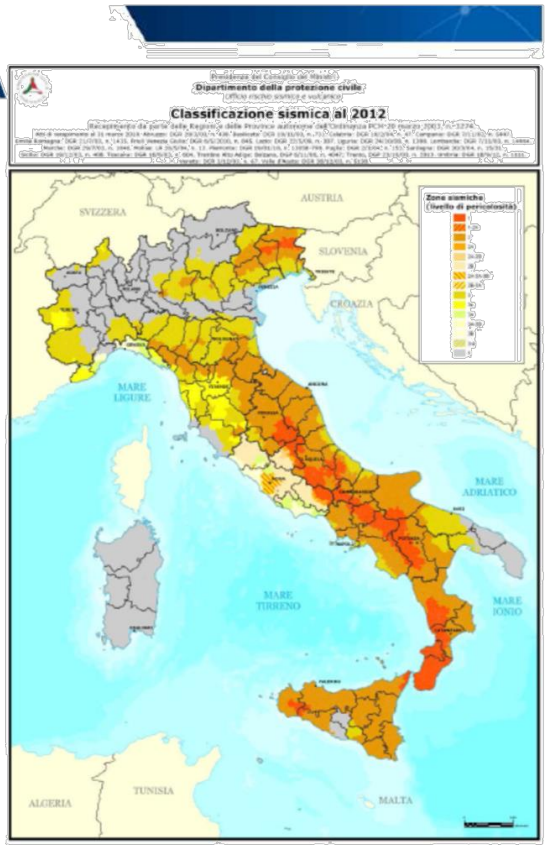
ESPOSIZIONE E

Misura la presenza di beni a rischio e, dunque, la conseguente possibilità di subire un danno (economico, in vite umane, ai beni culturali, ecc...).
- Prima dell'evento: quantità e qualità dei beni esposti
- Dopo l'evento: valore delle perdite causate dal terremoto: economiche, artistiche, culturali, morti, feriti, senzatetto…

PERICOLOSITÀ E CLASSIFICAZIONE SISMICA



Accelerazione massima al suolo con periodo di ritorno 475 anni (Prob. 10% in 50 anni)



Fonte: Prof. Mauro Dolce – Protezione Civile

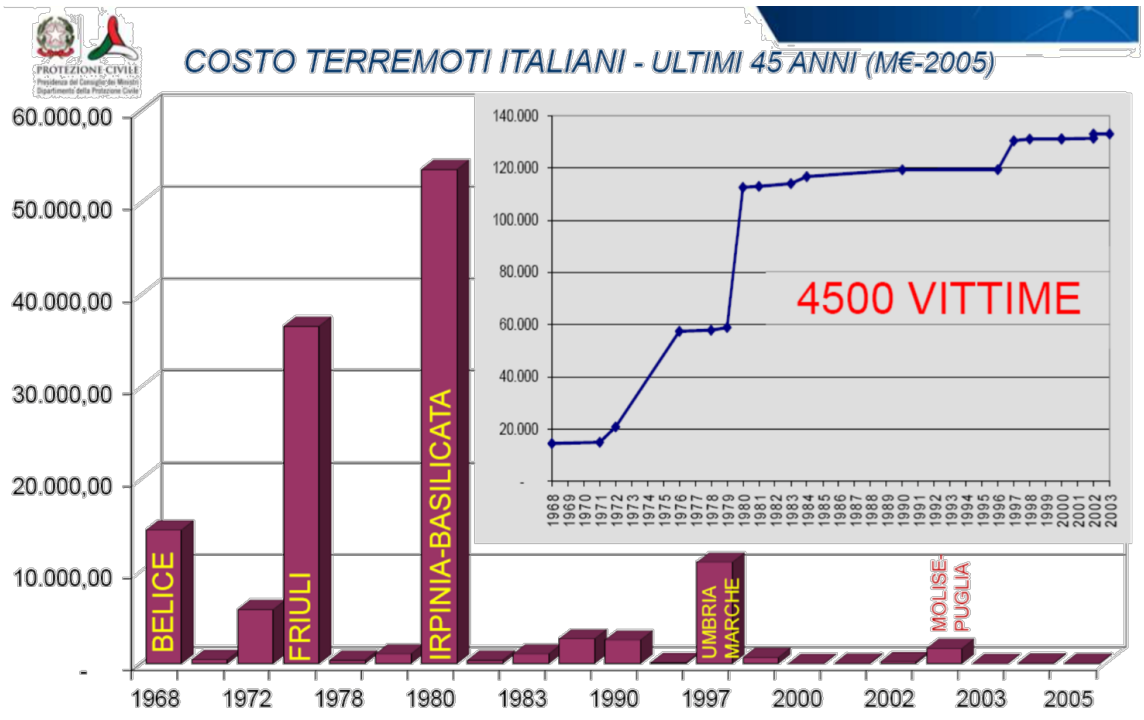
AZIONI PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

1. **MIGLIORAMENTO DELLE CONOSCENZE**

2. **RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ E DELL'ESPOSIZIONE**

3. **MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI**

PERDITE ECONOMICHE LEGATE AI TERREMOTI

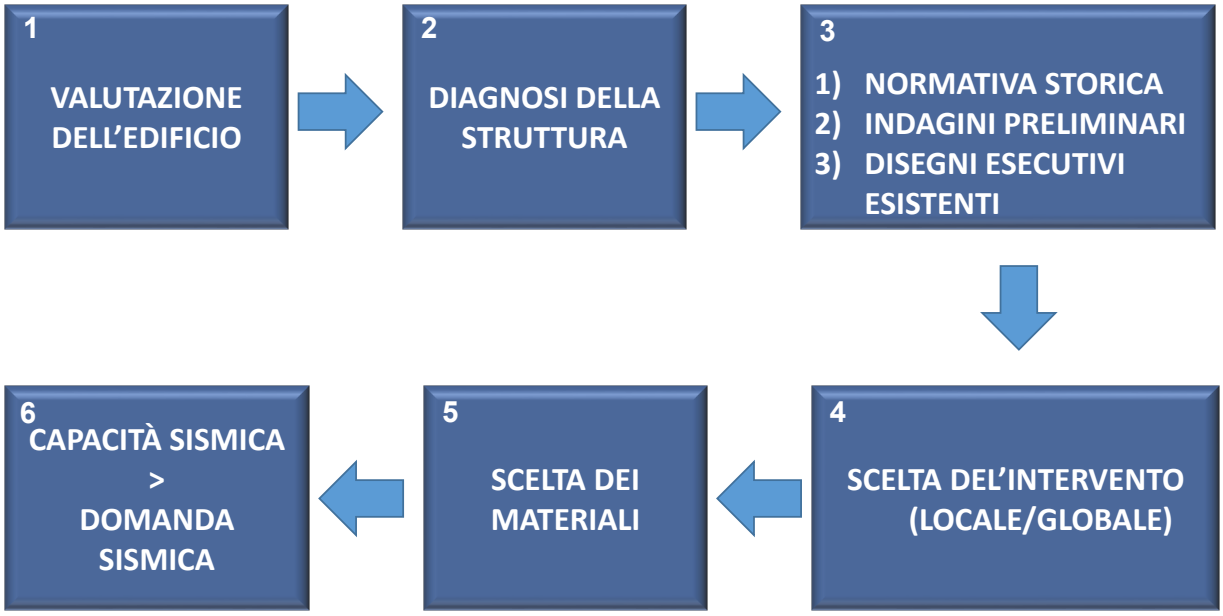


+ ABRUZZO'09 + EMILIA'12 ~ **€ 160 Mld → 3-3,5 Mld €/an.**

Fonte: Prof. Mauro Dolce – Protezione Civile

VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI

INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA



NTC 2008
12 RIFERIMENTI TECNICI

Per quanto non diversamente specificato nella presente norma, si intendono coerenti con i principi alla base della stessa, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:
- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali o, in mancanza di esse, nella forma internazionale EN; **EUROCODICE 6**
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI.

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:
- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del
- Linee Guida pe
  successive m
  Consiglio Sup
- Istruzioni e docu

Possono essere u
livelli di sicurezza

RIFERIMENTI TECNICI:
- NORME TECNICHE COSTRUZIONI – **NTC 2008**
- **EUROCODICE 6** – EC6
- **LINEE GUIDA** PER LA VALUTAZIONE E RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL PATRIMONIO CULTURALE con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni

8.2 CRITERI GENERALI

Per quanto non diversamente specificato nel presente capitolo, le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono il riferimento anche per le costruzioni esistenti.

Nel caso di interventi non dichiaratamente strutturali (impiantistici, di ridistribuzione degli spazi, ecc.) dovrà essere valutata la loro possibile interazione con gli SLU e gli SLE della struttura o parti di essa.

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi su costruzioni esistenti devono tenere conto dei seguenti aspetti:

- la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;
- la costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le strutture possono presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria.

Nella definizione dei modelli strutturali, si dovrà, inoltre, tenere conto che:

- la geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive;
- la conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo della omogeneità dei materiali stessi all'interno della costruzione, del livello di approfondimento delle indagini conoscitive e dell'affidabilità delle stesse;
- i carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.

Si dovrà prevedere l'impiego di metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile e l'uso, nelle verifiche di sicurezza, di adeguati "fattori di confidenza", che modificano i parametri di capacità in funzione del livello di conoscenza relativo a geometria, dettagli costruttivi e materiali,

valutazione della sicurezza e progetto degli interventi sono affetti da un grado di incertezza diverso da quello degli edifici di nuova progettazione.

LIVELLO DI APPROFONDIMENTO DELLE INDAGINI

→ LIVELLO DI CONOSCENZA – **LC1,LC2,LC3**

→ FATTORI DI CONFIDENZA – **FC**

– FC differenti per i BENI MONUMENTALI

8.3 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU; nel caso in cui si effettui la verifica anche nei confronti degli SLE i relativi livelli di prestazione possono essere stabiliti dal Progettista di concerto con il Committente.

BENI MONUMENTALI – SLA danno bene artistico

Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza quando ricorra anche una delle seguenti situazioni:

- riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta ad azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni), situazioni di funzionamento ed uso anomalo, deformazioni significative imposte da cedimenti del terreno di fondazione;
- provati gravi errori di progetto o di costruzione;
- cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o della classe d'uso della costruzione;
- interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità o ne modifichino la rigidezza.

Qualora le circostanze di cui ai punti precedenti riguardino porzioni limitate della costruzione, la valutazione della sicurezza potrà essere limitata agli elementi interessati e a quelli con essi interagenti, tenendo presente la loro funzione nel complesso strutturale.

La valutazione della sicurezza deve permettere di stabilire se:

- l'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
- l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
- sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante.

→ Valutazione della sicurezza con riferimento ai soli Stati limite ultimi.

→ Dovrà effettuarsi ogni qual volta si eseguano interventi strutturali

→ Il Progettista dovrà esplicitare, in un'apposita relazione, i livelli di sicurezza già presenti e quelli raggiunti con l'intervento, nonché le eventuali conseguenti limitazioni da imporre nell'uso della costruzione.

8.4.1 INTERVENTO DI ADEGUAMENTO

È fatto obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, all'adeguamento della costruzione, a chiunque intenda:

a) sopraelevare la costruzione;

b) ampliare la costruzione mediante opere strutturalmente connesse alla costruzione;

c) apportare variazioni di classe e/o di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%; resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;

d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intera struttura post-intervento, secondo le indicazioni del presente capitolo.

Una variazione dell'altezza dell'edificio, per la realizzazione di cordoli sommitali, sempre che resti immutato il numero di piani, non è considerata sopraelevazione o ampliamento, ai sensi dei punti a) e b). In tal caso non è necessario procedere all'adeguamento, salvo che non ricorrano le condizioni di cui ai precedenti punti c) o d).

8.4.2 INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO

Rientrano negli interventi di miglioramento tutti gli interventi che siano comunque finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate.

È possibile eseguire interventi di miglioramento nei casi in cui non ricorrano le condizioni specificate al paragrafo 8.4.1.

Il progetto e la valutazione della sicurezza dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme.

→ La valutazione della sicurezza è **obbligatoria**; è finalizzata a determinare l'entità massima delle azioni cui la struttura può resistere con il grado di sicurezza richiesto e riguarda la struttura nel suo insieme, oltre che i possibili meccanismi locali.

→ Si tratta di **interventi che fanno variare significativamente** la rigidezza, la resistenza e/o la duttilità dei singoli elementi o parti strutturali e/o introducono nuovi elementi strutturali, così che **il comportamento strutturale locale o globale**, particolarmente rispetto alle azioni sismiche, **ne sia significativamente modificato** (La **variazione dovrà avvenire in senso migliorativo**, ad esempio riducendo le irregolarità in pianta e in elevazione, trasformando i meccanismi di collasso da fragili a duttili).

8.4.3 RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE

In generale, gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura e interesseranno porzioni limitate della costruzione. Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati e documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non siano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

La relazione di cui al par. 8.2 che, in questi casi, potrà essere limitata alle sole parti interessate dall'intervento ed a quelle con esse interagenti, dovrà documentare le carenze strutturali riscontrate, risolte e/o persistenti, ed indicare le eventuali conseguenti limitazioni all'uso della costruzione.

→ **l'intervento comporta variazioni trascurabili di rigidezza e di peso** e non cambia significativamente il comportamento globale della struttura:

EX: ricadono in questa categoria:
- Interventi di **rinforzo delle connessioni tra elementi strutturali diversi** (ad es. tra pareti murarie, tra pareti e travi o solai, anche attraverso l'introduzione di catene/tiranti), in quanto comunque migliorano anche il comportamento globale della struttura, particolarmente rispetto alle azioni sismiche.
- **Sostituzione di coperture e solai** (a condizione che ciò non comporti una variazione significativa di rigidezza nel proprio piano, importante ai fini della ridistribuzione di forze orizzontali, né un aumento dei carichi verticali statici).

8.5 PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E LA REDAZIONE DEI PROGETTI

Nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi. Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal Progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione, tenendo conto delle indicazioni generali di seguito esposte.

PROGETTO DEL PIANO DELLE INDAGINI DIAGNOSTICHE

- Identificazione dell'organismo strutturale !!!

- Verifica stato di conservazione !!!

Deve contenere i **criteri di scelta** e **finalità delle singole indagini.**

8.5.1 ANALISI STORICO-CRITICA

Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato.

- Ricerca archivistica:
  - disegni originali di progetto
  - ricostruzione la storia progettuale e costruttiva
  - identificazione fasi edilizie (storia destinazioni d'uso)
  - storie di carico (ex: terremoti)
- Considerazioni sullo sviluppo storico del quartiere in cui l'edificio è situato.
- Regole dell'arte locali e storia delle tecniche.

VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI IN MURATURA

La muratura

La muratura rappresenta una delle più antiche tecniche costruttive. Le caratteristiche che qualificano il comportamento meccanico della muratura sono:

- Asimmetria di comportamento compressione-trazione

- Buona resistenza a compressione

- Scarsa o trascurabile resistenza a trazione (resistenza a trazione del giunto malta-blocco può essere dell'ordine di 1/30 della resistenza a compressione)

- **Disomogeneità** (differenza di comportamento da punto a punto)

- Anisotropia (differenza di comportamento nelle diverse direzioni)

- Non linea**rità** del legame sforzi-deformazioni

Edifici in muratura esistenti:

- Raramente organizzati per resistere ai carichi orizzontali

La muratura

- materiale composito con proprietà diverse da quelle dei suoi componenti

ELEMENTI
- naturali: pietra, tufo, argilla cruda
- artificiali: laterizio pieno, laterizio forato, blocchi cls forati, cls alveolare

Pietra Calcarea

Elementi di laterizio - mattoni

MALTA
- materiali costituenti: cemento, calce aerea (grassello), calce idrata, sabbia, pozzolana
- tipo: idraulica, pozzolanica, bastarda cementizia

Calce idraulica

Pozzolana

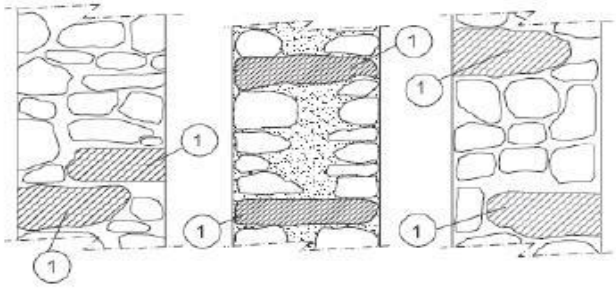
Clinker (cemento)

Indagini visive e giudizio sulla qualità

VERIFICA QUALITÀ DELLA TESSITURA IN PROSPETTO E IN SEZIONE

Di particolare importanza risulta la presenza o meno di elementi di collegamento trasversali (es. diatoni), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la tessitura, l'orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la qualità e consistenza della malta.

→ Singolo o doppio paramento, con sacco?
→ **con diatoni di collegamento?**
→ Muratura regolare/irregolare; omogenea/disomogenea?
→ Muratura listata
→ Ammorsatura



Rimozione 100x100cm intonaco:

(1) Interno/esterno → diatoni
(2) Angolate → ammorsatura

Fatiscenza muraria

Onna

Caratteristiche meccaniche della muratura

Tabella C8A.2.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte; f_m = resistenza media a compressione della muratura, $_0$ = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura

Tipologia di muratura	f_m (N/cm^2)	$_0$ (N/cm^2)	E (N/mm^2)	G (N/mm^2)	w (kN/m^3)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Ref: Circolare 2009

Caratteristiche meccaniche della muratura

Tabella 3.1. Valori di riferimento per le proprietà meccaniche delle diverse tipologie murarie: valori medi e deviazione standard del logaritmo.

Tipologia di muratura		f_m [N/cm^2]	τ_0 [N/cm^2]	E [MPa]	G [MPa]
Muratura in pietrame disordinata	μ	140	2.6	870	290
	σ_{ln}	0.29	0.24	0.21	0.21
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	μ	250	4.3	1230	410
	σ_{ln}	0.20	0.19	0.17	0.17
Muratura in pietra a spacco con buona tessitura	μ	320	6.5	1740	580
	σ_{ln}	0.19	0.14	0.14	0.14
Muratura a conci di pietra tenera	μ	190	3.5	1080	360
	σ_{ln}	0.27	0.20	0.17	0.17
Muratura a blocchi lapidei squadrati	μ	700	10.5	2800	860
	σ_{ln}	0.14	0.14	0.14	0.09
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	μ	320	7.6	1500	500
	σ_{ln}	0.26	0.21	0.20	0.20
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es. doppio UNI foratura < 40%)	μ	650	28.0	4550	1138
	σ_{ln}	0.24	0.14	0.24	0.24
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	μ	500	35.0	4500	1350
	σ_{ln}	0.20	0.14	0.20	0.20
Muratura in blocchi semipieni con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	μ	350	11.5	3150	945
	σ_{ln}	0.14	0.13	0.14	0.14
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	μ	175	11.0	1400	350
	σ_{ln}	0.14	0.14	0.14	0.14
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (perc. foratura < 45%)	μ	370	21.0	2960	740
	σ_{ln}	0.19	0.14	0.19	0.19

f_m: resistenza a compressione della muratura; τ_0: resistenza a taglio della muratura; E: modulo di elasticità normale; G: modulo di elasticità tangenziale

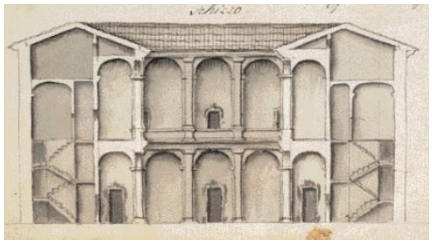
il riconoscimento delle caratteristiche costruttive della muratura può essere d'ausilio per l'attribuzione di un'opportuna classe tipologica sulla base della quale potere assumere dei valori di riferimento delle proprietà meccaniche, come disponibili in letteratura o in documenti normativi per tipologie analoghe.

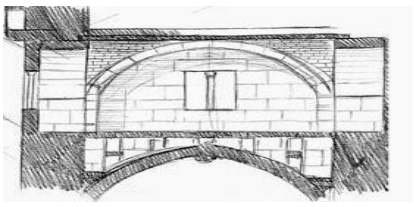
valori di base relativi al mancato rispetto di alcune regole dell'arte (quali ad esempio la presenza di una buona connessione trasversale, malta di buona qualità, etc.); il valore medio può essere eventualmente modificato sulla base dei coefficienti proposti nella Tabella C8A.2.2 della Circolare del 2009, mantenendo inalterata la deviazione standard.

Ref: CNR-DT 212/2013

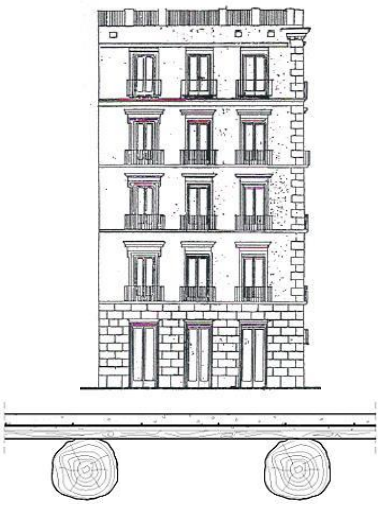
Classi degli edifici

Classe I
Strutture verticali (1 o 2 piani) ed orizzontali in muratura

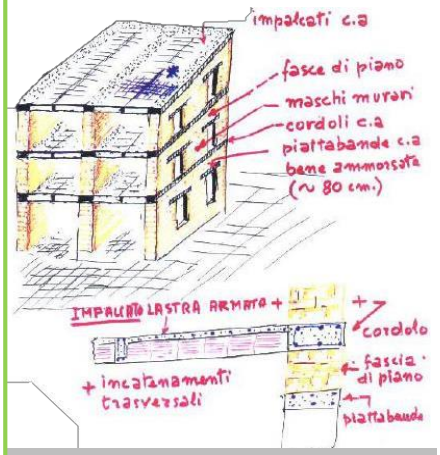




Classe II
Strutture verticali in muratura (anche pluripiano), solai in legno o acciaio



Classe III
Strutture verticali in muratura e orizzontamenti in c.a. (strutture recenti)



!! NB: Da non confondere con gli edifici con solai realizzati con cordoli in breccia su murature di qualità scadente

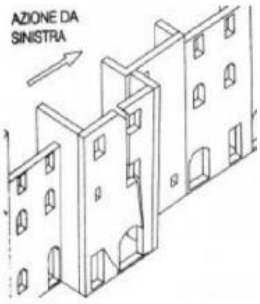
Rilievo geometrico e strutturale

Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno.

Analisi STRATIGRAFICA e Ricostruzione FILOLOGICA



RILIEVO:
→ GEOMETRICO
→ STRUTTURALE e dei dettagli costruttivi
→ MATERICO
→ DEL DEGRADO
→ QUADRI FESSURATIVI E DEFORMATIVI ed interpretazione
→ EIDOTIPO (con edifici in adiacenza)
→ **MONITORAGGIO**

Fasi della conoscenza: non sequenziali ma integrate.

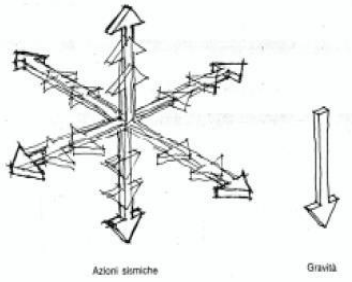
Edifici in muratura in zona sismica

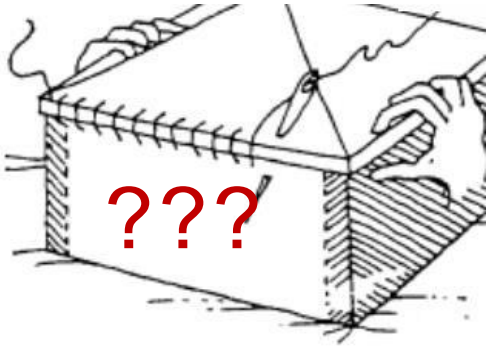
La resistenza dei muri a forze agenti **nel piano del muro è molto maggiore rispetto a forze agenti ortogonalmente al piano**, e quindi è maggiore la loro efficacia come elementi di controventamento.

Setto resistente
e rigido nel piano

Maschio murario
non resistente e
non rigido fuori piano

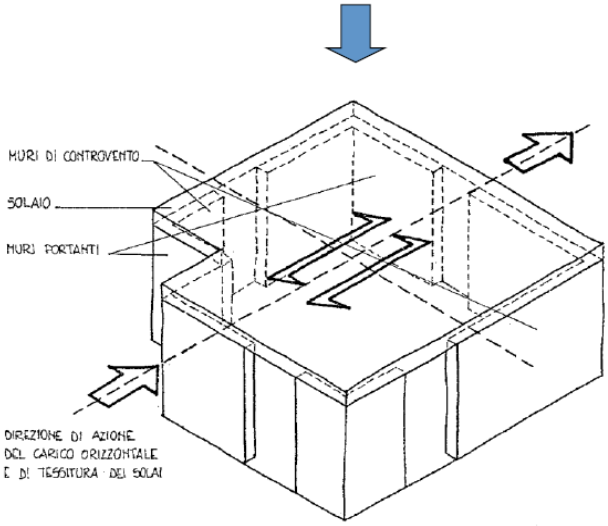
(da Touliatos, 1996)





Concezione strutturale per EDIFICI NUOVI (CLASSE III) in muratura

L'edificio a muratura portante deve essere concepito e realizzato come un assemblaggio *tridimensionale* di muri e solai. L'organizzazione dell'intera struttura e l'interazione ed il collegamento tra le sue parti devono essere tali da assicurare appropriata resistenza e stabilità, ed un *comportamento d'insieme "scatolare".*



L'edificio è un assemblaggio di:

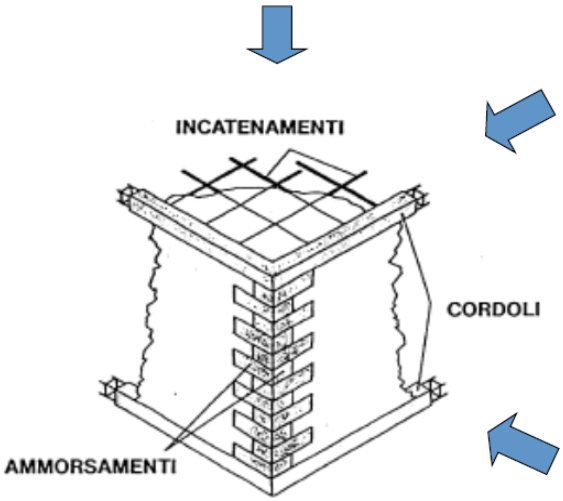
- muri che sopportano principalmente i carichi verticali (detti convenzionalmente "portanti")
- muri che sopportano principalmente i carichi orizzontali (detti convenzionalmente "di controventamento"), disposti parallelamente alla direzione delle forze orizzontali
- muri che svolgono sia una funzione portante che di controventamento
- solai sufficientemente rigidi e resistenti per *ripartire le azioni tra i muri di controventamento* (azione di diaframma)

Edifici in muratura in zona sismica

Concezione strutturale per EDIFICI NUOVI (CLASSE III) in muratura

Per garantire il comportamento "scatolare":

muri ed orizzontamenti devono essere opportunamente collegati fra loro. Tutte le pareti devono essere collegate al livello dei solai mediante *cordoli di piano* e, tra di loro, mediante *ammorsamenti* lungo le intersezioni verticali. Devono inoltre essere previsti opportuni *incatenamenti* al livello dei solai, aventi lo scopo di collegare tra loro i muri paralleli della scatola muraria.



Le pareti portanti sono considerate resistenti anche alle azioni orizzontali quando hanno una *lunghezza* non inferiore a 0,3 volte l'altezza di interpiano; e devono rispettare degli *spessori minimi*.

Ai fini di un adeguato comportamento statico e dinamico dell'edificio, tutti le pareti devono assolvere, per quanto possibile, sia la *funzione portante che di controventamento*.

Gli orizzontamenti sono generalmente solai piani, o con falde inclinate in copertura, che devono assicurare, per resistenza e rigidezza, *la ripartizione delle azioni orizzontali fra i muri di controventamento*.

Edifici in muratura in zona sismica

Concezione strutturale di EDIFICI ESISTENTI (CLASSI I E II, edifici antichi)

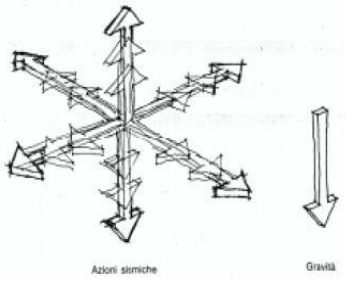
- Scadenti collegamenti tra le murature e tra orizzontamenti e muratura.
- Nessun comportamento scatolare → scomposizione in macro-elementi

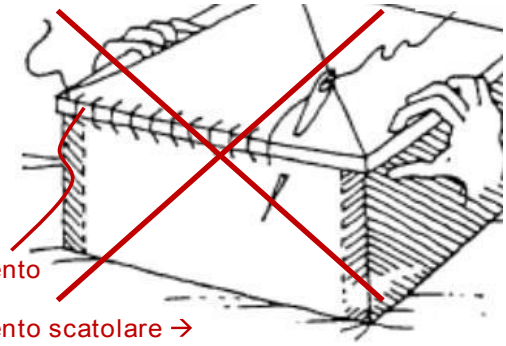
Setto resistente
e rigido nel piano

Maschio murario
non resistente e
non rigido fuori piano

(da Touliatos, 1996)

Terremoti
superficiali



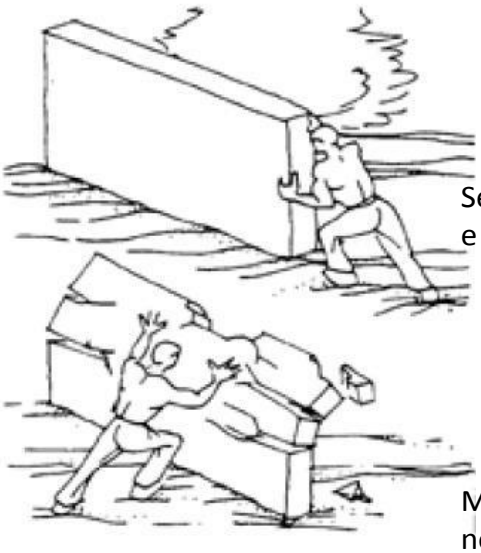


Sistemi di collegamento
spesso inefficaci !!!
Nessun comportamento scatolare →
macro-blocchi/macro-elementi

Edifici in muratura in zona sismica

Concezione strutturale di EDIFICI ESISTENTI (CLASSI I E II, edifici antichi)

- Scadenti collegamenti tra le murature e tra orizzontamenti e muratura.
- Nessun comportamento scatolare → scomposizione in macro-elementi
- Collasso governato dall'attivazione di meccanismi locali

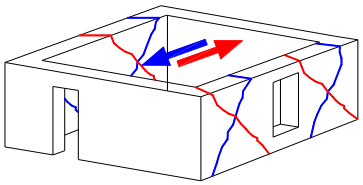


Setto resistente
e rigido nel piano

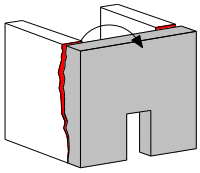
Maschio murario
non resistente e
non rigido fuori piano

(da Touliatos, 1996)

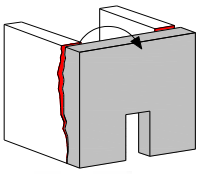
MECCANISMI NEL PIANO
- II modo

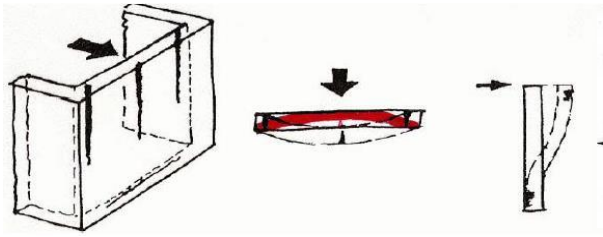


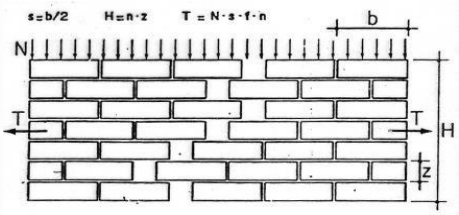
MECCANISMI FUORI
PIANO
I modo

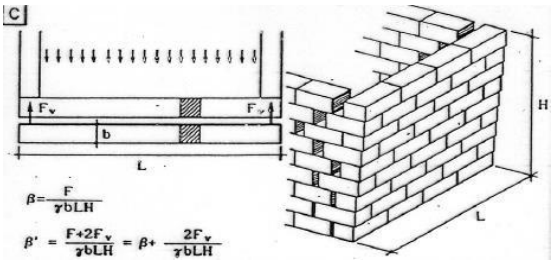


COMPORTAMENTO DELLE PARETI AL DI FUORI DEL PIANO







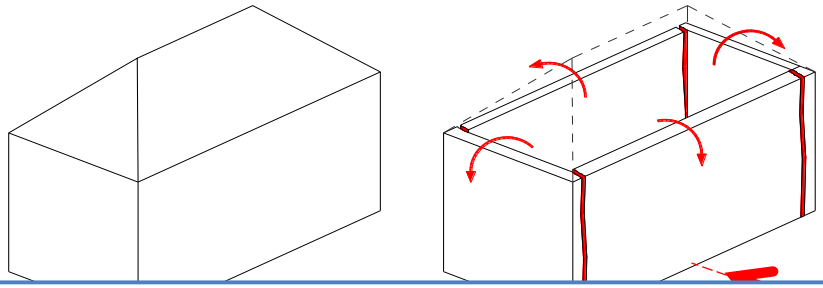


La muratura è un materiale con resistenza a **trazione molto bassa**. Per effetto delle tensioni di trazione prodotte dal taglio o dalla flessione la muratura si fessura dando origine a modalità di collasso di vario tipo.

Tratto da: RELUIS-DPC: Il comportamento delle strutture in muratura Meccanismi di danno.
Modulo didattico a cura di: A.Prota, G.Zuccaro, M.Di Ludovico, C.D'Ambra, F. Papa, A.G. Pizza, F. Giordano

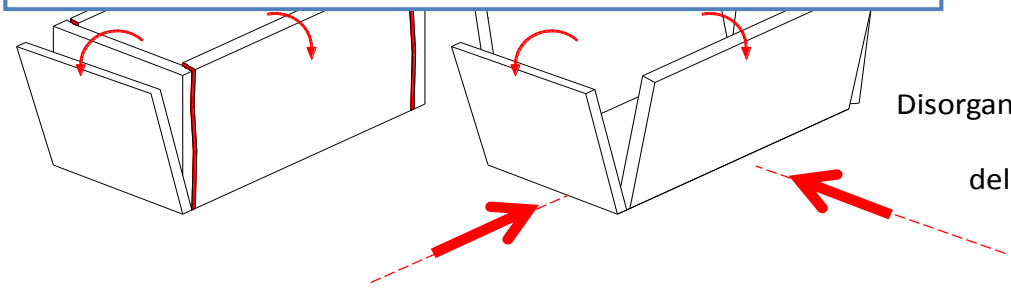
Meccanismi fuori piano

MECCANISMI FUORI PIANO



Le fessure dipendono dal grado di ammorsamento delle murature

Vulnerabilità degli edifici ←→ Meccanismi fuori piano associato al ribaltamento delle pareti.
Mitigazione del rischio sismico:
→ prevenire o ritardare i meccanismi fuori piano
→ Catene e diaframmi di piano e di falda.

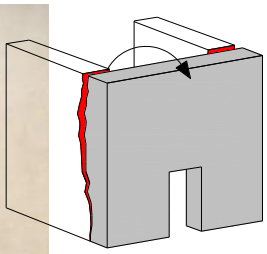


Disorganizzazione totale della scatola

Ribaltamento delle facciate e pareti perimetrali

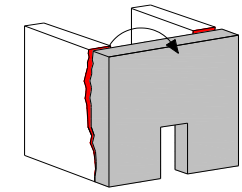
- Ribaltamento Composto

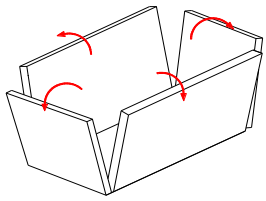
Ribaltamento delle facciate e pareti perimetrali



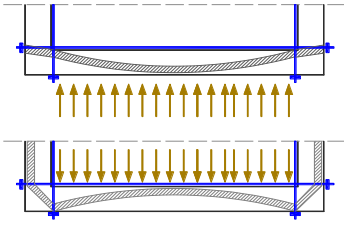
Crollo della parete perimetrale soggetta alla spinta della copertura e al peso della parete. Si osserva modesto grado di ammorsamento tra le pareti e mancanza e di diatoni di collegamento

Insufficiente incatenamento





Innesco del meccanismo dovuto all'insufficiente incatenamento



Insufficiente/Inefficace incatenamento

Insufficiente incatenamento

Catene lignee spesso inefficaci:
→ Ammalorate e tranciate;
→ Crisi sistemi di ancoraggio

Vulnerabilità per presenza di indebolimenti nei muri

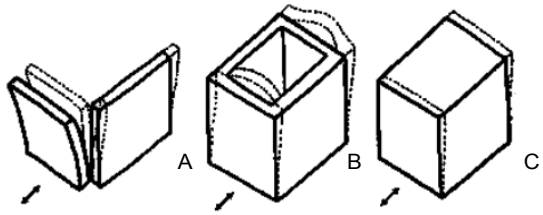
Presenza di canne fumarie nello spessore del muro

Sintesi degli elementi di vulnerabilità

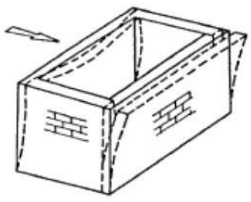
)

5.4) soluzione di continuità delle murature: PRESENZA DI **CAVITA'** (nicchie, canne fumarie) nello spessore del muro

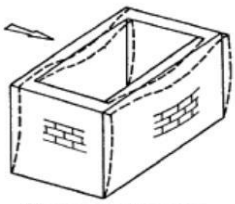
Ruolo collegamenti e rigidezza impalcati



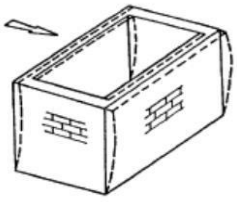
Comportamento di un edificio:
- A – a pareti indipendenti;
- B – effetto dei vincoli verticali;
- C – effetti dei collegamenti orizzontali di piano



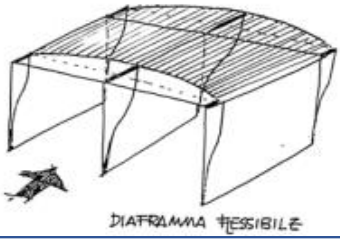
a) con solaio deformabile e senza cordolo



b) con cordolo e con solaio deformabile



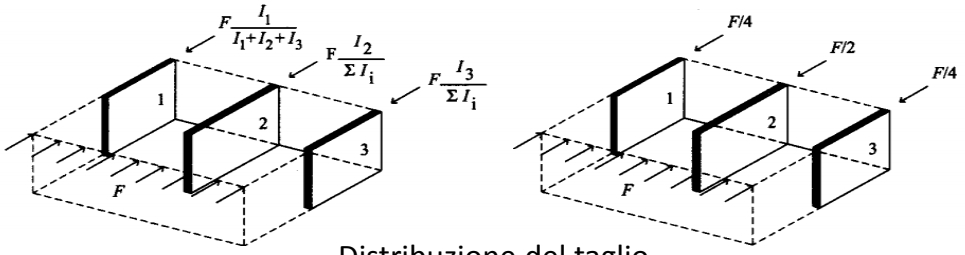
c) con cordolo e con solaio rigido



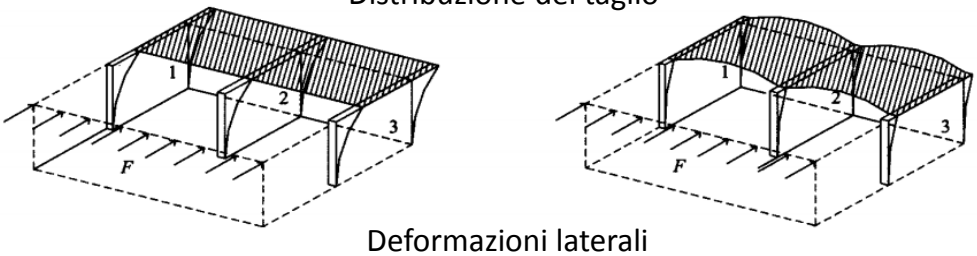
- Azione sismica funzione della rigidezza della scatola
- Azioni sulle pareti sismo-resistenti funzione tipologia diaframmi

Ruolo collegamenti e rigidezza impalcati

SOLAIO RIGIDO	SOLAIO DEFORMABILE



Distribuzione del taglio

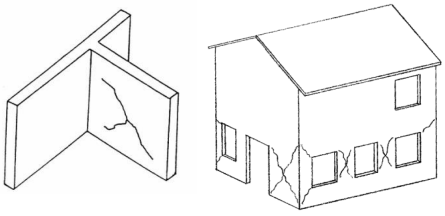


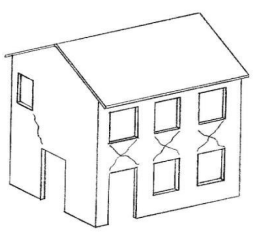
Deformazioni laterali

Meccanismi nel piano

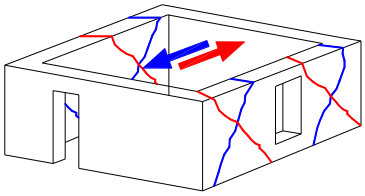
TIPOLOGIE DI COLLASSO PER AZIONI NEL PIANO

Collasso dei maschi murari	*Collasso delle fasce di piano*





Meccanismi nel piano – rottura a taglio dei maschi murari



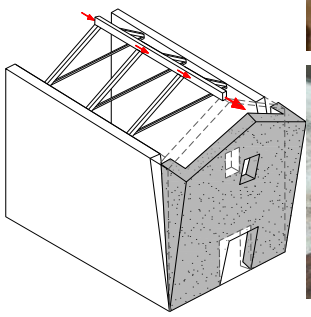
Irregolarità in pianta e in elevazione

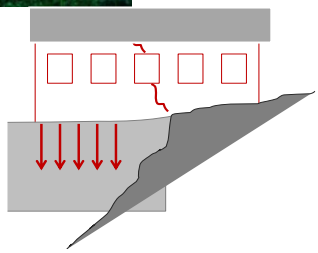
Struttura in c.a.

Sintesi degli elementi di vulnerabilità

6) presenza di spinte orizzontali non contrastate
6.1 insufficiente incatenamento di volte e archi
- insufficiente incatenamento di volte e archi
- catene lignee degradate
- efficacia del sistema di ancoraggio

6.2 spinta in copertura

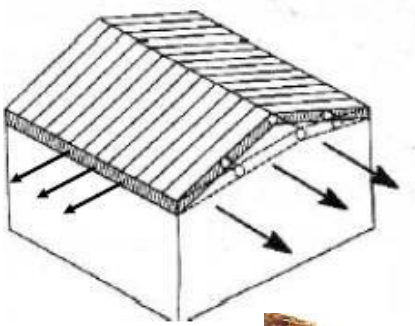


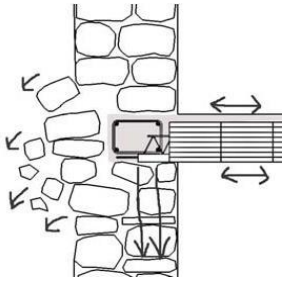


7) carenze delle fondazioni con rischio di cedimenti
7.1 disomogenea natura del terreno
struttura in parte su roccia e in parte su terreno
7.2 materiali sabbiosi quasi saturi soggetti a fenomeni di liquefazione
7.3. – Modesta profondità del piano di fondazione

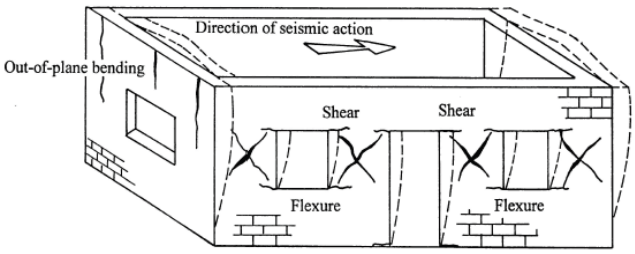
Sintesi degli elementi di vulnerabilità

8) Esiti di pregressi interventi sulle strutture:
- 8.1 pesanti coperture/solai in c.a.
- 8.2 cordoli robusti su murature scadenti e/o cordoli in breccia
- 8.3 significative soluzioni di continuità nella rigidezza di porzioni di edifici in aggregato

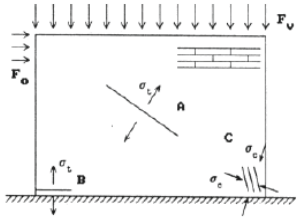




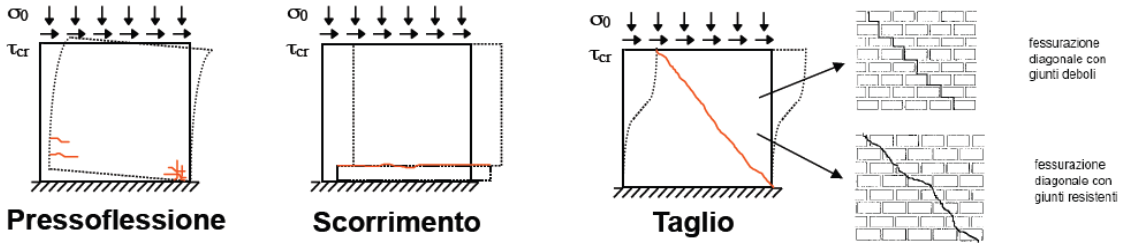
Meccanismi nel piano



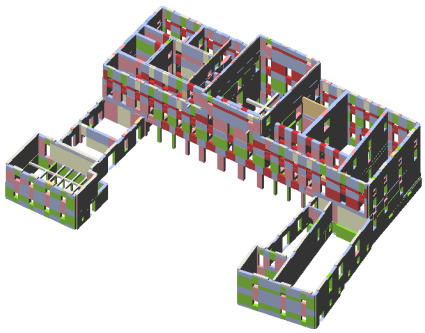
Deformazione dell'edificio e danni agli elementi della struttura portante in muratura



Danneggiamento delle pareti per azioni nel piano



Analisi sismica globale



• L'analisi della risposta globale di un edificio **ha significato solo** quando **sono impediti i meccanismi di collasso locali** fuori dal piano (presenza di catene, cordoli…).

• La risposta globale dell'edificio è governata dalla **resistenza nel piano delle pareti.**

• In **edifici inseriti in un aggregato**, il significato dell'analisi è convenzionale, a causa dell'interazione con gli edifici adiacenti.

• Quando la **costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme**, ma tende a reagire al sisma come un insieme di **sottosistemi** (macroelementi), la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico. In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali.

- ANALISI LINEARE STATICA
- ANALISI DINAMICA MODALE
- **ANALISI NON LINEARE STATICA → PUSHOVER**
- ANALISI DINAMICA NON LINEARE

Edifici fortemente irregolari (palazzo con barchesse) Chiesa (navata abside campanile)

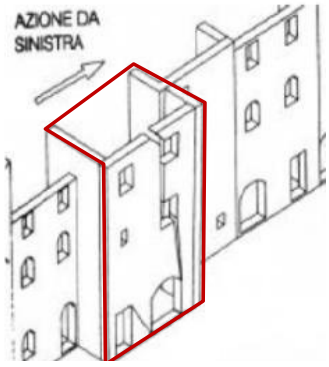
EDIFICI IN AGGREGATO

In presenza di edifici in aggregato, contigui, a contatto od interconnessi con edifici adiacenti, i metodi di verifica di uso generale per gli edifici di nuova costruzione possono non essere adeguati. Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti. A tal fine dovrà essere individuata l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

L'US dovrà avere continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata o da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi. Oltre a quanto normalmente previsto per gli edifici non disposti in aggregato, dovranno essere valutati gli effetti di: spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti, meccanismi locali derivanti da prospetti non allineati, US adiacenti di differente altezza.

COMPLESSO ARCHITETTONICO

UNITA' STRUTTURALE



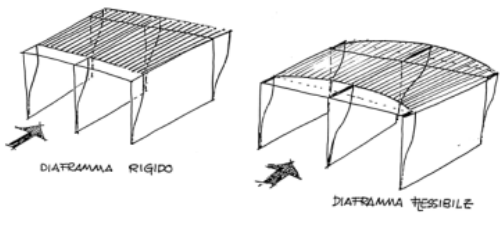
EDIFICI IN AGGREGATO

L'analisi globale di una singola unità strutturale assume spesso un significato convenzionale e perciò può utilizzare metodologie semplificate. La verifica di una US dotata di solai sufficientemente rigidi può essere svolta, anche per edifici con più di due piani, mediante l'analisi statica non lineare, analizzando e verificando separatamente ciascun interpiano dell'edificio, e trascurando la variazione della forza assiale nei maschi murari dovuta all'effetto dell'azione sismica. Con l'esclusione di unità strutturali d'angolo o di testata, così come di parti di edificio non vincolate o non aderenti su alcun lato ad altre unità strutturali, l'analisi potrà anche essere svolta trascurando gli effetti torsionali, nell'ipotesi che i solai possano unicamente traslare nella direzione considerata dell'azione sismica. Nel caso invece di US d'angolo o di testata è comunque ammesso il ricorso ad analisi semplificate, purchè si tenga conto di possibili effetti torsionali e dell'azione aggiuntiva trasferita dalle US adiacenti applicando opportuni coefficienti maggiorativi delle azioni orizzontali.

Qualora i solai dell'edificio siano flessibili si potrà procedere all'analisi delle singole pareti o dei sistemi di pareti complanari, ciascuna parete essendo soggetta ai carichi verticali di competenza ed alle corrispondenti azioni del sisma nella direzione parallela alla parete.

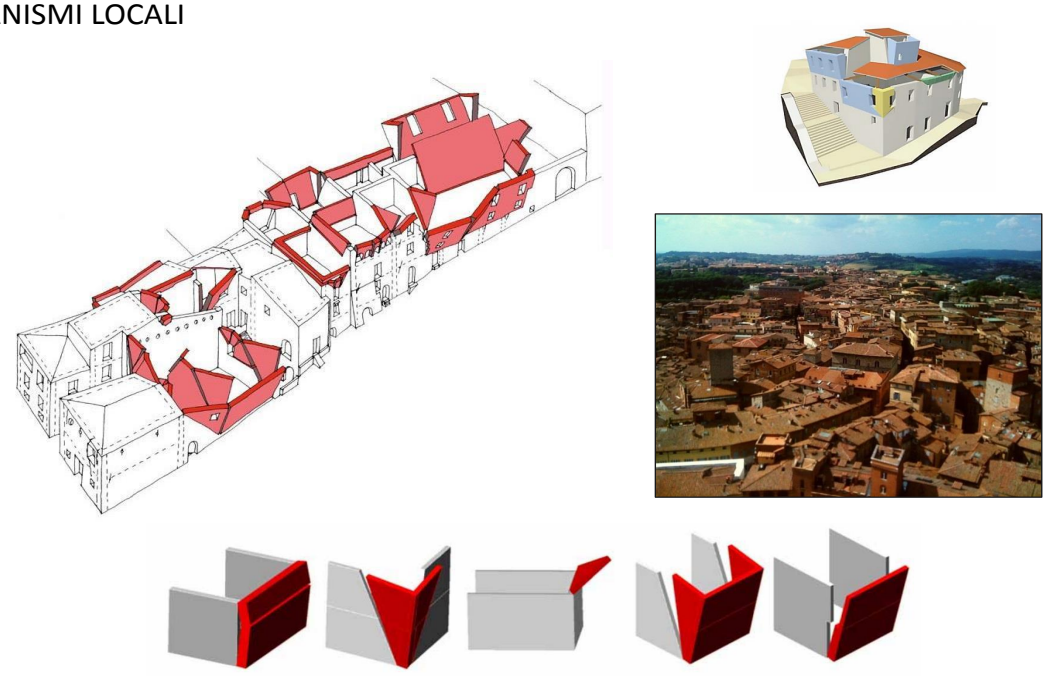
RIDISTRIBUZIONE tra pareti SOLO SE solai rigidi

Viceversa, distribuzione lungo i maschi murari di uno stesso allineamento



Edifici in aggregato

EDIFICI IN AGGREGATO → IN GENERALE: VALUTAZIONE UNITA' STRUTTURALE E MECCANISMI LOCALI

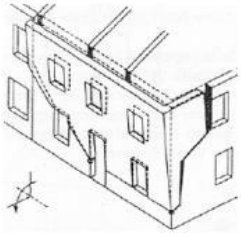


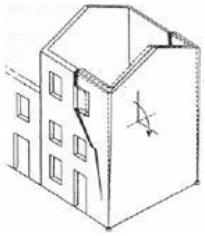
Tratto da: RELUIS-DPC: Il comportamento delle strutture in muratura Meccanismi di danno.
Modulo didattico a cura di: A.Prota, G.Zuccaro, M.Di Ludovico, C.D'Ambra, F. Papa, A.G. Pizza, F. Giordano

Analisi dei meccanismi locali

ANALISI LIMITE PER MECCANISMI LOCALI

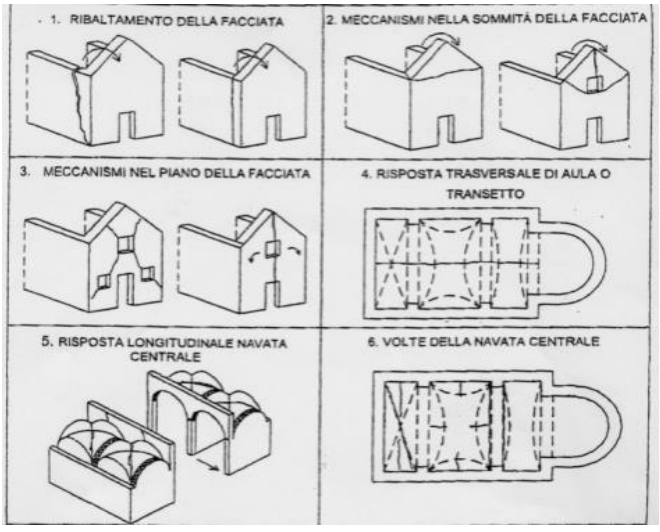
- approccio statico/cinematico
- Si considerano cinematismi tra **blocchi rigidi**
- Si considera una distribuzione di forze proporzionali ai pesi (λW) o ad una distribuzione variabile con l'altezza, scalata secondo un moltiplicatore (λ).
- Si cerca di valutare il valore minimo moltiplicatore (λ_{MIN}) che attivi un meccanismo di collasso.





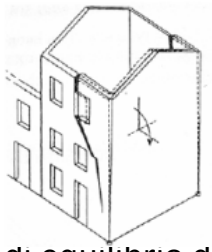
ABACHI GNDT

Meccanismi Locali nel piano e fuori dal piano
- Edifici in aggregato
- Chiese
- Edifici isolati



ANALISI DEI MECCANISMI LOCALI DI COLLASSO

Analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo.



Il metodo consiste nel:
- individuare parti di muratura a **comportamento monolitico**;
- individuare i **cinematismi possibili;**
- **il moltiplicatore dei carichi orizzontali che porta** ad una perdita di equilibrio del sistema (**innesco del cinematismo**) **è il moltiplicatore di collasso;**
- **confrontare tale valore con l'accelerazione di riferimento.**

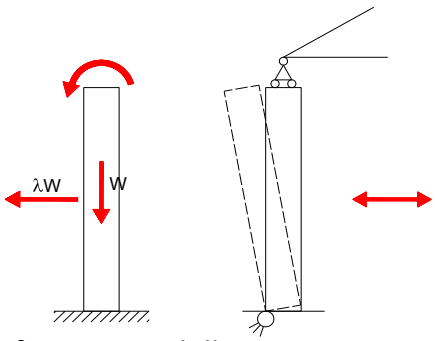
NB: l'analisi assume significato se è **garantita una certa monoliticità della parete** muraria, tale da impedire collassi puntuali per **disgregazione della muratura**.

Operativamente il **problema è quello di individuare tutti i meccanismi di collasso possibili, ovvero quelli a cui corrispondono i valori più piccoli dei** moltiplicatori di collasso.

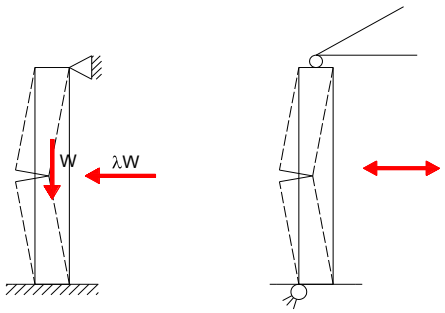
Verifica di vulnerabilità per meccanismi locali

MECCANISMI FUORI PIANO (DI I MODO)

_ Ribaltamento al piede della parete

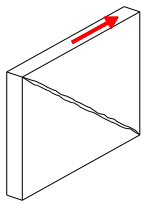


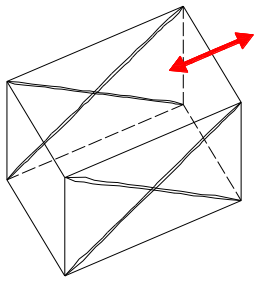
_ Flessione fuori piano delle pareti

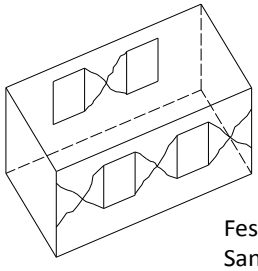


MECCANISMI NEL PIANO (DI II MODO)

_ Fessurazione del piano di massima resistenz







Fessure a croce di Sant'Andrea (per taglio)

ESEMPIO

Muratura

Periodo: ***XV sec.***

Localizzazione: ***Zona 3 – a_g= 0.092g***

Terreno: ***Cat. B – top. T1***

Superficie: ***800mq***

N° piani: ***4***

Criticità evidenti:

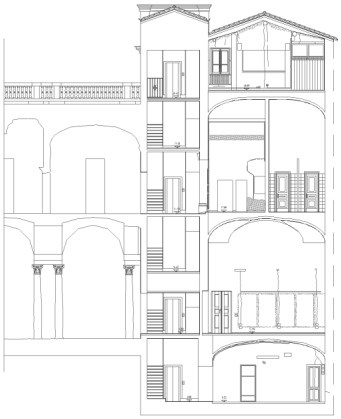
- ***Interazione con aggregato urbano (cinematismi di interazione tra sotto-strutture)***
- ***Rischio di innesco di meccanismi locali in assenza di solai che garantiscano comportamento d'insieme alla struttura.***

Descrizione strutturale tipologica:

- *Pareti in muratura in mattoni pieni e malta di calce*
- *Varie tipologie di orizzontamenti: solai in legno, volte in muratura, solai in travetti in calcestruzzo armato e solai con travetti in c.a.*

Diagnostica:

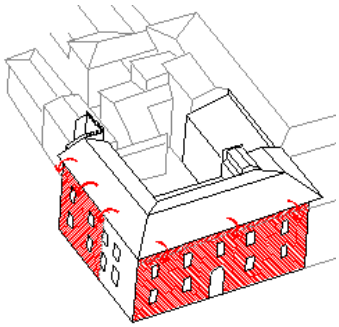
- ***Rilievo geometrico e rilievo dei quadri fessurativi/deformativi***
- ***Indagine delle proprietà meccaniche dei materiali e del terreno di fondazione***
- ***Indagine storico-critica***

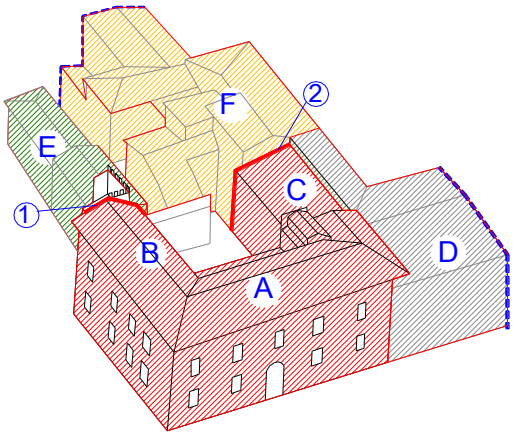


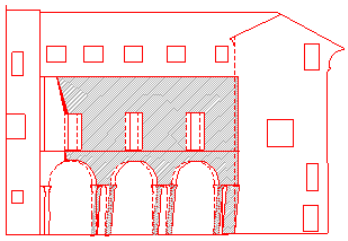
→ ***Sviluppo di modelli analitici che evidenzino interazione con strutture adiacenti (modellazione numerica meno efficace di interpretazione esperta)***

Scelte di analisi:

- ***Verifiche di sicurezza condotte nei confronti di 2 tipologie di meccanismi di collasso: meccanismi locali e meccanismi d'insieme***



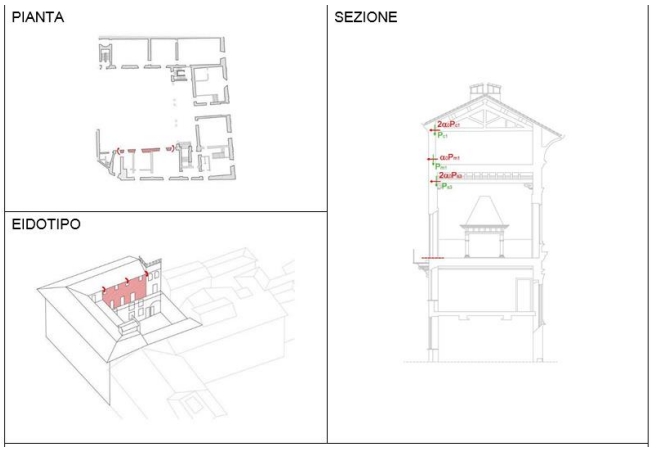




Esito di analisi:

→ ***Resistenza nell'ordine del 10% di quella richiesta a un'analoga struttura nuova (innesco di meccanismi locali)***

- ***Realizzazione di elementi di collegamento fra le pareti ortogonali non vincolate***
- ***Formazione di diaframmi di piano***
- ***Realizzazione di una copertura scatolare***
- ***Rinforzo delle volte in foglio con elementi lignei leggeri***
- ***Riparazione dei quadri fessurativi più significativi***



INDICI DI SICUREZZA SLV			
PGA ammissibile SLV ($a_{g,SLV}$= a_0*q/S)		0.022	g
PGA di riferimento SLV ($a_{g,PVr=10\%}$)		0.092	g
Tempo di ritorno ammissibile SLV (T_{SLV})		20	anni
Tempo di ritorno di riferimento SLV ($T_{PVr=10\%}$)		712	anni
INDICI DI SICUREZZA SLV	$f_{a,SLV}$	0.24	
	$I_{s,SLV}$	0.03	

VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI IN C.A.

Gli elementi che contribuiscono alla capacità sismica sono definiti primari. Differentemente dalle nuove costruzioni, alcuni elementi considerati non strutturali, ma comunque dotati di resistenza non trascurabile (come ad esempio le tamponature robuste), o anche strutturali, ma comunemente non presi in conto nei modelli (come ad esempio i travetti di solaio nel comportamento a telaio della struttura), possono essere presi in conto nelle valutazioni di sicurezza globali della costruzione, a condizione che ne sia adeguatamente verificata la loro efficacia. Gli elementi non strutturali e gli elementi strutturali secondari devono soddisfare i requisiti riportati nel § 7.2.3 delle NTC.

3.1 Requisiti di sicurezza

Stato Limite di Collasso

Nel caso di elementi/meccanismi duttili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale, mentre nel caso di elementi/meccanismi fragili gli effetti derivanti dall'analisi strutturale possono venire modificati (vd. oltre).

Le capacità sono definite in termini di deformazioni ultime per gli elementi/meccanismi duttili e di resistenze ultime per gli elementi/meccanismi fragili.

Questo Stato limite non può essere verificato con l'impiego del fattore q.

Stato Limite di salvaguardia della Vita

Nel caso di elementi/meccanismi duttili gli effetti da considerare sono quelli derivanti dall'analisi strutturale, mentre nel caso di elementi/meccanismi fragili gli effetti derivanti dall'analisi strutturale possono venire modificati (vd. oltre).

Le capacità sono definite in termini di "deformazioni di danno" per gli elementi/meccanismi duttili, come riportato in Appendice C8F, di "deformazioni ultime" e di resistenze prudenzialmente ridotte per gli elementi/meccanismi fragili.

Nel caso di verifica con l'impiego del fattore q, la resistenza degli elementi si calcola come per le situazioni non sismiche.

Livelli di Conoscenza ed Indagini Secondo NTC2008

Stato Limite di esercizio

In mancanza di più specifiche valutazioni sono consigliati i valori limite di spostamento di interpiano validi per gli edifici nuovi, riportati in Tabella.

Tabella C8.3 - Valori limite di spostamento di interpiano per la verifica dello Stato limite di esercizio di costruzioni in calcestruzzo armato o in acciaio

	Spostamento relativo d_r per Stato limite di danno	Spostamento relativo d_r per Stato limite di operatività
tamponamenti collegati rigidamente alla struttura che interferiscono con la deformabilità della stessa	0,005 h*	2/3 di quello per Stato limite di danno
per tamponamenti progettati in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano d_{rp}, per effetto della loro deformabilità intrinseca ovvero dei collegamenti alla struttura:	$d_r < d_{rp} < 0,01$ h	

* questo limite tamponamenti deve essere opportunamente ridotto nel caso in cui la presenza della tamponatura sia considerata nel modello. Si può in tal caso far riferimento ai limiti validi per la muratura..

3.2 Azione sismica

L'azione sismica è definita, per i diversi stati limite, come per gli edifici nuovi

3.3 Combinazione delle azioni

Per la combinazione dell'azione sismica con le altre azioni valgono i criteri definiti per gli edifici nuovi

Livelli di Conoscenza ed Indagini Secondo NTC2008

Le fonti da considerare per la acquisizione dei dati necessari sono:

- documenti di progetto con particolare riferimento a relazioni geologiche, geotecniche e strutturali ed elaborati grafici strutturali;
- eventuale documentazione acquisita in tempi successivi alla costruzione;
- rilievo strutturale geometrico e dei dettagli esecutivi;
- prove in-situ e in laboratorio.

Dati richiesti

In generale saranno acquisiti dati sugli aspetti seguenti:

- identificazione dell'organismo strutturale e verifica del rispetto dei criteri di regolarità indicati al § 7.2.2 delle NTC; quanto sopra viene ottenuto sulla base dei disegni originali di progetto opportunamente verificati con indagini in-situ, oppure con un rilievo ex-novo;
- identificazione delle strutture di fondazione;
- identificazione delle categorie di suolo secondo quanto indicato al § 3.2.2 delle NTC;
- informazione sulle dimensioni geometriche degli elementi strutturali, dei quantitativi delle armature, delle proprietà meccaniche dei materiali, dei collegamenti;
- informazioni su possibili difetti locali dei materiali;
- informazioni su possibili difetti nei particolari costruttivi (dettagli delle armature, eccentricità travi-pilastro, eccentricità pilastro-pilastro, collegamenti trave-colonna e colonna-fondazione, etc.);

Livelli di Conoscenza ed Indagini Secondo NTC2008

- informazioni sulle norme impiegate nel progetto originale incluso il valore delle eventuali azioni sismiche di progetto;
- descrizione della classe d'uso, della categoria e dalla vita nominale secondo il § 2.4 delle NTC;
- rivalutazione dei carichi variabili, in funzione della destinazione d'uso;
- informazione sulla natura e l'entità di eventuali danni subiti in precedenza e sulle riparazioni effettuate.

La quantità e qualità dei dati acquisiti determina il metodo di analisi e i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali da adoperare nelle verifiche di sicurezza.

Livelli di conoscenza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza, si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

- LC1: Conoscenza Limitata;
- LC2: Conoscenza Adeguata;
- LC3: Conoscenza Accurata.

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

- geometria, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali,
- dettagli strutturali, ossia la quantità e disposizione delle armature, compreso il passo delle staffe e la loro chiusura, per il c.a., i collegamenti per l'acciaio, i collegamenti tra elementi strutturali diversi, la consistenza degli elementi non strutturali collaboranti,
- materiali, ossia le proprietà meccaniche dei materiali.

Livelli di Conoscenza ed Indagini Secondo NTC2008

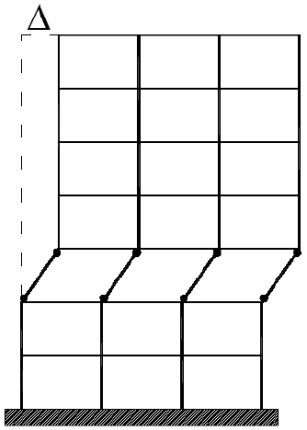
Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi e i fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali. Le procedure per ottenere i dati richiesti sulla base dei disegni di progetto e/o di prove in-situ sono descritte nel seguito per gli edifici in c.a. e acciaio.

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

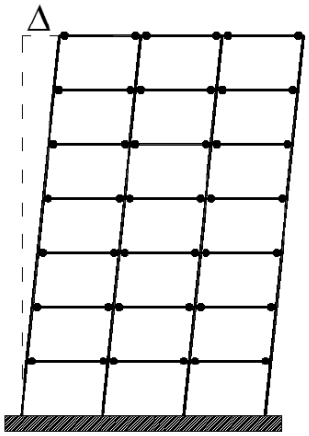
Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e *limitate* verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e *limitate* prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con limitate verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con limitate prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con limitate verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00

Livelli di Conoscenza ed Indagini Secondo NTC2008

L'individuazione degli elementi strutturali richiede innanzitutto l'individuazione del meccanismo di collasso più probabile per la struttura. Per un edificio esistente, realizzato senza progettazione antisismica o con criteri antisismici non appropriati, è probabile che si inneschi un meccanismo di collasso di piano, ossia un meccanismo che coinvolge prevalentemente i pilastri di un piano, salvo sporadiche plasticizzazioni in alcune travi ed in alcuni pilastri di altri piani, provocando la formazione di cerniere plastiche alle loro estremità (travi forti e colonne deboli).



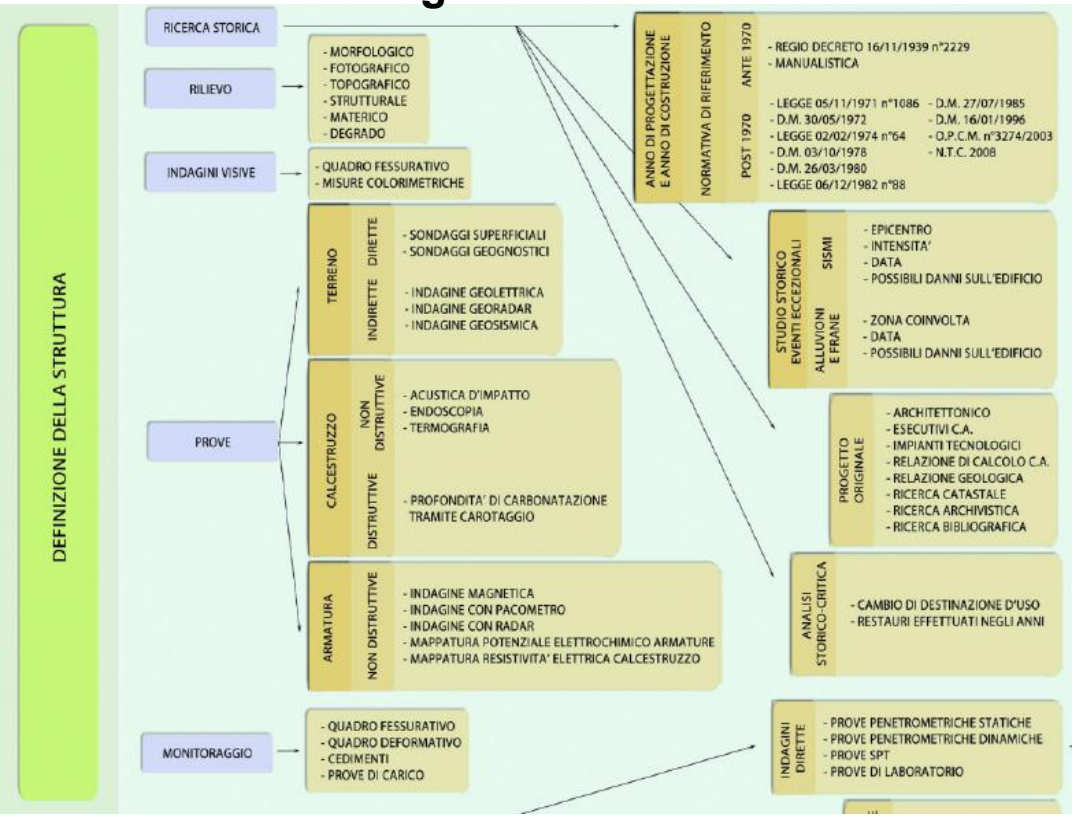
Meccanismo caratterizzato da un piano debole



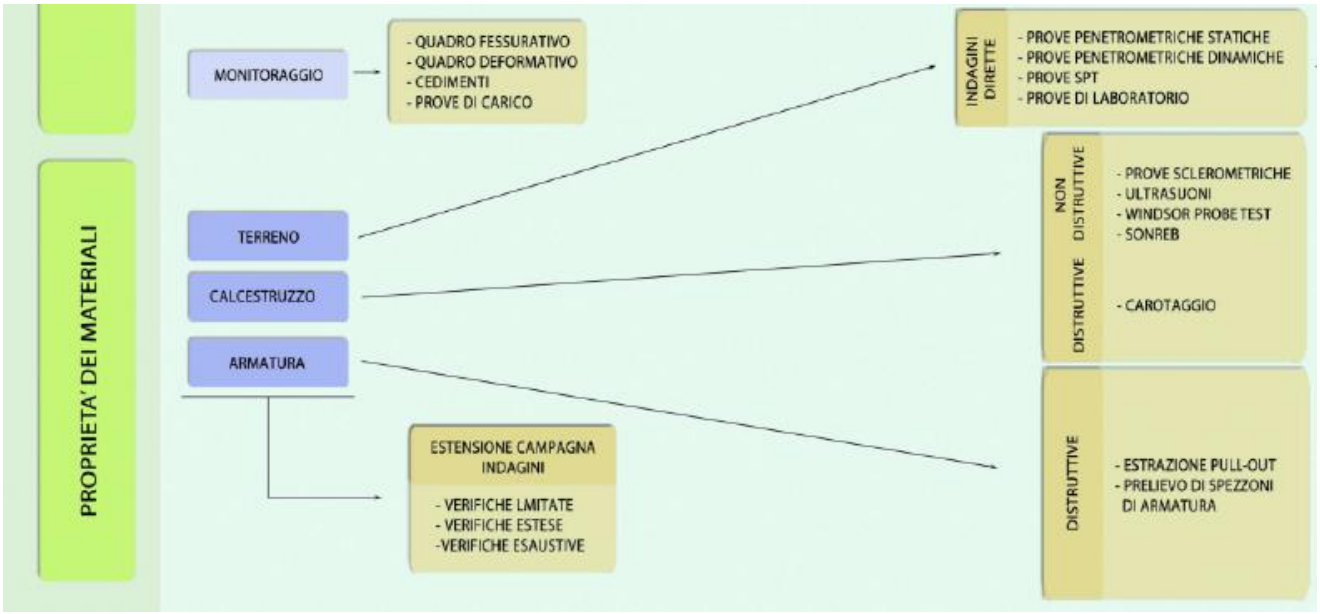
Meccanismo desiderabile per telai in c.a.

Nella scelta degli elementi strutturali da indagare è pertanto opportuno privilegiare i pilastri rispetto alle travi, effettuando sugli elementi strutturali verticali prove sia distruttive che non distruttive mentre sulle travi prove preferibilmente di tipo indiretto.

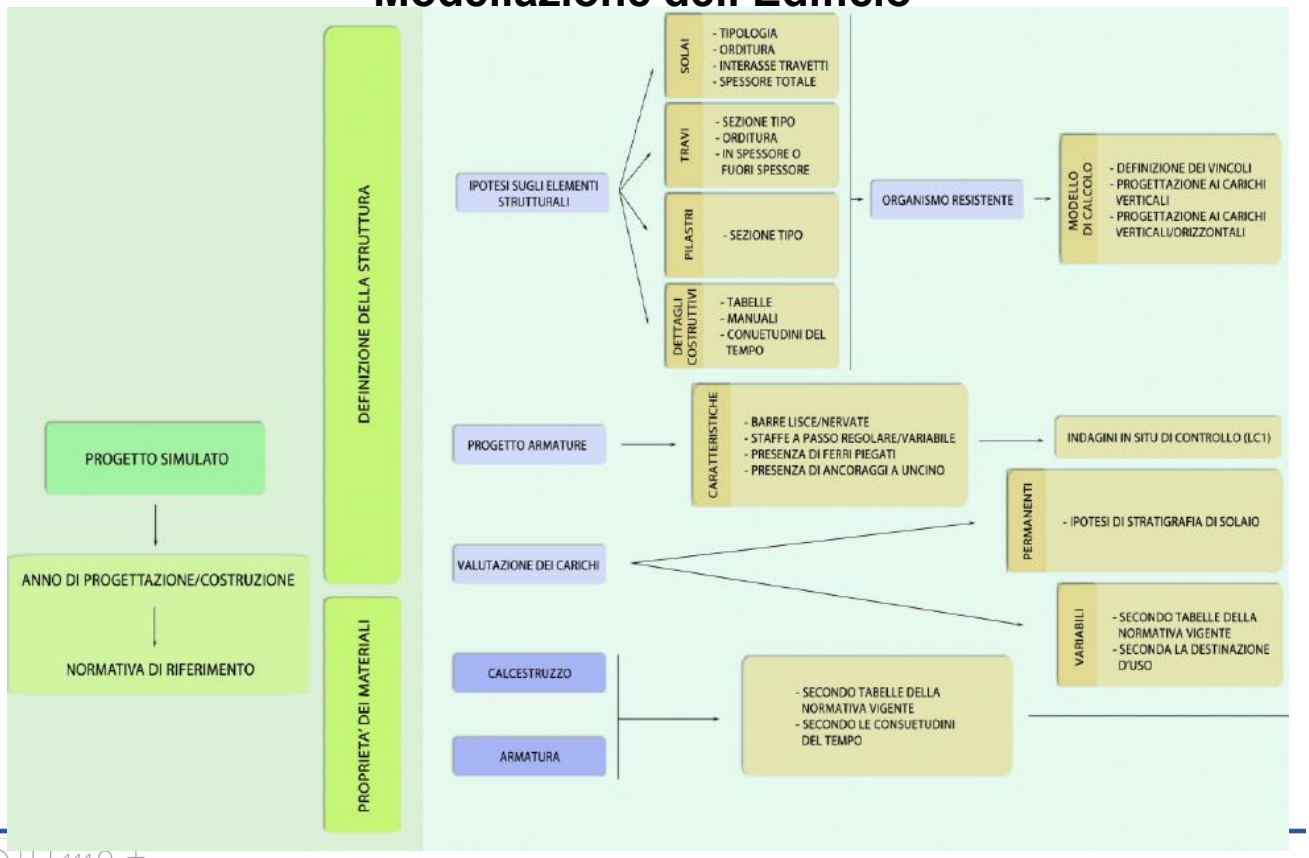
Approccio allo Studio di un Edificio Esistente in C.A.
Indagini Preliminari



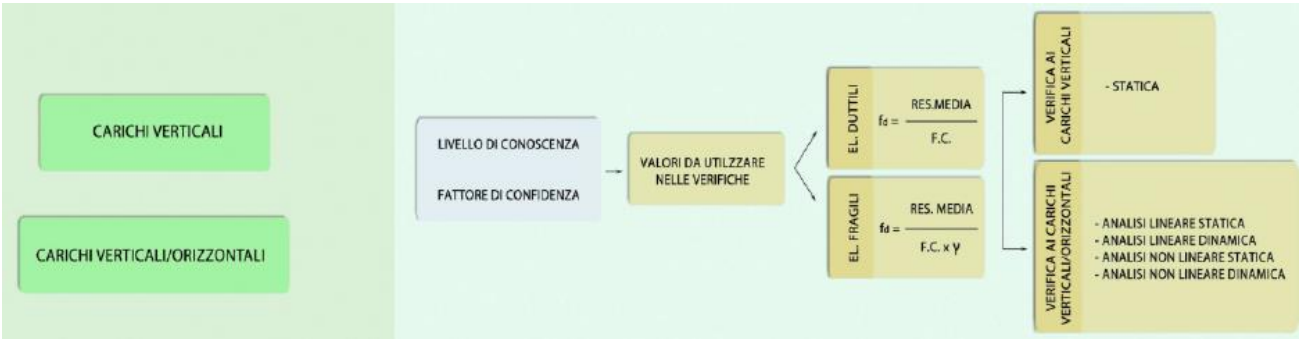
Approccio allo Studio di un Edificio Esistente in C.A.
Indagini Preliminari



Approccio allo Studio di un Edificio Esistente in C.A.
Modellazione dell'Edificio

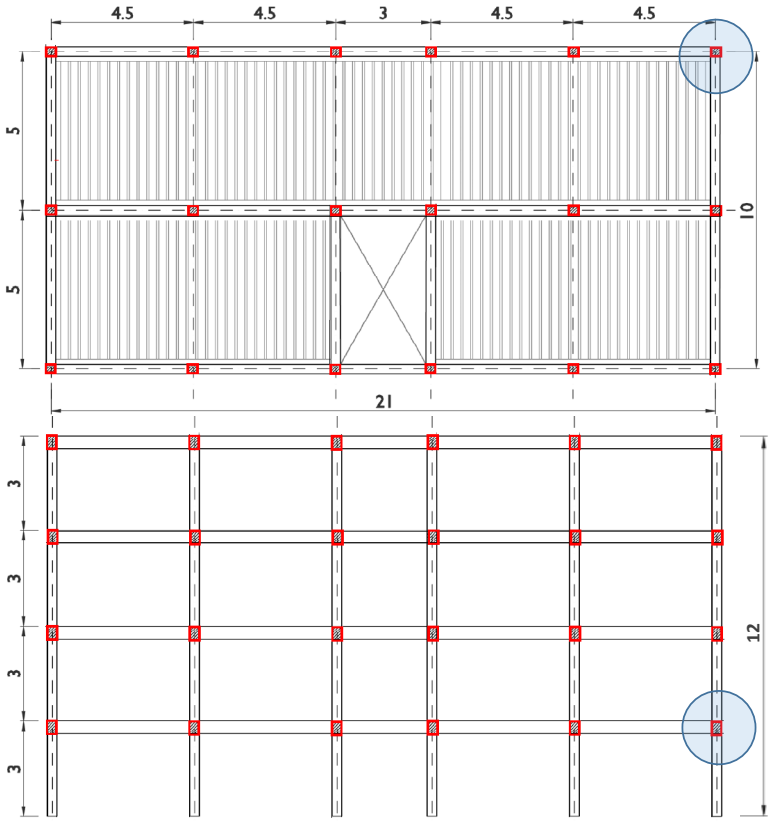


Approccio allo Studio di un Edificio Esistente in C.A.
Verifica dell'Edificio



3

3.5 Confronto tra un progetto secondo RD1939 e DM2008

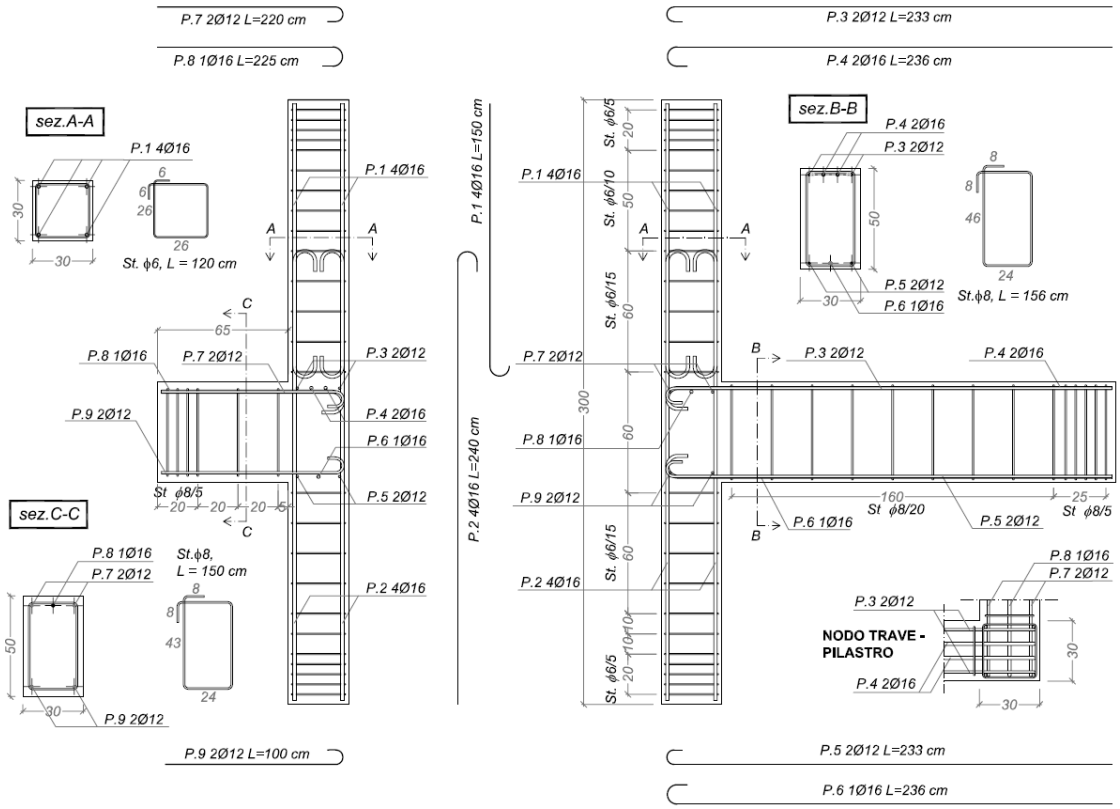


Progetto Simulato

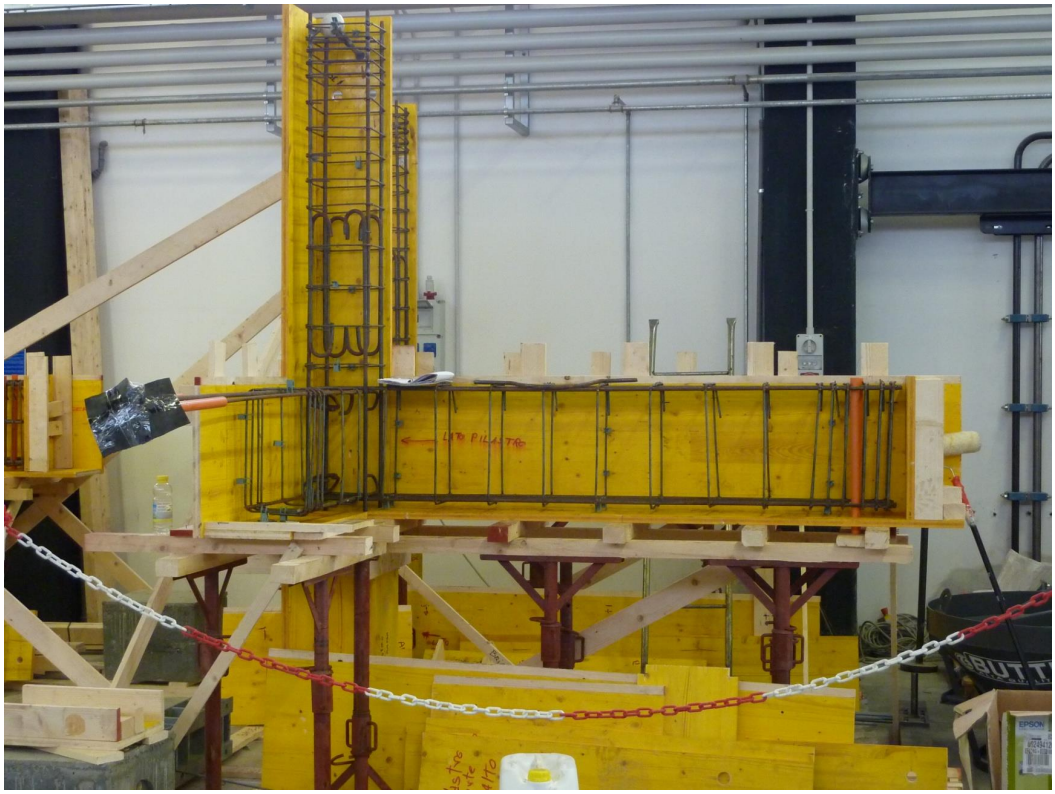
GEOMETRIA

- Lunghezza 21 m (5 campate)
- Largezza 10 m (2 campate)
- Altezza 12 m (4 piani)
- DETTAGLI COSTRUTTIVI
  - Assenza di staffe nei nodi
  - Assenza infittimento staffe alle estremità dei pilastri
  - Barre d'armatura lisce
  - Ferri piegati per contributo alla resistenza a taglio
  - Scarsi copriferri
  - Scarsa lunghezza di ancoraggio delle barre di armatura con uncini d'estremità

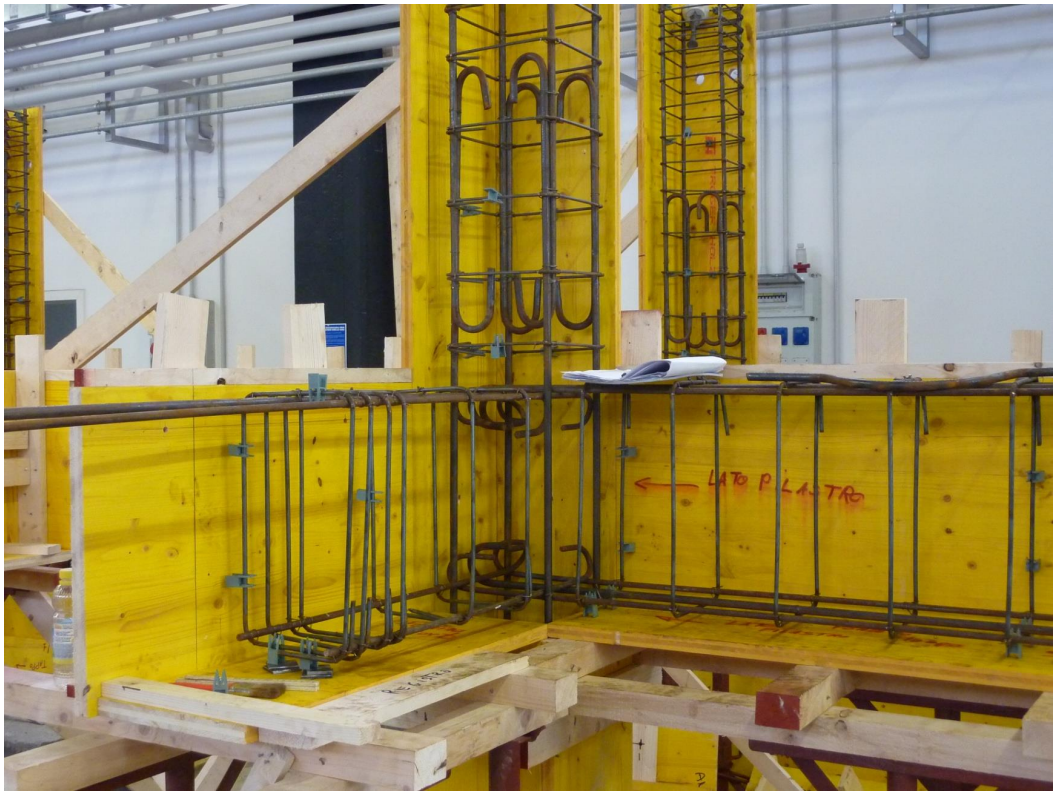
Nodo RD1939



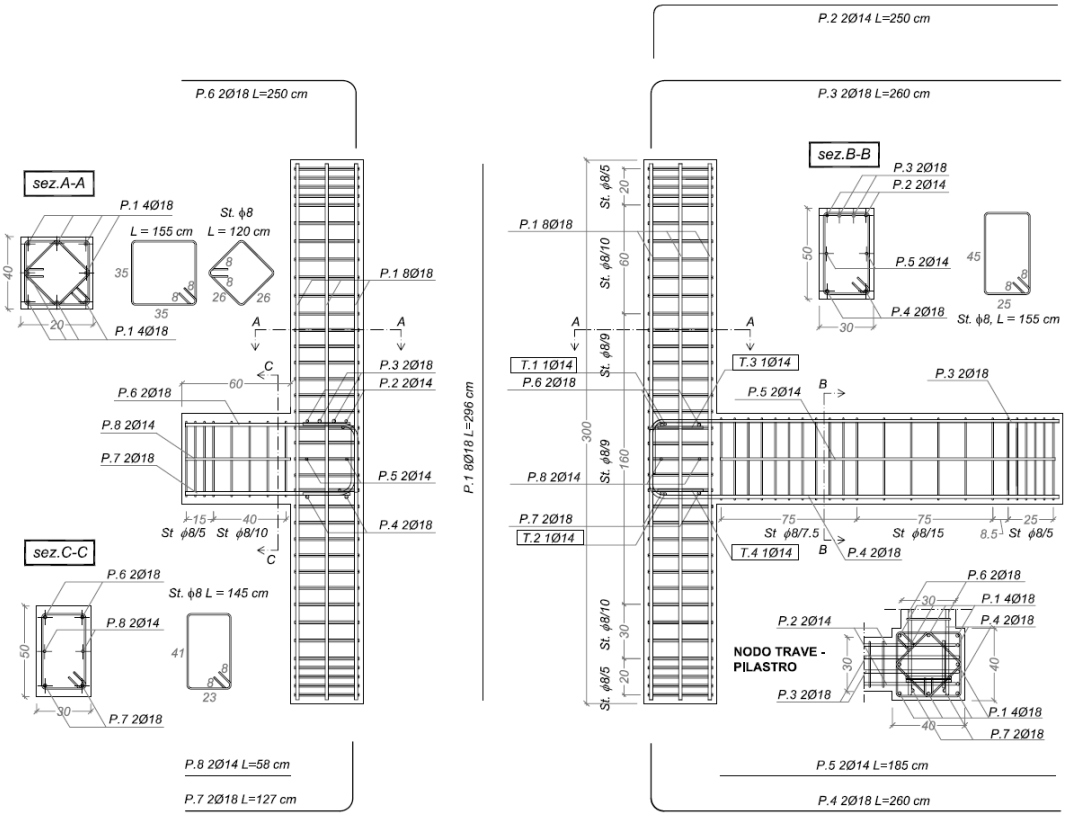
Nodo RD1939



Nodo RD1939

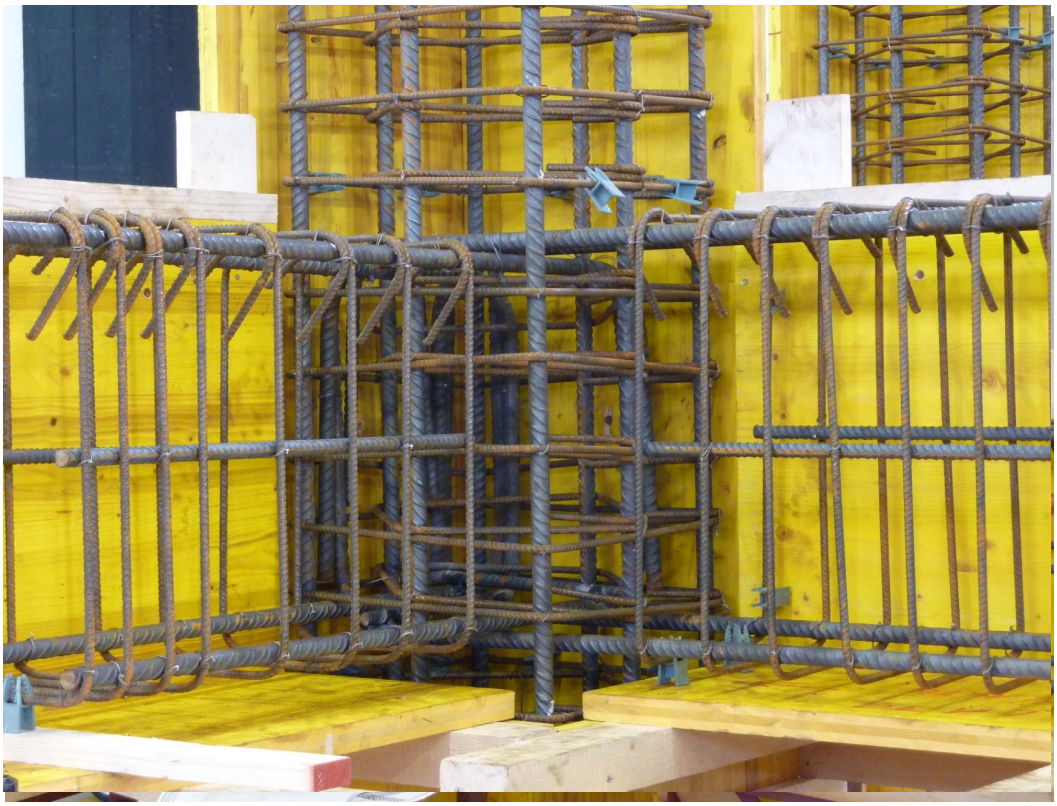


Nodo DM2008



Nodo DM2008

Nodo DM2008



ESEMPI

Scuola - c.a. gettato in opera

Tipologia: ***Scuola - c.a. gettato in opera***

Periodo: ***1982***

Localizzazione: ***Zona 4 – a_g= 0.051g***

Terreno: ***Cat. C – top. T1***

Superficie: ***670mq***

N° piani: ***2 fuori terra + 1 seminterrato***

Criticità evidenti:

- ***Presenza pareti in calcestruzzo non armato***

Descrizione strutturale tipologica:

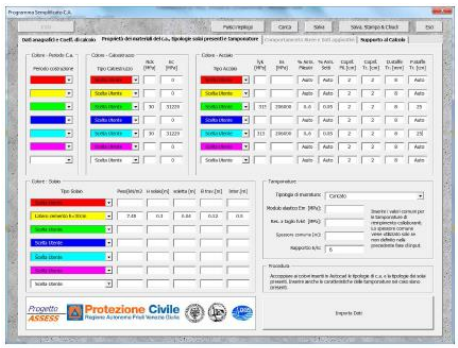
- *Telai in c.a. (piano terra e piano 1) calcolati per carichi verticali*
- *Presenza diffusa pareti in calcestruzzo non armato*

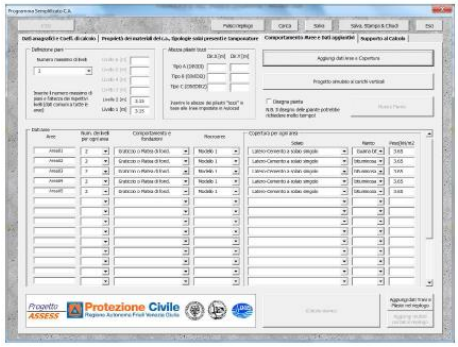
Diagnostica:

- ***Rilievo geometrico e acquisizione delle informazioni disponibili sulla base di elaborati progettuali originali***
- ***Indagini non distruttive sui materiali (indagini pacometriche e sclerometriche)***

→ ***Valutazione preliminare della vulnerabilità sismica per LC1***

→ ***Sviluppo di un modello di verifica semplificato con FIRSTEP-RC (metodo sviluppato per la verifica su larga scala di edifici scolastici – Protezione Civile Friuli)***

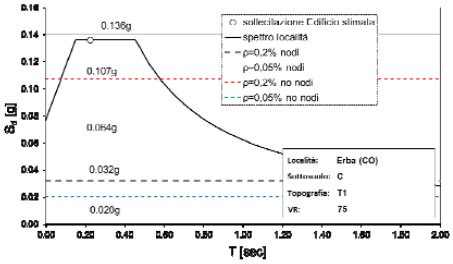




Esito di analisi:

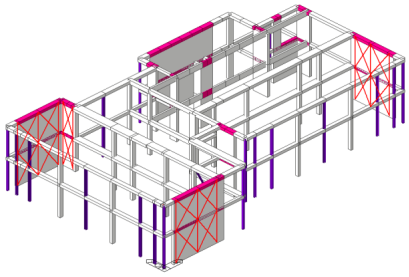
→ *Vulnerabilità a piano terra per carenza di setti sismo-resistenti ed elevata vulnerabilità dei nodi trave-pilastro*

- *Richiesti interventi di rinforzo dei nodi-trave pilastro dei telai in c.a.*
- *Approfondimento diagnostico per valutare se le pareti fossero armate, con esito negativo*



- *Rinforzo pareti tramite controventi esterni in acciaio*

Modello di calcolo di dettaglio dell'intervento



- *Inserimento piatti in acciaio 100x10mm spinottati alle pareti non armate su entrambe le facce*
- *Cappotto esterno su pareti rinforzate*
- *Contropareti interne su pareti rinforzate*
- *Nessun intervento in fondazione (sufficienti esistenti)*

- *Miglioramento sismico con indice di vulnerabilità post-intervento >80% (adeguamento)*

Costo intervento finito 72k€

Palestra e piscina + scuola - c.a. gettato in opera

Periodo: ***inizio anni '70***

Localizzazione: ***Zona 3 – a_g= 0.062g***

Terreno: ***Cat. B – top. T1***

Superficie: ***Palestra - piscina 1300mq***

Scuola 2000mq

N° piani: ***Palestra – Piscina 2 piani***

Scuola – 4 piani

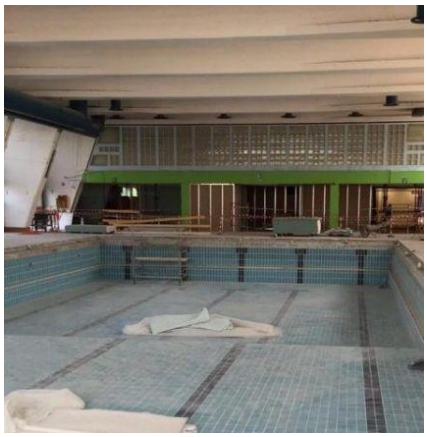
Criticità evidenti:

- ***Palestra + piscina: telai grande luce gettati in opera, altezza interpiano elevata***
- ***Scuola: Telai monodirezionali, assenza di dettagli strutturali sismicamente adeguati, interazione telai-tamponamenti, setti calcestruzzo poco armati***

Palestra e piscina

Descrizione strutturale tipologica:

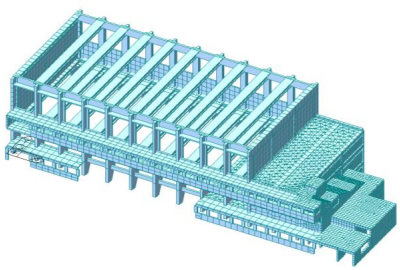
- ***Telai direzione portante con elementi dimensioni rilevanti, grande luce***
- ***Telai trasversali presenti***



Diagnostica:

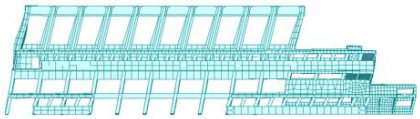
- ***Partenza da livello LC1 (rilievo carpenterie, armature, prove di carbonatazione cls, prelievo carote)***

→ ***Sviluppo di modelli ad elementi finiti di dettaglio, analisi a spettro di risposta***



Scelte di analisi:

- ***Sviluppo 2 modelli di calcolo per valutare interazione locale con tamponamenti***

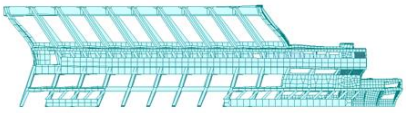


modo 1

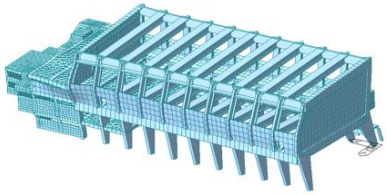
Esito di analisi:

→ ***Indice di vulnerabilità >80% subordinato a:***

- → ***Riduzione interazione telai-tamponamenti***
- → ***Integrazione diagnostica per LC2***
- → ***Riduzione effetto cinematismi locali (ribaltamento tamponamenti in quota doppia altezza)***



modo 2



modo 3

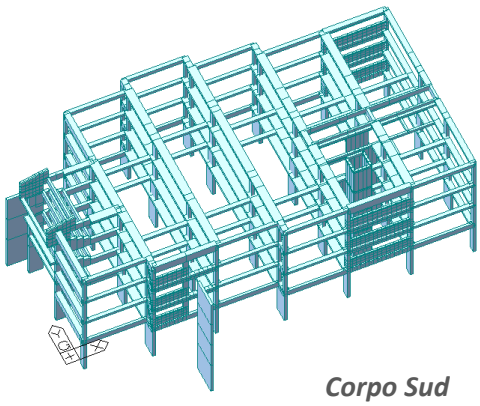
- ***Creazione di giunti strutturali antisismici***
- ***Rinforzo a taglio alcuni pilastri***
- ***Riduzione dell'interazione telaio-tamponamenti***
- ***Realizzazione di ritegni al ribaltamento fuori piano dei tamponamenti***

Costo opere da appaltare 30k€

Corpi scuola

Descrizione strutturale tipologica:

- *2 corpi con giunto termico*
- *Telai in c.a. monodirezionali*
- *Gusci e pareti poco armati*

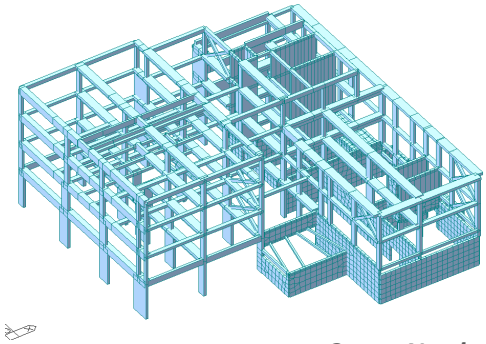


Corpo Sud

Diagnostica:

- ***Partenza da livello LC1 (rilievo carpenterie, armature, prove di carbonatazione cls, prelievo carote)***

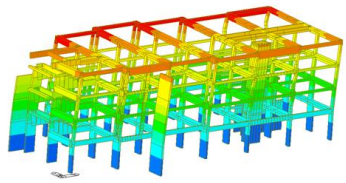
→ ***Sviluppo di modelli ad elementi finiti di dettaglio, analisi a spettro di risposta***

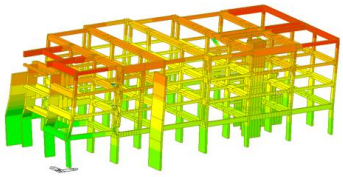


Corpo Nord

Scelte di analisi:

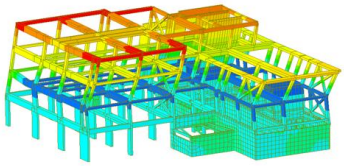
- *Valutazione della sicurezza sismica dei due corpi analizzati in modo indipendente*

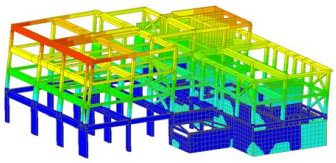




Esito analisi:

→ *Indice di vulnerabilità pari al 30%*





- *Necessario realizzare un sistema sismoresistente ex novo (es. doppia pelle energetica-strutturale)*
- *Inutile approfondire modellazione numerica e diagnostica, lontani da prestazioni accettabili per evidenti limiti strutturali.*

Palestra - c.a. gettato in opera

Periodo: *Inizio anni '80*

Localizzazione: *Zona 3 – a_g= 0.103g*

Terreno: *Cat. C – top. T1*

Superficie: *750mq*

N° piani: *1*

Criticità evidenti:

- *Degrado superficiale elementi in c.a. (espulsione copriferro, ossidazione armature principali e staffe)*

Descrizione strutturale tipologica:

- *Telai in c.a. 2 direzioni*
- *Copertura leggera (reticolare acciaio + pannelli sandwich, non nota la connessione di questi alla struttura primaria)*
- *Tamponamenti ben ammorsati alla struttura*

Diagnostica:

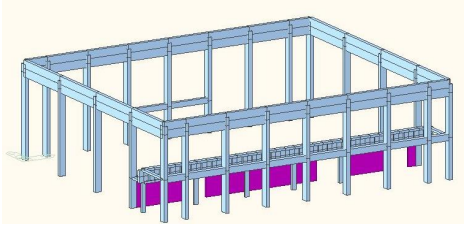
- ***Individuazione armatura elementi strutturali***
- ***Diagnostica specifica calcestruzzo (per problemi di carbonatazione)***

→ ***Obiettivo LC2 per avere mappatura dettagliata del degrado strutturale***

→ ***Sviluppo di modelli ad elementi finiti di dettaglio, analisi a spettro di risposta***

Scelte di analisi:

- ***Possibile interazione pilastri/ tamponamenti (pilastro corto): sviluppo 2 modelli di calcolo***



Esito di analisi:

→ ***Resistenza nell'ordine del 60-70% di quella richiesta a struttura analoga nuova (comprese le fondazioni), sotto ipotesi cautelative***

→ ***Resistenza ridotta del 15-20% considerando anche degrado armature***

- *Non richiesti interventi di rinforzo sismico globali*
- *Necessario ripristinare sezioni degradate (anche per incrementare vita residua struttura)*
- *Valutare dettaglio di connessione pannelli sandwich copertura con travi di bordo ed eventualmente intervenire*

Costo appaltato 30-40k€

Caserma + civile abitazione - c.a. gettato in opera

Periodo: ***fine anni '70***

Localizzazione: ***Zona 1 – a_g= 0.350g***

Terreno: ***Cat. B – top. T1***

Superficie: ***308mq***

N° piani: ***3 fuori terra + seminterrato***

Criticità evidenti:

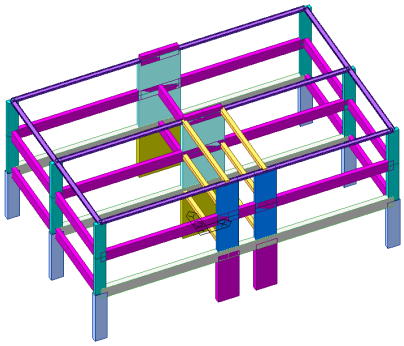
- ***Sistema sismoresistente specifico solo 1 direzione***
- ***Sovralzo 1 piano rispetto a progetto originario***
- ***Assenza completa impalcato copertura, con rischio elevatissimo di ribaltamento tamponamenti in quota***

Descrizione strutturale tipologica:

- ***Telai in c.a. 2 direzioni***
- ***Progetto sismico telaio solo in 1 direzione***
- ***Copertura leggera: reticolare in acciaio***

Diagnostica:

- ***Rilievo geometrico e acquisizione delle informazioni disponibili sulla base di elaborati progettuali originali***
- ***Prelievo di materiali (calcestruzzo e acciaio), prove di laboratorio, e prove non distruttive (pacometriche, sclerometriche e ultrasoniche)***



→ ***Obiettivo LC2 per sviluppare analisi non-lineari***

→ ***Sviluppo di modelli ad elementi finiti di dettaglio, analisi a spettro di risposta o pushover***

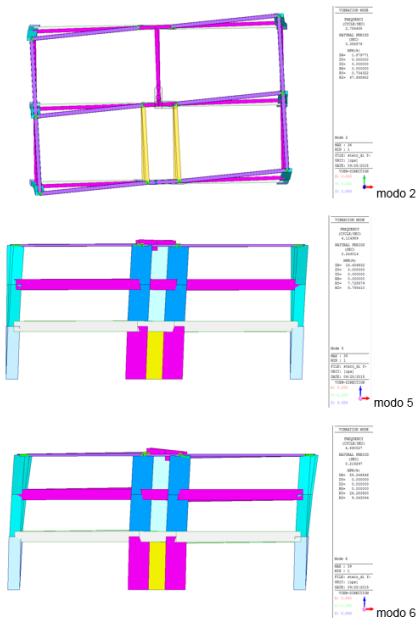
Pre-intervento

Scelte di analisi:

- ***Modellazione con interazione telai-tampoanamenti***

Esito analisi:

→ ***Resistenza nell'ordine del 10% di quella richiesta a un' analoga struttura nuova***



- ***Rinforzo del telaio sismoresistente per incrementare duttilità***
- ***Realizzazione di un sistema sismo-resistente ex novo in direzione trasversale***
- ***Creazione di un diaframma resistente nel sottotetto***
- ***Realizzazione di ritegni al ribaltamento fuori piano dei tamponamenti***
- ***Rinforzo nodi trave-pilastro (sistema Gordiano)***

Post-intervento

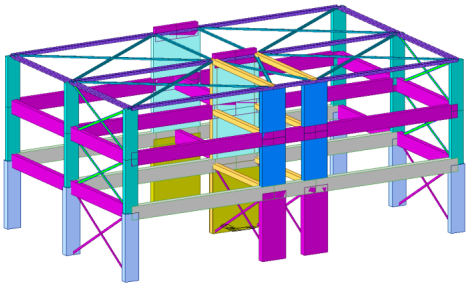
Scelte di analisi:

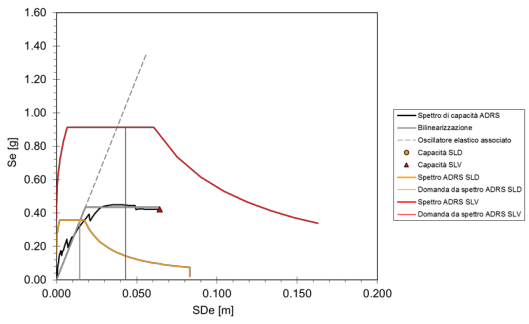
- ***Modellazione lineare e non-lineare***

Esito analisi:

→ ***Verifica soddisfatta per adeguamento sismico classe d'uso IV in analisi a spettro di risposta***

→ ***Valutazione prestazione in ambito non-lineare con analisi pushover per valutare plasticizzazione, richiesta duttilità, prestazione effettiva***





Costo stimato intervento 120-100k€

Scuola - c.a. gettato in opera

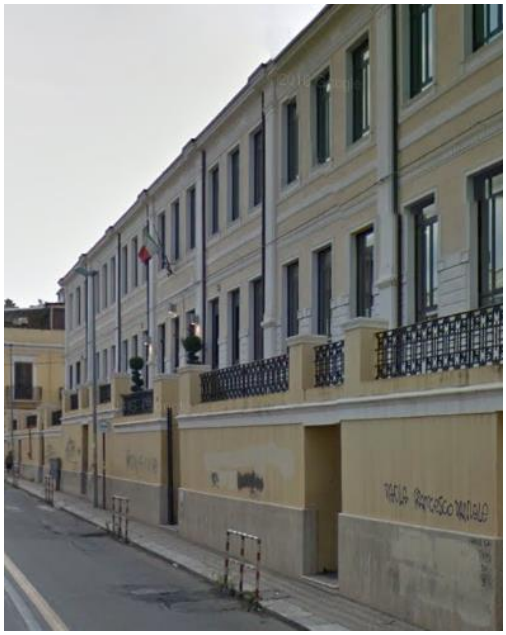
Periodo: ***1920-30***

Localizzazione: ***Zona 1 – a_g= 0.318g***

Terreno: ***Cat. A – top. T1***

Superficie: ***2000mq***

N° piani: ***3***



Criticità evidenti:

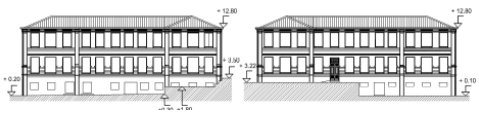
- ***Telai snelli in c.a. ordito in un'unica direzione***
- ***Tamponamenti in muratura piena di spessore elevato***

Descrizione strutturale tipologica:

- ***Telai in c.a. monodirezionali***
- ***Solai in c.a. e copertura lignea***
- ***Tamponamenti in muratura piena di spessore elevato***

Diagnostica:

- ***Indagini approfondite su elementi strutturali in c.a. (prove di carico, ultrasoniche, sclerometriche, indagini pacometriche e prelievo di materiali per test di compressione e analisi chimiche)***
- ***Indagini limitate su tamponamenti in muratura (martinetti piatti, prove di taglio e endoscopie)***

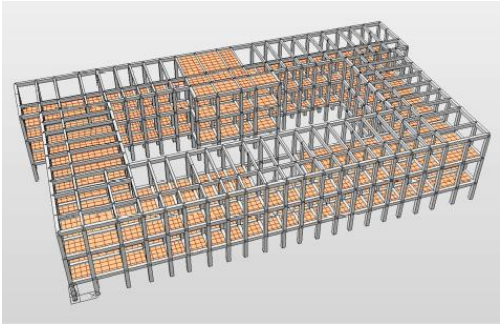


→ Obiettivo LC2 per sviluppare analisi non-lineari

→ Sviluppo di modelli ad elementi finiti, analisi non lineare statica (pushover)

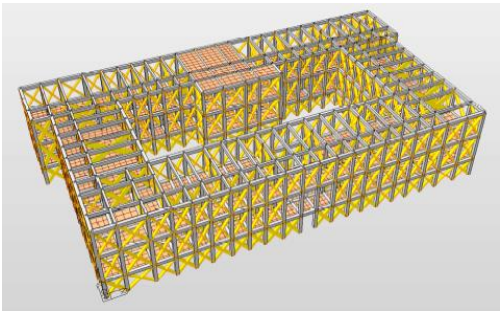
Scelte di analisi:

- ***Valutare la capacità sismica dell'edificio e stimare il contributo offerto dai tamponamenti: sviluppo 2 modelli di calcolo***



Esito analisi:

→ ***Resistenza nell'ordine del 10% di quella richiesta a struttura analoga nuova, ma sotto ipotesi cautelative***



- ***Richiesti interventi utili a ridurre la richiesta di domanda in spostamento imposta all'edificio dall'azione sismica***
- ***Inserimento nuovi elementi strutturali di controvento in acciaio***
- ***Rinforzo delle travi portanti non tamponate***

VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI PREFABBRICATI

COMPORTAMENTO SISMICO DELLE STRUTTURE PREFABBRICATE: LEZIONI DAL PASSATO

- Una struttura prefabbricata ben progettata può essere caratterizzata da **PRESTAZIONI SISMICHE POTENZIALMENTE ELEVATE**

- Alcuni problemi ricorrenti in strutture gettate in opera, come la **SCARSA CURA** dei **PARTICOLARI COSTRUTTIVI**, possono essere risolti ricorrendo alla prefabbricazione e all'uso di connessioni prefabbricate

- Le principali cause di risposte sismiche inadeguate in edifici prefabbricati è da ricercare nella **MANCATA O INADEGUATEZZA DEI COLLEGAMENTI**:
  - Mancanza di collegamento tra travi e pilastri ed elementi di copertura
  - Mancanza di collegamento tra i plinti di fondazione
  - Vincoli privi di duttilità oppure che non consentono spostamenti relativi
  - Vincoli dotati di eccessiva rigidezza, non compatibili con le richieste di spostamento

INTRODUZIONE: DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

Indagini diagnostiche su numerosi edifici esistenti sull'intero territorio nazionale:

- Progettazione ai carichi verticali, con considerazione di azioni orizzontali convenzionali e di modesta entità;
- Inadeguatezza dei collegamenti;
- Collasso collegamenti pannello-struttura;
- Martellamento fra elementi adiacenti;
- Mancanza di confinamento e instabilità delle barre d'armatura

NECESSITÀ DI INTERVENTI DI

ADEGUAMENTO SISMICO E MIGLIORAMENTO SISMICO

COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE PREFABBRICATE NEGLI ULTIMI TERREMOTI

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

PERDITA DI APPOGGIO

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

PERDITA DI APPOGGIO

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

COLLASSO DI ELEMENTI DI TAMPONATURA ORIZZONTALI

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

COLLASSO DI ELEMENTI DI TAMPONATURA VERTICALI

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

DANNI AI PILASTRI

DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

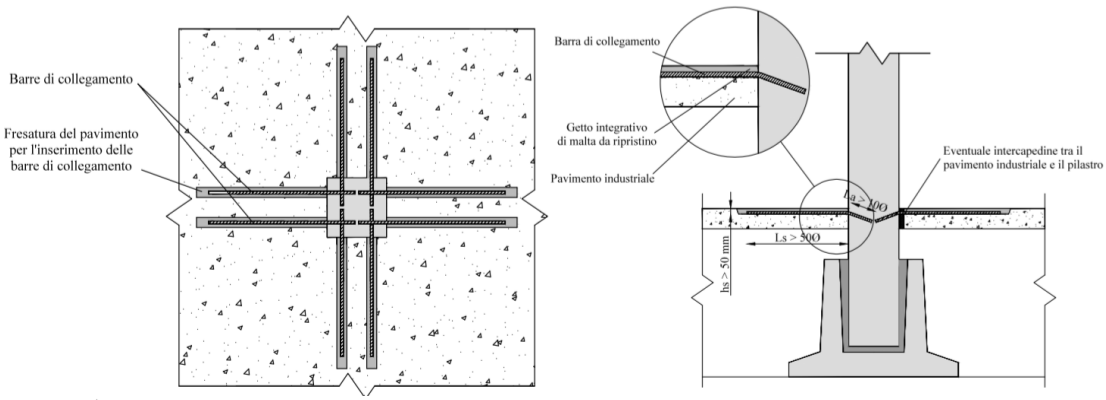
DANNI ALLE FORCELLE

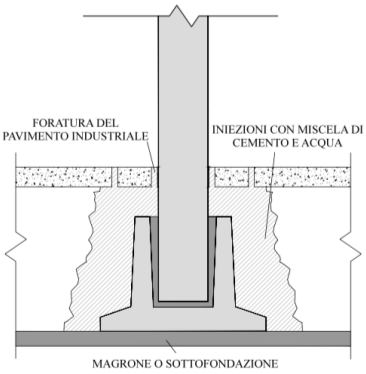
DIAGNOSI SUGLI EDIFICI ESISTENTI

DANNI AL CONTENUTO INTERNO

INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO

RINFORZO PILASTRO-FONDAZIONE





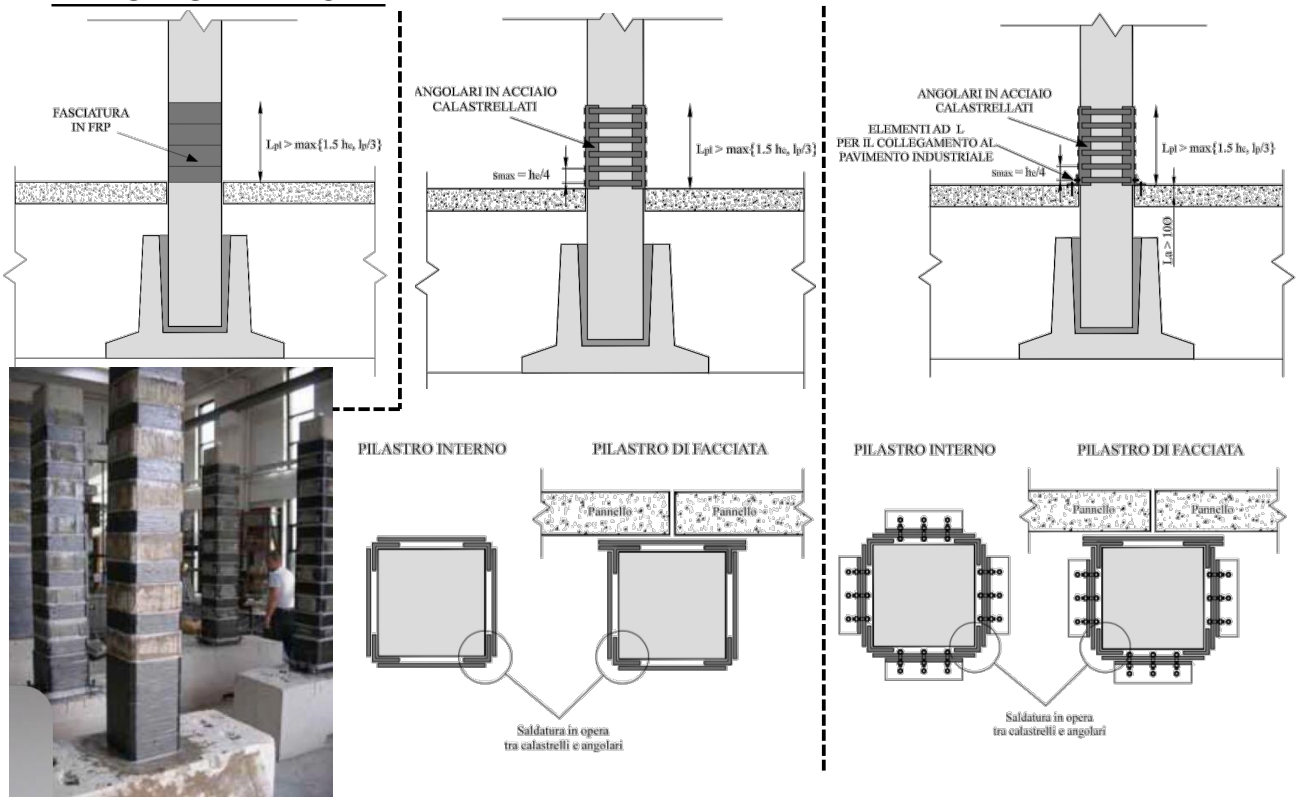
Vantaggi:

- Incremento sensibile della resistenza del sistema di fondazione al sisma

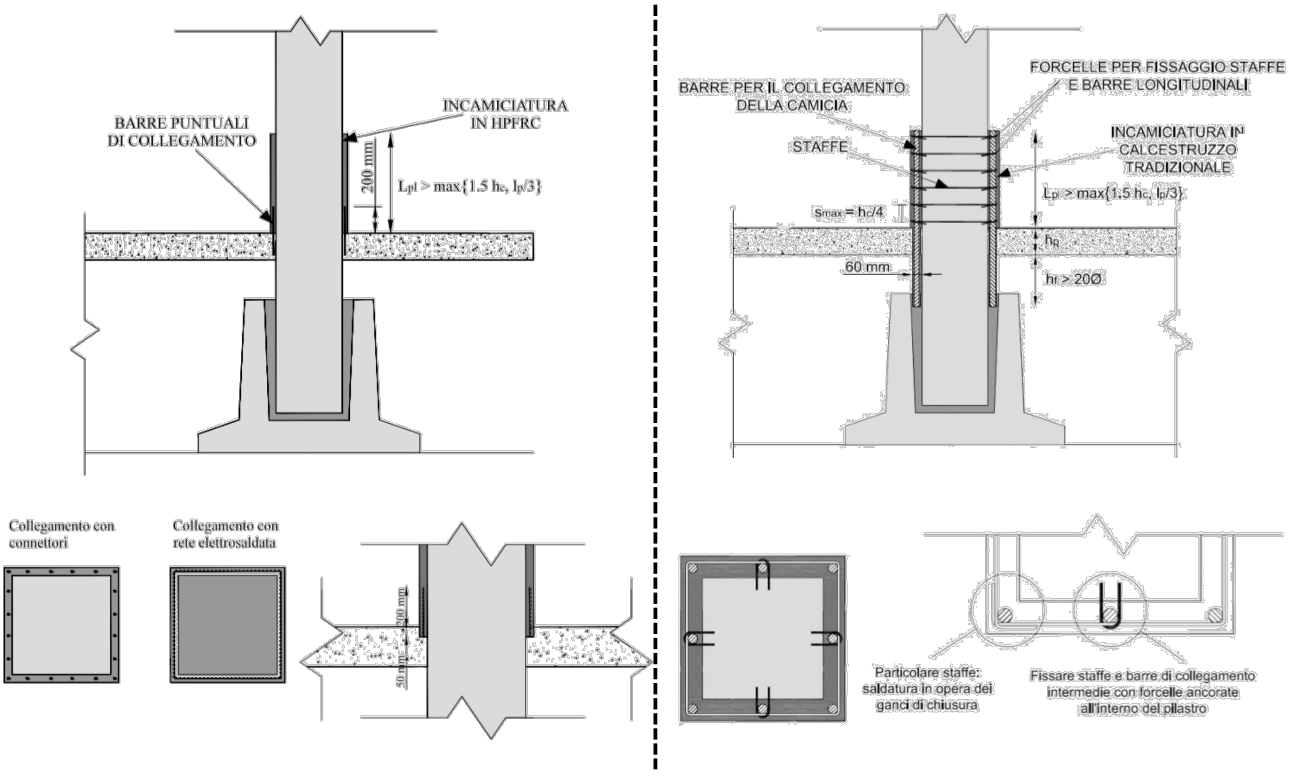
Svantaggi:

- Costo elevato ed esecuzione complessa
- Non realizzabili in presenza di pavimenti con finiture di pregio

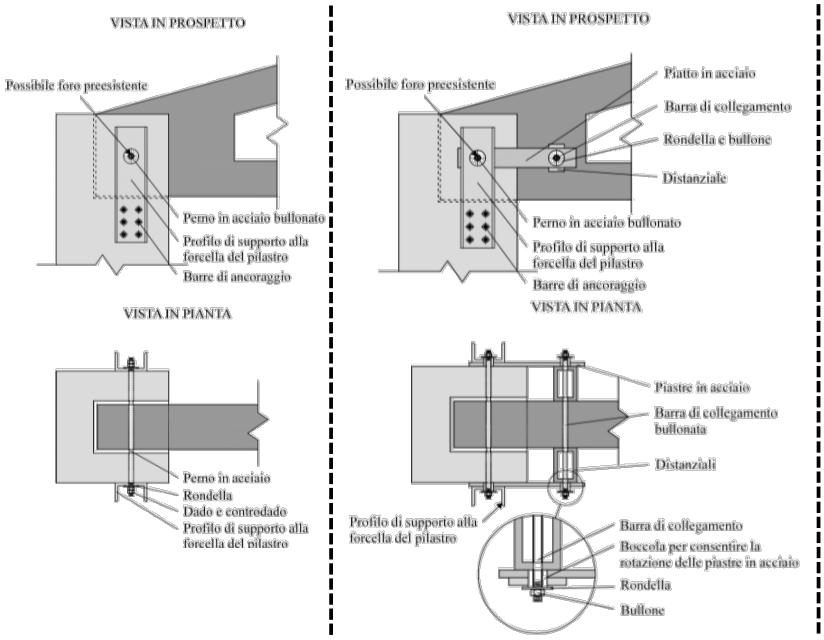
RINFORZO DI PILASTRI



RINFORZO DI PILASTRI



RINFORZO DEL COLLEGAMENTO TRAVE-PILASTRO



Esempio in capannone di 5200mq – 2 piani + magazzino

Costo € 518

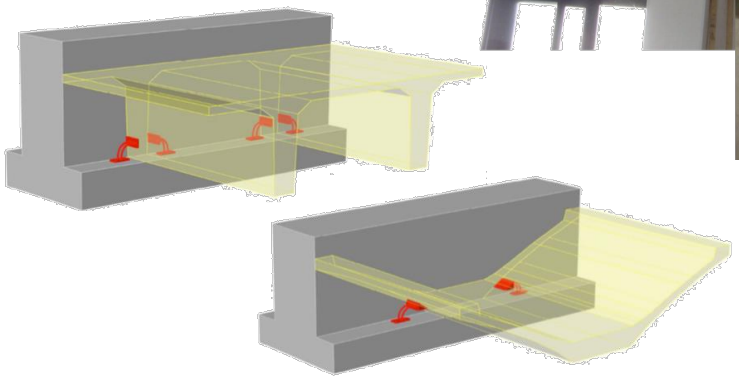
- *Semplicità esecutiva e velocità della messa in opera*
- *Necessaria la valutazione della resistenza della forcella entro la quale è inserita la trave*
  - ➠ *Possibilità di installazione di dissipatori sismici*

RINFORZO DEL COLLEGAMENTO TRAVE-PILASTRO

Esempio in capannone di 5200mq – 2 piani + magazzino

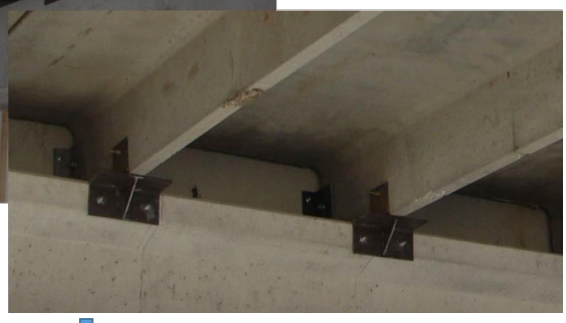
RINFORZO DELLA CONNESSIONE TRAVE-TEGOLO

Possibilità d'impiego di dissipatori metallici



Esempio in capannone di 6400mq – 2 piani

Danneggiato da terremoto Emilia (2012)



Costo € 19000

RINFORZO DEL COLLEGAMENTO DI PANNELLI

PRINCIPALI DANNI:

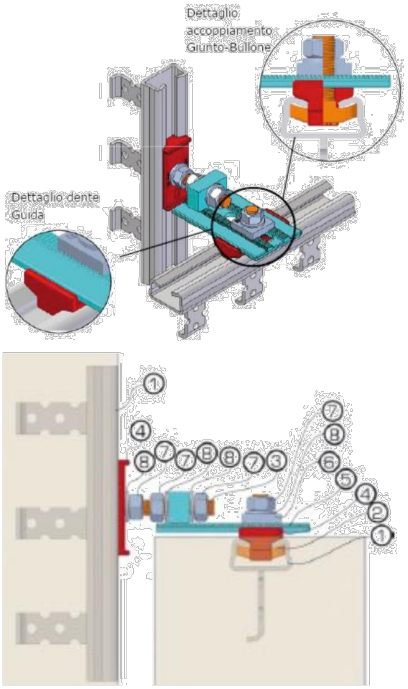
- Insufficiente capacità di spostamento e di deformazione
- Insufficiente resistenza dell'ancoraggio
- Elementi non interferenti con la struttura

→ **COLLASSO delle CONNESSIONI PANNELLO-STRUTTURA**

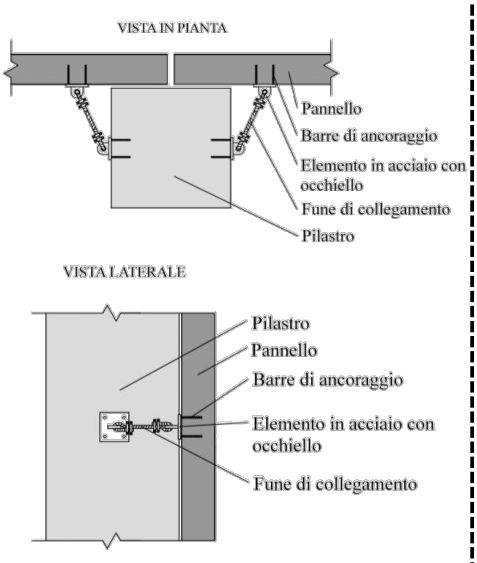
SOSTITUZIONE E/O RINFORZO delle CONNESSIONI

- Per consentire maggiore capacità di deformazione
- Per consentire maggiore capacità di spostamento

RINFORZO DEL COLLEGAMENTO DI PANNELLI

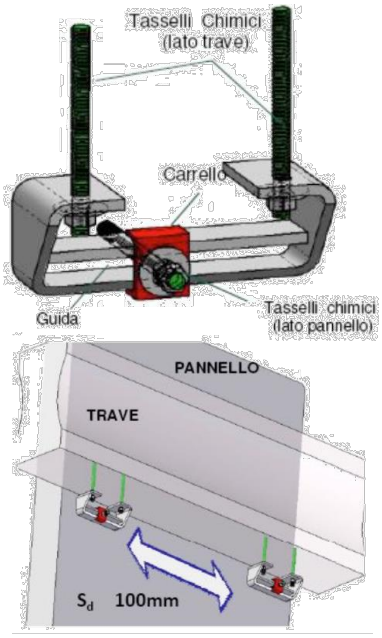


Vincoli in acciaio scorrevoli (pannelli orizzontali)



Cavetti

Semplicità esecutiva
Velocità messa in opera



Elementi in acciaio scorrevoli (pannelli verticali)

ESEMPIO

Prefabbricato (es. palestre)

Periodo: ***1995-96***

Localizzazione: ***Zona 3 – a_g= 0.127g***

Terreno: ***Cat. B – top. T1***

Superficie: ***8000mq***

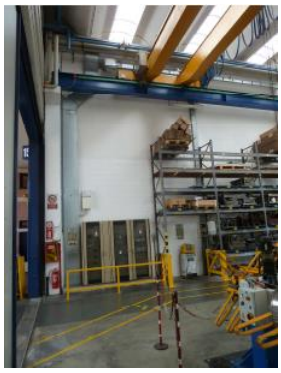
N° piani: ***zona 1 piano – zona 2 piani***

Criticità evidenti:

- ***Elementi strutturali non progettati per resistere all'azione sismica prevista da NTC08***
- ***Collegamenti tra elementi non sufficienti***
- ***Presenza di gusci dei vani scala/montacarichi che configurano irregolarità in pianta e in altezza***

Descrizione strutturale tipologica:

- *Travi e pilastri prefabbricati*
- *Impalcati realizzati con elementi prefabbricati*



Diagnostica:

- ***Rilievo geometrico e acquisizione di informazioni disponibili sulla base di elaborati progettuali originari relativamente recenti***

→ ***In relazione alla completezza documentale, corrispondenza tra progetto e esecuzione, ottimo stato conservazione: ipotesi LC2***

→ ***Sviluppo di modelli ad elementi finiti, analisi a spettro di risposta***

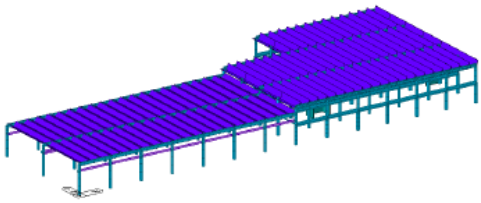
Scelte di analisi:

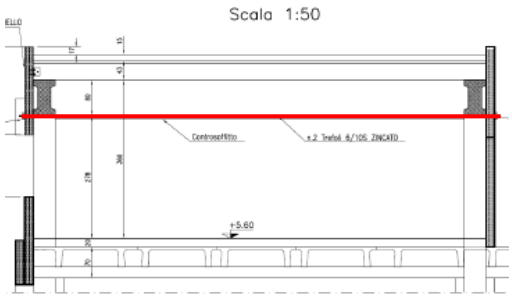
- ***Valutazione della sicurezza sismica mediante 2 modelli: telai nudi + gusci connessi rigidamente al diaframma; telai nudi senza gusci***

Esito di analisi:

→ ***MODELLO INTERAZIONE GUSCI - Resistenza nell'ordine del 30-40% di quella richiesta a un'analoga struttura nuova se inibiti cinematismi locali***

→ ***MODELLO SENZA INTERAZIONE GUSCI - Resistenza nell'ordine del 60-70% di quella richiesta a un'analoga struttura nuova se inibiti cinematismi locali***





➢ *Realizzazione di elementi di vincolo al ribaltamento dei pannelli di tamponamento e degli elementi di copertura (catene cinematiche)*

➢ *Riduzione dell'interazione fra gusci e struttura mediante giunto a carrello in corrispondenza dell'appoggio delle travi sui gusci*

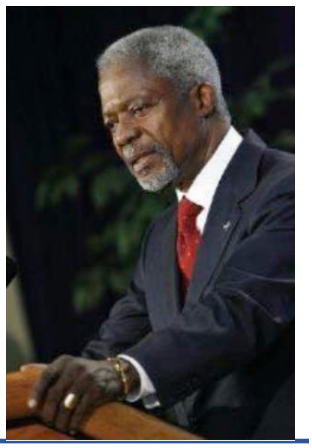
Costo realizzazione 120k€

“Strategie di prevenzione più efficace farebbero non solo risparmiare decine di miliardi di dollari ma salverebbero decine di migliaia di vite.

Costruire una cultura di prevenzione non è facile. Mentre i costi della prevenzione debbono essere pagati nel presente, i suoi benefici si avvertono in un futuro distante.

Per di più, i benefici non sono tangibili:

SONO I DISASTRI NON AVVENUTI”



(Kofi Annan, WSSD 2002)