

Massimo Traversari

P.F. Rischio sismico ed opere pubbliche d'emergenza

SCUOLA VIA GIOTTO – MORROVALLE (MC)

Gli edifici “misti” muratura-cemento armato costituiscono una parte significativa del costruito edilizio presente in Italia, e sono quindi riscontrabili anche fra gli edifici scolastici, in particolare eseguiti a cavallo degli anni '50-'70.

Il principio costruttivo di tali edifici si basa sulla sostituzione di alcuni elementi e/o pareti in muratura con elementi e/o telai in c.a..

Le problematiche proprie di questa tipologia riguardano la ripartizione delle azioni orizzontali ed il tema dei collegamenti tra elementi di diversa tecnologia, nonché la “definizione” di un coefficiente di struttura.

1 INTRODUZIONE

Gli edifici in muratura hanno manifestato la loro elevata vulnerabilità a seguito degli eventi sismici cui sono stati soggetti. Al fine di migliorarne il comportamento sismico si è assistito nel corso degli anni all'accoppiamento della muratura con materiali differenti (legno, acciaio, c.a., etc.), dando così vita agli edifici “misti” ed in alcuni ambiti a nuove tecniche costruttive. In particolare, con la nascita del cemento armato e la sua rapida diffusione, si è assistito alla sostituzione di alcuni elementi e/o pareti in muratura con elementi e/o telai in c.a., comportando così una trasformazione degli originari edifici in muratura. Contemporaneamente, si è assistito alla realizzazione di strutture ex-novo attraverso l'impiego di muratura e c.a. per venire incontro ad esigenze strutturali ed allo scopo di incrementare la flessibilità distributiva ed architettonica.

A differenti tipologie di intervento sugli edifici in muratura hanno fatto seguito differenti tipologie edilizie che necessitano di una classificazione tipologica. A tal riguardo per gli edifici misti muratura-c.a. è stata proposta da Liberatore et al. (2007) la seguente classificazione: gli edifici in muratura intelaiata o confinata, in cui le membrature in c.a. sono aderenti ai pannelli murari (i quali differiscono dai telai in c.a. tamponati per il ruolo portante della muratura) e gli edifici realizzati con elementi in c.a. e pannelli murari non in aderenza. In quest'ultimo caso è possibile un'ulteriore suddivisione tra gli edifici con piani a tecnologia differente (funzionamento in serie), che può verificarsi nel caso di sopraelevazioni di edifici esistenti, e gli edifici con elementi in c.a. ed in muratura allo stesso piano (funzionamento in parallelo), ad esempio nel caso di edifici con muri perimetrali esterni e telai e/o setti in c.a. interni, oppure ampliamenti con telai in c.a. di edifici in muratura. La classificazione presente nel D.M. 14/01/08 per gli edifici esistenti a struttura mista muratura-c.a. corrisponde a quella indicata da Liberatore et al. (2007) con elementi in c.a. e pannelli murari non in aderenza.

2 NORMATIVA

Il quadro normativo italiano ha fornito durante il suo evolversi delle indicazioni spesso discordanti sulla tematica connessa alla ripartizione dell'azione sismica.

Il D.M. 16/01/1996 ha il merito di introdurre per la prima volta il tema delle strutture miste, intese come costruzioni i cui elementi verticali sono in parte pareti in muratura ordinaria ed in parte telai o elementi in altro materiale. Lo stesso decreto ministeriale prescriveva di affidare, nel caso di strutture di nuova progettazione, integralmente l'azione sismica alla parte in muratura:

C.5.4. STRUTTURE MISTE

Nell'ambito delle costruzioni in muratura è consentito utilizzare strutture di diversa tecnologia per sopportare i carichi verticali, purché l'azione sismica sia integralmente affidata alla parte di muratura, per la quale risultino rispettate le prescrizioni di cui ai punti precedenti.

Particolare attenzione deve essere posta ai collegamenti fra elementi di tecnologia diversa, alla compatibilità delle deformazioni conseguenti alle diverse deformabilità ed alla trasmissione dei carichi verticali.

E' consentito realizzare edifici costituiti da struttura muraria nella parte inferiore e sormontati da un piano con struttura in cemento armato o acciaio, a condizione che:

- *i limiti all'altezza degli edifici, previsti al punto C.2. per le strutture in muratura, si intendono comprensivi delle parti in muratura e di quelle in cemento armato o in acciaio;*
- *la parte superiore in cemento armato o in acciaio sia ancorata al cordolo di coronamento della parte muraria e risulti verificata unitamente alla base in muratura, con i criteri di cui al punto C.6., per una forza sismica incrementata del 50%.*

mentre, nel caso di strutture esistenti, l'edificio viene considerato alla stregua della tipologia di elementi strutturali ai quali è prevalentemente affidato il compito di resistere alle azioni orizzontali (generalmente le pareti murarie):

C.9.9. EDIFICI CON STRUTTURA MISTA

Nel caso di edifici le cui strutture resistenti siano realizzate con combinazioni di elementi in muratura, in calcestruzzo armato o metallici, si applicano le prescrizioni di cui alle presenti norme relative alla tipologia degli elementi strutturali ai quali è prevalentemente affidato il compito di resistere alle forze orizzontali.

Deve essere verificata la compatibilità delle deformazioni dei vari elementi presenti nonché la validità dei collegamenti fra gli elementi strutturali di diversa tipologia.

Questa impostazione poteva essere giustificata dalle diverse caratteristiche di rigidità che presentano in campo elastico gli elementi strutturali di tecnologia differente. Infatti, nel caso di pareti murarie più rigide e meno duttili degli elementi in c.a., la minore duttilità delle pareti può comportare il mancato sfruttamento della massima resistenza esplicabile dagli elementi in c.a..

L'O.P.C.M. 3431 del 03/05/2005 prescrive che nell'ambito delle costruzioni in muratura è consentito utilizzare strutture di diversa tecnologia finalizzate a sostenere i carichi verticali, purché la resistenza all'azione sismica venga integralmente affidata agli elementi con la stessa tecnologia. Qualora si ritenesse necessario considerare la collaborazione delle pareti in muratura e dei sistemi di diversa tecnologia nella resistenza al sisma, quest'ultima dovrà essere verificata utilizzando i metodi di analisi non lineare (statica o dinamica).

Il D.M. 14/01/08 (e corrispondente Circolare) conferma quanto prescritto dall'O.P.C.M. 3431, sia per quanto riguarda la ripartizione dell'azione sismica negli edifici a struttura mista muratura-c.a., che per l'analisi sismica globale delle costruzioni in muratura, per la quale si deve considerare il sistema strutturale reale della costruzione, con particolare attenzione alla rigidità e resistenza dei solai e all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali:

7.8.4 STRUTTURE MISTE CON PARETI IN MURATURA ORDINARIA O ARMATA

Nell'ambito delle costruzioni in muratura è consentito utilizzare strutture di diversa tecnologia per sopportare i carichi verticali, purché la resistenza all'azione sismica sia integralmente affidata agli elementi di identica tecnologia. Nel caso in cui si affidi integralmente la resistenza alle pareti in muratura, per esse debbono risultare rispettate le prescrizioni di cui ai punti precedenti. Nel caso si affidi integralmente la resistenza alle strutture di altra tecnologia (ad esempio pareti in c.a.),

debbono essere seguite le regole di progettazione riportate nei relativi capitoli della presente norma.

In casi in cui si ritenesse necessario considerare la collaborazione delle pareti in muratura e dei sistemi di diversa tecnologia nella resistenza al sisma, quest'ultima deve essere verificata utilizzando i metodi di analisi non lineare.

I collegamenti fra elementi di tecnologia diversa debbono essere espressamente verificati.

Particolare attenzione deve essere prestata alla verifica della efficace trasmissione dei carichi verticali. Inoltre è necessario verificare la compatibilità delle deformazioni per tutte le parti strutturali.

E' consentito altresì realizzare costruzioni costituite da struttura muraria nella parte inferiore e sormontate da un piano con struttura in cemento armato o acciaio o legno o altra tecnologia, alle seguenti condizioni:

- i limiti all'altezza delle costruzioni previsti per le strutture in muratura si intendono comprensivi delle parti in muratura e di quelle in altra tecnologia;*
- la parte superiore di diversa tecnologia sia efficacemente ancorata al cordolo di coronamento della parte muraria;*
- nel caso di metodo di analisi lineare, l'uso dell'analisi statica (nei limiti di applicabilità riportati al § 7.8.1.5.2) è consentito a patto di utilizzare una distribuzione di forze compatibile con la prima forma modale elastica in ciascuna direzione, calcolata con metodi sufficientemente accurati che tengano conto della distribuzione irregolare di rigidità in elevazione. A tal fine, in assenza di metodi più accurati, la prima forma modale può essere stimata dagli spostamenti ottenuti applicando staticamente alla costruzione la distribuzione di forze definita nel § 7.3.3.2;*
- nel caso di analisi statica non lineare, si utilizzino le distribuzioni di forze orizzontali previste al § 7.3.4.1, dove la prima forma modale elastica è stata calcolata con metodi sufficientemente accurati.*
- nel caso di analisi lineare, per la verifica della parte in muratura si utilizzi il fattore di struttura q prescritto al § 7.8.1.3; per la verifica della parte superiore di altra tecnologia si utilizzi il fattore di struttura adatto alla tipologia costruttiva e alla configurazione (regolarità) della parte superiore, comunque non superiore a 2,5;*
- tutti i collegamenti fra la parte di diversa tecnologia e la parte in muratura siano localmente verificati in base alle forze trasmesse calcolate nell'analisi, maggiorate del 30%.*

C7.8.4 STRUTTURE MISTE CON PARETI IN MURATURA ORDINARIA O ARMATA

La trasmissione delle azioni sismiche in una struttura mista può avvenire attraverso un organismo strutturale che presenti elementi in muratura ed elementi in cemento armato o acciaio o legno od altra tecnologia disposti altimetricamente allo stesso piano oppure disposti altimetricamente su piani successivi.

Laddove le azioni sismiche non vengano integralmente affidate alla struttura muraria od a quelle in altra tecnologia ma si ravvisi l'esigenza di considerare la collaborazione delle pareti in muratura e dei sistemi di diversa tecnologia nella resistenza al sisma, per tali strutture è necessario eseguire l'analisi non lineare, statica o dinamica, al fine di valutare correttamente i diversi contributi di elementi caratterizzati da rigidità, resistenze e capacità deformative molto differenziate tra di loro.

8.7.3 EDIFICI MISTI


Alcune tipologie di edifici esistenti possono essere classificate come miste. Situazioni ricorrenti sono:

- edifici i cui muri perimetrali siano in muratura portante e la struttura verticale interna sia rappresentata da pilastri (per esempio, in c.a. o acciaio);*
- edifici in muratura che abbiano subito sopraelevazioni, il cui sistema strutturale sia, per esempio, in c.a. o acciaio, o edifici in c.a. o acciaio sopraelevati in muratura;*
- edifici che abbiano subito ampliamenti in pianta, il cui il sistema strutturale (per esempio, in c.a. o acciaio) sia interconnesso con quello esistente in muratura.*

Per queste situazioni è necessario prevedere modellazioni che tengano in considerazione le particolarità strutturali identificate e l'interazione tra elementi strutturali di diverso materiale e rigidità, ricorrendo, ove necessario, a metodi di analisi non lineare di comprovata validità.

C8.7.3 EDIFICI MISTI

Gli edifici a struttura mista sono molto presenti nel panorama degli edifici esistenti. L'interpretazione del loro comportamento e la relativa modellazione è in generale più complicata di quella degli edifici con struttura di caratteristiche omogenee, a causa delle interazioni tra i diversi comportamenti dei materiali costitutivi degli elementi strutturali. La chiamata in causa dei comportamenti in campo non lineare implica interazioni non gestibili attraverso modelli e metodi semplificati, a meno di non trascurare completamente il contributo alla capacità resistente sismica di

	<p>DIPARTIMENTO PER LE POLITICHE INTEGRATE DI SICUREZZA E PER LA PROTEZIONE CIVILE</p> <p>P.F. RISCHIO SISMICO ED OPERE PUBBLICHE D'EMERGENZA</p>	<p>Esempio applicativo struttura mista Scuola "Giotto", Morrovalle (MC) Dicembre 2009</p>
--	---	---

un'intera categoria di elementi dello stesso materiale, assunti come elementi secondari. Tale operazione, peraltro, è ammissibile solo a condizione che le interazioni degli elementi trascurati siano favorevoli al comportamento sismico della struttura mista.

Nel caso in cui i solai dell'edificio siano flessibili, è possibile procedere all'analisi delle singole pareti o dei sistemi di pareti complanari, con ciascuna parete soggetta ai carichi verticali di competenza ed alle corrispondenti azioni del sisma nella direzione parallela alla parete. Si noti come la norma italiana ponga in risalto il ruolo svolto dai solai ai fini della ripartizione dell'azione sismica in funzione della loro rigidezza o flessibilità nel piano rispetto agli elementi resistenti verticali.

3 MODELLAZIONE DEL CASO DI STUDIO

Nel presente documento è posta attenzione sul comportamento sismico di una costruzione mista muratura-c.a..

L'edificio, adibito a scuola elementare, si trova in via Giotto/Brodolini nel Comune di Morrovalle.

Il corpo di fabbrica in esame, più propriamente, è costituito da un nucleo originario con struttura perimetrale prevalentemente in muratura di mattoni e struttura interna prevalentemente organizzata con telai in c.a., e da un successivo primo ampliamento in continuità strutturale realizzato in muratura sempre di mattoni.

Come considerazione generale sull'edificio, si può rilevare come l'ampiezza delle aule didattiche, dei corridoi e degli spazi di collegamento funzionale mal si presta alle esigenze strutturali di un manufatto in muratura, a maggior ragione tenendo conto che gli spessori costruttivi dell'epoca moderna sono ben diversi da quelli dell'edilizia storica. Negli anni '50 – '60, il massimo spessore resistente della muratura era dell'ordine di 27 – 50cm, corrispondente a due, tre o quattro teste in mattoni pieni.

Ne consegue che, per tale edificio o, più genericamente, per gli edifici costruiti in quel periodo, il rapporto tra l'area resistente delle pareti e l'ingombro del fabbricato viene ad essere caratterizzato da valori estremamente piccoli.

Come si può vedere dalle foto seguenti, il fabbricato, sempre mantenuto in uso, si presenta in discreto stato di conservazione.



Figura 1. Vista ingresso principale



Figura 2. Vista interna



Figura 3. Vista retro



Per quanto attiene la geometria d'ingombro, questa è riferibile ad una pianta rettangolare inscritta in una figura di dimensioni 35.30m×15.20m con un'altezza massima di circa 7.10m, realizzato con 2 livelli fuori terra con altezza di interpiano media di circa 3.50m.

Presenta copertura piana, fondazioni superficiali su plinti per i pilastri in c.a. e su travi continue al di sotto della muratura.

Le pareti in muratura di mattoni sono realizzate con due tipologie, che si differenziano essenzialmente per lo spessore e di 27 e 42cm; i mattoni da cui sono costituite hanno una resistenza a compressione confrontabile e la stessa cosa può dirsi della malta con cui sono legati.

La tipologia caratterizzata da uno spessore di circa 42cm è realizzata con due paramenti murari separati da un sacco pari a circa 1/3 dello spessore, interrotto da legature che permettono di considerare sufficientemente omogeneo il comportamento dell'intero setto costituito da mattoni interi verso l'interno dell'edificio e da mattoni con una percentuale di foratura minore del 18% verso l'esterno.

Gli spessori individuati sono mantenuti per entrambi i livelli in elevazione.

Per quanto attiene ai telai in c.a., con riferimento a quelli centrali, al piano terra si riscontrano pilastri con sezioni pari a 25x25cm sovrastati da travi rettangolari di base 25cm e altezza lorda pari a 56cm, mentre al piano primo i pilastri si mantengono uguali e le travi (che ricevono la doppia solaiatura di copertura) hanno invece un'altezza lorda di 45cm.

Riferendosi invece ai telai in c.a. esterni (o a porzioni di telai in c.a. inseriti in un allineamento che preveda anche l'utilizzo di maschi murari) questi presentano pilastri prevalentemente di 25x25cm e travi calate di base 25cm con altezza variabile tra i 45 ed i 60cm, anche in funzione delle esigenze architettoniche.

L'unica scala presente è analogamente realizzata con soletta continua in c.a..

Sia con riferimento al nucleo originario, che riferendosi al successivo ampliamento, non è stata riscontrata ovunque la presenza di cordoli perimetrali sulle pareti murarie, come mostrato negli elaborati grafici a seguire.

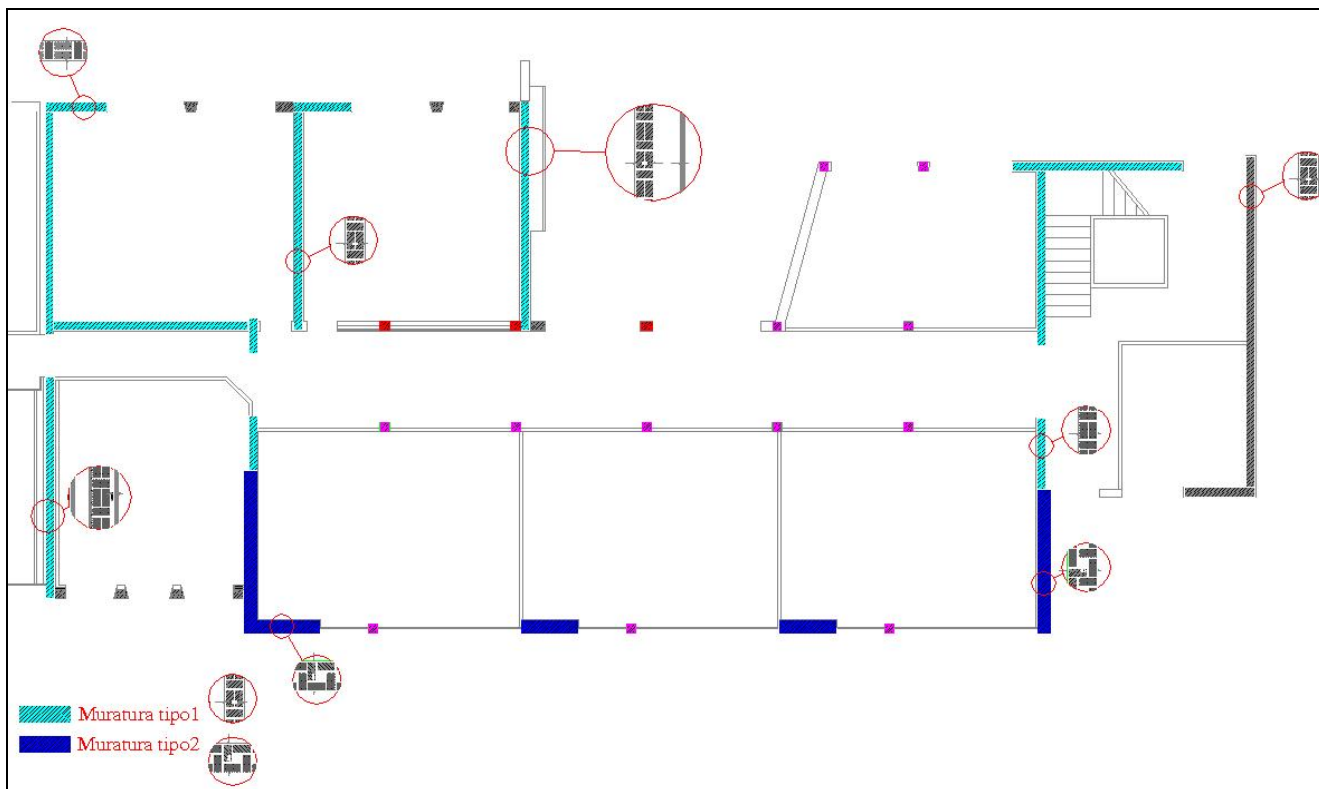


Figura 4. Individuazione tipologie murarie – piano terra

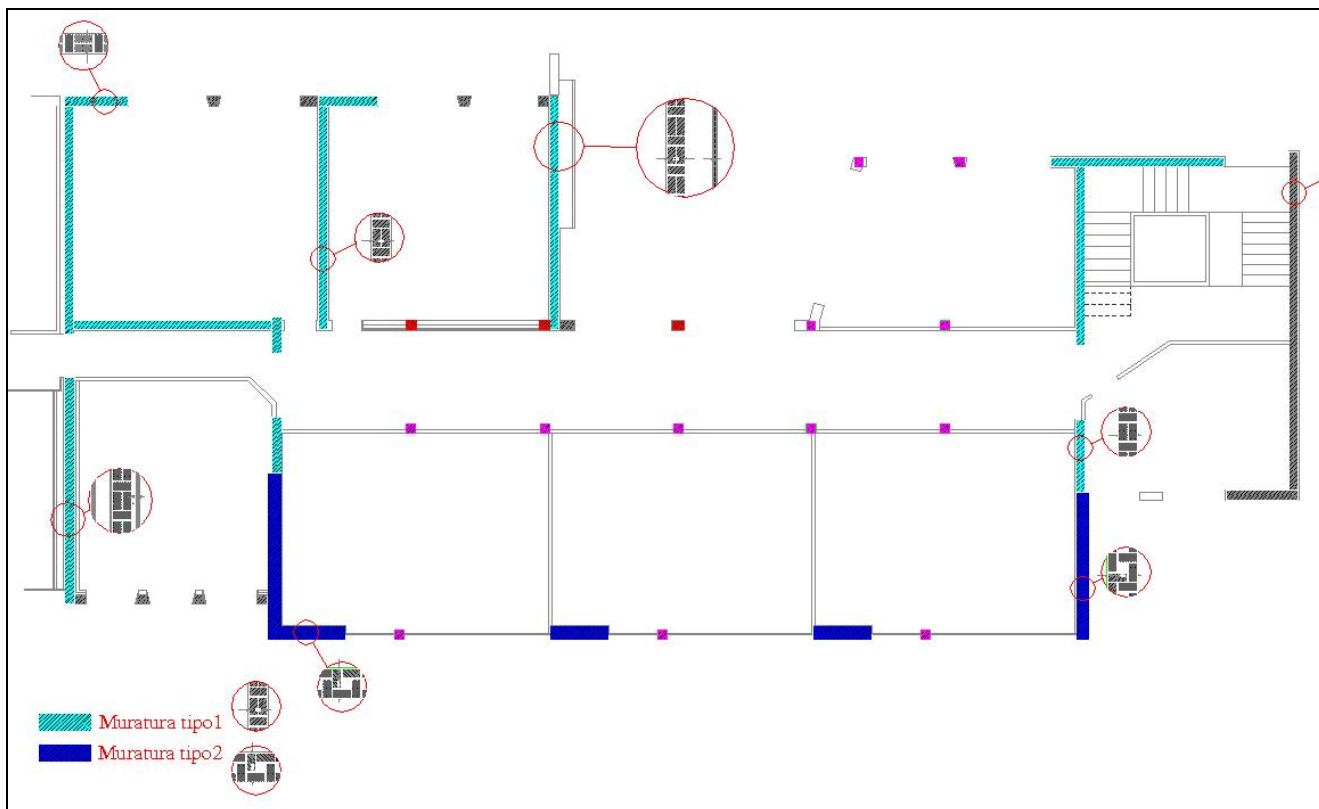



Figura 5. Individuazione tipologie murarie – piano primo

3.1 Analisi di regolarità dell'edificio (p.to 7.2.2 D.M. 14/01/08)

Regolarità in pianta	a) configurazione in pianta compatta ed approssimativamente simmetrica rispetto alle due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione delle masse e delle rigidezze → <i>forma non compatta: la differenza percentuale tra l'area in pianta e l'area della poligonale convessa è superiore al 5% (>11%)</i> → <i>distribuzione masse e rigidezze approssimativamente simmetrica: la differenza percentuale è superiore al 10% della dimensione massima lungo la direzione corrispondente (dist. y tra CR e CM > 10% Ly)</i>	NO
	b) rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4 → $35.30/15.20 = 2.32$	SI
	c) nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25% della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione → <i>in entrambe le direzioni non risulta verificato</i>	NO
	d) gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti → <i>l'edificio è realizzato per la maggior parte con solai in laterizio armato (tipo SAP) non dotati di soletta collaborante, che pertanto non possono essere considerati infinitamente rigidi</i>	NO
Regolarità in altezza	e) tutti i sistemi resistenti verticali (quali telai e pareti) si estendono per tutta l'altezza della costruzione	SI
	f) massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25%, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base → <i>rigidezze invariate ai due livelli</i> → <i>variazione massa <10%</i>	SI
	h) eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengono in modo graduale da un orizzontamento al successivo, rispettando i seguenti limiti: ad ogni orizzontamento il rientro non supera il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento, né il 20% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno 4 piani per il quale non sono previste limitazioni di restringimento → <i>non sono presenti restringimenti</i>	SI

3.2 La modellazione

L'edificio oggetto di studio viene modellato tenendo conto della flessibilità dei solai, della deformabilità e limitata resistenza delle fasce di piano e della redistribuzione delle azioni di compressione sui singoli maschi murari. La struttura portante è costituita dalle pareti in muratura e dai telai in c.a., mentre ai solai è demandato il compito di trasferire i carichi gravitazionali agli elementi portanti e di ripartire l'azione sismica tra le varie pareti. Le pareti a loro volta, secondo la schematizzazione a telaio equivalente, sono suddivise in pannelli di maschio, pannelli di fascia e di nodo. Le modalità di crisi considerate per i pannelli murari sono a pressoflessione ed a taglio, in accordo con i criteri di resistenza proposti dal D.M. 14/01/08, con il raggiungimento delle condizioni di collasso per i pannelli di maschio controllate attraverso il *drift*, il cui valore è imposto dallo stesso D.M.. Pur avendo assunto il comportamento dei pannelli di fascia alla stregua dei

	<p>DIPARTIMENTO PER LE POLITICHE INTEGRATE DI SICUREZZA E PER LA PROTEZIONE CIVILE</p> <p>P.F. RISCHIO SISMICO ED OPERE PUBBLICHE D'EMERGENZA</p>	<p><i>Esempio applicativo struttura mista Scuola "Giotto", Morrovalle (MC) Dicembre 2009</i></p>
--	---	--

pannelli di maschio, ciò non dispensa alcune considerazioni. Infatti, secondo il D.M. 14/01/08, tale ipotesi è valida solo nel caso di azione assiale nota sui pannelli di fascia, altrimenti il criterio di resistenza da assumersi per tale elemento è di tipo coesivo. Per quanto attiene ai pannelli di nodo, a seguito delle osservazioni dei danni post-sisma, si è visto che questi presentano solo raramente dei danni, con la conseguente possibilità – pertanto - di trascurare la deformazione di tali elementi, che vengono pertanto assunti come rigidi. Un comportamento bilineare, con resistenza limitata e pendenza di scarico uguale rispetto a quella iniziale, viene assunto per gli elementi in c.a., con la concentrazione della plasticità in corrispondenza delle estremità degli stessi. I criteri di resistenza considerati per gli elementi in c.a. sono a pressoflessione ed a taglio, come indicato nel D.M. 14/01/08. I solai sono modellati come elementi membrana ortotropi a 3-4 nodi.

Di fondamentale importanza è l'utilizzo di modelli a comportamento non lineare per gli elementi in muratura ed in c.a., in quanto un'analisi di tipo lineare non risulterebbe appropriata per investigare la ripartizione tra le diverse componenti strutturali dell'azione sismica con l'evolversi del processo di carico sino in campo non lineare. Il codice di calcolo utilizzato nelle analisi è il 3Muri v. 4.0.220.

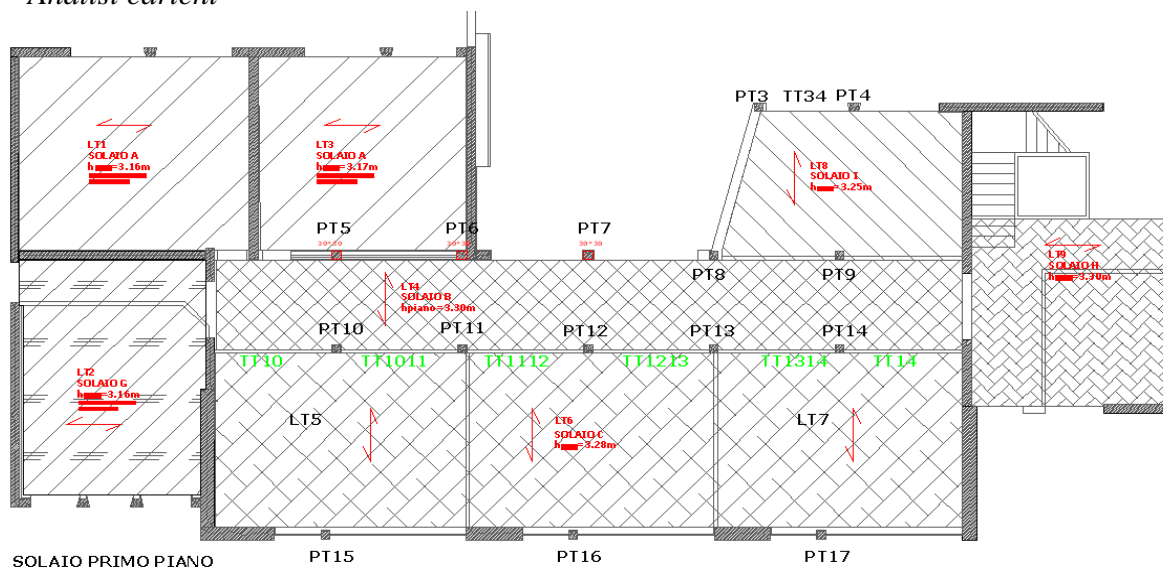
3.3 Il caso di studio analizzato

Per "caso di studio analizzato" si intende l'unico modello implementato per la struttura in esame (unico per ciò che concerne le scelte di modellazione, ma comunque ottimizzato per ciò che riguarda "l'analisi di sensitività" di alcuni parametri che influenzano i risultati), ottenuto sulla scorta delle possibilità date dal software utilizzato e sulla scorta dei dati oggettivi riportati nel seguito: geometria degli elementi resistenti (solai compresi), carichi, caratteristiche meccaniche dei materiali in gioco, specificazione del contenuto di armatura per gli elementi in c.a., azione sismica.

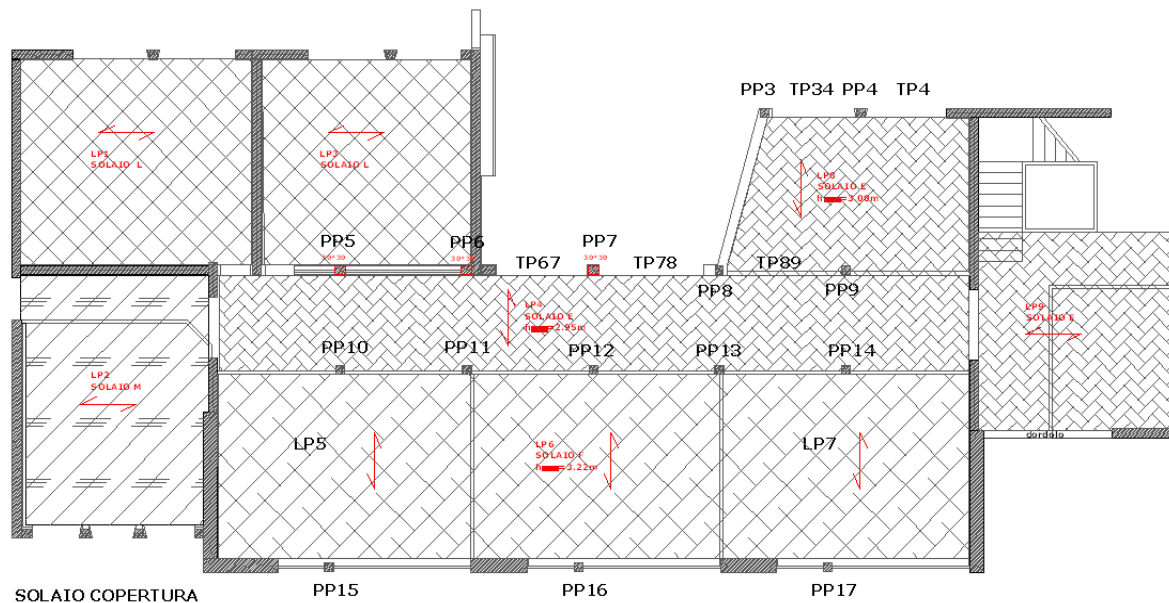
In particolare, si ricorda che:

1. i solai sono stati sempre messi in conto con la rigidità nel piano di cui sono dotati, con differenziazione anche data dalla presenza o meno della soletta collaborante;
2. la presenza dei cordoli, laddove riscontrati, comporta un buon effetto in termini di incremento di resistenza su una parete muraria, e pertanto nel modello (stante l'investigazione effettuata sull'edificio) se ne è considerato il contributo.

C'è da rammentare, infine, che siamo di fronte ad una struttura esistente, progettata con riferimento alla presenza delle sole azioni verticali, e pertanto con un dimensionamento degli elementi in c.a. spesso al limite (od anche al di sotto), in particolare con sezioni trasversali dei pilastri ridotte e soprattutto un contenuto d'armatura spesso insoddisfacente.

• *Analisi carichi*


SOLAIO tipo	spessore (cm)	peso specifico (kg/mc)	peso (kg/mq)
SOLAIO tipo A			
pavimento in PVC	0.5	9	4.5
massetto	8	2400	192
pignatta e travetto precompresso	20	1000	200
intonaco	1.5	1800	27
TOT			423.5
SOLAIO tipo B			
pavimento in PVC	0.5	9	4.5
massetto	8	2400	192
SAP	16		130
intonaco	1.5	1800	27
TOT			353.5
SOLAIO tipo C			
pavimento in PVC	0.5	9	4.5
massetto	8	2400	192
SAP	20		175
intonaco	1.5	1800	27
tramezzi (incidenza media)			30
TOT			428.5
SOLAIO tipo H			
pavimento in PVC	0.5	9	4.5
massetto	8	2400	192
SAP	16		130
intonaco	1.5	1800	27
tramezzi (incidenza media)			73
TOT			426.5
SOLAIO tipo I			
pavimento in ceramica	1.5	27	40.5
massetto	12	2400	288
SAP	16		130
intonaco	1.5	1800	27
tramezzi (incidenza media)			115
TOT			600.5
SOLAIO tipo G			
pavimento in PVC	0.5	9	4.5
massetto	12	2400	288
solaio con travetti tipo "varese"	22		190
intonaco	1.5	1800	27
tramezzi (incidenza media)			115
TOT			624.5



SOLAIO tipo E

	spessore (cm)	peso specifico (kg/mc)	peso (kg/mq)
guaina impermeabilizzante	1	9	9
massetto	6	2400	144
isolante termico	4		0
guaina impermeabilizzante	0.5	9	4.5
soletta	4	2400	96
SAP	12		110
camera d'aria			0
SAP	9		85
intonaco	1.5	1800	27
TOT			475.5

SOLAIO tipo F

	spessore (cm)	peso specifico (kg/mc)	peso (kg/mq)
guaina impermeabilizzante	1	9	9
massetto	6	2400	144
isolante termico	4		0
guaina impermeabilizzante	0.5	9	4.5
soletta	6	2400	144
SAP	12		110
camera d'aria			0
SAP	12		110
intonaco	1.5	1800	27
TOT			548.5

SOLAIO tipo L

	spessore (cm)	peso specifico (kg/mc)	peso (kg/mq)
guaina impermeabilizzante	1	9	9
massetto	6	2400	144
isolante termico	4		0
guaina impermeabilizzante	0.5	9	4.5
massetto	5	2400	120
solaio in latero-cemento	20	1000	200
intonaco	1.5	1800	27
TOT			504.5

SOLAIO tipo M

	spessore (cm)	peso specifico (kg/mc)	peso (kg/mq)
guaina impermeabilizzante	1	9	9
massetto	6	2400	144
isolante termico	4		0
guaina impermeabilizzante	0.5	9	4.5
massetto	6	2400	144
solaio con travetti tipo "varese"	22		200
intonaco	1.5	1800	27
TOT			528.5

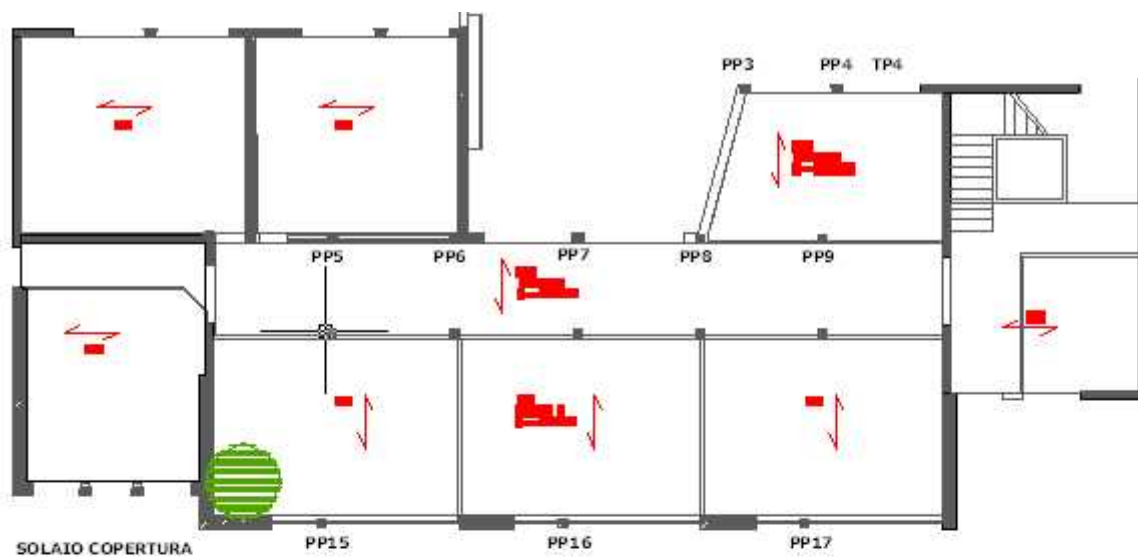


Figura 6. Indagini sui solai di copertura



• *Caratterizzazione materiali*

Cls

Elaborazione dati carotaggi (Formula Masi)													
Oggetto: Scuola elementare Giotto di Morrovalle (Mc)													
N° carote	4		da inserire manualmente		da inserire manualmente				f_{cm} (N/mm ²)	R_{cm} (N/mm ²)	Massa vol. media (Kg/m ³)		
									13.1	15.8	2164.2		
Denominazione	h (mm)	d (mm)	d/h	C _{no1}	C _{no2}	C ₂	C ₃	$f_{car,i}$ (N/mm ²)	$f_{eis,i}$ (N/mm ²)	Peso carota (Kg)	Volume carota m ³	Massa volumica apparente (Kg/m ³)	
Elemento 1	161.0	79.0	0.49	1.00	1.02	1.00	1.20	14.8	18.2	1.751	0.000789	2219.9	
Elemento 2	141.0	79.0	0.56	0.97	1.02	1.00	1.20	9.1	10.8	1.489	0.000691	2155.5	
Elemento 3	97.0	79.0	0.81	0.86	1.02	1.00	1.20	16.8	17.8	1.02	0.000475	2146.4	
Elemento 4	161.0	79.0	0.49	1.00	1.02	1.00	1.20	4.6	5.7	1.684	0.000789	2135.0	
Correlazione con indagine non distruttiva su elemento:			lr	lr di calcolo									
R _{sca} (N/mm ²)	15.1		1.18	1.07									
Prove non distruttive													
	R _{sca} (N/mm ²)	f _{ca} (N/mm ²) correlati		N° prove									
Prova 1	25.3	22.5		15.00									
Prova 2	30.0	26.6											
Prova 3	27.8	24.7											
Prova 4	15.1	13.4											
Prova 5	21.9	19.5											
Prova 6	16.4	14.6											
Prova 7	14.5	12.9											
Prova 8	15.5	13.8											
Prova 9	17.4	15.5											
Prova 10	15.2	13.5											
Prova 11	17.8	15.9											
f_{cm} (N/mm ²)	R_{cm} (N/mm ²)		F _c	f_{cdm} (N/mm ²)									
16.4	19.7		1.2	13.6									
E (N/mm ²)		G (N/mm ²)											
25496.7		10623.6											

Acciaio

Elaborazione dati sull'acciaio		
N°	f _y	f _t
1	370.1	505.8
2	351.3	444.6
Tot. elementi	2	
Media	360.70	475.20
F _c	f _{ydm} (N/mm ²)	
1.2	300.6	

Muratura

	f_m [N/cm ²]	τ_0 [N/cm ²]	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	w [kN/m ³]
<i>Muratura tipo 1 con LC2: mattoni semipieni, senza sacco, malta buona, paramenti ben accostati, fattore confidenza 1.2 per sole caratteristiche resistenza, moduli elastici fessurati</i>	520	12.35	937	312	18
<i>Muratura tipo 2 con LC2: mattoni semipieni, con presenza sacco, malta buona, paramenti ben accostati (presenza di collegamenti), fattore confidenza 1.2 per sole caratteristiche resistenza, moduli elastici fessurati</i>	363	8.64	655	218	18

- Sintesi delle indagini sui cordoli delle pareti in muratura e sugli elementi in c.a.

Cordoli

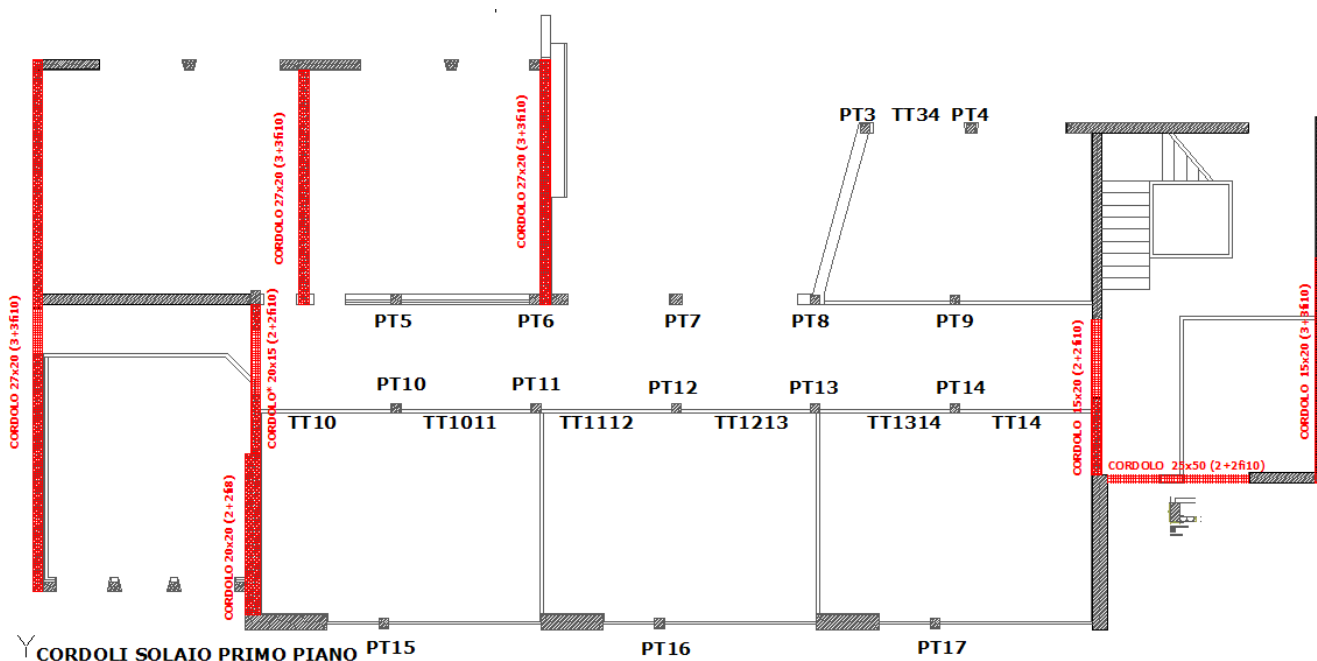


Figura 7. Individuazione cordoli – solaio piano primo

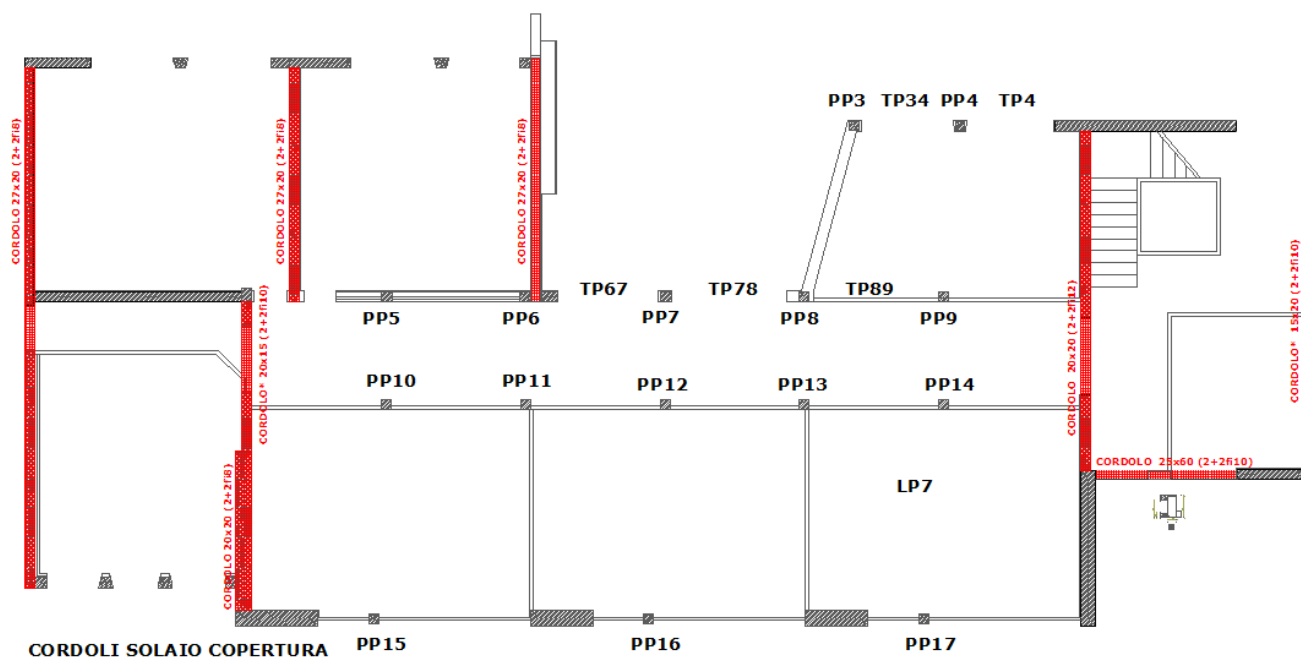


Figura 8. Individuazione cordoli – solaio copertura

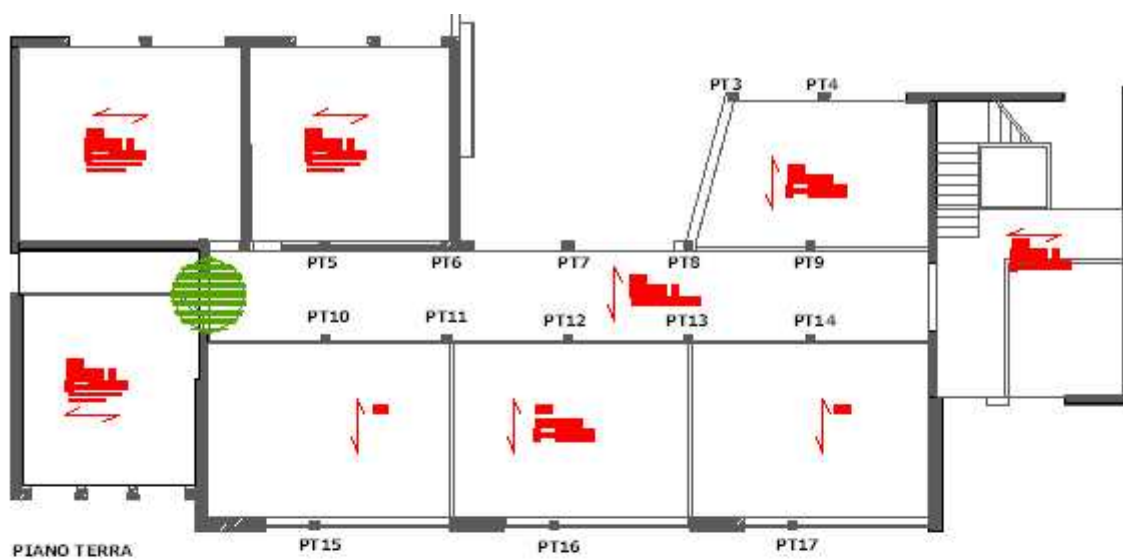


Figura 9. Sondaggi sui cordoli al primo livello

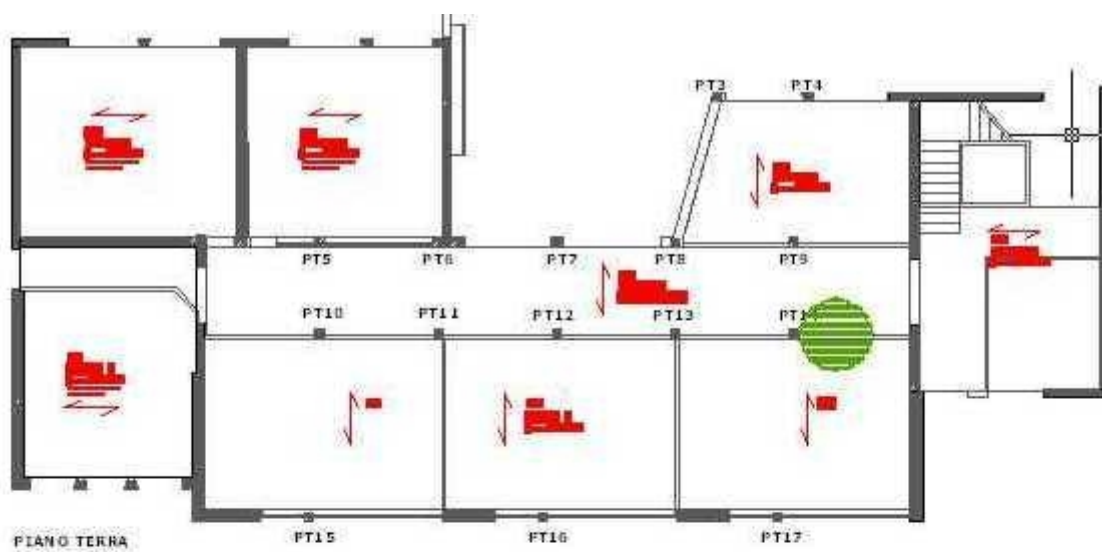


Figura 12. Sondaggi su travi al primo livello

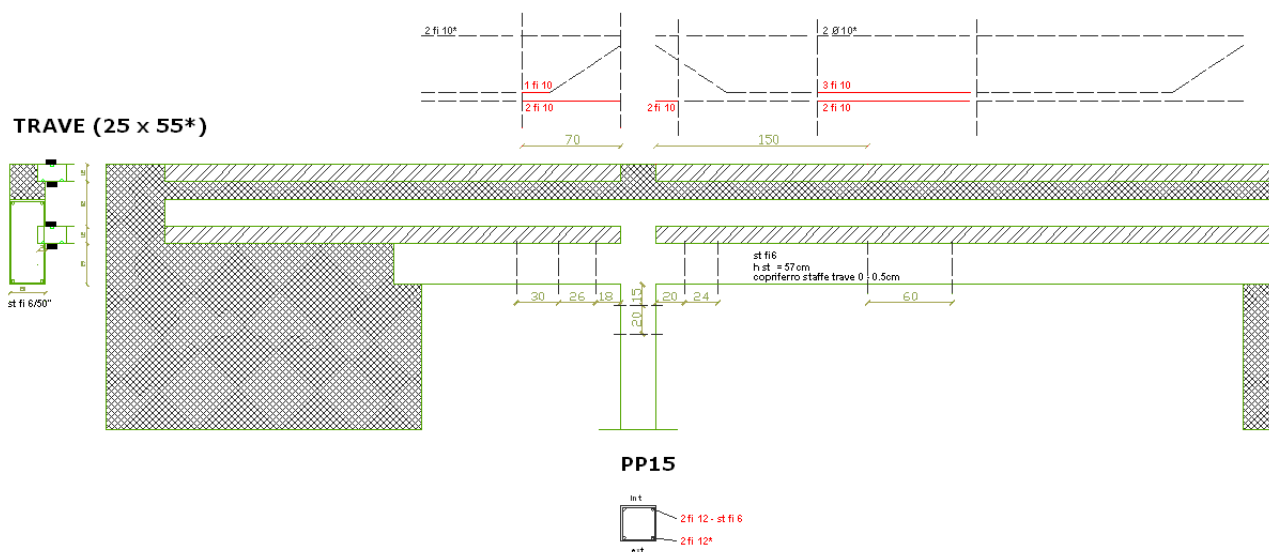


Figura 13. Rilievo tipico elementi in c.a.

Per quanto attiene le dimensioni geometriche delle sezioni trasversali degli elementi in c.a., si rimanda alla lettura degli elaborati di cui sopra.

Il rilievo delle barre lisce di armatura longitudinale dei pilastri, a volte incerto anche a causa del "rigonfiamento" di alcuni di esse, ha riportato mediamente l'utilizzo di diametri da 14mm per i pilastri del piano terra e di diametri da 12mm per quelli al piano primo; questo lascia presupporre che l'intento progettuale sia stato proprio quello di differenziare l'armatura a seconda del piano considerato, e pertanto questo è quanto è stato riportato nelle tavole di restituzione del rilievo e nella modellazione; per le staffe, di diametro 6mm, queste sono state rinvenute con passi estremamente variabili, ma riconducibili al passo medio di 20cm, rispettivamente per gli estremi e per il tratto centrale dei pilastri.

Per le travi, le barre di armatura longitudinale prevalenti sono costituite da piccoli diametri (\varnothing 10-12mm), con l'utilizzo di piegati in prossimità degli appoggi per l'integrazione del contributo delle staffe per il taglio, quest'ultime utilizzate con diametro \varnothing 6 e passi medi di 40cm in campata e 20cm agli appoggi.

- *Categoria suolo e Azione sismica*

Calcolo $V_{s,30}$ – SCUOLA GIOTTO, MORROVALLE (MC)

H	Prof. (m)	V_s (m/sec)	Tipo terreno
H1	1	175	Terreno di riporto
H2	3	200	Limi Sabbiosi
H3	3	440	Ghiaia in matrice sabbiosa limosa
H4	7.5	505	Ghiaia in matrice sabbiosa limosa
H5	7.5	315	Argilla limosa debolmente sabbiosa
H6	8	350	Argilla limosa debolmente sabbiosa
somma	30		
$V_{s,30}$ (m/sec)		337	suolo tipo C

DATI DI INPUT

SPETTRO DI RISPOSTA per SLV

Coordinate geografiche	43.27721 13.59005
Periodo di ritorno	Vn = 50 anni Cu = 1,5 (classe 3) Smorzamento 5%
Caratteristiche del suolo	Suolo Tipo C Cat. Top. T1

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV

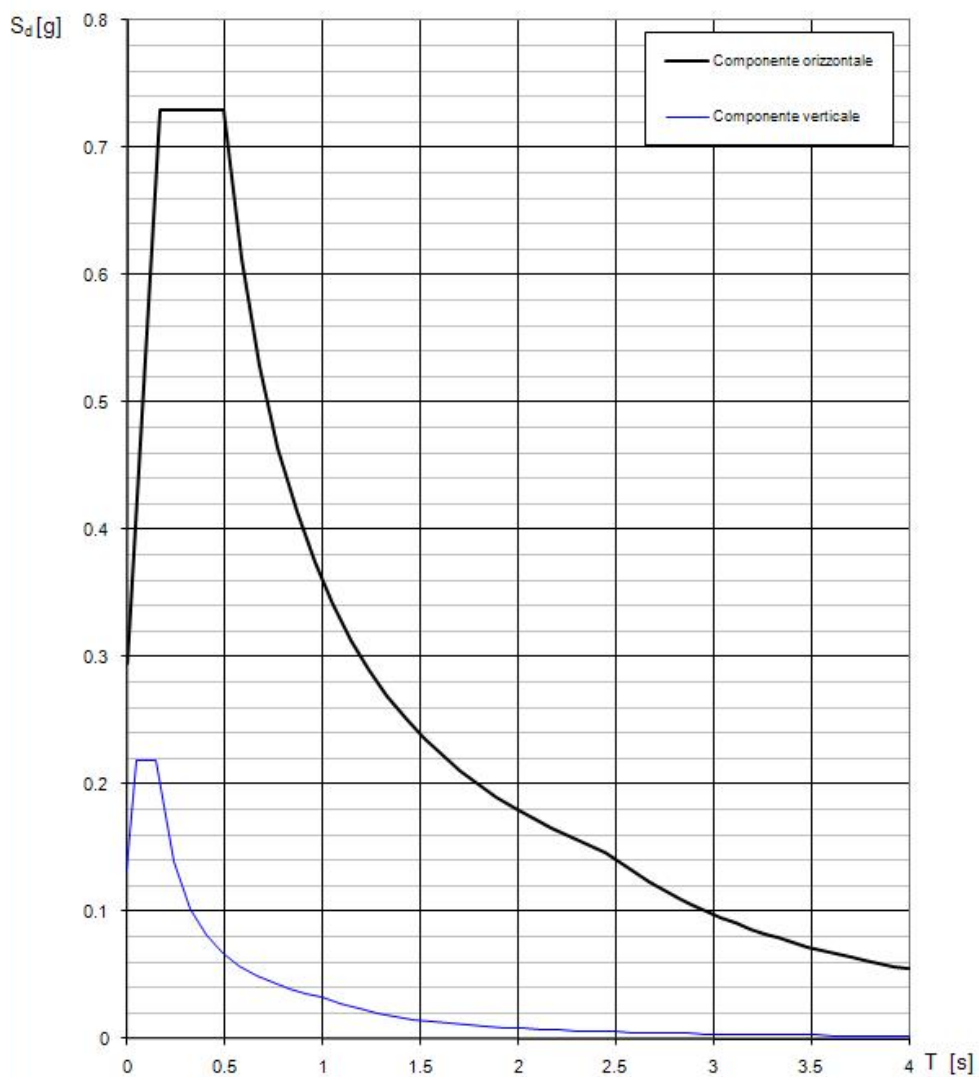


Figura 14. Spettri per il sito in esame (da Spettri ver.1.03 del Consiglio Superiore LL.PP.)

- *Visualizzazione grafica del modello di calcolo*

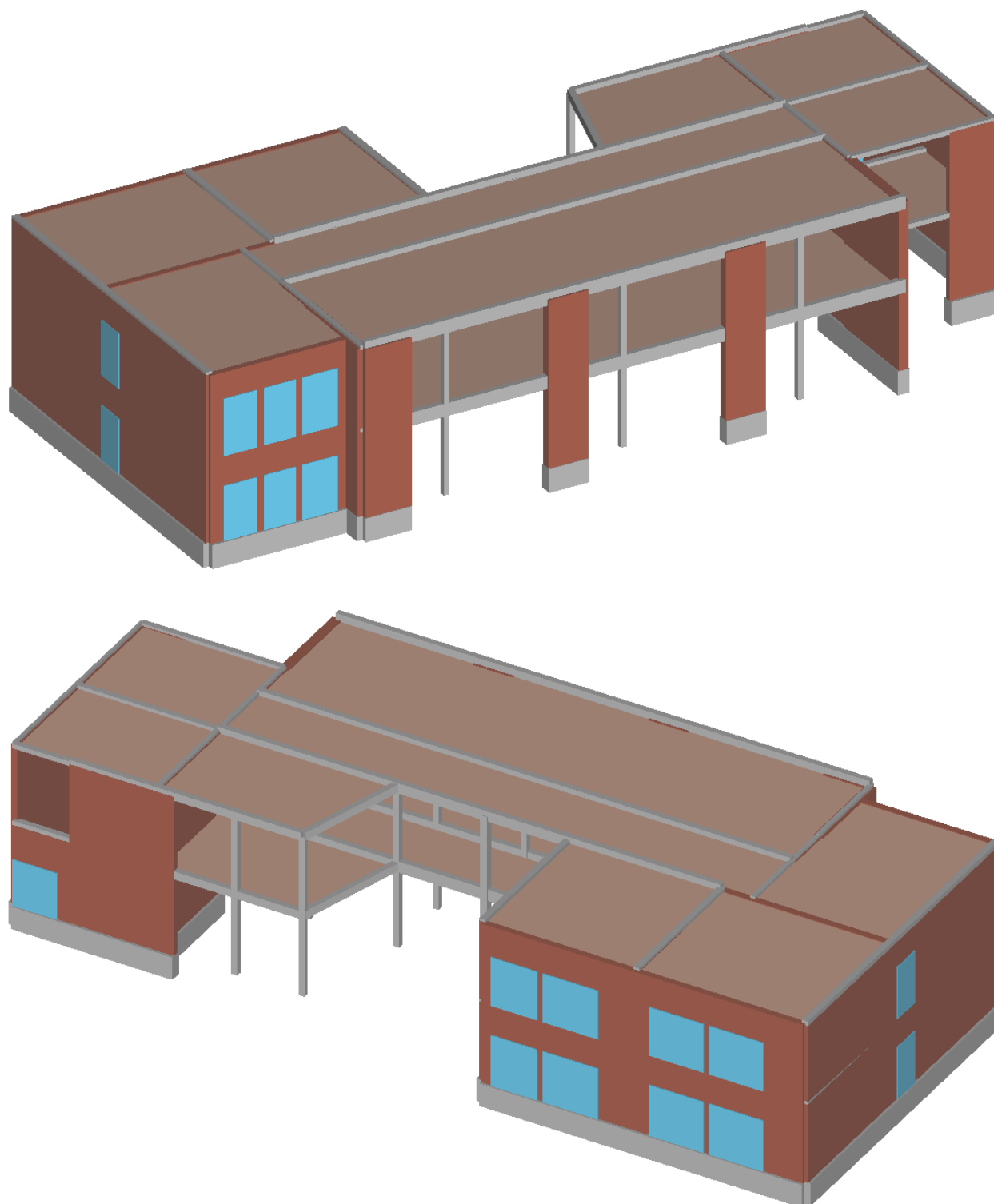


Figura 15. Viste principali del modello analizzato

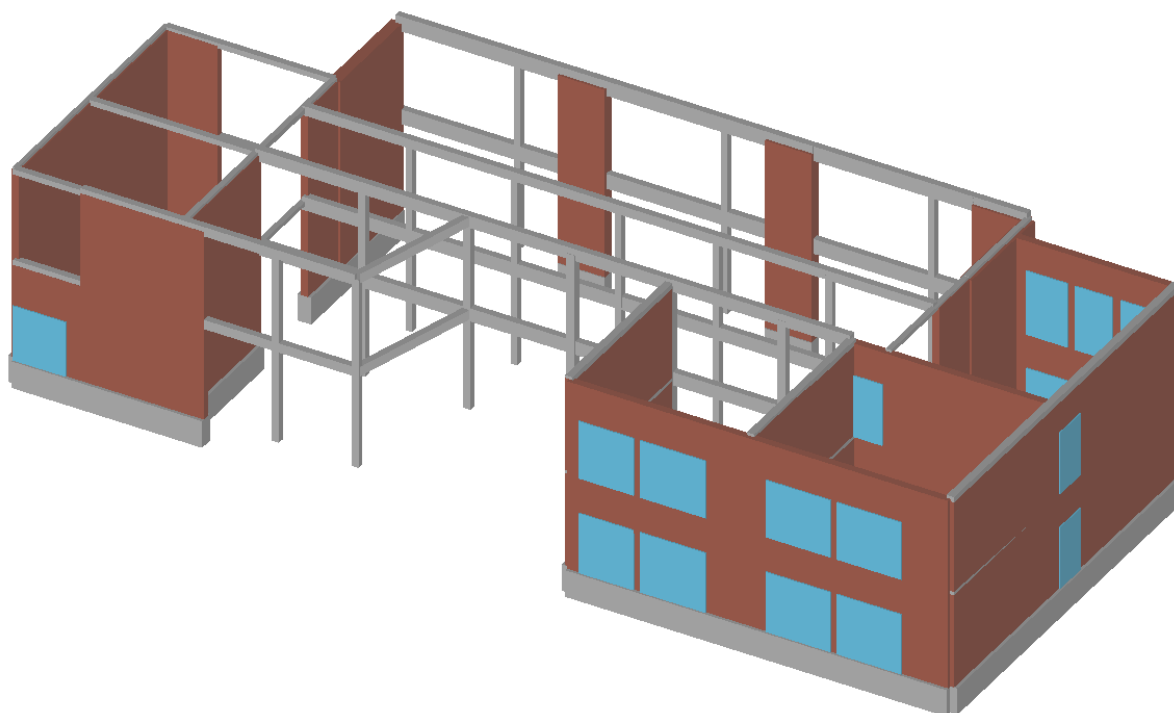


Figura 16. Vista interna del modello analizzato

4 COMPORTAMENTO GLOBALE

Le analisi statiche non lineari condotte considerano le due distribuzioni di azioni sismiche di normativa: una proporzionale alle masse (*uniforme*) ed una proporzionale al prodotto delle masse applicate nei nodi per la relativa quota rispetto allo spiccatto delle fondazioni (*pseudo-triangolare*). Le curve di capacità dell'intero edificio sono tracciate riportando in ordinata il tagliante di base ed in ascissa lo spostamento medio dell'ultimo livello dell'edificio. Le condizioni di collasso delle singole curve sono state assunte, come indicato da norma, in corrispondenza del decadimento del massimo tagliante di base pari al 20%, che non necessariamente coincide con la crisi dell'elemento murario o in c.a. secondo i criteri forniti dalla norma stessa. Tale scelta è giustificata dal modello assunto per le fasce di piano, che in assenza di elementi resistenti a trazione hanno capacità resistente pressoché nulla; pertanto, facendo corrispondere la condizione di collasso dell'edificio con quella del singolo elemento, non risulterebbe possibile investigare il comportamento dell'edificio anche in ambito non lineare. Questa affermazione, particolarmente significativa per le strutture integralmente in muratura, è tanto più vera per una struttura esistente mista, in cui è possibile riscontrare un'ulteriore criticità per la presenza di elementi in c.a. di vecchia concezione.

Dalla lettura di articoli di riferimento per questo documento (ed in particolare l'ottimo [2] sull'impostazione del quale ci si è basati, che ha affrontato la problematica della ripartizione dell'azione sismica tra la componente muraria e quella in c.a. per tramite di una parametrizzazione delle dimensioni e quindi della rigidità degli elementi strutturali in c.a.), anche non affrontando uno studio capace di cogliere quantitativamente il contributo distinto fra le due macro-componenti strutturali in termini di aliquota sismica assorbita, si è perlomeno colta la differenza di soluzione nelle due direzioni data dal diverso "peso" di presenza delle intelaiature in c.a. rispetto agli allineamenti murari.

In generale, per le strutture miste si riscontra che in funzione della consistenza della componente in c.a., la rigidità da questa offerta può risultare significativa ai fini della ripartizione dell'azione

sismica anticipatamente in ambito lineare, e maggiormente in ambito non lineare. Pertanto, nel momento in cui la resistenza delle pareti murarie e dei telai in c.a. in campo non lineare sono simili tra loro, ciò dà maggiormente forza a quanto indicato nel D.M. 14/01/08 di effettuare analisi in campo non lineare quando nella resistenza al sisma si fanno intervenire anche elementi di tecnologia differente dalla muratura.

Infatti, all'incrementarsi del contributo dei telai in c.a. si ha un doppio effetto benefico, in quanto, da un lato aumenta il massimo tagliante sostenibile dall'edificio e dall'altro decresce l'aliquota sostenuta dalle pareti in muratura.

La realizzazione di un ipotetico modello di confronto basato sulla semplice sostituzione dei telai interni in c.a. con pareti in muratura, porterebbe a rilevare un aumento della massima capacità resistente disponibile dell'edificio, in quanto le pareti in muratura riescono a contribuire maggiormente in termini di resistenza e rigidità rispetto ai telai in c.a. che sostituiscono. Ciononostante, l'ottenimento di maggior rigidità conferirebbe a questa alternativa struttura una minore capacità deformativa, a discapito dello spostamento ultimo offerto dall'edificio.

La sintesi dei risultati dell'analisi condotta è affidata alla tabella successiva. L'Indice di Rischio è costituito dal valore di "alfa u" riscontrabile per la combinazione di carico n°15, pari a 0.431.

N.	Inserisci in relazione	Dir. sisma	Carico sismico proporzionale	Ecc. [cm]	Dmax SLV [cm]	Du SLV [cm]	q* SLV	Dmax SLD [cm]	Dd SLD [cm]	Dmax SLO [cm]	Do SLO [cm]	Alfa u	Alfa e
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Masse	0	4.290	4.104	3.334	1.487	2.439	1.114	1.724	0.900	1.578
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	1° modo	0	4.811	4.732	3.847	1.736	1.966	1.329	1.395	0.780	1.128
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Masse	0	5.195	4.159	6.132	1.897	1.970	1.468	1.352	0.489	1.039
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	1° modo	0	5.875	3.475	6.935	2.111	1.750	1.634	1.180	0.433	0.829
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Masse	0	1.943	2.305	1.674	0.541	1.353	0.419	1.353	1.129	2.035
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	1° modo	0	2.217	2.483	1.790	0.628	1.544	0.486	1.544	1.088	2.012
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Masse	0	2.022	2.736	1.553	0.600	2.736	0.464	2.736	1.242	3.280
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	1° modo	0	2.454	3.973	1.749	0.734	3.129	0.568	3.129	1.464	3.201
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Masse	76.2	4.288	4.178	3.424	1.486	2.282	1.114	1.669	0.876	1.484
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Masse	-76.2	4.312	4.055	3.291	1.497	2.237	1.122	1.720	0.912	1.447
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	1° modo	76.2	4.739	3.673	3.741	1.702	1.972	1.300	1.400	0.784	1.152
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	1° modo	-76.2	4.764	3.709	3.706	1.714	1.964	1.310	1.387	0.788	1.140
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Masse	76.2	5.251	3.511	6.076	1.915	1.726	1.482	1.334	0.494	0.901
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Masse	-76.2	5.193	3.807	6.188	1.896	1.962	1.467	1.356	0.485	1.035
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	1° modo	76.2	5.797	3.310	6.968	2.085	1.712	1.614	1.190	0.431	0.821
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	1° modo	-76.2	5.871	3.463	6.790	2.110	1.742	1.632	1.200	0.442	0.826
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Masse	4.9625	2.060	2.123	1.796	0.564	1.233	0.437	1.233	1.022	1.828
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Masse	4.9625	1.791	1.658	1.538	0.512	1.393	0.396	1.393	0.951	2.200
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	1° modo	4.9625	2.348	2.327	1.956	0.654	1.415	0.506	1.415	0.993	1.802
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	1° modo	4.9625	2.088	2.318	1.713	0.591	1.337	0.458	1.337	1.078	1.911
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Masse	4.9625	2.087	2.841	1.678	0.598	2.841	0.463	2.841	1.255	3.330
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Masse	4.9625	1.953	1.887	1.603	0.561	1.695	0.434	1.695	0.977	2.361
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	1° modo	4.9625	2.488	3.376	1.858	0.728	3.376	0.564	2.810	1.273	3.394
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	1° modo	4.9625	2.379	2.465	1.860	0.682	1.964	0.528	1.964	1.027	2.269

Figura 17. Sintesi dei risultati dell'analisi sismica "pushover"

Si riportano nelle figure seguenti alcune significative curve di capacità dell'intero edificio per il modello in esame.

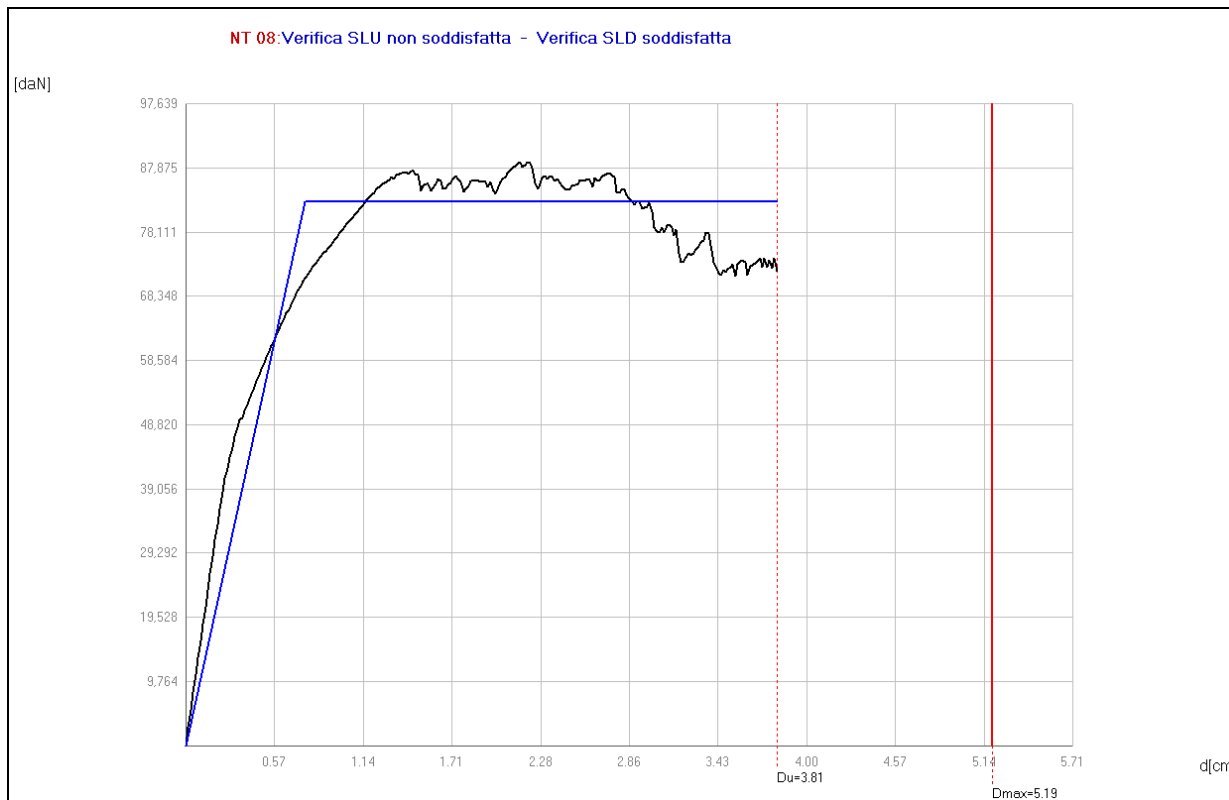


Figura 18. Curva di capacità per comb. più sfavorevole in X con distribuzione "masse" (N°14)

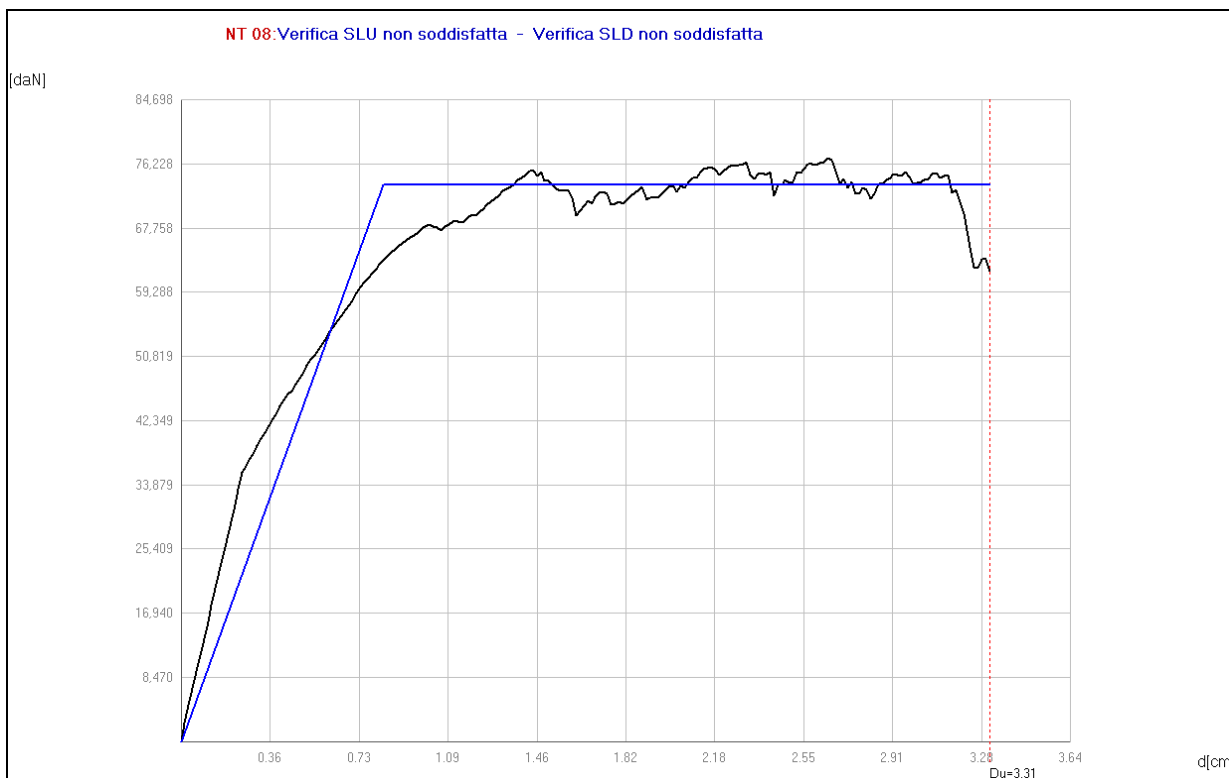


Figura 19. Curva di capacità per comb. più sfavorevole in X con distribuzione "1° modo" (N°15, IR minore)

Dalla lettura dei grafici di cui sopra, si desume che le variazioni minori del tagliante di base nelle curve di capacità sono legate in parte alla progressiva rottura delle fasce di piano prive di elementi resistenti a trazione, ed in parte alle crisi anticipate degli elementi in c.a., mentre le variazioni maggiori corrispondono alla crisi dei maschi murari.

Con riferimento invece alla presenza di cordoli, si ha che questa influenza fortemente il comportamento delle fasce di piano, in quanto per queste cambia il meccanismo resistente che diventa a puntone equivalente. Ne può derivare un significativo incremento del massimo tagliante sopportabile dall'edificio, al costo di una minore capacità di spostamento da questo offerta.

E' evidente che arrestarsi ad una fase lineare del processo di carico della struttura può condurre ad una valutazione errata della ripartizione dell'aliquota sismica, qualora in particolare la gran parte di questa fosse sostenuta dalle pareti.

Per quanto attiene la modalità di collasso del modello analizzato, che si ricorda aver convenzionalmente assunto in corrispondenza di un decadimento del tagliante massimo pari al 20%, si osserva per la direzione più sfavorevole un danneggiamento o collasso prematuro delle fasce di piano e degli elementi in c.a., a cui si accompagna la rottura a pressoflessione di uno dei maschi al piano primo per la direzione X sia per la distribuzione di forze uniforme, sia per la distribuzione di tipo pseudo-triangolare.

Come desumibile dalla disposizione in pianta dagli elementi, e per quanto già detto sul minore contributo di rigidezza e resistenza dei telai in c.a., si conferma la direzione X come la più sfavorevole, in quanto maggiormente carente di elementi resistenti in muratura.

5 COMPORTAMENTO LOCALE DEGLI ELEMENTI IN C.A.

A livello normativo, le indicazioni relative alle strutture miste non scendono nel dettaglio dell'utilizzo dell'analisi non lineare perché, più specificatamente, anche in presenza di crisi anticipate su elementi in c.a. non viene indicata la condizione per la quale si debba considerare la struttura non più capace di resistere nel suo complesso.

La logica riconosciuta ed accettata per lo studio in questione è quella di utilizzare il criterio indicato dalla normativa per gli edifici in muratura, e cioè di proseguire nell'analisi non lineare fino a quando non si verifica un decremento del taglio resistente alla base della struttura superiore al 20%.

In una struttura mista come quella oggetto del presente studio, i contributi principali al taglio globale resistente sono offerti dai setti in muratura, come confermato dalla lettura dei risultati locali.

La considerazione precedente comporta, a livello pratico, che eventuali crisi, anche di tipo fragile, degli elementi in c.a. passino in secondo piano rispetto a quelle dei setti in muratura, poiché la perdita del contributo conseguente alla loro crisi in termini resistenza globale risulta minimo e quindi difficilmente determinante per la stabilità complessiva della struttura.

Un parallelo risolto pratico dell'adozione, per le strutture miste, del criterio di esecuzione dell'analisi non lineare, è quindi quello dell'utilizzo dei risultati in fase di progetto per la definizione di interventi sul c.a. atti a scongiurare crisi locali che comunque potrebbero provocare effetti non desiderabili.

In particolare, nella struttura in esame (che, si ricorda, rappresenta un edificio esistente progettato con criteri di dimensionamento degli elementi resistenti in c.a. riferibili alle sole azioni verticali statiche), la presenza di telai in c.a. con sezioni ed armature limite rispetto a quelle oggi giorno minime richieste dalle norme, fa sì che anche per piccoli incrementi di sollecitazione dovuti alle combinazioni sismiche, si inneschino crisi anticipate negli elementi in c.a. rispetto a quella complessiva della struttura.

L'Indice di Rischio ottenuto come risultato è figlio pertanto dell'analisi globale che, pur determinato dall'evidente maggior contributo offerto dai setti in muratura nell'assorbire l'azione

sismica, evidenzia comunque la presenza di crisi su elementi in c.a. che vanno parallelamente considerate significative ai fini del giudizio sulla prestazione ultima dell'edificio. Pertanto in fase di programmazione degli interventi risulterà, tra le altre cose, prioritaria la correzione dell'innescò di queste crisi di tipo fragile.

6 CONCLUSIONI

L'analisi sismica statica non lineare (*pushover*) su una struttura mista esistente effettuata nel presente documento ha preso in considerazione tutte le risorse che l'organismo resistente è in grado di offrire; proprio per questo ha richiesto un livello di conoscenza degli elementi strutturali dettagliato, soprattutto con riferimento a quelli in calcestruzzo armato che sono stati messi in conto con il loro contributo in termini di rigidità e resistenza.

Particolare attenzione è stata rivolta all'indagine dei solai; a parte quelli delle due aule relative al primo ampliamento ed a quella ad esse adiacente sul lato est, tutti gli impalcati sono di tipo SAP, tecnica costruttiva della prima industrializzazione.

Nello specifico l'edificio presenta delle criticità che vanno affrontate e risolte, anticipatamente, poiché sulla loro eliminazione si fonda la valutazione di vulnerabilità sismica svolta; tra queste:

- una prima considerazione da fare riguarda i solai, per i quali l'assenza di armature di ripartizione trasversali all'orditura non garantisce il loro comportamento monolitico, e la non completa presenza di cordolature che li chiudano perimetralmente ad ogni livello, non garantisce l'efficacia del loro collegamento ai maschi murari;
- un secondo aspetto che incide sulla vulnerabilità della struttura è quello relativo alla modalità di realizzazione del solaio di copertura; in aggiunta alle problematiche indicate per i solai al punto precedente, per l'ultimo impalcato si devono fare riflessioni ulteriori relative alle modalità di ancoraggio alla struttura. Questo perché si rileva l'adozione di uno schema costruttivo a doppio impalcato di cui il primo perfettamente in piano senza svolgere funzioni portanti, configurandosi come un semplice controsoffitto; il secondo, all'estradosso della copertura, è invece in pendenza ed è quello chiamato a sostenere i carichi accidentali. La criticità di questo sistema costruttivo risiede nell'efficacia degli ancoraggi alle strutture principali;
- come terzo elemento di criticità si possono citare i pilastri in muratura realizzati nelle due aule del primo ampliamento in corrispondenza delle finestrate. Trattasi di elementi estremamente snelli che essenzialmente hanno la funzione di costituire un appoggio per l'architrave che delimita le aperture. Si ritiene necessario conferire la dovuta resistenza e stabilità a questi elementi in quanto incidono sul corretto comportamento della fascia di piano sopra l'architrave;
- il quarto ed ultimo punto di riflessione è relativo ai giunti sismici con i corpi adiacenti a quello di studio, che vanno ripristinati laddove è riscontrabile la loro chiusura o perdita di efficacia. La presente valutazione si basa sull'ipotesi di un loro corretto funzionamento che conferma la possibilità di studiare in modo indipendente il corpo strutturale originario.

L'approccio effettuato per l'analisi sismica, nel rispetto di quanto richiesto dal D.M. 14/01/08 (nel quale è indicato di condurre analisi non lineari se si vuole considerare il contributo resistente all'azione sismica di elementi di tecnologia differente da quella in muratura), ha confermato per la tipologia strutturale in esame l'importanza di un'analisi non lineare per stimare più efficacemente il comportamento reale della struttura (e conseguentemente un più aderente Indice di Rischio) e per comprenderne più correttamente l'evoluzione del comportamento (anche per finalità progettuali), anche e soprattutto nel confronto con un'analisi lineare.

Infine, è bene ricordare come tutte le considerazioni seguenti all'indagine della prestazione sismica del fabbricato non prescindano dalle complementari e necessarie considerazioni "statiche" sugli elementi strutturali che evidenzino carenze, in parte riscontrate in alcuni elementi in c.a.

7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Cattari S., Lagomarsino S. (2007). "Formulazione di elementi non lineari per l'analisi degli edifici esistenti a struttura mista muratura-c.a.", *XII Convegno "L'Ingegneria sismica in Italia"*, Pisa, Italia.
2. Nardone F., Verderame G. M., Prota A., Manfredi G. (2008). "Analisi comparativa su edifici misti c.a.-muratura", *RELUIS – "Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in c.a."*, Roma, Italia
3. Liberatore L., Decanini L.D., Benedetti S. (2007). "Le strutture miste muratura-cemento armato: uno stato dell'arte", *XII Convegno "L'Ingegneria sismica in Italia"*, Pisa, Italia.
4. 3Muri v. 4.0.220 (<http://www.stadata.com>)