

Valutazione della vulnerabilità sismica locale di edifici esistenti in muratura attraverso analisi cinematica dei meccanismi di collasso e curve di fragilità

Michele Fava, Marco Munari, Francesca da Porto, Claudio Modena
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Via F. Marzolo 9, 35131 Padova.

Keywords: vulnerabilità sismica, analisi cinematica, curva di capacità, curva di fragilità

ABSTRACT

La valutazione della risposta sismica di edifici esistenti in muratura ricopre una tematica di rilievo sempre maggiore nello sviluppo di strategie di prevenzione e riduzione del rischio sismico. Molteplici sono i fattori che influenzano la sicurezza strutturale dei singoli edifici e i loro effetti possono essere apprezzati attraverso l'adozione di differenti metodologie di analisi.

Una di queste è la valutazione cinematica dei meccanismi di collasso: insieme alla verifica globale risulta uno dei metodi indispensabili da adottare per ottenere un giudizio completo sul comportamento di un edificio esistente. Nonostante richieda la conoscenza di limitati parametri (geometrici e meccanici), consente di definire in modo appropriato la vulnerabilità locale.

A partire da queste considerazioni è stato definito un modello di valutazione in grado di stimare, a partire dalle curve di capacità dei singoli cinematismi considerati, la distribuzione di probabilità di danno in funzione dell'azione sismica attesa.

La procedura proposta è stata adottata con la finalità di costruire curve di fragilità, per differenti meccanismi di collasso e classi tipologiche, su un campione di casi reali appartenenti al patrimonio edilizio dell'Università di Padova. L'analisi dei risultati ottenuti potrà consentire, per differenti cinematismi e sulla base di parametri comuni tra classi edilizie, l'estensione del giudizio di vulnerabilità locale ad altri edifici esistenti in muratura.

1 INTRODUZIONE

L'elevata vulnerabilità sismica che caratterizza gran parte dell'edilizia storica ed esistente presente all'interno del territorio italiano evidenzia la necessità, sempre maggiore, di adottare strategie di prevenzione e riduzione del rischio sismico.

Lo sviluppo di analisi semplificate a livello urbano è il punto di partenza per l'individuazione di misure di prevenzione e permette di identificare problemi complessi che possono essere risolti solo attraverso indagini più dettagliate (Binda, et al. 2004).

La finalità del lavoro di analisi proposto è quella di individuare una metodologia speditiva che consenta, a partire da un numero di parametri limitato e di facile individuazione, di formulare un primo rapido giudizio di vulnerabilità e comportamento sismico locale di edifici esistenti in muratura. Queste valutazioni si contestualizzano più in generale nell'ambito di analisi di scenario attuabili su un contesto urbano

eterogeneo e caratterizzato da differenti classi edilizie. Importante risulta quindi, al fine di poter estendere i risultati ottenuti, l'individuazione degli elementi caratterizzanti i manufatti dell'intera popolazione di edifici.

Vengono presentate, a descrizione della resistenza sismica locale, le curve di capacità e di fragilità ottenute mediante l'elaborazione di analisi cinematiche di meccanismi locali di collasso su edifici in muratura. Le curve ottenute consentiranno una prima rapida stima della vulnerabilità locale a partire da alcuni parametri geometrici e strutturali di facile determinazione, consentendo di evidenziare in modo prioritario le tipologie che presentano maggiore vulnerabilità e, quindi, rischio sismico.

Le valutazioni hanno interessato un campione significativo di casi studio in muratura appartenenti al patrimonio edilizio dell'Università di Padova: sono stati individuati nel corso di una estesa fase conoscitiva che ha previsto un accurato rilievo geometrico e strutturale degli edifici, ed una analisi sia dal punto di vista storico-critico che evolutiva del costruito.

L'attenzione è stata posta prevalentemente su complessi storici, generalmente più vulnerabili essendo stati costruiti o avendo subito interventi successivi in assenza di normative antisismiche. Sono diversi, infatti, gli aspetti che influenzano il giudizio di vulnerabilità: lo stato di conoscenza al tempo della sua realizzazione che si rispecchia, nella costruzione, con la presenza di possibili difetti di impostazione o di degradi/modificazioni rispetto alla configurazione originaria.

2 VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ SISMICA LOCALE

L'approccio cinematico per la valutazione dei meccanismi di collasso rappresenta uno dei metodi di analisi più importanti nella definizione della capacità sismica locale di edifici esistenti in muratura. La corretta individuazione dei macroelementi e della loro possibile evoluzione come cinematismo, in presenza di eventi sismici, richiede una adeguata conoscenza delle caratteristiche strutturali e costruttive degli edifici. Per consentire di esprimere un idoneo giudizio sulla sicurezza, l'attenzione è stata posta sugli aspetti considerati più vulnerabili: le caratteristiche degli elementi verticali, la tipologia ed incidenza degli orizzontamenti (come la qualità ed efficacia del collegamento con le pareti) e la presenza di ulteriori elementi di contenimento (cordoli, catene e ammorsamenti murari). Questi ultimi risultano fortemente incidenti nella risposta sismica degli edifici, sia a livello globale che locale, rientrando frequentemente in interventi eseguiti nel corso dell'evoluzione e modernizzazione dell'edilizia storica: un esempio frequentemente rilevato è dato dalla sostituzione degli orizzontamenti lignei, leggeri e deformabili, con solai più rigidi e pesanti in laterocemento e l'inserimento di cordoli (armati e non) in breccia, in particolare nel campione di edifici analizzato, a destinazione prevalentemente scolastica. Tale aspetto evidenzia l'importanza della conoscenza, della definizione del dettaglio costruttivo e delle caratteristiche strutturali dei manufatti: al fine di ottenere una definizione realistica sul giudizio di vulnerabilità sono stati analizzati differenti manufatti rappresentativi delle tipologie di strutture in muratura presenti nel contesto del patrimonio edilizio dell'Università di Padova.

Il campione di edifici rilevati ha interessato un numero rilevante di manufatti restituendo un ampio database di informazioni utili alla

formulazione di una idonea stima sulla capacità e risposta sismica. Risultati complessivamente 47 edifici presentano una distribuzione sia in insediamento isolato (43%) che in aggregato (57%); per quanto riguarda l'epoca di costruzione oltre il 65% degli edifici risulta costruito prima del 1919, mentre risultano con percentuali inferiori quelli appartenenti al periodo 1919-45 (26%) e successivi al secondo dopoguerra (5%).

Gli edifici si differenziano per uno sviluppo su 1 (7%), 2 (17%), 3 (46%) e 4 (30%) piani, uno spessore medio delle pareti di 2 (in media 19%), 3 (61%) e 4 (21%) teste, una prevalenza (70%) di orizzontamenti pesanti (laterocemento/soletta in c.a.) nei piani intermedi e leggeri (legno) in copertura.

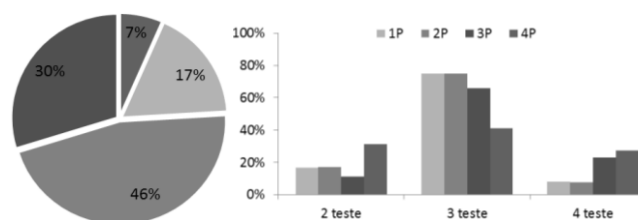


Figura 1: caratteristiche del campione di edifici rilevati per numero di piani e spessore delle murature.

2.1 Definizione dei parametri

Nella definizione delle tipologie dei macroelementi e dei cinematismi, sono stati considerati come parametri (e variabili) determinanti: il numero di piani (variabile da 1 a 4 piani fuori terra) e la diversa altezza di interpiano, lo spessore e la tipologia degli elementi verticali (da un minimo di muratura a due teste, 25 cm, ad un massimo di muratura a quattro teste, 63 cm circa), la tipologia di orizzontamenti, sia intermedi che di copertura, e la presenza o meno di elementi di contenimento efficaci (cordoli in breccia o su tutto lo spessore murario, ammorsamenti trasversali).

Tabella 1: parametri e variabili identificati per le classi edilizie rilevate.

CLASSI EDILIZIE IDENTIFICATE

parametri	variabili
Numero di piani	1 – 2 – 3 – 4 piani variazione altezza interpiano
Tipologia elementi verticali	mattoni pieni e malta di calce
Spessore elementi verticali	2 (25-37.5cm) teste 3 (37.5-50 cm) teste 4 (50-62.5 cm) teste
Tipologia elementi orizzontali	solaio in laterocemento/soletta c.a. solaio ligneo copertura in laterocemento

Presenza elementi di contenimento	cordolo in breccia/ a tutto spessore ammorsamento trasversale efficace
--	---

Per quanto riguarda gli orizzontamenti sono state individuate due differenti tipologie ricorrenti: solaio in legno a travetti affiancati e tavolato doppio (leggero, deformabile e solitamente scarsamente ammorsato alla muratura), e solaio in laterocemento/soletta in c.a (pesante e rigido). Tutti gli elementi verticali considerati sono costituiti da muratura in mattoni pieni e malta di calce.

Definiti i parametri e le variabili (Tabella 1) sono stati valutati i cinematismi di collasso che si possono manifestare, in occasione di un evento sismico, considerando sia le vulnerabilità costruttive spesso presenti negli edifici storici in muratura (non adeguato ammorsamento tra elementi orizzontali e verticali) che le caratteristiche strutturali in grado di migliorarne il comportamento sismico (cordoli efficaci o elementi che garantiscono un buon collegamento e comportamento scatolare). Vista l'elevata vulnerabilità che rappresentano, sono stati valutati i meccanismi di "primo modo" (fuori piano): secondo quanto indicato nell'Allegato C8A.4 delle Istruzioni per l'applicazione delle NTC 2008 (NTC08) sono stati considerati i cinematismi di porzioni di muratura integre che arrivano al collasso a seguito della formazione di cerniere cilindriche, e successiva rotazione attorno ad esse.

Il moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0 che porta all'attivazione del meccanismo è stato ottenuto applicando il Principio dei Lavori Virtuali secondo l'equazione seguente:

$$\alpha_0 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} = 0 \quad (1)$$

Dove P_i sono le forze verticali (pesi applicati propri e portati) e δ_i gli spostamenti virtuali verticali (y) o orizzontali (x) del punto di applicazione delle forze verticali. L'azione della forza sismica agente è stata considerata ortogonale al piano della parete; è stato inoltre considerato l'arretramento della cerniera cilindrica (Giuffrè e Carrocci, 1999) su cui si sviluppa il cinematismo di rotazione permettendo di tenere in considerazione la possibile riduzione di capacità a seguito della concentrazione degli sforzi e conseguente parzializzazione della sezione di base.

2.2 Modelli cinematici considerati

L'estesa campagna di rilievo condotta direttamente sui casi reali ha permesso di identificare la molteplicità delle classi edilizie presenti.

I modelli cinematici analizzati e compatibili con le condizioni di vincolo presenti nel campione di edifici di riferimento si configurano in differenti schematizzazioni:

- **ribaltamento semplice (RS)** di parete monolitica semplicemente appoggiata al muro ortogonale con diverse altimetrie da 1 a 4 piani. Questo cinematismo rappresenta il caso più vulnerabile tra quelli valutati non considerando alcuna forza di contenimento sia in corrispondenza delle connessioni verticali che degli orizzontamenti, e tenendo solamente in considerazione come forze in gioco la presenza dei pesi propri delle pareti e dei carichi portati (orizzontamenti intermedi e copertura);
- **flessione semplice (FS)** di parete con sviluppo su due piani e rottura localizzata in corrispondenza dell'orizzontamento intermedio.

Tabella 2: meccanismi di ribaltamento e flessione semplice considerati.

codice	numero piani	orizzontamenti
RS_1/2/3p	1 - 2 - 3	legno laterocemento/soletta
RS_4p	4	laterocemento/soletta
FS_2p	2	laterocemento/soletta

Tali cinematismi, pur fornendo una prima importante stima sul possibile scenario di danno, possono rappresentare una verifica in configurazioni fortemente a favore di sicurezza non tenendo in considerazione dell'effetto di forze di contenimento efficace sia verticale (per l'adeguato ammorsamento tra le pareti) che orizzontale.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno estendere le analisi valutando ulteriori schematizzazioni che possono rappresentare una configurazione di vincolo più realistica per gli edifici considerati:

- ribaltamento con **formazione di cuneo (RCu)** sulla parete di controvento di parete monolitica per configurazioni ad 1 piano (Aorio, 1999);
- ribaltamento con **cordolo a tutto spessore (RCo)** per configurazioni ad 1 piano (Giuffrè e Carrocci, 1999),
- ribaltamento con contenimento dovuto ad **ammorsamento trasversale (RAm)** considerando la resistenza statica della parete a

tessitura regolare in presenza di attrito (de Buhan e de Felice, et al. 1997);

- ribaltamento con **cordolo in breccia (RCoB)** per configurazioni da 1 a 4 piani.

Per i meccanismi che considerano la presenza di cordolo in breccia, situazione riscontrata frequentemente nel corso dell'analisi conoscitiva dei manufatti, è stato considerato come coefficiente di compenetrazione del cordolo 0.5 (1 per quello a tutto spessore) e di attrito solaio/cordolo-muratura (μ_i) 0.4. Il valore della forza di contenimento viene valutato moltiplicando il coefficiente μ_i per la sommatoria dei carichi superiori.

Nell'analisi dei meccanismi che considerano la presenza di elementi di contrasto (cordolo in breccia o ammorsamento) su più livelli è stata presa in considerazione, nell'evoluzione del cinematismo, la graduale mancanza di efficacia delle forze di contenimento una volta superato lo spostamento di appoggio di piano.

Tabella 3: meccanismi di ribaltamento con contenimento considerati.

codice	numero piani	orizzontamenti
RCu_1p	1 con cuneo	laterocemento/soletta
RCo_1p	1 con cordolo su tutto spessore	laterocemento/soletta
RCoB_1/2/3/4p	1 - 2 - 3 - 4 con cordolo in breccia	laterocemento/soletta
RAm_1/2/3/4p	1 - 2 - 3 - 4 con ammorsamento	laterocemento/soletta

Le analisi svolte per i cinematismi riportati in Tabella 2 e Tabella 3, secondo i differenti parametri e variabili, consentiranno la definizione delle curve di capacità e di fragilità.

3 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI CAPACITÀ

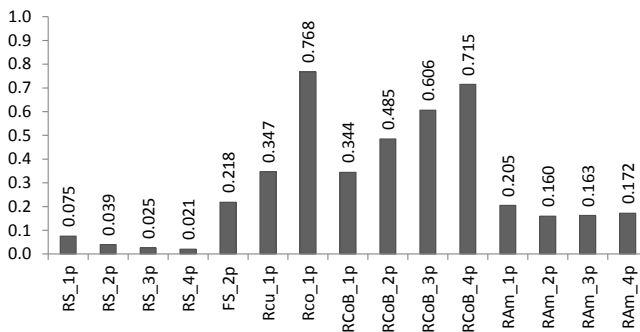


Figura 2: valore medio dei coefficienti di attivazione dei meccanismi α_0 analizzati.

Dallo studio dell'evoluzione dei cinematismi si evidenzia come il valore del coefficiente di

attivazione α_0 risulti minore per i cinematismi che non presentano forze di contenimento (ribaltamento semplice) e maggiore per quello di flessione di strisce verticali di muratura; in presenza di elementi di contenimento (se efficaci) risultano maggiormente vulnerabili i cinematismi che tengono in considerazione la sola presenza dell'ammorsamento trasversale rispetto a quelli con presenza di cordolo in breccia.

Evidente inoltre, in particolare per i cinematismi con forze di contenimento, la variazione del coefficiente α_0 al variare del numero di piani (decrescente da 4 piani a 1 piano).

Il grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra i valori medi dei coefficienti di attivazione per i meccanismi analizzati unificando nel medesimo cinematismo le tipologie murarie di diverso spessore; tale parametro, a differenza di quanto emerso con la costruzione delle curve di capacità e fragilità, non risulta particolarmente influente nella definizione di α_0 .

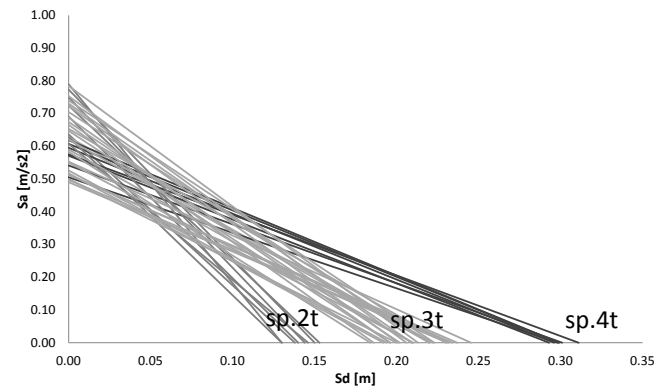


Figura 3: curve di capacità per i meccanismi di ribaltamento semplice di una parete ad un piano, orizzontamento pesante e spessore della parete variabile (2t - 3t - 4t)

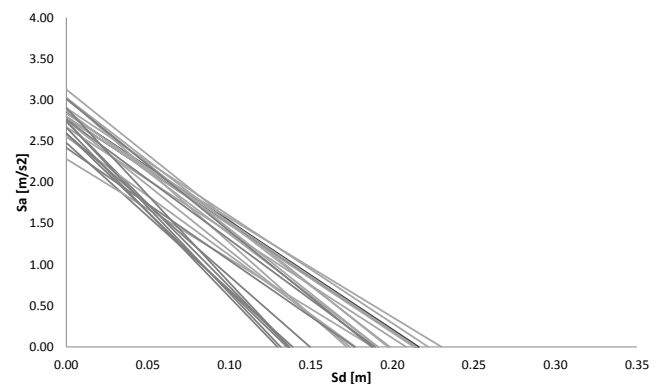


Figura 4: curve di capacità per i meccanismi di ribaltamento di una parete ad un piano, orizzontamento pesante, contenimento di cordolo in breccia e spessore variabile.

Per ognuno dei cinematismi individuati sono state svolte le analisi cinematiche lineari (capacità

sismica in termine di resistenza) e non lineari (in termine di spostamento): attraverso la determinazione dell'accelerazione spettrale a_0^* di attivazione del cinematiso e della sua evoluzione fino all'annullamento della capacità di sopportare azioni orizzontali, è stato possibile creare le diverse curve di capacità espresse in termini di accelerazione e spostamento spettrale; la capacità di spostamento ultimo dell'elemento valutato è rappresentato da d_u^* (fissato al 40 % di d_0^*).

Dal confronto tra le diverse curve di capacità ottenute è evidente come la variabile legata allo spessore della muratura, oltre al numero di piani, risulta maggiormente influente nei cinematismi di ribaltamento (Figura 3) e flessione semplice.

Diversamente, per i cinematismi che considerano forze di contenimento come per esempio il cordolo in breccia, il differente spessore murario non risulta un parametro particolarmente influente ai fini della capacità (Figura 4); in questo caso il coefficiente di compenetrazione del cordolo è considerato costante e pari a 0.5 per tutti i piani.

Una ulteriore variabile di confronto è l'altezza di interpiano delle pareti: nonostante l'ampia variabilità dei casi rilevati, le analisi hanno evidenziato andamenti confrontabili e quindi unificabili nella medesima tipologia.

A partire dalle valutazioni sulle analisi cinematiche e sui parametri/variabili risultati più influenti nella capacità dei macroelementi, sono state quindi ridefinite le tipologie di cinematismi, differenziate o semplificate rispetto a quelle inizialmente considerate (Tabella 2 e Tabella 3) ed adottate per la costruzione delle curve di fragilità:

- **ribaltamento (RS) e flessione (FS) semplice** differenziando le curve per numero di piani (da 1 a 4) e per lo spessore delle pareti (da due a quattro teste) in presenza di orizzontamenti pesanti;
- **ribaltamento semplice (RS)** differenziando le curve per numero di piani in presenza di orizzontamenti leggeri;
- **ribaltamento con cordolo in breccia (RCoB)** di contenimento differenziando le curve per numero di piani;
- **ribaltamento con formazione di cuneo (Rcu) o cordolo a tutto spessore (RCo)** per un piano;
- **ribaltamento con ammorsamento trasversale (Ram)** unificando le curve per numero di piani.

4 CURVA DI FRAGILITÀ

4.1 Livelli di danno

Una volta ottenute le curve di capacità dei differenti cinematismi, il primo passo per la valutazione della vulnerabilità sismica richiede la definizione di prefissati indici di danno strutturale; il metodo analitico adottato per la costruzione delle curve di fragilità segue la procedura proposta da Shinozuka et al. (2000) per analisi statiche non lineari.

Per le analisi cinematiche condotte sono stati valutati 4 livelli di danno: definiti in termini di spostamento a partire da quello spettrale d_0^* del sistema equivalente a 1 g.d.l (Lagomarsino et al. 2012), individuano le fasi più importanti che descrivono l'evoluzione, e quindi la perdita di equilibrio, del meccanismo secondo intervalli variabili da un danno lieve fino al collasso (Tabella 4).

Tabella 4: livelli di danno considerati.

<i>Livello di danno</i>	<i>spostamento</i>	<i>IM</i>
DL1 <i>lieve</i>	$0.70 d_s^*$	
DL2 <i>moderato</i>	$0.40 d_u^*$	d_D
DL3 <i>esteso</i>	$0.25 d_0^*$	d_{DLi}
DL4 <i>completo</i>	$0.40 d_0^*$	

Il livello di danno ultimo DL4 che pregiudica la sicurezza della struttura viene fissato, in accordo con le NTC08, in corrispondenza dello spostamento spettrale ultimo d_u^* ; il livello di danno DL2 è fissato per lo spostamento d_s^* (pari al 40% di d_u^*) in corrispondenza a cui viene definito il periodo secante T_s . Sono inoltre valutati due ulteriori livelli di danno intermedi: DL1 in corrispondenza dello spostamento $0.7d_s^*$ e DL3 in corrispondenza dello spostamento $0.25 d_0^*$.

4.2 Input sismico

Il passo successivo ha previsto la definizione dell'input sismico, parametro di fondamentale rilevanza vista l'incertezza e variabilità che rappresenta.

Nell'approccio adottato sono state considerate 20 differenti PGA definite secondo le indicazioni fornite dalle NTC08 al variare del periodo di ritorno T_R : le accelerazioni ricoprono un intervallo variabile da 0.030g (30 anni) a 0.150g (2475 anni) con passo 0.005g. Il valore di riferimento da normativa per le verifiche allo SLV per la città di Padova è 0.099g con T_R 712 anni (V_N 50 anni e c_U III). Per quanto riguarda la caratterizzazione del sottosuolo, in base alle

informazioni raccolte, è stata considerata la categoria C.

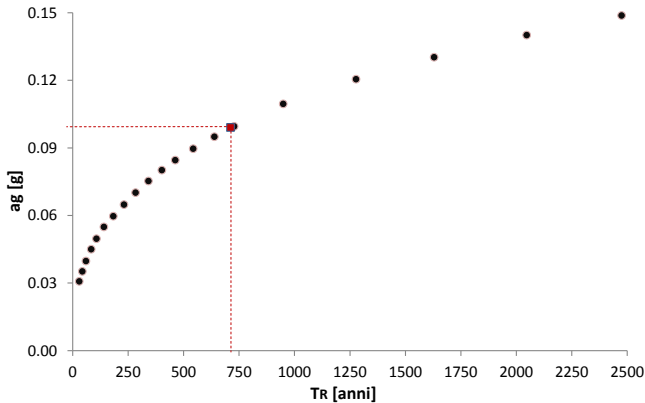


Figura 5: domanda sismica considerata: da 0.030g a 0.150 g con passo 0.005g e indicazione del riferimento normativo allo SLV.

Tabella 5: valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i diversi SL con V_N 50 anni e C_U III.

	T_R [anni]	a_g [g]	F_0	T_C^* [s]
SLO	45	0.036	2.547	0.242
SLD	75	0.043	2.534	0.279
SLV	712	0.099	2.597	0.342
SLC	1462	0.126	2.594	0.355

4.3 Costruzione della curva

Sono state condotte le diverse analisi utili alla definizione del valore di danno al variare dell'input sismico (PGA) e livello di danno (DL_i): il parametro di riferimento, rappresentato dall'indice IM, è definito dal rapporto tra lo spostamento dovuto alla domanda sismica d_D e lo spostamento d_{DL_i} dovuto al DL_i considerato.

Tale indice, correlato con la relativa domanda sismica $IM(PGA)$, consente di descrivere la domanda media, nel piano bilogaritmico intensità sismica – danno, attraverso la seguente equazione:

$$\ln(S_d) = \lambda = A + B \cdot \ln(IM) \quad (2)$$

I coefficienti A e B, così come la dispersione ε della nuvola di punti presenti nel grafico (varianza), sono stati calcolati attraverso analisi di regressione svolte sull'intero insieme di dati per ognuno dei quattro diversi livelli di danno. Tali coefficienti hanno permesso la costruzione di curve di fragilità mediante una distribuzione cumulata lognormale descritta dal seguente integrale:

$$f_D(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon d}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - \lambda}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (3)$$

La probabilità di eccedere il livello di danno prefissato PL_i per un determinato input sismico è descritta da:

$$P_{f,DL}(a) = [D \geq d_{DL_i} | a] \quad (4)$$

5 ANALISI DELLE CURVE DI FRAGILITÀ OTTENUTE

Le curve ottenute descrivono la probabilità di eccedenza per il prefissato livello di danno, in funzione della variabile domanda sismica (PGA), consentendo la formulazione di una prima stima sul possibile scenario di danno. Il confronto tra le differenti curve per tipologie di meccanismo permetterà di formulare un giudizio sulla risposta sismica locale del campione analizzato secondo configurazioni che influenzano positivamente (parete con contenimento) e negativamente (parete libera) la vulnerabilità, e con riferimento alla pericolosità indicata dalle NTC08 per la città di Padova.

5.1 Ribaltamento semplice e flessione

La prima tipologia analizzata riguarda i meccanismi di ribaltamento semplice: le configurazioni analizzate si differenziano per numero di piani, spessore murario e tipologia di orizzontamento.

Tabella 6: scenari di danno per i cinematismi di ribaltamento e flessione semplice secondo lo SLV definito dalle NTC08

	DL1	DL2	DL3	DL4
RS_1p A(p)	0%	0%	13%	87%
RS_2p A(p)	0%	0%	8%	92%
RS_3p A(p)	0%	0%	5%	95%
RS_1p B(p)	0%	7%	52%	41%
RS_2p B(p)	0%	0%	18%	82%
RS_3p B(p)	0%	5%	33%	61%
RS_4p B(p)	10%	23%	29%	31%
RS_1p C(p)	0%	11%	65%	24%
RS_2p C(p)	0%	1%	43%	56%
RS_3p C(p)	0%	7%	48%	45%
RS_4p C(p)	2%	15%	42%	41%
RS_1p (l)	0%	11%	48%	41%
RS_2p (l)	0%	1%	31%	68%
RS_3p (l)	0%	0%	22%	78%
FS_2p A	1%	30%	64%	5%
FS_2p B	24%	48%	20%	2%
FS_2p C	45%	47%	2%	0%

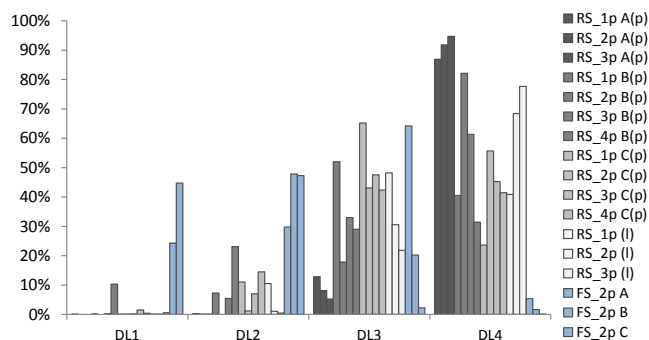


Figura 6: scenario di danno per i cinematismi di ribaltamento (RS) e flessione semplice (FS) differenziati per numero di piani (1-2-3-4p), spessore della parete (A una testa, B due teste e C tre teste) e tipologia di orizzontamento (p pesante e l leggero)

Lo scenario di danno evidenzia come la configurazione di pareti con orizzontamenti leggeri risulta mediamente la più gravosa con probabilità di eccedenza elevate per livelli di danno esteso (DL3) e completo (DL4), e crescenti all'aumentare del numero di piani (in particolare per DL4); le curve, inoltre, presentando tra loro andamenti confrontabili non sono state differenziate al variare dello spessore della parete.

Analoghe osservazioni, ma con probabilità di eccedenza inferiori (tranne per la parete ad un solo piano), per quanto riguarda le pareti con orizzontamenti pesanti; in questo caso, invece, l'influenza dello spessore della parete si evidenzia con l'aumento della vulnerabilità e probabilità di danno al diminuire dello spessore.

Anche per quanto riguarda il meccanismo a flessione evidente è la maggiore vulnerabilità per le pareti con minor spessore rispetto alle restanti dove la probabilità di eccedenza si attesta su percentuali maggiori nei primi due intervalli di danno DL1 e DL2; tutti e tre gli spessori murari, a differenza dei cinematismi a ribaltamento semplice, non evidenziano percentuali significative per il livello di danno DL4.

Gli scenari di danno ottenuti risultano in linea con quanto evidenziato dai valori dei coefficienti di attivazione dei cinematismi.

5.2 Ribaltamento con forze di contenimento

La seconda configurazione analizzata ha considerato la presenza di forze di contenimento efficaci sia a livello degli orizzontamenti che dei setti trasversali. Come precedentemente osservato le curve di fragilità considerano come unico parametro di variazione il numero di piani e la tipologia di contenimento; il parametro legato allo spessore della muratura non è risultato influente ai fini del giudizio di vulnerabilità. Si ricorda come le analisi di questi meccanismi sono

state effettuate considerando la possibile perdita di efficacia delle forze di contenimento ai vari livelli all'evolversi del cinematismo.

Dallo scenario di danno risultante si osservano, per tutte le configurazioni analizzate, basse percentuali di probabilità di eccedenza con danno concentrato solamente nei primi due intervalli lieve (DL1) e moderato (DL2).

Tra i meccanismi che considerano il contenimento a livello degli orizzontamenti per la presenza di cordoli in breccia, l'unico a presentare un livello di danno significativo anche nell'intervallo di danno esteso (DL3) risulta quello ad un solo piano; i restanti, invece, presentano per gli intervalli DL3 e DL4 probabilità nulle. Nella configurazione con cordolo a tutto spessore della parete il livello di danno riscontrato si concentra nel primo intervallo DL1.

Infine, il contenimento offerto da un cuneo sulla parete di controvento, risulta la configurazione meno vulnerabile non evidenziando livelli di danno, per i vari intervalli, sul limite di SLV richiesto dalla normativa.

Tabella 7: scenario di danno per i cinematismi di ribaltamento con contenimento secondo lo SLV definito dalle NTC08

	DL1	DL2	DL3	DL4
RCoB_1p	10%	41%	39%	8%
RCoB_2p	25%	9%	1%	0%
RCoB_3p	3%	0%	0%	0%
RCoB_4p	0%	0%	0%	0%
Ram_1p	40%	16%	1%	0%
Ram_2p	43%	16%	1%	0%
Ram_3p	42%	13%	0%	0%
Ram_4p	39%	10%	0%	0%
RCo_1p	39%	9%	0%	0%
Rcu_1p	0%	0%	0%	0%

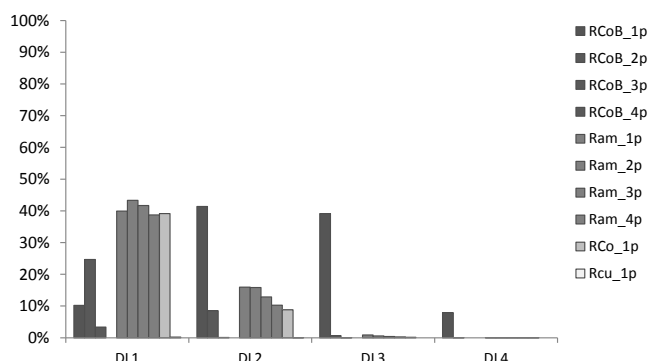


Figura 7: scenario di danno per i cinematismi di ribaltamento con contenimento differenziati per numero di piani (1-2-3-4p) e tipologia di contenimento (CoB cordolo in breccia, am ammorsamento trasversale, Co cordolo a tutto spessore e cu cuneo trasversale).

6 CONCLUSIONI

L'utilizzo di analisi cinematiche di meccanismi locali di collasso rappresenta un importante strumento per la formulazione del giudizio sulla sicurezza sismica locale di edifici storici in muratura. Tali analisi, attraverso le curve di capacità opportunamente elaborate, possono descrivere scenari di rischio secondo differenti livelli di danno prestabiliti (lieve - moderato - esteso - completo).

La valutazione su più configurazioni strutturali permette di analizzare le molteplici casistiche presenti: vista l'incertezza che spesso contraddistingue le analisi sui manufatti esistenti, i parametri individuati per la definizione delle curve sono stati valutati secondo la loro facile reperibilità in situ ed incidenza sulla risposta sismica.

Questo per consentire, in una seconda fase, una immediata estensione del giudizio di vulnerabilità su un ampio patrimonio edilizio a partire dalle valutazioni condotte nei manufatti di riferimento.

Questa procedura è stata adottata per un numero consistente di edifici storici in muratura appartenenti al patrimonio edilizio dell'Università di Padova, che si sono rivelati rappresentativi dei manufatti dell'intera popolazione di edifici.

Le curve proposte (Allegato 0) considerano differenti meccanismi locali di collasso di primo modo (fuori piano) al variare di configurazioni sia per aspetti geometrici (numero di piani, spessore delle pareti) che strutturali (tipologia orizzontamenti, efficacia/presenza o meno di contenimento).

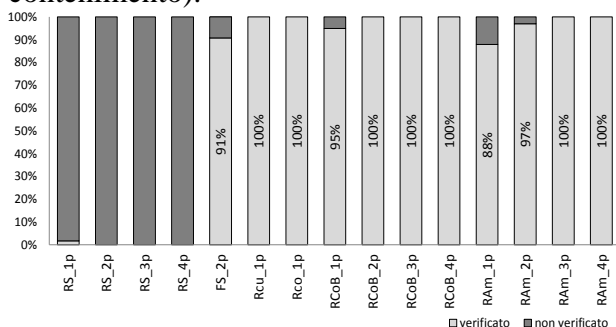


Figura 8: verifiche di sicurezza SLU lineari

Gli scenari di danno emersi dalle curve di fragilità ottenute dalle analisi cinematiche trovano conferma nell'esito delle verifiche di sicurezza, lineari e non-lineari, allo SLV. Anche in questo caso la maggiore vulnerabilità è riscontrata per i meccanismi di ribaltamento semplice: in tutti i casi presi in considerazione le

percentuali di non soddisfacimento delle verifiche risultano molto elevate sia in campo lineare che non-lineare.

Per i restanti cinematismi, di flessione semplice o considerando forze di contenimento efficaci, le verifiche risultano nella quasi totalità (> 90%) soddisfatte.

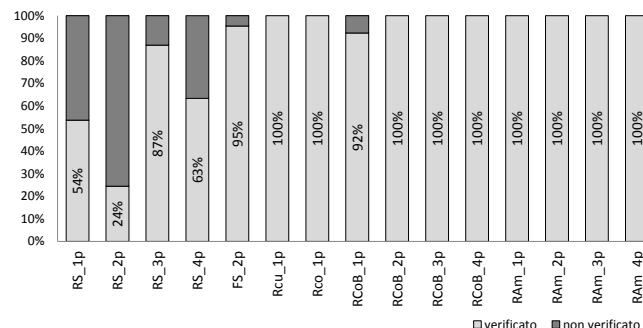


Figura 9: verifiche di sicurezza SLU non-lineari

Il confronto dei risultati tra configurazioni differenti ha consentito inoltre di evidenziare, sia in termini di spostamento che di attivazione del cinematismo, l'importante influenza (se efficaci) delle forze di contenimento al manifestarsi ed evolversi del meccanismo di danno. In questo caso sono state inoltre considerate le possibili limitazioni della capacità di contenimento a seguito di incompatibilità locali.

Tali analisi confermano, per quanto riguarda la valutazione della sicurezza strutturale di una costruzione esistente, il fondamentale ruolo della conoscenza sul manufatto: sia per la definizione della reale configurazione strutturale presente che per la valutazione dell'efficacia degli elementi di contenimento a livello orizzontale e verticali.

Per questo, il percorso adottato nella procedura proposta è stato condotto considerando i diversi scenari possibili (in termini di vulnerabilità) secondo le tipologie e le informazioni raccolte nel campione di edifici analizzato. I risultati ottenuti potranno pertanto essere adottati come riferimento, per l'estensione del giudizio di vulnerabilità (locale), sull'intero patrimonio edilizio considerato e su altri edifici che presentano caratteristiche strutturali simili.

REFERENCES

- Avorio A., Borri A., Cangi G., Riparazione e consolidamento degli edifici in muratura, 1999.
 Gurrieri F. (a cura di), Regione dell'Umbria - Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici, DeI tipografia del Genio Civile, Roma.

- Bernardini A. (a cura di), 2000. *La vulnerabilità degli edifici: Valutazione a scala nazionale della vulnerabilità degli edifici ordinari*. C.N.R. – G.N.D.T., Roma.
- Binda L., 2004. The importance of the investigation for the diagnosis of historic building: application at different scale (centres and single buildings). *IV International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, Padova.
- Buhan P., de Felice G., 1997. A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry, *Journal for the Mechanics and Physics of Solids*, 45, 7, pp.1085-1104.
- Cattari S., Curti E., Giovinazzi S., Lagomarsino S., Parodi S., Penna A., 2004. Un modello meccanico per l'analisi di vulnerabilità del costruito in muratura a scala urbana. *XI Congresso Nazionale "L'ingegneria sismica in Italia"*, Genova
- Cattari S., Lagomarsino S., D'Ayala D., Novelli V., Bosiljkov V., 2012. PERPETUATE-Proposal n° 244229. *Derivable 17- Correlation of performance levels and damage states for types of buildings*.
- Cattari S., Lagomarsino S., 2012. PERPETUATE-Proposal n° 244229, 2012. *Derivable 35-Definition of seismic safety verification procedures for historical buildings*.
- Circolare n. 617 02/02/2009. Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni, di cui al DM 14/01/2008.
- Curti E., Lagomarsino S., Resemini S., Giovinazzi S., 2007. Analisi non lineari di meccanismi locali di danno in strutture monumentali. *XII Congresso Nazionale "L'ingegneria sismica in Italia"*, Pisa.
- Decreto Ministeriale 14/01/2008. Norme Tecniche per le Costruzioni.
- Fava M., da Porto F., C. Modena, D'Este E., Ravazzolo E., Ricerca di una metodologia per la valutazione della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio dell'Università degli Studi di Padova. *XV Congresso Nazionale "L'ingegneria sismica in Italia"*, Padova.
- Giuffrè A., Carrocci C., 1999. *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*, Laterza, Bari
- Munari M., 2011. Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura. *Tesi di dottorato di ricerca*, Università degli Studi di Padova
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H., Kim, S., (2000). Nonlinear static procedure for fragility curve development. *Journal of mechanism*, 1287-1295.

ALLEGATO A: CURVE DI FRAGILITÀ

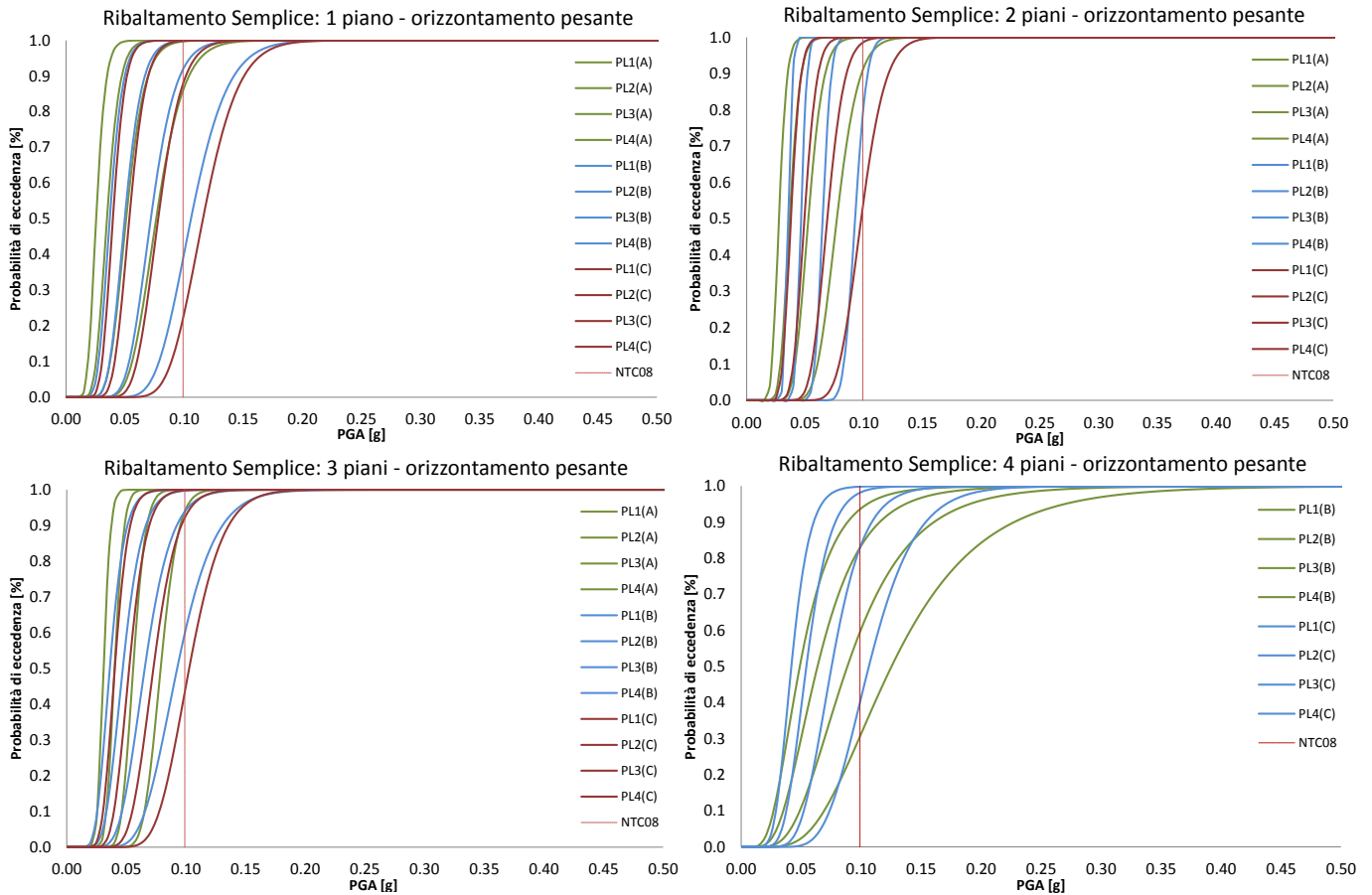


Figure 1: curve di fragilità per cinematismo di **ribaltamento semplice**: configurazione con orizzontamenti pesanti (laterocemento/soletta c.a.) e variazione del numero di piani e spessore delle pareti (A: due, B: tre, C: quattro teste).

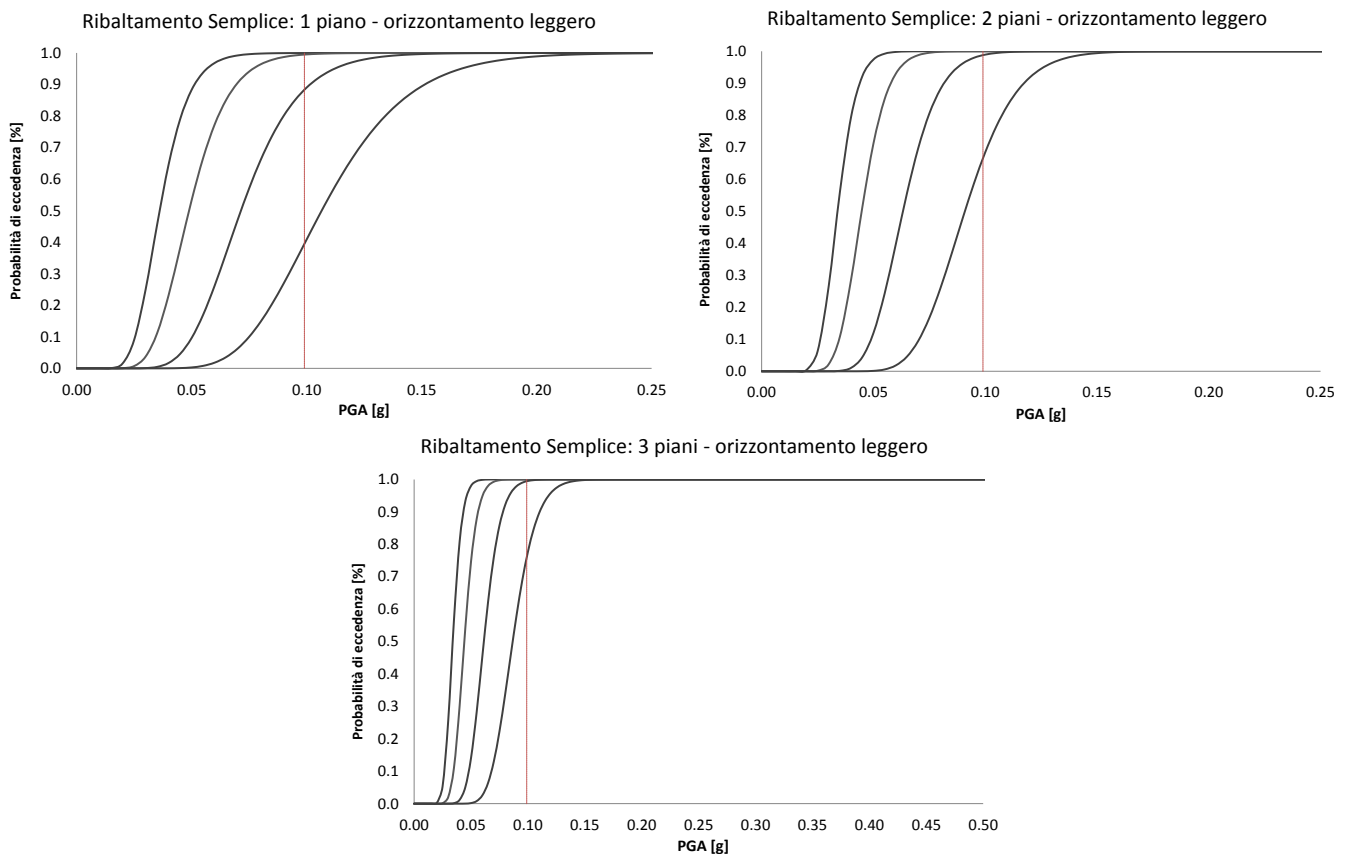


Figure 2: curve di fragilità per cinematismo di **ribaltamento semplice**: configurazione con orizzontamento leggero (legno) e variazione del numero di piani.

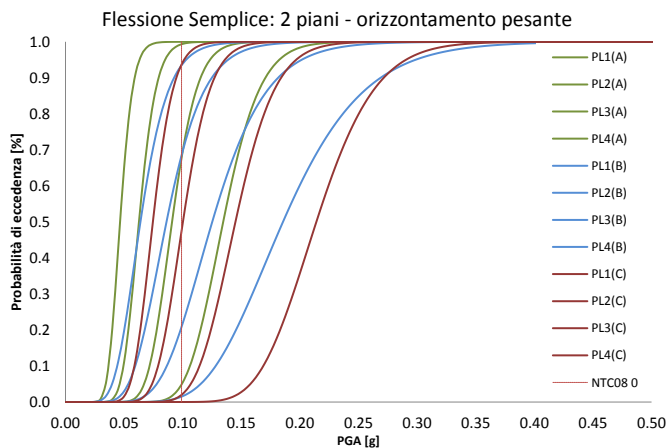


Figura 3: Curve di fragilità per cinematiso di **flessione semplice**: configurazione con orizzontamenti pesanti e variazione dello spessore delle pareti

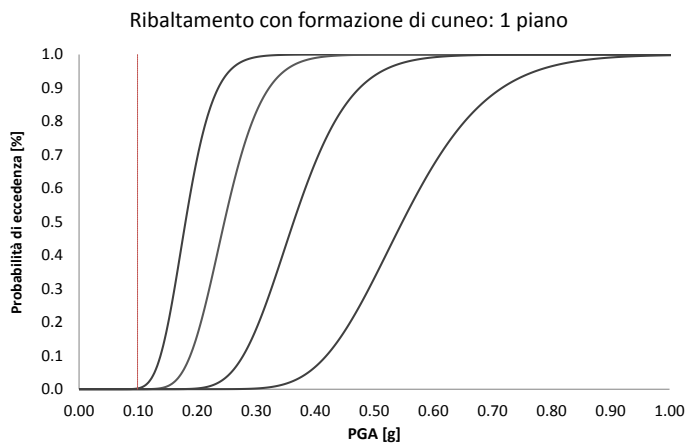


Figura 4: Curve di fragilità per cinematiso di ribaltamento **con formazione di cuneo per un piano**.

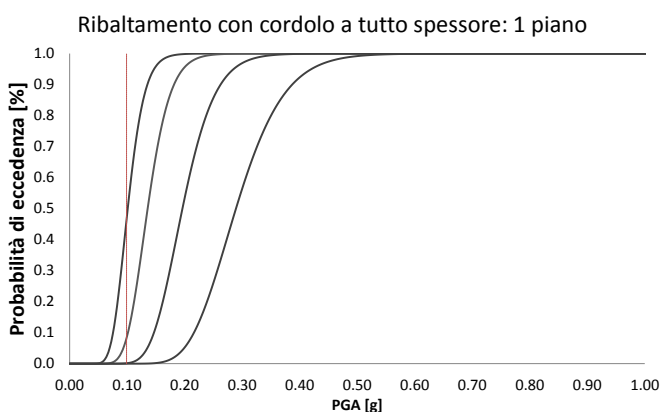


Figura 5: Curve di fragilità per cinematiso di ribaltamento **con cordolo a tutto spessore** per un piano.

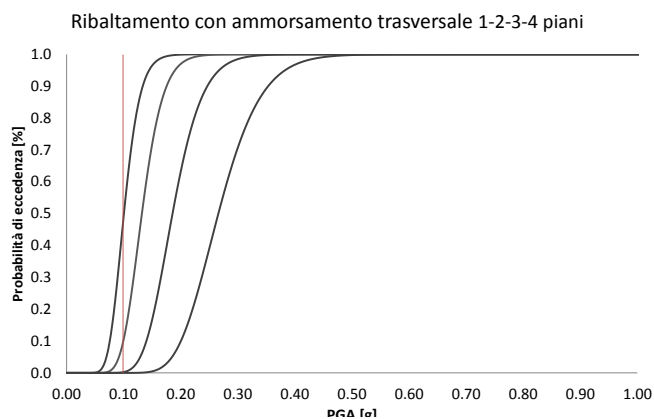


Figura 6: Curve di fragilità per cinematiso di ribaltamento **con ammassamento trasversale**.

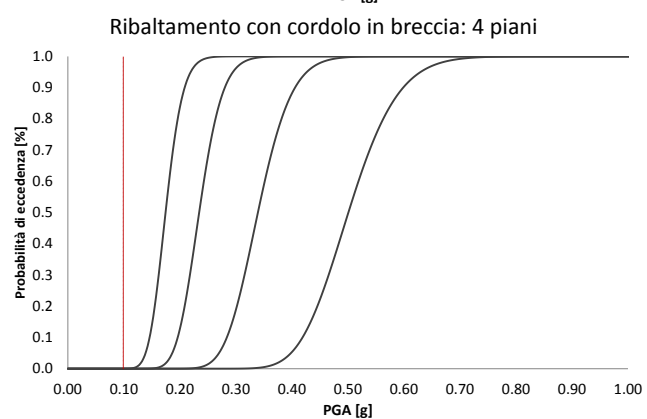
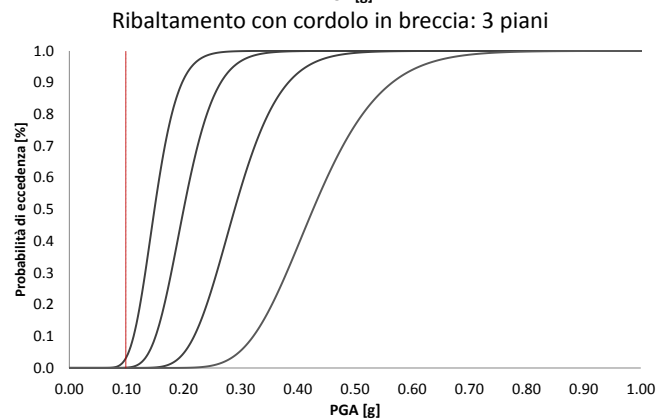
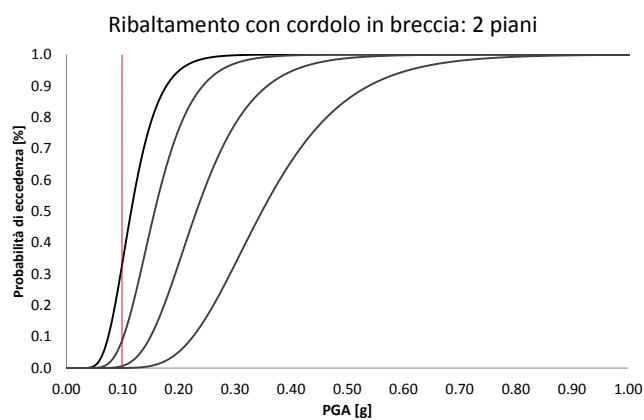
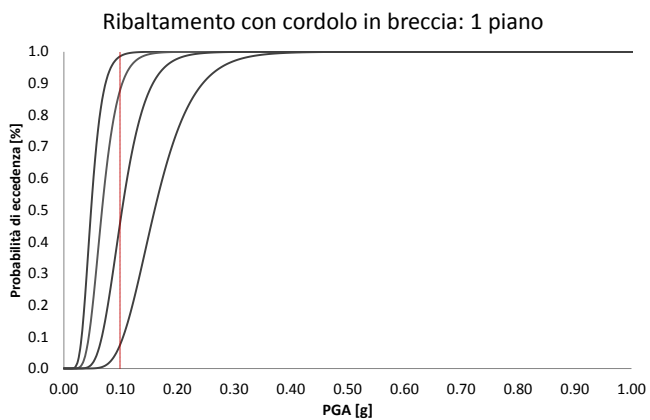


Figure 7: curve di fragilità per cinematiso di **ribaltamento con cordolo in breccia**: configurazione con variazione dello spessore del numero di piani.