

Vulnerabilità sismica di un edificio prefabbricato: confronto fra metodi di calcolo e classificazione sismica secondo il DM 28/02/2017

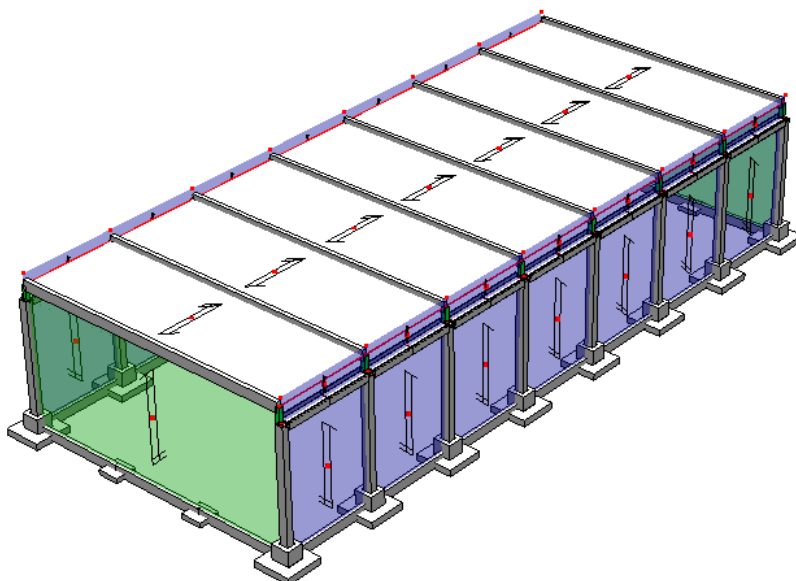
La recente pubblicazione delle “Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni” ha richiamato l’attenzione su uno dei temi attualmente più ricorrenti nel settore dell’ingegneria civile, ovvero la valutazione del grado di vulnerabilità delle strutture esistenti.

L’intento del presente articolo è quello di mettere in luce i diversi risultati che si possono ottenere affrontando lo studio di vulnerabilità di una struttura con due metodi differenti, entrambi ammessi dalla vigente normativa: l’analisi elastica lineare con fattore di comportamento q e l’analisi statica non lineare (analisi di pushover).

Come fabbricato oggetto di verifica si è scelto una palestra, con struttura portante in c.a. prefabbricato, il cui progetto risale alla fine degli anni ‘70.

L’edificio ha una pianta rettangolare, di dimensioni 42 x 18 m; l’ossatura portante presenta 8 telai trasversali, ciascuno costituito da una coppia di pilastri di sezione 40x50 cm e altezza di circa 8 m e da una trave di copertura a sezione variabile. La copertura è realizzata mediante solai in latero-cemento, con soletta collaborante gettata in opera. Il rivestimento esterno della palestra è realizzato tramite pannelli in c.a.p. verticali, poggianti alla base su travi portapannelli e vincolati superiormente alle travi di copertura e di gronda. Le fondazioni sono di tipo diretto (plinti a bicchiere). L’edificio presenta le vulnerabilità tipiche delle strutture prefabbricate realizzate in epoca antecedente all’entrata in vigore della più recente classificazione sismica del territorio nazionale: inadeguatezza delle strutture portanti nei confronti dell’azione sismica e mancanza di collegamenti efficaci tra le strutture prefabbricate.

Lo studio della struttura è condotto utilizzando un modello tridimensionale agli elementi finiti, rappresentato nell’immagine seguente:



Come già anticipato, gli effetti dell'azione sismica sono valutati utilizzando due approcci: un'analisi dinamica con spettro di risposta svolta in ambito elastico lineare e un'analisi statica non lineare (analisi di pushover). La modellazione ed elaborazione dei risultati delle analisi sono eseguite con il software di calcolo Namirial CMP versione 29. Per semplificare la trattazione dell'argomento in questa sede, si è scelto di fare riferimento alle sole verifiche riguardanti i pilastri.

La struttura richiede anche interventi locali finalizzati ad eliminare le vulnerabilità ricorrenti di questa tipologia: carenza dei collegamenti tra elementi strutturali, in particolare fra travi e pilastri, e carenza di connessione tra il sistema di tamponatura esterna e la struttura portante. Assumeremo come risolti tali aspetti che, ai sensi delle recenti Linee Guida sulla classificazione sismica delle costruzioni, consentono il miglioramento di una classe di rischio.

La costruzione è caratterizzata da una classe d'uso III ($c_u = 1.5$), da cui i valori dell'accelerazione di picco al suolo di domanda, PGA_D , per gli stati limite presi in esame:

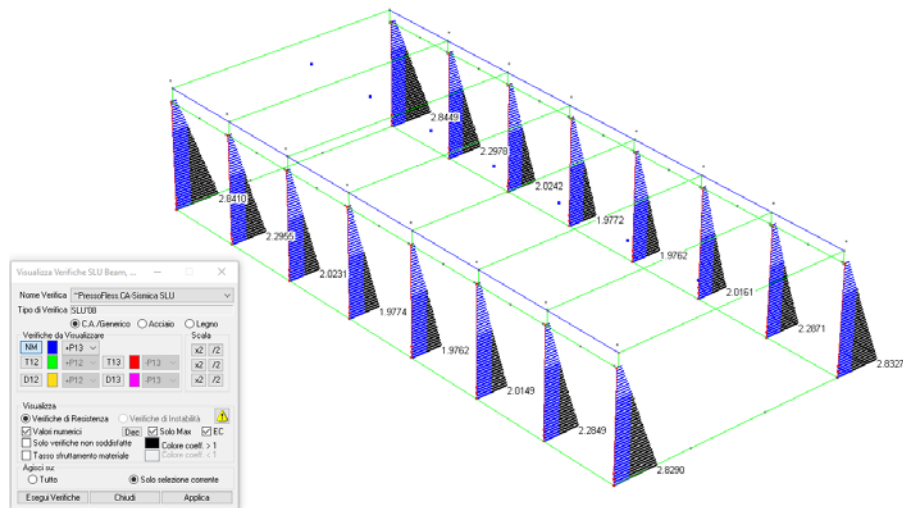
Tempi di ritorno e domande				
		SLO	SLD	SLV
T_{rD}	(anni)	45	75	712
PGA_D	(g)	0.0518	0.0635	0.1516

Analisi di vulnerabilità condotte in ambito elastico

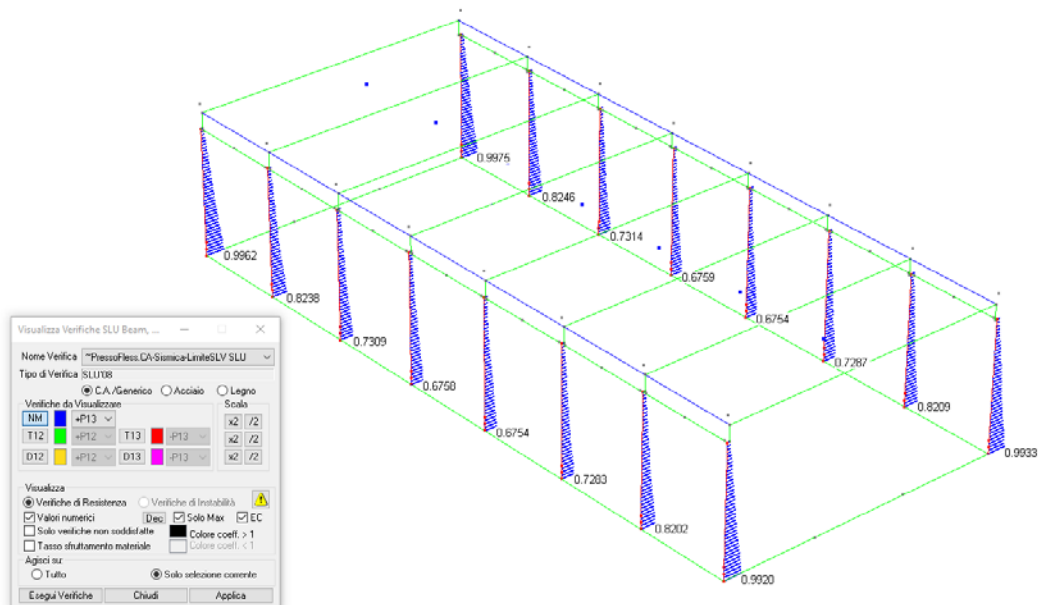
Lo studio della struttura in ambito elastico è condotto utilizzando un'analisi dinamica, con spettri desunti da quelli elastici previsti da NTC 08, ridotti per un determinato fattore di struttura. Il valore di questo parametro è un punto molto delicato; si è scelto di utilizzare $q = 3.3$, ricavato inquadrando l'edificio nella categoria di strutture "a telaio di un piano", regolare in pianta e in altezza. In merito a questa scelta, una considerazione appare doverosa. Dovendo eseguire analisi finalizzate alla progettazione di interventi di rinforzo, la tendenza sarebbe quella di adottare valori del fattore di struttura più bassi, che equivalgono a valutazioni più cautelative. In quest'ambito, invece, si è scelto un valore che tende a rappresentare meglio il comportamento probabile dell'edificio.

Nella modellazione della struttura occorre definire in maniera opportuna le proprietà dei materiali sulla base del livello di conoscenza raggiunto; per la struttura in esame, si ipotizza un livello di conoscenza LC3, corrispondente ad un fattore di confidenza pari a 1. Con le sollecitazioni risultanti da questa prima analisi si eseguono le verifiche previste, in modo da evidenziare eventuali carenze presenti. In caso di verifiche non soddisfatte, si riduce l'azione sismica applicando coefficienti riduttivi alla PGA prevista dalla norma (d'ora in poi denominata PGA_D). L'azione sismica andrà ridotta fino ad ottenere la frazione di PGA tale per cui le verifiche risultano soddisfatte in tutti gli elementi: tale valore coincide con la capacità della struttura in termini di PGA (d'ora in poi denominata PGA_C). Le NTC 2008 consentono, nel caso di strutture esistenti, di analizzare il solo Stato Limite Ultimo; al fine della classificazione sismica ai sensi del DM 28/2/2017 è necessaria anche la valutazione almeno dello Stato Limite di Danno, perciò si procederà alla sua valutazione; sarà valutato anche lo Stato Limite di Operatività, essendo molto semplice per la struttura in esame.

Si veda l'applicazione del procedimento descritto alla struttura in oggetto; come già anticipato, l'attenzione sarà rivolta esclusivamente ai pilastri. Inizialmente ci si rapporta alle verifiche a SLU: la figura seguente mostra i risultati delle verifiche a pressoflessione per un sisma da normativa ($PGA_D = 0.1516g$). Per una migliore lettura dei risultati, si tenga presente che le verifiche sono espresse attraverso il coefficiente di sfruttamento: la verifica risulta soddisfatta se il coefficiente di sfruttamento è < 1 .



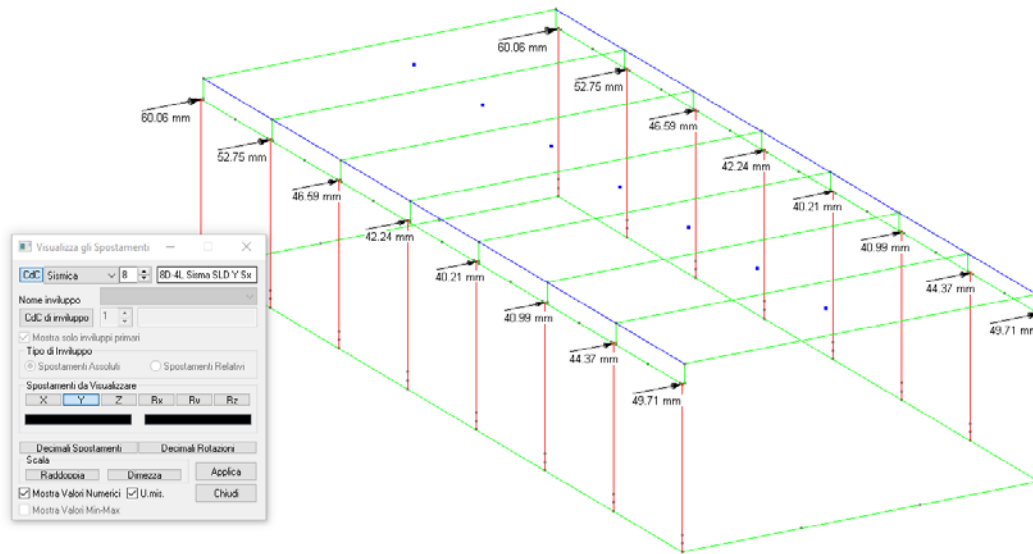
I massimi valori del coefficiente di sfruttamento risultano pari a 2.83; le verifiche sono pertanto non soddisfatte. Scalando opportunamente l'azione sismica, a parità delle altre azioni, si può ottenere il moltiplicatore che porta ad avere un coefficiente di utilizzo prossimo all'unità. Il coefficiente per il quale si verifica questa situazione è risultato pari a 0.34, corrispondente ad una $PGA_c = 0.05154g$. Il valore di 0.34 corrisponde all'indice di rischio I_r , o α_u , calcolato ai sensi dell'ordinanza n. 3362/2004.



Volendo determinare la PGA_c corrispondente allo SLD e allo SLO, si opera con un procedimento analogo agendo sulle verifiche di deformabilità. Per la determinazione degli spostamenti limite, la struttura in esame si ricade nel caso b) previsto dalla norma, ovvero "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"; gli spostamenti di interpiano limite si assumono pertanto pari a:

- $d_r < 0.01 h = 78 \text{ mm}$ per lo SLD;
- $d_r < 0.0066 h = 52 \text{ mm}$ per lo SLO.

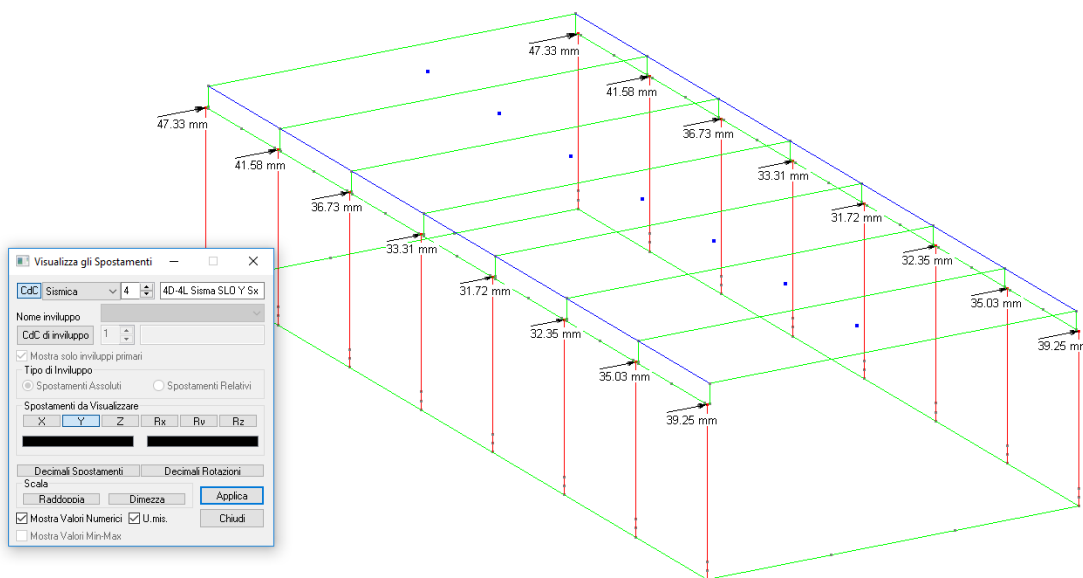
La figura seguente mostra i massimi spostamenti orizzontali in testa ai pilastri per effetto di un sisma da norma per lo SLD:



Lo spostamento di interpiano massimo, pari a 60.06, è in questo caso inferiore rispetto a quello previsto per il soddisfacimento della verifica; data la semplicità del modello, la PGA_C si può ottenere moltiplicando la PGA_D (pari a 0.0635) per il rapporto tra spostamenti limite e spostamenti osservati. I valori che si ottengono sono pari a:

$$PGA_C (SLD) = 0.0825;$$

Il medesimo procedimento può essere utilizzato per lo Stato Limite di Operatività. I massimi spostamenti che si osservano sono illustrati nella figura seguente:



In base a tali spostamenti e considerando che la $PGA_D(SLO)$ vale 0.0518, si ottengono i seguenti risultati:

$$PGA_C (SLD) = 0.0569;$$

Le stesse considerazioni possono essere eseguite considerando una rigidezza flessionale ridotta, ad esempio al 50%, per tenere conto dello stato fessurato del calcestruzzo. I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella a seguito riportata:

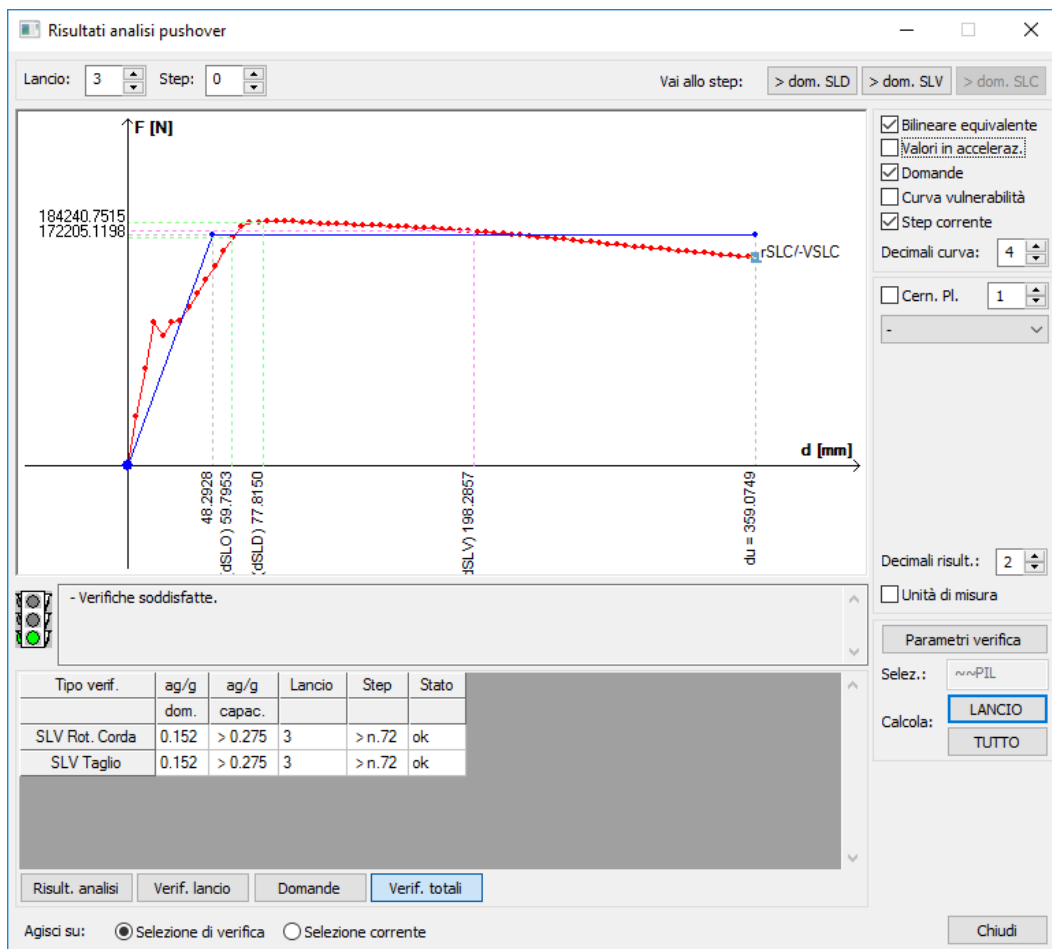
Risultati delle analisi lineari			
Tipo di analisi	PGA _C (SLO)	PGA _C (SLD)	PGA _C (SLV)
Analisi Modale con rigidezza flessionale al 100%	0.0569	0.0825	0.0515
Analisi Modale con rigidezza flessionale al 50%	0.0401	0.0581	0.0728

Analisi di vulnerabilità condotte con metodo statico non lineare

Si è eseguita un'analisi pushover dell'edificio e si sono condotte le verifiche per gli stati limite di operatività SLO, di danno SLD e di salvaguardia della vita SLV; rispetto ai primi due, sono state eseguite le verifiche degli spostamenti di interpiano, mentre per l'SLV si sono condotte verifiche a taglio e di rotazione rispetto alla corda.

L'analisi eseguita prevede 8 analisi che considerano le diverse direzioni x e y, l'eccentricità delle masse e le distribuzioni di forze proporzionali rispettivamente alle masse e alle masse per le altezze, senza considerare inversioni dei segni, vista la simmetria dell'edificio. Le verifiche fanno riferimento:

- per lo stato limite di danno SLD e per lo stato limite di operatività SLO, agli stessi dati già riportati al punto precedente;
- per le verifiche a taglio SLV, al cap. 4.1.2.1.3.2 delle NTC2008;
- per le verifiche di rotazione rispetto alla corda SLV, al cap. C8A.6.1 delle Appendici alla Circolare 2 febbraio 2009.



Si ricorda che, per quanto riguarda lo stato limite SLV, le analisi di pushover prevedono una verifica in termini di spostamento, quando il comportamento determinante è di tipo duttile (flessione dei pilastri), come in questo caso. Dai risultati riportati di seguito, per le verifiche SLO e SLD si nota un buon accordo con l'analisi lineare con rigidezza flessionale ridotta, mentre per lo stato limite SLV la differenza è marcata: in questo caso la struttura è verificata, mentre non lo è con analisi lineari con fattore $q = 3.3$.

Risultano le seguenti accelerazioni di picco al suolo di capacità:

Risultati delle analisi di pushover			
Tipo di analisi	PGA _c (SLO)	PGA _c (SLD)	PGA _c (SLV)
Statica non lineare	0.0396	0.0613	0.2710

Classe di rischio sismico

Le "Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni" definiscono otto **classi di rischio** (da A+ a G) rappresentative della vulnerabilità sismica di una struttura, al fine di incentivare il processo di prevenzione sismica degli edifici; sono contenuto nel decreto attuativo del cosiddetto Sismabonus, che è stato firmato il 28 febbraio 2017.

L'attribuzione delle classi di rischio dipende da due parametri: la perdita annua media attesa, **PAM**, e l'indice di sicurezza, **IS-V**, detto anche indice di rischio **I_r**; mentre il primo parametro considera le perdite economiche associate ai danni, con riferimento al costo di ricostruzione CR, il secondo parametro è il rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo di capacità PGA_c e di domanda PGA_d nei confronti dello Stato Limite di salvaguardia della Vita SLV.

Interessante è il fatto che i professionisti potranno eseguire la diagnosi e l'assegnazione della classe di rischio con due diverse modalità: la prima, semplificata, è applicabile solo in casi specifici e prevede l'utilizzo di tabelle descrittive degli interventi necessari per il passaggio alla classe di rischio immediatamente inferiore; la seconda, detta convenzionale, prevede invece l'analisi della struttura e la determinazione analitica di PAM e IS-V, sulla base dei risultati del calcolo pre e post eventuali interventi, con passaggio a classi di rischio inferiore.

Nel caso in esame si hanno a disposizione i risultati delle verifiche con analisi modale e con analisi di pushover: è pertanto possibile valutare le classi di rischio della struttura applicando il metodo convenzionale a seconda delle analisi svolte.

Il valore dell'**indice di sicurezza IS-V** è semplicemente uguale al rapporto tra capacità e domanda per lo stato limite SLV:

$$I_r (SLV) = PGA_c (SLV) / PGA_d (SLV)$$

La perdita media annua attesa **PAM** è invece uguale all'area sottesa dalla curva che presenta:

- in ascissa, il valore della frequenza media annua λ ;
- in ordinata, il valore del costo di ricostruzione CR.

Il costo di ricostruzione CR è tabulato nelle Linee Guida in funzione dello stato limite, in percentuale rispetto al costo di ricostruzione dell'edificio: convenzionalmente si attribuiscono 7%, 15%, 50%, 80% di perdita agli stati limite SLO, SLD, SLV e SLC rispettivamente.

Le Linee Guida introducono due ulteriori stati limite convenzionali:

- lo stato limite di inizio danno (SLID), in corrispondenza del quale si manifesta una perdita economica nulla; corrisponde ad un evento sismico il cui periodo di ritorno è assunto pari a 10 anni;

- lo stato limite di ricostruzione (SLR), in corrispondenza del quale l'unico intervento plausibile sull'edificio è quello di demolizione e ricostruzione; si assume che il suo periodo di ritorno coincida con quello dello stato limite di collasso.

La *frequenza media annua* è invece pari all'inverso del periodo di ritorno associato all'accelerazione di capacità PGA_C :

$$\lambda (S.L.) = 1 / T_{rC} (S.L.)$$

dove T_{rC} , per un certo stato limite, è ottenibile mediante la seguente relazione:

$$T_{rC} = T_{rD} \times (PGA_C / PGA_D)^\eta$$

Avendosi un'accelerazione massima di riferimento su roccia pari a 0.1312 g, dalla nota (4) delle Linee Guida si ottiene il valore da utilizzare per la definizione del parametro η . Risulta pertanto:

$$\eta (a_g/g = 0.1312) = 0.356$$

Calcolando infine il valore di λ utilizzando i tempi di ritorno degli stati limite, cioè i tempi di ritorno T_{rD} relativi alle varie domande, si ottiene una curva convenzionale rappresentativa della situazione ideale in cui si ha ovunque $PGA_C = PGA_D$.

Valori convenzionali di PAM per $C_u = 1,5$						
	SLID	SLO	SLD	SLV	SLC	SLR
λ	10.00%	2.22%	1.33%	0.14%	0.07%	0.07%
CR	0%	7%	15%	50%	80%	100%
PAM	0.87%	0.27%	0.10%	0.39%	0.05%	0.07%

Nella struttura in esame, non essendo state condotte verifiche allo stato limite di collasso SLC, si utilizza la valutazione semplificata della frequenza media annua nei confronti di tale stato limite:

$$\lambda_{SLC} = 0.49 \lambda_{SLV}$$

I risultati sono sintetizzati nelle seguenti tabelle e nel grafico; si evidenzia nella prima come il T_{rC} per SLV condizioni anche i dati per SLO e SLV, come indicato al punto 3) del paragrafo 2.1 delle Linee Guida.

RISULTATI PER ANALISI MODALE - RIGIDEZZA AL 100%						
	SLID	SLO	SLD	SLV	SLC	SLR
PGAC		0.0569	0.0825	0.0515		
Ir(PGA)		110%	130%	34%		
Ir(TR)		130%	209%	5%		
TrC (anni)	0.0	34.3	34.3	34.3		
λ	10.00%	2.91%	2.91%	2.91%	1.43%	1.43%
CR (%)	0%	7%	15%	50%	80%	100%
PAM	2.64%	0.25%	0.00%	0.97%	0.00%	1.43%

PAM =	2.64%	CLASSE PAM: D
IS-V =	33.97%	CLASSE IS-V: D

Classe di rischio = D

RISULTATI PER ANALISI MODALE - RIGIDEZZA AL 50%							
		SLID	SLO	SLD	SLV	SLC	SLR
PGAC			0.0401	0.0581	0.0728		
Ir(PGA)			77%	91%	48%		
Ir(TR)			49%	78%	13%		
TrC (anni)		0.0	22.0	58.4	90.6		
λ		10.00%	4.56%	1.71%	1.10%	0.54%	0.54%
CR (%)		0%	7%	15%	50%	80%	100%
PAM	1.61%	0.19%	0.31%	0.20%	0.37%	0.00%	0.54%

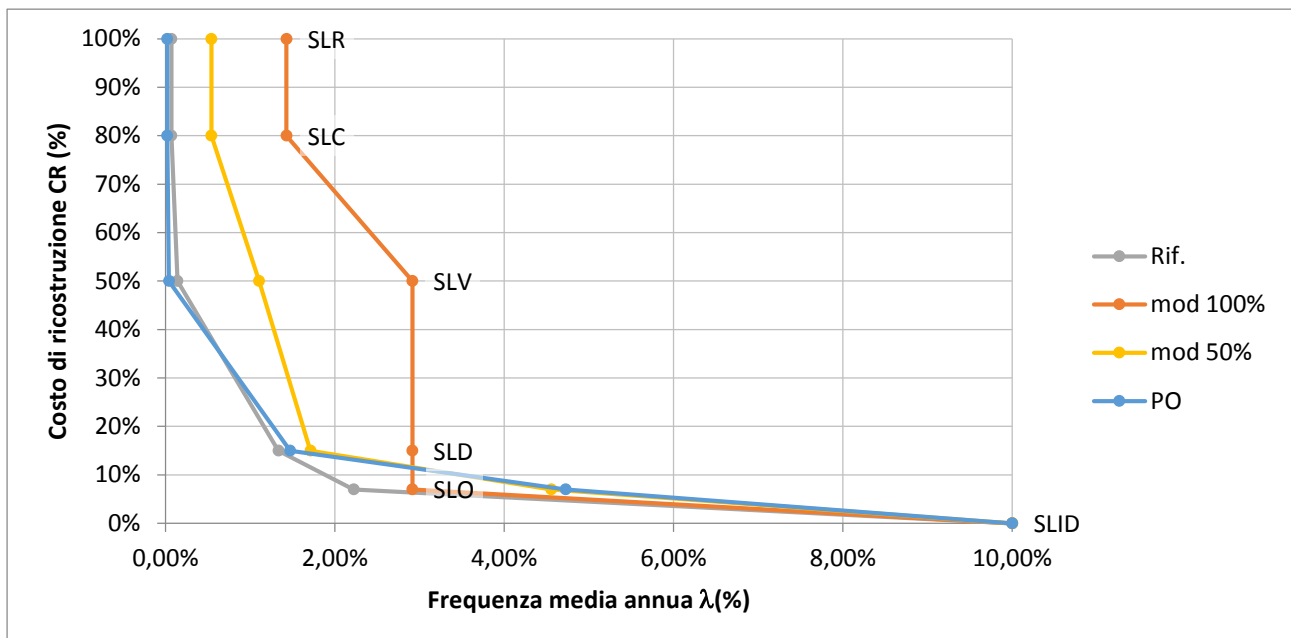
PAM =	1.61%	CLASSE PAM: C
IS-V =	48.00%	CLASSE IS-V: C

Classe di rischio = C

RISULTATI PER ANALISI PUSHOVER							
		SLID	SLO	SLD	SLV	SLC	SLR
PGAC			0.0396	0.0613	0.2710		
Ir(PGA)			76%	97%	179%		
Ir(TR)			47%	91%	511%		
TrC (anni)		0.0	21.2	67.9	2475.0		
λ		10.00%	4.73%	1.47%	0.04%	0.02%	0.02%
CR (%)		0%	7%	15%	50%	80%	100%
PAM	1.04%	0.18%	0.36%	0.47%	0.01%	0.00%	0.02%

PAM =	1.04%	CLASSE PAM: B
IS-V =	178.76%	CLASSE IS-V: A+

Classe di rischio = B



Conclusioni

Si è visto come, a seconda del metodo di calcolo adottato, la vulnerabilità sismica sia differente e la classificazione del rischio sismico in base al DM 28/02/2017 passi da D ad A. La verifica in termini di spostamento e non di resistenza per l'analisi pushover gioca un ruolo decisivo nella differenza rispetto alle analisi lineari.

Nelle verifiche si è valutata la sola risposta sismica. In realtà l'insufficienza per le analisi lineari si evidenzerebbe anche in analisi non sismiche, ad esempio in condizioni di vento, che non sono state considerate nel presente documento.

Tra analisi lineari con rigidità flessionale piena e rigidità flessionale ridotta si ha un aumento del periodo fondamentale della struttura, che passa da 1.465 s a 2.071 s, attingendo a valori spettrali di accelerazione inferiori e conseguente minor impegno della struttura.

Il comportamento agli stati limite di esercizio dell'analisi lineare con rigidità ridotta è in buon accordo con quanto emerge dall'analisi di pushover, in cui il modello a fibre della sezione di calcestruzzo armato prevede esplicitamente la formazione di fessure.

La differenza di risultati ottenuti con vari metodi è di fatto prevista anche dalle Linee Guida stesse, quando nel primo paragrafo si prescrive che l'attribuzione della classe di rischio pre e post intervento dev'essere effettuata utilizzando lo stesso tipo di analisi e di verifica.

Per maggiori approfondimenti sul software Namirial CMP visita:

<http://www.edilizianamirial.it/software-calcolo-strutturale.asp>