

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E DELLA CLASSE SISMICA DEGLI EDIFICI

DEFINIZIONI E PROCEDURE OPERATIVE

Salvatore Miano, ingegnere strutturista

Abstract

La Legge di Stabilità 2017, approvata il 21 dicembre 2016 ha introdotto un sistema di sgravi fiscali basati sulla classificazione delle prestazioni sismiche degli edifici, che sono stati ulteriormente ampliati dal Decreto-legge 19 maggio 2020, n. 34 Convertito in legge il 17 luglio 2020 (superbonus 110).

Nell'articolo si vuole evidenziare che per il raggiungimento dell'obiettivo, che si propone la normativa del superbonus di una reale riduzione del rischio sismico, risulti centrale prima l'attività di analisi dell'esistente e quindi la progettazione dell'intervento.

Verrà mostrato inoltre come tale attività, implementate in un caso di studio, trovano il loro naturale inquadramento normativo nelle NTC2018 e nella circolare applicativa MIT del 2019 dove assume una importanza centrale il capitolo 8.

LE PRESTAZIONI SISMICHE DEGLI EDIFICI

La Legge di Stabilità 2017, approvata il 21 dicembre 2016 ha introdotto un sistema di sgravi fiscali basati sulla classificazione delle prestazioni sismiche degli edifici, che sono stati ulteriormente ampliati dal D.L. 19 maggio 2020, n. 34 Convertito in legge il 17 luglio 2020 (**superbonus 110**).

Risulta doveroso premettere che la formulazione aggiornata del sismabonus, che prevede detrazioni fiscali fino al 110% (superbonus 110), non subordina l'entità dello sconto fiscale ad un obiettivo minimo di incremento della sicurezza o di classe sismica.

Diversamente quindi dalla formulazione precedente, che subordinava l'entità del beneficio fiscale al raggiungimento di precisi obiettivi di incremento delle prestazioni sismiche (passaggio di almeno una o più classi), con la nuova formulazione lo sconto fiscale del 110% può essere raggiunto con qualsiasi intervento previsto dalle NTC compreso l'intervento locale.

La criticità di questo aspetto è stata sollevata da più parti in quanto in questa maniera si potrebbero penalizzare gli interventi più complessi ma anche più performanti a favore di interventi che richiedono minori sforzi di analisi e progettazione.

Successivamente a completamento della previsione dell'art. 119 è stato pubblicato dal MIT il DM 329 del 6 agosto 2020 che modifica e sostituisce l'allegato B del DM 58/2017.

La nuova formulazione dell'asseverazione prevista dal DM 329 del 6 agosto 2020 conferma la possibilità di accedere allo sconto fiscale del 110% senza la valutazione della classe sismica e con interventi che non comportano **alcun incremento di classe**.

A parere dello scrivente, la mancanza di precisi obiettivi da raggiungere riguardo la sicurezza sismica, può creare non poche difficoltà al progettista strutturale che come previsto dall'art. 119 del Decreto-legge n. 34 deve **asseverare l'efficacia dell'intervento al fine della riduzione del rischio sismico** e come riportato nel citato articolo *in base alle disposizioni del decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti n. 58 del 28 febbraio 2017 (Linee guida per la classificazione sismica)*.

In ogni caso l'applicazione del sismabonus nella versione originaria o in quella aggiornata del superbonus non può che partire da una valutazione quantitativa della sicurezza strutturale dell'edificio (cap. 8.3 NTC2018) e quindi dalla progettazione degli interventi al fine di ridurre le vulnerabilità individuate.

Se si parte da questo presupposto, la classificazione sismica è semplicemente un modo per esplicitare in maniera sintetica ed oggettiva le prestazioni dell'edificio prima e dopo l'intervento senza alcun costo progettuale significativo aggiuntivo.

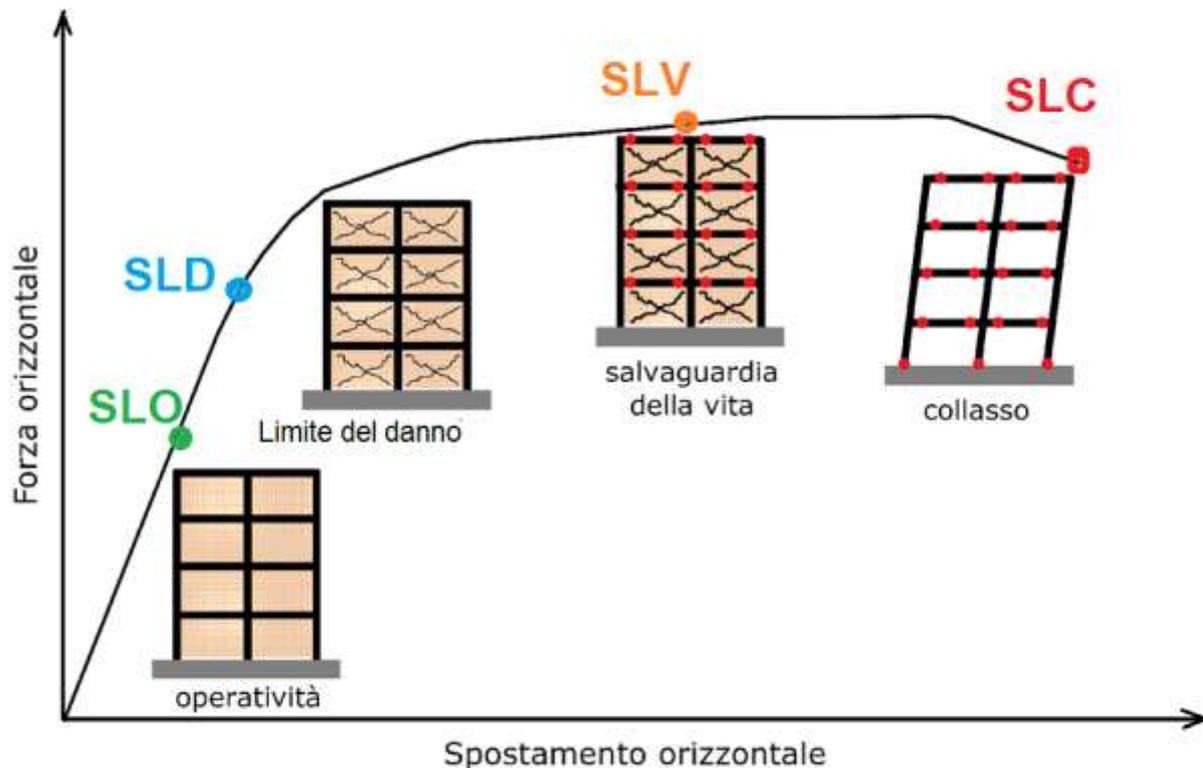
Questa premessa si ritiene necessaria per inquadrare correttamente le procedure e le attività necessarie alla valutazione delle prestazioni strutturali utilizzando i soli indici di sicurezza previsti nel cap. 8 delle NTC2018 o se si ritiene anche l'assegnazione della classe sismica.

Già dall'introduzione delle norme NTC 2008 sappiamo che le prestazioni sismiche degli edifici sono individuate da 4 stati limite a cui corrispondono diversi gradi di danneggiamento e che vengono di seguito riportati:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** *a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;*
- **Stato Limite di Danno (SLD):** *a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.*
- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** *a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;*
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** *a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti*

strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Un modo per rappresentare efficacemente le prestazioni dell'edificio consiste nel graficizzare su un diagramma avente in ascissa lo spostamento orizzontale dell'ultimo piano ed in ordinata la spinta orizzontale applicata (curva di capacità dell'edificio) ai vari stati limite:



CURVA DI CAPACITA' STRUTTURA DUTTILE

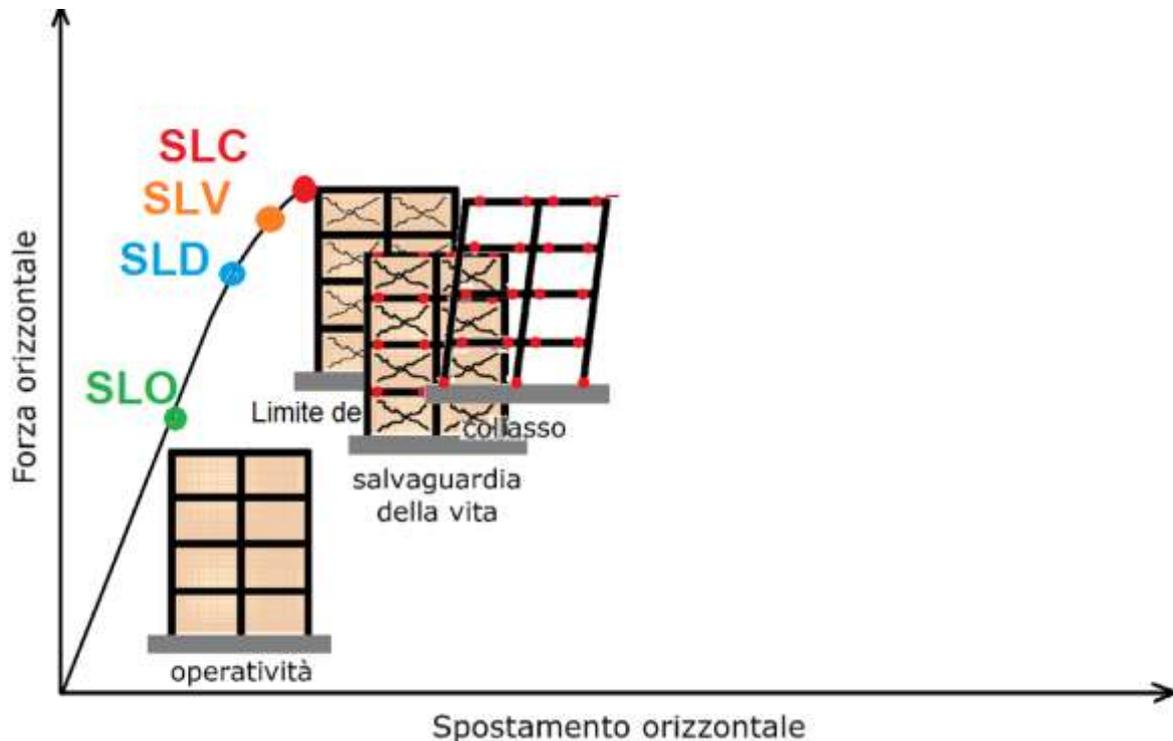
Il grafico evidenzia il fatto che la prestazione dell'edificio, e quindi il suo danneggiamento, è ben rappresentato dall'entità dello spostamento a cui questo risulta assoggettato.

In particolare, per bassi livelli di spostamento i danni sono limitati agli impianti ed alle finiture (SLO, SLD) al crescere della domanda di spostamento il danno si propaga alle strutture fino all'incipiente collasso (SLV, SLC).

Ad onore del vero vi è da dire che tale rappresentazione di danneggiamento progressivo dell'edificio presuppone un comportamento duttile delle strutture, ipotesi realistica per le strutture progettate con le nuove norme e quindi che rispettano la progettazione in capacità ma sicuramente improbabile per gli edifici esistenti.

Negli edifici esistenti in calcestruzzo armato, infatti, i meccanismi di collasso probabili sono in genere fragili, quali quelli di nodo e di taglio.

Questi meccanismi sono regolati dalla resistenza e non dalla deformazione per cui sopravvengono con livelli di spostamento bassi, paragonabili a quelli per cui si hanno i danneggiamenti delle tamponature, in questo caso la struttura passa repentinamente dal danneggiamento delle tamponature al collasso e gli stati limite tendono a sovrapporsi, come in figura:



CURVA DI CAPACITA' STRUTTURA FRAGILE

Ai fini degli scopi che ci prefiggiamo, ovvero la valutazione delle prestazioni sismiche e quindi dell'assegnazione della classe, la nostra struttura sarà rappresentata in maniera esaustiva dalla sua curva di capacità.

Per ora basti dire che la valutazione numerica di tale curva viene effettuata con analisi statiche non lineari (PUSH OVER) come previsto e regolato nelle norme tecniche utilizzando specifici codici di calcolo agli elementi finiti.

Facciamo un passo avanti, e vogliamo per un dato edificio ubicato in un determinato sito, nota la sua curva di capacità determinare le sue prestazioni sismiche.

Per determinare la prestazione sismica di un edificio, nota la sua curva di capacità, dobbiamo conoscere e modellare la domanda sismica ovvero l'entità delle azioni sismiche che sono attese con una determinata probabilità di superamento.

La domanda sismica viene modellata dalle norme in termini probabilistici utilizzando i concetti di periodo di ritorno (T_R), vita nominale (V_N), coefficiente d'uso (CU) e probabilità di superamento nel periodo di riferimento (P_R).

La relazione fondamentale che regola queste grandezze è:

$$T_R = -\frac{C_U x V_N}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Una grandezza non utilizzata esplicitamente nelle norme tecniche ma utilizzata invece nella classificazione sismica, e che si ritiene a parere dello scrivente molto importante ai fini della valutazione della sicurezza sismica, è la frequenza media annuale di superamento pari al reciproco del periodo di ritorno $\lambda=1/T_R$ (1/anno)

Si riportano due esempi in cui tale grandezza viene utilizzata:

- frequenza media annuale di superamento di uno stato limite (λ_L), rappresenta la frequenza annuale con cui la struttura può subire quel livello di danneggiamento
- frequenza media annuale di superamento di una determinata PGA al suolo (λ_{PGA}) rappresenta la frequenza annuale con cui avvengono sismi che raggiungono o superano quel livello di PGA

A titolo esemplificativo per un edificio nuovo per civile abitazione si ha $V_N=50$ e $C_U=1$, i valori dei periodi di ritorno per gli stati limite SLD e lo SLV richiesti dalla normativa sono:

Per lo stato limite SLD

$$P_{VR}=63\%$$

$$T_{rSLD} = -\frac{1x50}{\ln(1-0.63)} = 50 \text{ anni} \quad \lambda_{LD}=1/50=0.02$$

Per lo stato limite SLV

$$P_{VR}=10\%$$

$$T_{rSLV} = -\frac{1x50}{\ln(1-0.1)} = 475 \text{ anni} \quad \lambda_{LV}=1/475=0.002$$

La norma, quindi, richiede che le tamponature si possano danneggiare con una frequenza inferiore al 2% annuo mentre che lo stato limite di salvaguardia della vita venga raggiunto con una frequenza di soli il 0.2% annuo.

A parere dello scrivente negli interventi sugli edifici esistenti la valutazione critica della frequenza media annuale di superamento ottenuta per i vari stati limite risulta molto importante per comprendere l'entità della riduzione del rischio sismico ottenuto.

A titolo di esempio si riporta il confronto tra la frequenza di superamento annuale dello stato limite del collasso per una scuola di nuova costruzione sita in Catania ed una in cui è stata effettuato un miglioramento sismico.

Per lo SLC di una scuola nuova la norma attuale richiede:

$$T_{rSLC} = -\frac{1.5x50}{\ln(1-0.05)} = 1462 \text{ anni} \quad \lambda_{LC}=1/1462=0.07\% \quad PGA=0.343$$

Per l'intervento di miglioramento, come richiesto dalle NTC 2018, è necessario raggiungere un indice di sicurezza sismica espresso in termini di accelerazioni al suolo di almeno $\zeta_E = 60\%$ e quindi

$$PGA=0.205 \quad T_r = 474 \quad \lambda_L=1/474=0.21\%$$

Se si confronta il miglioramento in termini di frequenza annuale di raggiungimento dello stato limite di collasso si avrà: $r = \lambda_L / \lambda_{LC} = 0.21\% / 0.07\% = 3$; ovvero la frequenza media annuale di raggiungimento del collasso della scuola migliorata secondo norma è di **ben 3 volte** quella di una scuola nuova edificata nello stesso sito.

LA CLASSIFICAZIONE SISMICA

A questo punto abbiamo definito tutte le grandezze che servono a comprendere la classificazione sismica degli edifici come introdotta dalla legge di stabilità del 2017 ed implementata nel Decreto Ministeriale numero 58 del 28/02/2017 e dalle linee guida del Consiglio superiore dei lavori Pubblici.

Le Linee Guida consentono di assegnare ad un edificio una Classe di Rischio Sismico, da **A+ a G**, mediante un unico parametro che tenga **conto sia della sicurezza sia degli aspetti economici**.

Ovviamente la classe sismica sarà la peggiore tra quella individuata con il criterio della sicurezza e quello con il criterio economico.

classe A+ (meno rischio)

classe A

classe B

classe C

classe D

classe E

classe F

classe G (più rischio)

La novità più interessante introdotta è che la classificazione tiene conto non solo della sicurezza, concetto già presente a partire dalla OPCM 3274 con gli indicatori di rischio sismici, ma degli **aspetti economici legati ai danni attesi sulla costruzione**.

La classificazione terrà quindi in conto dell'aspetto della sicurezza espresso dall'indice **IS-V** secondo la tabella:

Indice di Sicurezza	Classe IS-V
$100\% < IS-V$	A_{ISV}^+
$80\% < IS-V \leq 100\%$	A_{ISV}
$60\% < IS-V \leq 80\%$	B_{ISV}
$45\% < IS-V \leq 60\%$	C_{ISV}
$30\% < IS-V \leq 45\%$	D_{ISV}
$15\% < IS-V \leq 30\%$	E_{ISV}
$IS-V \leq 15\%$	F_{ISV}

Tabella 2 – *Attribuzione della classe di Rischio IS-V in funzione dell'entità dell'indice di Sicurezza*

L'indice IS-V è un classico indice di sicurezza sismico espresso come rapporto tra capacità e domanda per il solo stato limite SLV della salvaguardia della vita; è stato inserito per garantire oltre aspetto economico del danneggiamento anche la sicurezza degli occupanti.

Se l'indice si esprime in termini di accelerazione di attacco dello spettro A_g assume l'aspetto: $IS-V = A_{gSLV} / A_{g10\%} * 100$, tale valore a meno dell'essere espresso in percentuale è lo stesso dell'indice di sicurezza sismica ζ_E definito al punto 8.3 delle NTC2018, quindi:

$$IS-V = \zeta_E * 100.$$

Vediamo invece l'aspetto economico della classificazione sismica che, come detto, rappresenta la vera novità; questo è legato al costo di riparazione dei danni attesi, prodotti dagli eventi sismici, che si manifesteranno nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del costo di ricostruzione (CR).

Il valore del costo di riparazione ripartito annualmente viene quantificato con il parametro **PAM** (perdita annua media attesa).

Il PAM quantifica quindi le perdite economiche annue attese dovute al danneggiamento degli elementi strutturali e non strutturali in termini di percentuale del Costo di Ricostruzione CR.

Tale concetto è preso a prestito dai modelli utilizzati per quantificare il rischio assicurativo per gli eventi catastrofici in cui la gravità delle conseguenze è decrescente con la frequenza di superamento annuo, tali sono molti fenomeni naturali sisma incluso.

Si riporta la definizione di PMRM (partitioned multi-objective risk method) ripreso da Global Catastrophic Risk-Oxford Press in cui gli obiettivi di rischio altri non sono che i nostri SL.

Nell'immagine riportata di seguito le curve rappresentano come varia la gravità dei danni attesi in funzione della frequenza di superamento annuo dell'evento e partizionate per vari livelli di danno.

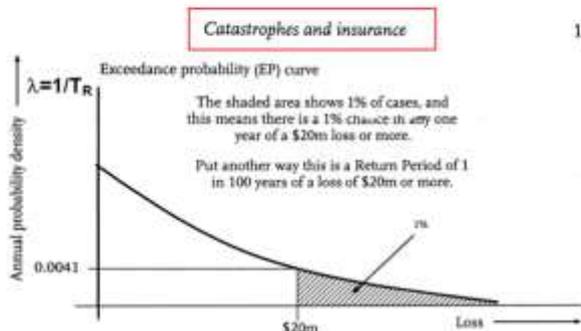


Fig. 8.3 Exceedance probability loss curve.

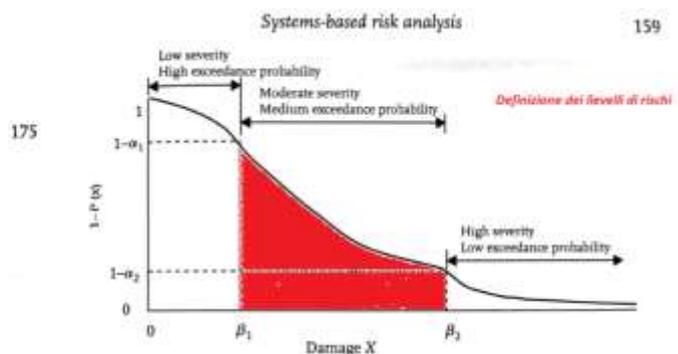


Fig. 7.2 PDF of failure rate distributions for four designs.

$$f_3(\cdot) = E[X | \beta_1 \leq X \leq \beta_2]$$

$$f_3(\cdot) = \frac{\int_{\beta_1}^{\beta_2} xp(x) dx}{\int_{\beta_1}^{\beta_2} p(x) dx}$$

Valore atteso del danno sul livello di rischio considerato

Tipiche curve frequenza di superamento vs danno atteso

Come visto, per un dato edificio, siamo in grado di conoscere per ogni stato limite e quindi per un assegnata prestazione sismica la frequenza annua di superamento; per potere quantificare le perdite attese dal punto di vista economico è però necessario conoscere per i vari stati limite, anche la perdita attesa in termini di costo di riparazione.

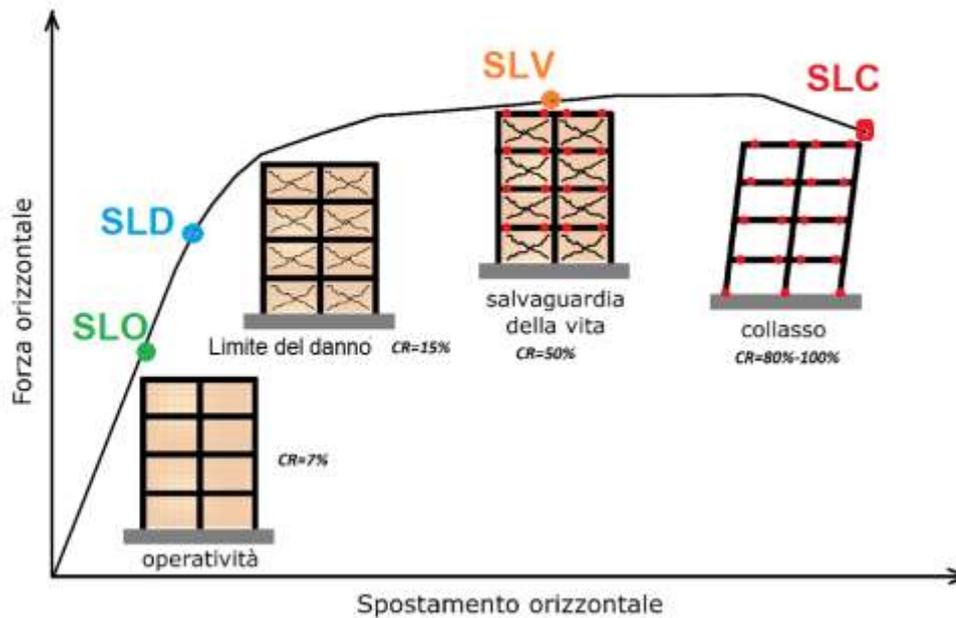
A questo scopo il legislatore ha di fatto completato le definizioni degli stati limite presenti nelle NTC quantificando per ogni stato limite il costo necessario alla riparazione espresso in percentuale del costo di ricostruzione.

I valori sono stati desunti dall'analisi dei costi effettuati su 2500 interventi della ricostruzione dell'Aquila, ed espressi in percentuale del costo di ricostruzione CR per i vari SL secondo la tabella:

SL	CR%
SR	100
SLC	80
SLV	50
SLD	15
SLO	7
SLID	0

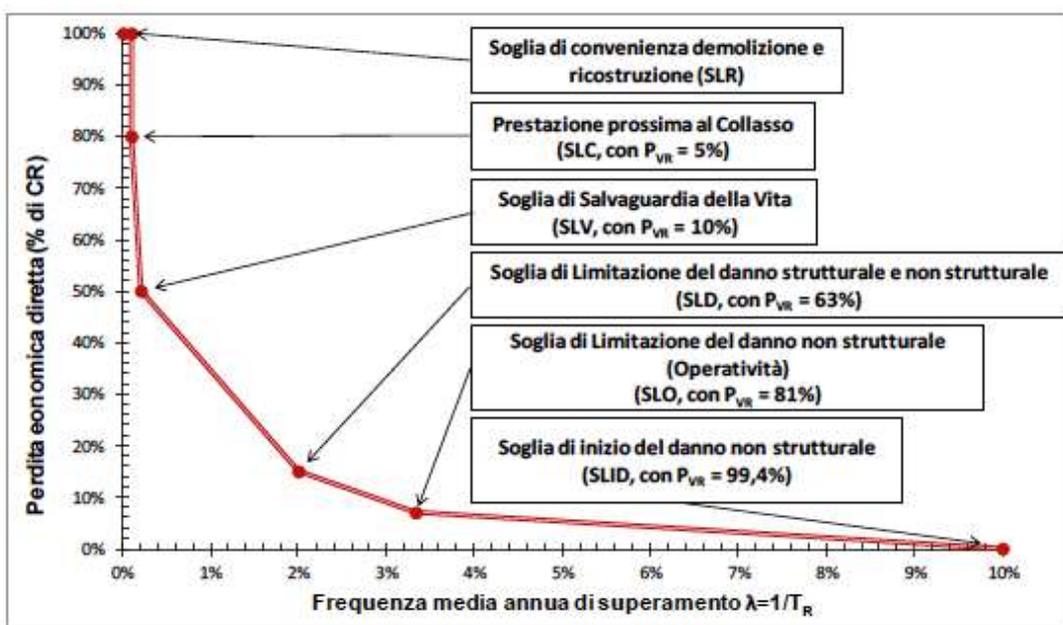
Possiamo quindi ora rivedere la curva di capacità e le prestazioni dell'edificio andando a dare un significato economico ai vari stati limite, a titolo di esempio un sisma che comporta il superamento dello SLD di un edificio comporterà un danno agli elementi non strutturali (tamponature, impianti) per la cui riparazione si quantifica un costo pari al 15% di quello necessario alla completa ricostruzione dell'edificio; diversamente un evento sismico di maggiore intensità che fa raggiungere lo SLV all'edificio produrrà danni estesi anche alle strutture con un danno complessivo per la cui riparazione si quantifica un costo pari al 50% di quello necessario alla completa ricostruzione dell'edificio.

Livello del danneggiamento per i vari SL espresso anche in funzione del **CR (costo ricostruzione) introdotto nella normativa del SISMABONUS**



PRESTAZIONI EDIFICIO E DANNO IN PERCENTUALE AL COSTO DI COSTRUZIONE

A questo punto abbiamo tutti i dati per potere calcolare il PAM ovvero la perdita attesa media annua che si ottiene integrando la funzione che ha in ordinata la perdita economica espressa in % del CR ed in ascissa la frequenza media di superamento; ovviamente la funzione è definita per punti in corrispondenza dei **4 SL definiti dalle NTC2018** (SLO, SLD,SLV,SLC) con in più lo stato limite SLID di inizio danno e lo stato limite SR di completa ricostruzione.



L'integrale si calcola facilmente come somma delle aree dei trapezi dei vari segmenti costituendo la funzione:

$$PAM = \sum_{i=2}^5 [\lambda(SL_i) - \lambda(SL_{i-1})] * [RC\%(SL_i) + CR\%(SL_{i-1})] / 2 + \lambda(SLC) * CR\%(SLR)$$

In considerazione che in genere per gli edifici ordinari la valutazione della sicurezza si effettua solo per gli stati limite SLD ed SLV la norma prevede un calcolo semplificato delle frequenze annue per gli SLO ed SLC utilizzando le seguenti relazioni:

$$\lambda_{SLO} = 1,67 \lambda_{SLD} \quad \lambda_{SLC} = 0,49 \lambda_{SLV};$$

Se utilizziamo la forma semplificata e ci mettiamo nelle ipotesi che $\lambda_{SLV} < \lambda_{SLD}$ l'integrale della funzione si può scrivere nella forma chiusa:

$$PAM = (0,4965 \lambda_{SLV} + 0,34025 \lambda_{SLD} + 0,0035) \times 100$$

Per un edificio nuovo per civile abitazione abbiamo già visto che le frequenze medie annue di superamento valgono:

$$\lambda_{LD} = 1/50 = 0.02 \quad \lambda_{LV} = 1/475 = 0.002$$

Quindi il PAM, utilizzando la formulazione semplificata, vale:

$$PAM = (0,4965 * 0,002 + 0,34025 * 0,02 + 0,0035) \times 100 = 1.13\%$$

Abbiamo trovato che un edificio per civile abitazione di nuova costruzione ha una perdita media annua attesa pari a PAM= 1.13% di CR; a che classe corrisponde ?

Perdita Annua Media attesa (PAM)	Classe PAM
PAM ≤ 0,5%	A+
0,5% < PAM ≤ 1,0%	A
1,0% < PAM ≤ 1,5%	B
1,5% < PAM ≤ 2,5%	C
2,5% < PAM ≤ 3,5%	D
3,5% < PAM ≤ 4,5%	E
4,5% < PAM ≤ 7,5%	F
7,5% < PAM	G

Classificazione sismica in base al PAM

Come si vede la classe richiesta **per gli edifici per civile abitazione è la classe B** mentre le classi A ed A+ richiedono prestazioni superiori quali quelle degli edifici strategici.

Bisogna però dire che per un edificio nuovo questa è la classe richiesta ovvero calcolata con le frequenze di superamento di progetto dei vari stati limite, un edificio ben progettato in genere presenta delle capacità superiori ed una analisi non lineare di verifica a valle del progetto potrebbe evidenziare una classificazione migliore.

La classe finale dell'edificio sarà quindi la peggiore tra quelle ottenute con la classificazione IS-V e la classificazione PAM.

Il decreto ministeriale per il calcolo della classificazione sismica prevede due metodi: - il primo definito "convenzionale" prevede la valutazione quantitativa della classificazione sismica

- Il secondo definito "semplificato" si basa su considerazioni macrosismiche e tipologiche e che però può essere utilizzato in casi limitati.

Nel proseguo faremo riferimento alla valutazione della classe sismica con il metodo convenzionale mettendoci nelle ipotesi più generali.

CASO STUDIO DI VALUTAZIONE DELLA CLASSIFICAZIONE SISMICA E DI INTERVENTO

L'esempio che tratteremo si riferisce alla classificazione sismica pre e post intervento di miglioramento di un edificio in c.a. di 7 elevazioni realizzato negli anni 70.

L'attività di rilievo, modellazione, progettazione e verifica è stata effettuata in ambiente BIM utilizzando come strumenti software Revit dell'Autodesk e CDSWin della STS s.r.l.

In particolare è stato modellato l'edificio in tutte le sue componenti architettoniche e strutturali nel software Revit, dal modello completo è stato estratto automaticamente il modello analitico e quindi il modello FEM di calcolo.

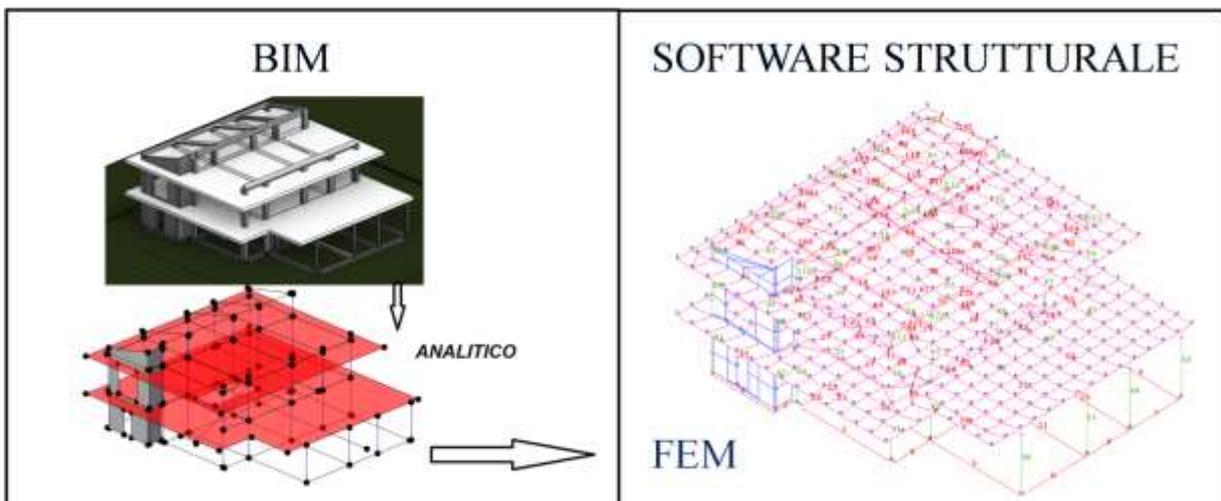
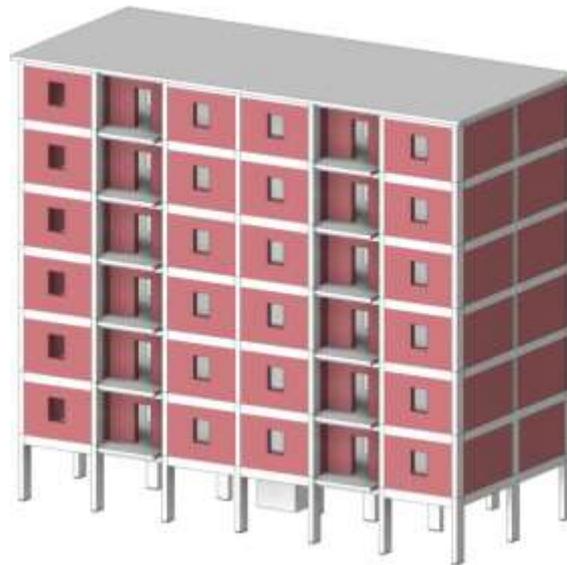
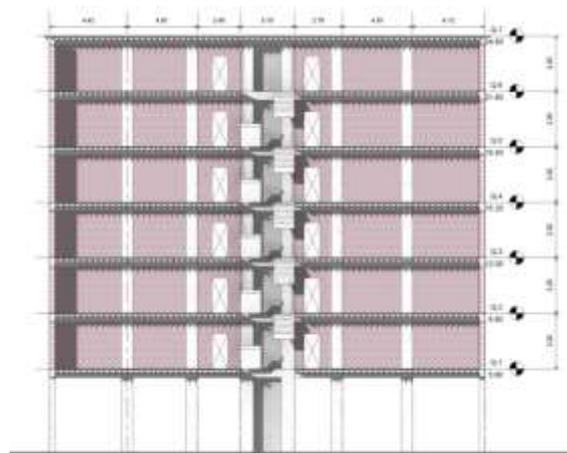


Diagramma di flusso delle attività di modellazione e verifica delle prestazioni strutturali

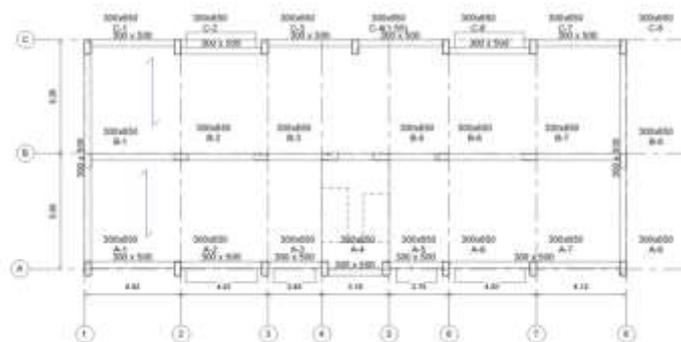
L'edificio in esame si presenta come un classico edificio anni 70 realizzato in assenza di norme sismiche con telai orditi solo in una direzione e piano terra non tamponato:



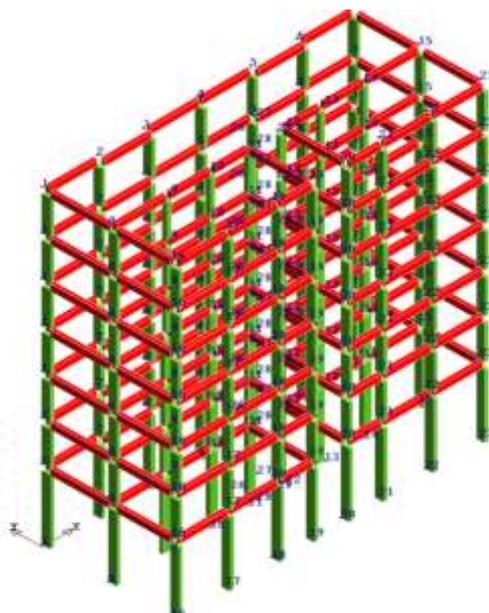
Modello 3d dell'edificio con la piattaforma BIM Revit



Sezione Edificio ottenuto dal modello BIM



Carpenteria Pianta Tipo ottenuta dal modello BIM



Modello di calcolo della struttura ottenuto in automatico dal modello BIM

Livello di conoscenza - Indagini e rilievo strutturale

Per una determinazione attendibile delle prestazioni sismiche è necessario effettuare delle analisi non lineari per cui si è dovuto raggiungere un livello di conoscenza della struttura LC2.

Per programmare le indagini necessarie si può fare riferimento alle indicazioni della circolare del MIT 21 gennaio 2019, n. 7 ed alle istruzioni CNR-DT 212/2013 *Istruzioni per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti*.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (%)
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione, in alternativa rilievo completo ex-novo	Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

Tabella C8.5.V – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prova per edifici di c.a.

Livello di Indagini e Prove	Rilievo (dei dettagli costruttivi) ¹⁾	Prove (sui materiali) ²⁾⁰⁰⁹⁶
		Per ogni elemento "primario" (trave, pilastro)
<i>limitato</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
<i>esteso</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
<i>esaustivo</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

Come si vede dalla tabella della circolare i rilievi dei dettagli costruttivi per arrivare ad un livello LC2 vanno da limitate ad estese in funzione della documentazione disponibile e quindi da un minimo del 15% ad un massimo del 35% di elementi indagati.

La circolare specifica che tali valori indicativi possono essere ridotti accorpando gli elementi che presentano caratteristiche ripetitive.

Tenendo in conto che per effettuare le verifiche ed in particolare le analisi non lineari dobbiamo conoscere i dettagli e quindi le armature nelle sezioni significative **di tutti gli elementi strutturali** una strategia può essere quella di effettuare preliminarmente un progetto simulato utilizzando i materiali, la normativa, ed i carichi dell'epoca di costruzione in modo da determinare le armature in tutta la struttura.

L'analisi preliminare della struttura deve inoltre servire a determinare gli elementi più sollecitati e quelli che si ritiene più rilevanti ai fini della risposta strutturale in modo da progettare in maniera razionale dove ubicare le indagini e le prove sui materiali (*cf. Calcestruzzo armato - 4.1 Conoscenza della struttura CNR-DT 212/2013*).

Una volta svolte le indagini si confronteranno, sia le caratteristiche dei materiali che le armature rilevate con quelli previsti nel progetto simulato, in modo da affinare il modello sulla base dei risultati delle prove e delle indagini e verificare nel contempo la rispondenza di quanto rilevato con la pratica e tecnica costruttiva dell'epoca.

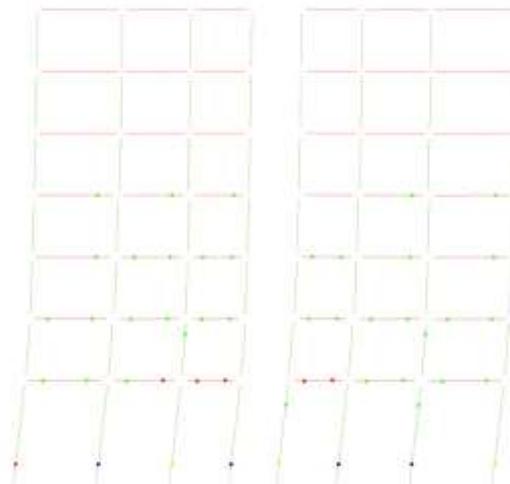
Caratteristiche dei materiali più scadenti di quelli utilizzati normalmente all'epoca della costruzione così come una mancata corrispondenza tra le armature previste nel progetto simulato e quindi dalla normativa dell'epoca e quelle rilevate, devono mettere in allarme rispetto all'affidabilità delle analisi che si effettueranno.

A tal proposito la CNR CNR-DT 212/2013 al punto 4.1.3.1 Dettagli costruttivi riporta:

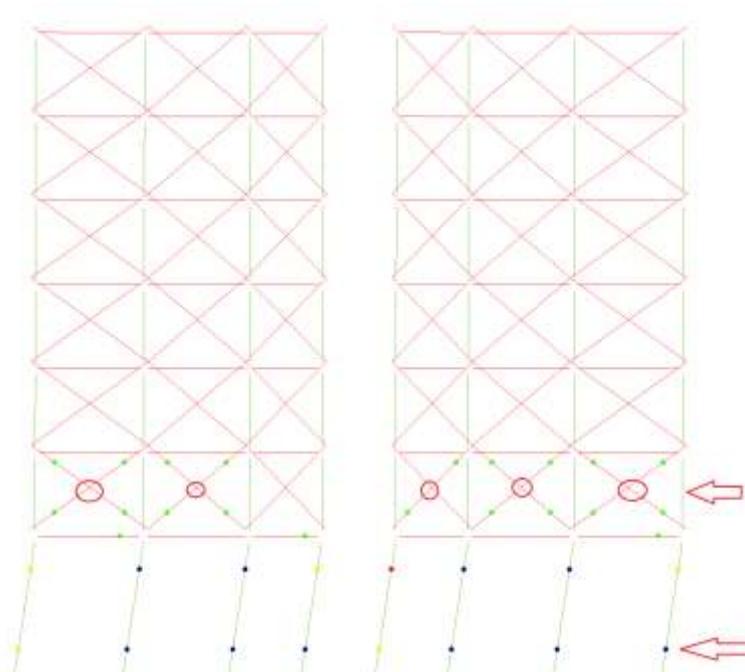
*In caso siano disponibili i disegni esecutivi (o di contabilità) originali, la necessaria verifica di compatibilità richiede la messa a nudo delle strutture di alcuni elementi, con rimozione dell'intonaco e copriferro, su fasce di larghezza sufficiente a esaminare anche le armature trasversali. Il numero di tali fasce, da eseguire a piani diversi, e prevalentemente nelle zone individuate sulla base dell'analisi preliminare, è **legato al grado di rispondenza che si riscontra tra progettato ed eseguito.***

Il modello utilizzato nelle analisi effettuate è quello di Panagiotakos e Fardis che permette di modellare sia la perdita di resistenza che rigidità in funzione del drift di piano.

Se confrontiamo il meccanismo di danno della struttura nuda con quella tamponata vediamo che nel secondo caso il modello riesce a cogliere il meccanismo di piano soffice che viene nella realtà osservato durante gli eventi sismici per questo tipo di strutture mentre il modello nudo presenta un meccanismo a telaio non verosimile.



Meccanismo di danno a telaio della struttura nuda (non verosimile)



Meccanismo di danno a piano soffice della struttura tamponata (verosimile)

Completato il modello si è effettuata l'analisi non lineare da cui si ottengono i valori di capacità in termini di PGA per i vari stati limite ed i periodi di ritorno ad essi corrispondenti.

Valutazione degli indici di sicurezza e dalla CLASSE sismica

Si riportano i risultati ottenuti dalla stampa del software per la Push over in direzione X con le forze proporzionali al modo prevalente:

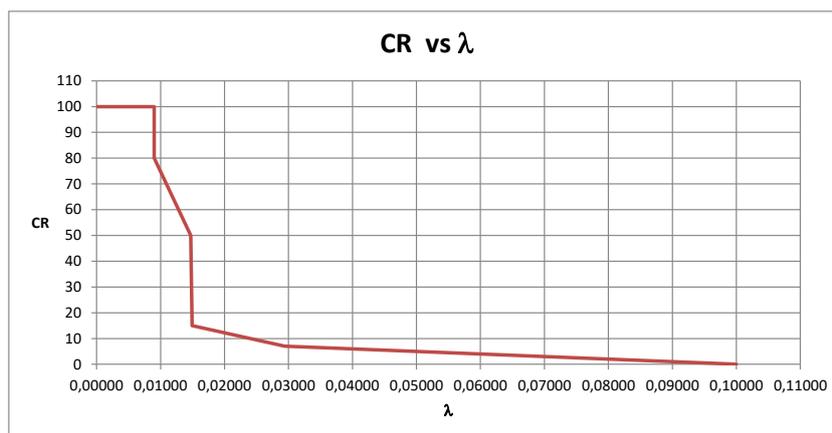
RISULTATI GENERALI PUSH-OVER			
PUSH-OVER N.ro	1 -	DISTRIB. FORZE SECONDO DEFORMATA MODALE	
Angolo Ingr. Sisma (Grd)	0	Numero collassi totali	1
Numero passo Resist.Max.	28	Numero passi significativi	28
Massa SDOF (t)	1537,49	Taglio alla base max. (t)	137,24
Coeff. Partecipazione	1,24	Resistenza SDOF (t)	106,34
Rigidità SDOF (t/m)	3684,77	Spostam. Snervam. SDOF mm	29
Periodo SDOF (sec)	1,30	Rapporto di incrudimento	0,000
Rapporto Alfau/alfa1	3,110	Fattore struttura	2,040
Coeff Smorzam.Equival.	21,000	Duttilità	2,040
STATO LIMITE DI OPERATIVITA'			
DOMANDA		CAPACITA'	
Spostamento mm	31,043	Spostamento mm	33,431
S.L. Operativita'	VERIFICATO	Numero passo precedente	19
PgaLO/g	0,066	PgaLO/Pga 81%	1,063
Rapporto q*=Fe/Fy	1,08	TrCLO	34,000
Vita Residua (anni)	56,000	(TrCLO/TDLO)^a	1,053
STATO LIMITE DI DANNO			
DOMANDA		CAPACITA'	
Spostamento mm	40,217	Spostamento mm	46,314
S.L. Danno	VERIFICATO	Numero passo precedente	25
PgaLD/g	0,087	PgaLD/Pga 63%	1,141
Rapporto q*=Fe/Fy	1,39	Asta3D Nro	
Vita Residua (anni)	67,000	TrCLD	67,000
-----		(TrCLD/TDLD)^a	1,128
STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA			
DOMANDA		CAPACITA'	
Spostamento mm	120,105	Spostamento mm	46,659
S.L. Salvaguardia Vita	NON VERIFICA	Numero passo precedente	25
PgaLV/g	0,090	PgaLV/Pga 10%	0,424
Rapporto q*=Fe/Fy	4,16	Asta3D Nro	14
Vita Residua (anni)	7,000	TrCLV	68,000
-----		(TrCLV/TDLV)^a	0,449
STATO LIMITE DI COLLASSO			
DOMANDA		CAPACITA'	
Spostamento mm	172,473	Spostamento mm	58,883
S.L. Collasso	NON VERIFICA	Numero passo precedente	28
PgaLC/g	0,104	PgaLC/Pga 5%	0,380
Rapporto q*=Fe/Fy	5,98	Asta3D Nro	14
Vita Residua (anni)	6,000	TrCLC	111,000
-----		(TrCLC/TDLC)^a	0,409

Se consideriamo lo SLV otteniamo un valore di $PGA_{SLV}=0.09g$ ed un periodo di ritorno $T_{rSLV}=68$ anni significa che la struttura subisce, i danni conseguenti, per i sismi che hanno un periodo di ritorno ≥ 68 anni e quindi con una frequenza media di $\lambda_{LV}=1/68=0.0147$.

Se si confronta la prestazione della nostra struttura in termini di frequenza annuale di raggiungimento dello stato limite di SLV rispetto ad una struttura nuova ($T_{rSLV}=475$ anni $\lambda_{LV}=1/475=0.0021$) avrò: $r=\lambda_L / \lambda_{LSV} = 0.0147/0.0021=7$; ovvero la frequenza media annuale di raggiungimento dello SLV (quindi di danneggiamento) è di **ben 7 volte** quella di una costruzione nuova realizzata nello stesso sito.

A questo punto calcolati i periodi di ritorno e quindi le frequenze media di superamento per ogni SL posso calcolare il PAM che risulterà pari a 1.68% e quindi una classe C; mentre avrò una classe D per la classificazione IS-V=42% :

SL	Tr(anni)	λ	Pga	CR	ISV%	42%	D
		0,00000		100			
SR		0,00901		100			
SLC	111	0,00901	0,104	80			
SLV	68	0,01471	0,09	50			
SLD	67	0,01493	0,087	15			
SLO	34	0,02941	0,066	7	PAM %	1,68	C
SLID		0,10000		0			



Il Metodo convenzionale per la classe di Rischio Sismico

Parametro Economico:
Classe PAM (Perdita Annua Media Attesa)
costo di riparazione dei danni prodotti dagli eventi sismici che si manifesteranno nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del costo di ricostruzione

Parametro Sicurezza:
Classe IS-V (Indice di sicurezza)
rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo che determina il raggiungimento dello Stato Limite di salvaguardia della Vita e quella prevista, nel sito, per un nuovo edificio

Perdita Media Annua attesa (PAM)	Classe PAM
PAM ≤ 0,50%	A ^{PAM}
0,50% < PAM ≤ 1,0%	B ^{PAM}
1,5% < PAM ≤ 2,5%	C ^{PAM}
2,5% < PAM ≤ 3,5%	D ^{PAM}
3,5% < PAM ≤ 4,5%	E ^{PAM}
4,5% < PAM ≤ 7,5%	F ^{PAM}
7,5% ≤ PAM	G ^{PAM}

La classe di Rischio si individua mettendo in relazione due parametri e privilegiando nel confronto la classe più bassa (più rischio)

Indice di Sicurezza	Classe IS-V
100% < IS-V	A ^{IS-V}
100% ≤ IS-V < 80%	B ^{IS-V}
80% ≤ IS-V < 60%	B ₂ ^{IS-V}
60% ≤ IS-V < 45%	C ^{IS-V}
45% ≤ IS-V < 30%	D ^{IS-V}
30% ≤ IS-V < 15%	E ^{IS-V}
IS-V ≤ 15%	F ^{IS-V}

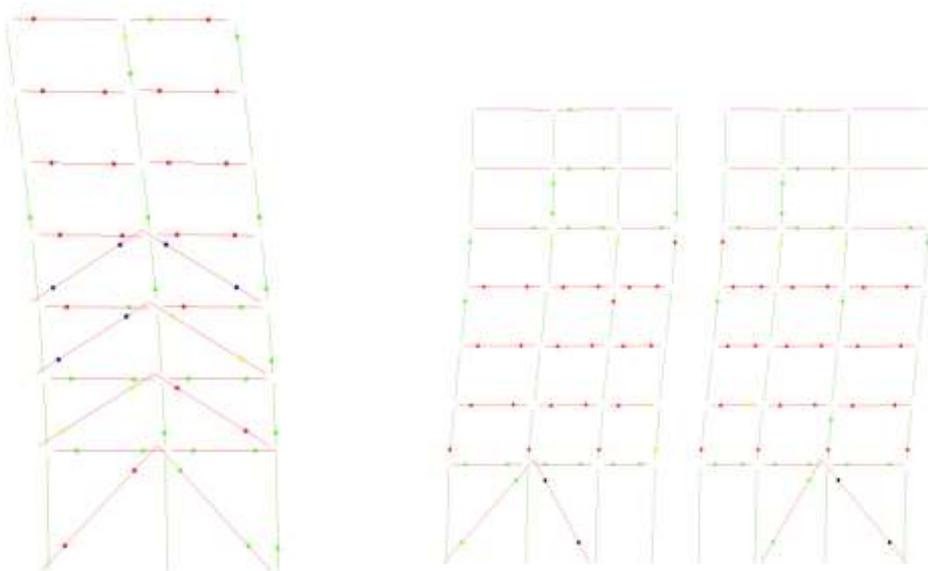
PROGETTAZIONE DELL'INTERVENTO STRUTTURALE

Desiderando di migliorare la struttura di almeno due classi sismiche e considerando le carenze strutturali rilevate è necessario prevedere sia interventi locali **di rinforzo dei nodi esterni** ma anche l'introduzione di un nuovo efficace sistema di controvento come ad esempio i controventi dissipativi ad instabilità impedita.



Controvento dissipativo ottenuto con una trave HEA ed in serie un dispositivo tipo BRAD (FIP)

Inseriamo nella struttura i controventi dissipativi e rieseguiamo l'analisi non lineare della struttura:

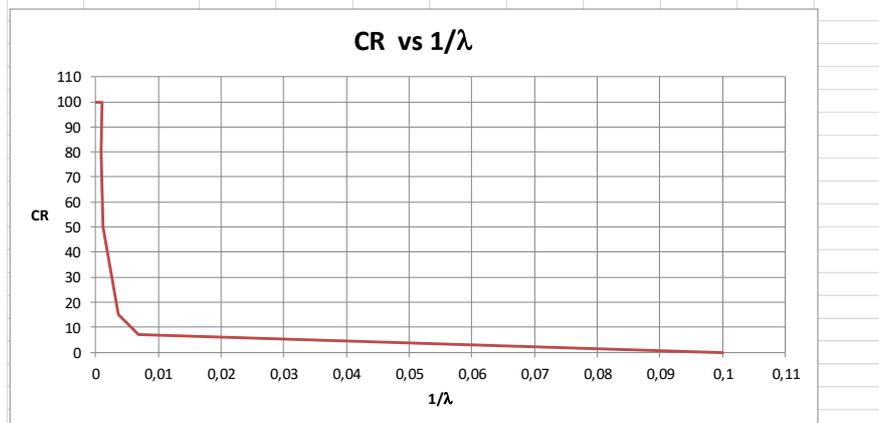


Meccanismi di danno struttura controventata

Come si vede dai meccanismi di danno grazie alla loro elevata rigidezza ed ad uno spostamento di snervamento molto basso il danno si concentra sui dispositivi proteggendo la struttura esistente.

Dall'analisi non lineare otteniamo i nuovi valori di PGA e di periodo di ritorno per i vari SL, quindi ricalcoliamo la classe della struttura migliorata che in questo caso risulterà adeguata con classe **sismica A**.

SL	$1/\lambda$	Pga	CR			Classe
SR1	0		100		ISV	A+
SR1	0,001		100			>100%
SLC	0,000823723	0,314	80			
SLV	0,001191895	0,265	50			
SLD	0,003610108	0,162	15			
SLO	0,006896552	0,121	7		PAM %	0,55
SLID	0,1		0			A



Prestazioni simiche e classificazione edificio migliorato/adequato

A conclusione di questo percorso possiamo redigere l'asseverazione prevista dall'art. 4 del DM n. 58 del 28/02/2017 come modificato dal DM 329 del 6 agosto 2020 dove vengono riportati la classe e gli indici IS-V e PAM sia dell'esistente che del progetto di adeguamento sismico con il Passaggio di due classi.

- la congruità della spesa ammessa a detrazione, stimata mediante il prezzario **Regionale Sicilia** pubblicato nell'anno **2020**, che ammonta ad un costo complessivo dell'intervento, comprensivo delle spese professionali, pari ad **€ 250.000**, di cui di lavori pari ad **€ 200.000**

Dalle analisi della costruzione emerge quanto segue :

STATO DI FATTO (prima dell'intervento):

- Classe di Rischio della costruzione⁽³⁾: A+ A B C D E F G
- Valore dell'indice di sicurezza strutturale (IS-V) ⁽⁴⁾ : **42%**
- Valore della Perdita Annua Media (PAM) ⁽³⁾ : **1,70%**
- Linea Guida, utilizzata come base di riferimento per le valutazioni, approvata con D.M. n. 58 del 28/02/2017; successivi aggiornamenti del D.M. n. 24 del 09/01/2020;
- Classe di rischio attribuita utilizzando il metodo: convenzionale semplificato

Si allega la relazione illustrativa dell'attività conoscitiva svolta e dei risultati raggiunti;

STATO CONSEGUENTE L'INTERVENTO PROGETTATO

- Classe di Rischio della costruzione^(5,6): A+ A B C D E F G
- Valore dell'indice di sicurezza strutturale (IS-V) ⁽³⁾ : **>100 %**
- Valore della Perdita Annua Media (PAM) ⁽³⁾ : **0,55 %**
- Linea Guida, utilizzata come base di riferimento per le valutazioni, approvata con D.M. n. 58 del 28/02/2017; successivi aggiornamenti del D.M. n. 24 del 09/01/2020;
- classe di rischio attribuita utilizzando il metodo: convenzionale semplificato
- estremi del Deposito/Autorizzazione al Genio Civile, ai sensi delle autorizzazioni in zona sismica, **n.123456 del 01/09/2020** ;
- si allega la relazione illustrativa dell'attività conoscitiva svolta e dei risultati raggiunti, inerenti la valutazione relativa alla situazione post-intervento.

EFFETTO DELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO CONSEGUITO MEDIANTE L'INTERVENTO PROGETTATO ⁽⁴⁾

Gli interventi strutturali progettati consentono una riduzione del Rischio Sismico della costruzione ed il passaggio di un numero di Classi di Rischio, rispetto alla situazione ante opera, pari a :

n. 0 classe n. 1 classe n. 2 o più classi

Esempio di compilazione della pag. 2 dell'asseverazione all. B DM 329 del 6 agosto 2020