



# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A5.1 | Definizione di metodi di studio per la valutazione del miglioramento dell'operatività strutturale degli edifici strategici per IOCT

Contributi per la realizzazione delle Linee Guida per il miglioramento dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza

**Versione 1.0**

Pubblicato in data 28/06/2019





# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività A5.1 | Definizione di metodi di studio per la valutazione del miglioramento dell'operatività strutturale degli edifici strategici per IOCT

**Contributi per la realizzazione delle Linee**

**Guida per il miglioramento dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza**

**Versione 1.0**

Pubblicato in data 28/06/2019



## PON GOVERNANCE E CAPACITA' ISTITUZIONALE 2014-2020

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO  
AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

### DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

#### Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Angelo Borrelli (responsabile), Lucia Palermo (supporto)

#### Unità di coordinamento

Fabrizio Brammerini, Angelo Corazza, Italo Giulivo, Agostino Miozzo, Francesca Romana Paneforte, Gianfranco Sorchetti

#### Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Marco Falzacappa, Antonio Gioia, Pietro Giordano, Antonella Gorini, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

#### Unità di raccordo DPC

Sara Babusci, Pierluigi Cara, Gianluca Garro, Valter Germani, Biagio Prezioso, Sara Petrinelli

#### Unità amministrativa e finanziaria

Pietro Colicchio, Francesca De Sandro, Maria Cristina Nardella, Ada Paolucci, Vincenzo Vigorita

#### Hanno fatto parte della struttura

Gabriella Carunchio, Luciano Cavarra, Biagio Costa, Lavinia Di Meo, Francesca Giuliani, Natale Mazzei, Paolo Molinari, Anna Natili, Roberto Oreficini Rosi, Marco Rossitto, Sisto Russo, Chiara Salustri Galli, Maurilio Silvestri

### REGIONI

#### Referenti

*Basilicata*: Liliana Santoro (coordinatore), Maria Carmela Bruno, Alfredo Maffei, Cinzia Fabozzi, Pietro Perrone, Claudio Berardi, Cosimo Grieco, Antonella Belgiovine, Guido Loperte, Donatella Ferrara; *Calabria*: Francesco Russo (coordinatore), Giuseppe Iritano, Luigi Giuseppe Zinno; *Campania*: Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Emilio Ferrara, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò, Vincenzo Minotta, Celestino Rampino; *Puglia*: Tiziana Bisantino, Marco Greco, Franco Intini, Antonio Mario Lerario (coordinatore), Pierluigi Loiacono, Giuseppe Pastore, Francesco Ronco, Isabella Trulli; *Sicilia*: Nicola Alleruzzo, Giuseppe Basile, Antonio Bruculeri, Aldo Guadagnino, Maria Nella Panebianco, Antonio Torrisi

#### Sono stati referenti

*Calabria*: Carlo Tansi, *Puglia*: Giuseppe Tedeschi

#### Commissione tecnica interistituzionale

Mauro Dolce (presidente); Laura Albani, Salvo Anzà, Walter Baricchi, Lorenzo Benedetto, Michele Brigante, Gennaro Capasso, Vincenzo Chieppa, Luigi D'Angelo, Lucia Di Lauro, Calogero Foti, Luca Lo Bianco, Giuseppe Marchese, Paolo Marsan, Mario Nicoletti, Mario Occhiuto, Ezio Piantedosi, Roberta Santaniello, Luciano Sulli, Carlo Tansi, Federica Tarducci, Carmela Zarra; *Segreteria*: Elda Catà, Carletto Ciardiello, Giuseppe Tiberti

#### Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

*Responsabile Unico del Procedimento*: Mario Nicoletti

*Direttore di Esecuzione Contrattuale*: Fabrizio Brammerini

*Referenti rischio sismico*: Fabrizio Brammerini, Sergio Castenetto, Daniele Spina, Antonella Gorini, Giuseppe Naso

*Referente rischio vulcanico*: Stefano Ciolli

*Referenti pianificazione di emergenza*: Antonio Gioia, Stefania Renzulli

#### CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

#### Struttura di coordinamento

Gianluca Carbone, Claudio Chiappetta, Francesco Fazio, Biagio Giaccio, Federico Mori, Edoardo Peronace, Federica Polpetta, Attilio Porchia, Andrea Rampa, Francesco Stigliano (coordinatore operativo)

#### Struttura tecnica

Angelo Anelli, Massimo Cesarano, Eleonora Cianci, Rosa Marina Donolo, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Angelo Gigliotti, Cora Fontana, Carolina Fortunato, Amerigo Mendicelli, Marco Nocentini, Giuseppe Occhipinti, Gino Romagnoli, Valentina Tomassoni, Vitantonio Vacca

#### Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatrice gestionale), Federica Polpetta (supporto gestionale), Francesco Petracchini

#### Revisori

Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

#### Supporto tecnico-amministrativo

Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

#### A5.1 - Definizione di metodi di studio per la valutazione del miglioramento dell'operatività strutturale degli edifici strategici per IOCT

**Responsabile DPC**: Daniele Spina

**Responsabile CNR-IGAG**: Federico Mori

#### A cura di

Angelo Anelli (CNR-IGAG), Giuseppe Occhipinti (CNR-IGAG), Vitantonio Vacca (CNR-IGAG).

versione colophon 28/06/2019

# Sommario

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PREMESSA</b>  | <b>8</b>  |
| <b>DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ ED OBIETTIVI</b>  | <b>10</b> |
| <b>1. Procedure per la stima del miglioramento delle curve di fragilità degli edifici strategici</b>   | <b>12</b> |
| 1.1 <i>Prestazioni richieste per edifici adeguati</i>  | 15        |
| 1.2 <i>Metodologia di Letteratura (M1)</i>   | 17        |
| 1.3 <i>Metodologia della Variazione delle frequenze proprie (M2)</i>   | 20        |
| 1.4 <i>Metodologia della Variazione dei parametri costituenti (M3)</i>   | 22        |
| 1.5 <i>Metodologia della Variazione delle performance dell'edificio (M4)</i>   | 29        |
| <b>2. Procedura per la quantificazione economica degli interventi di miglioramento dell'operatività degli edifici</b>                                      | <b>32</b> |
| 2.1 <i>Altri indicatori prestazionali dell'edificio</i>  | 34        |
| 2.1.1 <i>Indice PAM (perdita annuale media) e Classe di rischio sismico</i>  | 34        |
| 2.1.2 <i>Tempo di intervento</i>   | 36        |
| <b>3. Caso di studio</b>   | <b>37</b> |
| 3.1 <i>Curve di fragilità SMAV "reali" pre e post-intervento</i>   | 39        |
| 3.2 <i>Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M1 (di letteratura)</i>   | 42        |
| 3.3 <i>Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M2 (variazione delle frequenze proprie dell'edificio)</i>                                     | 43        |
| 3.4 <i>Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M3 (variazione dei parametri costituenti)</i>   | 44        |
| 3.5 <i>Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M4 (variazione delle performance dell'edificio) ***DA</i>                                     |           |
| <b>COMPILARE</b>   | 45        |
| 3.6 <i>Confronti tra metodologie</i>   | 45        |
| 3.7 <i>Valutazione economica</i>   | 46        |
| <b>4. Bibliografia (da completare)</b>   | <b>48</b> |
| Figura 1 - Assegnazione della classe di attuazione in funzione della fase espletata .....  | 9         |
| Figura 2 - Variazione della Curve di fragilità dell'edificio a seguito di un generico intervento di miglioramento strutturale. ....                        | 12        |
| Figura 3 - Variazione della curva di fragilità in funzione dei tre diversi livelli di intervento previsti dalle vigenti normative per le Costruzioni. .... | 13        |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4 - Le prestazioni dell'edificio sono lette direttamente dalle curve di fragilità "pre intervento": Le Probabilità di superamento di ciascun stato limite sono lette in corrispondenza dell'intensità sismica prevista da norma per quello SL. ....   | 15 |
| Figura 5 – Adeguamento sismico edificio strategico con Basso costo relativo delle misure migliorative della sicurezza. Le curve di fragilità post intervento devono rispettare i limiti indicati in Tabella 2 per ciascun SL. In figura sono riportate le curve allo SLD pre intervento e post intervento di adeguamento. Quest'ultima mostra una probabilità di raggiungimento e superamento dello SLD dell'1% in corrispondenza di $IM_{SLD}$ . .... | 16 |
| Figura 6 – Curve di fragilità SLD pre intervento, post intervento di miglioramento e post intervento di adeguamento di un edificio strategico. ....  | 16 |
| Figura 7 Determinazione delle probabilità post intervento tramite l'impiego di un fattore di scala SF che riducono le probabilità di fragilità pre intervento. Determinati tali punti con la metodologia di curve fitting riportata nei documenti <b>Attività A4.1, PUG F4.2 e SICF4.2</b> si costruisce la curva di fragilità post intervento. ....   | 17 |
| Figura 8 Dal documento di Caterino et al. (2018) [3]: Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio. ....  | 18 |
| Figura 9 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio. ....   | 18 |
| Figura 10 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio. ....  | 19 |
| Figura 11 Curve di fragilità post intervento per diversi SL. ....  | 19 |
| Figura 12 – Risultati analisi con modello SMAV pre-intervento (in rosso) con frequenze proprie identificate in situ e modello SMAV post-intervento (in verde) con frequenze scalate iterativamente fino ad ottenere, in corrispondenza di $IM_{SLi}$ una prefissata prestazione in termini di probabilità di superamento $P_{postintSLi}$ . ....   | 20 |
| Figura 13 – Risultati analisi con modello SMAV pre intervento (in rosso) con frequenze proprie identificate in situ e modello SMAV post-intervento (in verde) con frequenze scalate iterativamente fino ad ottenere, in corrispondenza di uno specifico $IM_{SLi}$ un prefissata prestazione in termini di probabilità di superamento. ....  | 21 |
| Figura 14 - Metodologia per la costruzione della costruzione delle curve di fragilità post-intervento. ....  | 22 |
| Figura 15 - Strutture di riferimento. ....   | 23 |
| Figura 16 - Metodologia utilizzata per definire i livelli di danno e generare le relative curve di fragilità. ....   | 24 |
| Figura 17 - Input sismico impiegato. ....  | 24 |
| Figura 18 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento $a_2$ . ....  | 25 |
| Figura 19 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento $a_2$ . ....  | 25 |
| Figura 20 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento $a_3$ . ....  | 25 |
| Figura 21 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento $a_1$ ( $K_I=0.49$ ). ....   | 26 |
| Figura 22 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento $a_2$ ( $K_I=0.62$ ). ....   | 27 |
| Figura 23 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento $a_3$ ( $K_I=0.27$ ). ....   | 27 |
| Figura 24 - Linea di tendenza di un generico intervento ( $K=0.26$ ). ....   | 28 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 25 – Risultati analisi SMAV pre-intervento (n rosso) e post-intervento (in verde) per intensità sismiche $IM_{SLi}$ previste per i diversi SL. I punti verdi sono ottenuti scalando i punti rossi avendo fissato a priori le probabilità di superamento $P_{postintSLi}$ .   | 29 |
| Figura 26 - Valori di Drift/h associati ai livelli di danno Ld (DS è il danno strutturale) per edifici in C.A. (Masi et al.2009 [13])   | 30 |
| Figura 27 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutte le intensità sismiche di interesse, e scalatura della nuvola di punti SMAV pre-intervento (in rosso). La nuvola di punti post-intervento (in verde) consente la costruzione delle curve di fragilità post-intervento dell'edificio garantendone le prestazioni prefissate ai vari SL. | 30 |
| Figura 28 – Nuvola di punti post-intervento (in verde) ottenuta scalando i risultati delle analisi con modello SMAV pre-intervento (in rosso). Da questa è possibile costruire le curve di fragilità post-intervento dell'edificio con prestazioni prefissate.  | 31 |
| Figura 29 – Determinazione della frequenza media annua di superamento in capacità dell'edificio $\lambda_{pre-int SLV}$ allo Stato Limite di salvaguardia della Vita. In basso è riportata la curva di pericolosità del sito in esame.  | 32 |
| Figura 30 – Stima dei costi di intervento normalizzati al costo di ricostruzione per interventi di adeguamento (full retrofit) e miglioramento (partial retrofit): (a) edifici costruiti prima del 1972; (b) edifici costruiti dopo il 1972.  | 33 |
| Figura 31 – Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni: Classi di Rischio Sismico   | 34 |
| Figura 32 – Costi normalizzati di ricostruzione per diversi SL e curva delle perdite medie annue attese.  | 35 |
| Figura 33 – procedura per la determinazione delle frequenze medie annue di accadimento per ogni SL partendo dalle curve di fragilità.   | 35 |
| Figura 34 – Confronto tra il PAM effettivo per l'edificio pre-intervento, e quello previsto per un edificio adeguato sismicamente.  | 36 |
| Figura 35 - Istituto scolastico De Gasperi – Battaglia del comune di Norcia   | 37 |
| Figura 36 - Edificio pre-intervento: pianta strutturale, sezione trasversale e prospetto longitudinale.   | 38 |
| Figura 37 – Edificio post-intervento: modello strutturale. In blu i controventi dissipativi metallici inseriti nelle maglie di telaio.  | 38 |
| Figura 38 – Edificio post-intervento: particolari strutturali dei controventi dissipativi inseriti nelle maglie di telaio.  | 38 |
| Figura 39 – Proprietà modali reali dell'edificio estratte da misure di rumore ambientale in situ prima e dopo l'intervento di adeguamento.  | 39 |
| Figura 40 – Scuola media di Norcia pre-intervento (in viola) e post-intervento (in giallo): Nuvola di punti drift,max-PGA, nuvola di punti IOPS-PGA, e curva di fragilità SMAV.   | 40 |
| Figura 41 – Valutazione delle performance dell'edificio per lo SLD  | 41 |
| Figura 42 – Valutazione delle performance dell'edificio allo SLD per la scossa del 30/10/2016 per la quale si è registrata una $PGA=0.41g$  | 41 |
| Figura 43 - Curva di pericolosità di sito per il comune di Norcia   | 42 |
| Figura 44 – Metodologia M1: andamento dei fattori di scala FS(TR) e curve di fragilità pre e post- intervento. Puntinata blu è riportata la curva di fragilità post-intervento “reale”.   | 43 |
| Figura 45 –Risultati analisi SMAV con modello pre-intervento (in viola) e post-intervento con frequenze amplificate del 100% (in verde). Sulla banda verticale in corrispondenza della $PGA=0.186g$ la probabilità di superamento dello SLD è del 2%. ...   | 43 |
| Figura 46 – Curva di fragilità SLD pre e post-intervento ottenuta con metodologia M2. Con tratto giallo continuo è riportata la curva post-intervento “reale”.  | 44 |
| Figura 47 - Curva di fragilità SLD pre e post-intervento ottenuta con metodologia M3. Con tratto giallo continuo è riportata la curva post-intervento “reale”.  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 48 – Curve di fragilità post-intervento di adeguamento: confronti tra le metodologie proposte. ....  | 45 |
| Figura 49 – Confronto tra le metodologie proposte.....  | 45 |
| Figura 50 - Determinazione della frequenza media annua di superamento in capacità dell'edificio $\lambda_{pre-int SLV}$ allo Stato<br>Limite di salvaguardia della Vita. .... | 46 |
| Figura 51 - Stima dei costi di intervento normalizzati al costo di ricostruzione. ....  | 47 |

## PREMESSA

L'attuale strategia di mitigazione del rischio sismico ai fini di protezione civile ("Standard minimi per la programmazione degli interventi in materia di riduzione del rischio ai fini di protezione civile - e di resilienza socio-territoriale" predisposti dal Dipartimento della protezione civile, con l'Agenzia per la coesione territoriale e concertato con la Struttura di Missione contro il dissesto idrogeologico per gli ambiti di competenza, 17 dicembre 2015), prevede un percorso metodologico ben determinato e la raccolta ed elaborazione di dati e informazioni che possono costituire la base di partenza per ulteriori politiche finalizzate alla mitigazione del rischio sismico, in particolare nell'ottica della sicurezza abitativa, della cura del territorio e delle aree urbane all'interno del Paese.

La strategia di riduzione del rischio sismico ai fini di protezione civile degli "standard minimi" è stata predisposta in coerenza con quanto previsto dall'Accordo di partenariato Italia 2014-2020 per quanto riguarda l'Obiettivo Tematico 5 (Promuovere l'adattamento al cambiamento climatico, la prevenzione e la gestione dei rischi). Essa è finalizzata ad assicurare un minimo livello standard di sicurezza del territorio.

Il processo attuativo è articolato in **sei fasi**:

1. Analisi dei fabbisogni e individuazione dei contesti territoriali
2. Analisi per tipo di rischio e definizione di scenari di rischio
3. Analisi ed eventuale aggiornamento dei Piani di emergenza
4. Valutazione operatività del sistema di risposta in caso di emergenza
5. Programmazione degli interventi di mitigazione delle condizioni di rischio e per il miglioramento dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza
6. Valutazione complessiva dell'efficacia degli interventi

Nella **fase 1** vengono quantificati i fabbisogni relativi all'obiettivo generale e vengono definiti i contesti territoriali su cui operare. La programmazione deve avere, come presupposto, cooperazione tra aree territoriali limitrofe (Contesti Territoriali), in cui le attività di pianificazione e conseguente gestione dell'emergenza si possono esercitare in modo unitario, o in cui vi sia una sostanziale omogeneità di gestione del rischio, inteso nelle sue fasi di previsione, prevenzione e mitigazione, nonché nelle sue attività di tipo strutturale e non strutturale. Le informazioni e i dati utilizzati fanno principalmente riferimento ai Sistemi Locali del Lavoro (Istat, 2011), alle Unioni di comuni e ai Centri Operativi Misti (Direttiva DPC n. 1099 del 31.03.2015).

Nella **fase 2**, nel caso del rischio sismico, vengono effettuati gli studi di Microzonazione Sismica (mappe di pericolosità sismica alla scala urbana). Le informazioni e i dati utilizzati riguardano cartografie geologiche e geomorfologiche e tutti i dati sul sottosuolo esistenti ed eventualmente rilevati appositamente, ai quali si aggiungo specifiche elaborazioni finalizzate alla quantificazione dei fenomeni di instabilità e di amplificazione delle aree in ambito urbano. Tutti i dati sono rilevati, elaborati e archiviati in formati standardizzati georiferiti (ICMS2008, Standard MS 4.0.1, SoftMS):

Nella **fase 3** gli studi di MS vengono recepiti nella pianificazione generale e nella pianificazione d'emergenza. I dati utilizzati in questa fase sono relativi ai piani di emergenza.

Nella **fase 4** viene effettuata una specifica analisi finalizzata alla valutazione dell'operatività del piano di emergenza, attraverso il rilevamento di tutti gli elementi "strutturali" che concorrono alla gestione dell'emergenza post-evento. Anche in questo caso il percorso è completamente standardizzato e i dati rilevati attraverso schede riguardano edifici strategici, aree di emergenza, infrastrutture, aggregati strutturali e unità abitative strutturali (Standard CLE 3.0.1, SoftCLE). Tutti gli elementi rilevati sono



georiferiti. Il sistema di analisi è denominato Condizione Limite per l’Emergenza (CLE). Specifiche valutazioni di operatività vengono effettuate sui singoli elementi strutturali, quali, ad esempio, gli edifici strategici.

Nella **fase 5**, in base alle valutazioni effettuate, vengono individuate le aree ed i contesti territoriali nell’ambito dei quali implementare le risorse disponibili per la realizzazione degli interventi, strutturali e non strutturali, per la mitigazione delle condizioni di rischio. Sulla base delle valutazioni effettuate per definire il grado di operatività del sistema di gestione dell’emergenza relativamente ai singoli rischi, viene predisposto un programma di interventi strutturali e non strutturali finalizzati al miglioramento dell’intero scenario territoriale. I dati utilizzati sono quelli derivanti dalle precedenti valutazioni e riguardano gli indici di operatività strutturale.

A conclusione delle fasi precedenti, viene attribuito a ciascun Contesto Territoriale un indicatore, che sintetizza il livello conoscitivo, il livello valutativo e quello attuativo di alcune attività di mitigazione dei rischi trattati. In sintesi, è possibile avere un quadro dello stato attuativo delle fasi, attribuendo ai territori una classe corrispondente alla fase realizzata, secondo lo schema riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

| FASE 1                                    | FASE 2                          | FASE 3      | FASE 4                     | FASE 5                    | Classe |
|---|---------------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|--------|
| Individuazione Contesti Territoriali (CT) |                                 |             |                            |                           | E      |
|   | Studi di Microzonazione Sismica |             |                            |                           | D      |
|   |                                 | Analisi CLE |                            |                           | C      |
|   |                                 |             | Valutazione operatività CT |                           | B      |
|   |                                 |             |                            | Programmazione Interventi | A      |

Figura 1 - Assegnazione della classe di attuazione in funzione della fase espletata

Il presente documento si colloca nell’ambito delle attività previste dalla Fase 5, riguardante la definizione di modelli e metodologie convenzionali per valutare il miglioramento dell’Operatività del sistema di gestione dell’emergenza di un **Contesto Territoriale** (si veda documento **Attività A4.1** *Definizione di metodi di ausilio alla valutazione della CLE e della operatività strutturale degli edifici*) e, in particolare, la valutazione del miglioramento dell’operatività strutturale dei singoli elementi costituenti il sistema.

## DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ ED OBIETTIVI

Come riportato nel documento **Attività A4.1** *Definizione di metodi di ausilio alla valutazione della CLE e della operatività strutturale degli edifici* l'operatività del sistema di gestione dell'emergenza viene valutata con il parametro definito Indicatore di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (**IOCT**). Il modello matematico del suddetto indice, di cui il documento **Attività A4.1**, consente l'analisi e l'assegnazione di un indicatore di contesto territoriale dipendente dall'operatività dei singoli elementi costituenti il sistema (edifici strategici, COC, Edifici interferenti, Infrastrutture di connessione).

La valutazione dell'operatività strutturale dei singoli elementi costituenti il sistema di gestione dell'emergenza avviene attraverso una **curva di probabilità di non operatività strutturale** – più semplicemente indicata come **curva di fragilità**.

Lo scopo della presente relazione e delle attività ad essa connesse è la definizione di modelli matematici e procedure standard per valutare il **miglioramento** di tali curve a seguito di **interventi tipologici sulle strutture**. La curva così generata diviene un oggetto computazionalmente non oneroso e facilmente implementabile nelle procedure stocastiche che vengono messe in atto per la determinazione del parametro definito Indicatore di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (**IOCT**).

Il miglioramento delle suddette curve si traduce nel miglioramento dell'Indicatore di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (**IOCT**) e dunque dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza.

Agli interventi tipologici sulle strutture ed alle conseguenti variazioni di operatività strutturale è altresì possibile associare dei costi parametrici per la **valutazione economica del miglioramento** delle strutture e, quindi, del sistema di gestione dell'emergenza.

La presente relazione cerca quindi di rispondere a due domande fondamentali:

- 1- Come modificare le curve di fragilità degli edifici strategici senza sostituirsi al progettista, quindi senza sapere quale specifico intervento di miglioramento verrà posto in essere;
- 2- Quantificare economicamente l'intervento di incremento di operatività dell'edificio.

L'enorme fabbisogno economico necessario per l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti (loro allineamento ai livelli di sicurezza imposti alle nuove costruzioni) pone una questione fondamentale: in quale modo, in una situazione di risorse limitate, migliorare il livello di operatività del sistema di gestione dell'emergenza attraverso gli interventi sui singoli elementi costituenti il sistema (edifici strategici, COC, Edifici interferenti, Infrastrutture di connessione).

Dunque, il presente documento rappresenta altresì un contributo propedeutico alla definizione di un algoritmo simulativo in grado di **ottimizzare** l'Indicatore di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (**IOCT**) in funzione dei costi d'intervento, divenendo un utile strumento decisionale per la selezione del più vantaggioso scenario di investimento del budget.

Degli elementi costituenti il sistema di gestione dell'emergenza il presente documento tratta del miglioramento e della sua valutazione economica degli edifici di cui si possiedono le curve di fragilità di cui al documento **Attività A4.1** (edifici strategici e COC). Non sono oggetto di questa relazione gli edifici interferenti e le infrastrutture di connessione.

Quale sia in un'ottica di miglioramento dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza (e di prevenzione e riduzione del rischio sismico in generale) a fronte di risorse limitate, il livello minimo di operatività del Contesto Territoriale da conseguire

attraverso interventi sulle strutture esistenti (edifici strategici, COC, Edifici interferenti, Infrastrutture di connessione) non è oggetto di questo documento.

Nell'ambito dell'attività A5.1 sono stati trattati diversi aspetti riguardanti le Linee guida per il miglioramento dell'operatività del sistema di gestione dell'emergenza che verranno trattati nel presente documento, per semplicità, in tre diversi capitoli come di seguito indicato:

- Capitolo 1: Procedure per la stima del miglioramento delle curve di fragilità degli edifici strategici;
- Capitolo 2: Procedure per la valutazione economica del miglioramento degli edifici strategici;
- Capitolo 3: Caso studio.

# 1. Procedure per la stima del miglioramento delle curve di fragilità degli edifici strategici

L'operatività degli edifici è valutata tramite l'impiego della curva di fragilità ottenuta con **metodologia SMAV** [1]. Facendo riferimento ai livelli di danno presenti in *European Macroseismic Scale 1998* (EMS-98) [2], per gli edifici strategici si impiega la curva relativa al danno moderato (**D2**) avendo come obiettivo quello di valutarne la capacità di conservare l'operatività a seguito dell'evento sismico, per gli edifici interferenti si impiega la curva relativa al collasso (**D5**).

Si rimanda ai documenti **PUG F.4.2** e **SICF.4.2** per una maggiore e più esauriente trattazione dell'approccio di calcolo delle curve di fragilità secondo il metodo SMAV. Inoltre, il metodo di calcolo delle curve è analizzato nel documento PUG F.4.2 e che il metodo per la generazione delle forme modali complete necessarie per il trattamento dell'edificio tramite modello SMAV è descritto dal documento SIC F.4.2.

La Curva di Fragilità dell'edificio, rappresentandone una vera e propria Carta d'Identità di Vulnerabilità Sismica, dipende solo ed esclusivamente da caratteristiche intrinseche dello stesso. Qualesivoglia intervento strutturale di miglioramento sull'edificio, riducendone la vulnerabilità, non può che ripercuotersi nella variazione della curva ottenuta con metodologia SMAV.

Lo scopo del presente capitolo è capire modificare le curve di fragilità dell'edificio senza sostituirsi al progettista, cioè senza sapere quale specifico intervento di miglioramento verrà posto in essere sull'edificio (Figura 2).

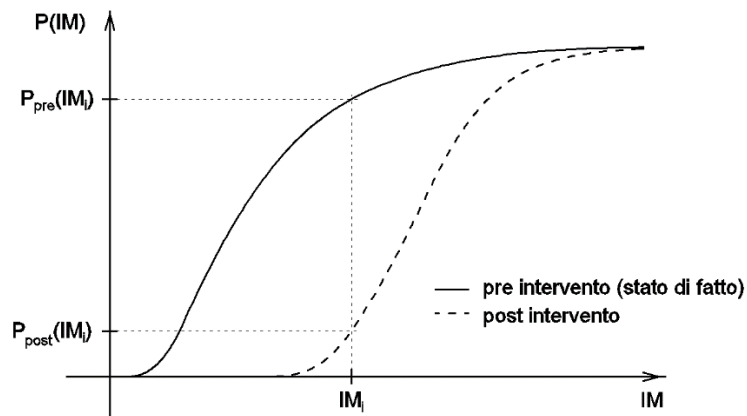


Figura 2 - Variazione della Curve di fragilità dell'edificio a seguito di un generico intervento di miglioramento strutturale.

Indipendentemente dallo specifico intervento che il progettista sceglierà per l'edificio in esame, i differenti livelli di sicurezza conseguibili con interventi sulle costruzioni esistenti sono contemplati e ben descritti dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni [3] (nel seguito NTC) che prevedono tre diversi **livelli di intervento**, finalizzandoli al conseguimento di prestazioni o **livelli di sicurezza** progressivamente crescenti, e precisamente:

- **riparazione o rafforzamento locale**, che interessa elementi isolati e comunque comporta (almeno a livello locale) un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti;

- **miglioramento**, che prevede il conseguimento di un livello di sicurezza antisismica (globale, cioè riferito all'intera costruzione) superiore a quello posseduto dalla costruzione prima dell'intervento;
- **adeguamento**, che prevede il conseguimento di un livello di sicurezza antisismica (globale) pari o superiore a quello richiesto alle nuove costruzioni.

Dei tre livelli d'intervento, solo l'adeguamento fissa una precisa soglia alla sicurezza antisismica (globale e locale) da conseguire, mentre al miglioramento non è richiesto di conseguire un prefissato livello minimo di sicurezza antisismica, ma solo un incremento rispetto alla sicurezza antisismica (globale e locale) precedentemente posseduta. Il rafforzamento locale, utilizzato per conseguire un incremento della sicurezza di singoli elementi strutturali e/o l'eliminazione di alcuni meccanismi di danno, richiede infine la valutazione dell'incremento locale, ma non la valutazione di tale incremento a livello globale.

Dunque, più in dettaglio, si descrivono le procedure che consentono di modificare le curve di fragilità dell'edificio in funzione dei livelli di intervento che possono, da normativa, interessare l'edificio (Figura 3).

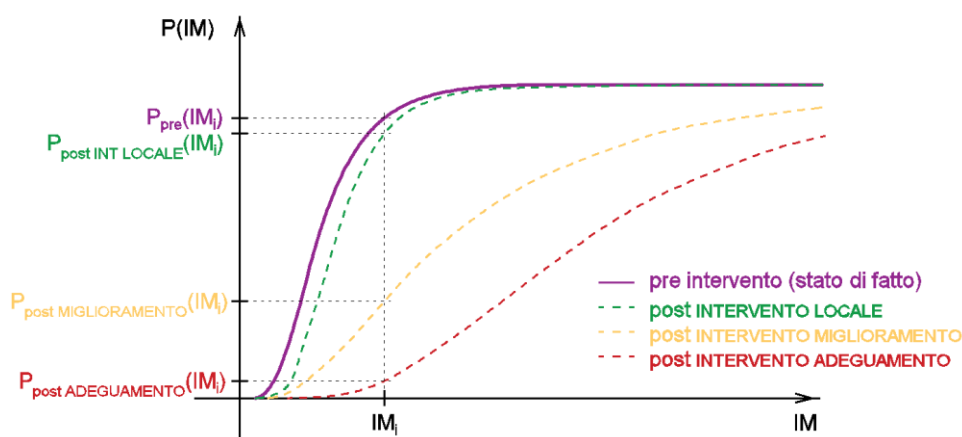


Figura 3 - Variazione della curva di fragilità in funzione dei tre diversi livelli di intervento previsti dalle vigenti normative per le Costruzioni.

Con l'obiettivo sopra dichiarato sono presentate ed illustrate le seguenti quattro differenti metodologie:

- METODOLOGIE DI LETTERATURA: in particolare quella proposta da Caterino et al (2018) [4] basata sulla manipolazione numerica delle curve di fragilità dell'edificio ante intervento;
- METODOLOGIA DELLA VARIAZIONE DELLE FREQUENZE PROPRIE DELL'EDIFICIO: basata sulla modifica delle frequenze proprie di vibrazione dell'edificio ante intervento;
- METODOLOGIA DELLA VARIAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUENTI: basata sulla manipolazione numerica dei parametri costituenti (media e deviazione standard) le curve di fragilità dell'edificio ante intervento;
- METODOLOGIA DELLA VARIAZIONE DELLE PERFORMANCE DELL'EDIFICIO: basata sulla manipolazione numerica dei risultati delle analisi SMAV necessarie per costruire le curve di fragilità ante intervento (documenti **Attività A4.1, PUG F4.2 e SICF4.2**).

Le quattro metodologie indagate non impiegano modelli numerici dell'edificio dopo l'intervento, e consentono di costruire le curve di fragilità dell'edificio a partire da quelle ante intervento (stato di fatto) per i diversi stati limite. Queste ultime costituiscono

dunque il dato di ingresso necessario per ciascuna metodologia. Le curve di fragilità ante intervento sono ricavate con metodologia di cui ai documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2**.

Le metodologie sono elencate in Tabella 1. Nella stessa sono indicate le principali caratteristiche, nonché le curve di output fornite dalle metodologie per i differenti livelli di intervento. Il simbolo di spunta (✓) indica che il metodo fornisce quell'output; in caso contrario è usato il simbolo di divieto (⊖).

| ID metodologia  | Caratteristiche principali  |   | input   | output   |
|---|---|---|---|--|
| 1- <b>DI LETTERATURA</b><br>(Caterino, Azmoodeh, Manfredi 2018) | Manipolazione numerica delle curve di fragilità   | * Non impiegano modelli numerici dell'edificio dopo l'intervento;<br><br>** non è necessario definire il tipo di intervento, ma solo il <b>LIVELLO DI INTERVENTO</b> (NTC 18) | Curve di fragilità ante intervento (SMAV – attività A4.1) | <b>1- CURVE DI FRAGILITA'</b><br>* Intervento Locale ⊖<br>* Miglioramento ✓<br>* Adeguamento ✓<br><br><b>2- COSTO INTERVENTO</b><br><br><b>3- ALTRI INDICATORI</b><br>* Indice PAM<br>* Classe di rischio<br>* Tempo di intervento |
| 2- <b>VARIAZIONE DELLE FREQUENZE PROPRIE DELL'EDIFICIO</b>      | Manipolazione numerica modello SMAV dell'edificio (variano le frequenze proprie, invarianza delle forme modali) |   |   |  |
| 3- <b>VARIAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUENTI</b>                  | Manipolazione numerica delle curve di fragilità   |   |   |  |
| 4- <b>VARIAZIONE DELLE PERFORMANCE DELL'EDIFICIO</b>            | Manipolazione numerica della nuvola di punti SMAV che genera le curve di fragilità                              |   |   |  |

Tabella 1 - Metodologie indagate per il Miglioramento delle Curve di Fragilità degli edifici.

Nei paragrafi successivi, dapprima, sono descritte le performance di riferimento per edifici adeguati, ossia per edifici rispettosi di tutte le verifiche di sicurezza previste dalle NTC, successivamente sono descritte le metodologie nel loro inquadramento teorico per la stima del miglioramento dell'operatività. In seguito, è mostrata la validazione delle procedure attraverso il confronto con un caso studio reale del quale si possiedono le curve di fragilità "reali", ossia costruite con metodologia SMAV, prima e dopo l'intervento di adeguamento.

## 1.1 Prestazioni richieste per edifici adeguati

Nell'ambito di questo documento la valutazione dell'adeguatezza di un edificio esistente alle prestazioni richieste dalla norma, consiste nella quantificazione della probabilità di superamento di uno o più stati limite (SL), ed il confronto di tali valori con i requisiti minimi di affidabilità previsti dalle NTC [3]. I primi sono forniti direttamente dalle curve di fragilità dell'edificio in corrispondenza delle intensità sismiche previste ai diversi SL (Figura 4).

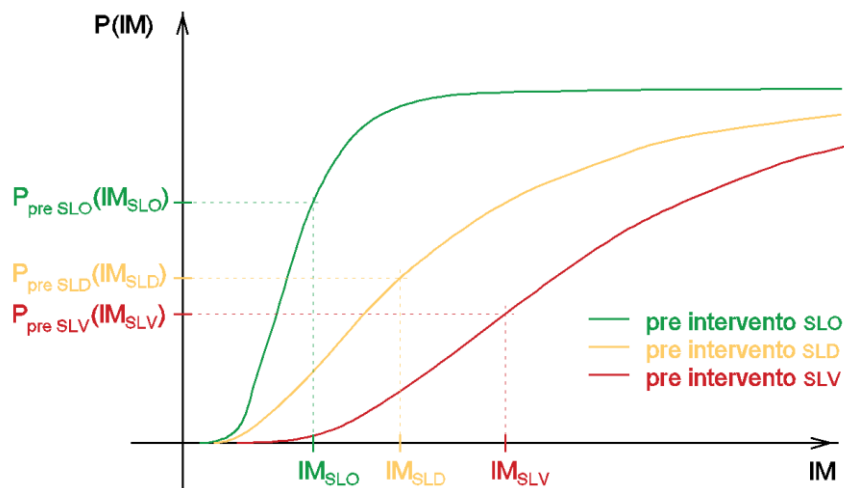


Figura 4 - Le prestazioni dell'edificio sono lette direttamente dalle curve di fragilità "pre intervento": Le Probabilità di superamento di ciascun stato limite sono lette in corrispondenza dell'intensità sismica prevista da norma per quello SL.

In merito ai requisiti minimi di affidabilità previsti per gli edifici, si fa riferimento a quanto indicato nel D.M. 14 settembre 2005 Norme tecniche per le Costruzioni [5]. Questo, alle tabelle 2.5.II e 2.5.III, indica i limiti superiori delle probabilità di superamento in funzione delle conseguenze del verificarsi dell'evento sfavorevole (SLU, SLE) e del "costo relativo (Alto, Basso) di misure migliorative della sicurezza", inteso come rapporto tra il costo necessario a migliorare il livello di sicurezza della costruzione ed il costo di costruzione. Si rimanda al documento [5] per una maggiore e più esauriente trattazione dell'approccio di calcolo di tali limiti, che sono sinteticamente riportati nella seguente Tabella 2.

|   | Limite superiore della probabilità di superamento $P_c$ |  |   |  |
|---|---|--|---|--|
|   | SLE   |  | SLU   |  |
| Costo relativo di misure migliorative della sicurezza | Edifici senza funzioni pubbliche e sociali essenziali   | Edifici con funzioni pubbliche o strategiche | Edifici senza funzioni pubbliche e sociali essenziali | Edifici con funzioni pubbliche o strategiche |
| Alto  | $\leq 10\%$   | $\leq 10\%$                                  | $\leq 0.01\%$   | $\leq 0.001\%$                               |
| Basso   | $\leq 1\%$  | $\leq 1\%$                                   | $\leq 0.001\%$  | $\leq 0.0001\%$                              |

Tabella 2 – Prestazioni per edifici adeguati espresse attraverso i Limiti superiori delle probabilità di superamento per diversi SL

In termini di un'analisi costi/benefici i maggiori costi solitamente previsti per la riabilitazione di strutture esistenti, portano per queste ad accettare livelli di affidabilità minori. Per gli SLE, il cui raggiungimento per definizione non coinvolge la perdita di vite umane, la reversibilità o irreversibilità del fenomeno indesiderato ha molta influenza. I limiti di affidabilità dipendono più direttamente dal problema specifico e, a puro titolo di esempio, vengono forniti i limiti prima indicati. Nella presente relazione si farà riferimento ai limiti indicati in Tabella 2 per indicare le prestazioni di un edificio adeguato.

A titolo di esempio nella seguente Figura 5 si riportano le curve di fragilità allo SLD di un edificio strategico prima e dopo un generico intervento di adeguamento. Indipendentemente dalla natura dell'intervento posto in essere è vincolata la prestazione dell'edificio adeguato, ossia è vincolato il punto di passaggio della curva di fragilità post intervento in corrispondenza dell'intensità sismica prevista per quello SL.

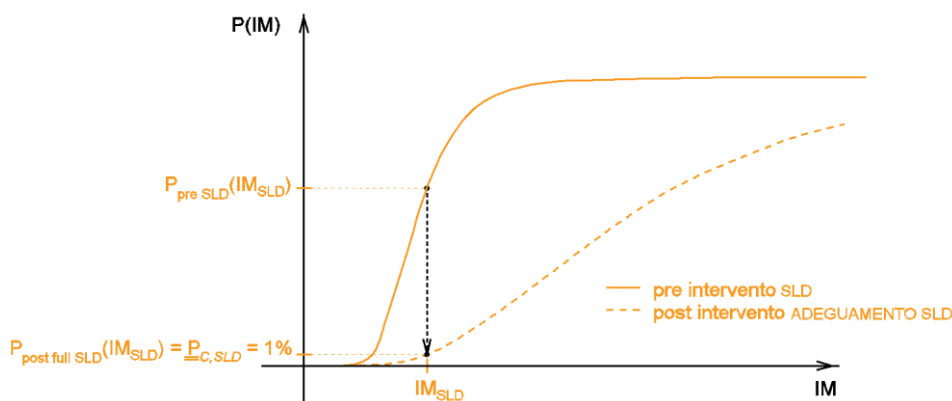


Figura 5 – Adeguamento sismico edificio strategico con Basso costo relativo delle misure migliorative della sicurezza. Le curve di fragilità post intervento devono rispettare i limiti indicati in Tabella 2 per ciascun SL. In figura sono riportate le curve allo SLD pre intervento e post intervento di adeguamento. Quest'ultima mostra una probabilità di raggiungimento e superamento dello SLD dell'1% in corrispondenza di  $IM_{SLD}$ .

In merito agli interventi di miglioramento sismico, in accordo con quanto indicato in [4], le prestazioni possono determinarsi come aliquota prestabilita di quella relativa all'intervento di adeguamento (Figura 6), attraverso la seguente relazione:

$$(1) \quad P_{post\ partial_{SLi}}(IM_{SLi}) = P_{post\ full\ SLi}(IM_{SLi}) + \frac{P_{pre\ SLi}(IM_{SLi}) - P_{post\ full\ SLi}(IM_{SLi})}{\alpha}$$

dove:  $P_{post\ partial_{SLi}}(IM_{SLi})$  è la probabilità di superamento dello SLi post intervento di miglioramento;

$P_{post\ full_{SLi}}(IM_{SLi})$  è la probabilità di superamento dello SLi post intervento di adeguamento;

$P_{pre_{SLi}}(IM_{SLi})$  è la probabilità di superamento dello SLi pre intervento;

$0 < \alpha < 1$  è l'aliquota miglioramento da assegnare preventivamente.

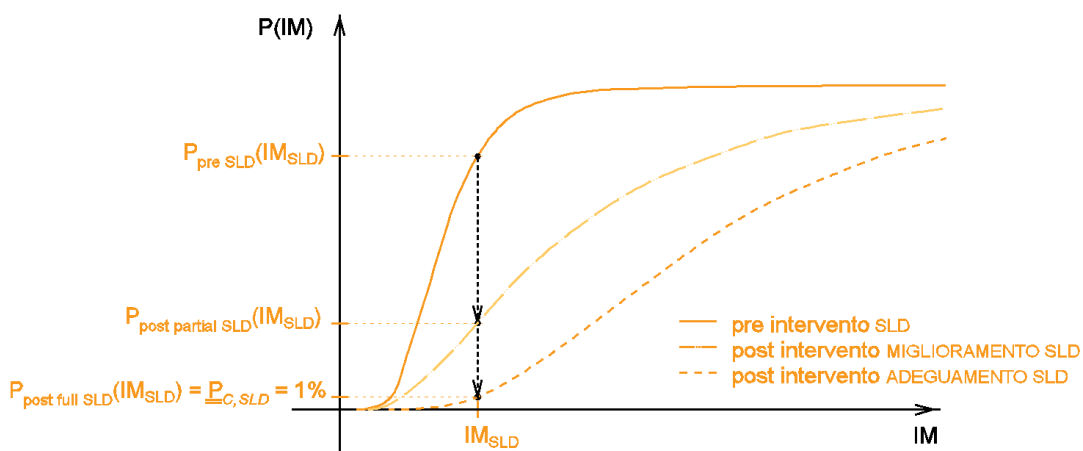


Figura 6 – Curve di fragilità SLD pre intervento, post intervento di miglioramento e post intervento di adeguamento di un edificio strategico.



## 1.2 Metodologia di Letteratura (M1)

Si rimanda al documento *Seismic Risk Mitigation for a Portfolio of Reinforced Concrete Frame Buildings through Optimal Allocation of a Limited Budget* [4] degli autori Nicola Caterino, Behnam M. Azmoodeh e Gaetano Manfredi per una più esauriente trattazione del metodo di calcolo delle curve di fragilità post intervento.

Tali curve vengono determinate manipolando numericamente le curve di fragilità pre intervento dell'edificio tramite l'impiego di un fattore di scala SF applicato a ciascuno dei punti ai quali vengono ancorate le curve ante intervento (Figura 7).

Nella Figura 7 con IM è indicato il generico parametro di misura dell'intensità sismica, con  $IM_{SLi}$  il parametro di misura dell'intensità sismica previsto da norma per l'*i*-esimo Stato Limite, con  $P_{pre\ int\ SLi}(IM_{SLi})$  e  $P_{post\ int\ SLi}(IM_{SLi})$  le probabilità di fragilità in corrispondenza dell'intensità  $IM_{SLi}$  rispettivamente pre e post intervento.

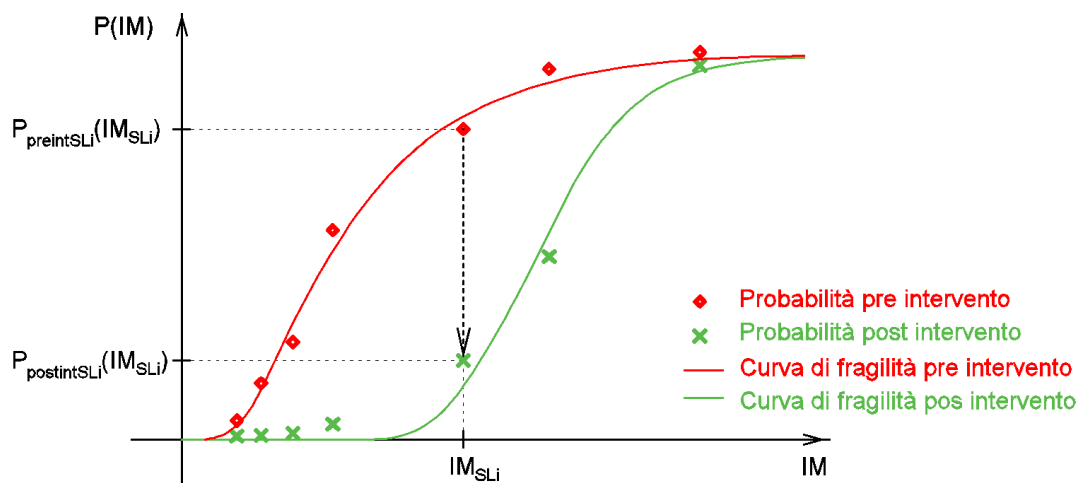


Figura 7 Determinazione delle probabilità post intervento tramite l'impiego di un fattore di scala SF che riducono le probabilità di fragilità pre intervento. Determinati tali punti con la metodologia di curve fitting riportata nei documenti *Attività A4.1*, *PUG F4.2* e *SICF4.2* si costruisce la curva di fragilità post intervento.

Si assume che il fattore di scala SF non sia costante, ma vari con legge lineare del periodo di ritorno TR dell'azione sismica (Figura 8 e Figura 8). Il concetto di base è che dopo l'intervento, il livello di danneggiamento atteso si riduca per eventi sismici di intensità previste dalla norma per i diversi SL, sebbene Livelli di danneggiamento elevati siano ancora probabili per eventi più rari. Dunque in corrispondenza degli eventi previsti ai diversi SL il fattore di scala abbatte la curva ai valori delle performance prestabiliti secondo la relazione (2):

$$(2) \quad P_{post\ int\ SLi}(IM_{SLi}) = SF(IM_{SLi}) \cdot P_{pre\ int\ SLi}(IM_{SLi})$$

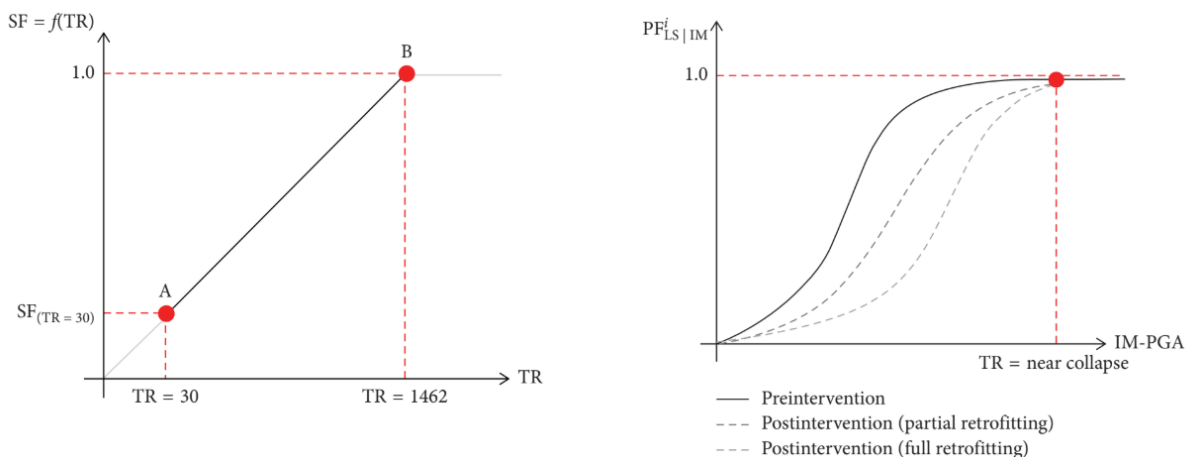


Figura 8 Dal documento di Caterino et al. (2018) [3]: Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio.

Per determinare la legge di variazione del fattore di scala SF con i periodi di ritorno TR dell'azione sismica è necessario determinare i punti A e B del grafico riportato in Figura 8. Per ogni edificio il punto A fornisce il fattore di scala in corrispondenza del primo TR = 30 anni fissato dalla normativa. Il punto B fornisce il fattore di scala in corrispondenza del TR associato allo SLC (per edifici in classe d'uso III, TR<sub>SLC</sub>=1462 anni), per il quale si assume un fattore di scala unitario. Data la natura cumulativa della funzione di fragilità, per TR superiori chiaramente il fattore di scala resta costantemente pari ad 1 (Figura 9). Dunque fissando la performance dell'edificio ai vari SL dopo l'intervento, si determina il valore da assegnare al fattore di scala attraverso la (2):

$$(2) \quad SF(IM_{SLi}) = P_{post\ int_{SLi}}(IM_{SLi}) / P_{pre\ int_{SLi}}(IM_{SLi})$$

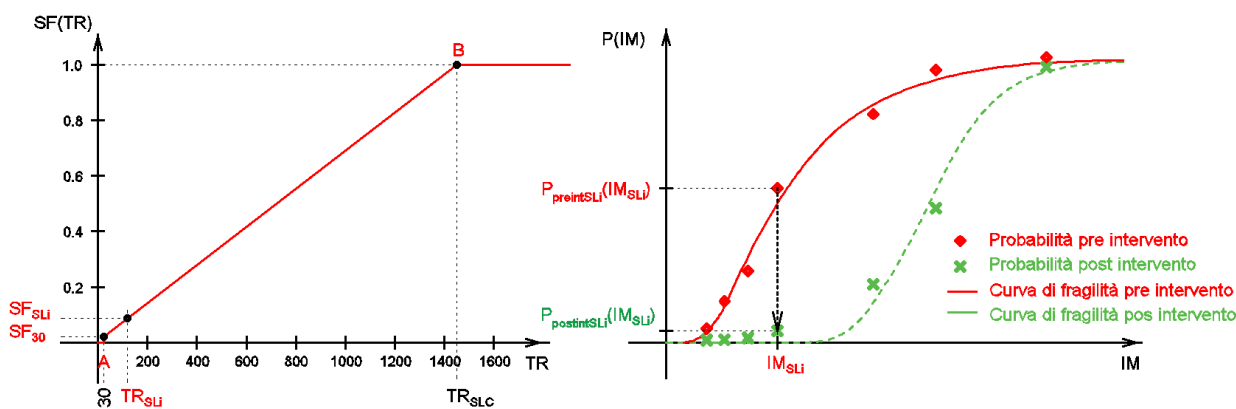


Figura 9 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio.

Per la natura cumulativa della curva di fragilità, il fattore di scala SF non può attingere a valori negativi; per tanto l'eventuale presenza di valori negativi della regressione lineare al punto A della legge SF(TR), viene considerata costantemente nulla (Figura 10).

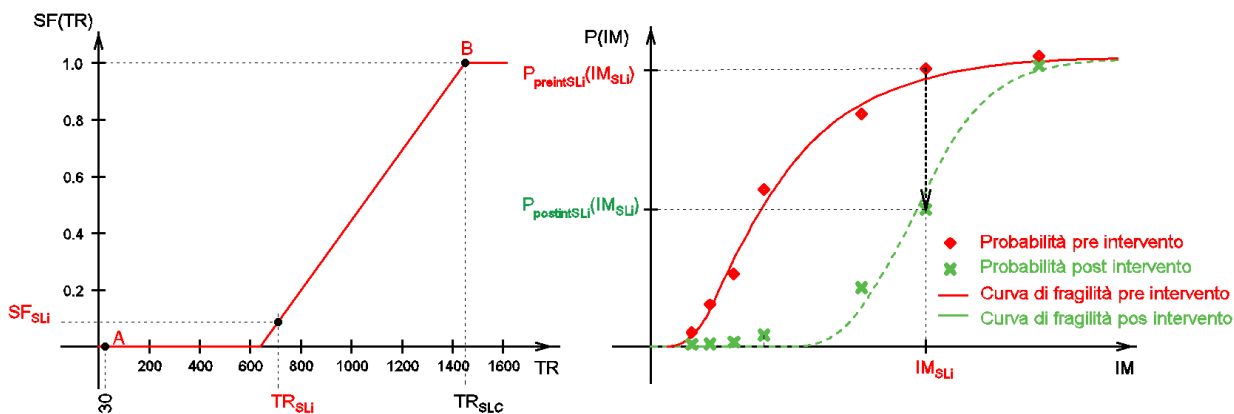


Figura 10 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutti i periodi di ritorno TR dell'azione sismica per la costruzione delle curve di fragilità post intervento dell'edificio

Determinati in questo modo i punti rappresentativi delle curve post intervento, con la metodologia di curve fitting riportata nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2** viene costruita la curva di fragilità post intervento per ciascuno SL (Figura 11). Tale metodologia permette di ottenere le curve di fragilità post intervento dell'edificio con un basso onere computazionale non essendo necessarie ulteriori analisi numeriche, ma esclusivamente una manipolazione analitica delle curve pre-intervento.

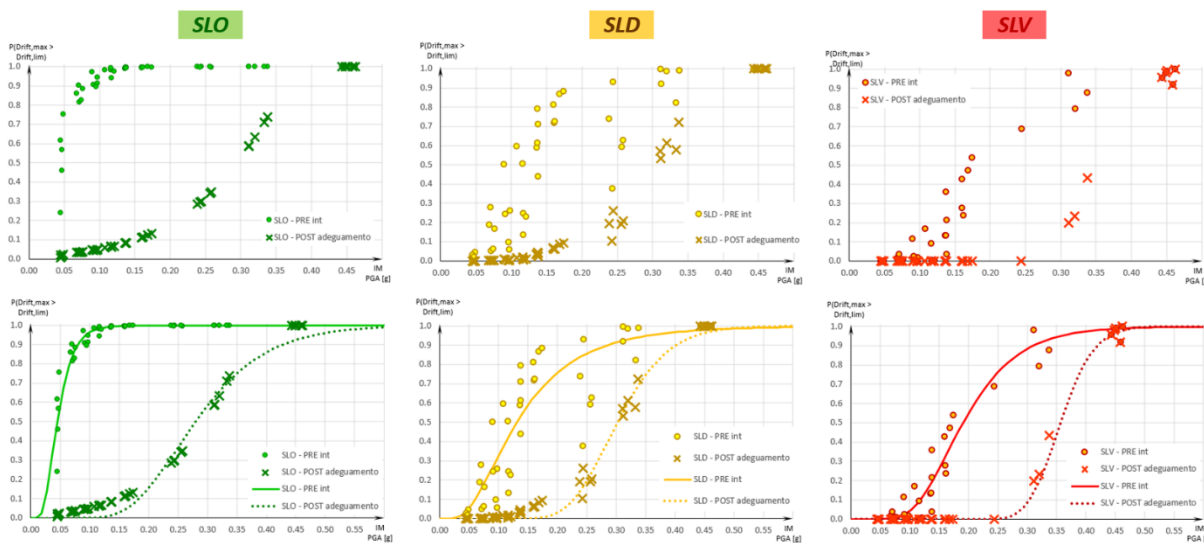


Figura 11 Curve di fragilità post intervento per diversi SL

Riassumendo sinteticamente, la metodologia si articola nelle seguenti quattro fasi:

- FASE 1: Costruzione curve di fragilità pre-intervento per lo SL di interesse;
- FASE 2: Definizione della performance dell'edificio post-intervento per lo SL di interesse;
- FASE 3: Calcolo dei fattori di scala FS(TR) che garantiscono la performance prefissata;
- FASE 4: Manipolazione numerica delle curve di fragilità pre-intervento ed ottenimento delle curve post-intervento.

### 1.3 Metodologia della Variazione delle frequenze proprie (M2)

La metodologia della *Variazione delle frequenze proprie dell'edificio* permette la costruzione delle curve di fragilità post-intervento impiegando il modello SMAV dell'edificio pre-intervento opportunamente manipolato.

La metodologia riportata ai documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2** consente la costruzione delle curve di fragilità di un qualsivoglia edificio del quale si possiede il modello SMAV. Appare evidente che, qualora si possedesse il modello SMAV dell'edificio post-intervento sarebbe possibile la costruzione delle curve di fragilità post-intervento.

L'idea presente nella metodologia qui presentata è quella di ricavare artificiosamente il modello SMAV post-intervento dell'edificio manipolando opportunamente il modello SMAV pre-intervento dell'edificio (per ipotesi già in possesso). Nello specifico, restando fedeli al principio di invarianza delle forme modali sancito nella metodologia SMAV, il modello SMAV post-intervento possiede le seguenti caratteristiche:

- Forme modali uguali a quelle dell'edificio pre-intervento;
- Frequenze proprie di oscillazione modificate con un medesimo fattore di scala.

Rimandando ai documenti di letteratura Dolce et al. (2016) [1], Mori et al. (2015) [6], Acunzo et al. (2016) [7], Acunzo et al. (2018) [8], per una maggiore trattazione della metodologia SMAV, si ricorda brevemente che tale modello si basa sull'impiego delle proprietà modali dell'edificio (Frequenze proprie di oscillazione e forme modali) estratte attraverso misure di identificazione dinamica. Per tener conto del comportamento non lineare della struttura durante un terremoto si applica una riduzione delle frequenze proprie rispetto a quelle identificate in situ impiegando delle specifiche curve di abbattimento. In questo processo le forme modali restano invariate.

La variazione delle frequenze proprie comporta una variazione dei drift,max registrati durante le analisi e dunque una variazione delle prestazioni globali dell'edificio rispetto a quelle pre-intervento. La variazione delle frequenze avviene iterativamente fino a quando prefissate performance dell'edificio vengono soddisfatte.

Nella Figura 12 è riportata a titolo di esempio il risultato della variazione delle frequenze proprie su un generico modello SMAV nel quale si è vincolata la probabilità di superamento di uno SL in corrispondenza dell'intensità sismica ad esso associata. In questo modo si è certi che la curva di fragilità costruita per quello SL sarà rispettosa delle prestazioni fissate a priori (Figura 13).

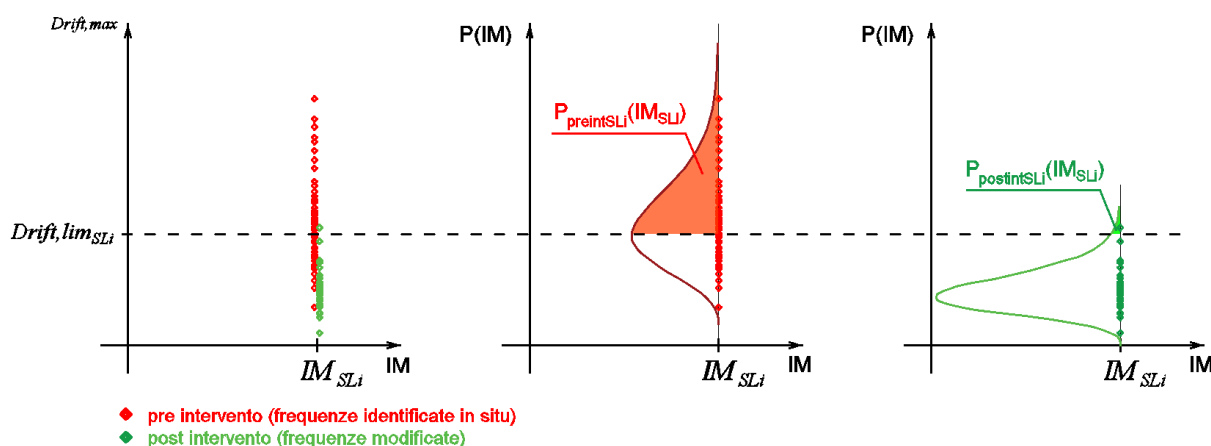


Figura 12 – Risultati analisi con modello SMAV pre-intervento (in rosso) con frequenze proprie identificate in situ e modello SMAV post-intervento (in verde) con frequenze scalate iterativamente fino ad ottenere, in corrispondenza di  $IM_{SLi}$  una prefissata prestazione in termini di probabilità di superamento  $P_{postintSLi}$ .

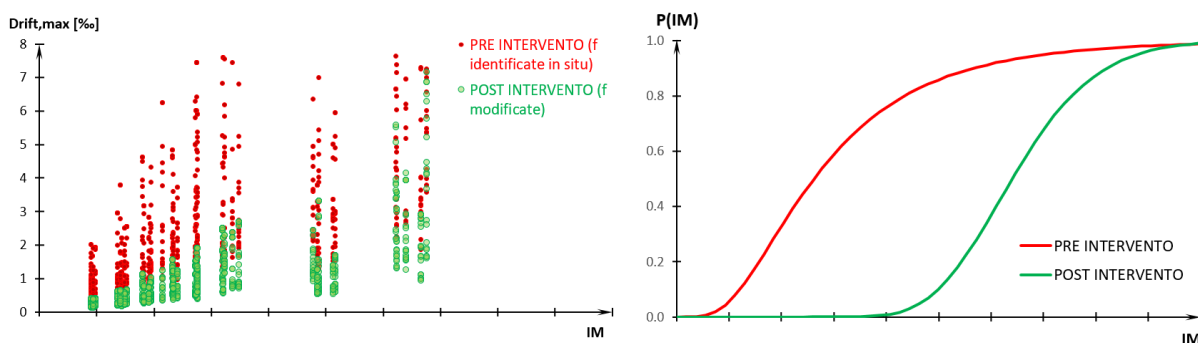


Figura 13 – Risultati analisi con modello SMAV pre intervento (in rosso) con frequenze proprie identificate in situ e modello SMAV post-intervento (in verde) con frequenze scalate iterativamente fino ad ottenere, in corrispondenza di uno specifico  $IM_{SLi}$  una prefissata prestazione in termini di probabilità di superamento.

E' doveroso sottolineare che l'entità della variazione delle frequenze è del tutto svincolata da qualsivoglia ipotesi di intervento che il tecnico progettista proporrà per l'edificio in esame. Questo coerentemente con gli obiettivi generali di questa attività come indicato nelle premesse del presente documento. Le frequenze post-intervento impiegate in questa metodologia dunque non sono indicative di alcuna reale variazione delle proprietà intrinseche della struttura, ma sono esclusivamente funzionali al raggiungimento di prefissate performance che, in caso di adeguamento/miglioramento sismico l'edificio dovrà necessariamente garantire. Altresì è importante osservare che, in alcuni casi, possono registrarsi variazioni delle frequenze dell'ordine del 100% che, non essendo accompagnate da modifiche delle forme modali, rendono il modello SMAV post-intervento un mero strumento numerico del tutto svincolato dalla realtà fisica del problema, e che non può essere inteso in alcun modo come indicazione sulla natura dell'intervento da porre in essere sull'edificio.

Il limite di questa metodologia risiede in primo luogo nell'elevato onere computazionale richiesto per ottenere le curve di fragilità post-intervento. Infatti l'iteratività della procedura necessita l'esecuzione di un elevato numero di analisi SMAV prima di individuare le frequenze post-intervento che garantiscono le performance fissate a monte. In secondo luogo, in linea generale, vi è la necessità di costruire un modello SMAV-post intervento per ogni SL. Questo perché la variazione delle frequenze viene

calibrata per la prestazione da garantire in corrispondenza di una sola  $IM_{SLi}$  (Figura 12). Non è detto dunque che uno stesso modello rispetti le performance per tutti gli SL.

Riassumendo sinteticamente, la metodologia si articola nelle seguenti quattro fasi:

- FASE 1: Costruzione curve di fragilità pre-intervento per lo SL di interesse;
- FASE 2: Definizione della performance dell'edificio post-intervento per lo SL di interesse;
- FASE 3: Manipolazione numerica delle frequenze del modello SMAV pre intervento e analisi iterative per l'ottenimento del modello SMAV post-intervento rispettoso delle performance definite nella FASE 3;
- FASE 4: Costruzione della curva di fragilità post-intervento.

## 1.4 Metodologia della Variazione dei parametri costituenti (M3)

Le curve di fragilità forniscono la probabilità di un sistema strutturale, soggetto ad un input sismico assegnato, di superare determinati livelli di danno. Generalmente negli studi di vulnerabilità sismica, la curva di fragilità relativa ad un generico livello di danno si ottiene con la seguente espressione:

$$(3) \quad P_{[Drift,max \geq Drift,lim]}^{(IM)} = \Phi(\mu^*, \sigma^*) \cdot \ln(IM) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln IM - \mu^*}{\sqrt{2}\sigma^*}\right)$$

dove  $\Phi(\mu^*, \sigma^*)$  è la funzione di ripartizione della distribuzione normale ed  $\operatorname{erf}$  è la funzione degli errori. In tale approccio la curva di fragilità è caratterizzata da due parametri media  $\mu^*$  e deviazione standard  $\sigma^*$  così definiti:

$$(4) \quad \mu^* = \ln \mu - \frac{1}{2} \ln \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \right]$$

$$(5) \quad \sigma^* = \sqrt{\ln \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \right]}$$

dove  $\mu$  e  $\sigma$  sono la media e la deviazione standard dei valori delle intensità sismiche  $IM$  definenti il generico livello di danno considerato. La media  $\mu$  e la deviazione standard  $\sigma$  rappresentano pertanto i parametri costituenti la curva di fragilità del generico livello di danno considerato, in quanto una volta noto il loro valore, è possibile generare la curva di fragilità associata.

Nell' approccio proposto in questo paragrafo, si vuole individuare una relazione matematica che a partire dalla media ( $\mu_i$ ) e deviazione standard ( $\sigma_i$ ) della curva di fragilità SMAV, permetta di costruire la "potenziale" curva di fragilità legata all'intervento (senza sapere come il progettista interverrà) attraverso una legge di variazione della deviazione standard in funzione dell'incremento in media desiderato ( $\Delta I = \mu_f - \mu_i$ ) legato all'intervento (Figura 14).

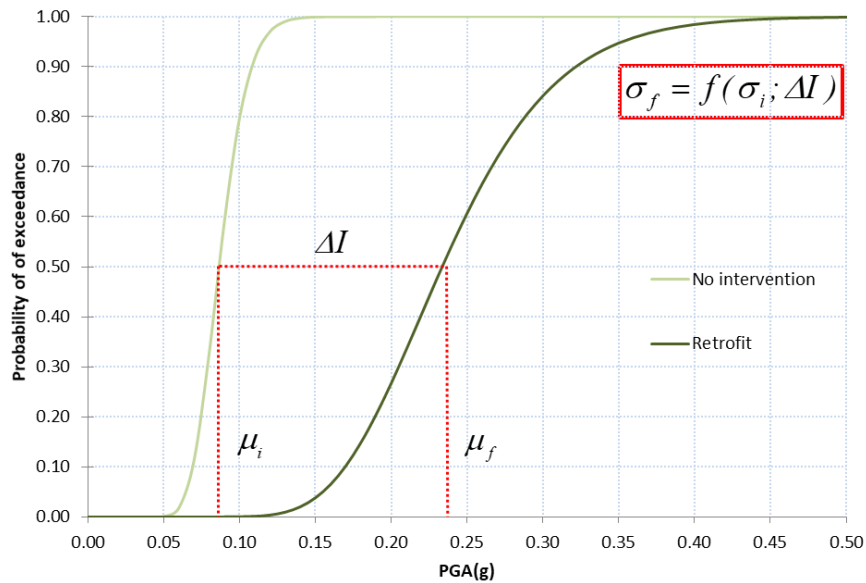


Figura 14 - Metodologia per la costruzione delle curve di fragilità post-intervento

Al fine di individuare tale legge di variazione della deviazione standard, si sono eseguite analisi statiche non lineari su una struttura campione di due piani in c.a. rinforzata con diversi tipi di intervento volti rispettivamente al miglioramento e adeguamento della struttura (Figura 15). Nella fattispecie le tre alternative d'intervento considerate sono state:

- a<sub>1</sub> – Sistema di controventatura con cavi
- a<sub>2</sub> – Sistema di controventatura con controventi in acciaio
- a<sub>3</sub> – Incamiciatura in c.a.

Tali alternative simulano valide ed economiche strategie d'intervento del progettista e mirano alla riduzione del drift d'interpiano al fine di consentire un minor danneggiamento degli elementi strutturali e non-strutturali e quindi migliorare l'operatività dell'edificio in seguito ad un terremoto.

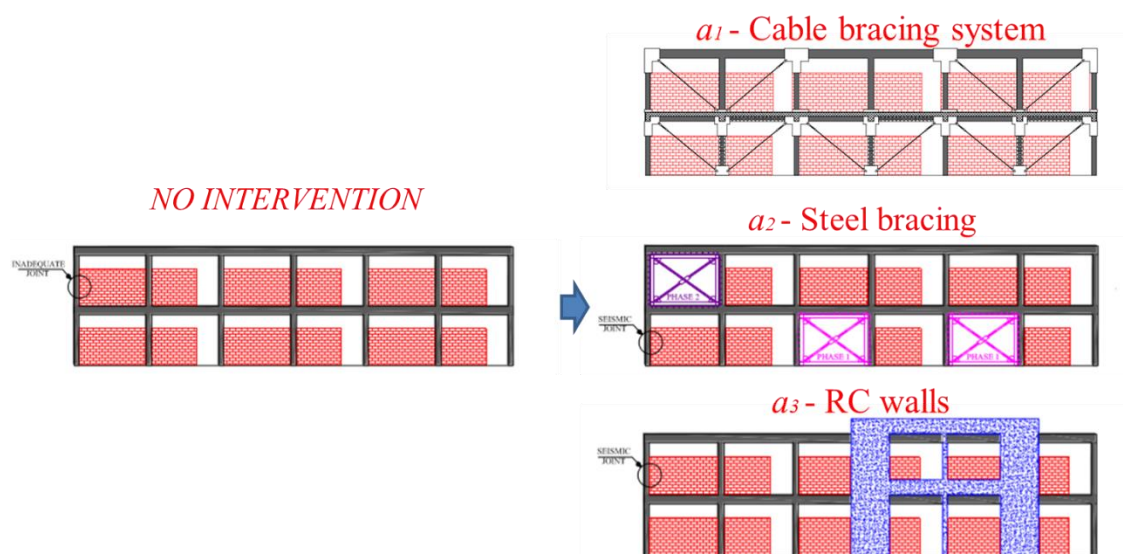


Figura 15 - Strutture di riferimento

Le analisi statiche non lineari sono state svolte attraverso il software SAP2000 classificando gli elementi strutturali in fragili, duttili/fragili e duttili. Per gli elementi fragili sono state assegnate cerniere plastiche taglianti, mentre per gli elementi duttili e duttili/fragili sono state attribuite cerniere plastiche flessionali. Per quanto concerne gli elementi strutturali duttili/fragili, la capacità deformativa è stata ridotta in funzione della loro resistenza tagliante al fine di considerazione il degrado della resistenza a taglio legato al comportamento inelastico e ciclico delle sezioni. In particolare le capacità di resistenza e deformazione sono state definite nel rispetto dell'Eurocodice 2 [9] e 8 [10] nonché delle NTC 2018 [3].

A partire dalle curve di capacità prodotte dalle analisi statiche non lineari, si sono generate le curve di fragilità della struttura con e senza l'intervento utilizzando il metodo FRACAS (FRAGility through Capacity spectrum ASsessment) sviluppato da Rossetto et al. (2016) [11]. In particolare, come illustrato in Figura 16(1), in base alla capacità deformativa degli elementi strutturali, sono stati definiti i livelli di danno (lieve, moderato, severo, collasso) e utilizzando il metodo FRACAS (Figura 16(2)), si sono generate le relative curve di fragilità (Figura 16(3)) per la struttura con e senza l'intervento. Per generare le curve di fragilità delle strutture considerate, come input sismico si sono utilizzati 50 accelerogrammi naturali italiani (Figura 17) opportunamente scalati ( $\min=0,5$ ;  $\max=2,5$ ;  $p=0,5$ ). Ulteriori dettagli riguardanti i 50 accelerogrammi selezionati sono riportati in Masi and Vona (2012) [12].

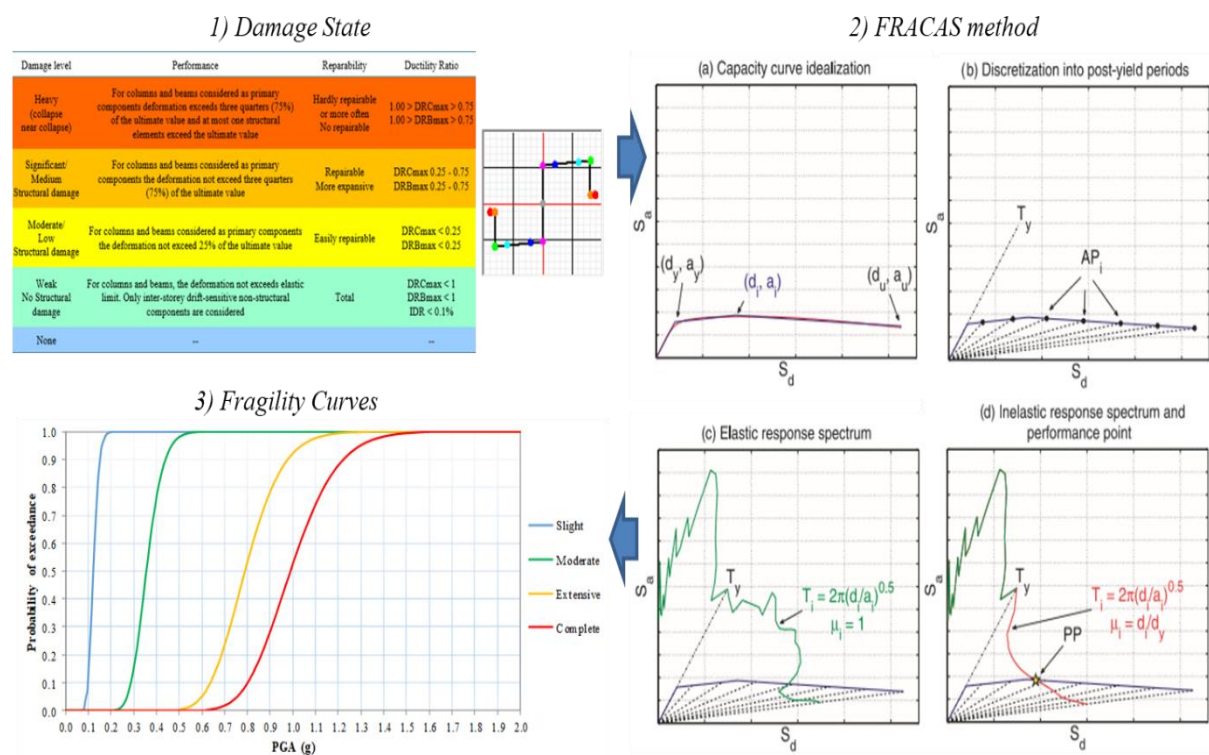


Figura 16 - Metodologia utilizzata per definire i livelli di danno e generare le relative curve di fragilità



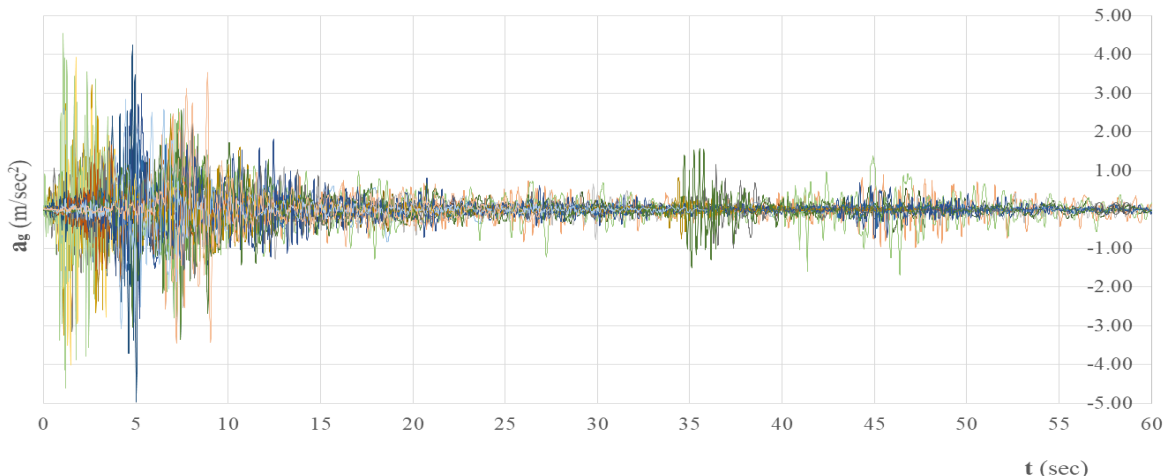


Figura 17 - Input sismico impiegato

Applicando la procedura innanzi indicata, in Figura 18 sono riportate le curve di fragilità della struttura campione senza l'intervento e sono anche raffigurate le curve di fragilità relative alla struttura rinforzata attraverso il sistema di controventatura con cavi (alternativa d'intervento a<sub>1</sub>) al fine di consentire il miglioramento e il completo adeguamento della struttura in due livelli crescenti. In Figura 19 e Figura 20 sono invece riportate le medesime curve di fragilità applicando il sistema di controventatura con controventi in acciaio (alternativa d'intervento a<sub>2</sub>) e l'incamiciatura in c.a (alternativa d'intervento a<sub>3</sub>), al fine di garantire il miglioramento e il completo adeguamento della struttura campione.

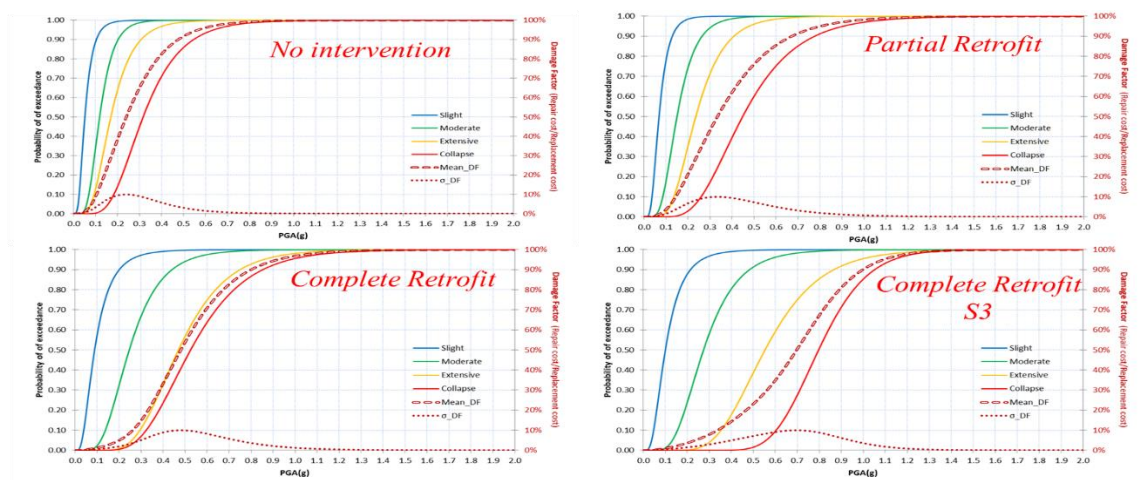


Figura 18 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento a<sub>2</sub>

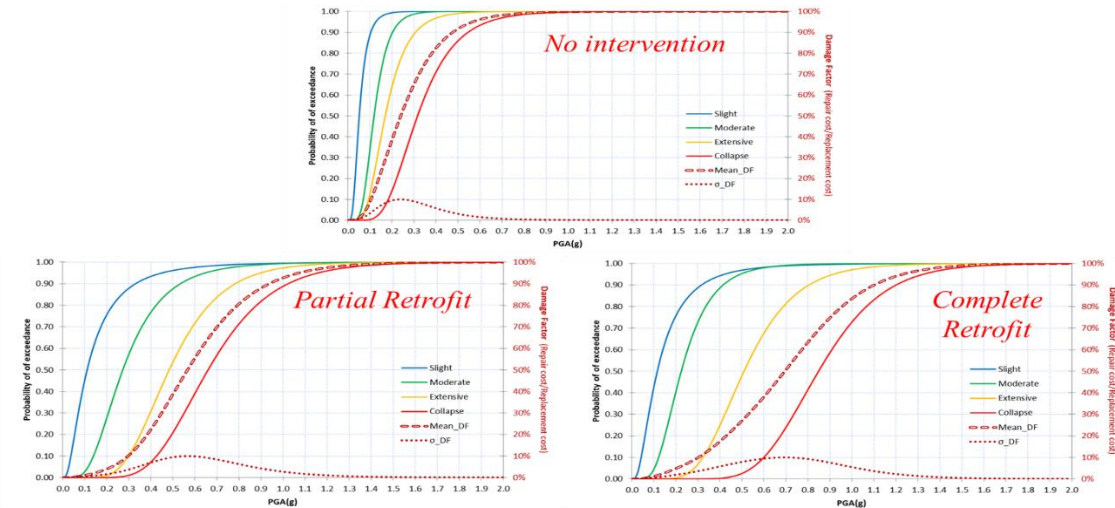


Figura 19 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento a<sub>2</sub>

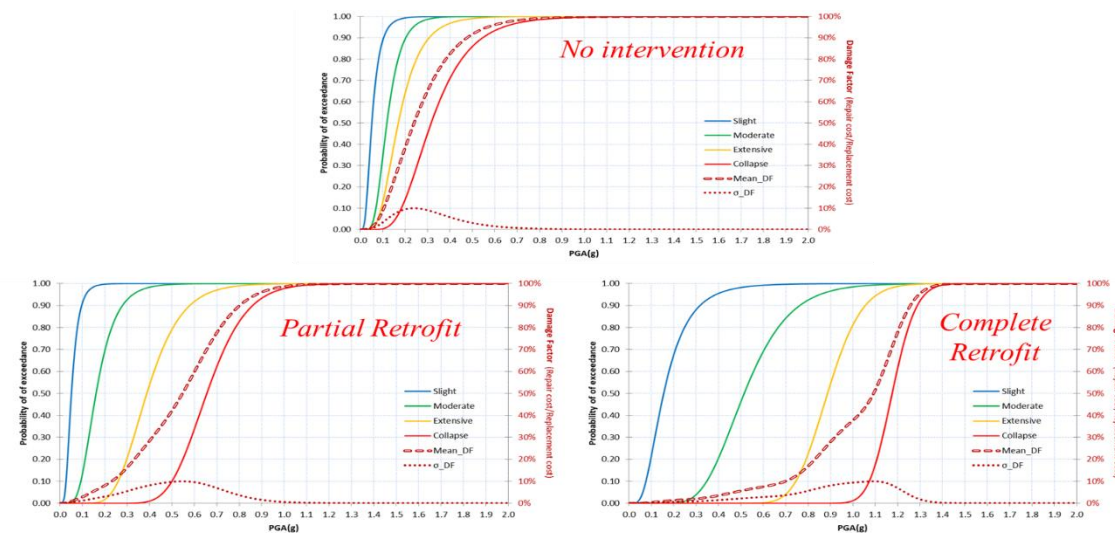


Figura 20 - Curve di fragilità al crescere dei livelli di rinforzo della struttura campione applicando l'alternativa di intervento a<sub>3</sub>

Considerando le curve di fragilità relative allo Stato Limite di Danno (danno moderato), ovvero le curve di fragilità che potrebbero essere generate con la metodologia SMAV, per ciascun alternativa d'intervento, sono state analizzate le variazioni dei parametri costituenti (media  $\mu$  e deviazione standard  $\sigma$ ) in base ai vari livelli di rinforzo considerati, e sono state individuate delle leggi di variazione delle deviazione standard  $\sigma$  che crescono linearmente con la media  $\mu$  attraverso la seguente espressione:

$$(6) \quad \sigma_{fj} = \sigma_i + K_j \cdot \Delta I = \sigma_i + K_j \cdot (\mu_{fj} - \mu_i)$$

dove:

$\sigma_{fj}$  è la deviazione della curva di fragilità associata all' $j$ -esimo intervento  $j$  ( $j=1, 2, 3$ );

$\sigma_i$  è la deviazione standard della curva di fragilità senza l'intervento (curva di fragilità SMAV);

$K_j$  è il coefficiente angolare delle linee di tendenza per le varie alternative d'intervento considerate ( $j=1, 2, 3$ ) i cui valori sono raffigurati in Figura 21, Figura 22 e Figura 23;

$\Delta I$  è l'incremento in media desiderato dal decisore;

$\mu_{ij}$  è la media della curva di fragilità associata all'j-esimo intervento (j=1, 2, 3);

$\mu_i$  è la media della curva di fragilità senza l'intervento (curva di fragilità SMAV).

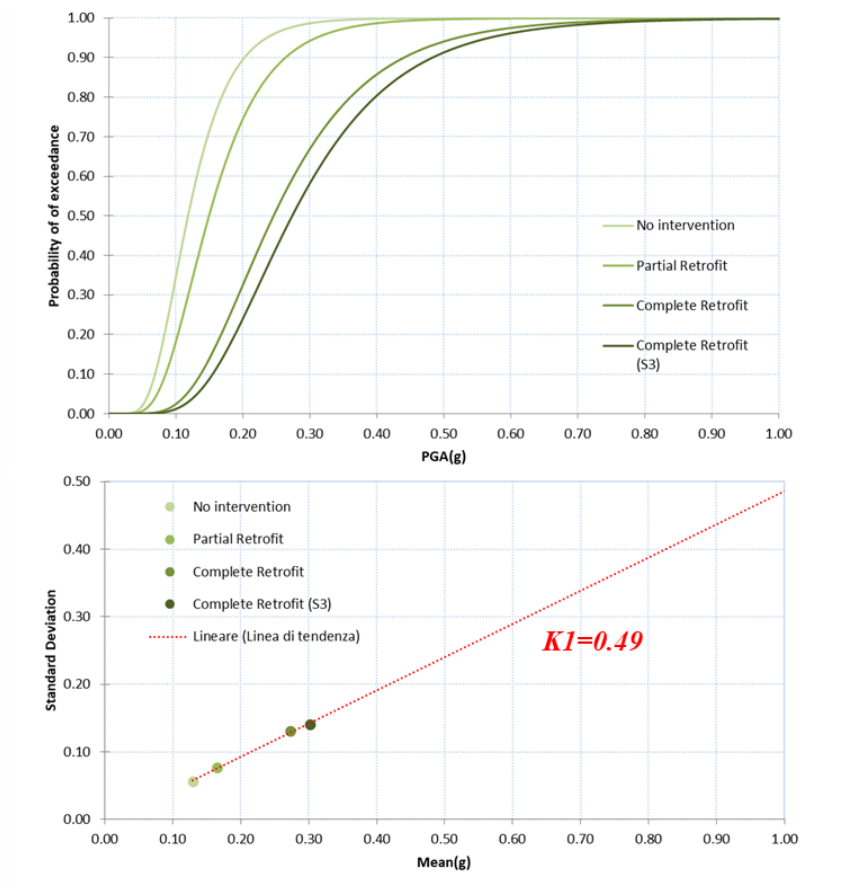


Figura 21 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento  $a_1$  ( $KI=0.49$ )

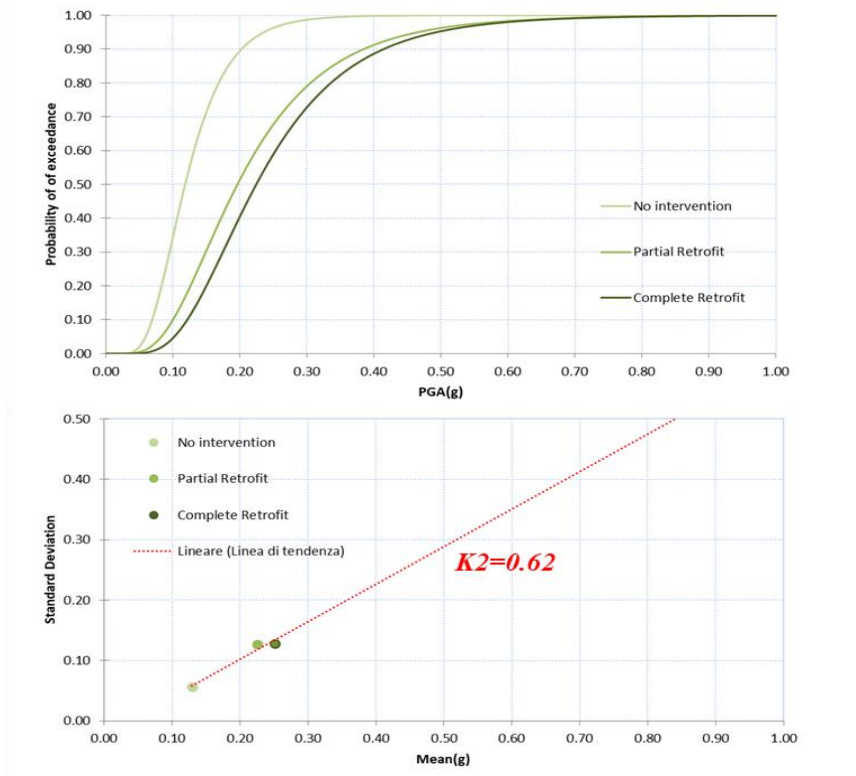


Figura 22 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento  $a_2$  ( $K_1=0.62$ )

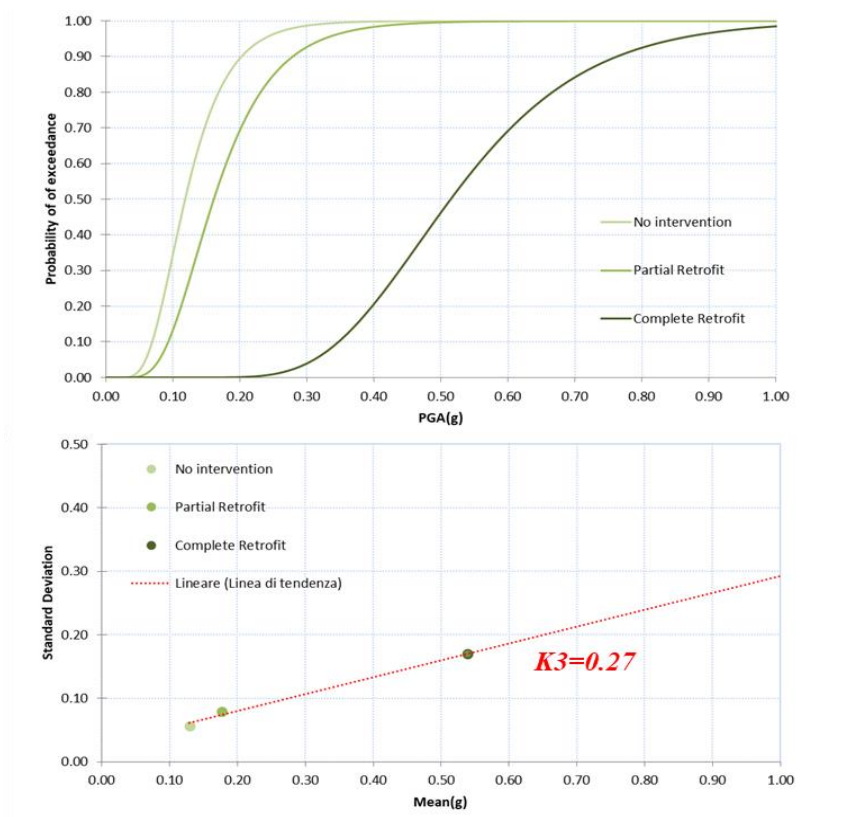


Figura 23 - Linea di tendenza dell'alternativa d'intervento  $a_3$  ( $K_1=0.27$ )

Considerando le curve di fragilità relative allo Stato Limite di Danno della struttura senza e con i vari tipi d'intervento (Figura 24), analogamente al caso precedente è stata individuata una legge generale di variazione della deviazione standard  $\sigma$  in funzione della media  $\mu$  attraverso la seguente espressione:

$$(7) \quad \sigma_f = \sigma_i + 0.26 \cdot \Delta I = \sigma_i + 0.26 \cdot (\mu_f - \mu_i)$$

dove:

$\sigma_f$  è la deviazione della curva di fragilità associata ad un generico intervento;

$\sigma_i$  è la deviazione standard della curva di fragilità senza l'intervento (curva di fragilità SMAV);

$\Delta I$  è l'incremento in media desiderato dal decisore;

$\mu_f$  è la media della curva di fragilità associata ad un generico intervento;

$\mu_i$  è la media della curva di fragilità senza l'intervento (curva di fragilità SMAV).

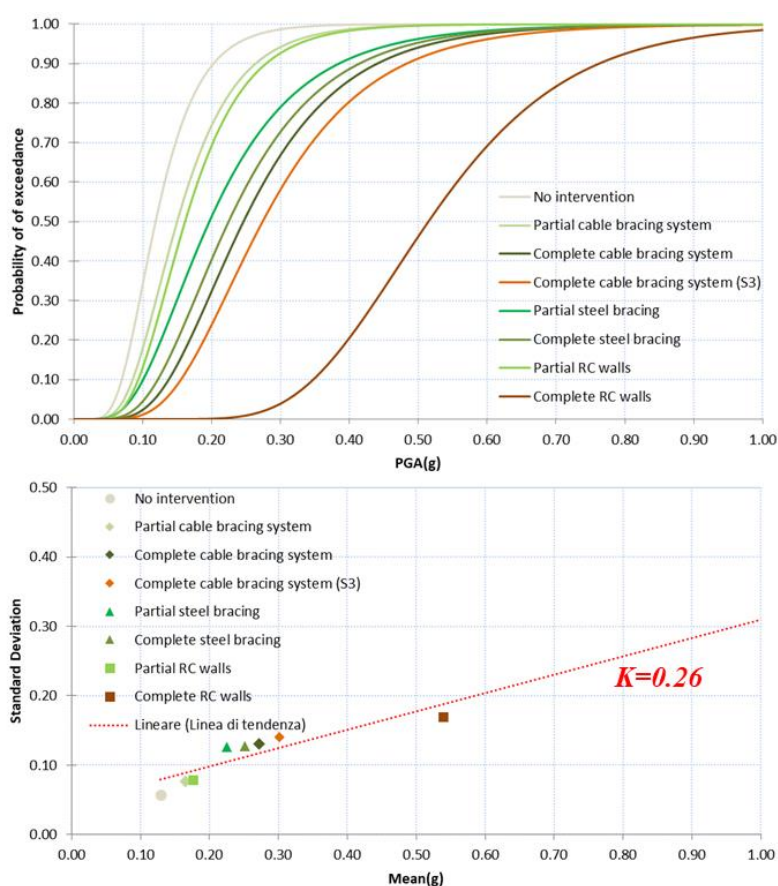


Figura 24 - Linea di tendenza di un generico intervento ( $K=0.26$ )

Si noti che l'approccio proposto in questo capitolo potrebbe essere esteso e calibrato su più strutture campione rinforzate con vari tipi d'intervento e per diversi livelli di rinforzo al fine di avere leggi di variazioni della deviazione standard  $\sigma$  in funzione della media  $\mu$  più rappresentative sia per il singolo tipo d'intervento che per una valenza generale. Inoltre, leggi di variazione non lineari dei parametri costituenti potrebbero anche essere individuate.

## 1.5 Metodologia della Variazione delle performance dell'edificio (M4)

Il metodo della *Variazione delle performance dell'edificio* consente di costruire le curve di fragilità post-intervento manipolando numericamente i risultati delle analisi SMAV ottenute impiegando il modello SMAV pre-intervento dell'edificio in esame come riportato nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2**. Può considerarsi una sintesi dei metodi presentati ai precedenti paragrafi 1.2 (Metodologia di letteratura [4]) e 1.3 (Metodologia della variazione delle frequenze proprie dell'edificio).

Come indicato in Figura 25 il metodo opera direttamente sulle prestazioni che l'edificio deve garantire post-intervento per tutti gli SL in termini di probabilità di superamento  $P_{post\ int\ SL_i}(IM_{SL_i})$ .

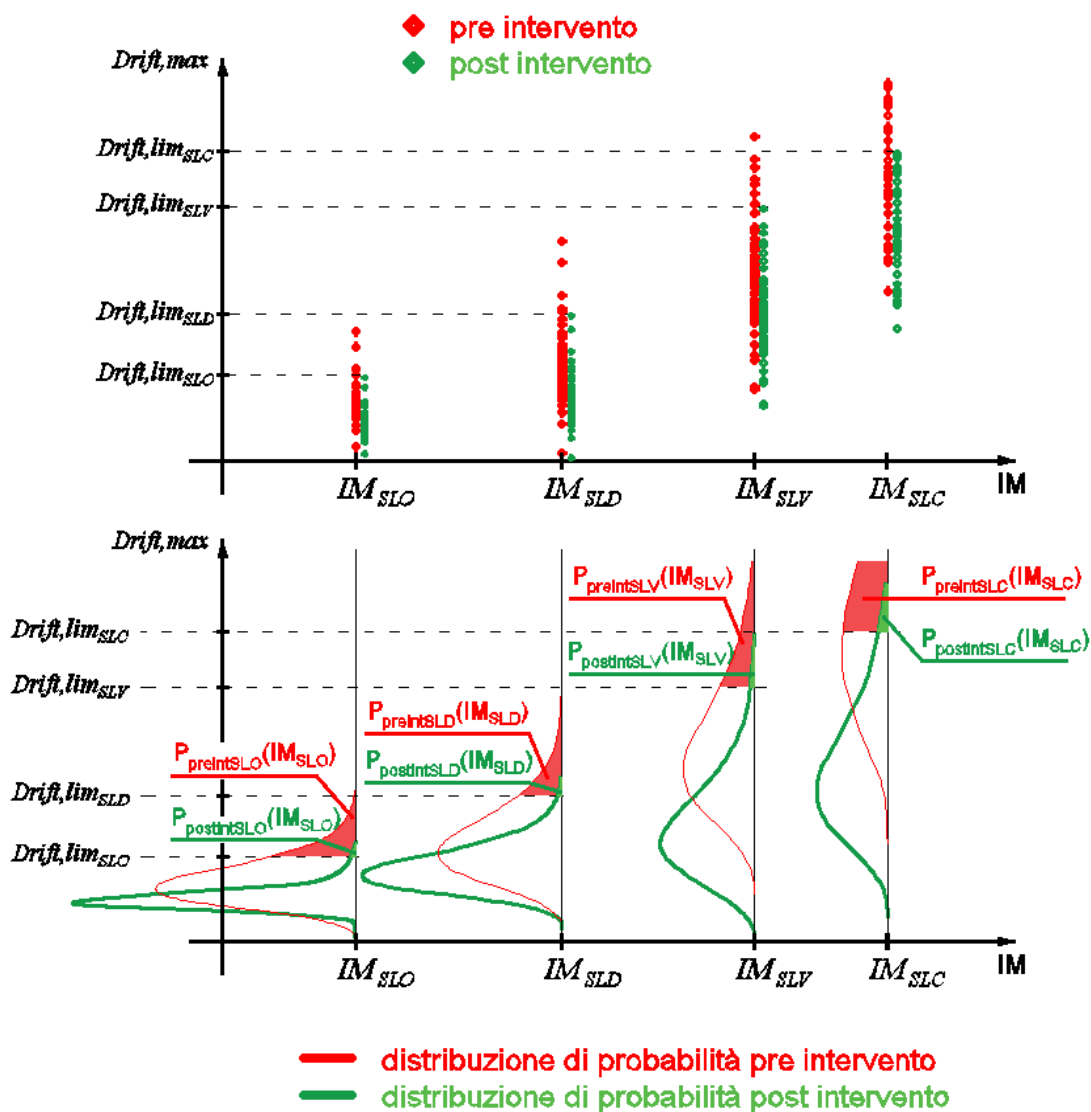


Figura 25 – Risultati analisi SMAV pre-intervento (n rosso) e post-intervento (in verde) per intensità sismiche  $IM_{SL_i}$  previste per i diversi SL. I punti verdi sono ottenuti scalando i punti rossi avendo fissato a priori le probabilità di superamento  $P_{post\ int\ SL_i}$ .

Fissati a priori i valori delle  $P_{post\ int\ SL_i}(IM_{SL_i})$  (vedi Tabella 2) e avendo fissato delle opportune soglie dei  $Drift, lim_{SL_i}$  (vedi Figura 26 - Figura 26 [13]), è possibile determinare per ciascuno SL il seguente fattore di scala:

$$(8) \quad SF(IM_{SL_i}) = P_{post\ int\ SL_i}(IM_{SL_i}) / P_{pre\ int\ SL_i}(IM_{SL_i})$$

in maniera del tutto analoga a quanto descritto in [4].

Passo necessario per poter applicare questa metodologia è l'individuazione delle soglie di danno. Le modalità con cui è possibile definire le soglie di danno sono molteplici e spesso non direttamente correlabili tra loro (Hill & Rossetto 2007 [14]). Come riportato in [13] e nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2** si è assunto il drift quale parametro di danno. I livelli di Drift considerati per la costruzione delle curve sono riportati in [13] Figura 26.

| Ld    | DS                         | Drift (%)  |
|-------|----------------------------|------------|
| 0     | Nulla                      | < 0.1      |
| 1     | lieve                      | 0.1 – 0.25 |
| 2     | moderato                   | 0.25 – 0.5 |
| 3     | grave                      | 0.5 – 1.0  |
| 4 – 5 | Collasso parziale o totale | > 0.1      |

Figura 26 - Valori di Drift/h associati ai livelli di danno Ld (DS è il danno strutturale) per edifici in C.A. (Masi et al.2009 [13])

In questo modo, applicando la relazione (8) per i quattro SL si ottiene, per interpolazione lineare negli intervalli, l'andamento dei fattori di scala al variare dell'intensità sismica FS(IM) come riportato in Figura 27. I fattori di scala così ottenuti, applicati ai risultati delle analisi SMAV pre-intervento, generano la nova nuvola di punti post-intervento che consente di ottenere le curve post-intervento ai diversi SL (Figura 28).

A differenza della metodologia di Caterino et al. (2019) [4] i fattori di scala qui sono applicati direttamente alla nuvola di punti dei risultati delle analisi (Figura 27) e, a partire da questa si costruiscono le curve di fragilità per i diversi SL (Figura 28) con la metodologia riportata nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2**.

Diversamente, nella metodologia riportata al paragrafo 1.2 (vedi Figura 10) i fattori di scala FS(TR) sono applicati direttamente alle curve di fragilità pre-intervento. Questo comporta un onere computazionale superiore della metodologia descritta in questo paragrafo.

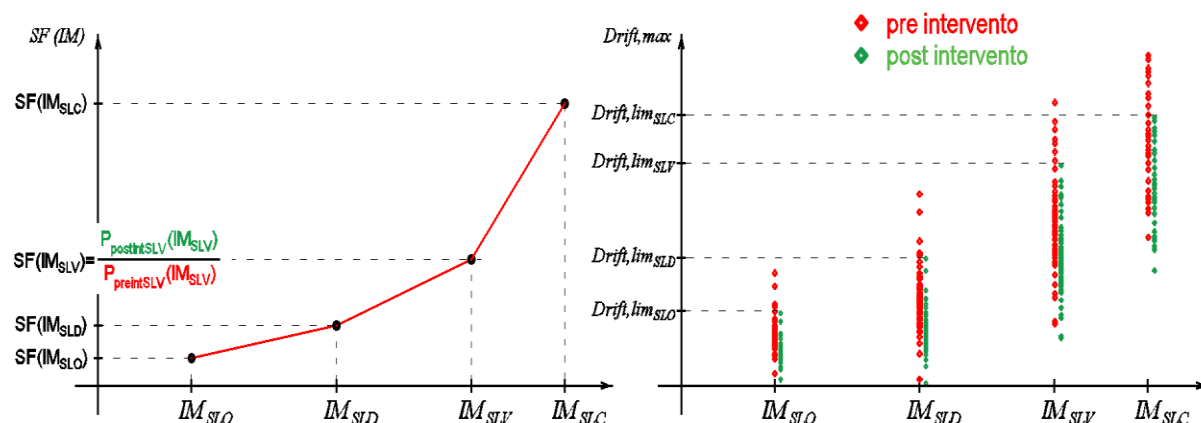


Figura 27 - Legge di variazione del fattore di scala SF per tutte le intensità sismiche di interesse, e scalatura della nuvola di punti SMAV pre-intervento (in rosso). La nuvola di punti post-intervento (in verde) consente la costruzione delle curve di fragilità post-intervento dell'edificio garantendone le prestazioni prefissate ai vari SL.

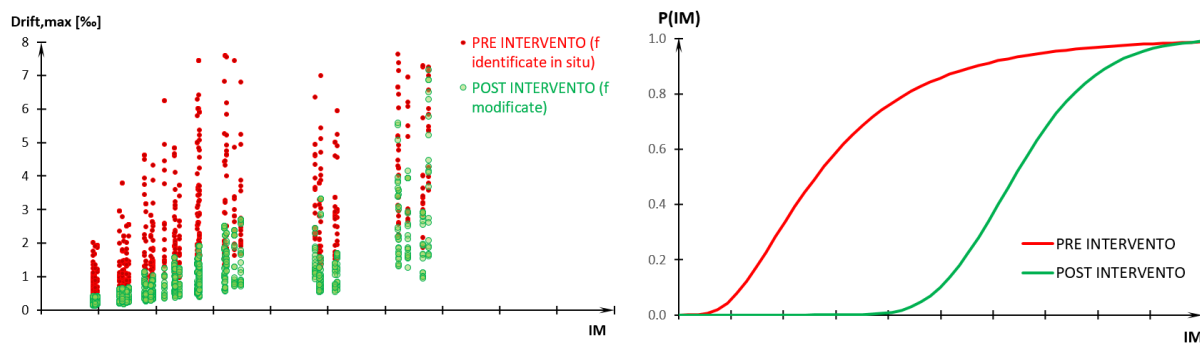


Figura 28 – Nuvola di punti post-intervento (in verde) ottenuta scalando i risultati delle analisi con modello SMAV pre-intervento (in rosso). Da questa è possibile costruire le curve di fragilità post-intervento dell'edificio con prestazioni prefissate.

Riassumendo sinteticamente, la metodologia si articola nelle seguenti quattro fasi:

- FASE 1: Costruzione nuvola di punti (*drift,max* - *IM*) del modello SMAV pre-intervento come indicato nei documenti **Attività A4.1, PUG F4.2 e SICF4.2**;
- FASE 2: Definizione dei valori dei *drift,max* associati a ciascuno SL;
- FASE 3: Definizione delle performance dell'edificio post-intervento per lo SL di interesse;
- FASE 4: Calcolo della legge dei fattori di scala  $FS(IM)$ ;
- FASE 5: Scalatura della nuvola di punti SMAV pre-intervento per l'ottenimento della nuvola di punti post-intervento;
- FASE 6: Costruzione della curva di fragilità post-intervento.



## 2. Procedura per la quantificazione economica degli interventi di miglioramento dell'operatività degli edifici

Per determinare i costi associati agli interventi per il miglioramento/adequamento sismico si fa riferimento alla metodologia indicata in Caterino et al. (2018) [4]. Rimandando al documento per una più esauriente trattazione del metodo di calcolo, si riporta qui una breve sintesi.

Si tratta di una metodologia convenzionale che consente il calcolo dei costi di intervento in funzione dell'epoca di costruzione dell'edificio e della sua vulnerabilità misurata attraverso un indice di vulnerabilità  $\chi$ . Tale indice è definito dalla seguente relazione:

$$(9) \quad \chi_{pre-int} = \frac{\lambda_{SLV}}{\lambda_{pre-int SLV}}$$

dove  $\lambda_{SLV}$  è la massima frequenza annua di superamento consentita (DOMANDA), mentre  $\lambda_{pre-int SLV}$  è la frequenza annua di superamento registrata per l'edificio (CAPACITA'). Entrambe sono relative allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita.

Per la frequenza annua di superamento consentita (DOMANDA) si fa riferimento a quanto indicato in [15] che, in accordo con la classe d'uso dell'edificio, indica la prestazione da garantire per ogni SL. Per edificio in Classe d'uso III (edifici strategici) per lo SLV, la massima frequenza media annua di superamento indicata è pari a 0.0032.

La frequenza media annua di superamento in capacità dell'edificio  $\lambda_{pre-int SLV}$  allo Stato Limite di salvaguardia della Vita è desumibile direttamente dalla curva di fragilità SLV dell'edificio pre-intervento come indicato in Figura 29.

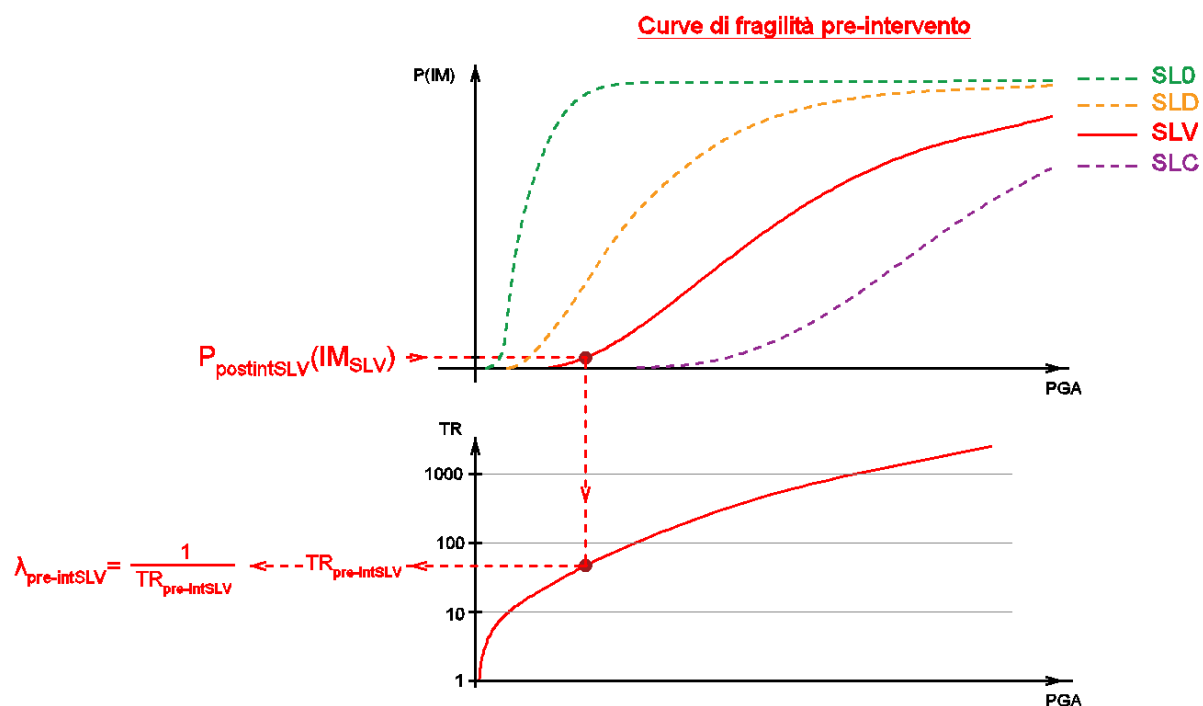


Figura 29 – Determinazione della frequenza media annua di superamento in capacità dell'edificio  $\lambda_{pre-int SLV}$  allo Stato Limite di salvaguardia della Vita. In basso è riportata la curva di pericolosità del sito in esame.

Calcolato tale indice attraverso i diagrammi riportati in Figura 30 è possibile stimare il costo di intervento normalizzato al costo di ricostruzione dell'edificio.

Dato che il costo di intervento è una funzione della vulnerabilità dell'edificio, poiché a maggiori vulnerabilità corrispondono maggiori costi di intervento, in questo studio è stimato un andamento bilineare dei costi con la vulnerabilità. E' altresì proposto un distinguo tra gli edifici costruiti prima o dopo il 1972 dato che in quell'anno è stata modificata la normativa per il progetto delle strutture [16].

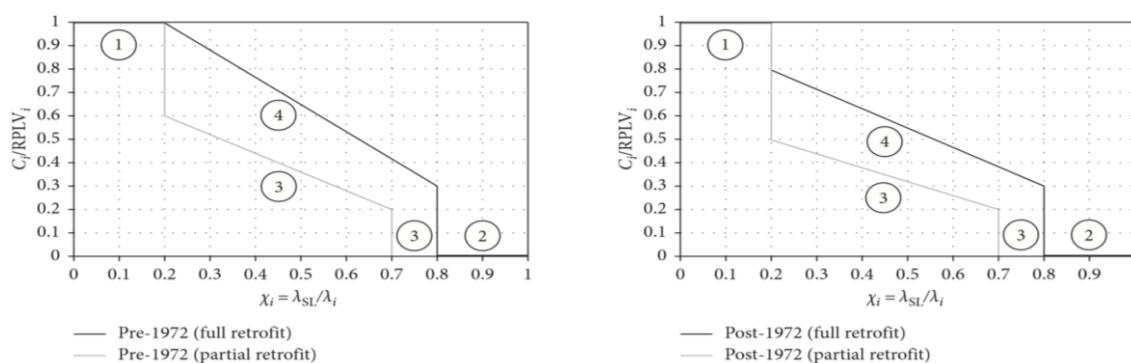


Figura 30 – Stima dei costi di intervento normalizzati al costo di ricostruzione per interventi di adeguamento (full retrofit) e miglioramento (partial retrofit): (a) edifici costruiti prima del 1972; (b) edifici costruiti dopo il 1972.

Tale documento nell'ottica di costituire un contributo propedeutico alla definizione di un algoritmo propedeutico alla definizione di un algoritmo simulativo in grado di **ottimizzare** l'Indicatore di Operatività strutturale del Contesto Territoriale (IOCT) in funzione dei costi d'intervento, divenendo uno strumento decisionale per la selezione del più vantaggioso scenario di investimento del budget, si riporta quanto segue.

Quando l'indice di vulnerabilità  $\chi > 1$  le strutture non risultano vulnerabili e non necessitano di alcun intervento. In questo studio si suggerisce di non intervenire per valori dell'indice  $\chi > 0.8$  perché in primo luogo il valore unitario dell'indice risulta un riferimento meramente numerico ma poco rappresentativo di situazioni realistiche, in secondo luogo, in un'ottica di budget limitato, questo consente di focalizzare le risorse sugli edifici maggiormente vulnerabili.

Per edifici con  $\chi \leq 0.8$  è necessario migliorare le performance, e questo può avvenire in tre differenti modalità:

- Demolizione e ricostruzione ( $\chi \leq 0.2$ ): ricostruzione dell'edificio con criteri antisismici;
- Adeguamento ( $0.2 \leq \chi \leq 0.8$ );
- Miglioramento ( $0.2 \leq \chi \leq 0.7$ ): la performance è computata al 70% di quella relativa all'adeguamento.

In definitiva possono presentarsi le seguenti opzioni in funzione del valore dell'indice di vulnerabilità:

- CASO 1 ( $\chi \leq 0.2$ ) =====> Demolizione e ricostruzione;
- CASO 2 ( $0.2 \leq \chi \leq 0.7$ ) =====> Miglioramento o Adeguamento;
- CASO 3 ( $0.7 \leq \chi \leq 0.8$ ) =====> Adeguamento o Nessun intervento;
- CASO 4 ( $\chi > 0.8$ ) =====> Nessun intervento.

## 2.1 Altri indicatori prestazionali dell'edificio

Le metodologie presentate in questo documento consentono la valutazione di ulteriori indicatori prestazionali dell'edificio utili ad avere un quadro complessivo dello stato di salute dello stesso, ma anche ai fini dell'individuazione di una graduatoria di edifici, divenendo complessivamente uno strumento per la selezione del più vantaggioso scenario di investimento del budget.

Gli indicatori in parola sono tutti codificati da normative tecniche vigenti [3] [17] e, nel caso specifico, sfruttano le curve di fragilità SMAV dell'edificio determinate come indicato nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2**

### 2.1.1 Indice PAM (perdita annuale media) e Classe di rischio sismico

Le Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni D.M. 28/02/2017 [17] affrontano, con un nuovo approccio, il tema della classificazione del Rischio Sismico delle costruzioni esistenti coniugando:

- il rispetto del valore della salvaguardia della vita umana (mediante i livelli di sicurezza previsti dalla Vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni);
- la considerazione delle possibili perdite economiche e delle perdite sociali (in base a robuste stime convenzionali basate anche sui dati della Ricostruzione post Sisma Abruzzo 2009)

Le Linee Guida consentono di attribuire ad un edificio una di otto Classi di Rischio Sismico, da A+ a G, in base al valore assunto da due indici (PAM e IS-V) come indicato nella Figura 31. La classe di rischio effettiva sarà la minima tra la Classe PAM e Classe IS-V. Nella presente relazione si fa riferimento solo ed esclusivamente alla Classe PAM.

| Perdita Media Annuata attesa (PAM) | Classe PAM | Indice di Sicurezza (IS-V) | Classe IS-V |
|------------------------------------|------------|----------------------------|-------------|
| $PAM \leq 0.50 \%$                 | A+         | $100 \% < IS-V$            | A+          |
| $0.50 \% < PAM \leq 1.0 \%$        | A          | $100 \% \leq IS-V < 80 \%$ | A           |
| $1.0 \% < PAM \leq 1.5 \%$         | B          | $80 \% \leq IS-V < 60 \%$  | B           |
| $1.5 \% < PAM \leq 2.5 \%$         | C          | $60 \% \leq IS-V < 45 \%$  | C           |
| $2.5 \% < PAM \leq 3.5 \%$         | D          | $45 \% \leq IS-V < 30 \%$  | D           |
| $3.5 \% < PAM \leq 4.5 \%$         | E          | $30 \% \leq IS-V < 15 \%$  | E           |
| $4.5 \% < PAM \leq 7.5 \%$         | F          | $IS-V \leq 15 \%$          | F           |
| $7.5 \% < PAM$                     | G          |                            |             |

Figura 31 – Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni: Classi di Rischio Sismico

La Classe PAM (Perdita Annuata Media attesa) può essere assimilato al 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. Le perdite economiche sono correlate alla capacità della costruzione di sostenere terremoti, sia frequenti (SLO, SLD) che rari (SLV, SLC).

L'indice IS-V (Indice di sicurezza) è definito come il 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. La salvaguardia della vita umana è correlata soprattutto alla capacità della costruzione di non crollare (SLV, SLC) per effetto dei terremoti.

Per il calcolo del PAM è necessario associare ad ogni SL:

- un costo di riparazione normalizzato al costo di costruzione (indicati in [17]);
- la frequenza media annua di accadimento.

L'area sottesa dal diagramma così ottenuto (Figura 32) corrisponde all'indice PAM che consente di legare una valutazione della sicurezza strutturale ad una valutazione economica.

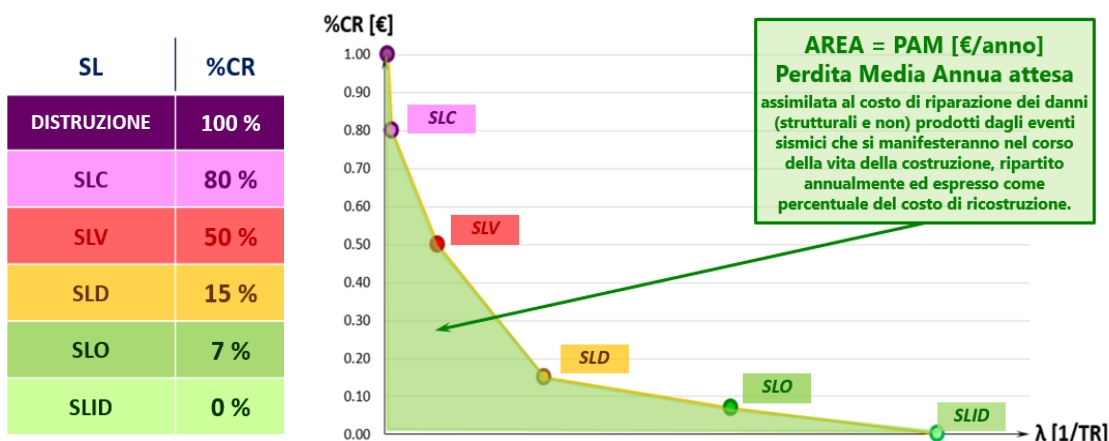


Figura 32 – Costi normalizzati di ricostruzione per diversi SL e curva delle perdite medie annue attese.

In merito alle frequenze medie annue di accadimento dei diversi SL, in questa sede è necessario estrapolare tali informazioni dalle curve di fragilità SMAV dell'edificio e dalla curva di pericolosità di sito, con la procedura indicata in Figura 33.

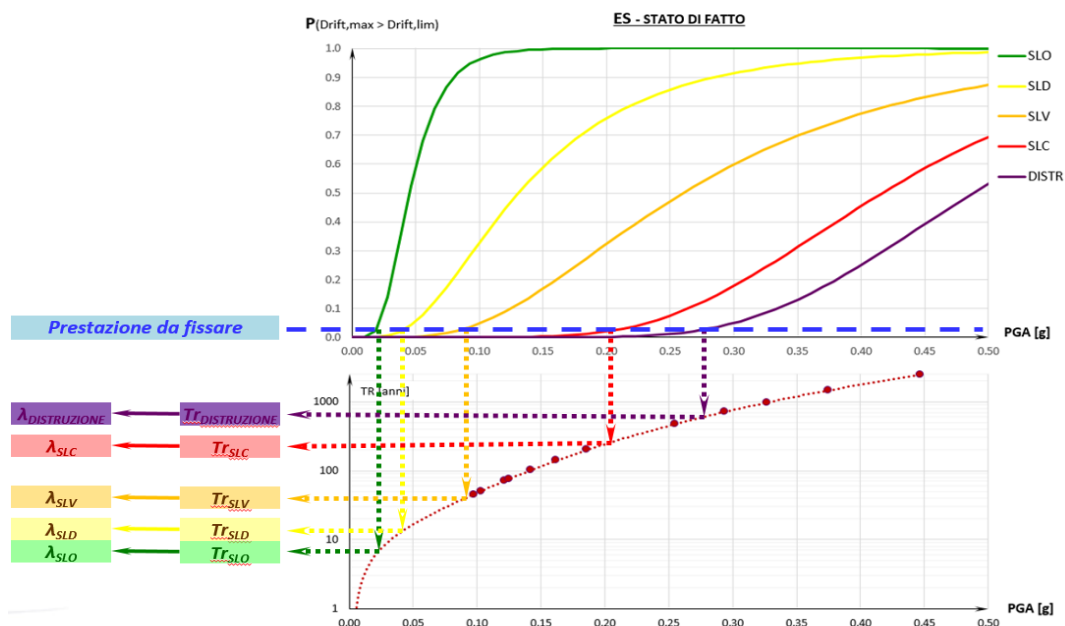


Figura 33 – procedura per la determinazione delle frequenze medie annue di accadimento per ogni SL partendo dalle curve di fragilità.

Determinate queste ultime è possibile valutare:

- il valore dell'indice PAM dell'edificio;
- confrontare tale valore con l'indice PAM di riferimento (quello previsto per edifici di nuova costruzione), vedi Figura 34;
- associare la Classe di Rischio Sismico come indicato in Figura 31.

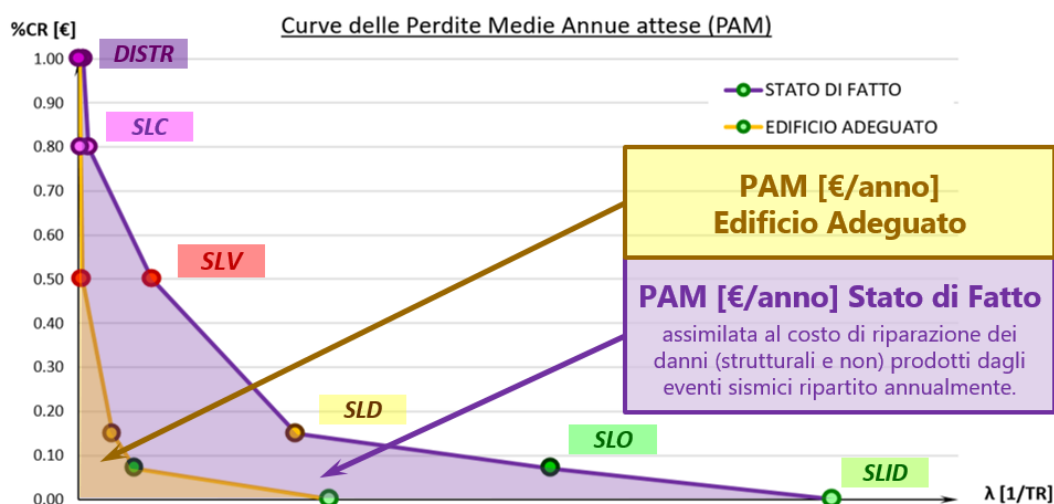


Figura 34 – Confronto tra il PAM effettivo per l'edificio pre-intervento, e quello previsto per un edificio adeguato sismicamente.

### 2.1.2 Tempo di intervento

Rimandando alle NTC [3] per ulteriori approfondimenti, il *Tempo di intervento* indica la “gravità dell’inadeguatezza sismica” e fornisce il “periodo convenzionale di tempo entro il quale attuare il rimedio”.

Viene calcolato impiegando la seguente relazione:

$$(10) \quad T_{int} = -\frac{T_{RR}}{C_u} \ln(1 - P_{vr})$$

dove:  $T_{int}$  è il Tempo di intervento ;

$T_{RR}$  è il Tempo di ritorno della  $PGA_r$ , essendo la  $PGA_r$  la CAPACITA' della struttura in termini di  $PGA$  allo SLV;

$C_u$  Tempo di ritorno della  $PGA_r$  ;

$P_{vr}$  Probabilità di superamento associata allo SLV.

Tenendo conto del carattere probabilistico della valutazione, è possibile affermare che:

- $T_{INT} \leq 2$  anni -----> **INTERVENTI CON CARATTERE D'URGENZA** (elevata inadeguatezza);
- $T_{INT} > 30$  anni -----> **INTERVENTI NON URGENTI** (modesta inadeguatezza).

Il calcolo della capacità della struttura in termini di  $PGA$  allo SLV si impiega un procedimento analogo a quello indicato in Figura 33.

### 3. Caso di studio

Il caso di studio proposto in questa sezione riguarda l'Istituto scolastico De Gasperi – Battaglia (Figura 35) sito nel comune di Norcia, interessato da interventi strutturali di adeguamento sismico nel gennaio 2010, e per il quale sono disponibili:

- i dati sul sito dell'Osservatorio Sismico delle Strutture del Dipartimento della Protezione Civile;
- i dati di misure di rumore ambientale pre-intervento e post-intervento;
- i modelli SMAV pre-intervento e post-intervento;
- tutti gli elaborati progettuali esecutivi dell'intervento di adeguamento;
- tutti i report degli eventi sismici che hanno interessato la struttura pre e post-intervento;
- i dati economici sui costi di intervento.

In virtù dei dati disponibili, per tale edificio è possibile costruire le curve di fragilità SMAV pre e post-intervento con dati reali, impiegando la metodologia di cui ai documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2**, e considerare tali curve come benchmark di riferimento per il confronto tra metodologie presentate al Capitolo 1.

Segue una breve descrizione della struttura in esame.

L'edificio, edificato nel 1950, presenta una struttura portante intelaiata in calcestruzzo armato composta da tre blocchi giuntati con selle Gerber che ne limitano il rapporto di allungamento in pianta; i blocchi di estremità sono pressochè simmetrici in pianta e ospitano le aule didattiche, nel corpo centrale sono alloggiati i collegamenti verticali costituiti da scale con soletta rampante in calcestruzzo armato. Il rapporto di allungamento in pianta dei blocchi di estremità è di circa 1:2, mentre per il blocco centrale è di circa 1:1. Complessivamente l'edificio presenta un'area in pianta di circa 712 mq sviluppati su una lunghezza di 60 m ed una larghezza di 12 m. In verticale l'edificio si sviluppa su quattro livelli fuori terra con copertura a falde a falde. Tutti gli orizzontamenti sono costituiti da solai latero-cementizi.

Nella Figura 36 sono riportate la pianta, la sezione trasversale ed il prospetto longitudinale dell'edificio prima dell'intervento di adeguamento sismico avvenuto nel 2010. Tale intervento si è concretizzato nell'inserimento nelle maglie dei telai longitudinali e trasversali dei tre blocchi di controventi dissipativi in acciaio (Figura 37, Figura 38).

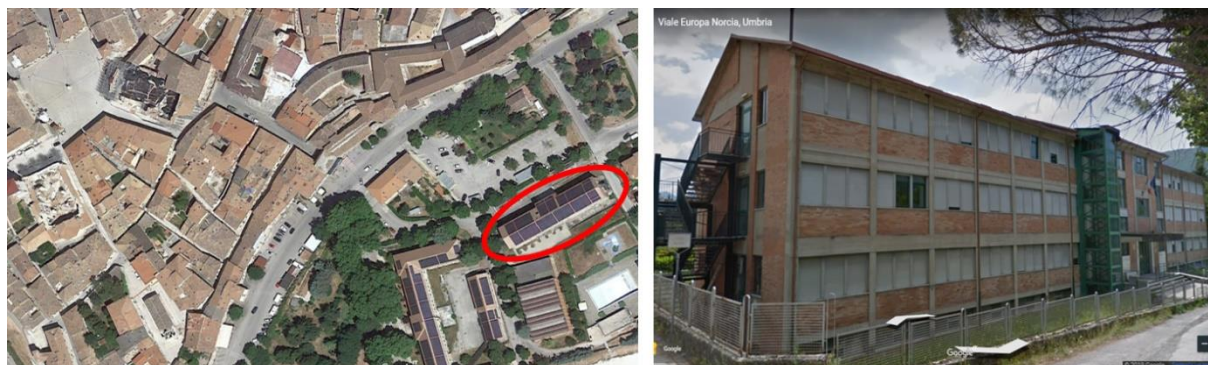


Figura 35 - Istituto scolastico De Gasperi – Battaglia del comune di Norcia

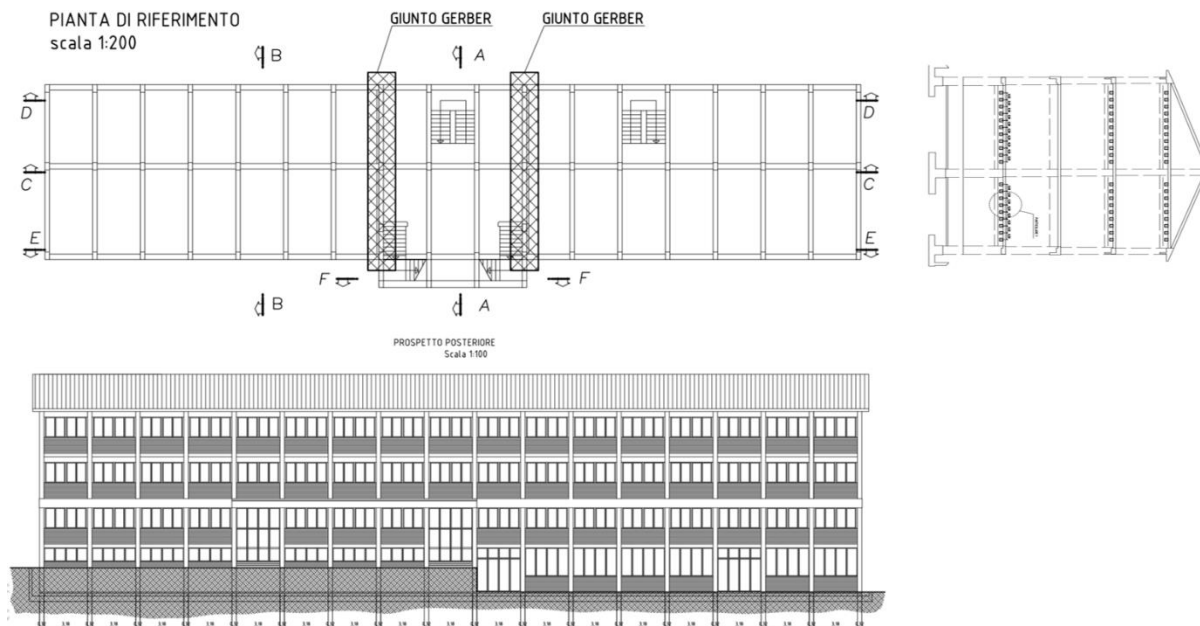


Figura 36 - Edificio pre-intervento: pianta strutturale, sezione trasversale e prospetto longitudinale.

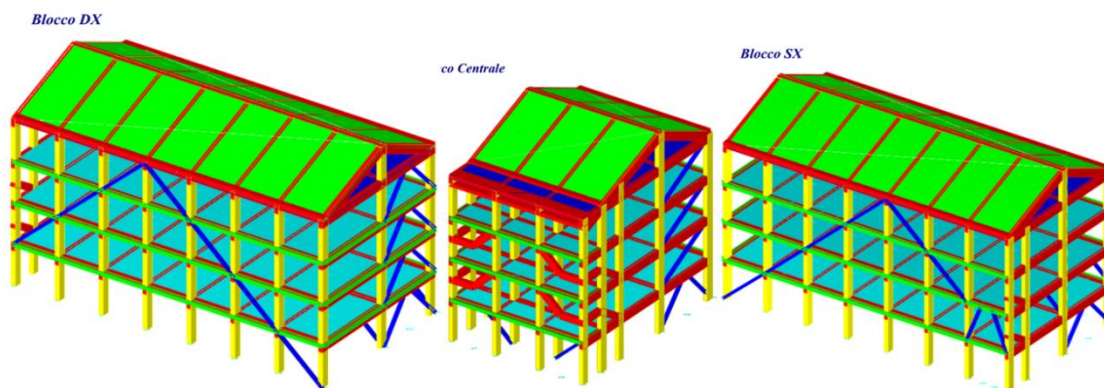


Figura 37 - Edificio post-intervento: modello strutturale. In blu i controventi dissipativi metallici inseriti nelle maglie di telaio.

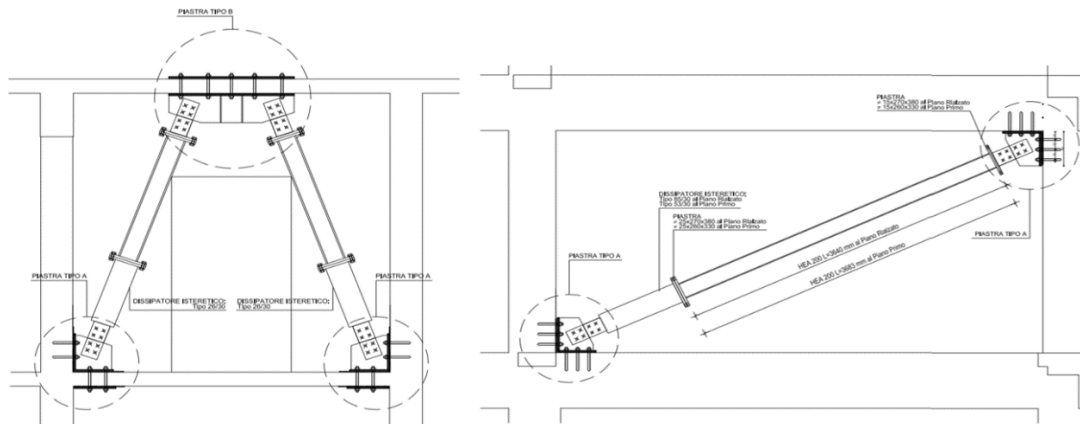


Figura 38 - Edificio post-intervento: particolari strutturali dei controventi dissipativi inseriti nelle maglie di telaio.

### 3.1 Curve di fragilità SMAV “reali” pre e post-intervento

Sul sito dell'Osservatorio Sismico delle Strutture del Dipartimento della Protezione Civile sono disponibili, ed archiviati come indicato in [1], i dati delle misure di rumore ambientale effettuate sull'edificio prima e dopo l'intervento di adeguamento. Questi consentono:

- costruire i modelli SMAV pre e post-intervento dell'edificio;
- valutare la variazione delle frequenze proprie di oscillazione e delle forme modali dell'edificio pre e post-intervento e valutarne, in maniera qualitativa, l'efficacia;
- costruire le curve di fragilità SMAV dell'edificio pre e post-intervento “reali” e valutarne la variazione a seguito di un miglioramento di operatività;
- testare l'affidabilità delle curve di fragilità SMAV alla luce degli eventi sismici che negli anni hanno interessato l'edificio in esame.

Nella Figura 39 si riportano le frequenze proprie di oscillazione e le deformate modali (vista dall'alto dell'ultimo livello) identificate in situ, nonché le percentuali di massa eccitata nelle due direzioni principali della struttura. Si può osservare l'efficacia dell'intervento di adeguamento sia in una riduzione dei periodi propri, sia nella “regolarizzazione” delle forme modali dell'edificio. Infatti dopo l'intervento per l'edificio si registrano i primi due modi traslazionali nella direzione trasversale e longitudinale, mentre il terzo modo risulta di tipo torsionale.

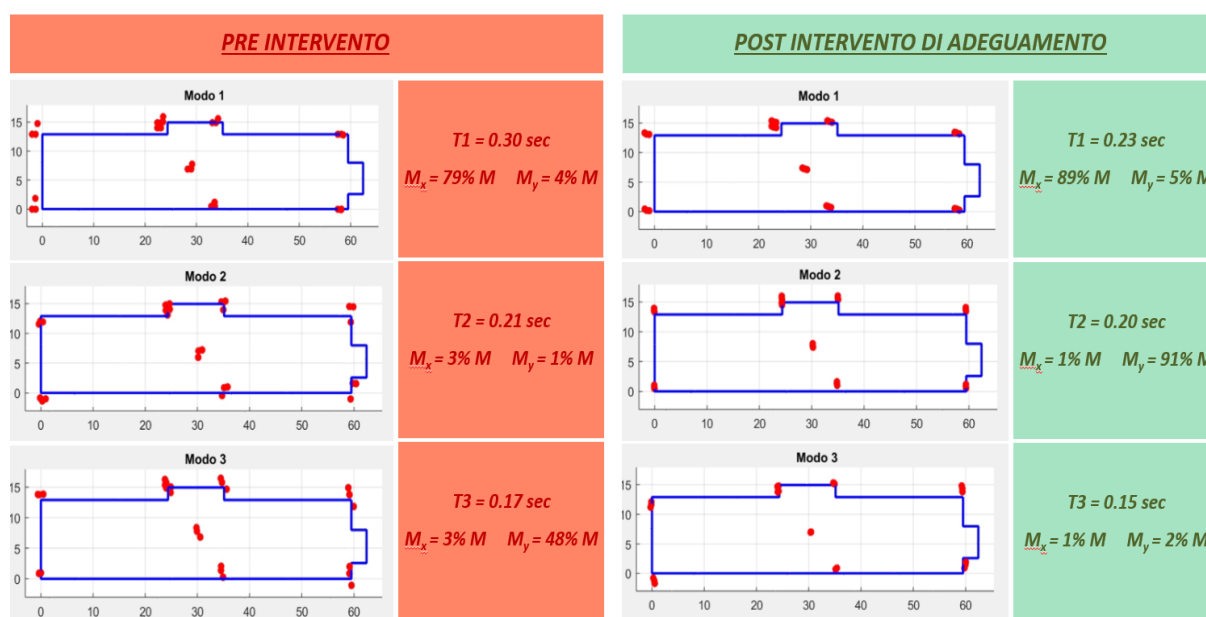


Figura 39 – Proprietà modali reali dell'edificio estratte da misure di rumore ambientale in situ prima e dopo l'intervento di adeguamento.

Con i modelli SMAV, e con la procedura standard indicata nei documenti **Attività A4.1**, **PUG F4.2** e **SICF4.2** si sono costruite le curve di fragilità allo SLD (drift,lim = 3‰) per l'edificio prima e dopo l'intervento. In Figura 40 si riportano i risultati ottenuti.

Per il parametro di intensità sismica IM impiegato per le curve di fragilità, per semplicità si è scelta la PGA al fine di applicare in maniera diretta le metodologie presentate al Capitolo 1, benché si è dimostrata una maggiore correlazione della curva con l'indice ASI nell'intervallo di periodi di competenza dell'edificio in questione.



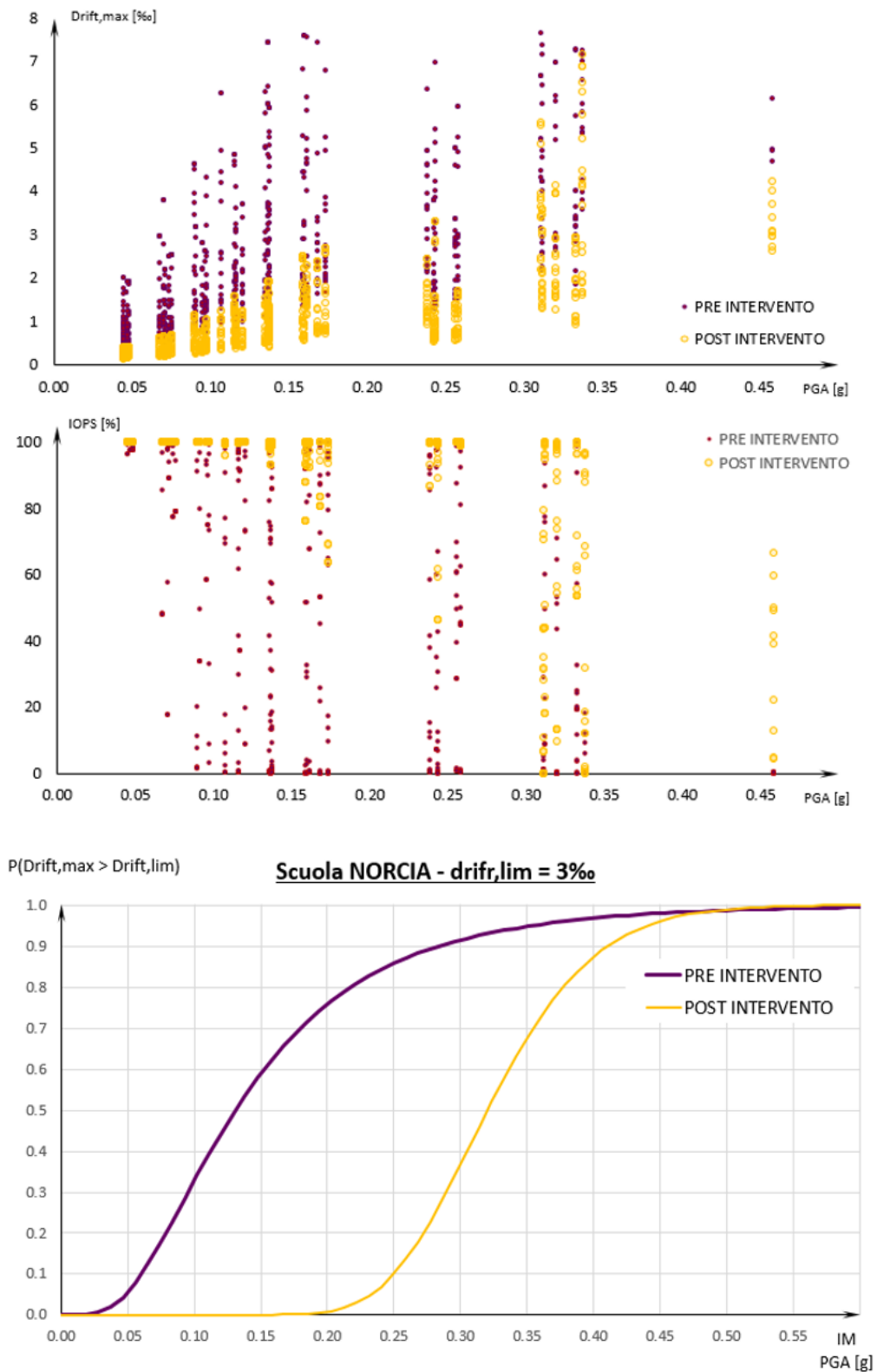


Figura 40 – Scuola media di Norcia pre-intervento (in viola) e post-intervento (in giallo): Nuvola di punti drift,max-PGA, nuvola di punti IOPS-PGA, e curva di fragilità SMAV.

Per valutare l'affidabilità delle curve così costruite si è valutata la prestazione dell'edificio in termini di Probabilità operatività per l'input sismico previsto dalla normativa per il sito di costruzione allo SLD. Evidentemente si sono considerati anche gli effetti di sito, ottenendo una  $PGA_{SLD} = 0.186 \text{ g}$ . Come riportato in Figura 41 le curve di fragilità mostrano un incremento delle prestazioni dell'edificio in linea con un intervento di adeguamento sismico. Si registra infatti una probabilità di operatività prossima al 100% dell'edificio post-intervento; la curva pre-intervento mostra invece una probabilità di operatività del 27% per quel valore di intensità sismica.

In Figura 42 si riporta invece la prestazione dell'edificio post-intervento a seguito della scossa del 30/10/2016 per la quale si è registrata una PGA pari 0.41g. Come mostra la curva, si ottiene una probabilità di operatività dell'11% (non operatività 89%). Osservando le immagini dei report sismici presenti nella scheda dell'edificio in esame effettivamente l'edificio in quell'occasione ha perso l'operatività.

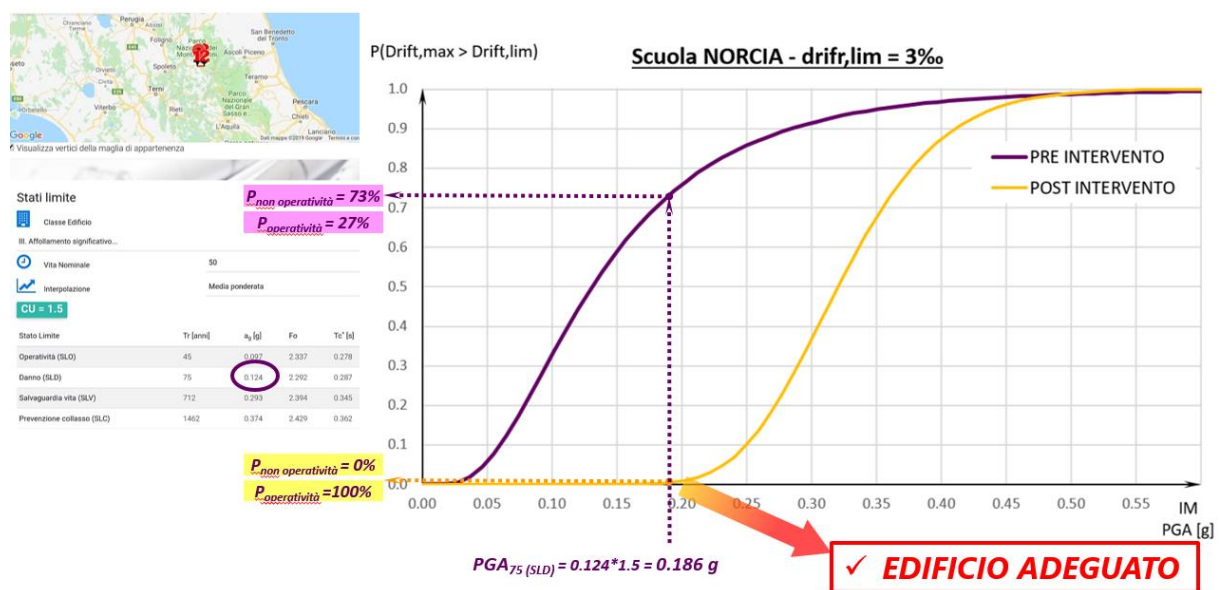


Figura 41 – Valutazione delle performance dell'edificio per lo SLD

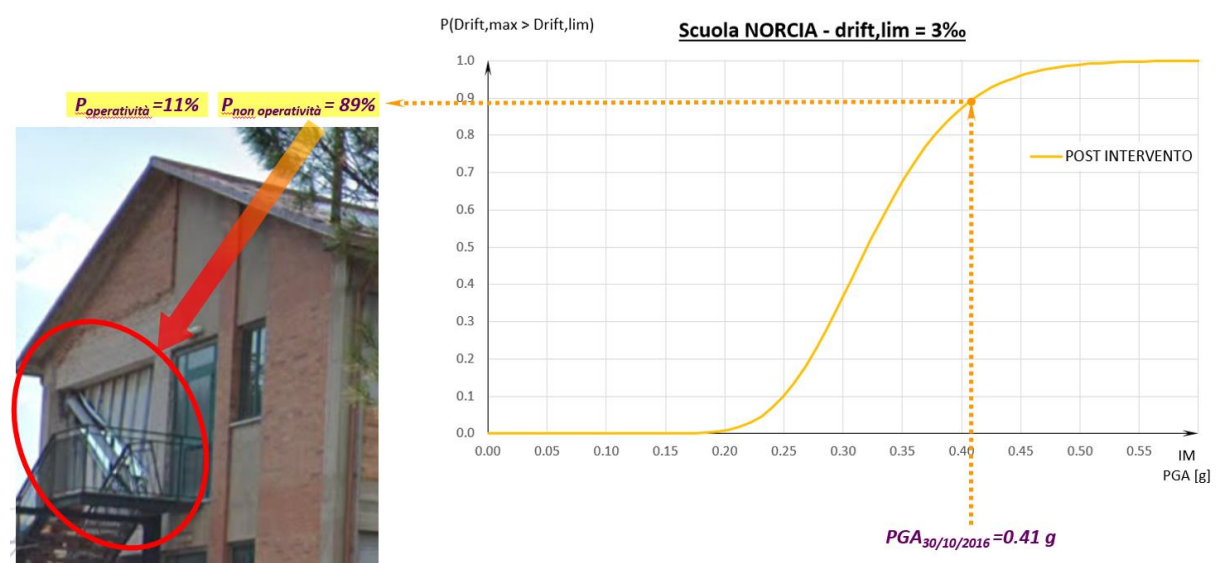


Figura 42 – Valutazione delle performance dell'edificio allo SLD per la scossa del 30/10/2016 per la quale si è registrata una  $PGA=0.41\text{g}$

Le considerazioni sopra riportate possono confermare la capacità delle curve di fragilità SMAV per lo SLD di descrivere le prestazioni dell'edificio, e saranno utilizzate come benchmark per la valutazione delle metodologie predittive.

### 3.2 Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M1 (di letteratura)

Come riportato al paragrafo 1.2 per l'applicazione di tale metodologia è necessario in primo luogo determinare i fattori di scala FS in corrispondenza dei punti A e B della Figura 9 attraverso la relazione (2).

Con tale fine è necessario dapprima determinare  $TR_{SLD}$  e  $TR_{SLC}$ . Per l'edificio in questione risultano i seguenti  $TR_{SLD}$  e  $TR_{SLC}$  a cui sono associate le  $PGA_{SLD}$  e  $PGA_{SLC}$  ricavate dalla curva di pericolosità per il sito in cui insiste l'edificio (Figura 43)

- $TR_{SLD} = 75$  anni ----->  $PGA_{SLD} = 0.125$  g
- $TR_{SLC} = 1462$  anni ----->  $PGA_{SLC} = 0.375$  g

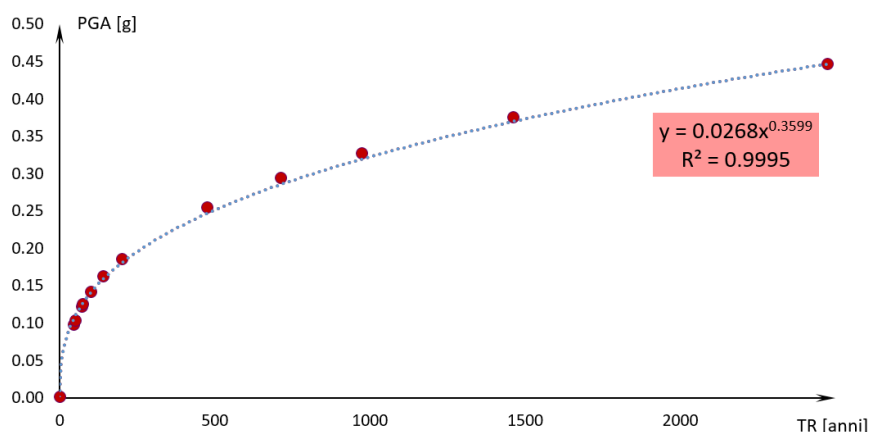


Figura 43 - Curva di pericolosità di sito per il comune di Norcia

In corrispondenza della  $PGA_{SLD} = 0.125$  g la curva di fragilità SMAV pre-intervento mostra una prestazione in termini di probabilità di superamento dell'SLD  $P_{pre\ int_{SSLD}}(0.125\ g) = 46.7\ %$  (curva viola in Figura 40).

Coerentemente con quanto indicato in Tabella 2, fissando una prestazione per lo SLD  $P_{post\ int_{SLD}}(0.125\ g) = 2\ %$ , applicando la relazione (2) si ottiene il seguente fattore di scala:

$$(11) \quad SF(IM_{SLD}) = \frac{P_{post\ int_{SLD}}(IM_{SLD})}{P_{pre\ int_{SLD}}(IM_{SLD})} = \frac{0.02}{0.467} = 0.043$$

Il fattore di scala in corrispondenza dello SLC risulta pari ad 1 (punto B), mentre per regressione lineare si ottiene il fattore di scala per il più basso periodo di ritorno  $TR=30$  anni (punto A), pari a  $SF(TR = 30\ anni) = 0.012$ .

In Figura 44 è riportato l'andamento dei FS(TR) che, applicati ai punti della curva di fragilità pre-intervento, consentono di costruire la curva predittiva del post-intervento di adeguamento.

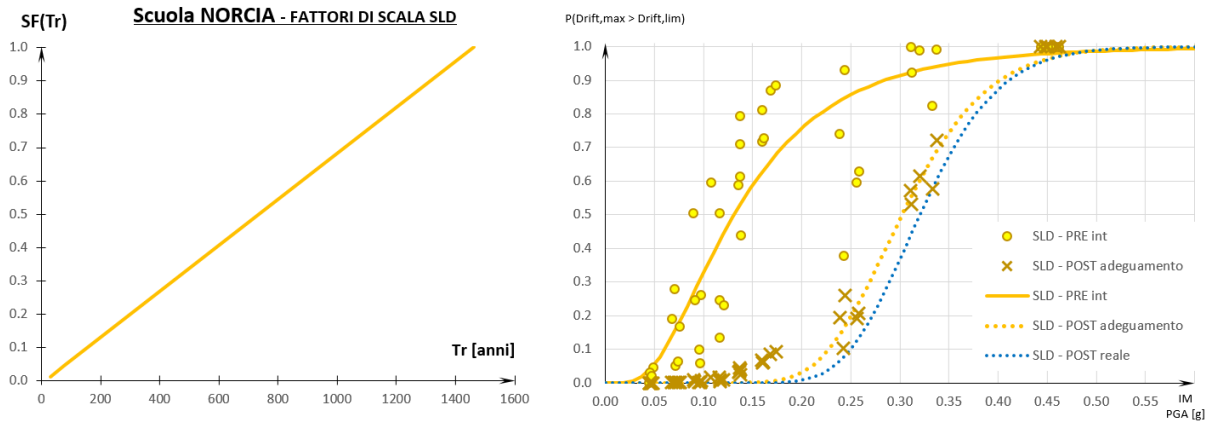


Figura 44 – Metodologia M1: andamento dei fattori di scala  $FS(Tr)$  e curve di fragilità pre e post- intervento. Puntinata blu è riportata la curva di fragilità post-intervento “reale”.

### 3.3 Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M2 (variazione delle frequenze proprie dell’edificio)

Come riportato al paragrafo 1.3 la metodologia prevede una variazione iterativa delle frequenze proprie dell’edificio in maniera iterativa fino a quando, in corrispondenza dell’input sismico con  $IM_{SLD}$ , non venga raggiunta un prefissata prestazione in termini di probabilità di superamento  $P_{post\ int_{SLD}}(IM_{SLD})$ .

Coerentemente con quanto indicato in Tabella 2, la prestazione per lo SLD  $P_{post\ int_{SLD}}(0.186\ g) = 2\ \%$ , si ottiene amplificando le frequenze del modello SMAV pre-intervento del 100% (Figura 45).

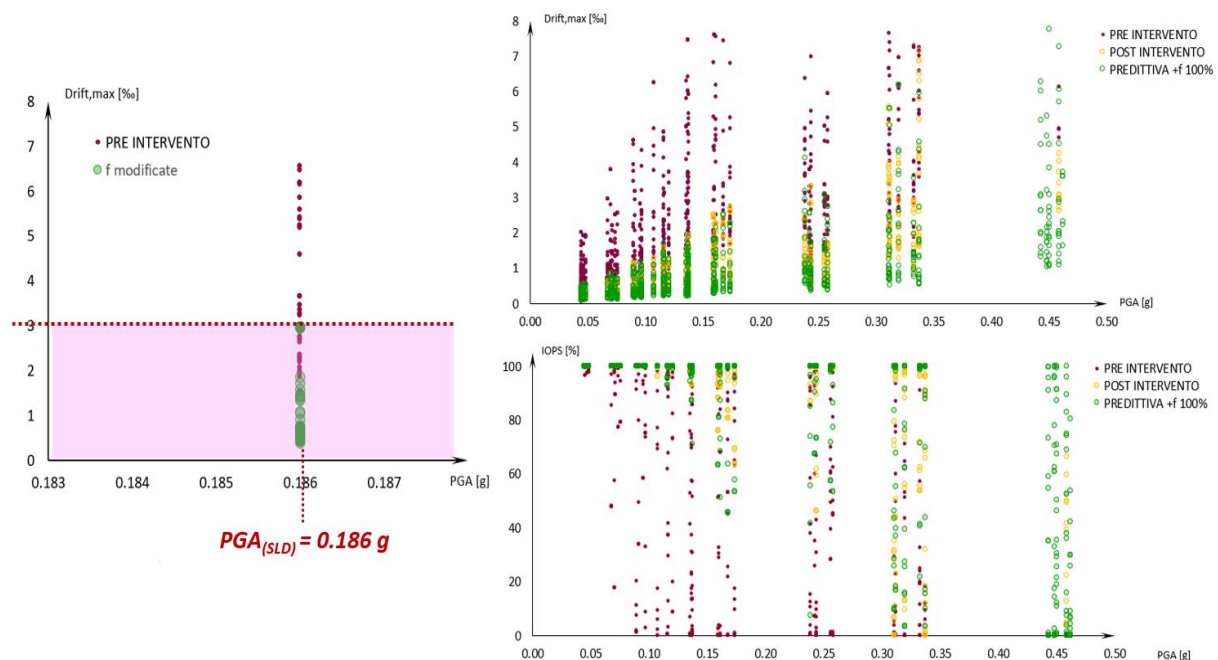


Figura 45 – Risultati analisi SMAV con modello pre-intervento (in viola) e post-intervento con frequenze amplificate del 100% (in verde). Sulla banda verticale in corrispondenza della  $PGA=0.186\ g$  la probabilità di superamento dello SLD è del 2%.

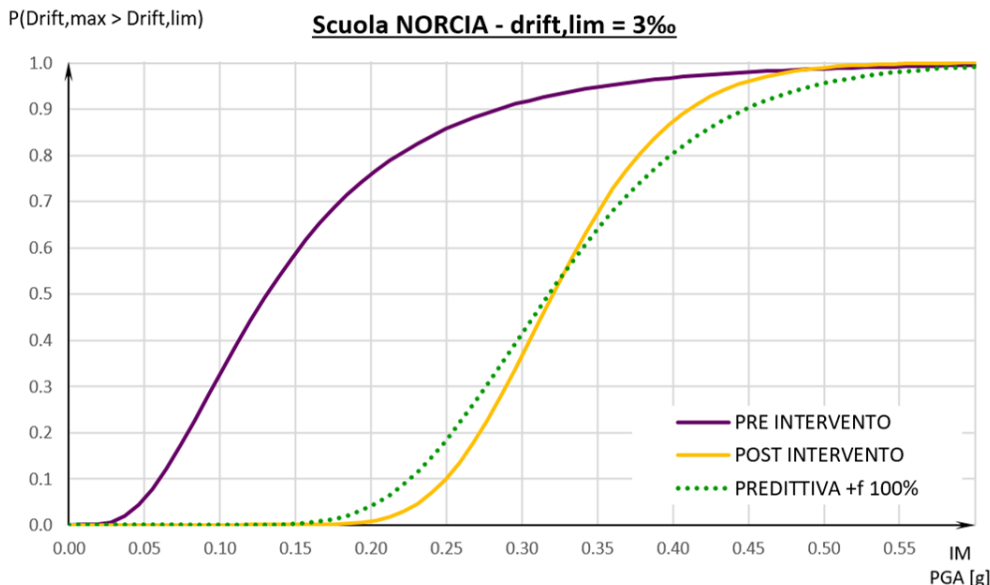


Figura 46 – Curva di fragilità SLD pre e post-intervento ottenuta con metodologia M2. Con tratto giallo continuo è riportata la curva post-intervento “reale”.

### 3.4 Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M3 (variazione dei parametri costituenti)

Per il metodo M3 occorre utilizzare la media ( $\mu_i$ ) e la deviazione standard ( $\sigma_i$ ) della curva di fragilità SMAV relativa alla condizione pre-intervento nonché la media ( $\mu_f$ ) della curva di fragilità SMAV associata all'intervento. Nel caso studio,  $\mu_i = 0.13g$ ,  $\sigma_i = 0.61g$  e  $\mu_f = 0.32g$ , pertanto applicandola relazione (7), la deviazione standard ( $\sigma_f$ ) della curva di fragilità associata all'intervento dovrebbe assumere il seguente valore:

$$(12) \quad \sigma_f = 0.61 + 0.26 \cdot (0.32 - 0.13) = 0.66g$$

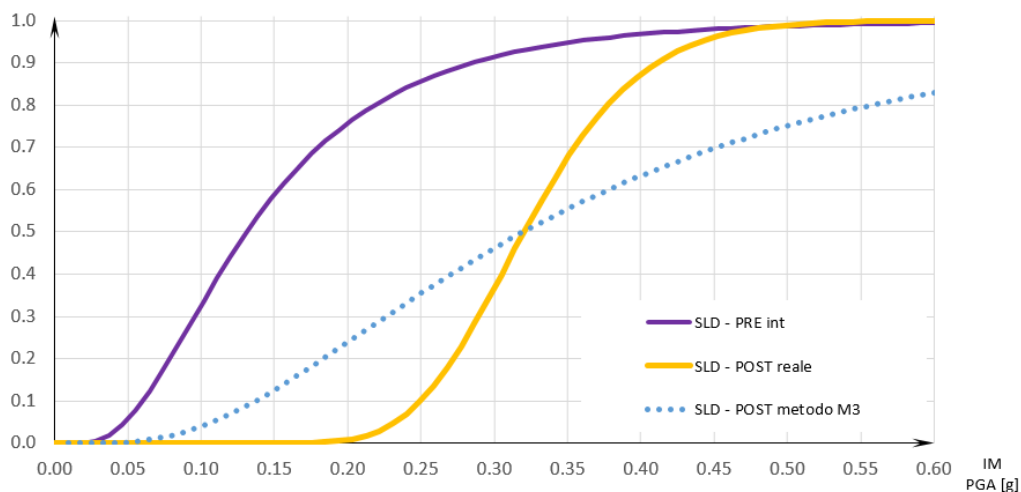


Figura 47 - Curva di fragilità SLD pre e post-intervento ottenuta con metodologia M3. Con tratto giallo continuo è riportata la curva post-intervento “reale”.

### 3.5 Curve di fragilità post-intervento con la metodologia M4 (variazione delle performance dell'edificio) \*\*\*DA COMPILARE

### 3.6 Confronti tra metodologie

Al fine di comparare i metodi proposti nel presente documento e selezionare il metodo che meglio risponde alle esigenze dichiarate in premessa, si riporta in Figura 48 la sovrapposizione delle curve ottenute con i diversi metodi con la curva di fragilità SMAV "reale". Si riportano altresì gli andamenti degli errori al variare del parametro di intensità sismica. In Figura 49 sono sinteticamente riportati i vantaggi e gli svantaggi delle metodologie proposte.

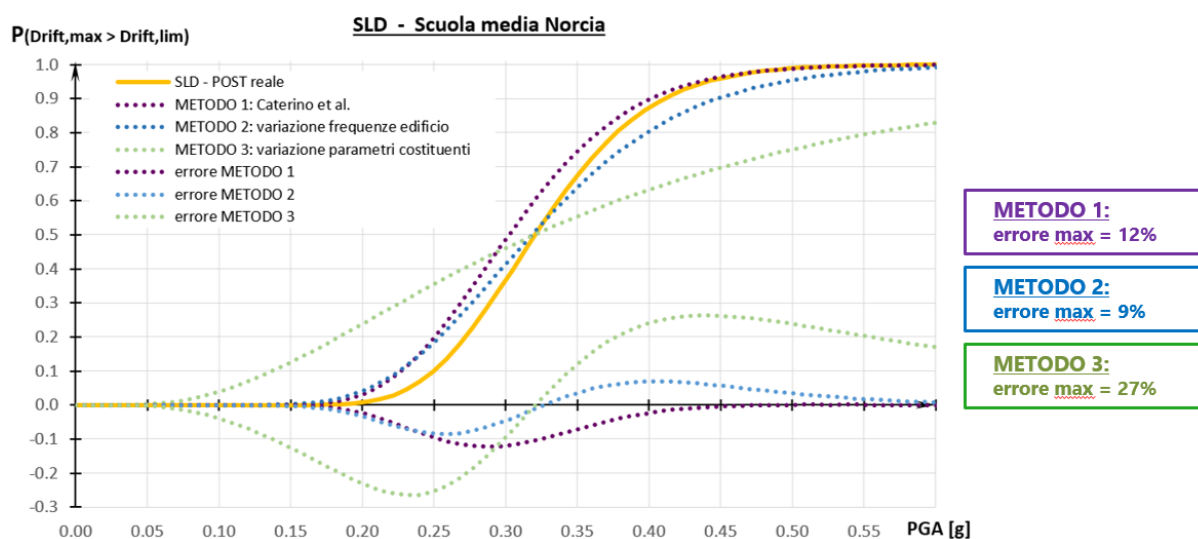


Figura 48 – Curve di fragilità post-intervento di adeguamento: confronti tra le metodologie proposte.

| ID metodologia   | VANTAGGI  | SVANTAGGI   |
|--|---|---|
| 1- DI LETTERATURA<br>(Caterino, Azmoodeh, Manfredi 2018) | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Metodo di letteratura;</li> <li>* Approssima bene i risultati reali;</li> <li>* Basso onere computazionale;</li> <li>* Dev. St. delle curve post int. non vincolata.</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Manipolazione numerica della curva;</li> <li>* Nessuna ipotesi sul tipo di intervento;</li> </ul>  |
| 2- VARIAZIONE DELLE FREQUENZE PROPRIE DELL'EDIFICIO      | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Approssima bene i risultati reali;</li> <li>* Curva costruita con modello SMAV aggiornato (documento attività A4.1);</li> <li>* Dev. St. delle curve post int. non vincolata.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Manipolazione numerica delle proprietà modali dell'edificio (svincolata dalla realtà);</li> <li>* Iterazione manuale del modello SMAV;</li> <li>* Tempi di esecuzione lunghi.</li> </ul> |
| 3- VARIAZIONE DEI PARAMETRI COSTITUENTI                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Basso onere computazionale.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Metodologia da calibrare con numerosi modelli numerici (tempi incompatibili con esigenze PON);</li> <li>* Dev. St. delle curve post int. vincolata.</li> </ul>                           |
| 4- VARIAZIONE DELLE PERFORMANCE DELL'EDIFICIO ***        |   |   |

Figura 49 – Confronto tra le metodologie proposte

### 3.7 Valutazione economica

La metodologia convenzionale per il calcolo dei costi di intervento prevede il calcolo dell'indice di vulnerabilità  $\chi$  attraverso la relazione:

$$(13) \quad \chi_{pre-int} = \frac{\lambda_{SLV}}{\lambda_{pre-int SLV}}$$

dove  $\lambda_{SLV}$  è la massima frequenza annua di superamento consentita per lo SLV (DOMANDA), mentre  $\lambda_{pre-int SLV}$  è la frequenza annua di superamento registrata allo SLV per l'edificio (CAPACITA').

Per la frequenza annua di superamento consentita (DOMANDA) si fa riferimento a quanto indicato in [15] che, in accordo con la classe d'uso dell'edificio, indica  $\lambda_{SLV} = 0.0032$ .

Coerentemente con quanto indicato in Tabella 2, fissando la prestazione per lo SLV  $P_{post-int_{SLV}} = 0.01\%$ , si legge la capacità  $\lambda_{pre-int SLV}$  allo Stato Limite di salvaguardia della Vita dalla curva di fragilità SLV dell'edificio pre-intervento come indicato in Figura 50.

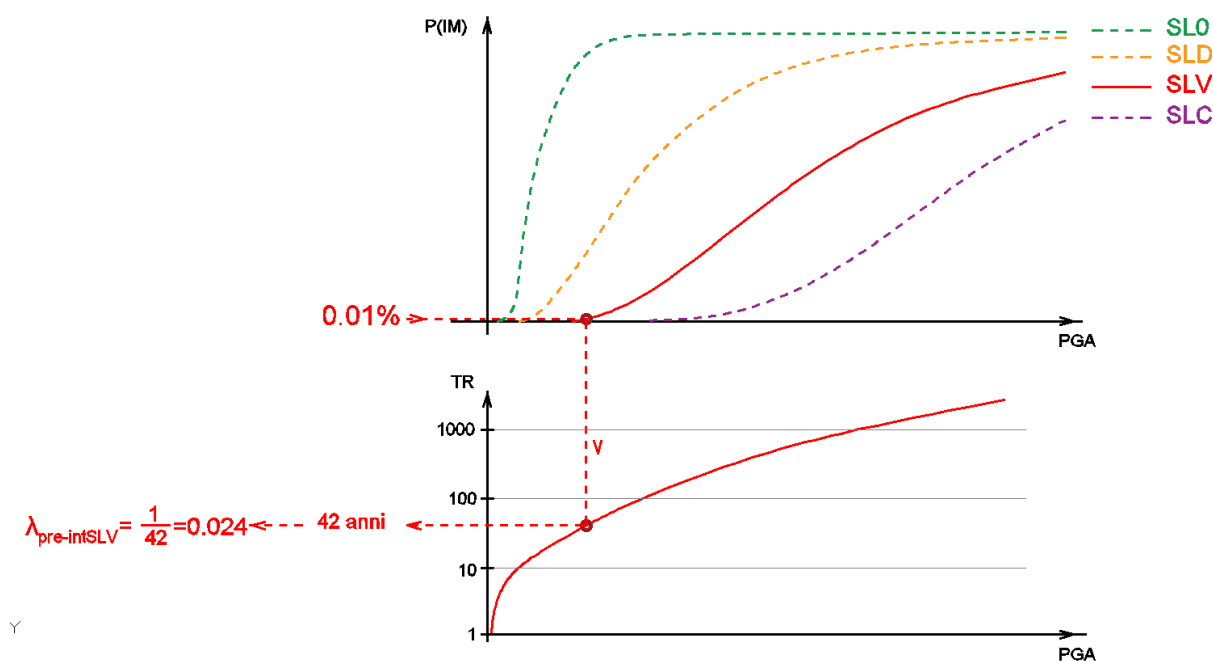


Figura 50 - Determinazione della frequenza media annua di superamento in capacità dell'edificio  $\lambda_{pre-int SLV}$  allo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

Il valore dell'indice di vulnerabilità  $\chi$  assume il valore:

$$(14) \quad \chi_{pre-int} = \frac{0.0032}{0.024} = 0.13$$

Calcolato tale indice attraverso i diagrammi riportati in Figura 51 è possibile stimare il costo di intervento normalizzato al costo di ricostruzione dell'edificio. Per l'edificio in esame, essendo  $\chi < 0.2$  è suggerita la Demolizione e ricostruzione.

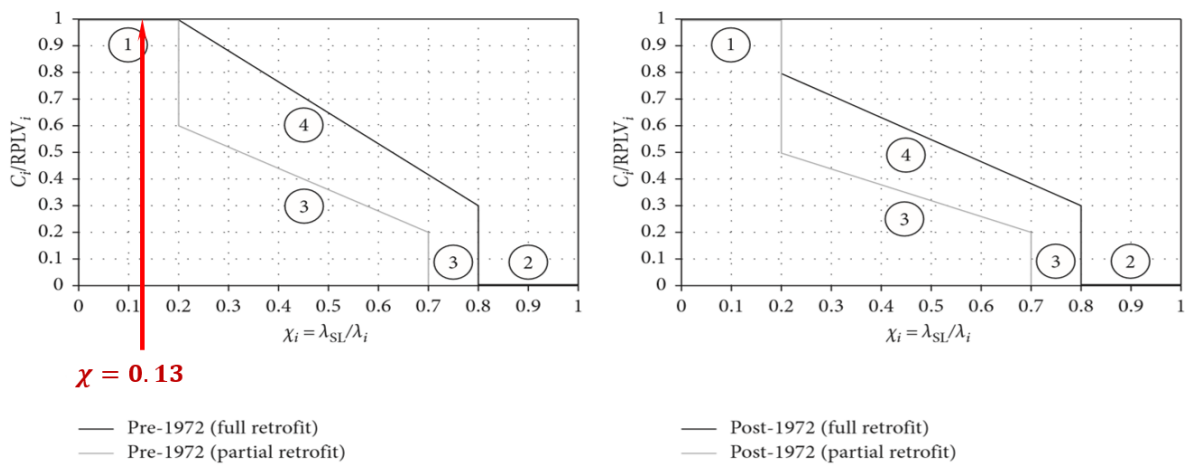


Figura 51 - Stima dei costi di intervento normalizzati al costo di ricostruzione.



## 4. Bibliografia (da completare)

- [1] Mauro Dolce (DPC), Daniele Spina (DPC), Gianluca Acunzo (CNR-IGAG), Noemi Fiorini (CNR-IGAG) e Federico Mori (CNR-IGAG), «Indice di OPERatività Strutturale degli edifici strategici (IOPS) e Istruzioni per l'applicazione della metodologia SMAV. Versione 1.0. b,» Roma, 2016.
- [2] «European Macroseismic Scale 1998,» Conseil De L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Editor G.Grunthal, Luxemburg 1998.
- [3] NTC18, D.M.17 gennaio, Norme Tecniche per le Costruzioni, Ministero delle Infrastrutture, Rome, Italy, 2018.
- [4] Nicola Caterino, Behnam Azmoodeh, Gaetano Manfredi, *Seismic Risk Mitigation for a Portfolio of Reinforced Concrete Frame Buildings through Optimal Allocation of a Limited Budget*, Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 8184756, 18 pages <https://doi.org/10.1155/2018/8184756>
- [5] NTC05, D.M.14 settembre 2005, Norme Tecniche per le Costruzioni, Ministero delle Infrastrutture, Rome, Italy, 2005.
- [6] Federico Mori (CNR-IGAG), Gianluca Acunzo (CNR-IGAG), Noemi Fiorini (CNR-IGAG), Alessandro Pagliaroli (CNR-IGAG), Daniele Spina (DPC) e Mauro Dolce (DPC), «La metodologia SMAV (Seismic Model from Ambient Vibrations) per la valutazione dell'operatività strutturale degli edifici esistenti,» Atti del XVI convegno ANIDIS, 13-17 settembre 2015, L'Aquila.
- [7] Gianluca Acunzo (CNR-IGAG), Noemi Fiorini (CNR-IGAG), Federico Mori (CNR-IGAG) e Daniele Spina (DPC), «VaScosmav: il software sviluppato per l'applicazione della metodologia SMAV (Seismic Model from Ambient Vibrations),» Atti del XVI convegno ANIDIS, 13-17 settembre 2015, L'Aquila.
- [8] G. Acunzo, N. Fiorini, F. Mori e D. Spina, «Modal mass estimation from ambient vibrations measurement: A method for civil buildings.,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, n. 98, pp. 580-593, 2018.
- [9] Eurocodice 2 - EC2
- [10] Eurocodice 8 - EC8
- [11] Rossetto, T., Gehl, P., Minas, S., Galasso, C., Duffour, P., Douglas, J., Cook, O.: FRACAS: A capacity spectrum approach for seismic fragility assessment including record-to-record variability. *Engineering Structures*, No. 125, pp 337-348, (2016).
- [12] Masi, A., Vona, M.: Vulnerability Assessment of Gravity-Load Designed RC Buildings, Evaluation of Seismic Capacity through Non Linear Dynamic Analyses. *Engineering Structures*, Vol. 45, pp 257-269, (2012). [13] Angelo Masi, Marco Vona, Andrea Digrisolo, 2009. Costruzione di curve di fragilità di alcune tipologie strutturali rappresentative di edifici esistenti in c.a. mediante analisi dinamiche non lineari. ANIDIS | Bologna, 2009.
- [14] Hill M., Rossetto T., 2007. Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe, *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-007-9057-y.
- [15] Istruzioni per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti, Commissione di Studio per l'Apredispozione e l'Analisi norme Tecniche Relative alle Costruzioni (CNR-DT 212 2013), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome, Italy, 2013.
- [16] D.M. LL.PP. 30/4/72, Norme Tecniche alle Quali Devono Uniformarsi Le Costruzioni in Conglomerato Cementizio, Normale E Precompresso Ed A Struttura Metallica, Italian Ministry of Public, Rome, Italy, 1972.

[17] LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO SISMICO DELLE COSTRUZIONI (D.M. 28/02/2017 SISMABONUS)