

SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
DOTTORATO IN INGEGNERIA STRUTTURALE E GEOTECNICA

**Valutazione e riduzione del
rischio sismico
delle costruzioni esistenti**

Cinzia Picchi

XXIX Ciclo – A.A. 2015/2016

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
STRUTTURALE E GEOTECNICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

INDICE

PREMESSA.....	6
1. INTRODUZIONE	8
2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	10
3. CONVENZIONALITÀ NELLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ANTISISMICA	13
4. PARAMETRIZZAZIONE DEL RISCHIO SISMICO.....	16
5. MODELLO MACROSISMICO PER VALUTAZIONI DI RISCHIO SISMICO	25
5.1 LE CURVE DI VULNERABILITÀ PER LE CLASSI EMS-98.....	38
5.2 VALUTAZIONE DI EAL SU BASE MACROSISMICA	39
5.2.1 PASSAGGIO DALL'INTENSITÀ MACROSISMICA ALLA FREQUENZE DI OCCORRENZA.....	39
5.2.2 LE CURVE DI PERDITA EAL	40
5.2.3 EAL E STATI LIMITE	46
5.3 APPLICAZIONI PER LA STIMA DI EAL SU BASE MACROSISMICA	49
6. VALIDAZIONE, SU BASE STATISTICA, DEL MODELLO MACROSISMICO	54
6.1 LA BASE STATISTICA	54
6.1.1 Il campione e i costi.....	54
6.1.2 Costruzione delle Curve di Vulnerabilità - Percorso 1.....	56
6.1.3 Costruzione delle Curve di Vulnerabilità - Percorso 2.....	58
6.2 I COSTI ASSOCIATI AL DANNO NON STRUTTURALE	60
6.2.1 Il campione e i costi.....	60
7. INDIVIDUAZIONE DELLA CLASSE MEDIA DI VULNERABILITÀ'	62
8. LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO	69
8.1 IL RISCHIO NELL'AREA AL DI FUORI DEL CRATERE.....	69
8.1.1 La distribuzione del danno al di fuori del cratere sismico – il parametro SEAL	69
8.1.1.1 Stima del SEAL	71
8.1.1.2 SEAL e Stati Limite	75
8.1.2 SEAL - APPLICAZIONI.....	78
9. LA RIDUZIONE DEL RISCHIO.....	79
9.1 LA STIMA DELLE PERDITE DI VITE UMANE.....	79
9.2 IL MODELLO DI PERDITE ATTESE DI VITE UMANE.....	80
9.3 STRATEGIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO	86
9.4 LE STRATEGIE DI INTERVENTO	86
9.5 METODO SPEDITIVO PER LA STIMA DELLA RIDUZIONE DEL RISCHIO	88
10. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	90
11. BIBLIOGRAFIA	91

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.- Ripartizione di RC fra contenuti, elementi non strutturali e struttura (FEMA E-74).	17
Figura 2.- EAL: i punti della spezzata indicano la frequenza annua di superamento delle prestazioni.	18
Figura 3.- Perdite economiche dirette (RC) in funzione della frequenza annua di superamento.	19
Figura 4.- Esempi di curve di pericolosità di siti diversi.	20
Figura 5.- Perdita economica diretta al variare di PGA, per due edifici con diversa vulnerabilità.	21
Figura 6.- EAL di edifici con diversa vulnerabilità (V_1 , V_2), collocati in siti a diversa pericolosità (H_1 , H_2).	22
Figura 7.- Frequenza di feriti e morti (in % degli occupanti) in funzione della percentuale di danno alle strutture.	23
Figura 8.- Percentuale di feriti e morti sul totale degli occupanti, in funzione del danno espresso in %RC.	24
Figura 9.- Matrice di probabilità di danno proposta dall'ATC.	24
Figura 10.- Scala macrosismica MMI, con vari parametri d'interesse ad essa correlati.	26
Figura 11.- Differenziazione delle diverse tipologie di edifici in classi di vulnerabilità EMS-98.	27
Figura 12.- Significato dei termini "alcuni", "molti" e "la maggior parte" nell'EMS-98.	28
Figura 13.- Distribuzioni di Poisson relative alle quantità "alcuni – molti – la maggior parte" (EMS-98).	29
Figura 14.- Formalizzazione di "alcuni", "molti", "la maggior parte" utilizzando distribuzioni di Poisson.	30
Figura 15.- Livelli di danno degli edifici in muratura e in c.a. (secondo EMS-98).	31
Figura 16.- Valori medi del livello di danno EMS-98 per ciascuna classe di vulnerabilità e intensità.	31
Figura 17.- Distribuzioni del danno al variare dell'intensità e della classe di vulnerabilità, secondo EMS98.	32
Figura 18.- Distribuzione dei livelli di danno, al variare del numero medio di edifici danneggiati P (in %).	33
Figura 19.- Distribuzione di %RC (secondo ATC) tra i livelli di danno, per le diverse intensità MMI.	33
Figura 20.- Andamento di %RC in funzione di P (in accordo con ATC).	34
Figura 21.- Valori di P al variare dell'Intensità e della classe di vulnerabilità (secondo EMS-98).	35
Figura 22.- Distribuzione dei livelli di danno, al variare del numero medio di edifici danneggiati P (in %).	36
Figura 23.- Andamento di %RC in funzione dell'intensità macrosismica e della vulnerabilità EMS-98.	37
Figura 24.- Curve di Vulnerabilità, per le classi EMS-98 (%RC _{TOT} in funzione dell'intensità macrosismica).	38
Figura 25.- Curve %RC _{STRUTT} – I (EMS98) - %RC _{NON STRUTT} – I (EMS98).	38
Figura 26.- Curve %RC _{STRUTT} – I (EMS98) - %RC _{NON STRUTT} – I (EMS98).	39
Figura 27.- Valori di a, b, R ² per ciascuna delle 4 zone sismiche.	40
Figura 28.- Valori di λ , per ciascuna delle 4 zone sismiche e delle 11 intensità.	40
Figura 29.- Perdite relative alle diverse classi di vulnerabilità, per edifici ricadenti nelle Zone 1 e 2.	41
Figura 30.- Perdite relative alle diverse classi di vulnerabilità, per edifici ricadenti nelle Zone 3 e 4.	42
Figura 31.- Perdite relative alla componente strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 1 e 2.	44
Figura 32.- Perdite relative alla componente non strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 1 e 2.	45
Figura 33.- Perdite relative alla componente strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 3 e 4.	45
Figura 34.- Perdite relative alla componente non strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 3 e 4.	46
Figura 35.- Perdite attese (EAL) e Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 1 – 2 - 3.	48
Figura 36.- EAL/RC (%) - Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 1 – 2.	48
Figura 37.- EAL/RC (%) - Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 3 – 4.	49
Figura 38.- Caratterizzazione degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1.	50
Figura 39.- Vulnerabilità degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1.	50
Figura 40.- Curve dei danni aggregati degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1.	51
Figura 41.- Caratterizzazione degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2.	52
Figura 42.- Vulnerabilità degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2.	52
Figura 43.- Curve dei danni aggregati degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2.	53
Figura 44.- Campione edifici esito B o C ed E come B o C dei Comuni nelle Province AQ-TE-CH-PE.	55
Figura 45.- Vulnerabilità edifici esito B o C ed E come B o C dei Comuni nelle Province AQ-TE-CH-PE.	56
Figura 46.- Classi omogenee di costo di UII con esito B o C, dei Comuni nelle province.	56
Figura 47.- Percorso 1- Vulnerabilità EMS-98 B e C vs. UII con esito B o C dei Comuni nelle province.	57
Figura 48.- Percorso 1- Vulnerabilità EMS-98 D vs. UII con esito B o C dei Comuni nelle province.	58
Figura 49.- Percorso 2- Vulnerabilità EMS-98 B e C vs. U.I.I. con esito B o C dei Comuni nelle province.	59
Figura 50.- Percorso 2- Vulnerabilità EMS98 D vs U.I.I. con esito B o C dei Comuni nelle province.	59
Figura 51.- Campione dei condomini del Comune di L'Aquila e costi medi di riparazione.	60
Figura 52.- Classi omogenee di costo per i condomini del Comune di L'Aquila.	61
Figura 53.- Vulnerabilità non strutturale - condomini del Comune di L'Aquila.	61
Figura 54.- Legge di attenuazione di Gomez Capera – 2006 ($I_{pic.} = 10$).	70
Figura 55.- Intensità – distanza.	70
Figura 56.- Superfici – distanza – intensità (I_{EMS}).	71
Figura 57.- Contributi di RC in % di RC _{TOT} – distanza – intensità (I_{EMS}).	71
Figura 58.- Densità delle perdite economiche dirette attese – SEAL.	72
Figura 59.- Distribuzione cumulata delle perdite economiche dirette attese al variare di d.	72
Figura 60.- Andamento di SEAL al variare di d, in forma non cumulata e cumulata, per $I_{ep.}=10$.	72
Figura 61.- Andamento di SEAL al variare di d, in forma non cumulata e cumulata, per $I_{ep.}=9$.	73

Figura 62.- Andamenti di SEAL al variare di d e di SEAL al variare di I (Classi EMS-98 A e B).	73
Figura 63.- Andamenti di SEAL al variare di d e di SEAL al variare di I (Classi EMS-98 C e D).	74
Figura 64.- Andamento di SEAL in funzione di d , al variare della classe di vulnerabilità e di I_p .	74
Figura 65.- Distribuzione (non cumulata e cumulata) del danno non strutturale (SEAL) al variare di d .	75
Figura 66.- Frequenza di occorrenza λ - distanza.	75
Figura 67.- SEAL – SLD - SLO (ZONA 1 – ZONA 2 – ZONA 3).	76
Figura 68.- SEAL – SLD (ZONA 2 – ZONA 3).	76
Figura 69.- CLASSI A – B – C SEAL – SLD (ZONA 2).	76
Figura 70.- SEAL vs SLE - I.	77
Figura 71.- SEAL – d vs EAL – λ (Zona 1).	78
Figura 72.- SEAL – sisma L'Aquila 2009.	78
Figura 73.- Modello di stima delle perdite attese di vite umane – Jaiswal e Wald 2010.	80
Figura 74.- Modello di stima delle perdite attese di vite umane (Jaiswal e Wald 2010) – danni attesi (EAL).	81
Figura 75.- Rapporti di danno (EAL), per le classi di vulnerabilità da A_{EMS} a E_{EMS} - Zona 1	82
Figura 76.- Rapporti di danno (EAL), per le classi di vulnerabilità da A_{EMS} a E_{EMS} - Zona 2	82
Figura 77.- Disaggregazione, in funzione di EAL, della % di morti attesi sulle classi da A_{EMS} a E_{EMS} - Zona 1.	83
Figura 78.- Disaggregazione, in funzione di EAL, della % di morti attesi sulle classi da A_{EMS} a E_{EMS} - Zona 2.	84
Figura 79.- Modelli di perdite attese di vite umane.	84
Figura 80.- Perdite economiche dirette vs Perdite attese di vite umane vs SLE.	86
Figura 81.- Esempio di strategia di intervento di riduzione del rischio sismico.	87
Figura 82.- Curve interpolanti - modello di riduzione del rischio sismico.	88
Figura 83.- Curve interpolanti - riduzione del rischio sismico agli SLE.	89
Figura 84.- Curve interpolanti - riduzione del rischio sismico agli SLU.	89

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1</i>	<i>Costruzioni in muratura e con struttura in c.a.: valori medi delle classi di vulnerabilità globale</i>
<i>Tabella 2</i>	<i>Costruzioni di muratura: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe</i>
<i>Tabella 3</i>	<i>Costruzioni con struttura di c.a. a telaio: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe</i>
<i>Tabella 4</i>	<i>Costruzioni con struttura di c.a. a pareti: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe</i>

PREMESSA

Questa tesi si propone di valutare e misurare **la vulnerabilità sismica degli edifici esistenti ed il rischio (perdite) ad essa conseguente; si accetta, quindi, come inevitabile il fatto che le costruzioni, in relazione alla propria vulnerabilità, si danneggino per effetto delle azioni sismiche e che il concetto di sicurezza non implichi necessariamente una perdita (rischio) nulla.**

Rispetto al classico approccio della sicurezza, che fissa a priori una probabilità (piccola a piacere, ma finita) di avere danni, l'approccio proposto non ha assunzioni a priori in quanto tutte le decisioni vengono assunte sulla base di considerazioni di carattere economico, confrontando la riduzione attesa delle perdite di origine sismica, con il costo che tale riduzione comporta.

L'approccio richiede, in primo luogo, la **valutazione del rischio sismico** e poi, sulla base del quadro emerso da tale analisi, consente di **valutare la "convenienza" degli interventi mirati a ridurlo.**

Il suo vantaggio principale risiede nel fatto che **si presta bene a cogliere correttamente le reali dimensioni del problema** in quanto, stimata la vulnerabilità, permette di monetizzare i danni attesi (così da valutare la convenienza economica di intervenire o meno) e, subordinatamente, permette di individuare gli interventi economicamente più "convenienti" e, quindi, più efficaci.

D'altra parte, con riferimento al patrimonio edilizio storico Italiano, che costituisce buona parte del patrimonio culturale di questo Paese, si deve notare che esso è costituito prevalentemente da edifici a medio – alta vulnerabilità dislocati principalmente a ridosso dell'Appennino ovvero proprio nelle zone a più alta sismicità (Zona 1 e Zona 2). Affrontare, quindi, **il problema della riduzione della vulnerabilità sul territorio Italiano** si traduce, in primo luogo, in **un problema economico** che deve essere correttamente stimato. In quanto tale, si tratta di un problema **adatto ad essere trattato con un approccio basato sulla valutazione del rischio.**

In questa tesi viene proposto un **MODELLO MACROSISMICO PER VALUTAZIONI DI RISCHIO** sugli edifici esistenti, validato con dati reali e di cui si presentano due esempi applicativi, e **un collegato METODO SPEDITIVO PER LA STIMA DELLA RIDUZIONE DEL RISCHIO** conseguibile a seguito di interventi (che è tuttora oggetto di sviluppo).

Il MODELLO MACROSISMICO PER VALUTAZIONI DI RISCHIO è articolato su tre elementi, che costituiscono altrettanti aspetti da considerare per una posizione corretta del problema, e sono:

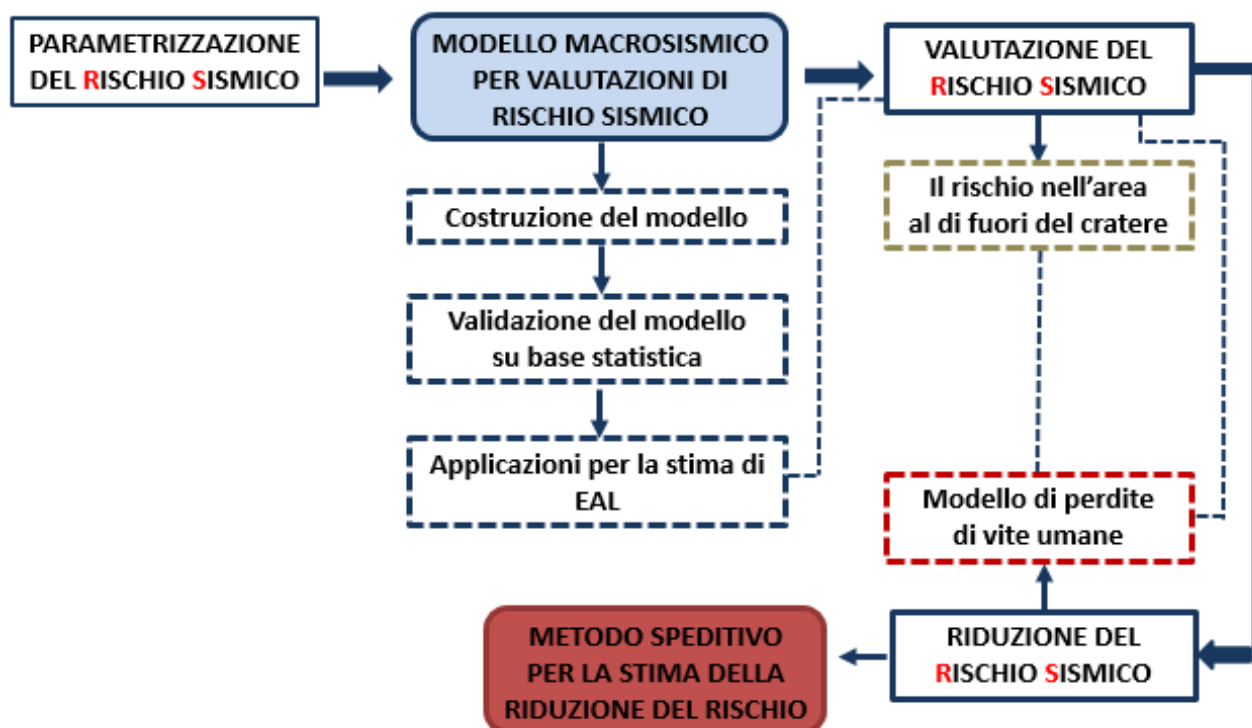
- la **caratterizzazione della vulnerabilità costruttiva** e la connessa **stima delle perdite economiche dirette attese;**
- la **stima delle perdite attese in termini di vite umane, disaggregate in base ai livelli di vulnerabilità;**
- la **stima delle perdite economiche dirette attese nell'area oltre il cratere sismico.**

Il **collegato METODO SPEDITIVO PER LA STIMA DELLA RIDUZIONE DEL RISCHIO** dovrebbe costituire uno strumento rapido che consenta di valutare la riduzione del rischio a seguito di interventi, attraverso un modello analogo a quello elaborato per la valutazione del rischio.

Il lavoro comprende:

- una parte iniziale di **inquadramento del problema** con la **PARAMETRIZZAZIONE DEL RISCHIO SISMICO;**
- la descrizione del **MODELLO MACROSISMICO PER VALUTAZIONI DI RISCHIO**, che si propone;
- l'analisi degli elementi significativi da stimare in una **VALUTAZIONE DI RISCHIO SISMICO;**
- la descrizione di un modello speditivo per la stima della **RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO.**

Il **modello complessivo di valutazione e riduzione del rischio sismico elaborato** è di seguito sintetizzato.



1. INTRODUZIONE

L'urgenza di affrontare la questione del rischio sismico in Italia attraverso un'azione sistematica di prevenzione strutturale, ossia attraverso il rafforzamento delle costruzioni esistenti, si ripropone non solo e drammaticamente dopo ogni terremoto distruttivo, ma anche dopo terremoti di non elevata magnitudo, ma comunque in grado di produrre danni non trascurabili, evidenziando la notevole vulnerabilità delle costruzioni in Italia.

Per affrontare il problema alla radice, oltre a disporre di enormi risorse finanziarie, occorre conoscere l'attuale livello di rischio. Ciò è vero non solo a livello globale, utilizzando basi di dati disponibili contenenti informazioni elementari (numero di piani, epoca di costruzione e materiale della struttura principale - muratura o calcestruzzo armato, etc.), ma anche a livello di singolo edificio, e vale tanto per le opere e gli edifici pubblici, quanto per le costruzioni private.

Come rappresentare il rischio sismico a fini decisionali, ossia individuare i parametri che lo caratterizzano in relazione alle finalità della valutazione e della rappresentazione del rischio, non è questione di poco conto.

Come è noto, il rischio sismico si esprime attraverso le conseguenze che i possibili futuri terremoti possono produrre; tali conseguenze sono sia economiche, sia sociali.

Le conseguenze economiche sono fondamentalmente determinate dai danni alla costruzione stessa, che si traducono nei cosiddetti costi diretti, nonché dai danni ai contenuti e alle attività che si svolgono al suo interno. In particolare queste ultime possono essere interrotte a causa dell'inagibilità della costruzione, nonché dei danni agli impianti e alle attrezzature necessarie al loro svolgimento.

Le conseguenze sociali, ancorché in termini generali legate ai contraccolpi psicologici, alle lacerazioni del tessuto sociale e ad altri aspetti che possono avere riscontri anche molto negativi nel breve, medio e lungo termine, sono, in maniera preponderante, riconducibili ai danni alle persone, ossia ai morti e ai feriti che il terremoto provoca.

Il rischio sismico di una singola costruzione, inteso nella sua complessiva e complessa articolazione, dipende da tre fondamentali fattori:

1. la pericolosità del sito,
2. la vulnerabilità della costruzione,
3. l'esposizione delle attività, dei beni e delle persone presenti permanentemente, periodicamente o solo saltuariamente nella costruzione.

La **classificazione del rischio sismico** delle singole costruzioni, utile a definire le conseguenze che i terremoti possono determinare in futuro, **può essere riferita:**

- alle **caratteristiche intrinseche di resistenza al sisma** della costruzione (la sua vulnerabilità sismica),
- ai **danni producibili dai futuri terremoti**, ovvero direttamente al rischio sismico.

È importante focalizzare l'attenzione sulla distinzione tra questi due tipi di classificazione, ugualmente utili e entrambi frequentemente utilizzati.

Le scale macrosismiche, ad esempio, per valutare l'intensità di un terremoto utilizzano una classificazione di tipo qualitativo-tipologico della vulnerabilità delle costruzioni, prendendo in considerazione il livello di danneggiamento che esso ha provocato.

D'altra parte, quando si effettua una verifica di sicurezza di una costruzione, esistente o nuova, non si fa altro che valutare le conseguenze che possibili futuri terremoti possono provocare, tenendo conto della pericolosità sismica del sito, per cui la stessa costruzione può appartenere a classi di

rischio diverse in relazione alla pericolosità del sito in cui sorge.

In questa tesi si prenderà in considerazione la classificazione in termini di vulnerabilità, determinando le curve di vulnerabilità o le funzioni di fragilità di una costruzione o, in alternativa, individuando la classe di vulnerabilità di appartenenza in base alle caratteristiche tipologico-strutturali, con la finalità di arrivare ad una classificazione riferita al rischio sismico, dunque dipendente non solo dalla vulnerabilità, ma anche dalla pericolosità del sito e dall'esposizione.

In tutta la trattazione è bene tener presente la netta distinzione che c'è e deve esserci, tra vulnerabilità e rischio, onde evitare confusioni nelle classificazioni e malintesi nelle applicazioni reali.

Questa tesi cerca di tracciare un percorso chiaro per la classificazione del rischio sismico degli edifici, sia nello stato di fatto, sia dopo un intervento. È importante sottolineare come essa, necessariamente, si riferisca a grandezze (l'occorrenza dei terremoti, le caratteristiche costruttive degli edifici, la vulnerabilità intesa come previsione del danno data l'intensità del terremoto) che hanno caratteristiche di forte aleatorietà e non sono esattamente conoscibili.

Pertanto, anche i risultati che si ottengono seguendo il percorso descritto saranno affetti da una significativa variabilità probabilistica, dunque da una non trascurabile incertezza sul valore del parametro di riferimento (ad esempio il valore atteso delle perdite annuali) nonostante quest'ultimo sia scaturito da un calcolo svolto con assoluta precisione formale.

Perciò è opportuno che la classificazione, pur riferita a un preciso parametro, avvenga per fasce di valori, ossia per classi di vulnerabilità, come in effetti è proposto. Si sottolinea inoltre come, in ogni caso, possa accadere che la classe di rischio individuata per lo specifico edificio non lo rappresenti in modo corretto, specie se il valore del parametro cade in prossimità degli estremi dell'intervallo che definisce la classe.

Sebbene nella tesi si sia cercato di esemplificare i diversi tipi di perdite, sia economiche sia sociali, per ragioni di operatività l'unico parametro che verrà preso in considerazione è dato dalle cosiddette perdite dirette, ovvero dai costi di riparazione delle parti strutturali e non strutturali stimabili in relazione all'occorrenza dei possibili futuri terremoti.

Infatti non v'è dubbio, come ben illustrato nel seguito, che le perdite economiche (dirette) sono fortemente influenzate dai terremoti più frequenti, e perciò di minore intensità, che producono danni frequenti alle parti non strutturali, ma rischi limitati o nulli per la vita e l'incolumità delle persone.

Al contrario, sono i terremoti più violenti, che però hanno probabilità di occorrenza molto bassa, quelli che, provocando il collasso strutturale, mettono a repentaglio le vite umane. Essendo a tutt'oggi controversa la possibilità di quantificare in termini monetari le perdite umane, così da esprimerle come perdite indirette con una metrica omogenea con quella delle perdite dirette, una classificazione del rischio che guardi solo alle perdite dirette evidenzia solo parte del problema.

Nelle more della definizione di una classificazione che guardi anche alle perdite sociali, le scelte che proprietari e valutatori faranno, rispetto alla riduzione della vulnerabilità e del rischio, non potranno non tener conto anche degli aspetti sociali detti.

Poiché gli strumenti valutativi a disposizione dell'esperto, progettista o valutatore della sicurezza di una costruzione, sono numerosi, si è tentato, in questo documento, di lasciare libertà di scelta su come affrontare il problema, anche in relazione all'uso che della classificazione del rischio si vuole fare, ad esempio in relazione al tipo di intervento adottato, di rafforzamento o di miglioramento.

2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

La crescente consapevolezza che le decisioni, specie se strategiche, devono essere assunte valutando prioritariamente la loro sostenibilità a fronte di risorse limitate, sta orientando gli interessi dell'ingegneria civile verso le costruzioni esistenti e verso la valutazione e la riduzione dei diversi rischi, in specie quelli riconducibili ai rapporti tra caratteristiche tipiche delle costruzioni esistenti e peculiarità dell'ambiente in cui esse sorgono.

La questione, di per sé complessa in quanto implica anche l'individuazione di livelli di sicurezza minimi accettabili (eventualmente diversi da quelli attualmente richiesti alle nuove costruzioni), si complica ulteriormente se ad essa si accompagna l'istanza a conseguire una qualità abitativa superiore a quella perseguita all'atto della costruzione.

In Italia i problemi sopra enunciati si possono brevemente riassumere:

- nella valutazione e riduzione del rischio sismico su costruzioni e infrastrutture,
- nell'acquisizione di livelli d'isolamento termoacustico superiori a quelli ammessi in passato.

Se si focalizza l'attenzione sul rischio sismico, inteso come misura (probabilistica) dei danni prodotti dai possibili terremoti futuri, va subito rimarcato come Governo e Parlamento abbiano istituito, nello stato di previsione del Ministero dell'Economia e delle Finanze (nel seguito MEF), un fondo per la prevenzione del rischio sismico utilizzando, a tal fine, la legge per la ricostruzione delle aree colpite dal terremoto dell'Abruzzo del 6 aprile 2009 (art. 11, Legge n. 77/2009).

La spesa autorizzata è stata di **44 M€** per il 2010, di **145,1 M€** per il 2011, di **195,6 M€** per ciascuno degli anni 2012, 2013 e 2014, di **145,1 M€** per il 2015 e di **44 M€** per il 2016. L'attuazione è stata affidata al Dipartimento della Protezione Civile (nel seguito DPC) e regolata attraverso ordinanze.

La cifra complessiva di **965 M€** (stanziata nei sette anni del programma) è largamente insufficiente a coprire il fabbisogno (alcune centinaia di miliardi di euro) stimato necessario per l'adeguamento sismico delle costruzioni (pubbliche e private) e delle opere infrastrutturali strategiche.

Per cercare di utilizzare tale cifra al meglio, l'OPCM 3843 (19/01/10) ha istituito una Commissione di esperti del rischio sismico che ha definito obiettivi e criteri generali di un'efficace azione di prevenzione da attuare con i fondi messi a disposizione. Gli obiettivi individuati sono, in particolare, la mitigazione del rischio sismico attraverso azioni e interventi solo marginalmente sviluppati negli anni passati.

Oltre agli interventi su edifici pubblici strategici e rilevanti, sono stati finanziati, infatti, anche studi di microzonazione sismica nei territori comunali (utili alla pianificazione urbanistica e di emergenza), interventi sull'edilizia privata e sulle infrastrutture (attraverso contributi economici diretti) per opere di rafforzamento locale o di miglioramento sismico delle strutture¹ alternative all'adeguamento sismico.

L'enorme fabbisogno stimato necessario per l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti (loro allineamento ai livelli di sicurezza imposti alle nuove costruzioni), unito alla consapevolezza della sostanziale impossibilità a disporre in una condizione di risorse limitate hanno posto, infatti, una questione fondamentale e cioè **quale sia, in una situazione di risorse limitate, il livello minimo di sicurezza da perseguire attraverso gli interventi sulle costruzioni esistenti.**

La necessità d'interventi che conseguano livelli di sicurezza minori di quelli attribuiti alle nuove

1 Dolce, M. (2012), *The Italian National Seismic Prevention Program*, Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 2012, Lisbona, Portogallo (Relazione su invito).

costruzioni è stata ulteriormente ribadita dalla crescente consapevolezza che, spesso, le vaste aree ad intensità sismica medio bassa (poco perniciose in termini di morti e feriti), che sempre circondano le ridotte aree epicentrali dei terremoti violenti, possono pesare sull'entità dei danni in modo più significativo delle aree epicentrali in relazione alla distribuzione territoriale della popolazione e delle relativa attività.

I differenti livelli di sicurezza conseguibili con interventi sulle costruzioni esistenti sono contemplati e ben descritti dalle vigenti **Norme Tecniche per le Costruzioni** (nel seguito **NTC**) che prevedono tre diversi livelli di intervento sulle costruzioni esistenti, finalizzandoli al conseguimento di livelli di sicurezza antisismica 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, incremento che deve comunque essere valutato attraverso analisi e verifiche effettuate sull'intera struttura. 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.

Quale sia, dunque, in un'ottica di prevenzione e riduzione del rischio sismico a fronte di risorse limitate, il livello minimo di sicurezza da conseguire attraverso interventi sulle strutture esistenti è, come già detto, oggetto di dibattito.

Significativo è, al riguardo, il fatto che il comportamento delle costruzioni sottoposte ad azioni sismiche sia un comportamento a soglie. Al crescere progressivo del costo d'intervento, dunque, non si assiste a una proporzionale riduzione della vulnerabilità (in specie delle strutture) e quindi dei danni e del conseguente rischio bensì, raggiunta una certa soglia di riduzione della vulnerabilità strutturale, in molti casi occorre un significativo incremento dell'investimento affinché sia possibile raggiungere la successiva soglia di riduzione sicché, a parità di cifra investita, al ridursi della vulnerabilità diminuisce la ulteriore riduzione conseguibile.

A ciò si aggiunge la constatazione che, per livelli di danno strutturale assente o molto contenuto, i danni agli elementi non strutturali e agli impianti possono essere già significativi e meritevoli di interventi per la loro riduzione.

In un'analisi benefici-costi, riferita a un patrimonio costruito vario e molto vulnerabile, il beneficio (riduzione del rischio) conseguibile con un prefissato costo (entità dell'investimento) è particolarmente elevato se si perseguono, ad un tempo, contenute riduzioni della vulnerabilità strutturale (che già comportano significative riduzioni delle conseguenze per le vite umane) e significative riduzioni del danno agli elementi non strutturali e agli impianti.

Tutto ciò comporta che, a fronte di risorse limitate, sia preferibile spendere la cifra a disposizione intervenendo su molte costruzioni in modo più limitato (ad esempio utilizzando **interventi di raf-**

forzamento locale per eliminare alcune gravi carenze strutturali e/o perseguendo con il **miglioramento strutturale** un livello di sicurezza antisismica pari al **60-80%** del livello di sicurezza antisismica previsto dall'adeguamento), piuttosto che intervenire su poche costruzioni adeguandole a quanto previsto per le nuove costruzioni.

Gli **interventi di rafforzamento locale e/o di miglioramento**, infatti, se finalizzati a ridurre le vulnerabilità più elevate e a conseguire aliquote efficaci della capacità di resistere ai terremoti, a parità d'investimento, consentiranno di conseguire una più marcata riduzione del rischio sismico sull'intero territorio nazionale, cui si accompagneranno notevoli riduzioni del numero atteso di morti e feriti.

3. CONVENZIONALITÀ NELLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ANTISISMICA

Sono passati più di trent'anni dall'introduzione in Italia di metodi probabilistici, semiprobabilistici e di stati limite per il progetto, l'analisi e la verifica delle strutture, con il trasferimento pressoché integrale nelle norme tecniche italiane del *CEB/FIP² Model Code 1978*, anche se solo come possibile alternativa all'applicazione di regole basate sulle *tensioni ammissibili*.

Negli anni successivi furono sviluppate logiche di progettazione strutturale ottimizzata riferendosi a costi globali da stimarsi sull'intera vita dell'opera (*structural design optimization based on life cycle costs*³), concetti rimasti sostanzialmente confinati ad ambiti accademici. In ambito sismico, negli Stati Uniti si parla di *Performance Based Earthquake Engineering* dalla fine degli anni ottanta^{4,5}, ma solo in epoca assai più recente gli approcci sviluppati da Cornell, Krawinkler e dai loro collaboratori⁶ hanno trovato riscontri applicativi, anche grazie a rilevanti semplificazioni di linguaggio e di formulazione⁷.

Nella progettazione per azioni sismiche è inevitabile accettare logiche probabilistiche⁸, quanto meno in relazione alla bassa probabilità del verificarsi delle azioni di progetto ed alla conseguente accettazione di stati di danno più elevati.

Nelle verifiche per azioni gravitazionali l'incrocio tra valori delle azioni di progetto e fattori di sicurezza applicati alla capacità della costruzione induce valori di probabilità annua che l'azione superi la capacità (in termini di resistenza) dell'ordine di 1×10^{-6} ; nelle verifiche per azioni sismiche la medesima probabilità di superamento è dell'ordine di 1×10^{-2} .

L'accettazione di livelli di sicurezza nei confronti del sisma molto più bassi di quelli adottati nei confronti delle azioni gravitazionali si giustifica in forza di varie considerazioni.

Innanzitutto ci si riferisce a eventi molto più rari; il fatto poi che la domanda raggiunga la capacità (in termini di resistenza) comporta in generale fenomeni di non linearità (e conseguentemente di danno strutturale) che si accettano in ragione della rarità del fatto e osservando che non necessariamente ad essi consegue il collasso che, invece, grazie alla duttilità della costruzione, potrà avvenire con probabilità nettamente inferiori.

Da un punto di vista concettuale, il livello minimo di sicurezza antisismica, da accettare per un edificio di nuova costruzione, si basa dunque su due scelte fondamentali:

- la definizione del terremoto di progetto, in termini, ad esempio, di periodo medio di ritorno

2 CEB: *Comité Européen du Béton*, fondato nel 1953 (da Balency-Béarn, Nennig, Base, Rüsch, Torroja, Wästlund e altri); FIP: *Fédération Internationale de la Précontrainte*, fondata nel 1952 (da Freyssinet, Torroja, Magnel e altri).

3 Madsen, H.O., Krenk, S. and Lind, N.C. (1986), *Methods of structural safety*, Prentice Hall.

4 Ditlevsen, O. and Madsen, H.O. (1996), *Structural Reliability Methods*, Wiley.

5 SEAOC (1995), *Vision 2000, A framework for performance-based engineering*, Structural Engineers Association of California, Sacramento.

6 Cornell, C.A., Jaylender, F., Hamburger, R.O., Foutch, D.A. (2002). Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines. *Journal of Structural Engineering*. 128:4. 526-553.

7 Zareian, F. and Krawinkler, H. (2012). Conceptual performance-based seismic design using building-level and story-level decision support system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. DOI: 10.1002/eqe.2218.

8 Pinto, P.E., Giannini, R. and Franchin P. (2007), *Seismic Reliability Analysis of Structures*, IUSS Press.

- o di probabilità annua di superamento di una prefissata intensità dello scuotimento;
- la probabilità accettata di raggiungere un certo stato limite (ad esempio la prossimità al collasso) nel caso in cui si verifichi l'evento di progetto.

Ad esempio, se il periodo di ritorno medio T_R dell'intensità di progetto è **500 anni** (dunque la probabilità annua di superamento dell'intensità è $\lambda=1/T_R=2 \times 10^{-3}$) e se la probabilità di collasso accettata per quella data intensità è fissata a 1×10^{-2} , allora la probabilità di collasso annua accettata è circa pari a 2×10^{-5} .

È evidente che per le azioni, sia gravitazionali che sismiche, le probabilità di collasso sono convenzionali, ma è altrettanto evidente che utilizzare un terremoto di progetto più raro, ossia prescrivere una probabilità di collasso più bassa per contenere i danni strutturali dovuti al sisma, comporta maggiori costi e possibili cambiamenti, anche rilevanti, delle tecniche di costruzione utilizzate.

Quando si considera il problema degli edifici esistenti le cose, ovviamente, cambiano, in quanto:

- ridurre la probabilità di superare un certo stato limite (o livello di prestazione) può comportare costi molto diversi da caso a caso;
- può essere relativamente semplice raggiungere una certa probabilità e molto difficile raggiungerne una di poco inferiore;
- di conseguenza potrebbe essere antieconomico voler raggiungere, ad ogni costo, una certa probabilità prescritta a priori.

Si deve inoltre considerare l'enorme sproporzione esistente, in termini di denaro, tecnici, imprese e tempo, tra le necessità poste dalla riduzione del rischio e le risorse a tal fine disponibili.

La logica di utilizzazione delle risorse con l'obiettivo di ridurre il rischio sismico, formulata su una base strettamente razionale di uso ottimale delle risorse, dovrebbe essere del tipo *"si interviene prioritariamente sulle situazioni nelle quali, a parità d'impiego di risorse, si produce una maggiore riduzione del rischio"* il che comporta valutazioni non solo di vulnerabilità della costruzione, ma anche di perdite attese (rischio) e di costi d'intervento. L'applicazione di una logica di questo tipo implica valutazioni complesse che includono la definizione di possibili modi d'intervento, la stima del loro costo e dei benefici ottenibili e, quindi, la necessità di quantificare in termini economici il valore atteso della riduzione del rischio.

L'introduzione e l'uso di parametri confrontabili per la valutazione delle prestazioni sismiche degli edifici (quali quelli che saranno illustrati nel § 4) consente l'immediata valutazione della convenienza e opportunità di investire in prevenzione, sia per il proprietario sia per lo Stato.

Al riguardo occorre distinguere i punti di vista di tali soggetti: il primo inteso come utente del singolo edificio per un termine temporale limitato, il secondo inteso come sostanziale assicuratore (almeno in Italia) del patrimonio edilizio privato e pubblico, giacché il risarcimento dei danni rimane sostanzialmente a suo carico.

Tenuto conto di ciò, i benefici di un'azione diffusa di prevenzione antisismica sono, per lo Stato, pressoché certi e comunque connotati da un'elevata probabilità di essere conseguiti, con riferimento alle prospettive temporali di lungo termine e all'ambito geografico di applicazione che corrisponde all'intero territorio nazionale o, comunque, alle vaste aree a rischio più elevato (a questo proposito basti pensare che il costo dei terremoti a carico dello Stato, negli ultimi 50 anni, è stato superiore ai 150 G€).

I benefici per il singolo proprietario, invece, dipendono dal termine temporale considerato; tenuto conto della bassa probabilità di accadimento di un terremoto di forte intensità nel periodo d'interesse e nel sito dell'edificio, investire per ridurre il rischio sismico potrebbe non ripagare la spesa se

non quando l'edificio sarà abitato da altri.

È peraltro da ricordare come il valore della prevenzione, se riferito al conseguimento di una maggiore protezione della vita umana e dei beni sia percepito, per chi abita nell'edificio, in maniera decisamente preminente rispetto a possibili stime economiche (ad esempio valutate su base assicurativa), producendo un netto miglioramento delle condizioni di convivenza con il sisma, per la maggiore fiducia acquisita nella capacità della propria abitazione di resistergli.

Questi aspetti, di particolare valore a livello individuale, si traducono poi in **benefici sociali**, non facilmente e direttamente quantificabili, ma fondamentali nel migliorare la resilienza al sisma delle comunità e dell'intero Paese. **Per queste e altre ragioni, è logico prevedere forme d'incentivazione degli interventi antisismici, analoghe a quelle da tempo in essere per gli interventi di contenimento dei consumi energetici.**

In conclusione, riferendosi agli edifici:

- **quanto alle migliori prestazioni termoacustiche**, i vantaggi economici derivanti investiranno prevalentemente la sfera della proprietà, con vantaggi pubblici essenzialmente connessi alla riduzione della spesa energetica globale e alla riduzione dell'inquinamento;
- **quanto alle migliori prestazioni antisismiche**, i vantaggi economici derivanti (al netto della maggiore protezione della vita umana) potranno essere principalmente riferiti allo Stato, di fatto percepito come responsabile ultimo degli interventi di ripristino dei danni, materiali e sociali

In un quadro di questo tipo e pur nella consapevolezza di affrontarne solo una parte, inizialmente il rischio sismico sarà trattato in puri termini economici, per poi integrare la trattazione con considerazioni connesse alla protezione della vita umana (chiaramente attinenti al solo caso sismico).

4. PARAMETRIZZAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

Il termine **rischio sismico** indica, in generale, una misura dell'entità delle perdite di origine sismica che possono avvenire in un prefissato sito, in un dato intervallo di tempo; il rischio è una grandezza probabilistica a causa delle numerose incertezze presenti nei diversi aspetti che lo determinano.

Esso si ottiene combinando:

- **pericolosità** (intesa come probabilità che si verifichi un evento sismico di determinata intensità, in un dato intervallo temporale, in un dato luogo);
- **vulnerabilità** (intesa come probabilità che, per effetto di un evento di determinata intensità, si produca un determinato livello di danno fisico agli elementi esposti);
- **esposizione** (intesa come valutazione probabilistica delle conseguenze sociali ed economiche prodotte dal raggiungimento di determinati livelli di danno negli elementi esposti, anche in relazione alla presenza di persone e beni).

Una corretta valutazione e quantificazione economica del **rischio sismico** comporta analisi complesse (talvolta rappresentate nel mondo scientifico con un integrale triplo di non immediata comprensione) che possono essere semplificate sostituendo la probabilità di superamento con la frequenza di superamento.

Assunte, come elementi esposti, le costruzioni, la procedura di valutazione comprende i seguenti passi:

- **Analisi di pericolosità** – per valutare la frequenza con la quale al sito di costruzione è superato, ad esempio annualmente, un prefissato valore di un parametro significativo dell'input, ad esempio l'accelerazione massima al terreno **PGA** (*Peak Ground Acceleration*).
- **Analisi strutturale** – per valutare le conseguenze sull'edificio del parametro di ingresso (ad es. la PGA), in termini di parametri di risposta (ad es. la deformazione a un piano).
- **Analisi di vulnerabilità** – per quantificare i danni strutturali e non strutturali conseguenti al raggiungimento di determinati livelli da parte dei parametri di risposta.
- **Analisi di esposizione** – per stimare le **perdite dirette**, ossia i costi strettamente legati alla riparazione del danno, e le **perdite indirette**, che possono essere sia economiche (costi indiretti, per lo più legati ai contenuti e all'interruzione dell'operatività della costruzione) sia sociali (perdite umane, perdite di valore del bene culturale, etc.), conseguenti al raggiungimento di determinati livelli di danno; (la quantificazione delle sole perdite economiche, sia dirette sia indirette, sarà espressa in percentuale del Costo stimato di Ricostruzione RC).

Nel caso reale, con riferimento a terremoti aventi probabilità di occorrenza diverse e che producono quindi livelli di danno diversi, le **perdite annue medie, dirette e indirette**, si ottengono integrando le perdite espresse in funzione della frequenza annua di superamento $\lambda=1/T_R$. Il valore del periodo di ritorno T_R si ottiene come $T_R = -V_R / \ln(1-P_{VR})$ dove (v. NTC) V_R è il periodo di riferimento e P_{VR} è la probabilità di superamento su V_R , per ciascuno degli Stati Limite considerati.

Si può, dunque, esprimere il **rischio sismico, per la sola parte economica**, in termini di **perdite annue medie attese**, normalmente indicate con la sigla **EAL** (*Expected Annual Loss*). Le **perdite sociali, in particolare morti e feriti attesi, verranno considerate nella procedura proposta collegando parametricamente il numero di morti e feriti all'entità del danno economico diretto**.

Per capire meglio cosa s'intenda con **EAL**, è utile presentare alcuni esempi; in essi ci si riferirà alle sole **perdite economiche dirette**, fermo restando il fatto che, delle **perdite economiche indirette** e

delle **perdite sociali** (morti e feriti), sarà sempre possibile tenere conto valutandole in termini parametrici e, in tal modo, riferirle ancora a **RC**⁹.

Si consideri il caso di un edificio con struttura in c.a. per il quale si stima che l'intensità del sisma con periodo di ritorno medio di 2.000 anni induca il collasso (quindi una **perdita economica diretta** corrispondente al 100 % di **RC**), mentre qualsiasi intensità del moto con periodo di ritorno più breve non induce alcun danno. Considerazioni analoghe potrebbero farsi per edifici con struttura in altro materiale, ad esempio in muratura, ma con esiti quantitativamente e, in parte, qualitativamente diversi.

In tal caso **EAL** è pari al $(100 \% \text{ di } \text{RC}) / 2.000 = 0,05\% \text{RC}$, cioè mediamente si perde ogni anno lo 0,05 % del Costo stimato di Ricostruzione.

Si consideri invece un edificio in cui si prevedono **perdite economiche dirette** pari al 30 % di **RC** per l'intensità del moto con periodo di ritorno di 200 anni; in tal caso si ha $\text{EAL} \approx (30 \% \text{ di } \text{RC}) / 200 = 0,15\% \text{RC}$.

Vari studi indicano che le perdite dirette annue medie per un edificio moderno, costruito applicando norme sismiche, sono normalmente dell'ordine di **1,0%RC**, mentre per edifici costruiti in assenza di norme sismiche è raro riscontrare valori inferiori a **2,5%RC**.

Nella bibliografia internazionale (**FEMA E-74**) compare anche un altro dato di significativa importanza per valutare l'aliquota di **RC** connessa al danno sismico: la ripartizione di **RC**, tra **contenuti**, **elementi non strutturali** (finiture e impianti) e **struttura**, riportata in Figura 1¹⁰.

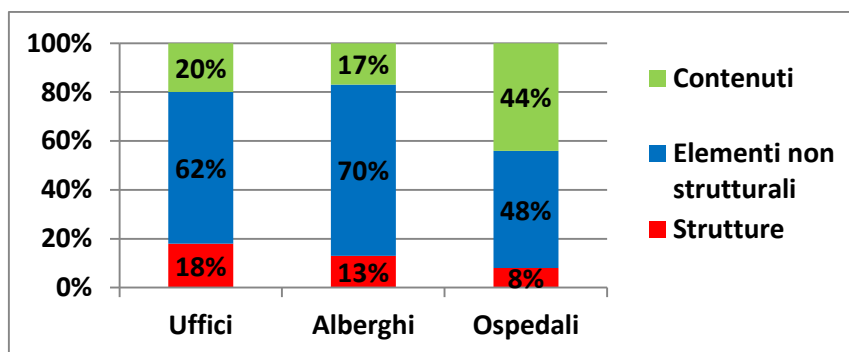


Figura 1.- Ripartizione di RC fra contenuti, elementi non strutturali e struttura (FEMA E-74).

Al netto dei **contenuti**¹¹, si sottolinea come gli **elementi non strutturali** incidano su **RC** per una percentuale che oscilla tra il 75% (uffici) e l'85% (ospedali); non è possibile dunque valutare rischio sismico e danni prescindendo dagli elementi non strutturali e riferendosi alle sole strutture. Inoltre i danni agli elementi non strutturali e agli elementi strutturali non sono immediatamente correlabili.

Nel seguito si terrà conto di quanto detto:

- attribuendo, il **25%RC** alle strutture e il **75%RC** agli elementi non strutturali, per gli edifici in c.a., il **65%RC** alle strutture e il **35%RC** agli elementi non strutturali, per gli edifici in muratura, rispettivamente;

⁹ Nella corrente letteratura di settore, le **perdite economiche indirette** sono stimate oscillare tra 2 e 3 volte le **perdite economiche dirette** e, se valutate ed espresse in tale modo, sono ancora riferibili ad **RC**.

¹⁰ FEMA E 74 Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide,” Fig. 2.1.3-1.

¹¹ I danni ai contenuti vengono usualmente conteggiati tra le **perdite economiche indirette**.

- assumendo che, a parità di livello di danno, i danni agli elementi non strutturali si manifestino per terremoti di intensità minore di quella per cui si manifestano i danni alle strutture.

Occorre inoltre segnalare che:

- per le costruzioni in c.a. il **danno non strutturale si manifesta prima del danno strutturale** per motivi legati alla rigidità reciproca dei telai in c.a. e delle tamponature, nonché alla differente deformabilità posseduta dai diversi elementi;
- per gli edifici in muratura il **danno strutturale si manifesta prima del danno non strutturale**, in virtù del fatto che, essendo le pareti portanti più rigide delle partizioni interne, iniziano a danneggiarsi prima e in misura proporzionale ai rapporti di rigidità.

Il valore atteso delle **perdite annue (EAL)** si stima approssimando con segmenti rettilinei (funzioni multi-lineari), tra le prestazioni valutate, la curva che esprime la frequenza di eccedenza annuale, come mostrato in **Figura 2**; EAL è dato dall'area sottesa dalla spezzata rossa a doppia linea ¹².

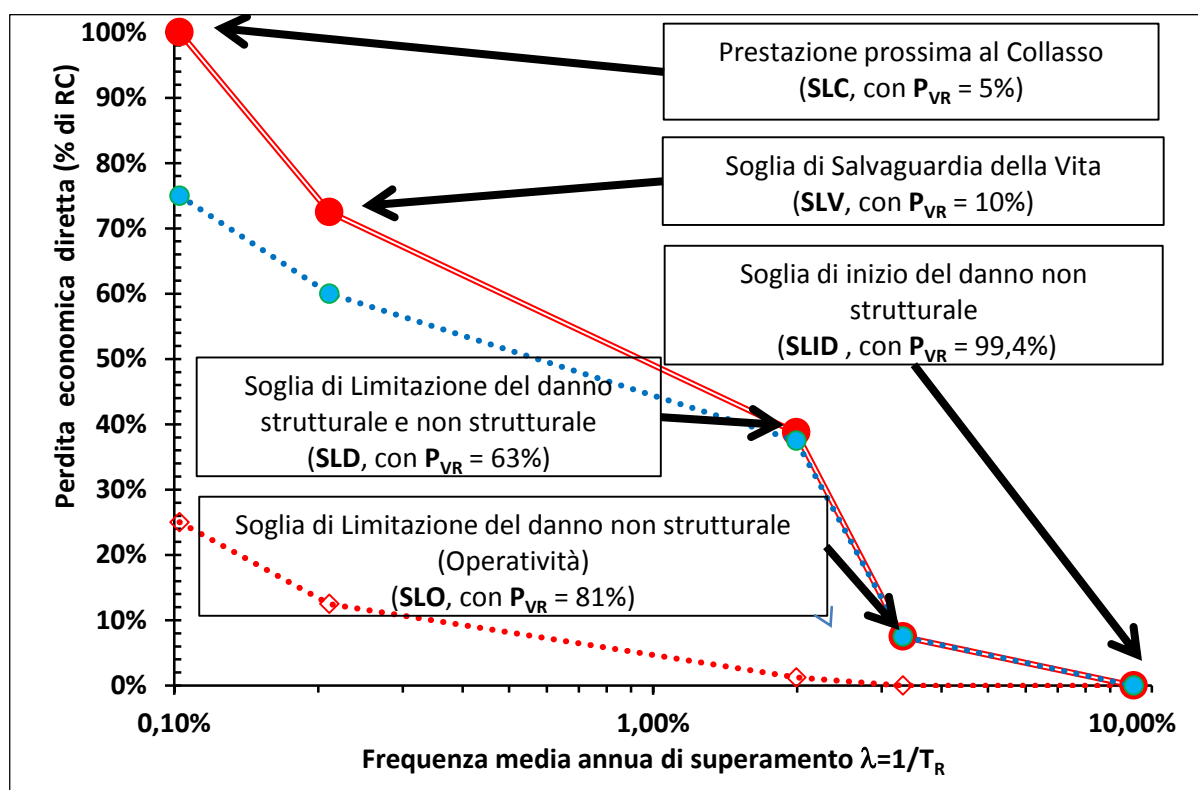


Figura 2.- EAL: i punti della spezzata indicano la frequenza annua di superamento delle prestazioni.

Nell'esempio di **Figura 2**, relative a un edificio in c.a., le prestazioni considerate, tutte ottenute riferendosi a un $V_R=50$ anni, sono espresse in termini di probabilità di:

- non avere danno, né strutturale, né non strutturale ($P_{VR}=99,4\%$);
- avere un danno non strutturale che consenta l'operatività (perdite dirette 7,50%RC, $P_{VR}=81\%$);

12 Welch, D.P., Sullivan, T.J and Calvi, G.M. (2012). *Towards a direct displacement-based loss assessment methodology for RC frame buildings*. 15 WCEE, Lisbon, Portugal.

- contenere il danno strutturale e non strutturale entro limiti di riparabilità (perdite dirette **38,75%RC**, $P_{VR}=63\%$);
- limitare il danno strutturale per salvaguardare la vita (perdite dirette **72,5%RC**, $P_{VR}=10\%$);
- evitare il collasso (perdite dirette **100%RC**, $P_{VR}=5\%$).

I valori attribuiti alle diverse probabilità sono quelli mostrati nella tabella di **Figura 3**.

P_{VR} (%)	T_R (anni)	λ (1/anni)	%RC (Strutt.)	%RC (Non strutt.)	% RC (Totale)
99,4%	10	0,1	0	0	0
81%	30	0,033333	0	7,5%	7,5%
63%	50	0,02	0,75%	38%	38,75%
10%	475	0,002105	12,5%	60%	72,5%
5%	975	0,001026	25%	75%	100%

Figura 3.- Perdite economiche dirette (RC) in funzione della frequenza annua di superamento.

La puntinata rossa è relativa al danno alle strutture (cui, come già detto, è stato attribuito un **RC** pari al **25%** dello **RC** totale); la puntinata blu è relativa al danno agli elementi non strutturali (finiture e impianti, cui è stato attribuito un **RC** pari al **75%** dello **RC** totale) e ben evidenzia l'importanza delle scosse di intensità medio-piccola (λ elevato) nel danneggiare tali elementi.

Si noti che:

- **EAL** può assumere valori che oscillano molto di anno in anno (nulli in anni in cui non si manifesta alcun evento che induca danni, potenzialmente molto alti quando si verifica un evento forte) e si può esplicitare come la necessità di accumulare, anno per anno, le risorse necessarie per fare fronte a quanto indotto dall'evento raro;
- a un edificio con bassa probabilità di collasso, che soddisferebbe quanto previsto dalle norme in termini di **SLV**, non necessariamente corrisponde un **EAL** particolarmente basso.

Al riguardo si osserva che un edificio, strutturalmente adeguato, può subire danni rilevanti agli elementi non strutturali anche per valori modesti, e quindi frequenti, dell'intensità del moto; in quest'ultimo caso **EAL** potrà essere elevato, perché l'edificio richiederà, frequentemente, costosi interventi di riparazione e indurrà forti costi indiretti (danni ai contenuti, delocalizzazione degli occupanti, mancata produzione).

Ricordando che ci si sta riferendo alle sole **perdite economiche dirette**, per quantificare, sia pure in modo semplificato, l'**EAL** di un edificio occorrono un'analisi **di pericolosità** del sito di costruzione e un'analisi **di vulnerabilità** dell'edificio. I risultati delle due analisi sono rappresentabili graficamente con due curve: la **curva di pericolosità** e la **curva di vulnerabilità**. Le due curve sono funzione del medesimo parametro di scuotimento (nell'esempio l'accelerazione massima al terreno, **PGA**).

La **curva di pericolosità di un sito** può essere espressa fornendo, al variare della frequenza media annua di superamento $\lambda=1/T_R$, l'accelerazione massima al terreno (**PGA**) attesa in corrispondenza di una definita frequenza di superamento annua.

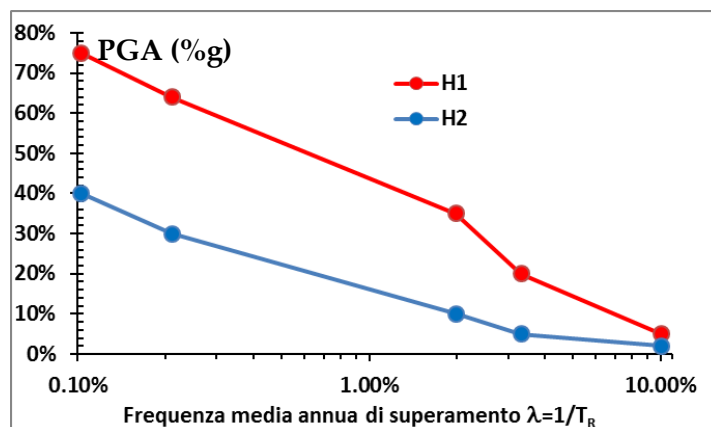


Figura 4.- Esempi di curve di pericolosità di siti diversi.

In **Figura 4** sono rappresentati due esempi di **curva di pericolosità**; le curve sono riferite a due siti (**H₁** e **H₂**) diversamente pericolosi e nei quali si attendono, rispettivamente, **PGA** pari a **0,75g** (**H₁**) e **0,4g** (**H₂**) con **T_R=975** anni, a **0,65g** e **0,3g** con **T_R=475** anni, a **0,3g** e **0,1g** con **T_R=50** anni, a **0,2g** e **0,05g** con **T_R=30** anni, a **0,05g** e **0,02g** con **T_R=10** anni. È chiaro che la curva **H₁** rappresenta un sito a pericolosità più alta di quella del sito **H₂**; si noti inoltre che la **PGA** indicata non include le amplificazioni locali.

Dati di questo tipo sono stati prodotti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (nel seguito **INGV**) e sono reperibili in rete per tutto il territorio italiano¹³, con la precisazione che quelli ora disponibili non contengono le amplificazioni locali connesse alla natura del terreno o a eventuali effetti orografici, che devono essere valutate così come previsto dalle **NTC**.

Esistono certamente siti le cui curve di pericolosità s'intersecano, in altre parole situazioni per le quali un sito ha, rispetto a un altro, una più bassa probabilità che si verifichi un moto a più bassa intensità e una più alta probabilità che si verifichi un moto a più alta intensità, o viceversa.

La **curva di vulnerabilità di un edificio** può essere espressa fornendo, al variare di un parametro d'intensità del moto sismico (nell'esempio l'accelerazione massima al terreno, **PGA**), una stima del costo di riparazione del danno atteso in corrispondenza di un definito valore d'intensità.

I dati necessari si possono ricavare o da valutazioni parametriche (si vedano le considerazioni successive) o da quanto normalmente prodotto da un tecnico in sede di progettazione di un nuovo edificio o di valutazione della sicurezza di un edificio esistente.

È possibile, infatti, associare a un certo valore del parametro d'intensità stime dell'accelerazione attesa (e del corrispondente spostamento interpiano) ai diversi piani dell'edificio; è inoltre possibile associare ai valori di accelerazione e spostamento una quantificazione dei danni attesi a **elementi non strutturali** (finiture e impianti) e **strutture**.

In **Figura 5** sono riportate le **curve di vulnerabilità** relative a due edifici diversamente vulnerabili (si tratta di esempi, non ci si stupisca di valori estremi) edificati in siti di pericolosità pari, rispettivamente, a **H₁** e a **H₂**.

13 I dati sulla pericolosità sismica in Italia sono liberamente disponibili sul sito esse1.mi.ingv.it.

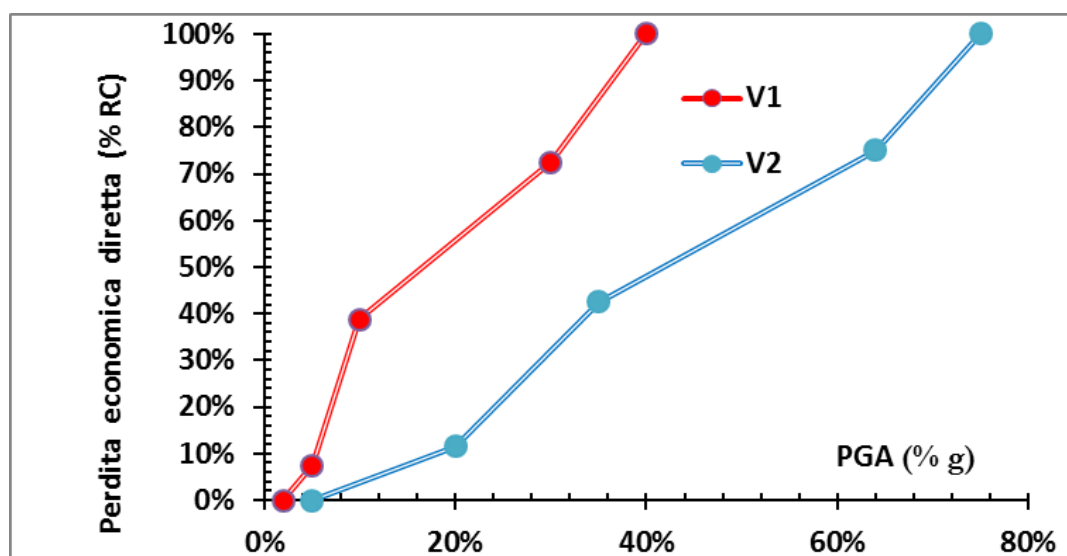


Figura 5.- Perdita economica diretta al variare di PGA, per due edifici con diversa vulnerabilità.

Il primo edificio (V_1 , più vulnerabile) sorge nel sito a pericolosità più bassa (H_2); la sua situazione in termini di danneggiamento è già stata rappresentata in **Figura 3**, ma riferendo il danno alla frequenza media annua di superamento λ invece che all'accelerazione massima al suolo **PGA**.

Si evidenzia che una **PGA** pari a **0,02g** non induce danni, una **PGA** pari a **0,05g** induce danni che richiederebbero costi di riparazione pari al **7,50%RC**, una **PGA** pari a **0,1g** induce costi di riparazione pari al **38,75%RC**, una **PGA** di **0,3g** costi di riparazione pari al **72,5%RC**, una **PGA** di **0,4g** costi di riparazione pari al **100%RC**.

Per il secondo edificio (V_2 , meno vulnerabile) che sorge nel sito a pericolosità più alta (H_1) a **PGA=0,05g** si ha un costo di riparazione nullo, a **PGA=0,2g** si ha un costo di riparazione pari all'**11,5%RC**, a **0,35g** un costo di riparazione pari al **42,5%RC**, a **0,64g** un costo di riparazione pari al **75%RC**, a **0,75g** un costo di riparazione pari al **100%RC**.

È evidente che il secondo edificio è meno vulnerabile del primo, non solo nel senso che occorre un'accelerazione più elevata per indurre la perdita totale, ma anche nel senso che, per qualsiasi valore di **PGA**, il danno atteso è minore. Non è impossibile immaginare edifici con curve di vulnerabilità che intersecano, ad esempio, quella di V_2 , ai quali può corrispondere, quindi, un danno maggiore per accelerazioni più basse, ma per i quali è richiesta un'accelerazione più elevata per indurre il collasso.

Dalla combinazione della **vulnerabilità di un edificio** e della **pericolosità del sito** in cui è costruito, operando come detto in nota¹⁴, si possono immediatamente derivare curve del tipo rappresentato in **Figura 6**.

¹⁴ Avendo dei dati necessari a tracciare le curve di **Figura 4** e di **Figura 5**, si può tracciare immediatamente la curva di **Figura 6**; basta, infatti, ricavare, per ciascuno dei cinque valori di **perdita economica diretta** della tabella di **Figura 3**, il corrispondente valore di λ per legare a questo, attraverso la curva di **Figura 4**, il corrispondente valore di **PGA**.

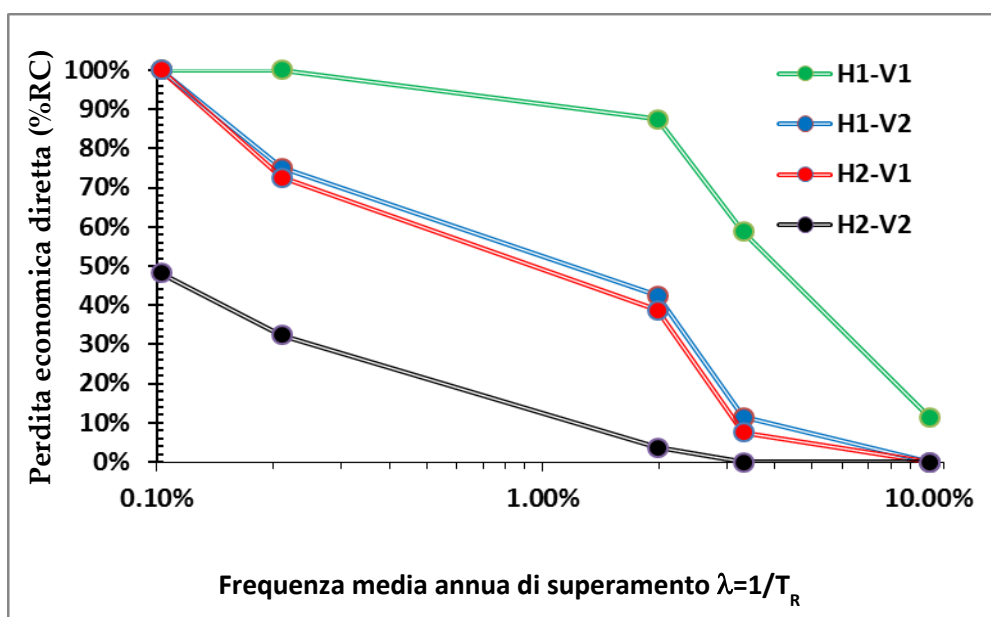


Figura 6.- EAL di edifici con diversa vulnerabilità (V_1 , V_2), collocati in siti a diversa pericolosità (H_1 , H_2).

A titolo di esempio sono illustrati i quattro casi generati dalla combinazione delle due **curve di pericolosità** di Figura 4 e delle due **curve di vulnerabilità** di Figura 5. Ciò che si ottiene è la frequenza annua di raggiungimento di un livello di danno tale da indurre la necessità di una certa spesa (o superiore), valutata in percentuale del costo di costruzione RC dell'edificio.

Le curve sono del tutto analoghe a quella rappresentata in Figura 2 talché è evidente che il valore del danno atteso annuo corrisponde, in ciascun caso, all'area sottesa dalla curva corrispondente.

È evidente come la combinazione di bassa vulnerabilità (V_2) e bassa pericolosità (H_2) produca il caso a EAL più basso e, al contrario, la combinazione di alta vulnerabilità (V_1) e alta pericolosità (H_1) produca il caso a EAL più alto. Negli esempi i valori di EAL sono pari a circa: **3,32%RC** (H_1 - V_1), **1,68%RC** (H_1 - V_2), **1,54%RC** (H_2 - V_1) e **0,44%RC** (H_2 - V_2). Si noti, peraltro, che le frequenze di superamento sono state trattate come frequenze di occorrenza; anche per questo motivo, i risultati sono da considerarsi approssimati.

Un altro aspetto qui trascurato è la frequenza, nel corso del medesimo anno, di superamento ripetuto.

In generale la ripetizione è trascurata in quanto, per valori alti di scuotimento, la frequenza con cui un valore è superato due o più volte risulta trascurabile rispetto alla frequenza con cui quel medesimo valore è superato una volta sola. Per valori bassi di PGA, che hanno frequenze di superamento annuali potenzialmente alte e che quindi influiscono su EAL, la frequenza di superamento ripetuto non è necessariamente trascurabile. Quest'ultima costituisce un limite dell'approccio.

Tornando ora a trattare insieme le **perdite dirette** e le **perdite indirette**, il parametro EAL può sintetizzare la stima delle perdite annue medie (**dirette e indirette**), dunque, **può essere usato come parametro globale di valutazione della "qualità sismica" di un edificio**. Quest'ultimo approccio è quello dello Stato, che assume (così come finora avvenuto in vari modi) anche l'onere delle perdite economiche indirette, quali ad esempio gli oneri determinati dalla perdita dei contenuti, dalla sistemazione provvisoria degli abitanti o dall'interruzione delle attività produttive che si svolgono nell'edificio o a esso sono connesse. Tutte le perdite indirette possono essere espresse, in maniera approssimata, in %RC, anche quelle legate alla temporanea non utilizzabilità dell'edificio.

A titolo di esempio sulla possibile entità delle **perdite indirette**, nel caso di un edificio residenziale

e limitando l'analisi al costo della sistemazione provvisoria, posto che ogni abitante occupi **25 m²** di superficie, che il costo di trasferimento in un'altra struttura, tipicamente alberghiera, sia attorno a **50 €** al giorno, che un edificio costi **1.200 €/m²**, il valore dell'area occupata da ogni persona può essere assunto pari a **30.000€** ($1.200€/m^2 \times 25 m^2$) e di conseguenza le **perdite indirette**, espresse in termini di percentuale sul Costo di Ricostruzione, risulterebbero di **0,17%RC/giorno** ($50 €/giorno/30.000€$) per ogni giorno di inagibilità. Trascorsi **588** giorni, tale valore uguaglierebbe l'intero costo di ricostruzione **RC**; le conseguenze sono evidenti, anche per le logiche di costruzione temporanea post evento.

Questa valutazione è strettamente legata alle strategie adottate per le sistemazioni provvisorie; esse si differenziano fortemente in relazione sia all'evento, sia alle soluzioni abitative provvisorie e alle scelte che i singoli cittadini possono fare. Ad esempio, si può ricorrere all'adozione di contributi per l'autonoma sistemazione, piuttosto che all'affitto di appartamenti non danneggiati, così da determinare riduzioni sensibili dei costi e scendere fino a **5÷10 €/giorno/persona**.

Per completare il quadro della valutazione del rischio è necessario considerare le **perdite sociali**, in particolare del numero di morti e feriti che può accompagnare un certo livello di danno sismico. Nell'approccio proposto, per valutare la probabilità d'infortunio degli occupanti di una costruzione soggetta a un evento sismico, si utilizzano i dati dell'Applied Tecnology Council (nel seguito **ATC**) della tabella di **Figura 7¹⁵**.

Livello di danno (MMI)	Percentuale media di danno (%)	Frazione di occupanti feriti		Frazione di occupanti morti
		Lievemente	Gravemente	
1	0,0	0	0	0
2	0,5	3/100 000	1/250 000	1/1 000 000
3	5,0	3/10 000	1/25 000	1/100 000
4	20,0	3/1 000	1/2 000	1/10 000
5	45,0	3/100	1/250	1/1 000
6	80,0	3/10	1/25	1/100
7	100,0	2/5	2/5	1/5

Figura 7.- Frequenza di feriti e morti (in % degli occupanti) in funzione della percentuale di danno alle strutture.

La tabella, riferendosi alla **Modified Mercalli Intensity** (nel seguito **MMI**), lega al danno dell'edificio articolato in **7 livelli** (da **1: nessun danno**, a **7: totalmente crollato**) il danno medio (colonna 2, corrispondente a %RC) e il danno agli occupanti, diviso in **3 livelli** (feriti lievi, feriti gravi, morti).

¹⁵ Le stime sono relative a tutte le tipologie di costruzione, escluse quelle in acciaio e quelle intelaiate in legno. I valori relativi a queste ultime si ricavano moltiplicando i numeratori per 0,1. (Progetto ATC-13, 1985).

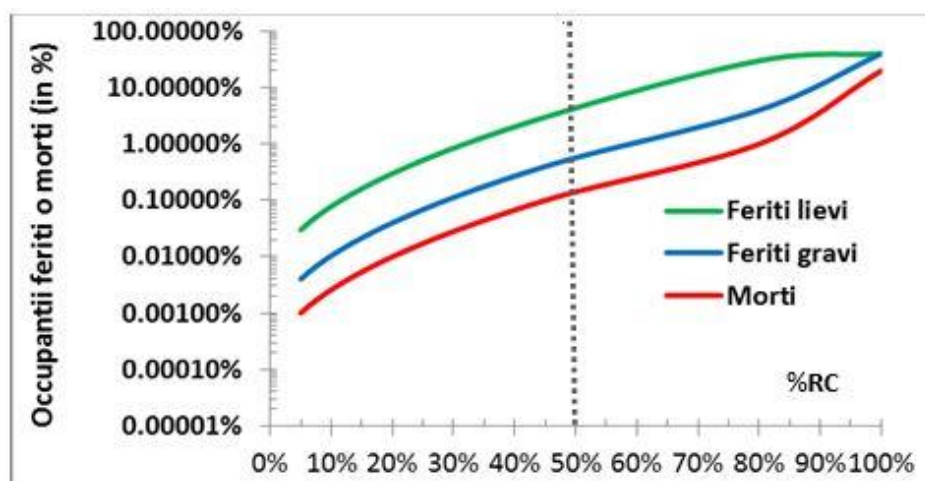


Figura 8.- Percentuale di feriti e morti sul totale degli occupanti, in funzione del danno espresso in %RC.

È dunque possibile legare l'entità dell'infortunio e le relative probabilità di accadimento al danno atteso, quantificato in %RC, ottenendo le curve mostrate in Figura 8.

Come si vede il legame proposto è di tipo semilogaritmico e richiede, perché si raggiungano percentuali di feriti e morti superiori allo 0,1% degli occupanti, che la perdita economica diretta superi il 50%RC.

La **Matrice di Probabilità di Danno** (nel seguito **DPM**) cui si riferisce implicitamente l'ATC è data, in funzione della **MMI**, nella **Figura 9** ove sono riportate le probabilità (in %) corrispondenti ai diversi livelli di danno, per ciascun livello d'intensità macrosismica significativo per le strutture (da VI a XII).

Livello di danno	Intervallo di %RC	%RC medio	Probabilità di danno secondo la MMI						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1—Nessuno	0	0	95%	49%	30%	14%	3%	1%	0,4%
2—Minore	0-1%	0,5%	3%	38%	40%	30%	10%	3%	0,6%
3—Leggero	1-10%	5%	1,5%	8%	16%	24%	30%	10%	1%
4—Moderato	10-30%	20%	0,4%	2%	8%	16%	26%	30%	3%
5—Grave	30-60%	45%	0,1%	1,5%	3%	10%	18%	30%	18%
6—Gravissimo	60-100%	80%	--	1%	2%	4%	10%	18%	39%
7—Crollato	100%	100%	--	0,5%	1%	2%	3%	8%	38%
NOTA: Le seguenti definizioni dei livelli di danno sono da utilizzare come suggerimento									
1—Nessuno	Nessun danno.								
2—Minore	Danni limitati e localizzati che non necessitano di riparazioni.								
3—Leggero	Danni significativi e localizzati che, generalmente, non necessitano di riparazioni.								
4—Moderato	Danni locali e significativi su molti componenti che necessitano di riparazioni.								
5—Grave	Danni estesi che necessitano di riparazioni importanti.								
6—Gravissimo	Danni importanti, estesi a tal punto che potrebbe essere necessario abbattere la struttura.								
7—Crollo	Crollo della maggior parte della struttura.								

Figura 9.- Matrice di probabilità di danno proposta dall'ATC.

5. MODELLO MACROSISMICO PER VALUTAZIONI DI RISCHIO SISMICO

La possibilità di valutare le perdite, anche sociali, riferendosi ad una scala macrosismica e poi ad EAL (invece che direttamente ad EAL) è stata spesso esplorata in passato¹⁶, per motivi facilmente intuibili.

Valutare direttamente EAL richiede calcoli complessi cui non è poi agevole legare una stima del numero di morti e feriti, laddove il riferimento agli stati di danno previsti da una scala macrosismica è operativamente molto più agevole, dunque atto a trattare rapidamente gruppi di edifici numerosi cogliendo, insieme anche se con minore precisione, **perdite economiche** e **perdite sociali**.

Nel seguito ci si riferirà dapprima alla **MMI** (la scala macrosismica più nota a livello internazionale) la cui suddivisione in 12 gradi è riportata in **Figura 10** con i seguenti parametri d'interesse, ad essa correlati:

- **PGA** (esprese in **g**) che lo “United States Geological Survey” (nel seguito **USGS**) associa a ciascuna intensità macrosismica **MMI**;
- “**Stati di danno**”-**ATC**, valutati come media pesata dei livelli di danno di **Figura 7** assegnando a ciascun livello un peso ricavato dalle probabilità riportate nella **DPM** di **Figura 9**.

Poi (e **definitivamente**) ci si riferirà alla **Scala Macrosismica Europea del 1998** (nel seguito **EMS-98**) di **Figura 11**, **scelta come scala macrosismica di riferimento perché, a differenza della MMI, tipizza le costruzioni (così consentendo di differenziare meglio i vari comportamenti) e evidenzia la distribuzione dei danni in modo tale da darle una valenza statistica.**

Le percentuali di feriti e morti di cui si dispone, peraltro, sono riferite alla **MMI**; è stato dunque necessario mostrare ambo le scale, trovando criteri di equivalenza che leghino i danni delle due.

Nelle elaborazioni successive, nota la pericolosità del sito (in base alle NTC), si valuteranno le probabilità di morte e ferimento a essa connesse legandole ai danni stimati con l'EMS-98.

Grado	Scossa	Descrizione	PGA (g)	Danno ATC
I	impercettibile	Avvertita solo dagli strumenti sismici.	< 0,0017	-
II	molto leggera	Avvertita solo da qualche persona in opportune condizioni.	0,0017÷ 0,014	-
III	leggera	Avvertita da poche persone.		
IV	moderata	Avvertita da molte persone; tremito di infissi e cristalli, e leggere oscillazioni di oggetti appesi.	0,014÷0,039	-
V	piuttosto forte	Avvertita anche da persone addormentate; caduta di oggetti.	0,039÷0,092	-
VI	forte	Sentito da tutti. Spavento e fuga all'esterno. Barcollare di persone in moto. Rottura di vetrine, piatti, vetrerie. Caduta dagli scaffali di piccoli oggetti e di quadri dalle pareti. Spostamento o rotazione di mobili. Screpolature d'intonaci, caduta di tegole e di murature. Suono di campanelli (chiese scuole). Stormire di alberi e di cespugli.	0,092÷0,18	1,1
VII	molto forte	Difficile stare in piedi. Risentito da guidatori di automezzi. Tremolio di oggetti sospesi. Rottura di mobili. Danni alle murature incluse fessurazioni. Rottura di comignoli deboli, situati sul colmo di tetti. Caduta di intonaci, mattoni, pietre,	0,18÷0,34	1,7

¹⁶ *Estimating Losses From Futures Earthquakes*, Panel on Earthquake Loss Estimation Methodology, National Academy Press, 1989.

		tegole, cornicioni (anche di parapetti isolati e ornamenti architettonici). Formazione di onde sugli specchi di acqua. Intorbidamento delle acque. leggeri smottamenti in depositi di sabbia e ghiaia. Forte suono di campane. Danni ai canali di irrigazione rivestiti.		
VIII	rovinosa	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.	0,34÷0,65	2,2
IX	distruttiva	Rovina totale di alcuni edifici e gravi lesioni in molti altri; vittime umane sparse ma non numerose.	0,65÷1,24	2,9
X	completamente distruttiva	Rovina di molti edifici; molte vittime umane; crepacci nel suolo.	> 1,24	3,9
XI	catastrofica	Distruzione di agglomerati urbani; moltissime vittime; crepacci e frane nel suolo; maremoto.		4,4
XII	apocalittica	Distruzione di ogni manufatto; pochi superstiti; sconvolgimento del suolo; maremoto distruttivo; fuoriuscita di lava dal terreno.		6,1

Figura 10.- Scala macrosismica MMI, con vari parametri d'interesse ad essa correlati.

L'EMS-98¹⁷ divide gli edifici in 15 tipologie (identificate principalmente in base alla struttura verticale) e fissa la vulnerabilità media di ciascuna (6 classi di vulnerabilità, da A ad F).

L'EMS-98 individua, per ogni tipologia e ogni classe di vulnerabilità, il valore più credibile (cerchio) e la dispersione intorno a tale valore, espressa con i valori più probabili (linee continue) e meno probabili o addirittura eccezionali (linee tratteggiate).

Tipologia di struttura		Classe di vulnerabilità					
		AEMS	BEMS	CEMS	DEMS	EEMS	FEMS
MURATURA	Muratura di pietra senza legante (a secco)	○					
	Muratura di mattoni di terra cruda (adobe)	○—					
	Muratura di pietra sbozzata	—○					
	Muratura di pietra massiccia per costruzioni monumentali	—○—					
	Muratura di mattoni e pietra lavorata	—○—					
	Muratura di mattoni e solai di rigidezza elevata	—○—					
	Muratura rinforzata e/o confinata		—○—				

17 CONSEIL DE L'EUROPE, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, European Macroseismic Scale 1998*, Editor G. GRÜNTAL, Luxembourg 1998.

CALCESTRUZZO ARMATO	Telai con un livello di progettazione antisismica nullo					
	Telai con un livello di progettazione antisismica moderato					
	Telai con un livello di progettazione antisismica elevato					
	Pareti con un livello di progettazione antisismica nullo					
	Pareti con un livello di progettazione antisismica moderato					
	Pareti con un livello di progettazione antisismica elevato					
ACCIAIO	Strutture di acciaio					
LEGNO	Strutture di legno					

Figura 11.- Differenziazione delle diverse tipologie di edifici in classi di vulnerabilità EMS-98.

Si evidenzia come la EMS-98 non consideri costruzioni in muratura progettate per essere antisismiche; qualora si ricada in tale situazione e la norma di riferimento sia la NTC si potrà assumere una vulnerabilità media di classe E_{EMS} (per le zone sismiche 1 e 2), di classe D_{EMS} (per le zone sismiche 3 e 4).

L'intensità macrosismica è poi ricavata dagli effetti di ciascun livello d'intensità su ciascuno dei tre diversi indicatori: **l'essere umano, gli edifici e, con trattazione separata, gli oggetti e l'ambiente.**

Tralasciando essere umano, oggetti e ambiente, che risentono del terremoto in modo simile a quello dato dalla MMI, si fissa l'attenzione sugli edifici riportando l'EMS-98 per i gradi da V a XII, quelli per cui l'indicatore "edifici" è utile (gli edifici si danneggiano). Sono previsti 6 livelli di danno (da 0, nessun danno, a 5, distrutto) distribuiti, per tipologia costruttiva e classe di vulnerabilità, come mostrato nel seguito.

V. Piuttosto Forte

- c) Danni di **livello 1** per **alcuni** fabbricati di classe A_{EMS} e B_{EMS}

VI. Forte

- c) Danni di **livello 1** per **molti** fabbricati di classe A_{EMS} e B_{EMS} .
Alcuni fabbricati di classe A_{EMS} e B_{EMS} subiscono danni di **grado 2**.
Alcuni fabbricati di classe C_{EMS} subiscono danni di **grado 1**.

VII. Molto Forte

- c) **Molti** fabbricati di classe A_{EMS} subiscono danni di **grado 3**; **alcuni** di **grado 4**.
Molti fabbricati di classe B_{EMS} subiscono danni di **grado 2**; **alcuni** di **grado 3**.
Alcuni fabbricati di classe C_{EMS} subiscono danni di **grado 2**.
Alcuni fabbricati di classe D_{EMS} subiscono danni di **grado 1**.

VIII. Assai dannoso

- c) Molti fabbricati di classe **A_{EMS}** subiscono danni di **grado 4**; **alcuni** di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **B_{EMS}** subiscono danni di **grado 3**; **alcuni** di **grado 4**.
 Molti fabbricati di classe **C_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**; **alcuni** di **grado 3**.
 Alcuni fabbricati di classe **D_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**.

IX. Distruttivo

- c) Molti fabbricati di classe **A_{EMS}** subiscono danni di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **B_{EMS}** subiscono danni di **grado 4**; **alcuni** di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **C_{EMS}** subiscono danni di **grado 3**; **alcuni** di **grado 4**.
 Molti fabbricati di classe **D_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**; **alcuni** di **grado 3**.
 Alcuni fabbricati di classe **E_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**.

X. Assai distruttivo

- c) La **maggior parte** dei fabbricati di classe **A_{EMS}** subisce danni di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **B_{EMS}** subiscono danni di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **C_{EMS}** subiscono danni di **grado 4**; **alcuni** di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **D_{EMS}** subiscono danni di **grado 3**; **alcuni** di **grado 4**.
 Molti fabbricati di classe **E_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**; **alcuni** di **grado 3**.
 Alcuni fabbricati di classe **F_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**.

XI. Devastante

- c) La **maggior parte** dei fabbricati di classe **B_{EMS}** subisce danni di **grado 5**.
 La **maggior parte** dei fabbricati di classe **C_{EMS}** subisce danni di **grado 4**; molti di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **D_{EMS}** subiscono danni di **grado 4**; **alcuni** di **grado 5**.
 Molti fabbricati di classe **E_{EMS}** subiscono danni di **grado 3**; **alcuni** di **grado 4**.
 Molti fabbricati di classe **F_{EMS}** subiscono danni di **grado 2**; **alcuni** di **grado 3**.

XII. Totalmente devastante (Gli effetti del sisma sono i massimi concepibili)

- c) Tutti i fabbricati di classe **A_{EMS}**, **B_{EMS}** e **praticamente tutti** quelli di classe **C_{EMS}** vengono distrutti.
 La **maggior parte** dei fabbricati di classe **D_{EMS}**, **E_{EMS}** e **F_{EMS}** vengono distrutti.

Ai termini “alcuni”, “molti” e “la maggior parte” si legano le quantificazioni (in percentuale sul numero totale di edifici di quella tipologia) rappresentate in **Figura 12**, in modo volutamente¹⁸ “sfocato” (“fuzzy”).

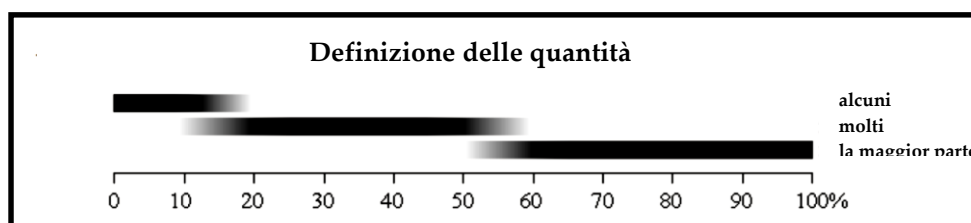


Figura 12.- Significato dei termini “alcuni”, “molti” e “la maggior parte” nell’EMS-98.

La EMS-98 attribuisce, dunque, anche se in maniera “sfocata”, una precisa distribuzione in termini di probabilità di occorrenza (**alcuni**, **molti**, **la maggior parte**) a ciascuno dei 6 possibili livelli di danno di ciascuna delle 15 possibili tipologie.

Senza snaturare l’approccio “sfocato”, si può associare ai termini “alcuni, molti, la maggior parte” un’espressione analitica utilizzando **distribuzioni di Poisson** nella forma $p(x) = (\lambda^x / x!) e^{-\lambda}$, con $p(x)$ = probabilità dell’evento atteso (x edifici danneggiati sul totale degli edifici) e λ = probabilità media di

¹⁸ Si veda al riguardo, nel già citato Volume 15 dei Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, il punto 1.2.3.Quantities.

avere **alcuni/molti/la maggior parte** degli edifici danneggiati.

Per simulare la aleatorietà del fenomeno e la dispersione ad esso connessa ci si riferisce, per ciascun termine, a più valori di λ e si adotta poi, come relativa distribuzione di riferimento, l'interpolante delle distribuzioni considerate, ottenuta operando ai minimi quadrati.

Per ciascuno dei tre termini, le tre distribuzioni di Poisson considerate sono:

- **alcuni** - le distribuzioni corrispondenti a $\lambda = 2,5\%, 5,0\%, 10\%$;
- **molti** - le distribuzioni corrispondenti a $\lambda = 25\%, 30\%, 41\%$;
- **la maggior parte** - le distribuzioni corrispondenti a $\lambda = 73\%, 91\%, 100\%$,

sono riportate in **Figura 13**.

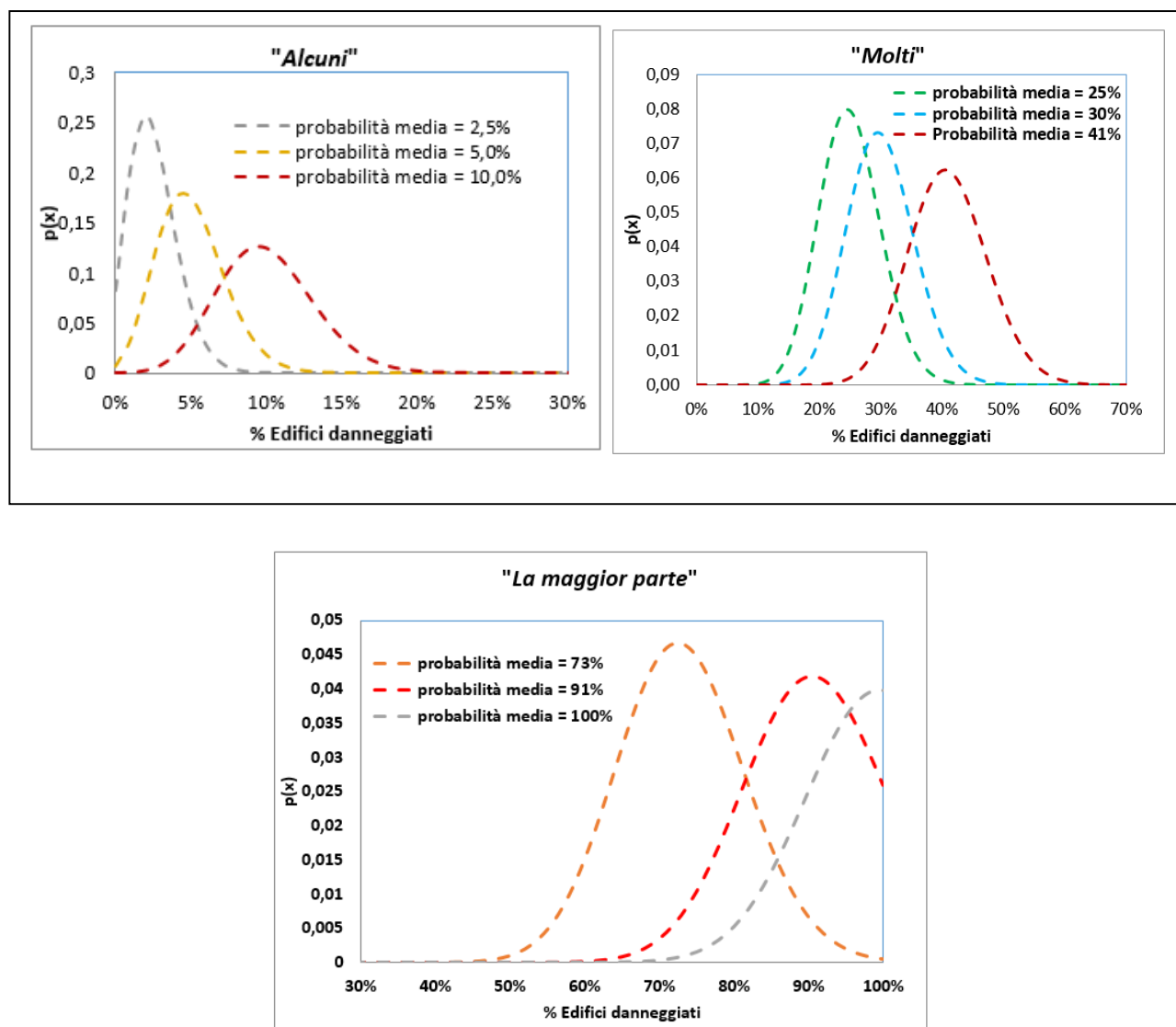


Figura 13.- Distribuzioni di Poisson relative alle quantità "alcuni – molti – la maggior parte" (EMS-98).

Le tre interpolanti polinomiali, di cui in **Figura 14.-** si riportano gli andamenti e gli intervalli di confidenza al 65%, sono:

- **alcuni** - $p(x) = -13,118x^6 + 39,773x^5 - 44,711x^4 + 22,126x^3 - 3,9496x^2 - 0,2217x + 0,0927$;
- **molti** - $p(x) = 14,341x^6 - 47,490x^5 + 59,683x^4 - 34,760x^3 + 8,9420x^2 - 0,7230x + 0,0106$;
- **la maggior parte** - $p(x) = 2,1482x^6 - 6,6714x^5 + 7,4827x^4 - 3,6529x^3 + 0,7772x^2 - 0,0612x + 0,0010$.

In questi termini, i tre eventi **alcuni**, **molti**, **la maggior parte** di **Figura 14** hanno probabilità di occorrenza, intesa come valore medio del numero di edifici danneggiati espresso in percentuale del numero totale di edifici, rispettivamente pari a :

- **alcuni** 7,5% con deviazione standard 5,1%
- **molti** 31% con deviazione standard 3,5%
- **la maggior parte** 82% con deviazione standard 4,4%

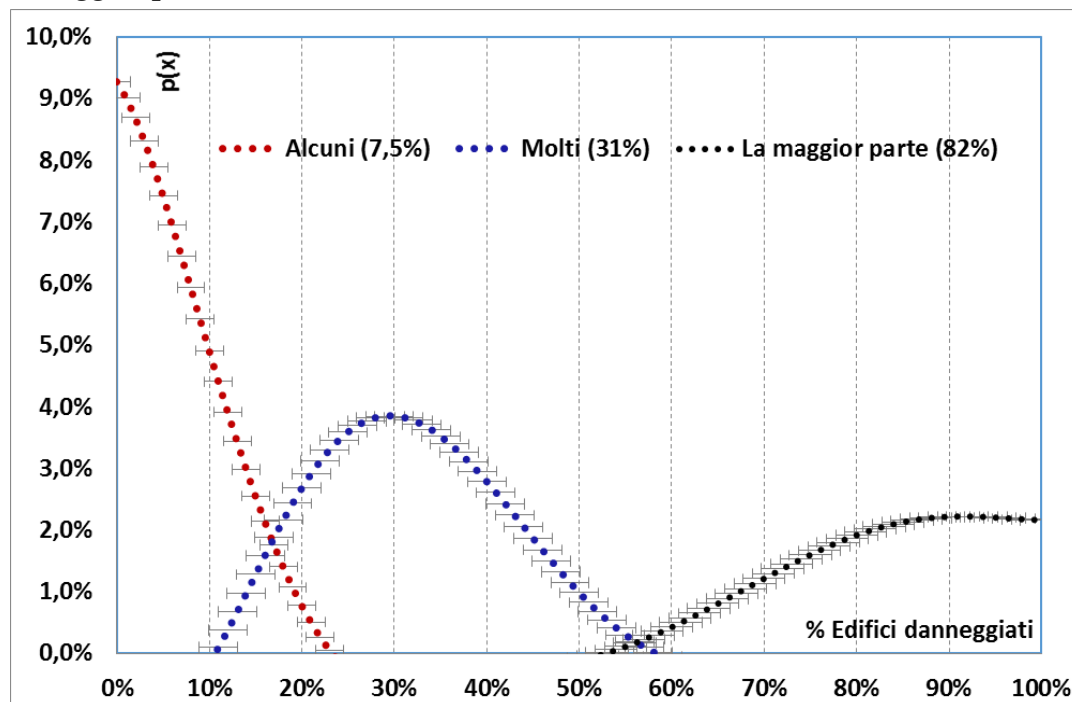
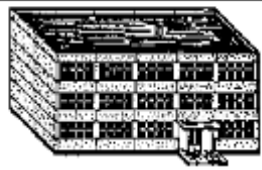


Figura 14.- Formalizzazione di “alcuni”, “molti”, “la maggior parte” utilizzando distribuzioni di Poisson

Ciascun livello di danno è individuato dall'EMS-98 nel modo mostrato, sia per le **costruzioni di muratura** sia per le **costruzioni con struttura di c.a.**, in **Figura 15**.

Danni alle costruzioni di muratura		Danni alle costruzioni con struttura di c.a.	
LIVELLO 1: Danni da trascurabili a leggeri (nessun danno alla struttura, danni lievi agli elementi non strutturali)			
	Fessure di dimensione capillare in alcune pareti. Caduta di piccole porzioni di solo intonaco. Caduta, solo in alcuni casi, di pietre non legate dalla parte alta del fabbricato.		Piccole fessure nell'intonaco che ricopre gli elementi del telaio o alla base delle pareti portanti. Piccole fessure in tramezzi e tamponamenti.
LIVELLO 2: Danni moderati (danni lievi alla struttura, moderati agli elementi non strutturali)			
	Fessure in molte pareti. Caduta di discrete porzioni di intonaco. Collasso parziale di comignoli.		Fessure nelle colonne e travi del telaio e nelle pareti portanti. Fessure in tramezzi e tamponamenti; caduta di rivestimenti fragili e intonaco. Caduta di malta dai giunti delle pareti in muratura.

LIVELLO 3: Danni da sostanziali a pesanti (danni moderati alla struttura, pesanti agli elementi non strutturali)			
	Fessure larghe ed estese nella maggior parte delle pareti. Distacco di tegole. Collasso del comignolo all'altezza del tetto; rottura di elementi non strutturali (tramezzi, frontoni).		Fessure nelle colonne e nei giunti trave-colonna del telaio e alla base e nei giunti delle pareti portanti accoppiate. Espulsione di copriferro, instabilizzazione di armature. Larghe fessure in tramezzi e tamponamenti; rottura di alcuni elementi di tamponamento.
LIVELLO 4: Danni molto pesanti (danni pesanti alla struttura, molto pesanti agli elementi non strutturali)			
	Rottura significativa di pareti; rottura parziale di strutture del tetto e dei solai.		Larghe fessure negli elementi strutturali con rotture per compressione del calcestruzzo e rottura delle barre di acciaio. Sfilamento delle barre di armatura nelle travi. Eccesso di deformazioni residue nelle colonne. Collasso di alcune colonne o di un solo piano superiore
LIVELLO 5: Distruzione (danni molto pesanti alla struttura)			
	Collasso totale, o quasi, dell'edificio.		Collasso del piano terra o di porzioni (es. parti dell'edificio)

Figura 15.- Livelli di danno degli edifici in muratura e in c.a. (secondo EMS-98).

È ora agevole individuare il valore medio del danno accusato da ciascuna tipologia. Basta, infatti, attribuire alle 6 classi di vulnerabilità i livelli di danno sintetizzati in **Figura 15**, adottare una **distribuzione binomiale del danno** e riferirsi alle probabilità di **Figura 14**, per ottenere, per le intensità da V a XII, i valori medi del danno riportati nella tabella di **Figura 16**.

Ricordando che i livelli di danno sono 7 per l'ATC e 6 per l'EMS-98 e che il livello di danno nullo è 1 per la ATC e 0 per la EMS-98, si giunge infine (seconda colonna della tab. di **Figura 16**) a collegare il danno EMS-98 al danno ATC, per estendere all'EMS-98 i dati ATC su feriti e morti.

LIVELLO MEDIO DI DANNO		SEVERITÀ / VULNERABILITÀ					
ATC	EMS-98	AEMS	BEMS	CEMS	DEMS	EEMS	FEMS
1,06	0,05	V	V	VI	VII	--	--
1,47	0,4	VI	VI	VII	VIII	IX	X
2,46	1,25	--	VIII	VIII	IX	X	XI
3,63	2,25	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4,5	3	VIII	IX	X	XI	XII	--
5,67	4	IX	X	XI	XII	--	--
6,51	4,73	X	XI	XII	--	--	--

Figura 16.- Valori medi del livello di danno EMS-98 per ciascuna classe di vulnerabilità e intensità.

I valori medi del livello di danno EMS-98 sono stati ottenuti assumendo per il danno una **distribuzione binomiale** nella forma $(n!/(k!(n-k)!))q^{n-k}p^k$ in cui: k (0,1,2,3,4,5) sono i **livelli di danno**, n è il **numero di livelli di danno** escluso il danno nullo (5), p è la **probabilità di occorrenza del danno**, $q = 1-p$. Attraverso la binomiale è stato possibile cogliere la distribuzione della % di edifici danneggiati "alcuni, molti, la maggior parte" lungo i 5 livelli di danno, al crescere della probabilità di danneggiamento ovvero del danno medio.

Variando la **probabilità di danneggiamento** tra 0 e 1 è stato immediato ottenere le distribuzioni

percentuali, tra i diversi livelli di danno, mostrate nella tabella di **Figura 17**¹⁹; infatti, scorrendo i termini della binomiale al crescere di p e riferendosi alle percentuali associate alle quantità “alcuni (7,5%), molti (31%), la maggior parte (82%)”, si individuano le distribuzioni che meglio approssimano tali quantità, corrispondenti ai valori medi del danno EMS-98, per le intensità da V a XII .

La procedura seguita consentirà di valutare anche EAL, sempre basandosi sull’approccio macro-sismico.

In tabella sono cerchiare **in rosso** (così da provarne il buon accordo con la EMS-98) **le percentuali di edifici che individuano l’intensità macrosismica attraverso il livello di danno di appartenenza**; nella tabella sono riportate anche **le intensità** (da V a XII), già mostrate nella **Figura 16**, e che fissano, **per ciascuna classe di vulnerabilità, l’intensità EMS-98 per la quale si ha quella distribuzione di danno.**

L’accordo è perseguito minimizzando gli scostamenti dalle quantificazioni attribuite ai termini *alcuni* (7,5%) e *molti* (31%); le coppie cerchiare, di conseguenza non colgono esattamente né l’uno né l’altro valore ma accusano errori i più contenuti possibili rispetto all’insieme dei due, ricadendo negli intervalli di confidenza delle interpolanti.

In tabella sono riportati anche altri dati d’interesse e cioè:

- “**P**”, il parametro p della distribuzione binomiale cui ci si riferisce;
- “**Danno medio**”, il prodotto di P per il numero di livelli di danno, ossia 5;
- “**Coeff. Var.**”, il coefficiente di variazione del “**Danno medio**”.

P	Livello di danno						Danno medio	Coeff. Var.	Classe di vulnerabilità					
	0	1	2	3	4	5			A _{EMS}	B _{EMS}	C _{EMS}	D _{EMS}	E _{EMS}	F _{EMS}
≤1%	95%	5%	0%	0%	0%	0%	0,05	447%	--	V	VI	VII	--	--
9%	62%	31%	6%	1%	0%	0%	0,45	149%	V	VI	VII	VIII	IX	X
30%	17%	36%	31%	13%	3%	0%	1,5	82%	VI	VII	VIII	IX	X	XI
47%	4%	19%	33%	29%	13%	2%	2,35	65%	VII	VIII	IX	X	XI	XII
64%	1%	5%	19%	34%	30%	11%	3,2	56%	VIII	IX	X	XI	XII	--
79%	0%	1%	6%	22%	41%	31%	3,95	50%	IX	X	XI	XII	--	--
96%	0%	0%	0%	1%	17%	82%	4,8	46%	X	XI	XII	--	--	--

Figura 17.- Distribuzioni del danno al variare dell’intensità e della classe di vulnerabilità, secondo EMS98

Così, ad esempio, una % di edifici danneggiati di circa il 5% sul livello di danno 1 (*pochi edifici danneggiati*), cui corrisponde una probabilità di danneggiamento $P \leq 1\%$, si ha per una intensità EMS-98 V per la classe B, VI per la classe C e VII per la classe D. Si osserva che un livello di danneggiamento caratterizzato da una certa distribuzione del danno (con corrispondente danno medio) è associato a intensità più basse nel caso di classi più vulnerabili quali la A_{EMS} e la B_{EMS} ossia le classi più vulnerabili si danneggiano già per le basse intensità.

Si hanno infine, al variare di P (**Figura 18**), le spezzate delle 7 distribuzioni di **Figura 17**; ogni spezzata mostra (al crescere di P da 1% a 96%) come gli edifici danneggiati si distribuiscano tra i livelli di danno.

¹⁹ Nella tabella, la distribuzione delle intensità è stata completata in modo da risultare più coerente al suo interno.

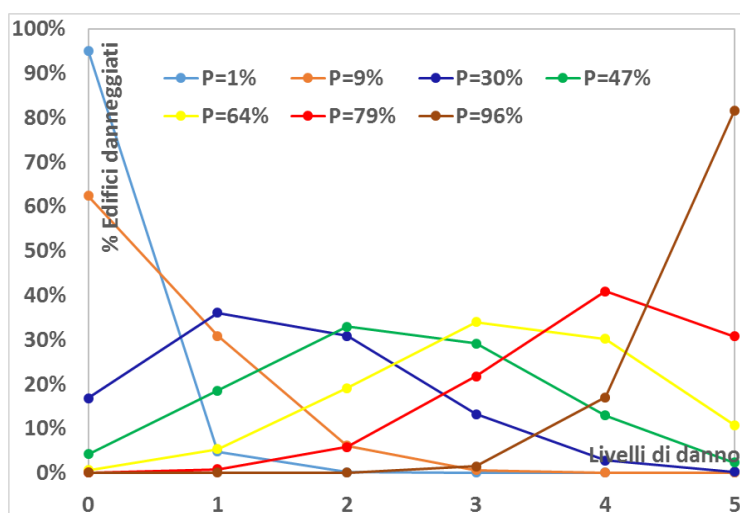


Figura 18.- Distribuzione dei livelli di danno, al variare del numero medio di edifici danneggiati P (in %).

Si devono ora legare i danni ai costi, esprimendo il danno in termini di EAL. Per farlo si utilizza la distribuzione del danno in termini di %RC (secondo ATC) per ciascuna intensità macrosismica MMI.

A questo fine, ridotti da 7 a 6 i livelli di danno ATC accorpando i livelli di danno 1 e 2, si rinumerano i livelli stessi da 0 a 5 e si moltiplica la matrice di probabilità di danno ATC per il vettore dei %RC medi ATC (v. Figura 9) per ottenere l'entità del danno, espressa in %RC (per ogni livello di danno e ogni intensità macrosismica MMI), di Figura 19. Sommando le percentuali di ciascuna colonna si ottengono, al variare della intensità macrosismica MMI, i %RC mostrati nell'ultima riga di tabella.

Livello di danno	Intensità macrosismica MMI						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0-Minore	0,49%	0,44%	0,35%	0,22%	0,07%	0,02%	0,01%
1-Leggero	0,08%	0,40%	0,80%	1,20%	1,50%	0,50%	0,05%
2-Moderato	0,08%	0,40%	1,60%	3,20%	5,20%	6,00%	0,60%
3-Grave	0,05%	0,68%	1,35%	4,50%	8,10%	13,50%	8,10%
4-Gravissimo	0,00%	0,80%	1,60%	3,20%	8,00%	14,40%	31,20%
5-Crollato	0,00%	0,50%	1,00%	2,00%	3,00%	8,00%	38,00%
%RC	0,69%	3,21%	6,70%	14,32%	25,87%	42,42%	77,96%

Figura 19.- Distribuzione di %RC (secondo ATC) tra i livelli di danno, per le diverse intensità MMI

Si può adesso individuare il legame tra i %RC e i valori di P che essi sottendono, per estenderlo poi alle 6 classi di vulnerabilità della EMS-98.

In accordo con le valutazioni ATC di Figura 9, il legame %RC - P si ricava passando dai livelli di danno alle probabilità binomiali di eccedenza P corrispondenti. Infatti, poiché ad ogni livello di danno corrisponde un danno medio (ATC ed EMS 98) e quindi una certa distribuzione di danno ed un determinato valore di P, è possibile legare % RC medio a P attraverso il danno medio.

Tale legame (che fornisce l'andamento non lineare di %RC con il livello medio di danno), espresso mediante l'interpolante del 5° ordine $\%RC = -6,5104 P^5 + 13,021 P^4 - 9,1146 P^3 + 3,8542 P^2 - 0,25 P$, nel modo mostrato in Figura 20, viene poi esteso alle EMS-98. Infatti, a partire dai valori di P corrispondenti alle distribuzioni di danno individuate con la binomiale (che rispettano le quantizzazioni medie alcuni/molti/la maggior parte, che soddisfano i valori di danno medio dell'ATC e che rispettano il criterio di traslazione implicito nell'EMS 98), si ricavano i valori di %RC interpolando i valori di P e i corrispondenti %RC medi forniti dalle ATC.

Livello di danno	P(%)	Intervallo di %RC	%RC medio
0-Minore	0%	0-1%	0,50%
1-Leggero	20%	1-10%	5%
2-Moderato	40%	10-30%	20%
3-Grave	60%	30-60%	45%
4-Gravissimo	80%	60-100%	80%
5-Crollato	100%	100%	100%

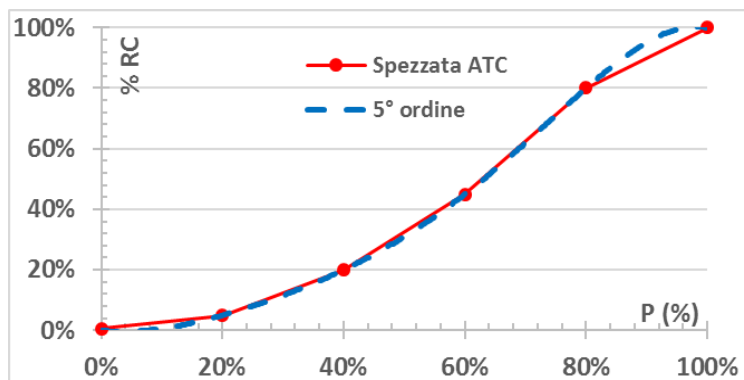


Figura 20.- Andamento di %RC in funzione di P (in accordo con ATC)

La distribuzione di **P** così ricavata viene attribuita alla classe **E_{EMS}**, quella corrispondente alle costruzioni dotate di un livello di progettazione antisismica elevato, quale è lecito attendersi abbiano costruzioni capaci di sostenere terremoti del IX-X grado EMS-98.

L'attribuzione dei valori di **P** alle altre classi di vulnerabilità viene operata aggiungendo o sottraendo frazioni della deviazione standard associata al danno medio della classe **E_{EMS}**. In particolare:

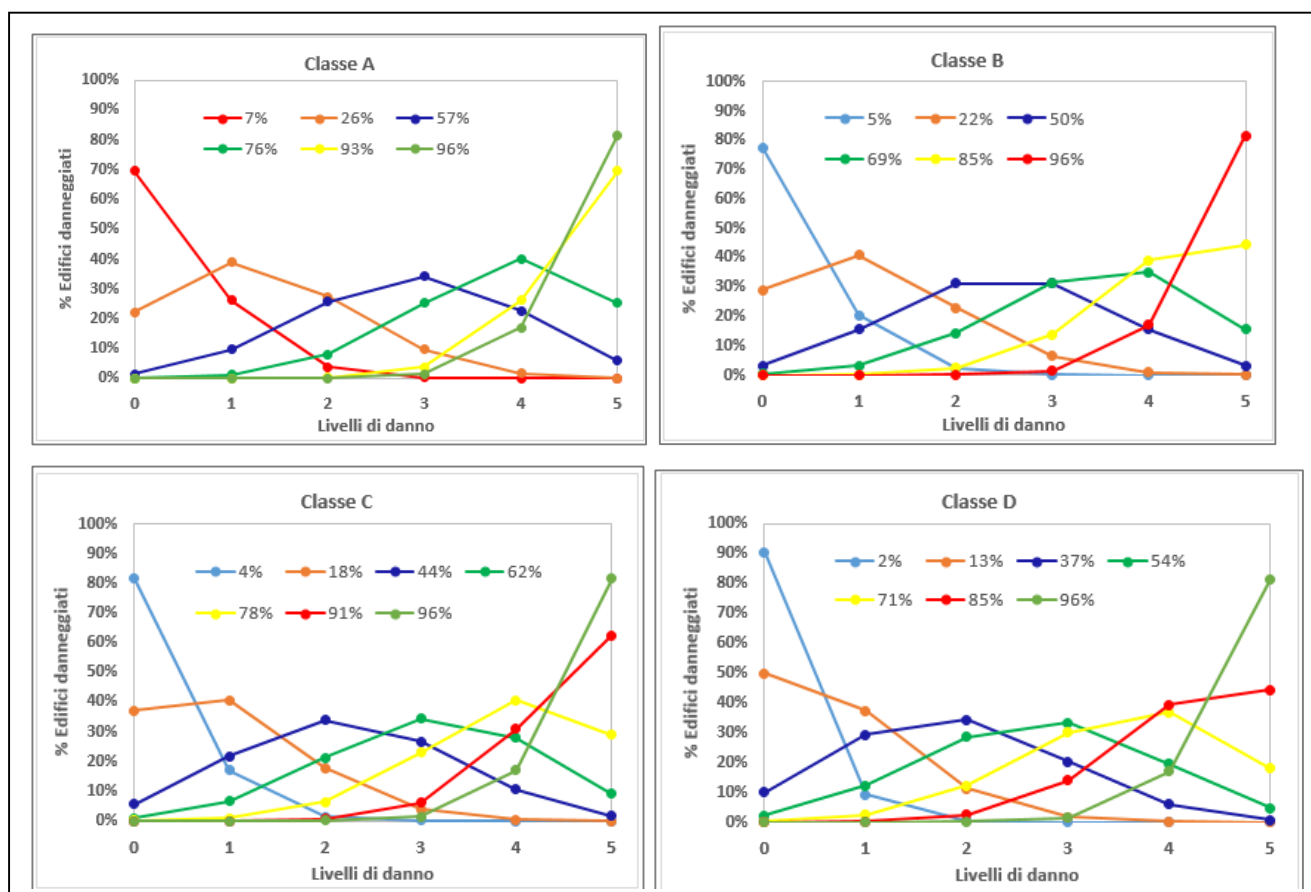
- i **P** relativi alle **i** classi di vulnerabilità da **D_{EMS}** a **A_{EMS}** (con **i** variabile da 1, per la classe **D_{EMS}**, a 4, per la classe **A_{EMS}**) aumentando quelli relativi alla classe **E_{EMS}** di **i/3** della deviazione standard, per la generica classe **i-esima**;
- i **P** relativi alla classe **F_{EMS}** si ottengono da quelli relativi alla classe **E_{EMS}** riducendoli di **1/3** della deviazione standard²⁰.

²⁰ Così facendo si riscontra un ottimo accordo con i danni rilevati, per le diverse classi di vulnerabilità, a seguito del terremoto aquilano del 2009 (dati con cui è stata eseguita la validazione del modello macrosismico proposto).

Intensità	A _{EMS}	B _{EMS}	C _{EMS}	D _{EMS}	E _{EMS}	F _{EMS}
V	0%	0%	0%	0%	0%	0%
VI	7%	5%	4%	2%	1%	1%
VII	26%	22%	18%	13%	9%	5%
VIII	57%	50%	44%	37%	30%	23%
IX	76%	69%	62%	54%	47%	40%
X	93%	85%	78%	71%	64%	57%
XI	96%	96%	91%	85%	79%	73%
XII			96%	96%	96%	93%

Figura 21.- Valori di P al variare dell'Intensità e della classe di vulnerabilità (secondo EMS-98)

Complessivamente, al variare della classe di vulnerabilità e dell'intensità macrosismica EMS-98, si ottiene la distribuzione di **P** mostrata nella tabella di **Figura 21** (alla classe E_{EMS} competono i **P** evidenziati in giallo). In **Figura 22** si riportano le distribuzioni del danno che competono alle altre classi di vulnerabilità (A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS}, D_{EMS} e F_{EMS}).



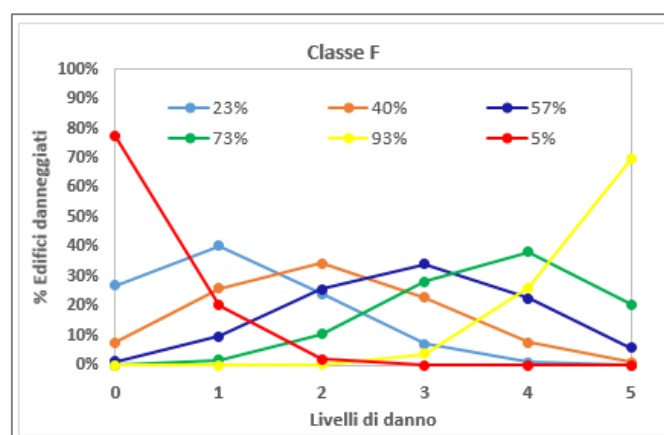


Figura 22.- Distribuzione dei livelli di danno, al variare del numero medio di edifici danneggiati P (in %).

Noti i valori di **P** di ciascuna classe è poi immediato, utilizzando la interpolante mostrata in **Figura 20**, ricavare i valori di **%RC** corrispondenti riportati in **Figura 23**; occorre però, prima, fare qualche considerazione sulla **ripartizione del danno tra la componente “struttura” e le “parti non strutturali”**. Per le classi di vulnerabilità **E_{EMS}** e **F_{EMS}**, cui compete una progettazione antisismica di livello elevato, ciò non comporta variazioni nella valutazione dei danni (l’attenzione agli elementi non strutturali, analoga a quella prestata agli elementi strutturali, garantisce che i danni procedano di pari passo per entrambe le categorie). Dunque, per le classi **F_{EMS}** e **E_{EMS}**, partendo dai **P** della colonna di competenza di **Figura 21**, si ricavano, con l’interpolante di **Figura 20**, i danni in termini di **%RC** corrispondenti.

Per le classi **A_{EMS}**²¹, **B_{EMS}** e **C_{EMS}**, invece, che sono prive di progettazione antisismica, i danni agli elementi non strutturali precedono di un livello, nel caso di edifici in c.a., seguono di un livello, nel caso di edifici in muratura (v. **Figura 15**) i danni agli elementi strutturali.

Ricavati così i **%RC**, li si attribuisce per il **25%** agli elementi strutturali e per il **75%** agli elementi non strutturali (edifici in c.a.), per il **65%** agli elementi strutturali e il **35%** agli elementi non strutturali (edifici in muratura). Per semplicità, nelle elaborazioni successive i valori riportati per le classi **B_{EMS}** e **C_{EMS}**, sono stati ottenuti come media tra quelli relativi agli edifici in c.a. e quelli relativi in muratura e sono dunque attribuibili, indifferentemente, agli uni e agli altri.

Si perviene, poi, al valore effettivo di **%RC** sommando, per ciascuna intensità, la **%RC** del **danno strutturale** alla **%RC** del **danno non strutturale** secondo la tempistica di innesco del danno.

Infine per la classe **D_{EMS}**, intermedia tra classi a progettazione elevata e classi prive di progettazione, i valori di **%RC** si ottengono come media dei valori ottenuti procedendo in ambedue i modi detti.

²¹ La classe **A_{EMS}** si riferisce solo agli edifici in muratura

Intensità	A _{EMS}	B _{EMS}	C _{EMS}	D _{EMS}	E _{EMS}	F _{EMS}	ATC
V	1,68%	1,34%	1,18%	0,95%	0,00%	0,00%	0%
VI	7,64%	5,28%	3,76%	2,83%	0,73%	0,00%	0,69%
VII	33,31%	26,00%	19,89%	14,95%	2,53%	1,63%	3,21%
VIII	65,06%	53,69%	42,40%	33,54%	12,50%	7,25%	6,70%
IX	88,00%	78,94%	69,42%	57,81%	28,75%	20,00%	14,12%
X	95,25%	93,25%	87,38%	79,53%	52,00%	41,25%	25,87%
XI	100,00%	100,00%	94,75%	93,16%	78,25%	67,75%	42,42%
XII	--	--	100,00%	96,00%	96,00%	93,00%	77,96%

Figura 23.- Andamento di %RC in funzione dell'intensità macrosismica e della vulnerabilità EMS-98

I danni così ottenuti, espressi in %RC, sono riportati nella tabella di **Figura 23**; come si vede, la massima somiglianza ai danni previsti dall'ATC è esibita dalla classe di vulnerabilità F_{EMS}²².

Circa i rapporti tra intensità sismica e progettazione, per le classi di vulnerabilità D_{EMS}, E_{EMS} e F_{EMS}, è opportuna qualche considerazione critica ulteriore.

Premesso che le tre classi si riferiscono a strutture dotate di progettazione antisismica, ma con un livello di progettazione diverso (molto elevato per la F_{EMS}, elevato per la E_{EMS}, moderato per la D_{EMS}); esse prefigurano una situazione in cui il livello di progettazione sia correttamente commisurato alla pericolosità sismica con cui la struttura è chiamata a confrontarsi.

Ovviamente una vulnerabilità sismica dipendente dalla pericolosità contrasta, almeno a prima vista, con l'approccio sin qui mostrato che, invece, considera la vulnerabilità sismica un parametro proprio della costruzione dunque, indipendente dalla pericolosità sismica del sito in cui la costruzione sorge.

D'altronde, se si decide di progettare antisismicamente, è logico che vulnerabilità e pericolosità si leghino e che la progettazione persegua una vulnerabilità costante al variare della pericolosità.

L'apparente contrasto logico scompare se si assume, come dato di fatto dalla EMS-98, che i tre livelli di progettazione caratterizzino tre diverse classi di vulnerabilità. Prescindendo infatti dalla classe di vulnerabilità F_{EMS} (una vulnerabilità sismica minima, a fronte di una progettazione antisismica molto elevata ed efficace), alle classi E_{EMS} e D_{EMS} possono essere associate vulnerabilità tipiche di una struttura progettata antisismicamente riferendosi a una pericolosità sismica alta o bassa rispettivamente²³.

²² La normativa antisismica italiana ha sempre seguito (anche se con notevoli scarti temporali) la normativa californiana quanto a criteri, procedimenti, particolari. Riferendosi, allora, alla pericolosità sismica italiana di entità più elevata (terremoti di intensità > IX-X) è ragionevole attendersi che edifici antisismici particolarmente ben progettati e realizzati, quali quelli della classe F_{EMS}, abbiano danni assai simili a quelli degli edifici californiani (sintetizzati dall'ATC) fino alle intensità previste nella progettazione (IX-X), per scostarsene poi in eccesso al presentarsi di intensità più elevate (X-XII) proprie della California, più che dell'Italia.

²³ Per dare un senso più preciso ai due aggettivi, in Italia una pericolosità sismica alta può considerarsi quella attribuita alla Zona 1, bassa quella attribuita alla Zona 3.

5.1 LE CURVE DI VULNERABILITA' PER LE CLASSI EMS-98

Le **Curve di Vulnerabilità** ottenute (per le classi EMS-98), esprese come andamento dei danni (in termini di %RC) al variare dell'intensità macrosismica, sono riportate in **Figura 24**.

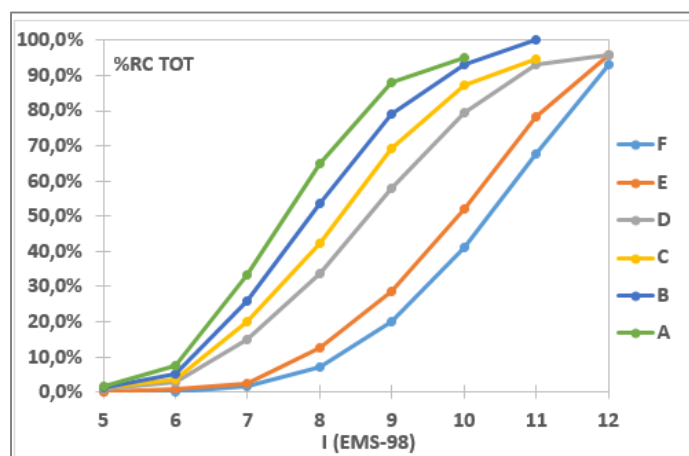


Figura 24.- Curve di Vulnerabilità, per le classi EMS-98 (%RC_{TOT} in funzione dell'intensità macrosismica).

Distinguendo tra **componente strutturale** e **componente non strutturale**, le relative curve di danno, per gli **edifici in c.a.**, sono mostrate in **Figura 25**, per gli **edifici in muratura** in **Figura 26**.

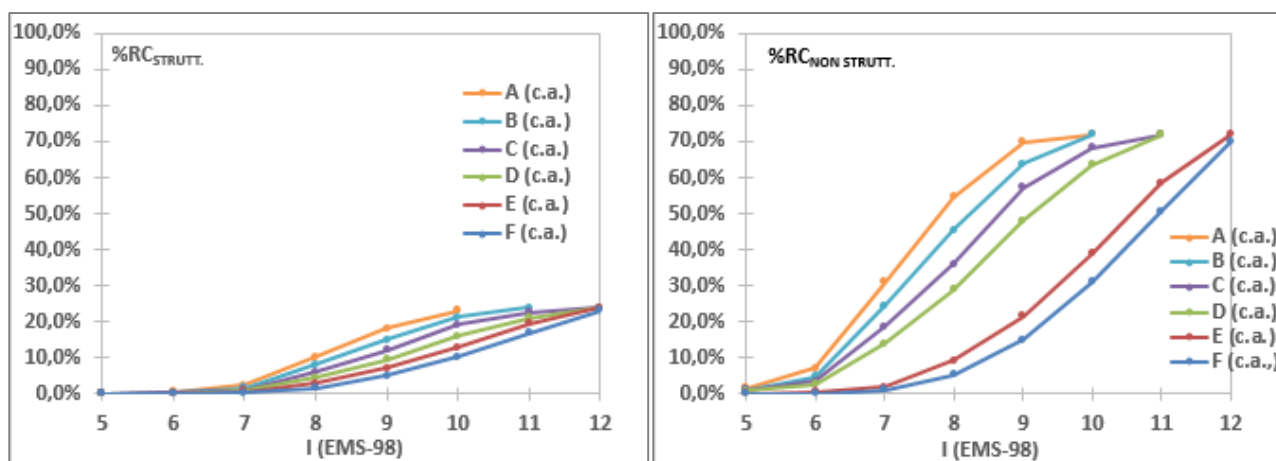


Figura 25.- Curve %RC_{STRUTT.} – I (EMS98) - %RC_{NON STRUTT.} – I (EMS98).

Gli andamenti delle curve in **Figura 25** evidenziano come:

- il comportamento associato alla componente “**struttura**”, per le diverse classi di vulnerabilità, migri in maniera graduale verso livelli di danneggiamento più elevati al crescere della vulnerabilità della struttura (da F_{EMS} a A_{EMS});
- il danno legato agli “**elementi non strutturali**” caratterizzi bene il diverso comportamento esibito dagli edifici progettati per l'azione sismica (classi E_{EMS} e F_{EMS}) rispetto a quello degli edifici non antisismici (classi da A_{EMS} a C_{EMS}) e degli edifici in classe D_{EMS}, che, pur essendo progettati per l'azione sismica (ma con un basso livello di progettazione), non dedicano attenzione ai particolari costruttivi e alla componente non strutturale.

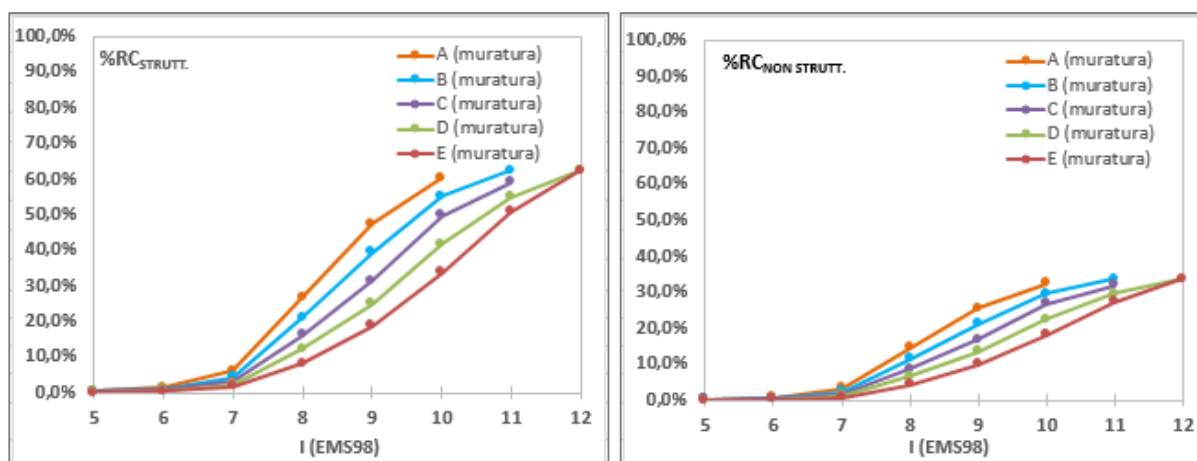


Figura 26.- Curve %RC_{STRUTT.} - I (EMS98) - %RC_{NON STRUTT.} - I (EMS98).

5.2 VALUTAZIONE DI EAL SU BASE MACROSISMICA

Per passare dai **danni espressi in %RC** alle **perdite attese annue EAL**, così da valutare EAL su base macrosismica, è necessario attribuire a ciascuna intensità macrosismica I il corrispondente valore di $\lambda=1/T_R$, con T_R periodo di ritorno di I nel sito in cui sorge la costruzione. Per fare ciò occorre:

1. **esprimere l'intensità macrosismica in termini di accelerazione;**
2. **esprimere il danno in termini di EAL.**

5.2.1 PASSAGGIO DALL'INTENSITÀ MACROSISMICA ALLA FREQUENZE DI OCCORRENZA

Per legare l'intensità macrosismica all'accelerazione si parte dalla **pericolosità sismica italiana**, che definisce, **per ciascun punto di un reticolo** (avente maglia grossolanamente quadrata di circa 5 km di lato) **che copre l'intero territorio nazionale, i valori di PGA e i relativi periodi di ritorno.**

Si ricavano i valori dell'intensità macrosismica I per tutti i nodi del reticolo utilizzando la relazione tra I e PGA (in m/sec²) proposta Gómez Capera A.A., Albarello D., Gasperini P., nel 2007 nell'ambito del progetto DPC-INGV S1²⁴ nella forma $I = (\log(PGA) - A)/B$, con $A = -1,84 \pm 0,16$ e $B = 0,28 \pm 0,04$.

La relazione è stata ottenuta applicando una regressione ortogonale alla base dati **DB4** [dati di Margottini et al. (1992) e di Faccioli e Cauzzi (2006)] e scegliendo, nel caso in esame, i segni meno.

Ottenuti, in questo modo, i valori di I per tutti i nodi del reticolo, li si raggruppa nelle 4 zone sismiche previste²⁵, legando I a $\lambda=1/T_R$ per ogni zona, mediante una regressione espressa nella forma:

24 Gómez Capera A.A., Albarello D., Gasperini P., 2007. Aggiornamento relazioni fra l'intensità macrosismica e PGA. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D11, <http://esse1.mi.ingv.it/d11.html>

25 La attuale zonazione sismica italiana è stata definita dalle regioni che hanno deliberato sulla base dei criteri definiti dalla **OPCM 3274** del 20 marzo 2003 e, successivamente, dalla **OPCM 3519** del 28 aprile 2006: *Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone*. Quest'ultima prevede, con riferimento alla PGA avente probabilità di superamento 10% su $V_R=50$ anni (ossia la PGA corrispondente allo SLV), 4 zone: zona 1 con $PGA \geq 0,25g \pm 0,025g$, zona 2 con $0,15g \pm 0,025g < PGA < 0,25g \pm 0,025g$, zona 3 con $0,05g \pm 0,025g < PGA < 0,15g \pm 0,025g$, zona 4 con $PGA < 0,05g \pm 0,025g$. Sebbene non tutte le regioni abbiano ancora deliberato per la riclassificazione del loro territorio, le elaborazioni sono condotte assumendo per semplicità che le zone siano effettivamente definite con riferimento ai limiti sopraparportati, senza considerare le tolleranze di $\pm 0,025g$.

$\lambda = e^{-(1-b)/a}$. In Figura 27 sono riportati, referendosi per ciascuna zona alla pericolosità sismica media nazionale, i valori di **a** e **b** e della relativa varianza spiegata **R²**.

	ZONA1	ZONA2	ZONA3	ZONA4
a	0,8143	0,7578	0,6677	0,5602
b	4,9448	4,6862	4,0058	3,2547
R²	0,9753	0,9240	0,7200	0,9217

Figura 27.- Valori di **a**, **b**, **R²** per ciascuna delle 4 zone sismiche.

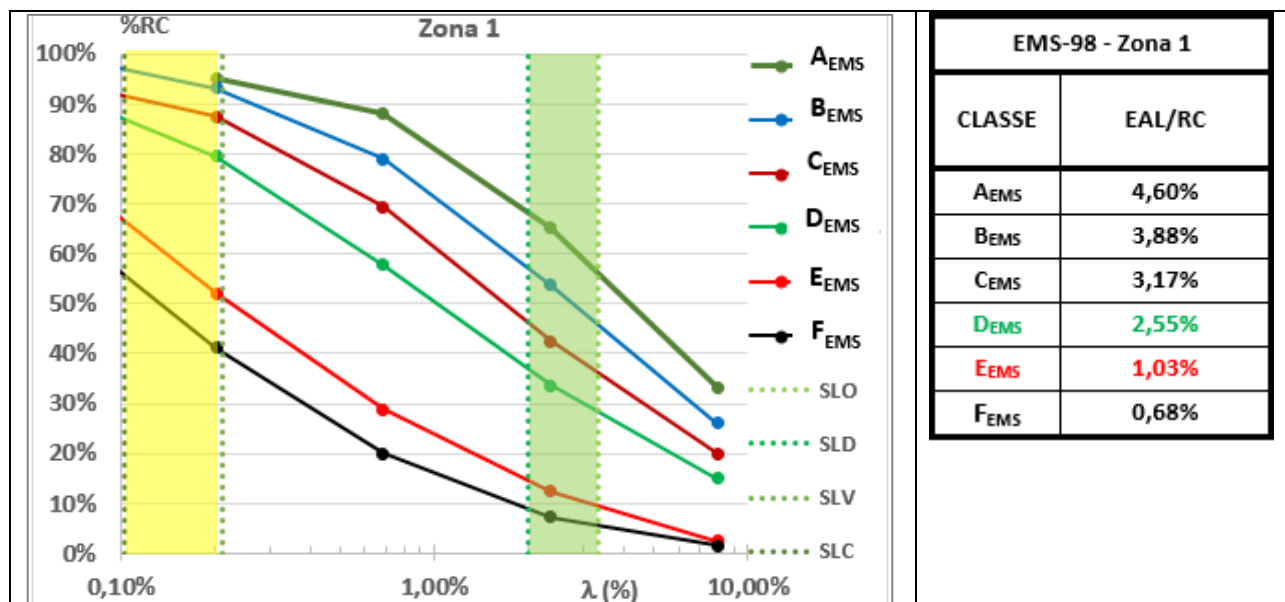
In Figura 28 sono riportati i valori di λ (purché di entità non superiore al 10% circa, cui si riferisce lo SLID) corrispondenti alle intensità comprese tra IV-V e XII.

	$\lambda = 1/T_R$ (%)			
	ZONA1	ZONA 2	ZONA3	ZONA4
IV-V				10,829%
V				4,436%
V-VI			10,669%	1,817%
VI			5,046%	0,744%
VI-VII		9,131%	2,386%	0,305%
VII	8,015%	4,720%	1,128%	0,125%
VIII	2,347%	1,261%	0,252%	0,021%
IX	0,687%	0,337%	0,056%	0,004%
X	0,201%	0,090%	0,013%	0,001%
XI	0,059%	0,024%	0,003%	0,000%
XII	0,017%	0,006%	0,001%	0,000%

Figura 28.- Valori di λ , per ciascuna delle 4 zone sismiche e delle 11 intensità.

5.2.2 LE CURVE DI PERDITA EAL

Le **curve EAL** si tracciano incrociando i danni (%RC di Figura 23) con le frequenze di occorrenza (λ di Figura 28); esse, in virtù della pericolosità di riferimento adottata, sono relative al suolo tipo “A” affiorante e piano e sono riportate, per le **Zone 1 e 2**, in Figura 29, per le **Zone 3 e 4**, in Figura 30.



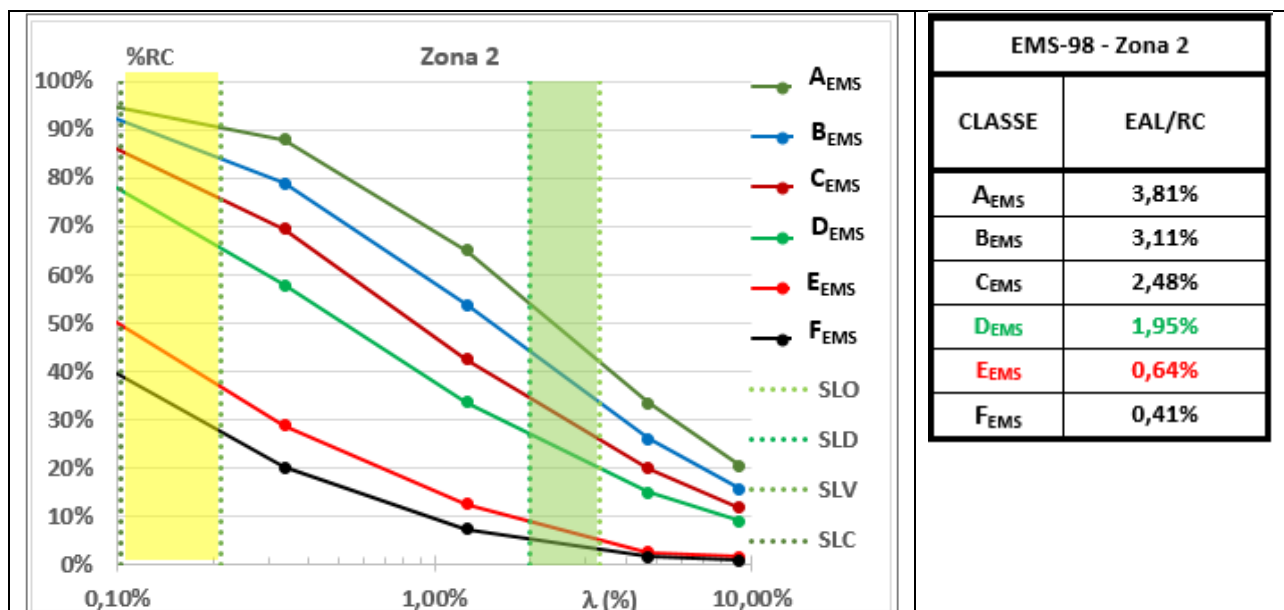
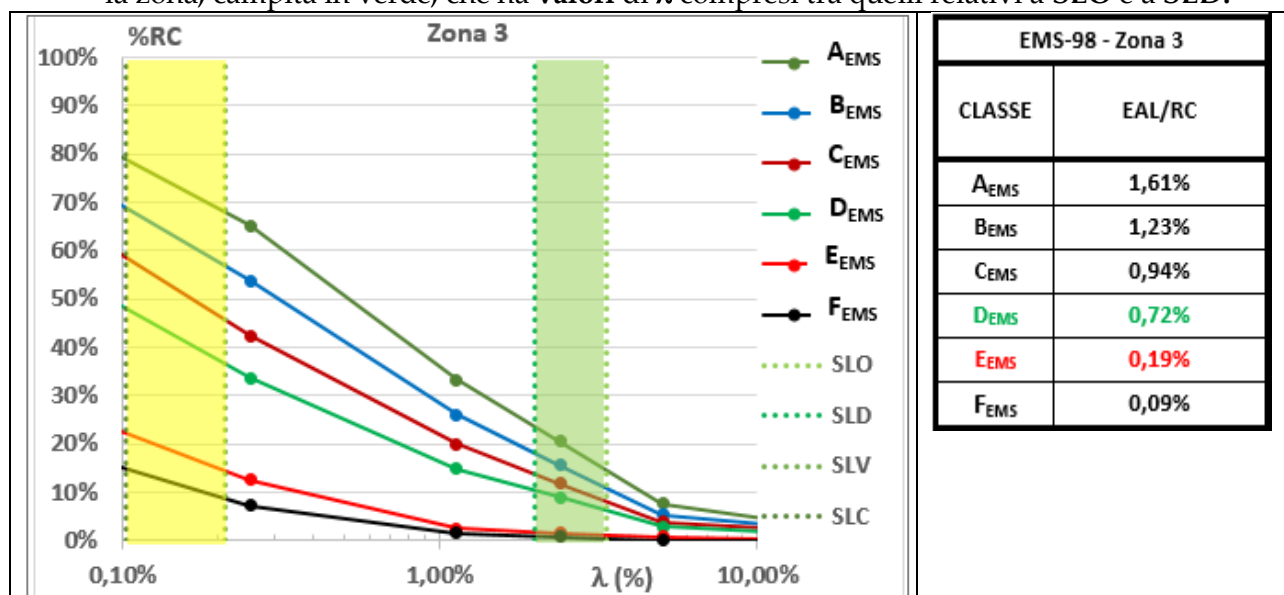


Figura 29.- Perdite relative alle diverse classi di vulnerabilità, per edifici ricadenti nelle Zone 1 e 2.

Nelle figure citate, oltre alle curve si riportano anche, in tabelle, i valori di EAL/RC (in %), per ciascuna zona sismica e ciascuna classe di vulnerabilità. Nel calcolo di EAL, convenzionalmente, si fissa la soglia $\lambda=10\%$ di inizio danneggiamento (corrispondente allo SLID), e la soglia $\lambda=0,10\%$ di raggiungimento del danno totale (corrispondente allo SLC). Per consentire considerazioni in merito agli stati limite previsti dalle NTC²⁶ con riferimento a un $V_R=50$ anni²⁷, sono state individuate:

- la zona, campita in giallo, che ha valori di λ compresi tra quelli relativi a SLV e a SLC;
- la zona, campita in verde, che ha valori di λ compresi tra quelli relativi a SLO e a SLD.



²⁶ Per le classi di vulnerabilità e le sismicità più elevate lo Stato Limite di Inizio Danno (SLID) si ha per valori di $\lambda > 10\%$.

²⁷ È immediato variare il valore di V_R , così da allinearsi a tutte le possibili situazioni.

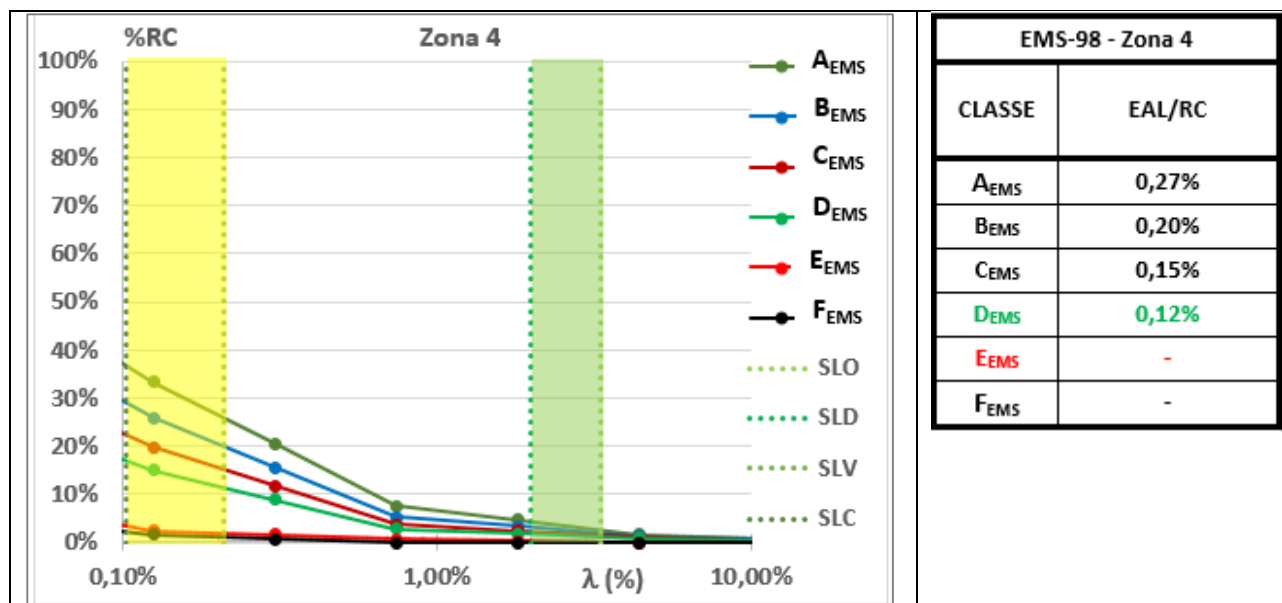


Figura 30.- Perdite relative alle diverse classi di vulnerabilità, per edifici ricadenti nelle Zone 3 e 4.

Nelle **Zona 1** e **2** la classe **E_{EMS}** (progettata in accordo alla azione sismica di Norma in **Zona 1** e **indicata in rosso**) rappresenta la frontiera tra edifici a vulnerabilità più bassa di quella di Norma (classe **F_{EMS}**) e edifici a vulnerabilità più alta di quella di Norma e progressivamente crescente (classi da **D_{EMS}** a **A_{EMS}**).

Nella **Zona 3** e nella **Zona 4** la classe **D_{EMS}** (progettata in accordo alla azione sismica di Norma in **Zona 3** e **indicata in verde**) rappresenta la frontiera tra edifici a vulnerabilità più bassa di quella di Norma (classi **F_{EMS}** e **E_{EMS}**) e edifici a vulnerabilità più alta di quella di Norma e progressivamente crescente (classi da **C_{EMS}** a **A_{EMS}**).

Nelle **Zona 1** e **2** le classi **A_{EMS}** a **B_{EMS}** accusano valori di **EAL** molto elevati, manifestando pertanto, una vulnerabilità troppo elevata (almeno per la classe **A_{EMS}**); invece nelle **Zona 3** e **4** le classi **F_{EMS}** e **E_{EMS}** accusano valori di **EAL** così ridotti da far dubitare della presenza di ambedue le classi (troppo poco vulnerabili perché tale ridotta vulnerabilità giustifichi il maggior costo di costruzione ad essa connesso, ossia troppo poco convenienti in un'ottica costi-benefici).

Passando dalla **Zona 1** alla **Zona 2**, **EAL/RC** si riduce mediamente dello **0,59%**; si può dunque ritenere che ogni classe di vulnerabilità registri in **Zona 2** danni vicini a quelli che, in **Zona 1**, registrava la classe di vulnerabilità ad essa contigua ma meno vulnerabile (la classe **E_{EMS}** si avvicina ai danni della classe **F_{EMS}**, la classe **D_{EMS}** ai danni della classe **E_{EMS}** e così via).

Passando dalla **Zona 2** alla **3**, **EAL/RC** si riduce mediamente dello **1,27%**; in particolare, al variare della classe dalla **F_{EMS}** alla **A_{EMS}**, si registrano riduzioni di **EAL/RC** che vanno dallo **0,30%** al **2,30%**, tanto più marcate quanto più la classe è vulnerabile, con ciò confermando il comportamento a soglie delle costruzioni. Il danneggiamento infatti, frequentemente, non cresce con andamento continuo al crescere dell'intensità ma, piuttosto, evidenzia improvvisi aumenti dopo tratti sostanzialmente costanti, ossia un comportamento a soglie.

Infine, passando dalla **Zona 3** alla **4**, si hanno riduzioni di **EAL/RC** pari in media allo **0,67%**, dunque sostanziale assenza di danni per le classi da **F_{EMS}** a **D_{EMS}** e danni ulteriormente ridotti per le classi da **C_{EMS}** ad **A_{EMS}**.

Dall'esame delle spezzate emergono alcuni comportamenti caratteristici che è bene evidenziare:

- il valore di **EAL** è fortemente legato ai terremoti d'intensità medio-piccola (più frequenti), dunque agli stati limite di esercizio (zona campita in verde, compresa tra **SLO** e **SLD**);

- sulla base dei modelli assunti, i morti e feriti gravi (in percentuale degli occupanti) superano rispettivamente lo 0,1% e lo 0,4% (v. Figura 8) solo per valori di EAL superiori al 50%RC, dunque sono legati ai terremoti più intensi (molto poco frequenti), ossia agli stati limite ultimi (zona SLV - SLC campita in giallo) e tale legame è ancora significativo in Zona 3, ma sostanzialmente assente in Zona 4 (danno < 50%RC).

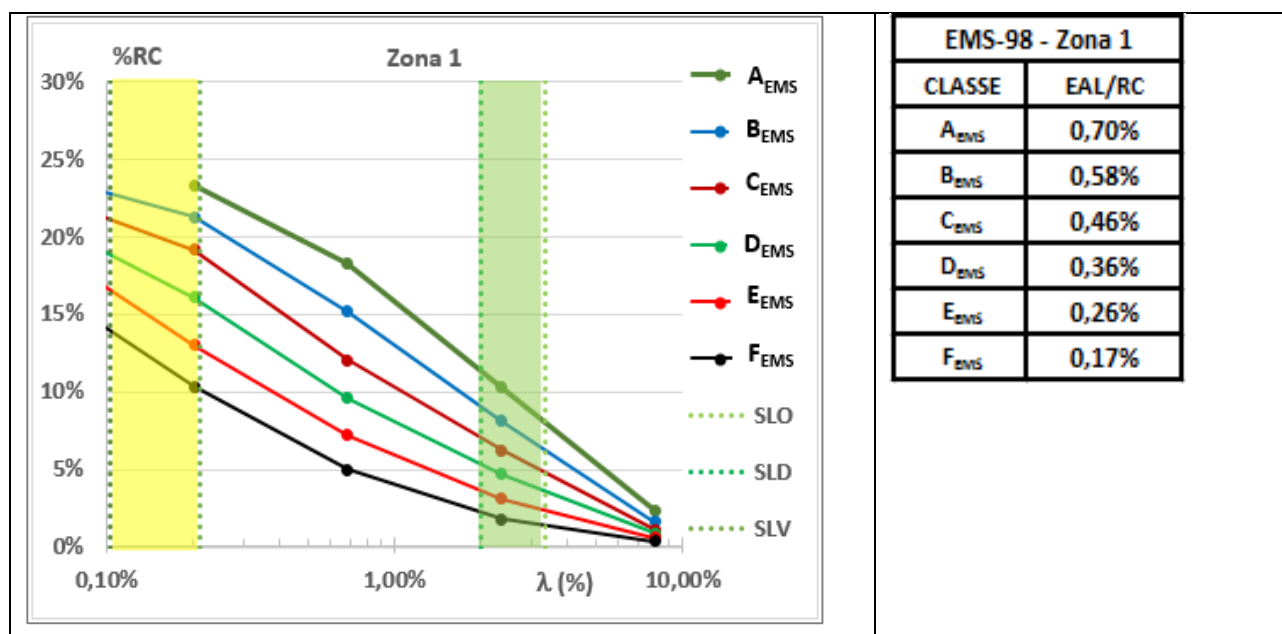
Si conferma che **la riduzione del rischio legato alla perdita economica diretta** si consegue più utilmente con interventi che riducano la vulnerabilità nei confronti degli Stati Limite di Esercizio (SLE), mentre **la riduzione del rischio legato alle perdite sociali rappresentate dal numero di morti e feriti** si consegue più utilmente adottando interventi che riducano la vulnerabilità nei confronti degli Stati Limite Ultimi (SLU).

Tipicamente in **zona 1** e in **zona 2** gli edifici di classe A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS} non soddisfano le condizioni sugli SLU, pertanto gli interventi finalizzati alla riduzione del numero di morti e feriti debbono concentrarsi su tali zone e tali classi. Gli edifici di classe E_{EMS}, D_{EMS} sono, invece, maggiormente protettivi in termini di SLU, ma comunque passibili di significative riduzioni di EAL, se si interviene sugli elementi non strutturali.

Nelle **zone 3 e 4** migliora il comportamento degli edifici di classe A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS} nei confronti degli SLU, dunque diminuisce l'utilità di interventi per ridurre il numero di morti e feriti, e si conferma, almeno in **zona 3**, l'opportunità di ridurre il rischio intervenendo sugli edifici di classe D_{EMS} (gli edifici di classe F_{EMS} e E_{EMS}, sono sostanzialmente assenti) per ridurne la vulnerabilità nei confronti degli SLE.

Infine, volendo specificamente caratterizzare la **zona 4**, si può segnalare, per tutte le classi (da D_{EMS} a A_{EMS}), la ulteriore riduzione della vulnerabilità nei confronti degli SLU nonché un comportamento soddisfacente nei confronti degli SLE.

Si riportano, inoltre, le curve di danno EAL relative alla sola **componente strutturale** (Figura 31, Zone 1 e 2 e Figura 33, Zone 3 e 4) e alla sola **componente non strutturale** (Figura 32, Zone 1 e 2 e Figura 34, Zone 3 e 4), rispettivamente, per le diverse classi EMS-98.



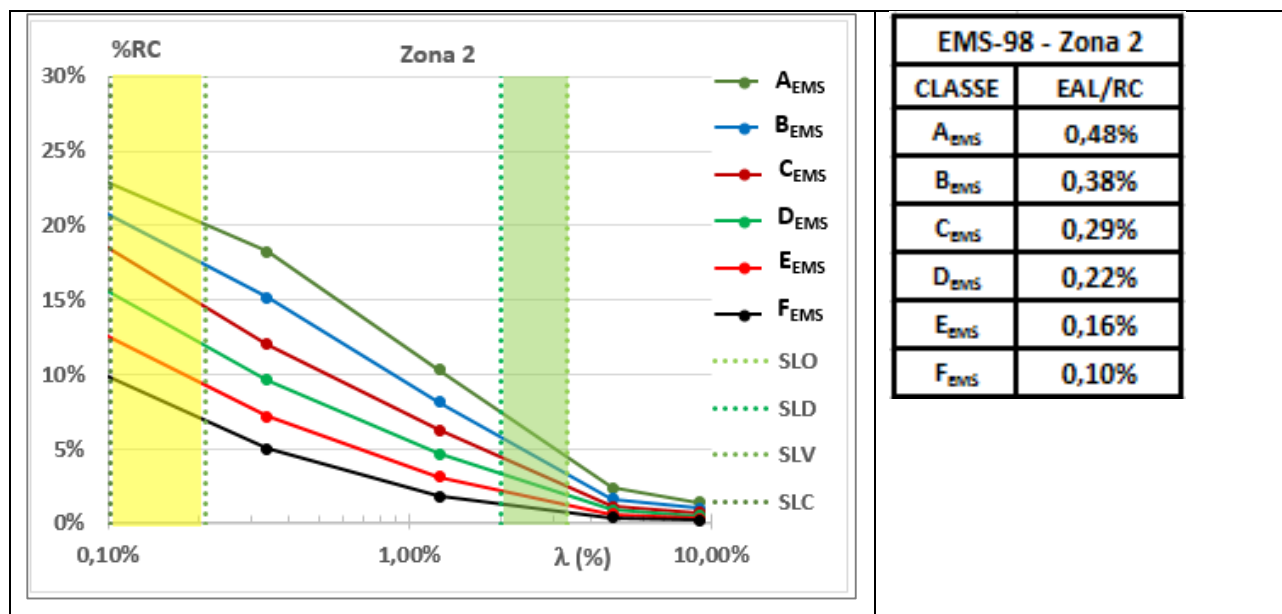
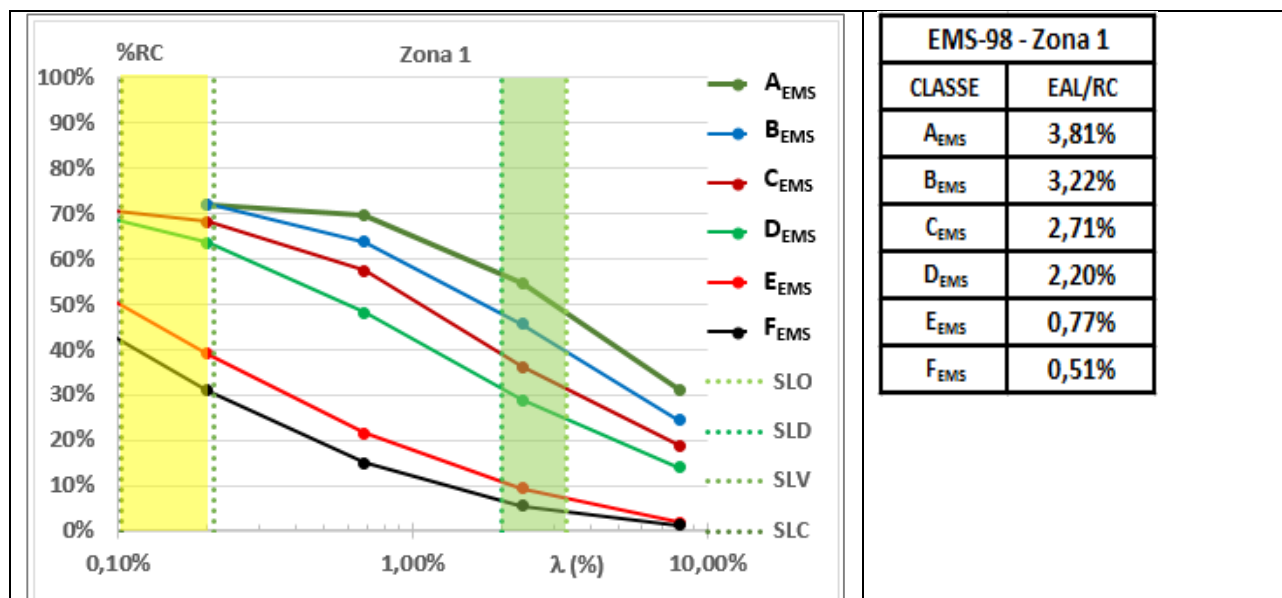


Figura 31.- Perdite relative alla componente strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 1 e 2.

Dal confronto tra le **Figura 31** e **Figura 32** emerge chiaramente come, al variare della classe di vulnerabilità, l'andamento dei danni (%RC) al variare della frequenza di occorrenza (λ) sia, nel caso dei danni alla **componente strutturale**, distribuito molto più regolarmente di quanto non avvenga per i danni alla **componente non strutturale**.

Questo particolare comportamento si giustifica pensando al fatto che, per le classi a vulnerabilità maggiore (A_{EMS} , B_{EMS} , C_{EMS}) le componenti non strutturali non ricevono alcuna attenzione ingegneristica (ingegnerizzazione), mentre per le classi a vulnerabilità minore (D_{EMS} , E_{EMS} , F_{EMS}) tale attenzione è presente e progressivamente crescente fino ad allinearsi all'attenzione prestata alla componente strutturale.



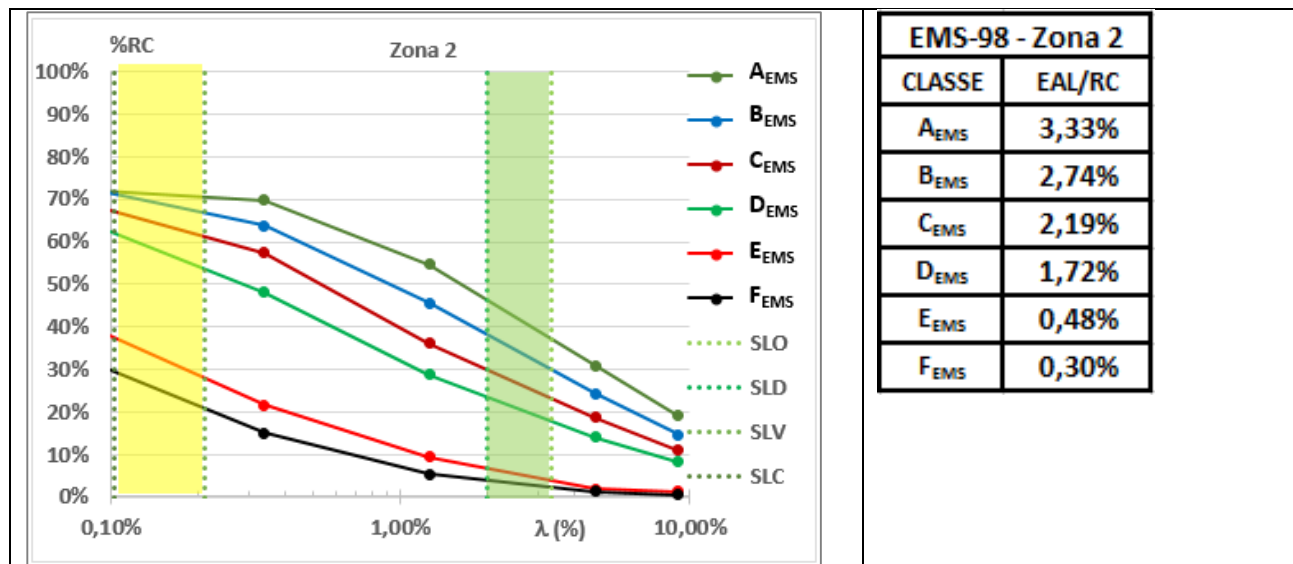


Figura 32.- Perdite relative alla componente non strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 1 e 2.

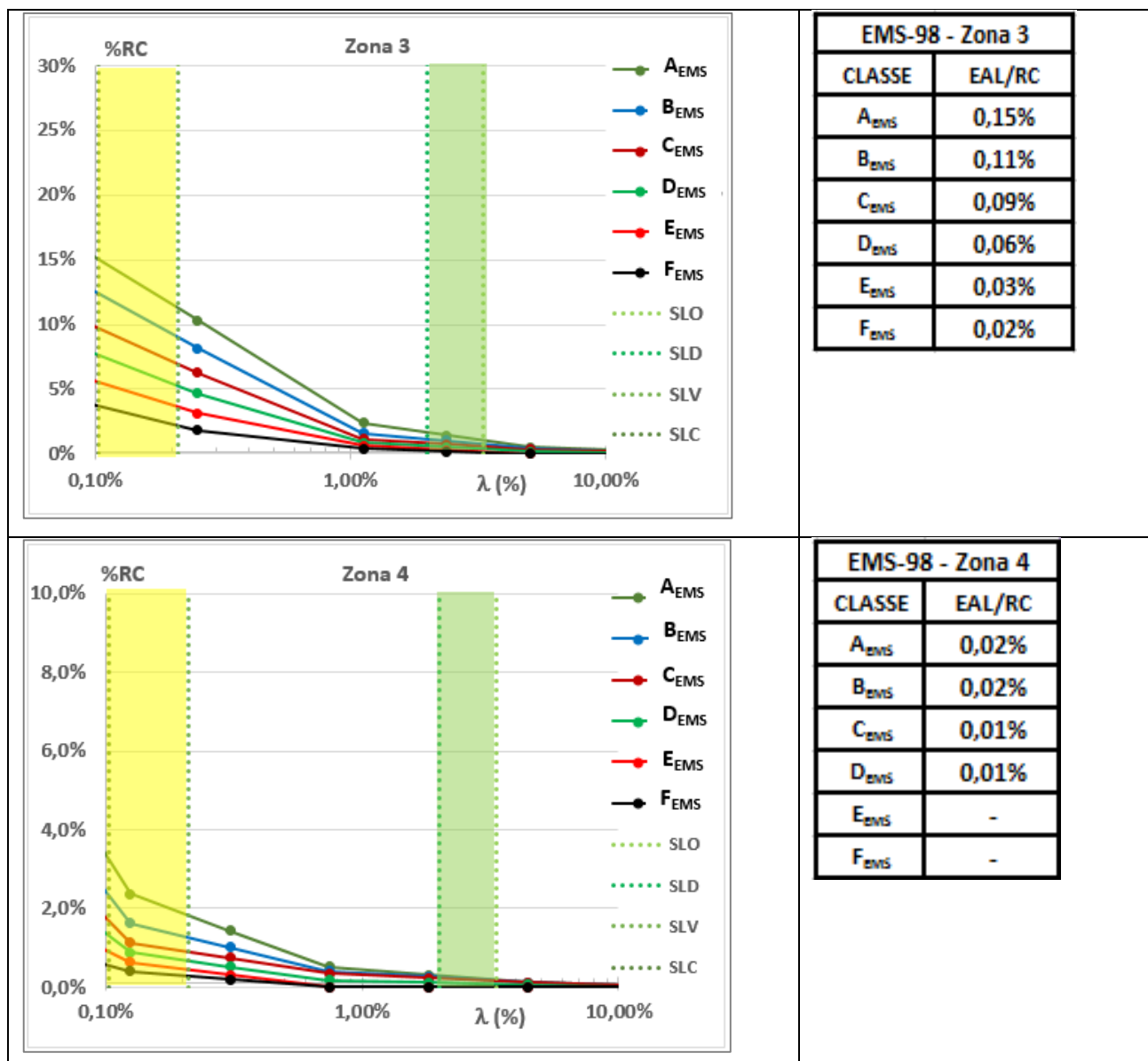


Figura 33.- Perdite relative alla componente strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 3 e 4.

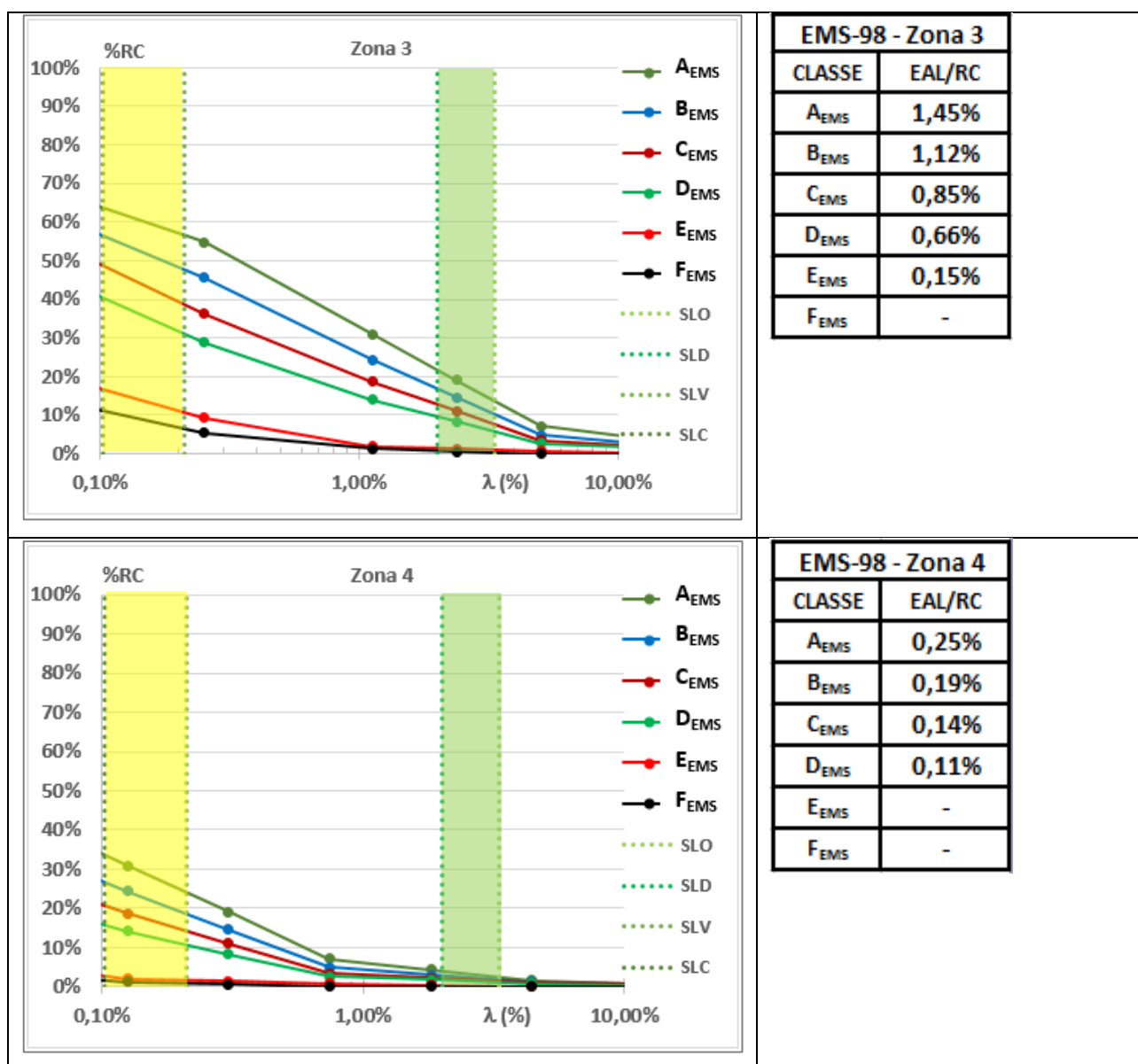


Figura 34.- Perdite relative alla componente non strutturale, per edifici in c.a. ricadenti nelle Zone 3 e 4.

5.2.3 EAL E STATI LIMITE

Come già visto, il valore di EAL, che è riferito alle perdite economiche dirette, è fortemente legato ai terremoti d'intensità medio-piccola dunque agli Stati Limite di Esercizio (SLE).

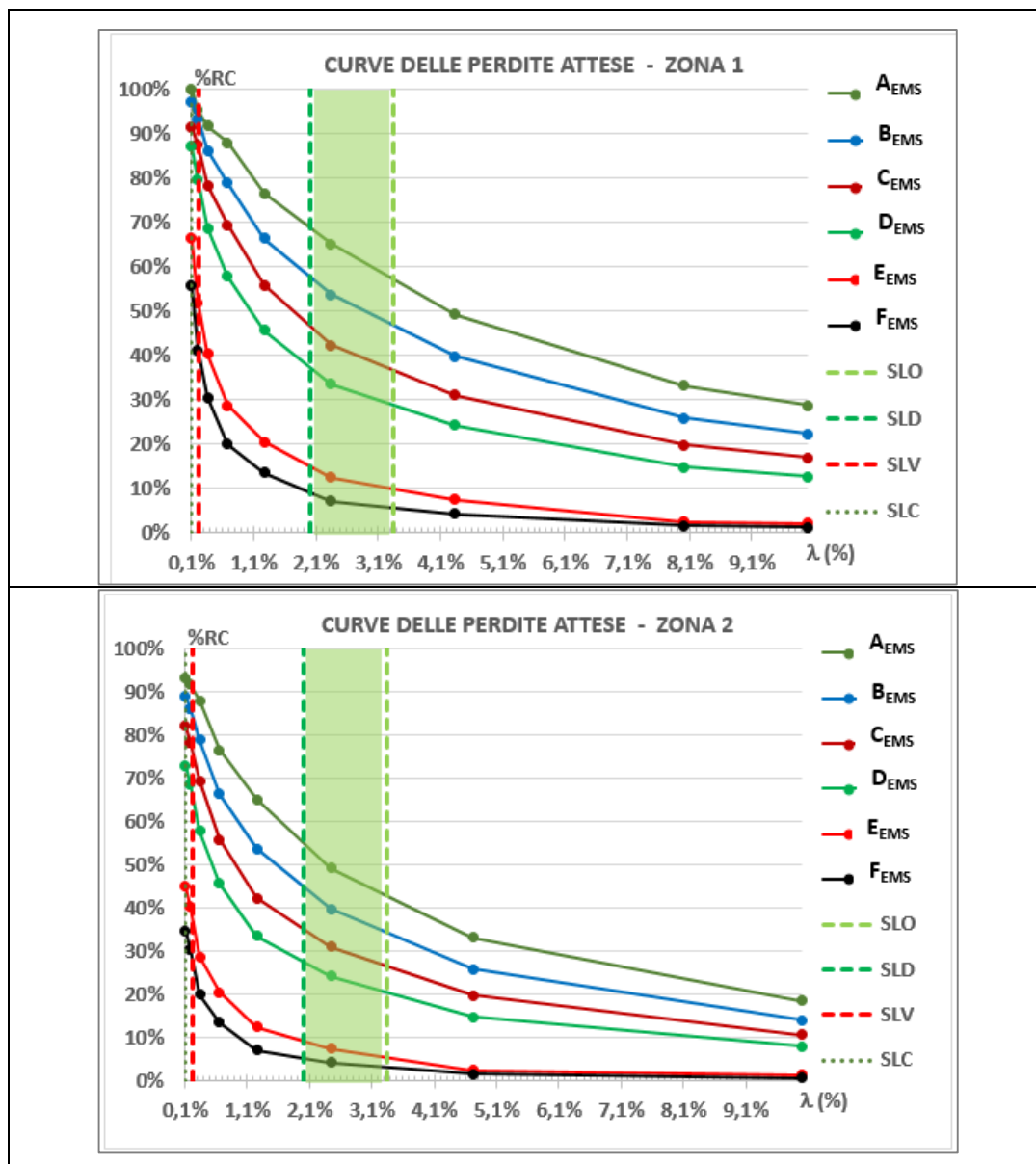
Volendo leggere meglio il rapporto tra EAL e Stati Limite ovvero la relazione tra perdite attese e prestazioni richieste dalle NTC, le curve di perdita tra SLID e SLC sono state rappresentate in scala lineare (anziché semi logaritmica) per le zone 1 - 2 - 3 (a sismicità più elevata).

In **Figura 35** sono riportate le curve ottenute per le classi di vulnerabilità EMS-98 e le 3 zone sismiche dette.

La rappresentazione in scala lineare evidenzia **due aspetti** molto interessanti:

- la maggior parte delle perdite attese – EAL (in % rispetto al totale) , per le Zone 1 e 2, si mobilita per le classi a medio – alta vulnerabilità (da C_{EMS} ad A_{EMS}) nell'intervallo di frequenze λ comprese tra lo SLID e lo SLD, confermando il fatto che la riduzione delle perdite economiche si consegue intervenendo agli SLE;

- le prestazioni richieste dalle NTC agli SLE risultano cautelative nei confronti delle perdite economiche attese.



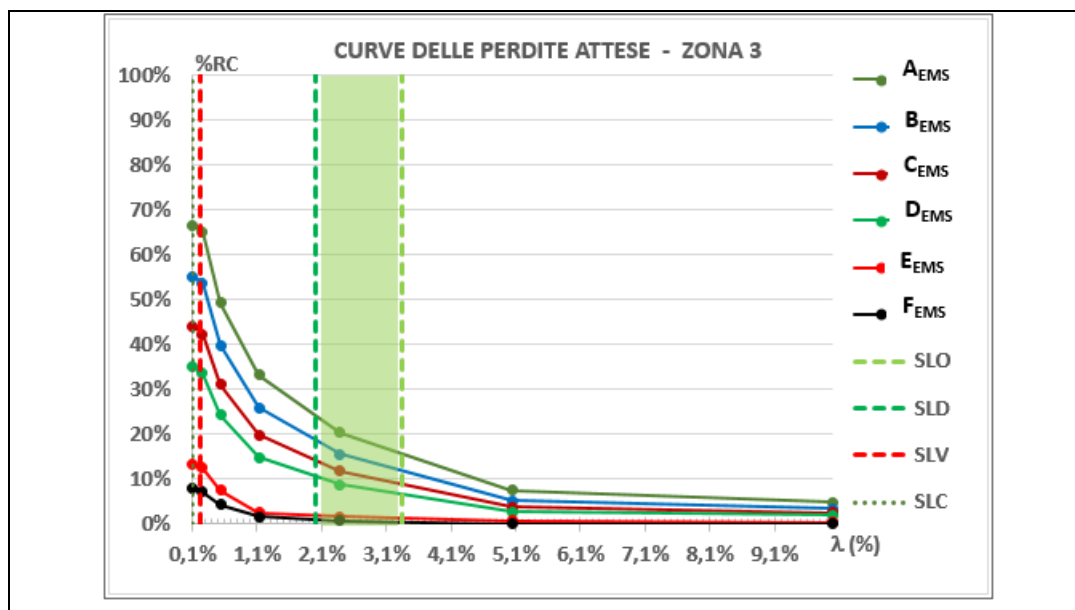


Figura 35.- Perdite attese (EAL) e Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 1 - 2 - 3.

Definendo, infine, i valori di **EAL/RC (%)** in corrispondenza degli **Stati Limite** per le 4 Zone si ottengono gli andamenti e i valori di Figura 36, per le Zone 1 e 2, Figura 37, per le Zone 3 e 4.

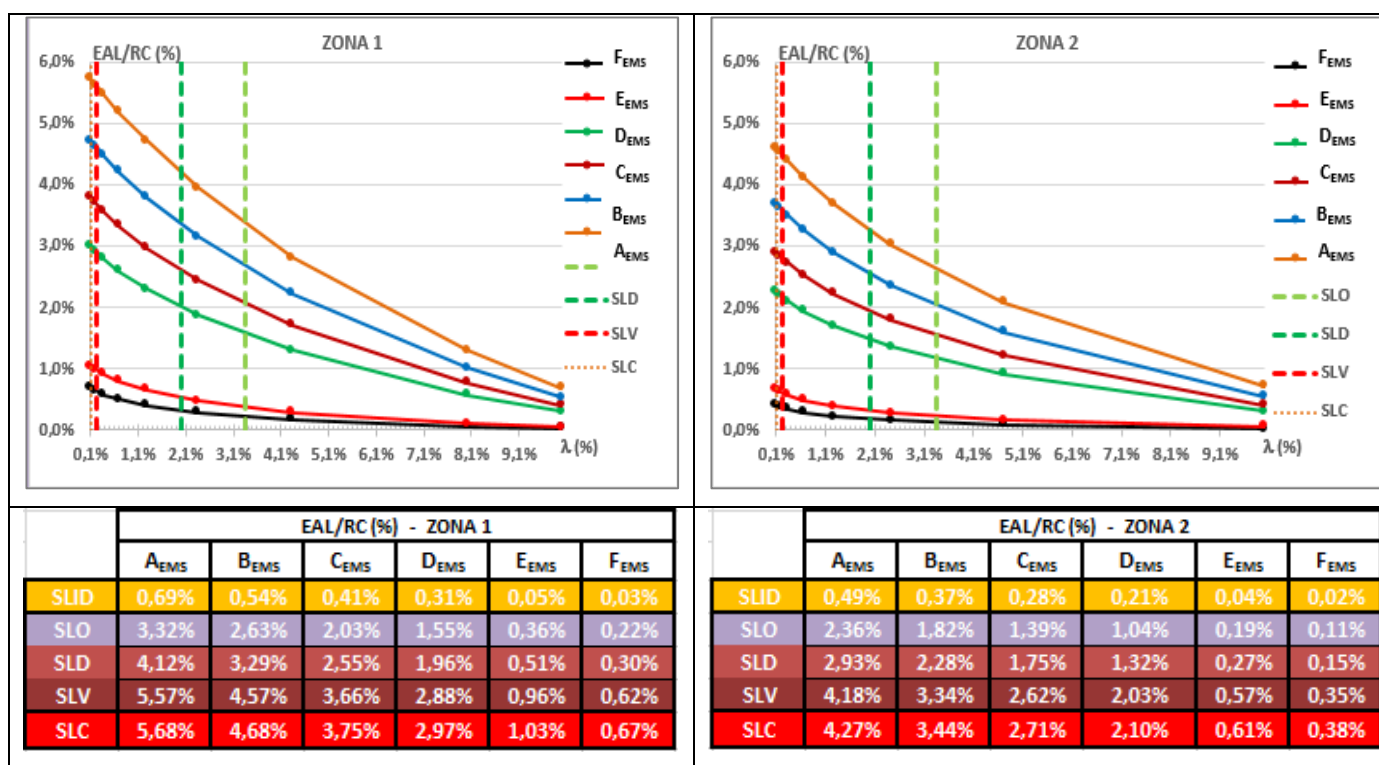


Figura 36.- EAL/RC (%) - Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 1 - 2

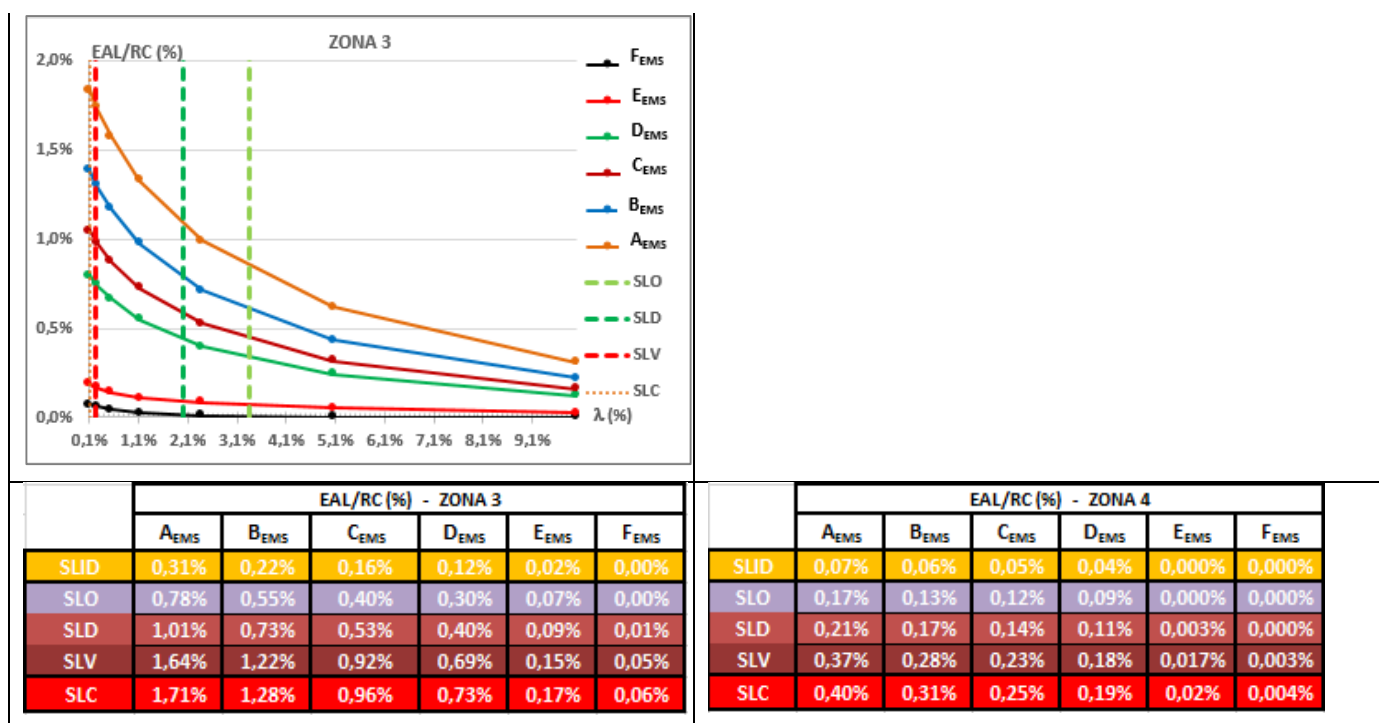


Figura 37.- EAL/RC (%) - Stati Limite, per edifici ricadenti nelle Zone 3 – 4

Dall'esame delle soglie di perdita EAL corrispondenti agli Stati Limite si osserva che:

- in **Zona 1**, le classi A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS} mobilitano **valori di EAL** intorno al **70%** del totale al raggiungimento dello SLD e la classe D_{EMS} il **65%** del totale;
- in **Zona 2**, le classi A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS} mobilitano **valori di EAL** compresi tra il **60% e il 70%** del totale al raggiungimento dello SLD e la classe D_{EMS} il **62%** del totale;
- in **Zona 3**, le classi A_{EMS}, B_{EMS}, C_{EMS} mobilitano **valori di EAL** inferiori al **60%** del totale.

5.3 APPLICAZIONI PER LA STIMA DI EAL SU BASE MACROSISMICA

Per l'attribuzione delle classi di vulnerabilità è stata elaborata un'**apposita procedura automatica** con cui, partendo dal database ISTAT, sono stati estratti i dati sugli edifici relativi a:

- destinazione d'uso,
- tipologia (muratura – c.a. – struttura mista),
- periodo di costruzione,
- numero di piani,
- superficie media.

La procedura ha permesso di correlare i dati per giungere all'individuazione delle classi di vulnerabilità ed è **stata utilizzata per un'analisi della vulnerabilità, su macroscala, di tutti gli edifici siti in Zona 1 e in Zona 2**, in cui non si tiene conto di eventuali interventi di riduzione della vulnerabilità. L'attribuzione della classe di vulnerabilità è stata fatta con riferimento alla tipologia costruttiva e all'età di costruzione; di seguito viene presentata qualche applicazione per la stima di EAL con l'approccio macrosismico proposto. Sono stati presi in considerazione **2 Comuni** situati rispettivamente in **Zona 1** e in **Zona 2**, la cui **caratterizzazione in termini di vulnerabilità edilizia** è stata fatta con riferimento al **database ISTAT** aggiornato all'ultimo censimento (censimento ISTAT 2011).

I **Comuni** campione sono:

- **Amatrice – Zona 1**
- **L'Aquila – Zona 2**

		DESTINAZIONE D'USO		TIPOLOGIA EDILIZIA		
		% sul n° TOT di edifici utilizzati		% sul n° TOT di edifici residenziali		
COMUNE	N° TOT di edifici utilizzati	Residenziali	Altro uso	MURATURA	C.A.	MISTA
Amatrice	4.426	92,7%	7,3%	85,6%	5,3%	9,1%

C.A.										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
Amatrice	219							73	62	84

MURATURA										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
Amatrice	3511	1111	758	636	611	395				

STRUTTURA MISTA										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
Amatrice	373					102	200	71		

Ante 1945					
COMUNE	N° TOT campione	TOT campione/TOT edif.	N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. /TOT edif. MURATURA
Amatrice	4032	98,3%	1869	46,4%	53,2%

Dopo il 1945 e prima del 1970				
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. MURAT. /TOT MURAT.	N° edif. MISTA/TOT edif. MISTA	
1247	30,9%	35,5%	0%	

Dopo il 1970 e prima del 1990				
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. MURAT. /TOT MURAT.	N° edif. MISTA/TOT MISTA	N° edif. C.A./TOT C.A.
697	17,3%	11,3%	100,0%	0,0%

Dopo il 1990 e prima del 2005		
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. C.A./TOT C.A.
135	2,1%	61,6%

Dopo il 2005		
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. C.A./TOT C.A.
84	2,1%	38,4%

Figura 38.- Caratterizzazione degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1.

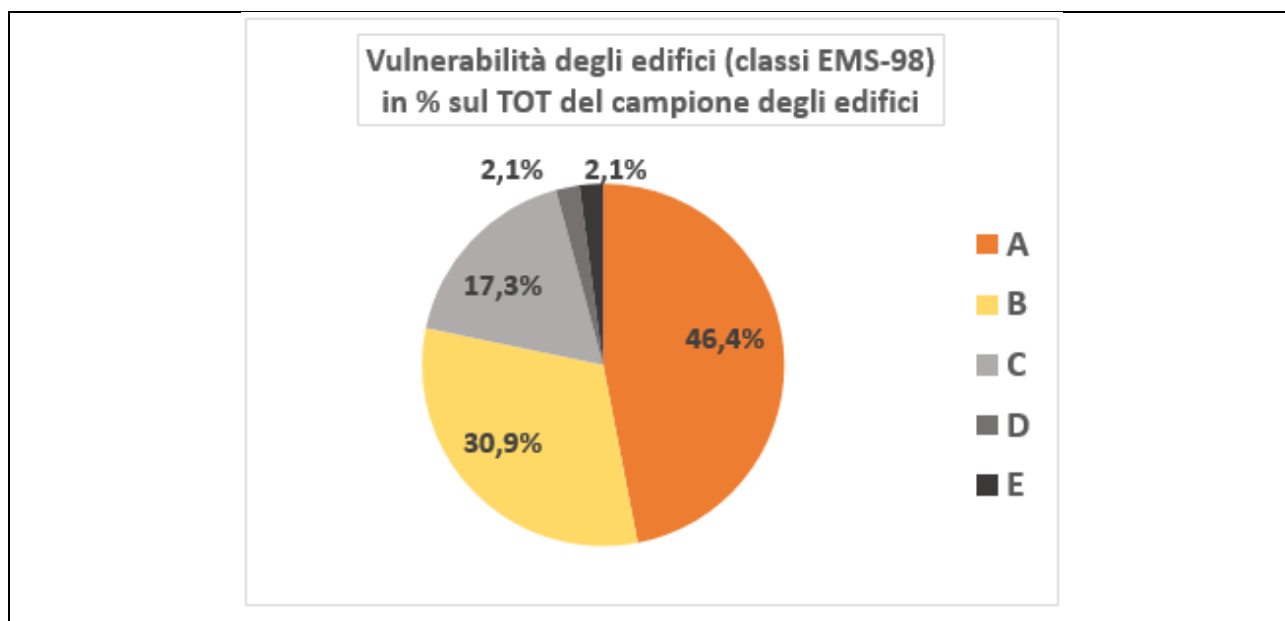


Figura 39.- Vulnerabilità degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1.

In Figura 38 e in Figura 39 sono riportati, rispettivamente, la **caratterizzazione del campione di edifici** e la stima della **vulnerabilità** per il Comune di Amatrice.

La stima delle perdite attese, in termini di “**curva dei danni aggregati**” per le classi di vulnerabilità del campione, è riportata in **Figura 40**.

Il grafico mostra chiaramente che, secondo il modello macrosismico proposto, all’evento sismico del 24 agosto (corrispondente ad un terremoto con periodo di ritorno $T_R = 2500$ anni circa) corrisponde una **perdita attesa (danni aggregati)** intorno al 90%, confermando in tal modo i danni reali registrati.

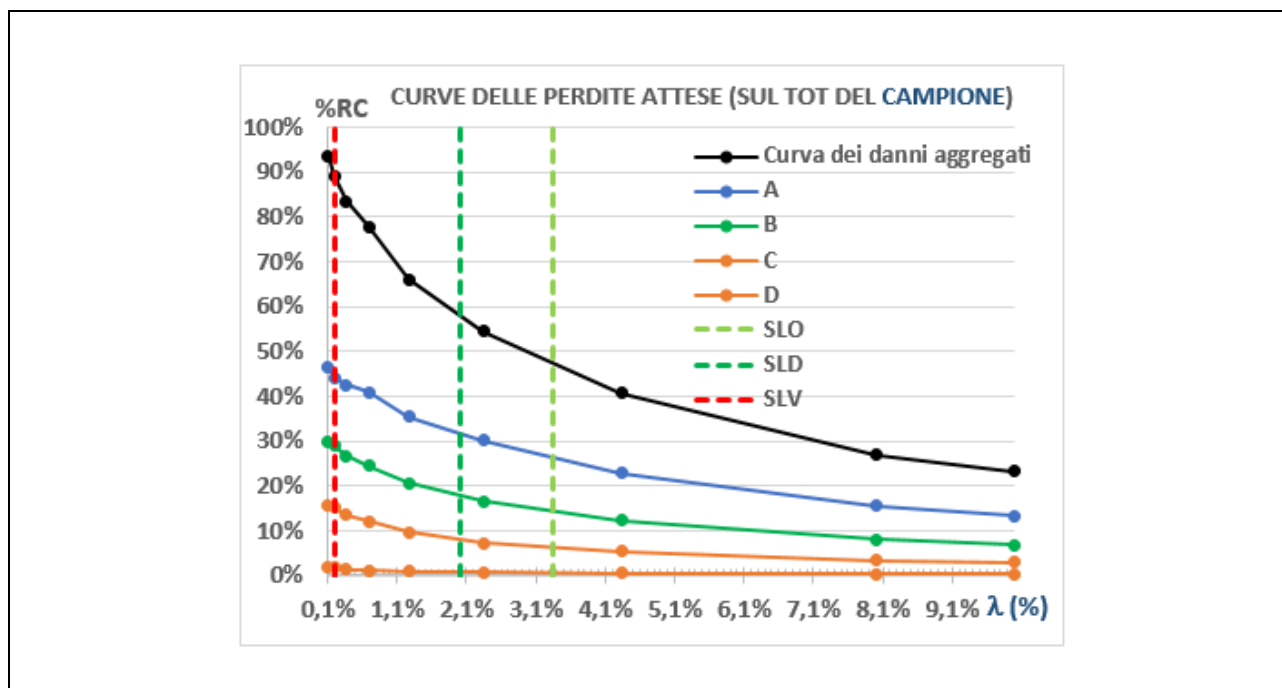


Figura 40.- Curve dei danni aggregati degli edifici nel Comune di Amatrice - Zona 1

In **Figura 42** e in **Figura 42** sono riportati, rispettivamente, la **caratterizzazione del campione di edifici** e la stima della **vulnerabilità** per il **Comune di L'Aquila**.

		DESTINAZIONE D'USO		TIPOLOGIA EDILIZIA		
		% sul n° TOT di edifici utilizzati		% sul n° TOT di edifici residenziali		
COMUNE	N° TOT di edifici utilizzati	Residenziali	Altro uso	MURATURA	C.A.	MISTA
L'Aquila	14.531	90,1%	9,9%	63,5%	28,4%	8,1%

MURATURA										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
L'Aquila	8315	3156	1220	1223	1373	1343	0	0	0	0

STRUTTURA MISTA										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
L'Aquila	1059	0	0	0	0	761	298	0	0	0

C.A.										
COMUNE	N. TOT edifici	<1919	<1945	<1960	<1970	<1980	<1990	<2000	<2005	>2005
L'Aquila	3719			0	0	0	1438	807	620	854

			Ante 1945		
COMUNE	N° TOT campione	TOT campione/TOT edif.	N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. /TOT edif. MURATURA
L'Aquila	13093	100,0%	4376	33,4%	52,6%

Dopo il 1945 e prima del 1970			
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. MURAT. /TOT MURAT.	N° edif. MISTA/TOT edif. MISTA
2596	19,8%	31,2%	0%

Dopo il 1970 e prima del 1990				
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. MURAT. /TOT MURAT.	N° edif. MISTA/TOT MISTA	N° edif. C.A./TOT C.A.
3840	29,3%	16,2%	100,0%	38,7%

Dopo il 1990 e prima del 2005		
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. C.A./TOT C.A.
1427	7,3%	38,4%

Dopo il 2005		
N° edifici	N° edif. /TOT campione	N° edif. C.A./TOT C.A.
854	7,3%	23,0%

Figura 41.- Caratterizzazione degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2.

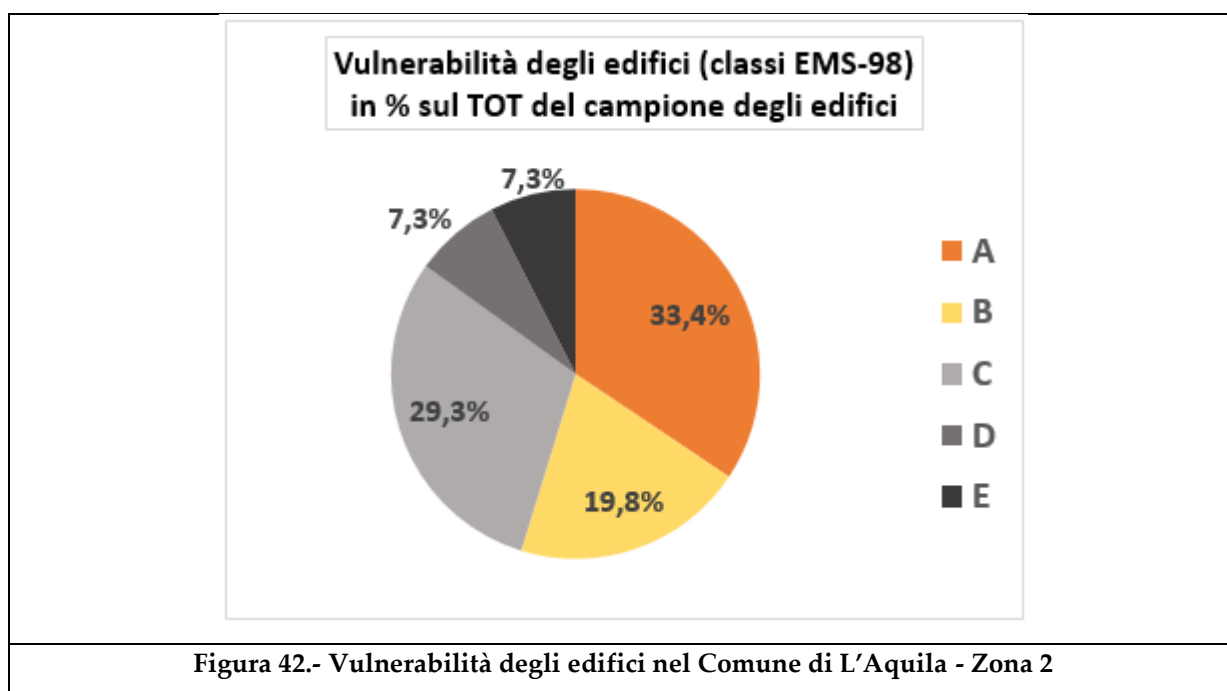


Figura 42.- Vulnerabilità degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2

La stima delle perdite attese, in termini di “**curva dei danni aggregati**” per le classi di vulnerabilità del campione, è riportata in **Figura 43**.

Il grafico mostra che, secondo il modello macrosismico proposto, all’evento sismico del 6 aprile 2009 (corrispondente ad un terremoto con periodo di ritorno $T_R = 300$ anni) corrisponde una **perdita attesa (danni aggregati)** intorno al 80%, confermando in tal modo i danni reali registrati.

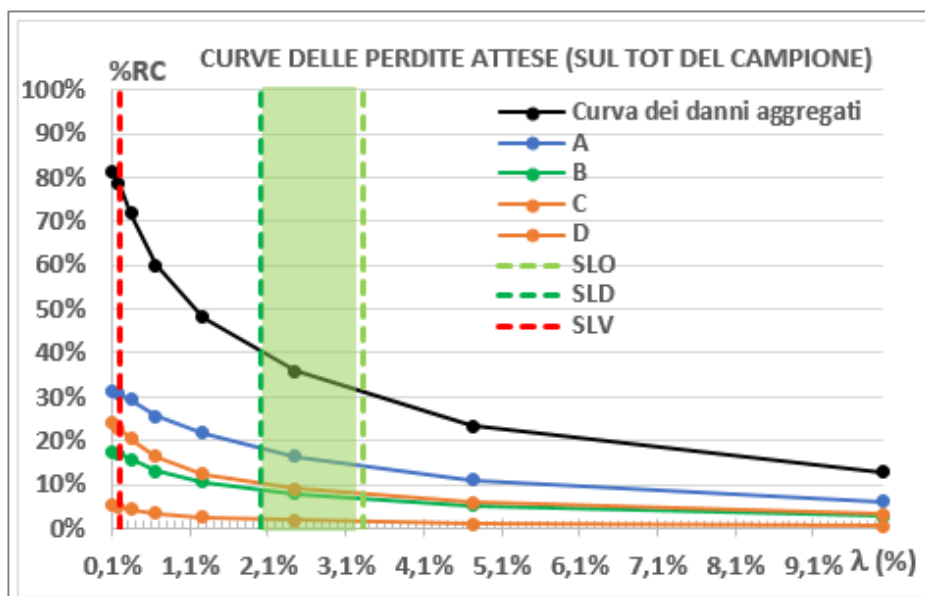


Figura 43.- Curve dei danni aggregati degli edifici nel Comune di L'Aquila - Zona 2.

6. VALIDAZIONE, SU BASE STATISTICA, DEL MODELLO MACROSISMICO

La **validazione** è sembrata un passaggio obbligato **per decidere dell'efficacia del modello** e per poterlo quindi considerare (se assolta positivamente) **uno strumento operativo efficace, seppure di tipo speditivo, per Valutazioni di Rischio sismico**.

Per validare il modello, le **Curve di Vulnerabilità** ottenute con l'approccio macrosismico proposto e presentate nel § 5.1 sono state confrontate con i dati relativi al **sisma di L'Aquila del 6 aprile 2009**, opportunamente formalizzati in termini statistici; **l'ottimo accordo rilevato** ha permesso di ritenere i primi risultati incoraggianti, e il modello utilmente validabile.

Ulteriori procedure di validazione, quindi di calibrazione del modello e sempre su base statistica, sono in corso.

6.1 La base statistica

La base dati utilizzata nella procedura di validazione è stata ricavata dal *"LIBRO BIANCO SULLA RICOSTRUZIONE PRIVATA FUORI DAI CENTRI STORICI NEI COMUNI COLPITI DAL SISMA DELL'ABRUZZO DEL 6 APRILE 2009"* a cura del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (DPC), in collaborazione con ReLUIS.

I dati forniti nel Libro Bianco si riferiscono a edifici privati al di fuori dei centri storici e sono sintetizzabili come segue:

- differenziazione degli edifici danneggiati in base all'**esito di agibilità (esiti B – C – E)**;
- caratterizzazione degli edifici in termini di **tipologia (muratura – c.a.)**, **periodo di costruzione**, **numero di piani fuori terra**;
- statistica degli **interventi eseguiti**;
- **analisi dei costi per gli edifici del Comune di L'Aquila**;
- **analisi dei costi per gli edifici degli altri Comuni**.

Il lavoro di costruzione della base dati di interesse per la procedura di validazione ha richiesto un lungo lavoro di estrapolazione delle informazioni e successiva correlazione, con la necessità di procedere per passi alla verifica delle operazioni.

6.1.1 Il campione e i costi

I dati si riferiscono a **edifici, ad uso residenziale, dislocati nei 64 Comuni colpiti nelle Province di L'Aquila, Chieti, Teramo e Pescara**.

Il campione di edifici di interesse ai fini della procedura di validazione è costituito da **unità immobiliari indipendenti (U.I.I.)**, con struttura in muratura o in c.a. danneggiate, con esito di agibilità (secondo le schede AeDES) **B o C ed E trattato come B o C** (la così detta *ricostruzione leggera*).

Per una maggiore chiarezza delle informazioni, si riporta di seguito la descrizione degli esiti sopra detti:

B – Edificio TEMPORANEAMENTE INAGIBILE (tutto o in parte) ma AGIBILE solo a seguito di lavori di pronto intervento;

C – Edificio PARZIALMENTE INAGIBILE;

E – Edificio INAGIBILE (con un elevato danno strutturale, alto rischio esterno o geotecnico).

Ai fini della richiesta di contributo, nel caso di edifici con esito di agibilità **E**, l'**O.P.C.M. n. 3790** ha previsto la possibilità di procedere al progetto di lavorazioni di **riparazione e rafforzamento locale**,

in accordo con l'O.P.C.M. n. 3779 e relativi Indirizzi *“qualora le parti strutturali non siano danneggiate o siano solo leggermente danneggiate”* e quindi trattare gli edifici che ricadano in tale condizione come gli edifici con esito di agibilità B o C (**esito E trattato come B o C, ai sensi dell'O.P.C.M. n. 3779**).

Nella trattazione, ci si riferisce alla *‘ricostruzione leggera’* che comprende edifici con esito di agibilità B o C ed E **trattato ai sensi dell'O.P.C.M. n. 3779**, per i quali gli **interventi** previsti sono di RIPARAZIONE e di RAFFORZAMENTO LOCALE.

Nello specifico, poiché l'obiettivo è validare un modello di valutazione del rischio sismico, i dati di interesse sono quelli legati agli interventi di RIPARAZIONE, che, in quanto tali, sono **mirati esclusivamente a rimuovere il danno prodotto dall'evento sismico** e quindi a ripristinare lo “status quo ante” dell'edificio, senza produrre un incremento della sua capacità all'azione sismica.

Per la quantificazione dei danni in termini monetari sono stati presi in considerazione i **COSTI DI RIPARAZIONE**, quelli legati, quindi, alla sola riparazione del danno. Tale voce di costo, nel *Libro Bianco*, non è stata presentata sempre scorporata dagli altri costi; questo ha rese necessarie elaborazioni aggiuntive e verifiche a posteriori.

In **Figura 44** viene presentata una tabella generale di sintesi dei dati.

		n. edifici	c.a.	muratura		costo di riparazione (€/mq)
Esito B o C	U.I.I.	450	190	149	332	163,19
	P.C.				118	95,57
	U.I.C.					119,68
Esito E trattato come B o C	U.I.I.	42	158	50	27	201,89
	P.C.				15	215,77
	U.I.C.					131,96

Figura 44.- Campione edifici esito B o C ed E come B o C dei Comuni nelle Province AQ-TE-CH-PE.

Nella tabella vengono riportati, per le unità immobiliari indipendenti (U.I.I.) e i condomini (U.I.C. e P.C.): il numero di edifici per esito di agibilità, la ripartizione tra edifici in c.a. e in muratura e il costo medio di riparazione (in €/mq).

Il campione è stato caratterizzato in termini di vulnerabilità, attribuendo agli edifici **la classe di vulnerabilità sulla base della tipologia costruttiva e dell'epoca di costruzione**, pervenendo all'individuazione delle 3 classi **B_{EMS} – C_{EMS} – D_{EMS}**. La classe **D_{EMS}** è stata attribuita ai soli edifici in c.a. di epoca più recente.

La bontà della caratterizzazione è stata verificata a posteriori sulla base di relative pubblicazioni da parte di coautori del *Libro Bianco*.

In **Figura 45** viene presentata una tabella generale, di sintesi, con l'attribuzione delle classi di vulnerabilità. In tabella vengono riportati, per tipologia costruttiva (c.a., muratura), il numero di edifici, l'epoca di costruzione, il costo medio di riparazione, la classe di vulnerabilità attribuita e un coefficiente di costo adimensionale che tiene conto del maggiore o minore costo della classe rispetto al costo medio di riparazione sul campione totale.

		Epoca di costruzione	n. edifici	Coeff. Costi	costo medio di riparaz. (€/mq)	C.V.
Esito B o C	c.a.	≤ 1971	34	1,1	196,64	B
		1972 - 1991	153	0,9	163,94	C
		> 1992	88	0,8	132,65	D
	muratura	≤ 1971	154	1,0	181,88	B
		≥ 1972	43	0,8	143,77	C
Esito E trattato come B o C	c.a.	≤ 1971	4	1,1	288,82	B
		1972 - 1991	21	1,1	287,95	C
		> 1992	16	1,0	254,23	D
	muratura	≤ 1971	10	1,1	269,80	B
		≥ 1972	5	1,1	267,47	C

Figura 45.- Vulnerabilità edifici esito B o C ed E come B o C dei Comuni nelle Province AQ-TE-CH-PE.

La procedura è stata applicata seguendo **2 percorsi differenti**, al fine di avere una verifica dei risultati ottenuti. Nel **percorso 1** i costi di riparazione sono stati ottenuti a partire dai costi totali (riparazione + rafforzamento) relativi alle U.I.I. dei Comuni nelle Province; nel **percorso 2** i costi di riparazione sono stati ottenuti abbattendo i corrispondenti costi relativi al Comune di L'Aquila del 27%, in accordo con la stima su base statistica del *Libro Bianco* stesso.

6.1.2 Costruzione delle Curve di Vulnerabilità - Percorso 1

Le curve di vulnerabilità, per le classi **EMS-98** individuate, vengono costruite con riferimento ai costi di riparazione ricavati a partire dai costi totali (riparazione + rafforzamento) relativi alle Unità Immobiliari Indipendenti (U.I.I.) dei 64 Comuni nelle province AQ – CH – TE – PE.

Il costo di riparazione è stato ricavato applicando un **coefficiente correttivo al costo totale** (riparazione + rafforzamento), ottenuto come rapporto *costo medio di riparazione/costo TOT*.

A ciascuna delle classi omogenee di costo di **Figura 46** è stato attribuito un costo medio di riparazione, ottenuto come sopra.

E' stata valutata, inoltre, la **dispersione dei costi**, in termini di **intervallo di confidenza**, a partire dalla deviazione standard relativa al costo TOT (da *Libro Bianco*), corretta per il costo di riparazione.

n. edifici	Costo di riparazione
68	0-100
140	101-200
123	201-300
64	301-400
35	401-500
10	501-600
5	601-700
2	701-800
1	801-900
2	901-1000

Figura 46.- Classi omogenee di costo di UII con esito B o C, dei Comuni nelle province.

I costi medi di riparazione per classi omogenee di costo sono stati articolati per livelli di intensità macrosismica e poi differenziati per le classi di vulnerabilità individuate attraverso i coefficienti correttivi di costo di cui sopra, legati al periodo di costruzione e alla tipologia costruttiva.

Dai **costi medi di riparazione e i relativi intervalli di confidenza** (espressi in €/mq), **differenziati**

per classi di vulnerabilità e articolati sulle intensità macrosismiche, sono stati ricavati i costi unitari (in €) moltiplicando per la superficie media (dato fornito).

L'intervallo delle intensità macrosismiche considerate (dovuto all'attenuazione dell'intensità con la distanza dalla zona epicentrale) è quello riportato nel *Rapporto sugli effetti del sisma* a cura del DPC e dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Ricavati i costi associati ai danni, espressi in percentuale del costo di ricostruzione (%RC), articolati per livelli di intensità macrosismica, sono state costruite le relative spezzate (%RC – I_{EMS-98}) ovvero le **Curve di Vulnerabilità** degli edifici.

In **Figura 47** e in **Figura 48** sono riportate le spezzate ottenute con il **Percorso 1**, e i relativi intervalli di confidenza, per le **classi EMS-98 B - C e D**, rispettivamente, confrontate con le corrispondenti Curve di Vulnerabilità ottenute con l'Approccio Macrosismico proposto.

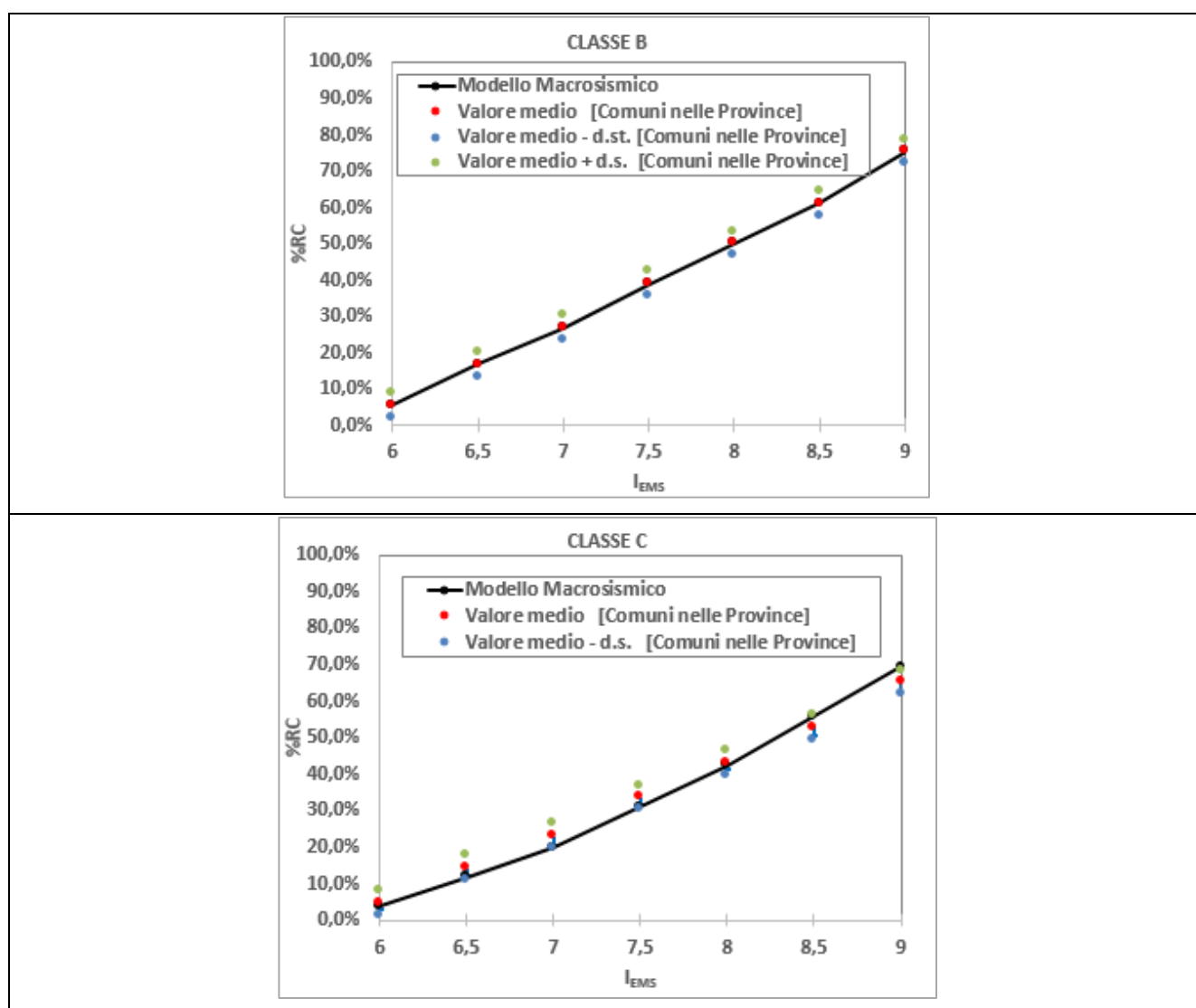


Figura 47.- Percorso 1- Vulnerabilità EMS-98 B e C vs. UII con esito B o C dei Comuni nelle province.

I grafici mostrano il **buon accordo in termini di andamento e di valori puntuali dei danni** (espressi in %RC) per livelli di intensità macrosismica, tra le spezzate ottenute con il metodo macrosismico e quelle ottenute con i dati relativi agli edifici danneggiati (esito B o C ed E trattato come B o C) dei

Comuni nelle province interessate.

Ciò conferma la possibile efficacia del metodo proposto come strumento per eseguire valutazioni di rischio sismico.

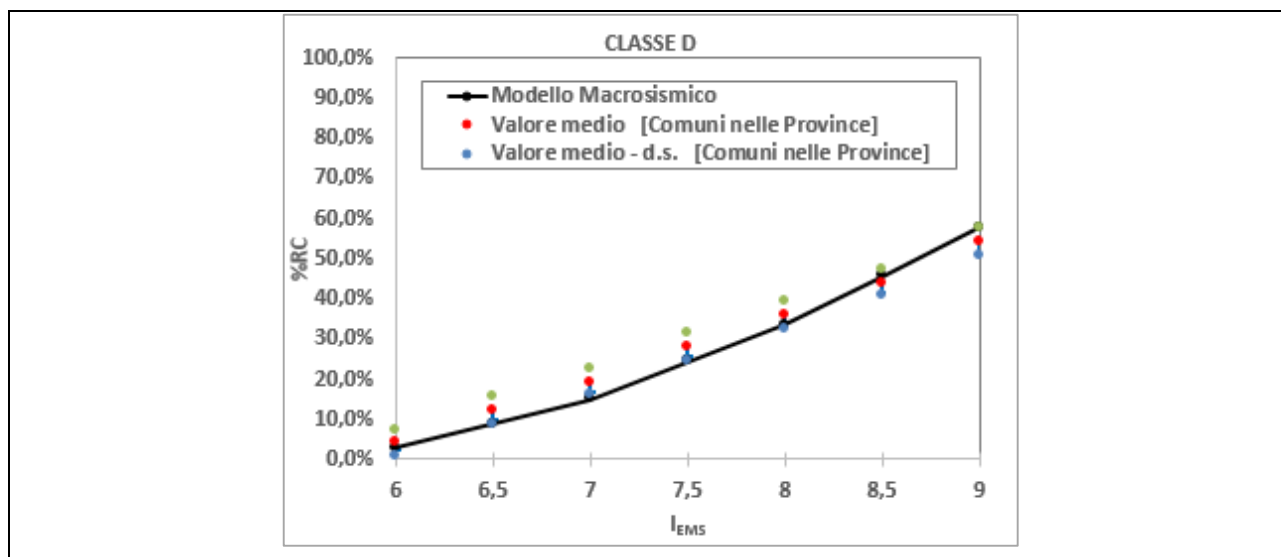


Figura 48.- Percorso 1- Vulnerabilità EMS-98 D vs. UII con esito B o C dei Comuni nelle province.

6.1.3 Costruzione delle Curve di Vulnerabilità - Percorso 2

Il percorso di costruzione 2 nasce dalla stima (eseguita nel Libro Bianco) del minore costo, mediamente del 27%, degli interventi di riparazione sugli edifici dei Comuni nelle province rispetto a quelli sugli edifici del Comune di L'Aquila. Si è pensato, allora, di utilizzare tale dato per ricavare i **costi di riparazione degli edifici dei Comuni nelle province** a partire dall'**abbattimento del 27% dei relativi costi per gli edifici del Comune di L'Aquila**, in modo tale da avere un riscontro sui risultati ottenuti con il Percorso 1.

Il **campione di edifici** è sempre costituito da unità immobiliari indipendenti (U.I.I.) con esito di agibilità B o C.

A partire dai costi medi di riparazione per classi omogenee di costo, ponderati sulle tipologie costruttive, per gli edifici del Comune di L'Aquila, sono stati ricavati i corrispondenti costi di riparazione per classi omogenee di costo per gli edifici dei Comuni nelle province, operando un abbattimento del 27%.

Ottenuta l'articolazione dei costi per livelli di intensità macrosismica, questi sono stati differenziati per le classi di vulnerabilità individuate attraverso i coefficienti correttivi di costo legati al periodo di costruzione e alla tipologia costruttiva.

E' stata valutata, inoltre, la **dispersione dei costi**, in termini di **intervallo di confidenza**, a partire dalla deviazione standard relativa al costo medio di riparazione (da *Libro Bianco*).

Dai costi medi di riparazione e i relativi intervalli di confidenza (espressi in €/mq), differenziati per classi di vulnerabilità e articolati sulle intensità macrosismiche, sono stati ricavati i costi unitari (in €) moltiplicando per la superficie media (dato fornito).

Ricavati i **costi associati ai danni, espressi in percentuale del costo di ricostruzione (%RC)**, **articolati per livelli di intensità macrosismica**, sono state costruite le relative spezzate (%RC – I_{EMS-98})

ovvero le **Curve di Vulnerabilità** degli edifici.

In **Figura 49** e in **Figura 50** sono riportate le spezzate ottenute con il **Percorso 2**, e i relativi intervalli di confidenza, per le **classi EMS-98 B - C e D** rispettivamente, confrontate con le corrispondenti Curve di Vulnerabilità ottenute con il Modello Macrosismico proposto.

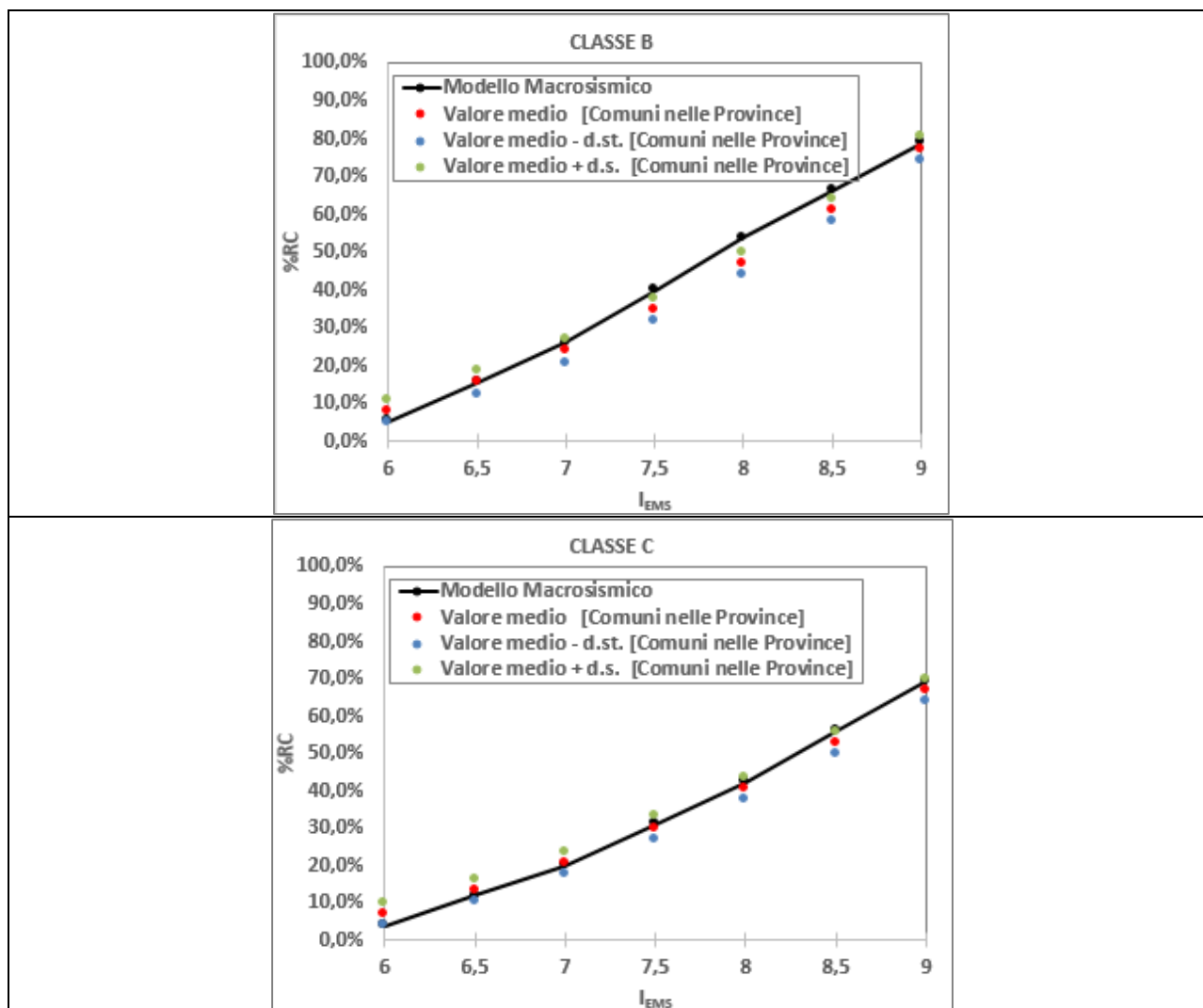


Figura 49.- Percorso 2- Vulnerabilità EMS-98 B e C vs. U.I.I. con esito B o C dei Comuni nelle province.

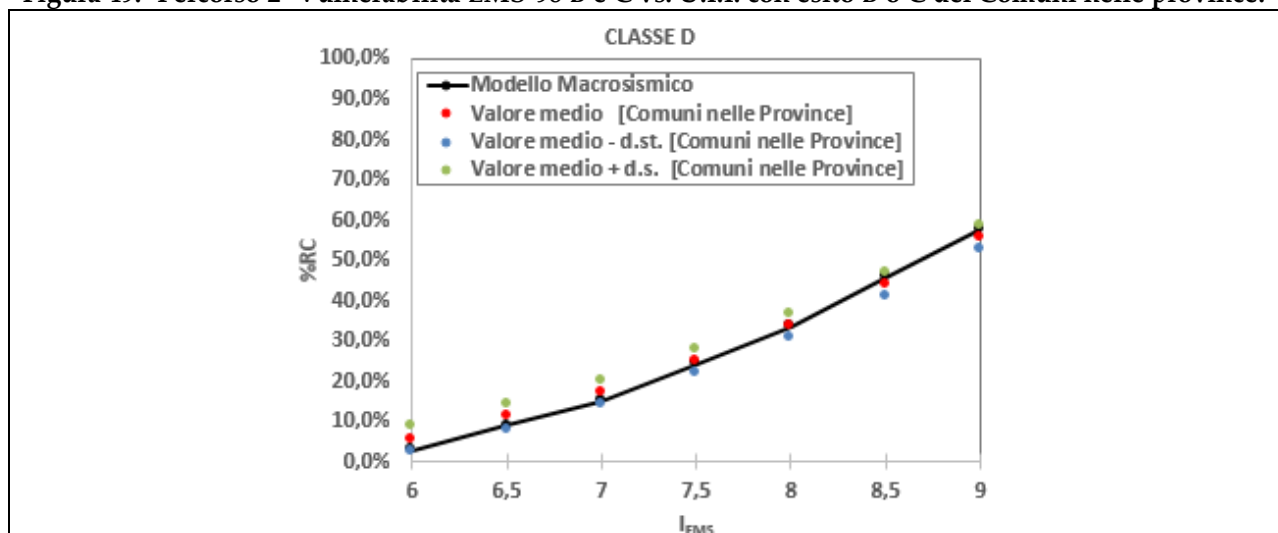


Figura 50.- Percorso 2 - Vulnerabilità EMS98 D vs U.I.I. con esito B o C dei Comuni nelle province.

I danni, in %RC, ottenuti attraverso i due percorsi di costruzione sono in ottimo accordo, confermando quindi la bontà dei dati assunti come base, elaborati a partire dalla statistica fornita nel *Libro Bianco*.

Anche in questo caso, quindi, i grafici mostrano il **buon accordo in termini di andamento e di valori puntuali dei danni** (espressi in %RC) al variare dell'intensità macrosismica, tra le spezzate ottenute con il modello macrosismico e quelle ottenute con i dati relativi agli edifici danneggiati.

6.2 I costi associati al danno non strutturale

Partendo dalla constatazione che il **danno non strutturale** costituisce un contributo consistente al danno totale subito dagli edifici in seguito ad un evento sismico e che esso **si innesca per livelli medio-bassi di intensità macrosismica ovvero per terremoti di medio-alta frequenza**, si è cercato di indagare l'andamento dei costi legati al danno non strutturale a partire da dati reali utilizzando, ancora una volta, la base dati relativa al sisma di L'Aquila di aprile del 2009.

Le curve dei danni ottenute sono state confrontate con le analoghe costruite con il modello macrosismico, così da verificare l'efficacia del modello nel cogliere, nel particolare, la distribuzione dei costi non strutturali.

6.2.1 Il campione e i costi

La base dati è stata estratta dalla statistica fornita dal *Libro Bianco*. Il campione di edifici considerato è costituito da **condomini ubicati nel Comune di L'Aquila con esito di agibilità** (secondo le schede AeDES) **B o C** ed **E** trattato **come B o C**.

Sono stati differenziati i **COSTI STRUTTURALI**, relativi alle parti comuni (P.C.), dai **COSTI NON STRUTTURALI**, relativi alle unità immobiliari condominiali (U.I.C.).

Nelle elaborazioni successive ci si riferirà ai **COSTI DI RIPARAZIONE** relativi alle **U.I.C.**

In **Figura 51** si riporta una tabella di sintesi del campione con i relativi costi medi di riparazione; Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. vengono riportate le classi omogenee di costo di riferimento.

		n. pratiche	Costo medio di riparazione (/mq)	dev. standard (/mq)
Costi delle strutture (P.C.)	ESITO B o C	1254	124,12	85,89
	ESITO E trattato come B o C	176	224,16	121,72
Costi delle parti non strutturali (U.I.C.)	ESITO B o C	4894	198,33	130,18
	ESITO E trattato come B o C	787	302,98	152,84

Figura 51.- Campione dei condomini del Comune di L'Aquila e costi medi di riparazione

ESITO B o C (U.I.C.)	Costi delle PARTI NON STRUTTURALI	Classi omogenee di costo (€/mq)	n. pratiche
		0-100	1144
		101-200	1829
		201-300	984
		301-400	539
		401-500	237
		501-600	98
		601-700	42
		701-800	14
		801-900	2
		901-1000	5
ESITO E trattato come B o C (U.I.C.)	Costi delle PARTI NON STRUTTURALI	Classi omogenee di costo (€/mq)	n. pratiche
		0-100	44
		101-200	175
		201-300	211
		301-400	173
		401-500	104
		501-600	36
		601-700	28
		701-800	14
		801-900	1
		901-1000	1

Figura 52.- Classi omogenee di costo per i condomini del Comune di L'Aquila

Articolati i costi per livelli di intensità macrosismica, questi sono stati differenziati per classi di vulnerabilità attraverso i coefficienti correttivi di costo.

E' stata valutata, inoltre, la **dispersione dei costi**, in termini di **intervallo di confidenza**, a partire dalla deviazione standard relativa al costo medio di riparazione (dato fornito dal *Libro Bianco*).

Dai costi medi di riparazione e i relativi intervalli di confidenza (espressi in €/mq), differenziati per classi di vulnerabilità e articolati sulle intensità macrosismiche, sono stati ricavati i costi unitari (in €) moltiplicando per la superficie media (dato fornito).

In **Figura 53** sono riportate le spezzate ottenute, con i relativi intervalli di confidenza, confrontate con le corrispondenti curve ottenute con il modello Macrosismico.

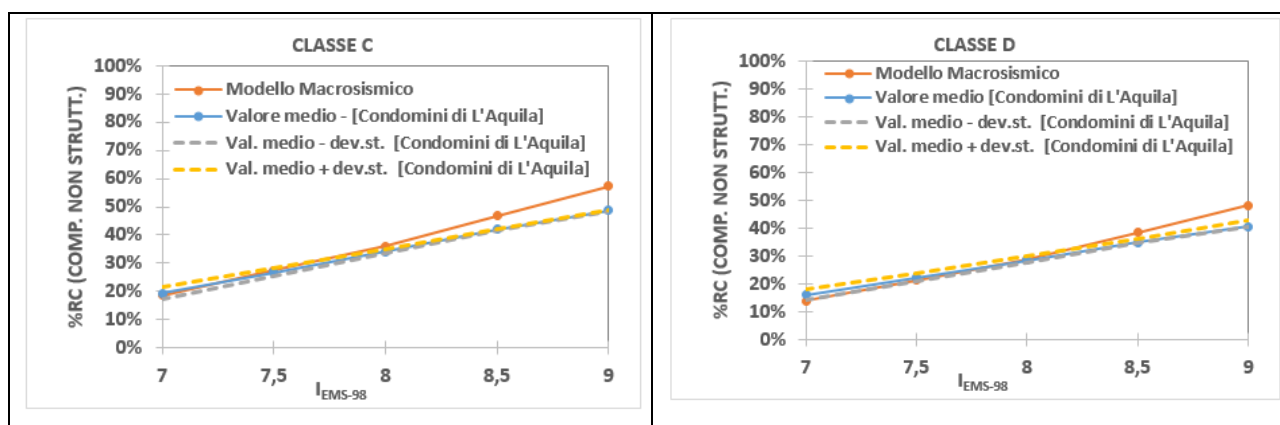


Figura 53.- Vulnerabilità non strutturale - condomini del Comune di L'Aquila.

7. INDIVIDUAZIONE DELLA CLASSE MEDIA DI VULNERABILITA'

In base alla **EMS-98** una generica costruzione, di muratura o con struttura di c.a. (si tralasciano le costruzioni con struttura d'acciaio o legno in quanto poco numerose), può essere associata a una delle **15 tipologie** viste e, subito dopo, a una classe di vulnerabilità globale media, in base non solo alla rispondenza nella descrizione ma anche ad analogie di comportamento sismico²⁸.

La classe di vulnerabilità globale dell'edificio (da distinguere dalla vulnerabilità locale che è riferibile a singole parti o elementi strutturali) è media in quanto presume:

- **assenza di stati di danneggiamento o degrado evidenti** e comunque di entità superiore a quella usualmente riscontrabile per costruzioni di quella classe di vulnerabilità;
- **qualità costruttiva soddisfacente** e, comunque, allineata a quella usualmente riscontrabile per costruzioni di quella classe di vulnerabilità.

Le classi medie di vulnerabilità definite dall'**EMS-98** sono, a titolo puramente indicativo²⁹, replicate e meglio definite, per alcune situazioni frequenti in Italia, nella **tabella 1**.

Ancora una volta si evidenzia come la EMS-98 non consideri costruzioni in muratura progettate per essere antisismiche; qualora si ricada in tale situazione e la norma di riferimento sia la NTC si potrà assumere una classe E_{EMS}.(per le zone sismiche 1 e 2), una classe D_{EMS}.(per le zone sismiche 3 e 4).

TIPOLOGIA STRUTTURALE		PECULIARITÀ CARATTERISTICHE DELLA TIPOLOGIA STRUTTURALE	CLASSE MEDIA DI VULNERABILITÀ GLOBALE
	INERTI / MAGLIA MURARIA		
MURATURA	pietra grezza	• Legante di cattiva qualità e/o assente • Orizzontamenti di legno o comunque caratterizzati da scarsa rigidezza e/o resistenza nel proprio piano medio e scarsamente collegati con le pareti portanti	A _{EMS}
	mattoni di terra cruda (adobe)	• Orizzontamenti di legno o di mattoni ma comunque caratterizzati da scarsa rigidezza e/o resistenza nel proprio piano medio e scarsamente collegati con le pareti portanti • Eventuale presenza di telai di legno	A _{EMS}
	pietra sbazzata	• Accorgimenti per aumentare la resistenza (ad es. listature). • Orizzontamenti di legno o comunque caratterizzati da	B _{EMS}

²⁸ A tal proposito, si riportano i criteri generali di classificazione della **EMS-98**: *Accordingly, six classes of decreasing vulnerability are proposed (A-F) of which the first three represent the strength of a "typical" adobe house, brick building and reinforced concrete (RC) structure, i.e. they should be compatible with building classes A-C in the MSK-64 and MSK-81 scales. Classes D and E are intended to represent approximately linear decreases in vulnerability as a result of improved level of earthquake resistant design (ERD), and also provide for well-built timber, reinforced or confined masonry and steel structures, which are well-known to be resistant to earthquake shaking. Class F is intended to represent the vulnerability of a structure with a high level of earthquake resistant design, i.e. a structure of the highest earthquake resistance due to the incorporated design principles.*

²⁹ Di seguito quanto è riportato nella descrizione delle tipologie di edifici della scala **EMS98**: *The vulnerability table includes entries for most of the major building types encountered in Europe. For reasons of space, the listing of types is necessarily simplified. It is recognised that the table is incomplete, in that some building types (e.g. adobe, wood) would benefit from further sub-classification.*

		scarsa rigidezza e/o resistenza nel proprio piano medio e scarsamente collegati con le pareti portanti	
	pietra massiccia per costruzioni monumentali	• Orizzontamenti a volta o di legno caratterizzati da scarsa rigidezza e/o resistenza nel proprio piano medio	C _{EMS}
	mattoni o pietra lavorata	• Orizzontamenti di mattoni o di legno caratterizzati da scarsa rigidezza nel proprio piano medio e scarsamente collegati con le pareti portanti	B _{EMS}
	mattoni + solai d'elevata rigidezza nel proprio piano medio	• Funzionamento scatolare della costruzione • Orizzontamenti di calcestruzzo armato o comunque caratterizzati da elevata rigidezza nel proprio piano medio ben collegati alla muratura	C _{EMS}
	armata e/o confinata	• Elevata qualità delle muratura, rinforzata da reti o barre di acciaio, e/o realizzata tra travi e colonne che la racchiudono in corrispondenza di tutti e quattro i lati • Orizzontamenti di calcestruzzo armato o comunque caratterizzati da elevata rigidezza nel proprio piano medio	D _{EMS}
LIVELLO DI PROGETTO ANTISISMICO		PECULIARITÀ CARATTERISTICHE DELLA TIPOLOGIA STRUTTURALE	CLASSE MEDIA DI VULNERABILITÀ GLOBALE
C.A. (TELAI)	NULLO	• Sistema resistente prevalentemente unidirezionale • Assenza di dettagli antisismici	C _{EMS}
	MODERATO	• Sistema resistente bidirezionale e planimetricamente anche irregolare • Assenza di progettazione in capacità • Presenza di dettagli antisismici, ma di qualità scarsa	D _{EMS}
	ELEVATO	• Sistema resistente bidirezionale e planimetricamente regolare • Corretta progettazione in capacità • Presenza di dettagli antisismici di qualità adeguata	E _{EMS}
C.A. (PARETI)	NULLO	• Sistema resistente prevalentemente unidirezionale • Assenza di dettagli antisismici	C _{EMS}
	MODERATO	• Sistema resistente bidirezionale e planimetricamente anche irregolare • Presenza di dettagli antisismici, ma di qualità scarsa	D _{EMS}
	ELEVATO	• Sistema resistente bidirezionale, planimetricamente e altimetricamente regolare • Corretta progettazione in capacità • Presenza di dettagli antisismici di qualità adeguata	E _{EMS}

Tabella 1.- Costruzioni in muratura e con struttura in c.a.: valori medi delle classi di vulnerabilità globale.

È il caso di rimarcare che la grandissima varietà di tipologie strutturali e loro varianti presenti nel patrimonio edilizio italiano rende l'individuazione della classe media di vulnerabilità globale del singolo edificio, da F_{EMS} a A_{EMS}, più complessa di quanto non appaia nella tabella, che è da intendersi, perciò, come esemplificazione di riferimento.

In tal senso può risultare utile far riferimento agli esiti degli studi svolti con i dati tipologici e di

danneggiamento relativi ai terremoti italiani, a partire da quello dell'Irpinia del 1980³⁰⁻³¹, che hanno condotto ad una classificazione semplificata, basata sulle caratteristiche anche delle strutture orizzontali.

Essi dimostrano come la presenza di orizzontamenti, rigidi o semirigidi e ben collegati alle strutture murarie, possa ridurre la vulnerabilità sismica di una tipologia standard determinandone il passaggio in una classe meno vulnerabile.

La vulnerabilità globale di una costruzione (classe media di vulnerabilità di appartenenza), **per uno stato di conservazione medio e una qualità costruttiva media**, prefigura un valore medio di EAL ossia si posiziona, al variare della zona sismica di appartenenza, sul valore medio dell'intervallo attribuito a quella classe.

Al peggiorare/migliorare dello stato di conservazione e della qualità costruttiva, il valore indicativo di EAL si sposta verso il margine superiore/inferiore dell'intervallo d'origine, fino a passare alla classe più/meno vulnerabile immediatamente contigua a quella originale.

In altri termini, la classe di vulnerabilità di appartenenza dipende dalla tipologia strutturale definita dall'EMS-98, ma può cambiare in peggioro/miglior, al crescere/decretere del degrado e al peggiorare/migliorare della qualità costruttiva.

Effetto analogo a quello dello stato di conservazione e della qualità costruttiva, ha la numerosità delle peculiarità, caratterizzanti la costruzione, che ne possono peggiorare il comportamento sismico.

Se le peculiarità peggiorative sono allineate, in termini di numerosità, alla numerosità usuale (media) per quella classe di vulnerabilità, il valore di EAL si posiziona sul valore medio dell'intervallo relativo a quella classe; se invece esse sono più/meno numerose dell'usuale è di nuovo possibile il passaggio alla classe più/meno vulnerabile immediatamente contigua a quella originale.

In particolare, si richiama l'attenzione sugli interventi di modifica della struttura, particolarmente negli edifici in muratura che, sia se volti al miglioramento delle prestazioni sismiche sia se volti a modifiche architettoniche che comunque incidono sulla struttura (ad esempio: apertura nelle pareti portanti di vani, nicchie, armadi a muro, sostituzione di solai), possono determinare comportamenti sismici migliori o peggiori, se non addirittura passaggi di classe.

In sintesi la presenza/assenza combinata di degrado elevato, cattiva qualità costruttiva, numerosità delle peculiarità negative, può ulteriormente aggravare/migliorare la situazione spostando la classe di vulnerabilità della costruzione anche di due classi rispetto al valore medio.

Il quadro complessivo dei possibili spostamenti di classe di vulnerabilità che emerge da quanto detto è illustrato per le **costruzioni di muratura**, nella **tabella 2**, per le **costruzioni con struttura di calcestruzzo armato, a telaio nella tabella 3 e a pareti nella tabella 4**.

Come si vede, gran parte delle peculiarità negative elencate sono fisiologicamente presenti nella relativa tipologia, caratterizzandone significativamente il comportamento.

Si è peraltro già detto che, **oltre a tali inevitabili presenze eliminabili solo attraverso interventi**

30 F. Braga, M. Dolce, D. Liberatore, Southern Italy November 23, 1980 Earthquake: A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the M.S.K.-76 Scale. pubblicazione CNR-PFG n.503, 1982, Roma.

31 F.Braga, M.Dolce, D.Liberatore, Assessment of the Relationship between Macroseismic Intensity, Type of Building and Damage, Based on the Recent Italy Earthquake Data. Atti della 8th European conference on earthquake engineering, Settembre 1986, Lisbona.

estesi e, comunque, tali da cambiare radicalmente il comportamento sismico del sistema strutturale, sono le situazioni puntuali (più gravi della situazione media) quelle che possono rendere la costruzione più vulnerabile e sono queste le situazioni che, ricorrendo agli interventi di rafforzamento locale, possono essere eliminate sistematicamente per riportare la costruzione alla sua vulnerabilità media.

TIPOLOGIA STRUTTURALE		SIGNIFICATIVA VULNERABILITA' LOCALE		CLASSE MEDIA DI VULNERABILITÀ GLOBALE
MURATURA	INERTI/ MAGLIA MURARIA	POSSIBILI MECCANISMI LOCALI	PECULIARITÀ NEGATIVE PER LA VULNERABILITÀ LOCALE/GLOBALE	
	pietra sbazzata	Ribaltamento delle pareti Meccanismi parziali o di piano	• Scarsa qualità costruttiva • Elevato degrado e/o danneggiamento • Spinte orizzontali non contrastate • Pannelli murari male ammorsati tra loro • Orizzontamenti male ammorsati alle pareti • Aperture di elevate dimensioni intervallate da maschi di ridotte dimensioni • Presenza di numerose nicchie che riducono significativamente l'area resistente della muratura • Pareti di elevate dimensioni (larghezza e altezza) non controventate a sufficienza	da BEMS a AEMS
	pietra massiccia per costruzioni monumentali			da CEMS a BEMS
	mattoni o pietra lavorata			da BEMS a AEMS
	mattoni + solai di calcestruzzo armato	Ribaltamento delle pareti Meccanismi parziali o di piano	• Scarsa qualità costruttiva • Elevato degrado e/o danneggiamento • Pannelli murari male ammorsati tra loro • Orizzontamenti male ammorsati alle pareti • Pannelli murari a doppio strato con camera d'aria • Assenza totale o parziale di cordoli • Aperture di elevate dimensioni intervallate da maschi di ridotte dimensioni • Presenza di numerose nicchie che riducono significativamente l'area resistente della muratura • Pareti di elevate dimensioni (larghezza e altezza) non controventate a sufficienza	da CEMS a BEMS
	armata e/o confinata	Meccanismi dovuti, ad esempio, ad un'errata disposizione degli elementi non strutturali che possono ridurre la duttilità globale	• Scarsa qualità costruttiva • Elevato degrado o danneggiamento • Elevata irregolarità in pianta e/o in altezza • Presenza numerosa di elementi non-strutturali che modificano negativamente il comportamento locale e/o globale • Aperture di elevanti dimensioni intervallate da maschi di ridotte dimensioni • Pareti di elevate dimensioni (larghezza e altezza) non controventate a sufficienza	da DEMS a CEMS

Tabella 2.- Costruzioni di muratura: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe.

TIPOLOGIA STRUTTURALE		ELEVATA VULNERABILITA' LOCALE		CLASSE MEDIA DI VULNERAB. GLOBALE	SIGNIFICATIVA VULNERABILITA' LOCALE		CLASSE MEDIA DI VULNERAB. GLOBALE
	LIVELLO DI PROGETTO ANTISI-MICO	POSSIBILI MECCANISMI LOCALI	PECULIARITÀ NEGATIVE PER LA VULNERABILITÀ LOCALE/GLOBALE		POSSIBILI MEC-CANISMI LOCALI	PECULIARITÀ NEGATIVE PER LA VULNERABILITÀ LOCALE/GLOBALE	
C.A. (TELAI)	NULLO	Meccanismi locali o di piano	• Molto scarsa qualità costruttiva • Assai diffuso degrado e/o danneggiamento • Forte irregolarità in pianta e/o in altezza • Presenza diffusa di travi e/o colonne tozze armate non a sufficienza	da CEMS a AEMS	Crisi a taglio delle colonne e/o di elementi non strutturali potenzialmente pericolosi	• Scarsa qualità costruttiva • Diffuso degrado e/o danneggiamento • Irregolarità in pianta e/o in altezza • Presenza di travi e/o colonne tozze armate non a sufficienza	da CEMS a BEMS
	MODERATO	Meccanismi locali o di piano	• Molti elementi non strutturali pericolosi (tamponamenti non in asse con i pilastri, paramenti ininterrotti da terra alla sommità, comignoli, parapetti, ecc.) • Inadeguatezze gravi e diffuse ai carichi gravitazionali	da DEMS a BEMS	Crisi a taglio delle colonne	• Alcuni elementi non strutturali pericolosi (Comignoli, parapetti, ecc.) • Inadeguatezze ai carichi gravitazionali	da DEMS a CEMS
	ELEVATO	Meccanismi dovuti ad un'errata disposizione degli elementi non strutturali che possono ridurre la duttilità globale	• Molto scarsa qualità costruttiva • Assai diffuso degrado e/o danneggiamento • Forti Irregolarità in pianta o in altezza a causa della disposizione degli elementi non strutturali • Assai carente progettazione degli elementi non-strutturali	da EEMS a CEMS	Meccanismi locali di tamponamenti e tramezzature	• Scarsa qualità costruttiva • Diffuso degrado o danneggiamento • Carente progettazione degli elementi non-strutturali (ad es. tamponamenti non in asse con i pilastri, etc.)	da EEMS a DEMS

Tabella 3.- Costruzioni con struttura di c.a. a telaio: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe.

TIPOLOGIA STRUTTURALE		SIGNIFICATIVA VULNERABILITA' LOCALE		CLASSE MEDIA DI VULNERAB. GLOBALE
	LIVELLO DI PROGETTO ANTISISMICO	POSSIBILI MECCANISMI LOCALI	PECULIARITÀ NEGATIVE PER LA VULNERABILITÀ LOCALE/GLOBALE	
C.A. (PARETI)	NULLO	Rottura fuori piano delle pareti e/o sviluppo di meccanismi locali o di piano in direzione perpendicolare al piano medio della parete	• Scarsa qualità costruttiva • Diffuso degrado/danneggiamento • Irregolarità in pianta e/o in altezza (ad es. interruzione di pareti) • Travi di collegamento tra pareti armate non a sufficienza • Solai non sufficientemente resistenti e/o rigidi nel proprio piano medio • Collegamenti in fondazione assenti o insufficienti • Presenza di elementi non strutturali particolarmente pericolosi. • Inadeguatezze ai carichi gravitazionali	da CEMS a BEMS
	MODERATO	Rottura fuori piano delle pareti Sviluppo di meccanismi locali o di piano Rottura a taglio del muro. Crisi delle fondazioni. Crisi locale del solaio	• Scarsa qualità della costruzione • Diffuso degrado o danneggiamento • Irregolarità in pianta e/o in altezza • Solai non sufficientemente resistenti e/o rigidi nel proprio piano medio • Collegamenti in fondazione insufficienti • Presenza di elementi non strutturali particolarmente pericolosi. • Inadeguatezze ai carichi gravitazionali	da DEMS a CEMS
	ELEVATO	Danno elevato di elementi non strutturali per livelli di terremoto inferiori a quello di danno	• Scarsa qualità dei getti (evidenti segni di riprese di getto, ferri affioranti, etc) • Diffuso degrado/danneggiamento • Carente progettazione degli elementi non-strutturali (ad es. tamponamenti non in asse con i pilastri) • Irregolarità in pianta o in altezza a causa della disposizione di elementi non strutturali • Elementi non strutturali particolarmente pericolosi	da EEMS a DEMS

Tabella 4.- Costruzioni con struttura di c.a. a pareti: peculiarità negative per la vulnerabilità globale e relative variazioni di classe.

Le disuniformità legate alle peculiarità negative possono essere più accentuate se la struttura è di c.a. intelaiata, meno accentuate se è di c.a. a pareti o di muratura. La stessa tipologia arriva, dunque, a coprire **quattro classi** di vulnerabilità per le strutture di c.a. intelaiate, **tre classi** di vulnerabilità per le strutture in c.a. a pareti e per le costruzioni di muratura.

Per la vulnerabilità locale si è, di conseguenza, adottata una doppia articolazione (**significativa ed elevata**) per le strutture di c.a. intelaiate, una semplice articolazione (**significativa**) per le strutture di c.a. a pareti e per le costruzioni di muratura.

Tra le peculiarità negative delle costruzioni non sono state citate quelle tipiche della tipologia (ad esempio l'assenza di un sistema resistente bidirezionale) in quanto difetti che, per essere eliminati, richiedono una variazione del comportamento d'insieme della costruzione e della sua tipologia, dunque diversi dalle questioni di ritorno al valore medio della vulnerabilità globale sin qui trattate.

L'individuazione definitiva della classe di vulnerabilità richiede, quindi, oltre all'individuazione della tipologia strutturale, anche la valutazione:

- **dell'entità del degrado e della qualità costruttiva;**
- **della presenza e numerosità di peculiarità che possono innescare meccanismi di collasso locale e aumentare la vulnerabilità globale.**

8. LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Le **curve di perdite attese**, espresse in termini di EAL/%RC - frequenza di occorrenza λ , hanno messo in evidenza che la maggiore incidenza dei costi diretti si colloca nell'intervallo delle intensità medio – basse (medio-alte frequenze λ), in altre parole al di fuori del così detto 'cratere'.

Tale evidenza risulta, d'altra parte, confermata dai costi sostenuti dallo Stato, dopo i vari terremoti, per finanziare la ricostruzione su aree molto estese, al di fuori quindi della 'zona del cratere'.

Alla luce di ciò è chiaro che, per una corretta valutazione del rischio, è necessario riferirsi ad un ambito più vasto che riguarda, quindi, un'area ben più estesa della zona epicentrale, da investigare efficacemente al fine di delimitarla ragionando in termini di costi significativi.

8.1 Il rischio nell'area al di fuori del cratere

L'aspetto sopra evidenziato, fino ad oggi poco investigato, è stato la spinta ad un approfondimento mirato a valutare l'entità del danno (e di conseguenza i costi diretti ad esso associati) nell'area circoscritta all'epicentro ma esterna al cratere, al crescere della distanza dalla zona epicentrale.

Per lo scopo, è stato sviluppato un modello che, a partire da una data intensità epicentrale, attraverso una legge di attenuazione (intensità macrosismica – distanza) e riferendosi ai danni in termini di %RC, fornisce la densità media del danno per unità di superficie, al crescere della superficie investigata.

8.1.1 La distribuzione del danno al di fuori del cratere sismico – il parametro SEAL

La **entità del danno**, al variare della superficie considerata, viene espressa mediante un parametro denominato **SEAL (Superficie-EAL)**, appositamente definito per quantificare, dopo un evento sismico di data intensità, la entità percentuale dei costi diretti, al variare dell'estensione del territorio considerato nel valutare i danni.

L'espressione analitica del parametro **SEAL**, che rappresenta la **parte di %RC considerata espressa in percentuale della %RC totale**, è :

$$SEAL = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i^*}{\sum_{i=1}^n x_i y_i^*}$$

$$x_i = \%RC_i \quad x_i^* = \%RC_i / \%RC_{TOT}$$

$$y_i = S_i \quad y_i^* = S_i / S_{TOT}$$

$$i [1, \dots, 8] \quad n = 8 \quad i=1 \text{ per } l = 12 \quad i = 8 \text{ per } l = 5$$

$$k [1, \dots, n]$$

dove:

S_i rappresenta l'area della **i-esima superficie considerata**;

S_{TOT} rappresenta l'area totale della **superficie investita dal sisma** (somma delle n superfici S_i);

x_i^* e y_i^* sono due variabili che rappresentano, rispettivamente, la **percentuale di %RC totale** mobilitata alla distanza i -esima (corrispondente ad un certo livello di intensità I minore della intensità epicentrale I_0) e il rapporto tra la i -esima superficie considerata e la superficie totale investita.

La **costruzione del parametro** è stata fatta con riferimento ai seguenti passi:

- scelta di una legge di attenuazione;
- scelta della legge di ricorrenza;
- particolarizzazione alle 4 zone sismiche.

E' stata utilizzata la **legge di attenuazione di Gomez Capera – 2006** (che è un modello a carattere regionale) nella forma generale

$$I_0 - I = -1,3096 + 1,1833d^{1/3} \quad \sigma = 0.94$$

in cui:

$I_0 - I$ è la riduzione dell'intensità macrosismica al crescere della distanza dall'epicentro;

d è la distanza misurata a partire dall'epicentro.

La rappresentazione della **legge**, per un'intensità epicentrale 10, è quella mostrata in **Figura 54**.

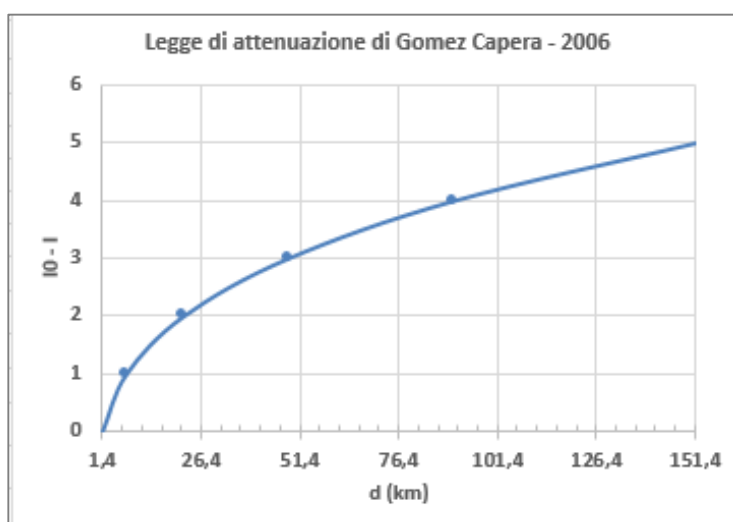


Figura 54.- Legge di attenuazione di Gomez Capera – 2006 ($I_{\text{epic.}} = 10$).

La **legge di ricorrenza** (già vista) è una **regressione** espressa **nella forma** : $\lambda = e^{-(I-b)/a}$.

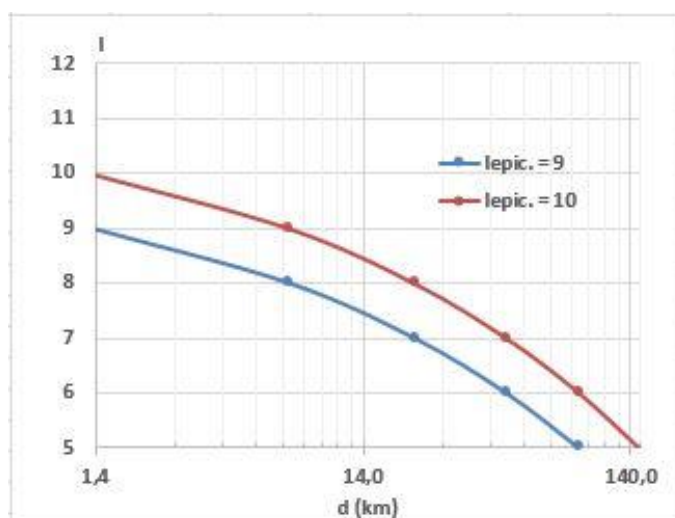


Figura 55.- Intensità – distanza.

In **Figura 55** viene riportata l'attenuazione $I - d$ per intensità epicentrale 10 e intensità epicentrale 9.

8.1.1.1 Stima del SEAL

Di seguito si riporta un esempio di **stima del parametro SEAL e della relativa distribuzione** al crescere della distanza dal cratere, con riferimento ad una intensità epicentrale **I = 10**.

Nell'esempio proposto, per il calcolo delle superfici investite, si è fatto riferimento a corone circolari (operando in analogia alle leggi di propagazione delle onde sismiche); tuttavia le valutazioni non cambiano se si cambia la forma delle superfici passando a corone ellittiche. Sono stati elaborati due esempi di applicazione confrontandoli con i dati reali relativi agli eventi sismici di L'Aquila del 2009 e dell'Emilia del 2012; nel § 8.1.2 vengono presentati i risultati conseguiti per il sisma Aquilano.

Nella tabella di **Figura 56** sono riportati, in colonne (procedendo da sinistra verso destra), rispettivamente:

- i valori della distanza dall'epicentro;
- le superfici cumulate al crescere della distanza;
- l'area delle corone circolari investigate;
- i rapporti (in %) delle superfici delle corone sulla superficie totale investita;
- i valori cumulati dei rapporti di cui al punto precedente;
- i valori dell'intensità macrosismica corrispondenti alle distanze della 1° colonna (secondo la legge di attenuazione considerata).

	$S_{\text{areole}} / S_{\text{TOT}} = \gamma_i^*$				
d	S (kmq)	S _{corona}	S _{corona} /S _{TOT}	(S _{corona} /S _{TOT})CUM	I
151,6	72172,4	46543,5	64,49%	1,000	5
90,3	25629,0	18301,0	25,36%	0,355	6
48,3	7327,9	5824,8	8,07%	0,101	7
21,9	1503,2	1329,6	1,84%	0,021	8
7,4	173,6	167,8	0,23%	0,002	9
1,4	5,8	5,8	0,01%		10

Figura 56.- Superfici – distanza – intensità (I_{EMS}).

Nella **tabella di Figura 57**, per gli stessi valori di **d** già visti in Figura 56, sono riportati i contributi al danno espressi in percentuale di %RC totale. I valori di γ_i^* rappresentano i vari addendi al **danno espressi in % del danno totale, distinti per classi di vulnerabilità**, al variare della distanza dall'epicentro (e con essa della intensità I).

		$\%RC_i / \%RC_{\text{TOT}} = \gamma_i^*$					
d	I	F _{EMS}	E _{EMS}	D _{EMS}	C _{EMS}	B _{EMS}	A _{EMS}
151,6	5	0,00%	0,00%	0,25%	0,28%	0,37%	0,58%
90,3	6	0,00%	0,27%	0,75%	0,90%	1,47%	2,63%
48,3	7	0,71%	0,93%	3,95%	4,75%	7,25%	11,45%
21,9	8	3,14%	4,62%	8,86%	10,12%	14,98%	22,36%
7,4	9	8,66%	10,62%	15,26%	16,58%	22,02%	30,25%
1,4	10	17,87%	19,21%	21,00%	20,87%	26,01%	32,74%

Figura 57.- Contributi di RC in % di RC_{TOT} – distanza – intensità (I_{EMS}).

Si può notare come ciascuna classe di vulnerabilità mobiliti, al variare della distanza, danni diversi

in misura proporzionale alla propria vulnerabilità.

La **distribuzione dei danni attesi al crescere della superficie considerata** ossia al crescere della **distanza dall'area epicentrale** è fornita, in termini di valori cumulati, nella **tabella di Figura 58** e rappresentata nel **grafico di Figura 59**.

SEAL ($I_{epic.} = 10$)							
I_{EMS}	d (Km)	F_{EMS}	E_{EMS}	D_{EMS}	C_{EMS}	B_{EMS}	A_{EMS}
10	1,4	1,05%	0,60%	0,19%	0,16%	0,14%	0,11%
9	7,4	15,82%	10,28%	4,27%	3,95%	3,49%	2,98%
8	21,9	58,23%	43,63%	23,03%	22,24%	21,53%	19,82%
7	48,3	100,00%	73,20%	59,64%	59,84%	59,81%	57,57%
6	90,3	100,00%	100,00%	81,41%	82,18%	84,24%	84,78%
5	151,6	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 58.- Densità delle perdite economiche dirette attese – SEAL.

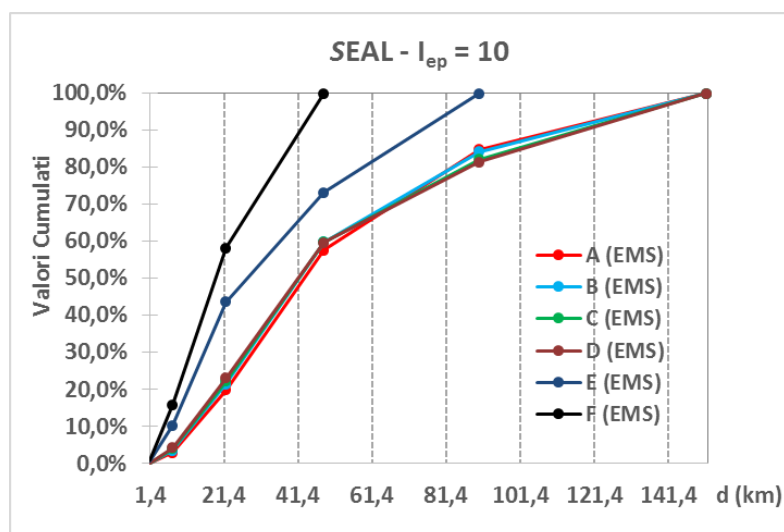


Figura 59.- Distribuzione cumulata delle perdite economiche dirette attese al variare di d.

In **Figura 60** e **Figura 61**, per le diverse classi di vulnerabilità, vengono riportati gli **andamenti di SEAL**, in **forma non cumulata** e in **forma cumulata**, per le **intensità epicentrali $I_{ep}=10$ e 9**, rispettivamente .

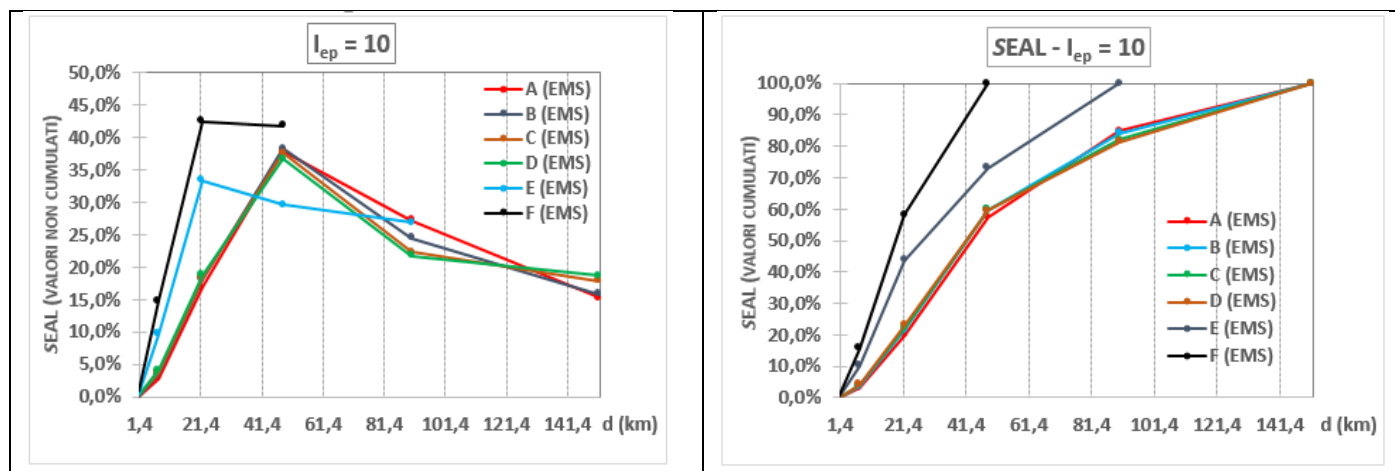


Figura 60.- Andamento di SEAL al variare di d, in forma non cumulata e cumulata, per $I_{ep}=10$

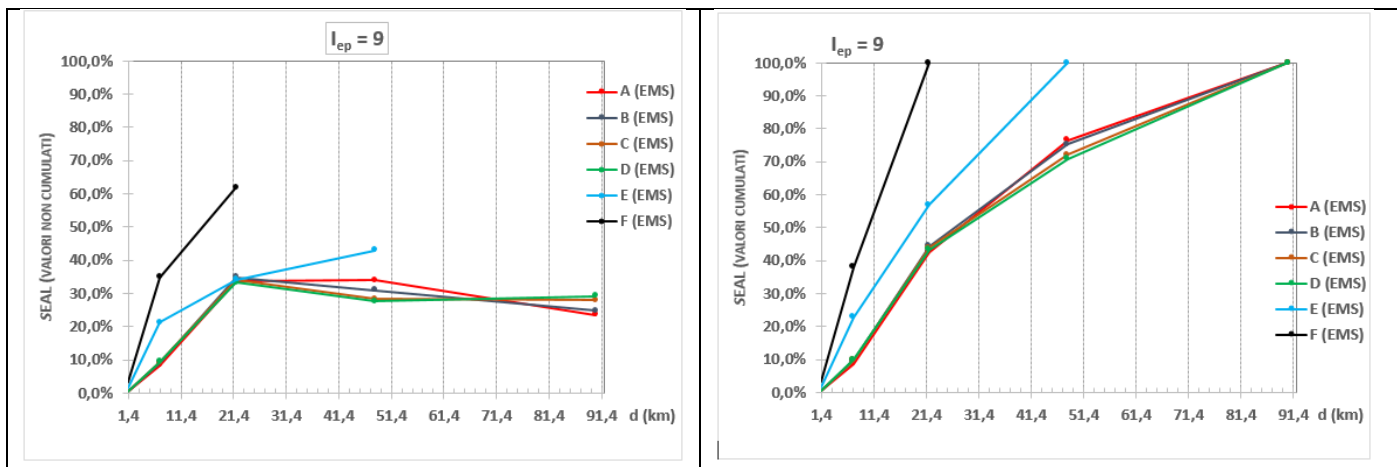


Figura 61.- Andamento di SEAL al variare di d , in forma non cumulata e cumulata, per $I_{ep}=9$

I grafici precedenti evidenziano come, indipendentemente dall'intensità epicentrale, **i contributi maggiori in termini di perdite economiche dirette sul territorio si abbiano a distanze elevate ovvero lontano dall'area del cratere**, soprattutto per le classi più vulnerabili (da A_{EMS} a D_{EMS}), che accusano danni apprezzabili anche per basse intensità. Infatti, le distribuzioni non cumulate mostrano che **il contributo maggiore ai costi diretti è fornito dagli addendi provenienti da aree distanti dal cratere**, in particolare, per le classi più vulnerabili:

- distanze superiori a 20 Km fino ad arrivare a oltre 100 Km nel caso di intensità epicentrale 10;
- distanze superiori a 20 Km fino a 90 Km nel caso di intensità epicentrale 9.

A conferma, le **distribuzioni cumulate** mostrano che il totale dei **costi diretti attesi** si mobilita a distanze superiori a 100 Km, per un evento di intensità 10, e superiori a 90 Km, per un evento di intensità 9. Dunque, la distribuzione dei danni si completa a grande distanza dal cratere.

Riportando gli andamenti SEAL – d e SEAL – I su uno stesso grafico (Figura 62) emerge un altro aspetto interessante:

la stima dei costi diretti (SEAL) basata sulla distribuzione dell'intensità macrosismica I sottostima la dimensione del problema, che è, invece, possibile cogliere più efficacemente indagando la distribuzione sul territorio al crescere della distanza dall'epicentro d .

I grafici nelle Figura 62 e Figura 63, che sono solo alcuni esempi dei casi studiati, mostrano chiaramente quanto affermato.

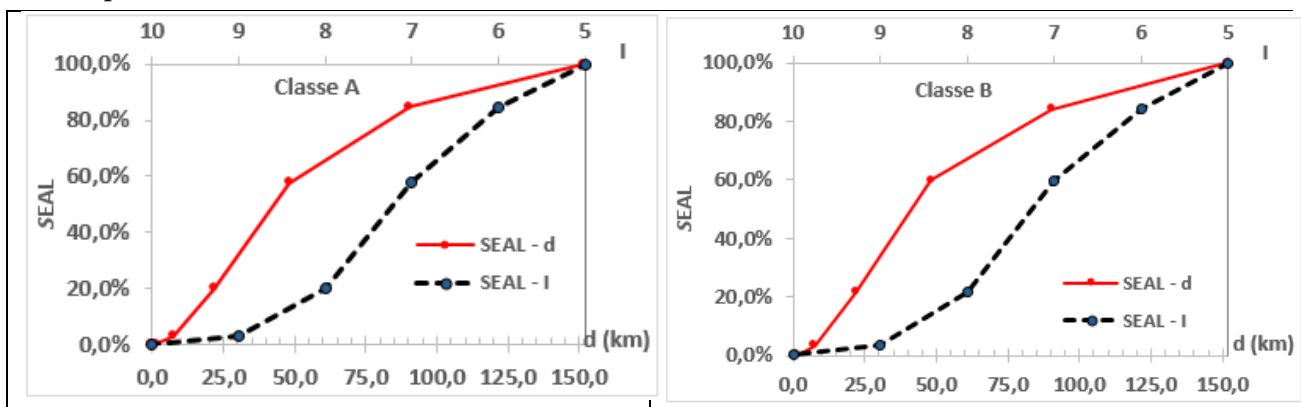


Figura 62.- Andamenti di SEAL al variare di d e di SEAL al variare di I (Classi EMS-98 A e B).

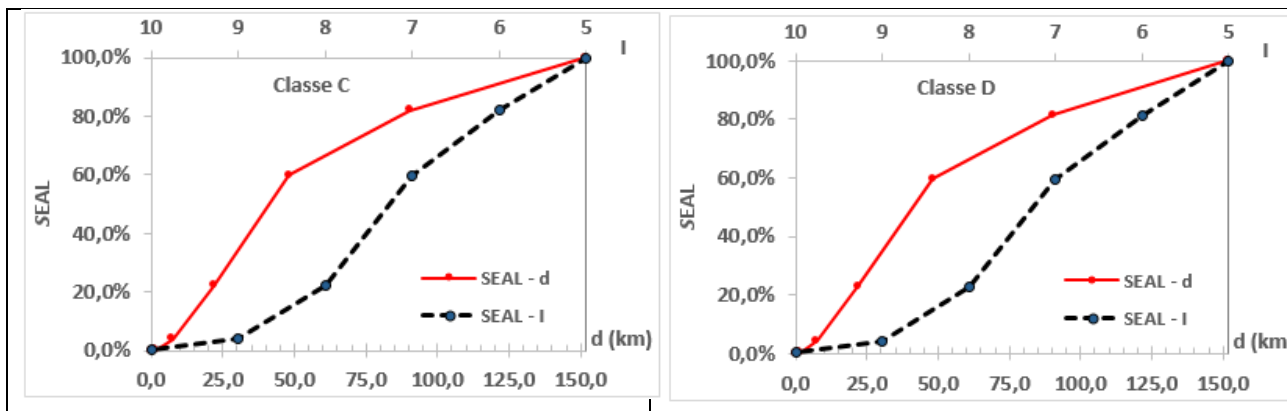


Figura 63.- Andamenti di SEAL al variare di d e di SEAL al variare di I (Classi EMS-98 C e D).

Si riportano, inoltre, in **Figura 64** i grafici **SEAL – d** per **diverse intensità epicentrali** a confronto, per le classi di vulnerabilità da **A_{EMS}** ad **D_{EMS}**, che consentono di cogliere la variazione della distanza significativa da indagare in termini di danni.

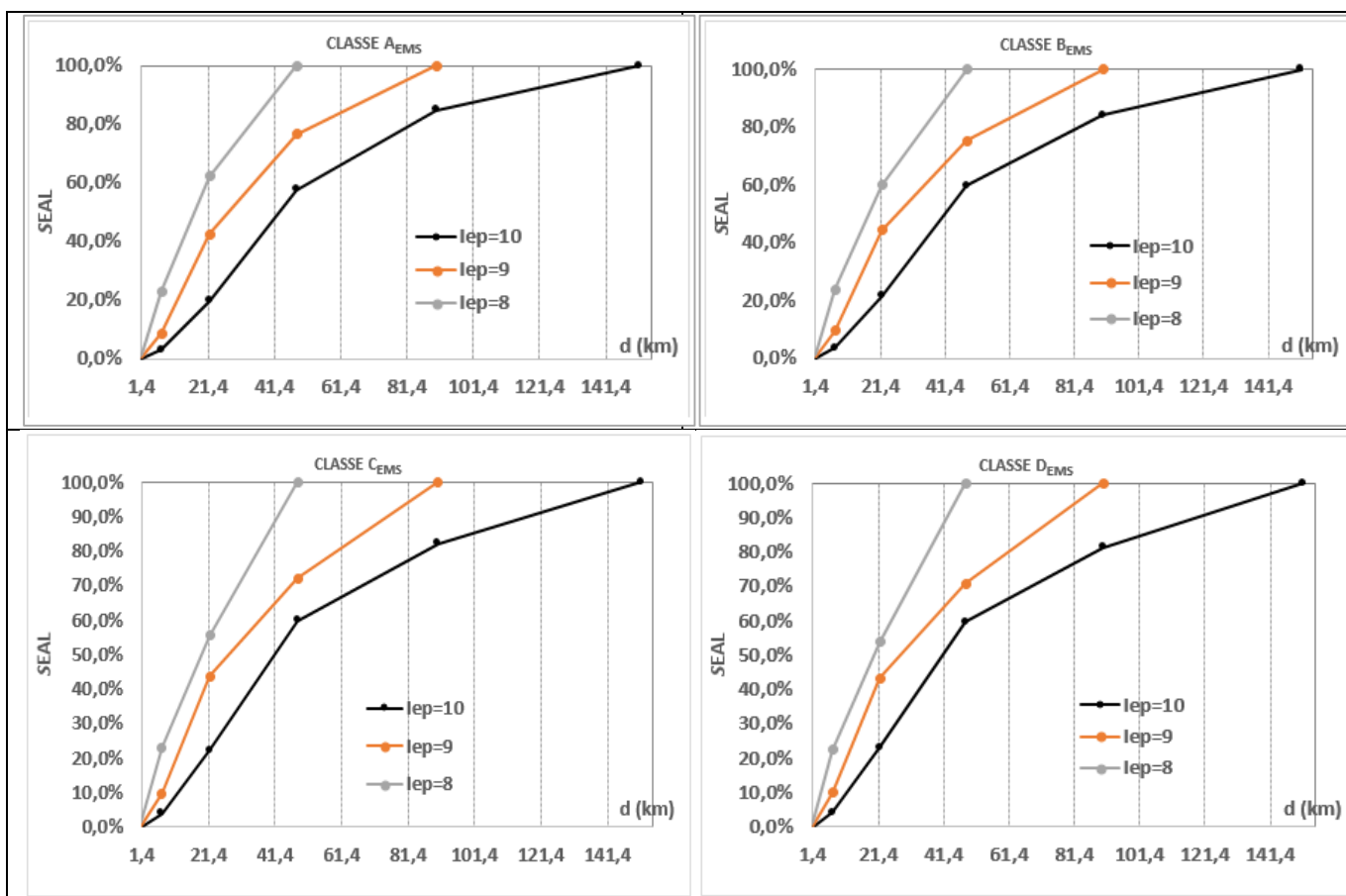


Figura 64.- Andamento di SEAL in funzione di d, al variare della classe di vulnerabilità e di I_{ep}.

E' stata indagata, inoltre, la **distribuzione dei costi** associati al solo **danno non strutturale** e, dall'analisi svolta, è emerso che **i danni non strutturali costituiscono il contributo maggiore, alle grandi distanze, sui costi totali.**

Nei grafici di **Figura 65** vengono riportati i valori non cumulati e cumulati del corrispondente SEAL.

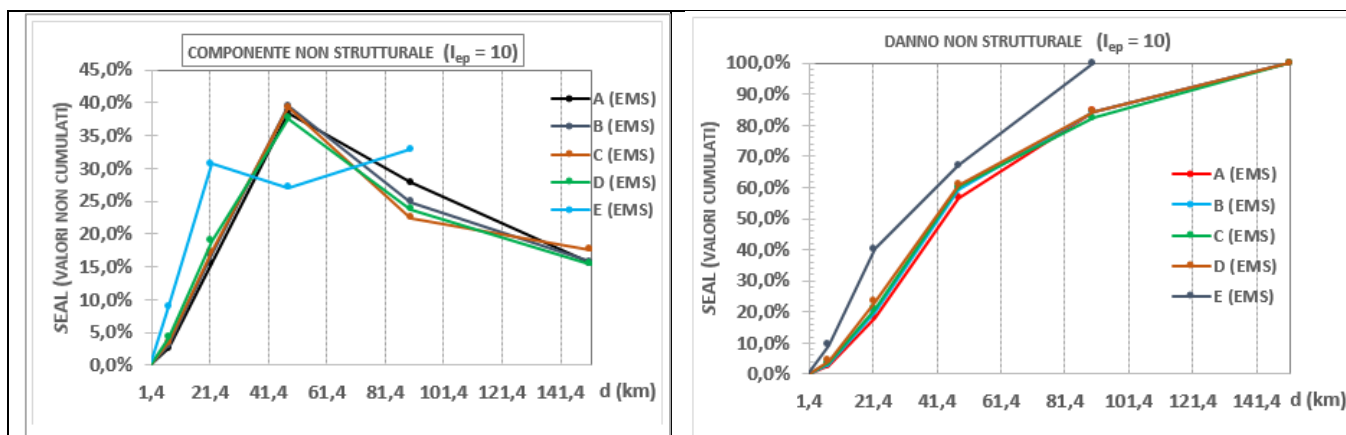


Figura 65.- Distribuzione (non cumulata e cumulata) del danno non strutturale (SEAL) al variare di d.

8.1.1.2 SEAL e Stati Limite

Viene spontaneo, a questo punto, chiedersi quali siano i **rapporti tra la distribuzione delle perdite economiche dirette con la distanza (SEAL) e gli Stati Limite** ovvero chiedersi dove si colloca il limite fissato per gli **SLE nei confronti dei costi diretti**.

La questione è stata approfondita esprimendo la frequenza di occorrenza λ associata agli Stati Limite in termini di distanza (per il tramite dell'intensità); si è così correlato, per le 4 zone sismiche, il parametro SEAL agli Stati Limite, attraverso la distanza.

Nei grafici di **Figura 66** viene rappresentato l'andamento della **frequenza di occorrenza λ in funzione della distanza**, per le 4 zone sismiche, con il posizionamento dello SLO e dello SLD.

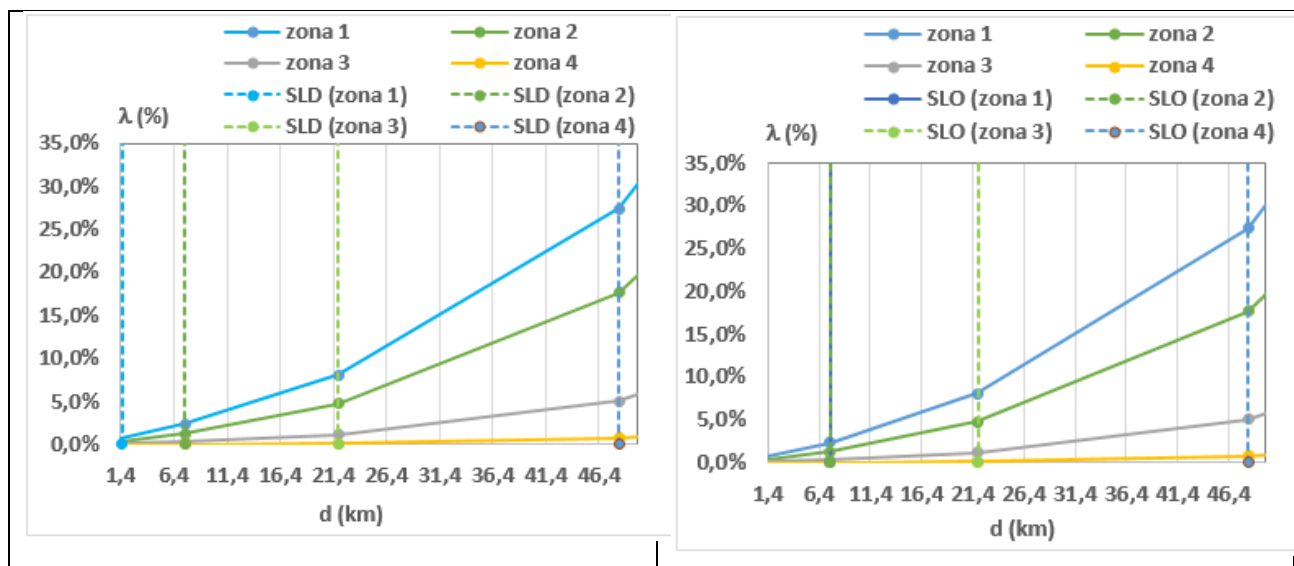


Figura 66.- Frequenza di occorrenza λ - distanza.

I grafici, sopra riportati, evidenziano che, **per le zone a elevata sismicità, gli SLD e SLO sono riferibili a piccole e medie distanze dal cratere**, con la conseguenza che le verifiche agli SLE, che dovrebbero cautelare nei confronti dei danni attribuibili a intensità medio-basse, non colgono correttamente la dimensione dei danni totali, correlati ad un'area di interesse più estesa.

I grafici che seguono (**Figura 67**), che incrociano la distribuzione del SEAL per le diverse classi di vulnerabilità con le soglie degli SLE, illustrano con chiarezza il concetto.

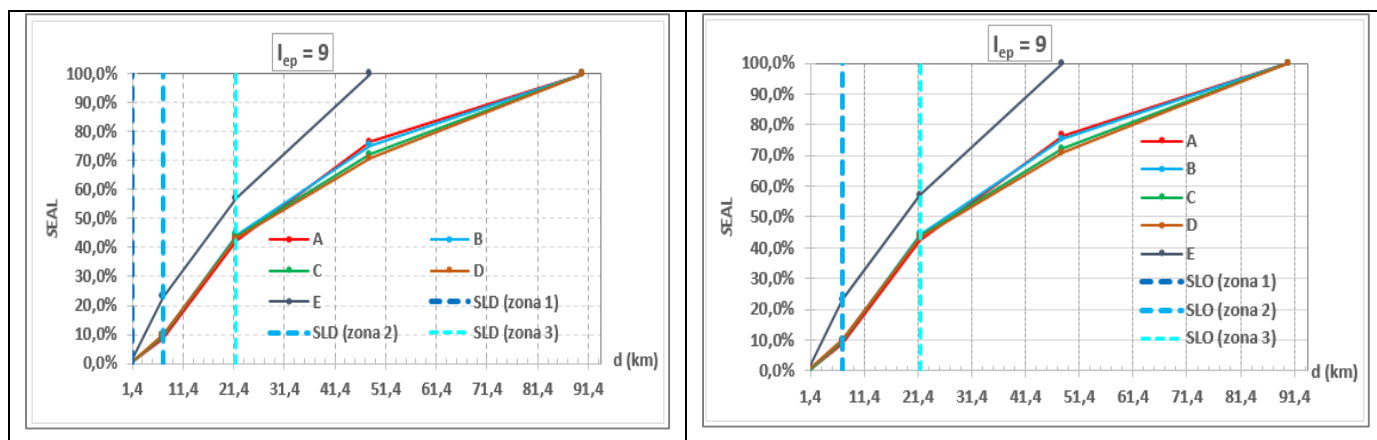


Figura 67.- SEAL – SLD – SLO (ZONA 1 – ZONA 2 – ZONA 3).

Emerge un aspetto significativo; per le classi da A a D, i costi cumulati diretti sulla intera superficie coinvolta dal sisma sono concentrati oltre lo SLD, che quindi non costituisce una frontiera valida per la stima corretta di quale sia la superficie realmente danneggiata dagli effetti dell'evento sismico.

Nei grafici delle **Figura 68** e **Figura 69**, per le classi più vulnerabili e per diverse intensità epicentrali, vengono campite le percentuali di danni economici diretti attesi che vengono mobilitate oltre le soglie degli SLE.

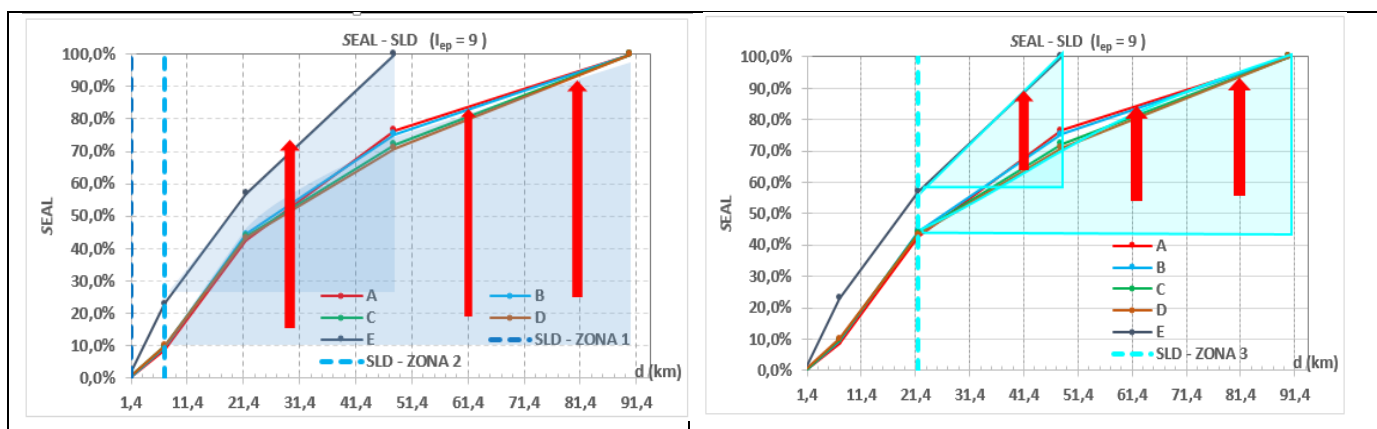


Figura 68.- SEAL – SLD (ZONA 2 – ZONA 3).

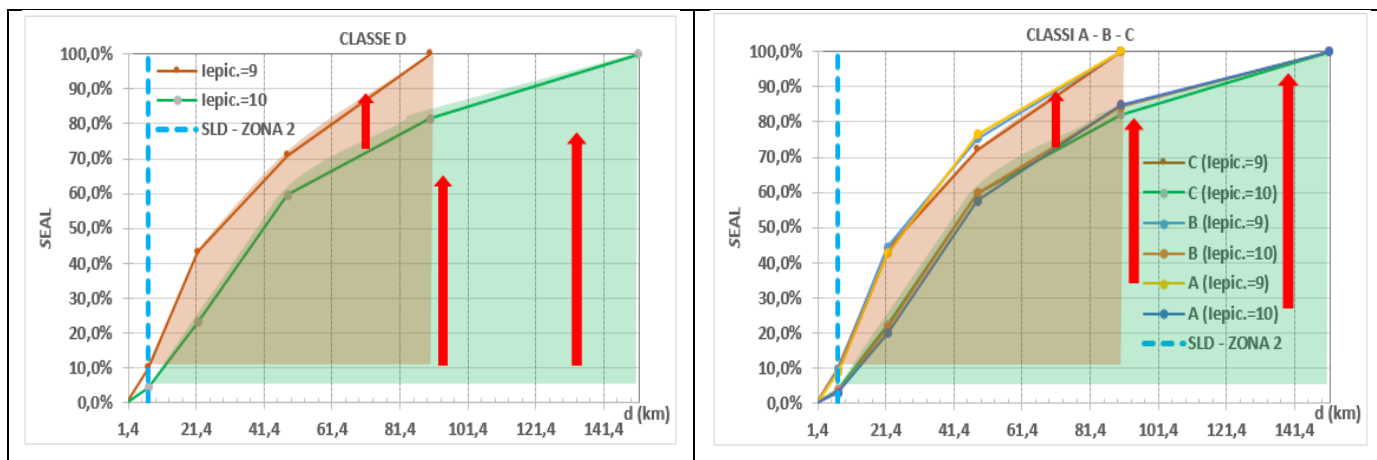


Figura 69.- CLASSI A – B – C

SEAL – SLD (ZONA 2).

Infine, nei grafici di **Figura 70**, si forniscono analoghe **rappresentazioni in funzione dell'intensità** (anziché della distanza).



Figura 70.- SEAL vs SLE - I.

Per concludere le considerazioni sin qui fatte, si riportano nel grafico di **Figura 71**, gli andamenti della distribuzione dei danni economici diretti con la distanza dalla zona epicentrale (SEAL – d) e delle medesime perdite con la frequenza di occorrenza (EAL – λ), per la Zona 1.

Gli andamenti confermano, ancora una volta, che per **fare una corretta valutazione del rischio su larga scala è necessario investigare la densità del danno (SEAL) al crescere della distanza dall'epicentro, al fine di delimitare correttamente l'area in cui i costi attesi sono ancora significativi.**

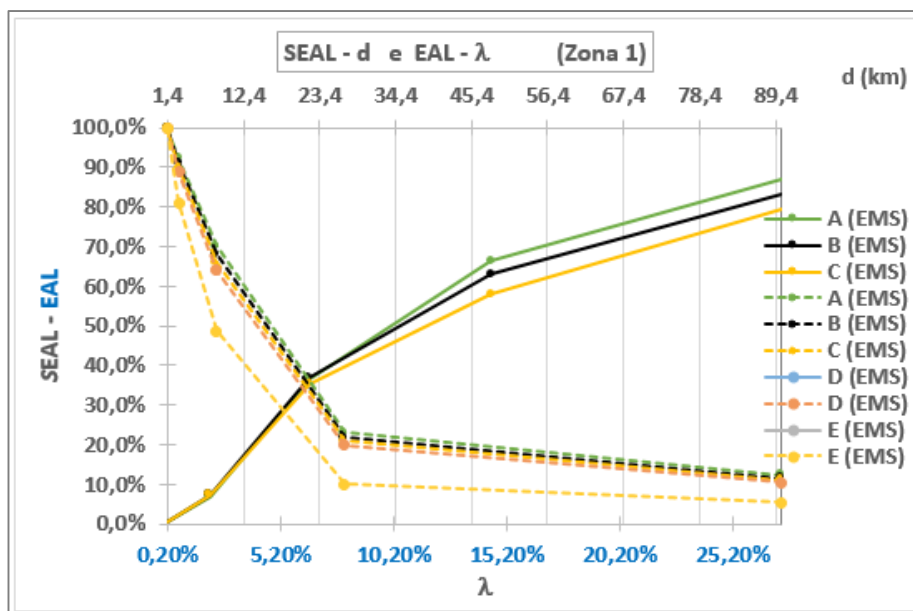


Figura 71.- SEAL - d vs EAL - λ (Zona 1).

8.1.2 SEAL - APPLICAZIONI

Sulla base dei danni registrati dopo il sisma di L'Aquila del 2009 è stata costruita la relativa distribuzione del SEAL con la distanza d . Il grafico di **Figura 72**, in cui sono riportati i valori di SEAL cumulati al crescere della distanza dal cratere, mostra come la valutazione dei costi diretti si raggiunga solo per distanze elevate, così confermando quanto emerso dalle elaborazioni precedenti.

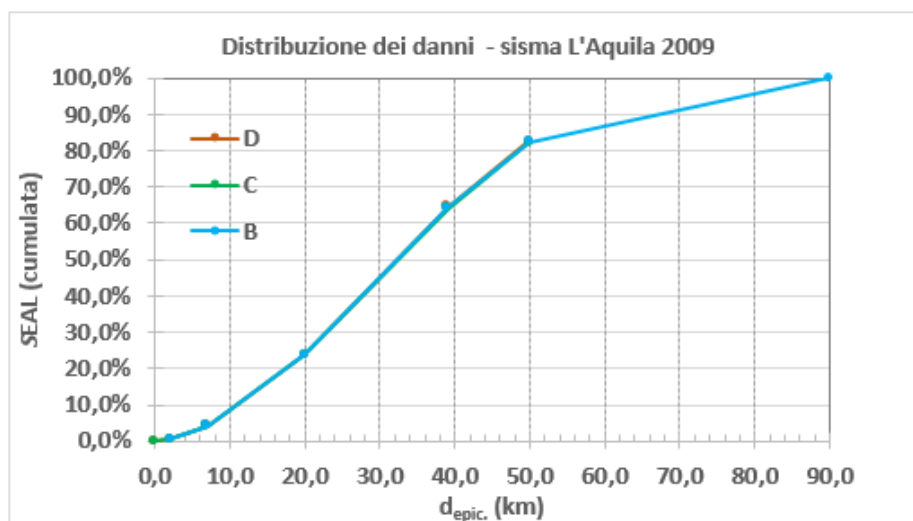


Figura 72.- SEAL - sisma L'Aquila 2009.

9. LA RIDUZIONE DEL RISCHIO

Il modello macrosismico per valutazioni di rischio, proposto, costituisce uno strumento speditivo per caratterizzare l'edificio in esame in termini di vulnerabilità, espressa come perdite economiche dirette attese; in quanto tale, si presta molto bene per analisi di costi sugli edifici esistenti. Nel § 9.55 verrà presentato un ulteriore sviluppo del modello che lo renderà uno strumento operativo per la stima del livello di riduzione del rischio conseguito dopo un intervento.

L'analisi di **riduzione del rischio per gli edifici esistenti** (non suscettibili, in generale, né di dislocazione sul territorio, né di cambio di destinazione d'uso) si traduce, di fatto, nella scelta degli interventi più efficaci ed economicamente realizzabili **per ridurre la vulnerabilità, principalmente con riferimento ai danni economici diretti, ma anche nei confronti delle perdite attese in termini di vite umane.**

Il progetto dell'intervento implica la scelta del livello di riduzione che si intende conseguire ovvero del livello di capacità (in termini di resistenza e di deformabilità) conseguibile dall'edificio. La scelta del livello di riduzione da conseguire è chiaramente condizionata dall'entità dei costi necessari per conseguirlo. In ogni caso, tutte le possibili strategie di intervento devono valutare, in ottemperanza alla norma, **la soglia che corrisponda alla capacità minima richiesta alla struttura dopo l'intervento.**

Nel fissare tale soglia, oltre a considerazioni sulla vulnerabilità e la destinazione d'uso, non si dovrebbe prescindere da una **stima delle perdite attese in termini di vite umane (morti)**, dal momento che la soglia non rappresenta 'la sicurezza' a meno che non si voglia conseguire un comportamento corrispondente ad una progettazione antisismica elevata di norma (classe di vulnerabilità F).

9.1 La stima delle perdite di vite umane

Al di là di statistiche relative alle vittime di terremoti passati e modelli probabilistici calibrati sul singolo edificio, **non ci sono modelli di stima delle perdite umane su scala nazionale che consentano di fare previsione in maniera speditiva**; ci sono solo possibili modelli proposti sulla base di studi eseguiti su eventi recenti.

In Italia, uno di questi è quello condotto da G. Zuccaro e F. Cacace «Seismic Casualty Evaluation: The Italian Model, an application to the L'Aquila 2009 Event». Tale modello deriva direttamente da un'idea originale di Coburn e Spence (1992) applicata al contesto Italiano utilizzando i dati dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), che consentono di legare la percentuale delle vittime alla tipologia strutturale ed allo stile di vita della popolazione. Nello studio, la percentuale di feriti gravi e di morti viene fatta dipendere, oltre che dall'esposizione (destinazione d'uso dell'edificio, variabilità del n° di occupanti nell'arco del giorno, della settimana e dell'anno), dalla tipologia strutturale (muratura o c.a.), dalle caratteristiche geometriche (nello specifico dal n° di piani) e dal livello di danno strutturale dell'edificio, restringendo in particolare l'intervallo dei livelli di danno significativi ai livelli 4 e 5 (in una scala che va da 0 = nessun danno a 4 = crollo parziale e 5 = crollo totale).

Quest'ultima ipotesi è non sempre condivisibile, dal momento che innescandosi il danno non strutturale generalmente prima del danno strutturale e dunque per livelli di danno più bassi, si potrebbero verificare situazioni in cui il collasso di partizioni interne (spesso supporto di oggetti e di mobili di arredo) siano la causa di feriti gravi. D'altra parte, la maggior parte degli edifici in c.a. esistenti sul territorio nazionale non possiede elementi di ancoraggio delle partizioni interne alla struttura; quindi tale situazione risulta tutt'altro che rara.

Un **modello empirico specifico per Paese/regione** è stato elaborato da **K. Jaiswal e D. Wald** all'interno dell'USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) system; esso consente di stimare il rapporto di mortalità medio specifico del Paese, espresso attraverso una distribuzione cumulativa di tipo log-normale, come una funzione dell'intensità macrosismica (MMI - Modified Mercalli Intensity).

9.2 Il modello di perdite attese di vite umane

È stato scelto come modello base per la stima delle vittime attese il **modello probabilistico su base statistica elaborato** (su scala mondiale) **da K. Jaiswal e D. Wald nel 2010** e particolarizzato per varie sismicità, compresa quella dell'Italia. Il database di terremoti di riferimento, per l'Italia, comprende gli eventi sismici verificatisi nell'arco temporale 1973 – 2007.

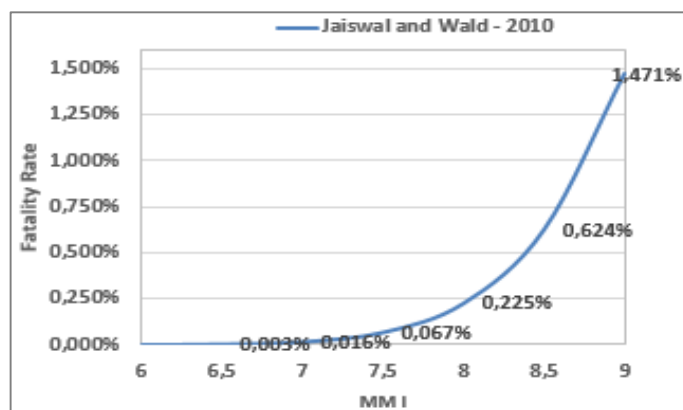


Figura 73.- Modello di stima delle perdite attese di vite umane – Jaiswal e Wald 2010.

In **Figura 73** viene riportata la rappresentazione del modello, particolarizzato per le intensità comprese tra VI e IX. Il modello, operante su base macrosismica, a partire da una funzione lognormale fornisce la distribuzione della % di morti sul totale della popolazione esposta, per ciascuna intensità.

La scelta è ricaduta su tale modello in quanto, oltre a fornire una distribuzione delle perdite attese di vite umane che appare realistica, si presta molto bene per collegare il rapporto di mortalità ai danni economici diretti, attraverso l'intensità macrosismica. Infatti, poiché la % dei morti è legata all'intensità macrosismica, risulta immediata la correlazione al danno sugli edifici; potendo legare la % di morti all'EAL attraverso l'intensità.

In questo modo, è immediato avere per ogni livello di intensità i corrispondenti valori delle perdite economiche dirette e delle perdite di vite attese, riuscendo così a collegare alla valutazione del rischio sismico e alla conseguente analisi di riduzione del rischio il dato relativo alla vita umana.

Il modello è stato sviluppato con l'obiettivo di indagare la distribuzione della percentuale di morti attesi sulle 5 classi di vulnerabilità EMS-98 AEMS, BEMS, CEMS, DEMS, EEMS, escludendo la classe FEMS che corrisponde ad un edificio "superantisismico", cui è stato attribuito quindi un rapporto di mortalità pari a 0 (nessun morto).

L'ipotesi alla base dell'elaborazione è che la % di morti attesi, a seguito di un evento sismico, sia proporzionale ai corrispondenti danni attesi (EAL), al crescere dell'intensità macrosismica.

Sulla base di questa assunzione, è stata ripartita la % di morti tra le 5 classi di vulnerabilità in funzione del danno ai vari livelli di intensità.

Per valutare la bontà dell'assunzione fatta, sono stati indagati i rapporti tra l'andamento del rapporto di mortalità (% di morti attesi rispetto alla popolazione esposta a quel livello di intensità) con l'intensità (I) e l'andamento delle perdite economiche attese (EAL) con gli stessi livelli di intensità. Il confronto, presentato nei grafici di **Figura 74**, per le 5 classi di vulnerabilità e la Zona 1, mostra il buon accordo dei due andamenti, che evidenziano come al crescere del danno crescano proporzionalmente le perdite in termini di vite umane.

L'accordo risulta migliore per livelli di intensità elevati (gli andamenti convergono); per livelli bassi di intensità, invece, l'approssimazione perde di accuratezza, risultando maggiore la dispersione del dato di base del modello. Nell'ipotesi, dunque, che la mortalità da sisma sia proporzionale ai danni al crescere dell'intensità macrosismica, si può ripartire la % di morti tra le classi di vulnerabilità in funzione del danno atteso ai vari livelli di intensità (ipotizzando la presenza di tutte le classi di vulnerabilità esclusa la F).

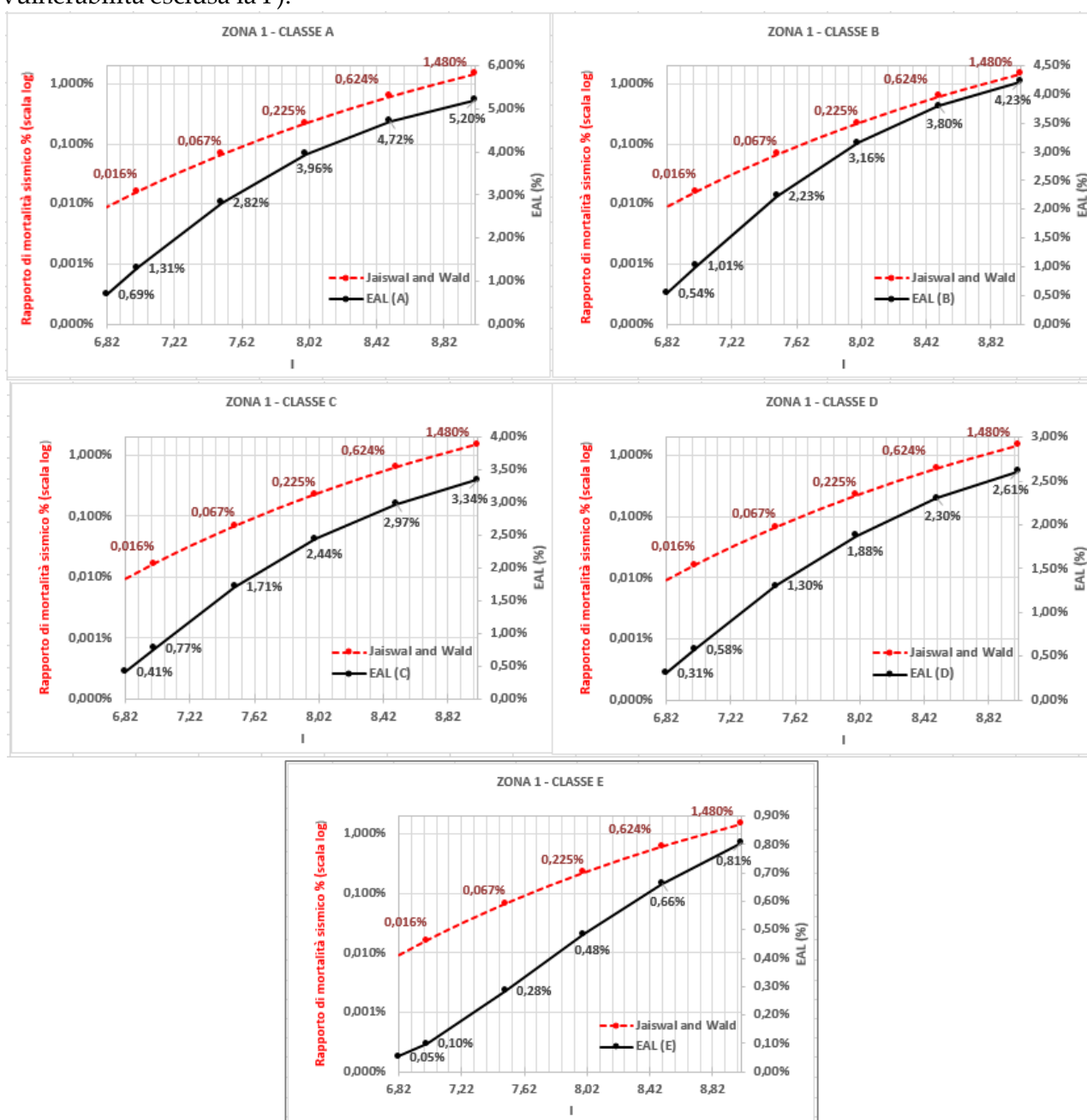
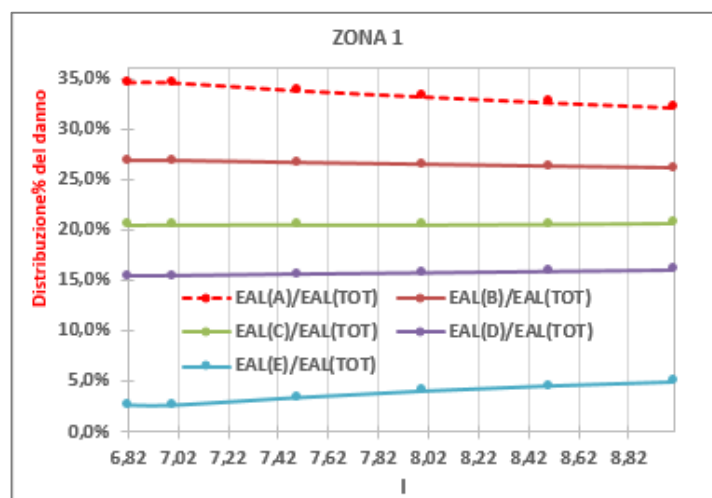


Figura 74.- Modello di stima delle perdite attese di vite umane (Jaiswal e Wald 2010) – danni attesi (EAL).

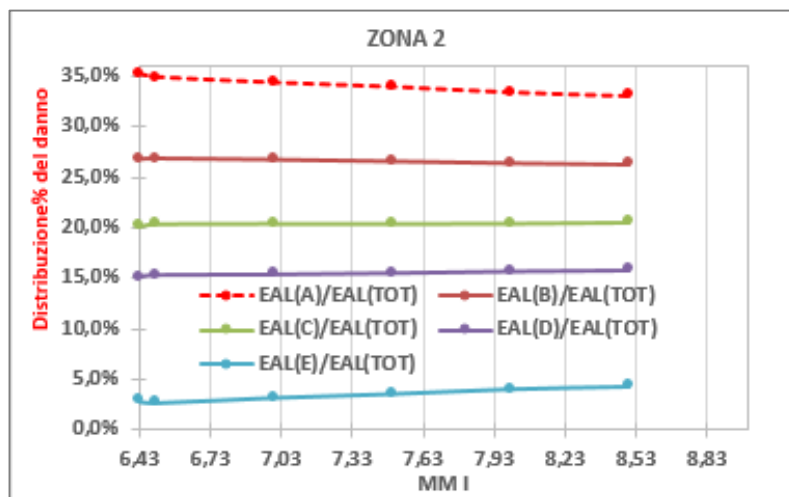
Nelle **Figura 75** e **Figura 76** vengono riportati, per ciascuna classe di vulnerabilità, gli andamenti

delle distribuzioni % di danno al crescere dell'intensità, rispettivamente per la Zona 1 e la Zona 2.



MM I	EAL _A /EAL _{TOT}	EAL _B /EAL _{TOT}	EAL _C /EAL _{TOT}	EAL _D /EAL _{TOT}	EAL _E /EAL _{TOT}
6,82	34,6%	26,9%	20,5%	15,4%	2,7%
7	34,6%	26,9%	20,5%	15,4%	2,6%
7,5	33,8%	26,7%	20,5%	15,6%	3,4%
8	33,2%	26,5%	20,5%	15,8%	4,1%
8,5	32,6%	26,3%	20,6%	15,9%	4,6%
9	32,2%	26,1%	20,6%	16,1%	5,0%

Figura 75.- Rapporti di danno (EAL), per le classi di vulnerabilità da A_{EMS} a E_{EMS}- Zona 1



MM I	EAL _A /EAL _{TOT}	EAL _B /EAL _{TOT}	EAL _C /EAL _{TOT}	EAL _D /EAL _{TOT}	EAL _E /EAL _{TOT}
6,43	35,2%	26,7%	20,1%	15,1%	2,8%
6,5	34,8%	26,8%	20,4%	15,3%	2,7%
7	34,3%	26,7%	20,4%	15,4%	3,2%
7,5	33,9%	26,6%	20,4%	15,5%	3,6%
8	33,4%	26,4%	20,4%	15,7%	4,1%
8,5	33,0%	26,3%	20,5%	15,8%	4,3%

Figura 76.- Rapporti di danno (EAL), per le classi di vulnerabilità da A_{EMS} a E_{EMS}- Zona 2

Indicando con : $P(m_A)$ - $P(m_B)$ - $P(m_C)$ - $P(m_D)$ - $P(m_E)$ le perdite attese di vite umane per ciascuna classe di vulnerabilità, la disaggregazione (in presenza delle 5 classi) fornisce la ripartizione della % di morti attesi sulle classi di vulnerabilità, per livelli di intensità.

Disaggregando, quindi, il rapporto di mortalità, espresso in % della popolazione esposta per intensità, tra le 5 classi di vulnerabilità EMS-98 (da A ad E) proporzionalmente al danno atteso (EAL/RC), mobilitato da ciascuna classe sul corrispondente livello di intensità, si ottengono le distribuzioni riportate nelle Figura 77 e Figura 78 , rispettivamente per la Zona 1 e per la Zona 2, limitatamente ad un intervallo di intensità comprese tra lo SLID e 9 (la disaggregazione può essere eseguita con riferimento a qualsiasi intervallo di intensità significativo per il caso).

MM I	$\alpha=5i/\theta$	Mortalità sismica (%)	$P(m_A)$	$P(m_B)$	$P(m_C)$	$P(m_D)$	$P(m_E)$
6,82	0,516	0,009%	0,0032%	0,0024%	0,0019%	0,0014%	0,0002%
7	0,529	0,016%	0,0056%	0,0044%	0,0033%	0,0025%	0,0004%
7,5	0,567	0,067%	0,0228%	0,0180%	0,0138%	0,0105%	0,0023%
8	0,605	0,225%	0,0747%	0,0596%	0,0461%	0,0354%	0,0091%
8,5	0,643	0,624%	0,2037%	0,1640%	0,1283%	0,0994%	0,0286%
9	0,680	1,471%	0,4728%	0,3841%	0,3035%	0,2369%	0,0733%

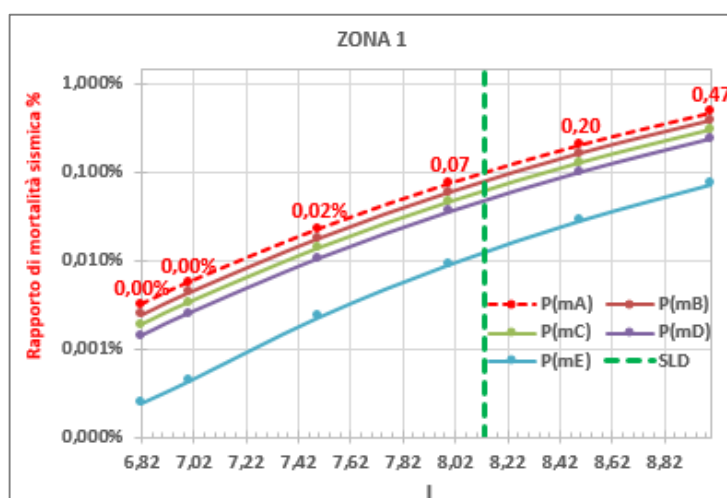


Figura 77.- Disaggregazione, in funzione di EAL, della % di morti attesi sulle classi da A EMS a E EMS- Zona 1

MM I	$\alpha=5i/\theta$	Mortalità sismica (%)	$P(m_A)$	$P(m_B)$	$P(m_C)$	$P(m_D)$	$P(m_E)$
6,43	0,486	0,002%	0,0008%	0,0006%	0,0005%	0,0003%	0,00006%
6,5	0,491	0,003%	0,0010%	0,0008%	0,0006%	0,0005%	0,0001%
7	0,529	0,016%	0,0056%	0,0043%	0,0033%	0,0025%	0,0005%
7,5	0,567	0,067%	0,0229%	0,0179%	0,0138%	0,0105%	0,0024%
8	0,605	0,225%	0,0751%	0,0594%	0,0460%	0,0354%	0,0091%
8,5	0,643	0,624%	0,2061%	0,1642%	0,1280%	0,0988%	0,0268%

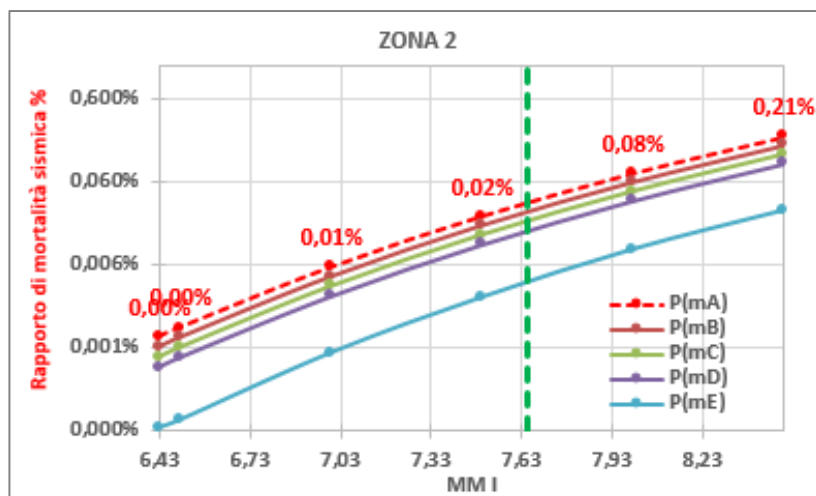


Figura 78.- Disaggregazione, in funzione di EAL, della % di morti attesi sulle classi da A_{EMS} a E_{EMS}- Zona 2

I grafici, di cui sopra, mostrano chiaramente come le classi EMS-98 da A a D, a differenza della classe E, siano sensibili al rischio di perdite di vite umane, manifestando curve di perdite molto vicine. Ciò non stupisce, se si pensa che le classi A e B presentano danni mediamente superiori all'80% di RC per livelli di intensità superiori a 8.

Nel grafico di **Figura 79**, si mettono a confronto il modello di Jaiswal e Wald e la curva delle perdite attese secondo ATC, cui si è fatto riferimento nella costruzione del modello di approccio macrosismico proposto.

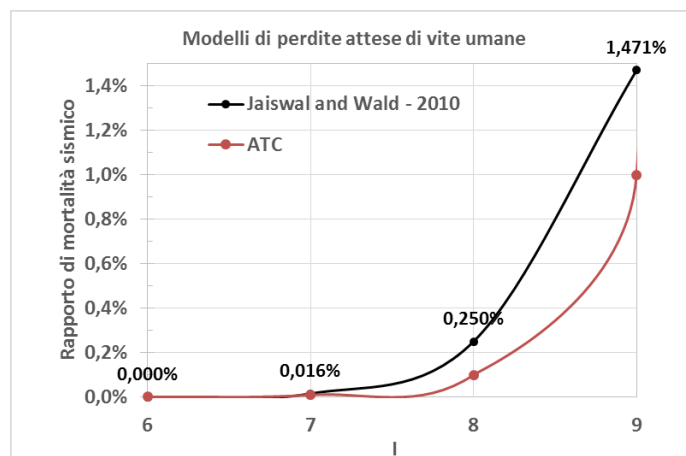
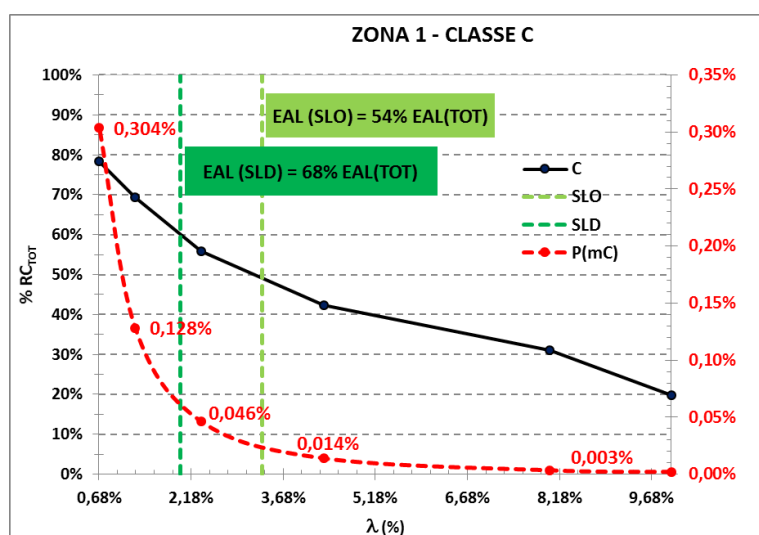
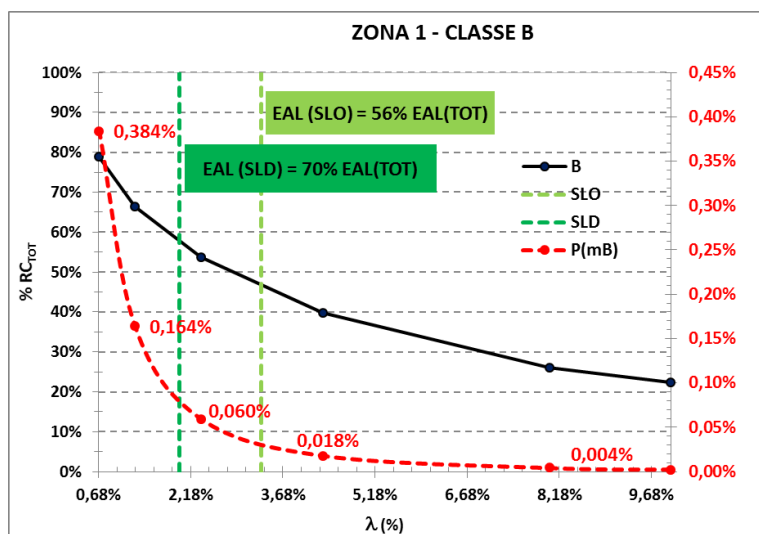
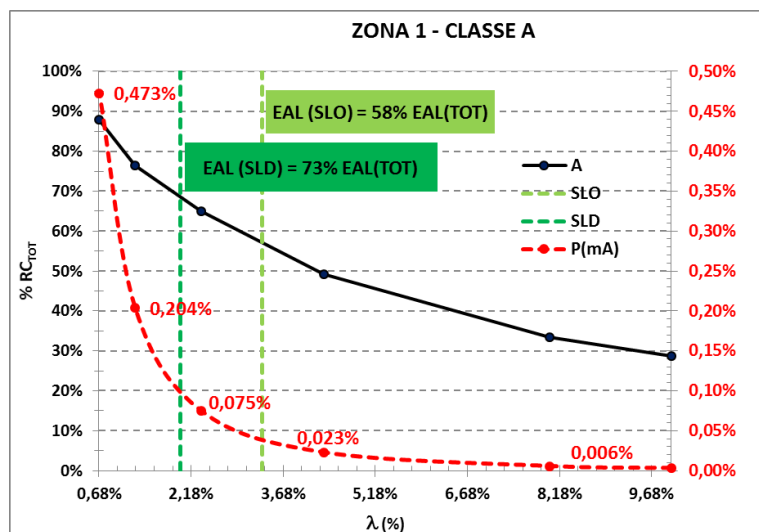


Figura 79.- Modelli di perdite attese di vite umane

Dal confronto emerge che la stima su base ATC tende a sottostimare le % di morti attesi; ciò risulta giustificabile se si pensa alla diversa vulnerabilità degli edifici Californiani rispetto a quella attribuita al patrimonio edilizio Italiano, che risulta sicuramente più vulnerabile.

Per concludere, si presentano una serie di grafici (in **Figura 80**) in cui vengono incrociati gli elementi indagati nel presente lavoro di tesi perché ritenuti fondamentali per eseguire una corretta valutazione del rischio sismico. Essi rappresentano, per le classi più vulnerabili, le distribuzioni delle perdite attese sia in termini di vite umane sia di costi diretti in funzione della frequenza di occorrenza, per la **Zona 1**.



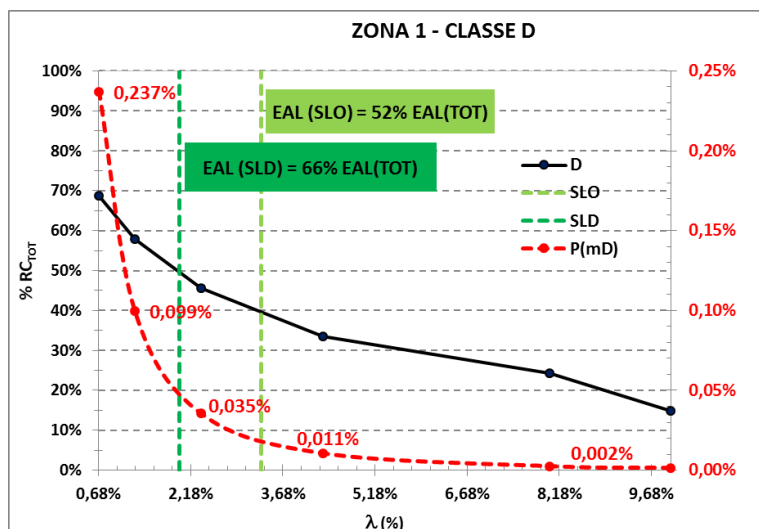


Figura 80.- Perdite economiche dirette vs Perdite attese di vite umane vs SLE
Classi da A_{EMS} a D_{EMS} (Zona 1)

I grafici mostrano chiaramente quali siano i fattori di interesse per eseguire valutazioni di rischio sismico finalizzate alla sua riduzione e come essi siano correlati.

9.3 Strategia di Riduzione del Rischio

La procedura di valutazione del rischio sismico ai fini della sua riduzione, qui proposta, può essere così sintetizzata:

1. caratterizzazione dell'esistente in termini di vulnerabilità costruttiva;
2. stima dei danni attesi in termini di %RC e delle perdite annue attese EAL;
3. stima delle perdite attese in termini di vite umane, disaggregate sulle classi di vulnerabilità $P(m_A) - P(m_B) - P(m_C) - P(m_D) - P(m_E)$;
4. incrocio degli elementi di cui ai precedenti punti da 1. a 3;
5. stima della distribuzione delle perdite economiche dirette attese nell'area significativa, oltre il cratere sismico [SEAL].

9.4 Le strategie di intervento

Per una scelta efficace di intervento è necessario, quindi, disporre, in primo luogo, di una valutazione del rischio sismico nei termini detti; in secondo luogo, occorre scegliere una o strategia di intervento.

Ricordando che la **vulnerabilità sismica** di un edificio è **determinata dal rapporto tra capacità e domanda** e la **domanda sismica** cui l'edificio è soggetto non dipende solo dalla pericolosità sismica del sito, ma anche dalla **risposta sismica** dell'edificio stesso, per ridurre il rischio sismico di un edificio **riducendone la vulnerabilità**, dunque, si può intervenire per:

1. aumentarne la capacità sismica;
2. ridurre la risposta sismica.

I **due approcci** non sono alternativi e possono essere adottati anche congiuntamente.

Viene presentato, di seguito, un esempio di **possibile strategia di intervento** appartenente alla tipologia 1, **finalizzata principalmente a ridurre la vulnerabilità nei confronti:**

- **degli SLE** (limitatamente alle zone 1, 2, 3) **per tutte le classi;**
- **degli SLU** (per tutte le zone) **privilegiando zone più sismiche (1 e 2) e classi più vulnerabili** (A_{EMS} , B_{EMS} , C_{EMS}).

Con riferimento alla **zona 1**, in **Figura 81**, partendo da un edificio di classe B_{EMS} , per **ridurre i danni agli SLE** si può intervenire allineando il comportamento dell'edificio alla classe C_{EMS} (contigua e meno vulnerabile) ottenendo una nuova curva delle perdite attese B'_{EMS} (in giallo), **che accusa danni più bassi agli SLE**.

A partire poi dalla nuova curva B'_{EMS} , si può intervenire per ridurre i danni agli SLU allineando il comportamento alla classe D_{EMS} , ottenendo una nuova curva delle perdite attese B''_{EMS} (in azzurro).

Il comportamento finale attribuibile all'edificio è rappresentato dalla spezzata azzurra tratteggiata.

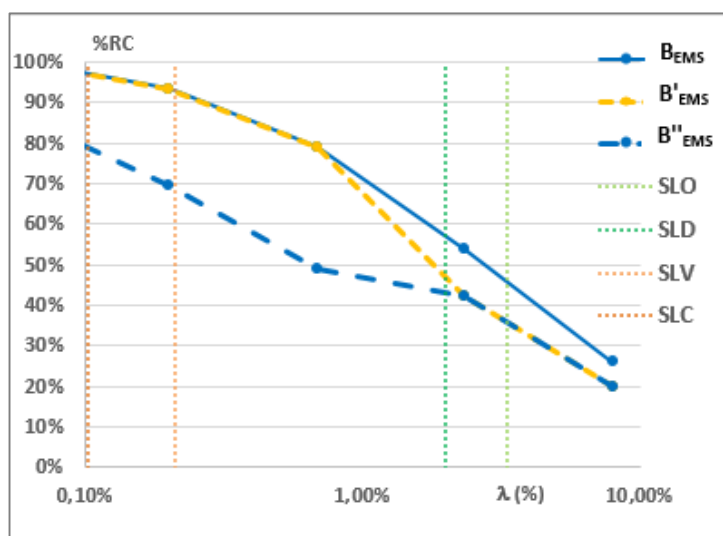


Figura 81.- Esempio di strategia di intervento di riduzione del rischio sismico (mediante aumento della sua capacità) – Zona 1

E' possibile quantificare la riduzione del rischio ottenuta in termini di abbattimento dei costi diretti attraverso la stima della riduzione dell'EAL ottenuta.

Infatti:

- **abbattendo i danni agli SLE** (passando dalla classe B_{EMS} al nuovo comportamento B'_{EMS}) **si ha una riduzione del danno atteso EAL del 15%;**
- **abbattendo i danni agli SLU** (passando dalla classe B'_{EMS} al nuovo comportamento B''_{EMS}) **si ha una riduzione del danno atteso EAL del 10%;**

Conseguendo, quindi, **una riduzione complessiva del 25% circa.**

9.5 Metodo speditivo per la stima della riduzione del rischio

A partire dalle curve delle perdite attese ottenute per le 6 classi di vulnerabilità EMS-98 relativamente alle 4 Zone sismiche, è stato costruito **un modello che consente di aggiornare la curva di vulnerabilità dell'edificio, a seguito di un intervento di riduzione del rischio, e di valutare contestualmente i nuovi danni in termini di costi attesi riferibili alle nuove caratteristiche di vulnerabilità dell'edificio.**

Si tratta di una procedura speditiva e versatile che consente di intervenire sul comportamento dell'edificio aumentando la sua capacità nei confronti degli SLE o degli SLU o intervenendo su entrambe i livelli, così da ottenere il comportamento più vantaggioso in termini di danni economici attesi. La procedura, inoltre, è interfacciabile con le valutazioni relative alla stima delle perdite attese in termini di vite umane secondo il modello proposto; quest'ultimo aspetto lo rende uno strumento molto interessante perché possiede i caratteri di efficacia nel caratterizzare il problema e di operatività che lo rendono facilmente utilizzabile.

Allo stato attuale, la procedura è in fase di miglioramento; seguirà poi l'applicazione a casi reali.

Il modello è stato elaborato costruendo le **curve interpolanti ai minimi quadrati** delle curve di vulnerabilità del modello macrosismico, relative alle 6 classi EMS-98 e per le Zone a più elevata sismicità. Nota la curva che caratterizza la vulnerabilità al variare della frequenza di occorrenza λ , è possibile attribuire in corrispondenza delle soglie relative agli SLE e agli SLU la capacità della struttura valutata a seguito di un intervento, esprimendola in termini dei corrispondenti danni attesi in %RC.

In **Figura 82** si riportano le **curve interpolanti**, relative alla sola componente **struttura**, pensando a interventi atti a ridurre la vulnerabilità strutturale, per la **Zona 1**.

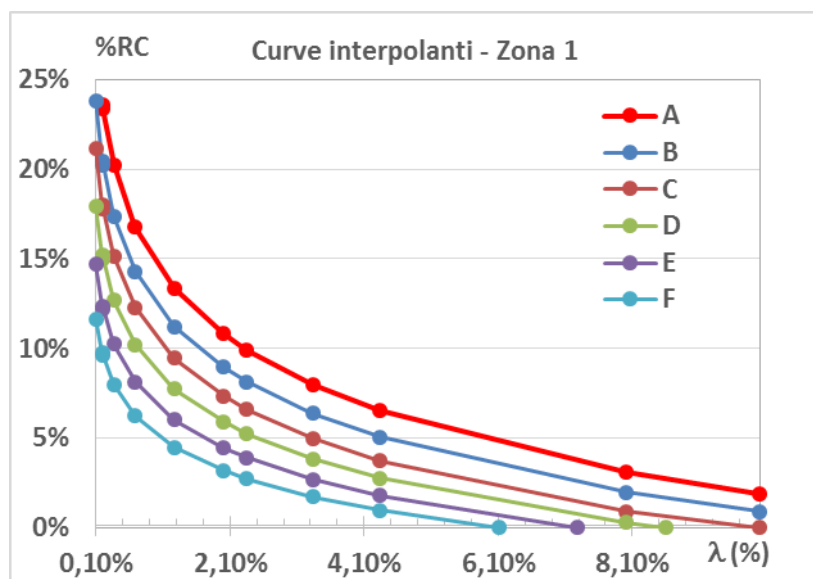


Figura 82.- Curve interpolanti - modello di riduzione del rischio sismico.

Le curve interpolanti sono state costruite a partire dalla forma logaritmica della funzione interpolante $y = a \ln(l) + b$; i coefficienti **a** e **b** sono stati determinati risolvendo il problema associato ai minimi quadrati :

$$\sum_i [y_i^* - y_i]^2 = \text{MIN} \quad \text{in cui} \quad y_i = \%RC_i \quad y_i^* = a \ln(\lambda) + b$$

$$d \sum_i [y_i^* - y_i]^2 / da = 0$$

$$d \sum_i [y_i^* - y_i]^2 / db = 0$$

Risolvendo il problema associato ai minimi quadrati per le 6 classi di vulnerabilità EMS-98, si ottengono le corrispondenti coppie di valori **a, b**.

I relativi valori di EAL si ottengono integrando la funzione logaritmica interpolante:

$$a[\lambda_{SLID} * \ln(\lambda_{SLID}) - \lambda_{SLID}] - \lambda_{SLC} * \ln(\lambda_{SLC}) - \lambda_{SLC}] + b(\lambda_{SLID} - \lambda_{SLC}).$$

Nelle **Figura 83** e **Figura 84** vengono riportati due esempi applicativi del metodo.

Il **primo esempio** si riferisce alla **riduzione del rischio agli SLE allineando il comportamento della classe di vulnerabilità B_{EMS} a quello della classe contigua meno vulnerabile C_{EMS}**; si osserva un miglioramento del comportamento anche agli SLU e una riduzione di EAL.

Il **secondo esempio** si riferisce alla **riduzione del rischio agli SLU allineando il comportamento della classe di vulnerabilità C_{EMS} a quello della classe contigua meno vulnerabile D_{EMS}**; si osserva una minore riduzione di EAL rispetto al caso precedente, confermando il fatto che la riduzione dei danni economici si riduce più utilmente intervenendo agli SLE.

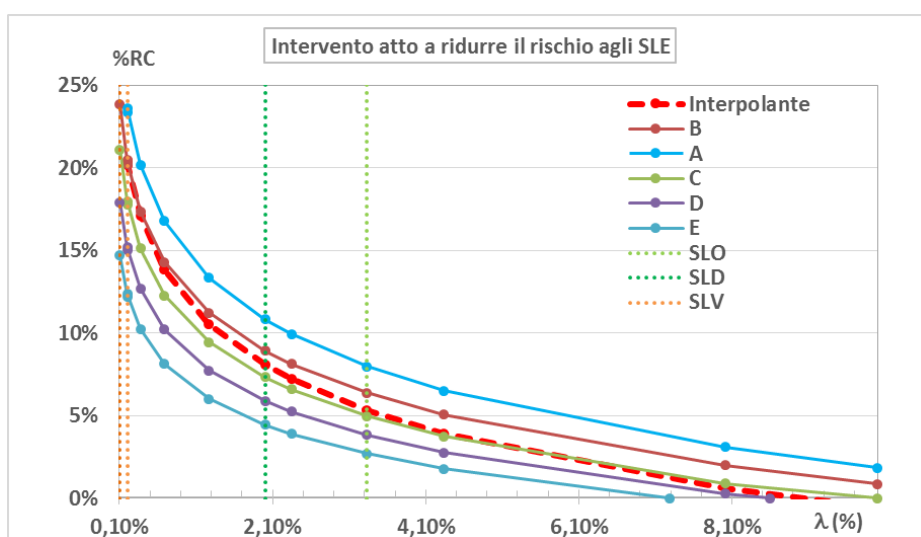


Figura 83.- Curve interpolanti - riduzione del rischio sismico agli SLE.

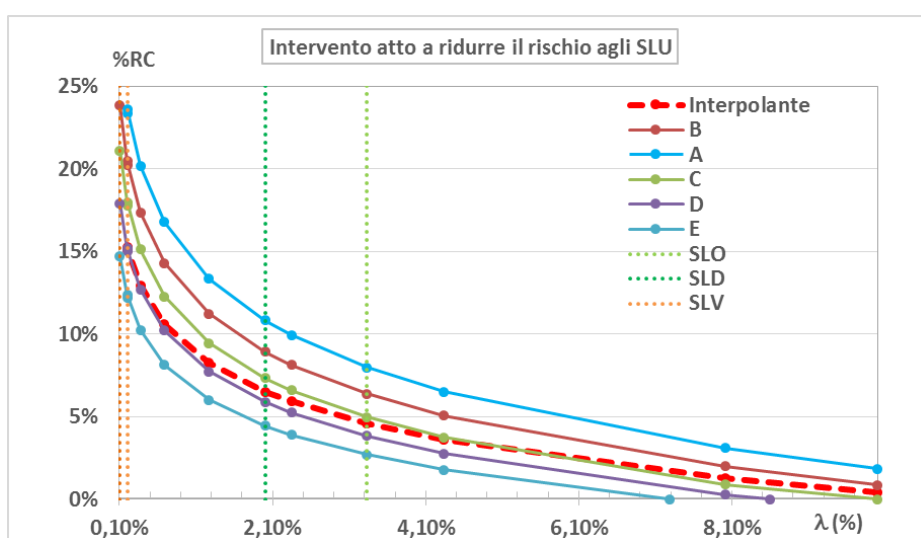


Figura 84.- Curve interpolanti - riduzione del rischio sismico agli SLU.

10. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il modello complessivo di valutazione e di riduzione del rischio sismico proposto, articolato nei due moduli:

- **valutazione del rischio con approccio macrosismico;**
- **riduzione del rischio con modello speditivo, con collegata valutazione delle perdite attese in termini di vite umane;**

si presta molto bene per analisi su larga scala, che, sicuramente, sono di particolare interesse se si pensa ad un piano esteso di interventi sul territorio.

Elementi del tutto nuovi, di cui non esiste ad oggi produzione scientifica, sono:

- **la valutazione del rischio, in termini analitici, nell'area al di fuori del cratere sismico;**
- **la stima delle perdite attese in termini di vite umane, su base macrosismica, disaggregata per classi di vulnerabilità.**

Sono, ancora, in corso :

- **altre analisi di calibrazione del modello macrosismico sulla base dati del sisma dell'Emilia del 2012;**
- **definizione di dettaglio dei criteri per l'attribuzione della classe media di vulnerabilità;**
- **analisi di comparazione del modello macrosismico con metodi analitici a livello di singoli edifici;**
- **applicazioni del modello a casi reali di edifici danneggiati a seguito di eventi sismici;**
- **miglioramenti del modello speditivo per la riduzione del rischio, in termini di interfaccia con i parametri che individuano la soglia di capacità della struttura al variare della tipologia di intervento.**

11.BIBLIOGRAFIA

- [1] Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08), D. Min. Inf. 14 gennaio 2008. Gazzetta Ufficiale n.29, February 4, 2008, Suppl. Ordinario n.30, Italy. (in Italian).
- [2] EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [3] Federal Emergency Management Agency, FEMA, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356". Washington D.C, 2000.
- [4] F. Braga, R. Gigliotti, G. Monti, F. Morelli, C. Nuti, I. Vanzi, W. Salvatore, "Post-seismic assessment of existing constructions: evaluation of the shakemaps for identifying exclusion zones in Emilia". *Earthquakes and Structures*, Vol. 8 (1), 2014 DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2015.8.1.895>.
- [5] Giovinazzi S (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Ph.D Thesis of the doctoral course "Risk Management on the built environment" jointly organized by University of Florence (I) and TU-Braunschweig (D)
- [6] Lagomarsino S., Giovinazzi S. "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering* (2006) 4: 415. doi:10.1007/s10518-006-9024-z.
- [7] CONSEIL DE L'EUROPE, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, European Macroseismic Scale 1998, Editor G. GRÜNTAL, Luxembourg 1998.
- [8] K.A. Porter, "An overview of PEER's Performance-based earthquake engineering methodology", ICASP9, Civil Engineering Risk and Reliability Association (CERRA), San Francisco, CA, July 6-9, 2003.
- [9] K.A. Porter, J. L. Beck, R. Shaikhutdinov, "Simplified Estimation of Economic Seismic Risk for Buildings". *Earthquake Spectra* (20):1239-1263, 2004.
- [10] Colombi M, Borzi B, Crowley H, Onida M, Meroni F, Pinho R. *Bulletin of Earthquake Engineering* (6th edn). Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data. Springer: Netherlands, 2008; 485–504. DOI: 10.1007/s10518-008-9073-6
- [11] Lantada N, Irizarry J, Barbat AH, Goula X, Roca A, Susagna T, Pujades LG. Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2009; 8: 201–229. DOI: 10.1007/s10518-009-9148-z
- [12] Braga F, Dolce M, Liberatore D. A statistical study on Damaged Buildings in the 23.11.1980 earthquake, and an ensuing review of the MSK76 scale. *Proc 7 European Conference on Earthquake Engineering*, 1982.
- [13] Sabetta F, Goretti A, Lucantoni A. Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, 1998.
- [14] L. Hengjian, M. Kohiyama, K. Horie, N. Maki, H. Hayashi, S. Tanaka, "Building damage and casualties after an earthquake. *Natural Hazards* 29:387–403, 2003.
- [15] Singhal A, Kiremidjian AS. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage. *Journal of Structural Engineering* 1996; 122: 1459–1467. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:12(1459)
- [16] Rossetto T, Elnashai A. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering Structures* 2005; 27: 397–409. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.11.002
- [17] Ibarra LF, Krawinkler H. Global collapse of frame structures under seismic excitations. Blume Center Technical Report, 2005.
- [18] Federal Emergency Management Agency (FEMA). HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology. US Federal Emergency Management Agency, 1999.

- [19] Federal Emergency Management Agency, FEMA, "Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage. FEMA E-74". Washington D.C., 2004.
- [20] G.M. Calvi, T.J. Sullivan, D.P. Welch, "Developing Direct Displacement-Based Procedures for Simplified Loss Assessment in Performance-Based Earthquake Engineering", *Journal of Earthquake Engineering* 18 (2), 2014. DOI: 10.1080/13632469.2013.851046
- [21] D.P. Welch, T.J. Sullivan, G. M. Calvi, "Developing direct displacement-based earthquake engineering". ROSE report 2012/03. IUSS Press Pavia.
- [22] M.J.N. Priestley, G.M. Calvi, M.J. Kowalsky, "Displacement-based seismic design of structures". IUSS Press, Pavia, 2007.
- [23] C.A. Cornell, F. Jalayer, R.O. Hamburger, D.A. Foutch, "The Probabilistic Basis for the 2000 SAC/FEMA Steel Moment Frame Guidelines". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 4, 2002.
- [24] S. Caprili, L. Nardini, W. Salvatore, Evaluation of seismic vulnerability of a complex RC existing building by linear and nonlinear modeling approaches, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Springer, vol. 10, n. 3, pp. 913-954, 2012.
- [25] G. Weatherill, V. Silva, H. Crowley, P. Bazzurro, "Exploring Strategies for Portfolio Analysis in Probabilistic Seismic Loss Estimation", *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013*, 28-30 August 2013, Vienna, Austria.
- [26] Silva, V., Crowley, H., Pinho, R. and Varum, H. (2013). Extending Displacement-Based Earthquake Loss Assessment (DBELA) for the Computation of Fragility Curves. *Engineering Structures*, 56, 2013.
- [27] F. Braga, F. Morelli, W. Salvatore, "A Macroseismic Approach for the Evaluation of Seismic Risk", in J. Kruis, Y. Tsompanakis, B.H.V. Topping, (Editors), "Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing", Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 91, 2015. doi:10.4203/ccp.108.91
- [28] OPCM 3274 del 20 marzo 2003: "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione del territorio nazionale e di normative tecniche" pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 105 May 08, 2003 (in Italian).
- [29] P. Stojanovski, W. Dong, "Simulation model for earthquake casualty estimation". *Proceedings of the Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, paper no. 00592, Chicago: 1045-1054, 1994.
- [30] M.E. Durkin, C.C. Thiel Jr., "Improving measures to reduce earthquake casualties". *Earthquake spectra*. 8 (1), 95-113, 1992.
- [31] ATC-13 - "Earthquake Damage Evaluation Data for California". Applied Technology Council. Redwood City, CA, 1985.
- [32] Gómez Capera A.A., Albarello D., Gasperini P., "Aggiornamento relazioni fra l'intensità macrosismica e PGA". Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D11, 2007, <http://esse1.mi.ingv.it/d11.html> (in Italian).
- [33] Margottini, C., D. Molin, L. Serva, "Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data", *Engineering Geology*, 33, 1, 45-58, 1992.
- [34] Faccioli, E., Cauzzi, C., "Macroseismic intensities for seismic scenarios estimated from instrumentally based correlations", *Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, paper number 569, 2006.
- [35] M. Dolce, E. Galanti, A. De Sortis, G. Di Pasquale, A. Goretti, R. Ferlito, F. Papa, S. Papa, A. Pizza, S. Sabato, M. Severino, "Iniziativa nazionali per la valutazione e riduzione del rischio sismo". DPC.
- [36] DPC – ReLUIS, "Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei Comuni colpiti dal sisma dell'Abruzzo del 6 aprile 2009"
- [37] M. Di Iudovico, A. Prota, C. Moroni, G. Manfredi, M. Dolce, "Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L'Aquila earthquake: part I – "light

- damage” reconstruction”. *Bulletin of Earthquake Engineering* (2016) 4: 415. doi:10.1007/s10518-016-9877-8.
- [38] P. Galli, R. Camassi, “Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009”. DPC – INGV.
- [39] F. Galadini, D. Pantosti, P. Boncio, P. Galli, P. Messina, P. Messina, P. Montone, A. Pizzi, S. Salvi, “The earthquake-April 6th 2009 and the present knowledge of the active faults in the Central Appennines”. *PROGETTAZIONE SISMICA* number 03 Special Issue
- [40] A. Tertulliani, L. Arcoraci, M. Berardi, F. Berardi, F. Bernardini, R. Camassi, C. Castellano, S. Del Mese, E. Ercolani, L. Graziani, I. Leschiutta, A. Rossi, M. Vecchi, “An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L’Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake”. *Bulletin of Earthquake Engineering* (2011) 4: 415. doi:10.1007/s10518-010-9188-4.
- [41] K. Jaiswal, M. EERI, D. Wald, “An Empirical Model for Global Earthquake Fatality Estimation” (2010)