

University of Bologna – Alma Mater Studiorum

Un approccio semplificato per analisi multi-hazard e multi-esposizione per edifici monumentali

APPLICAZIONE AL CASO STUDIO DUOMO DI MODENA

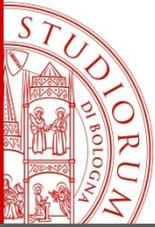


Outline

1. *Analisi di rischio sismico allo stato di fatto: sintesi*
2. *Analisi multirischio allo stato di fatto: sisma + incendio*
3. *Interventi di mitigazione del rischio sismico*
4. *Valutazione del rischio sismico nella condizione post-intervento*
5. *Analisi di rischio idraulico: metodologia*



Analisi di rischio sismico allo stato di fatto: sintesi

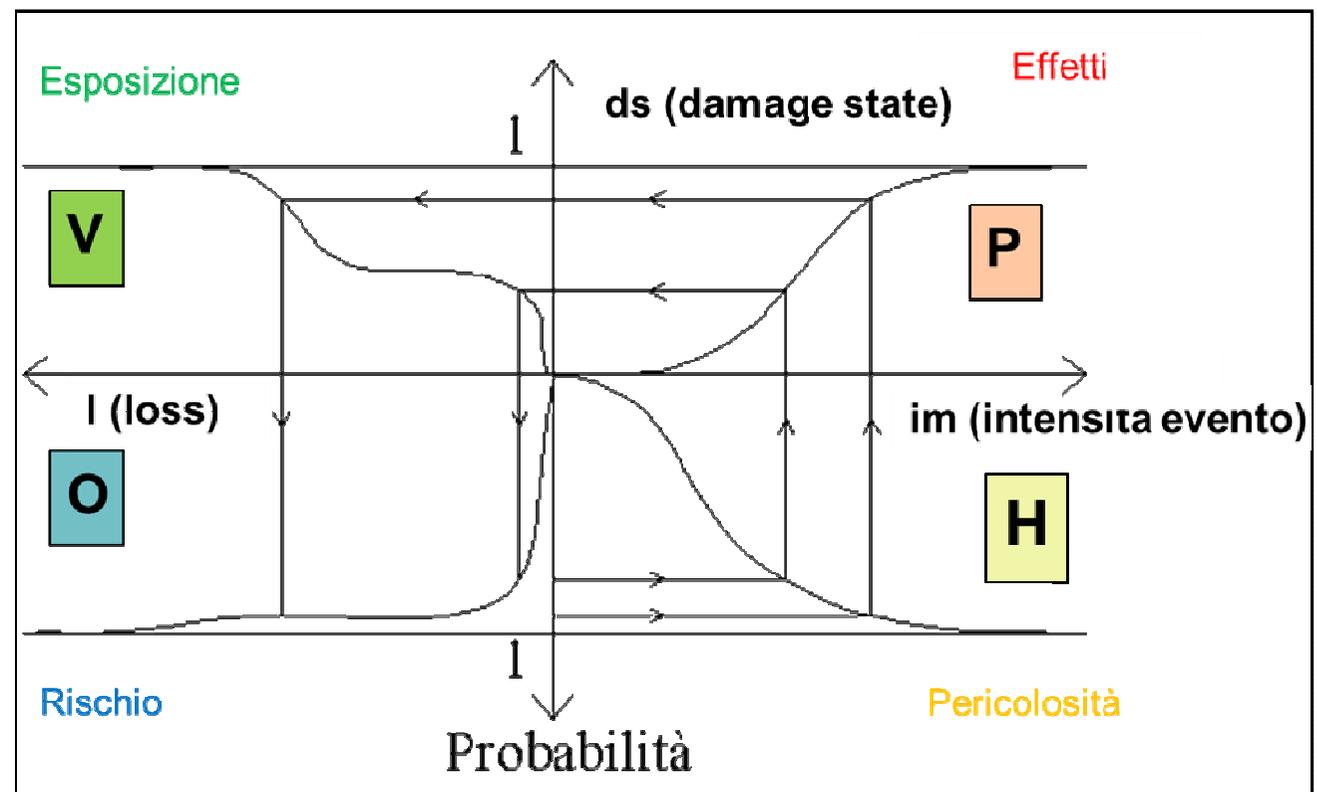


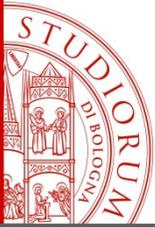
L'APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il processo logico e il corrispondente percorso di calcolo possono essere riassunti sinteticamente con riferimento alla figura riportata di seguito.

Definizioni

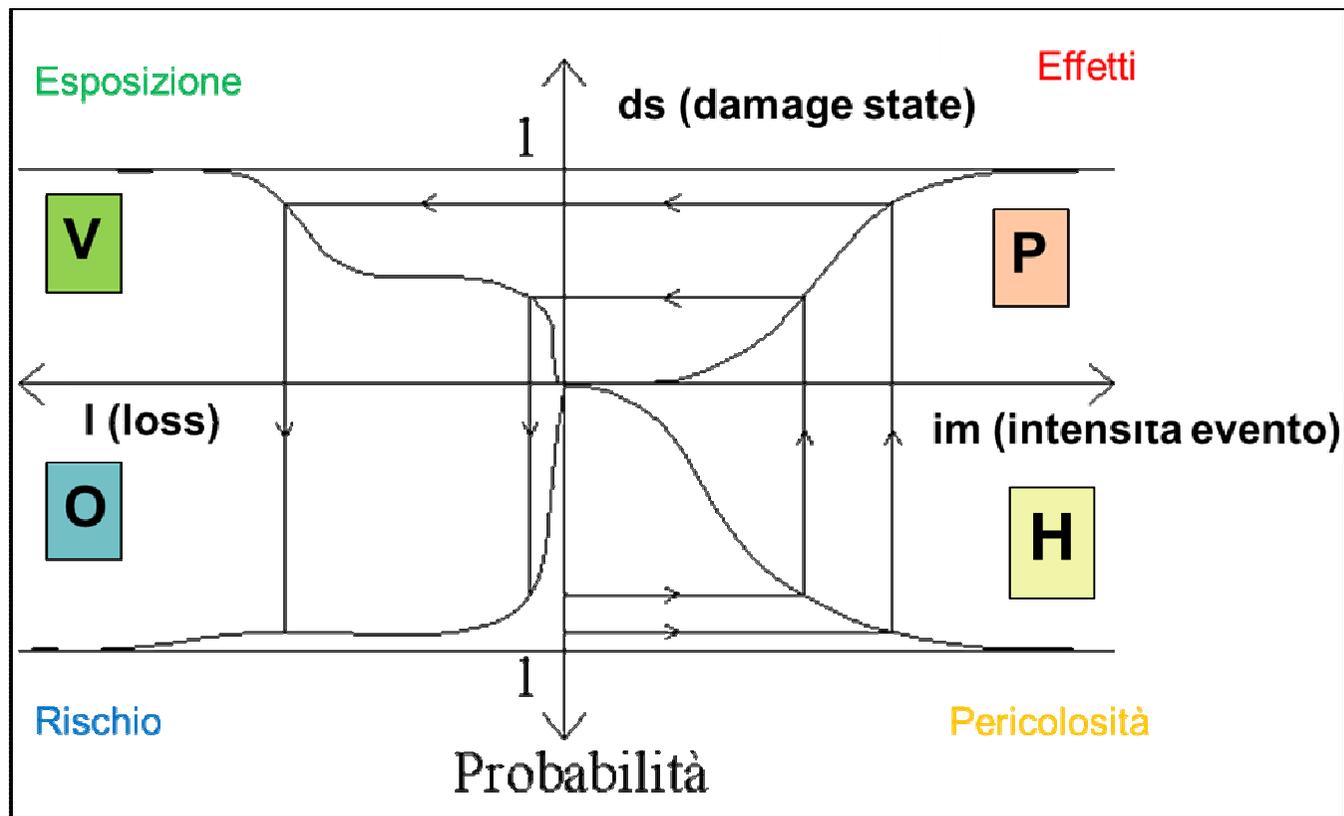
- **IM (intensity measure)= intensità dell'evento**
- **ds (damage state)= stato di danno**
- **L (loss)= Perdita economica**





L'APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

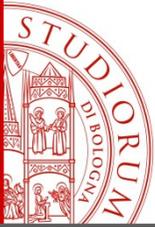
- **H** (hazard curve) = CDF(im)
- **V** (vulnerability) = curva di vulnerabilità
- **P** (performance curve) = curva di prestazione
- **O** = CDF (I) = output dell'analisi





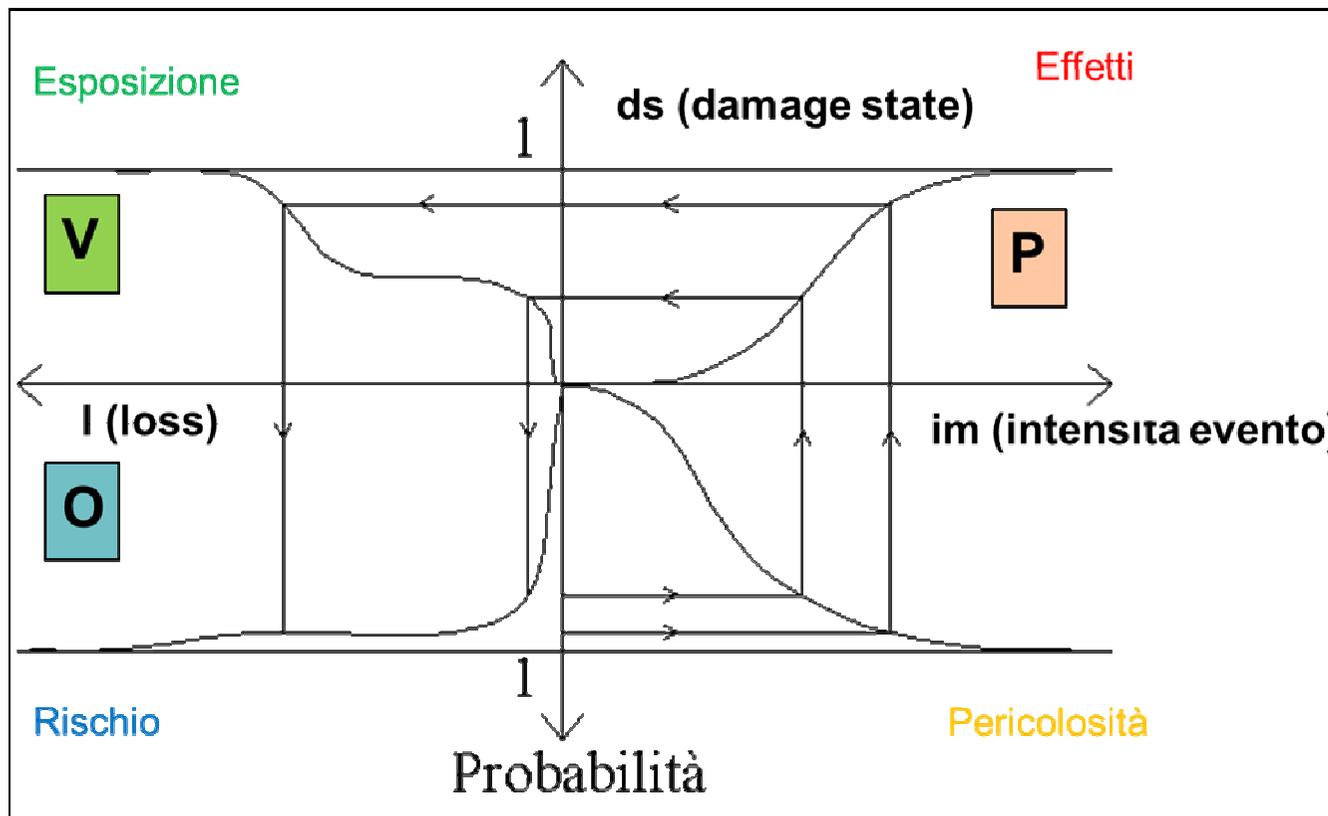
L'APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO CONSIDERANDO HAZARD SISMICO

CASO STUDIO: DUOMO DI MODENA

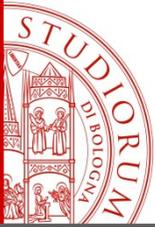


L'APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il processo logico e il corrispondente percorso di calcolo possono essere riassunti sinteticamente con riferimento alla figura riportata di seguito.



*Parametro di Hazard
PGA*



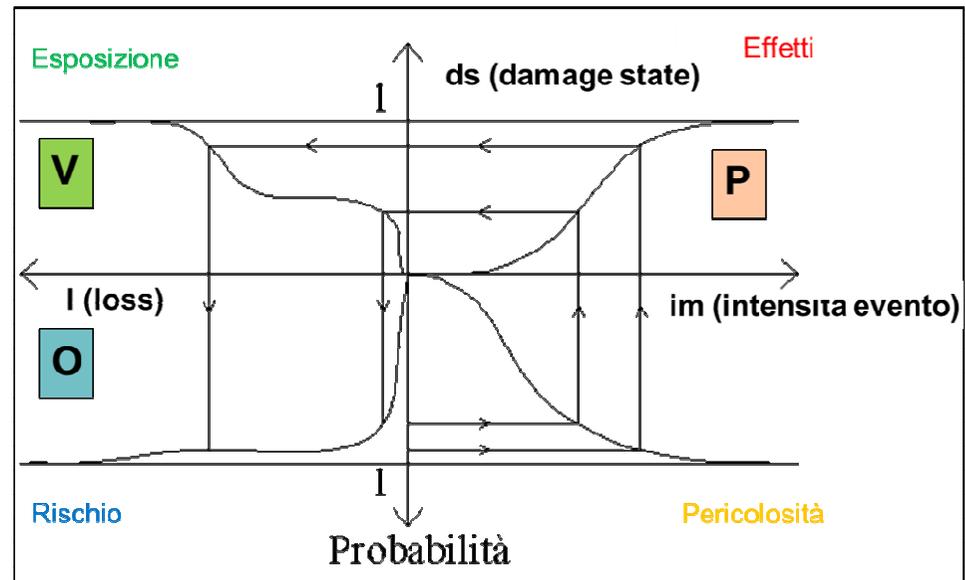
L'APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

Curva di pericolosità sismica H
- CDF della PGA

Curva di prestazione $P \Rightarrow Ds$
-funzione Ds -PGA $f(Pga)$

Curve di vulnerabilità $V_i \Rightarrow Li$
-funzioni Ds - Li

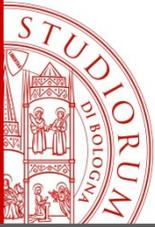
Curva di output
-CDF della Li



Variabili:

Ds = stato di danno

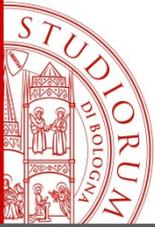
Li = perdita i -esima



Analisi Probabilistica di Pericolosità Sismica (PSHA)

La PSHA viene condotta secondo la **metodologia proposta da C.A. Cornell** (Stanford University, California) nel 1968:

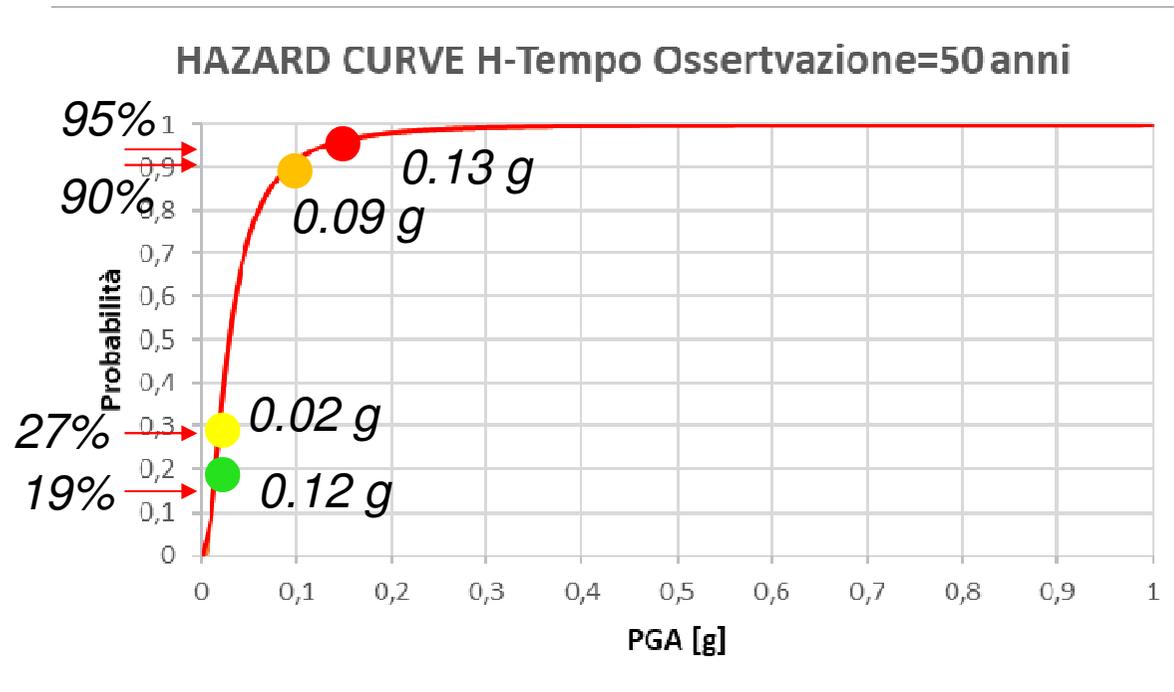
1. Scelta di un opportuno **catalogo sismico di riferimento** ed individuazione delle zone sorgenti di eventi sismici (dette anche **Zone Sismogenetiche**).
2. Legge di occorrenza (schematizzazione degli eventi sismici come **processi di Poisson**)
3. Parametrizzazione delle **leggi di ricorrenza (Gutenberg-Richter)** dei terremoti per ciascuna zona sorgente, ossia definizione di una relazione tra il periodo di ritorno e magnitudo sismica per ciascuna zona sorgente.
4. Parametrizzazione della propagazione dell'evento sismico da ciascuna zona sismogenetica sino al sito in esame, attraverso l'uso di **leggi di attenuazione** specificamente sviluppate per il territorio italiano.
5. **Calcolo probabilistico dell'hazard complessivo** (pericolosità sismica) per il sito preso in esame => risultato curva di hazard CDF della PGA



HAZARD CURVE (H)

- **Hazard curve H**: curve Probabilità di occorrenza –Parametro di Hazard (PGA per il caso sismico).

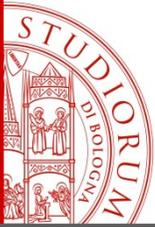
IM = misura di intensità sismica (PGA) Tempo di osservazione 50 anni



$$F_{IM}(im) = H$$

$$F_{PGA} = \Pr[PGA \leq \overline{pga}]$$

probabilità di avere specifici valori di accelerazione di picco del suolo PGA



DEFINIZIONE DELLA VARIABILE DI DANNO (DS) E CORRISPONDENZA CON GLI STATI LIMITE

Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati definiti 4 diversi stati limite di danno come segue:

Damage State DS (variabile continua con valori da 0 a 4):

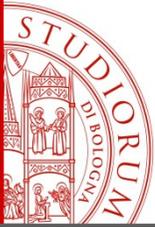
Sono stati definiti i seguenti specifici valori della variabile Ds:

1= SLO *raggiungimento dello Stato Limite di Operabilità definito come assenza di danno per gli elementi strutturali*

2=SLD *raggiungimento dello Stato Limite di Danno definito come raggiungimento di fessure negli elementi strutturali secondari (volte, archi..)*

3=SLV *raggiungimento dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita definito come il raggiungimento di danni consistenti ad elementi strutturali (es. crollo anche parziale di volte e torrini) che può mettere a repentaglio le vite umane*

4=SLC *raggiungimento dello Stato Limite di Collasso inteso come collasso totale o esteso (es. pareti delle navate, facciate, absidi, ...)*



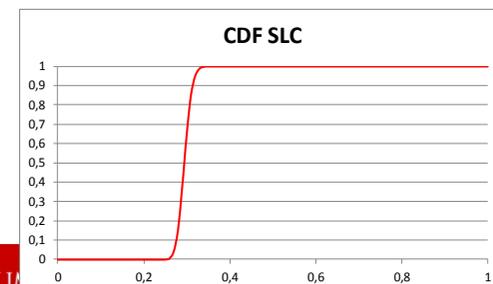
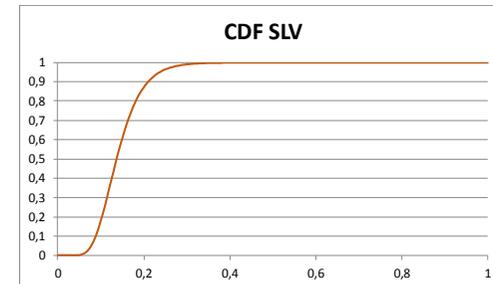
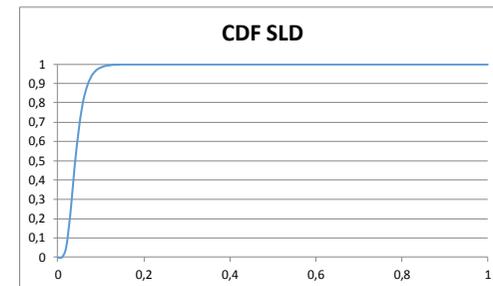
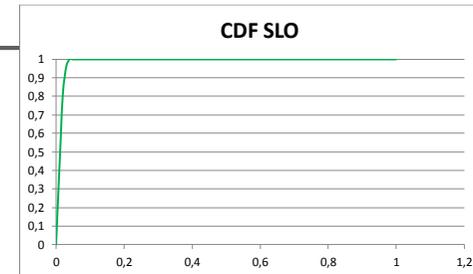
PERFORMANCE CURVE (P)

Le analisi e valutazioni sono state utilizzate per ottenere, per ciascuno stato limite, le seguenti due informazioni :

- *Il valore medio della accelerazione di innesco*
- *La dispersione (COV)*

Dalle informazioni sono state costruite 4 curve di fragilità, una per ogni stato limite

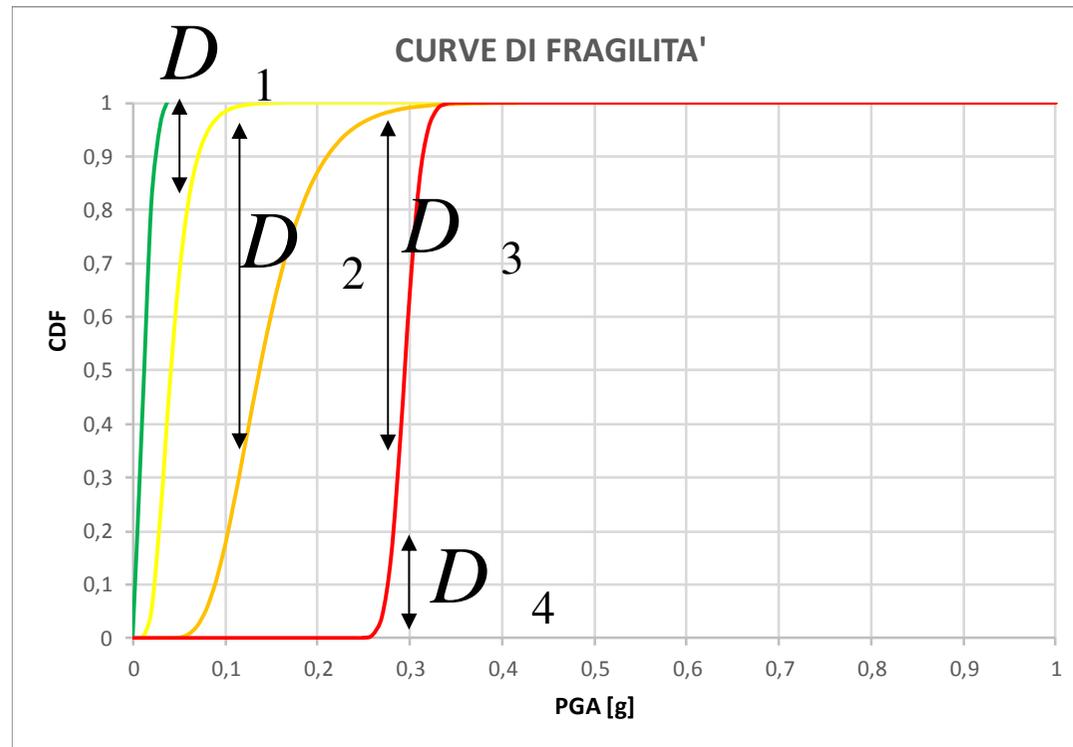
Le 4 curve di fragilità sono state combinate per ottenere la curva di prestazione



PERFORMANCE CURVE (P)

- **P: curve di prestazione.** La curva di prestazione associa in modo «deterministico» ad ogni valore del parametro identificativo della **pericolosità** un corrispondente **indice di danneggiamento**.

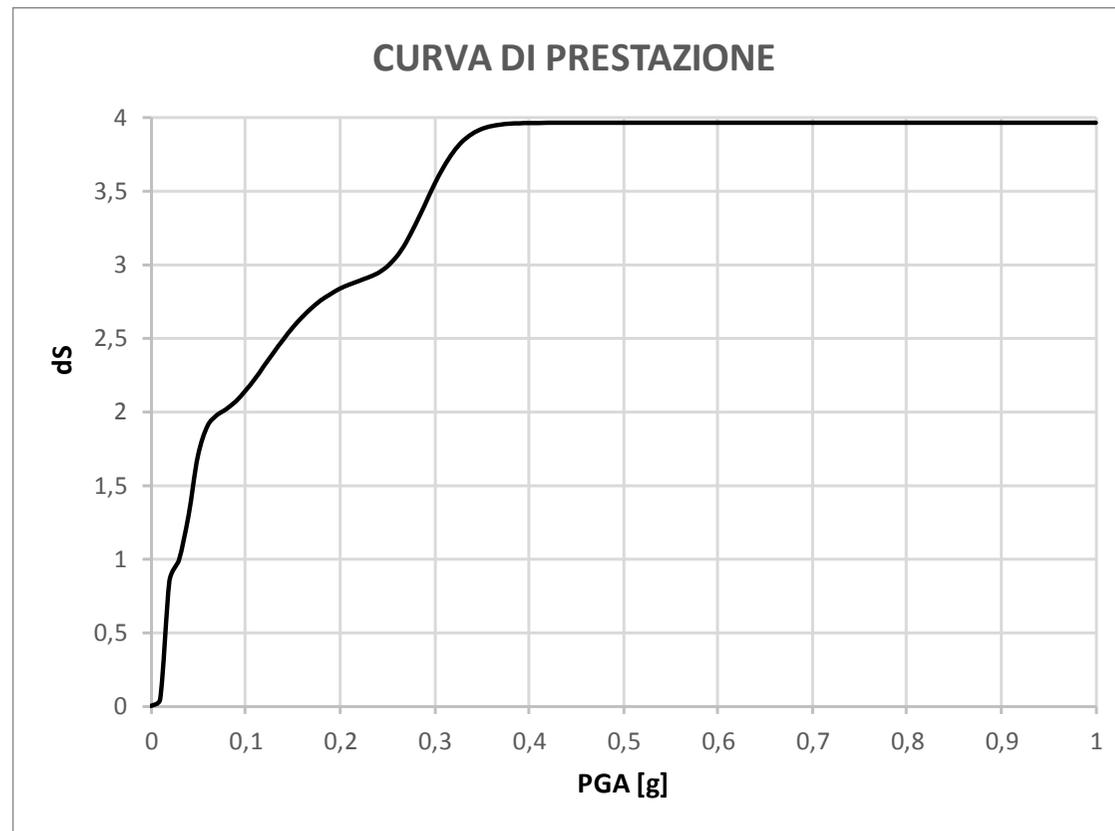
$$P(pga) = \sum_i D_i(pga) \cdot Ds_i$$

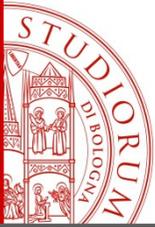




PERFORMANCE CURVE (P)

- **P: curve di prestazione.** La curva di prestazione associa in modo «deterministico» ad ogni valore del parametro identificativo della **pericolosità** un corrispondente **indice di danneggiamento**.





VALORI MEDI DELLE PGA CORRISPONDENTI AI 4 STATI LIMITE-PRE MITIGAZIONE

Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati definiti i valori medi delle PGA corrispondenti ai 4 stati limite come segue:

1= SLO raggiungimento dello Stato Limite di Operabilità (definito come il raggiungimento di lievi fessure negli elementi non strutturali) per **PGA= 0,02g (COV=0.25)**

2=SLD raggiungimento dello Stato Limite di Danno (definito come raggiungimento di fessure negli elementi strutturali secondari) per **PGA= 0,05g (COV=0.25)**

3=SLV raggiungimento dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (definito come il raggiungimento di danni consistenti ad elementi strutturali che può mettere a repentaglio le vite umane) per **PGA= 0,15g (COV=0.30)**

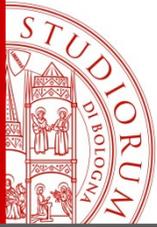
4=SLC raggiungimento dello Stato Limite di Collasso (inteso come collasso totale o parziale degli elementi strutturali principali) per **PGA= 0,3g (COV=0.30)**



VALUTAZIONE QUANTITATIVA DEI PUNTI DELLA FUNZIONE PGA-DS CORRISPONDENTE AI DIVERSI STATI LIMITE

La risposta sismica del Duomo di Modena è stata analizzata considerando la reale risposta del monumento agli eventi **sismici passati (basandosi sui dati storici)** e attraverso analisi e simulazioni numeriche.

- **ANALISI STORICA DETERMINISTICA**
- **ANALISI E SIMULAZIONI**
 - **LV1**
 - **LV2**
 - **LV3**



IDENTIFICAZIONE DEGLI STATI LIMITE PER DEFINIRE ds (Damage State)

RISPOSTA SISMICA DEL DUOMO BASATA SU DATI STORICI

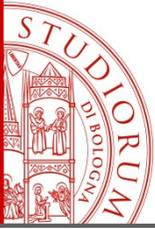
L'intensità dei **sismi storici specifici** che sono avvenuti nel passato sono stati ricostruiti tramite **un'analisi deterministica storica**.

L'analisi deterministica storica mostra che nei **circa 1000 anni di "vita" del Duomo**, alla sua base si sono verificati:

- 4 scuotimenti sismici caratterizzati da valori di accelerazione massima al suolo (PGA) compresa tra **0,15 e 0,25g** (in media quindi ogni 250 anni)
- 20 scuotimenti sismici caratterizzati da valori di accelerazione massima al suolo (PGA) compresi tra **0,05 g e 0,15 g**. In media quindi ogni 50 anni si è verificato uno scuotimento "non trascurabile".

Le evidenze storiche hanno mostrato che:

- per sismi caratterizzati da un'accelerazione tra **0,15 g e 0,25 g** il Duomo ha riportato **danni consistenti** che coinvolgono prevalentemente **i torrini e le volte**.
- per sismi caratterizzati da un'accelerazione tra **0,05 g e 0,15 g**, si sono rilevati **danni minori** prevalentemente **sulle volte**.



IDENTIFICAZIONE DEGLI STATI LIMITE PER DEFINIRE ds (Damage State)

RISPOSTA SISMICA DEL DUOMO INVESTIGATA ATTRAVERSO SIMULAZIONI NUMERICHE

RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV1:

una preliminare valutazione della vulnerabilità globale del manufatto attraverso una stima dell'accelerazione al suolo corrispondente al raggiungimento del SLV del bene

RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV2:

Suddivisione della fabbrica in macroelementi e individuazione dei corrispondenti meccanismi di collasso e dell'accelerazione d'innescio.

Per il Duomo sono stati considerati i seguenti macroelementi: la facciata, l'aula, le pareti longitudinali, il colonnato, le volte, il transetto, l'arco trionfale, e l'abside.

RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV3:

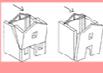
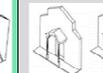
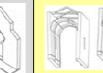
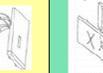
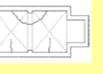
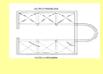
Valutazione della sicurezza sismica della costruzione nel suo complesso, identificando l'accelerazione del suolo che porta allo stato limite ultimo della costruzione globale o di parti significative di essa mediante modellazioni agli elementi finiti rappresentative dell'intera struttura.

RISULTATI LV1-LV2-LV3

RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV1:

valore dell'accelerazione al suolo PGA corrispondente al raggiungimento della condizione SLV pari a 0,205 g

RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV2:

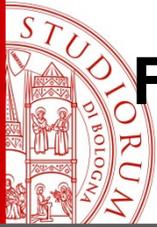
1. OVERTURNING OF THE FACADE  0.13 g	2. OVERTURNING TOP OF THE FACADE  0.06 g	3. IN PLANE MECHANISMS OF THE FACADE  0.33 g	4. PROTHYRUM 	5. TRANSVERSAL RESPONSE OF THE AULA  0.17 g	6. SHEAR IN THE LATERAL WALLS  0.31 g	7. LONGITUDINAL RESPONSE OF THE COLUMNS  0.14 g
8. VAULTS OF THE CENTRAL NAVE  0.19 g	9. VAULTS OF THE AISLES  0.21 g	10. OVERTURNING TRANSEPT WALLS  0.13 g	11. SHEAR IN THE TRANSEPT  0.24 g	12. VAULTS OF THE TRANSEPT  0.12 g	13. TRIUMPHAL ARCHES  0.07 g	14. DOME 
15. LANTERNA 	16. OVERTURNING OF THE APSE  0.34 g	17. SHEAR MECHANISMS ON THE APSE 	18. VAULTS OF THE APSE 	19. ROOF SYSTEM 	20. ROOF OF THE TRANSEPT 	21. ROOF OF THE APSE 
a < 0.15 g			22. PLAN AND EIGHT LATERALS 	26. AGGETTI (PINNACLES)  0.21 g	27. BELL TOWER 	28. CELL BELL 
0.15 g < a < 0.25 g				Not present, or static patterns insufficiently representative of reality		
a > 0.25 g						

Gli elementi che risultano essere più vulnerabili sono, in ordine decrescente:

- **sommità della facciata:** acc. di innesco di circa **0,06g**
- **archi trionfali:** acc. di innesco di circa **0,07g**
- **volte del transetto:** acc. di innesco di circa **0,12g**
- **facciata:** acc. di innesco di circa **0,13g**
- **pareti del transetto:** acc. di innesco di circa **0,13g**
- **risposta longitudinale del colonnato:** acc. di innesco di circa **0,14g**.

Tali elementi presentano vulnerabilità per sismi caratterizzati da accelerazioni inferiori a 0,15 g. Per terremoti caratterizzati da un'acc. compresa tra 0,15g-0,25g risultano vulnerabili anche: **torrini, absidi transetto e aula.**

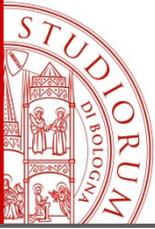
RISPOSTA SISMICA BASATA SU LV3: i paramenti murari non mostrano particolari criticità



FATTORI DI ESPOSIZIONE PER EDIFICI MONUMENTALI

Alcune possibili fattori di esposizione sono descritti di seguito a cui è associata la relativa variabile aleatoria che tiene conto della relativa/equivalente perdita economica (L_i):

1. **Danni al Contenitore:** danni all'involucro esterno dell'edificio (L_1)
2. **Danni al Contenuto:** danni a tutto ciò che è presente all'interno dell'edificio (L_2)
3. **Danni a Beni di valore artistico:** danni a beni di valore storico/artistico presenti all'interno o all'esterno dell'edificio come statue, dipinti, affreschi (L_3)
4. **Danni da mancata fruibilità:** mesi di mancato utilizzo (L_4)
5. **Danni economico da mancata fruibilità:** mesi di mancato utilizzo (L_5)
6. **Danno sociale:** impatto che la perdita/danneggiamento di un bene culturale ha sulla società (L_6)
7. **Casualità:** numero di vittime (L_7)
8. **Danno economico da Casualità:** numero di vittime (L_8)
9. **Danni da impedimento di Viabilità:** ingombro stradale da crollo (L_9)

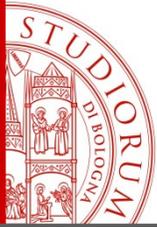


CURVA DI VULNERABILITA' V1

*La curva di VULNERABILITA' V1 è associata ai fattori di esposizione L1 e tiene conto della relativa/equivalente perdita economica relativa ai **Danni al Contenitore**.*

*Per **DANNI AL CONTENITORE** si intendono: danni all'involucro esterno dell'edificio, di tutti gli elementi strutturali quali volte, archi, copertura, torrini e rosone.*





CURVA DI VULNERABILITA' V1

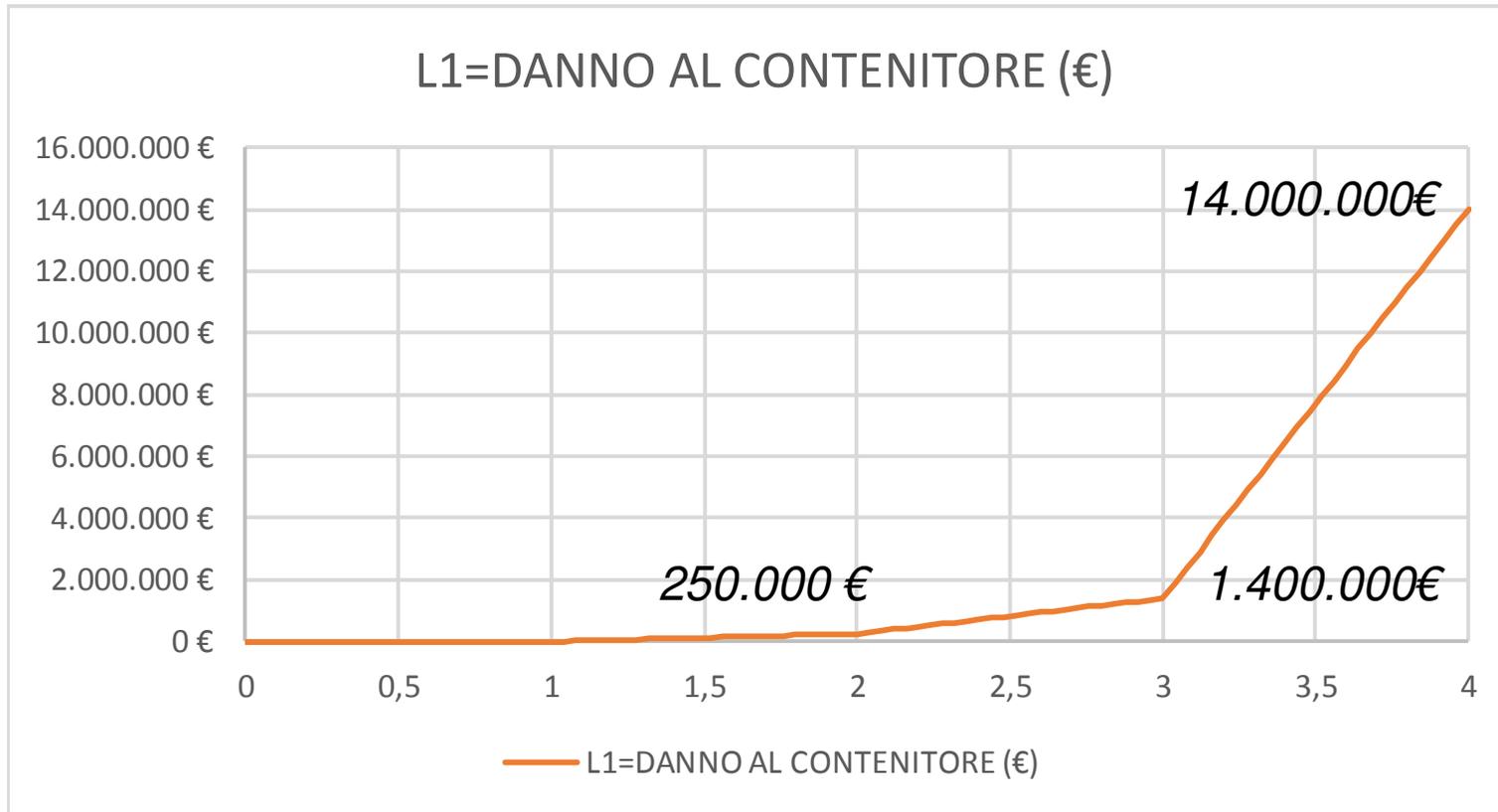
Per **DANNI AL CONTENITORE** si intendono: danni all'involucro esterno dell'edificio, di tutti gli elementi strutturali quali volte, archi, copertura, torrini e rosone.

Damage States	Descrizione della variabile V	Danno al contenitore [€]	Considerazioni sulla stima economica del danno / Fonte
1 SLO PGA=0,02g	Assenza di danni strutturali	0 €	/
2 SLD PGA=0,05g	Lievi fessure su volte e archi con assenza di crolli	250.000 €	Costo degli interventi effettuati sul Duomo di Modena a seguito dei danni del sisma 2012
3 SLV PGA=0,15g	Fessurazioni importanti e diffuse nelle volte, crollo parziale di alcune volte e torrini	1.400.000€	Costo stimato dell'intervento di ripristino (circa 800 euro a mq)
4 SLC PGA=0,30g	Crolli estesi che possono interessare anche i paramenti murari	14.000.000€	Costo stimato sulla base del costo di ricostruzione post- sisma della Basilica di Collemaggio, corretto tenendo in conto della estensione relativa dei due edifici*

$$*A_{\text{DuomoModena}} = 67 \times 25 = 1675 \text{ mq}$$
$$A_{\text{Collemaggio}} = 61 \times 27 = 1647$$



CURVA DI VULNERABILITA' V1

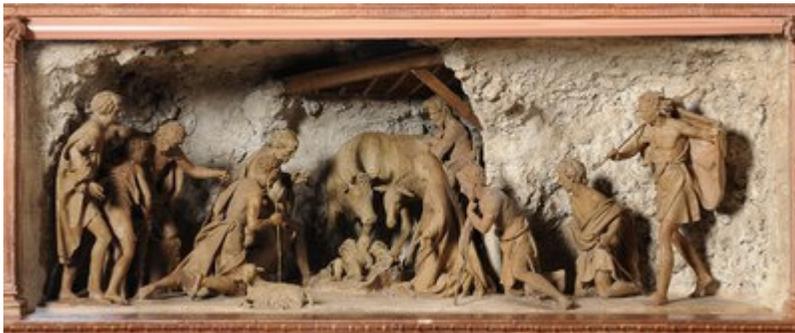


CURVA DI VULNERABILITA' V2

La curva di VULNERABILITA' V2 è associata ai fattori di esposizione L2 e tiene conto della relativa/equivalente perdita economica relativa ai **Danni al Contenuto**.

Per **DANNI AL CONTENUTO** si intendono: danni a tutto ciò che è presente all'interno dell'edificio.

Necessità di una stima accurata di un perito per valutare il costo delle opere d'arte presenti all'interno del Duomo



Presepio in terra cotta (Begarelli)



Il diluvio universale



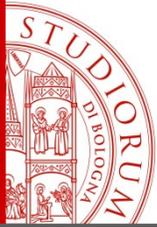
Altare di San Gimignano, XII sec

Madonna della Pappa di
Guido Mazzoni



Cappella Bellincini
(Cristoforo de Lendinara)





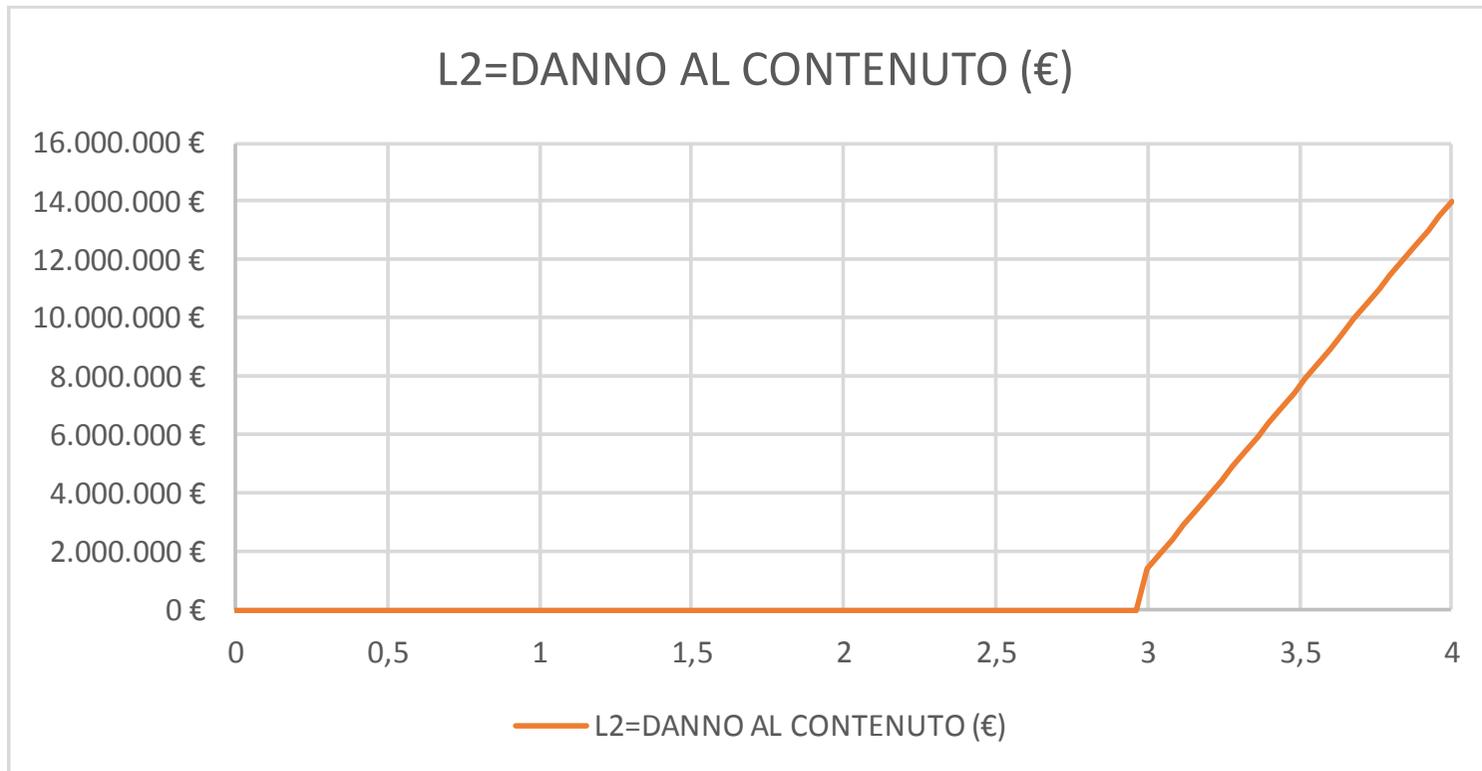
CURVA DI VULNERABILITA' V2

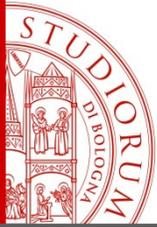
Per **DANNI AL CONTENUTO** si intendono: si intendono: danni a tutto ciò che è presente all'interno dell'edificio.

Damage State ds	Descrizione variabile V	Danno al contenuto [adimensionalizzato al valore complessivo]	Considerazioni sulla stima economica del danno
1 SLO PGA=0,02g	No danno	0	Non sono presenti affreschi all'interno del Duomo
2 SLD PGA=0,05g	No danno (assenza di affreschi nelle volte)	0	Non sono presenti affreschi all'interno del Duomo
3 SLV PGA=0,15g	Danneggiamento di circa il 10% delle opere d'arte	0.1	Stima perito
4 SLC PGA=0,30g	Danneggiamento della totalità delle opere d'arte	1	Stima perito



CURVA DI VULNERABILITA' V2





CURVA DI VULNERABILITA' V4

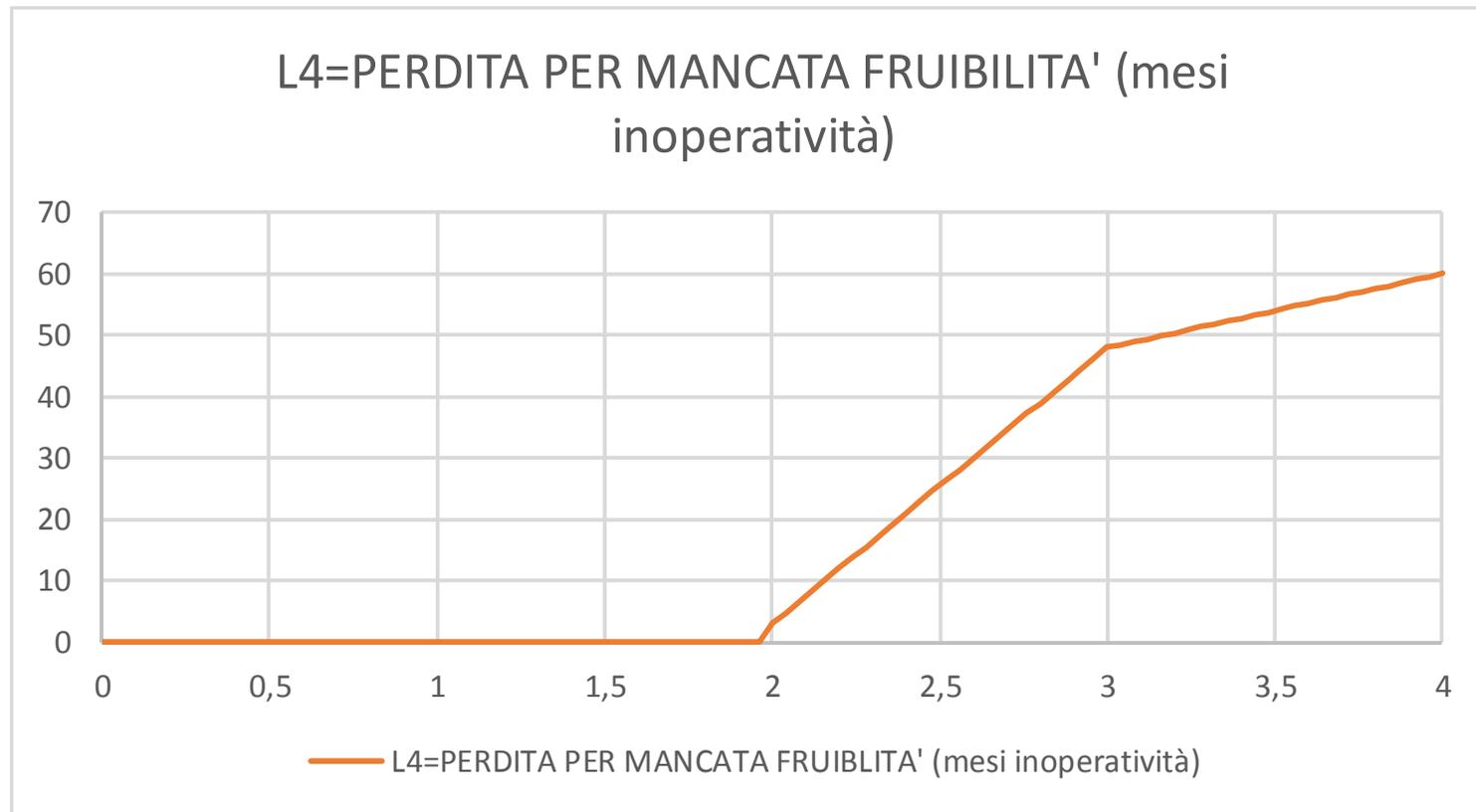
La curva di VULNERABILITA' V4 è associata al fattori di esposizione L4 e tiene conto dei mesi di mancato utilizzo.

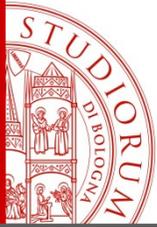
Per **Danni da mancata fruibilità** si intendono i mesi di mancato utilizzo (L_4)

Damage State ds	Descrizione variabile V	Mesi di mancato utilizzo [mesi]	Considerazioni sulla stima economica del danno
1 SLO PGA=0,02g	No danno, quindi assenza di interruzione della fruibilità	0	
2 SLD PGA=0,05g	Parziale interruzione della fruibilità	3 mesi	<i>Mesi impiegati per gli interventi sul Duomo di Modena a seguito del sisma 2012</i>
3 SLV PGA=0,15g	Durata degli interventi per la riapertura	48 mesi	<i>Mesi stimati sulla base del tempo impiegato per la ricostruzione post- sisma della Basilica di Collemaggio</i>
4 SLC PGA=0,30g	Durata della ricostruzione	60 mesi	<i>Mesi stimati sulla base del tempo impiegato per la ricostruzione post- sisma della Basilica di Collemaggio</i>



CURVA DI VULNERABILITA' V4





CURVA DI VULNERABILITA' V5

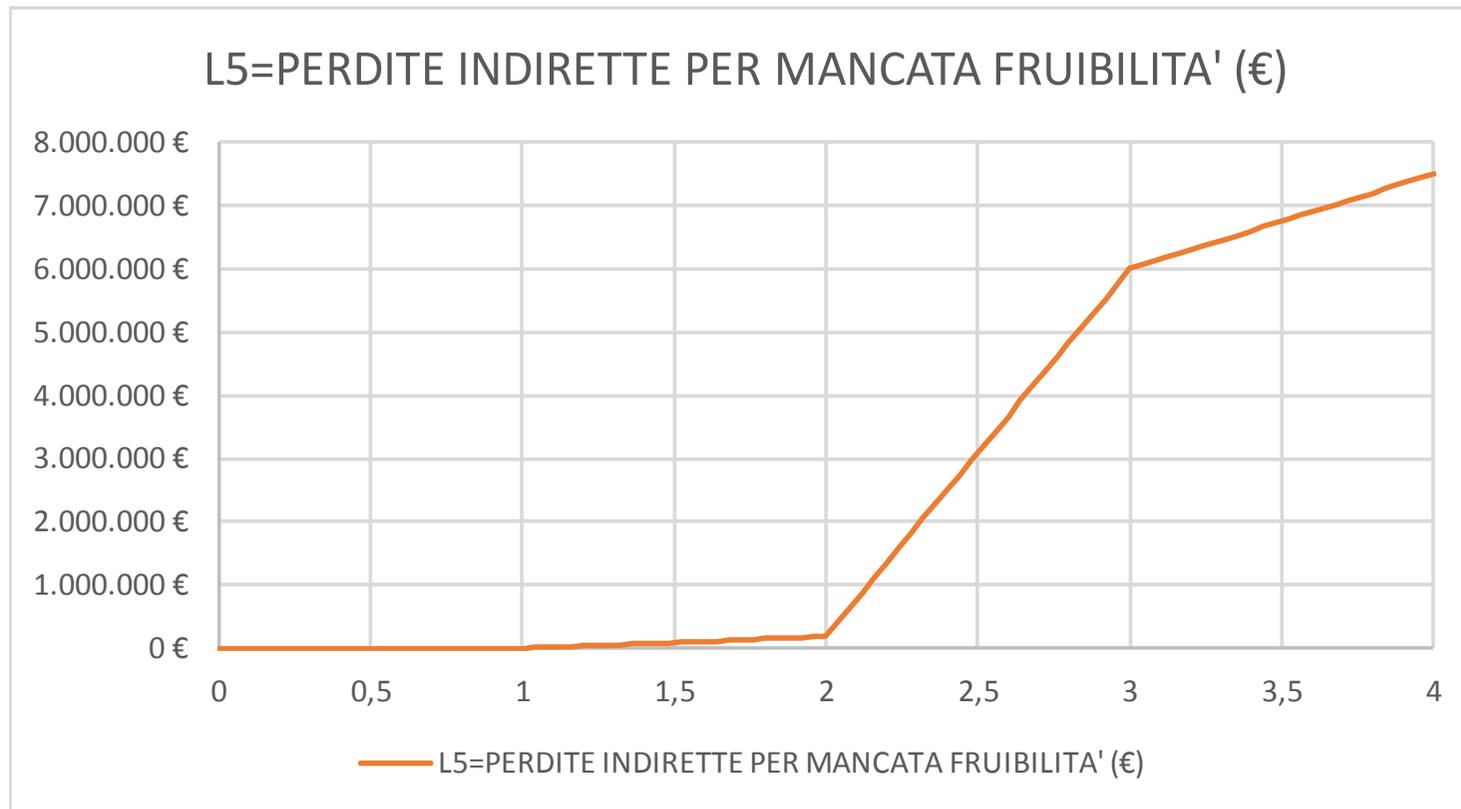
La curva di VULNERABILITA' V5 è associata ai fattori di esposizione L5 e tiene conto della relativa/equivalente perdita economica relativa ai mesi di mancato utilizzo.

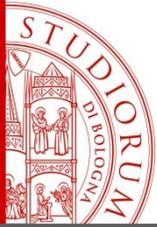
Damage State ds	Descrizione variabile V	Mesi di mancato utilizzo [€]	Considerazioni sulla stima economica del danno
1 SLO PGA=0,02g	No danno, quindi assenza di interruzione della fruibilità	0	/
2 SLD PGA=0,05g	Perdite dovuta a parziale interruzione della fruibilità (3 mesi)	187.000 €	Stima basata sui mesi di fermo, sulle monetizzazioni delle presenze medie**
3 SLV PGA=0,15g	Perdite per fermo di 48 mesi	6.000.000 €	Stima basata sui mesi di parziale fermo, sulle monetizzazioni delle presenze medie
4 SLC PGA=0,30g	Perdite per fermo di 60 mesi	7.500.000 €	Stima basata sui mesi di fermo, sulle monetizzazioni delle presenze medie

**media visitatori mensili=25.000 persone/mese
monetizzazione visitatore=5 euro/visitatore



CURVA DI VULNERABILITA' V5



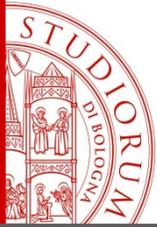


CURVA DI VULNERABILITA' V7

La curva di VULNERABILITA' V7 è associata al fattori di esposizione L7 e tiene conto delle possibili vittime.

Damage State ds	Descrizione variabile V	vittime	Considerazioni sulla stima economica del danno
1 SLO PGA=0,02g	No crolli, quindi assenza di vittime	0	
2 SLD PGA=0,05g	No crolli, quindi assenza di vittime	0	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere e sulla contemporaneità durante evento sismico</i>
3 SLV PGA=0,15g	Vittime corrispondenti ad un crollo parziale che interessa il 10% della superficie	2	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere e sulla contemporaneità durante evento sismico</i>
4 SLC PGA=0,30g	Vittime corrispondenti a crollo totale	17	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere e sulla contemporaneità durante evento sismico</i>

***media visitatori mensili=25.000 persone/mese
durata media visita=15 minuti*



CURVA DI VULNERABILITA' V8

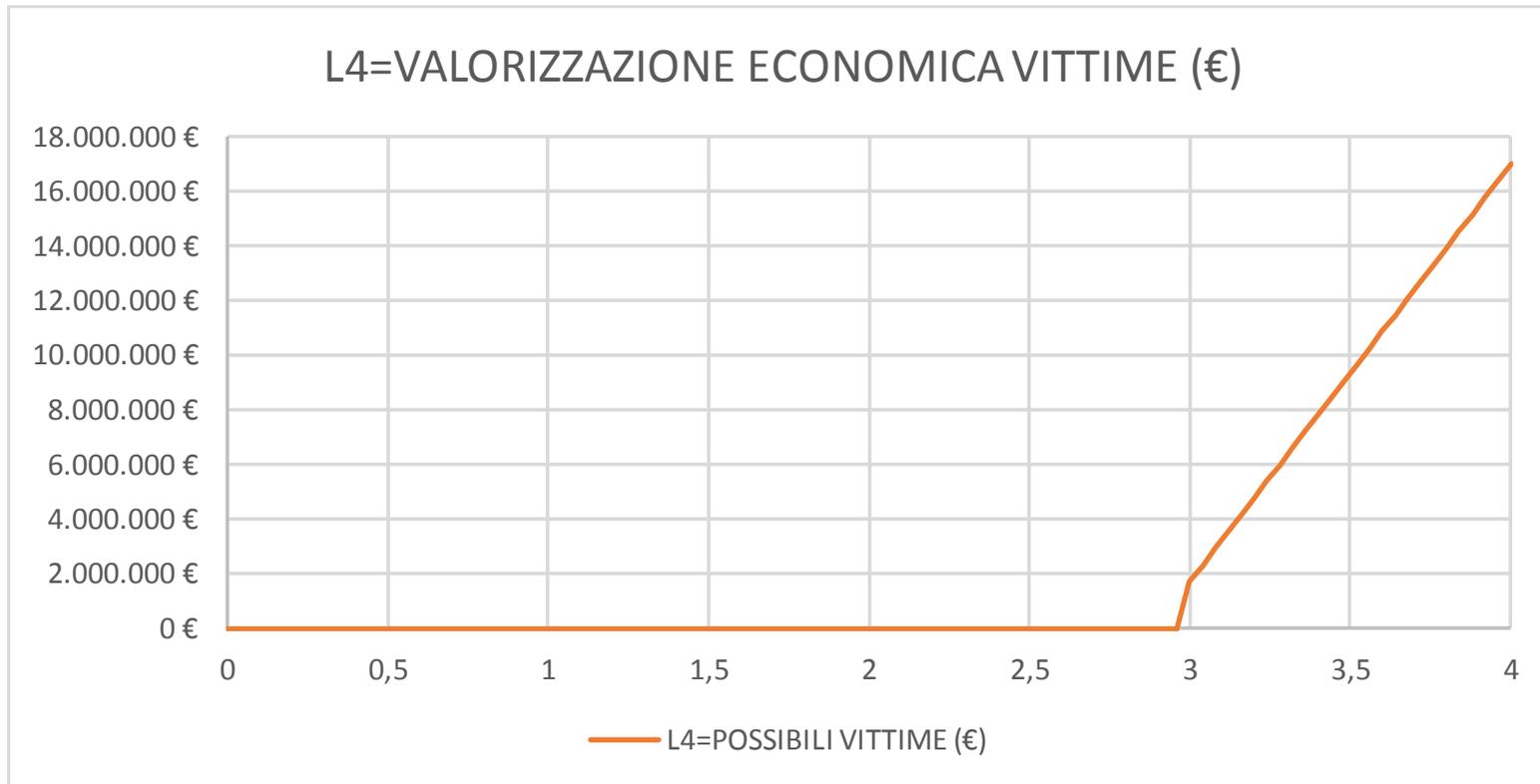
La curva di VULNERABILITA' V8 è associata ai fattori di esposizione L8 e tiene conto della valorizzazione economica delle possibili vittime.

Damage State ds	No crolli, quindi assenza di vittime	Vittime [€]	Considerazioni sulla stima economica del danno
1 SLO PGA=0,02g	No perdite economiche dovute a vittime	0	
2 SLD PGA=0,05g	No perdite economiche dovute a vittime	0	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere, sulla contemporaneità durante evento sismico, e sulla valorizzazione economica di una vittima</i>
3 SLV PGA=0,15g	Perdita economica dovuta a 1.7 vittime	2.000.000 €	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere, sulla contemporaneità durante evento sismico, e sulla valorizzazione economica di una vittima</i>
4 SLC PGA=0,30g	Perdita economica dovuta a 1.7 vittime	17.000.000 €	<i>Stima basata sulle presenze medie giornaliere, sulla contemporaneità durante evento sismico, e sulla valorizzazione economica di una vittima</i>

**valorizzazione economica vittima= 1.000.000 €

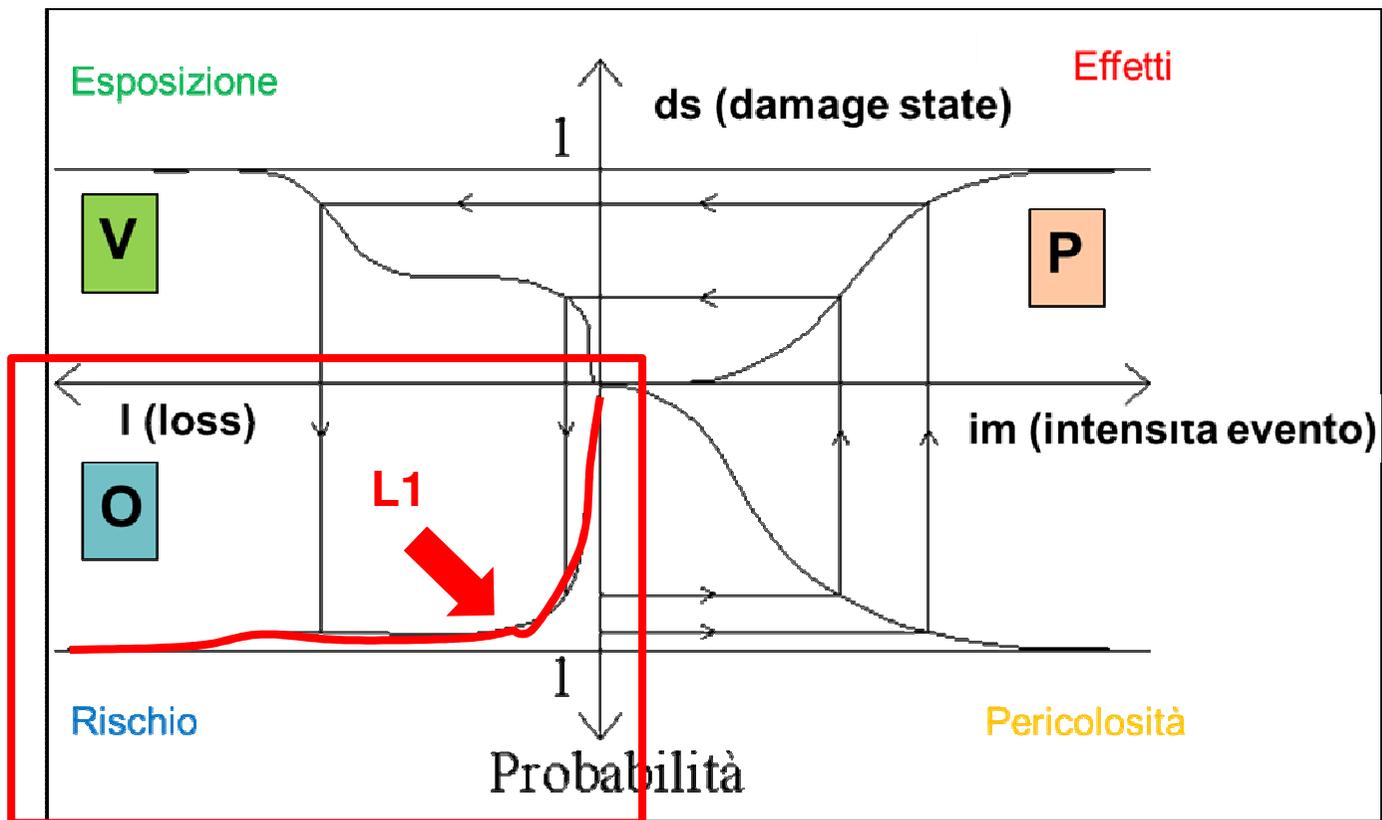


CURVA DI VULNERABILITA' V8



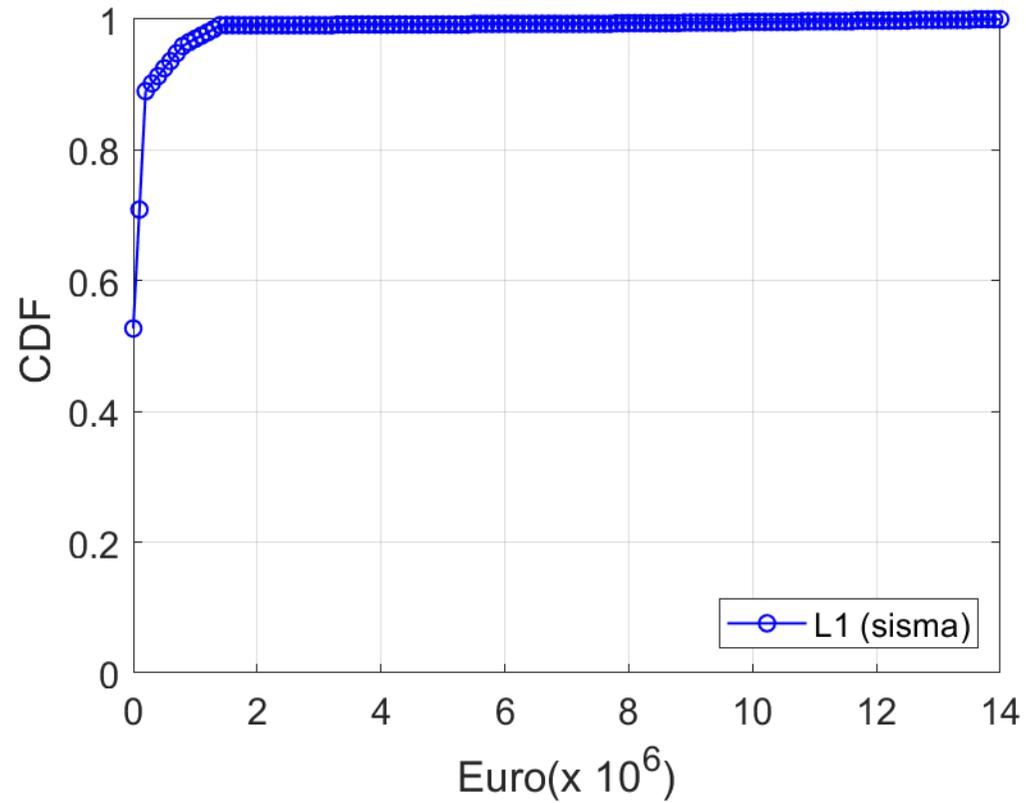


CURVA DI OUTPUT PER L1 (Danno al contenitore)



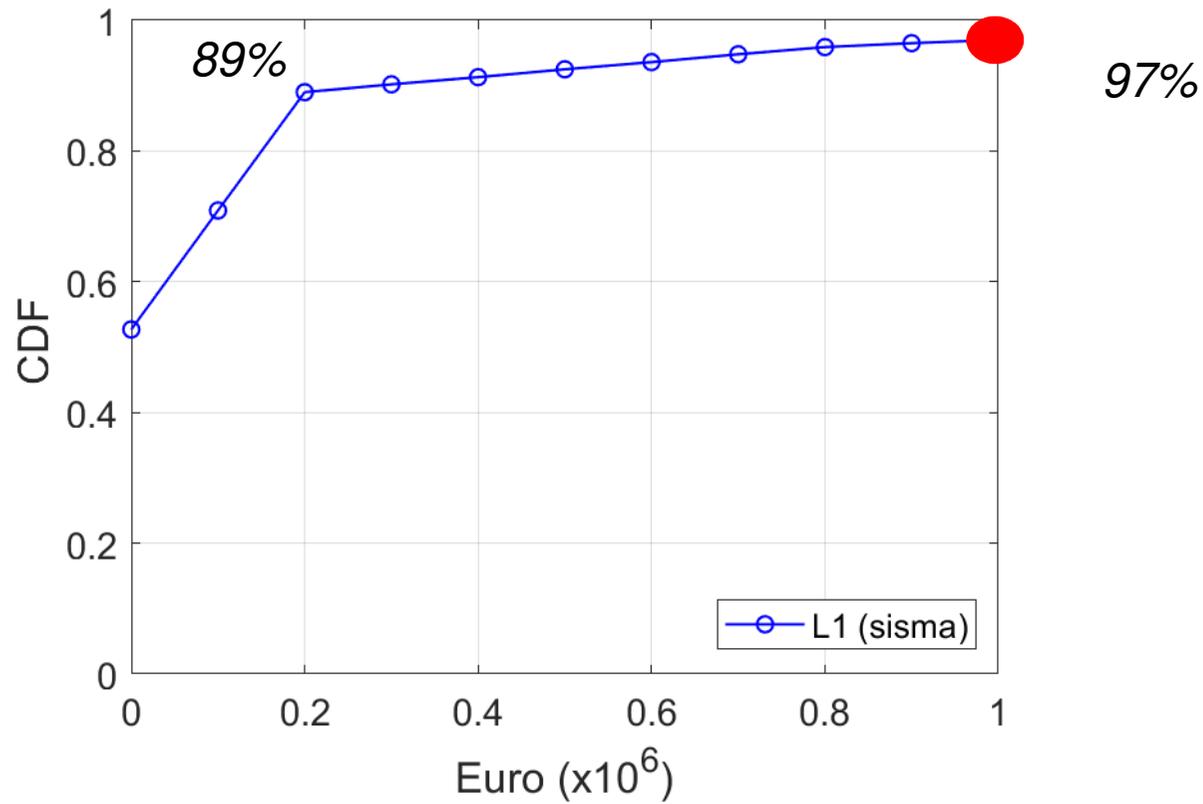


CURVA DI OUTPUT PER L1 (Danno al contenitore)



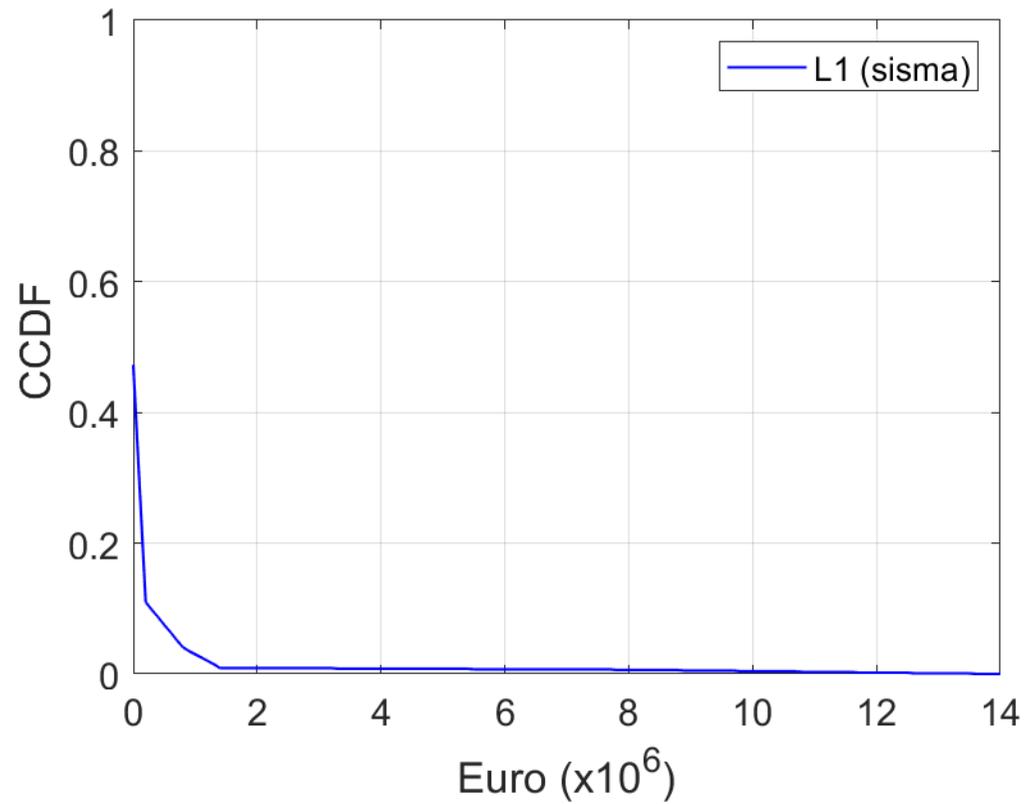


CURVA DI OUTPUT PER L1 (Danno al contenitore)



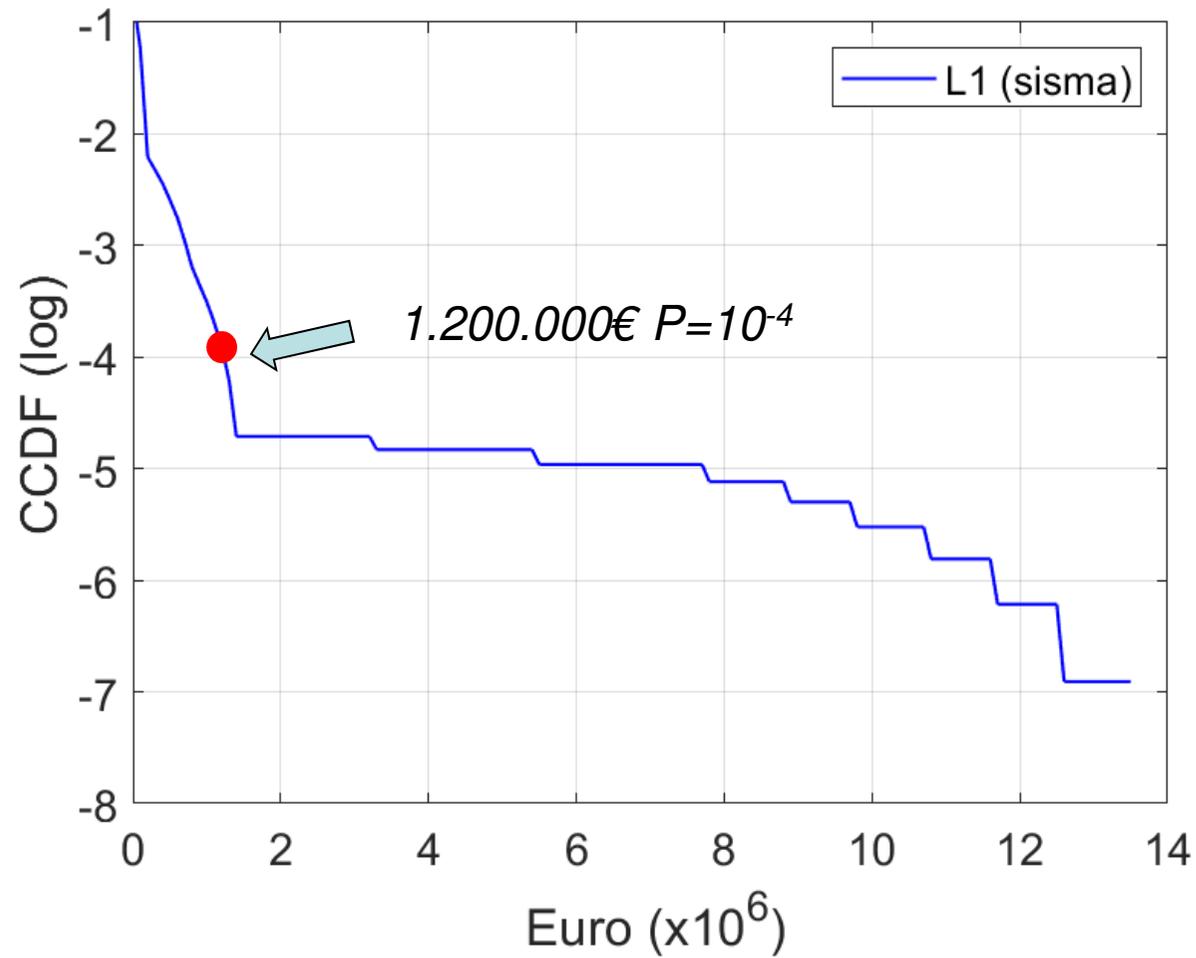


CURVA DI OUTPUT PER L1 (Danno al contenitore)



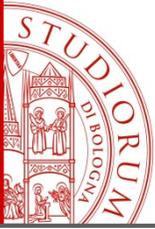


CURVA DI OUTPUT PER L1 (Danno al contenitore)





Analisi multirischio allo stato di fatto: sisma + incendio



ANALISI MULTI HAZARD

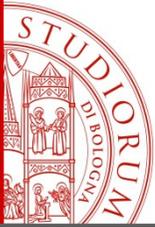
In una analisi multi loss-multi hazard, per ogni loss iesimo considerato, si definiscono le seguenti variabili

- $L_{i,E}$: loss iesimo L_i , dovuto all'hazard sismico (**Earthquake hazard**)
- $L_{i,Fl}$ = loss iesimo L_i , dovuto all'hazard idraulico (**Flood hazard**)
- $L_{i,F}$ = loss iesimo L_i , dovuto all'hazard da incendio (**Fire hazard**)

Ciascuna variabile è così definita dalle relativi CDF/PDF, ottenute secondo quanto sopra indicato per il monorischio valutato singolarmente.

Gli eventi vengono considerati **statisticamente indipendenti** (non ci sono eventi concatenati), il **Loss da multi hazard $L_{i,m}$** è definito come:

$$L_{i,m} = L_{i,E} + L_{i,Fl} + L_{i,F}$$



SOMMA DI DUE VARIABILI

- Dalla basi di probabilità, se si considerano due variabili random x_1 e x_2 ove (f_{X_1} e f_{X_2} rappresentano le relative PDF), la variabile Y somma di x_1 e x_2 è caratterizzata dalla seguente espressione della relativa CDF

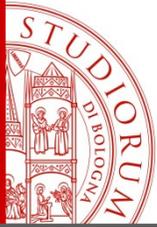
$$y = x_1 + x_2$$

$$F_Y(y) = \int_0^y \left\{ \int_{x_2}^y f_{X_1}(y - x_2) \cdot f_{X_2}(x_2) \cdot |J| dy \right\} dx_2$$

- Dove:

$$|J|=1$$

Matematicamente la pdf della variabile aleatoria Y è la convoluzione delle variabili X_1 ed X_2

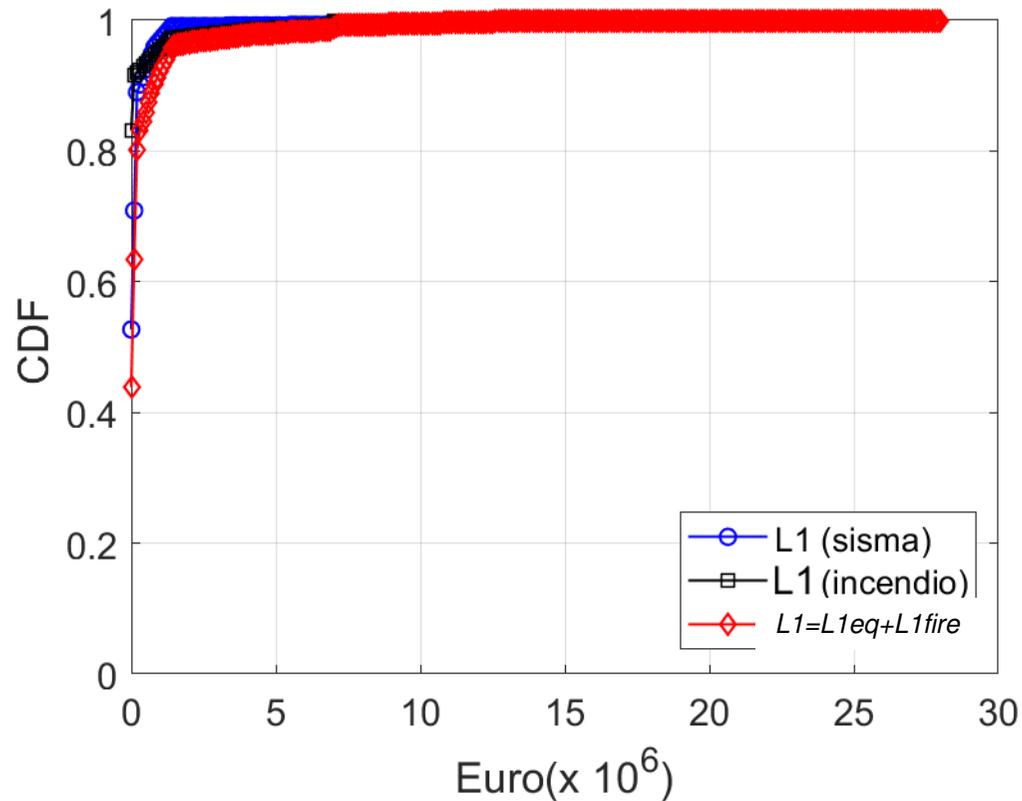


Analisi monorischio: danno al contenitore L1

Descrizione danno da incendio	CCDF	euro	CDF2 (incendio)
Nessun danno	100	0 €	0
Danno non strutturale Minimo	16,8	0 €	0,832
Danni contenuti alle capriate/ travi in legno	8,4	100.000 € stimato	0,916
Danni medi alle capriate/ travi in legno e perdita parziale della copertura	2,7	1.400.000 € SLV corrispondente a perdite da	0,973
Perdita sostanziale della copertura e danni ingenti al coro ligneo	1,3	4.200.000 €	0,987
Perdita della copertura e danni estesi alle opere sottostanti	0,7	7.000.000 € 0.5 SLC corrispondente a perdite a	0,993
	0	14.000.000 €	1
Descrizione danno da sisma		euro	CDF1 (terremoto)
DS=1.0 (SLO-no danni elementi strutturali)		0 €	0,527
DS=2.0 (SLVD- danni alle volte come da Terremoto 2012)		200.000 € Modena da Intervento su Duomo di	0,890
DS=2.5		800.000 €	0,959
DS=3 (SLV- collasso parziale volte/torrini)		1.400.000 € 10% costo di ricostruzione	0,991
DS=3.5		8.000.000 €	0,994
DS=4 (SLC -collasso totale)		14.000.000 € costo ricostruzione	1,000



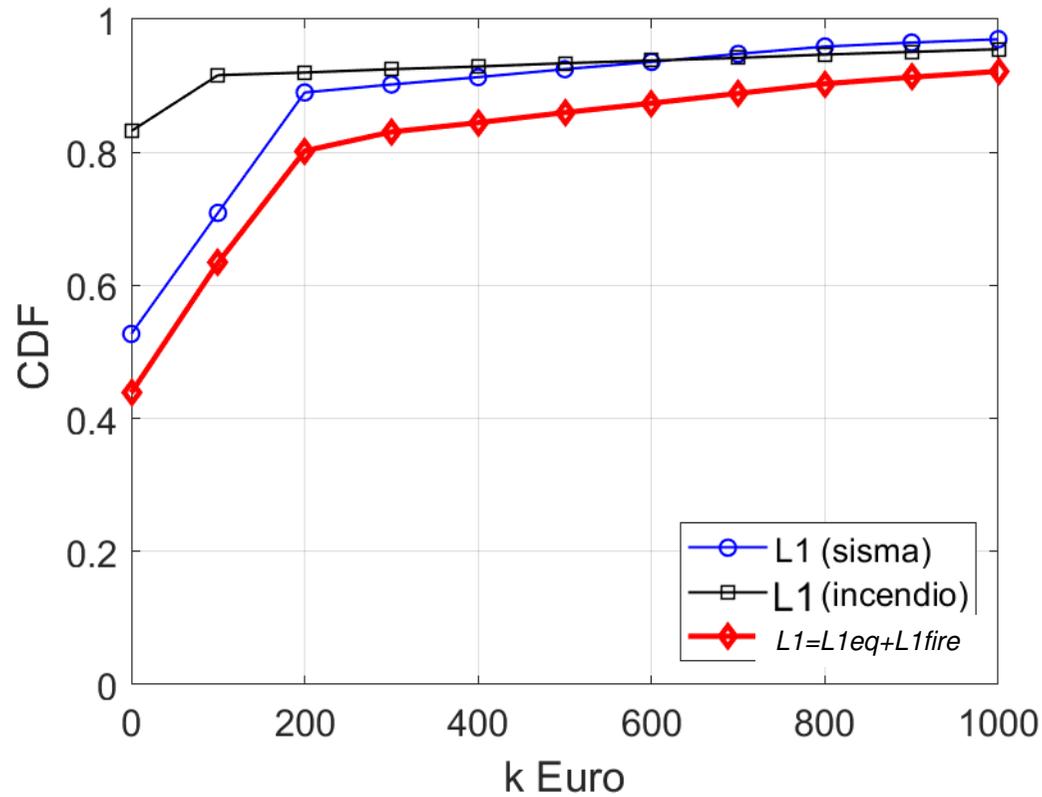
Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$



L1= CDF della variabile aleatoria perdite economiche totali per danno al contenitore (L1eq per sisma ed L1fire per incendio)

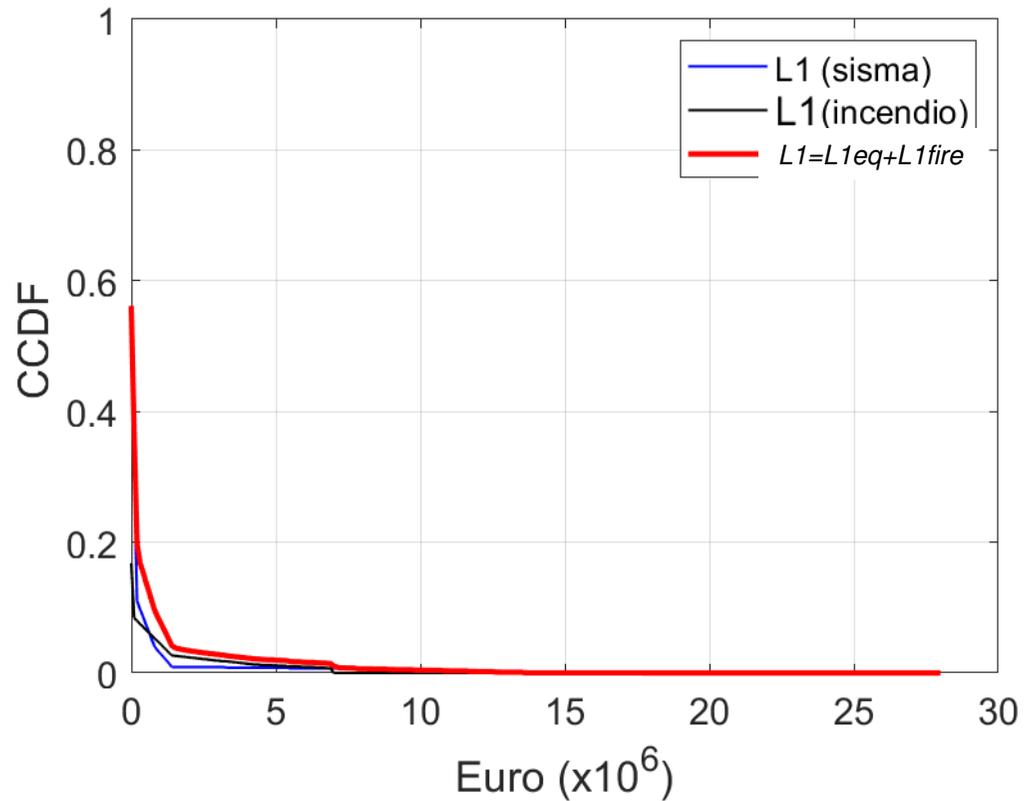


Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$



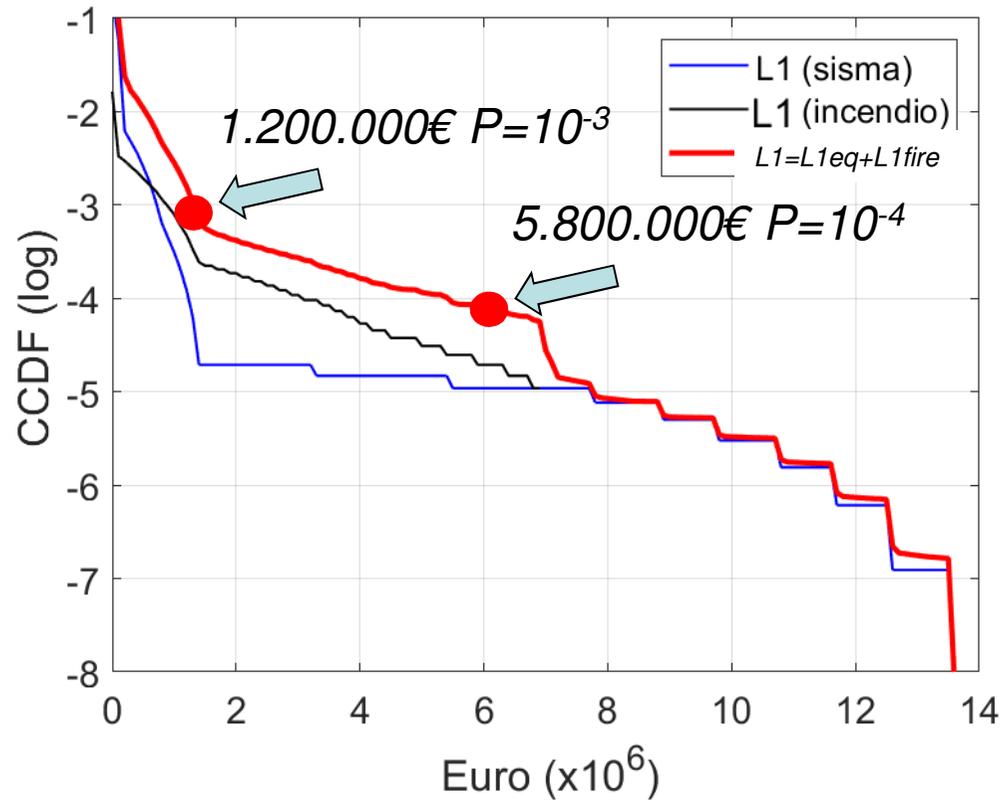


Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$





Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$





Interventi di mitigazione del rischio sismico



Gli interventi per la mitigazione delle principali vulnerabilità

Obiettivo intervento: riduzione delle vulnerabilità per incremento prestazioni nei confronti degli stati di danno corrispondenti a ds1 (SLO), ds2 (SLD) e ds3 (SLV)

- 1. Rinforzo delle volte*
- 2. Inserimento delle catene a vari livelli*
- 3. Rinforzo locale delle murature e ripristino connessioni tra pareti ortogonali*
- 4. Interventi in copertura (connessioni travi in legno e realizzazione controventi di falda)*
- 5. Rinforzo dei torrini tramite scheletro metallico interno*

Consolidamento delle volte

1.A- consolidamento giunti all'estradosso

Operazioni:

A. RIMOZIONE CAPPETTA ESISTENTE

B. SCARNITURA E RISIGILLATURA GIUNTI con COLATURA di CALCE

C. SABBIAIATURA

Riempimento lacune con iniezioni di CALCE

1.B – stuccature e consolidamenti intonaci all'intradosso

All'intradosso è presente un intonachino che risale ai primi del '900, con dipinti falsi mattoni.
Il progetto prevede:

- LA STUCCATURA DELLE FESSURAZIONI
- IL CONSOLIDAMENTO E LA RIPRESA DEGLI INTONACI DISTACCATI
- LA REVISIONE CROMATICA FINALE.

1.C- prolungamento frenelli e inserimento diatoni

STATO ATTUALE: DISCONTINUITA'

PROGETTO: ATTENUAZIONE DISCONTINUITA'

zono centrale della volta lasciata a vista

PROLUNGAMENTO FRENELLI

FRENELLI ESISTENTI

PROLUNGAMENTO FRENELLI + DIATONI

+ DIATONI DI COLLEGAMENTO ALLA VOLTA E AI COSTOLONI

Consolidamento delle volte

1.D- presidio costoloni

con RETE METALLICA

Foto intervento realizzato

STATO ATTUALE: rete sostegno costoloni realizzata, in via provvisoria, solo nella parte centrale

PROGETTO: prolungamento per tutta l'estensione dei costoloni

1.E- cappetta calce + eco pozzolana rinforzata spessore 1 cm

rinforzo in fibra di vetro GFRP o in acciaio SRP

7 cm circa

24 cm circa

malta

struttura in mattoni "di testa"

intonachino

CAPPETTA MALTA A BASE DI CALCE IDRAULICA ED ECO-POZZOLANA ARMATA CON RETE BIDIREZIONALE E BILANCIATA (SINGOLA O DOPPIA) IN FIBRA DI VETRI O IN FIBRA DI ACCIAIO

ZONA CON DOPPIA RETE

MICRO-CUCITURE DI COLLEGAMENTO DELLA DOPPIA RETE AL MURO

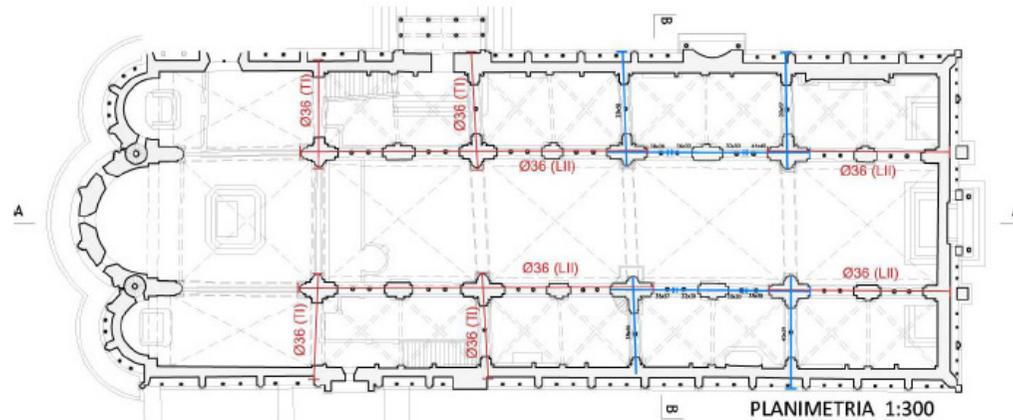
PLANIMETRIA SCALA 1:300

nelle zone più vulnerabili : DOPPIA RETE

Incremento della capacità fuori piano delle murature

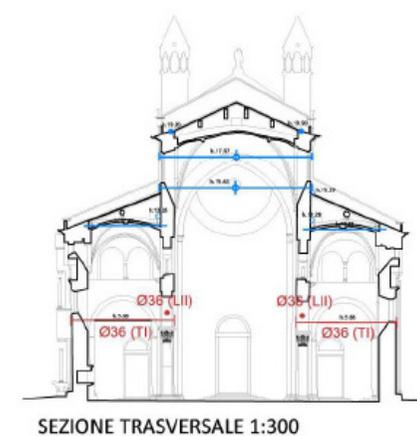
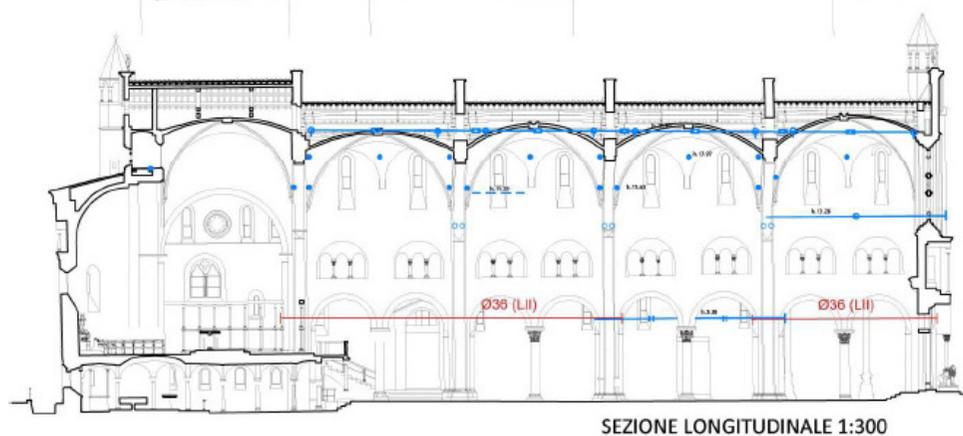
Sezione E_Progetto

tav. E_2.1 CATENE A : INFERIORI



LEGENDA

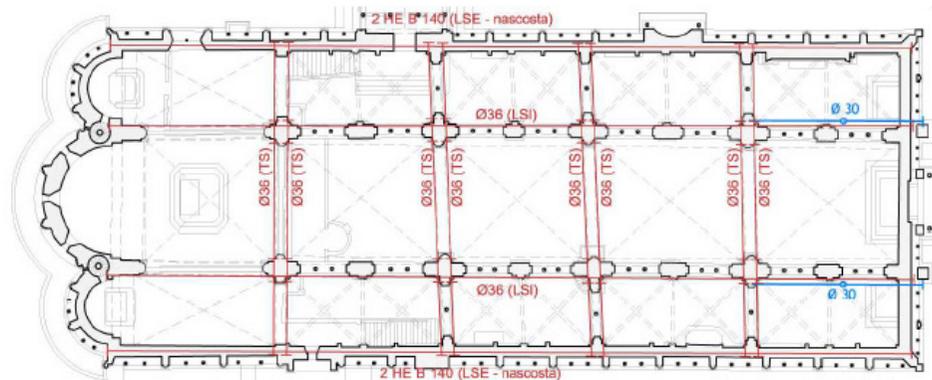
- CATENE ESISTENTI
 - CATENE PROPOSTE
- LEGENDA SIGLE:
 TI = catene trasversali inferiori
 LII = catene longitudinali inferiori interne



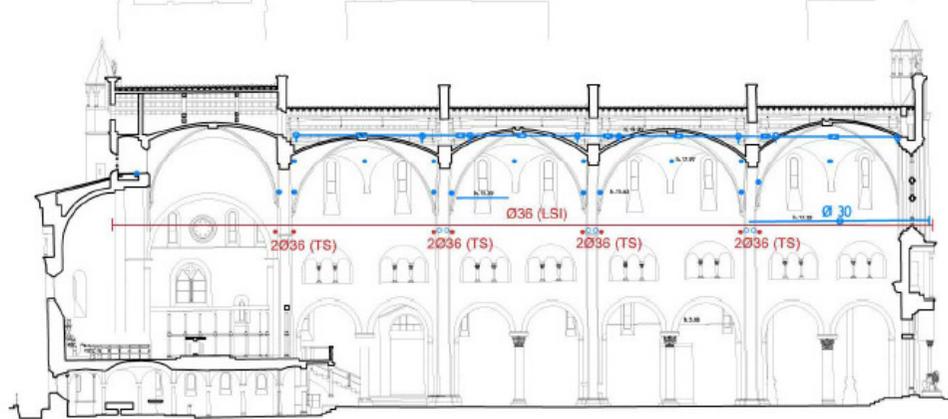
Incremento della capacità fuori piano delle murature

Sezione E_Progetto

tav. E_2.2 CATENE B : SUPERIORI



PLANIMETRIA 1:300



SEZIONE LONGITUDINALE 1:300

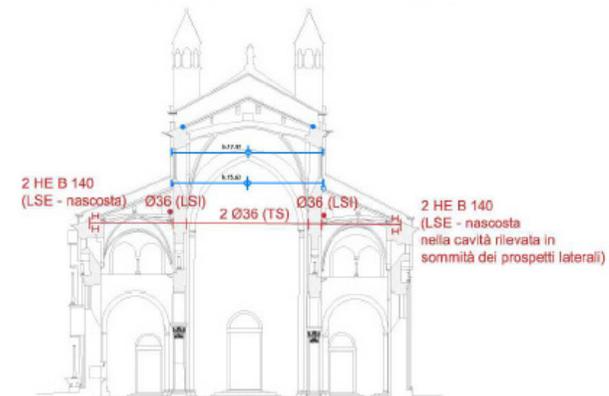
LEGENDA

- CATENE ESISTENTI
 - CATENE PROPOSTE
- LEGENDA SIGLE:
 TS = catene trasversali
 LSI = catene longitudinali superiori interne
 LSE = catene longitudinali superiori esterne



STATO ATTUALE

PROGETTO

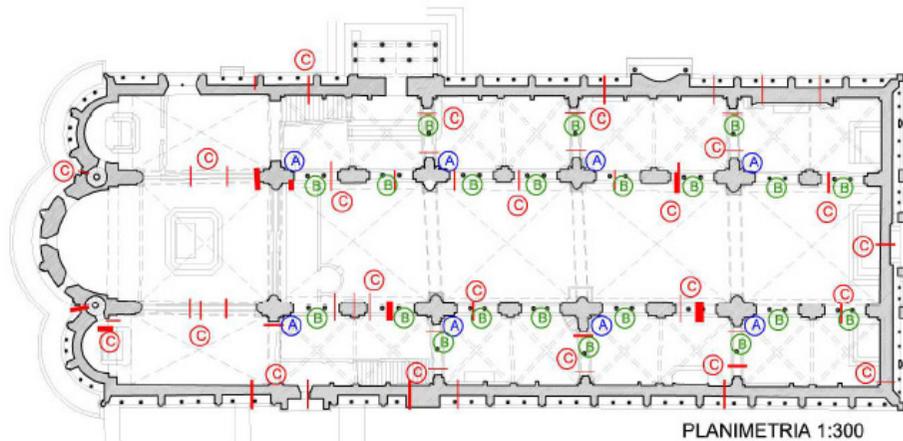


SEZIONE TRASVERSALE 1:300

Rinforzo delle murature

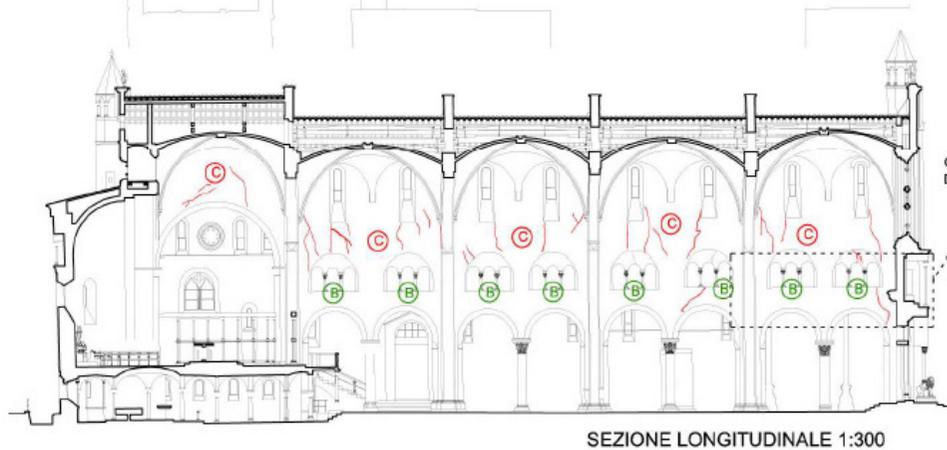
Sezione E_Progetto

tav. E_3.1 MURATURE: mappa interventi A,B,C

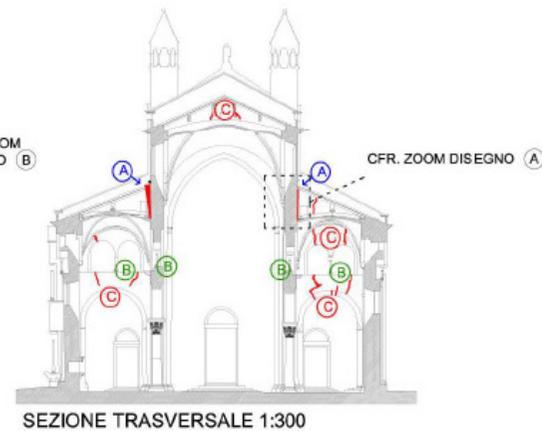


TRE TIPOLOGIE DI INTERVENTO

- A** RIPRISTINO DELLA CONNESSIONE TRASVERSALE DEGLI INCROCI MURARI
- B** COLATURA DI CALCE SUI PIANI MATRONEI
- C** INIEZIONE DI CALCE NELLE LESIONI



CFR. ZOOM
DISEGNO B

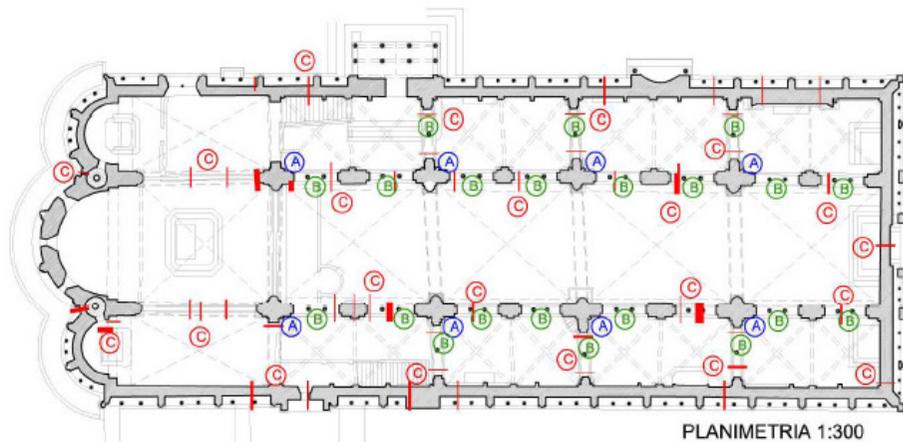


CFR. ZOOM DISEGNO A

Rinforzo delle murature

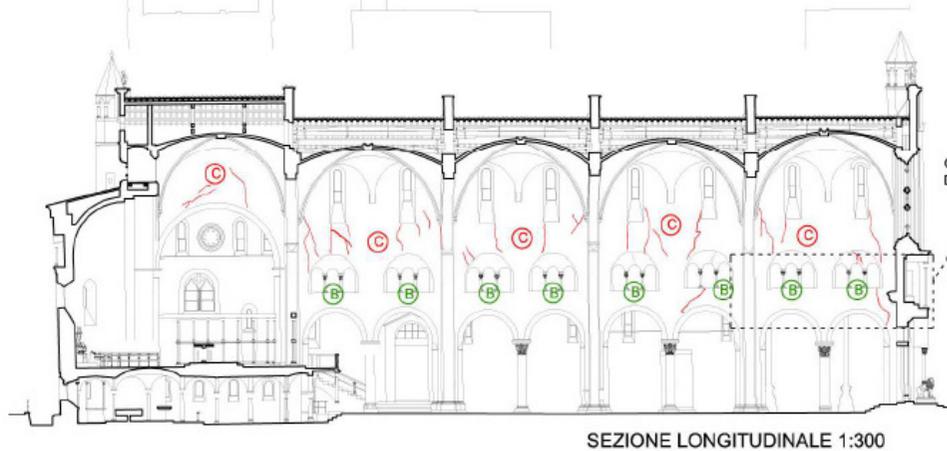
Sezione E_Progetto

tav. E_3.1 MURATURE: mappa interventi A,B,C

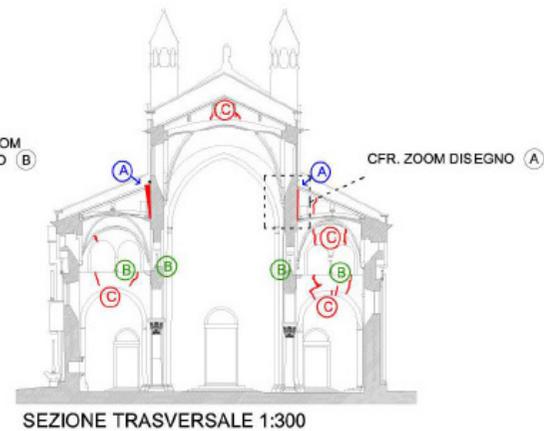


TRE TIPOLOGIE DI INTERVENTO

- A** RIPRISTINO DELLA CONNESSIONE TRASVERSALE DEGLI INCROCI MURARI
- B** COLATURA DI CALCE SUI PIANI MATRONEI
- C** INIEZIONE DI CALCE NELLE LESIONI



CFR. ZOOM
DISEGNO **B**



CFR. ZOOM DISEGNO **A**

Rinforzo dei torrini

Sezione E_Progetto

tav. E_4 COPERTURA: interventi A,B,C

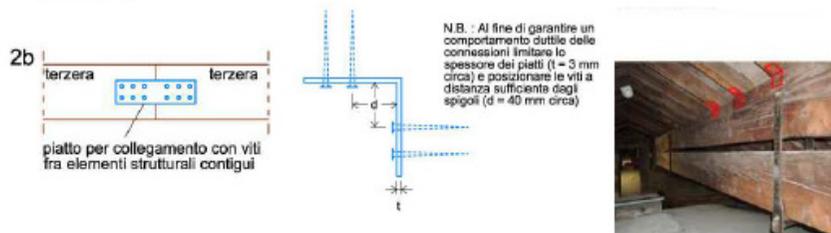
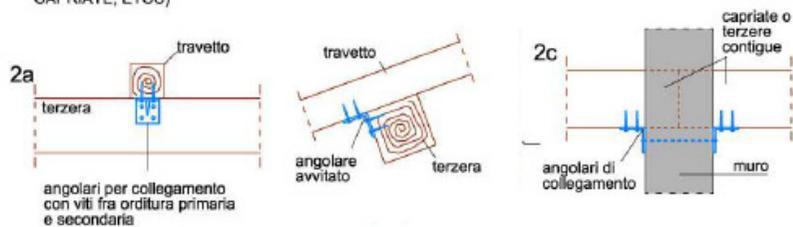
4.A- ripristino connessioni

Verifica capochiave, ripristino collegamento allentati, inserimento cunei, ritesatura staffature

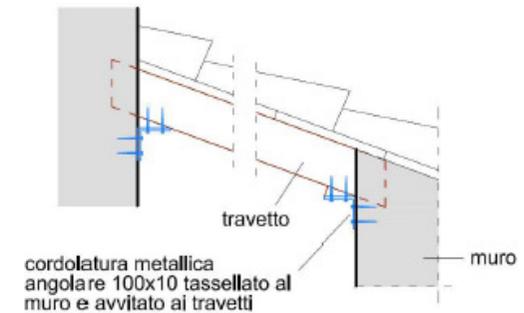


4.B- cucitura elementi legati

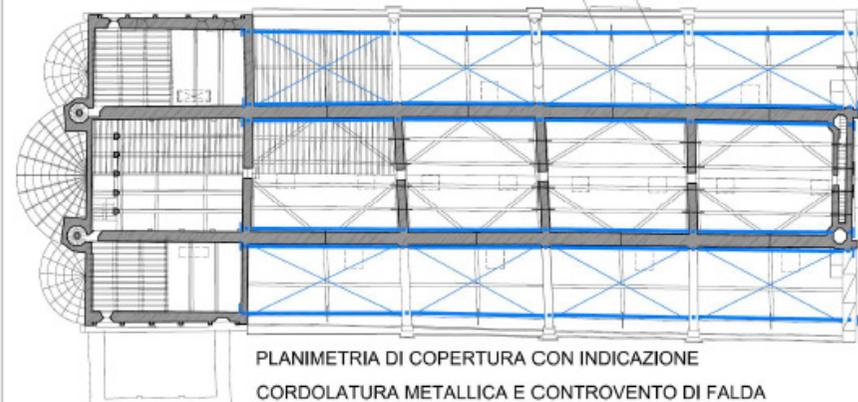
CUCITURA DI TUTTI GLI ELEMENTI SECONDARI (ARCARECCI) E PRINCIPALI (TERZERE, CAPRIATE, ETCC)

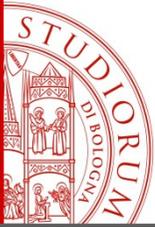


4.C- cordolatura metallica e controventi di falda



controvento di falda catene fi 30



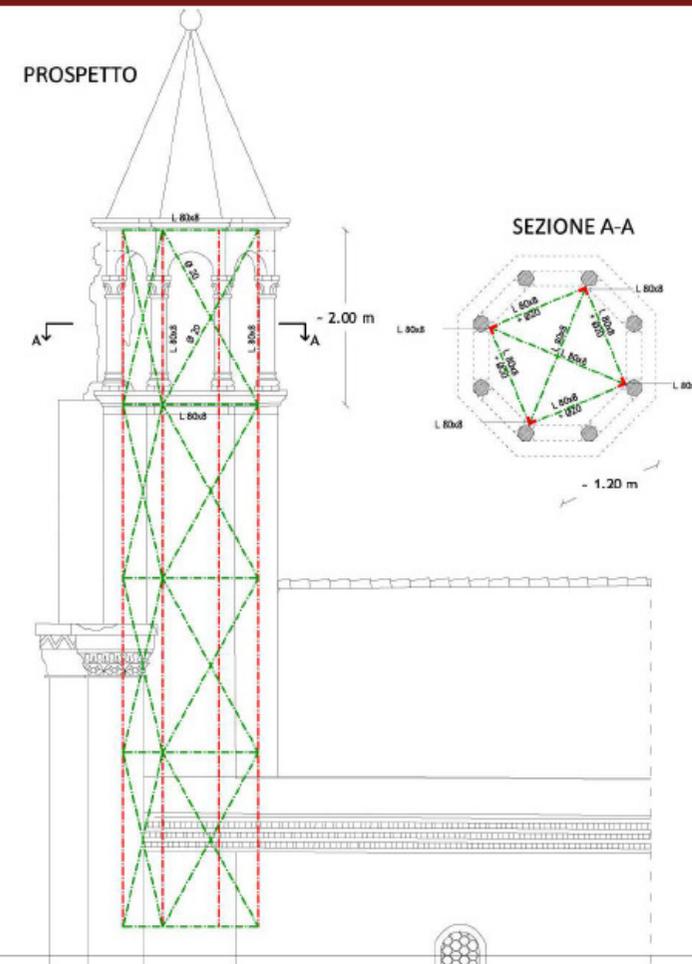


Interventi in copertura

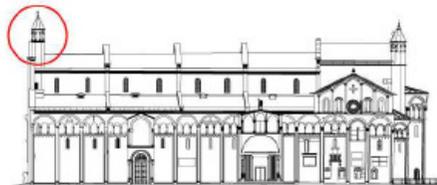
Sezione E_Progetto

tav. E_6 TORRINI

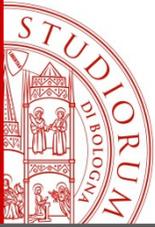
Presidio leggero nella cavità interna esistente



UBICAZIONE



TORRINI IN FACCIATA MOLTO PIÙ SNELLI DI QUELLI ABSIDALI



VALORI MEDI DELLE PGA CORRISPONDENTI AI 4 STATI LIMITE - POST MITIGAZIONE

Sulla base dei risultati delle analisi condotte (LV2, LV3 e DEM), sono stati definiti i valori medi delle PGA corrispondenti ai 4 stati limite come segue:

1= SLO raggiungimento dello Stato Limite di Operabilità (definito come il raggiungimento di lievi fessure negli elementi non strutturali) per **PGA= 0,12g (COV=0.2)** (contro 0.02g allo stato di fatto)

2=SLD raggiungimento dello Stato Limite di Danno (definito come raggiungimento di fessure negli elementi strutturali secondari) per **PGA= 0,15g (COV=0.20)** (contro 0.05g allo stato di fatto)

3=SLV raggiungimento dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (definito come il raggiungimento di danni consistenti ad elementi strutturali che può mettere a repentaglio le vite umane) per **PGA= 0,25g (COV=0.20)** (contro 0.15g allo stato di fatto)

4=SLC raggiungimento dello Stato Limite di Collasso (inteso come collasso totale o parziale degli elementi strutturali principali) per **PGA= 0,3g (COV=0.30)**



PERFORMANCE CURVE (P)

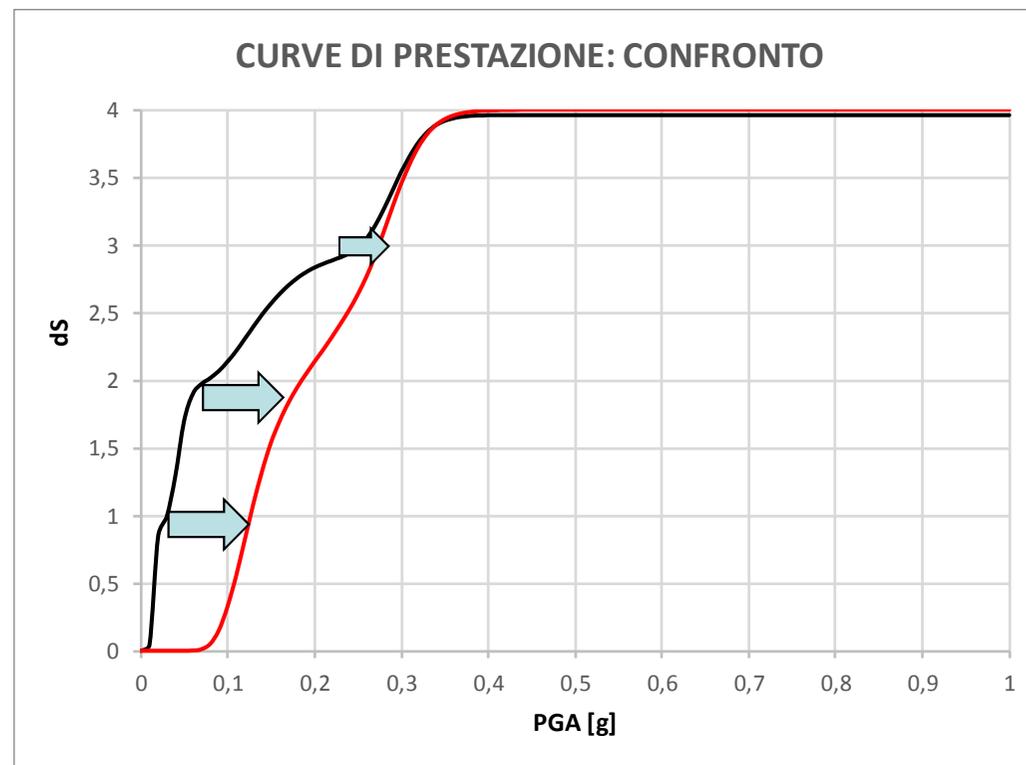
- **P: curve di prestazione.** La curva di prestazione associa in modo «deterministico» ad ogni valore del parametro identificativo della **pericolosità** un corrispondente **indice di danneggiamento**.

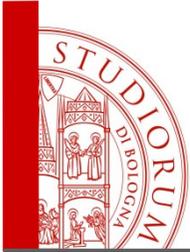




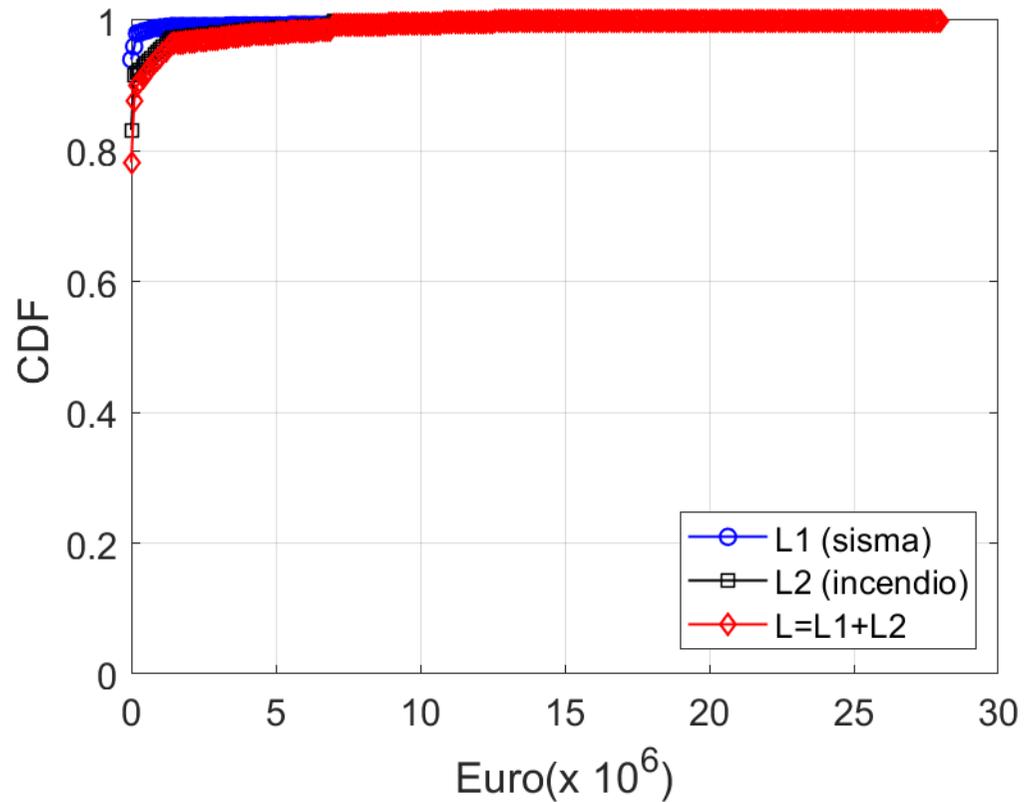
PERFORMANCE CURVE (P)

- Confronto stato di fatto vs **stato di progetto**



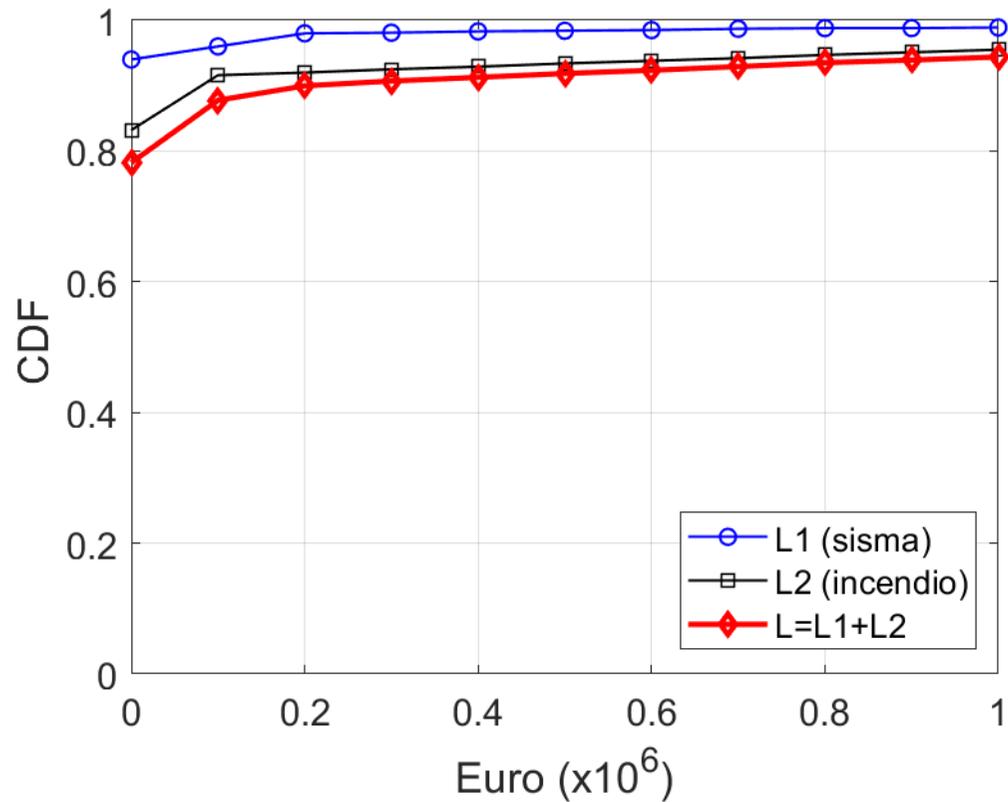


Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$



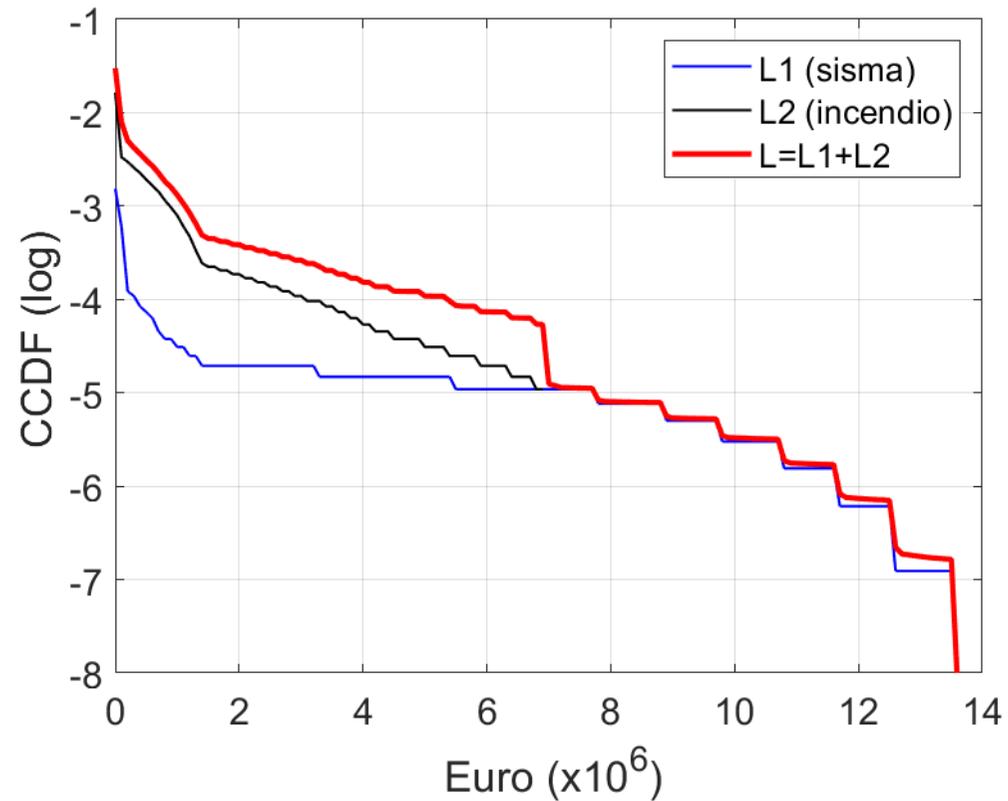


Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$



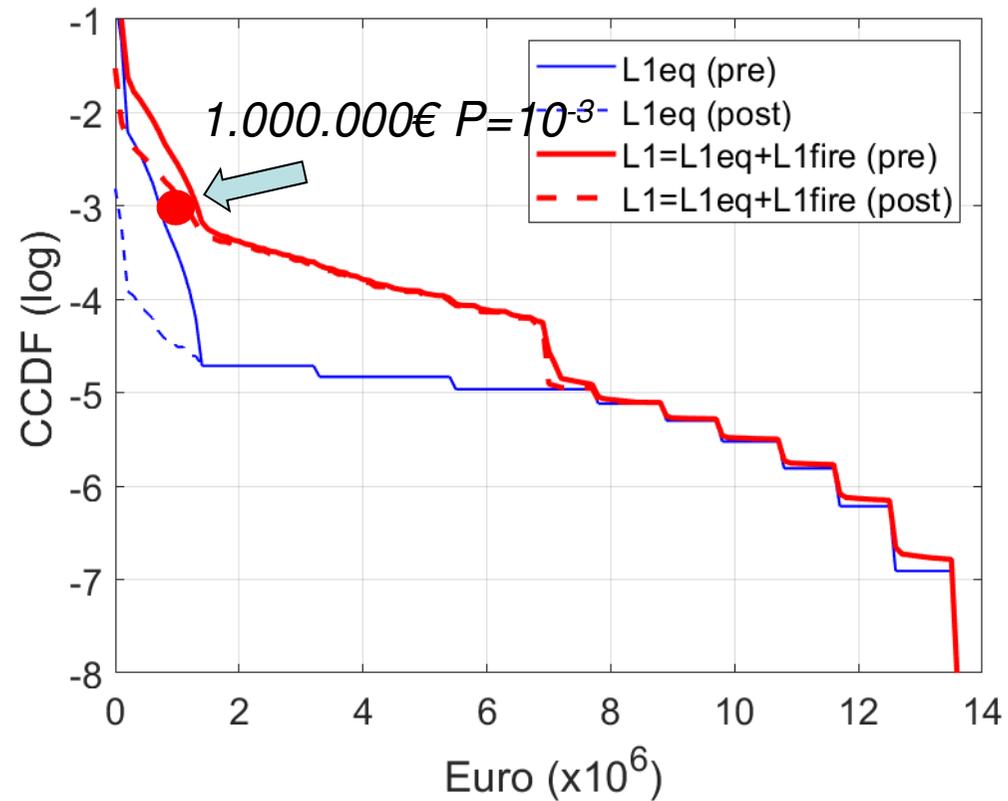


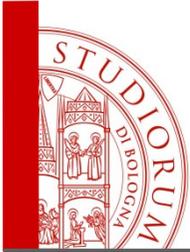
Analisi multirischio: danno al contenitore $L1=L1eq + L1fire$



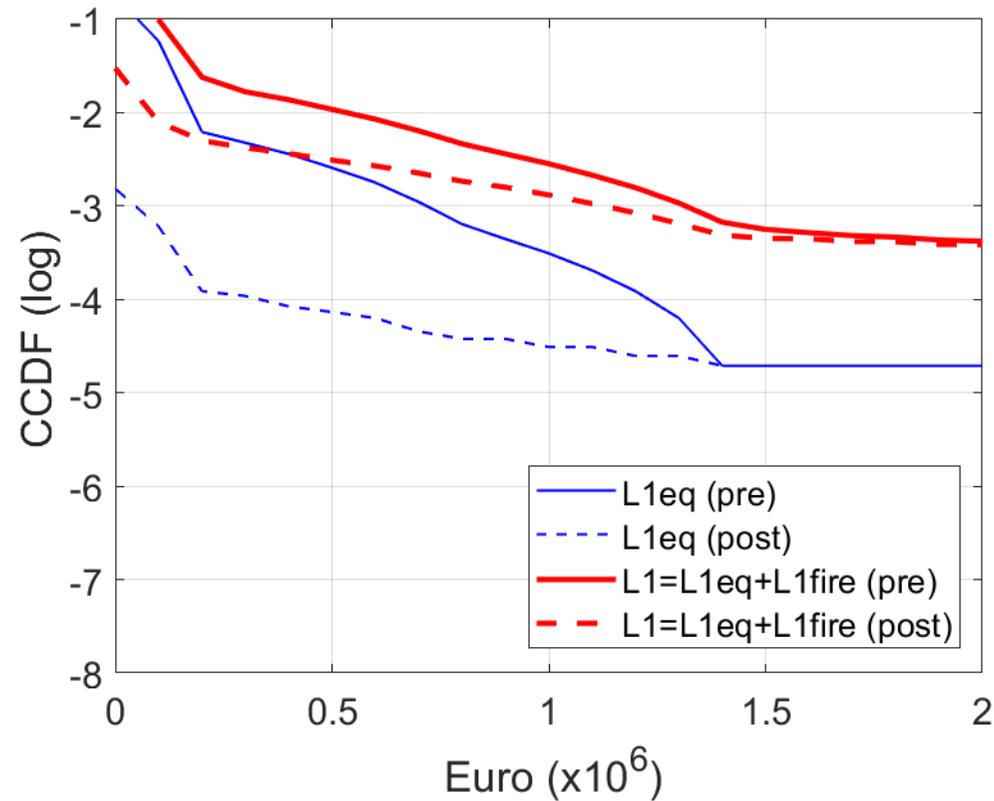


Analisi multirischio: confronto pre-post



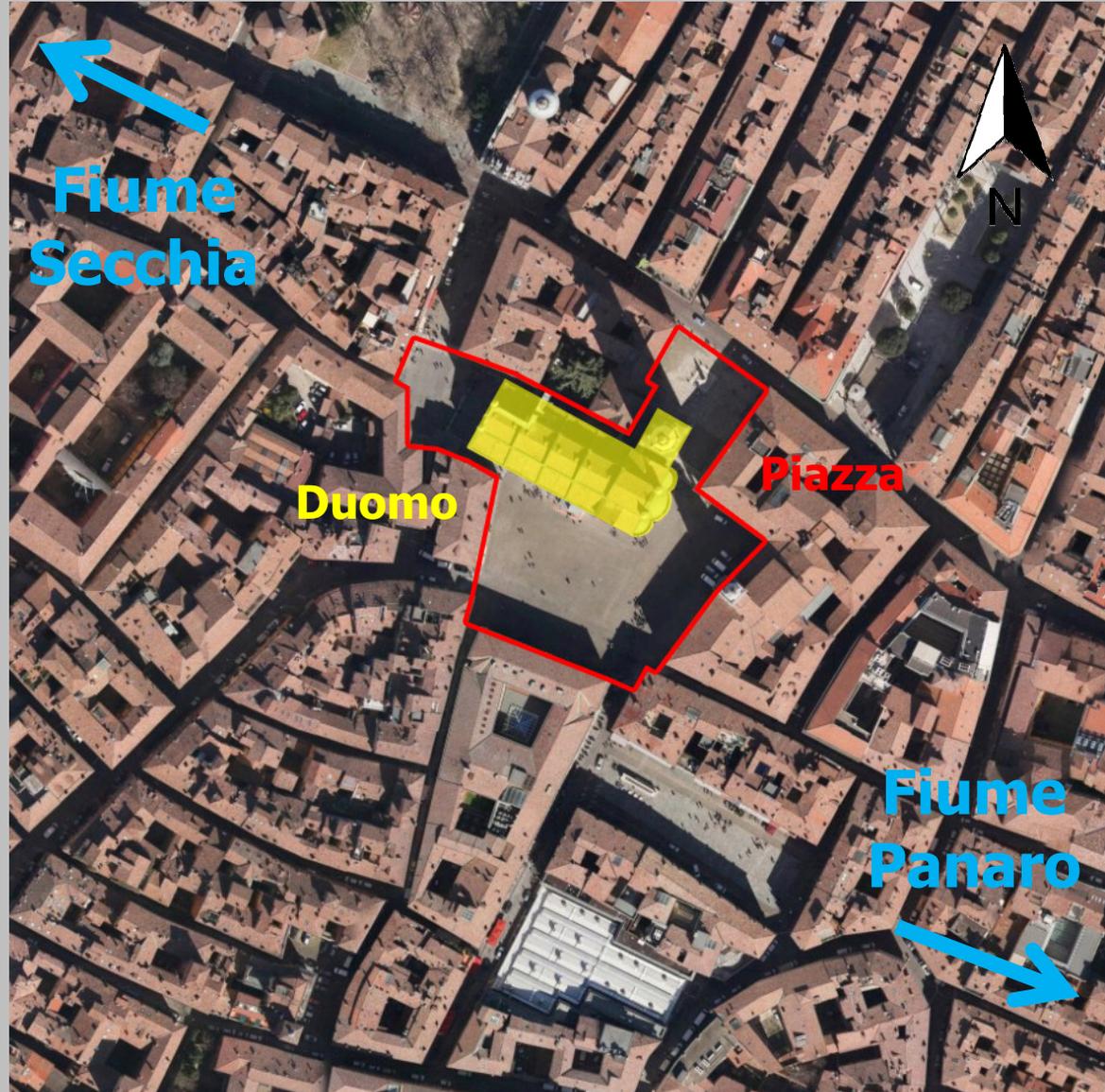
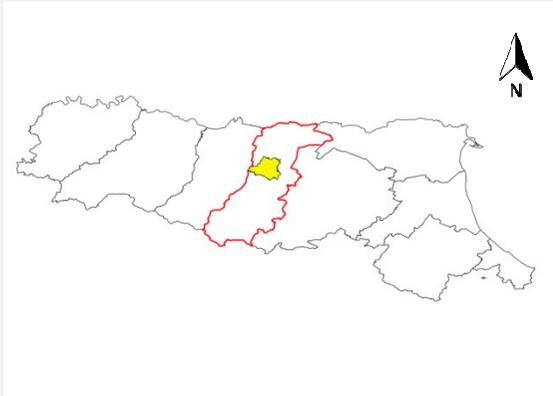


Analisi multirischio: confronto pre-post



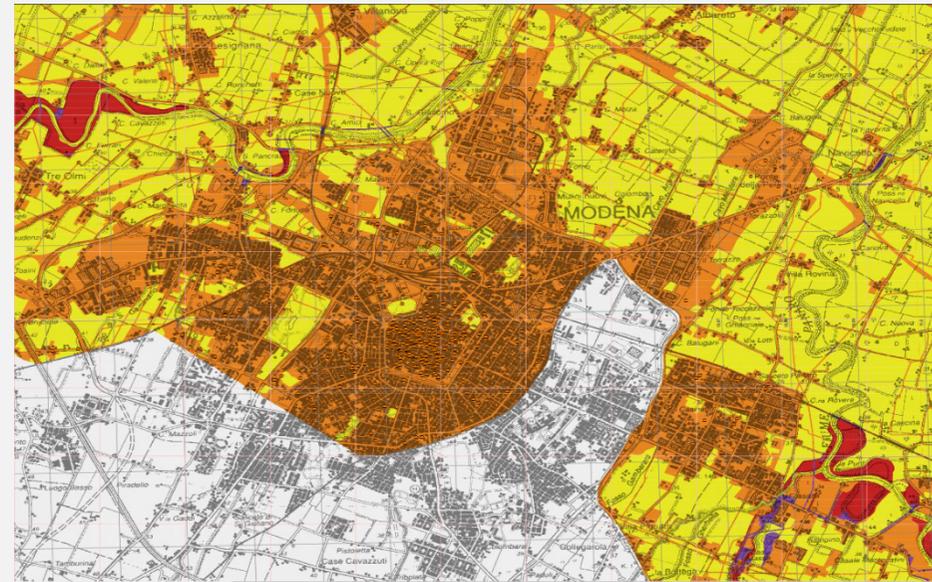
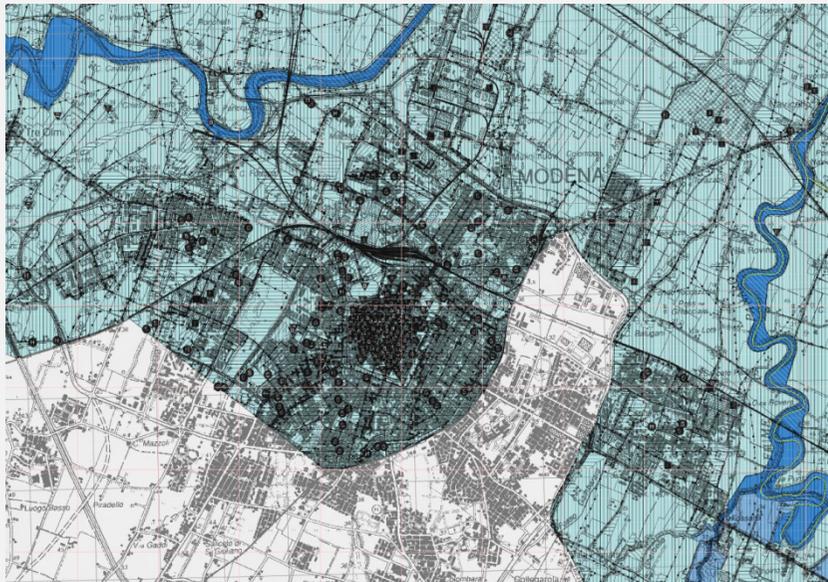


Analisi di rischio idraulico: metodologia



ALLAGAMENTO FLUVIALE

$T_r = 500$ anni



Scenari di Pericolosità

- P3 – H (Alluvioni frequenti: tempo di ritorno tra 20 e 50 anni - elevata probabilità)
- P2 – M (Alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno tra 100 e 200 anni - media probabilità)
- P1 – L (Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi)

Legenda

Aree Protette

- Zone Parco
- SIC - ZPS

Elementi Potenzialmente Esposti

- Zone urbanizzate
- Attività produttive
- Strutture strategiche e sedi di attività collettive
- Infrastrutture strategiche
- Insedimenti produttivi o impianti tecnologici, potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale
- Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse

areali

- puntuali
- lineari

Lineari

- scuola
- ospedale
- diga
- impianti insediamenti

reti per la distribuzione di servizi

- reti stradali secondarie e spazi accessori
- reti ferroviarie e stradali primarie e spazi accessori

CLASSI DI RISCHIO	CLASSI DI PERICOLOSITA'			
	P3	P2	P1	
CLASSI DI DANNO	D4	R4	R4	R2
	D3	R4	R3	R2
	D2	R3	R2	R1
	D1	R1	R1	R1

- Matrice 1**
- Reticolo principale (RP)
 - Reticolo secondario collinare e montano (RSCM alpino)

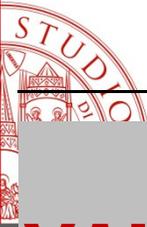
CLASSI DI RISCHIO	CLASSI DI PERICOLOSITA'			
	P3	P2	P1	
CLASSI DI DANNO	D4	R4	R3	R2
	D3	R3	R3	R1
	D2	R2	R2	R1
	D1	R1	R1	R1

- Matrice 2**
- Aree costiere lacuali (ACL)
 - Aree costiere marine (ACM), Reticolo secondario collinare e montano (RSCM appenninico)

CLASSI DI RISCHIO	CLASSI DI PERICOLOSITA'		
	P3	P2	
CLASSI DI DANNO	D4	R3	R2
	D3	R3	R1
	D2	R2	R1

- Matrice 3**
- Reticolo secondario di pianura (RSP)

Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) per il bacino del fiume Po



VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA ALLAGAMENTO

RISCHIO DA TABELLA STATI LIMITE NTC 2008

Stato Limite	Probabilità di superamento nel periodo di riferimento	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

RISCHIO

81%

63%

10%

5%



TEMPO DI RITORNO (T_r) [anni]

30.6

50.8

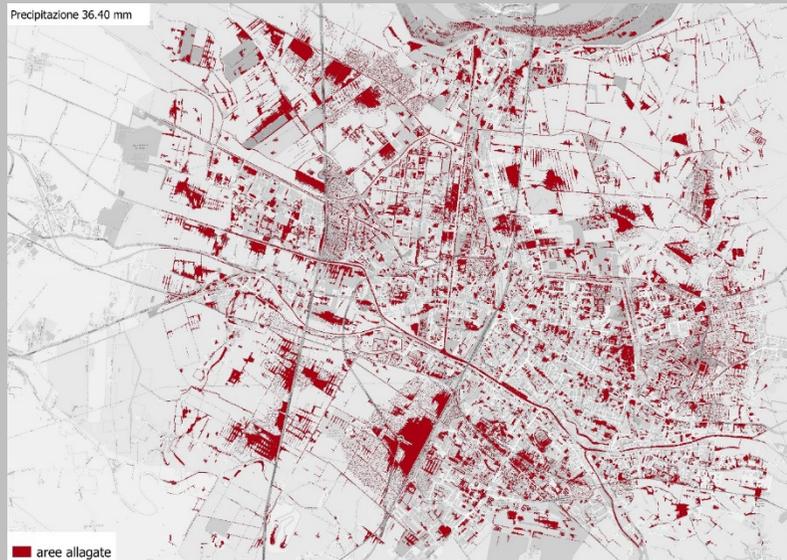
475

975

**BASSA PROBABILITA' DI
ALLAGAMENTO FLUVIALE**



**ALLAGAMENTO DA
PIOGGIA INTENSA
(PLUVIALE)**



**AREE POTENZIALMENTE
ALLAGABILI**



**ALTEZZE DI ALLAGAMENTO
AL SUOLO**



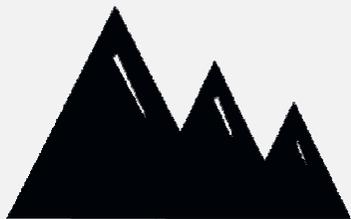
PIOGGIA INTENSA



**EVENTI di
PRECIPITAZIONE
INTENSA
(massimi annuali)**

Durata = 1, 3, 6, 12 e 24 ore

(Fonte: ARPAE)



DEM



**LIDAR
(DEM ad ELEVATA
RISOLUZIONE)**

Risoluzione = 1 - 2 m

(Fonte: AIPO)



**EVENTI di
PRECIPITAZIONE
INTENSA
(massimi annuali)**

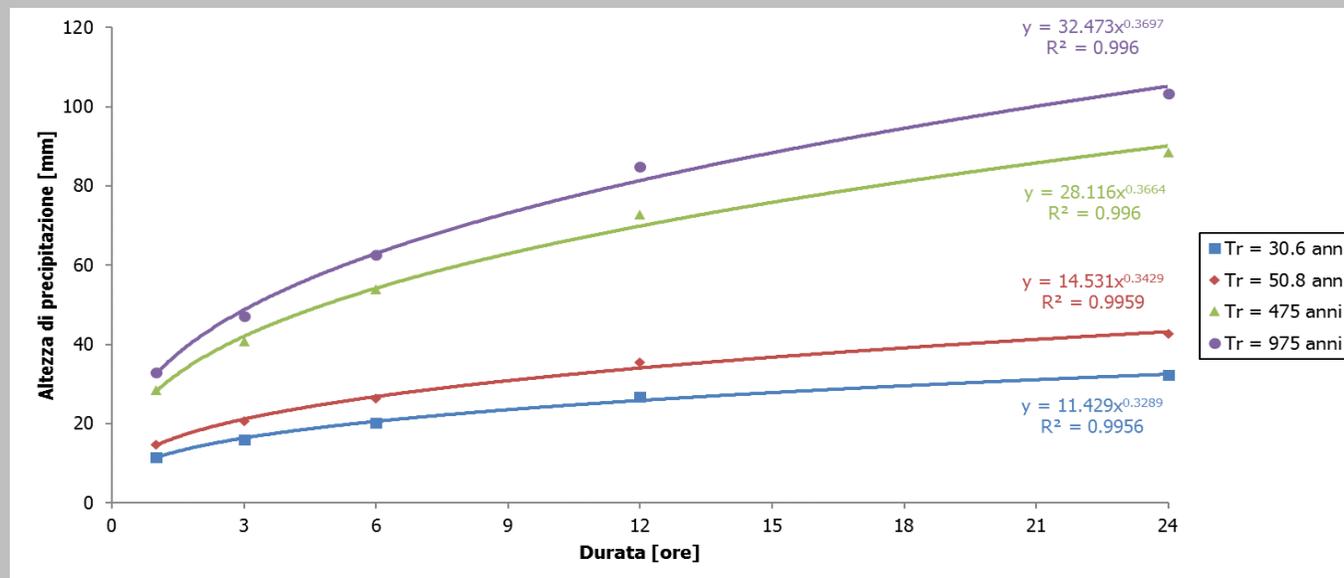
APPROSSIMAZIONE

**DISTRIBUZIONE di
PROBABILITA' di
GUMBEL**

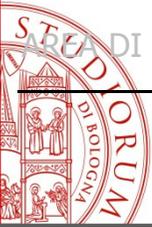
$$P(x) = e^{-e^{-\frac{x-\xi}{\alpha}}}$$

ESTRAPOLAZIONE

LINEE SEGNALETRICI DI POSSIBILITA' PLUVIOMETRICA (LSPP)



Stazione pluviometrica: Cognento (MO) – periodo: 1975-2012



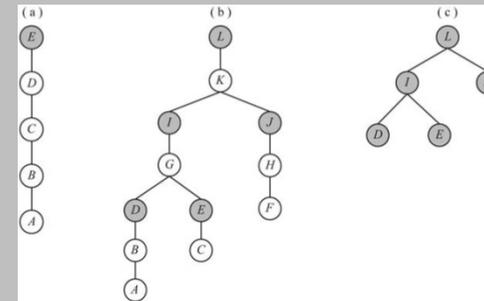
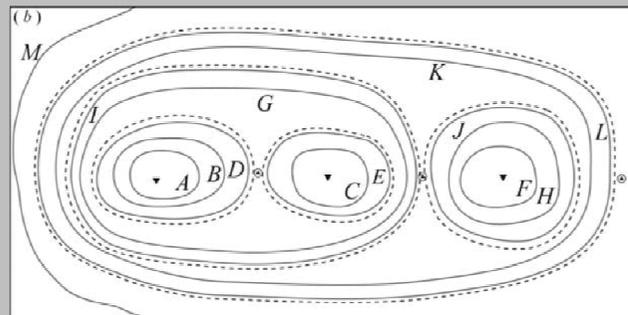
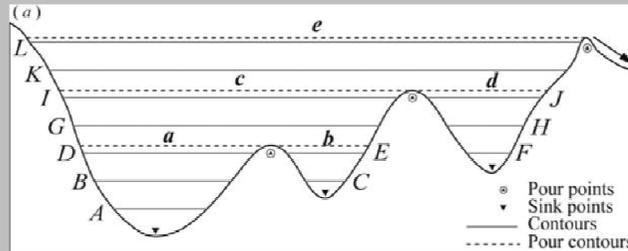
**LIDAR
(DEM ad ELEVATA
RISOLUZIONE)**

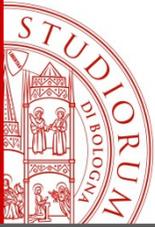
Metodo DEM-based

**Hierarchical
Filling-&-Spilling
(HFS)**

ESTRAPOLAZIONE

STRUTTURA GERARCHICA DELLE DEPRESSIONI DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA

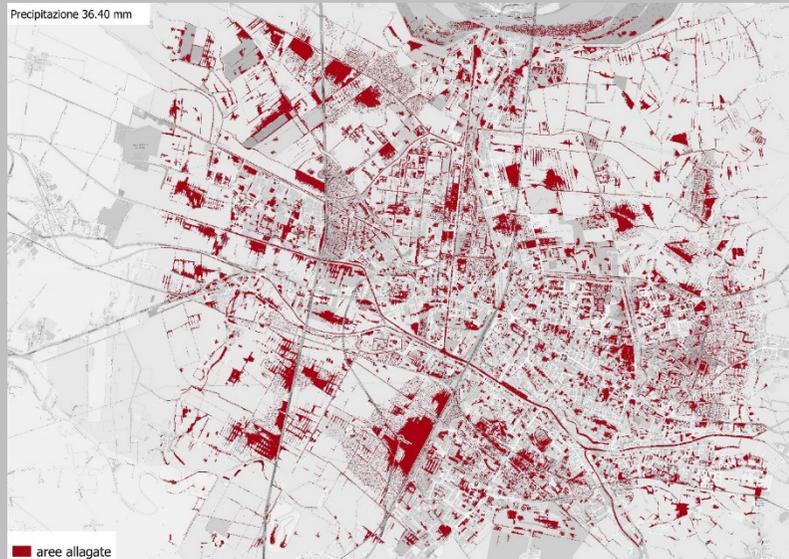




LSPP



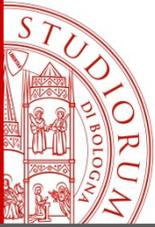
**STRUTTURA
GERARCHICA
DELLE
DEPRESSIONI**



**AREE POTENZIALMENTE
ALLAGABILI**



**ALTEZZE DI ALLAGAMENTO AL
SUOLO**



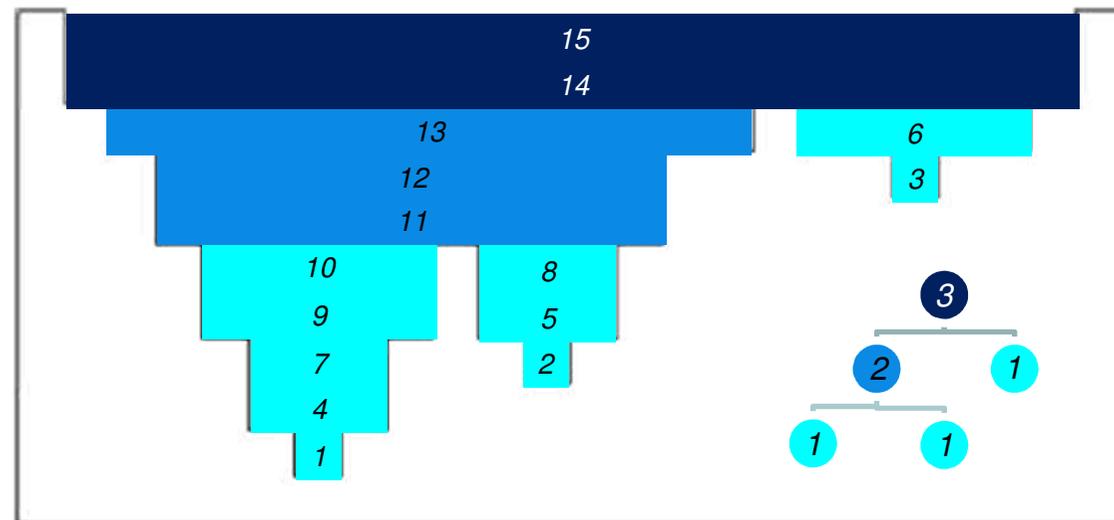
COME VENGONO IDENTIFICATE LE AREE POTENZIALMENTE ALLAGABILI E LE ALTEZZE DI ALLAGAMENTO AL SUOLO

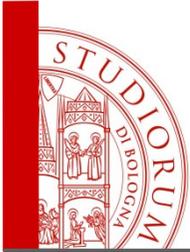


Condizione iniziale vuota

Le depressioni annidate vengono gradualmente riempite secondo la loro gerarchia verticale

il riempimento avviene per gradi, considerando in successione le depressioni con lo stesso ordine gerarchico





Depressioni nelle zone del centro di Modena

