This research has been carried out within the framework of the European LIQUEFACT project.
The LIQUEFACT project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement No. 700748

Il progetto LIQUEFACT in Emilia-Romagna

WEBINAR
17 febbraio 2021

Valutazione della vulnerabilità di strutture ed infrastrutture alla liquefazione sismo-indotta dei terreni. Sviluppo di modelli di fragilità empirici per edifici in muratura utilizzando i dati della Regione Emilia-Romagna.

Di Ludovico M., Chiaradonna A., Bilotta E., Flora A., Prota A.

UNIVERSITY OF NAPOLI FEDERICO II

European Commission

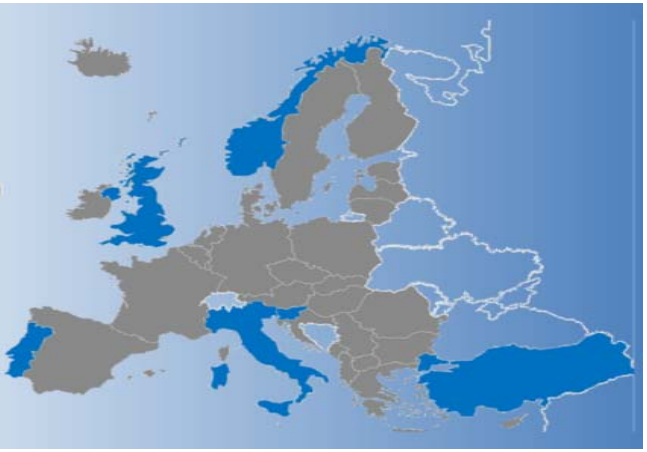
INTRODUZIONE

- **RACCOLTA DATI SUL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE**

European Commission

liquefACT

Horizon 2020
European Union funding
for Research & Innovation



RegioneEmilia-Romagna
DIREZIONE GENERALE CURA DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE

servizio geologico sismico e dei suoli

Agenzia regionale per la Ricostruzione Sisma 2012

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

2017 - Accordo scientifico

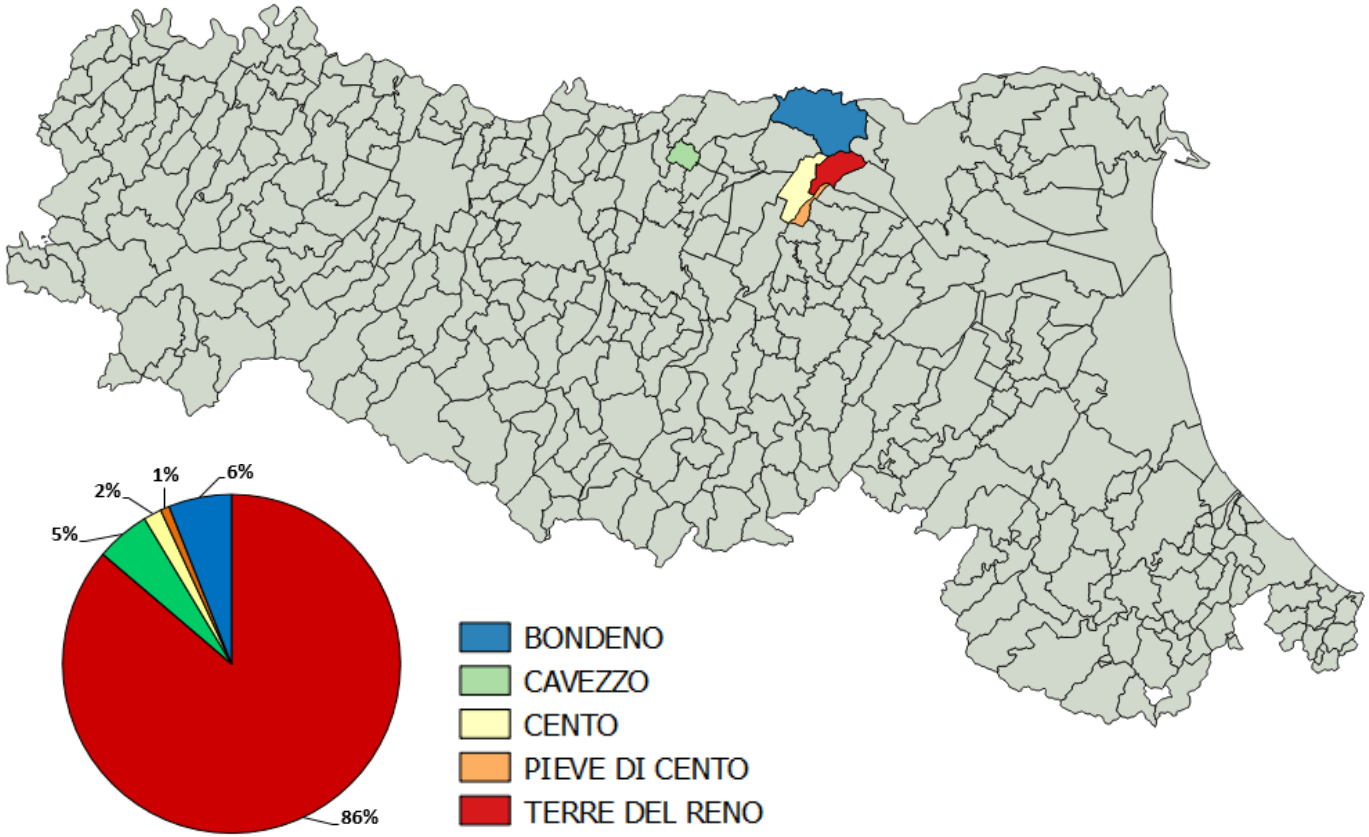
INTRODUZIONE

- **RACCOLTA DATI SUL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE**

I. RACCOLTA DATI DI EDIFICI DANNEGGIATI (Comuni di Mirabello, San Carlo (Sant'Agostino), Bondeno, Cavezzo, Cento e Pieve di Cento)

Liquefied Ground Buildings (LG):
116 edifici in muratura con contributo economico per danno indotto da liquefazione

Unliquefied Ground Buildings (UG):
993 edifici in muratura con contributo economico per danni indotti da sisma



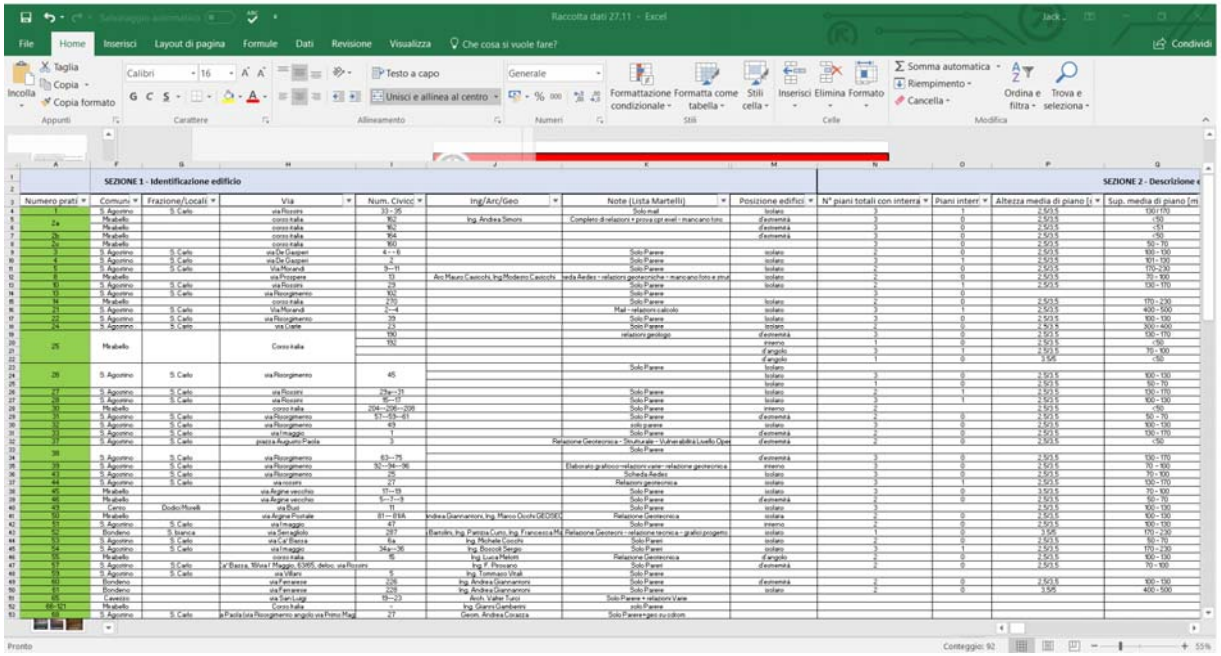
European Commission

INTRODUZIONE

- **RACCOLTA DATI SUL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE**

II. DATI ESTRAPOLATI DA REPORT DELLE PRATICHE

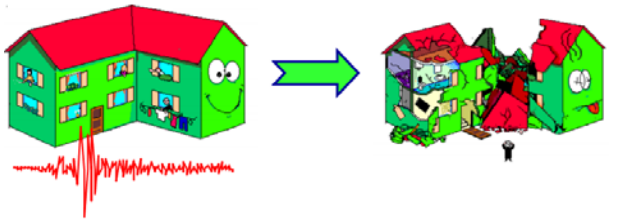
- Livello ed estensione del danno su componenti strutturali e non strutturali (AeDES),
- Report fotografici del danno (tavole),
- Prove distruttive e non distruttive su materiali e terreno.

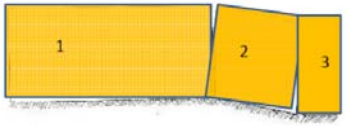


OBIETTIVI

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE:

Possiamo distinguere chiaramente il danno indotto da liquefazione da quello sismico?





Structural component / Pre-existing damage	Level - extension	DAMAGE									
		D4-D5 Very heavy			D2-D3 Medium-severe			D1 Slight			Null
		> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	L
1	Vertical structures	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
2	Floors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
3	Stairs	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
4	Roof	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
5	Infills-partitions	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
6	Pre-existing damage	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○

AeDES da (Baggio et al. 2008)

II. ANALISI COMPATATIVA DEL DANNO EMPIRICO:

Quanto è affetto dal fenomeno della liquefazione il danno globale sulle strutture?

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE:

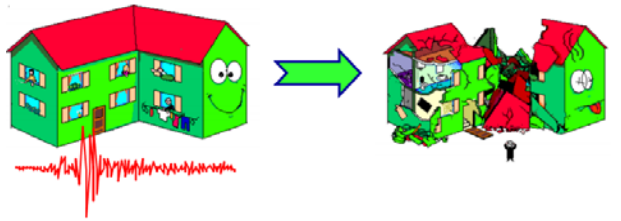
Cosa rappresenta la curva di fragilità e quali parametri dovrebbero essere usati?

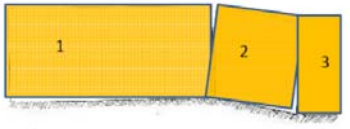
Gradi di danno Sismico?

PGA o potenziale di liquefazione del terreno?

OBIETTIVI

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE:
Possiamo distinguere chiaramente il danno indotto da liquefazione da quello sismico?





ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Tabella riassuntiva dei report

PER OGNI EDIFICIO:

- Vista in Pianta, elevazione e sezioni;
- Foto del danno;
- Localizzazione del danno;
- Analisi del danno

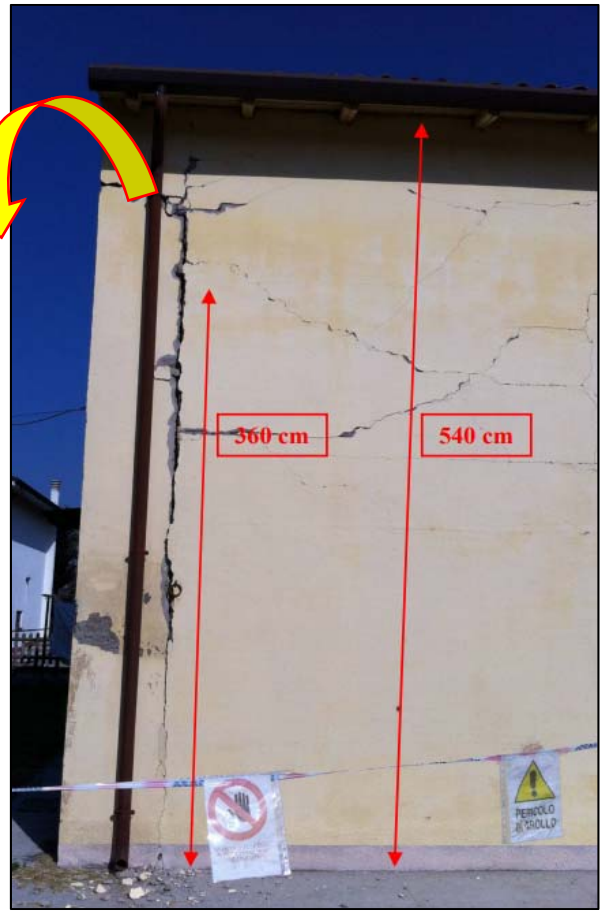
European Commission

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

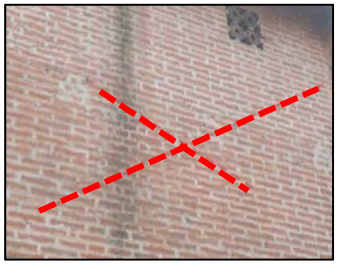
Danno – Azioni sismiche inerziali

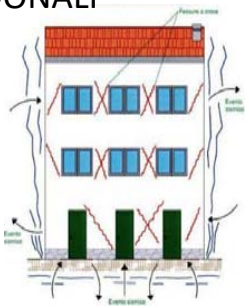
RIBALTAMENTO SEMPLICE DELLA PARETE



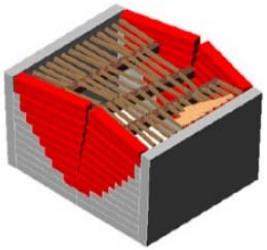
RIBALTAMENTO COPERTURA

FESSURE DIADONALI





PERDITA DELL'APPOGGIO

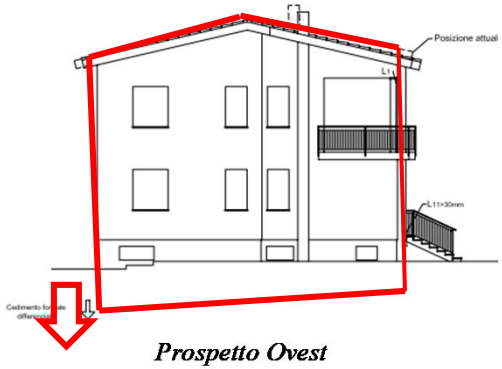


European Commission

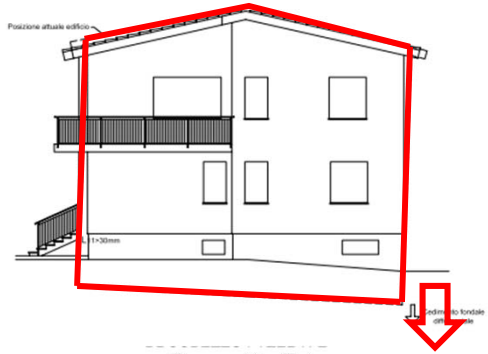
ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

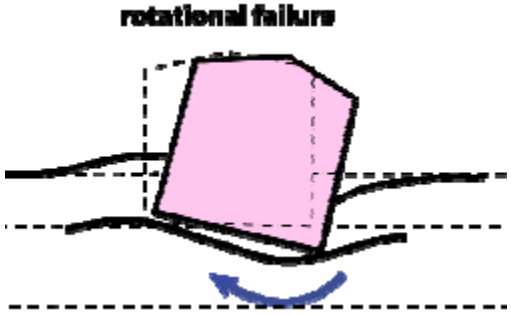
Danno - Liquefazione



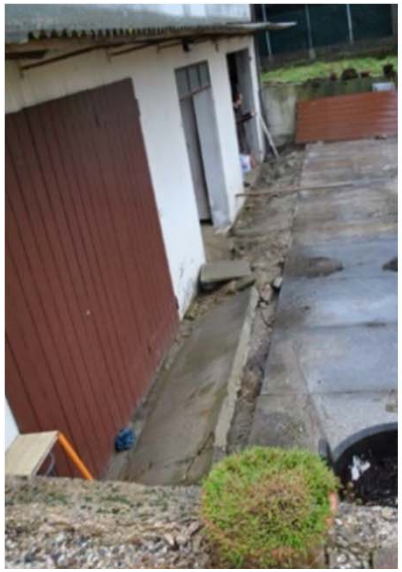
Prospetto Ovest



Prospetto Est



CEDIMENTI-ROTAZIONE RIGIDA DELL'EDIFICIO

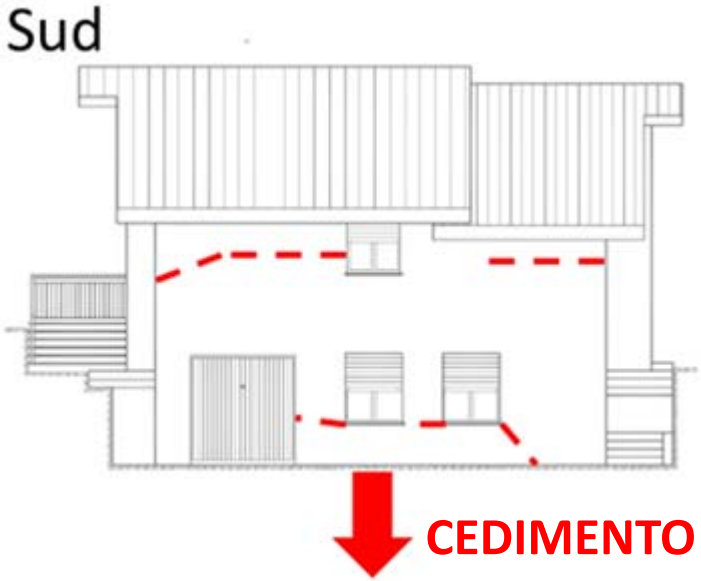


European Commission

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno - Liquefazione



CEDIMENTI LOCALIZZATI

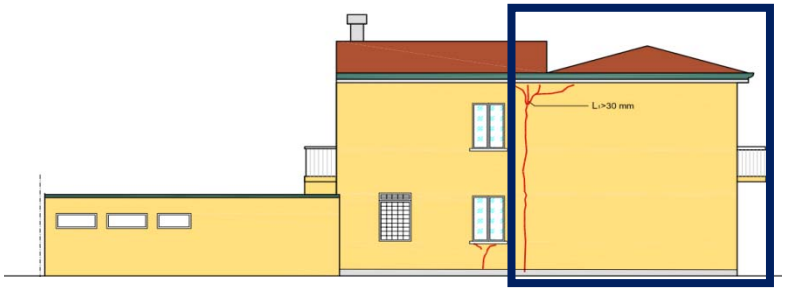
ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno - Liquefazione

Prospetto nord-est

Lateral Displacement



Prospetto sud

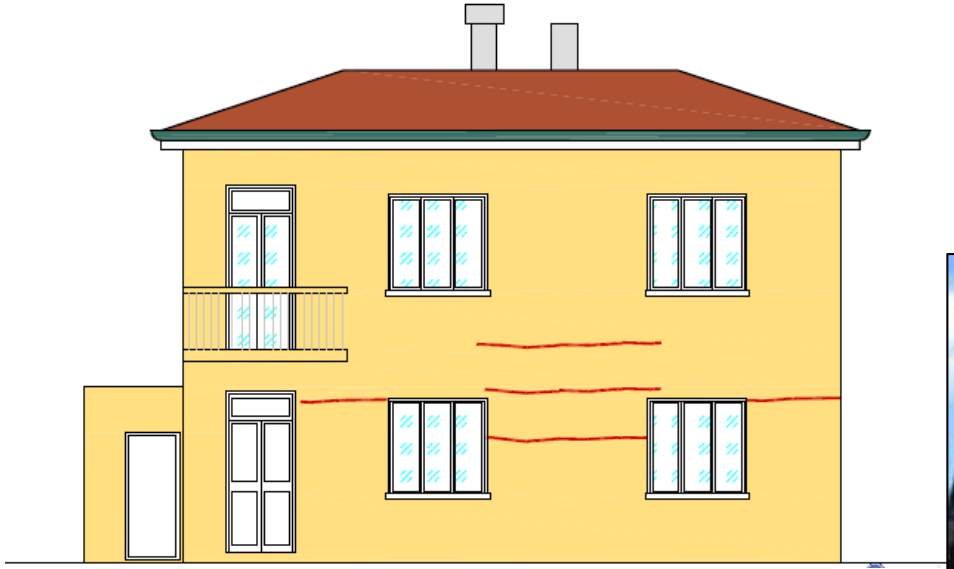
Lateral Displacement

CEDIMENTI LOCALIZZATI

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno - Liquefazione

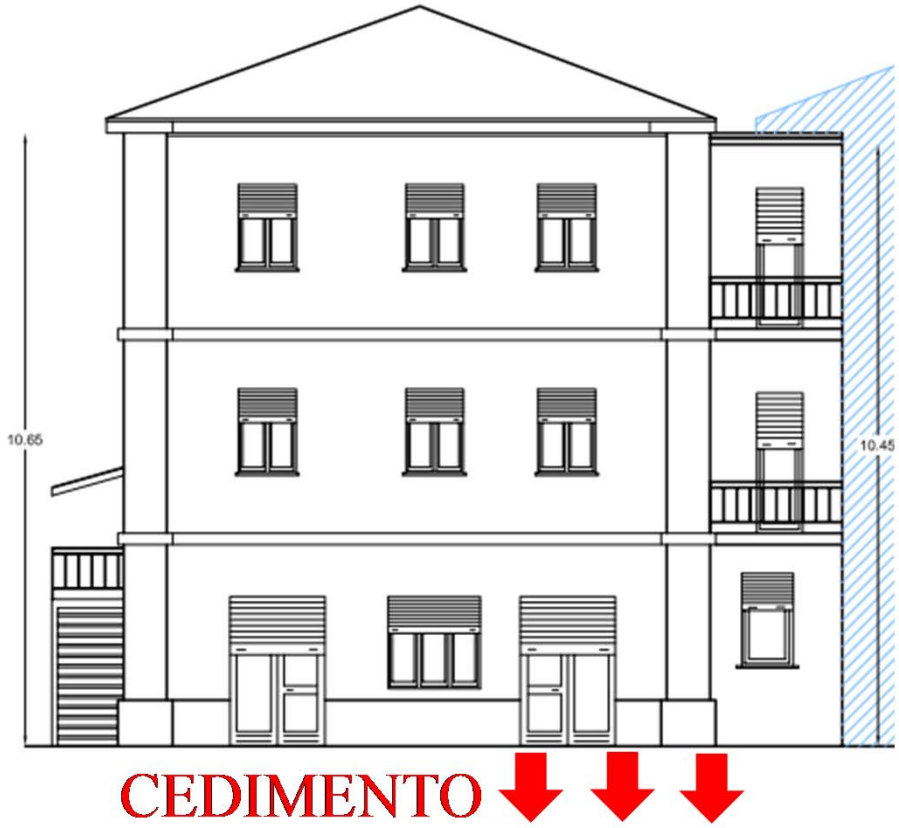


CEDIMENTI LOCALIZZATI

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno - Liquefazione



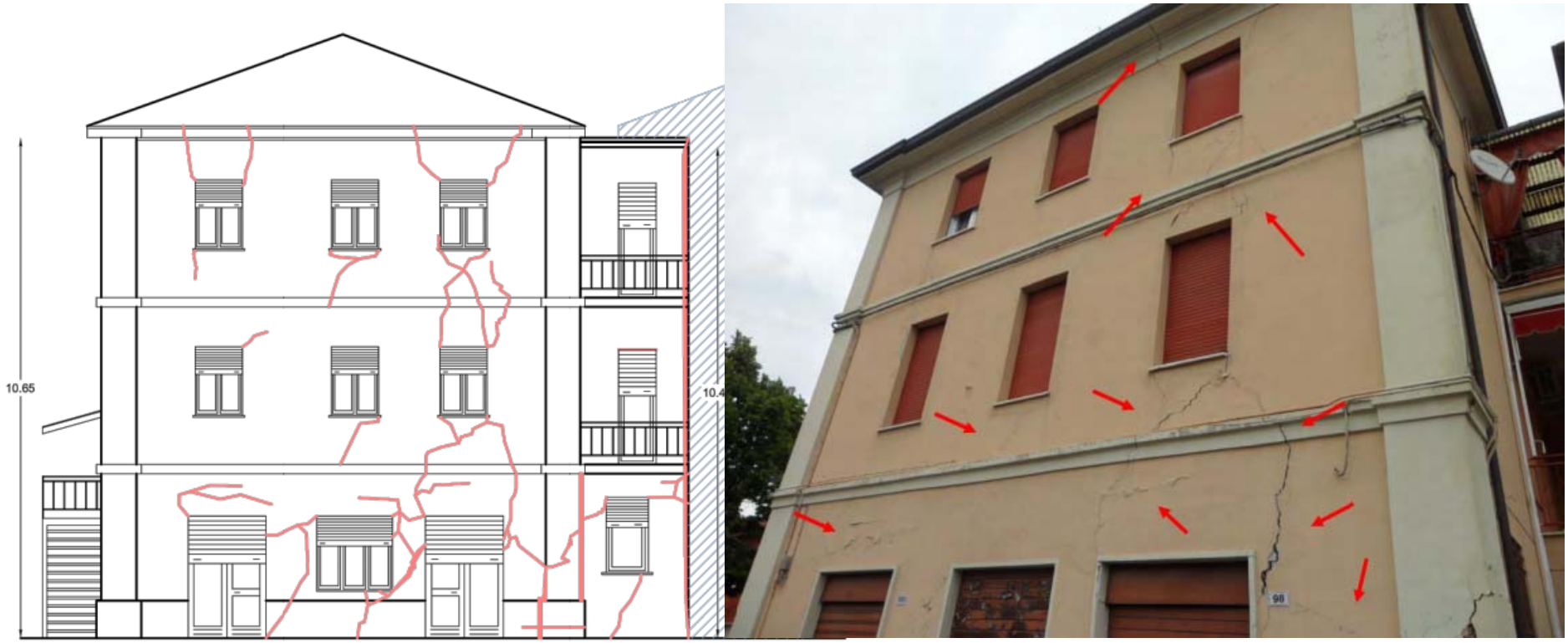
CEDIMENTI LOCALIZZATI

European Commission

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno – Liquef. + Forze inerziali



PROSPETTO SUD

…in alcuni casi è possibile osservare sia il tipico danneggiamento indotto da forze inerziali che da liquefazione (cedimento)

…la liquefazione è un «filtro» per le azioni sismiche sulla sovrastruttura, ma non è immediato

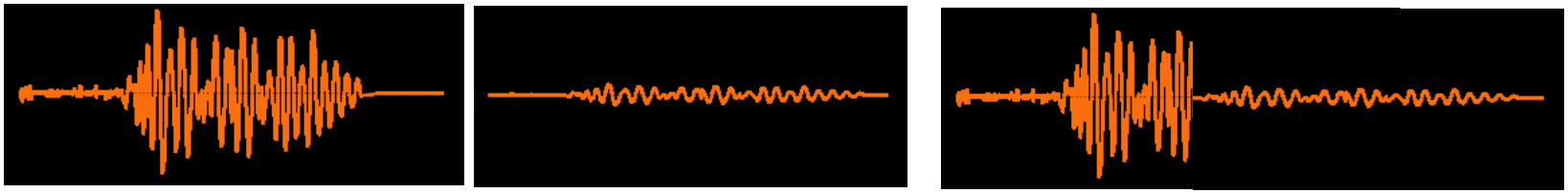
European Commission

ANALISI DEL DANNO – QUADRO FESSURATIVO

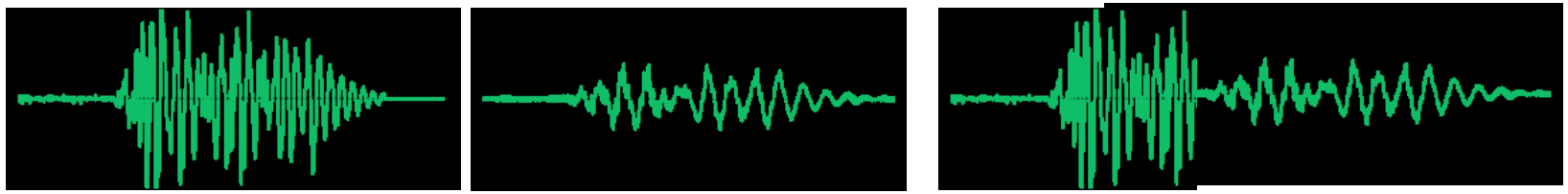
I. ANALISI DEL DANNO INDOTTO DA LIQUEFAZIONE

Danno – Liquef. + Forze inerziali

Interstorey Drift

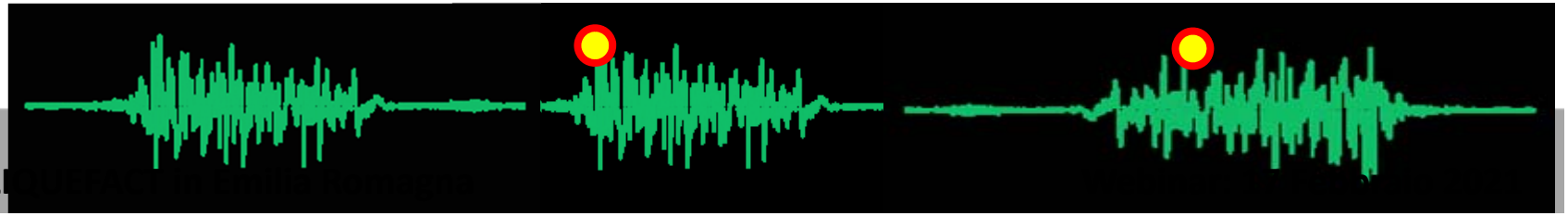


Risposta strutturale (accerel.)



No Liquefazione | **Attivazione Liquef.** | **No Liquef.** | **+Liquefazione**

Acceler. Input



OBIETTIVI

Structural component / Pre-existing damage	Level - extension	DAMAGE									
		D4-D5 Very heavy			D2-D3 Medium-severe			D1 Slight			Null
		> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	L
1	Vertical structures	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○
2	Floors	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○
3	Stairs	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○
4	Roof	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○
5	Infills-partitions	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○
6	Pre-existing damage	□	□	□	□	□	□	□	□	□	○

AeDES da (Baggio et al. 2008)

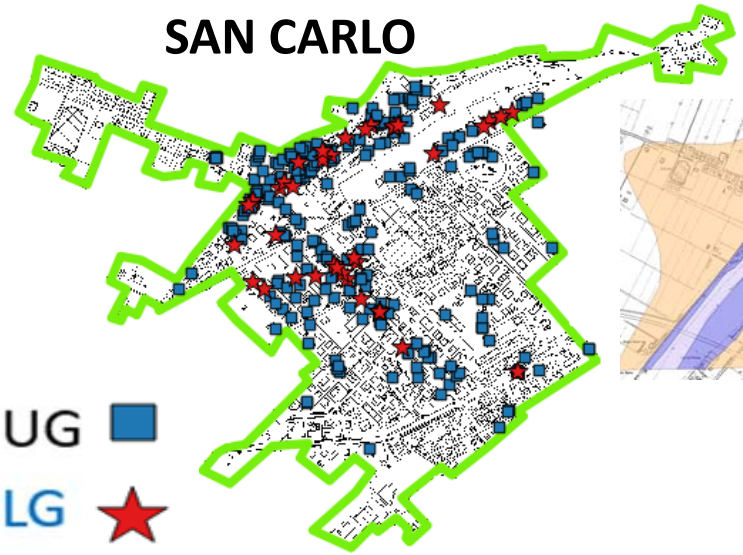
II. ANALISI COMPATATIVA DEL DANNO EMPIRICO:
Quanto è affetto dal fenomeno della liquefazione il danno globale sulle strutture?

European Commission

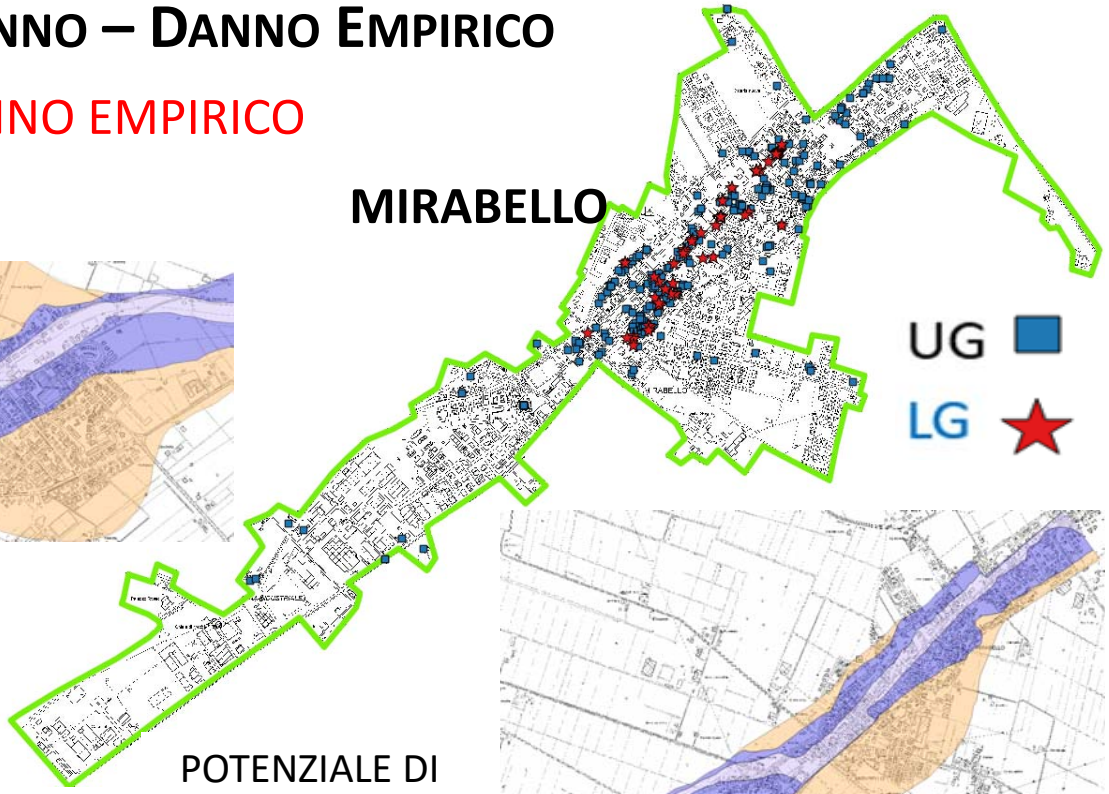
ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

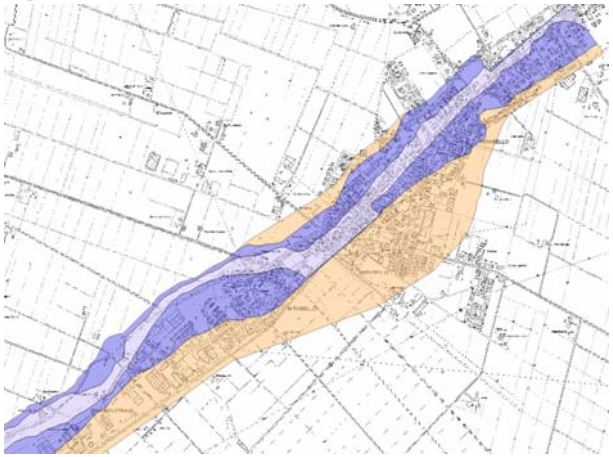
II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

SAN CARLO



MIRABELLO



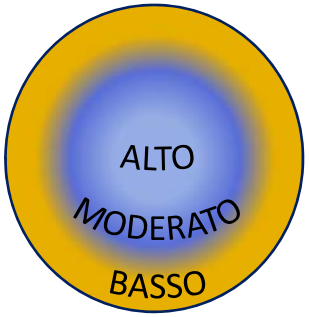


Dati sul danno empirico su 1094 strutture

	SAN CARLO	MIRABELLO	TOT.
CAMP. LG	46	55	101
CAMP. UG	393	277	650

Secondo i dati (ISTAT) ci sono 439 + 675 = 1114 edifici in muratura a San Carlo e Mirabello (si è assunto danno nullo per 363 (40 + 323) edifici non schedati)

POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE



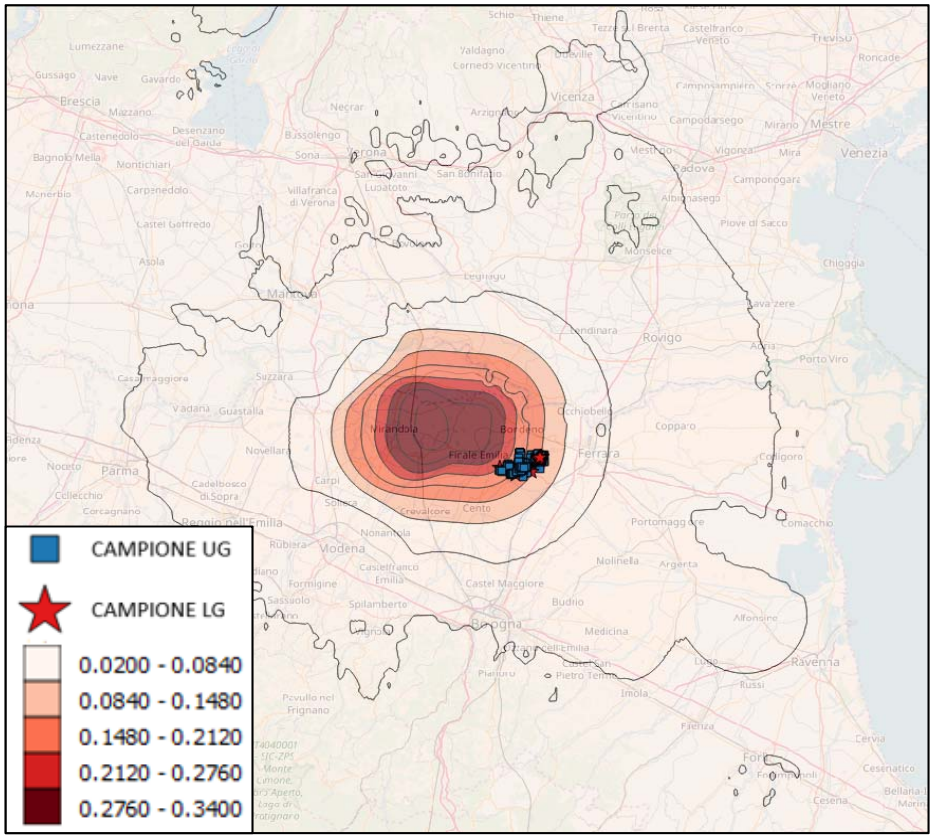
PIANA
PALEO-ARGINE
PALEO-ALVEO

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

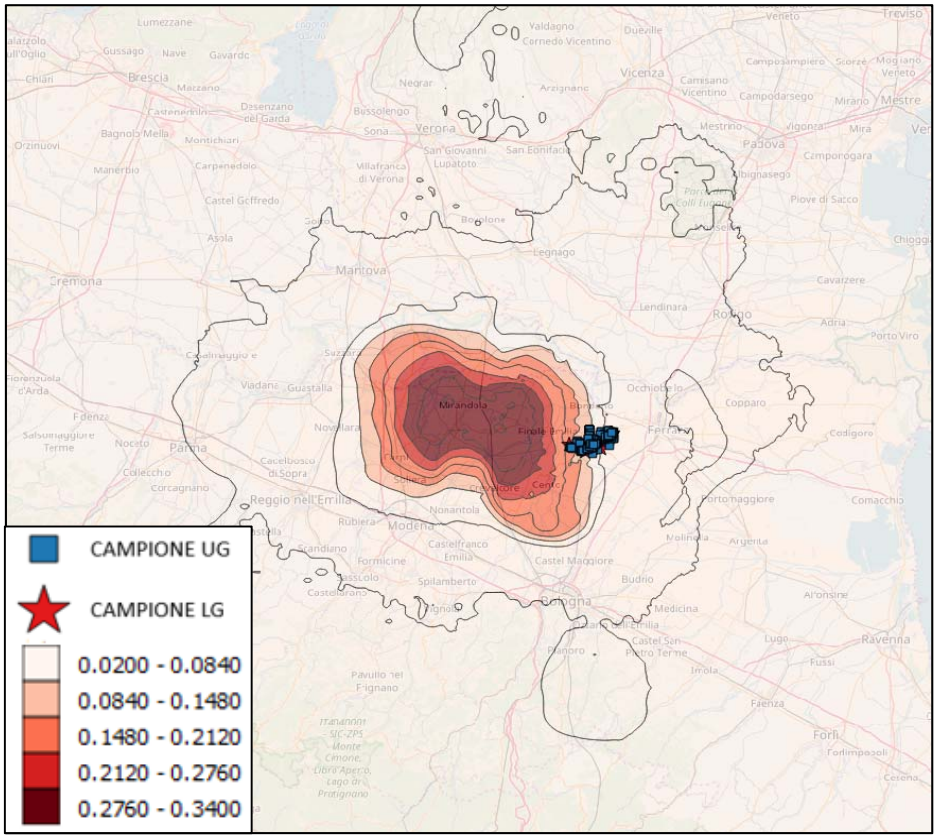
II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG Vs. Campione UG: Quanto sono comparabili i due campioni di edifici?

INGV ShakeMap: 20 Maggio 2012 02:03:50 UTC M 5.9



INGV ShakeMap: 29 Maggio 2012 07:00:03 UTC M 5.8

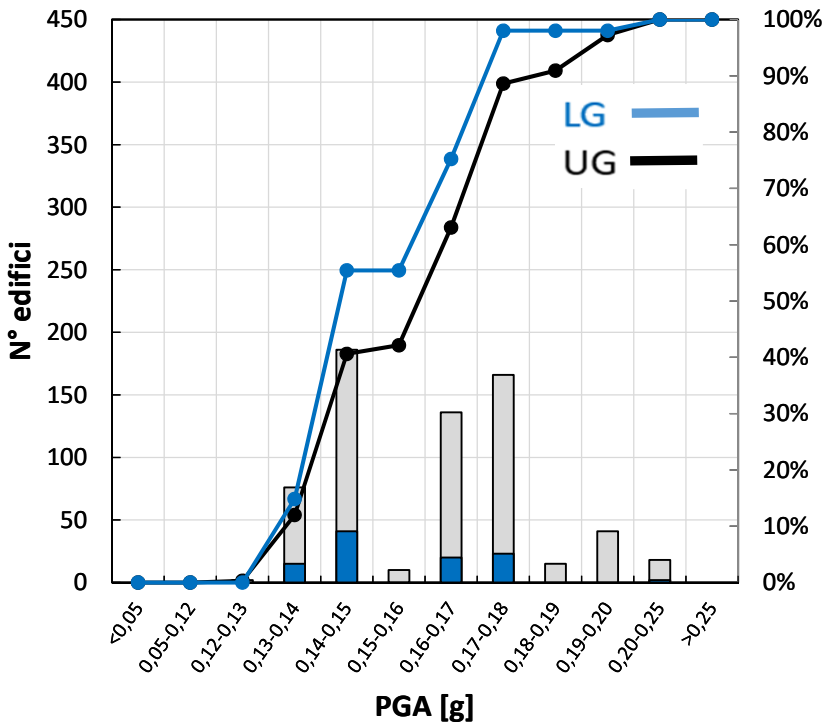


ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

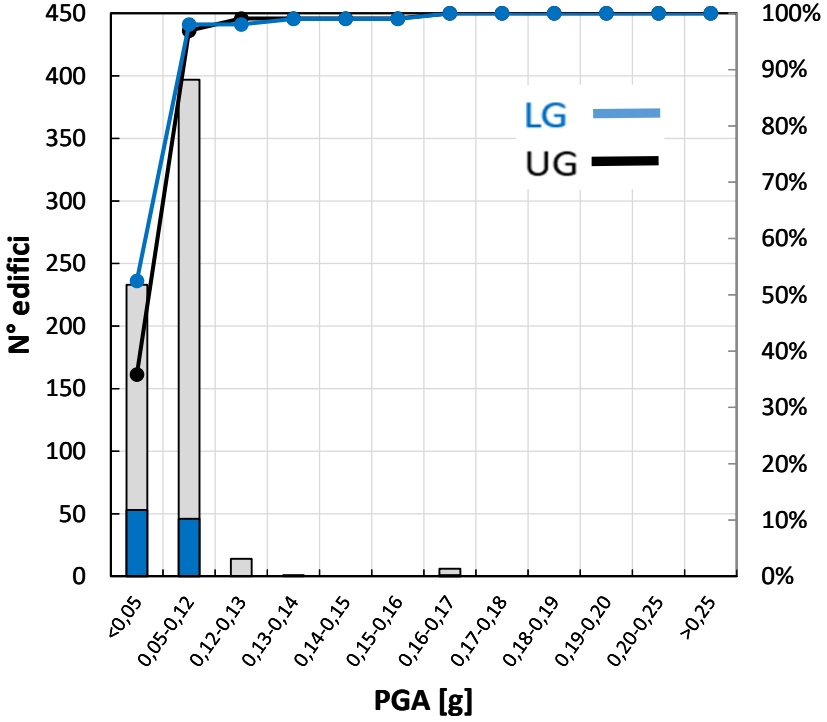
II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG Vs. Campione UG: Quanto sono comparabili i due campioni di edifici?

❖ PGA 20 Maggio



❖ PGA 29 Maggio



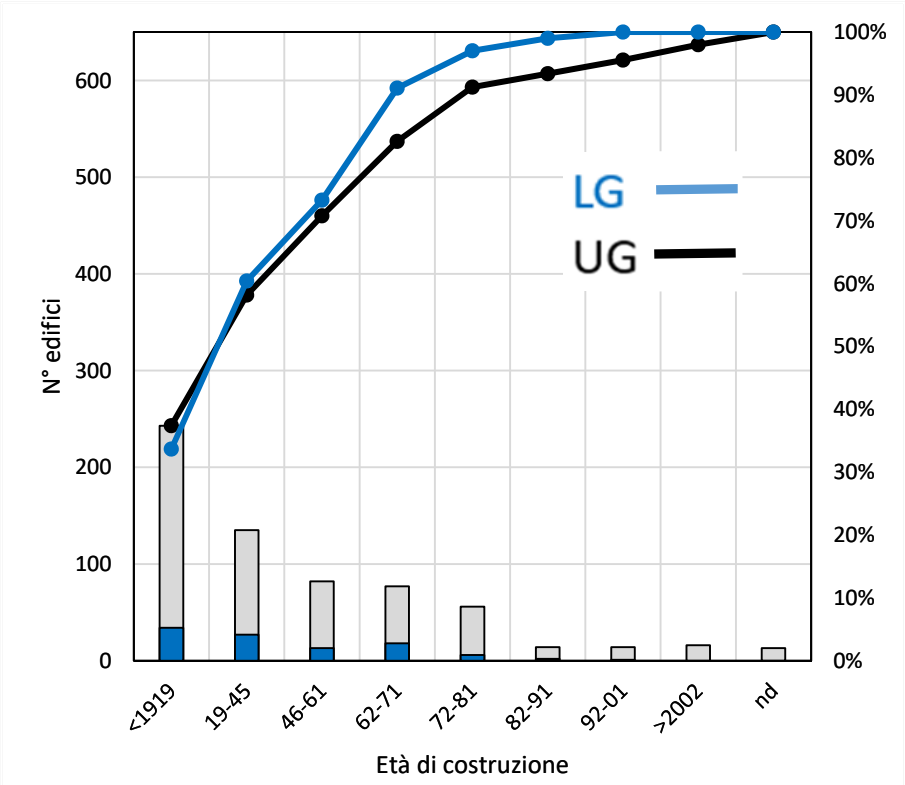
…… valori di PGA simili per intervalli compresi tra 0.13 - 0.18 g

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

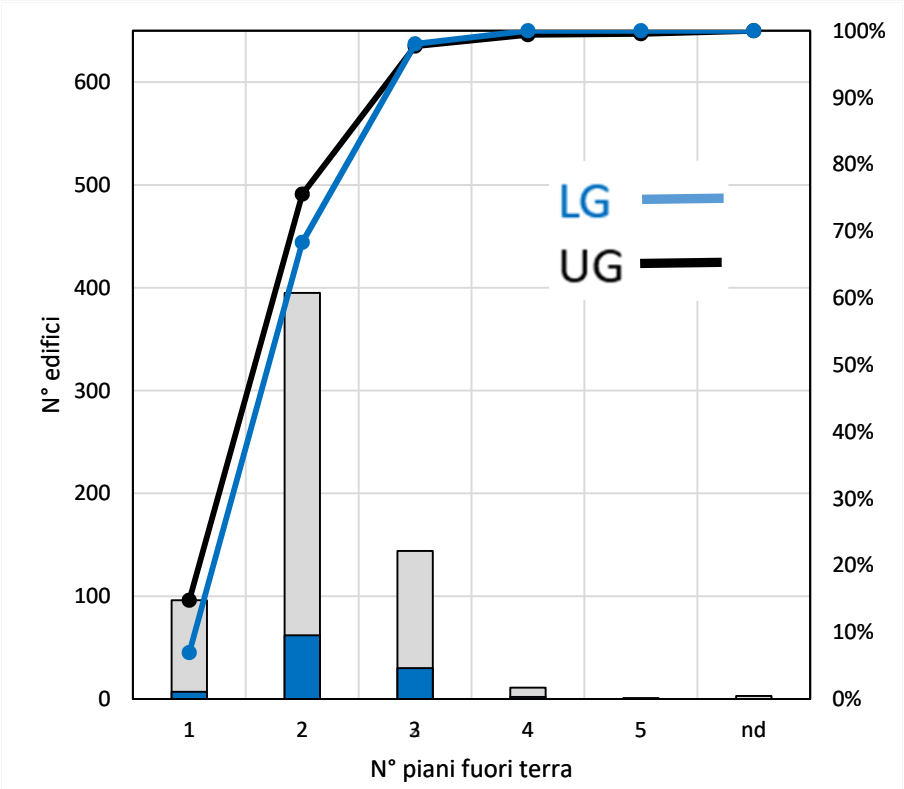
II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG Vs. Campione UG: Quanto sono comparabili i due campioni di edifici?

❖ ETÀ DI COSTRUZIONE



❖ NUMERO DI PIANI



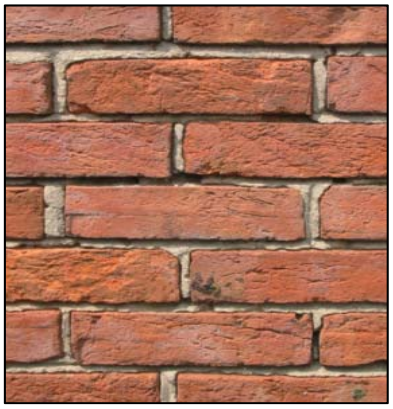
…… trend simile in termini di età di costruzione e numero di piani

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

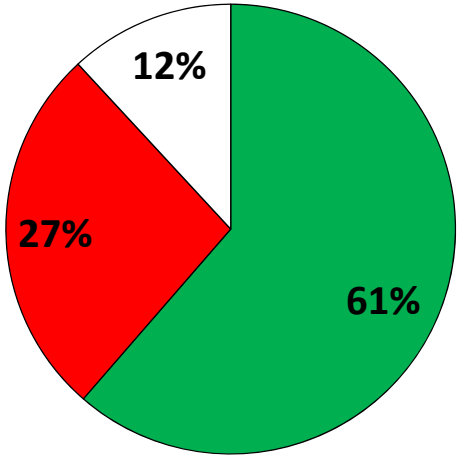
Campione LG Vs. Campione UG: Quanto sono comparabili i due campioni di edifici?

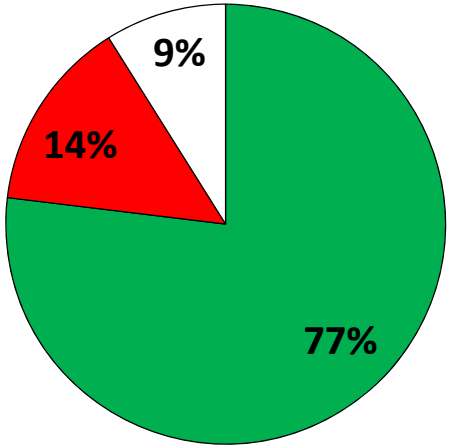
- QUALITÀ MURATURA

MURATURA DI BUONA QUALITÀ	MURATURA DI CATTIVA QUALITÀ
	

QUALITÀ MURATURA INDETERMINATA

LG edifici Vs. UG edifici:





… secondo i macroparametri del database (UG e LG) sono comparabili in termini di vulnerabilità (nei riguardi delle forze inerziali)

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

DETERMINAZIONE DANNO
(LEVELLO ED ESTENSIONE)
Componenti strutturali e non strutturali
secondo la scheda AeDES compilata da squadre di esperti nell'emergenza post-sisma

Componente strutturale- Danno preesistente \ Livello-estensione		Danno (1)									
		D4 - D5 Gravissimo			D2 - D3 Medio Grave			D1 Leggero			
		> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	Nullo
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	L
1	Strutture verticali	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
2	Solai	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
3	Scale	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
4	Copertura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○
5	Tamponature - Tramezzi	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	○

DANNO D0

DANNO D1

DANNO D2-D3

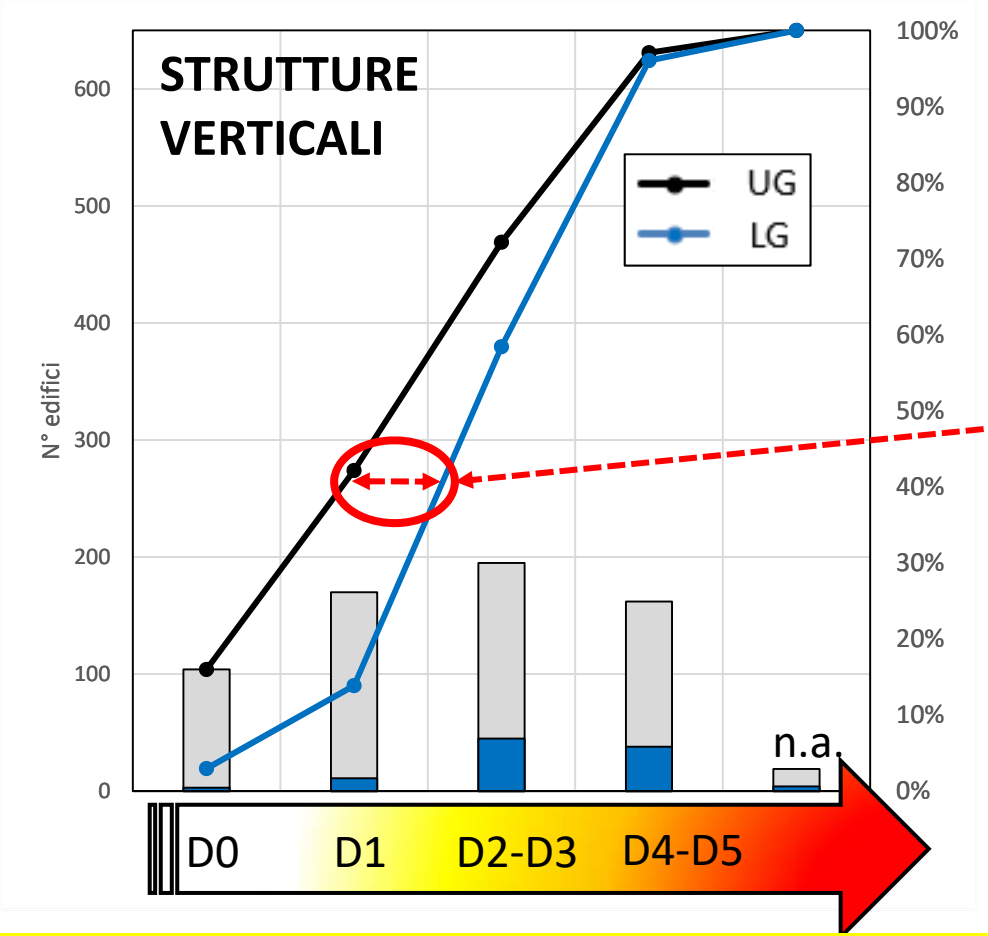
DANNO D4-D5

NULLO — LEGGERO — MEDIO-GRAVE — GRAVISSIMO

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG. Vs. Campione UG: Livello di danno?



Trend Cumulativo

Edifici soggetti a liquefazione(LG) mostrano un danno maggiore rispetto agli edifici non affetti da liquefazione(UG)

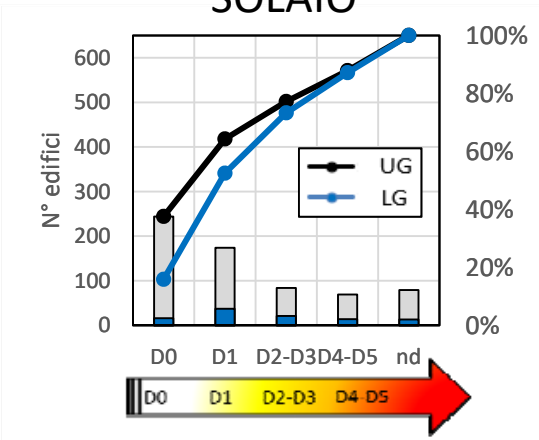
- **...la liquefazione provoca differenti tipologie di danno ma che sono severe;**
- **...il danno da liquefazione si può associare al danno sismico dovuto a forze inerziali**

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

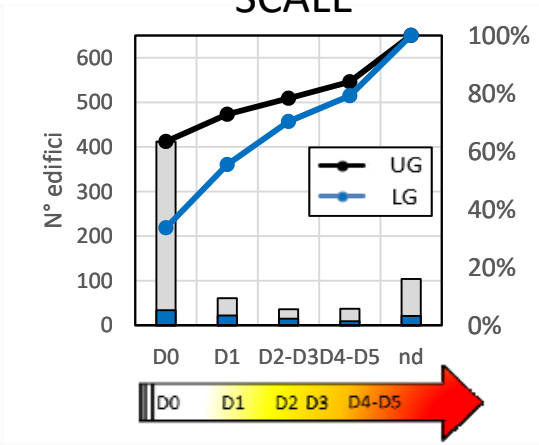
II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG. Vs. Campione UG: Livello di danno?

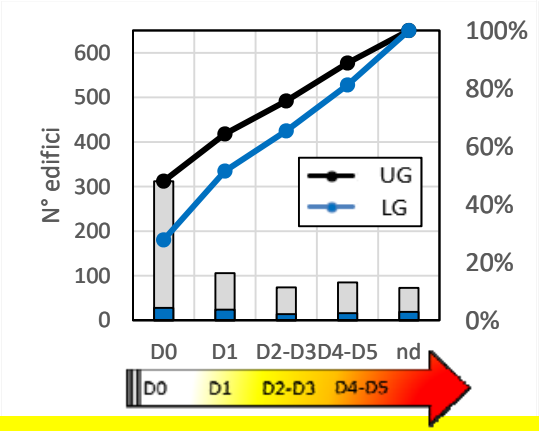
SOLAIO



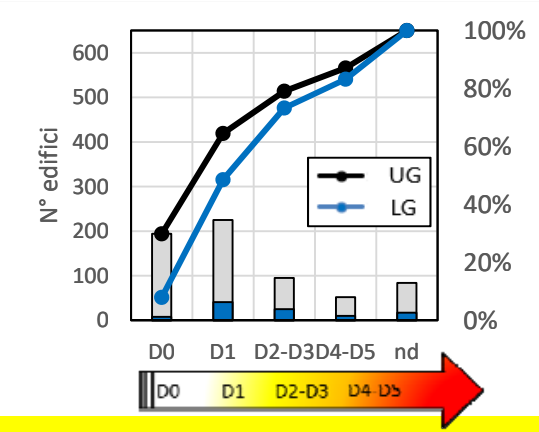
SCALE



COPERTURA



TAMPONATURE-TRAMEZZI

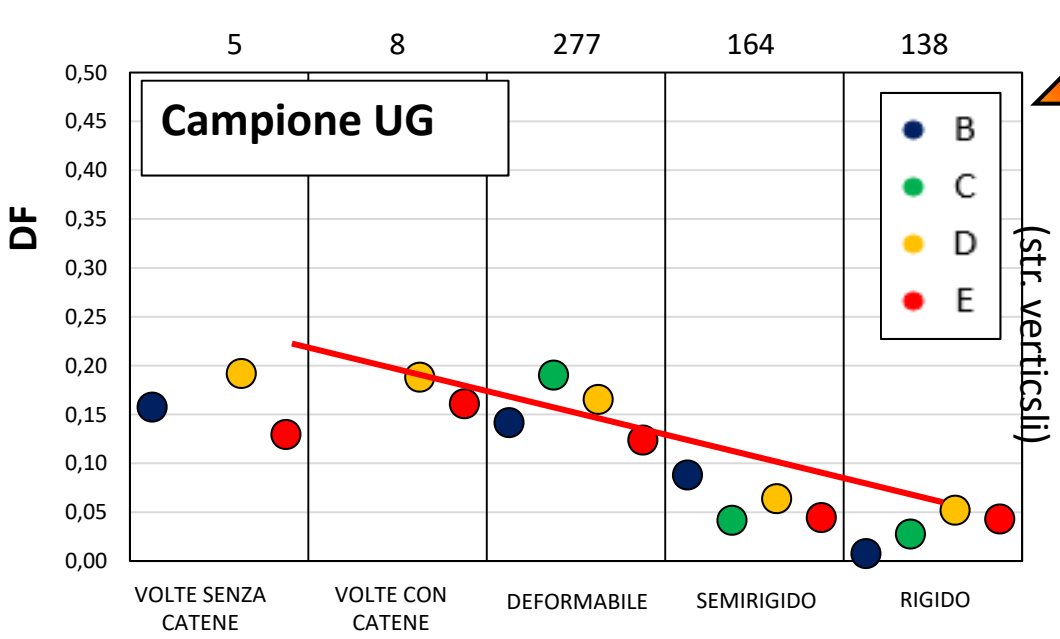


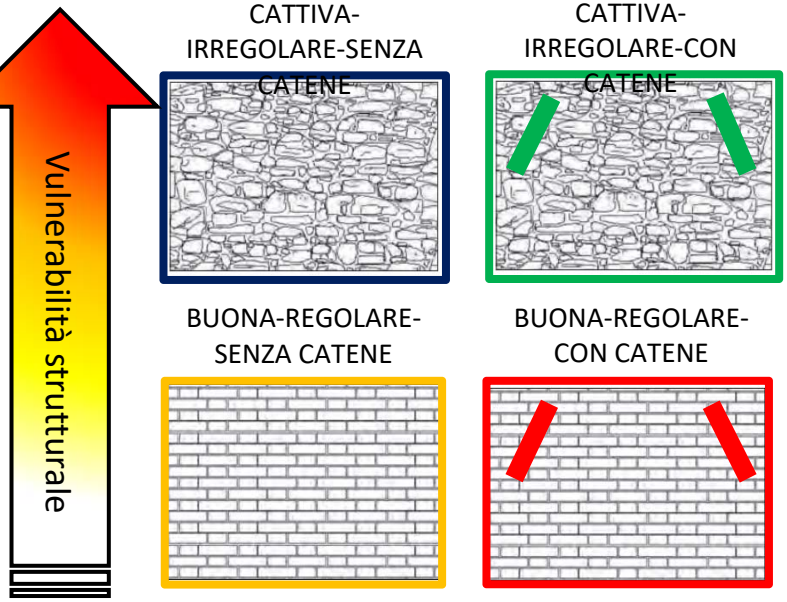
- **… Un trend simile è stato trovato per tutte le componenti strutturali e non strutturali**
- **…. differenza massima osservata su scale (danno leggermente dovuto a forze inerziali)**

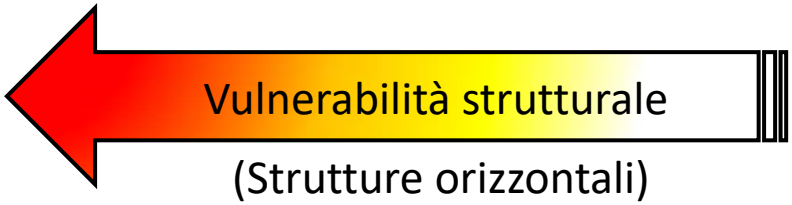
ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG. Vs. Campione UG: Influenza della vulnerabilità?







DF – Fattore Globale di danno

$$DF = \sum_j D_j \cdot \gamma_j$$

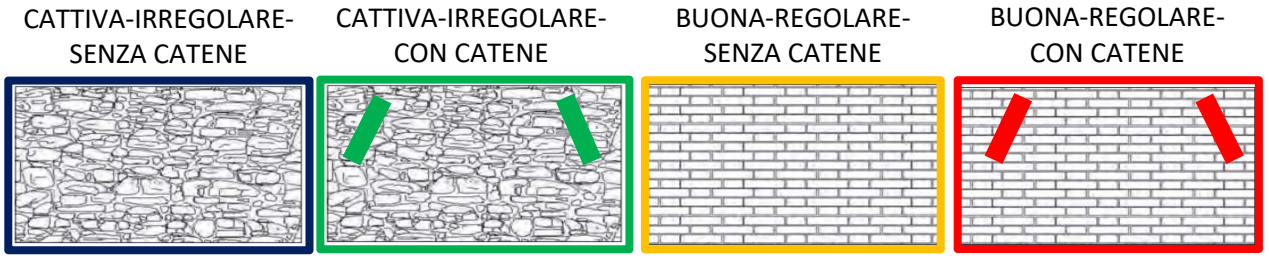
(Dolce et al. 2001)

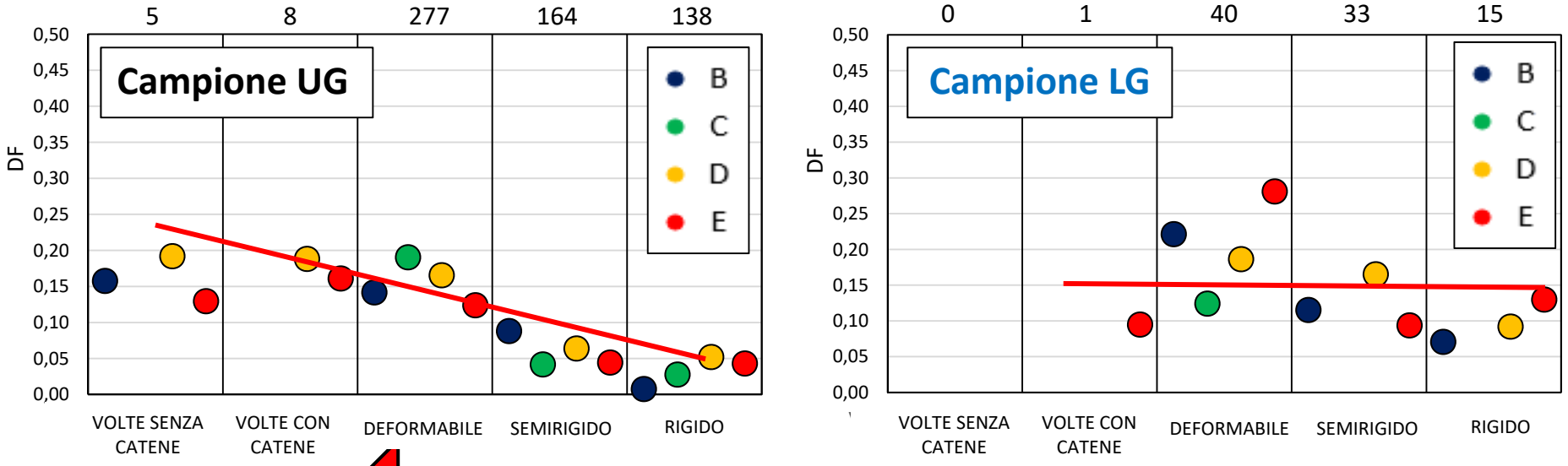
➢ **...vulnerabilità sismica chiaramente correlata al danno empirico nel campione di edifici UG**

ANALISI DANNO – DANNO EMPIRICO

II. ANALISI COMPARATIVA DEL DANNO EMPIRICO

Campione LG. Vs. Campione UG: Influenza della vulnerabilità?





Vulnerabilità strutturale (strutture orizzontali)

- **...la vulnerabilità sismica è chiaramente correlata al danno empirico per il campione UG mentre non è ben correlata al danno empirico per il campione LG**

OBIETTIVI

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE:

Cosa rappresenta la curva di fragilità e quali parametri dovrebbero essere usati?

Gradi di danno Sismico?

PGA o potenziale di liquefazione del terreno?

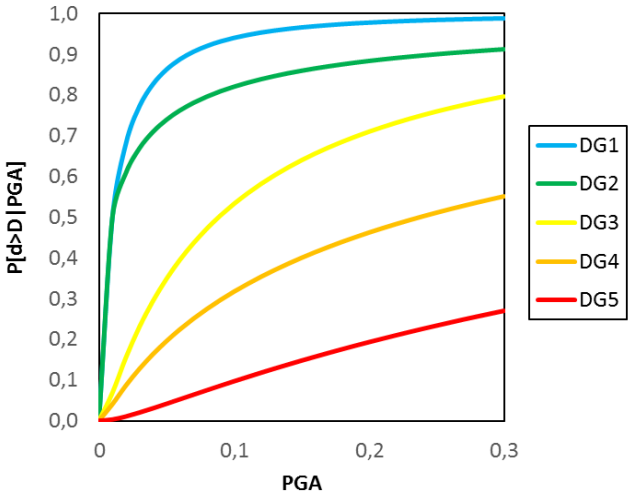
LINEE DI AZIONE A SCALA TERRITORIALE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

CURVE DI FRAGILITÀ
DEFINIZIONE SULLA BASE DEL DANNO OSSERVATO (AREA INDAGATA)

PREVISIONE DEL DANNO
PER LA DEFINIZIONE DI PROGRAMMI DI PREVENZIONE A SCALA TERRITORIALE

VALUTAZIONE DI INVESTIMENTO
ECONOMICO PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA LIQUEFAZIONE



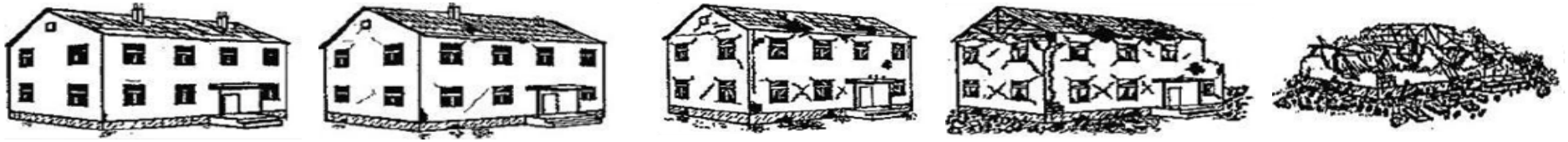
European Commission

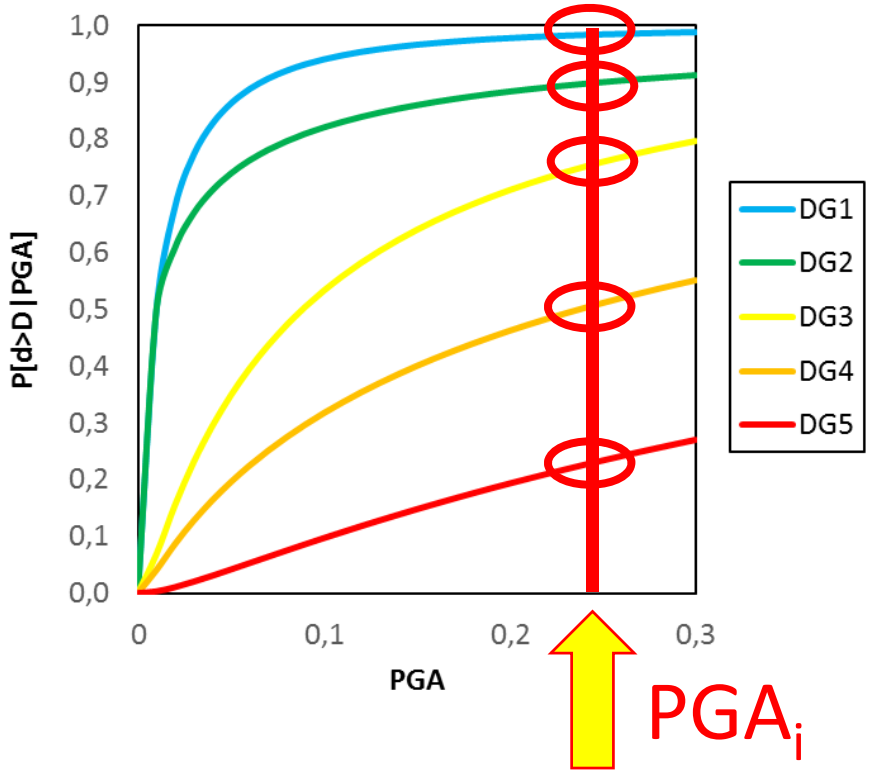
CURVE EMPIRICHE DI FRAGILITÀ - DEFINIZIONE

SCALA MACROSISMICA EUROPEA EMS 98

III. CURVE DI FRAGILITÀ

DG1 DG2 DG3 DG4 DG5





PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO DI STATI DI DANNO IN FUNZIONE DI PARAMETRI DI INTENSITÀ SISMICA (ES. PGA, PGV, PGD, IM...)

DANNO
5 STATI LIMITE

PERDITE
(€, inagibilità, vittime)

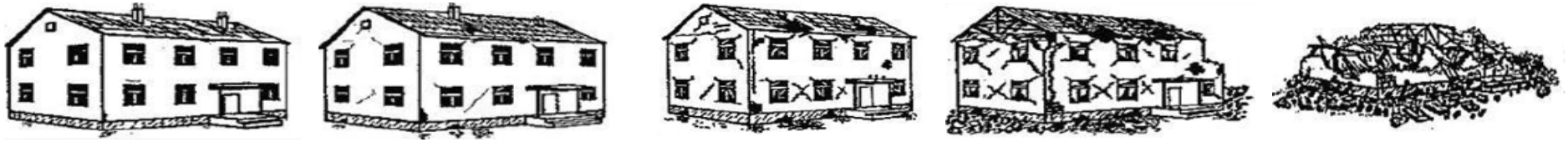
European Commission

CURVE EMPIRICHE DI FRAGILITÀ - DEFINIZIONE

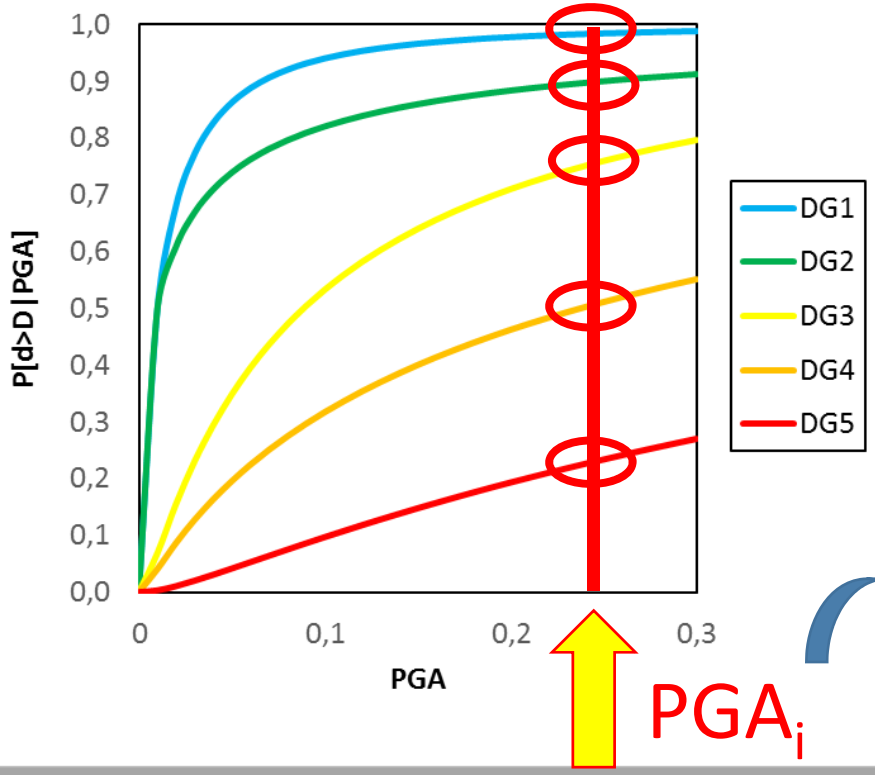
SCALA MACROSISMICA EUROPEA EMS 98

III. CURVE DI FRAGILITÀ **DA LIQUEFAZIONE**

DG1 DG2 DG3 DG4 DG5



- **Probabilità raggiungimento stato limite: misura danno da scheda AeDES correlato con EMS**



- **Parametro di intensità sismica?....Indice potenziale di liquefazione del terreno**

PGA_i → I_{AM}

ANALISI DANNO – PROBABILITÀ DI DANNO

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

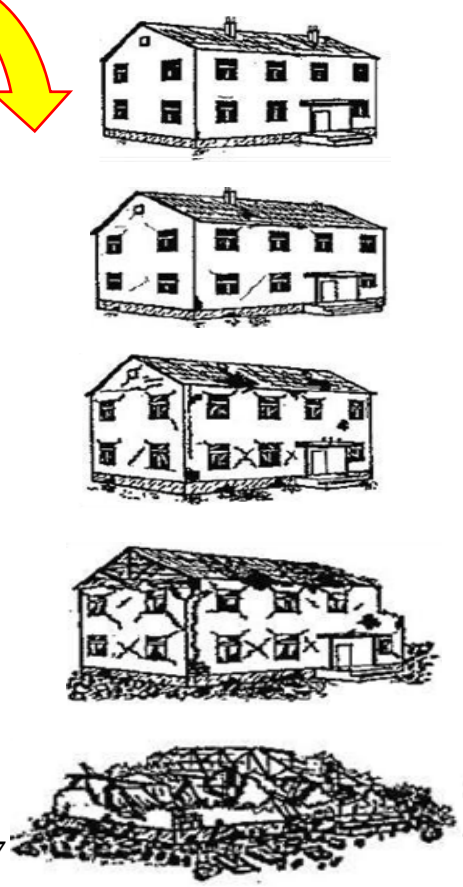
Gradi di danno sismico: Definiti in accordo alla scala Macrosismica Europea EMS-98

AeDES (Baggio et al. 2008)

D4-D5 Gravissimo	D3-D2 Medio-Grave	D1 Leggero	Danno nullo	Livello danno
			✓	0
			✓	0
		<1/3		1
		1/3-2/3		1
		>2/3		1
	<1/3			2
	<1/3	<1/3		2
	<1/3	1/3-2/3		2
	<1/3	>2/3		2
	1/3-2/3	<1/3		3
	1/3-2/3			3
	>2/3			3
<1/3				3
<1/3		<1/3		3
<1/3		1/3-2/3		3
<1/3	<1/3			3
<1/3	<1/3	<1/3		3
<1/3	1/3-2/3			4
<1/3	>2/3			4
1/3-2/3				4
1/3-2/3		1/3-2/3		4
1/3-2/3	<1/3			4
1/3-2/3	1/3-2/3			5
>2/3				5
>2/3		<1/3		5
>2/3	<1/3			5

Conversione Matrice Danno AeDES Grado di danno EMS

EMS -98



D0 D1 D2-D3 D4-D5

DG1 DG2 DG3 DG4 DG5

Dolce et al. 2017

➢ **...Ad ogni edificio è possibile associare un grado di danno dal danno empirico**

INDICI DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

LIQUEFACTION POTENTIAL INDEX (LPI)

Iwasaki et al. (1982)

$$LPI = \int_0^{20} F_L(z) \cdot w(z)\, dz$$

$$F_L = 1 - F_S \quad se \;\; F_S \le 1.0$$

$$F_L = 0 \quad se \;\; F_S > 1.0$$

$$\left(F_S = \frac{CRR}{CSR} \right)$$

$$w(z) = 10 - 0.5z = \begin{cases} 10 \; per \; z = 0 \\ 0 \; per \; z = 20m \end{cases}$$

LIQUEFACTION SEVERITY INDEX (LS)

Sonmez & Gokceoglu (2005)

$$L_S = \int_0^{20} P_L(z)(10 - 0.5z)dz$$

$$P_L(z) = \frac{1}{1 + \left(F_L/0.96\right)^{4.5}} \text{ for } F_L \le 1.411$$

$$P_L(z) = 0 \quad \text{for } F_L > 1.411$$

LIQUEFACTION SEVERITY NUMBER (LSN)

Van Ballegooy et al. (2014)

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} \mathrm{dz}$$

LIMITI

Non porta in conto l'incremento di pressione interstiziale che può determinarsi negli strati di terreno non completamente liquefatto (FS > 1), la cui dissipazione è comunque causa di un cedimento (danno in superficie)

Modifica all'indice di Iwasaki et al. (1982) che introduce una probabilità di liquefazione in funzione di F_L. Tuttavia la soglia di demarcazione (F_L =1.411) tra materiale liquefacibile e non, è ancora incerta e oggetto di discussione tra i vari autori.

La deformazione volumetrica ε_v può essere calcolato in maniera speditiva solo attraverso procedure empiriche molto semplificate (es. Zhang et al., 2002)

European Commission

NUOVO INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

Induced dAmage Measurement

PGA e potenziale di liquefazione del terreno?

$$I_{AM} = \frac{1}{1 + z_{min}} \int_{z_{min}}^{z_{max}} r_u^{\,2} dz$$

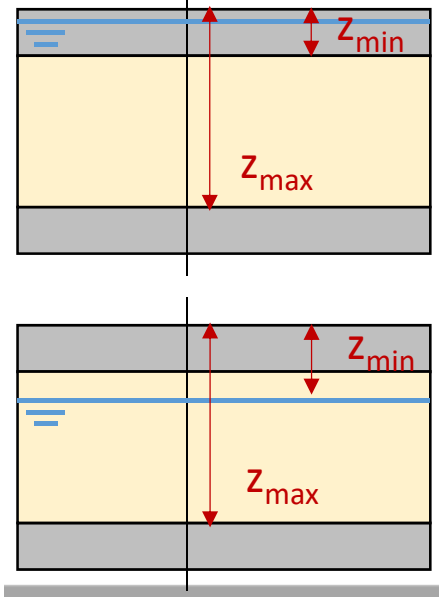
È stato assunto

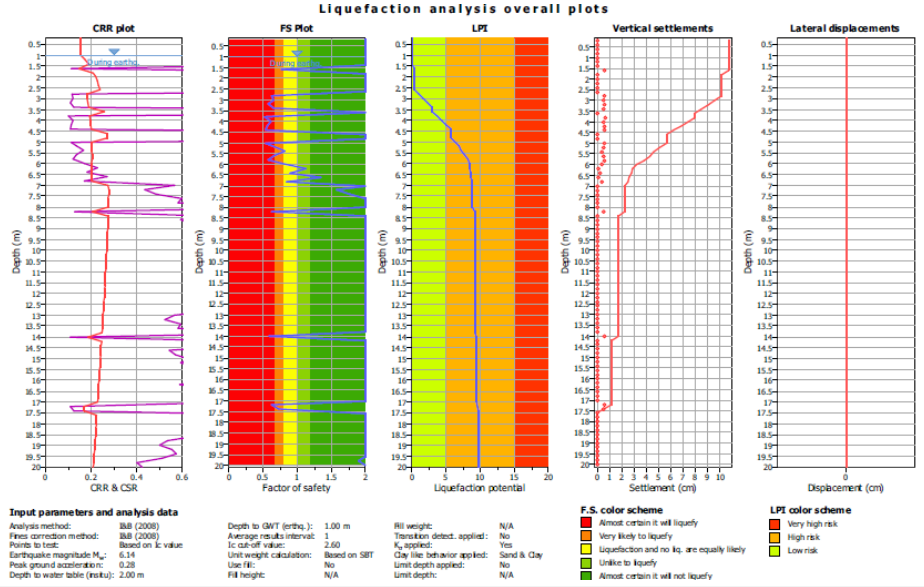
$$r_u = 1$$

$$I_{AM} = \frac{z_{max} - z_{min}}{1 + z_{min}}$$

r_u: rapporto di sovrappressione interstiziale sismo-indotto

z_{min}, z_{max} profondità minima e massima dello strato piu superficiale potenzialmente liquefacibile





$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = f\left(F_s = \frac{CRR}{CSR}\right)$$

Iwasaki et al., 1984

se $F_S \leq 1 \rightarrow r_u = 1$

se $F_S > 1 \rightarrow r_u = (F_S)^{1/b}$

L'esponente b è funzione della resistenza ciclica del terreno (definito sulla base di prove di laboratorio)

NUOVO INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

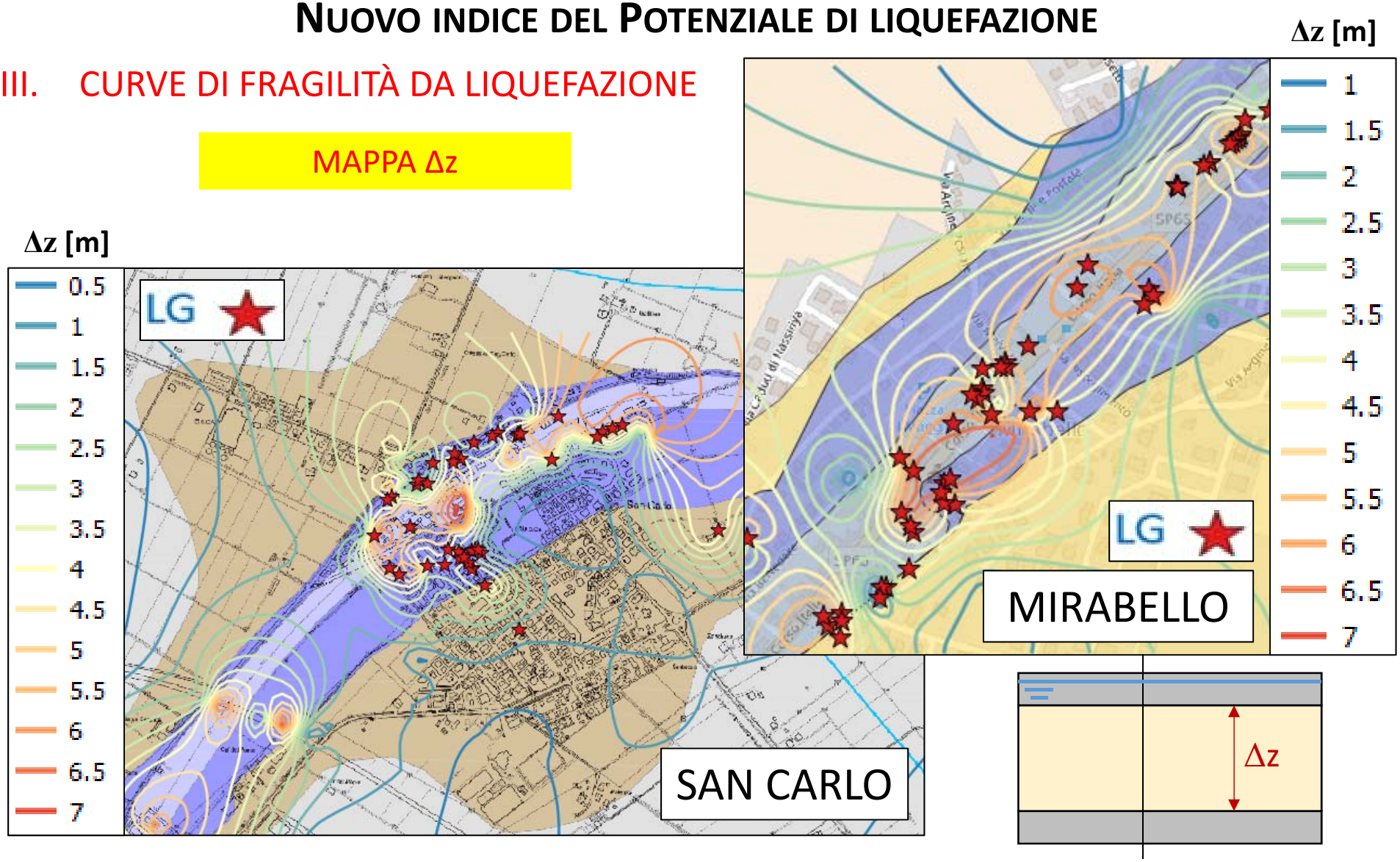
$$I_{AM} = \frac{1}{1 + z_{min}} \int_{z_{min}}^{z_{max}} r_u{}^2 dz$$

- **Ha un chiaro significato fisico** (legato alla profondità del tetto dello strato di materiale liquefacibile più superficiale ed al suo spessore equivalente)
- **Porta in conto l'incremento di pressione interstiziale anche negli strati in cui non si attinge la liquefazione** ($r_u < 1$)
- Direttamente correlabile al cedimento di consolidazione post-ciclico in condizioni *free-field* (di conseguenza correlabile al danno strutturale)
- **Può essere determinato a partire sia dai risultati di verifiche semplificate di suscettibilità alla liquefazione** (stima di r_u in funzione di un coefficiente di sicurezza, FS) e **sia dai risultati di analisi dinamiche in tensioni efficaci** (calcolo rigoroso di r_u). Infine, assumendo l'attingimento della liquefazione per l'intero strato potenzialmente liquefacibile, l'indice **può essere calcolato sulla base della sola conoscenza della successione stratigrafica**.

NUOVO INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

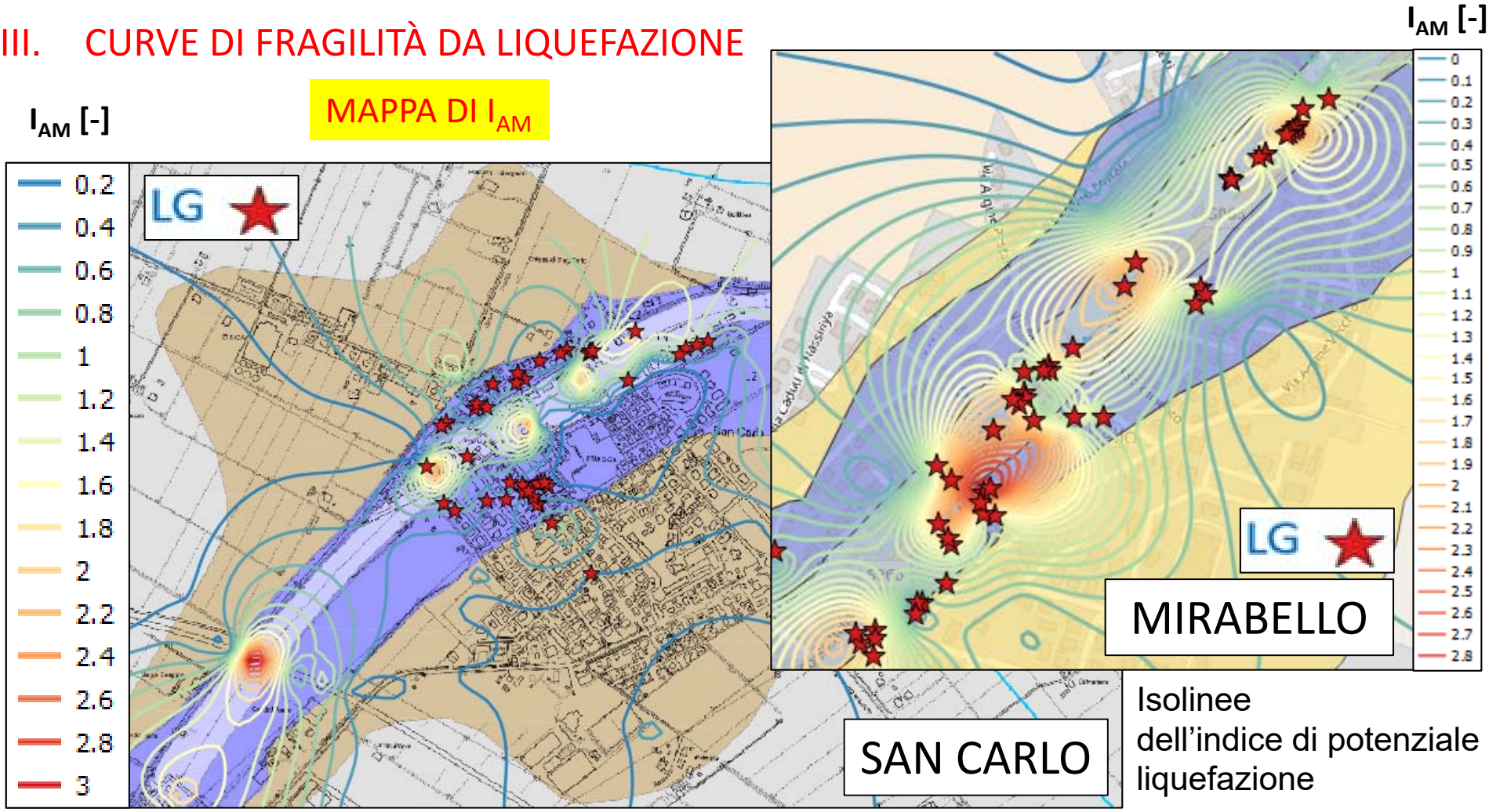
MAPPA Δz



NUOVO INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

MAPPA DI I_{AM}



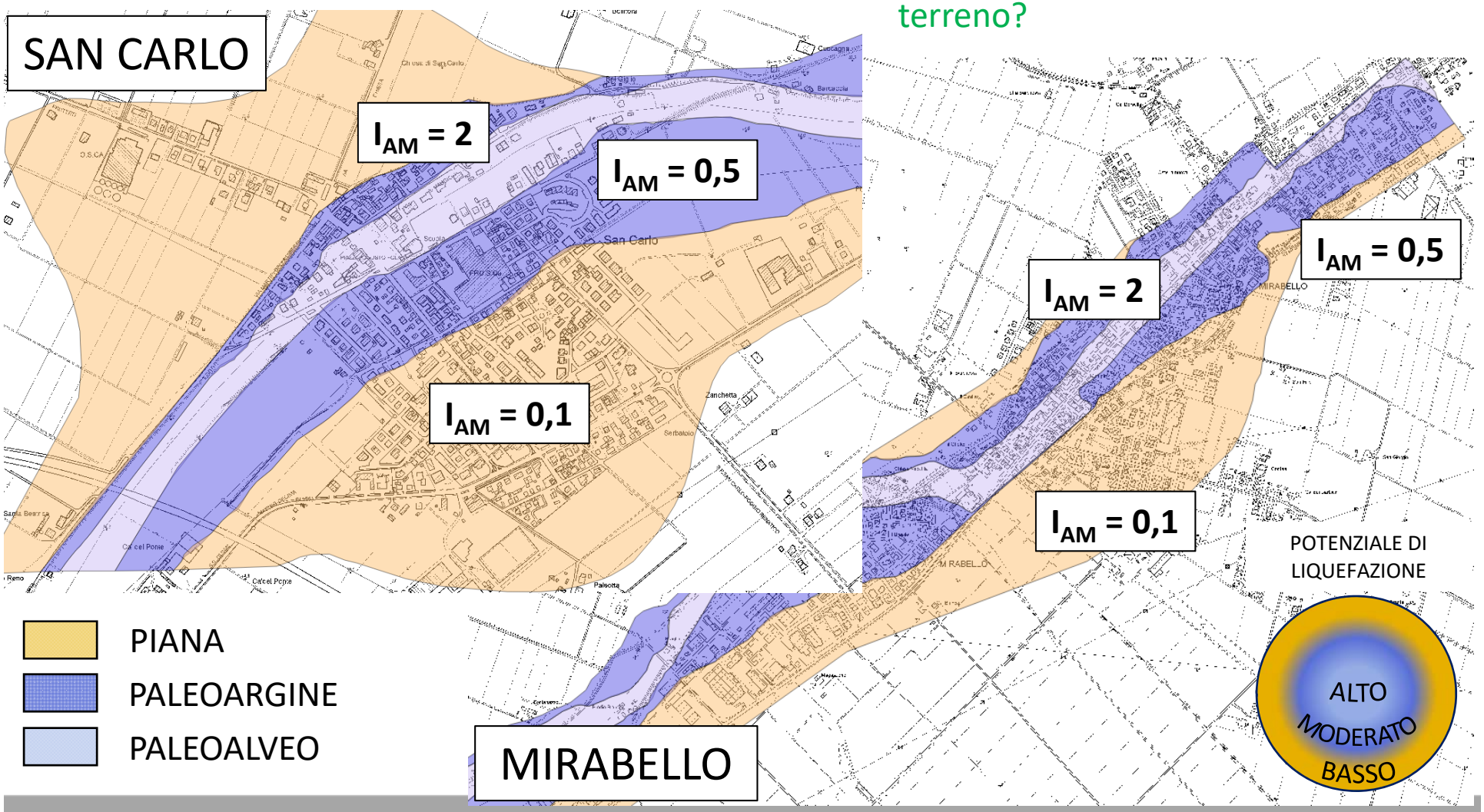
Isolinee dell'indice di potenziale liquefazione

European Commission

POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

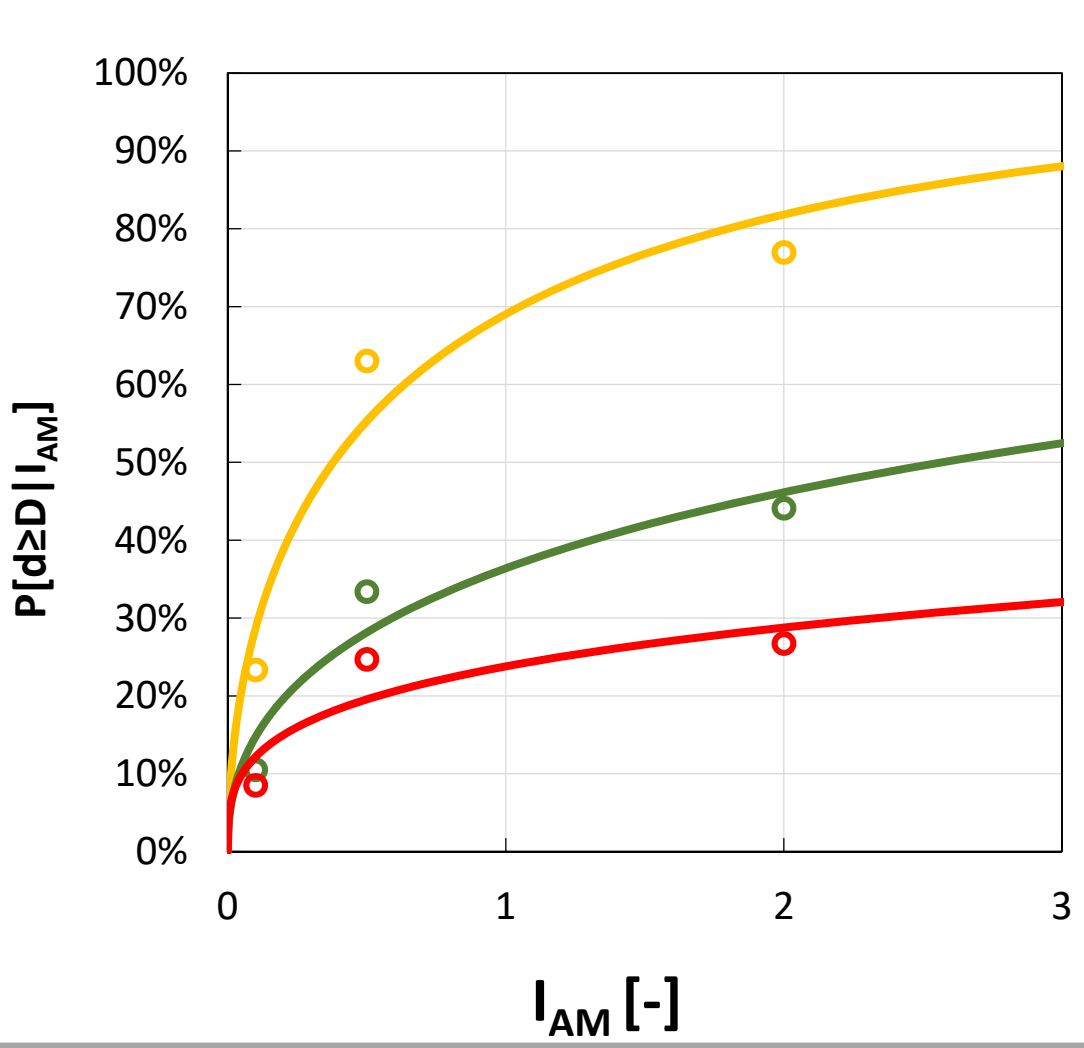
III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

PGA e potenziale di liquefazione del terreno?



ANALISI DANNO – PROBABILITÀ DI DANNO

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE



ANALISI DANNO – PROBABILITÀ DI DANNO

III. CURVE DI FRAGILITÀ DA LIQUEFAZIONE

MODELLO DI PREVISIONE LOGNORMALE

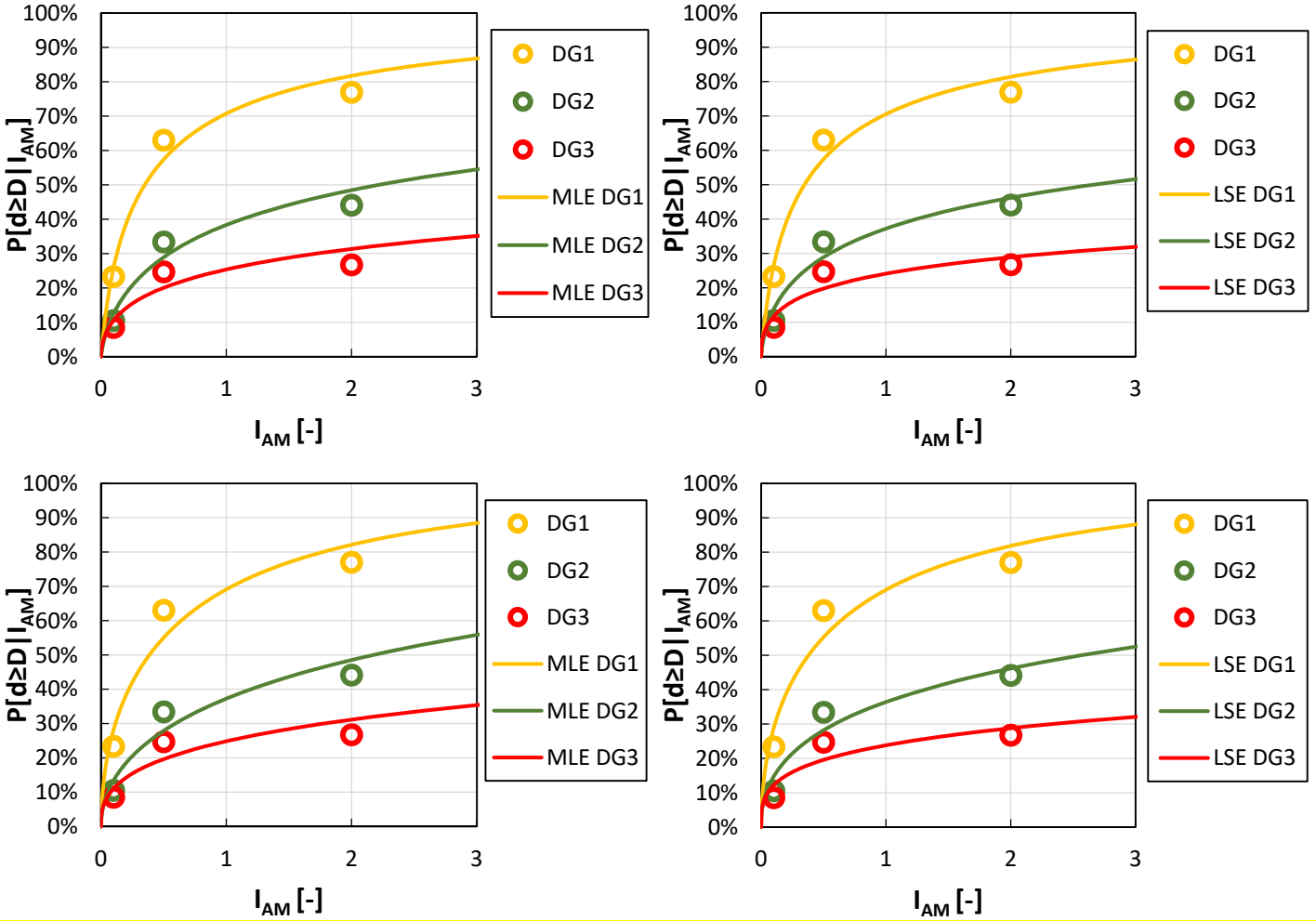
$$\Phi\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)$$

Shinozuka et al, 2000;
Rota et al, 2008

MODELLO DI PREVISIONE ESPONENZIALE

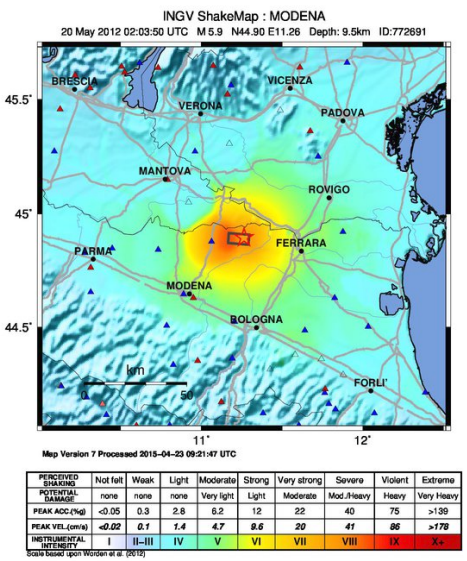
$$1-\exp\left(-\alpha x^{\beta}\right)$$

Rossetto e Elnashai, 2003;
Amiri et al, 2007

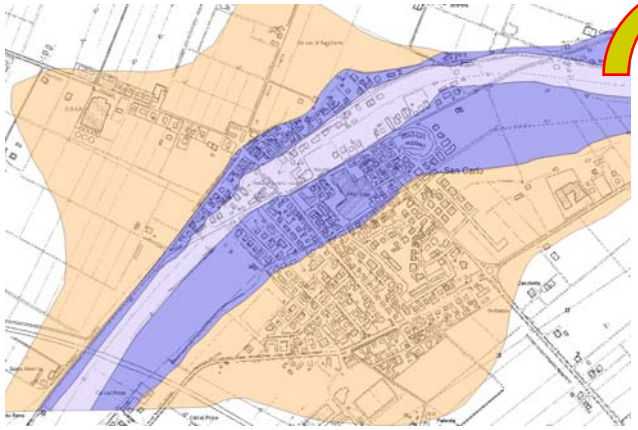


- **Dati insufficienti per le curve DG4 e DG5; si necessita di più valori di I_{AM}**
- **I gradi di danno sono basati su convenzione sismica**
- **Queste curve sono relative ad uno specifico intervallo di PGA e si è assunto $r_u = 1$**

ANALISI DANNO – PROBABILITÀ DI DANNO

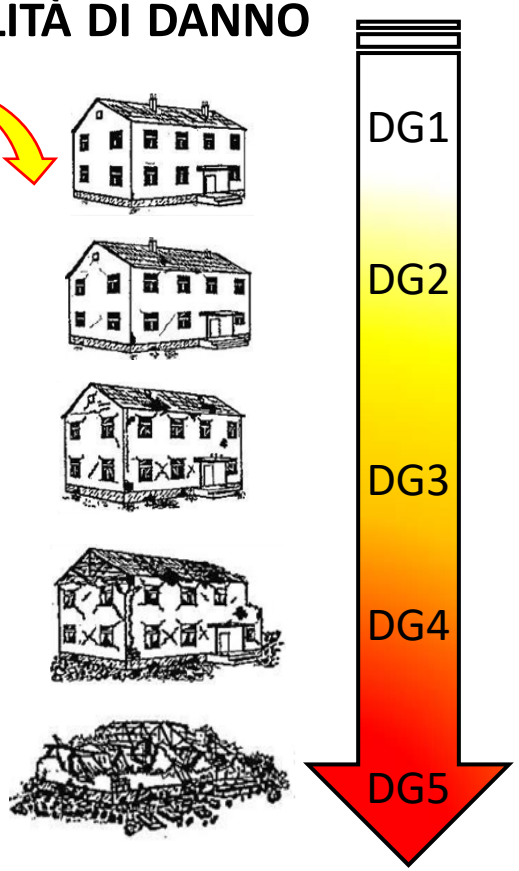


➢ **Scenario PGA**

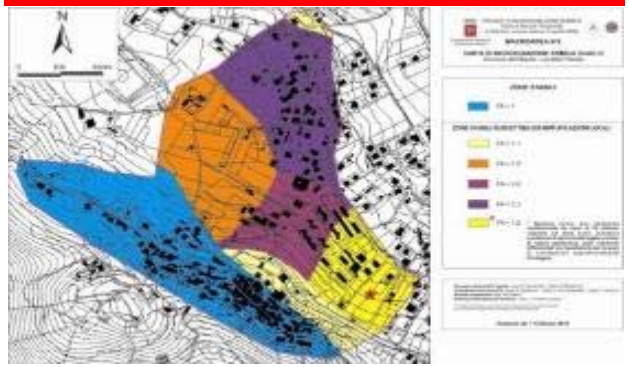


➢ **….differenti valori di I_{AM}**

➢ **Scenario I_{AM}**



✓ **Microzonazione Sismica**



✓ **Costi attuali di riparazione**

➢ **….gradi di danno per danno indotto da liquefazione**

Scenario Perdite

PUBBLICAZIONI

Di Ludovico M.,Chiaradonna A., Bilotta A., Flora A., Prota A., 2021, Valutazione della vulnerabilità di strutture ed infrastrutture alla liquefazione sismo-indotta dei terreni. Sviluppo di modelli di fragilità empirici per edifici in muratura utilizzando i dati della Regione Emilia-Romagna, Proceedings of Il Progetto Liquefact in Emilia Romagan, pp.34-49, 2021

Di Ludovico M., Chiaradonna A., Bilotta E., Flora A., Prota A., (2020), "Empirical damage and liquefaction fragility curves from 2012 Emilia earthquake data", **Earthquake Spectra**, 36(2), pp. 507-536, DOI: http://dx.doi.org/10.1177/8755293019891713.

Caputo, P., Chiaradonna, A., Di Ludovico M., Bilotta E., Prota, A. Flora, A., Martelli, L., (2019), "Soil Liquefaction and induced damage to structures: a case study from the 2012 Emilia earthquake", Proceedings of 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE), Rome, Italy, 17-20 June 2019

Thanks for your attention