



**UNIVERSITÀ
DI PISA
DESTEC**

*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei
Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni*



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE**

DIDA
DIPARTIMENTO DI
ARCHITETTURA

PRIN 2015 - MiChE

Mitigating the impacts of natural hazards on Cultural Heritage sites, structures and artefacts

UR Pisa - RS Linda Giresini

Analisi di rischio

delle mura urbane di Volterra

Metodologia per il multi-rischio

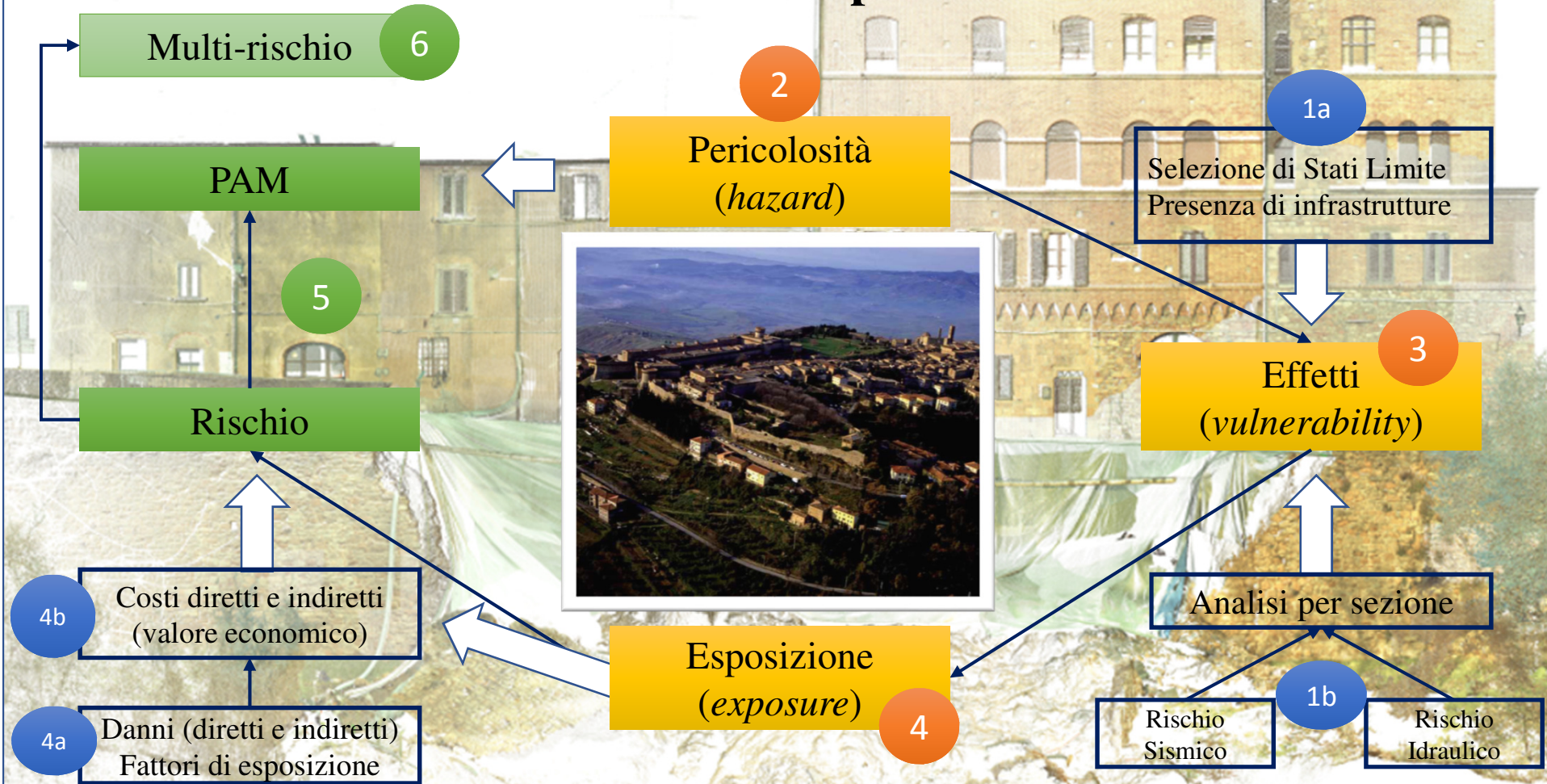
Linda Giresini, Mario Lucio Puppio, Mauro Sassu

Firenze, 17.12.2019

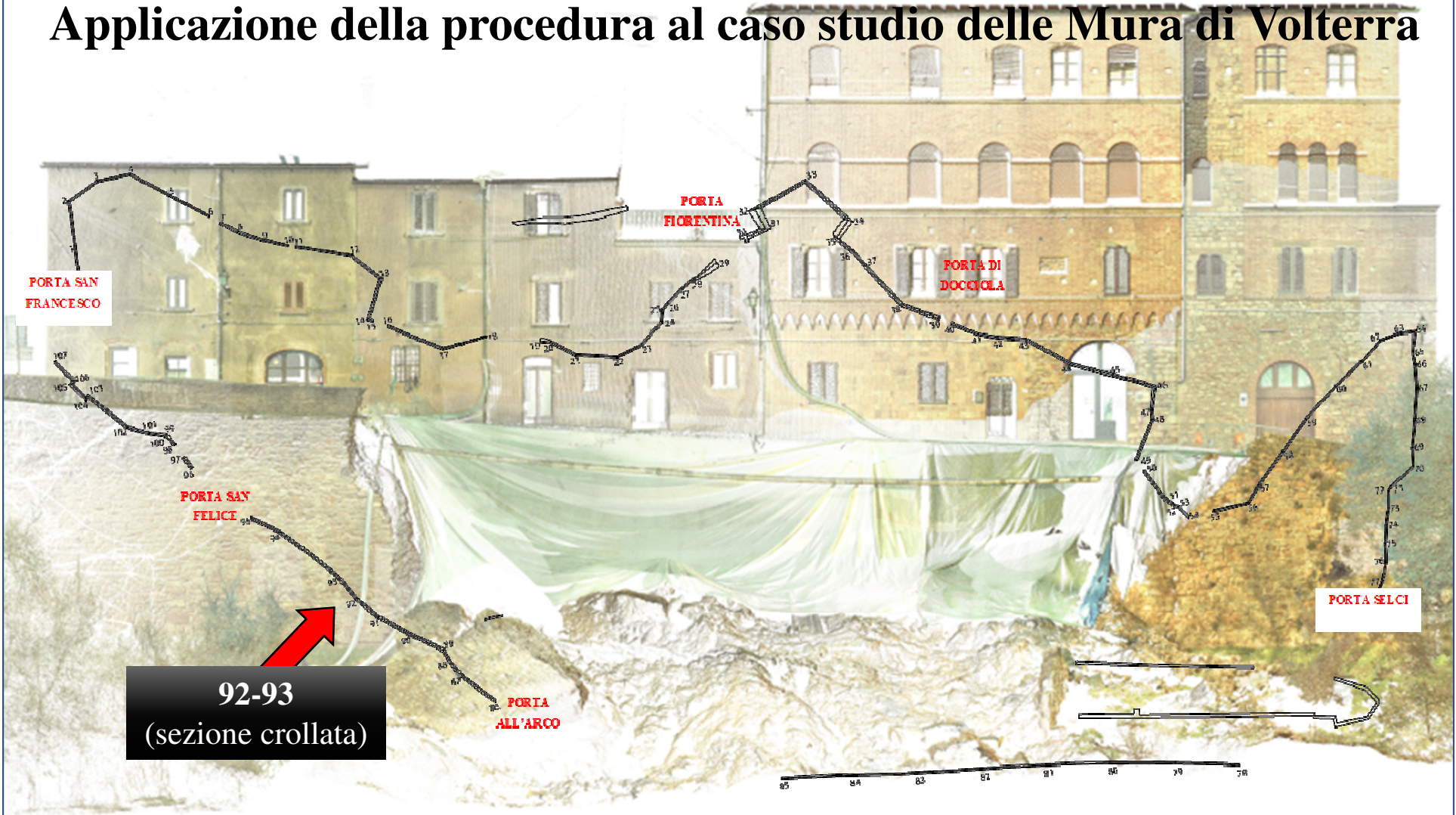
Indice

- Generalità
- Calcolo PAM per la sezione crollata
- Strategie di mitigazione del rischio (frana, sisma) con interventi di rapida esecuzione:
 - tiranti;
 - dreni;
 - opere di ingegneria naturalistica (e.g. risagomatura del pendio)

Risk assessment procedure



Applicazione della procedura al caso studio delle Mura di Volterra



Diapositiva 4

- MLP [2]3** Evidenziare sulla MAPPA le sezioni più rischiose come dalla slide precedente.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP4** Evidenziare sezioni + foto
Mario Lucio Puppio; 11/12/19
- MLP5** -92-93
Mario Lucio Puppio; 11/12/19
- MLP6** 48-49
Mario Lucio Puppio; 11/12/19
- MLP7** 71-72
Mario Lucio Puppio; 11/12/19

Stati Limite

Si individuano **4** Stati Limite:

- **SLI** (stato limite di integrità): totale assenza di danni. Valutabile da giudizio di esperti e legato a interventi di manutenzione ordinaria.
- **SLD**: Riferito al danno che si può avere per spostamenti eccessivi dell'infrastruttura muraria senza che avvenga il collasso della stessa ma con danni (limitati) alle infrastrutture e strutture contigue. *EDP*: spostamento orizzontale del muro d . Capacità: $d = 5 \text{ cm}$.
- **SLV**: Raggiungimento del primo meccanismo limite tra quelli a pressoflessione, taglio, scorrimento, ribaltamento e superamento della capacità portante del terreno di fondazione.
- **SLC**: Collasso dell'infrastruttura con danneggiamento delle infrastrutture contigue (collasso complesso terreno-opera di sostegno-strutture contigue).

Diapositiva 5

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

Calcolo della PAM per la sezione oggetto di crollo (92-93)

1. Per il calcolo della **perdita economica** si quantificano dapprima separatamente le perdite economiche L1-L7

Tipologia di Danno		SLI – SLD (periodo di riferimento 24 gg)				SLV (periodo di riferimento 120 gg)				SLC (periodo di riferimento 240 giorni)				
L1	Danni all'infrastruttura	Mura	65 [€/m/m]				195 [€/m/m]				10000,00 [€/m/m]			
L2	Danni alle infrastrutture contigue	Edifici	Se Presenti [€/m ²]				Se Presenti [€/m ²]				Se Presenti [€/m ²]			
			Abitazioni	Box	Uffici	Negozi	Abitazioni	Box	Uffici	Negozi	Abitazioni	Box	Uffici	Negozi
		Viabilità	100 [€/ml]				300 [€/ml]				1000 [€/ml]			
L3	Danni a beni di valore artistico	Beni artistici	50000 [€]		4,17 [€/m ²]		31,25 [€/m ²]				41,67 [€/m ²]			
L4	Danni di mancata fruibilità edifici	Affitto	0,27 [€/m ² /gg]		6,48 [€/m ²]		0,27 [€/m ² /gg]		32,40 [€/m ²]		0,27 [€/m ² /giorno]		64,8 [€/m ²]	
		Turismo	65 [€/pp/gg]		2,34 [€/m ²]		65 [€/pp/gg]		11,68 [€/m ²]		65 [€/pp/giorno]		23,4 [€/m ²]	
L5	Danno sociale	Beni	43 [€/pp/gg]		1,55 [€/m ²]		43 [€/pp/gg]		12 [€/m ²]		43 [€/gg/pp]		15,5 [€/m ²]	
L6	Casualties (vittime-vitalizi)	Abitanti	15000 [€/pp]		108,74 [€/m ²]		40000 [€/pp]		289,9 [€/m ²]		1500000 [€/pp]		10873,8 [€/m ²]	
		Visitatori	15000 [€/pp]		22,45 [€/m ² /gg]		40000 [€/pp]		59,90 [€/m ² /gg]		1500000 [€/pp]		2246,4 [€/m ² /gg]	
L7	Danni di mancata fruibilità strade	Strada urbana – famiglie residenti	35 [€/ps/gg]		840 [€/ps]		35 [€/ps/gg]		6300 [€/ps]		35 [€/ps/gg]		8400 [€/ps]	
		Chiusura viabilità principale e parcheggi	800 [€/ps/gg]		19200 [€/ps]		800 [€/ps/gg]		144000 [€/ps]		800 [€/ps/gg]		192000 [€/ps]	

Abitanti Città di Volterra: 8699 (Dati ISTAT 2017)
 Superficie della città: 1200000 m² ; Superficie centro storico: 394425 m²
 Abitanti al m² 0,00725
 Visitatori giornalieri Città di Volterra: 591 (Dati Confesercenti 2017)
 Visitatori al m²: 0,0015
 Densità abitativa - 0,0087 Abitanti al m²

Diapositiva 6

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

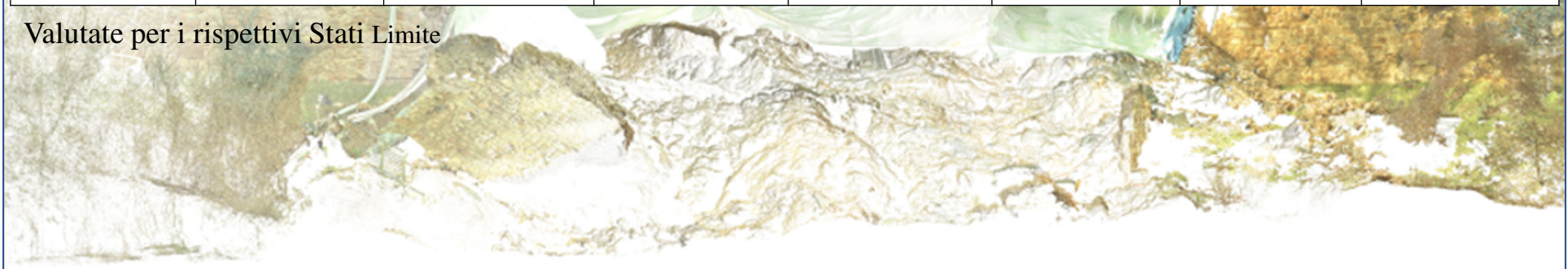
PAM – Sezione 92-93

2. Considerando la sezione già oggetto di crollo (92-93) si individua l'**area di influenza** della sezione e le sue **condizioni al contorno** (presenza di edifici e loro destinazione d'uso, presenza di parcheggi, strade, etc).

Lunghezza tratto di muro B [m]	Altezza del muro H [m]	Area di influenza della sezione [m ²]	Area edifici [m ²]	Perc. abitazioni [%]	Perc. box [%]	Perc. uffici [%]	Perc. negozi [%]
30	10,2	1224	1680	50%	5%	20%	20%

Numero strade urbane [-]	Numero strade principali + parcheggi [-]	Metri strada [ml]	area beni artistici [%]	case affitto [%]	case turismo [%]	X1 (distanza primo edificio dal muro) [m]	X2 (distanza prima strada dal muro) [m]
2	1	90	5%	30%	30%	5	0

Valutate per i rispettivi Stati Limite



Diapositiva 7

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

PAM – Sezione 92-93

3. Si considerano i 4 Stati Limite;
4. Per ciascuno SL si calcolano le **perdite economiche** L1-L7 in € e si combinano con gli opportuni coefficienti di partecipazione al danno ψ per ottenere le perdite totali.
5. Determinata la perdita totale per metro lineare di mura, si calcola la **PAM** riferita a ciascun rischio (sisma, frana, sisma+frana).

Sezione 92-93	L1 [€]	L2 Edifici [€]	L2 Strade [€]	L3 [€]	L4 [€]	L5 [€]	L6 [€]	L7 [€]	Ψ_1	$\Psi_{2\text{Edifici}}$	$\Psi_{2\text{Strade}}$	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6	Ψ_7	Perdita [€]	Perdita /ml [€]
SLI	6.120	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	702	23
SLD	19.890	254.478	9.000	350	2.614	130	160.590	20.880	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	99.489	3.316
SLV	59.670	763.434	67.500	2.625	13.071	974	428.241	156.600	1	0,75	1,00	0,75	0,75	0,75	0,2	1,00	917.820	30.594
SLC	1.989.000	2.544.780	90.000	3.500	26.142	1.298	16.059.036	208.800	1	0,75	1,00	0,75	0,75	0,75	0,2	1,00	7.444.023	284.134

Perdite economiche L1-L7 in €

Coefficienti di partecipazione al danno variabili tra 0-1 in funzione delle caratteristiche della sezione.

Perdite totali per ogni stato limite

Diapositiva 8

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

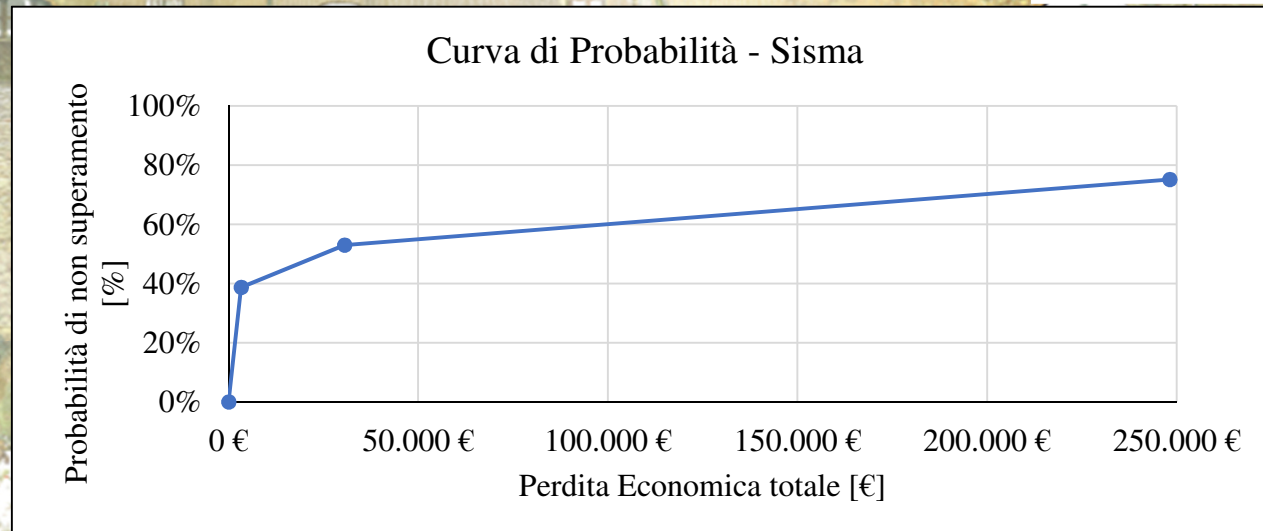
PAM – Sisma – Sezione 92-93

PAM - Sisma				
Dati	Tr [anni]	Pns [%]	λ	PAM/ml [€]
SLI	1	0%	1	23
SLD	79	39%	0,0127	42
SLV	118	53%	0,0085	259
SLC	262	75%	0,0038	947

I Tr di capacità sono stati calcolati dalle analisi non lineari (FEM). Per ciascun Tr è stata calcolata λ , frequenza media annua di superamento.

$$P_{ns} = e^{-\frac{V_R}{T_r}}$$

$V_R = 75$ anni



$$\lambda = \frac{1}{T_r}$$

Diapositiva 9

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP8** Curva relativa al rischio frana
Mario Lucio Puppio; 11/12/19

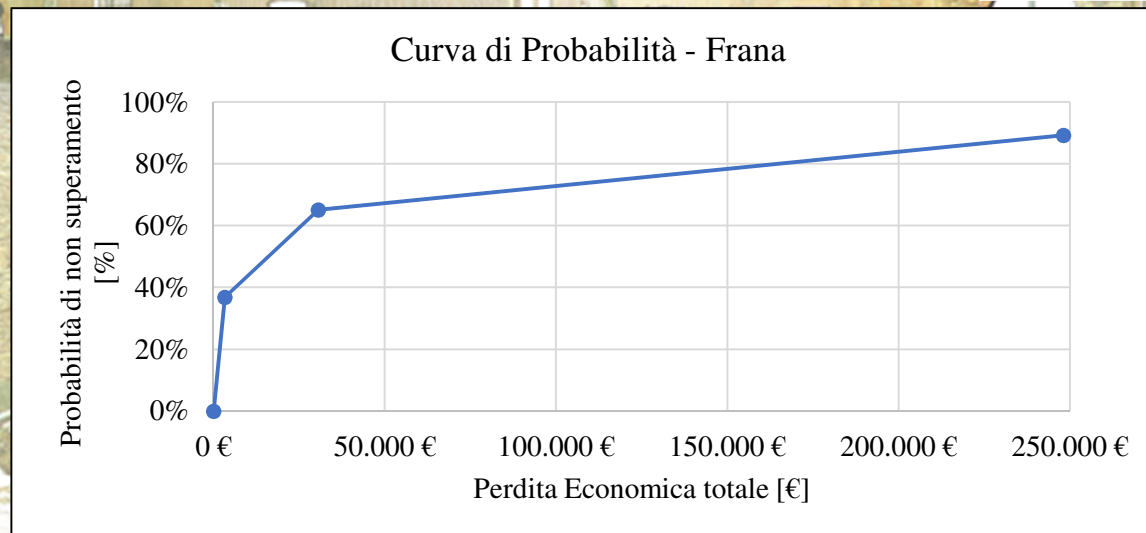
PAM – Frana – Sezione 92-93

PAM – Frana – d _{pioggia} 1h				
Dati	Tr [anni]	Pns [%]	λ	PAM/ml [€]
SLI	1	0	1	23
SLD	75	37	0,0133	44
SLV	175	65	0,0057	175
SLC	658	89	0,0015	377

I Tr di capacità sono stati calcolati dalle analisi non lineari (FEM). Per ciascun Tr è stata calcolata λ, frequenza media annua di superamento.

$$P_{ns} = e^{-\frac{V_R}{T_r}}$$

$V_R = 75$ anni



Diapositiva 10

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

PAM – Multi-hazard – Sezione 92-93

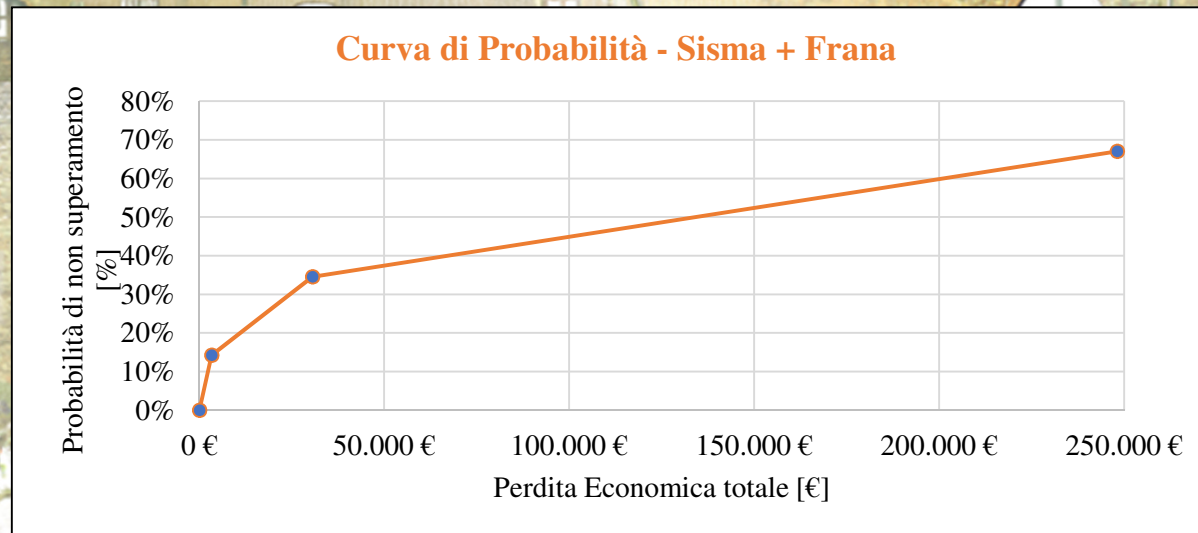
Condizione iniziale di imbibizione del terreno dovuta a piogge di forte intensità e valutazione del rischio sismico in questo scenario.

23

PAM - Sisma + Frana				
Dati	Tr [anni]	Pns [%]	λ	PAM/ml [€]
SLI	1	0%	1	
SLD	38	14%	0,026	86
SLV	70	35%	0,014	434
SLC	187	67%	0,005	1.324

$$P_{ns} = e^{-\frac{V_R}{T_r}}$$

$V_R = 75$ anni



Diapositiva 11

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

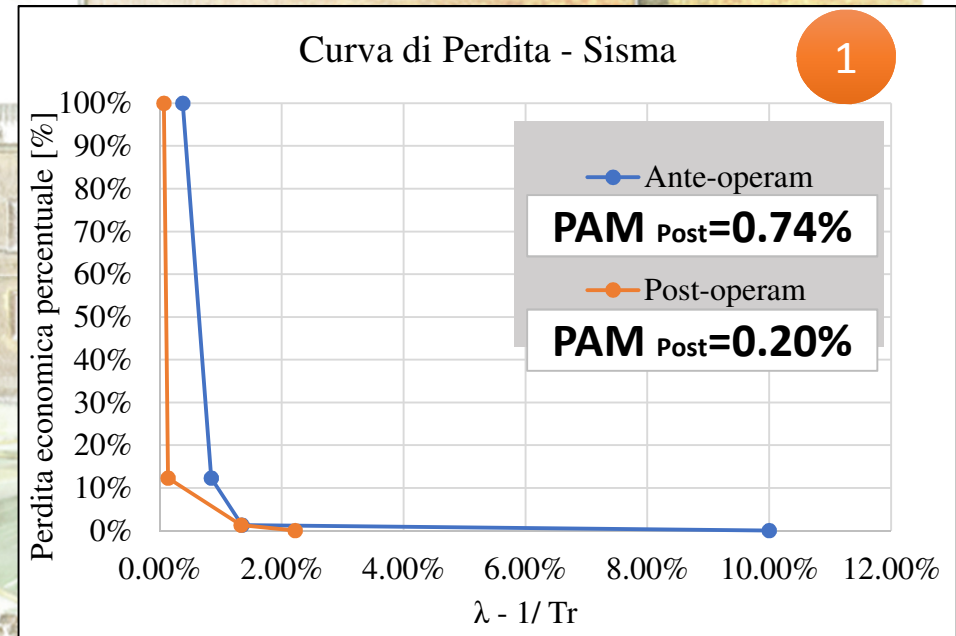
PAM – Sisma – Sezione 92-93

$$\lambda = \frac{1}{T_r}$$

1

Perdita annua normalizzata =
 $\lambda \cdot \text{Perdita economica totale [€/ml]}$

*Perdita normalizzata rispetto
alla perdita corrispondente all'SLC*



1

Limit State	SI=PGA _C /PGA _D
SLV	0.53

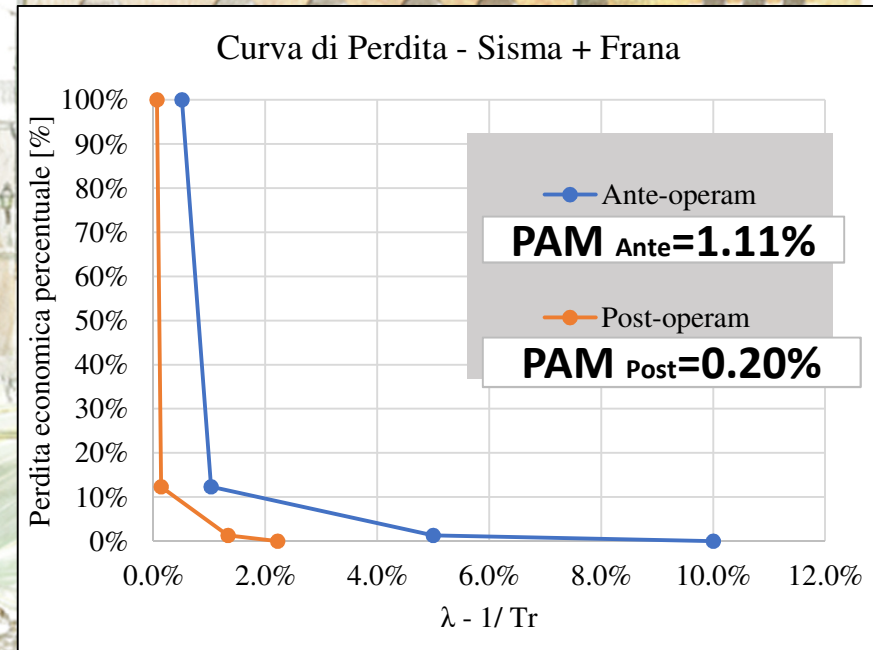
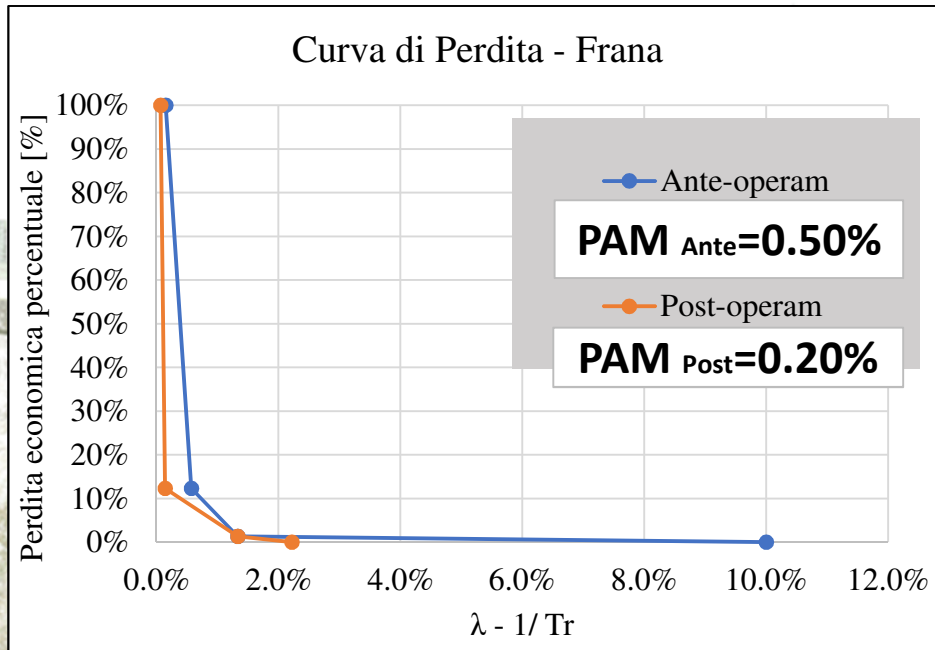
2

Da Cosenza *et al*, Bulletin of Earthquake Engineering (2018) 16:5905–5935

Diapositiva 12

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

PAM – Sezione 92-93



Limit State	SI= h_C/h_D
SLV	0.74

Diapositiva 13

- LG2** qui c'è da fare tutto il discorso delle varie perdite economiche di cui abbiamo discusso ieri (parcheggi, mancata fruizione appartamenti, etc.)
Lin Gi; 07/12/19
- MLP [2]1** Mario Lucio Puppio; 08/12/19
- MLP [2]2** Calcolo delle Perdite da L1 a L7 per i variii stai limite.
Mario Lucio Puppio; 08/12/19

Interventi per la mitigazione del rischio

a) Interventi sulla **struttura in muratura**

Inserimento di **tiranti**

b) Interventi sul **terreno**

pali e micropali

risagomatura del pendio

c) Interventi per la **riduzione delle azioni**

Dreni

Obiettivo: aumento del $SF = \frac{C}{D}$ \forall Categoria di rischio

Diapositiva 14

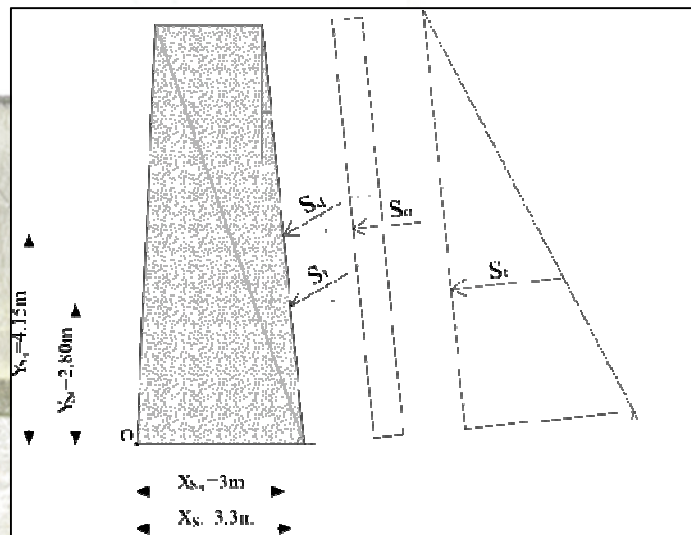
LG3

da aggiornare in base all'indice

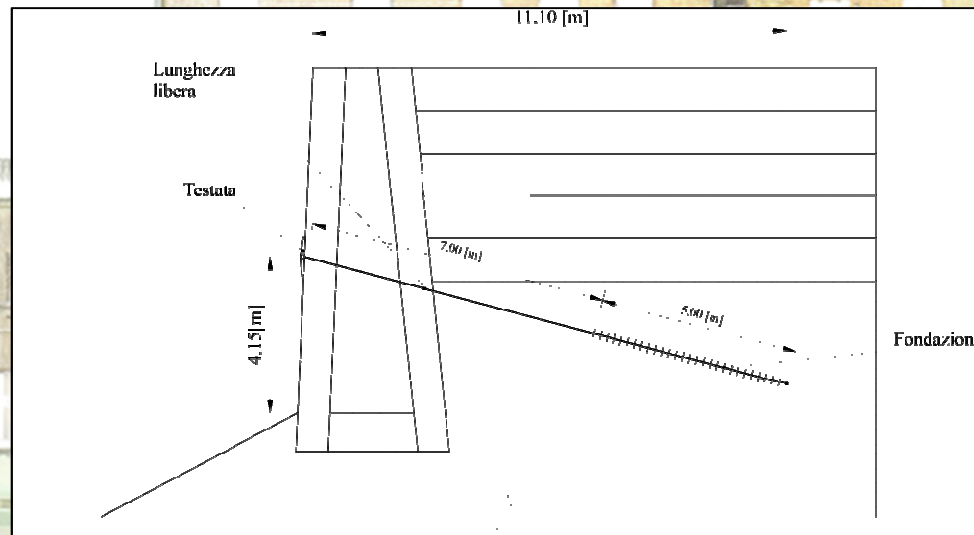
Lin Gi; 07/12/19

Inserimento di tiranti

Rischio frana



Modello di calcolo



Schema geometrico

Per la sezione oggetto di crollo è necessario, da analisi speditive, inserire tiranti a trefoli in numero di **2 trefoli**, diametro **15,3 mm** e lunghezza **12 m** per ogni metro di mura.

LG4
MLP11

Diapositiva 15

LG4 specificare se la stima del diametro è data da analisi fem o da calcoli speditivi

Lin Gi; 07/12/19

MLP11 speditive qui

Mario Lucio Puppio; 13/12/19

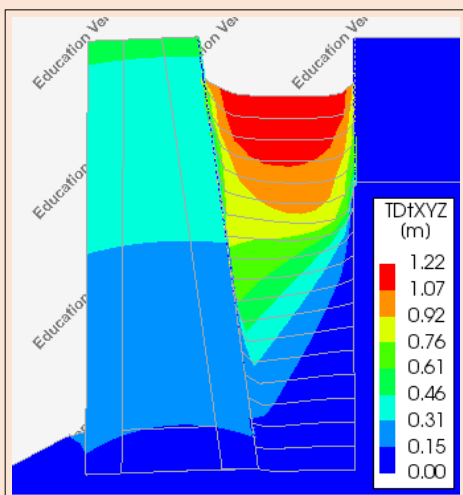
Inserimento di tiranti

Rischio frana

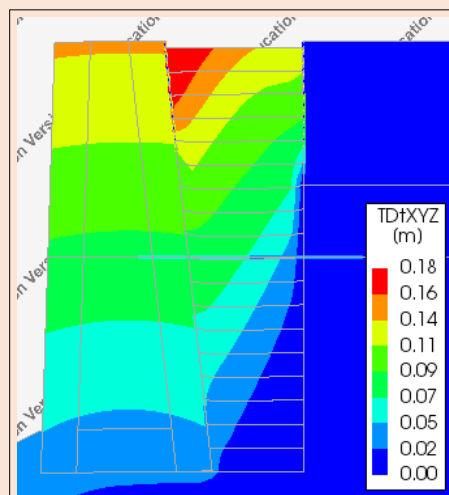


HP: tirante a barra di diametro 37 mm

Campo degli spostamenti

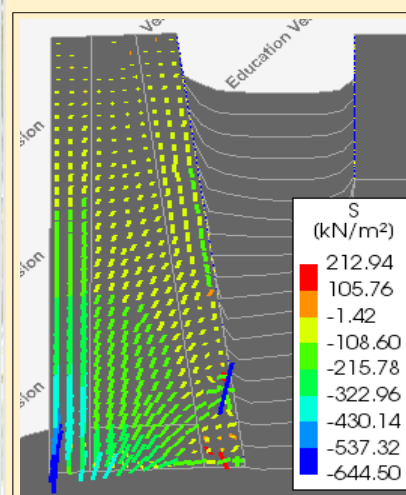


in assenza di tirante

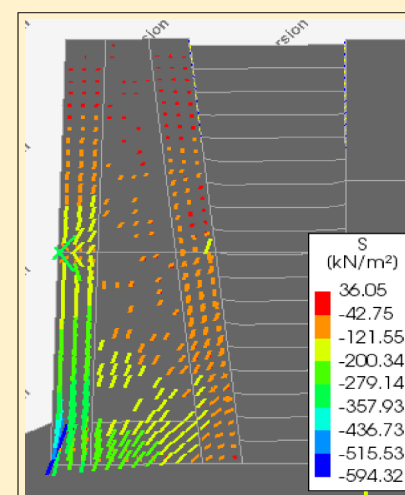


in presenza di tirante

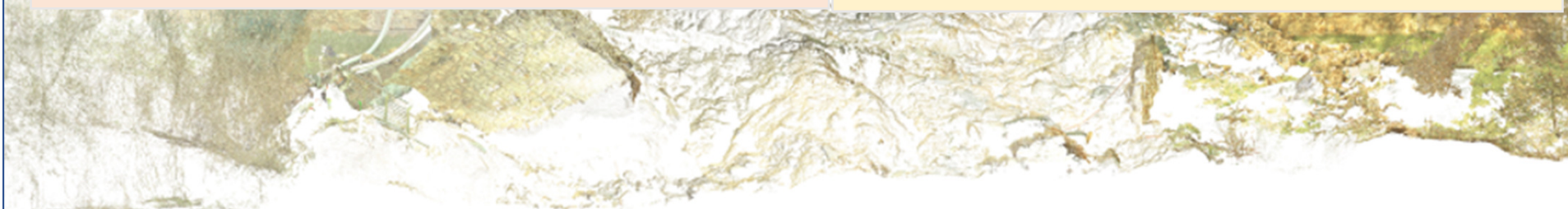
Tensioni



in assenza di tirante



in presenza di tirante



Inserimento di tiranti

Rischio sismico

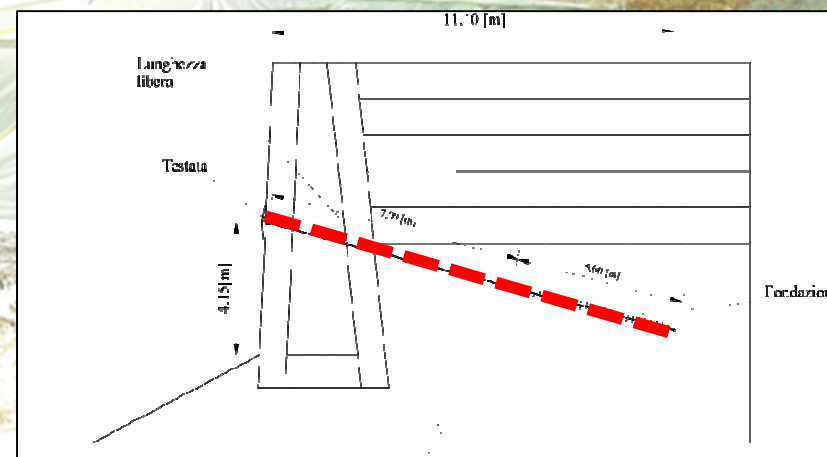
Tiranti a trefoli:

- Per la sezione oggetto di crollo il calcolo evidenzia la necessità di inserire tiranti a trefoli con numero **2 trefoli**, **diametro 15,3 mm** e **lunghezza 18,70 m**, ogni metro di mura.

Tiranti a barra:

- Per la sezione oggetto di crollo il calcolo evidenzia la necessità di inserire tiranti a barra con **diametro 26,5 mm** e **lunghezza 14,40 m**, ogni metro di mura.

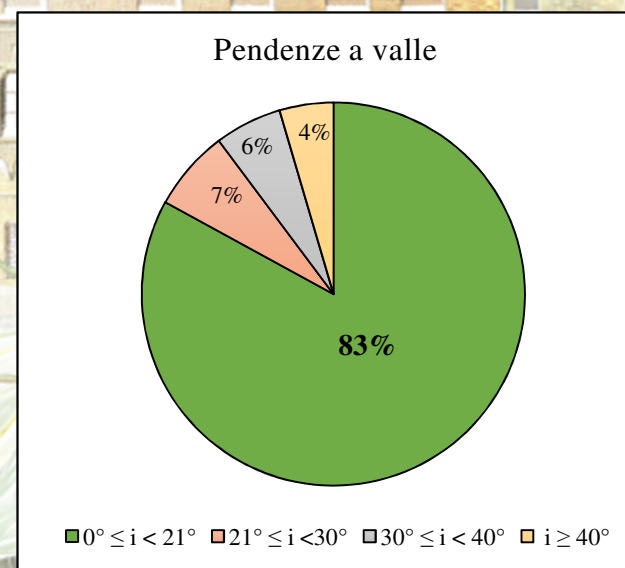
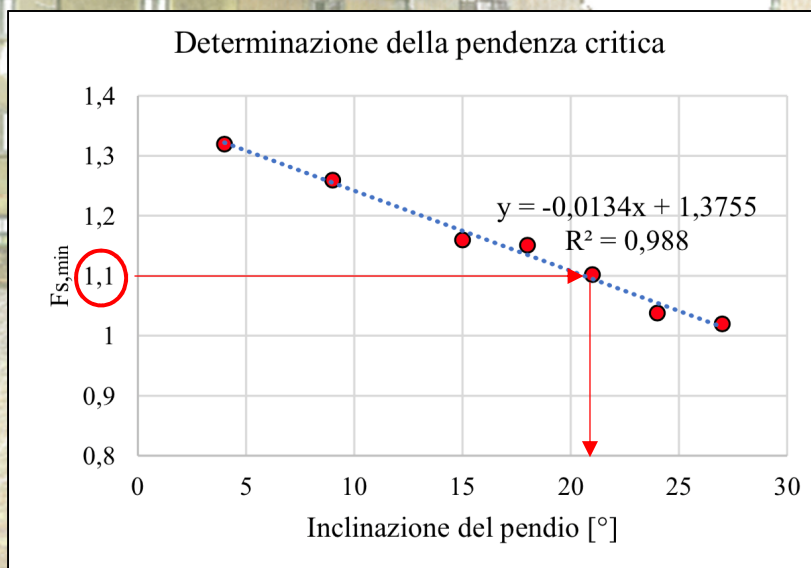
Il tirante può essere installato a metà altezza della struttura in muratura con inclinazione di $10^\circ - 15^\circ$ per intercettare gli strati di terreno con caratteristiche geotecniche migliori.



Riprofilatura del pendio

Rischio frana

Intervento di riprofilatura del pendio. Si agisce sulla geometria per ottenere una nuova configurazione che garantisca adeguate condizioni di stabilità, **diminuendo la pendenza a valle** della struttura di sostegno.

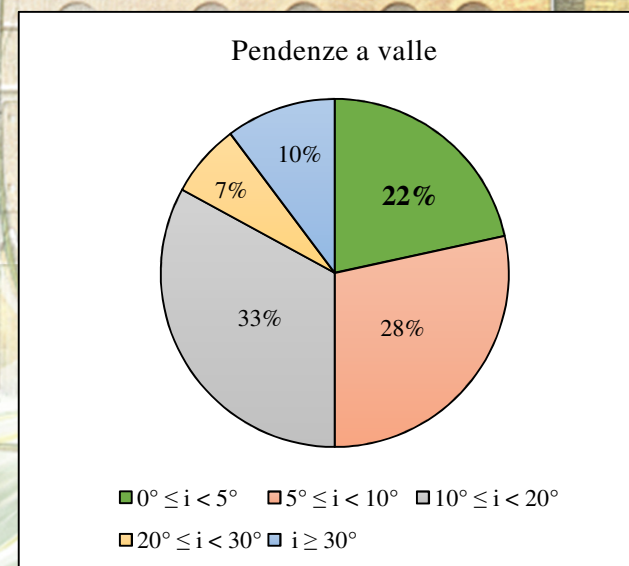
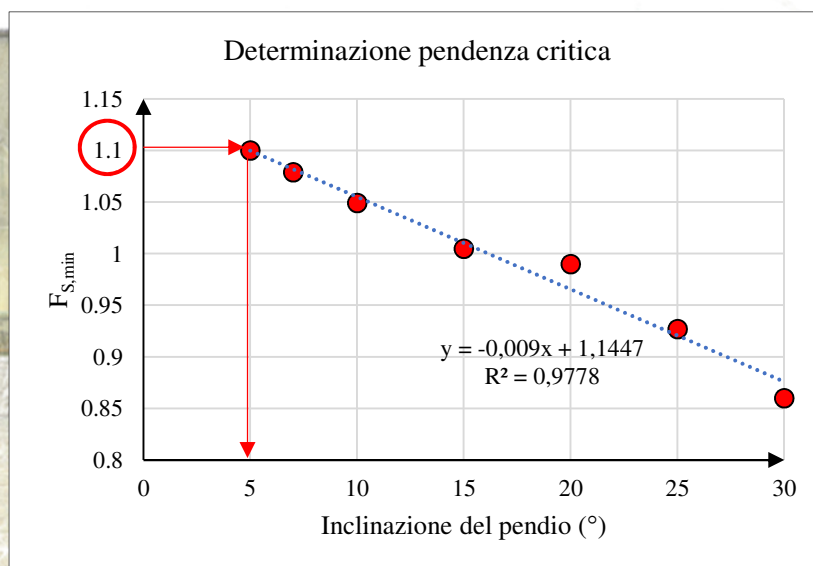


Modello di calcolo corrispondente ad una durata di pioggia di 24 ore

Pendenza critica: 21°

L'83% delle sezioni ha pendenza < 21°

Riprofilatura del pendio Rischio sismico



Pendenza critica: 5°
Il 22% delle sezioni ha pendenza < 5°

Inserimento di pali

Rischio frana

Ipotesi di dimensionamento della palificata:

$$d_{\text{palo}} \geq b_{\text{muro}} / 10$$

$$L_{\text{palo}} = (0,5; 1,0; 1,5; 2,0) \cdot H$$

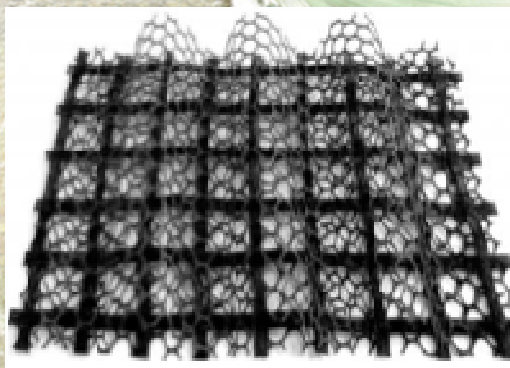
Sezione 92-93			
B _{base,muro} [m]		H _{muro} [m]	
2,30		8,30	
d _{palo} [m]	n _{file}	L _{palo} [m]	FS
0,30	1	4,00	0,99
0,30	1	8,00	1,13

Altri interventi di ingegneria naturalistica

Rischio frana-sismico

Interventi di consolidamento superficiale della scarpata di valle con:

- Sistemi di deflusso delle acque superficiali;
- Sistemi di drenaggio profondi;
- Geo-stuoie;
- Rivestimenti anti-erosivi;
- Piantumazioni.



Caso studio

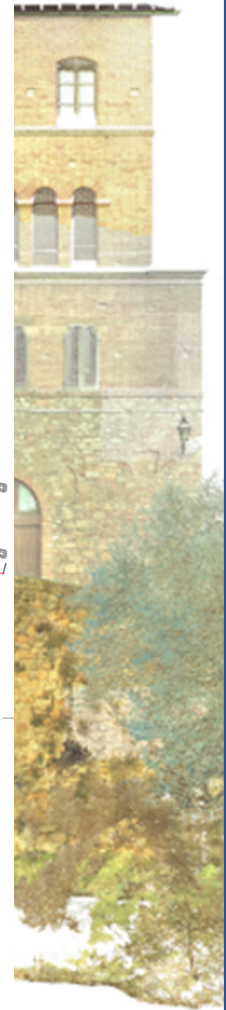
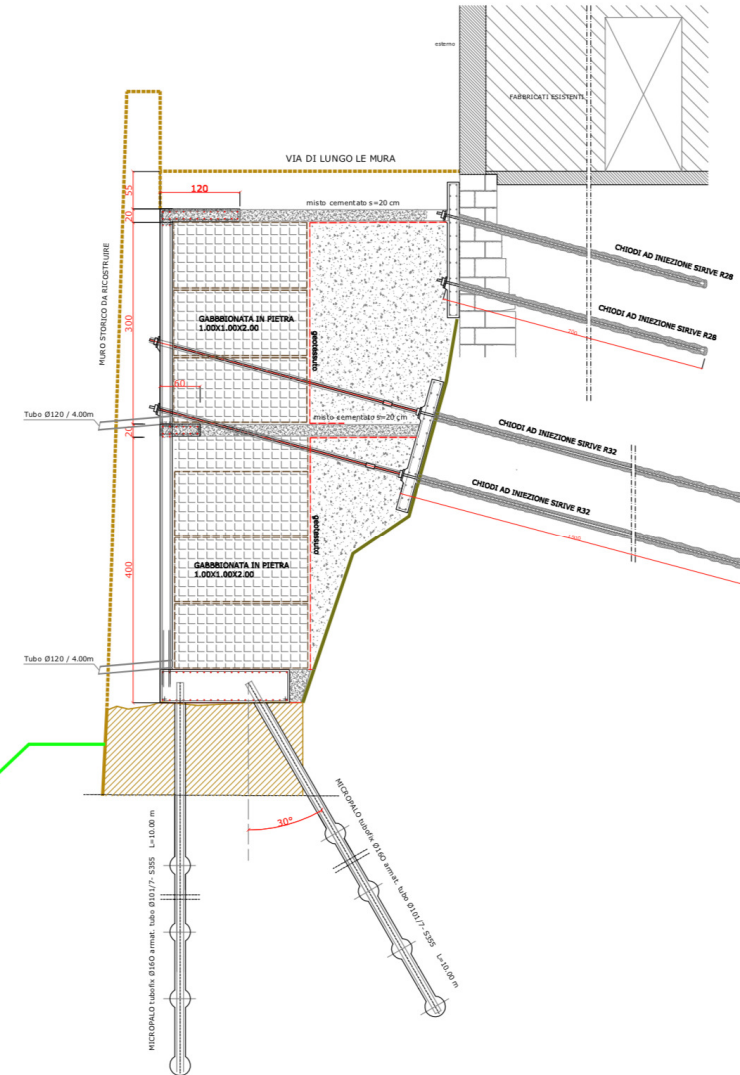
Intervento sulla sezione crollata

Caratteristiche della sezione crollata:

- Paramento **esterno** in pietra squadrata (pietra *panchina*) e murata con malta di calce;
- Paramento **interno** in pietra murata con calce di scarsa qualità e resistenza;
- Nucleo centrale di **riempimento** in materiale misto di pietre sciolte e sabbia senza alcuna traccia di malta.



Caso studio
Intervento sulla sezione crollata



Diapositiva 23

MLP1

Interventi con STEP costruttivi

Mario Lucio Puppio; 05/12/19

Caso studio

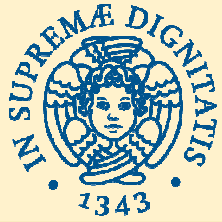
Interventi realizzati sulla sezione crollata

- Realizzazione di **micropali** di ancoraggio della fondazione esistente con platea in c.a.;
- Realizzazione di 3 fasce di **placcature di consolidamento** costituite da chiodature ad iniezione con placcatura in spritz-beton;
- Costruzione di una **gabbionata in pietra** sul fronte della quale è stata realizzata una **placcatura** in spritz-beton con 2 ordini di tiranti;
- **Ricostruzione** del muro storico a rivestimento della gabbionata.



Conclusioni

- Calcolo delle **perdite economiche** totali per la sezione oggetto di crollo;
- Calcolo della **PAM**, perdita annuale media, per la sezione oggetto di crollo;
- Applicazione del metodo **multi-hazard** per la sezione oggetto di crollo;
- Valutazione degli **interventi** atti a mitigare il rischio per le mura storiche;
- Valutazione dell'**efficacia** degli interventi proposti tramite metodologie di calcolo semplificate.



DESTEEC

PRIN 2015 – MiChE

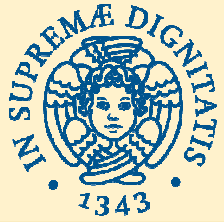
Mitigating the impacts of natural hazards on
Cultural Heritage sites, structures and artefacts



DIDA

Bibliografia

1. R. Sabelli, *Mura etrusche di Volterra: conservazione e valorizzazione.*
2. F. Fernandez, “*Caratterizzazione del materiale lapideo finalizzata all’individuazione dei requisiti delle malte da adoperare per il ripristino delle strutture murarie.*”
3. M.Andreini, A.De Falco, L.Giresini, M.Sassu, “*Recenti eventi di crollo in mura storiche urbane,*” no. May, pp. 14–16, 2015.
4. M.Signorini, E. Santarecchi, V. Bardini, A. Bettarini, N.Montevecchi, “*Relazione tecnica degli interventi-Crollo della sede stradale di Via Lungo le Mura in Volterra.*”
5. G. Leoni, A. Zona, Q. Piattoni, A. Meschini, E. Petrucci, and F. Sicuranza, “*Seismic assessment of stratified defensive walls with rubble stone infill,*” no. September, 2015.
6. A. Baratta, I. Corbi, and S. Coppari, “*Evaluation of the seismic vulnerability of fortified structures,*” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1020, no. PART 1, pp. 1573–1580, 2008.
7. G. Leoni, A. Zona, Q. Piattoni, and A. Meschini, “*Assessment of seismic vulnerability of historical defensive walls*”, no. May, 2015.
8. G. Milani, S. Casolo, A. Naliato, and A. Tralli, “*Seismic assessment of a medieval masonry tower in Northern Italy by limit, nonlinear static, and full dynamic analyses*”, *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 6, no. 5, pp. 489–524, 2012.
9. “*Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*,” 2018.
10. L. Montrasio and R. Valentino, “*A model for triggering mechanisms of shallow andslides*”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 1149–1159, 2008.
11. N. Komendantova *et al.*, “*Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders,*” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 8, pp. 50–67, 2014.
12. A. Ahuja, “*Review of assessment, design, and mitigation of multiple hazards,*” p. 81, 2011.
13. W. Marzocchi, A. Garcia-Aristizabal, P. Gasparini, M. L. Mastellone, and A. Di Ruocco, “*Basic principles of multi-risk assessment: A case study in Italy*”, *Nat. Hazards*, vol. 62, no. 2, pp. 551–573, 2012.
14. R. Bell and T. Glade, “*Quantitative risk analysis for landslides – Examples from BÍldudalur, NW-Iceland,*” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 4, no. 1, USAID, “*Site and retaining wall hazard mitigation in post-disaster situations: a primer*”, no. January, 2014.
15. M. Signorini, “*Opere di somma urgenza per la ricostruzione del crollo della cinta muraria medievale di ‘Via lungo le mura’ a Volterra*”, Volterra, 2014.



DESTEC

PRIN 2015 – MiCHe

Mitigating the impacts of natural hazards on
Cultural Heritage sites, structures and artefacts



DIDA

Analisi di rischio delle mura storiche di Volterra (PI)

MiCHe – UR Pisa

Linda Giresini
(Responsabile Scientifico)

Mario Lucio Puppio

Mauro Sassu

Maria Luisa Beconcini

Giacomo D'Amato Avanzi

Renato Iannelli

Valerio Cutini

Firenze 17.12.2019