

MiCHe

Mitigation of the impact of natural Hazard on  
Cultural Heritage sites, structures and artefacts

Final Report

Handbook and guidelines to hazard estimation methods for cultural heritage assets

Seismic and hydraulic risk of the

Volterra's Urban Walls



**MiChE**

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

INDICE

<b>1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Rilievo .....</b>	<b>5</b>
2.1	Individuazione delle sezioni caratteristiche.....	5
2.1.1	Rilievo Geometrico .....	9
2.2	Estensione dei dati ricorrenti alle sezioni non rilevabili.....	10
2.2.1	Determinazione delle pendenze del terreno.....	10
2.2.2	Peculiarità e criticità rilevate .....	14
2.2.3	Altre note ed allegati .....	20
<b>3</b>	<b>Rischio frana .....</b>	<b>24</b>
3.1	Lo slip model .....	24
3.1.1	Applicazione dello SLIP al periodo Gennaio-Marzo 2014 per la sezione collassata....	32
3.2	Analisi di vulnerabilità .....	33
<b>4</b>	<b>Rischio sismico .....</b>	<b>38</b>
4.1	Modelli di capacità .....	38
4.2	Analisi di vulnerabilità .....	39
4.2.1	Analisi limite .....	39
4.2.2	Analisi FEM .....	46
4.2.3	Verifiche delle sezioni individuate.....	50
4.2.4	Determinazione dei punti di performance .....	52
<b>5</b>	<b>Risultati .....</b>	<b>55</b>
5.1	Risultati rischio sismico e rischio frana.....	55
5.2	Tempo di Ritorno corrispondente agli Stati Limite considerati .....	55
5.2.1	Rischio sismico.....	56
5.2.2	Rischio frana.....	57



## **MiChE**

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

5.2.3	Rischio combinato (sisma + frana).....	58
5.3	Correlazione degli indici di rischio con i parametri macroscopici.....	59
<b>6</b>	<b>Analisi di rischio .....</b>	<b>63</b>
6.1	Stati limite.....	63
6.1.1	Stato limite di Collasso - SLC.....	63
6.1.2	Stato limite di salvaguardia della vita - SLV.....	64
6.1.3	Stato limite di Danneggiamento - SLD.....	64
6.1.4	Stato limite di Incipiente danneggiamento - SLI.....	65
6.1.5	Sintesi degli Stati Limite .....	65
6.2	Pericolosità .....	66
6.3	Vulnerabilità.....	67
6.4	Esposizione.....	68
6.4.1	Coefficienti di partecipazione al danno.....	69
6.5	Perdita Annuale Media (PAM).....	72
6.5.1	Estensione dei dati su macro-scala.....	90
<b>7</b>	<b>Mitigazione del rischio .....</b>	<b>92</b>
7.1	Interventi su muratura.....	92
7.2	Interventi su terreno.....	92
7.3	Interventi per la riduzione delle azioni.....	93
<b>8</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>96</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>97</b>
<b>11</b>	<b>Allegato .....</b>	<b>100</b>



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIDA**  
DIPARTIMENTO DI  
ARCHITETTURA



UNIVERSITÀ DI PISA

SCUOLA DI  
**INGEGNERIA**

**MiChE**

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

# Final Report

## Risk Analysis of the Volterra's Urban Walls

Linda Giresini

(Responsabile Scientifico UR di Pisa)

Mario Lucio Puppio

Mauro Sassu

Maria Luisa Beconcini

Giacomo D'Amato Avanzi

Renato Iannelli

Valerio Cutini



**MiChE**

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

# Final Report

## Risk Analysis of the Volterra's Urban Walls

### 1 Introduzione

La vulnerabilità delle mura storiche urbane è esaminata in forma metodologica con particolare riferimento alle mura storiche di Volterra. Il lavoro è incentrato sul rilievo e la valutazione della vulnerabilità attraverso quattro stati limite appositamente definiti in relazione alle specificità del caso studio. Sono evidenziati i parametri che maggiormente influenzano la risposta delle mura storiche urbane ed è proposto un metodo di rilievo e valutazione della sicurezza. Questa deve essere eseguita con un framework multirischio che, tenendo conto delle condizioni al contorno, fornisce la Perdita Media Annuale. In questo modo le Autorità competenti possono disporre di un metodo efficace di controllo del territorio e per valutare le opportune strategie di intervento finalizzate alla mitigazione del rischio.

La procedura proposta consta di 3 fasi:

1. rilievo delle sezioni salienti con estrapolazione dei dati di rilievo per le altre sezioni;
2. valutazione della vulnerabilità per i due rischi indagati (rischio sismico e rischio frana);
3. analisi di rischio con la determinazione della Perdita Annuale Media (PAM).

Final  
Report

## MiChE

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

# 2 Rilievo

In questa sezione effettuato il rilievo delle mura storiche e viene proposta una strategia di rilievo sezionale ad alto rendimento.

## 2.1 Individuazione delle sezioni caratteristiche

La prima operazione nella valutazione della sicurezza di un'infrastruttura diffusa è il rilievo di sezioni con caratteristiche ricorrenti. La discretizzazione della cinta muraria viene qui effettuata fissando l'origine un sistema di riferimento in una data sezione con coordinata curvilinea che segue tutto lo sviluppo dell'infrastruttura.

Questa operazione viene eseguita attraverso l'impiego di uno strumento GIS [1], [2]. Da questa fonte, è possibile individuare in maniera sistematica alcune informazioni salienti, come ad esempio:

- coordinate geografiche ed ascissa curvilinea di ogni sezione;
- caratteristiche meccaniche ed orografiche del terreno;
- presenza di altre infrastrutture ed impianti;
- dislivello geometrico relativo della sezione.

L'individuazione delle sezioni principali e delle loro caratteristiche salienti risulta necessaria per la successiva fase di rilievo sul campo.

In particolare, sono stati individuati, seguendo la cinta muraria a partire dalla Porta San Francesco, un totale di 107 picchetti. I criteri scelti per la discretizzazione sono i seguenti:

- identificazione di un vertice per ogni discontinuità angolare;
- individuazione di picchetti intermedi con distanza relativa non superiore a 50 metri;
- posizionamento di eventuali picchetti intermedi per tenere conto di eventuali disomogeneità o in posizioni ritenute critiche durante il sopralluogo in campo.

Nelle Fig. 1 e Fig. 2 e si riporta il perimetro delle mura con indicati i 107 picchetti. La planimetria è stata realizzata tramite l'uso del software QGis dove è stata importata la cartografia della Regione Toscana scaricata tramite il portale Geoscopio. E' stato possibile

Final

Report



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIDA**  
DIPARTIMENTO DI  
ARCHITETTURA



UNIVERSITÀ DI PISA

SCUOLA DI  
**INGEGNERIA**

## **MiChE**

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

ricostruire il tracciato delle mura e, tramite sovrapposizione con mappe satellitari e mappe catastali, identificare i tratti di mura dove sono stati inglobati in edifici.

Final  
Report

2020/01/31

**MiChe**

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

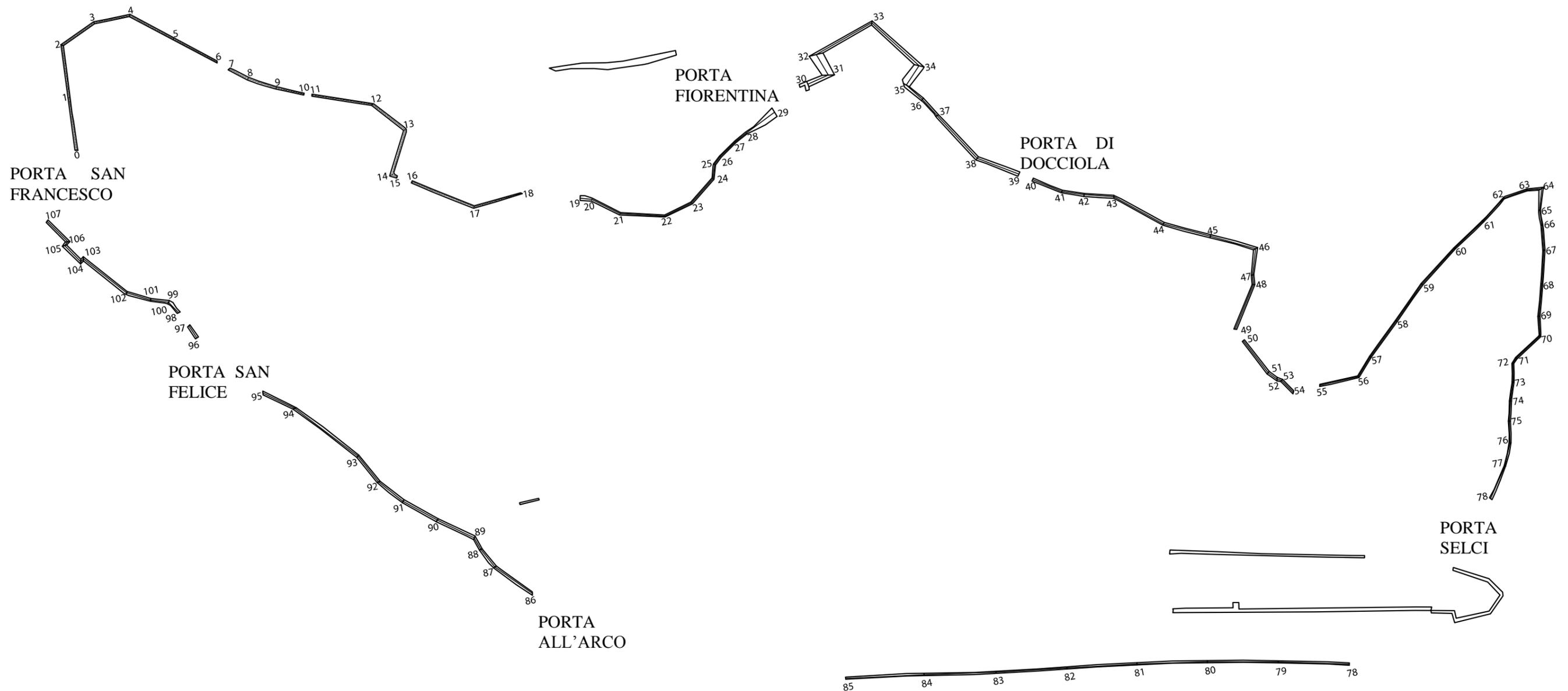


Fig. 1- Perimetro delle mura di Volterra con suddivisione in sezioni e delle principali. Sono indicate le porte della città.

**MiChE**

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



Fig. 2 - Perimetro delle mura di Volterra riportato su vista satellitare Google Maps con l'utilizzo del programma QGIS. Sono indicati i picchetti da 0 a 107 lungo il perimetro delle mura ed i punti di vista delle foto riportate nei paragrafi successivi.

## MiChE

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

Le sezioni sono così univocamente determinate a mezzo dei seguenti dati:

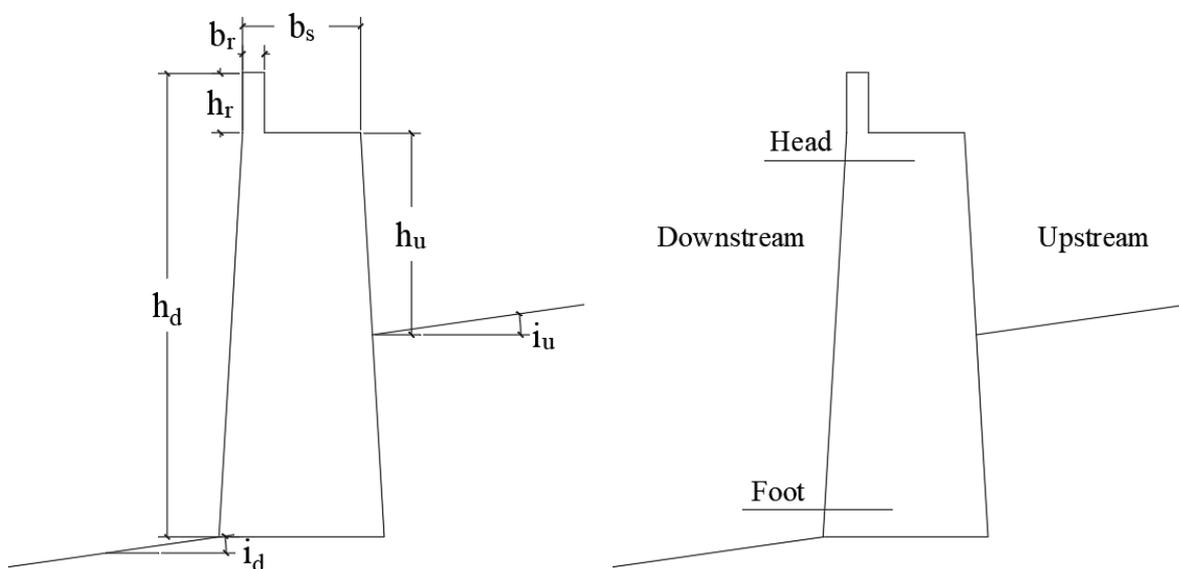
- Latitudine;
- Longitudine;
- Quota altimetrica;
- Ascissa curvilinea.

Un rilievo geometrico si rende a questo punto necessario.

### 2.1.1 Rilievo Geometrico

In data 4 Ottobre 2018 è stato eseguito un parziale rilievo geometrico sul posto delle mura urbane di Volterra. Il rilievo ha consentito di acquisire i più importanti dati geometrici, di avere informazioni sul materiale e di mettere in luce situazioni di degrado e discontinuità. Il rilievo il rilievo non è stato possibile per l'intera cinta muraria. Sono state ottenute misure esaustive su circa 10 sezioni. Per le restanti, sono state rilevate solo le grandezze geometriche accessibili. Per quelle mancanti, sono stati estesi i risultati ottenuti come illustrato di seguito.

Lo schema con cui è stata rilevata la geometria è il seguente (Fig. 3):



*Fig. 3 - Schema tipo per il rilievo.*

Le grandezze geometriche sono state rilevate con l'ausilio di strumenti tradizionali come distanziometro laser, rotella metrica, metro a stecca e livella.

## MiChE

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

Oltre alle grandezze già citate, è risultato necessario rilevare la pendenza del paramento di valle ed un eventuale fuori piombo. Dove possibile questo è stato fatto eseguendo tre misure di pendenza al piede ed in sommità dell'opera muraria. Queste misurazioni sono state effettuate in campo calcolando lo scostamento dalla verticale sulla base di 1 metro. Le letture sono state ripetute per tre volte e dei valori è stata poi effettuata la media.

### 2.2 Estensione dei dati ricorrenti alle sezioni non rilevabili

Le grandezze geometriche di Fig. 3 sono state rilevate completamente per una decina di sezioni. Per quelle sezioni non completamente rilevabili per ragioni di accessibilità si è proceduto estendendo i dati. Partendo dalle sezioni con geometria nota si sono ricavati i dati per le sezioni intermedie ipotizzando un andamento lineare delle grandezze in esame. Si riporta a titolo di esempio il procedimento adottato tra le sezioni 61-62 e 71-72 (di geometria nota) per ricavare la geometria (in questo caso l'altezza  $h$  del paramento murario) delle sezioni intermedie. Per semplicità si riporta una rappresentazione grafica descrittiva della metodologia utilizzata:

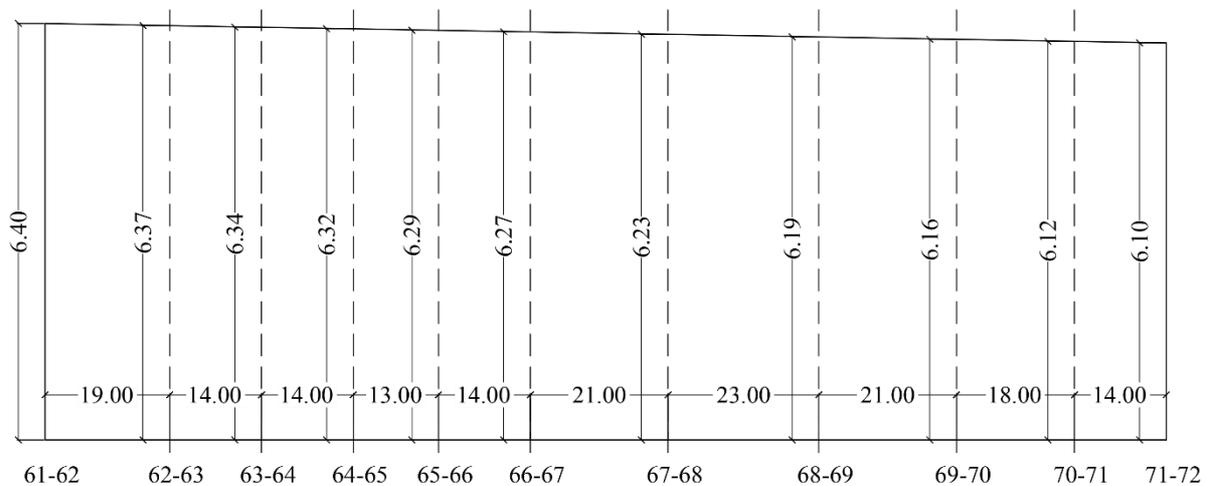


Fig. 4 - Rappresentazione grafica del metodo utilizzato per ricavare la geometria delle sezioni comprese tra la 61-62 e la 71-72 (di geometria nota).

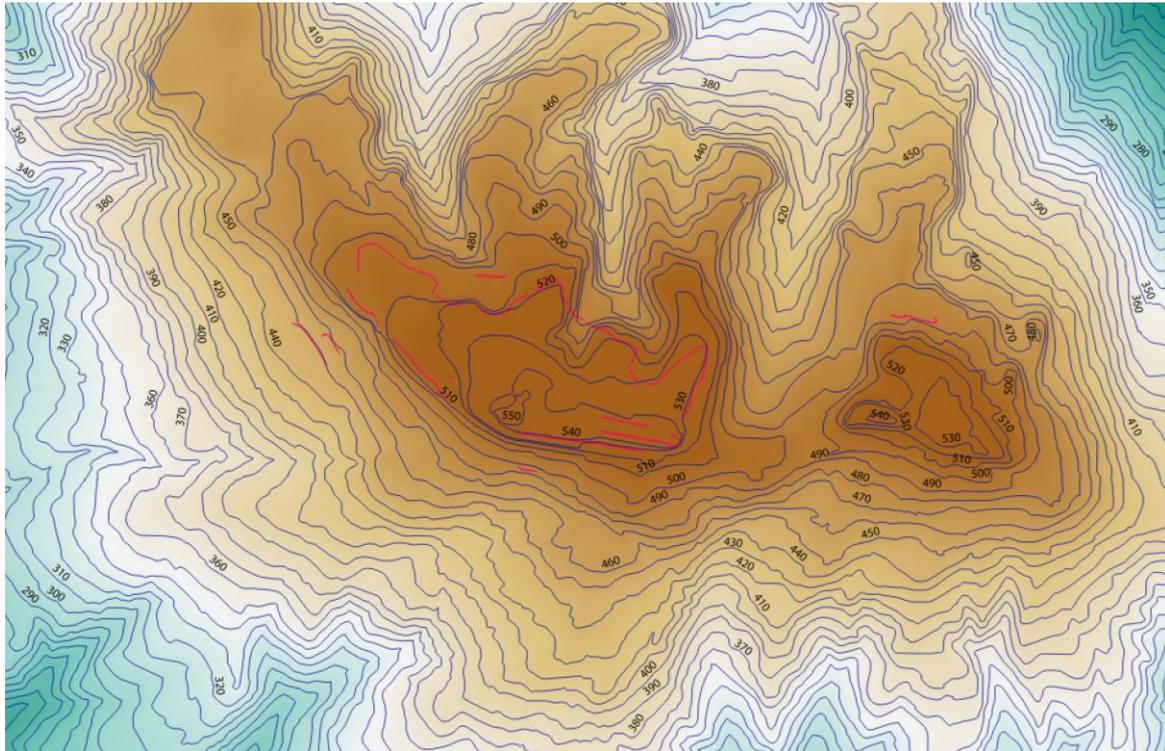
#### 2.2.1 Determinazione delle pendenze del terreno

Le pendenze del terreno a monte ed a valle dell'opera muraria sono state ricavate mediante il programma QGIS. Questo è stato possibile tramite il caricamento del raster DEM (Digital Elevation Model) della Provincia di Pisa, la cui elaborazione tramite l'installazione del plugin *ProfileTool* ha permesso di ricavare i dati necessari. Il DEM rappresenta un raster ad alta risoluzione e precisione in cui ogni cella contiene un valore di altezza, dato necessario per

## MiChE

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

determinare le pendenze del terreno a valle ed a monte dell'opera muraria. Il primo passo per individuare le pendenze è stato quello di realizzare una mappa delle pendenze. Si tratta di una mappa in cui in ogni cella viene inserito un valore che indica l'ammontare della pendenza, in questo caso in valore percentuale, del terreno nella corrispondente cella del DEM.



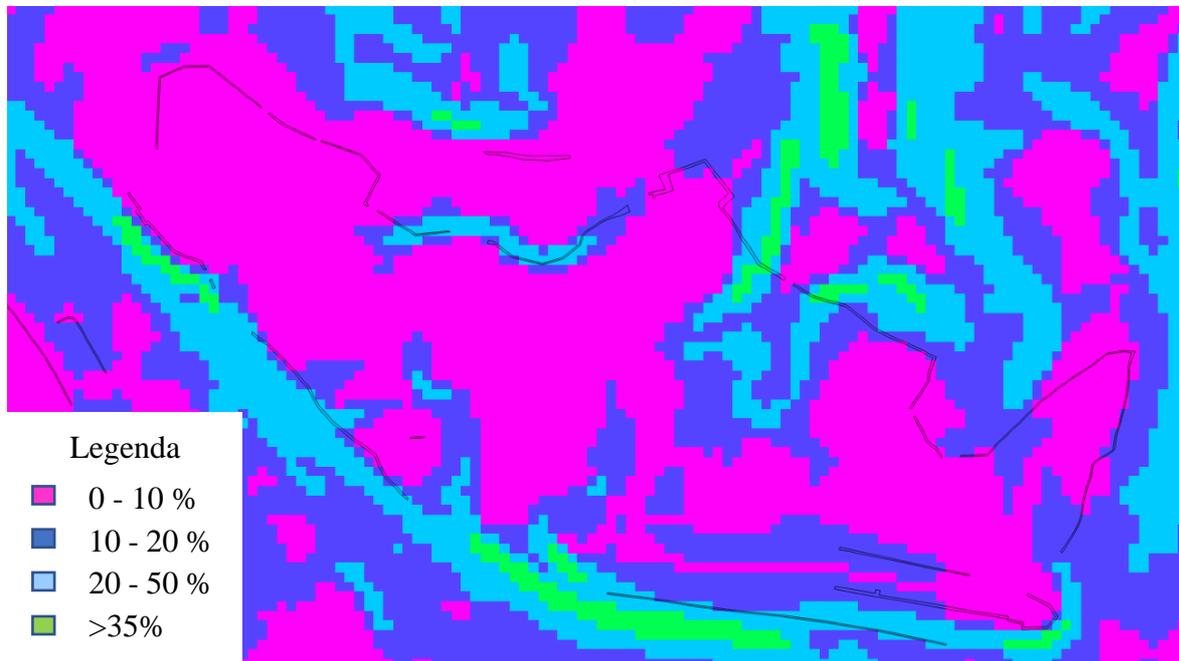
*Fig. 5 - DEM di Volterra con indicazione delle curve di livello. In rosso è riportato il perimetro delle mura. Le altezze sul livello del mare crescono dalla colorazione verde a quella marrone.*

Per ottenere il valore puntuale della pendenza a monte ed a valle di un'assegnata sezione, si è proceduto con il Plugin *Profile Tool*, seguendo la procedura riportata di seguito:

- caricamento del raster dem;
- caricamento delle mappe di googlemaps tramite il plugin *openlayers* per avere un riscontro su mappa satellitare della localizzazione delle sezioni analizzate;
- utilizzo del plugin *Saga crossprofiles* per tracciare sezioni trasversali ortogonali al perimetro delle mura con un passo di 10 metri;
- caricamento del layer dem nel plugin *profiletool*;
- calcolo dell'andamento del profilo a monte, in corrispondenza delle mura e a valle;
- determinazione del profilo del terreno.

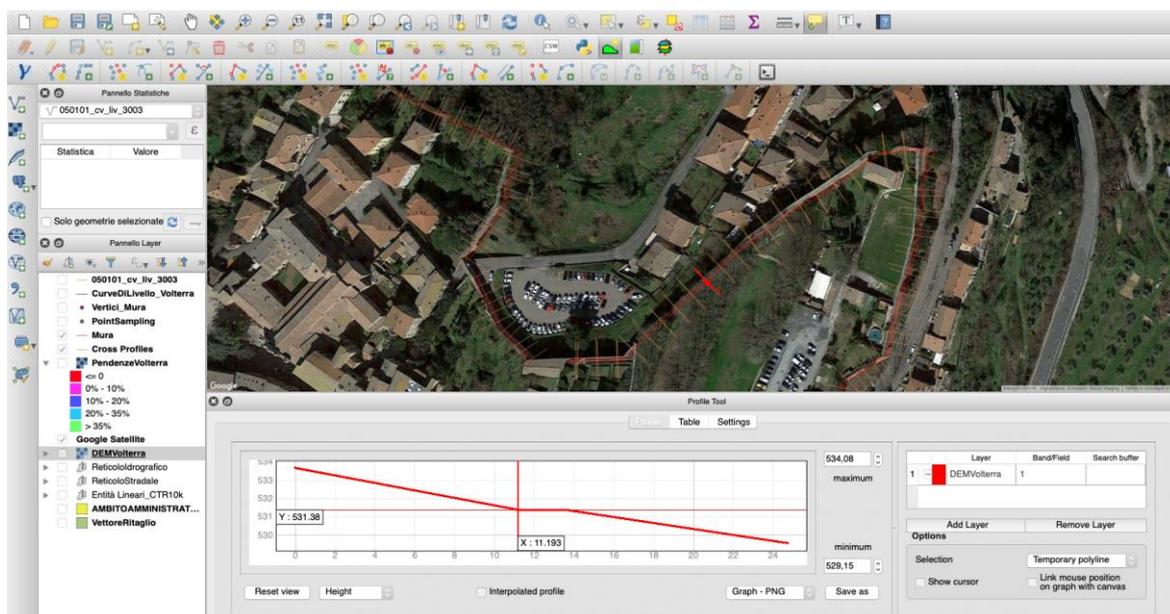
**MiChE**

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



*Fig. 6 - Mappa delle pendenze ottenuta dal programma QGIS.*

Si riporta ad esempio l'applicazione di questo plug-in per la sezione 58-59 (Fig. 7 - Schermata del programma QGIS con mostrato un esempio di utilizzo del plugin ProfileTool.). In rosso è riportato il profilo del terreno partendo da monte verso valle; in arancio le sezioni trasversali ottenuti con Cross-Profiles.



*Fig. 7 - Schermata del programma QGIS con mostrato un esempio di utilizzo del plugin ProfileTool.*

### MiChE

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

Si calcolano, applicando il procedimento appena esposto, le pendenze, espresse in gradi, di tutte le sezioni.

#### INCIDENZA VALORI DI PENDENZA A MONTE

$i_{\text{monte}} \geq 0^\circ$	88	$0^\circ \leq i < 10^\circ$	62	0,70
$i_{\text{monte}} \geq 10^\circ$	26	$10^\circ \leq i < 20^\circ$	14	0,16
$i_{\text{monte}} \geq 20^\circ$	12	$20^\circ \leq i < 30^\circ$	9	0,10
$i_{\text{monte}} \geq 30^\circ$	3	$30^\circ \leq i < 40^\circ$	2	0,02
$i_{\text{monte}} \geq 40^\circ$	1	$i \geq 40^\circ$	1	0,01

Tab. 1 - Incidenza dei valori della pendenza di monte suddivisi in 5 intervalli

#### INCIDENZA VALORI DI PENDENZA A VALLE

$i_{\text{valle}} \geq 0^\circ$	88	$0^\circ \leq i < 10^\circ$	44	50,00%
$i_{\text{valle}} \geq 10^\circ$	44	$10^\circ \leq i < 20^\circ$	29	32,95%
$i_{\text{valle}} \geq 20^\circ$	15	$20^\circ \leq i < 30^\circ$	6	6,82%
$i_{\text{valle}} \geq 30^\circ$	9	$30^\circ \leq i < 40^\circ$	4	4,55%
$i_{\text{valle}} \geq 40^\circ$	5	$i \geq 40^\circ$	5	5,68%

Tab. 2 - Incidenza dei valori della pendenza di valle suddivisi in 5 intervalli

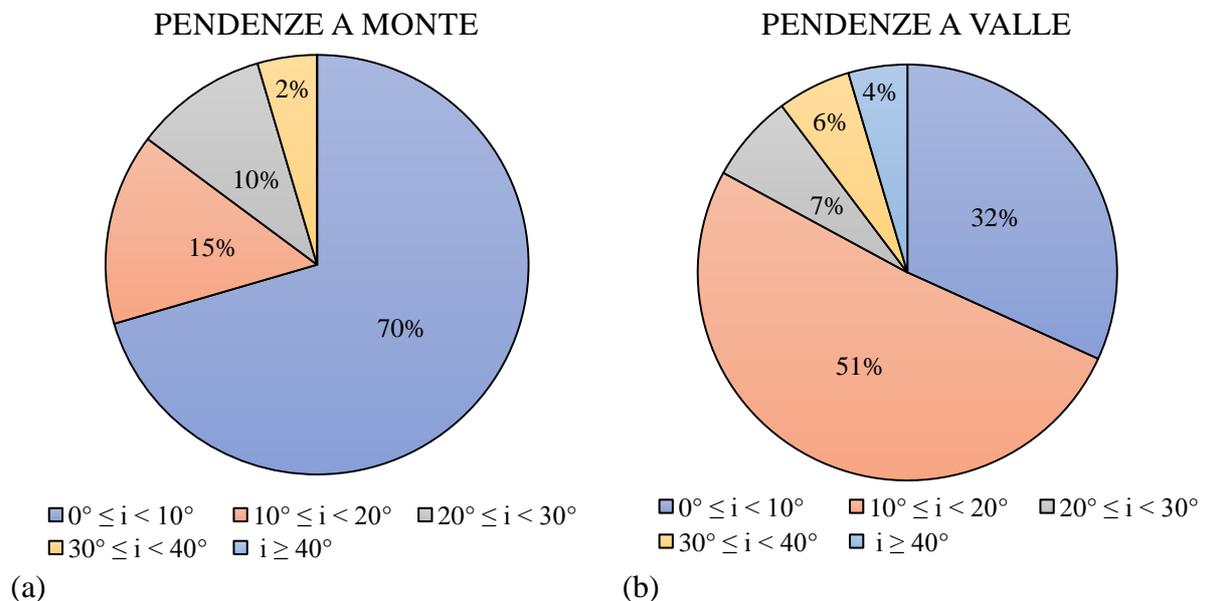


Fig. 8 - Incidenza in percentuale di ciascun intervallo della pendenza di monte (a) e di valle (b).

## MiChE

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

### 2.2.2 Peculiarità e criticità rilevate

Lungo tutta la cinta muraria e, nel dettaglio, dove sono state identificate significative discontinuità o peculiarità, è stato eseguito un rilievo fotografico. In particolare, le principali caratteristiche e discontinuità a cui si è prestata attenzione sono le seguenti:

- Presenza di dreni;
- tessitura muraria e presenza di rilevanti discontinuità in questa;
- presenza di vegetazione o eventuali macchie di umidità;
- presenza di fabbricati che hanno inglobato parte del tracciato delle mura;
- altre irregolarità geometriche.



(a)



(b)

*Fig. 9 - (a) tessitura muraria con discromie. In particolare, si nota in basso la pietra caratteristica del territorio di Volterra. (b) particolare che mostra la natura della muratura di pietre volterrane.*

Un primo rilievo condotto a Volterra nel Febbraio 2018 ha evidenziato come le pietre di Volterra siano caratterizzate da una notevole porosità e presenza di vuoti di vario diametro. Sono di natura arenaria, generalmente tenere e lavorabili, in forma di bozze squadrate con giunti di malta debolmente legate, di consistenza simile a quella del substrato roccioso esistente (la

## MiChE

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

cosiddetta “Pietra di San Giusto”). Di seguito si allegano alcune foto scattate in data 4 Ottobre 2018.

Non tutta la cinta muraria presenta tali caratteristiche. Alcuni tratti, in corrispondenza delle sezioni 30-35, sono di epoca successiva e realizzate in mattoni rettangolari. Queste fanno parte di un bastione mediceo costruito tra 1545 e 1551 su disegno dell’architetto militare Giovan Battista Bellucci con lo scopo di costruire un baluardo per proteggere la zona settentrionale della città. \\Le mura di epoca medicea non sono state oggetto di rilievo.



(a)

(b)

*Fig. 10 - (a) tessitura muraria caratterizzata da muratura in mattoni in cui si evidenzia un parziale crollo del paramento murario. (b) discontinuità dovuta alla realizzazione di uno zoccolo con pietre squadrate di maggiori dimensioni (sezioni 30-35, bastione Porta Docciola).*

È stato possibile identificare, limitatamente alle sezioni 48-49 e 58-62 la tessitura muraria della sezione di sommità, quindi del materiale di riempimento. Si è potuta constatare la presenza di conchiglie oltre che di materiale instabile e debolmente legato. Questo è costituito da blocchi informi di dimensioni da piccole a medie, disposti in filari irregolari e allettati con strati di malta. La presenza di vegetazione è stata rilevata in numerose sezioni. Di seguito si riportano alcune foto di sezioni significative, dove la presenza di vegetazione è importante. Questo indica presenza di umidità diffusa su ampie porzioni della cinta muraria. Detta umidità è alimentata da una sorgente presumibilmente non episodica (perdite dell’apparato fognario, adduzione idrica ecc.) in tutte le porzioni di mura caratterizzate da rinterro a monte.

Di seguito si riportano alcuni esempi di discontinuità geometriche dovute alla presenza, ad esempio, di strutture di **contrafforte** (Fig. 15) oppure di **edifici** (Fig. 16) che, nel corso degli anni, sono stati costruiti su tratti della cinta muraria. Altro elemento di cui si è rilevata la presenza sono i **dreni**. La presenza di questi è diffusa in più sezioni della cinta muraria ed il loro corretto funzionamento è atto ad evitare ristagno di acqua a monte della sezione muraria.

## MiChe

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

Tuttavia, come si è potuto constatare, il funzionamento di questi non è sempre garantito e in molti casi risultano parzialmente ostruiti.



(a)

(b)

*Fig. 11 - Coronamento sommitale di tratti dell'opera di sostegno; (a) pietre dilavate, (b) matrice debolmente cementata.*



*Fig. 12 - Presenza di conchiglie nella muratura. Foto scattata sulla sommità della sezione 48-49.*

**MiChe**

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



(a)



(b)

*Fig. 13 - (a) particolare della sezione 13-14, ben evidente la presenza di blocchi squadrati di pietra “panchina”; (b) particolare della sezione 5-6 con evidente presenza di umidità e vegetazione (livella lunga un metro).*



(a)



(b)

*Fig. 14 - (a) presenza di vegetazione su ampia parte del paramento murario in corrispondenza dell’anfiteatro romano, sezioni 19-24. Si evidenzia anche una discontinuità geometrica. (b) presenza di vegetazione specialmente in basso nella sezione 48-49.*

## MiChE

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



*Fig. 15 - Presenza di una discontinuità geometrica dovuta a contrafforti, sezione 56.*



(a)

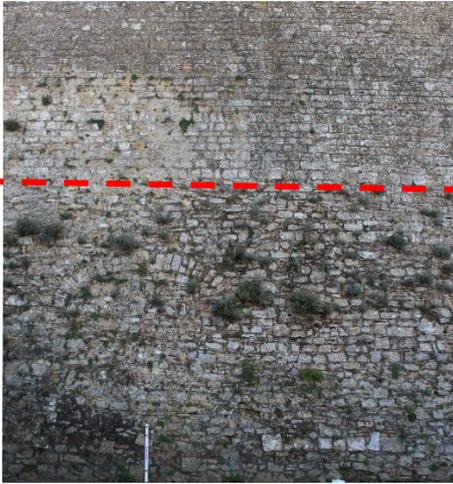


(b)

*Fig. 16 - (a) sezione 71-73; (b) sezione 18-19. In entrambi i casi si nota la presenza di un edificio che ha inglobato parte della cinta muraria).*

**MiChE**

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



(a)



(b)

*Fig. 17 - (a) presenza di vegetazione sulla parte bassa del paramento murario. Si evince anche una discontinuità dovuta alla presenza di un arco in muratura (sezione 5-6) ed una diversa tessitura muraria a partire da circa 4 metri (b) presenza di una discontinuità muraria nell'angolo del bastione con muratura squadrata di maggiori dimensioni. Si evidenziano aree con danneggiamento dei laterizi.*



(a)



(b)



(c)

*Fig. 18 - Da sinistra verso destra: sezione 92-93 (a), 32-33 (b), 51-52 (c). In tutte le foto si evidenzia la presenza di dreni nel paramento murario. Nella foto (c) è visibile vegetazione che ostruisce parzialmente il dreno.*



## **MiChe**

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

### **2.2.3 Altre note ed allegati**

Non è stato possibile rilevare il tratto di mura a partire dalla sezione 78 alla sezione 85. Inoltre, risulta mancante anche il rilievo della fortezza Medicea. Quest'ultima è costituita da due corpi uniti tra loro da un tratto di mura con sola funzione difensiva, quindi non di ritegno del terreno di monte. La parte più antica, conosciuta come Rocca Vecchia, risale al 1342, mentre la parte successiva, Rocca Nuova, fu edificata tra il 1472 ed il 1474.

Di seguito si allegano le tavole con la restituzione geometrica di tutte le sezioni rilevate, sia complete che parziali. Per ciascuna sezione si riportano anche uno o più punti di vista fotografici. Per l'individuazione geografica di ciascuna sezione si rimanda alle planimetrie.

**MiChE**

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

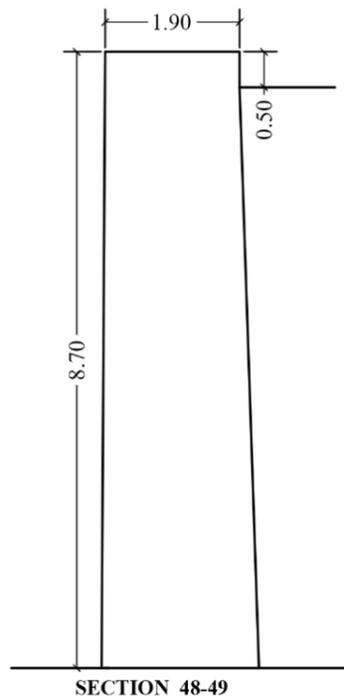


Fig. 19 – Vista della sezione 48-49

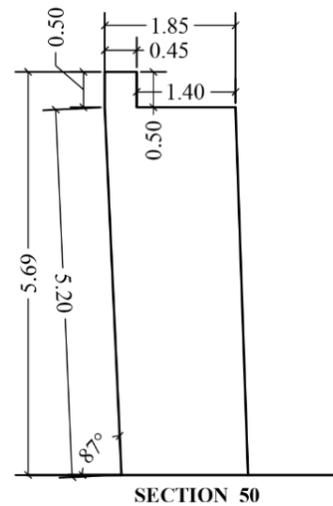


Fig. 20 – Vista della sezione 50

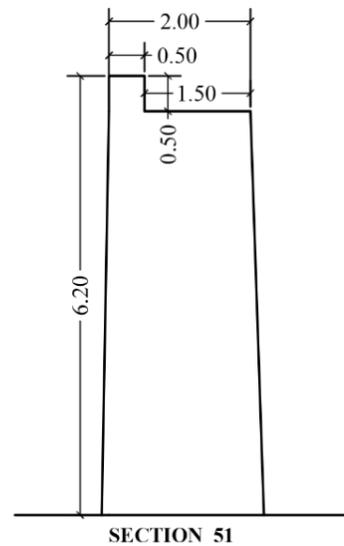


Fig. 21 – Vista della sezione 51 con presenza diffusa di vegetazione

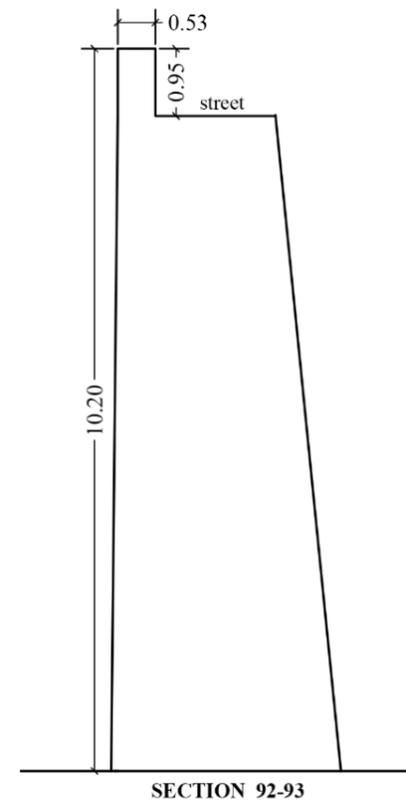


Fig. 22 – Vista della sezione 92-93

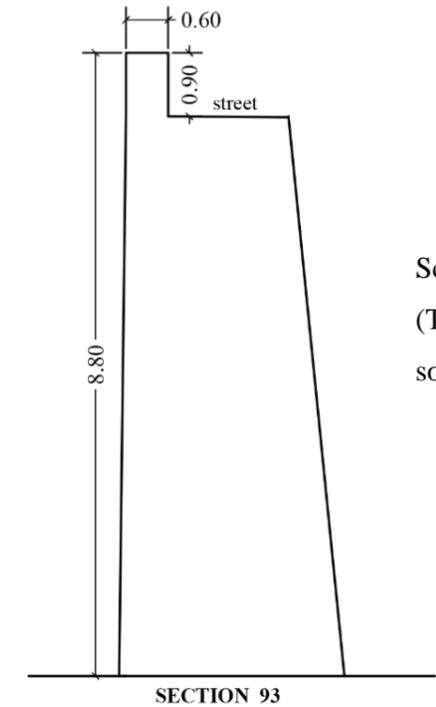


Fig. 23 – Vista della sezione 93 e parte ricostruita dopo il crollo del 2014



Fig. 24 – Foto che mostra vasta presenza di vegetazione nella sezione 48-49



Fig. 25 – Sommità della sezione 50 dal giardino del Museo Etrusco



Fig. 26 – Vista della sezione 51



Fig. 27 – Vista della sezione 92-93

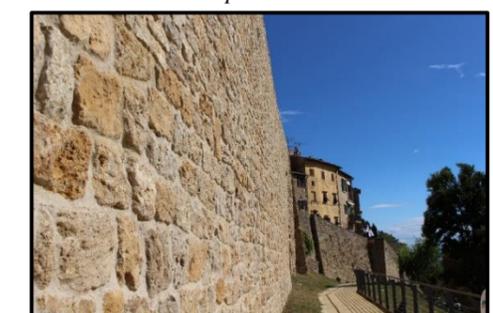
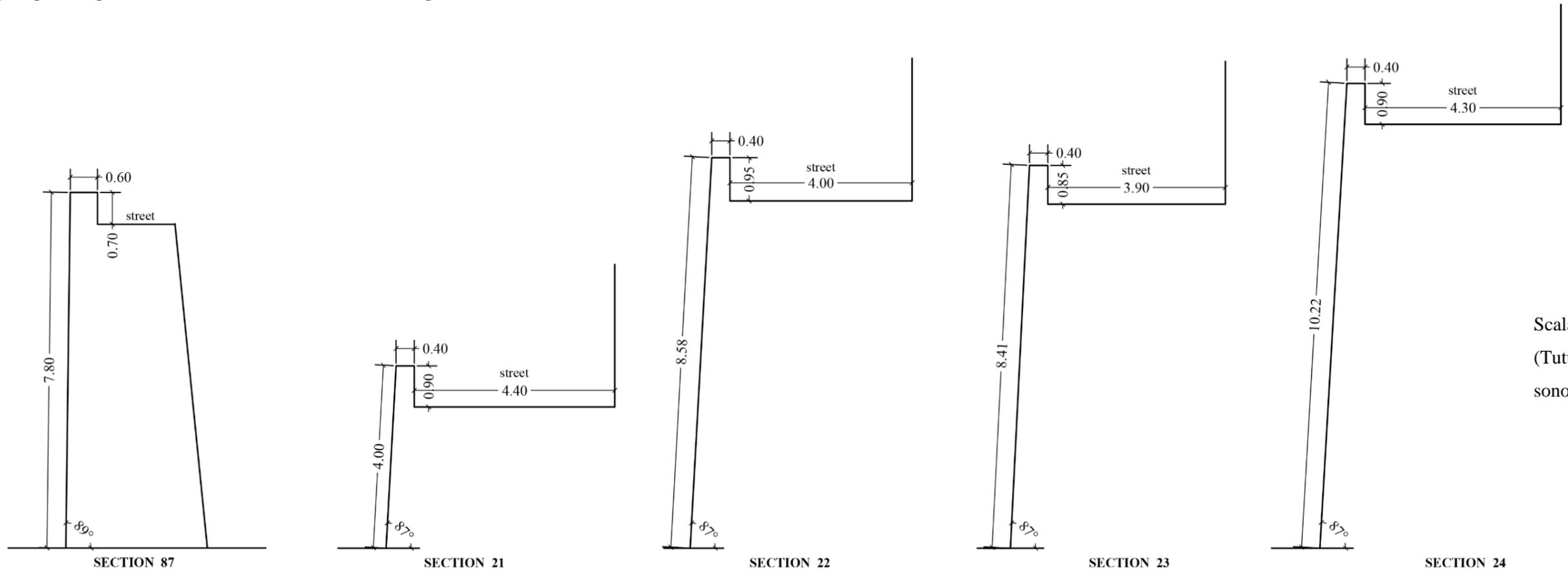


Fig. 28 – Vista della sezione 93 e parte ricostruita dopo il crollo del 2014.

Scala 1:100  
(Tutte le quote sono in metri)

**MiChE**

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



Scala 1:100  
(Tutte le quote  
sono in metri)



Fig. 29 – Vista della sezione 87 con a monte strada e edifici. Presenza di vegetazione.



Fig. 30 – Vista della sezione 21: a monte strada asfaltata ed edifici, a valle anfiteatro romano



Fig. 31 – Vista della sezione 22 notevole presenza di vegetazione



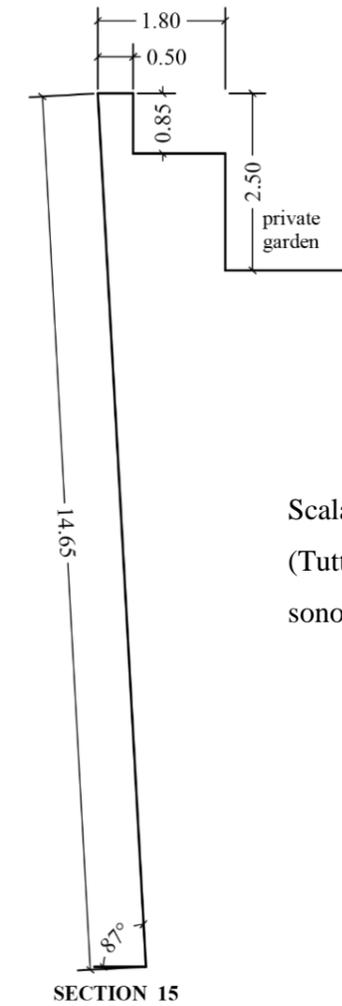
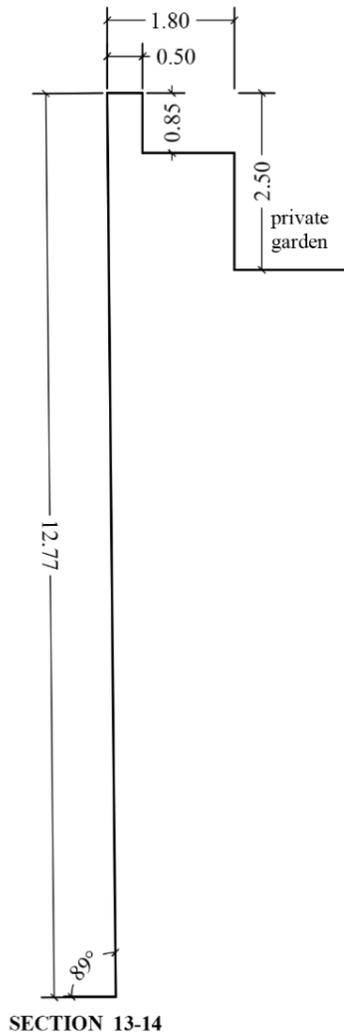
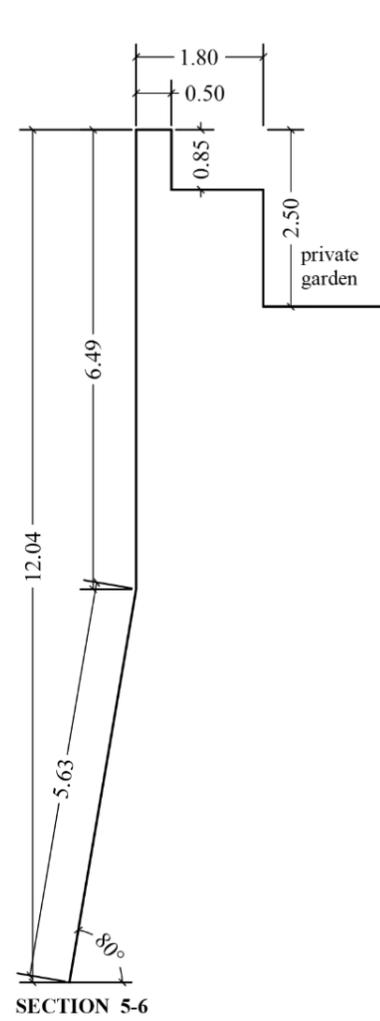
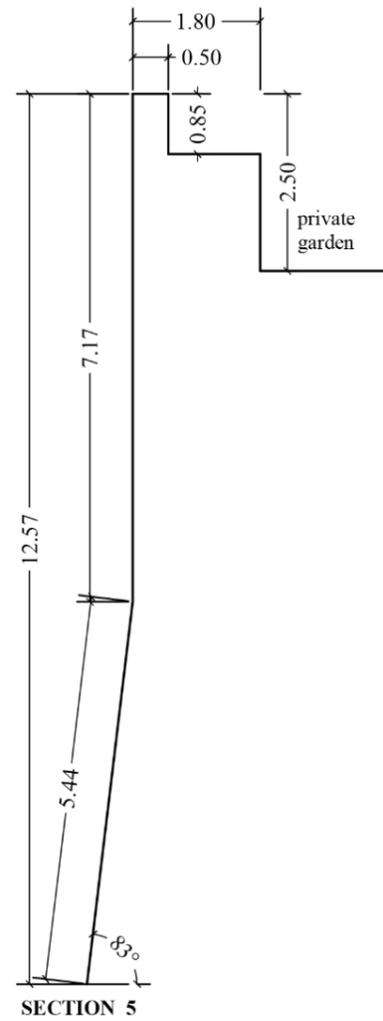
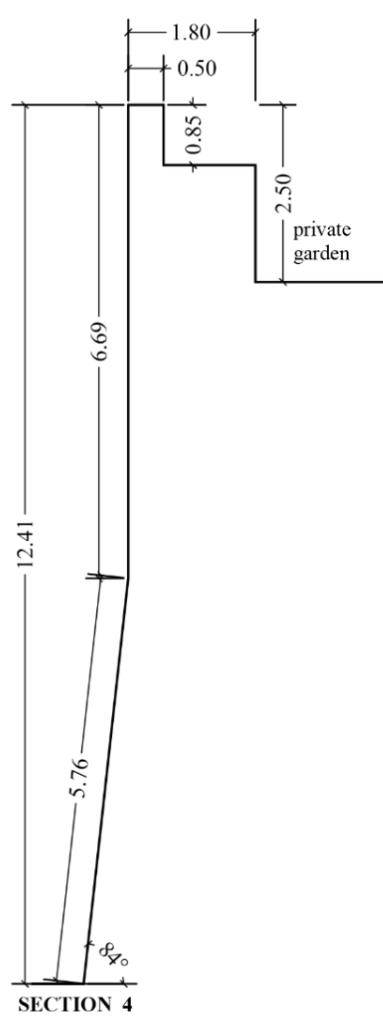
Fig. 32 – Vista delle sezioni 23-25



Fig. 33 – Vista della sezione 24 e parte ricostruita dopo il crollo del 2014

**MiChE**

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



Scala 1:100  
(Tutte le misure  
sono in metri)



Fig. 34 – Vista della sezione 4 e presenza di vegetazione



Fig. 35 – Vista delle sezioni 4-6 con evidenza di costruzione delle mura con due pendenze differenti.



Fig. 36 – Vista della sezione 5-6 con presenza di vegetazione sul paramento murario

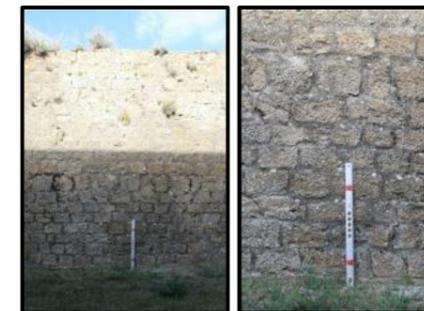


Fig. 37 – Vista della sezione 13-14 con dettaglio tessitura muraria



Fig. 38 – Vista della sezione 15. Presenza di edificio che ha inglobato parte della sezione e dreni. Dettaglio angolo 14-15 con edifici e vegetazione.

## MiChE

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

# 3 Rischio frana

La valutazione di recenti casi studio ha evidenziato come una delle cause scatenanti dissesti nelle mura storiche sia di natura idrologica. In particolare, le recenti variazioni in quantità ed intensità delle precipitazioni sono spesso causa di fenomeni franosi.

Nel caso in questione, la presenza di acque meteoriche ha un doppio effetto:

- Effetto dilavamento: una riduzione delle proprietà meccaniche dei terreni;
- Aumento delle azioni, in termini di incremento della spinta.

In particolare recenti studi hanno sviluppato uno modello per la previsione di frane in pendii indefiniti dovuto all'effetto di precipitazioni: lo SLIP Model [3]. Si tratta di un modello matematico per poter prevedere il pericolo di frane per strati di terreno superficiali dovute a piogge di diversa durata. Questo modello, applicato a recenti casi studio in [4]–[6] ha mostrato un livello previsionale caratterizzato da buona attendibilità.

Da qui discende l'idea applicare detto modello, sviluppato per la situazione di equilibrio di un pendio indefinito, per la valutazione della sicurezza delle opere di sostegno.

Vengono quindi utilizzati i risultati dello SLIP Model in termini di:

- aumento del grado di saturazione del terreno
- diminuzione di resistenza a taglio, coesione, ed angolo di attrito di strati discreti di terreno

## 3.1 Lo slip model

Le altezze di pioggia per cui è stato effettuato il calcolo e per cui si valutano cinque diversi scenari di imbibizione del terreno, sono state dedotte dai dati messi a disposizione dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa che ha fornito le linee di segnalatrici di probabilità pluviometrica per le stazioni del compartimento di Pisa. L'altezza di precipitazione è espressa nella forma:

$$h = at^n t_r^m \quad (1)$$

Dove:

$h$  = altezza di precipitazione espressa in millimetri;

$t$  = durata di pioggia espressa in ore;

$t_r$  = tempo di ritorno espresso in anni.

**MiChE**

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

I parametri  $a, n, m$  vengono stimati tramite regressione multipla lineare, previa linearizzazione dell'espressione (1) in scala logaritmica. Considerando che per il caso studio in esame sono di interesse durate di pioggia maggiori di un'ora i valori forniti dalle tabelle presenti in [7] sono i seguenti:

$$a = 26,534;$$

$$n = 0,264;$$

$$m = 0,219.$$

Si consideri un generico strato di terreno di profondità  $H$  in un pendio indefinito Fig. 39. In caso di evento meteorico questo può essere suddiviso in due porzioni:

- lo strato  $m^*H$ , completamente saturo.
- lo strato  $(H-mH)$  parzialmente saturo.

Le zone sature sono rappresentate nel modello da un substrato di spessore  $mH$ , dove  $0 < m < 1$ , come mostrato nell'immagine seguente. Il parametro  $mH$  è legato alla quantità di pioggia,  $h$ , attraverso la seguente relazione, la pioggia provoca quindi un aumento di  $m$ :

$$mH = \frac{\beta^* h}{n(1 - S_r)} \quad (2)$$

dove:

$h$  altezza di pioggia come calcolata al paragrafo precedente;

$H$  spessore dello strato superficiale di terreno che è potenzialmente coinvolto nella frana e per il caso studio in esame fissato in 1 metro;

$\beta^*$  percentuale di pioggia che si infila nel terreno;

$n$  porosità;

$S_r$  grado di saturazione.

## MiChE

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

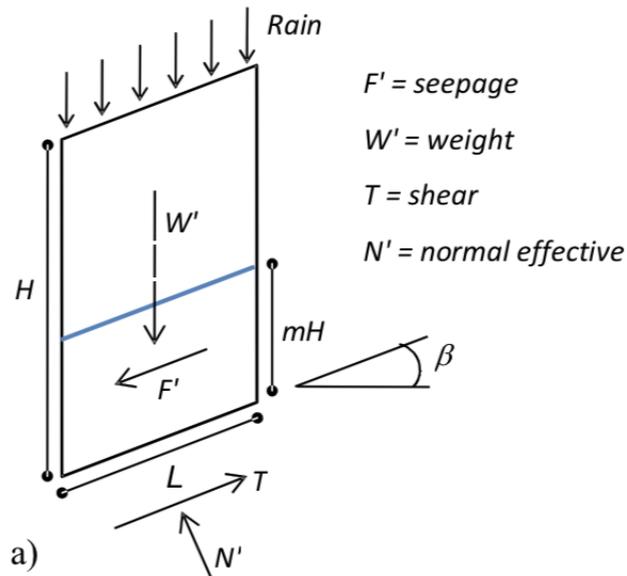


Fig. 39 - Schematizzazione del modello.

Per valutare il grado di saturazione  $S_r$  si è scelto di procedere fissando come valore di partenza il valore di 0,30 già calcolato, questo, come si vedrà nel seguito, aumenterà con l'altezza di pioggia fino ad un massimo di 0,79. Come spiegato in [8], il valore minimo del grado di saturazione viene sommato a quello dovuto all'infiltrazione piovosa, al fine di determinare un valore conclusivo utile per la modellazione.

Resta il problema di valutare, dato un evento meteorico, la percentuale di acqua che si infiltra nel terreno e la percentuale di acqua di ruscellamento.

Non essendo stato possibile un calcolo accurato per tutta l'area del caso studio, viene valutata in misura pari al 30% dell'altezza di pioggia totale [8], [9]. Si adotta l'ipotesi semplificativa che la quantità di pioggia che non interferisce con la stabilità dello strato di terreno superficiale, legata fondamentalmente ai meccanismi di evapotraspirazione e di deflusso superficiale. Quindi, il valore di  $\beta^*$  è stato fissato pari a 0,70. Noto  $\beta^*$  si può calcolare il valore del coefficiente  $m$  per poter determinare lo spessore dello strato saturo. Lo spessore dello strato superficiale potenzialmente coinvolto nel fenomeno franoso,  $H$ , è stato fissato pari a 1 metro, riferendosi infatti il modello a movimenti di strati superficiali di terreno.

## MiChE

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

$T_r = 175$  anni

$m_1$	$m_3$	$m_6$	$m_{12}$	$m_{24}$
0,3046	0,41	0,49	0,59	0,70

Tab. 3 - Valori del coefficiente  $m$  per piogge di durata 1,3,6,12,24 ore.

La resistenza al taglio dello strato saturo è espressa tramite il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb  $\tau = \sigma \tan \phi' + c$ ; la resistenza a taglio dello strato non saturo è invece descritta nel modello attraverso un criterio di Mohr-Coulomb semplificato per i terreni non saturi:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u)_f \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

Dove:

$\sigma' = (\sigma_f - u)_f$  è lo sforzo normale a rottura;

$c'$  coesione effettiva;

$\phi'$  e  $\phi_b$  sono gli angoli di attrito rispettivamente dovuti alla completa saturazione del terreno ed alla matrice di suzione;

$(u_a - u_w)$  rappresenta la matrice di suzione.

Il secondo termine del criterio di Mohr-Coulomb rappresenta il contributo della matrice di suzione alla resistenza a taglio del terreno ed è indicata da Fredlund e Rahardjo in [10] come coesione apparente, indicata come  $c_\psi$ , e dipende dal grado di saturazione del terreno. Poter esprimere il valore della coesione apparente attraverso la saturazione del terreno risulta comodo ed efficace in quanto spesso risulta di difficile determinazione sperimentale [4]. Il terreno, quindi, almeno inizialmente, non è completamente saturo per cui il valore della coesione è dovuto a due contributi, quello della coesione efficace satura  $c$ , e quello della coesione apparente che tiene conto della parziale saturazione del terreno e quindi dell'incremento della resistenza a taglio,  $c_\psi$ . Il valore della coesione apparente può essere dedotto tramite formule elaborate da risultati su test sperimentali in diversi tipi di terreno. Il criterio di rottura (3) può essere, quindi, riscritto nel seguente modo:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' + c_\psi \quad (4)$$

Si definisce quindi un valore iniziale della coesione apparente dipendente dalle caratteristiche del terreno e dal suo grado di saturazione iniziale:

$$c'_\psi = AS_r(1 - S_r)^2 \quad (5)$$

dove:

## MiChE

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

$A = 40$  è un parametro sperimentale del modello che dipende dal tipo di terreno;

$\lambda = 0,4$  è considerata una variabile costante anch'essa dipendente dal tipo di terreno.

Entrambi i due parametri  $A$  e  $\lambda$  sono stati identificati da prove sperimentali riportate in letteratura da Montrasio e Valentino [11], [8], [12], [13] e dipendono dal tipo di terreno e dalla resistenza a taglio in condizioni non sature.

Il valore finale della coesione apparente, dell'intero strato potenzialmente instabile di altezza  $H$ , considerando quindi lo strato saturo  $m$  e quello non sature, è dato da:

$$c_v = c'_v (1 - m)^\alpha \quad (6)$$

dove:

$\alpha = 3,40$  è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche del terreno e tiene conto delle semplificazioni che sono state fatte nell'elaborazione del modello. Anche questo parametro è stato reperito in letteratura [11], [8], [9], [13].

Il modello è qui servito a valutare la variazione della resistenza a taglio del terreno con l'aumentare del grado di imbibizione. Come riportato in [14], a partire da un valore massimo la coesione decresce abbastanza rapidamente con l'aumentare della saturazione del terreno: nello specifico studi effettuati su terreni prevalentemente sabbiosi hanno mostrato che decresce fino a valori del grado di saturazione intorno all'80% per poi mantenersi intorno a valori prossimi a 0 quando la saturazione tende al 100%. Nei grafici di Fig. 40 si riporta questo andamento. Nel primo grafico è riportato il valore riferito all'Espressione (6), nel secondo grafico l'andamento all'interno dell'intero strato di terreno di altezza  $H$ . Il valore della coesione in esame è quello apparente essendo il valore efficace pari a 0.

Il metodo SLIP Model ha permesso quindi di valutare l'andamento della coesione apparente del pendio equivalente, quindi di un parametro di resistenza al taglio, con l'aumentare della saturazione del terreno. Tali valori di coesione apparente saranno attribuiti ai diversi strati di terreno caratterizzati da diversi gradi di imbibizione.

Il primo valore di Tab. 12 rappresenta la massima coesione apparente del terreno per un valore del grado di saturazione pari al 30%, rappresentante cioè le condizioni iniziali del pendio. Come si vede dalla tabella, i valori decrescono poi molto rapidamente all'aumentare della saturazione, arrivando per le durate di pioggia di 24 ore ad un valore di saturazione dell'80% corrispondente ad una coesione apparente quasi nulla, come mostrano anche i grafici riportati di seguito.

## MiChE

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

$c_{\psi}$	10,40
$c_{\psi 1}$	3,00
$c_{\psi 3}$	1,80
$c_{\psi 6}$	1,10
$c_{\psi 12}$	0,50
$c_{\psi 24}$	0,20

Tab. 4 - Valori della coesione all'aumentare della saturazione del terreno

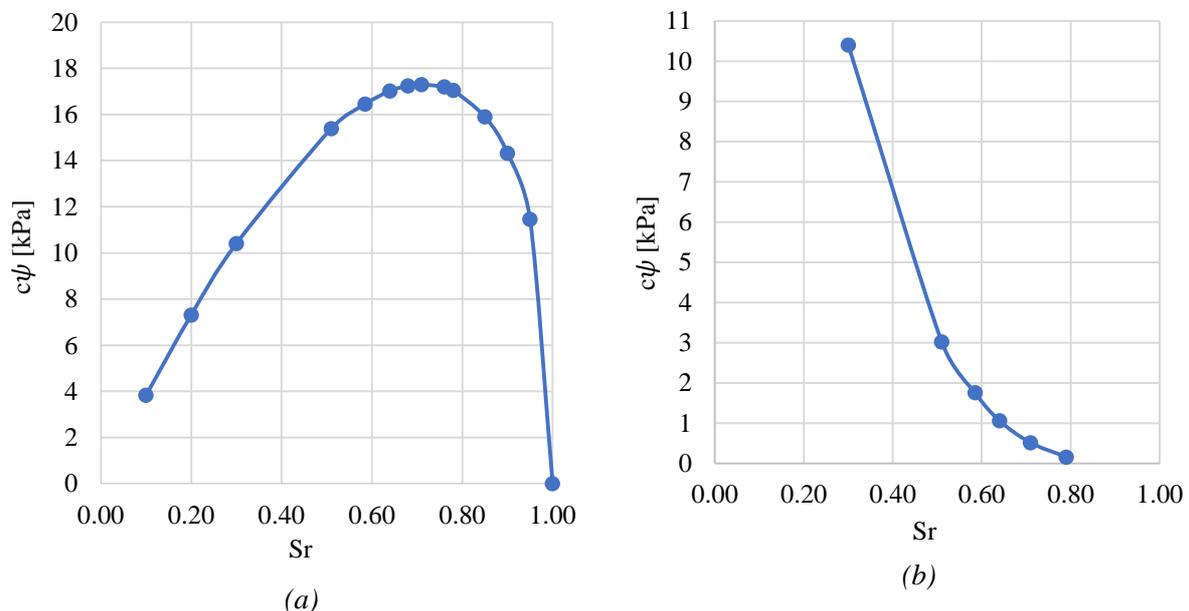


Fig. 40 - (a) il grafico riporta l'andamento della coesione apparente, in un terreno parzialmente saturo, con il grado di saturazione  $S_r$ . (b) si riporta l'andamento della coesione apparente dello strato di strato di terreno omogeneizzato di altezza  $H$ . In questo caso si tiene conto dello strato potenzialmente saturo  $mH$ , dove il valore di coesione apparente è nullo, per ottenere il valore nello strato di terreno di altezza  $H$ .

La variazione del grado di saturazione con l'altezza di pioggia è stata calcolata considerando i modelli sperimentali sviluppati da Montrasio et al. [6]:

$$S_r(h) = S_{r0} + \frac{\beta h}{nH} \quad (7)$$

dove:

$S_{r0}$  è il valore di partenza del grado di saturazione, in questo caso pari a 0,30;

$\beta$  rappresenta la capacità di imbibizione del terreno, assunta pari a 0,70 in base ad evidenze sperimentali e non avendo a disposizione sufficienti dati sul terreno;

$H$  è lo spessore dello strato superficiale di terreno considerato nel calcolo;

## MiChE

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

$n$  è il valore della porosità;

$h$  è l'altezza di pioggia considerata.

I valori calcolati sono riportati di in Tab. 5.

$S_{r,1}$	$S_{r,3}$	$S_{r,6}$	$S_{r,12}$	$S_{r,24}$
0,51	0,58	0,64	0,71	0,79

Tab. 5 – Grado di saturazione per la stratigrafia identificata.

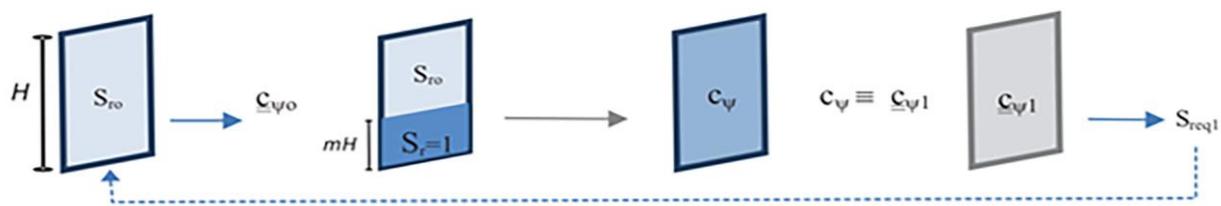


Fig. 41 - Step per valutare il valore della coesione apparente nello strato di altezza  $H$  potenzialmente instabile.

Di seguito si riportano i parametri del terreno in termini di peso specifico al variare del grado di saturazione. La variazione del peso specifico, dovuta alla variazione del contenuto d'acqua nel terreno, è stata ottenuta attraverso la seguente formula:

$$w = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_d} \quad (8)$$

dove:

$\gamma_d$  è il peso di volume secco, costante per ogni grado di saturazione;

$w$  è il contenuto d'acqua.

$\gamma$	20,00	$S_{r,0}$	0,30
$\gamma_1$	20,65	$S_{r,1}$	0,51
$\gamma_3$	20,86	$S_{r,3}$	0,58
$\gamma_6$	21,00	$S_{r,6}$	0,64
$\gamma_{12}$	21,21	$S_{r,12}$	0,71
$\gamma_{24}$	21,44	$S_{r,24}$	0,79

Tab. 6 - Valore del peso specifico del terreno al variare del grado di saturazione e quindi del contenuto d'acqua presente nel terreno.

Per quanto riguarda la variazione dell'angolo di resistenza al taglio  $\phi$  con l'aumentare della saturazione, non è stato possibile determinare matematicamente i valori all'aumentare

**MiChE**

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

dell'imbibizione del terreno, in mancanza di prove geotecniche sullo stesso. Si è fatto quindi riferimento a valori di variazione dell'angolo determinati sperimentalmente e reperiti in letteratura per terreni sabbiosi [15]. La decrescita dell'angolo di attrito con la saturazione è stata studiata da Yoshida et al. [14], sottolineando come in terreni sabbiosi decresce costantemente con l'aumentare del grado di saturazione. In Tab. 7 si riportano i valori dell'angolo di attrito utilizzati nella modellazione.

$\phi'$ [°]	37,00
$\phi'_{1}$ [°]	27,5
$\phi'_{3}$ [°]	26
$\phi'_{6}$ [°]	24,50
$\phi'_{12}$ [°]	24
$\phi'_{24}$ [°]	22,5

*Tab. 7 - Valori dell'angolo di attrito al variare del grado di saturazione.*

## MiChE

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

### 3.1.1 Applicazione dello SLIP al periodo Gennaio-Marzo 2014 per la sezione collassata

Si vuole verificare che l'applicazione dello SLIP Model al caso studio fornisce risultati validi. In tal caso la sezione di mura storiche crollata nel 2014 fornisce un'ottima possibilità di riscontro. Per ottenere un riscontro con quanto accaduto nel 2014, è stato applicato il modello SLIP al periodo Gennaio-Marzo 2014 ed è stato valutato l'andamento del Fattore di Sicurezza (FS) con le altezze di pioggia effettivamente verificatesi in tale arco temporale. Le Espressioni necessarie al calcolo sono le stesse riportate al paragrafo precedente, tranne che per il calcolo del valore di  $m$ . A differenza di quanto precedentemente fatto, in questo caso il modello è stato applicato al caso studio tal quale tenendo conto del contributo temporale, attraverso la seguente Espressione:

$$m = \frac{\beta}{nH(1-S_r)} \sum_{i=1}^n h_i \cdot \exp[-k_i(t-t_i)] \quad (9)$$

dove:

$k_i = 0,026 \text{ day}^{-1}$ , rappresenta la capacità di drenaggio globale del pendio ed il valore è stato scelto da fonti di letteratura per terreni prevalentemente sabbiosi [13];

$t_0$  è l'intervallo temporale di partenza, quindi il primo giorno considerato nel calcolo;

$\omega$ , intervallo di tempo. La sommatoria in un generico intervallo  $i$  tiene conto anche di tutti gli intervalli precedenti e delle precipitazioni già verificatesi.

Il valore di  $m$  è quindi dipendente dal tempo (espresso in giorni) e del quantitativo di precipitazione verificatesi nell'intervallo considerato, in questo caso 24 ore. Il valore che si ottiene in ciascun intervallo è sempre dipendente dall'intervallo precedente e dalle precipitazioni verificatesi. In assenza di precipitazioni, decresce nel tempo come conseguenza di fenomeni di evapotraspirazione, infiltrazione ecc. In questo caso, essendo il periodo di riferimento Gennaio-Marzo, in accordo con quanto riportato in [9][8], è stato scelto un valore del grado di saturazione di partenza pari a 0,75.

Si registra una significativa riduzione del fattore di sicurezza FS che nel periodo 29 Gennaio 26 Marzo diviene minore dell'unità. Questo dato è consistente con il crollo avvenuto in data 31 Gennaio 2014.

## MiChE

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

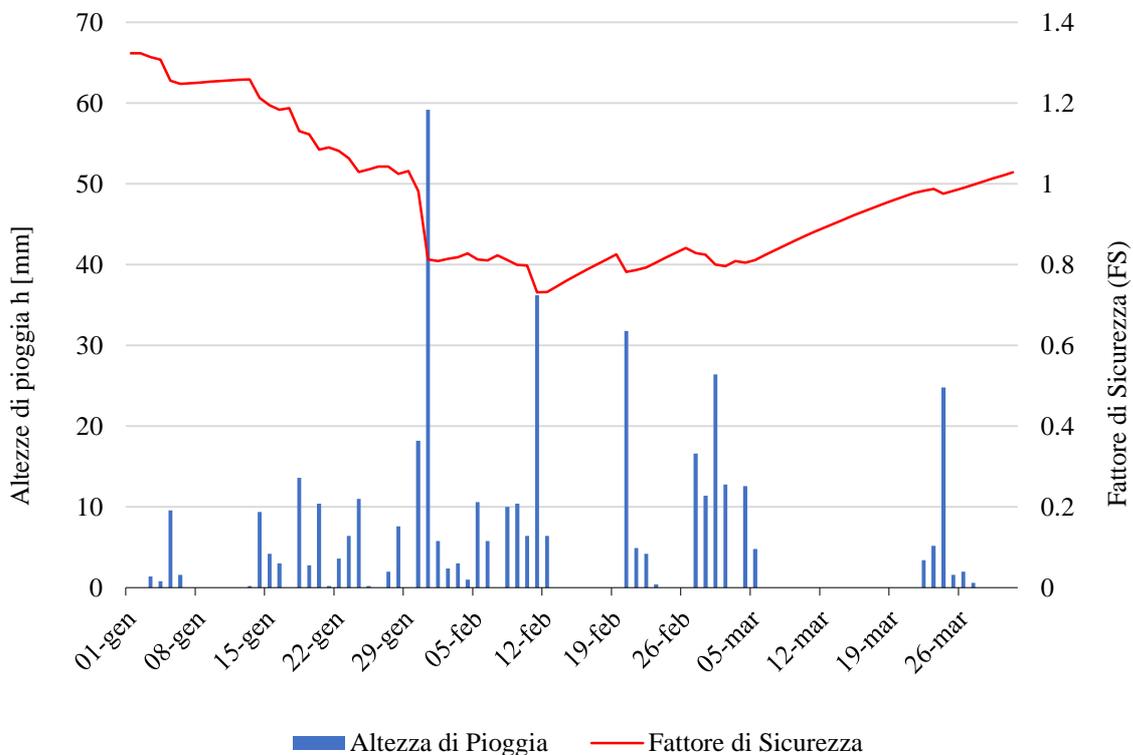


Fig. 42 - Grafico che riporta l'andamento del fattore di sicurezza FS nell'arco temporale considerato nel calcolo.

### 3.2 Analisi di vulnerabilità

Lo SLIP model è stato dunque applicato alle sezioni oggetto di studio attraverso i seguenti passi:

1. Discretizzazione del terreno in strati orizzontali di profondità pari ad un metro.
2. Applicazione a detti strati di caratteristiche meccaniche diverse in funzione del grado di saturazione (corrispondenti a piogge di diversa intensità e durata)
3. Determinazione del carico di collasso.

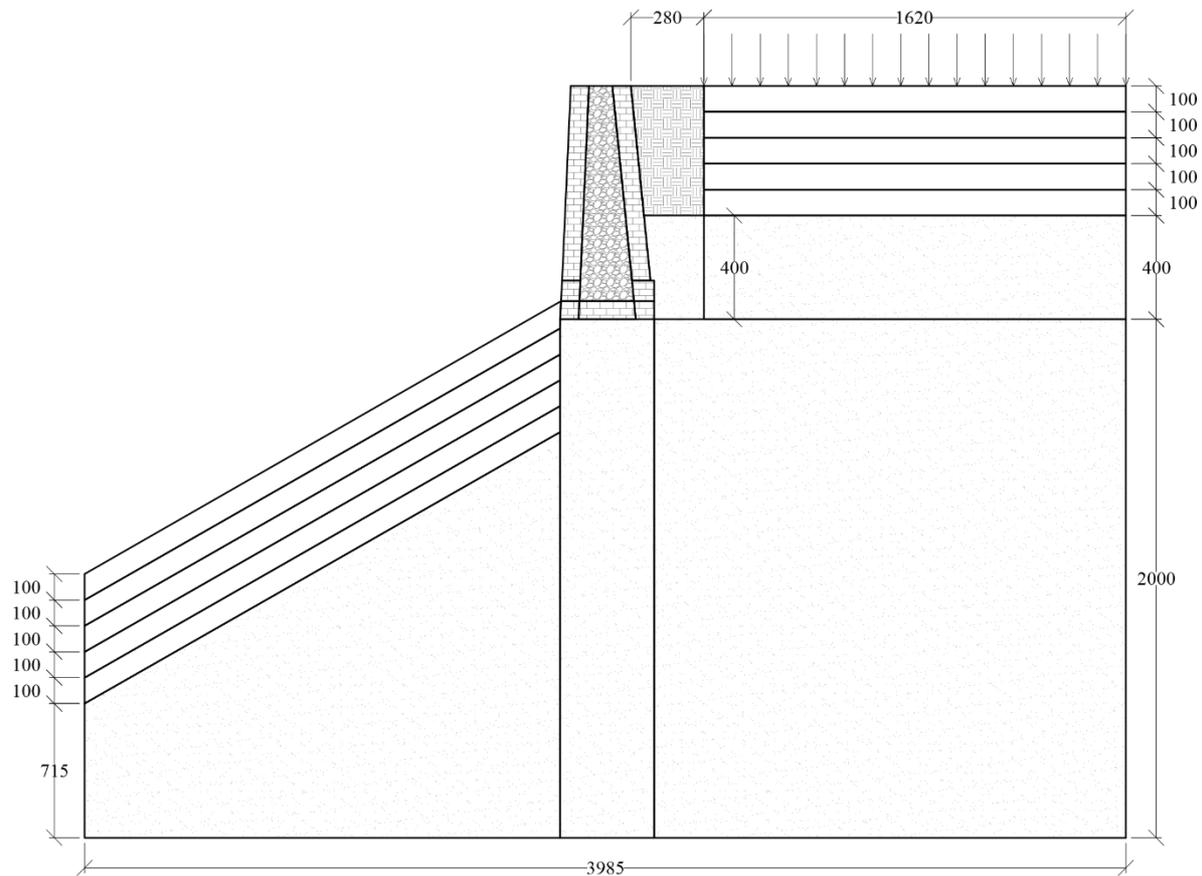
La discretizzazione del terreno a monte ed a valle dell'opera di sostegno in strati orizzontali permette di modellare scenari di pioggia di diversa intensità e durata. A titolo esemplificativo si propone lo schema di Fig. 43 relativo alla sezione 92-93.

Gli strati di terreno modificati sono 5 (minore la durata di pioggia, minore sarà l'imbibizione e lo spessore di terreno interessato da questa, per cui ad esempio per una durata di pioggia di 6 ore sarà interessata una porzione di terreno di spessore 3 metri con 3 strati aventi caratteristiche

## MiChE

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

differenti). Il resto del terreno mantiene le caratteristiche geomeccaniche di partenza. Le caratteristiche migliorano dalla superficie scendendo verso gli strati di terreno più profondi.



*Fig. 43 - Geometria schematica della sezione 92-93 con modello variato per piogge di durata da 0 a 24 ore, quote in cm.*

L'analisi per il rischio frana è stata eseguita con i seguenti strumenti:

- l'analisi limite;
- il metodo agli elementi finiti (FEM).

Per ogni scenario di pioggia è stato valutato il carico di collasso del complesso terreno-opera di sostegno. I risultati sono riportati nel paragrafo di seguito.

## MiChE

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

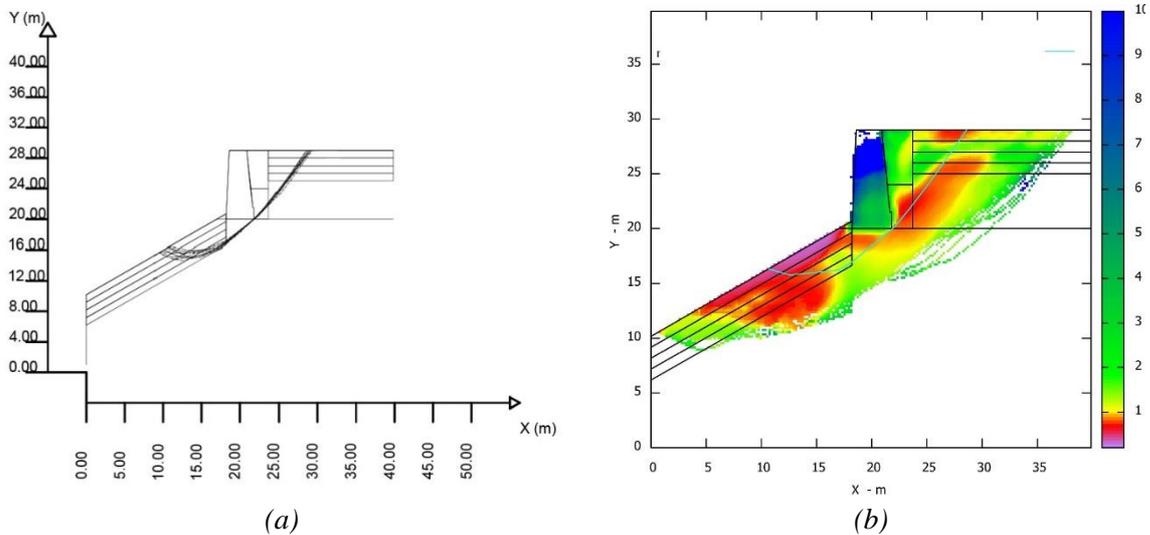


Fig. 44 – (a) Sezione 92-93 con indicazione della superficie di rottura individuata dalle curve che rappresentano i 10 valori minimi del coefficiente di sicurezza, (b) mappa dei valori di  $F_s$  minimo.

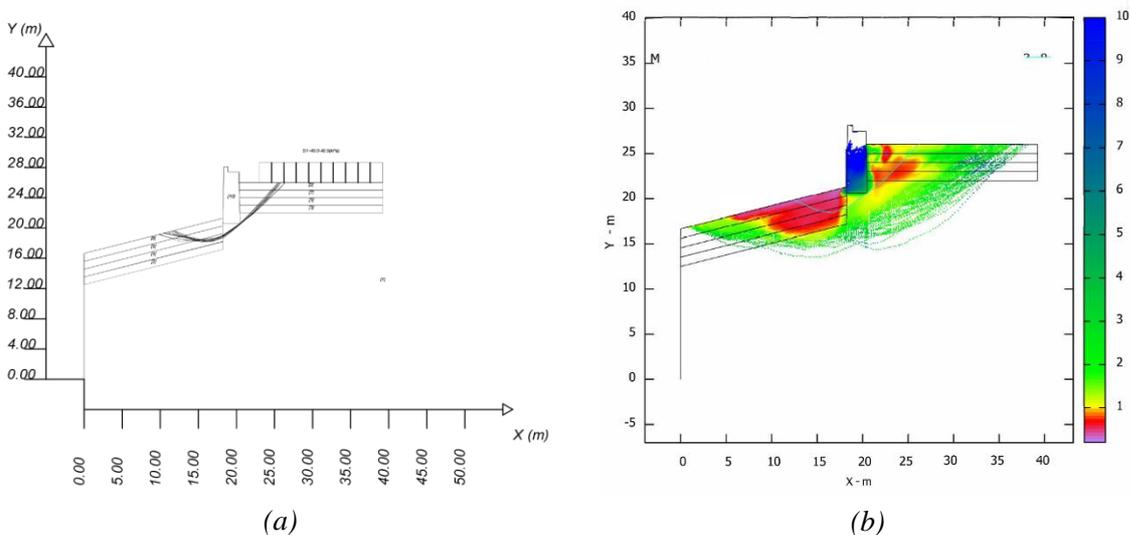


Fig. 45 – (a) Sezione 71-72 con indicazione della superficie di rottura individuata dalle curve che rappresentano i 10 valori minimi del coefficiente di sicurezza, (b) mappa dei valori di  $F_s$  minimo.

## MiChE

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

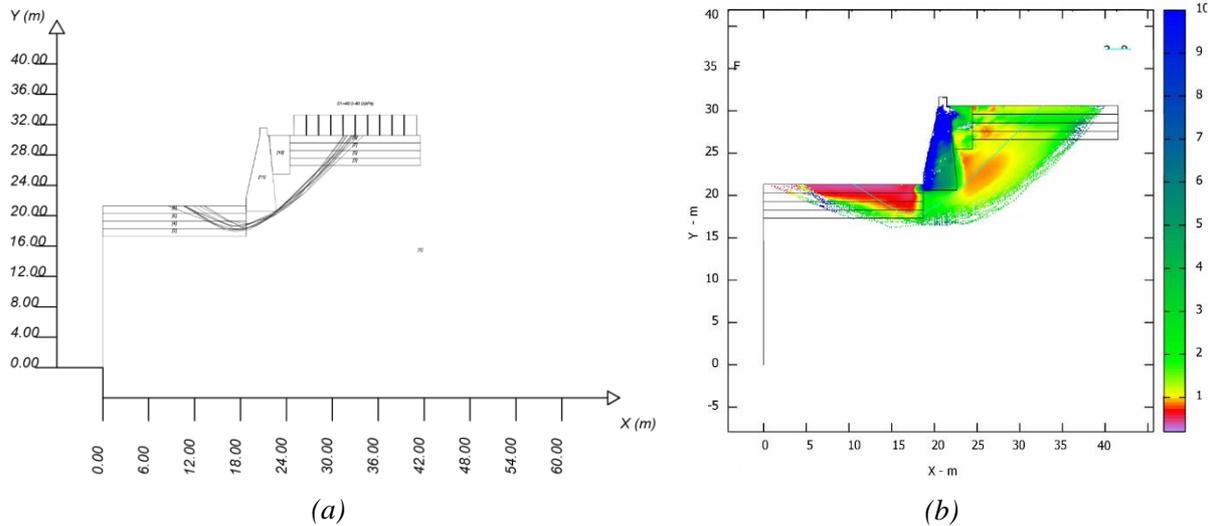


Fig. 46 – (a) Sezione 31-32 con indicazione della superficie di rottura individuata dalle curve che rappresentano i 10 valori minimi del coefficiente di sicurezza, (b) mappa dei valori di  $F_s$  minimo.

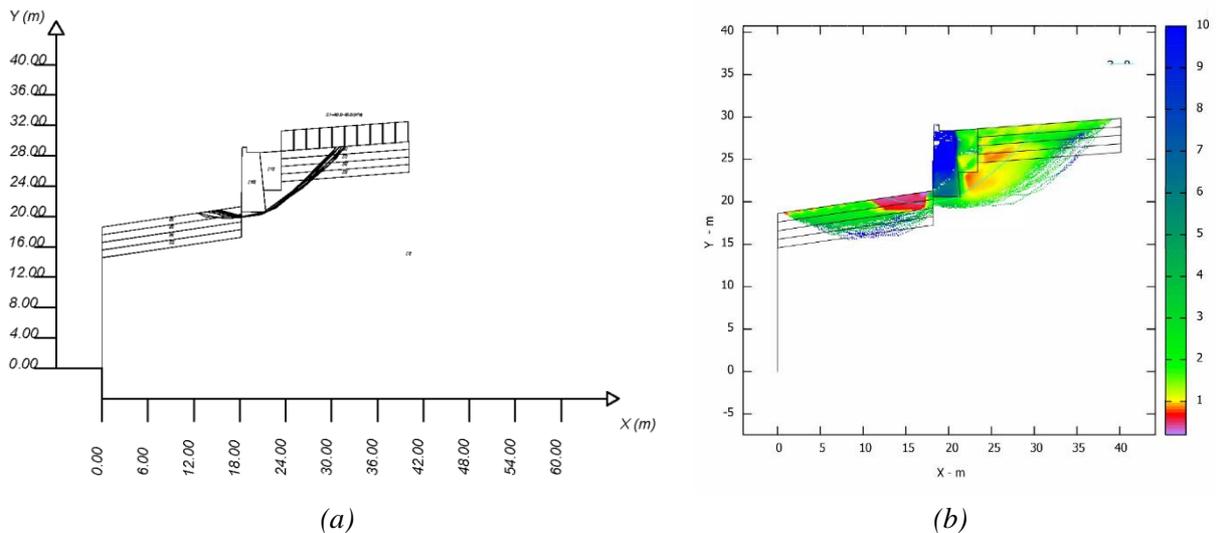


Fig. 47 – (a) Sezione 87 con indicazione della superficie di rottura individuata dalle curve che rappresentano i 10 valori minimi del coefficiente di sicurezza, (b) mappa dei valori di  $F_s$  minimo.

## MiChE

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

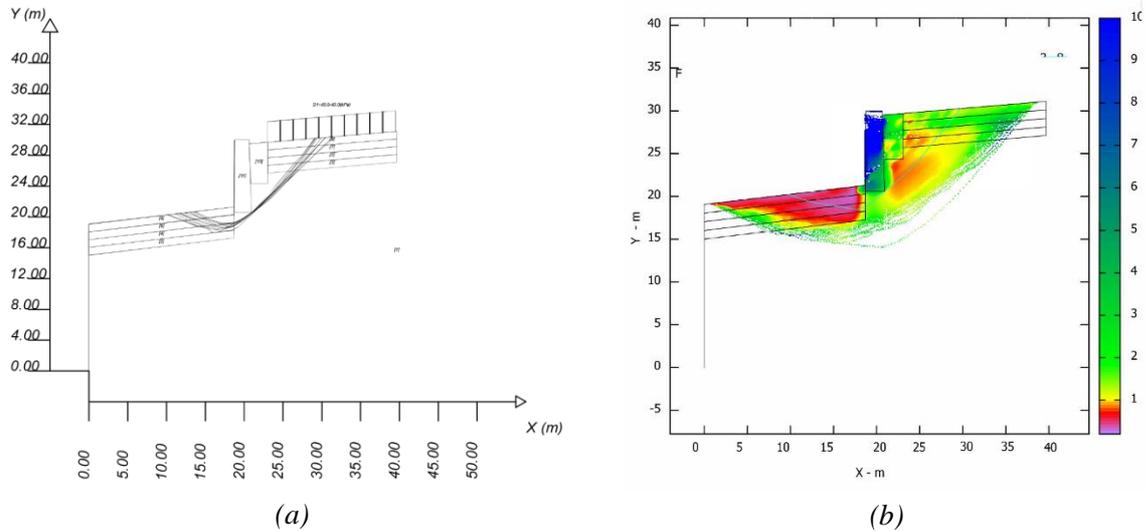


Fig. 48 – (a) Sezione 48-49 con indicazione della superficie di rottura individuata dalle curve che rappresentano i 10 valori minimi del coefficiente di sicurezza, (b) mappa dei valori di  $F_s$  minimo.

## MiChE

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

# 4 Rischio sismico

Nel presente paragrafo è analizzato il rischio sismico delle mura di Volterra [16]–[19]. Sono eseguite valutazioni numeriche considerando sia il terreno asciutto sia il terreno imbibito. Ciò al fine di valutare il rischio combinato (sisma e precipitazione meteorica).

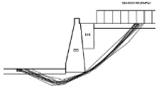
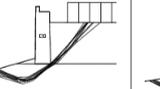
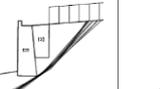
## 4.1 Modelli di capacità

L'analisi vulnerabilità sismica delle mura storiche è eseguita con:

- l'analisi limite;
- il metodo agli elementi finiti (FEM).

Impiegando il secondo strumento sono state eseguite analisi piane con diverso grado di complessità. In particolare, sono analizzate compiutamente sei sezioni rappresentative per condizioni di carico e condizioni al contorno (Tab. 8).

Sezioni analizzate per il rischio sismico

Metodo di calcolo	S. 32-33	S. 48-49	S. 61-62	S. 71-72	S. 87	S. 92-93
<b>Schema con caratteristiche geometriche prevalenti</b>						
<b>Height of the retaining wall [m]</b>	9,3	8,7	6,4	6,1	7,1	9,2
<b>Backfilling rate</b>	1,00	0,94	0,17	0,77	1,00	1,00
<b>Downstream slope</b>	0,00	0,11	0,11	0,25	0,15	0,50

Tab. 8 – Sezioni analizzate

Considerando i rilievi eseguiti sono state assunte le seguenti ipotesi nella modellazione:

- Fondazione superficiale. L'evidenza del collasso del 2014 ha evidenziato la presenza di fondazioni a sacco per lo più di tipo superficiale. In mancanza di indagini puntuali l'ipotesi di fondazione superficiale fornisce dati a favore di sicurezza.
- Analisi in stato piano di deformazione. Il confronto tra le analisi piane e tridimensionali eseguite in [20] ha evidenziato come il problema sia compiutamente analizzabile con un'analisi piana ai fini della valutazione della vulnerabilità. Ciò è vero in particolare per le sezioni caratterizzate da un modesto dislivello altimetrico nel senso dell'ascissa curvilinea.

Le analisi sono state eseguite in due situazioni:

## MiChE

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

- terreno indisturbato;
- terreno parzialmente imbibito, con uno strato di imbibizione di profondità pari ad un metro.

Ciò corrisponde ad una precipitazione di durata un'ora con tempo di ritorno  $T_r=175$  anni.

## 4.2 Analisi di vulnerabilità

### 4.2.1 Analisi limite

Le analisi limite sono state eseguite con il software freeware SSAP2010 [21]. Questo consente di modellare il terreno, con la propria stratigrafia, che la precisa geometria dell'opera di sostegno. Elementi con diverse caratteristiche geometriche e meccaniche sono modellati attraverso l'introduzione di diverse discretizzazioni. È inoltre possibile tenere conto della presenza di abitazioni attraverso il rispettivo sovraccarico  $q$ .

I parametri meccanici dei materiali utilizzati nella modellazione sono i seguenti:

Materiale	$\Phi$ (°)	$c'$ (kPa)	$C_u$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
<b>Muratura</b>	44,00	410,00	0,00	21,00	21,00
<b>Terreno di riempimento</b>	15,00	20,00	0,00	17,00	18,00
<b>Sabbia 30% satura</b>	37,00	0,00	0,00	20,00	22,00
<b>Sabbia 51% satura</b>	37,00	0,00	0,00	20,65	22,00

Tab. 9 - parametri meccanici dei materiali presenti all'interno dei modelli SSAP2010.

Il calcolo del Fattore di Sicurezza FS viene effettuato su una superficie di scivolamento all'interno di un pendio. L'analisi conduce al calcolo dei coefficienti di sicurezza sismici e statici per le sezioni analizzate. La procedura adottata è la seguente:

- Analisi delle possibili superfici di rottura attraverso il metodo di Sarma [21] e determinazione della superficie caratterizzata dal fattore di sicurezza minimo;
- Determinazione del fattore di sicurezza minimo verso i carichi sismici per la superficie di rottura individuata.

Modello di calcolo	Relazione funzionale che esprime $T(x)$
<b>Sarma I</b>	$T(x) = \frac{\lambda}{FS} \{c' H(x) + [(E(x) - Pw(x)) \tan \phi']\}$
<b>Sarma II</b>	$T(x) = \frac{\lambda}{FS} f(x) \{c' H(x) + [(E(x) - Pw(x)) \tan \phi']\}$

Tab. 10 - Relazione funzionale che esprime la forza verticale di interconcorso  $T(x)$  per i modelli Sarma I e Sarma II implementati nel software SSAP2010, dove  $\lambda$  è un fattore di scala.

## MiChE

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

### 4.2.1.1 Analisi in condizioni normali

Si riproducono di seguito (Fig. 49 - Fig. 54) gli screen shot dei risultati per le sezioni analizzate.

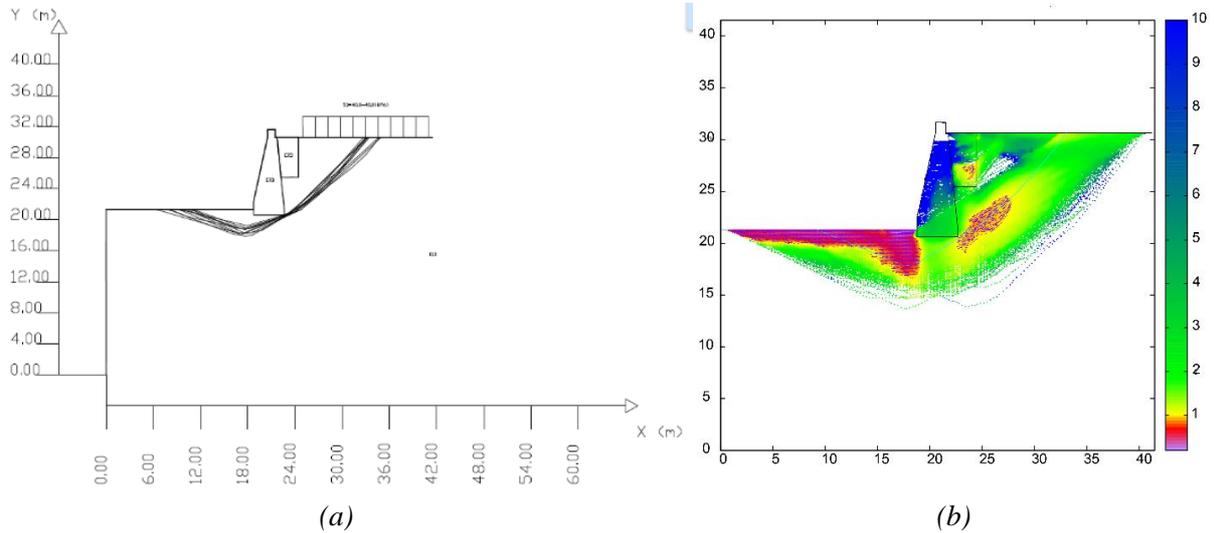


Fig. 49 - (a) Sezione 32-33 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

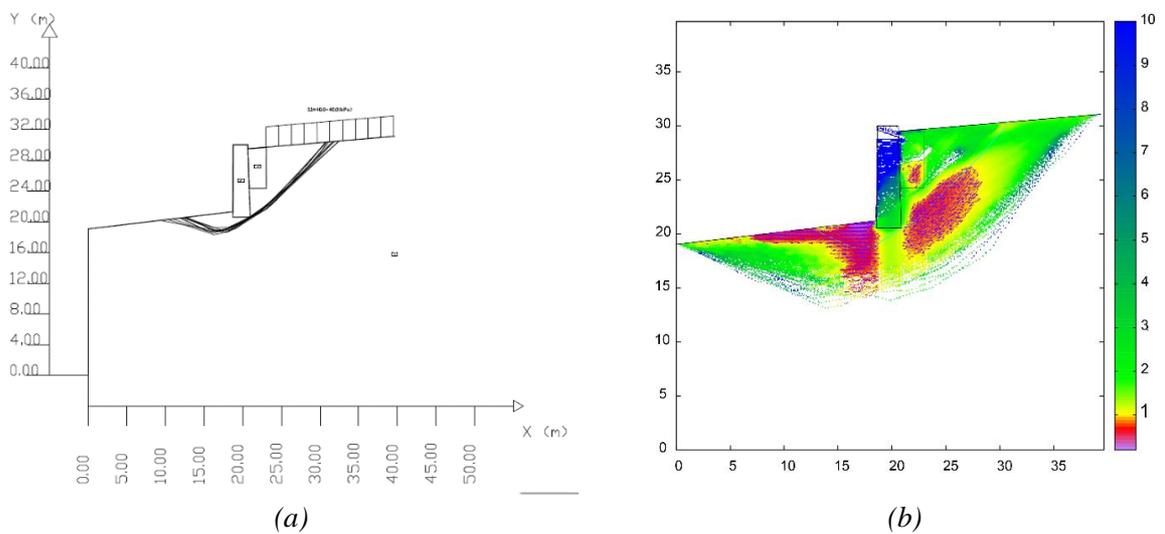


Fig. 50 - (a) Sezione 48-49, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

## MiChE

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

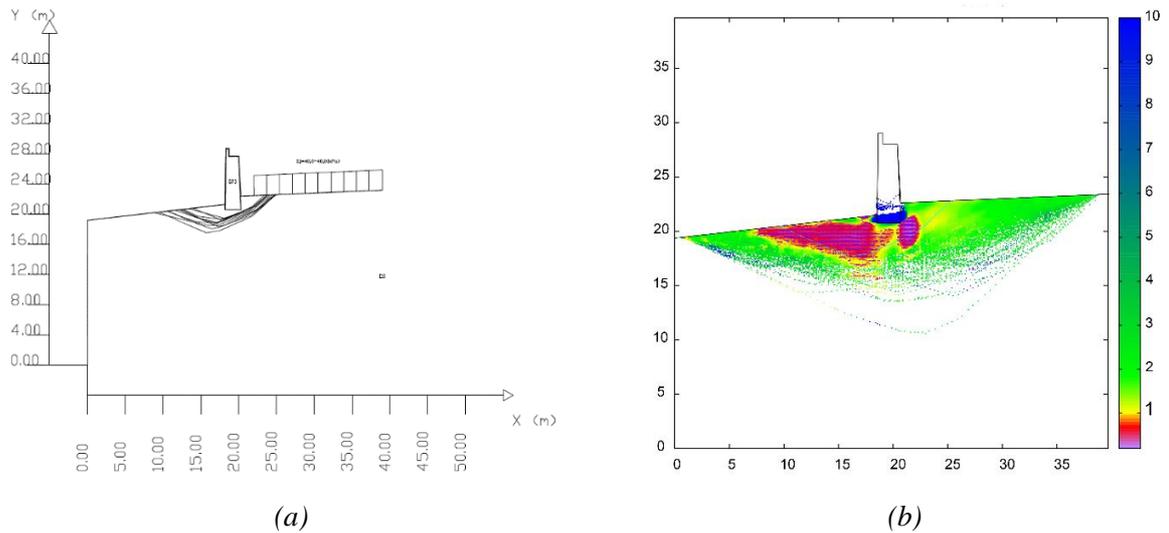


Fig. 51 – (a) Sezione 61-62, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

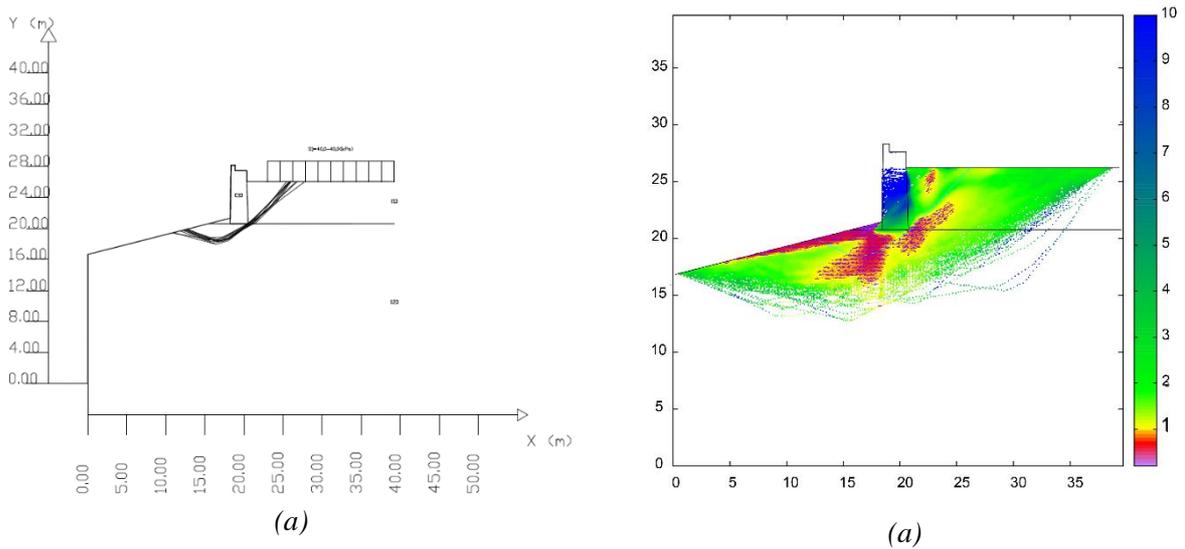


Fig. 52 – (a) Sezione 71-72 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

### MiChE

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

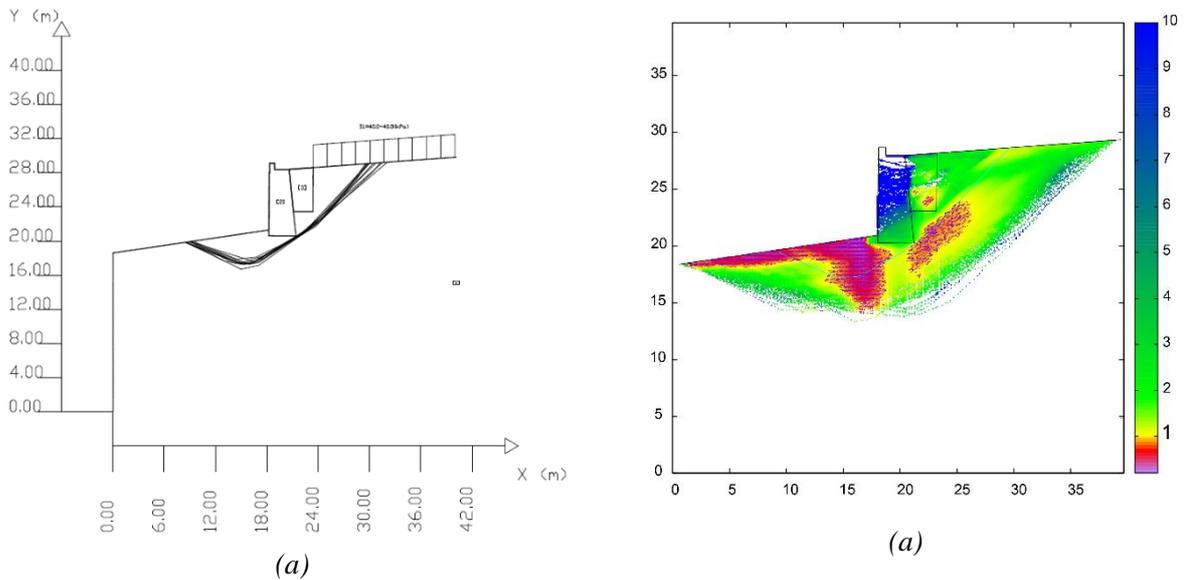


Fig. 53 – (a) Sezione 87 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

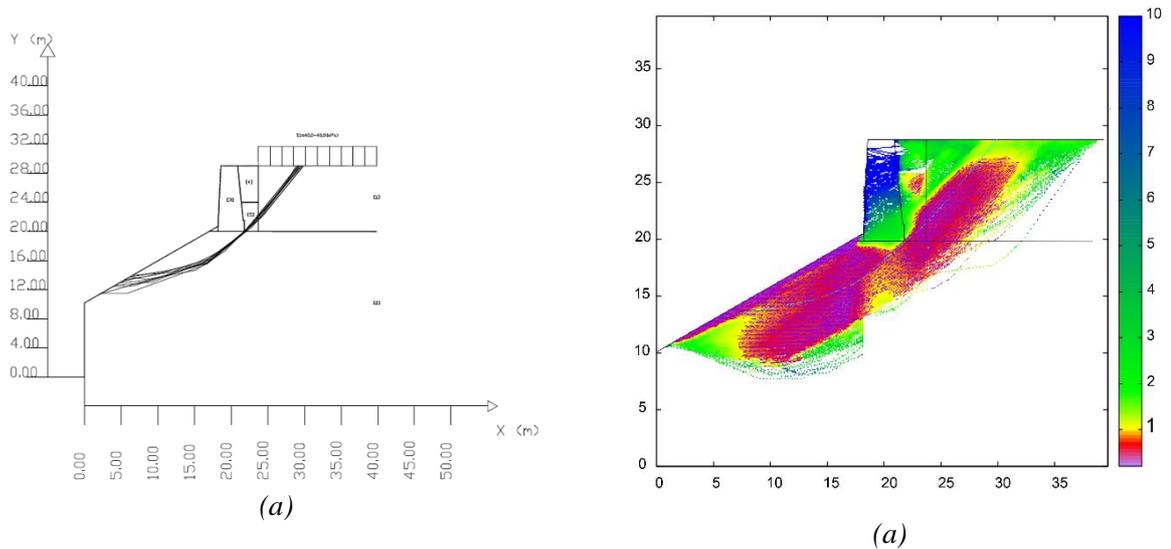


Fig. 54 – (a) Sezione 92-93 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

## MiChE

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

### 4.2.1.2 Analisi con strato di terreno imbibito

Si riproducono di seguito (Fig. 55 - Fig. 60) gli screenshots dei risultati per le sezioni analizzate.

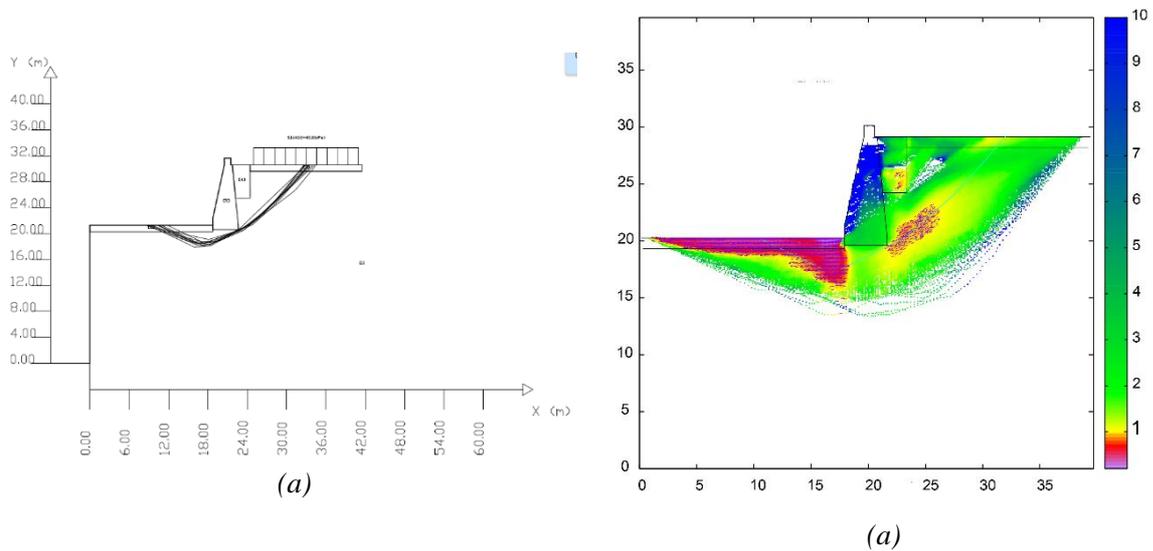


Fig. 55 – (a) Sezione 32-33\_2, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

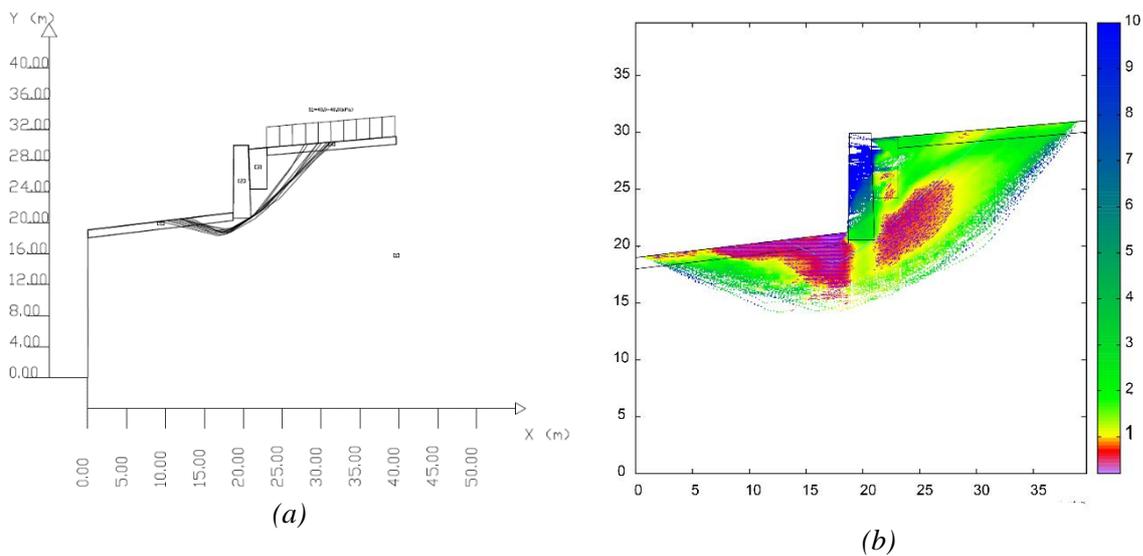


Fig. 56 – (a) Sezione 48-49\_2, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

### MiChE

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

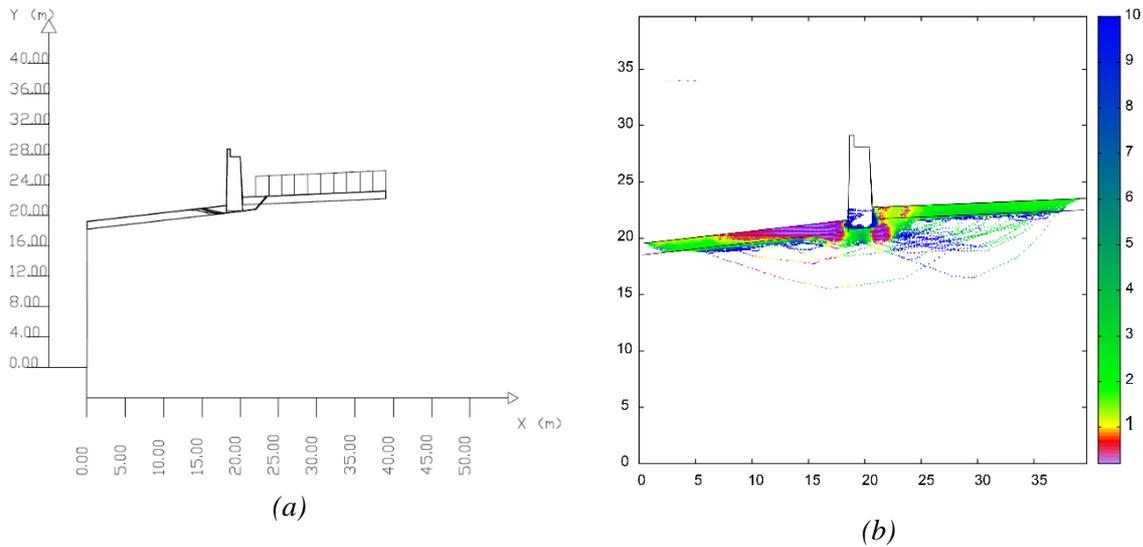


Fig. 57 – (a) Sezione 61-62\_2, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

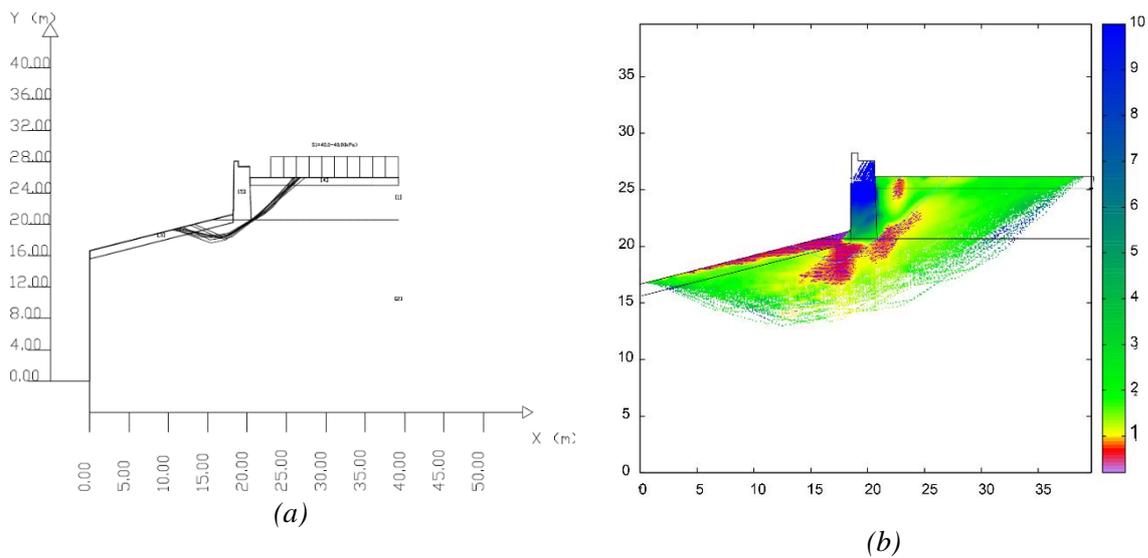


Fig. 58 – (a) Sezione 71-72\_2, con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

## MiChE

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

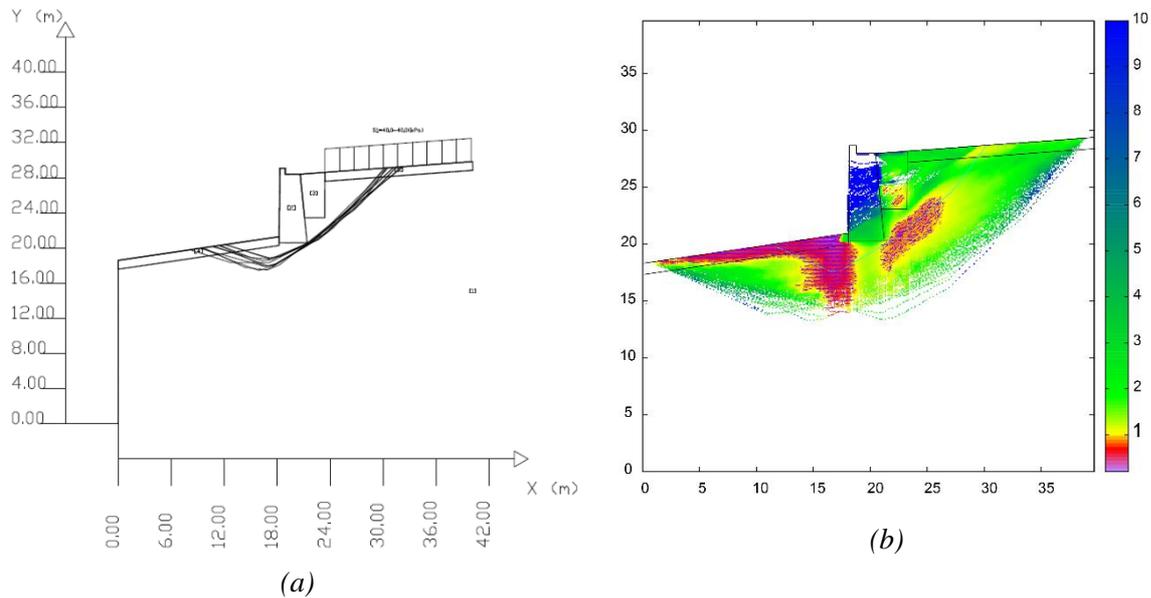


Fig. 59 – (a) Sezione 87\_2 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

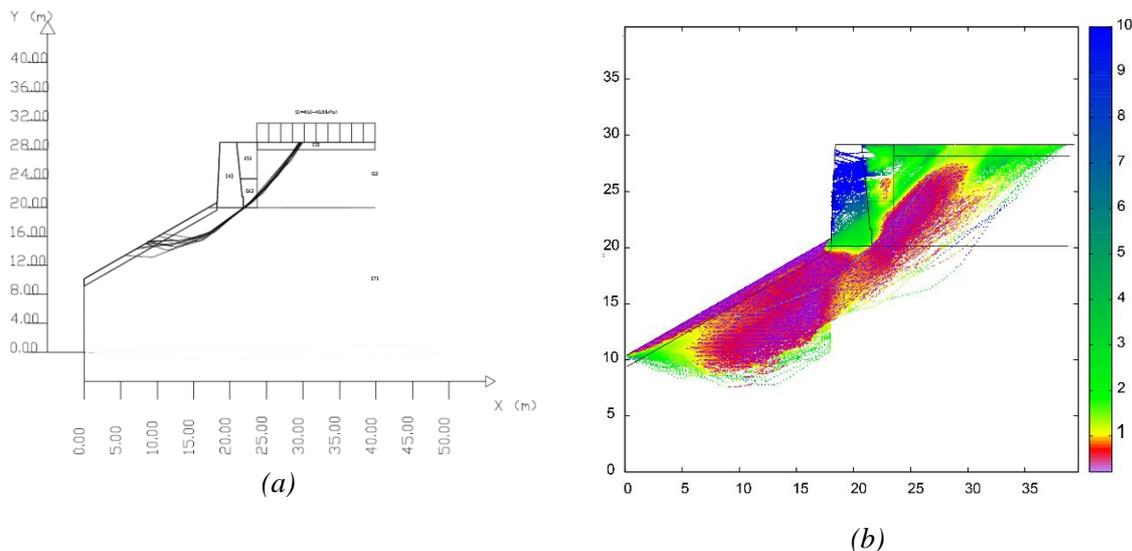


Fig. 60 – (a) Sezione 92-93\_2 con le 10 superfici con FS minori, (b) mappa dei fattori di sicurezza locali FS.

### 4.2.1.3 Calcolo del coefficiente sismico

I metodi Sarma I e Sarma II permettono di calcolare, il valore del coefficiente sismico orizzontale  $k_{crit}$  per i pendii analizzati. Questo tipo di analisi permette di determinare il valore limite di accelerazione orizzontale, a cui corrisponde un fattore di sicurezza pari a 1,0 (ovvero quando si verifica  $k_h = k_{crit}$ ).

## MiChE

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

### Coefficiente sismico critico $k_{crit}$ per le sezioni base

Metodo di calcolo	S. 32-33	S. 48-49	S. 61-62	S. 71-72	S. 87	S. 92-93
<b>Sarma I</b>	0,2200	0,1370	0,177	0,1925	0,185	0,0162
<b>Sarma II</b>	0,1900	0,1160	0,171	0,1588	0,175	0,0158

Tab. 11 - Valore del coefficiente sismico critico  $k_{crit}$ , per le sezioni base, avendo considerato le 10 sezioni che compongono la fascia critica.

### Coefficiente sismico critico $k_{crit}$ per le sezioni con imbibizione

Metodo di calcolo	S. 32-33_2	S. 48-49_2	S. 61-62_2	S. 71-72_2	S. 87_2	S. 92-93_2
<b>Sarma I</b>	0,2120	0,1100	0,1850	0,2250	0,1830	0,0163
<b>Sarma II</b>	0,1740	0,0625	0,0850	0,1370	0,1660	0,0150

Tab. 12 - Valore del coefficiente sismico critico  $k_{crit}$ , per le sezioni parametriche, avendo considerato le 10 sezioni che compongono la fascia critica.

## 4.2.2 Analisi FEM

Sono state condotte analisi statiche non lineari su modelli piani delle sezioni indicate in Tab. 8. I modelli geometrici sono stati estrapolati coinvolgendo una porzione significativa di terreno. Si è infatti considerato in pianta una estensione di terreno pari a circa 4 H, mentre in elevato una dimensione pari a 2 H.

Anche qui sono considerate due tipologie di modelli, modelli normali e modelli con imbibizione. Nei secondi modelli uno strato di terreno di profondità pari a ad 1 metro è stata modellata con caratteristiche meccaniche inferiori. Questo corrisponde all'effetto di una pioggia di durata un'ora con tempo di ritorno 175 anni.

Le analisi non lineari sono state condotte tramite il software agli elementi finiti Straus7 R.2.4: i modelli delle sezioni sono stati realizzati tramite gli elementi bidimensionali denominati *Plate*. La geometria delle varie sezioni è stata esportata in Straus7 e la mesh che caratterizza i modelli è stata generata con il comando Automeshing, adoperando una mesh di dimensioni massime pari a 0,75 metri per il terreno e una mesh di 0,40 metri per la muratura (avendo imposto in corrispondenza dei vertici dell'opera di sostegno un vincolo per la dimensione minima della mesh).

I plates adottati per la mesh sono di tipo *Quad-8*, caratterizzati da 8 nodi (4 alle estremità degli elementi e altrettanti in corrispondenza delle mezzerie dei lati). Si è cercato di ridurre il numero

## MiChE

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

di elementi triangolari. In Fig. 62 è riportato il modello della sezione 92-93. I differenti colori rappresentano le *Property Plate* applicate; le frecce a monte dell'opera di sostegno schematizzano il sovraccarico dovuto agli edifici mentre le linee rosse all'interno di ciascun plate rappresentano le *Soil In Situ Stress* applicate al terreno. Il modello riportato è il modello base della sezione crollata. Nell'analisi delle sezioni con imbibizione il primo strato di terreno presenta la stessa mesh ma sono assegnate caratteristiche meccaniche differenti, come riportato in precedenza.

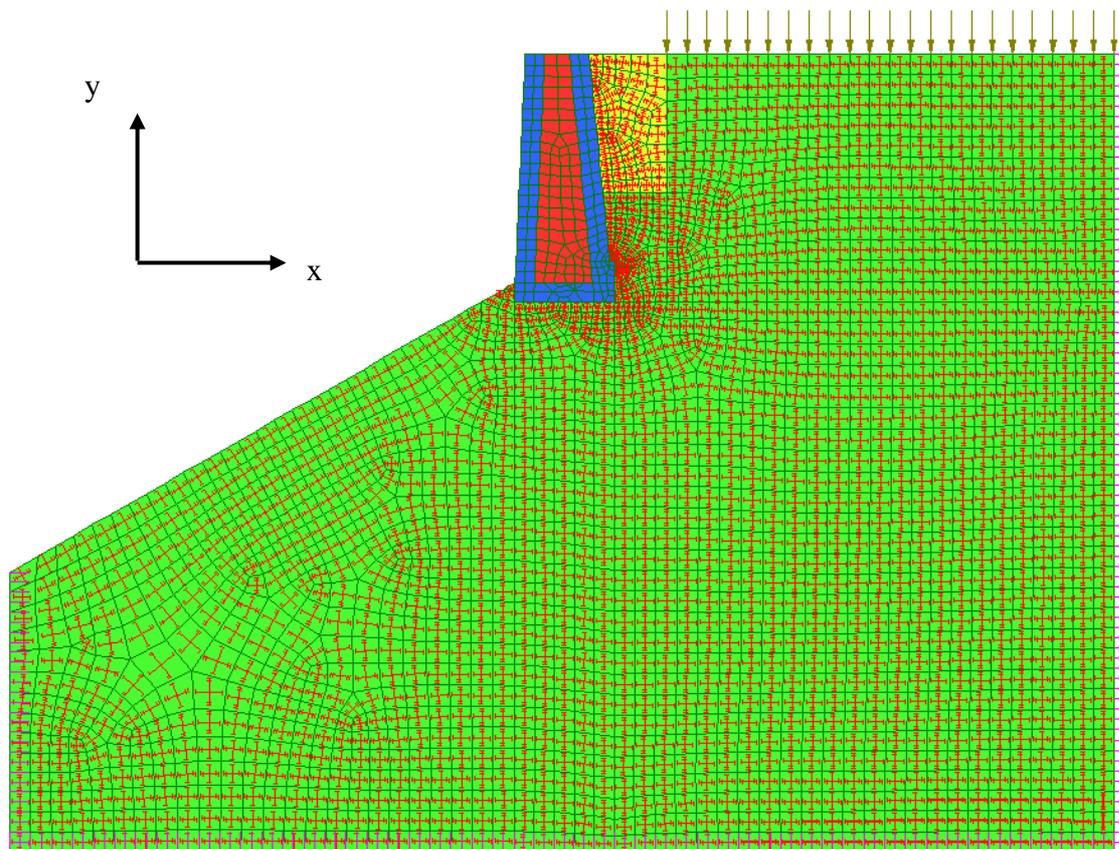


Fig. 61 - Modello della sezione crollata 92-93\_1 generato su Straus7. Come si nota in figura la mesh risulta più fitta in corrispondenza dell'opera di sostegno.

I modelli sono così vincolati:

- lateralmente, impedendo gli spostamenti orizzontali lungo x,
- alla base dei pendii impedendo le traslazioni lungo x e lungo y

tali sono i vincoli stati imposti su Straus7.

## MiChE

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

Le caratteristiche meccaniche dei materiali sono state assegnate agli elementi per mezzo delle schede *Property Plate*: i parametri meccanici adottati sono descritti nella Tab. 13.

E' stato previsto un comportamento elasto-plastico, secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

Materiali	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$\Phi$ (°)	c (kPa)
<b>Muratura</b>	2100	1200000	44,00	410,00
<b>Muratura di riempimento</b>	1900	1200000	44,00	410,00
<b>Sabbia</b>	2000	23076	37,00	10,40
<b>Sabbia superficiale (M. Parametrici)</b>	2065	23076	27,50	3,00
<b>Terreno parzialmente imbibito</b>	1700	16240	15,00	20,00

Tab. 13 – Materiali considerati elasto-plastici secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

Nello specifico la muratura è stata modellata come elemento isotropo (*isotropic*), mentre il terreno è stato modellato come elemento *Soil*: questa opzione è stata implementata nelle versioni recenti di Straus7 R.2.4, è risultata necessaria per poter modellare in maniera più realistica il comportamento del terreno. Tramite il comando *Auto-Assign Soil in Situ Stress* sono state applicate le condizioni iniziali del terreno: queste sono risultate fondamentali per poter svolgere un'analisi di tipo non lineare, tenendo così conto dello stato tensionale iniziale del terreno che fornisce la condizione di equilibrio a carichi nulli.

I carichi verticali sono stati applicati ai modelli per mezzo dei *Load Cases*:

- Gravità pari a 9,81 m/s<sup>2</sup>;
- Sovraccarico dovuto alla presenza degli edifici pari a 40 kPa: questo è stato applicato come pressione a monte delle opere di sostegno, tramite il comando *Edge Pressure*;

Per quanto riguarda invece l'azioni sismica questa è modellato come una accelerazione incrementale. Le accelerazioni orizzontali e verticali sono state impostate come *Load Cases*, i valori implementati nei vari modelli sono stati ricavati per mezzo di analisi *Natural Frequency*. Per estrapolare i valori delle accelerazioni da imprimere come *carico sismico* per ogni modello di base si è proceduto come segue:

- Tramite l'analisi *Natural Frequency* sono state valutate le frequenze a cui è associata la massa partecipante maggiore in direzione x (orizzontale) e in direzione y (verticale);
- Con tali valori delle frequenze sono stati ricavati i rispettivi valori dei periodi;

## MiChE

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

- Tramite i valori dei periodi, attraverso gli spettri di risposta elastici delle componenti orizzontali e verticali, sono state estrapolate le pseudo-accelerazioni;
- Sono state quindi ricavate le accelerazioni orizzontali e verticali da imprimere ai vari modelli come prodotto fra le pseudo-accelerazioni e la gravità.

Seguendo questa procedura sono state quindi valutate le accelerazioni considerando i modi di vibrare della struttura e gli spettri di risposta elastici allo SLV. Ciò ha consentito una più accurata applicazione dei carichi statici piuttosto che andare a imporre come carichi le accelerazioni di picco al suolo. I risultati ottenuti, in termini di accelerazioni sismiche orizzontali e verticali, sono riportati nella tabella seguente per le varie sezioni analizzate.

Sezioni	$f_x$ (Hz)	$f_y$ (Hz)	$T_x$ (s)	$T_y$ (s)	$S_{ex}/g$	$S_{ey}/g$	$a_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_y$ (m/s <sup>2</sup> )
<b>32-33</b>	1,467	1,023	0,682	0,977	0,278	0,018	2,72	0,17
<b>48-49</b>	1,18	1,035	0,659	0,966	0,287	0,018	2,82	0,18
<b>50</b>	1,547	1,447	0,647	0,691	0,293	0,025	2,87	0,25
<b>61-62</b>	1,532	1,313	0,653	0,762	0,290	0,023	2,84	0,22
<b>71-72</b>	1,519	1,185	0,658	0,844	0,288	0,021	2,82	0,20
<b>87</b>	1,497	1,068	0,668	0,936	0,283	0,019	2,78	0,18
<b>92-93</b>	1,408	1,074	0,710	0,931	0,373	0,026	3,66	0,26

Tab. 14 - Valori delle accelerazioni orizzontali e verticali ottenuti. Sono riportate anche le frequenze associate ai modi di vibrare traslazioni lungo  $x$  e lungo  $y$ , i periodi ricavati e le pseudo-accelerazioni ottenute considerando gli spettri di risposta ricavati in precedenza.

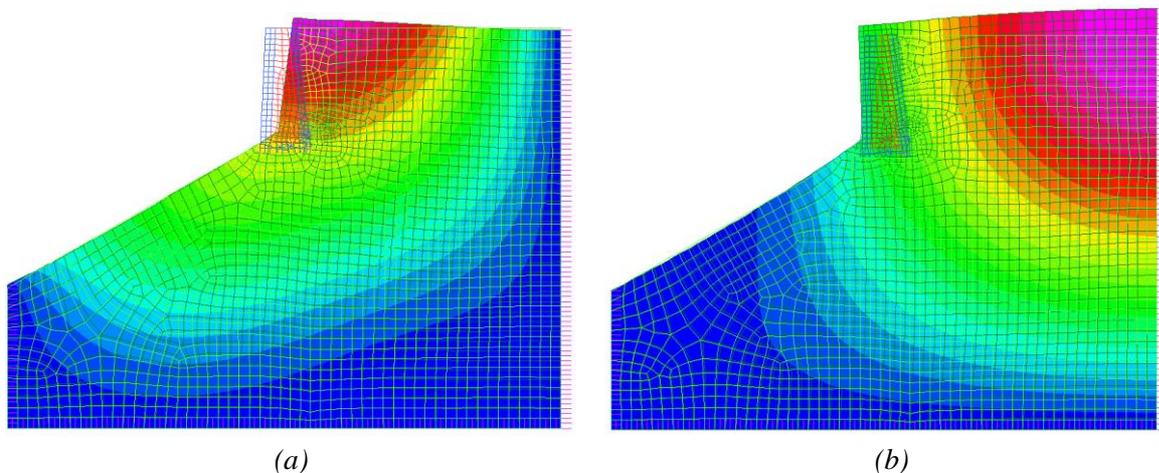


Fig. 62 - Modi di vibrare della sezione 92-93, (a) secondo modo di vibrare a cui corrisponde una traslazionale lungo  $x$  con massa partecipante pari al 40,93 %; (b) primo modo di vibrare a cui corrisponde una traslazione lungo  $y$  con massa partecipante del 54,44%.

## MiChE

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

Riassumendo i carichi di input per poter svolgere questo tipo di analisi sono quattro:

- Load Case 1: gravità;
- *Load Case 2: Edge Pressure* che simula il carico verticale degli edifici a monte delle opere di sostegno;
- *Load Case 3*: valore assoluto dell'accelerazione orizzontale (lungo x);
- *Load Case 4*: valore assoluto dell'accelerazione verticale (lungo y).

E' stata dunque condotta un'analisi statica non lineare con incrementi di carico verticali e orizzontali. Sono stati prima incrementati i carichi verticali, quindi la gravità e il peso degli edifici, con incrementi di carico da 0 a 1. Sono state quindi incrementate le accelerazioni sismiche con lo stesso criterio.

Con questo tipo di analisi è stato possibile valutare lo stato tensionale e deformativo del complesso opera di sostegno/terreno. Per quanto riguarda le accelerazioni sismiche sono state previste quattro combinazioni di carico, simulando in questo modo la direzionalità con cui possono avvenire il moto ondulatorio e il moto sussultorio. Prendendo come riferimento il sistema degli assi di Straus7, con l'asse orizzontale x positivo verso destra e l'asse verticale y positivo verso l'alto Fig. 62. Le quattro combinazioni sono:

- Combinazione 1:  $a_x (+) -a_y (+)$ ;
- Combinazione 2:  $a_x (+) -a_y (-)$ ;
- Combinazione 3:  $a_x (-) -a_y (+)$ ;
- Combinazione 4:  $a_x (-) -a_y (-)$ .

Quindi per ogni sezione sono state condotte 4 analisi statiche non lineari, mantenendo costante la direzione dei carichi verticali, che sono carichi appunto fissi e variando le direzioni di applicazione delle accelerazioni sismiche, secondo le combinazioni definite sopra.

### 4.2.3 Verifiche delle sezioni individuate

Per ogni sezione sono individuati due punti di controllo e tre sezioni di verifica - Fig. 63. I punti di controllo sono posti uno in testa all'opera di sostegno (a) ed uno alla base. Le sezioni di verifica sono:

- 1: nella mezzeria del muro di sostegno;
- 2: alla base del muro di sostegno, lato muratura;
- 3: alla base del muro di sostegno, lato calcestruzzo.

## MiChE

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

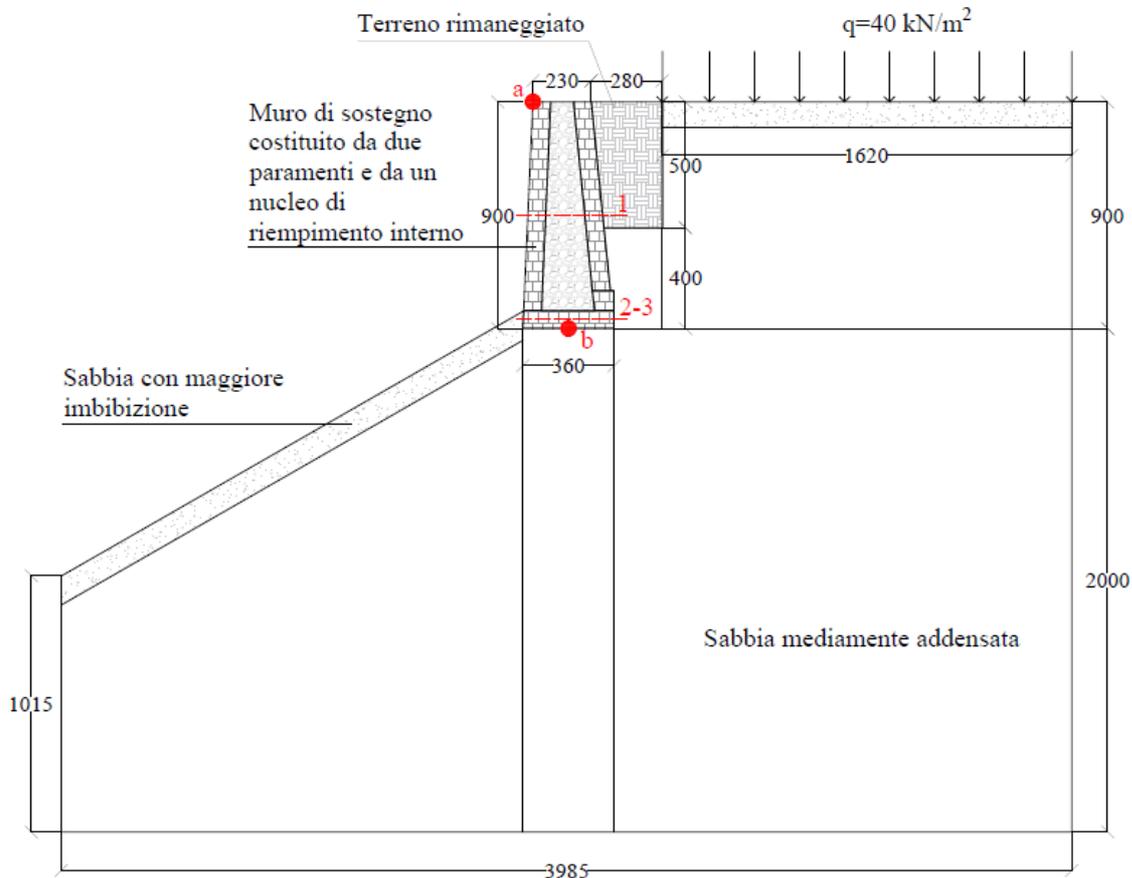


Fig. 63 - Modello geometrico della sezione 92-93\_2 con in evidenza le sezioni di verifica (quote in centimetri).

In Fig. 63 in rosso sono evidenziate le sezioni oggetto di verifica, in particolare la sezione 1 rappresenta la mezzeria dell'opera di sostegno, mentre la 2 e la 3 rappresentano rispettivamente le sezioni di verifica nel baricentro geometrico della base del muro e la corrispondente sezione di verifica lato terreno. I punti di controllo "a" e "b" sono stati scelto per le verifiche in termini di spostamento.

Le verifiche eseguite sulle varie sezioni sono:

- resistenza della muratura in corrispondenza delle sezioni "1" e "2"
- capacità portante del terreno in corrispondenza della sezione "3"
- stabilità dell'opera di sostegno in corrispondenza della sezione "2"
- spostamento del punto di controllo "a".

## MiChE

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

Per quanto riguarda le verifiche di resistenza delle sezioni murarie, alla base e in mezzera dell'opera di sostegno, sono state eseguite in termini di pressoflessione, taglio-scorrimento e taglio-trazione.

### 4.2.4 Determinazione dei punti di performance

Le verifiche sezionali sono eseguite in corrispondenza del punto di performance: questo rappresenta l'intersezione fra la curva bilaterale equivalente e lo spettro di risposta nel piano ADSR. Per poter riportare la domanda nel piano accelerazione-spostamento (ADSR) è stato utilizzato il Metodo N2 [22], [23].

È stato quindi realizzato il modello strutturale non lineare del sistema a n-GDL, che definisce l'azione sismica tramite gli spettri di risposta elastici in accelerazione e spostamento. Per poter ricavare lo spettro di spostamento è stata utilizzata la seguente formulazione:

$$S_{De}(T) = S_e \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (10)$$

Gli spettri di risposta sono differenti per la sezione crollata S.92-93 e le altre, in quanto la sezione oggetto di crollo presenta un'inclinazione del terreno a valle maggiore di 30°: di seguito sono quindi riportati i grafici relativi.

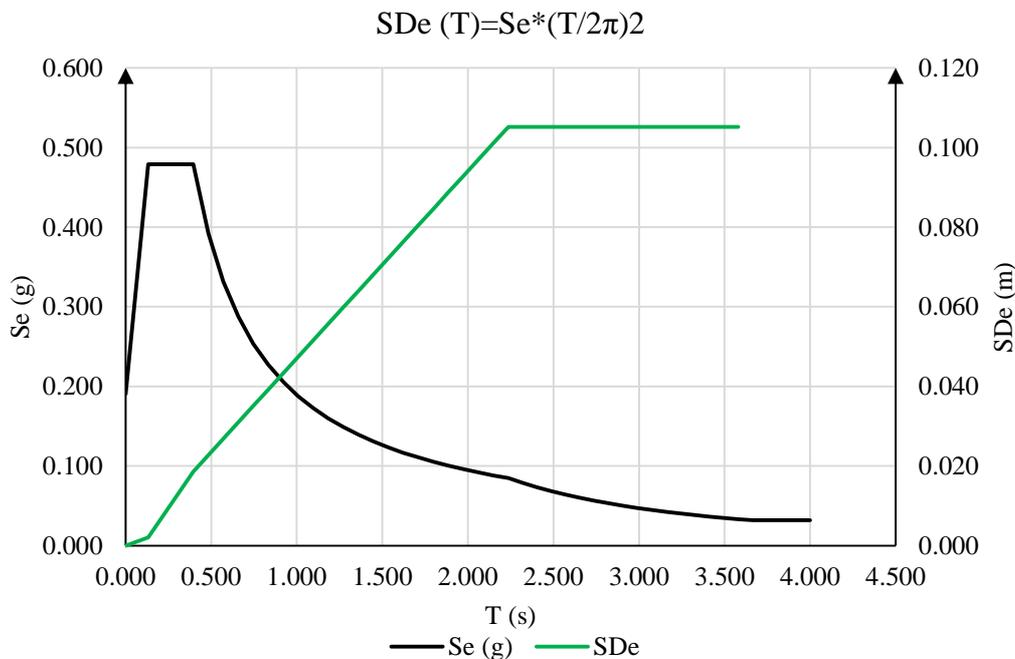


Fig. 64 - Spettro di risposta in termini di accelerazione e spostamento in riferimento alla maggior parte delle sezioni, ad eccezione della sezione 92-93.

## MiChE

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

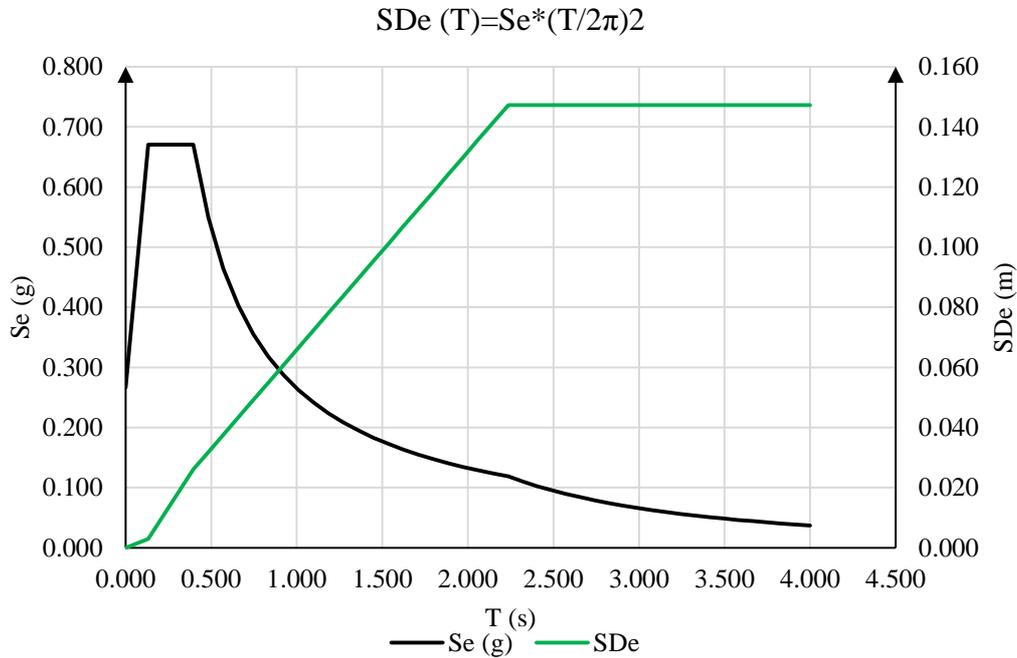


Fig. 65 - Spettro di risposta in termini di accelerazione e spostamento in riferimento alla sezione crollata.

E' stata valutata la domanda sismica per il sistema a 1-GDL nel piano ADSR: questa procedura prevede la conversione dello spettro di risposta elastico, determinando le ascisse in funzione dei valori delle ordinate. In questo modo i periodi non compaiono esplicitamente, ma sono rappresentati dalle rette radiali uscenti dall'origine degli assi.

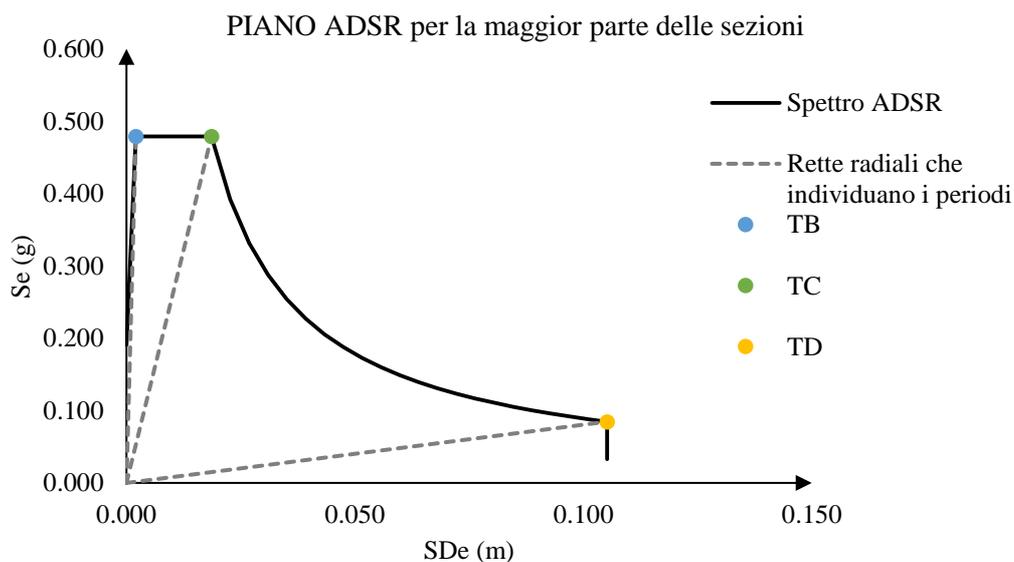


Fig. 66 - Domanda sismica nel piano ADSR in riferimento alla maggior parte delle sezioni, ad eccezione della sezione crollata.

## MiChE

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

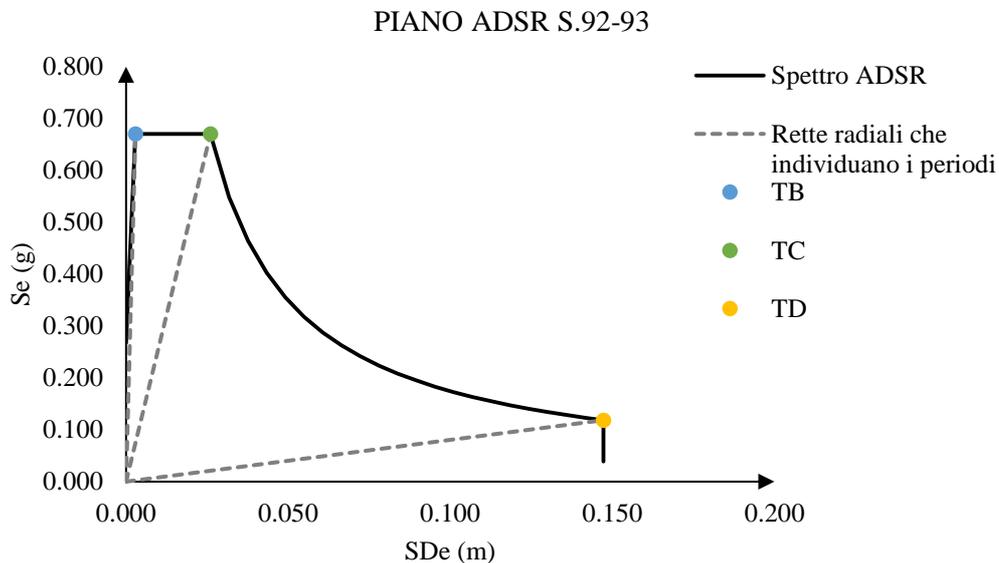


Fig. 67 - Domanda sismica nel piano ADSR in riferimento alla sezione crollata.

Individuate le domande sismiche nel piano accelerazione-spostamento sono state ricavate le bilaterali equivalenti, a partire dalle curve di capacità riportate nei paragrafi precedenti. Questa conversione è stata così eseguita:

- il tratto elastico è stato determinato imponendo il passaggio corrispondente a  $0,60F_u$ ;
- il tratto plastico orizzontale è stato individuato dal valore corrispondente alla forza ultima raggiunta, pari a  $F_u$ .
- sono state riportate le bilatere equivalenti nel piano ADSR.

È stato possibile individuare i punti di performance relativi a ciascuna sezione analizzata facendo riferimento all'accelerazione corrispondente ai punti di performance. Per le sezioni analizzate sono riportati i rapporti di verifica e i grafici in cui sono individuati i punti di performance nel paragrafo 5.

Il punto di performance, individuato convenzionalmente per le sezioni piane su 4 analisi non lineari (corrispondenti a 4 possibili combinazioni di azioni), forniscono il valore di capacità dell'opera di sostegno.

Le verifiche di resistenza, di equilibrio e di capacità portante evidenziano come in alcune sezioni, subentrino alcuni meccanismi di resistenza prima del raggiungimento del punto di performance.

## MiChE

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

# 5 Risultati

Si forniscono in questo paragrafo i risultati delle analisi di vulnerabilità delle sezioni indagate in funzione delle rispettive *Intensity Measure*. In particolare, sono considerati qui i risultati dall'analisi FEM.

## 5.1 Risultati rischio sismico e rischio frana.

Si riportano i risultati delle indagini sezionali in funzione della rispettiva IM:

- $h$ ;
- $PGA$ ;

E dei rispettivi tempi di ritorno  $T_r$ . Da questi sono calcolati i corrispondenti indici di rischio.

## 5.2 Tempo di Ritorno corrispondente agli Stati Limite considerati

Per ogni sezione è stata valutata la sequenza in cui avvengono i vari stati limite fino al collasso. Tramite i risultati dei modelli FEM su Straus7 è stato possibile risalire alle sollecitazioni per ogni incremento di carico sismico, a cui corrisponde un determinato tempo di ritorno critico, e determinare l'azione con cui avvengono i vari meccanismi presi a riferimento. I tempi di ritorno critici sono stati valutati tramite la seguente espressione, ricavata dall'appendice A delle NTC2018 [24]:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \left[ \log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Dove:

$p$  è il valore del parametro di interesse, assunto pari all'accelerazione corrispondente a ciascuna rottura a cui corrispondono determinati parametri spettrali ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ );

$T_R$  è il tempo di ritorno critico associato al parametro  $p$ ;

$T_{R1}$  e  $T_{R2}$  sono i periodi di ritorno prossimi a  $T_R$ , assunti in questo caso pari rispettivamente al tempo di ritorno allo SLD (75 anni) e allo SLV (712 anni);

$p_1$  e  $p_2$  sono i parametri corrispondenti a  $T_{R1}$  e  $T_{R2}$ , assunti pari alle accelerazioni di picco al suolo degli spettri delle componenti orizzontali, pari rispettivamente a 0,085(g) e 0,191 (g) per la maggior parte delle sezioni e pari a 0,119(g) e 0,267(g) per la sezione 92-93.

## MiChE

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

### 5.2.1 Rischio sismico

Sezioni	Stato Limite	TR [anni]	IM - PGA
<b>32-33</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>611</b>	0.181
	SLV	<b>1396</b>	0.243
	SLC	<b>2023</b>	0.278
<b>48-49</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>280</b>	0.137
	SLV	<b>280</b>	0.137
	SLC	<b>1530</b>	0.252
<b>50</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>864</b>	0.205
	SLV	<b>1738</b>	0.263
	SLC	<b>2210</b>	0.287
<b>61-62</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>1017</b>	0.217
	SLV	<b>1602</b>	0.256
	SLC	<b>2147</b>	0.284
<b>71-72</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>536</b>	0.172
	SLV	<b>1924</b>	0.273
	SLC	<b>2105</b>	0.282
<b>87</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>434</b>	0.160
	SLV	<b>1396</b>	0.243
	SLC	<b>2023</b>	0.278
<b>92-93</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>79</b>	0.087
	SLV	<b>118</b>	0.100
	SLC	<b>262</b>	0.133

Tab. 15 – Tempi di ritorno ( $Tr$ ) ed Intensity Measure ( $IM$ ) Relative al rischio sismico.

## MiChE

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

### 5.2.2 Rischio frana

Sezioni	Stato Limite	TR ( $d_p = 12$ ore) [anni]	IM - h [m]
<b>32-33</b>	SLI	<b>10</b>	0.085
	SLD	<b>466</b>	0.196
	SLV	<b>658</b>	0.212
	SLC	<b>740</b>	0.217
<b>48-49</b>	SLI	<b>10</b>	0.085
	SLD	<b>76</b>	0.159
	SLV	<b>404</b>	0.19
	SLC	<b>430</b>	0.193
<b>71-72</b>	SLI	<b>10</b>	0.085
	SLD	<b>401</b>	0.19
	SLV	<b>593</b>	0.207
	SLC	<b>658</b>	0.212
<b>87</b>	SLI	<b>10</b>	0.085
	SLD	<b>570</b>	0.205
	SLV	<b>890</b>	0.226
	SLC	<b>2500</b>	0.2773

Tab. 16 - Tempi di ritorno (Tr) ed Intensity Measure (IM) Relative al rischio frana.

## MiChE

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

### 5.2.3 Rischio combinato (sisma + frana)

Sezioni	Stato Limite	TR [anni]	IM - PGA
<b>32-33</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>611</b>	0.181
	SLV	<b>1629</b>	0.257
	SLC	<b>2023</b>	0.278
<b>48-49</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>119</b>	0.100
	SLV	<b>598</b>	0.179
	SLC	<b>667</b>	0.187
<b>50</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>598</b>	0.195
	SLV	<b>667</b>	0.243
	SLC	<b>2020</b>	0.278
<b>61-62</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>597</b>	0.179
	SLV	<b>1962</b>	0.275
	SLC	<b>2275</b>	0.290
<b>71-72</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>370</b>	0.151
	SLV	<b>1193</b>	0.230
	SLC	<b>2232</b>	0.288
<b>87</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>376</b>	0.152
	SLV	<b>1750</b>	0.264
	SLC	<b>2126</b>	0.283
<b>92-93</b>	SLI	<b>10</b>	0.041
	SLD	<b>20</b>	0.053
	SLV	<b>97</b>	0.093
	SLC	<b>196</b>	0.120

Tab. 17 - Tempi di ritorno (Tr) ed Intensity Measure (IM) Relative al rischio combinato (sisma + frana).

## MiChE

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

### 5.3 Correlazione degli indici di rischio con i parametri macroscopici

Una volta individuati gli Stati Limite ed i rispettivi tempi di ritorno per le sezioni analizzate è stata valutata la possibilità di estendere questi risultati alle sezioni con caratteristiche analoghe. Le considerazioni svolte sui meccanismi di rottura hanno evidenziato che la sicurezza delle mura urbane, espresse in funzione dell'indice di rischio  $\eta$ , è correlata alle principali caratteristiche geometriche e meccaniche dell'opera [25]. In particolare, nell'ipotesi di assumere costanti le proprietà meccaniche del materiale muratura e del terreno si correla l'indice di vulnerabilità alle principali caratteristiche geometriche che definiscono il problema.

Per il caso studio analizzato si considerano i legami con le seguenti grandezze geometriche:

- $h$  l'altezza dell'opera di sostegno;
- $r=H_r/H$ : grado di riempimento, espresso come il rapporto fra l'altezza di riempimento e l'altezza totale del muro.
- $i$  pendenza di valle.

Con l'intento di individuare una relazione tra l'indice di vulnerabilità  $\eta$  e le grandezze citate. si definiscono dei pesi  $\xi_i$ .

$$\eta(h;r;i) \quad (12)$$

in particolare, si definiscono:

$\xi_h$  peso altezza mura;

$\xi_r$  peso rapporto di riempimento;

$\xi_i$  peso inclinazione;

Questi pesi vengono a moltiplicare le rispettive grandezze ad ottenere un unico parametro  $\rho$  (Eq.(13) al fine di individuare una relazione univoca tra  $\eta$  ed  $\rho$  (Eq. (14)).

$$\rho = \xi_h \cdot h + \xi_r \cdot r + \xi_i \cdot i \quad (13)$$

$$\eta = \eta(\rho) \quad (14)$$

La relazione (14) e i rispettivi pesi (13) sono determinati agli SLV imponendo che la relazione tra  $\eta$  e  $\rho$  abbia il migliore coefficiente di correlazione  $R^2$  tarato sulle sezioni esaminate (Fig. 68 - Fig. 73). Questo consente di ottenere una relazione previsionale che, sulla base delle caratteristiche geometriche principali, consente di stimare  $\eta$  per le sezioni analoghe. Questo procedimento è stato eseguito sia per quanto riguarda il rischio sismico ( $\xi_{s,i}$ ,  $\xi_{s,h}$ ,  $\xi_{s,r}$ ,  $\rho_s$ ) sia per

### MiChE

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

quanto riguarda il rischio frana ( $\xi_{l,i}$ ,  $\xi_{l,h}$ ,  $\xi_{l,r}$ ,  $\rho_l$ ) ottenendo i corrispondenti coefficienti di correlazione tarati allo SLV.

I risultati sono illustrati nei grafici seguenti (Fig. 68 - Fig. 73).

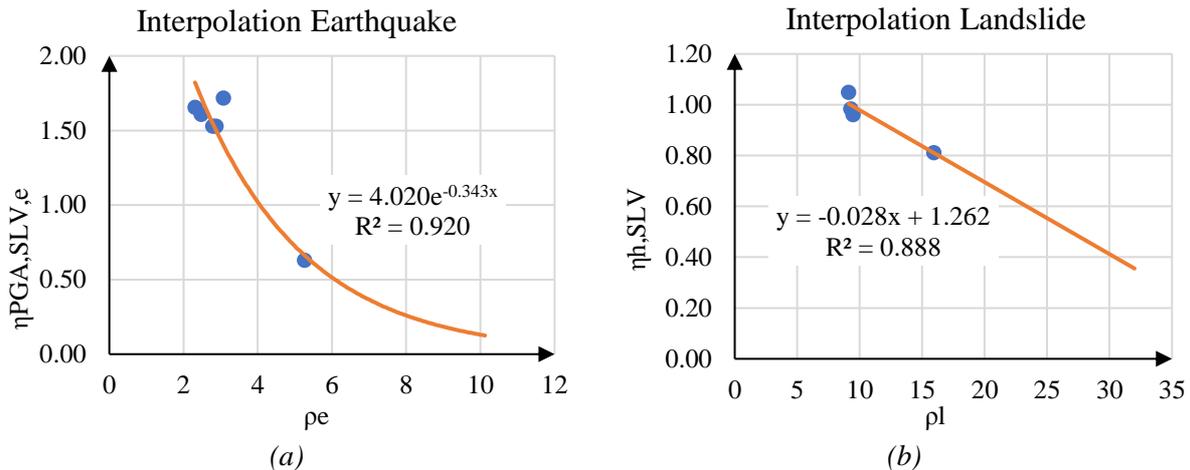


Fig. 68 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLV, sisma (a) e frana (b).

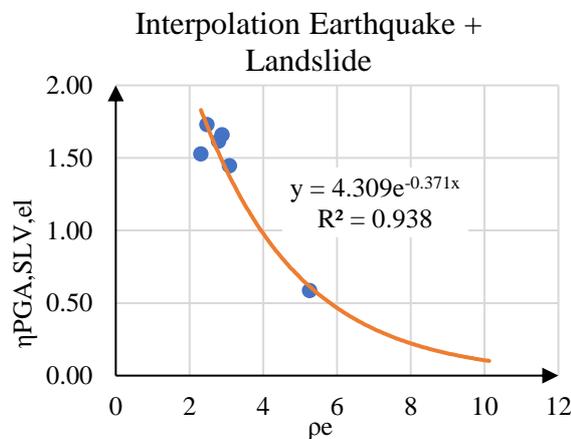


Fig. 69 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLV, rischio combinato (sisma + frana).

### MiChE

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

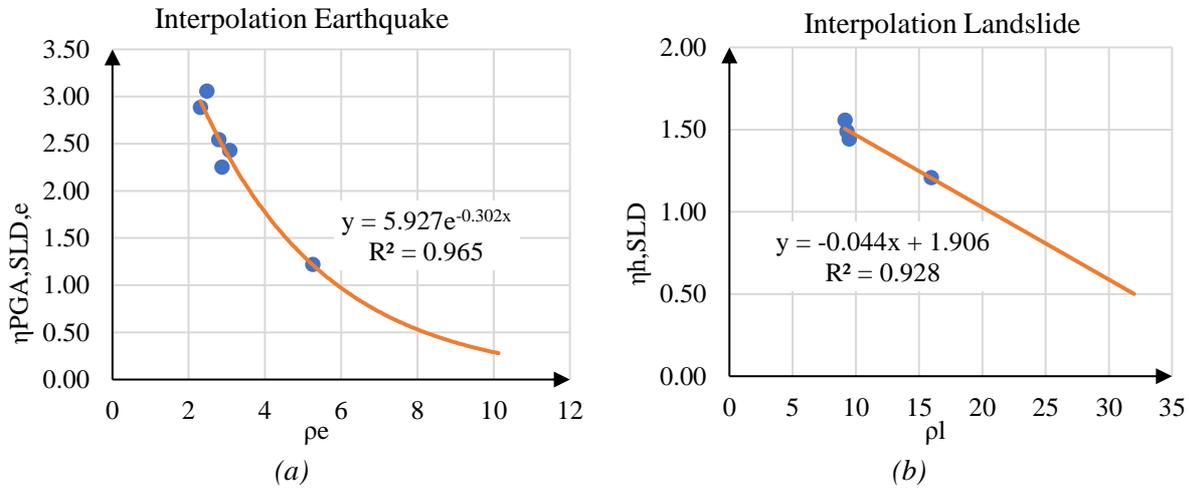


Fig. 70 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLD, sisma (a) e frana (b).

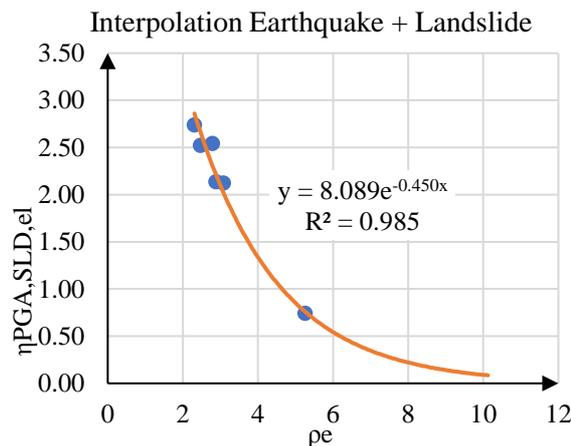


Fig. 71 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLD, rischio combinato (sisma + frana).

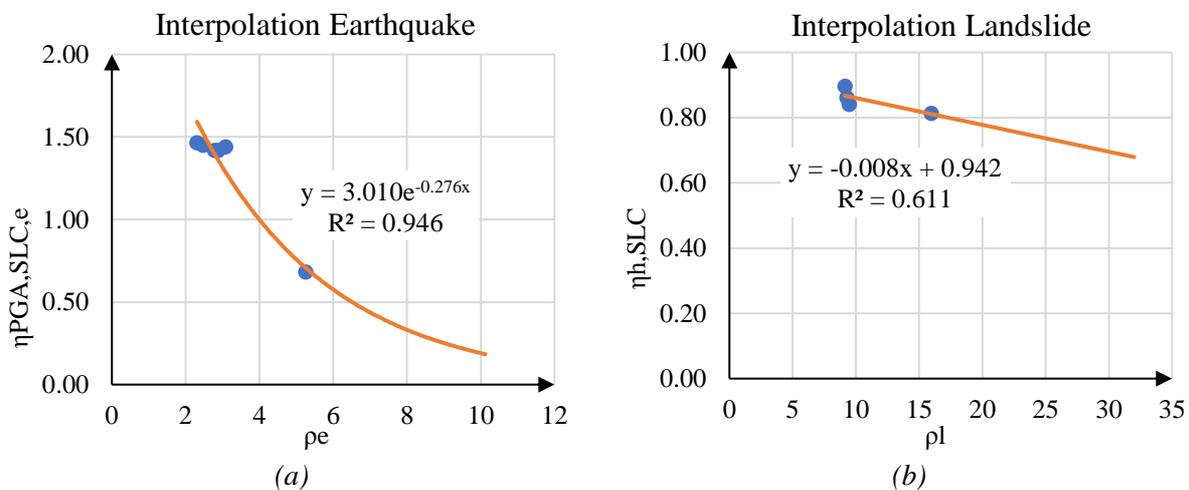


Fig. 72 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLC, sisma (a) e frana (b).

## MiChE

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

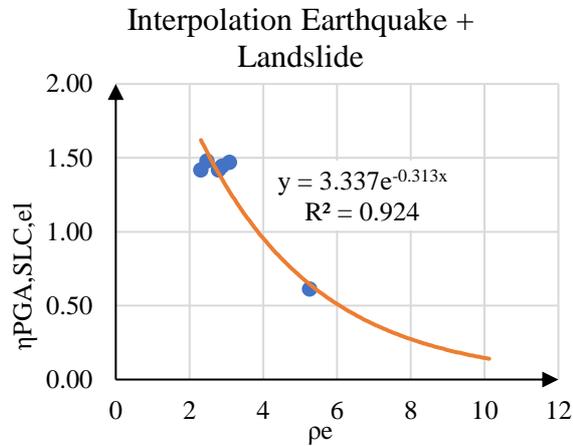


Fig. 73 – Interpolazione della relazione  $\eta=\eta(\rho)$  per gli SLC, sisma + frana.

Il calcolo di  $\eta$  qui descritto consente di estrapolare i dati di vulnerabilità delle sezioni esaminate estendendoli anche alle sezioni per cui non è eseguito un esplicito calcolo di vulnerabilità.

Per tutte le sezioni di geometria nota  $\rho(\xi)$  è dunque possibile calcolare la relativa vulnerabilità  $\eta(\rho)$ .

## MiChE

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

# 6 Analisi di rischio

Il rischio è la probabilità che si verifichi una certa perdita. È utile esprimere questa perdita in termini economici approdando così al calcolo di una Perdita Media Annua (PAM) [26] [27], [28]. La perdita media annua è lo strumento oggi più utilizzato per il calcolo del premio delle assicurazioni e per indirizzare l'investimento delle risorse delle pubbliche amministrazioni. Se la valutazione probabilistica di una perdita di per sé non risulta un'operazione banale, ancora di più lo è la valutazione di questa per le infrastrutture di pregio storico ed artistico. Nel presente lavoro si propone il calcolo della Perdita Media Annua al caso delle mura storiche di urbane.

## 6.1 Stati limite

Le mura urbane presentano peculiarità diverse rispetto a quelle di un edificio. I relativi Stati Limite non sono direttamente documentabili sulle Norme Tecniche delle Costruzioni. Queste ultime forniscono preziose indicazioni per le verifiche da fare per il soddisfacimento degli stati limite.

Sia  $d_r$  lo spostamento relativo dell'opera di sostegno così definito (Fig. 63):

$$d_r = d_a - d_b \quad (15)$$

Dove:

$d_a$  Spostamento in testa - top;

$d_b$  spostamento al piede - bottom;

Per le mura storiche, date le specificità documentate in questo studio, si definiscono i seguenti Stati Limite: due stati limite ultimi e due stati limite di esercizio.

### 6.1.1 Stato limite di Collasso - SLC

Si intende il collasso dell'infrastruttura e/o di una porzione delle infrastrutture/servizi circostanti il cui collasso può causare la perdita di vite umane. È questo il caso in cui il collasso di una porzione mura coinvolge il danneggiamento di altre infrastrutture e ciò in particolare può essere dovuto al collasso del complesso terreno-opera di sostegno, oppure l'interferenza del crollo con edifici isolati che si verifica in assenza di rinterro.

## MiChE

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

Il raggiungimento dello stato limite di collasso può essere identificato, attraverso analisi di tipo push-over come il raggiungimento di una condizione limite di equilibrio dell'opera di sostegno oppure del collasso terreno-opera di sostegno. Detto meccanismo si ritiene raggiunto in corrispondenza della divergenza dell'analisi push-over oppure al raggiungimento di una prefissata condizione limite di equilibrio.

Nella fattispecie, lo stato limite di collasso è individuato dal minimo dei seguenti valori:

$$d_{SLCg} = \min(d_{div}; B/2) \quad (16)$$

Dove:

$d_{div}$  spostamento in corrispondenza del quale si ha la divergenza dei risultati del modello di calcolo. Si identifica con il punto di performance per le analisi sismiche;

$B$  dimensione di base dell'opera di sostegno.

### 6.1.2 Stato limite di salvaguardia della vita - SLV

Lo stato limite consiste in un incipiente collasso dell'infrastruttura. L'opera può mantenere un margine di sicurezza ridotto in presenza di azioni quasi permanenti. SLV è caratterizzato da una soglia di spostamento limite oppure dal raggiungimento del primo meccanismo limite tra i meccanismi di pressoflessione, taglio, scorrimento, ribaltamento e superamento della capacità portante del terreno di fondazione calcolati con un opportuno margine di sicurezza [24].

Per lo spostamento allo stato limite di salvaguardia della vita si assume l'80% dello spostamento al collasso:

$$d_{SLV} = 0.8d_{SLCg} \quad (17)$$

### 6.1.3 Stato limite di Danneggiamento - SLD

Lo stato limite di danneggiamento è riferito al danno che si può avere per spostamenti eccessivi dell'infrastruttura muraria o alle infrastrutture adiacenti senza che tali spostamenti causino il collasso della stessa. In altri termini si effettua una valutazione dello stato limite di danneggiamento con riferimento ai cedimenti del terreno di monte o di valle.

Per lo stato limite di danneggiamento si assume convenzionalmente lo spostamento:

$$d_{SLD} = H/100 \quad (18)$$

## MiChE

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

### 6.1.4 Stato limite di Incipiente danneggiamento - SLI

Si rilevano perdite di verticalità, fessurazioni locali o altri meccanismi di degrado anche solo della gradevolezza estetica dell'opera. Queste valutazioni sono dedotte da un giudizio esperto e pertanto hanno un carattere di soggettività.

Si vede che gli stati limite di esercizio possono essere ricavati come un'opportuna percentuale degli stati limite ultimi (nel caso delle analisi lineari), nel caso delle analisi non lineari sono opportunamente deducibili dalle curve di push-over. Siccome l'unico stato limite ricavabile in maniera univoca è lo stato limite di collasso gli altri possono ottenersi, caso per caso, a partire da questo.

### 6.1.5 Sintesi degli Stati Limite

L'identificazione degli stati limite è convenzionalmente effettuata attraverso la valutazione di spostamenti di soglia. Attraverso le analisi eseguite è possibile determinare l'estensione del fronte instabile e quindi la corretta individuazione del parametro H (maggiore tra altezza dell'opera di sostegno e la potenziale estensione del fronte di terreno instabile).

- Lo spostamento al collasso si determina dalle condizioni limite di equilibrio dell'opera. Questo è derivabile da analisi di tipo push-over ( $d_{SLCg}$ ).
- Lo stato limite di salvaguardia della vita è quello che si ottiene a partire da uno spostamento pari al 90% dello spostamento relativo allo stato limite di collasso ( $d_{SLV}$ ).

Oppure al raggiungimento convenzionale di uno dei possibili meccanismi di rottura.

- lo Stato Limite di Danneggiamento degli edifici contigui si desume in relazione agli spostamenti massimi del terreno circostante  $d_{SLD}$ .
- lo Stato Limite di Integrità, anche intesa anche in senso estetico, è desumibile da giudizio esperto.

## MiChE

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

Gli stati limite individuati per le mura storiche sono riassunti nella Tab. 18.

**Stati Limite**

Esercizio		Ultimi	
SLI	SLD	SLV	SLCg
Incipiente danneggiamento	Danneggiamento	Salvaguardia della Vita	Collasso globale
Giudizio esperto*	$d_{SLD}$	$0.8*d_{SLC}$	$d_{SLC}$

*Tab. 18 - Stati limite per le mura urbane.*

Gli Autori hanno ritenuto di considerare uno stato limite deducibile da indizi osservazionali (SLI) oltre a quelli derivanti da considerazioni numeriche. Questo a sostegno dell'importanza del giudizio tecnico sintetico da considerarsi in aggiunta alle valutazioni analitiche e numeriche.

## 6.2 Pericolosità

La pericolosità è la probabilità che si verifichi un evento caratterizzato da una data intensità. Quest'ultima viene identificata con una *Intensity Measure*, vale a dire una grandezza fisica che rappresenta compiutamente la magnitudine dell'evento. La pericolosità è una caratteristica del sito di riferimento e può essere definita una volta per tutte per il caso studio considerato.

In questo studio sono esaminate le pericolosità relative a due eventi caratteristici che sono il sisma e la pioggia. Per questi sono definite le seguenti *Intensity Measures*.

<b>Peak Ground Acceleration</b>	PGA ( $T_R$ )	$m/s^2$
<b>Height of rain</b>	$h$ ( $T_R$ )	mm

*Tab. 19 - Intensity measure considered.*

Le *Intensity Measures* sono grandezze specifiche per il sito considerato. Esse rappresentano una caratterizzazione probabilistica dei rispettivi eventi. La caratterizzazione di questa per il sito di riferimento è effettuata in Italia dagli Enti di gestione delle emergenze.

In particolare per quando riguarda il rischio sismico in Italia i dati sono desunti da NTC 2018 [24] mentre per quanto attiene al rischio idraulico da LSPP [7]. Il legame tra il tempo di ritorno e la probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$  è fornito dalla relazione di Poisson [24], [27].

$$P_{VR} = 1 - e^{-V_R/T_R} \quad (19)$$

In cui:

$T_r$  tempo di ritorno di un dato evento;

## MiChE

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

$V_R$  periodo di riferimento o periodo di osservazione;

$P_{VR}$  probabilità annua di superamento.

Il periodo di riferimento dipende dalla Vita nominale dell'opera e dalla Classe d'uso secondo la relazione:

$$V_R = V_N C_u \quad (20)$$

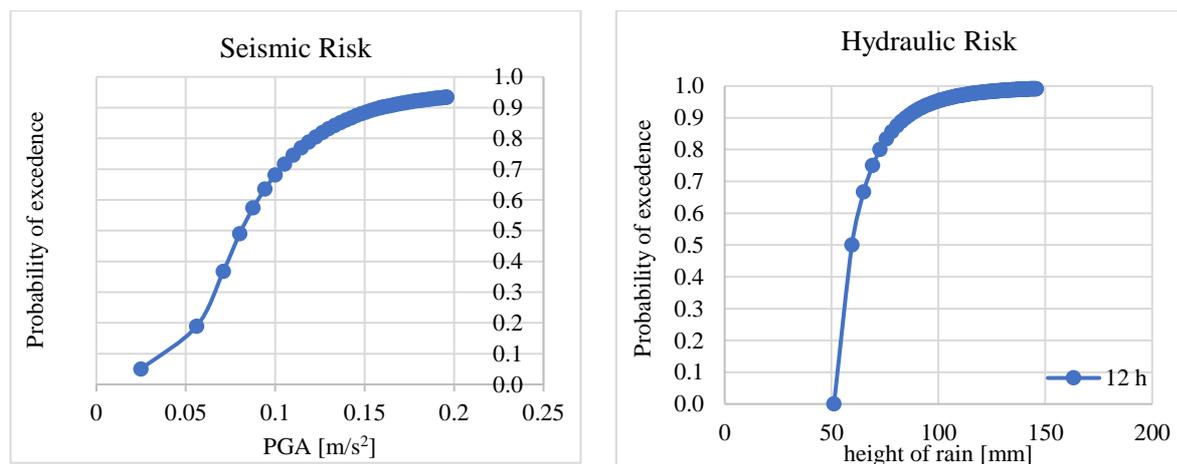
Nel caso studio preso in esame si assume:

$V_N$  Vita nominale della costruzione, pari a 50 anni;

$C_u$  Classe d'uso pari ad 1.5 (per edifici rilevanti).

Da cui discende un periodo di riferimento pari a 75 anni.

Tanto per il rischio sismico che per il rischio idraulico le  $IM$  sono correlate con i Tempi di ritorno  $T_r$  e con le rispettive probabilità di accadimento  $P_{VR}$  (Fig. 74).



(a)

Fig. 74 – Pericolosità (a) sismica e (b) pluviometrica per il sito di riferimento di Volterra.

## 6.3 Vulnerabilità

La vulnerabilità sismica ed idraulica è valutata con metodologie specifiche in riferimento ai due rischi considerati. In particolare in [25], [29] sono eseguite analisi con diverso livello di approfondimento facendo uso dell'analisi limite e del metodo agli elementi finiti. Con quest'ultimo sono eseguite analisi statiche e dinamiche non lineari. La sicurezza sismica e statica delle mura è espressa in funzione dell'Indice di rischio statico ed idraulico.

L'indice di rischio è il rapporto tra Capacità (C) e Domanda (D) ed è spesso impiegato per la valutazione della sicurezza di infrastrutture di interesse strategico o rilevante al fine di ottenere

## MiChE

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

una lista di priorità. Questo può essere esplicitato in funzione delle IM oppure del rispettivo tempo di ritorno.

Indice di rischio in funzione della PGA:

$$\eta_{PGA} = \frac{PGA_C}{PGA_D} \Big|_{SL} \quad (21)$$

Indice di rischio in funzione dell'altezza di pioggia:

$$\eta_h = \frac{h_C}{h_D} \Big|_{SL} \quad (22)$$

Indice di rischio in funzione del tempo di ritorno dell'evento:

$$\eta_{Tr} = \frac{T_{rC}}{T_{rD}} \Big|_{SL} \quad (23)$$

Dove C sta per Capacità e D per Domanda. I citati indici di rischio possono essere ricavati (Eq. 22-24) può essere calcolati per i diversi stati limite esaminati (SL).

Con questa assunzione l'indice di rischio assume valori compresi tra zero e uno nel caso di struttura non sicura ed assume valori maggiori di uno in caso di struttura sicura.

L'uso che ne viene fatto nel presente lavoro è molto simile a quello dell'OPCM 3274/2003 [30], ovvero quello di determinare il livello di scurezza di una certa popolazione di edifici stabilendo una lista di priorità. Detto giudizio non è espresso soltanto in funzione della vulnerabilità della singola sezione ma anche delle condizioni al contorno e del costo di ricostruzione come mostrato nei paragrafi seguenti.

L'obiettivo delle analisi di vulnerabilità sezionali è quindi quello di correlare IM e Stati Limite. Le analisi forniscono quindi la IM relativa a ciascuno stato limite.

## 6.4 Esposizione

Il raggiungimento dei codificati Stati Limite va classificato in relazione alle possibili conseguenze degli stessi al fine di ottenere le perdite economiche a questi collegati. E' dunque necessario per ogni seziona analizzata conoscere le condizioni al contorno in termini di infrastrutture contigue, beni di valore artistico e danni di mancata fruibilità.

La mancata fruibilità può riguardare l'uso di edifici, infrastrutture viarie, impianti beni di valore artistico e sociale ed il conseguente danno a persone. Gli strumenti di controllo del territorio ad

## MiChE

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

alto rendimento come (immagini satellitari, immagini da drone e strumenti GIS [1]) hanno un ruolo cruciale nella determinazione della perdita.

La descrizione riportata in Tab. 20 consente di associare un dato tipo di danno ad uno specifico valore economico (perdita economica). E' stata eseguita una ricerca specifica per le mura storiche di Volterra che consente di valutare il valore economico corrispondente ad un dato tipo di perdita. Il danno indotto da raggiungimento di un dato stato limite dell'opera di sostegno sulle infrastrutture vicine dipende dalla prossimità di queste. Ciò è codificato qui con i seguenti tipi di esposizione (Tab. 20 - descrizione qualitativa dei danni.):

ID Danno	Elemento danneggiato o tipo di danno	SLU	SLE
L1	infrastruttura (mura urbane)	Rifacimento in toto	Cucitura delle lesioni; Ripristino di dreni intasati; Ripristino dissesti minori attraverso il cuci e scuci
L2	Infrastrutture contigue	-	-
L3	Beni di valore artistico	Da valutarsi caso per caso	Da valutarsi caso per caso
L4	Mancata fruibilità - edifici	Mesi di mancato utilizzo	Mesi di mancato utilizzo
L5	Sociale – Beni artistici	Mesi di mancato utilizzo	Mesi di mancato utilizzo
L6	Casualità	Possibile numero di vittime	Possibile numero di feriti.
L7	Mancata fruibilità – strade piazze luoghi pubblici	Mesi di mancato utilizzo	Mesi di mancato utilizzo

Tab. 20 - descrizione qualitativa dei danni.

I tipi di danno vengono identificati con il codice identificativo ID danno che va da L1 ad L7. Si rende infatti possibile la scelta di diverse combinazioni in relazione alle specifiche condizioni al contorno. Ogni sezione infatti presenta le rispettive peculiarità in termini di densità abitativa, presenza di edifici o altre tipologie infrastrutturali.

### 6.4.1 Coefficienti di partecipazione al danno

La presenza di infrastrutture in prossimità delle sezioni indagate (Danno tipo L2) viene definito attraverso un coefficiente sintetico denominato coefficiente di partecipazione al danno  $\Psi$ . Detto coefficiente assume valore unitario nel caso di infrastrutture presenti in corrispondenza dell'opera e valore pari a zero ad una distanza pari a 2 volte l'altezza dell'opera di sostegno ( $2H$ ). Si assume che  $\Psi$  vari linearmente per i valori intermedi. Il coefficiente  $\Psi$  è definito come segue.

## MiChE

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

$$\Psi_u = 1 - \left( \frac{x}{2H} \right) \quad (24)$$

$$\Psi_d = 1 - \left( \frac{x}{2H} \right) \quad (25)$$

Dove i pedici  $u$  e  $d$  rappresentano rispettivamente:

U – Upstream, la sezione di monte;

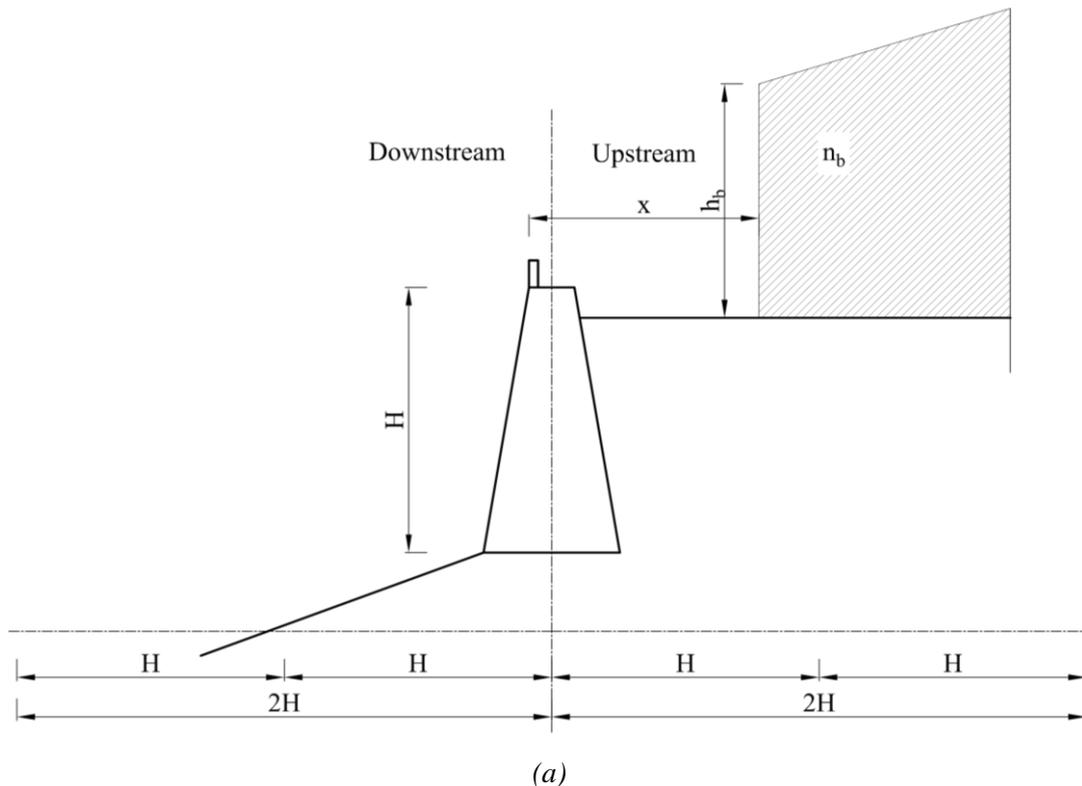
D – Downstream, la sezione di valle

Mentre  $H$  rappresenta una dimensione caratteristica dell'opera di sostegno.  $H$  è l'altezza dell'opera di sostegno nel caso in cui il meccanismo di rottura riguardi solo l'opera muraria mentre è l'estensione del fronte di terreno instabile nel caso l'instabilità sia dovuta a quello.

$$H = \max(H; d_{inst}) \quad (26)$$

$H$  altezza dell'opera di sostegno;

$d_{inst}$  dimensione del fronte di terreno instabile determinata con il programma SSAP.



## MiChE

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

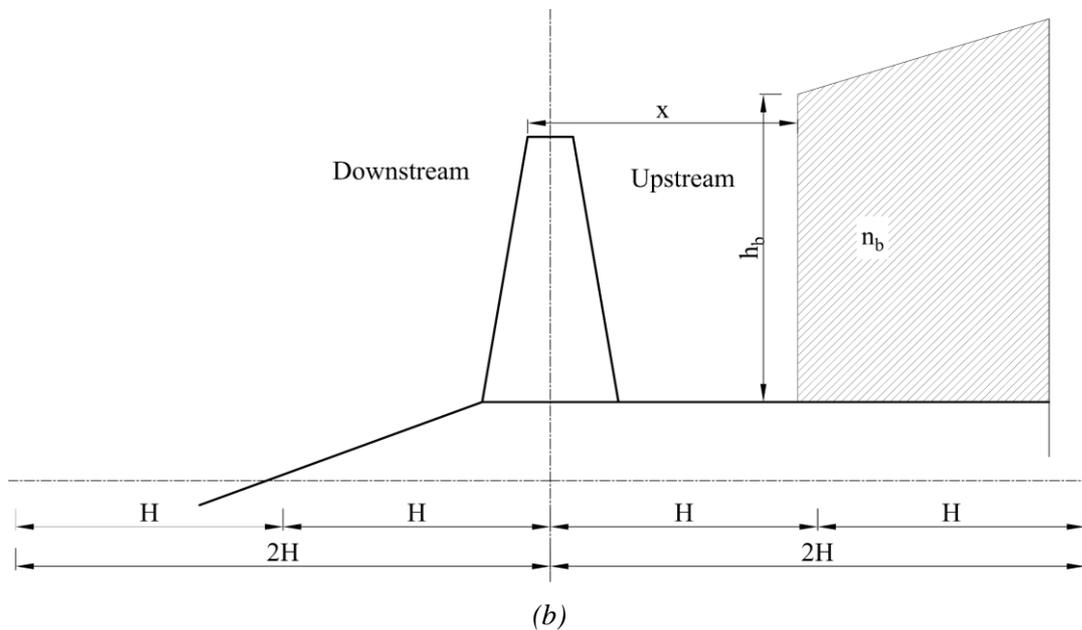


Fig. 75 - Aree interessate dal crollo per la stima del valore economico della perdita L2. Sezioni con riempimento a monte (a), sezioni senza riempimento a monte (b).

I valori dei coefficienti qui utilizzati per le perdite di tipo L1 e da L3 a L7 sono riportati nella Tab. 21. Il legame tra stato limite e livello di danno danno è dunque specifico per ogni singola sezione come esplicitato nella seguente tabella:

Stato limite	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
1 - SLC	1.0	$\Psi$ 1.0 - 0.0	0.0 - 0.6	0.0 - 0.6	0.0 - 0.6	0.0 - 0.2	1.0
2 - SLV	1.0	$\Psi$ 1.0 - 0.0	0.0 - 0.6	0.0 - 0.6	0.0 - 0.6	0.0 - 0.2	1.0
3 - SLD	0.1	0.3	0.0 - 0.1	-	-	-	-
4 - SLI	0.1	0.3	0.0 - 0.1	-	-	-	-

Tab. 21 - Coefficienti di partecipazione al danno.

Alcuni tipi di danno presentano coefficienti di partecipazione a scelta tra due valori (0.0 ed 0.6 oppure 0.1) Questo perché le diverse sezioni sono diversamente prone a subire un danno in relazione alla prossimità o meno di infrastrutture poste a monte ed a valle, che possono essere interessate o meno dal danneggiamento.

La determinazione dei costi degli scenari di danno e dei costi di intervento è stata effettuata tenendo conto dei prezziari regionali e delle informazioni di sito relative agli incassi turistici. Nello specifico, per le mura Storiche di Volterra, si riportano i dati di seguito indicati.

**MiChE**

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

Tipologia di Danno	Danno Lieve				Collasso			
<b>Danni all'infrastruttura</b>	1000,00 €/m/m				10.000,00 €/m/m			
<b>Danni alle infrastrutture contigue</b>	Edifici	Se Presenti €/m <sup>2</sup>			Se Presenti €/m <sup>2</sup>			
		Abitazioni	Box	Uffici	Negozi	Abitazioni	Box	Uffici
		167,5	104,5	152,5	160,0	1675	1045	1525
	Viabilità	100 €/ml			1000 €/ml			
<b>Danni a beni di valore artistico</b>	>50000 €				>500000 €			
<b>Danni di mancata fruibilità - edifici</b>	Affitto	0,27 €/m <sup>2</sup> /giorno						
	Turismo	65 €/pp/giorno						
<b>Danno sociale – beni artistici</b>	43 €/gg/pp							
<b>Casualità</b>	Decesso 1,5 milioni € - Ferito 40000 €							
<b>Danni di mancata fruibilità – strade</b>	Strada urbana – solo famiglie residenti				1000 €/mese			
	Chiusura viabilità principale + parcheggi pagamento				24000 €/mese			

Tab. 22 – Perdite economiche per le varie tipologie di danno.

## 6.5 Perdita Annua Media (PAM)

Le valutazioni sezionali svolte hanno consentito di inquadrare il problema da un punto di vista meccanico e di associare, ad ogni stato limite, la rispettiva probabilità di accadimento. Ogni stato limite è dunque caratterizzato attraverso l'indice di rischio  $\eta$ .

L'attingimento di un determinato stato limite può dar vita a degli scenari di danno che sono specifici per le condizioni al contorno considerate. La determinazione dei costi relativi agli scenari di danno delle singole sezioni consente di calcolare la perdita media annua. La perdita media annua (PAM o EAL) viene qui calcolata anche considerando degli scenari di retrofit ed è quindi possibile determinarne il valore sia *ante-operam* che *post-operam*.

Considerate le vulnerabilità peculiari delle mura storiche con rinterro il sistema di retro-fitting previsto consiste nell'inserimento di tiranti con relativi capi-chiave ed uno sistema di dreni sub orizzontali Fig. 76.

## MiChE

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

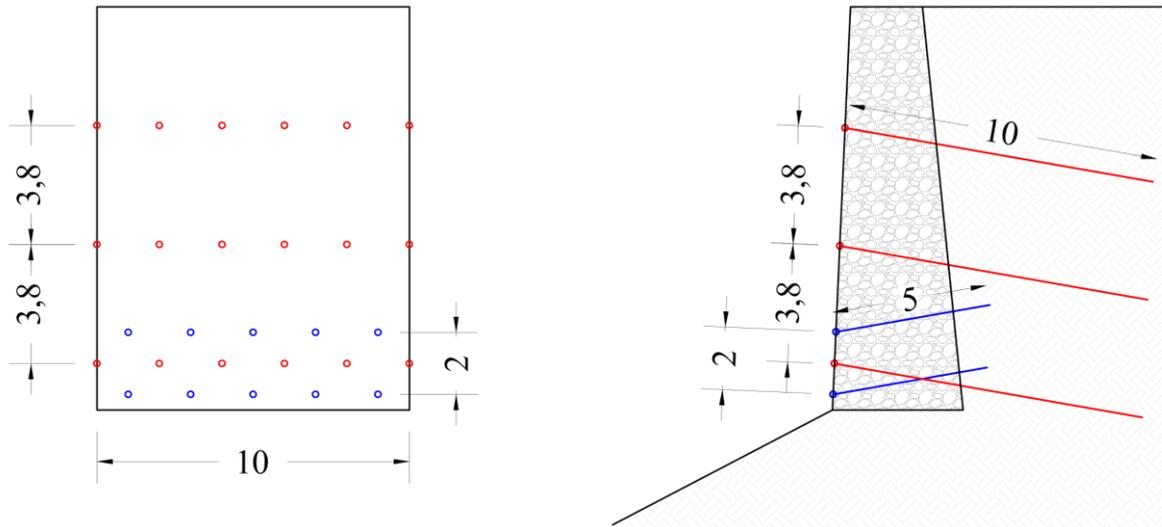


Fig. 76 – Sistema di retrofitting per la mitigazione della vulnerabilità idraulica e sismica. In rosso tiranti sub orizzontali, in azzurro dreni.

Il confronto tra PAM ante e *post-operam* consente di individuare le sezioni maggiormente meritevoli di intervento. Da queste è inoltre possibile desumere il risparmio annuo ottenibile in caso di intervento (28).

$$PAM_{ante} - PAM_{post} \quad (27)$$

Si riportano di seguito i risultati del calcolo della PAM per le sezioni analizzate (Fig. 77 - Fig. 93). La PAM per tutte le sezioni della cinta muraria e gli Stati Limite considerati sono indicati in (Tab. 23 - Tab. 26).

### MiChE

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

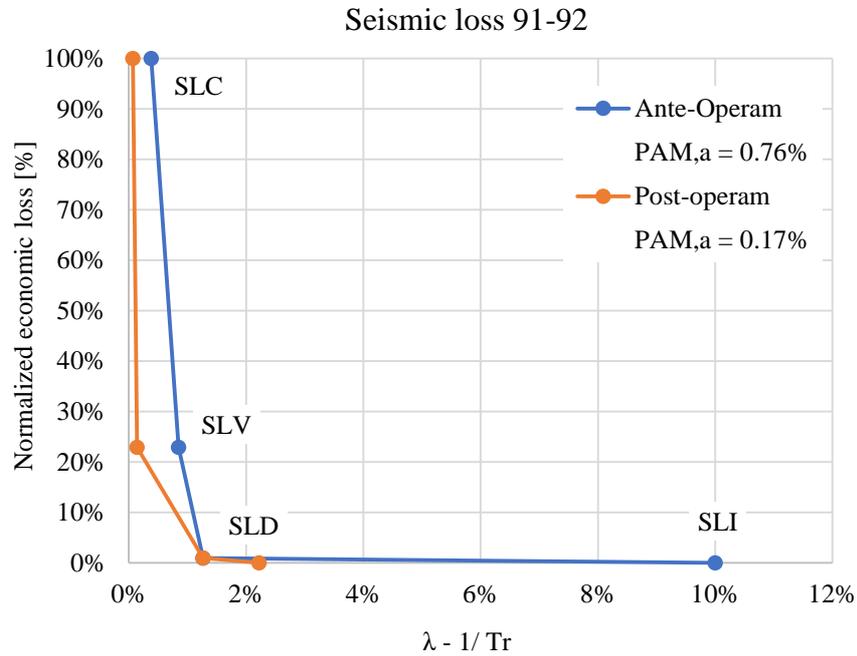


Fig. 77 - Perdita media annua per il rischio sismico, s. 91-92, PAM ante 0.76%, PAM post 0.17%.

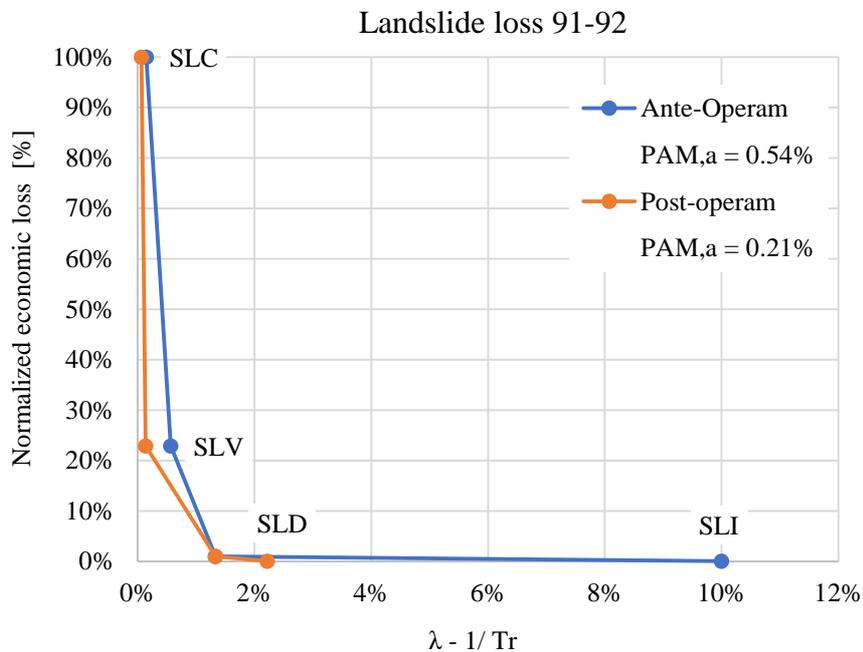


Fig. 78 - Perdita media annua per il rischio frana, s. 91-92, PAM ante 0.54%, PAM post 0.21%.

In aggiunta è possibile calcolare il rischio combinato dovuto agli eventi sisma più frana.

### MiChE

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

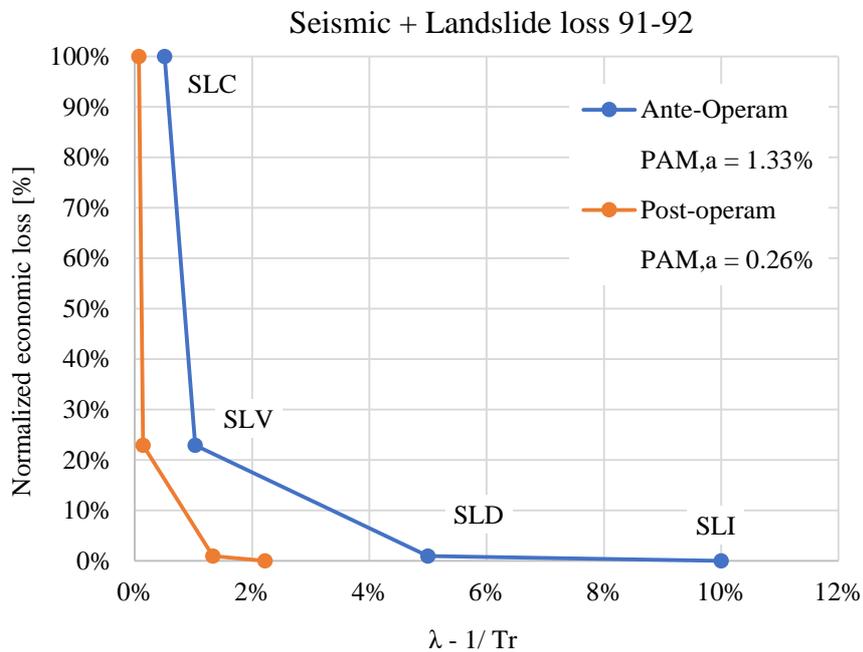


Fig. 79 - Perdita media annua per il rischio combinato (sisma + frana), s. 91-92, PAM ante 1.33%, PAM post 0.26%

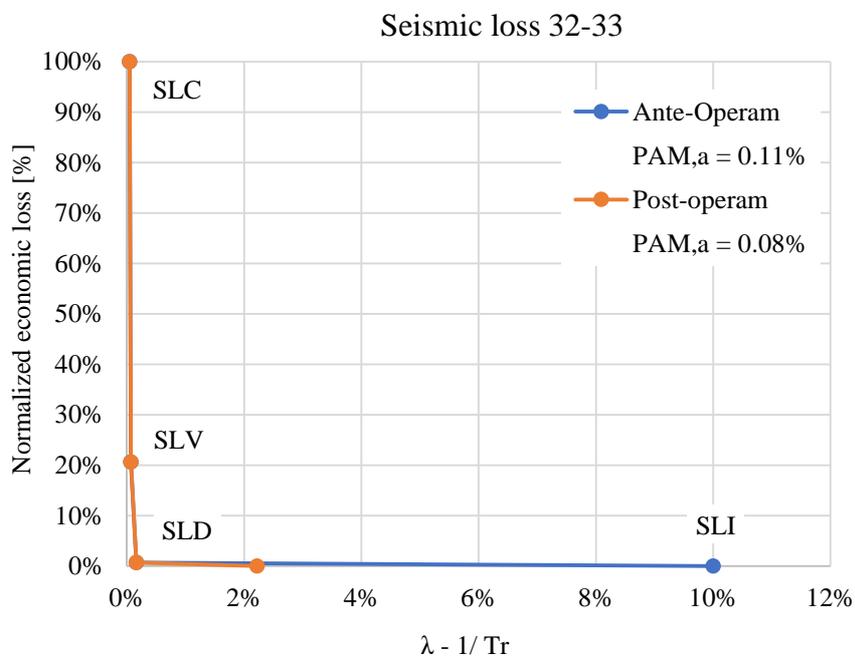


Fig. 80 - Perdita media annua per il rischio sismico, s. 32-33, PAM ante 0.11%, PAM post 0.08%.

### MiChE

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

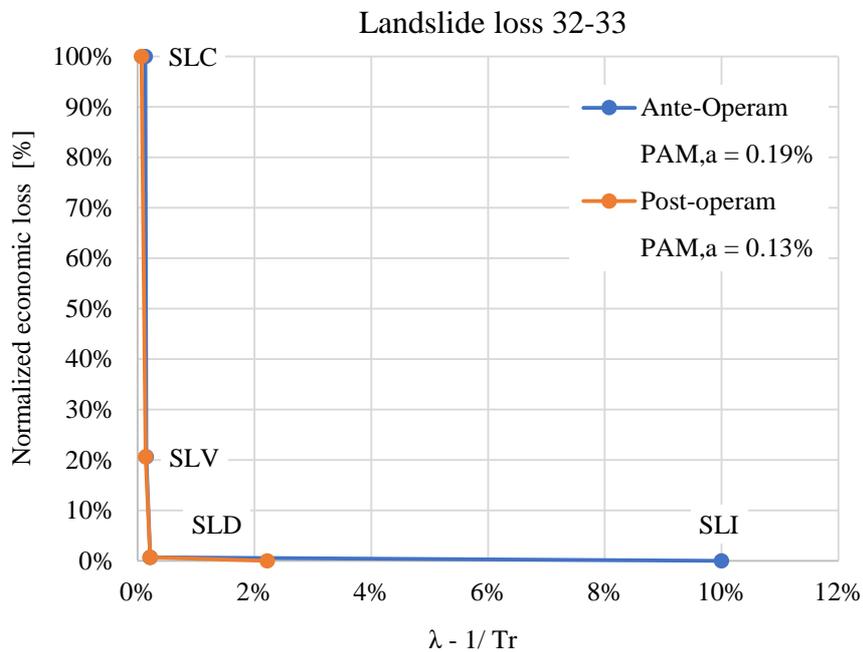


Fig. 81 - Perdita media annua per il rischio frana, s. 32-33, PAM ante 0.19%, PAM post 0.13%.

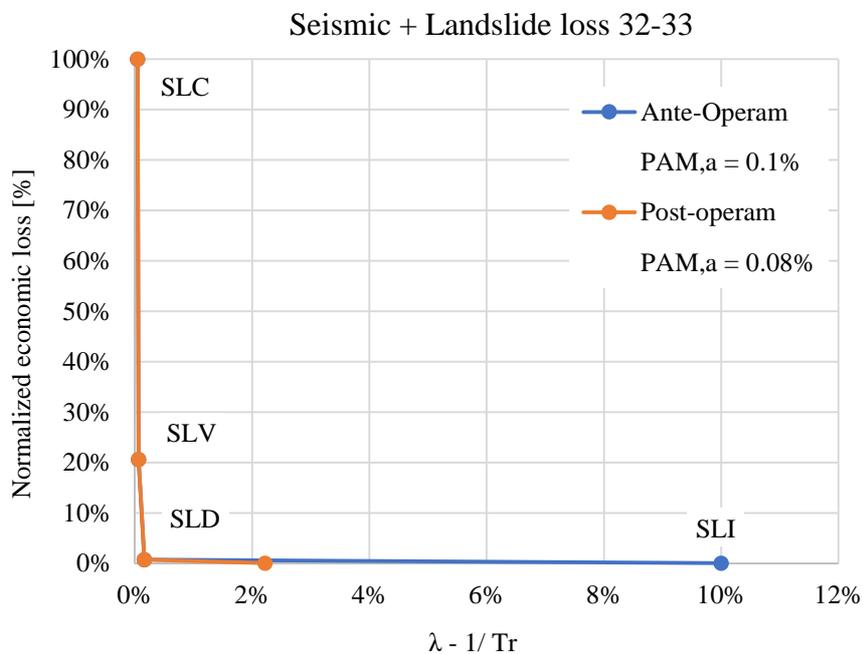


Fig. 82 - Perdita media annua per il rischio combinato (sisma + frana), s. 32-33, PAM ante 0.10%, PAM post 0.08%

**MiChE**

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

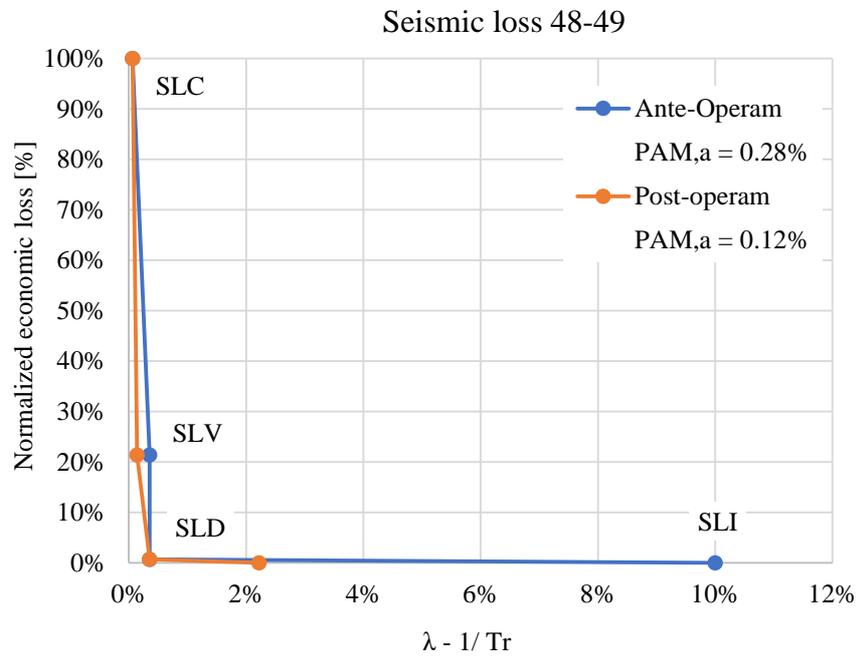


Fig. 83 - Perdita media annua per il rischio sismico, s. 48-49, PAM ante 0.28%, PAM post 0.12%.

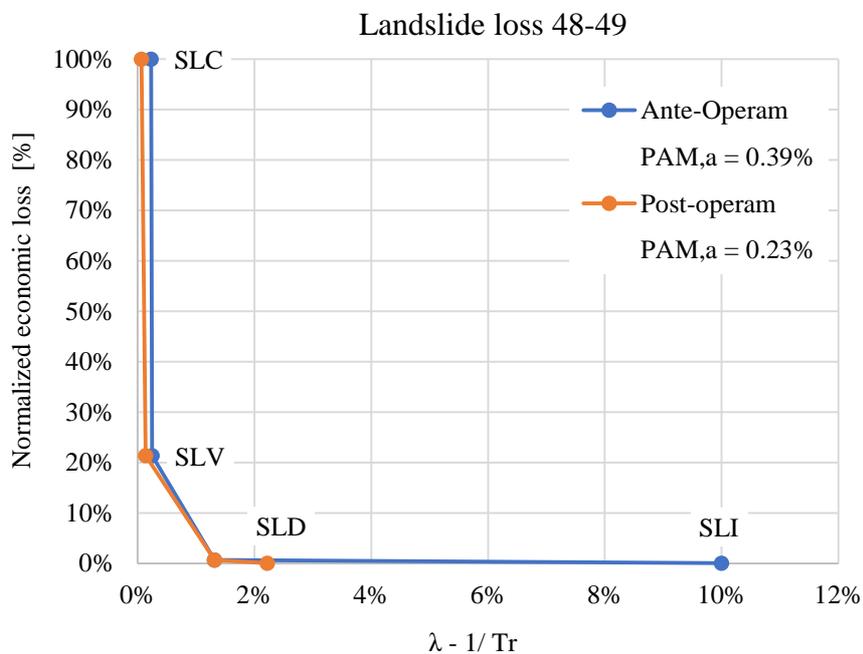


Fig. 84 - Perdita media annua per il rischio frana, s. 48-49, PAM ante 0.39%, PAM post 0.23%.

### MiChE

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

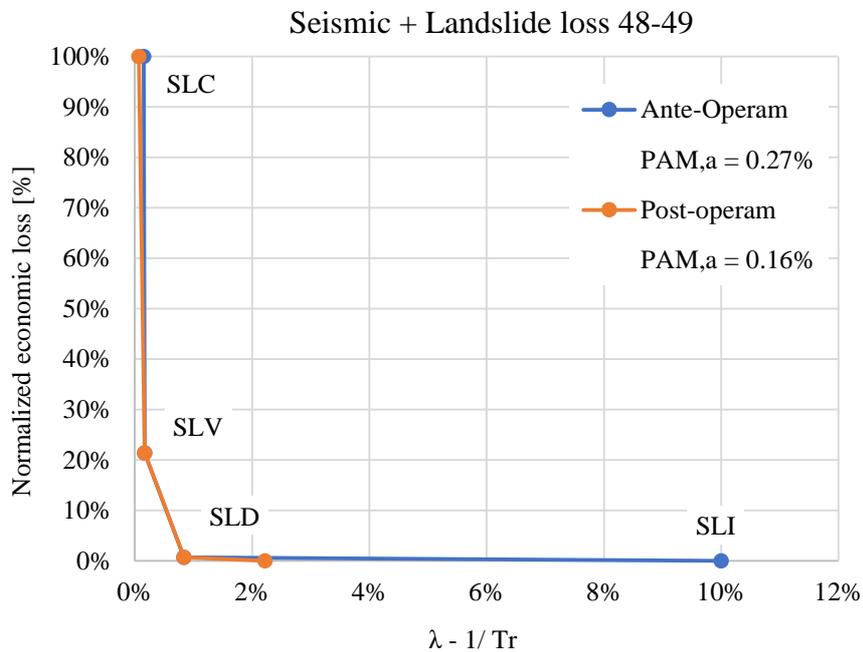


Fig. 85 - Perdita media annua per il rischio combinato (sisma + frana), s. 48-49, PAM ante 0.27%, PAM post 0.16%

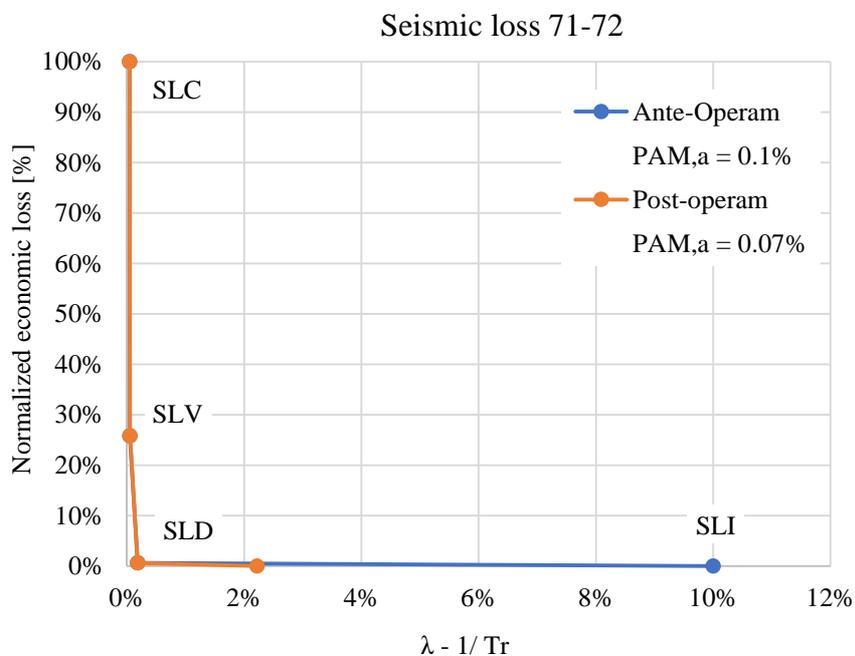


Fig. 86 - Perdita media annua per il rischio sismico, s. 71-72, PAM ante 0.10%, PAM post 0.07%.

### MiChE

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

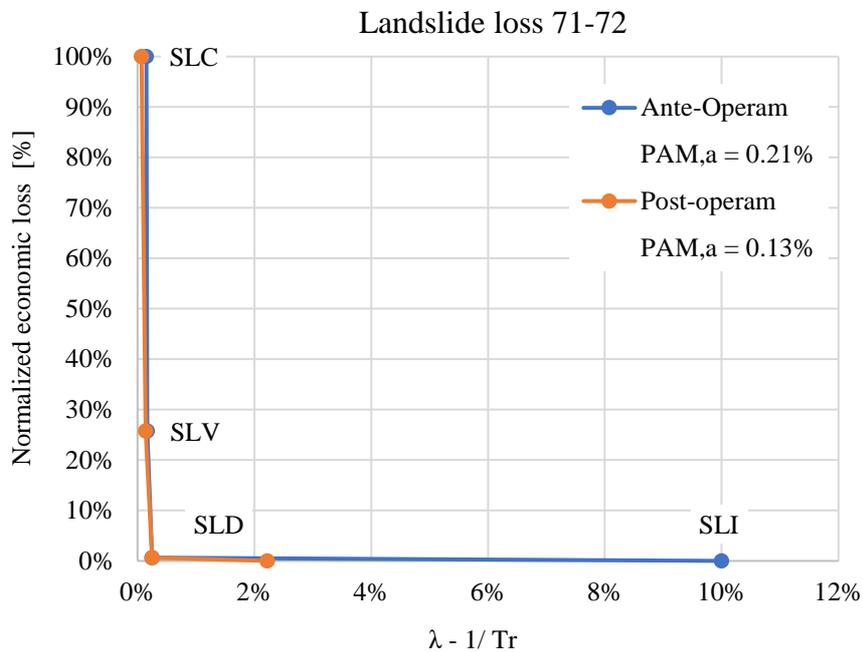


Fig. 87 - Perdita media annua per il rischio frana, s. 71-72, PAM ante 0.21%, PAM post 0.13%.

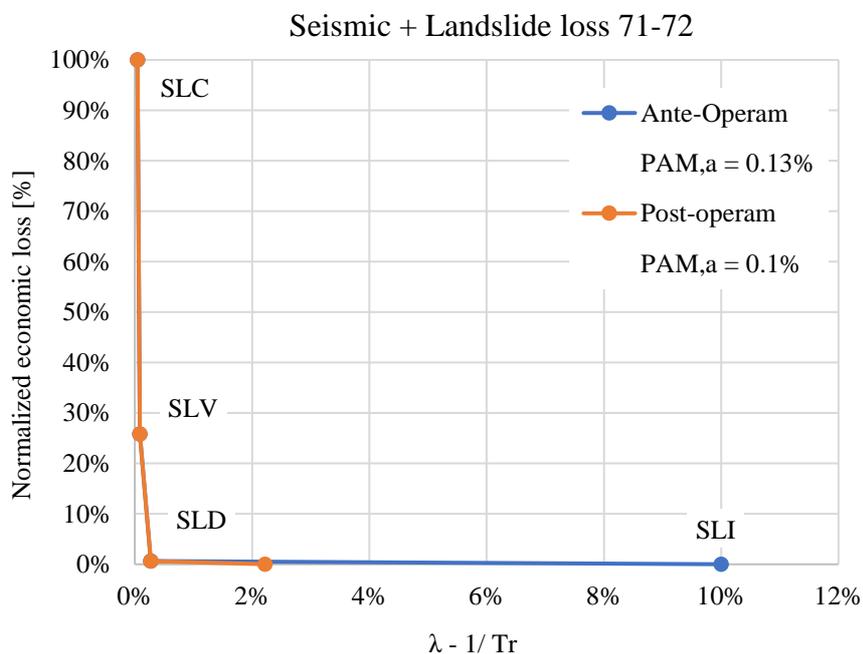


Fig. 88 - Perdita media annua per il rischio combinato (sisma + frana), s. 71-72, PAM ante 0.13%, PAM post 0.10%

### MiChE

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

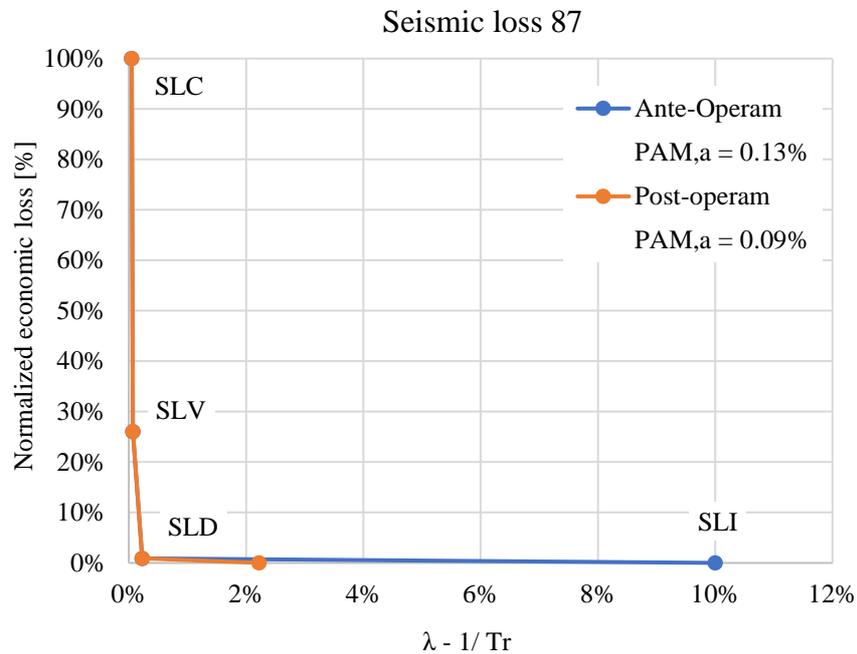


Fig. 89 - Perdita media annua per il rischio sismico, s. 87, PAM ante 0.13%, PAM post 0.09%.

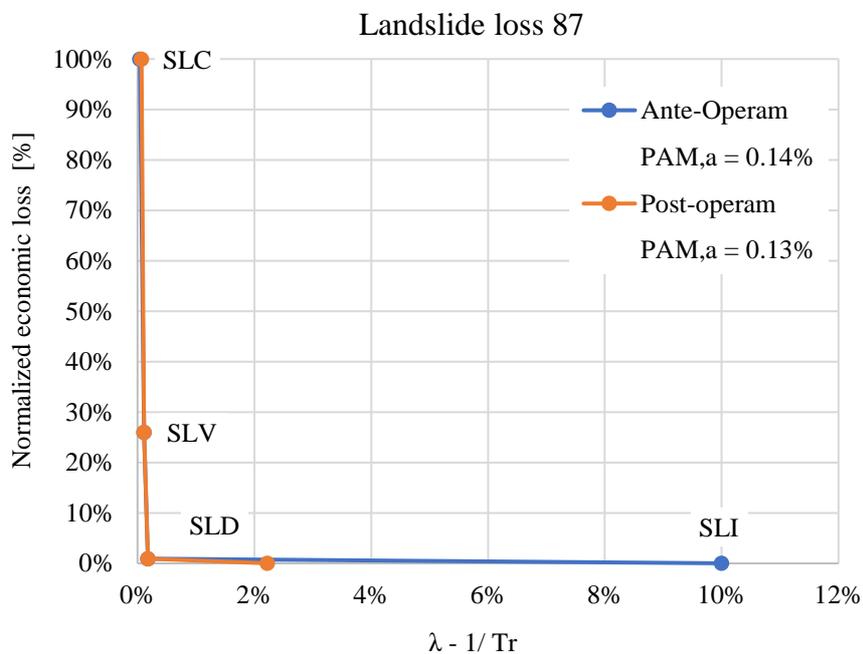


Fig. 90 - Perdita media annua per il rischio frana, s. 87, PAM ante 0.14%, PAM post 0.13%.

## MiChE

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

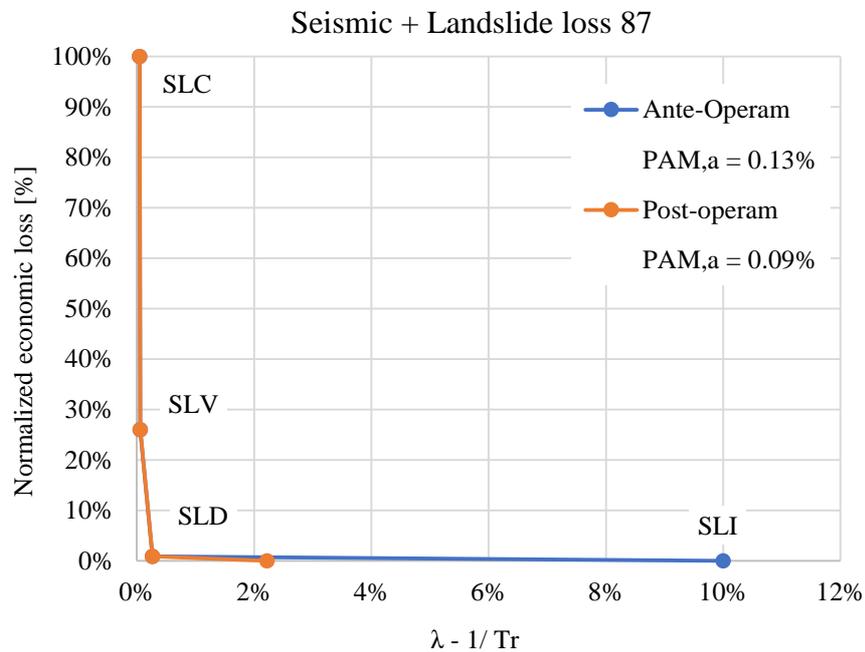


Fig. 91 - Perdita media annua per il rischio combinato (sisma + frana), s. 87, PAM ante 0.13%, PAM post 0.10%

	<b>SLI</b>					
	<b>Seismic PAM</b>		<b>Landslide PAM</b>		<b>Seismic + landslide PAM</b>	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
<b>0-1</b>	96 €	13 €	75 €	9 €	95 €	12 €
<b>1-2</b>	95 €	13 €	74 €	9 €	94 €	12 €
<b>2-3</b>	88 €	9 €	72 €	9 €	85 €	9 €
<b>4</b>	68 €	8 €	53 €	7 €	66 €	7 €
<b>5</b>	66 €	7 €	52 €	7 €	65 €	7 €
<b>5-6</b>	96 €	14 €	74 €	9 €	95 €	13 €
<b>7-8</b>	69 €	10 €	54 €	7 €	68 €	9 €
<b>8-9</b>	64 €	7 €	51 €	7 €	63 €	7 €
<b>9-10</b>	65 €	7 €	52 €	7 €	63 €	7 €
<b>11-12</b>	64 €	7 €	52 €	7 €	62 €	7 €
<b>12-13</b>	69 €	9 €	54 €	7 €	68 €	8 €
<b>13-14</b>	69 €	9 €	54 €	7 €	68 €	9 €
<b>15</b>	91 €	9 €	72 €	9 €	89 €	9 €
<b>16-17</b>	58 €	7 €	49 €	7 €	58 €	7 €
<b>17-18</b>	139 €	7 €	50 €	7 €	197 €	7 €
<b>20-21</b>	58 €	6 €	37 €	6 €	91 €	6 €
<b>21</b>	56 €	6 €	47 €	6 €	54 €	6 €
<b>22</b>	19 €	7 €	40 €	7 €	40 €	7 €
<b>23</b>	61 €	7 €	51 €	7 €	59 €	7 €
<b>24</b>	62 €	7 €	51 €	7 €	60 €	7 €

## MiChE

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

	SLI					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
25-26	60 €	6 €	50 €	6 €	59 €	6 €
26-27	62 €	8 €	49 €	6 €	61 €	7 €
27-28	65 €	8 €	51 €	6 €	64 €	8 €
28-29	67 €	9 €	53 €	7 €	66 €	8 €
30-31	69 €	11 €	54 €	7 €	69 €	11 €
31-32	71 €	13 €	55 €	7 €	71 €	13 €
32-33	76 €	16 €	75 €	15 €	76 €	16 €
33-34	72 €	12 €	56 €	7 €	72 €	12 €
34-35	69 €	11 €	54 €	7 €	69 €	11 €
35-36	69 €	13 €	53 €	6 €	69 €	13 €
36-37	71 €	13 €	55 €	7 €	71 €	13 €
37-38	57 €	7 €	49 €	7 €	50 €	7 €
38-39	74 €	14 €	57 €	7 €	74 €	14 €
40-41	62 €	11 €	48 €	6 €	62 €	11 €
41-42	151 €	6 €	39 €	6 €	208 €	6 €
42-43	67 €	8 €	53 €	7 €	66 €	7 €
43-44	66 €	7 €	53 €	7 €	64 €	7 €
44-45	25 €	7 €	39 €	7 €	52 €	7 €
45-46	56 €	6 €	45 €	6 €	55 €	6 €
46-47	59 €	8 €	47 €	6 €	59 €	7 €
47-48	61 €	10 €	47 €	6 €	61 €	9 €
48-49	73 €	14 €	66 €	7 €	69 €	10 €
50	74 €	16 €	56 €	7 €	74 €	15 €
51	69 €	13 €	54 €	6 €	69 €	13 €
52-53	61 €	12 €	48 €	6 €	61 €	12 €
53-54	69 €	11 €	54 €	7 €	69 €	11 €
55-56	62 €	11 €	48 €	6 €	62 €	11 €
56-57	61 €	10 €	48 €	6 €	61 €	10 €
57-58	57 €	6 €	46 €	6 €	56 €	6 €
58-59	62 €	11 €	49 €	6 €	62 €	11 €
59-60	73 €	14 €	57 €	7 €	73 €	14 €
60-61	72 €	14 €	56 €	7 €	72 €	14 €
61-62	73 €	16 €	55 €	7 €	73 €	15 €
62-63	70 €	14 €	55 €	6 €	70 €	14 €
63-64	68 €	13 €	53 €	6 €	68 €	13 €
64-65	66 €	11 €	52 €	6 €	66 €	11 €
65-66	66 €	11 €	51 €	6 €	66 €	11 €
66-67	66 €	9 €	52 €	6 €	65 €	9 €
67-68	71 €	14 €	55 €	7 €	71 €	14 €
68-69	69 €	12 €	54 €	7 €	69 €	12 €
69-70	67 €	11 €	53 €	6 €	67 €	10 €
70-71	70 €	14 €	55 €	6 €	70 €	14 €
71-72	69 €	14 €	68 €	14 €	68 €	14 €
72-73	68 €	14 €	53 €	6 €	68 €	14 €
73-74	67 €	13 €	52 €	6 €	67 €	13 €
74-75	66 €	12 €	52 €	6 €	67 €	12 €
75-76	67 €	11 €	52 €	6 €	66 €	11 €

## MiChE

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

	SLI					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
76-77	67 €	11 €	53 €	6 €	67 €	11 €
77-78	69 €	11 €	54 €	7 €	69 €	11 €
85-86	78 €	12 €	62 €	7 €	77 €	12 €
86-87	97 €	17 €	76 €	9 €	97 €	16 €
87	96 €	20 €	96 €	20 €	95 €	19 €
87-88	89 €	15 €	69 €	8 €	88 €	15 €
88-89	96 €	17 €	74 €	9 €	96 €	17 €
89-90	95 €	14 €	75 €	9 €	95 €	14 €
90-91	44 €	9 €	60 €	9 €	24 €	9 €
91-92	70 €	9 €	63 €	9 €	37 €	9 €
92-93	90 €	10 €	90 €	9 €	52 €	9 €
93	78 €	9 €	69 €	9 €	77 €	9 €
93-94	95 €	13 €	75 €	9 €	94 €	13 €
94-95	146 €	9 €	47 €	9 €	200 €	9 €
96-97	42 €	5 €	39 €	5 €	27 €	5 €
98-99	68 €	12 €	53 €	6 €	68 €	12 €
99-100	61 €	11 €	48 €	6 €	61 €	11 €
100-101	62 €	10 €	49 €	6 €	62 €	10 €
101-102	67 €	11 €	52 €	6 €	67 €	11 €
102-103	69 €	11 €	53 €	7 €	68 €	11 €
103-104	69 €	11 €	54 €	7 €	69 €	11 €
104-105	70 €	13 €	54 €	6 €	70 €	13 €
105-106	72 €	13 €	56 €	7 €	72 €	13 €

Tab. 23 – Perdita media annua per le sezioni esaminate, SLI

	SLD					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
0-1	310 €	310 €	672 €	292 €	329 €	329 €
1-2	316 €	316 €	678 €	293 €	335 €	335 €
2-3	454 €	292 €	731 €	292 €	495 €	292 €
4	318 €	318 €	641 €	275 €	343 €	275 €
5	351 €	283 €	670 €	283 €	378 €	283 €
5-6	301 €	301 €	681 €	299 €	314 €	314 €
7-8	267 €	267 €	631 €	281 €	284 €	284 €
8-9	384 €	289 €	693 €	289 €	422 €	289 €
9-10	377 €	277 €	668 €	277 €	411 €	277 €
11-12	402 €	272 €	668 €	272 €	440 €	272 €
12-13	288 €	288 €	631 €	275 €	308 €	308 €
13-14	273 €	273 €	635 €	280 €	292 €	292 €
15	398 €	292 €	723 €	292 €	432 €	292 €
16-17	535 €	270 €	754 €	270 €	600 €	270 €
17-18	3'902 €	270 €	1'957 €	270 €	5'570 €	270 €

## MiChE

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

	SLD					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
20-21	3'024 €	339 €	1'207 €	339 €	3'414 €	339 €
21	563 €	368 €	844 €	368 €	618 €	368 €
22	2'351 €	294 €	1'002 €	294 €	2'504 €	294 €
23	458 €	299 €	716 €	299 €	502 €	299 €
24	435 €	290 €	702 €	290 €	483 €	290 €
25-26	446 €	313 €	747 €	313 €	488 €	313 €
26-27	336 €	336 €	766 €	347 €	362 €	362 €
27-28	314 €	314 €	701 €	315 €	337 €	337 €
28-29	295 €	295 €	655 €	292 €	319 €	319 €
30-31	238 €	238 €	634 €	298 €	245 €	245 €
31-32	194 €	194 €	591 €	290 €	194 €	194 €
32-33	96 €	96 €	89 €	89 €	99 €	99 €
33-34	204 €	204 €	580 €	282 €	207 €	207 €
34-35	241 €	241 €	626 €	295 €	249 €	249 €
35-36	173 €	173 €	623 €	322 €	170 €	170 €
36-37	166 €	166 €	585 €	301 €	163 €	163 €
37-38	678 €	283 €	750 €	283 €	1'003 €	283 €
38-39	165 €	165 €	547 €	277 €	162 €	162 €
40-41	180 €	180 €	534 €	262 €	182 €	182 €
41-42	4'846 €	262 €	1'745 €	262 €	6'738 €	262 €
42-43	314 €	314 €	658 €	293 €	341 €	341 €
43-44	358 €	282 €	655 €	282 €	387 €	282 €
44-45	2'283 €	281 €	1'019 €	281 €	2'458 €	281 €
45-46	347 €	262 €	614 €	262 €	380 €	262 €
46-47	253 €	253 €	577 €	262 €	270 €	270 €
47-48	210 €	210 €	555 €	262 €	216 €	216 €
48-49	73 €	73 €	317 €	317 €	227 €	227 €
50	88 €	88 €	571 €	303 €	78 €	78 €
51	179 €	179 €	620 €	324 €	177 €	177 €
52-53	182 €	182 €	741 €	400 €	177 €	177 €
53-54	225 €	225 €	628 €	309 €	229 €	229 €
55-56	177 €	177 €	522 €	262 €	178 €	178 €
56-57	205 €	205 €	541 €	262 €	211 €	211 €
57-58	320 €	262 €	591 €	262 €	349 €	262 €
58-59	160 €	160 €	511 €	262 €	159 €	159 €
59-60	147 €	147 €	553 €	295 €	142 €	142 €
60-61	150 €	150 €	565 €	301 €	145 €	145 €
61-62	82 €	82 €	593 €	308 €	102 €	102 €
62-63	134 €	134 €	586 €	323 €	128 €	128 €
63-64	159 €	159 €	624 €	334 €	154 €	154 €
64-65	221 €	221 €	672 €	337 €	223 €	223 €
65-66	239 €	239 €	684 €	337 €	244 €	244 €
66-67	291 €	291 €	686 €	321 €	309 €	309 €
67-68	155 €	155 €	583 €	309 €	151 €	151 €
68-69	208 €	208 €	619 €	309 €	209 €	209 €
69-70	251 €	251 €	656 €	316 €	259 €	259 €
70-71	133 €	133 €	591 €	328 €	126 €	126 €

## MiChE

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

	SLD					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
71-72	107 €	107 €	91 €	91 €	121 €	121 €
72-73	133 €	133 €	618 €	346 €	127 €	127 €
73-74	164 €	164 €	641 €	343 €	160 €	160 €
74-75	185 €	185 €	660 €	346 €	181 €	181 €
75-76	221 €	221 €	668 €	336 €	222 €	222 €
76-77	241 €	241 €	657 €	320 €	248 €	248 €
77-78	239 €	239 €	620 €	298 €	246 €	246 €
85-86	236 €	236 €	566 €	276 €	244 €	244 €
86-87	244 €	244 €	652 €	313 €	247 €	247 €
87	141 €	141 €	114 €	114 €	155 €	155 €
87-88	270 €	270 €	761 €	371 €	275 €	275 €
88-89	228 €	228 €	671 €	331 €	228 €	228 €
89-90	291 €	291 €	678 €	309 €	301 €	301 €
90-91	1'803 €	310 €	975 €	310 €	2'443 €	310 €
91-92	1'041 €	316 €	927 €	316 €	2'003 €	316 €
92-93	197 €	197 €	283 €	283 €	1'061 €	313 €
93	616 €	312 €	790 €	312 €	688 €	312 €
93-94	307 €	307 €	678 €	304 €	323 €	323 €
94-95	3'268 €	296 €	1'457 €	296 €	4'505 €	296 €
96-97	1'388 €	511 €	1'237 €	511 €	2'734 €	511 €
98-99	202 €	202 €	637 €	320 €	202 €	202 €
99-100	198 €	198 €	749 €	392 €	195 €	195 €
100-101	268 €	268 €	750 €	363 €	276 €	276 €
101-102	234 €	234 €	663 €	322 €	240 €	240 €
102-103	233 €	233 €	636 €	306 €	238 €	238 €
103-104	227 €	227 €	628 €	303 €	232 €	232 €
104-105	163 €	163 €	605 €	316 €	159 €	159 €
105-106	188 €	188 €	579 €	289 €	188 €	188 €

Tab. 24 – Perdita media annua per le sezioni esaminate, SLD

	SLV					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
0-1	379 €	379 €	868 €	385 €	405 €	405 €
1-2	387 €	387 €	876 €	386 €	414 €	414 €
2-3	591 €	385 €	947 €	385 €	646 €	385 €
4	403 €	403 €	844 €	367 €	439 €	367 €
5	447 €	376 €	878 €	376 €	489 €	376 €
5-6	364 €	364 €	877 €	392 €	383 €	383 €
7-8	332 €	332 €	827 €	373 €	356 €	356 €
8-9	496 €	382 €	905 €	382 €	552 €	382 €
9-10	491 €	369 €	879 €	369 €	543 €	369 €
11-12	537 €	364 €	882 €	364 €	589 €	364 €

## MiChE

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

	SLV					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
12-13	362 €	362 €	830 €	367 €	390 €	390 €
13-14	341 €	341 €	832 €	373 €	366 €	366 €
15	503 €	385 €	937 €	385 €	554 €	385 €
16-17	767 €	362 €	1'015 €	362 €	856 €	362 €
17-18	5'398 €	362 €	2'975 €	362 €	7'369 €	362 €
20-21	3'924 €	435 €	1'620 €	435 €	4'490 €	435 €
21	727 €	466 €	1'059 €	466 €	798 €	466 €
22	2'924 €	388 €	1'374 €	388 €	3'155 €	388 €
23	609 €	393 €	929 €	393 €	667 €	393 €
24	575 €	383 €	916 €	383 €	646 €	383 €
25-26	581 €	407 €	963 €	407 €	639 €	407 €
26-27	414 €	414 €	970 €	443 €	447 €	447 €
27-28	389 €	389 €	901 €	410 €	420 €	420 €
28-29	368 €	368 €	851 €	386 €	401 €	401 €
30-31	274 €	274 €	821 €	391 €	286 €	286 €
31-32	197 €	197 €	767 €	383 €	197 €	197 €
32-33	125 €	125 €	111 €	182 €	114 €	114 €
33-34	217 €	217 €	757 €	374 €	222 €	222 €
34-35	279 €	279 €	811 €	389 €	295 €	295 €
35-36	173 €	173 €	795 €	417 €	170 €	170 €
36-37	166 €	166 €	754 €	395 €	163 €	163 €
37-38	994 €	376 €	991 €	376 €	1'356 €	376 €
38-39	165 €	165 €	714 €	370 €	162 €	162 €
40-41	189 €	189 €	708 €	353 €	192 €	192 €
41-42	6'677 €	353 €	2'662 €	353 €	8'812 €	353 €
42-43	393 €	393 €	856 €	387 €	430 €	430 €
43-44	460 €	374 €	858 €	374 €	503 €	374 €
44-45	2'889 €	374 €	1'426 €	374 €	3'187 €	374 €
45-46	458 €	353 €	818 €	353 €	508 €	353 €
46-47	321 €	321 €	767 €	353 €	346 €	346 €
47-48	245 €	245 €	736 €	353 €	256 €	256 €
48-49	450 €	170 €	337 €	410 €	250 €	250 €
50	104 €	104 €	734 €	397 €	209 €	209 €
51	179 €	179 €	791 €	419 €	177 €	177 €
52-53	182 €	182 €	916 €	500 €	177 €	177 €
53-54	245 €	245 €	807 €	404 €	253 €	253 €
55-56	183 €	183 €	692 €	353 €	185 €	185 €
56-57	237 €	237 €	717 €	353 €	248 €	248 €
57-58	416 €	353 €	787 €	353 €	460 €	353 €
58-59	160 €	160 €	676 €	353 €	159 €	159 €
59-60	147 €	147 €	714 €	389 €	142 €	142 €
60-61	150 €	150 €	727 €	395 €	145 €	145 €
61-62	103 €	103 €	761 €	402 €	111 €	111 €
62-63	134 €	134 €	746 €	419 €	128 €	128 €
63-64	159 €	159 €	791 €	430 €	154 €	154 €
64-65	232 €	232 €	852 €	433 €	235 €	235 €
65-66	262 €	262 €	867 €	433 €	271 €	271 €

## MiChE

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

	SLV					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
66-67	356 €	356 €	878 €	416 €	382 €	382 €
67-68	155 €	155 €	747 €	403 €	151 €	151 €
68-69	216 €	216 €	795 €	404 €	218 €	218 €
69-70	290 €	290 €	841 €	411 €	303 €	303 €
70-71	133 €	133 €	750 €	423 €	126 €	126 €
71-72	113 €	113 €	113 €	187 €	173 €	173 €
72-73	133 €	133 €	779 €	442 €	127 €	127 €
73-74	164 €	164 €	809 €	439 €	160 €	160 €
74-75	185 €	185 €	833 €	443 €	181 €	181 €
75-76	232 €	232 €	848 €	432 €	234 €	234 €
76-77	271 €	271 €	840 €	416 €	283 €	283 €
77-78	275 €	275 €	802 €	392 €	287 €	287 €
85-86	272 €	272 €	739 €	368 €	287 €	287 €
86-87	258 €	258 €	831 €	408 €	262 €	262 €
87	171 €	171 €	211 €	211 €	169 €	169 €
87-88	288 €	288 €	948 €	468 €	296 €	296 €
88-89	228 €	228 €	847 €	427 €	228 €	228 €
89-90	343 €	343 €	867 €	403 €	362 €	362 €
90-91	2'262 €	404 €	1'300 €	404 €	2'956 €	404 €
91-92	1'419 €	411 €	1'217 €	411 €	2'442 €	411 €
92-93	807 €	291 €	833 €	378 €	1'743 €	407 €
93	847 €	406 €	1'015 €	406 €	943 €	406 €
93-94	371 €	371 €	870 €	398 €	395 €	395 €
94-95	4'500 €	390 €	2'090 €	390 €	5'962 €	390 €
96-97	1'794 €	618 €	1'490 €	618 €	3'202 €	618 €
98-99	203 €	203 €	814 €	415 €	203 €	203 €
99-100	198 €	198 €	930 €	491 €	195 €	195 €
100-101	304 €	304 €	943 €	461 €	318 €	318 €
101-102	258 €	258 €	848 €	417 €	269 €	269 €
102-103	261 €	261 €	820 €	400 €	270 €	270 €
103-104	252 €	252 €	810 €	396 €	260 €	260 €
104-105	163 €	163 €	774 €	411 €	159 €	159 €
105-106	188 €	188 €	752 €	382 €	188 €	188 €

Tab. 25 – Perdita media annua per le sezioni esaminate, SLV

	SLC					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
0-1	479 €	479 €	1'176 €	530 €	518 €	518 €
1-2	490 €	490 €	1'186 €	532 €	531 €	531 €
2-3	814 €	531 €	1'287 €	531 €	917 €	531 €
4	536 €	536 €	1'164 €	513 €	593 €	513 €
5	601 €	521 €	1'204 €	521 €	672 €	521 €

## MiChE

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

	SLC					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
5-6	454 €	454 €	1'182 €	538 €	483 €	483 €
7-8	426 €	426 €	1'134 €	519 €	461 €	461 €
8-9	678 €	528 €	1'237 €	528 €	775 €	528 €
9-10	677 €	515 €	1'212 €	515 €	769 €	515 €
11-12	751 €	509 €	1'221 €	509 €	849 €	509 €
12-13	473 €	473 €	1'144 €	513 €	516 €	516 €
13-14	439 €	439 €	1'142 €	518 €	477 €	477 €
15	672 €	531 €	1'273 €	531 €	759 €	531 €
16-17	1'098 €	508 €	1'381 €	508 €	1'284 €	508 €
17-18	7'008 €	508 €	3'445 €	508 €	9'719 €	508 €
20-21	4'927 €	581 €	2'013 €	581 €	5'892 €	581 €
21	968 €	611 €	1'380 €	611 €	1'097 €	611 €
22	3'641 €	534 €	1'762 €	534 €	4'131 €	534 €
23	840 €	539 €	1'260 €	539 €	954 €	539 €
24	802 €	529 €	1'251 €	529 €	921 €	529 €
25-26	791 €	553 €	1'294 €	553 €	893 €	553 €
26-27	523 €	523 €	1'277 €	589 €	571 €	571 €
27-28	498 €	498 €	1'208 €	555 €	544 €	544 €
28-29	475 €	475 €	1'158 €	531 €	524 €	524 €
30-31	360 €	360 €	1'111 €	537 €	373 €	373 €
31-32	283 €	283 €	1'043 €	528 €	283 €	283 €
32-33	230 €	230 €	399 €	328 €	219 €	219 €
33-34	304 €	304 €	1'035 €	520 €	308 €	308 €
34-35	365 €	365 €	1'099 €	535 €	381 €	381 €
35-36	259 €	259 €	1'057 €	563 €	256 €	256 €
36-37	252 €	252 €	1'016 €	541 €	249 €	249 €
37-38	1'423 €	522 €	1'351 €	522 €	1'912 €	522 €
38-39	251 €	251 €	978 €	515 €	248 €	248 €
40-41	275 €	275 €	984 €	499 €	278 €	278 €
41-42	8'540 €	499 €	3'123 €	499 €	11'740 €	499 €
42-43	512 €	512 €	1'163 €	532 €	568 €	568 €
43-44	622 €	520 €	1'177 €	520 €	697 €	520 €
44-45	3'642 €	519 €	1'821 €	519 €	4'247 €	519 €
45-46	641 €	499 €	1'142 €	499 €	731 €	499 €
46-47	421 €	421 €	1'069 €	499 €	459 €	459 €
47-48	331 €	331 €	1'025 €	499 €	342 €	342 €
48-49	590 €	590 €	832 €	556 €	569 €	395 €
50	201 €	201 €	987 €	543 €	314 €	314 €
51	265 €	265 €	1'051 €	565 €	263 €	263 €
52-53	268 €	268 €	1'172 €	646 €	263 €	263 €
53-54	331 €	331 €	1'083 €	549 €	339 €	339 €
55-56	269 €	269 €	962 €	499 €	271 €	271 €
56-57	323 €	323 €	998 €	499 €	334 €	334 €
57-58	570 €	499 €	1'097 €	499 €	647 €	499 €
58-59	247 €	247 €	940 €	499 €	246 €	246 €
59-60	233 €	233 €	964 €	535 €	228 €	228 €
60-61	236 €	236 €	978 €	541 €	231 €	231 €

## MiChE

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

	SLC					
	Seismic PAM		Landslide PAM		Seismic + landslide PAM	
	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]	Ante-Operam [€/ml]	Post-operam [€/ml]
61-62	202 €	202 €	1'021 €	548 €	205 €	205 €
62-63	220 €	220 €	990 €	564 €	214 €	214 €
63-64	245 €	245 €	1'045 €	576 €	240 €	240 €
64-65	318 €	318 €	1'125 €	579 €	321 €	321 €
65-66	348 €	348 €	1'146 €	579 €	357 €	357 €
66-67	448 €	448 €	1'172 €	562 €	485 €	485 €
67-68	242 €	242 €	1'001 €	549 €	237 €	237 €
68-69	302 €	302 €	1'067 €	549 €	304 €	304 €
69-70	376 €	376 €	1'126 €	556 €	389 €	389 €
70-71	219 €	219 €	993 €	569 €	212 €	212 €
71-72	214 €	214 €	437 €	333 €	268 €	268 €
72-73	220 €	220 €	1'022 €	588 €	213 €	213 €
73-74	250 €	250 €	1'064 €	585 €	246 €	246 €
74-75	271 €	271 €	1'094 €	589 €	267 €	267 €
75-76	318 €	318 €	1'120 €	577 €	320 €	320 €
76-77	357 €	357 €	1'121 €	561 €	369 €	369 €
77-78	361 €	361 €	1'084 €	537 €	373 €	373 €
85-86	358 €	358 €	1'013 €	514 €	373 €	373 €
86-87	344 €	344 €	1'107 €	553 €	348 €	348 €
87	276 €	276 €	297 €	357 €	269 €	269 €
87-88	374 €	374 €	1'227 €	614 €	382 €	382 €
88-89	314 €	314 €	1'117 €	572 €	314 €	314 €
89-90	429 €	429 €	1'159 €	549 €	448 €	448 €
90-91	2'843 €	550 €	1'679 €	550 €	3'729 €	550 €
91-92	1'917 €	556 €	1'587 €	556 €	3'095 €	556 €
92-93	1'620 €	437 €	1'156 €	523 €	2'829 €	552 €
93	1'172 €	552 €	1'362 €	552 €	1'362 €	552 €
93-94	463 €	463 €	1'167 €	544 €	499 €	499 €
94-95	5'795 €	535 €	2'519 €	535 €	7'825 €	535 €
96-97	2'271 €	764 €	1'834 €	764 €	3'824 €	764 €
98-99	289 €	289 €	1'086 €	560 €	289 €	289 €
99-100	284 €	284 €	1'195 €	637 €	282 €	282 €
100-101	390 €	390 €	1'229 €	606 €	404 €	404 €
101-102	344 €	344 €	1'130 €	563 €	355 €	355 €
102-103	347 €	347 €	1'104 €	546 €	356 €	356 €
103-104	338 €	338 €	1'092 €	542 €	346 €	346 €
104-105	249 €	249 €	1'033 €	556 €	245 €	245 €
105-106	274 €	274 €	1'022 €	528 €	274 €	274 €

Tab. 26 – Perdita media annua per le sezioni esaminate, SLC

## MiChE

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

### 6.5.1 Estensione dei dati su macro-scala

Il framework descritto consente la determinazione della Perdita Media Annuale a scala urbana.

Questo è possibile attraverso (Fig. 92):

- L'extrapolazione degli indici di rischio per tutte le sezioni sulla base della loro geometria. L'extrapolazione si realizza per mezzo dei coefficienti di correlazione  $\xi_i$  per i vari stati limite esaminati;
- La specifica delle condizioni al contorno per tutte le sezioni attraverso i coefficienti di partecipazione  $\Psi_i$ .

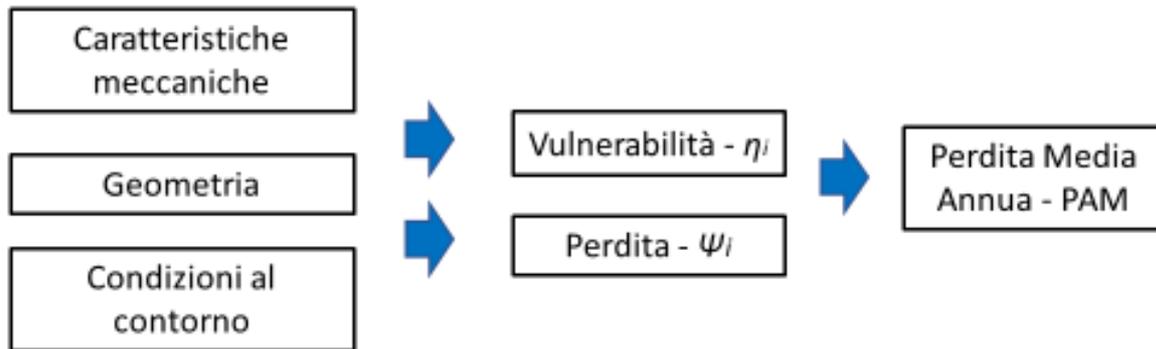


Fig. 92 - Calcolo della PAM.

In questo risulta possibile ottenere la perdita media annua relativa al tratto compreso tra due sezioni contigue ovvero su meso-scala (Eq. 28).

$$PAM_{l(i,i+1)} \quad (28)$$

E dalla sommatoria ottenere la PAM complessiva ovvero su macro-scala (Eq. 29).

$$PAM = \sum_i PAM_{l(i,i+1)} \quad (29)$$

Il risultato per il caso delle mura storiche di Volterra è qui riassunto (Tab. 27 - Tab. 29).

Rischio Sismico		
PAM ante-operam	PAM post-operam	Risparmio medio annuo
2,217,594 €	991,701 €	1,225,893 €

Tab. 27 - Calcolo della PAM per le mura storiche di Volterra. Rischio sismico.

## MiChE

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

<b>Rischio Frana</b>		
<b>PAM ante-operam</b>	<b>PAM post-operam</b>	<b>Risparmio medio annuo</b>
2,984,392 €	1,308,774 €	1,675,618 €

*Tab. 28 - Calcolo della PAM per le mura storiche di Volterra. Rischio frana.*

<b>Rischio combinato (Sisma + frana)</b>		
<b>PAM ante-operam</b>	<b>PAM post-operam</b>	<b>Risparmio medio annuo</b>
2,723,574 €	1,012,629 €	1,710,945 €

*Tab. 29 - Calcolo della PAM per le mura storiche di Volterra. Rischio combinato.*

**MiChE**

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

## 7 Mitigazione del rischio

La mitigazione del rischio sulle mura urbane contempla interventi di messa in sicurezza delle stesse a difesa delle strutture ed infrastrutture limitrofe.

Sono qui esaminati tre tipi di interventi, tutti miranti all'incremento del fattore di sicurezza dell'opera.

- Interventi sulla struttura in muratura;
- Interventi sul terreno;
- Interventi per la riduzione delle azioni.

Detti interventi sono quantificati nel precedente paragrafo nella valutazione della PAM nella situazione *post-operam*. Qui sono illustrati nel dettaglio.

### 7.1 Interventi su muratura.

Lato muratura si prevedono le seguenti tipologie di intervento:

- Rifacimento di porzioni di muratura attraverso il sistema cucì scuci. Questo rinforzo è da eseguirsi in caso di locale ammaloramento di una porzione di muratura.
- Inserimento di tiranti e capi-chiave. L'intervento è indicato nel caso di situazioni critiche nei confronti del ribaltamento o dello scorrimento.

### 7.2 Interventi su terreno.

Gli interventi su terreno consistono in:

- Rinforzo in fondazione attraverso l'inserimento di pali e micropali. Questo intervento è specifico laddove si ravvisino criticità lato terreno, in particolare in termini di capacità portante.;
- Risagomatura del pendio. La risagomatura del pendio mira a sanare eventuali situazioni instabili dovute alla pendenza del terreno di monte o di valle. Questa può essere eseguita mediante opere in terra ovvero mediante interventi di ingegneria naturalistica.

La presenza di pendii a monte o a valle delle mura storiche è un elemento ricorrente. Per questa ragione sono eseguite analisi parametriche al variare della pendenza di valle del terreno. Si riportano di seguito i risultati per il rischio frana e per il rischio sismico.

## MiChE

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

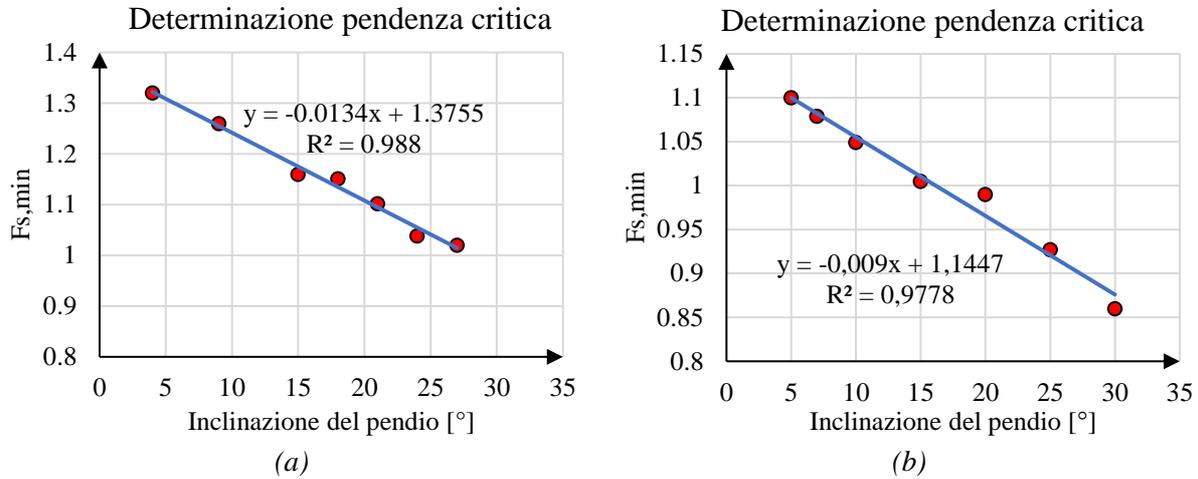


Fig. 93 - Determinazione della pendenza critica per la sezione 92-93 nel caso di rischio sismico (a) e nel caso di rischio frana (b). Dai grafici si deduce il valore di pendenza critica che fornisce un contributo unitario.

Nel diagramma che segue è indicata la distribuzione percentuale delle sezioni indagate in relazione alla pendenza di valle. Da questo si evince che buona parte delle sezioni si trovano in una situazione di pendenza critica.

### PENDENZE A VALLE

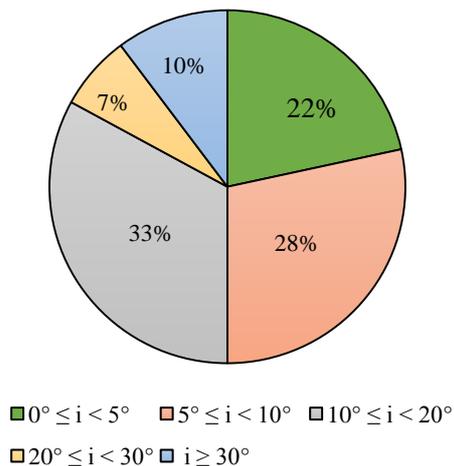


Fig. 94 - Distribuzione della pendenza di valle per le sezioni indagate.

### 7.3 Interventi per la riduzione delle azioni.

Nell'ambito della riduzione delle azioni si evidenzia in particolare l'inserimento di dreni. Questi consentono di mitigare l'effetto di spinta e l'effetto dilavante dovuto all'accumulo di acque.



## **MiChE**

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

Questo tipo di intervento risulta sempre opportuno nel caso le mura svolgano anche il ruolo di sostegno.

Non tutte le sezioni si presentano in condizioni critiche, il presente contributo consente di classificare le sezioni individuando quelle maggiormente bisognose di intervento e di ottimizzare quindi le risorse economiche.

**MiChE**

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

## 8 Conclusioni

Il presente lavoro, redatto nell'ambito del PRIN 2015 (PI - Prof. Mario De Stefano - UniFI), ha consentito ottenere un framework generale per l'analisi di rischio delle mura storiche urbane. Questo strumento è basato su una procedura semplice e ad alto rendimento che permette di ottenere indicazioni di notevole interesse per la Pubblica Autorità.

Quanto sopra è stato fatto definendo quattro stati limite specifici per le mura storiche urbane. Il framework è composto da tre fasi: un'attività di rilievo a tutto campo; analisi di vulnerabilità sezionali ed analisi di rischio.

L'attività di rilievo consente l'individuazione delle sezioni maggiormente rappresentative del complesso. La vulnerabilità di queste viene valutata attraverso i metodi dell'analisi limite e degli elementi finiti. Risulta così possibile individuare, per i quattro Stati Limite definiti, i corrispondenti indici di rischio. Detti indici vengono estesi all'intera cinta muraria sulla base delle condizioni geometriche. Per tenere conto delle condizioni al contorno si impiegano coefficienti di partecipazione. Questo consente di estendere i risultati delle analisi di vulnerabilità dalla scala sezionale (micro-scala) a scala globale (urbana). Quindi, determinando la perdita relativa a vari scenari di danno, viene calcolata la Perdita Media Annuale (PAM).

Detto strumento è di carattere generale e può essere applicato al caso di mura urbane. In questo report è applicato al caso delle mura storiche di Volterra calcolando la PAM per la sezione oggetto del crollo del 2014 (quella meglio conosciuta) ed alcune sezioni salienti ed illustrando la modalità di calcolo della stessa.

Sono alla fine individuate misure di mitigazione del rischio a basso costo ed impatto ed indicate come interventi tipo da applicare per ridurre il rischio. Il risparmio medio annuo è uno dei parametri numerici suggeriti per l'individuazione dell'efficacia degli interventi.



## MiChE

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

# 9 Ringraziamenti

Si ringrazia il MIUR per il supporto economico che ha portato alla redazione delle seguenti pubblicazioni:

*(pubblicate)*

1. Puppio, M. L. and Giresini, L. (2019) “*Estimation of tensile mechanical parameters of existing masonry through the analysis of the collapse of Volterra’s urban walls*”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 13(49), pp. 725-738. doi: 10.3221/IGF-ESIS.49.65.

*(in corso di redazione)*

1. Vagaggini E., Puppio M.L., Giresini L., Sassu M., “*Vulnerability of Historical Urban Walls. The case of Volterra*”.
2. Puppio M.L., Giresini L., Sassu M., “*Risk analysis and mitigation of Historical Urban Walls*”.

**MiChE**

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

## 10 Bibliografia

- [1] H. Neteler, M. Mitasova, “Open Source GIS: A GRASS GIS Approach,” *The International Series in Engineering and Computer Science*, vol. 773, 2008.
- [2] E. Lenticchia and E. Coïsson, “The use of GIS for the application of the phenomenological approach to the seismic risk analysis: The case of the Italian fortified architecture,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 42, no. 5W1, pp. 39–46, 2017.
- [3] L. Montrasio and R. Valentino, “Modelling Rainfall-induced Shallow Landslides at Different Scales Using SLIP - Part II,” *Procedia Eng.*, vol. 158, pp. 482–486, 2016.
- [4] R. Valentino, C. Meisina, L. Montrasio, G. L. Losi, and D. Zizioli, “Predictive Power Evaluation of a Physically Based Model for Shallow Landslides in the Area of Oltrepò Pavese, Northern Italy,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 783–805, 2014.
- [5] L. Schilirò, L. Montrasio, and G. Scarascia Mugnozza, “Prediction of shallow landslide occurrence: Validation of a physically-based approach through a real case study,” *Sci. Total Environ.*, vol. 569–570, pp. 134–144, 2016.
- [6] L. Montrasio and R. Valentino, “Experimental analysis and modelling of shallow landslides,” *Landslides*, vol. 4, no. 3, pp. 291–296, 2007.
- [7] AA. VV., *Linee seganatrici di probabilità pluviometrica*. Pisa: PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI - DIPARTIMENTO PER I SERVIZI TECNICI NAZIONALI, 2006, p. 228.
- [8] S. Franceschini, “Analisi critica di modelli previsionali per le frane in Emilia Romagna,” University of Bologna, 2012.
- [9] G. L. Losi, “Modellazione spazio-temporale dei fenomeni di soil slip: dalla scala di pendio alla scala territoriale,” Università degli Studi di Parma, 2012.
- [10] D. Fredlund and H. Rahardjo, “Soil mechanics for unsaturated soils,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 7, pp. 449–450, 1993.
- [11] L. Montrasio and R. Valentino, “A model for triggering mechanisms of shallow landslides,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 1149–1159, 2008.
- [12] L. Montrasio, R. Valentino, and A. Terrone, “Application of the SLIP Model,” *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 9, no. December, pp. 206–213, 2014.

## MiChE

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

- [13] L. Montrasio, R. Valentino, and G. L. Losi, “Rainfall-induced shallow landslides: A model for the triggering mechanism of some case studies in Northern Italy,” *Landslides*, vol. 6, no. 3, pp. 241–251, 2009.
- [14] Y. Yoshida, J. Kuwano, and R. Kuwano, “Effects of Saturation on Shear Strength of Soils,” *Soils Found.*, vol. 31, no. 1, pp. 181–186, 1991.
- [15] K. Farooq, J. D. Rogers, and M. F. Ahmed, “Effect of Densification on the Shear Strength of Landslide Material : A Case Study from Salt Range , Pakistan,” *Earth Sci. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 113–125, 2015.
- [16] 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.
- [17] Leoni *et al.*, “Seismic assessment of stratified defensive walls with rubble stone infill,” *XVI Convegno ANIDIS L’Aquila 2015*, no. I, 2015.
- [18] G. Leoni, A. Zona, Q. Piattoni, and A. Meschini, “Assessment of seismic vulnerability of historical defensive walls,” in *COMPDYN 2015 - 5th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, no. May, p. 16.
- [19] P. Busdraghi ; F. Veneri; V. Iampieri, “Senigallia historic town walls : materials and stability analyses,” *Ital. J. Eng. Geol. Environ.*, vol. 2, pp. 67–85, 2017.
- [20] M. L. Puppio and L. Giresini, “Estimation of tensile mechanical parameters of existing masonry through the analysis of the collapse of Volterra’s urban walls,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 13, no. 49, pp. 725–738, 2019.
- [21] L. Borselli, “SSAP2010 Slope Stability Analysis Program, Manuale di Riferimento,” 2018.
- [22] P. Fajfar, “A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design,” *Earthq. Spectra*, vol. 16, pp. 573–592, 2000.
- [23] M. Lucchesi, C. Padovani, G. Pasquinelli, and N. Zani, “Static analysis of masonry vaults, constitutive model and numerical analysis,” *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 2, no. 2, pp. 221–244, 2007.
- [24] D.M. 17/01/2018, “Aggiornamento delle ‘Norme Tecniche per le Costruzioni’ (in italian).” 2018.



## **MiChE**

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

- [25] E. Vagaggini, “Vulnerabilità di mura storiche urbane: il rischio frana perle mura di Volterra,” 2019.
- [26] E. Cosenza *et al.*, *The Italian guidelines for seismic risk classification of constructions: technical principles and validation*, vol. 16, no. 12. Springer Netherlands, 2018.
- [27] F. Braga, A. Dell’Asta, and F. Gara, “XV Convegno ANIDIS L ’ Ingegneria Sismica in Italia,” in *L ’ Ingegneria Sismica in Italia*, 2019, p. 3248.
- [28] T. Rossetto, I. Ioannou, and D. N. Grant, “Existing Empirical Fragility and Vulnerability Relationships: Compendium and Guide for Selection,” *GEM Tech. Rep.*, vol. 01, p. 77, 2015.
- [29] G. Passera, “Numerical Analysis of a Masonry Retaining Wall: The Case of Volterra’s Urban Walls,” Università di Pisa, Univerisity of Bath, 2018.
- [30] OPCM, “Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.” *Gazzetta Ufficiale*, 8 maggio 2003, n.105, 2003.



## MiChE

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

# 11 Allegato

Puppio, M. L. and Giresini, L. (2019) “*Estimation of tensile mechanical parameters of existing masonry through the analysis of the collapse of Volterra’s urban walls*”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 13(49), pp. 725-738. doi: 10.3221/IGF-ESIS.49.65.