

Aerial photo of Poggioreale in the aftermath of the 1968 Earthquake

## Poggioreale, How Are You? Interpretation of Vulnerabilities and Mitigation Strategies

Francesco Cannizzaro, University of Catania

## 1. Conservation status analysis

extended to the **entire ancient centre**

## 2. Criticalities, intervention criteria and cost estimation

**blocks' facades facing the main roads** of the ancient centre

## 3. Security and conservation operational program on a part of the urban fabric and pilot project

Guidelines for the **entire ancient centre** and selected blocks



## 2. CRITICALITIES AND INTERVENTION CRITERIA



## 2. CRITICALITIES AND INTERVENTION CRITERIA

**Construction features and state of preservation**

STRUTTURE IN ELEVAZIONE		
in pianta	in alzato	
	/	muri non rilevabili
		muri non più esistenti
		muri di chiusura di strade

Wooden roof partially collapsed  
▲ [1]

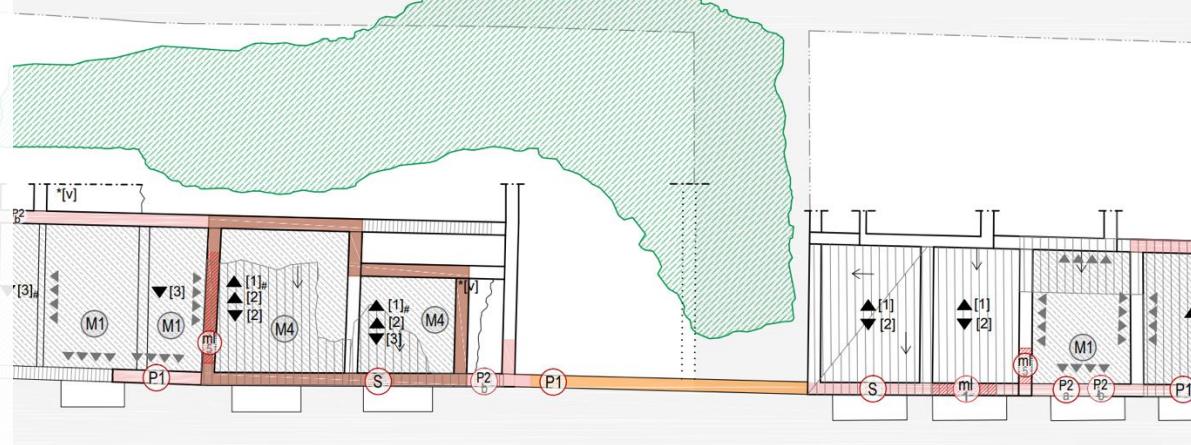
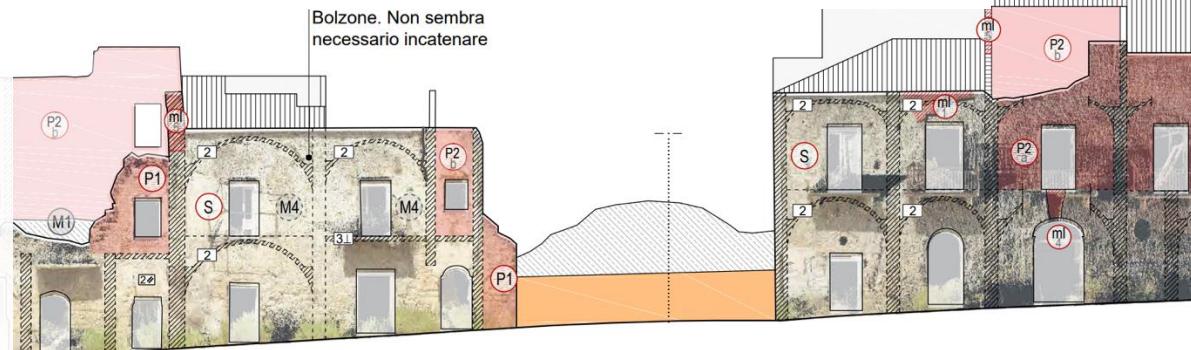
Jack-arch floor  
▼ [4]

ELEMENTI AL LIVELLO DEL SUOLO		
in pianta	in alzato	
		vegetazione arborea spontanea
	/	spazi aperti interni agli isolati (giardini, corti, pertinenze)

Wooden roof partially collapsed  
▲ [1]

Masonry vault  
▼ [2]

ORIZZONTAMENTI E COPERTURE		
in pianta	in alzato	
▲	/	orizzontamenti di copertura
▼	/	orizzontamenti di calpestio
#	#	orizzontamenti in parte crollati
/	⊥	tessitura ortogonale alla facciata
/	//	tessitura parallela alla facciata
[1]		legno
[2]		volta muraria
[3]		ferro e laterizi
[4]		cemento armato

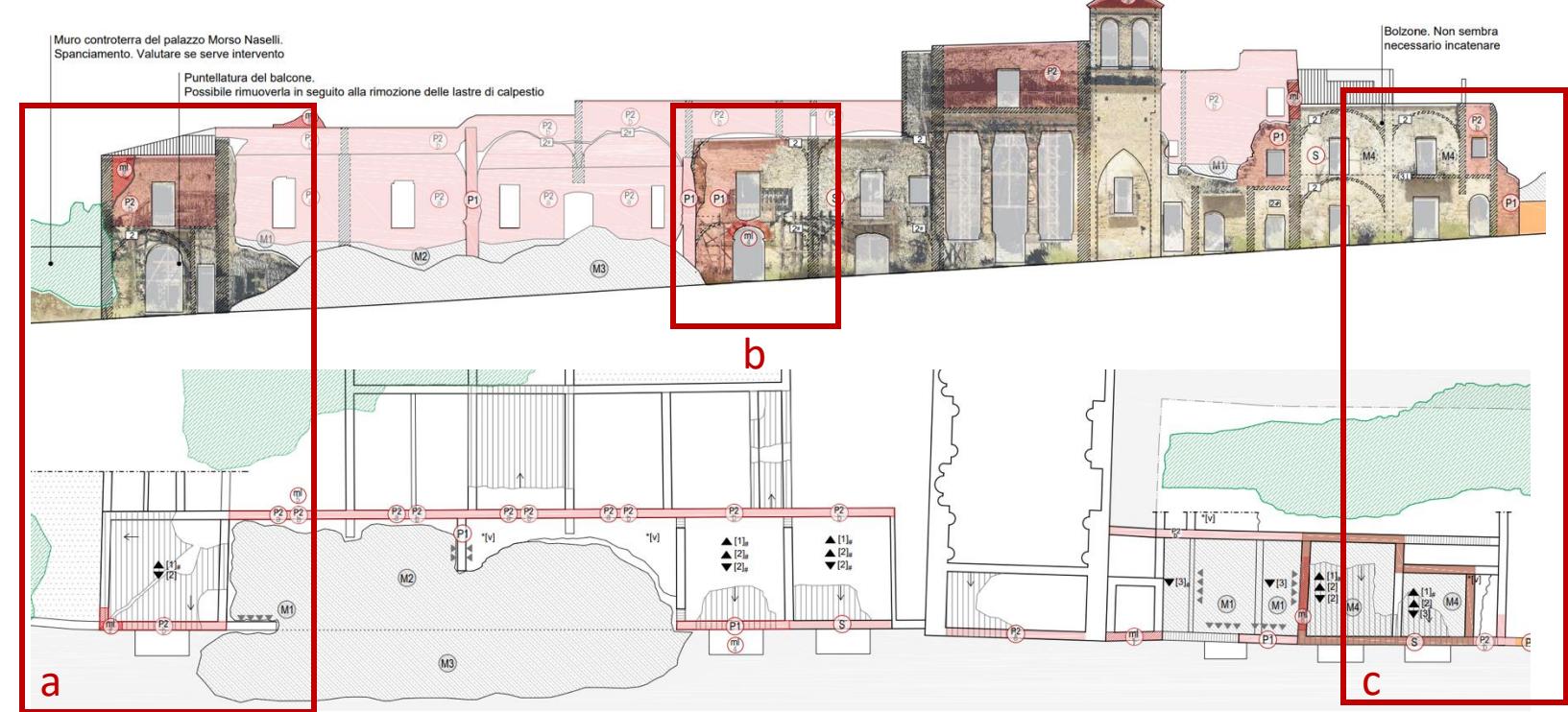
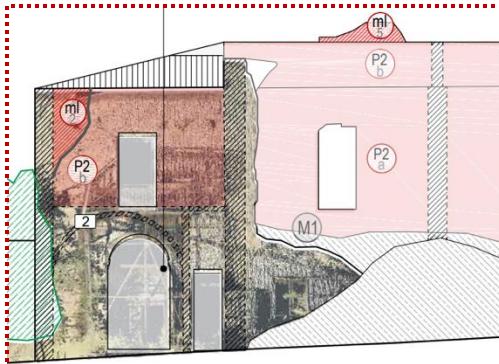
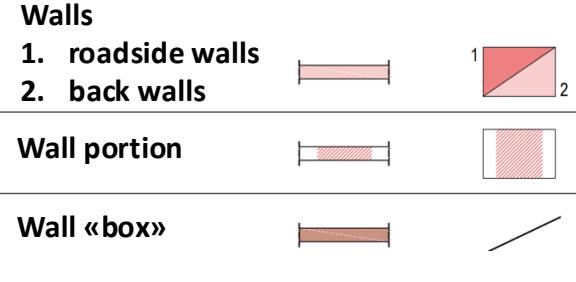


Simbologia generale

pareti e orizzontamenti retrostanti

## 2. CRITICALITIES

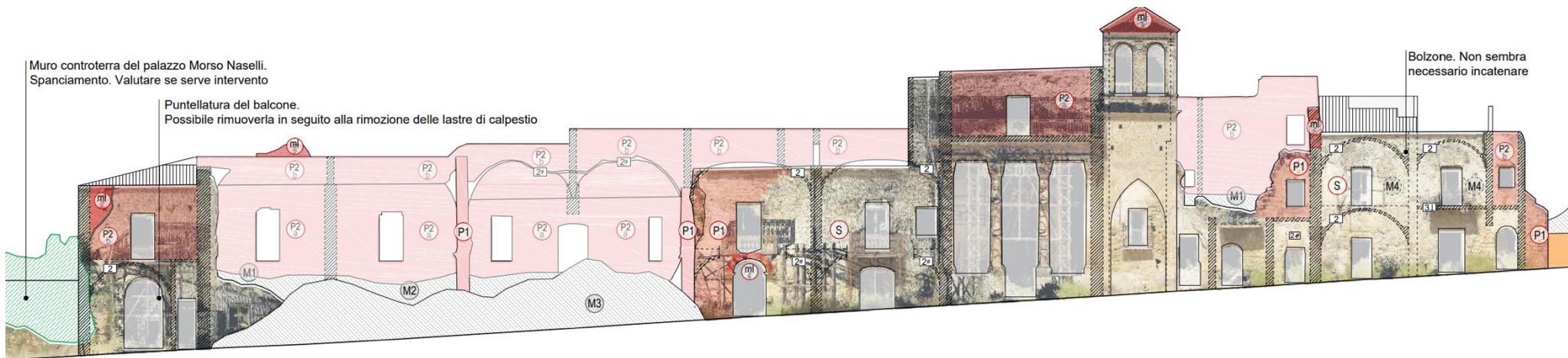
a  
b  
c



## 2. CRITICALITIES

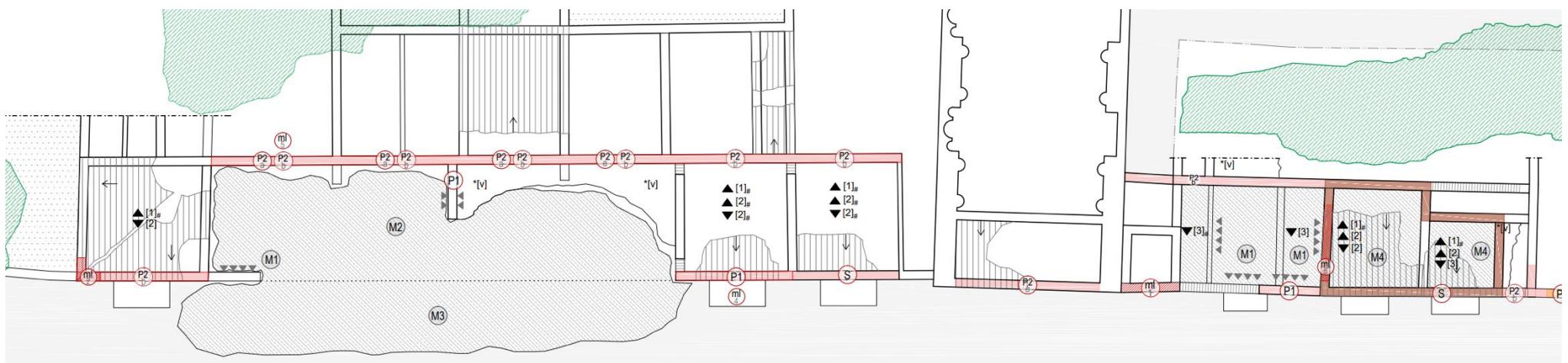
P

Potential **walls'**  
overturning collapses



ml

Potential **local**  
collapses (portion of  
the wall)



M

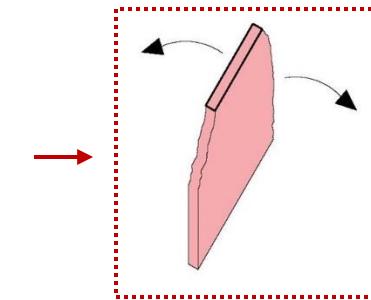
Criticalities due to  
rubble

## 2. CRITICALITIES: POTENTIAL WALL OVERTURNING

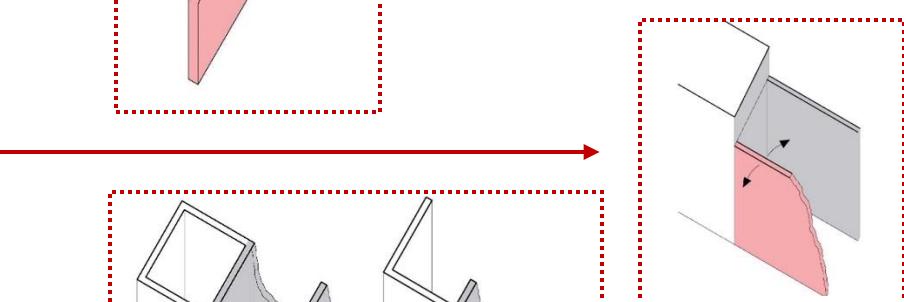
Decreasing vulnerability

SU PARETI MURARIE		
	parete su strada	parete interna
P0		
Parete isolata priva di pareti ortogonali su entrambi i lati. <i>Possibile ribaltamento fuori piano, nei due versi</i>		
P1		
Parete a bandiera priva di pareti ortogonali a una sola estremità. <i>Possibile ribaltamento parziale fuori piano, nei due versi</i>		
P2		
Parete con almeno due pareti ortogonali retrostanti (non ammorate o lesionate). P2a - le pareti retrostanti appartengono a una cellula chiusa P2b - le pareti retrostanti sono isolate <i>Possibile ribaltamento fuori piano solo verso l'esterno</i>		
P3		
Parete con pareti ortogonali retrostanti e antistanti, anche incomplete (non ammorate o lesionate). <i>Ribaltamento fuori piano impedito</i>		
S		
Cellula muraria integra per la quale si può ipotizzare un comportamento scatolare. <i>Ribaltamento fuori piano impedito</i>		

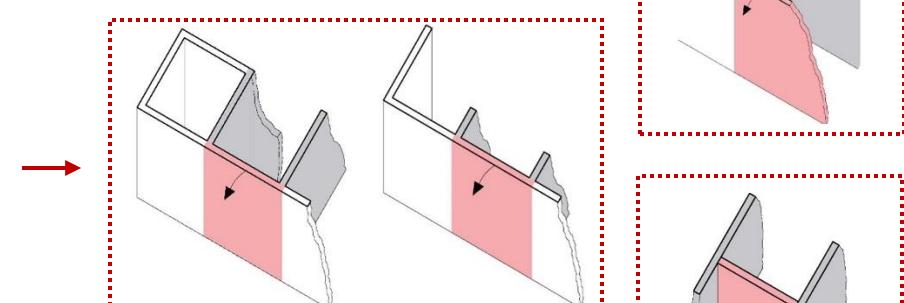
→ isolated wall without orthogonal walls on both sides



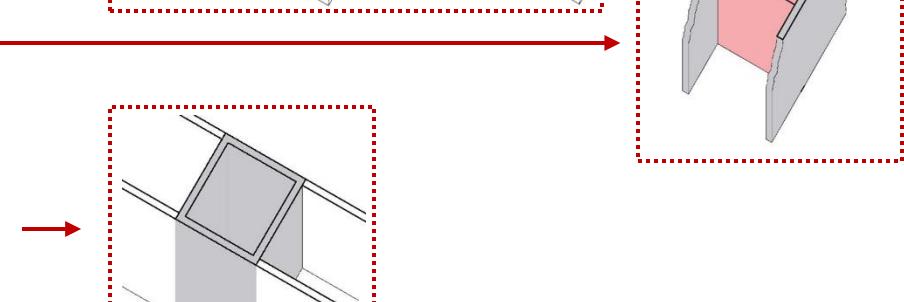
→ "flag wall" without orthogonal walls on one of its ends



→ wall with at least two orthogonal walls behind it



→ wall with orthogonal walls on both sides

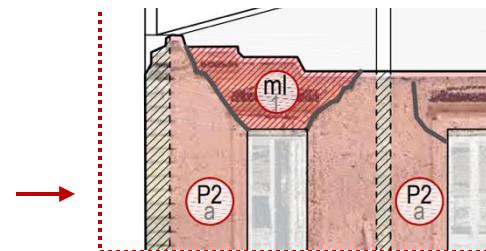


→ Undamaged wall cell

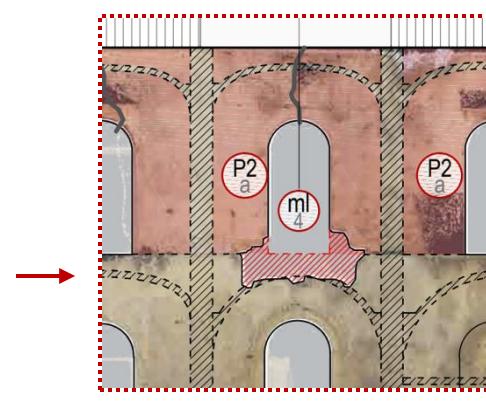
## 2. CRITICALITIES: POSSIBLE LOCAL COLLAPSES

SU PORZIONI MURARIE
<b>ml1</b> Porzioni murarie sommitali lesionate <i>Presenza di porzioni murarie sommitali con fessurazioni significative che inducono a temere il collasso locale delle porzioni stesse, soprattutto in corrispondenza degli architravi delle aperture.</i>
<b>ml2</b> Angolate lesionate <i>Presenza di significative fessurazioni che coinvolgono la zona d'angolo di una cellula con lesioni su entrambe le pareti convergenti.</i>
<b>ml3</b> Fuori Piombo <i>Presenza di pareti con difetto di verticalità o interessate da meccanismi di flessione orizzontale.</i>
<b>ml4</b> Aperture dissestate <i>Presenza di aperture con architravi metallici imbarcati o archivolti lesionati o con conci mancanti.</i>
<b>ml5</b> Porzioni murarie di qualità scadente o compromessa <i>Presenza di porzioni murarie sommitali di cattiva qualità o eccessivamente scompagnate.</i>

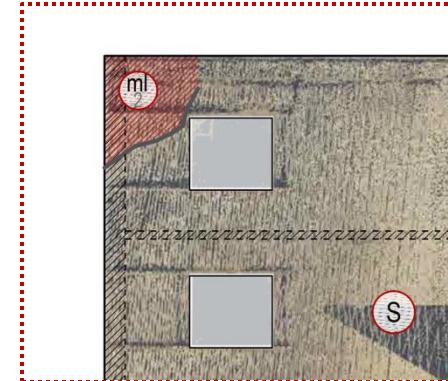
→ damaged masonry portions  
in the top of the wall



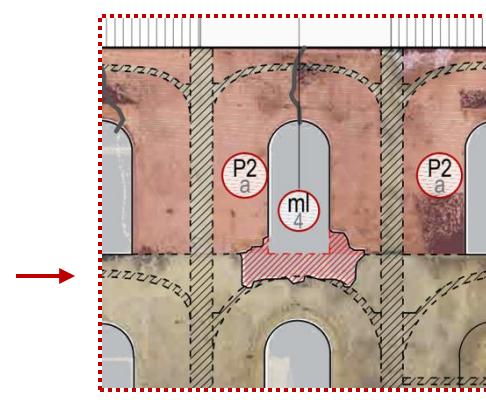
→ damaged intersection  
between walls



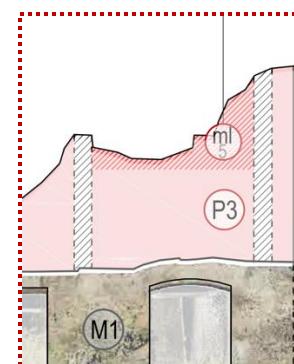
→ out of plumb



→ instable openings

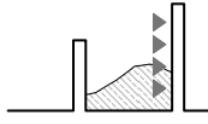
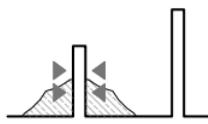
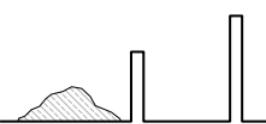


→ poor quality of the  
masonry texture



## 2. CRITICALITIES: RUBBLE

MACERIE	
<b>M1</b>	Macerie interne alla cellula muraria che esercitano una azione spingente sulla parete
<b>M2</b>	Macerie interne e/o esterne alla cellula muraria che esercitano una azione di contenimento della parete
<b>M3</b>	Macerie che ostacolano la percorrenza su strada
<b>M4</b>	Macerie interne alla cellula muraria che gravano sugli orizzontamenti

- internal rubble pushing outward the wall 
- internal rubble constraining the wall 
- rubble obstructing the passage on the road 
- internal rubble loading intermediate slabs or vaults 

### 3. Definition of interventions and cost estimation



### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

#### Criteria for interventions' identification

- 1.** Mitigate the seismic vulnerability conditions previously identified
- 2.** Interventions oriented to the elimination of the out-of-plane collapse mechanisms of masonry walls and the prevention of collapse (even local) that may affect the street
- 3.** Interventions that do not obstruct, not even partially, the area in front of the buildings, thus not limiting the use of the pedestrian street
- 4.** Conservative interventions aimed at avoiding the spread of cracks and existing damage
- 5.** Cost limitation

## 2. INTERVENTION CRITERIA

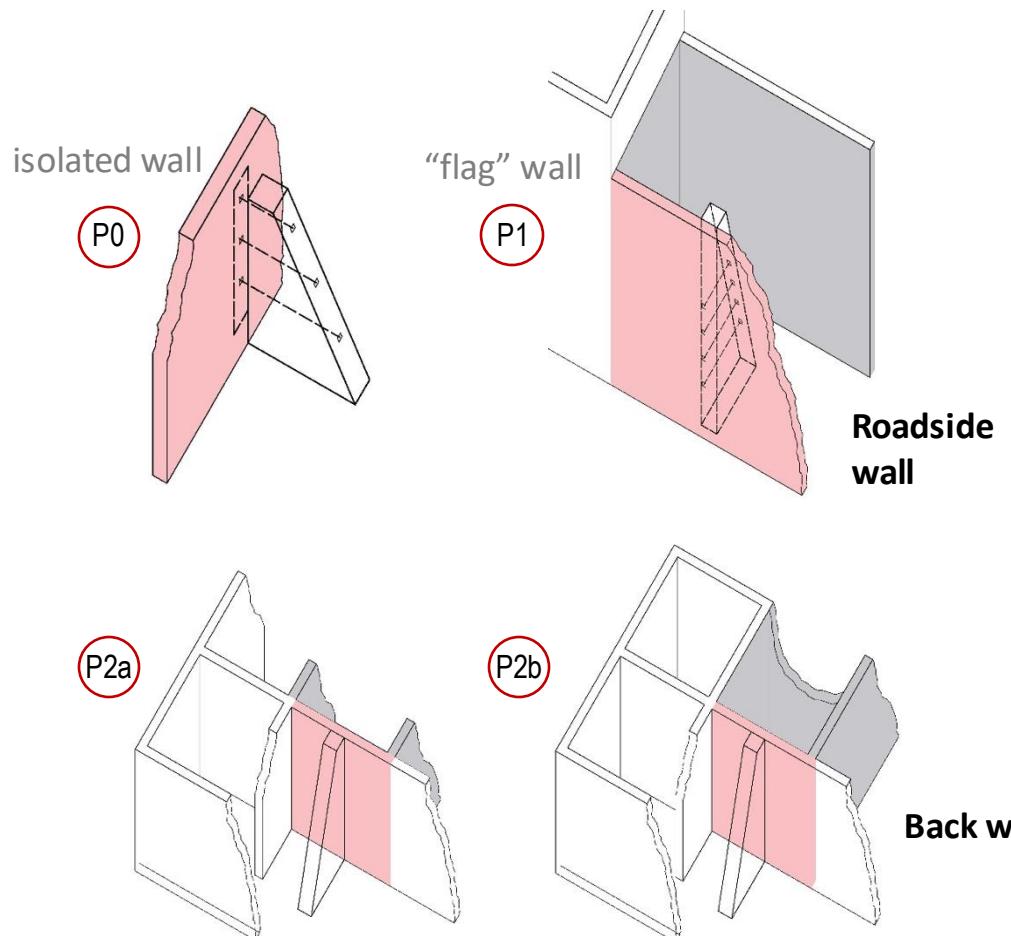
SU PARETI MURARIE		
P0  PARETE SU STRADA: C&T sul fronte verso l'interno PARETE INTERNA: C&T su uno dei due fronti oppure C (o T) su entrambi i fronti		
P1  PARETE SU STRADA: C&T sul fronte verso l'interno PARETE INTERNA: C&T su uno dei due fronti oppure C (o T) su entrambi i fronti		
P2  PARETE SU STRADA: T sul fronte verso l'interno (caso B controllo delle pareti ortogonal). PARETE INTERNA: T sul fronte verso l'interno, oppure C sul fronte verso strada		
P3		
S		
dispositivo di ritegno bilaterale dispositivo di ritegno monolaterale (Compressione o Trazione) dispositivo di ritegno monolaterale (Trazione)  dispositivo di ritegno monolaterale (Compressione)		

Insertion of either bilateral or monolateral devices to prevent the out-of-plane failure, according to the position of the walls and on the out-of-plane vulnerability typology

No need to insert any device. Check on the return walls to control their effectiveness to retain the façades in terms of masonry texture, which could require limited local interventions

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

#### Prevention of **walls'** potential collapse mechanisms



Vulnerability condition

P0 P1

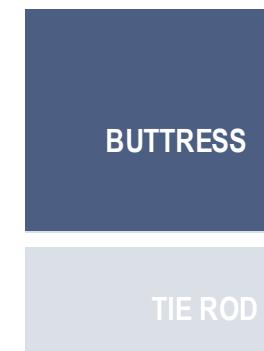
#### Intervention

##### Bilateral constraint



<b>NPV1Sperone 1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	5.486,67 €
<b>NPV2Sperone2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	15.509,00 €
<b>NPV3Telaio1p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	14.023,19 €
<b>NPV4Telaio2p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	34.655,35 €
<b>NPV5Incatenamento_aperture</b> Realizzazione di incatenamenti economici da realizzarsi tra aperture poste in corrispondenza tra parete fronte strada e parete retrostante mediante griglie ed elementi metallici	cad	1.062,53 €

##### Monolateral constraint

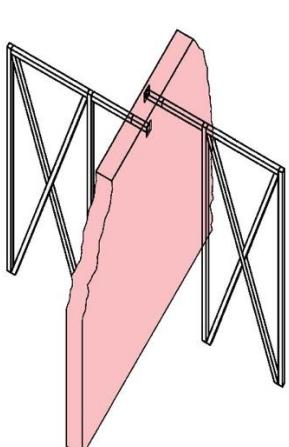


<b>NPV6SperoneMonolatero1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	2.675,30 €
<b>NPV7SperoneMonolatero2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	8.933,04 €
<b>NPV8Catena</b> Inserimento di catena metallica che collega una parete a quella retrostante da realizzarsi con due capochiave	cad	975,33 €

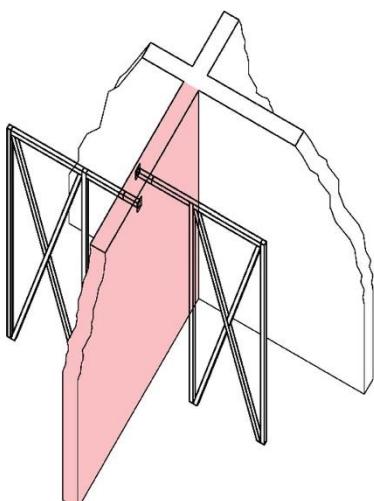
### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

Prevention of **walls'** potential collapse mechanisms

P0 isolated wall



P1 "flag" wall



Vulnerability condition

P0 P1

#### Intervention

##### Bilateral constraint



**NPV1Sperone 1p**  
Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV2Sperone2p**  
Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV3Telaio1p**  
Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV4Telaio2p**  
Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV5Incatenamento\_aperture**  
Realizzazione di incatenamenti economici da realizzarsi tra aperture poste in corrispondenza tra parete fronte strada e parete retrostante mediante griglie ed elementi metallici

cad 5.486,67 €

cad 15.509,00 €

cad 14.023,19 €

cad 34.655,35 €

cad 1.062,53 €

P2

##### Monolateral constraint



**NPV6SperoneMonolatero1p**  
Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV7SperoneMonolatero2p**  
Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m

**NPV8Catena**  
Inserimento di catena metallica che collega una parete a quella retrostante da realizzarsi con due capochiave

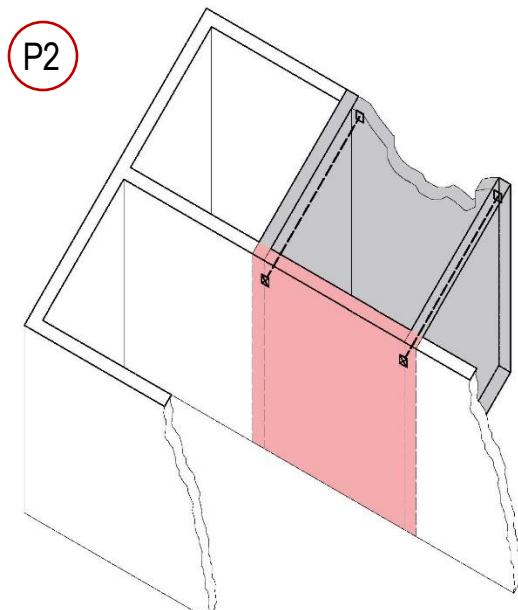
cad 2.675,30 €

cad 8.933,04 €

cad 975,33 €

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

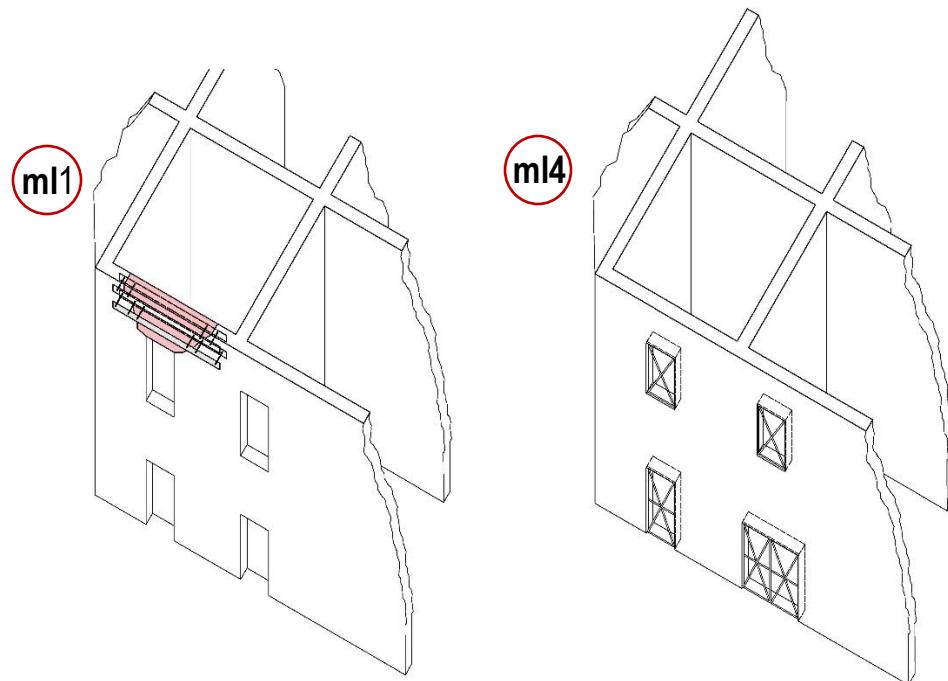
Prevention of **walls'** potential collapse mechanisms



Vulnerability condition	Intervention																	
P0	<b>Bilateral constraint</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>BUTTRESS</b></li> <li><b>STEEL FRAME</b></li> <li><b>TIE ROD</b></li> </ul>																	
P1	<b>Monolateral constraint</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>BUTTRESS</b></li> <li><b>TIE ROD</b></li> </ul>																	
P2	<table border="1"> <tr> <td><b>NPV1Sperone 1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>5.486,67 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV2Sperone2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>15.509,00 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV3Telaio1p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>14.023,19 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV4Telaio2p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>34.655,35 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV5Incatenamento_aperture</b> Realizzazione di incatenamenti economici da realizzarsi tra aperture poste in corrispondenza tra parete fronte strada e parete retrostante mediante griglie ed elementi metallici</td><td>cad</td><td>1.062,53 €</td></tr> </table>			<b>NPV1Sperone 1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	5.486,67 €	<b>NPV2Sperone2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	15.509,00 €	<b>NPV3Telaio1p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	14.023,19 €	<b>NPV4Telaio2p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	34.655,35 €	<b>NPV5Incatenamento_aperture</b> Realizzazione di incatenamenti economici da realizzarsi tra aperture poste in corrispondenza tra parete fronte strada e parete retrostante mediante griglie ed elementi metallici	cad	1.062,53 €
<b>NPV1Sperone 1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	5.486,67 €																
<b>NPV2Sperone2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	15.509,00 €																
<b>NPV3Telaio1p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	14.023,19 €																
<b>NPV4Telaio2p</b> Realizzazione di due telai metallici in grado di fornire un vincolo bilatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	34.655,35 €																
<b>NPV5Incatenamento_aperture</b> Realizzazione di incatenamenti economici da realizzarsi tra aperture poste in corrispondenza tra parete fronte strada e parete retrostante mediante griglie ed elementi metallici	cad	1.062,53 €																
P2	<table border="1"> <tr> <td><b>NPV6SperoneMonolatero1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>2.675,30 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV7SperoneMonolatero2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m</td><td>cad</td><td>8.933,04 €</td></tr> <tr> <td><b>NPV8Catena</b> Inserimento di catena metallica che collega una parete a quella retrostante da realizzarsi con due capochiave</td><td>cad</td><td>975,33 €</td></tr> </table>			<b>NPV6SperoneMonolatero1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	2.675,30 €	<b>NPV7SperoneMonolatero2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	8.933,04 €	<b>NPV8Catena</b> Inserimento di catena metallica che collega una parete a quella retrostante da realizzarsi con due capochiave	cad	975,33 €						
<b>NPV6SperoneMonolatero1p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su un solo livello con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	2.675,30 €																
<b>NPV7SperoneMonolatero2p</b> Realizzazione di uno sperone murario in grado di fornire un vincolo monolatero alla parete collegata. Realizzazione stimata su due livelli con altezza di interpiano pari a 3.5 m	cad	8.933,04 €																
<b>NPV8Catena</b> Inserimento di catena metallica che collega una parete a quella retrostante da realizzarsi con due capochiave	cad	975,33 €																

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

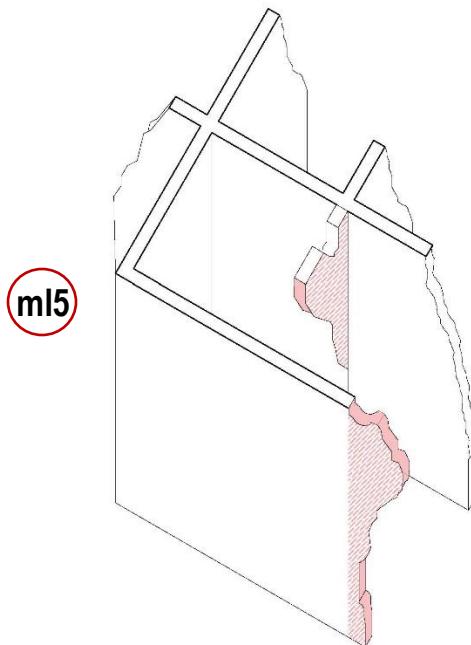
**Prevention of potential local collapse mechanisms of walls' portions**



Vulnerability condition	Intervention			
ml1 ml2	LOCAL REINFORCEMENT	NPV12Rinforzi_locali Interventi vari per la messa in sicurezza di porzioni di muratura soggette a ribaltamento incipiente (soprafinestra, cantonale) da effettuarsi mediante inserimento di reti, fasciature metalliche o strategie simili da valutare di volta in volta	cad	115 €
ml4	SUPPORTS	NPV13Puntellamenti Puntellamento di vani porta o volte pericolanti mediante opere di puntellamento	mc	40,69 €
ml5	DESMANTLING MASONRY	NPV14Smontaggio_muratura Smontaggio elementi murari pericolanti o in assenza di malta	mc	529,90 €

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

**Prevention of potential local collapse mechanisms of walls' portions**



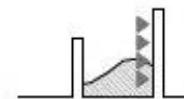
Vulnerability condition	Intervention			
ml1 ml2	LOCAL REINFORCEMENT	NPV12Rinforzi_locali Interventi vari per la messa in sicurezza di porzioni di muratura soggette a ribaltamento incipiente (soprafinestra, cantonale) da effettuarsi mediante inserimento di reti, fasciature metalliche o strategie simili da valutare di volta in volta	cad	115 €
ml4	SUPPORTS	NPV13Puntellamenti Puntellamento di vani porta o volte pericolanti mediante opere di puntellamento	mc	40,69 €
ml5	DESMANTLING MASONRY	NPV14Smontaggio_muratura Smontaggio elementi murari pericolanti o in assenza di malta	mc	529,90 €

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

#### Intervention aimed at **rubble management**

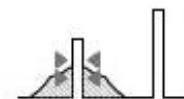
**M1**

Macerie interne alla cellula muraria che esercitano una azione spingente sulla parete



**M2**

Macerie interne e/o esterne alla cellula muraria che esercitano una azione di contenimento della parete



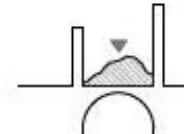
**M3**

Macerie che ostacolano la percorrenza su strada



**M4**

Macerie interne alla cellula muraria che gravano sugli orizzontamenti



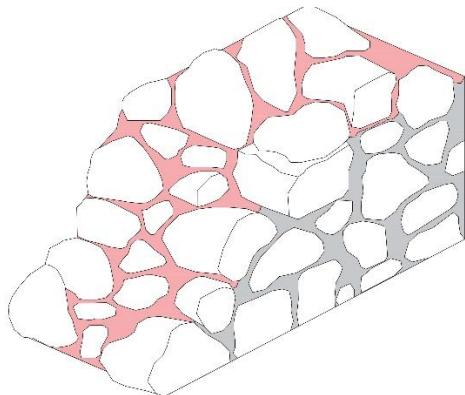
Vulnerability condition	Intervention		
M1    M4	REMOVAL	NPV10Rimozione_macerie_interne Rimozione delle macerie interne ai fabbricati che possono compromettere la stabilità dei paramenti murari rispetto ai quali sono poste a contrasto o degli orizzontamenti sottostanti.	mc    99,00 €
M2	STABILISATION	NPV11Stabilizzazione_macerie Stabilizzazione macerie mediante colate di malta e rese solidali ai paramenti murari rispetto ai quali sono poste a contrasto	mc    226,37 €
M3	REMOVAL	NPV9Rimozione_macerie_esterne Rimozione delle macerie che ingombrano la zona antistante le facciate e di intralcio per la fruizione del passaggio pedonale	mc    56,20 €

### 3. DEFINITION OF INTERVENTION

#### Widespread interventions

(Façade elements and vegetation)

Ex. walls' top sealing



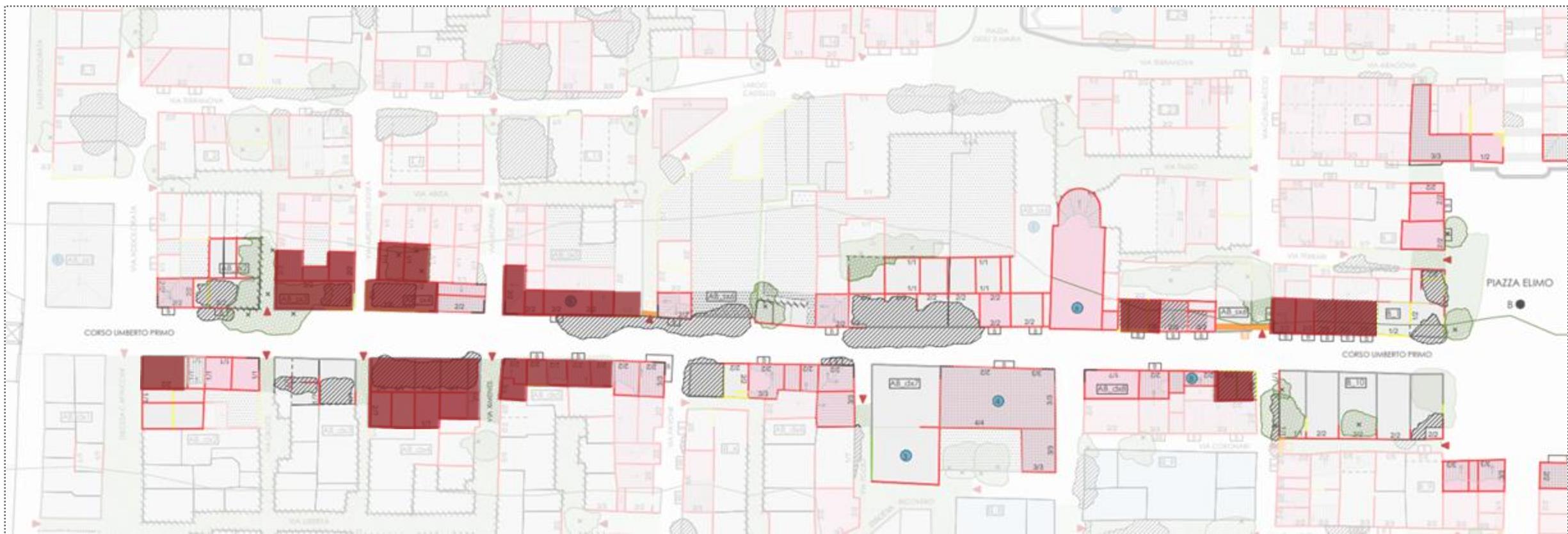
**landfilling**

**provisional works**

Vulnerability condition	Intervention		
Widespread	<b>REMOVALS</b> (Downpipes and window frames) <b>SEALINGS, PLASTER BEATING</b>		
		NPV15Sigillatura_sommitale: Impermeabilizzazione della superficie superiore di pareti murarie mediante aggiunta di miscele leganti	mq 43,16 €
		NPV16Rimozione_pluviali Rimozione di pluviali e canali di gronda pericolanti	m 4,99 €
		NPV17Scomposizione_copertura Smontaggio manto di copertura pericolante	mq 7,41 €
		NPV18Rimozione_infissi Smontaggio di infissi pericolanti	mq 18,50 €
		NPV19Rimozione_lastrre Rimozione elementi pericolanti dei balconi (lastre e cagnoli)	mq 22,36 €
		NPV20Battitura_intonaco Battitura e rimozione di intonaco pericolante	mq 3,86 €
Vegetation	<b>REMoval</b>		
		NPV21Rimozione_vegetazione Rimozione di vegetazione infestante	mq 14,84 €
		<b>LANDFILLING</b>	
		NPV22Conferimento_materiale_edile Conferimento a discarica di materiale edile derivante da demolizioni e smontaggio elementi costruttivi	
		mc	44,52 €
		<b>PROVISIONAL WORKS</b>	
		Opere_provisionali_presidi Presidi metallici da realizzare per la messa in sicurezza della parete nelle fasi di intervento (previsto un tempo di 3 mesi)	
		mq	112,54 €
		Opere_provisionali_ponteggio Ponteggi metallici da impiegare nelle fasi di intervento (previsto un tempo pari a 3 mesi in totale)	
		mq	18,99 €

### **3. ESTIMATION OF COSTS**

## Identification of 9 building units on Corso Umberto representative for variability of vulnerability conditions and geometric characteristics



### **3. ESTIMATION OF COSTS: SAMPLE IN NINE UNITS**

For each of the selected building units, a form is filled containing:

# Main geometric and constructional features;

## Vulnerability condition

Determination of interventions according to homogeneous criteria and **determination of the related safety costs**



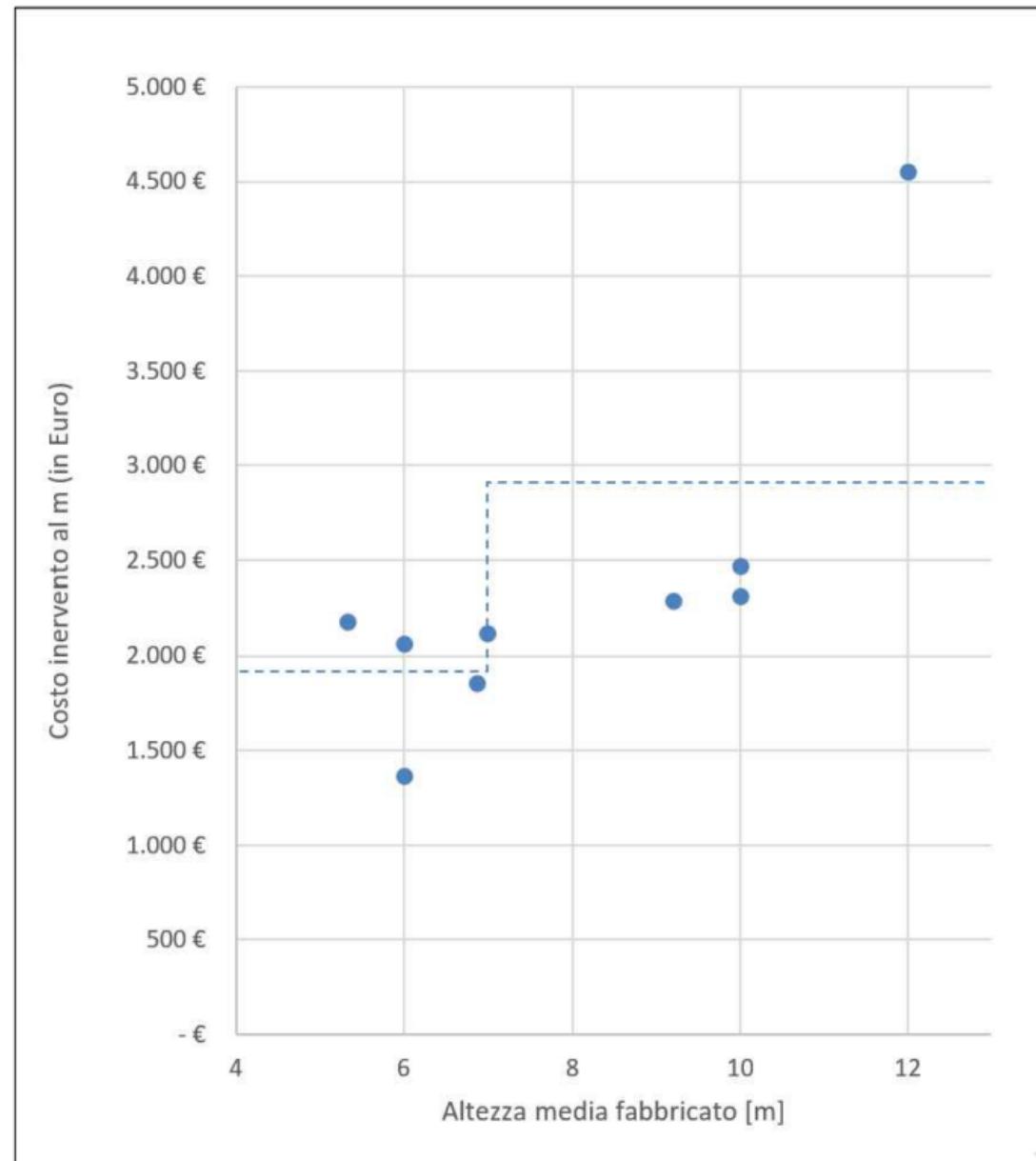
### 3. Definition of interventions and cost estimation

#### Definition of the unit cost per linear meter of façade

On the basis of the findings of these analyses, an estimation of the cost intervention can be preliminarily estimated as:

- Almost **2000 €/ml** for buildings with height lower than seven meters;
- About **3000 €/ml** for buildings with height higher than seven meters.

DATI SINTETICI SULLE UNITÀ EDILIZIE ANALIZZATE				
Unità edilizia	Costo totale	Lunghezza fronte [m]	Altezza media [m]	Costo/m
AB_SX3.1	29.682,75 €	16	6,88	1.855,17 €
AB_SX4.1	31.804,78 €	15	7,00	2.120,32 €
AB_SX5.1	57.363,51 €	25	9,20	2.294,54 €
AB_SX6.3	52.013,83 €	8	12,00	4.551,21 €
B_1.1	54.342,64 €	22	10,00	2.470,12 €
AB_DX2.1	18.562,43 €	9	6,00	2.062,49 €
AB_DX4.1	27.370,05 €	20	6,00	1.368,50 €
AB_DX5.1	53.331,26 €	23	10,00	2.318,75 €
AB_DX8.1	32.481,58 €	15	5,33	2.184,14 €



### 3. Definition of interventions and cost estimation

Definition of the unit cost per linear meter of façade

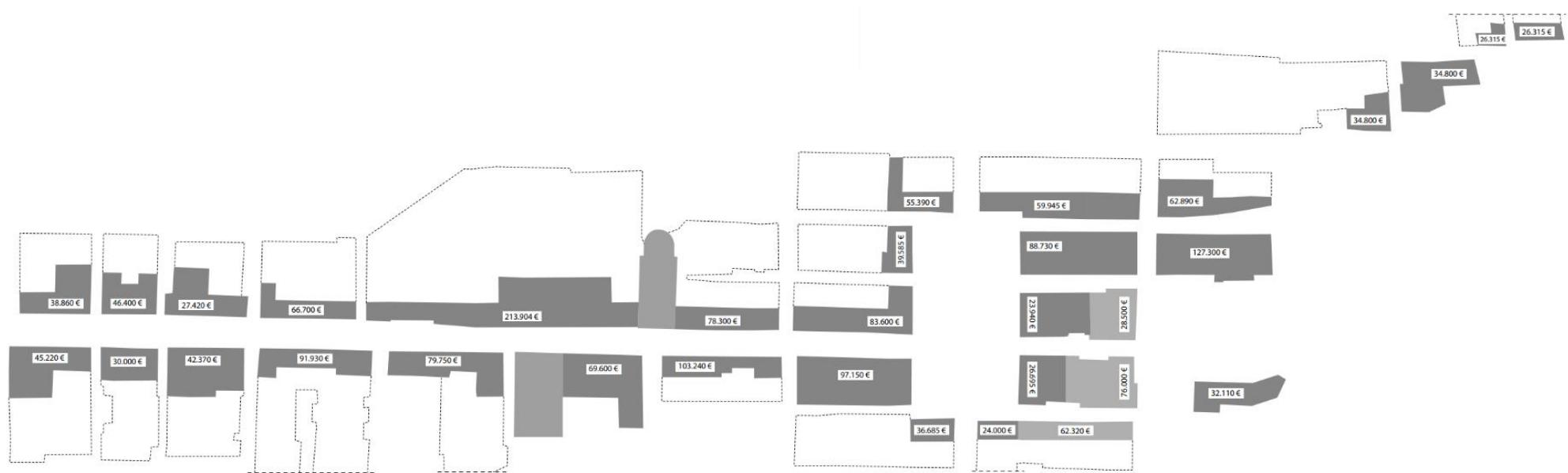
Extension of the obtained parametric costs to all the blocks facing onto the main roads of the town

Corso Umberto

Piazza Elimo and Largo Cannoli

via Santa Margherita

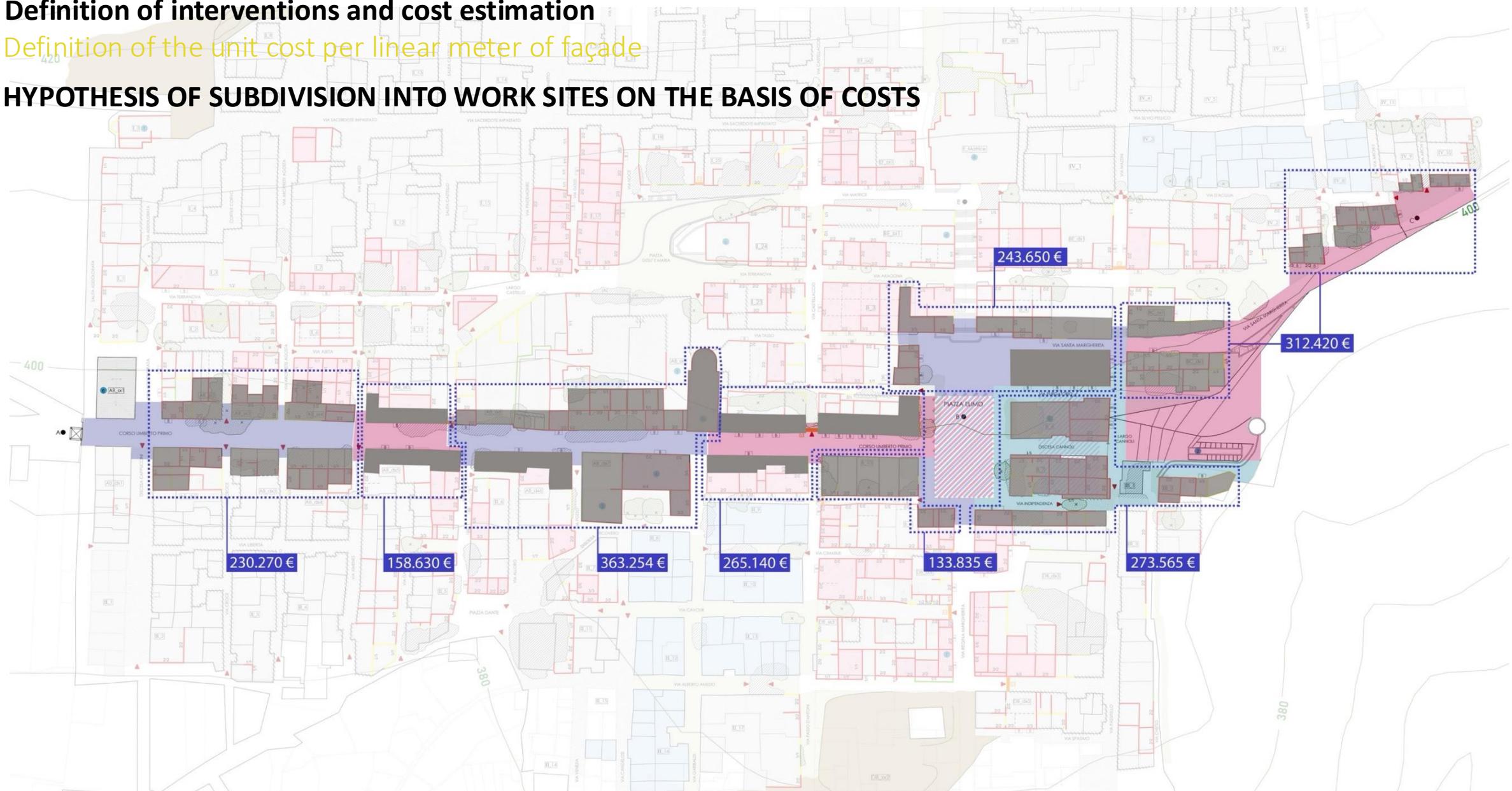
ISOLATO	LUNGHEZZA	h MEDIA	COSTO
ABsx2	13,40	8,51	38.860,00 €
ABsx3	16,00	10,08	46.400,00 €
ABsx4	14,43	7,05	27.417,00 €
ABsx5	23,00	10,08	66.700,00 €
ABsx6 a sx chiesa	73,76	8,70	213.904,00 €
ABsx6 a dx chiesa	27,00	7,12	78.300,00 €
B1	44,00	6,01	83.600,00 €
ABdx2	23,80	5,66	45.220,00 €
ABdx3	16,60		
ABdx4	22,30	5,85	42.370,00 €
ABdx5	31,70	9,33	91.930,00 €
ABdx6	27,50	7,46	79.750,00 €
ABdx7	24,00	12,14	69.600,00 €
ABdx8	35,60	8,07	103.240,00 €
B10	33,50	8,03	97.150,00 €
B2	13,65	8	39.585,00 €
B3	19,10	8	55.390,00 €
B4	31,55	6,00	59.945,00 €
B5	46,70	6,00	88.730,00 €
B6	12,60	6,00	23.940,00 €
B6 per fontanile	15,00	6,00	28.500,00 €
B7	14,05	6,00	26.695,00 €
B7 per fontanile	40,00	6,00	76.000,00 €
B8	12,65	6,00	24.035,00 €
B8 per fontanile	32,80	6,00	62.320,00 €
B9	12,65	8	36.685,00 €
III_2	16,9	6,00	32.110,00 €
BCdx1	67,00	6,00	127.300,00 €
BCsx1	33,10	6,00	62.890,00 €
IV_2	12,00	8	34.800,00 €
IV_7	21,35	6,00	40.565,00 €
IV_9	13,85	6,00	26.315,00 €
IV_10	13,85	6,00	26.315,00 €

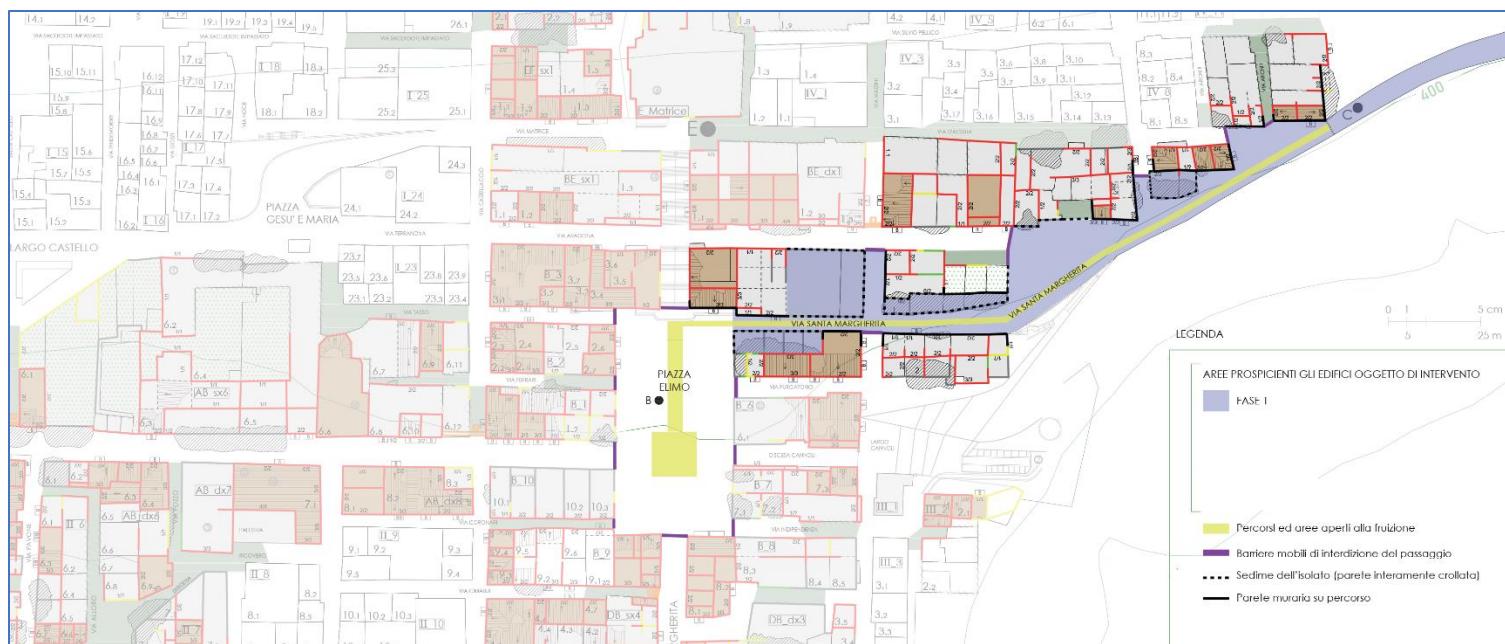


### **3. Definition of interventions and cost estimation**

## Definition of the unit cost per linear meter of façade

## HYPOTHESIS OF SUBDIVISION INTO WORK SITES ON THE BASIS OF COSTS



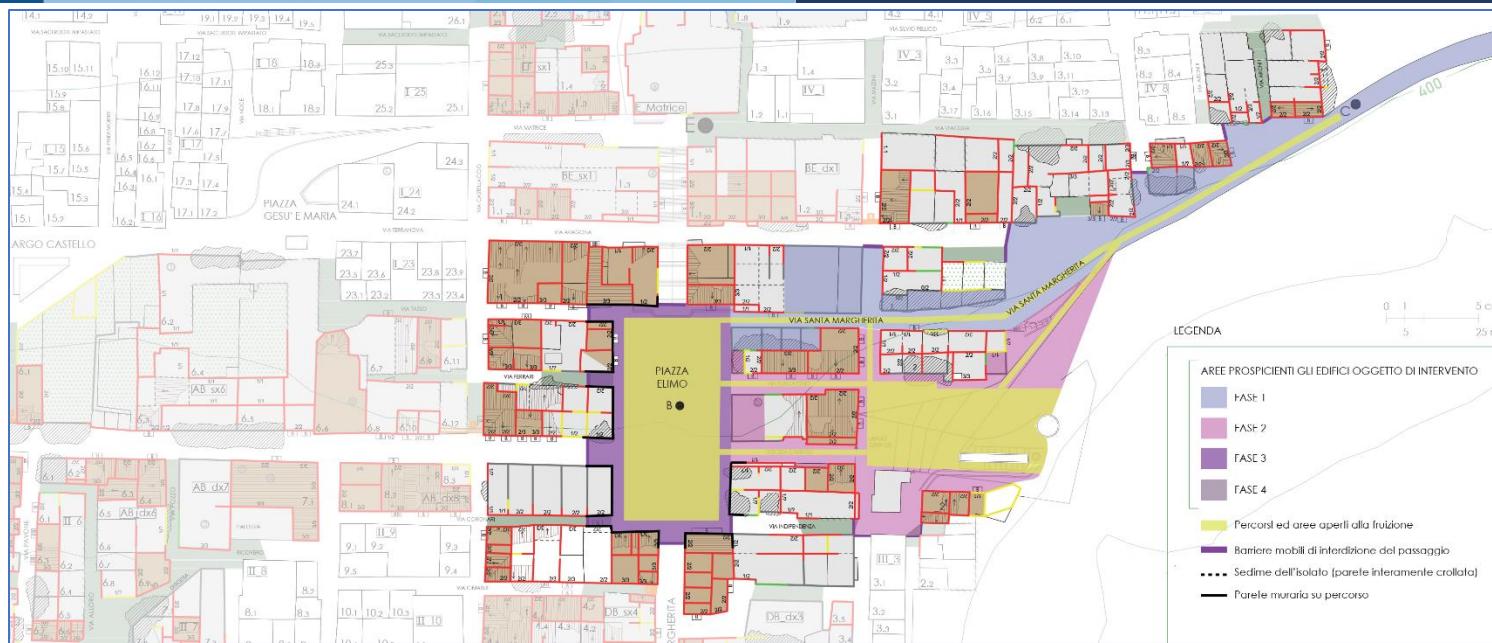


## CONSTRUCTION WORKS HYPOTHESIS AND OPENING PROCESS OF THE VISIT ITINERARY FROM THE EASTERN ENTRY TO THE TOWN

**PHASE A** – safe itinerary till piazza Elimo (limited to the central area of the square) with sight points point the main streets of the town



**PHASE B** – safe itinerary and use of the square of the drinking trough also for small outdoor events



## CONSTRUCTION WORKS HYPOTHESIS AND OPENING PROCESS OF THE VISIT ITINERARY

**PHASE C – opening of piazza Elmo to public use**



**PHASE D – opening of the first section of Corso Umberto I to public use**

## Masonry arch bridges

- Masonry arch bridges have still a **key role** in the infrastructure network of many countries in Europe (about 80.000) .
- Most of road or railway bridges were built in slightly more than 100 years starting from 1840.
- Many of them are **still operational** and they are consequently continuously subjected to dynamic loads due to the road and railway traffic. In many cases the maintenance required either **structural retrofitting intervention** or **complete transformations** that required a complete rethinking of the original configuration.

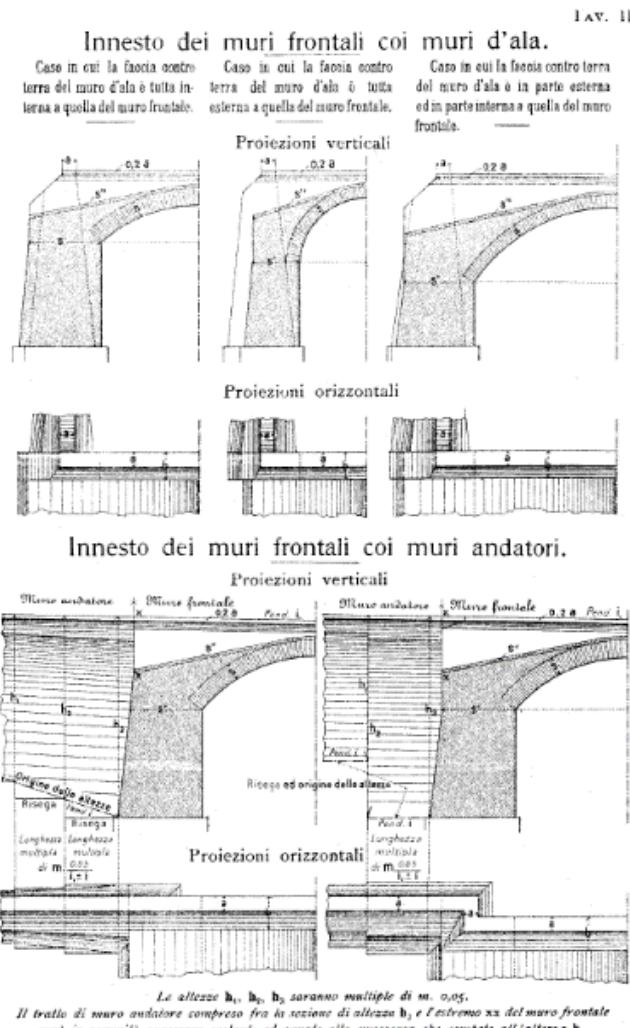


## Masonry arch bridges

- Although masonry arch bridges have a **common semantic** it is possible to identify features that frame them in **different typologies**.
- Historic bridges were conceived according to design criteria based on **simple geometric rules or balance equations**.
- In most of the cases the original **drawings are not available** as well as the adopted rules in the structural design. This makes difficult to reconstruct the actual structural geometry whose definition often requires **invasive inspections** as well as excavations in the proximity of the foundation.



## Masonry arch bridges – several typologies



Maddalena bridge – Borgo Mazzano (Italy)



Sandro Pertini bridge – Macerata (Italy)



Railway bridge km 326 – Caltagirone (Italy)



## Masonry arch bridges – some examples of collapses

Ponte ferroviario  
sul fiume Cervo,  
Buronzo (VC)  
**(21.12.1974)**



Ponte ferroviario al km 326  
tra Vituso e Piano Carbone,  
linea Caltagirone - Gela  
**(08.05.2011)**



Ponte ferroviario  
Marcellinara, loc. Varrà,  
Comune di Amato,  
linea Catanzaro-Lamezia  
**(22.11.2011)**

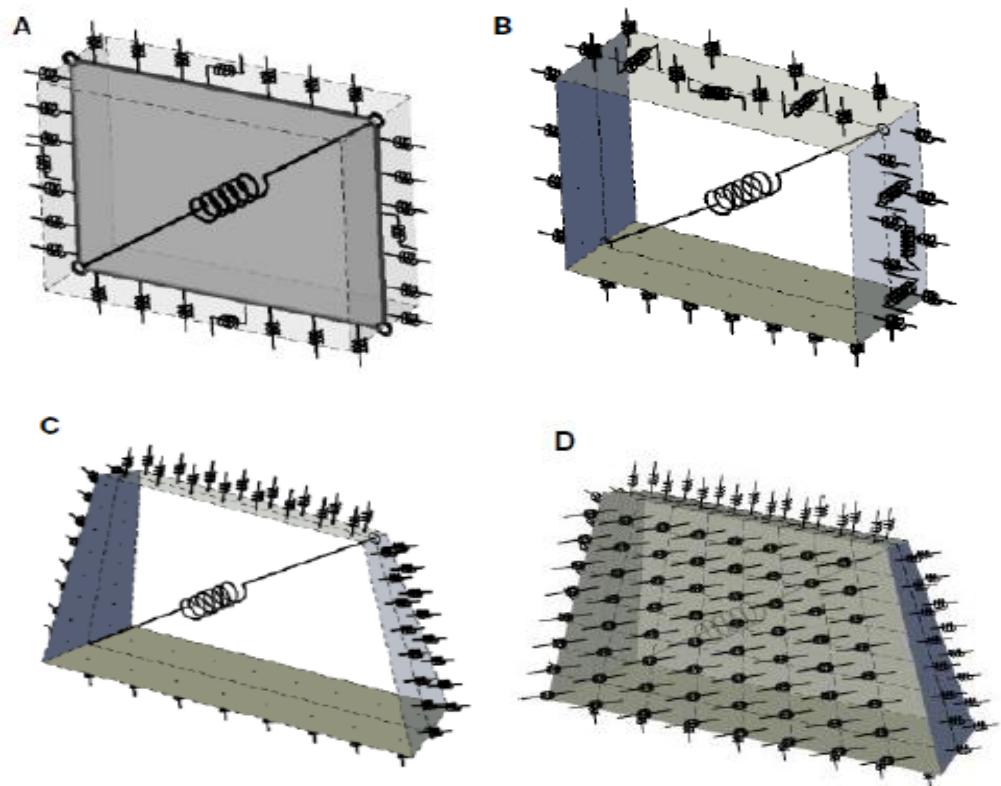


Ponte stradale  
Viadotto Albiano  
Comune di Aulla (MC),  
SS330 (ex SP70)  
**(08.04.2020)**



# The Discrete Macro-Element Model (DMEM)

- A) **In-plane Macro-Element** ([1], 2012): introduces the in-plane behavior of masonry walls
- B) **3D Macro-Element** ([2], 2017): introduces the in-plane and out-of-plane behavior of masonry walls
- C) **3D irregular Macro-Element** ([3], 2018): introduces the possibility to model structures with curved geometry (i.e., arches, vaults, domes)
- D) **3D irregular Macro-Element with interfaces on all the faces of the element** ([4], 2018): introduces the 3D interaction along all the edges of the Macro-Element



[1] I. Caliò, M. Marletta, B. Pantò 2012. A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures* 40 327–338.

[2] Pantò, B., Cannizzaro, F., Caliò, I., Lourenço, P.B. Numerical and Experimental Validation of a 3D Macro-Model for the In-Plane and Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls (2017) *International Journal of Architectural Heritage*.

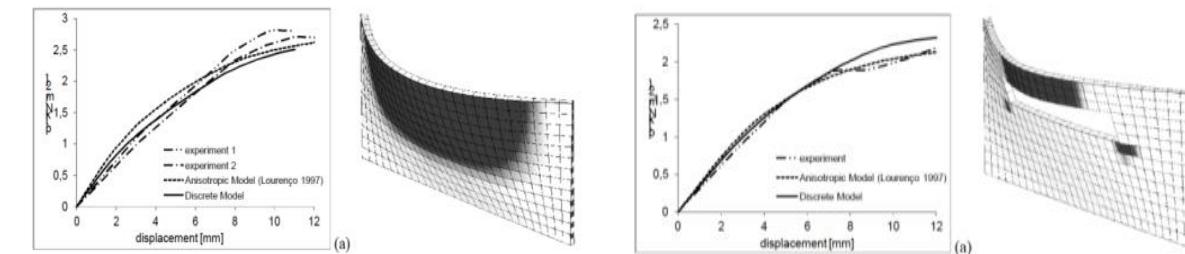
[3] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddeimi, S., Caliò, I. A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches (2018) *Engineering Structures*.

[4] S. Caddeimi, I. Caliò, F. Cannizzaro, D. D'Urso, G. Occhipinti, B. Pantò, G. Pisanelli, D. Rapicavoli, G. Spirolazzi, R. Zurlo. A ‘parsimonious’ 3d discrete macro-element method for masonry arch bridges – (2018) Conference: 10th IMC - International Masonry Conference, Milan (Italy), 9-11 July 2018

# The Discrete Macro-Element Model (DMEM)

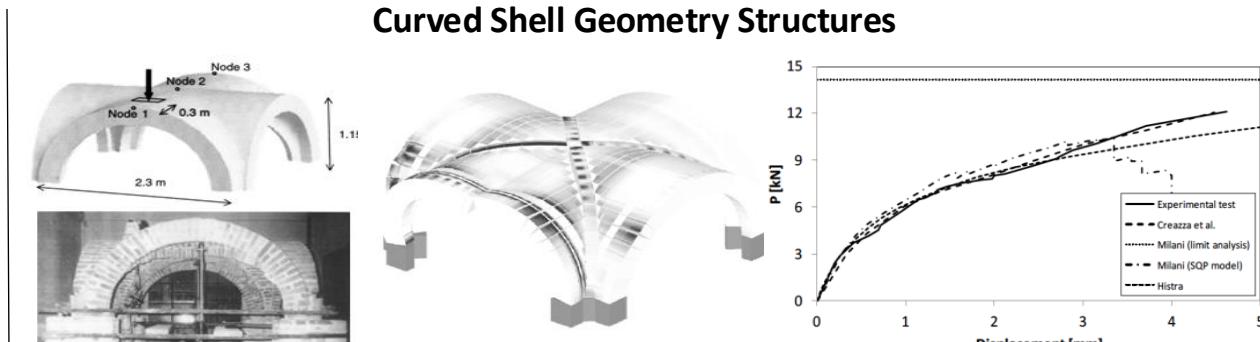
The application fields of the Discrete Macro-Elements Method were extended to other types of structures

## In-plane and Out-plane collapse mechanisms of masonry walls



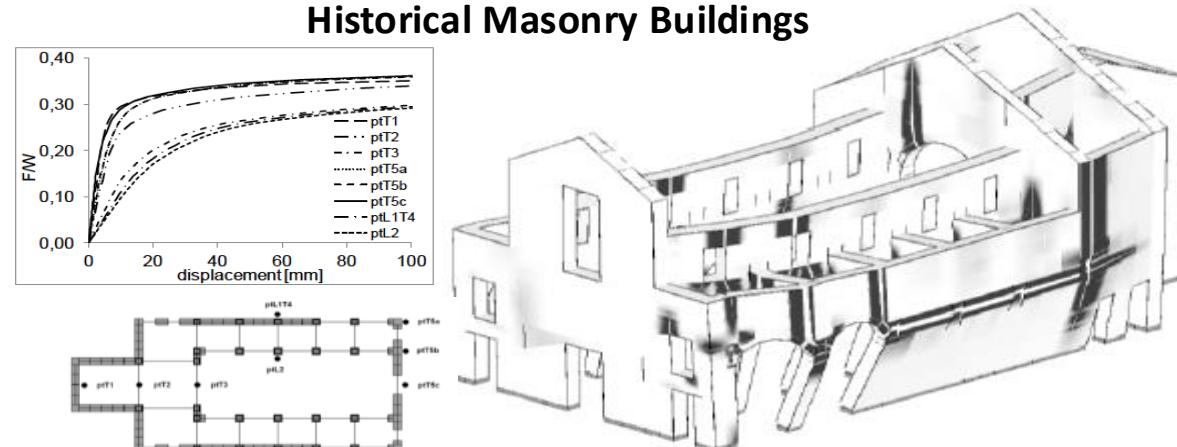
[2] B. Pantò, F. Cannizzaro, I. Caliò, P.B. Lourenço Numerical and experimental validation of a 3D macro-model for the in-plane and out-of-plane behaviour of unreinforced masonry walls – (2017) International Journal of Architectural Heritage

## Curved Shell Geometry Structures



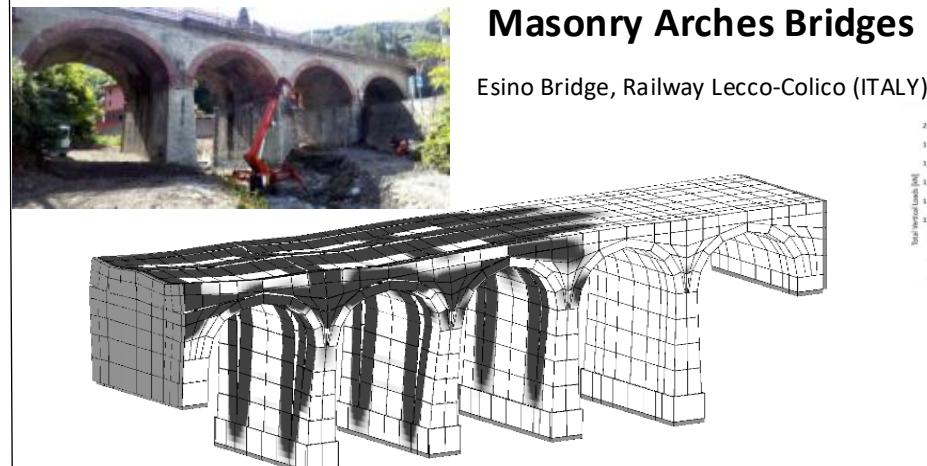
[5] S. Caddemi, I. Caliò, F. Cannizzaro, G. Occhipinti, B.Pantò. A parsimonious discrete model for the seismic assessment of monumental structures – (2015) CIVIL-COMP, Prague, Czech Republic

## Historical Masonry Buildings



[6] B. Pantò, F. Cannizzaro, S. Caddemi, I. Caliò, 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches – (2016) Advances in Engineering Software, 97, pp. 40-59.

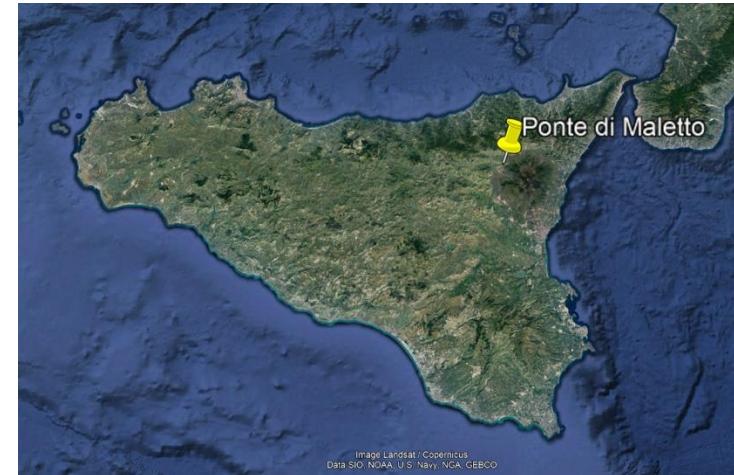
## Masonry Arches Bridges



Static Nonlinear Analysis  
Comparison DMEM vs FEM

[7] Caliò, Cannizzaro, Occhipinti, Pisanelli, Spirolazzi, Zurlo, Pantò, Rapicavoli, D'Urso. Ponti Ferroviari ad Arco, Metodologia di Analisi Tridimensionale Non Lineare – (2018) La Tecnica Professionale, Ed. CIFL, Settembre 2018

# A Case Study: The Maletto Railway Masonry Arch Bridge



## Masonry arch bridge

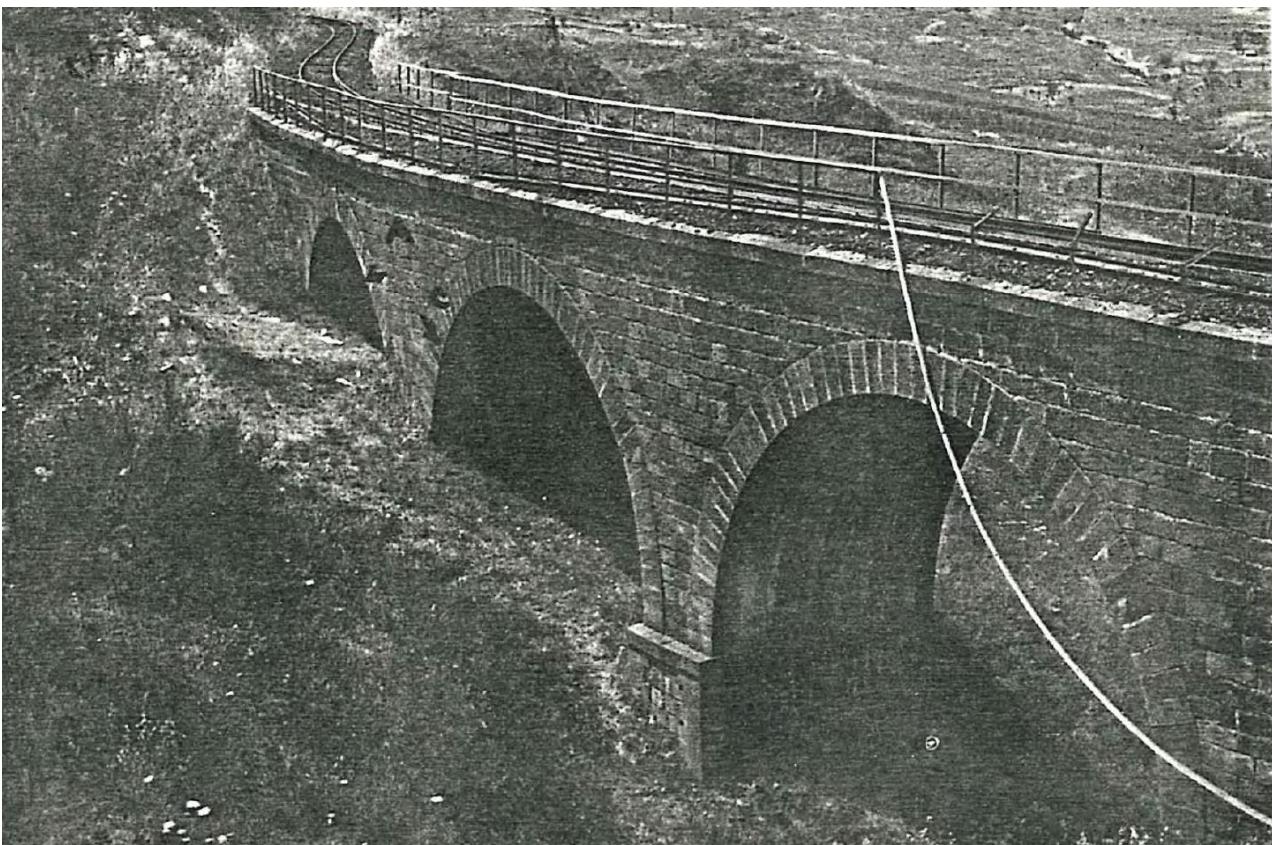
located in Maletto (Catania - Italy)  
at km 62+332 of the Circumetnea Railway (FCE)  
built at the end of the 19<sup>th</sup> century  
Total length: 38.04 m, Width: 3.70 m,  
4 spans, 3 piers  
Luce media = 7.30 m  
Rises ranging between 3.37 m and 4.05 m  
Slope: 1.1%  
Radius of curvature: 97.3 m  
Arch thickness = 0,60 m

[8] D. Rapicavoli, F. Cannizzaro, M. Falco, S. Fiore, M. Papa, S. Caddemi, Ivo Caliò, Structural Assessment of a Masonry Arch Bridge before and after a traditional inner arch retrofitting technique. Procedia Structural Integrity

# A Case Study: The Maletto Railway Masonry Arch Bridge

Fig. 3. Railway Maletto masonry arch bridge before the retrofitting (original design drawings)

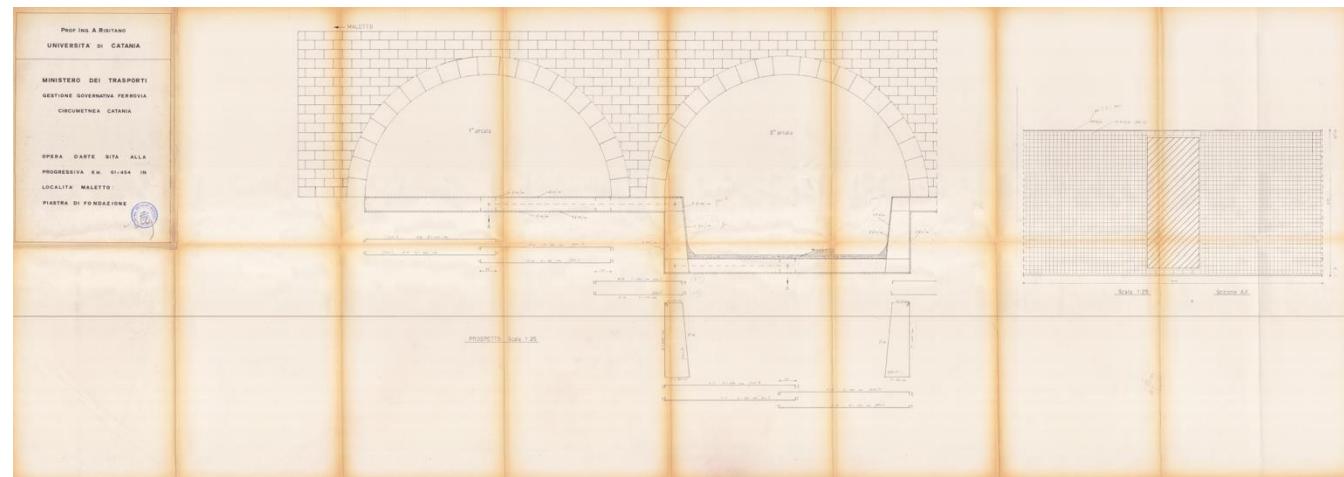
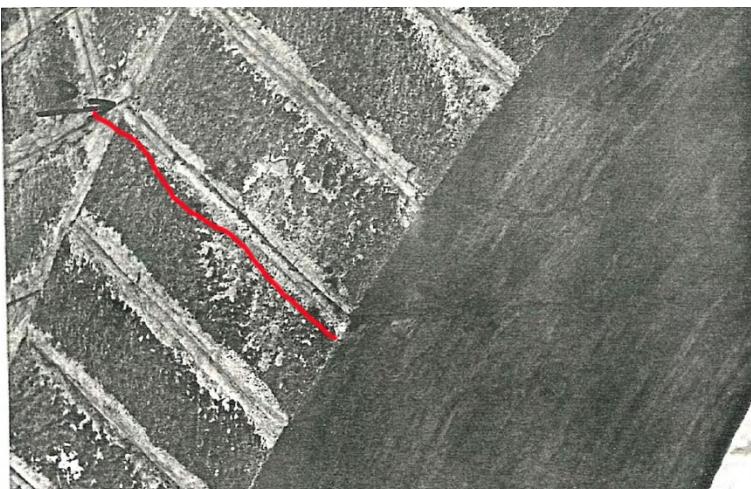
## A Case Study: The Maletto Railway Masonry Arch Bridge



# The damage pattern observed in 1984 (Eng. Risitano)



Cracking at the intrados of the vaults



Survey drawings (1984)

## The strengthening intervention (Eng. Risitano)

The precarious safety condition of the bridge due to the presence of extensive damage at the haunches of the arches required a retrofitting intervention. The retrofitting solution included the introduction of a **concrete layer** at the **intrados of the vaults** confined by an **external steel corrugated thick plate** used as formworks. The new structure was founded on a new reinforced **concrete enlargement of the existing masonry foundation**.



# The strengthening intervention (Eng. Risitano)

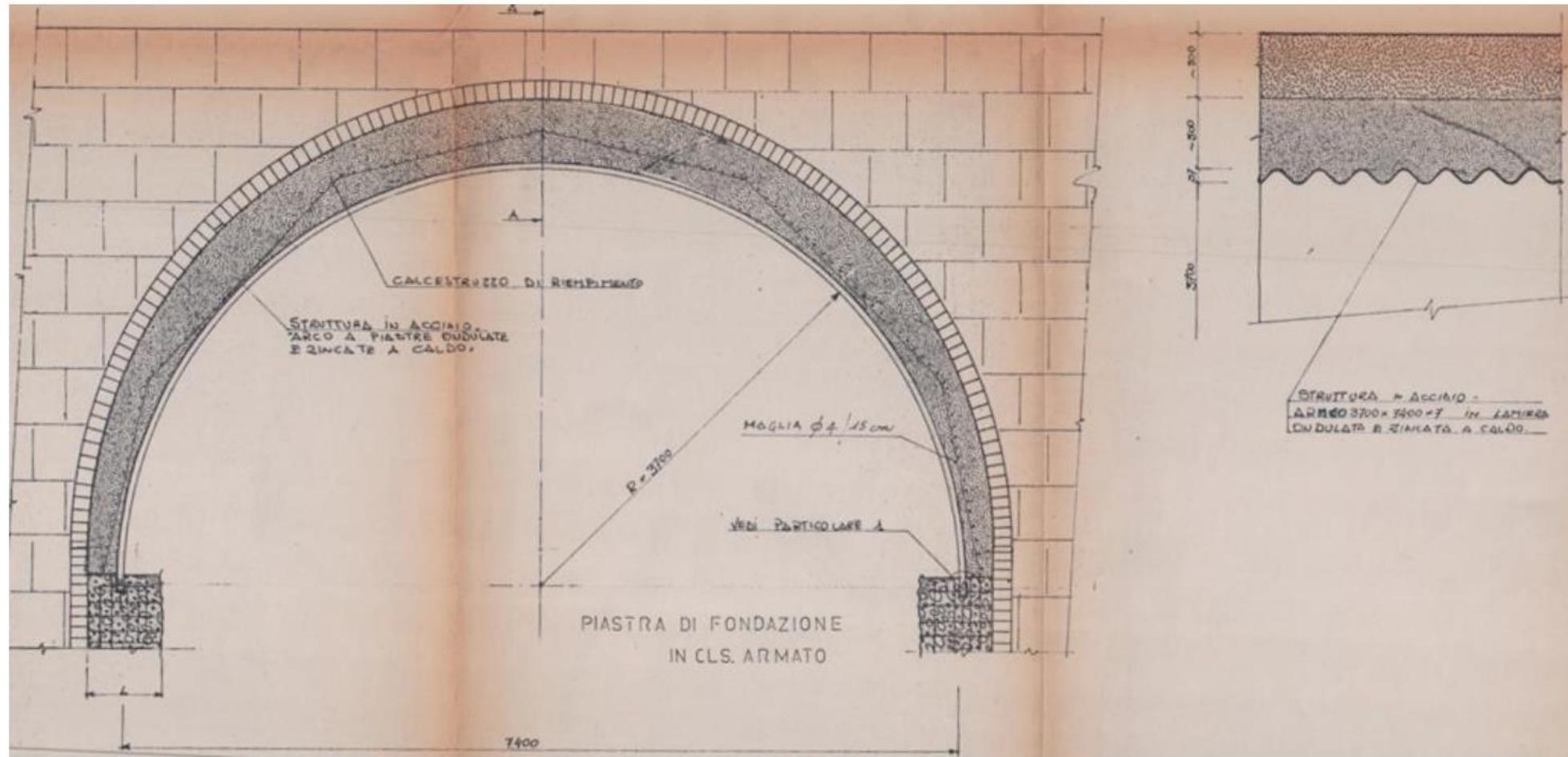


Fig. 4. Railway Maletto masonry arch bridge (the original drawing of the retrofitting strategy)

# Survey activities

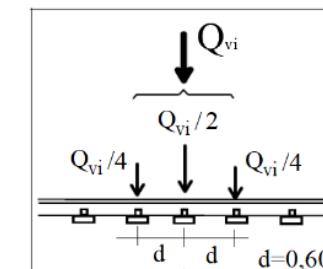
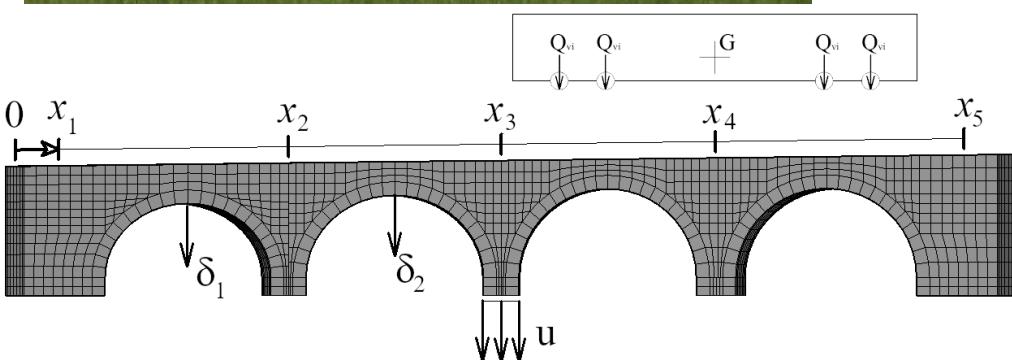
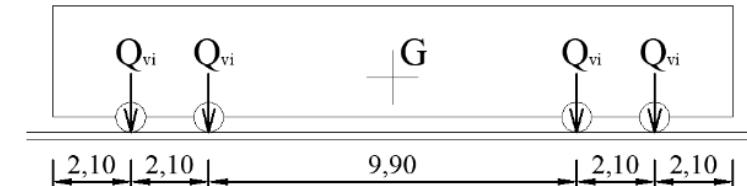
Survey with UAS and points cloud



[9] R. Garozzo, D. Caliò, M. Galizia, G. Pappalardo, C. Santagati, Integration of remote surveying methodologies for geological risk assessment of masonry arch bridges – (2022) D-SITE 2022 Drones – Systems of Information on cultural heritage International Seminar meeting, 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> June 2022 Museum of Electrical Technology, Pavia, Italy.

# The load conditions

**Adopted locomotive ADe 21-25 for the evaluation of the operational loads and corresponding scheme**



**Considered magnitudes of the vertical settlements**

0.01 m

0.025 m

0.04 m

0.08 m

0.12 m

Applied loads and positions of the operational load, base settlement  $u$ , monitored vertical displacements

# Strengthened configuration

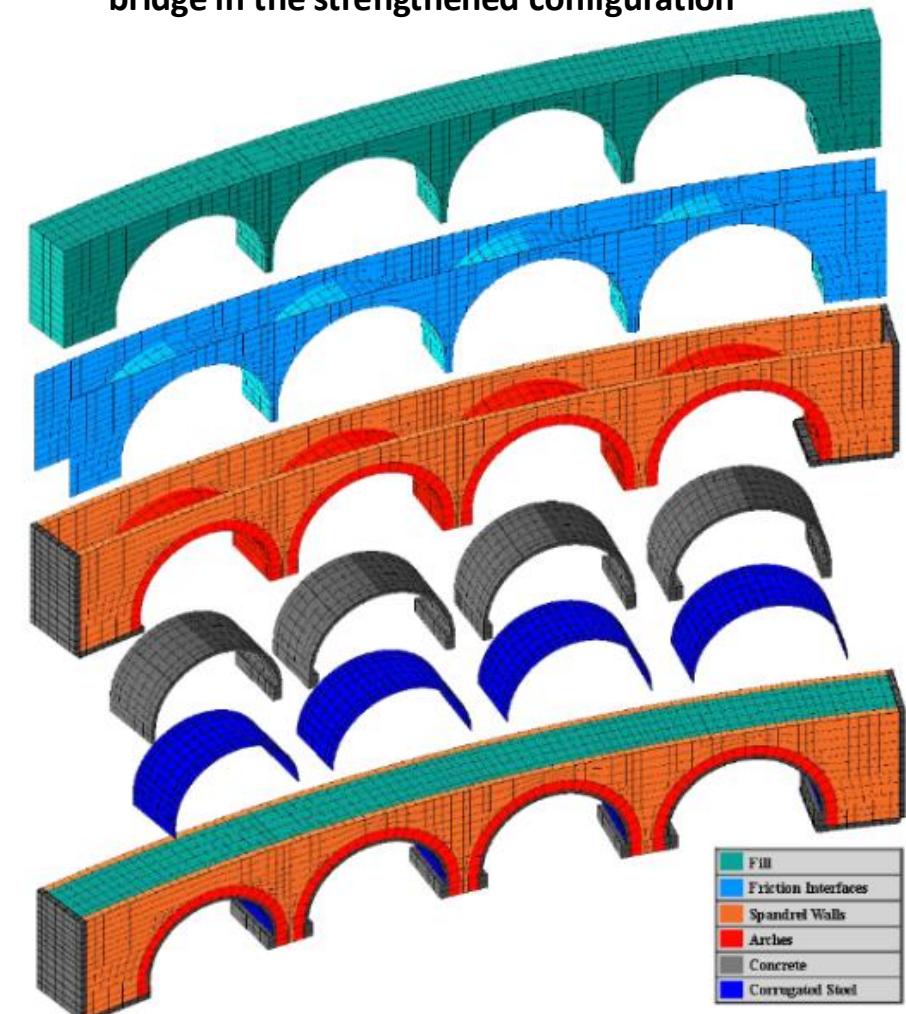
Modelling of the strengthened configuration:

- **enlargement of the foundation**
- introduction of a **concrete layer** at the **intrados of the vaults** (thickness 20 cm)
- introduction of a **steel plate** (thickness 3 mm) at the **intrados of the concrete layer**
- adoption of C20/25 type for the concrete, S235 for the steel plate and Feb32k for the **bars connecting foundation and concrete layer**

	E (MPa)	G (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>ct</sub> (MPa)	G <sub>fc</sub> (N/mm)	G <sub>ft</sub> (N/mm)	c (MPa)	μ <sub>c</sub> (-)	τ <sub>o</sub> (MPa)	μ <sub>t</sub> (-)	w (kN/m <sup>3</sup> )
Arches	1800	600	3.0	0.02	4.0	0.001	0.01	0.6	-	-	22
Spandrel walls	1800	600	2.0	0.05	1.5	0.001	0.01	0.6	0.3	0.4	22
Fill	300	115	0.5	0.01	∞	∞	-	-	0.0005	-	18
Friction interfaces	300	115	1.0	0.01	∞	∞	0.0	0.6	-	-	-
Concrete	9798	4083	11.76	1.057	19.6	0.028	-	-	-	-	25
Steel bars	206000	85833	273.9	273.9	∞	∞	-	-	-	-	78.5
Corrugated Steel	206000	85833	235.0	235.0	∞	∞	-	-	-	-	78.5

where E = normal elastic modulus; G = shear elastic modulus; f<sub>c</sub> = compressive strength; f<sub>ct</sub> = tensile strength; G<sub>fc</sub> = compressive fracture energy; G<sub>ft</sub> = tensile fract. energy; c = sliding cohesion; μ<sub>c</sub> = sliding frict. ratio; τ<sub>o</sub> = diagonal shear strength; μ<sub>t</sub> = diagonal shear frict. ratio; w = self-weight.

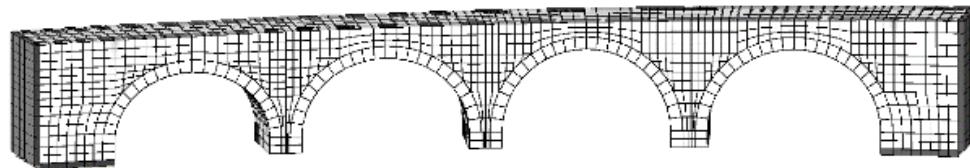
Exploded view of the model (DMEM) of the bridge in the strengthened configuration



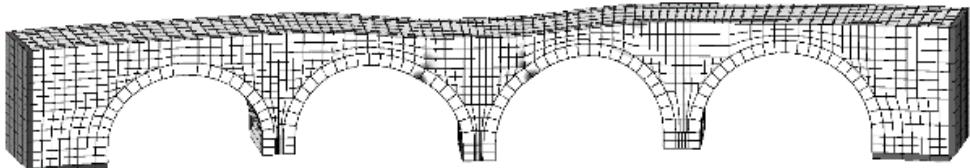
## Damage patterns before and after the application of the operational load magnified until collapse (position $x_2$ ) – unstrengthened configuration

Before application of the operational loads

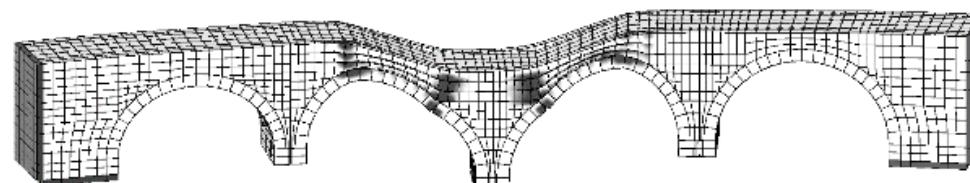
$u=0.00 \text{ m}$



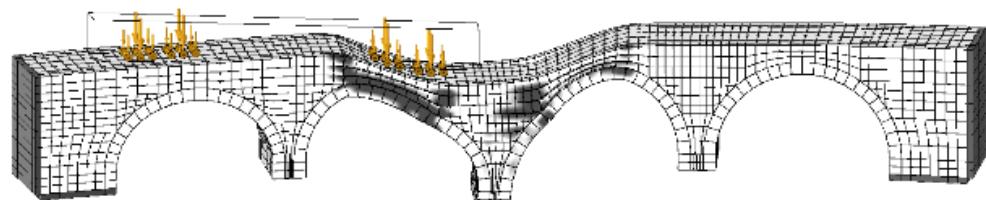
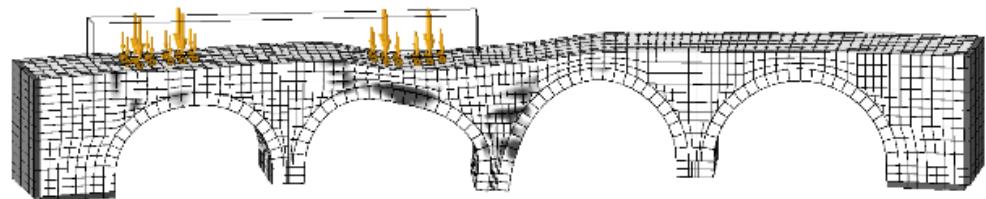
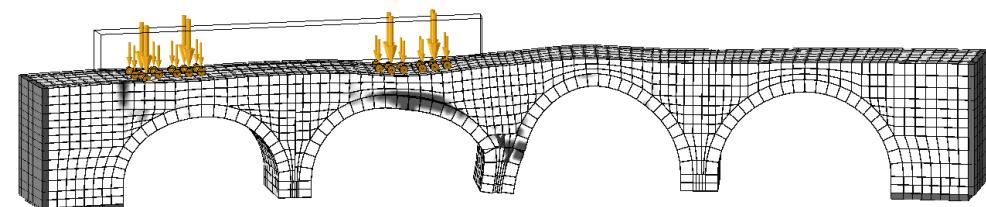
$u=0.04 \text{ m}$



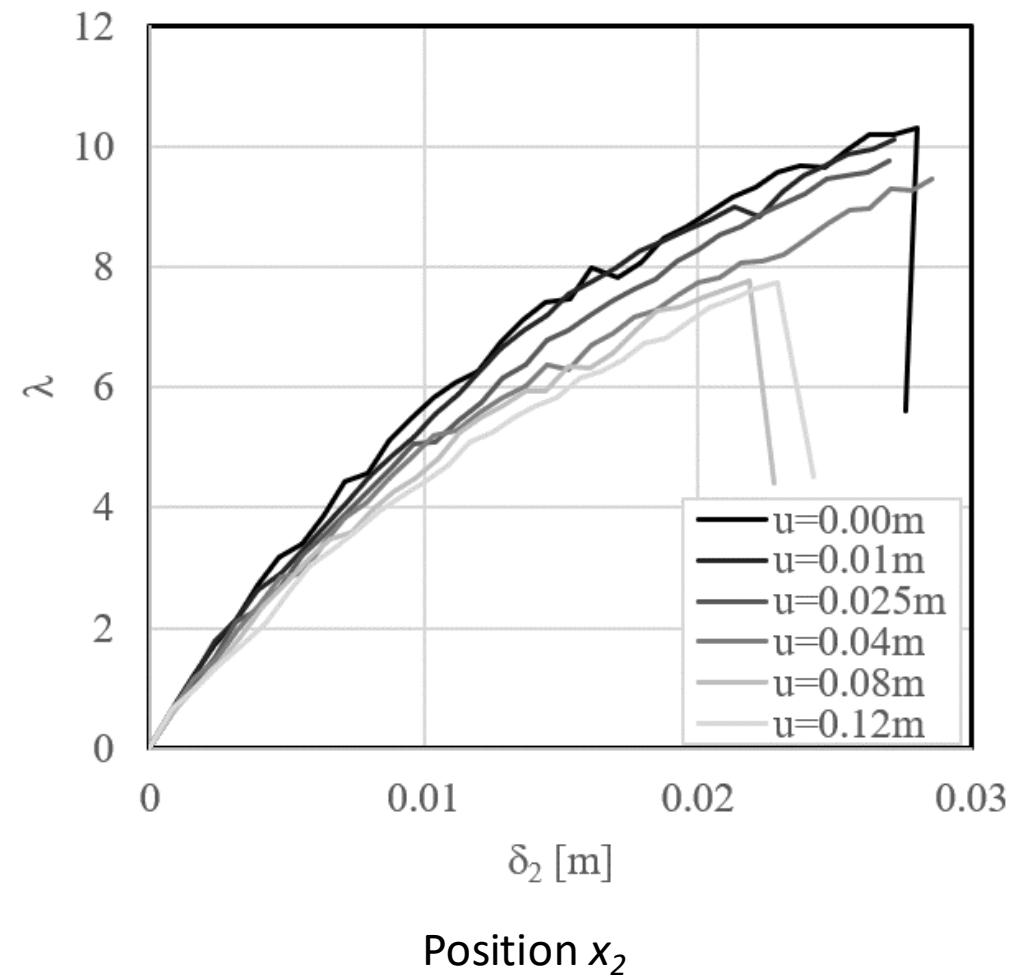
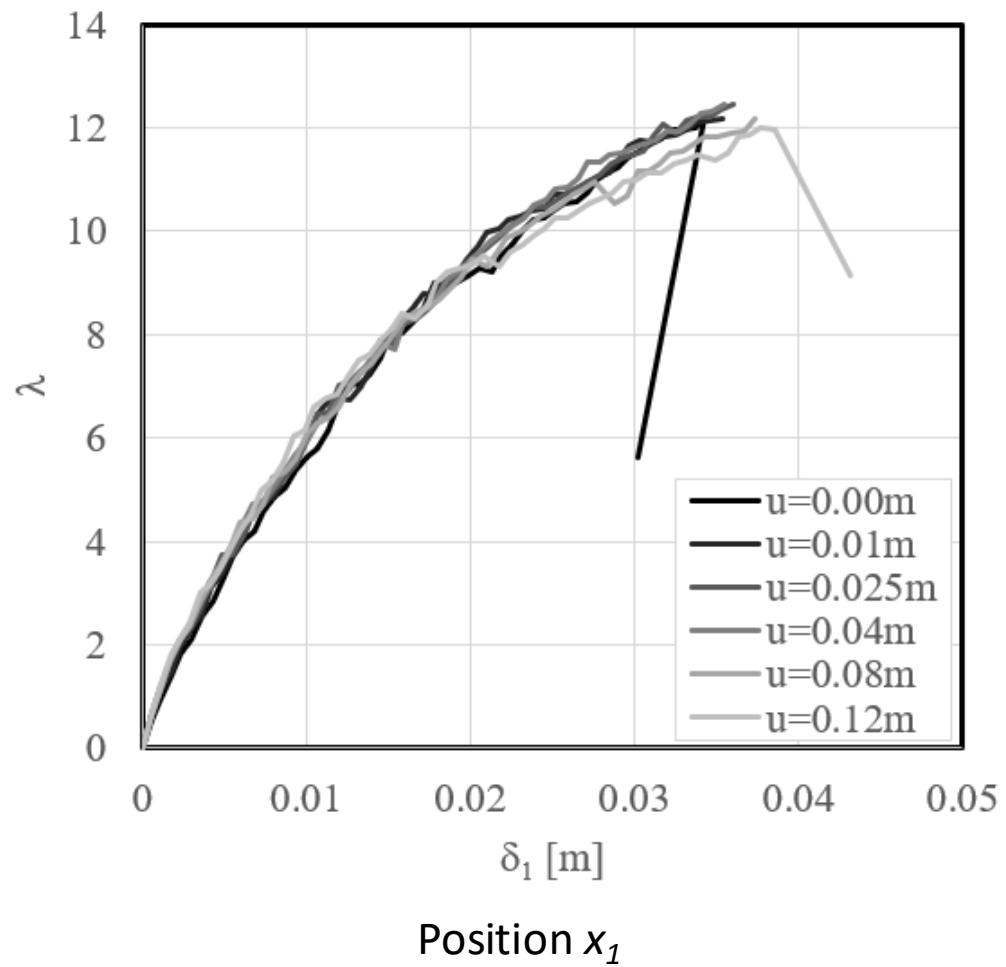
$u=0.12 \text{ m}$



After application of the operational loads

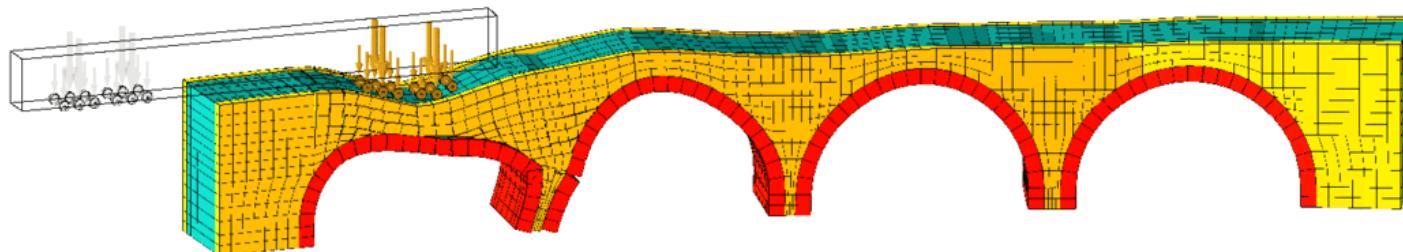


# Load displacement curves for all the considered settlements

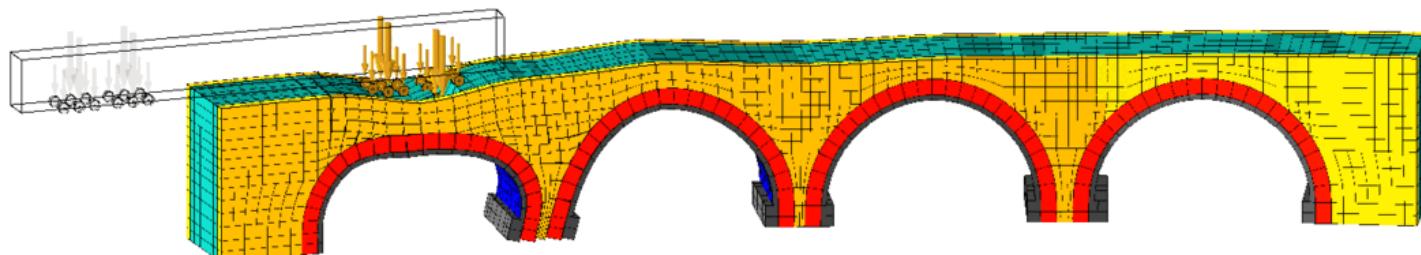


# Assessment of the efficacy of the strengthening intervention

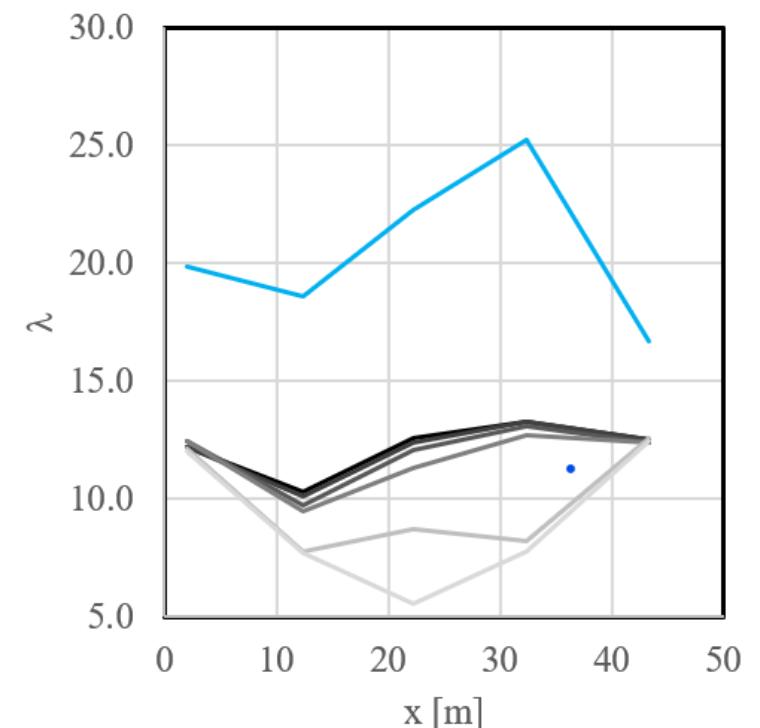
Unstrengthened configuration



Strengthened configuration

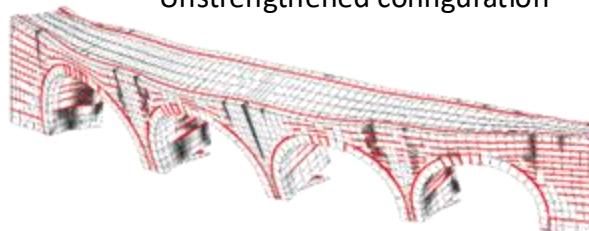


Influence line of the collapse multiplier

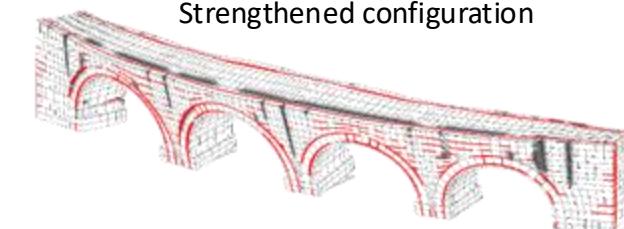


# Assessment of the efficacy of the strengthening intervention

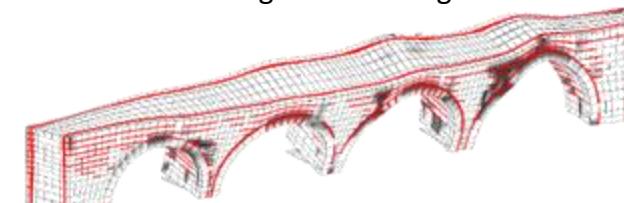
Unstrengthened configuration



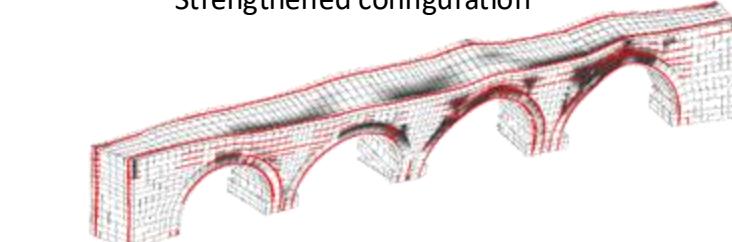
Strengthened configuration



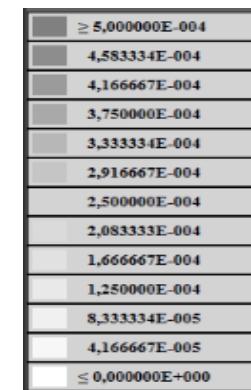
Unstrengthened configuration



Strengthened configuration

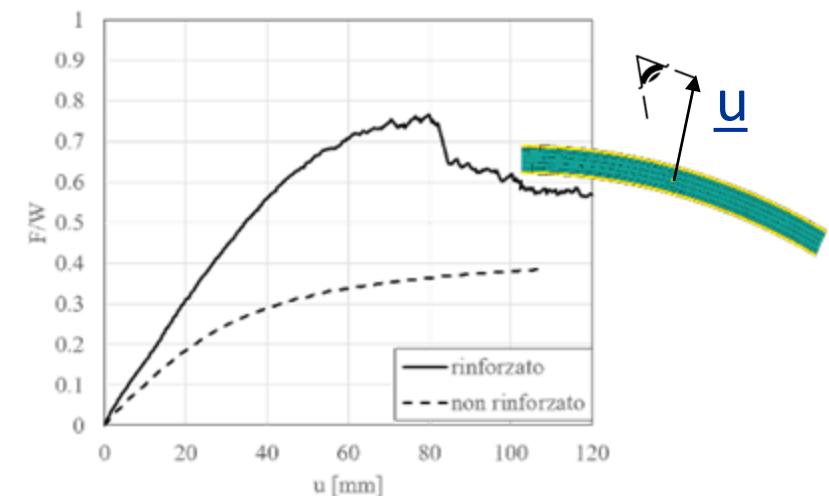


Plastic strains

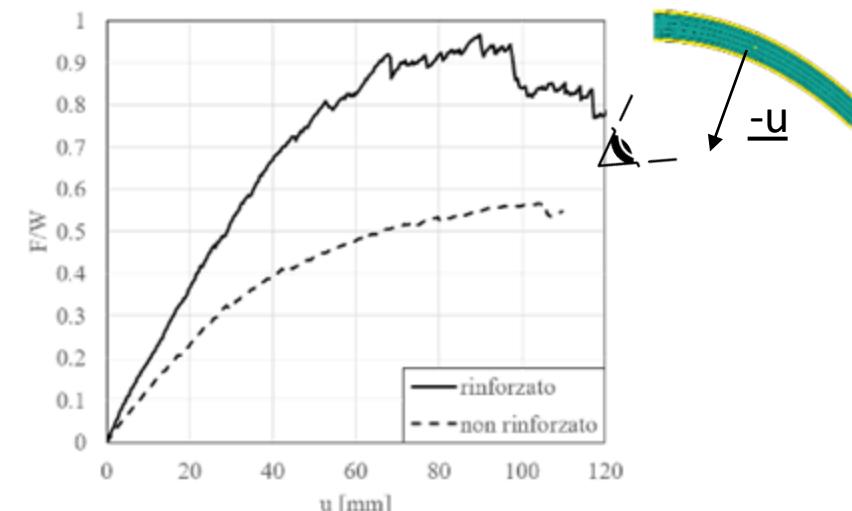


— Sliding

Pushover +u massa



Pushover -u massa



Thank you for your attention

