



# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE – ARCHITETTURA

**TESI DI LAUREA**

## **CANTIERABILITA' DI INIEZIONI CONSOLIDANTI CON MISCELE NON CEMENTIZIE – APPLICAZIONE AL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA**

Relatore: Prof. MARIA ROSA VALLUZZI

Correlatore: Prof. CLAUDIO MODENA  
Dott. Ing. ELVIS CESCATTI

Laureanda: MARTA MILAN

Anno Accademico 2014 - 2015



# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. STATO DELL'ARTE E REVISIONE DELLA LETTERATURA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Metodi di indagine su murature storiche .....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Tecniche Non Distruttive .....	2
1.1.1.1. Magnetometria.....	2
1.1.1.2. Endoscopia.....	3
1.1.1.3. Prove Sclerometriche .....	4
1.1.1.4. Termografia .....	5
1.1.1.5. Georadar.....	6
1.1.1.6. Indagini Soniche .....	7
1.1.1.7. Radiografie .....	13
1.1.1.8. Prove Dinamiche.....	13
1.1.2. Tecniche Leggermente Distruttive .....	14
1.1.2.1. Martinetti Piatti singoli e doppi .....	14
1.1.2.2. Ispezioni e Carotaggi.....	15
1.1.2.3. Prova di Penetrazione .....	16
1.1.2.4. Pull-out Test .....	16
1.1.2.5- Shove Test.....	16
1.1.2.6. Prova Dilatometrica .....	17
1.1.3. Tecniche distruttive .....	17
1.1.3.1. Prova di Compressione diretta monoassiale .....	18
1.1.3.2. Prova di Compressione diagonale.....	19
1.1.3.3. Prova di Taglio-Compressione .....	20
<b>1.2. Metodi di intervento su murature storiche.....</b>	<b>21</b>
1.2.1. Sostituzione muraria o scuci-cuci .....	23
1.2.2. Intonaci Armati .....	24
1.2.3. Ristilatura semplice o armata dei giunti di malta.....	26
1.2.4. Applicazione di tiranti trasversali .....	27
1.2.5. Applicazione di tessuti fibrorinforzati (frp) .....	29
1.2.6. Rivestimento di malta rinforzato con reti in fibra di vetro.....	30
1.2.7. Iniezioni di miscele consolidanti.....	31
<b>1.3. Casi studio precedenti .....</b>	<b>36</b>
1.3.1. Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni – F. Bresolato, N. Pasin (2008) .....	36
1.3.2. Valutazione dell'efficacia di iniezioni per il consolidamento di muratura in pietra mediante prove non distruttive – L. Fattori, S. Scaggiante (2010-2011) .....	46
1.3.3. Qualificazione di murature storiche: procedure sperimentali in sito e calibrazione in laboratorio – M. Dalla Benetta (2012) .....	50
<b>2.CASO STUDIO – IL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA.....</b>	<b>57</b>
<b>2.1. Inquadramento .....</b>	<b>57</b>
2.1.1. Inquadramento Geografico .....	57

2.1.2.	Inquadramento Geologico .....	58
2.1.3.	Inquadramento sismico .....	60
<b>2.2.</b>	<b>Storia del manufatto .....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.</b>	<b>Analisi delle prove svolte nell'ambito di una campagna di indagine precedente .....</b>	<b>71</b>
2.3.1.	Martinetti piatti.....	71
2.3.2.	Carotaggi con indagine endoscopica .....	74
2.3.3.	Verifica dell' integrità delle testate lignee .....	83
2.3.4.	Prove di caratterizzazione delle malte di allettamento .....	83
<b>2.4.</b>	<b>Fase Sperimentale.....</b>	<b>84</b>
2.4.1.	Programma sperimentale .....	84
2.4.1.1.	Prove soniche dirette .....	84
2.4.1.2.	Prove soniche tomografiche .....	87
2.4.1.3.	Interventi di consolidamento mediante iniezioni.....	88
2.4.1.4.	Valutazione dell'efficacia degli interventi.....	90
2.4.2.	Prove soniche dirette pre-iniezioni .....	91
2.4.2.1	Campo prova 1.....	91
2.4.2.2.	Campo prova 2 .....	96
2.4.2.3.	Campo prova 3.....	99
2.4.2.4.	Campo prova 4 .....	102
2.4.3.	Prove soniche tomografiche pre-iniezione .....	106
2.4.3.1.	Campo prova 1.....	106
2.4.3.2.	Campo prova 2.....	109
2.4.3.3.	Campo prova 3.....	113
2.4.3.4.	Campo prova 4 .....	116
2.4.4.	Ulteriori indagini conoscitive svolte mediante prove non-distruttive .....	120
2.4.5.	Intervento di consolidamento mediante iniezioni .....	121
2.4.5.1.	Campo prova 1.....	122
2.4.5.2.	Campo prova 2.....	129
2.4.5.3.	Campo prova 3.....	133
2.4.5.4.	Campo prova 4 .....	139
2.4.6.	Caratterizzazione delle miscele .....	144
2.4.6.1.	Prova di fluidità in sito.....	145
2.4.6.2.	Prova di stabilità in sito.....	147
2.4.6.3.	Prove in laboratorio .....	148
2.4.7.	Valutazione dell'efficacia delle iniezioni tramite prove soniche dirette, tomografiche e endoscopie.....	151
2.4.7.1-	Campo prova 1.....	151
2.4.7.2.	Campo prova 2 .....	163
2.4.7.3.	Campo prova 3.....	175
2.4.7.4.	Campo prova 4 .....	188
<b>3.</b>	<b>ANALISI DEI RISULTATI.....</b>	<b>201</b>
<b>3.1.</b>	<b>Confronto dei risultati ottenuti con le diverse miscele .....</b>	<b>201</b>
3.1.1.	Analisi delle caratteristiche meccaniche .....	201
3.1.2.	Efficacia delle diverse miscele.....	202
<b>3.2.</b>	<b>Confronto dei risultati con quelli ottenuti nelle precedenti sperimentazioni .....</b>	<b>207</b>

3.3.	<b>Cantierabilità dell'intervento di iniezione .....</b>	<b>208</b>
<b>4.</b>	<b>VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA.....</b>	<b>211</b>
4.1.	<b>Normativa di riferimento .....</b>	<b>211</b>
4.2.	<b>Individuazione dell' unità strutturale.....</b>	<b>212</b>
4.3.	<b>Analisi dei Carichi.....</b>	<b>215</b>
4.3.1.	Combinazione delle Azioni .....	218
4.3.2.	Carichi permanenti strutturali-non strutturali .....	218
4.3.3.	Carichi variabili .....	221
4.3.4.	Azione sismica .....	223
4.4.	<b>Analisi per macroelementi .....</b>	<b>226</b>
4.4.1.	Individuazione dei cinematismi .....	230
4.4.2.	Cinematismo 1 – Ribaltamento semplice (fessura) .....	232
4.4.3.	Cinematismo 2 – Flessione semplice (fessura) .....	234
4.4.4.	Cinematismo 3- Ribaltamento semplice (maschio murario facciata) .....	237
4.4.5.	Cinematismo 4 – Flessione semplice (maschio murario) .....	239
4.4.6.	Cinematismo 5 – ribaltamento semplice (maschio contrafforte) .....	242
4.4.7.	Cinematismo 6 – flessione semplice (maschio murario contrafforte).....	246
4.4.8.	Cinematismo 7 – Ribaltamento semplice (parete contrafforte).....	250
4.4.9.	Cinematismo 8- Flessione semplice (parete contrafforte) .....	253
4.4.10.	Cinematismo 9 – Ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud) .....	256
4.4.11.	Cinematismo 10 – Ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud – paramento esterno) .....	260
4.4.12.	Cinematismo 11 – Meccanismo di piano (porzione superiore facciata sud) .....	263
4.4.13.	Cinematismo 12 – meccanismo di piano (porzione superiore facciata nord) .....	265
4.5.	<b>Risultati .....</b>	<b>268</b>
	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>269</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>271</b>
	<b>APPENDICE .....</b>	<b>275</b>



## INTRODUZIONE

Il patrimonio storico edilizio italiano è molto importante in quanto simbolo di periodi storici, civiltà e culture differenti e ricche di significato, la sua tutela e salvaguardia è quindi di interesse primario. Per poter tramandare questi simboli di culture fiorenti è importante garantirne un'adeguata conservazione e fruibilità. Sono già in atto da anni numerosi interventi di recupero di edifici storici che nelle epoche di sviluppo edilizio sono stati messi in secondo piano rispetto alle nuove esigenze abitative. Oltre al recupero dal punto di vista estetico, e quindi alla rimozioni di eventuali interventi che ne abbiano alterato la configurazione originaria, è di notevole interesse mantenere queste strutture integre per poterle tramandare nel tempo. E' importante considerare che in Italia il rischio sismico è rilevante, come hanno dimostrato chiaramente i recenti terremoti de L'Aquila e dell' Emilia. La normativa vigente in materia sono le Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14.01.08 e la circolare applicativa n°617 del 2.02.2009, che hanno classificato come sismico l'intero territorio nazionale. In esse è posta particolare attenzione agli interventi su costruzioni esistenti con un capitolo ad essi dedicato.

Oltre a garantire efficaci collegamenti, di particolare interesse per gli edifici storici è il consolidamento delle murature, le quali costituiscono l'elemento strutturale di maggiore influenza e che spesso possono essere soggette al degrado. Nell'ambito di questa tesi viene trattato il consolidamento di murature storiche mediante l' iniezione di miscele a matrice non cementizia. Questo tipo di intervento permette di raggiungere importanti risultati dal punto di vista del consolidamento, e del raggiungimento di un comportamento monolitico delle pareti in muratura. In particolare è stato analizzato nell'ambito di murature in pietra, le quali possono presentare grosse criticità legate allo scarso collegamento dei paramenti murari e dei singoli elementi. Essendo un intervento invasivo hanno preso sempre più piede miscele a matrice non cementizia le quali garantiscono maggior compatibilità con la muratura storica in pietra.

In questa tesi questo tipo di intervento è stato sperimentato in sito presso il Museo Archeologico di Verona, nel quale dal 2012 sono in atto interventi di restauro, e nello specifico sono state utilizzate tre diverse miscele. L'efficacia dell'intervento è stata valutata mediante indagini non distruttive, in particolare indagini soniche eseguite in modalità diretta e tomografica ed endoscopie. Le indagini soniche sono state eseguite sia nella fase precedente che nella fase successiva all'intervento di iniezione per valutare il grado di consolidazione raggiunto, espresso dall'incremento di velocità sonica; le endoscopie invece sono state eseguite per confermare e validare i dati ottenuti mediante le indagini soniche. Oltre alla valutazione dell'efficacia dell'intervento, queste indagini hanno permesso di confrontare il comportamento e l'efficacia delle tre diverse miscele testate. Le tre diverse miscele sono state quindi valutate sia sulla base dei risultati ottenuti, e quindi della loro efficacia, che delle caratteristiche meccaniche valutate in laboratorio, e delle caratteristiche

di cantierabilità, cioè in base ai problemi riscontrati durante la fase di intervento. La sperimentazione eseguita in prima persona ha permesso infatti di valutare la cantierabilità sia dell'intervento in sé che delle tre diverse miscele permettendo di farne un confronto.

# 1. STATO DELL'ARTE E REVISIONE DELLA LETTERATURA

## 1.1. Metodi di indagine su murature storiche

Un adeguato progetto di indagini ha un ruolo fondamentale nell'intervento di conservazione di un edificio storico, è importante non solo per la scelta di soluzioni appropriate ma anche per la definizione di tempi e costi di intervento. Le indagini forniscono dati da utilizzare nel calcolo strutturale, parametri fisici e meccanici, e dati di controllo della struttura nel tempo.

Preliminarmente al progetto d'indagine è essenziale un rilievo geometrico e del quadro fessurativo, quest'ultimo in particolare ci permette di comprendere lo stato di danno della struttura e condiziona la scelta del tipo d'indagine e la localizzazione delle prove.

Alcune tecniche d'indagine sono realizzate in sito altre, più invasive, in laboratorio con l'esecuzione di test su porzioni di muratura prelevate in sito. Le tecniche d'indagine si dividono in base al grado d'invasività che hanno sulla muratura:

-Prove distruttive;

-Prove debolmente distruttive;

-Prove non distruttive.

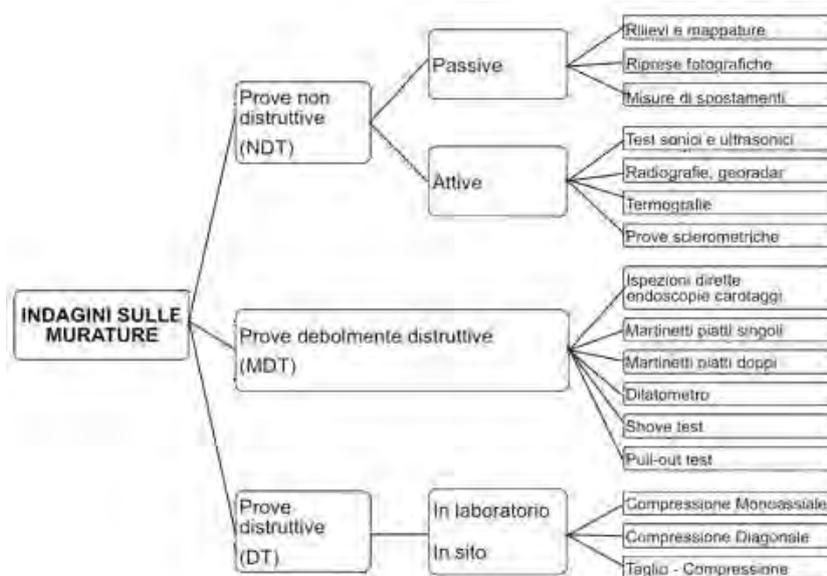


Fig. 1.1. 1 - Indagini sulle murature (Valluzzi 2012)

Le prove distruttive provocano rotture gravi e irrecuperabili, e sono utili per definire le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali.

Le prove debolmente distruttive provocano distruzioni limitate ma sono a carattere locale quindi i risultati non sono particolarmente indicativi dell'intera struttura.

La tendenza, soprattutto negli ultimi anni, è quella di utilizzare principalmente tecniche non distruttive: molto utili per ottenere una conoscenza generale della muratura. La maggioranza di queste tecniche è ancora in fase di studio, quindi la qualità dei risultati forniti è legata al livello tecnologico raggiunto al momento dell'indagine.

### **1.1.1. Tecniche Non Distruttive**

Le prove non distruttive sono impiegate per diverse finalità:

- individuazione di elementi strutturali nascosti, come solai, archi o pilastri;
- qualificazione della muratura e dei materiali componenti, mappando zone non omogenee nella muratura;
- valutazione dell'estensione del danno meccanico in strutture fessurate;
- individuazione del degrado superficiale;
- verifica di proprietà meccaniche e fisiche di malte, mattoni o pietre;
- controllo di alcune tecniche di riparazione come iniezioni o ristilatura dei giunti.

In relazione al grado di sollecitazione fornito alla struttura è possibile dividere le prove non distruttive in prove distruttive attive e prove distruttive passive. Della prima categoria fanno parte le analisi visive, come rilievi e riprese fotografiche, e le analisi degli spostamenti. Della seconda fanno invece parte tutte le prove basate sulla misurazione di fenomeni fisici indotti sulla muratura per mezzo di eccitazioni meccaniche, elettriche o termiche; come ad esempio test sonici, endoscopie o termografie.

#### **1.1.1.1. Magnetometria**

La magnetometria ha lo scopo di individuare la presenza all'interno della muratura di materiale metallico. Essa ne individua non solo la presenza ma anche la posizione, il diametro e il relativo copriferro con una discreta precisione. L'apparecchiatura necessaria consiste in un pacometro il cui funzionamento è basato sulla misurazione dell'assorbimento del campo magnetico prodotto dal pacometro stesso.



Fig. 1.1. 2 - Esecuzione della prova e relativi risultati (Giepi S.r.l.)

#### 1.1.1.2. Endoscopia

L'endoscopia consiste nell'ispezione degli strati più interni della muratura. Essa viene eseguita tramite dei fori passanti nella muratura (spesso si usano i fori dei carotaggi), all'interno dei quali viene inserito un apparecchio dotato di un sistema ottico, costituito da un obiettivo e una lente tradizionale, o sistemi più innovativi costituiti da fibre ottiche, e di un sistema d'illuminazione. L'apparecchio viene inserito all'interno della muratura attraverso un supporto, come ad esempio un tubo di ferro, attraverso il quale viene fatto passare il filo e fissato l'apparecchio all'estremità.

L'endoscopia permette di ottenere informazioni riguardo la presenza di vuoti o fessure all'interno della muratura, e riguardo alla sua composizione interna. E' molto utile in particolare quando si effettuano iniezioni: sia in fase d'indagine, per capire se l'intervento è opportuno, sia in seguito, in fase di monitoraggio, per valutare l'efficacia di questo.

L'endoscopia, anche se prevede la realizzazione di un foro all'interno della muratura, è classificata come prova non distruttiva in quanto molto spesso vengono usati i fori eseguiti per i carotaggi, e in ogni caso la dimensione del foro non è significativa.



*Fig. 1.1.3 - Esecuzione endoscopia (Museo Archeologico di Verona)*

### **1.1.1.3. Prove Sclerometriche**

Le prove sclerometriche sono in grado di fornire informazioni sulla qualità del calcestruzzo, misurando il rimbalzo di una massa battente proiettata sulla superficie della struttura stessa. Tali prove vengono principalmente usate per verificare la qualità dei giunti di malta. Lo strumento di prova è lo sclerometro, dispositivo costituito da un corpo cilindrico contenente un maglio d'acciaio caricato a molla che, quando viene rilasciato, colpisce un pistone d'acciaio che fuoriesce da un'estremità dell'involucro e che si trova a contatto con la superficie del calcestruzzo. La prova deve essere ripetuta più volte (nella normativa consigliano nove ripetizioni) divise tra giunti verticali, orizzontali e zone di confine della muratura; il principio di lettura si basa sull'altezza di rimbalzo di una massa battente interna allo strumento.

La prova fornisce una correlazione tra durezza superficiale e resistenza a compressione; questa correlazione però dipende da vari parametri che possono influenzarla rendendo meno attendibile il risultato ottenuto, come durezza dell'aggregato lapideo, finitura e compattazione dello strato corticale, presenza di intonaci, presenza di umidità. Quindi l'uso più opportuno consiste nell'individuare zone relativamente più deboli o più forti rispetto ad altre, ottenendo quindi risultati qualitativi e non quantitativi.



Fig. 1.1. 4 - Prova sclerometrica

#### 1.1.1.4. Termografia

Le prove termografiche si basano sul principio che ogni materiale emette energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, in funzione della propria conducibilità termica, ovvero della capacità di trasmettere e trattenere calore. Il flusso di energia è regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = e s T^4$$

Dove  $E$  è il flusso energetico,  $T$  è la temperatura assoluta della superficie,  $e$  e  $s$  due costanti; in particolare  $e$  dipende dal materiale che costituisce la superficie.

Ogni oggetto formato da diversi componenti, una volta riscaldato, vedrà i suoi componenti assumere temperature diverse in funzione della diversa conducibilità termica. La termografia tramite un rilevatore, costituito da un sistema ottico e da un sistema elettrico, registra le differenze di temperature in un termogramma, che consiste in una rappresentazione grafica di diverse tonalità proporzionali alle diverse temperature.

Ci sono due diversi modi di condurre l'analisi termografica: il metodo attivo, che consiste nel riscaldare artificialmente le pareti con lampade od altro, e il metodo passivo che sfrutta i cicli termici naturali, insolazione e successivo raffreddamento.

L'impiego della termografia è molto utile per rilevare eventuali alterazioni in elementi murari apparentemente omogenei, in particolare nel caso di murature intonacate o affrescate nelle quali non è possibile il contatto superficiale o il prelievo di campioni. E' spesso usata anche per verificare la presenza di umidità; in questo caso la termografia evidenzia le aree più fredde, ovvero quelle dove si manifesta una evaporazione continua. Altri usi sono legati all'individuazione di vuoti o cavità e di inclusioni di differenti materiali e al rilievo di impianti per il riscaldamento, elettrici, idrici o tubature per il gas.

Il limite principale di questa tecnica è dato dalla scarsa penetrazione all'interno della struttura, non è infatti possibile localizzare anomalie nella parte centrale della muratura ma solo fino a 10-20cm all'interno; ed è inoltre sensibile alle condizioni al contorno della prova.



*Fig. 1.1. 5 - Termografia (Museo Archeologico di Verona)*

#### **1.1.1.5. Georadar**

L'indagine radar è una tecnica sperimentale che consiste nella emissione e ricezione di impulsi elettromagnetici a larga banda, cioè brevi successioni di onde elettromagnetiche ad alta frequenza. E' una tecnica versatile che può essere utilizzata per diverse operazioni di indagine come:

- ricerca di elementi strutturali nascosti in murature portanti o orizzontamenti;
- individuazione di tessiture murarie nascoste da intonaci e affreschi;
- controllo dell'efficacia delle iniezioni;
- individuazione di difetti, fessure, vuoti o inclusioni di materiali diversi;
- individuazione della morfologia delle sezioni di murature a più paramenti;
- rilievo della presenza di umidità nelle murature.

La tecnica si basa sull'emissione di un flusso di energia elettromagnetica, il quale viene alterato dagli oggetti incontrati nel suo percorso, e questa alterazione può essere rilevata attraverso gli echi di ritorno.

La strumentazione necessaria consiste in un' antenna radar costituita da un trasmettitore e un ricevitore, trascinando quest'antenna sulla muratura si ottengono delle sezioni radar che esprimono l'andamento dei segnali ricevuti in funzione del tempo: l'immagine che si è ottenuta è quindi una sezione del mezzo irradiato il cui asse orizzontale rappresenta il tragitto fatto con l'antenna lungo la superficie esterna e l'asse verticale i tempi che l' onda ha

impiegato per coprire lo spazio tra la superficie esterna e le zone di discontinuità che hanno creato riflessioni. Una volta misurato quindi il tempo impiegato dall'onda e conoscendo la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo è possibile determinare la posizione degli ostacoli.

La valutazione della velocità non è però semplice nella muratura, in quanto varia sia per la disomogeneità del materiale, che per la presenza di vuoti e di umidità. Un altro problema per quanto riguarda la valutazione dei dati è dato dai disturbi del segnale che sono dovuti a:

- il disturbo tra la parte emittente e ricevente dell'antenna stessa;
- echi multipli dovuti ai cambi di materiale;
- sovrapposizione di echi laterali che possono sembrare immagini di riflettori paralleli in realtà non esistenti.

Per limitare questi disturbi è consigliato eseguirla lontano dagli spigoli, che possono causare effetti di bordo; e ripetere le operazioni regolando l'antenna secondo diverse angolazioni.



*Fig. 1.1. 6 – Georadar (Museo Archeologico di Verona)*

#### **1.1.1.6. Indagini Soniche**

Le tecniche di indagine sonica sono basate sulla ricezione, attraverso un accelerometro, di un impulso generato all'interno della muratura in seguito all'impatto di un martello strumentato; conoscendo la distanza tra il punto di trasmissione e di ricezione, e l'intervallo di tempo trascorso dalla partenza all'arrivo del segnale è possibile ricavare la velocità con cui si è diffusa l'onda. Una volta ricavata la velocità esistono alcune relazioni che la legano alle proprietà elastiche del mezzo, essa infatti è direttamente correlabile alla densità e al modulo elastico; nel caso della muratura però, considerando la sua eterogeneità e il gran numero di tipologie esistenti, non è possibile correlare direttamente la velocità alle proprietà del mezzo.

Le indagini soniche sono caratterizzate da un grosso limite dato dagli effetti di attenuazione che le caratteristiche delle murature storiche hanno sulla propagazione delle onde; come la dimensione variabile degli elementi, la loro porosità e la presenza di fessure. Possiamo dividere le attenuazioni in due tipi principali:

- **Attenuazione geometrica:** quando le onde si propagano all'interno di un solido si attenuano allontanandosi dalla sorgente, in quanto la propagazione è sferica e quindi l'energia immessa si distribuisce su superfici via via maggiori.
- **Attenuazione strutturale:** smorzamento generato dalle discontinuità e dai difetti presenti nel materiale.

Le tecniche assumono quindi un carattere qualitativo per quanto riguarda le caratteristiche elastiche del materiale e un carattere quantitativo nei rapporti di variazione di tali caratteristiche da punto a punto o tra situazione ante e post consolidamento (Monteforte, 1988). È infatti molto usata nella valutazione di tutti quegli interventi di consolidamento che modificano la consistenza della muratura, ad esempio le iniezioni, basandosi sul principio che la velocità delle onde elastiche dipende dalla consistenza del mezzo attraversato, in particolare è elevata nei mezzi omogenei solidi e subisce invece una forte attenuazione nell'aria.

#### *Modalità di esecuzione:*

Attraverso un martello strumentato si imprime un'onda acustica nella muratura, un opportuno sistema di acquisizione collegato al martello registra l'istante in cui è applicata tale onda e l'ampiezza che questa ha; successivamente l'energia generata dall'impatto del martello con la superficie si trasforma in energia acustico-vibrazionale, si propaga nel mezzo, e attraverso un accelerometro, viene registrato l'istante in cui si l'onda arriva all'accelerometro e la sua ampiezza. I parametri registrati sono quindi l'attenuazione subita dal segnale percorrendo la muratura, e il tempo impiegato; conoscendo quindi lo spessore della muratura è possibile calcolare la velocità del segnale. Con una singola battuta, si ha però un valore poco indicativo delle caratteristiche dell'elemento, la prova si ripete quindi su più punti secondo una maglia regolare.

Possiamo individuare tre diverse metodologie di conduzione della prova:

- **Prove dirette:** Si effettuano disponendo i punti di emissione e ricezione dei segnali su due lati opposti della muratura, alla stessa altezza dal piano di calpestio e in modo che la loro congiungente sia perpendicolare alle superfici. Per questo genere di prova è sufficiente un accelerometro, infatti per ogni punto "battuto" nel corrispondente punto sull'altro lato della muratura. I risultati ottenibili dall'elaborazione dei dati sono significativi e utili per la valutazione della consistenza muraria.

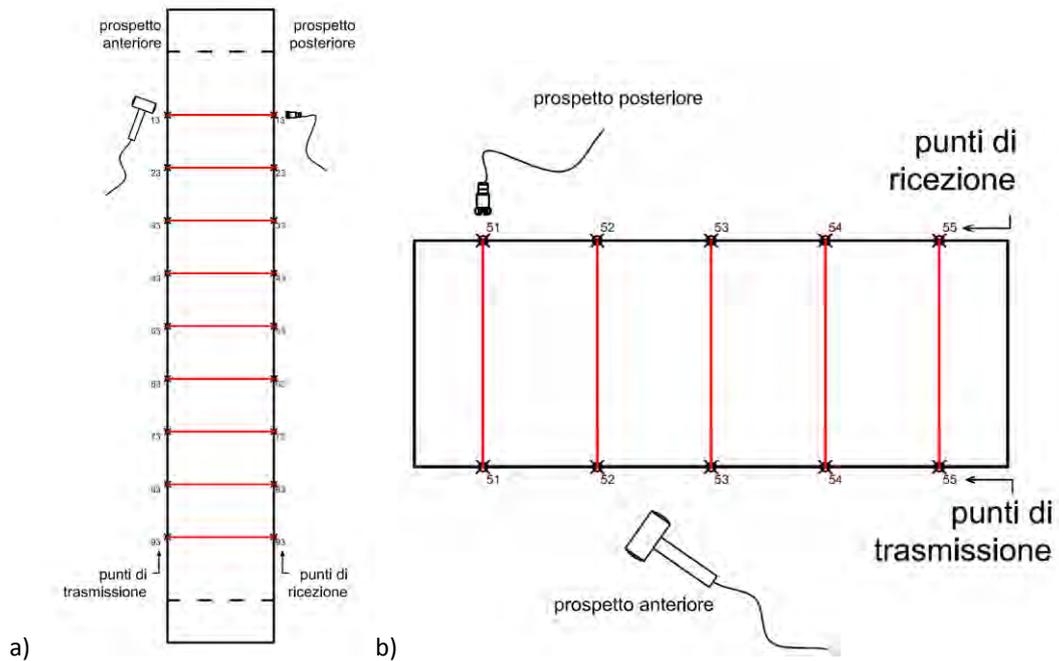


Fig. 1.1. 7 - Prova sonica diretta: sezione verticale e orizzontale (Deliverable D11.1.2004)

- Prove indirette: Si effettuano disponendo i punti di emissione e di ricezione del segnale sullo stesso lato e vengono solitamente eseguite lungo gli assi orizzontali o verticali. I dati che si ottengono quindi sono solo della parte più esterna della murature e non sono collegabili alle caratteristiche dell'intera sezione.

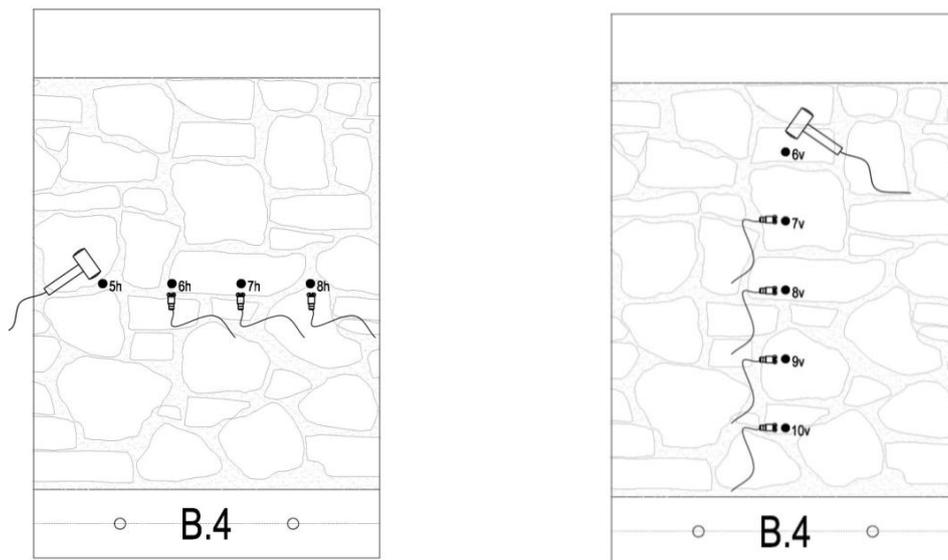


Fig. 1.1. 8 - Prova sonica indiretta: sezione orizzontale e verticale (Fattori e Scaggiante, 2011)

- Prove tomografiche: Si effettuano disponendo il martello e l'accelerometro su lati opposti o consecutivi della muratura da indagare; per questa prova sono necessari più accelerometri, in questo modo da un'unica battuta è possibile ottenere i parametri relativi ad una vasta porzione della sezione. La tomografia prevede l'acquisizione di un elevato numero di dati per garantire la copertura dell'intera sezione e ottenere risultati significativi.

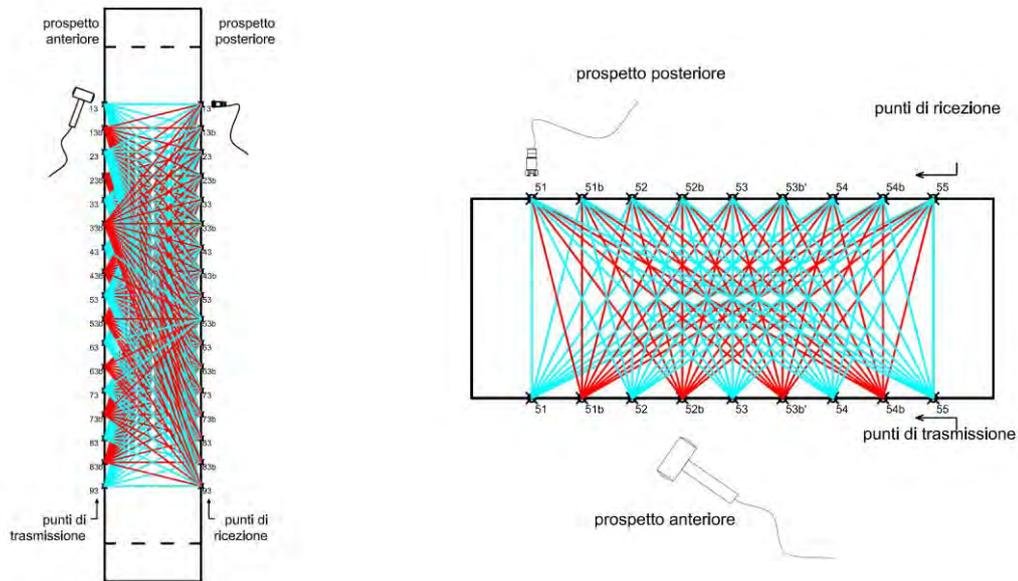


Fig. 1.1. 9 - Schema esecuzione tomografia orizzontale e verticale (Deliverable D11.1, 2004)

**Strumentazione:**

L'attrezzatura necessaria per eseguire un'indagine sonora è costituita da: un martello strumentato, uno o più accelerometri, un amplificatore di potenza, un convertitore analogico/digitale, un oscilloscopio, un pc per l'acquisizione dei dati, i cavi di collegamento tra i vari componenti.



Fig. 1.1. 10 - Strumentazione usata ( Museo Archeologico di Verona)

- Martello strumentato:

Il martello strumentato serve per eccitare la struttura in modo da poterne studiare il comportamento dinamico; esso genera un impulso sonoro in seguito al suo impatto con la superficie, un sensore di forza contenuto nella testa del martello trasforma la forza dell'impatto in un segnale elettrico che viene inviato agli strumenti di analisi. Esistono diversi tipi di martelli che si differenziano tra loro per lunghezza del manico e materiale della testa; in particolare la punta del martello è smontabile e può essere di tre diverse rigidità (hard, medium, soft), influenzando così le frequenze del segnale.



*Fig. 1.1. 11 - Martello strumentato (Museo Archeologico di Verona)*

- Accelerometro

Gli accelerometri sono dei trasduttori contenenti al proprio interno del materiale piezoelettrico, cioè un materiale in cui uno sforzo meccanico induce una polarizzazione elettrica. Successivamente le cariche generate nel cristallo piezoelettrico vengono convertite in una differenza di potenziale misurabile e registrabile attraverso un apposito circuito, formato da un amplificatore di carica e dalla microelettronica ad esso collegata, che nei modelli ICP (integrated circuit piezoelectric) sono incorporati all'interno dell'involucro del sensore. Il segnale che arriva alla strumentazione per la registrazione è quindi una differenza di potenziale.



Fig. 1.1. 12 – Accelerometri (Museo Archeologico di Verona)

- Oscilloscopio

L'oscilloscopio è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare su un grafico bidimensionale l'andamento temporale dei segnali elettrici. Nel nostro caso, la funzione di visualizzazione dei segnali viene garantita e gestita autonomamente dal software di acquisizione dati presente nel PXI.

- Sistema PXI

Il sistema PXI è una robusta piattaforma basata su PC in grado di offrire una soluzione di distribuzione ad elevate prestazioni per sistemi di misura e automazione. E' costituito da tre componenti fondamentali: uno chassis, che è il robusto telaio metallico all'interno del quale sono installati tutti i principali componenti hardware; il controller di sistema, che è costituito da tutte le componenti hardware indispensabili per la gestione dello strumento (CPU, Hard Disk, memoria Ram, ecc.) e da una serie di periferiche per l'interfacciamento con altri apparecchi; i moduli di periferica, che sono delle schede progettate e costruite per eseguire specifiche funzioni.

Le schede di cui è dotato il PXI usato per questa campagna prove sono una scheda di acquisizione del segnale dinamico a 8 canali progettata per effettuare accurate misure di dominio della frequenza, una scheda ottimizzata per le vibrazioni, una scheda di acquisizione dati multifunzione per applicazioni che non presentano costi eccessivi.

- Software di acquisizione ed elaborazione

Attualmente i software utilizzati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale di Padova, e in particolare per questa campagna prove, sono: ProveSoniche per l'acquisizione e archiviazione dei dati, Microsoft Excel per loro elaborazione, Surfer per la restituzione grafica.

La fase di acquisizione inizia dopo il montaggio dell'apparecchiatura e è necessario settare due parametri importanti: la frequenza di scansione e il numero totale di punti da campionare; in particolare una frequenza di scansione più alta permette una più facile individuazione dei punti di partenza degli impulsi del martello e degli accelerometri, ma non permette di registrare il segnale fino al suo completo smorzamento. Al termine di ogni battuta i dati vengono salvati in formato ASCII.

L'elaborazione dei dati ha come scopo quello di individuare le velocità di propagazione dei segnali all'interno della muratura. Questo viene fatto manualmente dall'operatore che individua, su un grafico tempo ampiezza relativo ai segnali registrati, l'istante in cui parte l'onda acustica e l'istante in cui questa viene ricevuta dall'accelerometro, e riporta il tempo intercorso tra i due istanti in un foglio di calcolo Excel dove riporta anche la distanza tra i due punti ottenendo quindi la velocità. Per quanto riguarda le tomografiche non è però sufficiente questa operazione, è infatti necessario calcolare le velocità componenti la mappa con il software Tomografia, sviluppato dall'ing. Monteforte del 1998.

La restituzione grafica dei risultati è restituita automaticamente dal software Surfer sulla base dei dati (le coordinate dei punti e le velocità) forniti dall'utente ed è indispensabile per la valutazione dello stato di conservazione della muratura.

#### **1.1.1.7. Radiografie**

Anche la radiografia, come l'endoscopia, deriva dalla medicina; essa si basa sul principio che materiali aventi diversa densità e spessore hanno un assorbimento differenziato delle radiazioni elettromagnetiche. Essa viene eseguita posizionando sui due lati della muratura un emettitore di raggi x ed una pellicola sensibile che, una volta impressionata, mette in evidenza le irregolarità interne e le eventuali lesioni e vuoti della struttura. In generale viene usata raramente a causa dei problemi di salute che può provocare agli operatori.

#### **1.1.1.8. Prove Dinamiche**

Lo scopo principale di questo tipo di prova è quello di valutare la risposta di un edificio alle vibrazioni, esse possono essere ambientali o forzate.

Le vibrazioni ambientali sono generalmente vento e traffico, tranne in casi più particolari come ad esempio i campanili dove si aggiungono le vibrazioni indotte dalle campane; le vibrazioni forzate sono invece costituite da sistemi di martellamento locale o da vibrodine. E' stato comunque accertato che i risultati ottenuti con vibrazioni ambientali concordano con quelli ottenuti con vibrazioni forzate, che sono più costose quindi meno utilizzate.

Il rilievo dei dati viene effettuato attraverso una serie di accelerometri posti in parti significative della struttura. L'elaborazione dei dati, attraverso l'analisi spettrale, permette di ricavare i parametri caratteristici della risposta locale e globale dell'edificio.

### 1.1.2. Tecniche Leggermente Distruttive

Le prove leggermente distruttive compromettono parzialmente la porzione di muro testata, ma forniscono valori numerici che possono essere estendibili all'intera muratura. Esse danno sia risultati quantitativi che qualitativi, permettono infatti di ricavare misure dirette delle caratteristiche di resistenza e deformabilità delle strutture, misure dello stato di sforzo agente sulla struttura stessa e consentono di effettuare valutazioni qualitative sulla valutazione della muratura.

#### 1.1.2.1. Martinetti Piatti singoli e doppi

E' una tecnica dalle notevoli potenzialità, è l'unica infatti tra quella attualmente usate che permette di ottenere informazioni sia sulle principali caratteristiche meccaniche di una struttura, sia in termini di sollecitazioni che di sforzo e resistenza. La prova è considerata leggermente distruttiva anche se al termine lo strumento può essere rimosso e il giunto eventualmente risarcito.

I martinetti piatti sono dei cuscinetti vuoti costituiti da delle sottili lamine d'acciaio saldate lungo i bordi, si differenziano tra loro per forme e dimensioni in modo da adattarsi a qualsiasi tipo di muratura e di taglio.

La prova viene eseguita realizzando un taglio orizzontale nella muratura: in caso di muratura in mattoni questo viene eseguito un taglio rettangolare lungo un giunto orizzontale, per quanto riguarda la muratura in pietra questo non è invece possibile non essendoci spesso giunti orizzontali regolari e necessariamente il taglio interesserà anche i corsi in pietra e verrà realizzato con un disco rotante di lama diamantata, nel caso di murature a più paramenti il taglio (e quindi la prova in generale) riguarda solo gli strati più esterni, in questo caso spesso si integra questa prova con una prova dilatometrica che viene trattata successivamente.

Una volta eseguito il taglio, misurando con degli appositi estensimetri il rilassamento da esso causato e possibile determinare lo stato di sforzo, misurando appunto la parziale chiusura della fessura. La misura viene effettuata segnando, prima del taglio, varie coppie di punti e misurando la distanza tra essi prima e dopo averlo eseguito.

Successivamente viene inserito il martinetto idraulico piatto, andando poi ad aumentare la pressione all'interno di esso fino a ripristinare nella muratura la condizione precedente al taglio; in questo modo la pressione all'interno del martinetto eguaglia la sollecitazione preesistente della muratura in direzione normale al piano del martinetto, permettendoci così di conoscere direttamente lo stato tensionale della muratura.

$$\sigma = p k_a k_m$$

Dove: -  $p$  è la pressione dell'olio all'interno del martinetto,

-  $k_a = f_m / f_j$  è il rapporto tra la pressione applicabile e quella del martinetto,

-  $k_m = A_j/A_c$  è il rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio.

Se invece eseguiamo una prova con martinetti doppi, usiamo quindi due martinetti, possiamo misurare la deformabilità della muratura. Per fare questo viene inserito a distanza di 40-50 cm dal primo un altro martinetto parallelo ad esso; in questo modo i due martinetti delimitano una porzione di dimensioni apprezzabili di muratura indisturbata su cui è possibile effettuare un prova di compressione monoassiale tramite un' opportuna strumentazione che misura le deformazioni verticali e orizzontali. La prova dei martinetti doppi può essere utilizzata anche per la valutazione della resistenza a compressione della muratura tramite dei cicli di carico con un graduale incremento dello stato di sollecitazione, determinando così i moduli di deformabilità per i diversi livelli di sforzo. Il valore della resistenza a compressione viene ricavato mediante l'estrapolazione della curva sforzi deformazione.

Nel caso di edifici bassi (uno o due piani) non è possibile eseguire questa prova a causa della mancanza di contrasto superiore.



*Fig. 1.1. 13 - Martinetti piatti singoli e doppi (Museo Archeologico di Verona)*

### 1.1.2.2. Ispezioni e Carotaggi

Le ispezioni e i carotaggi rappresentano una tecnica di ispezione diretta, sono quindi i più adatti all'analisi della morfologia muraria. A volte infatti è sufficiente asportare alcuni blocchi di pietra per visionare la sezione interna della muratura e eseguire quindi un'ispezione ed individuare quindi eventuali fori tamponati o la presenza di materiali diversi, mentre altre volte è necessaria un'analisi più profonda, un carotaggio. Quest'ultima viene eseguita tramite un apposito strumento, detto carotatore, che va a perforare la muratura ed a estrarre il campione, la carota, che consente l'analisi stratigrafica della muratura e lo studio della sua composizione, mostrando quindi eventuali nuclei interni nel caso di murature a più paramenti.

Un grosso limite di questa tecnica è dato dall'impossibilità di ottenere campioni integri, essi infatti sono sottoposti alle vibrazioni del perforatore e al dilavamento causato dall'acqua iniettata durante il prelievo. Questi problemi rendono quindi più difficoltose le valutazioni sull'effettiva qualità della muratura e sulla sua consistenza.

Spesso al carotaggio segue un'endoscopia, che sfrutta appunto il vuoto lasciato dalla carota, tecnica trattata nei metodi di indagine non distruttivi.



*Fig. 1.1. 14 - Campione di carotaggi ( Museo Archeologico di Verona)*

### **1.1.2.3. Prova di Penetrazione**

La prova di penetrazione ha l'obiettivo di caratterizzare la qualità della malta. La prova si esegue mediante un apposito trapano strumentato e si basa sul principio per cui la consistenza dei giunti è funzione dell'energia spesa dal trapano per realizzare un foro profondo 40-50mm e di 4mm di diametro.

E' una prova che da risultati limitati in quanto non è possibile estendere i risultati all'intera struttura muraria, e non è facilmente eseguibile in caso di murature storiche.

### **1.1.2.4. Pull-out Test**

La prova di pull-out valuta la resistenza allo strappo di una barra di acciaio dalla murature, questo viene fatto misurando la forza necessaria ad estrarre una vite ad elica da un giunto di malta di dimensioni consistenti. Tramite questa prova possiamo anche determinare la resistenza cubica, la resistenza a trazione e a flessione.

Un importante limite di questa prova è che il carico applicato per estrarre la vite non deve mai superare il carico massimo di snervamento dell'acciaio altrimenti si perde la proporzionalità tra lo sforzo applicato e la resistenza della malta.

### **1.1.2.5- Shove Test**

Il shove test è una prova a taglio diretto finalizzata alla determinazione del valore medio di resistenza a taglio di una muratura in mattoni pieni e alla valutazione dell'aderenza tra la malta e gli elementi resistenti. Il test si esegue facendo slittare orizzontalmente un elemento di laterizio, isolato dai resti della muratura, attraverso un martinetto; la resistenza a taglio viene quindi calcolata per il letto di malta adiacente al mattone caricato e basata sull'area lorda della giuntura, che viene quindi considerata completamente riempita.

Il test si esegue estraendo inizialmente i due mattoni adiacenti a quello da testare, in uno dei due fori viene inserito il martinetto che fornirà poi la spinta, nell'altro foro vengono invece posizionati degli estensimetri per valutare lo spostamento. Successivamente si inizia il carico, aumentando gradualmente la pressione fornita dal martinetto fino ad ottenere uno spostamento continuo del mattone.

Esistono due diverse tipologie di esecuzione della prova, la prima prevede l'uso di due martinetti piatti, posti sopra e sotto la zona su cui si eseguirà la prova, in modo di controllare lo stato di compressione a cui è sottoposto il campione durante il test; il secondo invece viene eseguito stimando la compressione a cui è sottoposto.

#### **1.1.2.6. Prova Dilatometrica**

La prova dilatometrica fornisce informazioni sulla rigidità e sulla deformabilità dei riempimenti di sezioni murarie di elevato spessore tipicamente realizzate a secco. (binda). Molto spesso questa prova completa i risultati ottenuti attraverso l'uso dei martinetti piatti, che indagano solo lo strato più esterno della muratura.

L'esecuzione della prova avviene attraverso una opportuna sonda dilatometrica che viene inserita in un foro di diametro 75mm e lungo 20cm, ottenuto mediante un carotatore, questa applica una tensione sulla parete del foro e ne misura la deformazione che ne consegue; calcola quindi il modulo di elasticità.

#### **1.1.3. Tecniche distruttive**

Le prove di tipo distruttivo sono quelle che più di tutte consentono di effettuare misure dirette delle caratteristiche meccaniche delle murature, come la resistenza a compressione e taglio e i moduli elastici, e possono essere eseguite in sito o in laboratorio.

Quelle eseguite in laboratorio però difficilmente vengono eseguite su campioni veramente provenienti dal sito, l'estrazione infatti causa un rimaneggiamento che potrebbe ridurre le proprietà meccaniche. Vengono quindi costruiti dei campioni con caratteristiche simili alla muratura presente in situ e oggetto di analisi, questi campioni solitamente presentano proprietà con valori più elevati rispetto a quelli che si misurerebbero in situ.

Le prove in sito vengono eseguite isolando il pannello da testare tramite dei tagli verticali e applicando un carico noto attraverso una struttura di contrasto.

In entrambi i casi si deve prestare attenzione alla scelta delle dimensioni del pannello, in particolare la dimensione minima ( la larghezza del pannello) dovrebbe essere superiore di almeno tre volte la massima dimensione degli elementi; e i rapporti tra altezza, larghezza e spessore del pannello devono essere tali per cui non si verifichino effetti di bordo ma che lo sforzo sia invece distribuito uniformemente nella parte centrale del campione.

### **1.1.3.1. Prova di Compressione diretta monoassiale**

Questa prova distruttiva consiste nell'applicazione ad un pannello, scelto e isolato dal resto della muratura come spiegato prima, di un carico di compressione, monotono o ciclico, fino al raggiungimento o al superamento della resistenza massima dell'elemento. Lo sforzo viene applicato tramite due martinetti idraulici che agiscono su delle piastre di ripartizione posizionate alle estremità del pannello, e deve essere tale da garantire la distribuzione uniforme delle tensioni orizzontali e che la risultante delle compressioni sia centrata nella sezione.

Sia per le prove condotte in laboratorio, sia per quelle condotte in sito, la prima operazione è la preparazione del pannello: per quanto riguarda quelle in sito questa avviene tagliando con una apposita sega dotata di lama diamantata le superfici laterali e la superficie superiore del pannello, lasciando solo il lato inferiore connesso alla restante muratura e viene applicata una trave in acciaio o in calcestruzzo sulla base superiore del pannello per distribuire i carichi applicati. La preparazione per quelle condotte in laboratorio invece avviene realizzando due cordoli in cemento armato per garantire appunto la distribuzione dei carichi e l'orizzontalità del piano di applicazione.

Una volta preparato il pannello si applicano i trasduttori di spostamento, per rilevare le deformazioni del pannello dovute all'applicazione del carico di compressione, e degli estensimetri anche sullo spessore della muratura per misurare la deformazione trasversale e, in caso di muratura a più paramenti, verificare se c'è stato uno distacco.

Attraverso questa prova possiamo determinare la resistenza a compressione, la relativa deformazione e il modulo di elasticità del campione. Aumentando il carico sino in campo plastico e a rottura è possibile definire la resistenza ultima della struttura, ottenere indicazioni sulla capacità di deformazione e osservare la modalità di collasso.

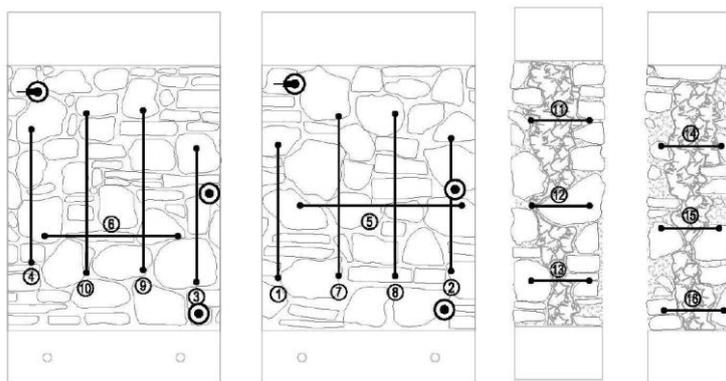


Fig. 1.1. 15 - Disposizione dei trasduttori di riferimento nelle prove a compressione diretta (Santunione, Secchiero, 2011)

### 1.1.3.2. Prova di Compressione diagonale

Questa prova di compressione differisce da quella precedente per l'applicazione del carico, il campione di muratura viene infatti posizionato in diagonale con una rotazione di  $45^\circ$  rispetto al piano orizzontale. Come per la prova precedente anche questa può essere svolta sia in laboratorio che in sito, quando viene svolta in laboratorio vengono eseguiti due cordoli di cemento collocati in corrispondenza degli spigoli del provino sui quali viene impartito lo sforzo con dei martinetti. Per i test in sito invece il pannello non viene ruotato e il carico viene applicato, sempre tramite dei martinetti posizionati sugli spigoli, lungo la diagonale del pannello.

Attraverso l'utilizzo di questo schema di applicazione dei carichi si generano degli sforzi sia di trazione che di compressione; si hanno anche questi sforzi di trazione perché la retta di applicazione dei carichi forma un angolo diverso da  $0^\circ$  con i giunti della muratura. Questa prova viene quindi utilizzata per la misura della resistenza a taglio per fessurazione diagonale e delle caratteristiche di deformabilità a taglio dei pannelli.

Per quanto riguarda la scelta del pannello è necessario prestare attenzione a vari aspetti: l'integrità della muratura, non devono quindi esserci fessure, lesioni, cavità o nicchie o tubazioni; la rappresentatività del pannello, il campione scelto deve essere infatti rappresentativo della tipologia muraria dell'edificio; e l'estensione del pannello scelto, deve avere un numero di giunti e di blocchi tale da riprodurre il comportamento globale della struttura.

Il pannello può inoltre essere di varie forme e in base a questa ci sono diverse modalità di esecuzione della prova:

- Pannello circolare di spessore  $S$  e diametro  $D$ , ipotizzando un meccanismo di crisi dovuto al raggiungimento della tensione di rottura per trazione nel centro del pannello.

- Pannello quadrato di spessore  $S$  e lato  $B$  con disposizione del pannello a  $45^\circ$  rispetto al piano orizzontale, o applicazione del carico lungo la diagonale.

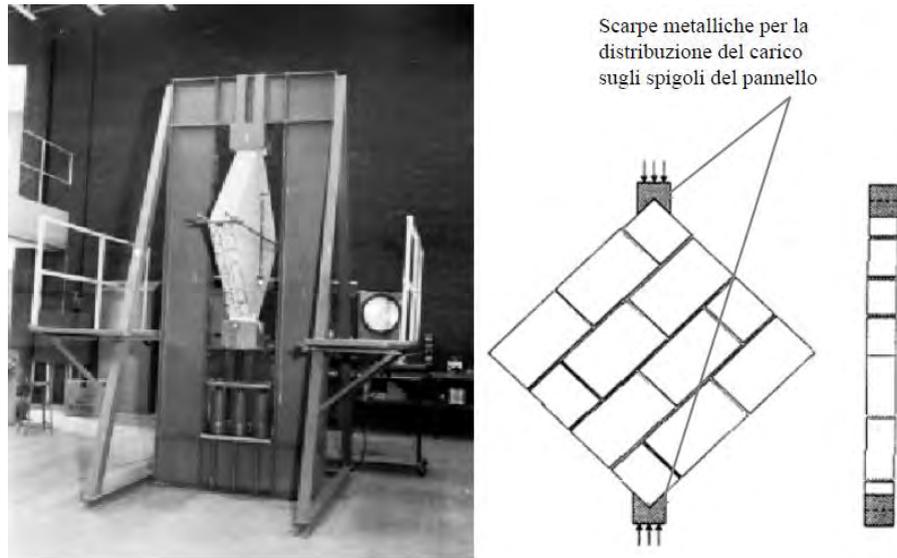


Fig. 1.1. 16 - Apparato di prova adottato per la determinazione della resistenza a trazione diagonale della muratura (Modena,2000)

### 1.1.3.3. Prova di Taglio-Compressione

Questa prova consiste nell'applicazione di una forza di compressione orizzontale a metà dell'altezza di un campione di muratura, e di un carico di contrasto sul lato superiore del provino. Essi devono avere una forma rettangolare, con l'altezza pari al doppio della base; in questo modo quando il carico orizzontale viene applicato i pannelli vengono suddivisi in due semi-pannelli di forma quadrata e su ognuno dei quali si sviluppa uno stato di sollecitazione come quello che si ottiene con le prove a compressione diagonale.

La forza di compressione orizzontale viene impressa sul provino tramite due barre d'acciaio filettate collegate ad una trave di carico verticale, posta sulla porzione di muratura a lato a quella da testare o su una apposita struttura di sostegno, dalla un martinetto idraulico fa muovere le barre generando lo sforzo. La prova può essere anche eseguita in modalità ciclica, in questo caso è necessario un opportuno sistema di inversione del carico.

Come le altre prove distruttive anche questa può essere svolta sia in sito che in laboratorio. Quando viene svolta in sito è necessario tagliare il pannello, lungo i due lati verticali e la sommità oppure solo lungo i lati verticali, ma in questi casi non è possibile controllare il carico verticale agente e quindi lo sforzo nella muratura. Quando la prova viene svolta in laboratorio invece si ha l'applicazione di una forza di compressione verticale costante, che simula l'azione di pre-compressione verticale gravitazionale agente sulle pareti, e una forza di taglio orizzontale invece variabile in modo ciclico o monotono corrispondente all'azione sismica agente durante un ipotetico terremoto. Con l'uso di questi carichi la prova indaga il comportamento dei maschi murari di edifici reali sottoposti ad azioni orizzontali cicliche, riconducibili all'azione sismica.

Gli schemi di prova adottabili, a seconda delle condizioni di vincolo della sezione superiore del muro, sono:

- Il primo viene impostato considerando le pareti come mensole a sbalzo. Il pannello viene fissato alla base e caricato con uno sforzo di pre-compressione verticale centrato e costante e, in sommità, con un carico o uno spostamento orizzontale laterale.
- Il secondo invece considera una configurazione del pannello murario con doppio incastro. Questa è ottenuta per mezzo di vincoli cinematici o mediante strutture pesanti di reazione.

Il risultato che la prova dà è la curva tensioni-deformazioni, dalla quale è quindi possibile ricavare la resistenza a taglio e il modulo di taglio della muratura testata.



*Fig. 1.1. 17 - Prova di taglio-compressione in sito (Loeffestiel,2015)*

## **1.2. Metodi di intervento su murature storiche**

La scelta del metodo di intervento più idoneo per il consolidamento di edifici storici è direttamente correlata al tipo di danno riscontrato e alle caratteristiche della muratura determinate nella fase di diagnosi. Per il progetto dell' intervento di consolidamento è quindi necessario seguire varie fasi di studio, a partire dalla conoscenza della struttura e delle caratteristiche della muratura prima dell'intervento e valutando successivamente l'efficacia della tecnica di consolidamento scelta.

1) Fase conoscitiva: La fase conoscitiva è composta sia dallo studio dei materiali che dallo studio del comportamento della struttura prima e dopo l'intervento. Lo studio dei materiali si avvale dei metodi di indagine in sito descritti prima, come carotaggi ed

endoscopie, e di prove in laboratorio su materiali estratti che permettono di studiare sia i singoli costituenti che il materiale composito. Lo studio del comportamento della struttura serve invece per evidenziare i problemi della struttura in modo da scegliere l'intervento più adatto in relazione alle prestazioni attese successivamente.

2) Scelta della tecnica di intervento più adeguata: La tecnica scelta deve essere tale da migliorare la prestazione strutturale senza alterare eccessivamente il comportamento strutturale pre-intervento; deve essere adeguata anche la scelta dei materiali, essi infatti devono essere compatibili con quelli del supporto murario.

Gli interventi di consolidamento devono generalmente rispettare i seguenti requisiti:

-Ripristino delle condizioni di sicurezza

-Miglioramento delle caratteristiche meccaniche, questo requisito non è sempre facilmente perseguibile a seconda del grado di danneggiamento in cui si trova la struttura.

-Compatibilità meccanico-strutturale, sia della tecnica che dei materiali; e chimico-fisica dei materiali per evitare l'innescò di ulteriori cause di degrado.

-Integrazione e non trasformazione della struttura.

-Durabilità .

-Reversibilità o removibilità e riparabilità, questa condizione è molto importante, deve essere infatti sempre possibile recuperare la costruzione nella sua originalità.

-Bassa invasività, l'intervento deve essere il meno invasivo possibile.

-Minimi costi.

3) Esecuzione dell'intervento: Le modalità di esecuzione dell'intervento variano a seconda delle tradizioni e dell'esperienza di coloro che eseguono l'intervento, generalmente fanno comunque riferimento a delle indicazioni contenute in specifiche schede tecniche. La corretta esecuzione dell'intervento è importante in quanto un intervento eseguito inaccuratamente potrebbe essere inefficace o persino comportare un peggioramento.

4) Verifica dell'efficacia dell'intervento: La fase di controllo dell'intervento valuta l'effettiva riuscita dell'intervento e quindi il miglioramento che questa ha portato. Questa fase si avvale delle stesse prove sperimentali finalizzate allo studio delle caratteristiche della muratura realizzate prima dell'intervento, valutando in questo modo l'effettivo miglioramento.

### 1.2.1. Sostituzione muraria o scuci-cuci

La sostituzione muraria con il metodo scuci-cuci è una tecnica di consolidamento attuata mediante la sostituzione di elementi degradati e la conseguente ricostruzione locale. Il primario obiettivo di questa tecnica è il ripristino della continuità strutturale originaria delle pareti, essa può interessare solo parti localizzate del paramento o più lesioni diffuse, estese e vicine tra loro. Le modalità di esecuzione di questa tecnica si differenziano anche a seconda che la lesione da ricucire sia passante o meno, in caso di lesione non passante si interviene solo sul lato fessurato; mentre se la lesione è passante è necessario intervenire gradualmente sostituendo gli elementi da un solo lato, se il muro è a due teste. Invece in caso di maggiori spessori si agisce coordinatamente su entrambi i lati.

#### *Preparazione dell'intervento:*

- Analisi della muratura: si analizzano sia gli elementi resistenti che le malte, in modo da introdurre nuovi elementi e malte compatibili per quanto riguarda le caratteristiche chimico-fisiche con la muratura originale.
- Organizzazione dell'ordine di sostituzione degli elementi: la muratura viene suddivisa in sottocantieri sui quali intervenire alternativamente.
- Puntellamento degli elementi strutturali pericolanti: è necessario bloccare gli effetti dovuti all'indebolimento momentaneo della muratura causati dalla rimozione degli elementi, in modo che non si creino sollecitazioni sulle zone da trattare.

#### *Esecuzione dell'intervento:*

- Scarnitura dei giunti e rimozione delle pietre: A seconda dello spessore murario e dei carichi gravanti può essere effettuata semplicemente a "strappo", oppure in presenza di uno spessore murario o di carichi gravanti elevati si effettua mediante l'uso di martinetti idraulici che sorreggono la muratura durante l'esecuzione.
- Introduzione di nuovi elementi lapidei: Si procede con l'inserimento dei nuovi elementi dal basso verso l'alto con l'obiettivo di realizzare il miglior ammorsamento possibile tra il vecchio e il nuovo.
- Sigillatura con malta della zona tra muratura vecchia e nuova: Si sigilla lo spazio che intercorre tra le due murature con un giunto di malta di spessore ridotto per limitare la diminuzione di volume della malta stessa.

L'efficacia dell'intervento dipende sia dalle caratteristiche dei materiali scelti, che devono essere compatibili con l'esistente e quindi il più possibile simili, che dall'ammorsamento tra muratura vecchia e nuova. Il cattivo funzionamento e quindi l'inefficacia dell'intervento sono spesso da imputare alla scorretta esecuzione che porta a creare zone di maggiore rigidità rispetto a quelle esistenti e quindi non realizza un buon ammorsamento tra le due.

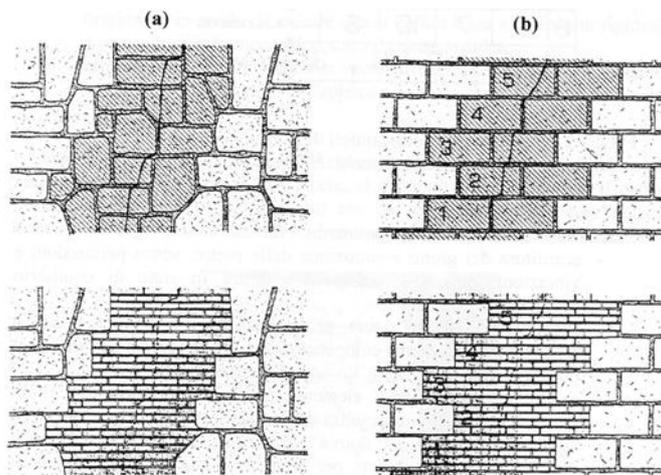


Fig. 1.2. 1 - Interventi di sostruzione muraria nel caso di muri di pietrame irregolare (a) e di muri in conci squadri (b). (Bresolato, Pasin, 2008)

### 1.2.2. Intonaci Armati

Il consolidamento di una muratura tramite intonaci armati consiste nell'applicazione di reti elettrosaldate in acciaio sulla superficie muraria, successivamente spruzzate con miscele specifiche, creando così lastre cementizie armate; che vengono ancorate alla muratura con tiranti trasversali in acciaio.

Questo intervento è molto utile in caso di strutture che presentano uno stato di degrado avanzato e nelle quali sia necessario ripristinare la continuità muraria, strutture che presentano quindi un complesso quadro fessurativo; il consolidamento con l'intonaco armato permette infatti di migliorare le caratteristiche di resistenza della muratura, esercita anche una funzione di confinamento della muratura e di protezione dal degrado a causa di agenti esterni.

Le pareti armate però comportano un notevole incremento di massa, per questo in caso di più piani vanno eseguite a partire dal basso, e di rigidezza alla struttura, oltre che non essere utilizzabili in edifici d'interesse storico-artistico in quanto coprono eventuali decorazioni; non rientrano perciò tra gli interventi di consolidamento più usati.

#### *Preparazione dell'intervento:*

La parete su cui verrà eseguito il consolidamento deve essere preparata, questo viene fatto asportando il vecchio intonaco, spazzolandola, eseguendo un lavaggio con acqua o aria compressa e stuccando le fessure e i piccoli vuoti. Il lavaggio è molto importante per saturare d'acqua la parete in modo che non sottragga successivamente acqua alla miscela causandone il ritiro.

#### *Perforazioni per le armature di collegamento:*

Si effettuano dei fori, in corrispondenza dei blocchi di pietra, con un trapano. I fori devono essere distribuiti uniformemente, in file equidistanti tra loro e sfalsate, hanno un diametro

di circa 40mm, e sono lunghi circa  $\frac{3}{4}$  lo spessore della parete; essi vengono eseguiti leggermente inclinati per favorire il riempimento con malta cementizia.

#### *Inserimento dei tiranti:*

I tiranti sono dei tondini per cemento armato, di diametro circa 4-8mm, che vengono inseriti nei fori fatti precedentemente e successivamente sigillati con iniezioni di malta.

In alternativa si possono usare staffature metalliche inserite in nicchie che vengono successivamente riempite durante la spruzzatura, ma questa tecnica prevede costi maggiori e una minore sicurezza riguardo l'avvenuto consolidamento, viene perciò usata raramente.

#### *Posizionamento delle armature:*

Per il consolidamento vengono usate reti elettrosaldate con una maglia 10x10 o 15x15cm e diametro 3-6mm, esse vengono posizionate su un lato o su entrambi a una distanza di circa 2cm. In presenza di aperture o negli spigoli è opportuna risvoltare le reti e sovrapporre di almeno 50-100cm due maglie.

Prima del posizionamento delle armature viene effettuata una prima intonacatura con intonaco cementizio.

#### *Esecuzione delle lastre:*

La posa in opera della miscela legante può essere eseguita con procedure diverse a seconda dello spessore e del tipo di lastra che si vuole applicare; per spessori di 5-10cm è necessario applicarla con cassetta, per spessori di 3-5cm si applica in pressione, mentre per spessori più piccoli si applica con una spruzzatura meccanica in più passaggi.

Il tipo di applicazione cambia a seconda della miscela che si intende usare, si può usare una miscela secca a base di sabbia e cemento (in proporzione 4:1) alla quale viene aggiunta acqua fino ad ottenere una buona fluidità, oppure intonaco di malta cementizia ad elevato contenuto di cemento, oppure un conglomerato cementizio.

Per evitare fenomeni di ritiro della malta, oltre a bagnare precedentemente la parete fino a saturazione, è necessario inserire all'interno della miscela adeguati prodotti antiritiro o espansivi, e continuare a bagnare la superficie nei giorni seguenti al getto.

L'efficacia di questa tecnica è difficilmente valutabile in quanto sono necessarie prove distruttive per avere risultati attendibili circa il miglioramento della resistenza della muratura. L'inefficacia può essere dovuta alla scorretta esecuzione dell'intervento, ad esempio alla mancata sovrapposizione delle reti elettrosaldate o a barre non sufficientemente lunghe o mal vincolate alle reti.

Questa tecnica di consolidamento non è spesso usata in quanto modifica in modo sostanziale le proprietà di deformazione e di rigidità delle pareti e se l'intervento non è omogeneamente distribuito su tutta la struttura l'alterazione del comportamento di solo una parte può provocare fenomeni torsionali e una modificazione della ripartizione delle forze

orizzontali in caso di un evento sismico. Un altro problema è dato dalla natura stessa dell'intervento che si pone come uno "scudo" per la muratura alterandone l'isolamento termico e la traspirabilità.

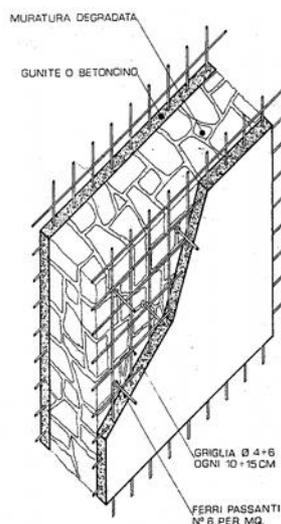


Fig. 1.2. 2 - Intonaci armati, Vista assonometrica, (Modena, 2000)

### 1.2.3. Ristilatura semplice o armata dei giunti di malta

La ristilatura dei giunti è un intervento di consolidamento che consiste nella parziale sostituzione della malta di allettamento dei giunti con una malta di migliori qualità al fine di migliorare le caratteristiche meccaniche della muratura. Questo intervento si applica in caso di degrado localizzato della sola malta, su uno o se possibile su entrambi i lati, e deve essere il più possibile uniforme su tutto il paramento oggetto di intervento. Spesso viene previsto anche l'inserimento di barre o di lamine di rinforzo in acciaio o in fibre polimeriche rinforzate, disposte su uno o possibilmente su entrambi i lati della muratura. Se viene eseguito su entrambi i lati è bene procedere prima alla ristilatura completa di un lato per poi procedere con l'altro.

L'intervento di ristilatura non apporta miglioramenti per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza dei materiali ma è utile a garantire la riduzione di trazione degli elementi resistenti e per prevenire lo spanciamiento dei parametri esterni nelle murature multistrato; spesso congiuntamente all'intervento di ristilatura vengono effettuate anche iniezioni o la sostituzione muraria per incrementare l'effetto di miglioramento del paramento.

#### *Scarnitura e pulizia dei giunti:*

Si inizia con la rimozione dell'intonaco, se presente, e con la scarnitura dei giunti con appositi raschietti. E' molto importante che la scarnitura raggiunga una adeguata profondità, circa 5-7cm, e che la malta originaria sia completamente eliminata per permettere a quella nuova di sviluppare dei forti legami di aderenza con gli elementi. Successivamente si

procede con un lavaggio a bassa pressione con acqua per rimuovere le impurità e i residui di polvere dati dalla scarnitura

#### *Ristilatura dei giunti semplice e armata:*

Nel caso di ristilatura armata vengono inserite in questa fase delle barre di acciaio di circa 6mm di diametro ogni 30-50cm, per aumentare la duttilità e la capacità della struttura di dissipare energia.

Si inizia con un primo strato di legante e successivamente si posiziona la prima barra, poi un altro piccolo strato di legante, dopo di che si inserisce la seconda barra e si passa infine al ricoprimento delle barre e alla sigillatura dell'intervento con malte di calce idraulica. Infine per garantire anche una resa estetica all'intervento l'ultimo strato di circa 15-20mm di rifinitura da inserire viene prodotto con materiali naturali o pigmentato in modo da riprodurre l'aspetto originario dei giunti, e infine viene eseguita la raschiatura e la pulitura dei giunti per eliminare eventuali sbavature di malta

Prima di procedere con la ristilatura dei giunti è necessario caratterizzare la malta originaria dal punto di vista chimico, fisico e meccanico, è infatti importante che la malta inserita sia compatibile con quella preesistente per evitare reazioni indesiderate e una diversa deformabilità che significherebbe avere zone a comportamento disomogeneo. Un altro aspetto importante è la profondità raggiunta, un probabile malfunzionamento infatti è spesso dovuto alla scarsa profondità, in questo caso la tecnica si limita ad essere un miglioramento estetico dei giunti.

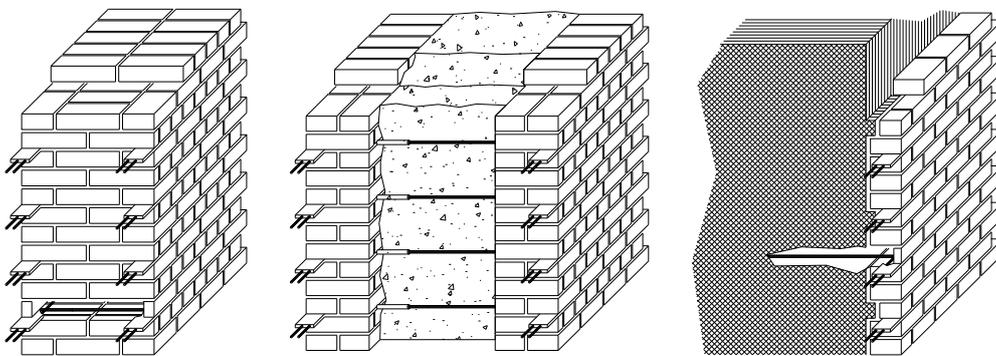


Fig. 1.2. 3 - Ristilatura armata in murature ad un paramento, a più strati con paramenti esterni portanti, a più paramenti con paramenti esterni di rivestimento (Valluzzi, et al., 2005).

#### **1.2.4. Applicazione di tiranti trasversali**

Questa tecnica di consolidamento della muratura prevede l'applicazione di tiranti metallici all'interno della muratura ed è utilizzata principalmente per migliorare il comportamento a taglio della muratura e per limitare le deformazioni e il distacco dei paramenti tramite confinamento. In particolare viene usata in caso di muratura multistrato per garantire il collegamento tra i paramenti esterni assicurando così un funzionamento monolitico della muratura da consolidare.

*Preparazione della parete:*

Si procede come per l'esecuzione degli intonaci armati, asportando l'intonaco presente e spazzolando le aree in cui eseguire i fori per l'inserimento dei tiranti.

*Perforazione della muratura per i tiranti:*

Si eseguono dei fori passanti, in corrispondenza dei blocchi di pietra, perpendicolarmente alla muratura tramite una sonda a rotazione. Come per gli intonaci armati, i fori vanno eseguiti uniformemente in file equidistanti tra loro e sfalsate.

*Inserimento dei tiranti passanti e serraggio:*

I tiranti sono in genere costituiti da barre di acciaio ad aderenza migliorata o da barre filettate, che successivamente possono essere sigillati con iniezioni di malta. Una volta inseriti nei fori appena eseguiti i tiranti vengono quindi ancorati e fissati alla muratura per mezzo di un bullone con testa e dado muniti di rondella capochiave avente caratteristiche di rigidità e resistenza tali da evitare schiacciamenti o lesioni localizzate.

Ci sono due metodi di inserimento dei tiranti:

- Inserimento a freddo: Quando si utilizzano semplici barre d'acciaio, queste vengono semplicemente inserite all'interno della muratura e fissate tramite un'iniezione, in questo caso la barra si "attiva" e sviluppa il tiraggio solo in seguito ad una deformazione della muratura.
- Inserimento a caldo: Quando si utilizzano barre filettate, al momento dell'inserimento si procede al riscaldamento della barra e ad un lieve serraggio; in questo modo il tiraggio della barra si svilupperà in seguito alla contrazione che si ha con il raffreddamento, senza aspettare che ci sia una deformazione.

L'applicazione di tiranti trasversali è un metodo molto usato in quanto prevede bassi costi di esecuzione e una notevole rapidità d'intervento.

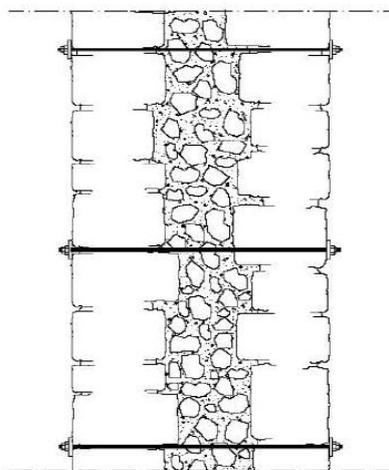


Fig. 1.2. 4 - Impiego di tiranti trasversali in muratura a più paramenti (Gloria Zanchetta, 2012)

### 1.2.5. Applicazione di tessuti fibrorinforzati (frp)

L'applicazione di fibro-rinforzati è una tecnica di consolidamento molto recente ma in crescente utilizzo per quanto riguarda il rinforzo e la riparazione di elementi murari portanti. La tecnica si basa sull'incollaggio sulla muratura di tessuti fibrosi ad elevata resistenza meccanica mediante l'utilizzo di resine. E' una tecnica di facile esecuzione e molto efficace come rinforzo in quanto consente di ottenere murature con limiti di resistenza più elevati e caratterizzati da una rottura meno fragile; la presenza del rinforzo inoltre, oltre a tenere legati gli elementi resistenti, ha anche una funzione di confinamento su murature sottoposte a grandi compressioni tramite una fasciatura perimetrale o tramite una maglia ortogonale applicata nei maschi murari.

Altri vantaggi di questa tecnica sono dati dalle ottime proprietà chimico-fisiche dei materiali fibrorinforzati come la bassa densità, l'elevata resistenza alla corrosione e la bassa conducibilità.

L'applicazione di fibrorinforzati non è ancora stata normata quindi il progetto degli interventi, cioè la scelta del tipo materiali e il dimensionamento del rinforzo, viene realizzato in assenza di metodi più o meno rigorosi.

#### *Preparazione della muratura:*

La preparazione della muratura consiste nella sua livellatura e pulitura superficiale al fine di garantire una buona adesione della fibra a essa, per consentire così che venga attivato il contributo di rinforzo. La pulitura consiste nell'eliminare gli strati ricoprenti non portanti e può essere fatta a mano con spazzole abrasive, con mezzi meccanici, tramite la sabbiatura. La livellatura consiste invece nell'eliminare le irregolarità superficiali e può essere fatta anch'essa a mano o con mezzi meccanici, cioè tramite la scalfitura o con un flessibile.

#### *Applicazione dello strato impregnante:*

Una volta pulita e livellata la muratura, la superficie non è ancora pronta, viene infatti applicato uno strato di impregnante, mediante l'uso di un pennello o di un rullo, per favorire l'aggrappo degli strati successivi. E una volta asciugato l'impregnante viene applicato uno strato di stucco epossidico mediante un frattazzo.

#### *Applicazione delle fibre:*

Dopo aver atteso trenta minuti dalla stesura della resina epossidica è possibile procedere all'applicazione del primo strato di adesivo sul quale vengono applicate le strisce di fibra. Queste devono essere fatte aderire alla resina, ciò viene fatto prima pressando manualmente poi attraverso l'uso di un rullo dentato che permette di eliminare le bolle d'aria e impregna le fibre stesse di adesivo. Dopo aver messo le fibre viene applicato un altro strato di resina per impregnare completamente le fibre di adesivo. Nel caso fossero necessari più strati di fibre questi vengono applicati successivamente rispettando i tempi necessari e senza spostare le fibre sottostanti.

### 1.2.6. Rivestimento di malta rinforzato con reti in fibra di vetro

Questa tecnica di rinforzo ovvia il problema che si ha con i tessuti fibrorinforzati per quanto riguarda l'incollaggio su una muratura irregolare. Il rinforzo mediante reti in fibra di vetro viene applicato su entrambe le facce della muratura e successivamente rivestito di malta, la rete è formata da fili realizzati torcendo lunghe fibre di vetro trasversali, impregnate di resina termoindurente, attorno ai fili longitudinali, a loro volta intrecciati a formare la griglia.

*Tecnica di intervento:*

- Rimozione dell'intonaco esistente e della malta presente nei giunti fra gli elementi per 10-15mm di profondità e su entrambe le facce della parete.
- Applicazione di uno strato coprente di collante antigraffio.
- Esecuzione di fori passanti di diametro 25mm per consentire l'inserimento dei connettori.
- Applicazione della griglia in fibra di vetro su entrambe le facce.
- Inserimento dei connettori e iniezione di resina epossidica all'interno dei fori per il fissaggio dei connettori della griglia.
- Applicazione del nuovo rivestimento a base di calce e malta cementizia.

Questa tecnica può essere considerata poco invasiva per la struttura muraria anche se per la sua applicazione è necessaria la rimozione e sostituzione dell'intonaco originale. Un vantaggio di questo intervento è che, rispetto all'intonaco armato, aumenta la duttilità senza aumentare la rigidità della muratura. È una tecnica innovativa, riguardo la quale si sta studiando l'efficacia; è stata condotta una vasta indagine sperimentale su diversi tipi di murature consolidate con questa tecnica, i risultati delle prove di compressione diagonale hanno evidenziato un effettivo aumento della resistenza a taglio dovuto sia all'effetto di confinamento del rivestimento sulla muratura, che alla resistenza a taglio del rivestimento stesso; in particolare è stata evidenziata una efficacia maggiore per le murature in pietra.

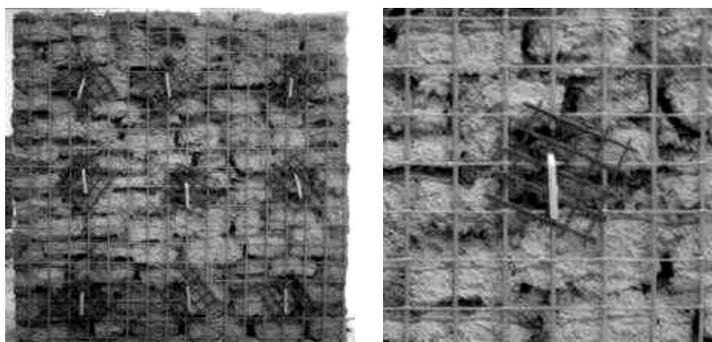


Fig. 1.2. 5 - La maglia GFRP applicata sulla muratura e particolare del connettore, (Gloria Zanchetta, 2012)

### 1.2.7. Iniezioni di miscele consolidanti

L'intervento di consolidazione tramite miscele consolidanti previene l'iniezione a bassa pressione di miscele fluide attraverso fori praticati in superficie, la miscela iniettata si espanderà in tutte le direzioni all'interno della muratura andando a colmare i vuoti interni, per questo risulta particolarmente adatta per il consolidamento di murature in pietra caratterizzate da una maggiore percentuale di vuoti interni rispetto a murature di altro tipo.

Attraverso l'uso di questa tecnica si possono ottenere vari benefici tra cui una maggiore coesività interna nel caso di malte degradate, la risarcitura di lesioni o di fessure esistenti, il riempimento di vuoti o di discontinuità interne e la prevenzione del distacco dei singoli blocchi lapidei dai paramenti murari. Nel momento in cui si effettua un'intervento di iniezioni gli obiettivi perseguiti sono:

- Incremento della capacità resistente nel piano e fuori piano.
- Consolidazione locale di una porzione di muro attorno a parti critiche.
- Miglioramento dell'adesione degli elementi lapidei posti nei paramenti dei muri.
- Risanamento delle proprietà isolanti, idrauliche e termiche.

L'uso della iniezioni presenta però anche vari problemi, questa tecnica è infatti stata usata fino a pochi anni fa per gli interventi di miglioramento o adeguamento sismico ma recenti eventi sismici hanno messo in evidenza una serie di problematiche legate all'uso di questa tecnica.

Uno di questi problemi è legato al difficile raggiungimento di una completa e omogenea distribuzione della miscela all'interno del paramento, questa è infatti legata alla conformazione dei vuoti interni e quindi alla presenza o meno di un percorso che connetta le cavità con i fori di immissione. In caso di iniezione disomogenea si vengono a creare all'interno della muratura con maggiore rigidità e resistenza, aumentando così la disomogeneità della muratura e creando un'incontrollata catena di parti deboli e parti consolidate che possono produrre comportamenti inaspettati di fronte alle azioni sismiche.

Tuttavia il consolidamento mediante iniezioni non va scartato ma devono essere controllate una serie di condizioni legate alle murature e al tipo di malta di iniezione, la miscela deve essere infatti il più possibile compatibile con la malta originaria; se questo avviene si possono ottenere condizioni di deformabilità non molto diverse da quelle originarie. Possiamo dire che l'iniezione ottimale sia quella che incrementando soddisfacentemente la resistenza non alteri la rigidità dell'organismo murario originario; quando si ha un'iniezione di questo tipo si riducono fortemente gli effetti negativi di una eventuale distribuzione non controllata di elevate resistenza e rigidità e quindi della possibile concentrazione di sforzi all'interno della muratura.

### *Caratteristiche della miscela di iniezione*

Le miscele sono composte da acqua, legante (cemento o calce), additivo e inerte; l'additivo è in quantità minima e serve per prolungare o accorciare i tempi di liquidità della miscela a seconda del caso; l'inerte invece non è sempre presente, si usa ad esempio quando il ritiro della malta originaria ha creato una porosità macroscopica che viene riempita attraverso l'uso dell'inerte.

Le caratteristiche generali della miscela da iniettare sono:

- Caratteristiche meccaniche: si richiede una resistenza meccanica e caratteristiche di deformabilità simili a quelle della muratura originaria.
- Penetrabilità: i materiali impiegati devono essere omogenei e privi di grumi, con una granulometria fine e scarsa viscosità allo stato fluido.
- Presa e indurimento: il tempo di presa deve essere adeguato alle procedure d'impiego, non deve quindi essere troppo breve o prolungato, il ritiro deve essere assente e limitato.
- Proprietà chimiche: le caratteristiche chimiche devono rimanere stabili nel tempo, è opportuno che si instaurino forti legami chimici con i materiali esistenti.
- Caratteristiche igroscopiche: si richiede che la miscela non risulti solubile in acqua, non vari il proprio volume con l'umidità e non crei una barriera alla libera circolazione di vapore.
- Caratteristiche economiche: il materiale deve essere poco costoso e di facile reperibilità.

Di fondamentale importanza circa l'iniettabilità di queste miscele sono la dimensione degli aggregati solidi in rapporto alle dimensioni delle fessure e la quantità d'acqua d'impasto. Il rapporto tra la dimensione delle fessure e quella degli aggregati può variare da 5 a 1.5 a seconda del caso; la quantità d'acqua è invece indicata per ogni tipo di miscela e deve essere tale da permettere l'idratazione del legante e conferire alla miscela una adeguata fluidità per una iniezione ottimale, ma non deve essere troppa in quanto questo può provocare successivamente un ritiro eccessivo o a causa dell'evaporazione una elevata porosità.

Le miscele attualmente in uso per il consolidamento si possono dividere in due categorie principali:

- Miscele inorganiche: si possono ulteriormente dividere in due sottocategorie, miscele a base di cemento e a base di calce.
  - Le miscele a base di cemento sono generalmente le più utilizzate nelle iniezioni quando è richiesta una elevata resistenza meccanica, solitamente viene usato il cemento portland o pozzolanico. Particolare attenzione va prestata alla granulometria che, se eccessiva, può limitare l'adesione al substrato esistente, per questo spesso come aggregato viene usata polvere di marmo.

- Le miscele a base di calce si utilizzano quando non vengono richieste elevate resistenze meccaniche o in alternativa alle miscele a base di cemento quando questo è incompatibile con i materiali della muratura. Le miscele a base di calce presentano problemi legati al ritiro e alla possibilità che i finissimi grani possano occludere i fori, ma presentano tuttavia una maggiore affinità con le caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali componenti le murature esistenti, tra cui la resistenza, il modulo elastico e il coefficiente di dilatazione termica; pertanto tramite l'uso di opportuni additivi si può far fronte ai problemi e ottenere un impiego efficace.
- Miscele a base di resine sintetiche:
  - Miscele a base di resine organiche: Vengono usate per ottenere resistenze finali superiori o tempi di presa più rapidi.
  - Miscele reoplastiche: Sono malte aventi elevata fluidità ma anche un alto potere coesivo ( in questo caso contengono generalmente additivi fluidificanti) o hanno elevate proprietà antiritiro ( in questo caso invece contengono additivi aspancanti).

#### *Tecnica di esecuzione:*

- Preparazione della parete:

Per la preparazione della parete si procede con l'eliminazione dell'intonaco se presente, la pulizia della superficie muraria attraverso un lavaggio con acqua a bassa o alta pressione o con getti di vapore. Successivamente viene eseguita una ulteriore pulizia mediante spazzole abrasive, questa però non deve essere talmente invasiva da danneggiare la muratura.

In un secondo momento, per evitare la fuoriuscita di miscela durante la fase di iniezione, si provvede alla stuccatura delle lesioni superficiali.

- Perforazione della parete e inserimento delle canule:

- Disposizione dei fori: I fori vanno disposti preferibilmente su una maglia triangolare a distanza pari al doppio del raggio d'azione individuato, cioè alla massima distanza dal foro raggiungibile dalla miscela. Va preferita una maglia triangolare equilatera, ove possibile, perché permette una migliore copertura della muratura iniettata.

- Esecuzione dei fori: I fori vengono eseguiti tramite delle perforatrici a rotazione, dall'alto verso il basso e all'interno dei giunti per non danneggiare gli elementi resistenti. La loro profondità deve essere pari a circa i  $\frac{2}{3}$  o  $\frac{3}{4}$  dello spessore della muratura e di diametro compreso tra i venti e i sessanta mm per muri in pietra, di dieci mm per muri in mattoni.

- Inserimento delle canule: Le canule che si inseriscono devono essere lunghe 10-15cm e fuoriuscire di una certa quantità dalla muratura. Una volta inserite vengono sigillate alla parete per evitarne l'espulsione durante l'iniezione e per impedire l'uscita di miscela dalla giunzione.

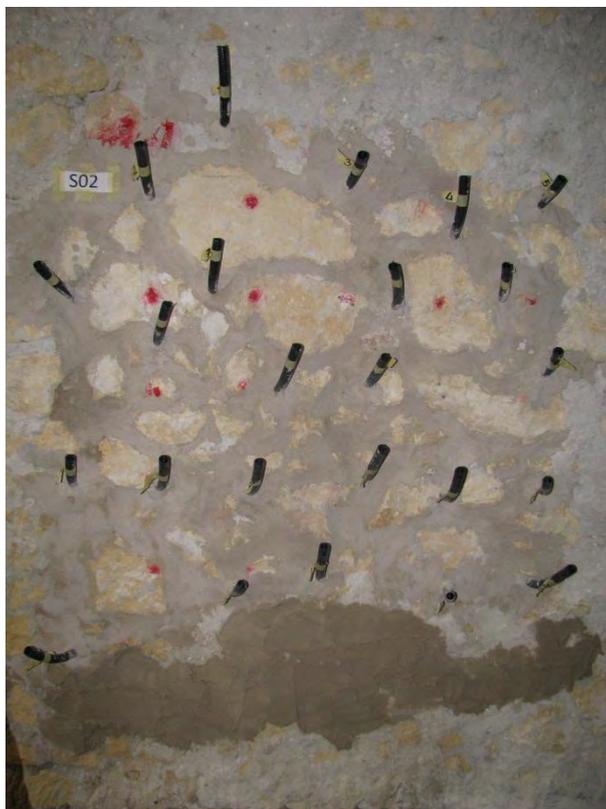
- Lavaggio e imbibizione della muratura e pulizia meccanica:

Prima di procedere con l' iniezione è necessario saturare d'acqua la parete attraverso il lavaggio e l'imbibizione; questo per evitare che la parete assorba l'acqua d'impasto della miscela iniettata.

Inoltre attraverso il lavaggio vengono asportate le eventuali impurità che possono ostacolare il flusso della miscela all'interno della muratura.

- Stuccatura di giunti e di lesioni superficiali

La fase di lavaggio mette in evidenza l'eventuale presenza di lesioni superficiali, queste vanno stuccate e sigillate con malta a presa rapida per impedire la fuoriuscita della miscela durante la fase di iniezione.



*Fig 1.2. 6 - Pannello preparato per l'intervento di esecuzione (Museo Archeologico)*

- Scelta e preparazione della miscela

La scelta del tipo di miscela da utilizzare è strettamente legata allo specifico intervento che si va a fare, e alle caratteristiche chimiche fisiche e meccaniche della muratura che si va a consolidare, infatti la miscela scelta deve essere il più possibile compatibile con essa.

Nella preparazione della miscela un elemento molto importante cui prestare attenzione è la quantità d'acqua, essa è prescritta dalla ditta fornitrice della miscela ma non sempre la

quantità prevista è quella ottimale. Il dosaggio d'acqua deve essere tale da garantire una buona fluidità della miscela ma non essere eccessiva per evitare fenomeni di ritiro e di evaporazione con conseguente formazione di pori.

- Iniezione della miscela

Una volta preparata la miscela le modalità di iniezione di questa nella muratura possono essere diverse, iniezione per gravità, per pressione o per depressione.

L'iniezione per gravità si effettua in caso di murature fortemente degradate, nelle quali le operazioni di perforazione o l'iniezione per pressione potrebbero causare ulteriori danneggiamenti. La tecnica consiste nel versare, con grandi imbuti, la miscela attraverso lesioni esistenti; in questo modo non è garantita la completa iniezione del muro ma solo il riempimento delle cavità di dimensioni maggiori.

L'iniezione per pressione si effettua inserendo la miscela in una pompa idraulica ad aria compressa che la inietta all'interno della muratura attraverso un ugello a pressione regolabile. Si iniettano per primi i fori posti in basso e si procede poi verso l'alto.

L'iniezione per depressione viene invece usata per miscele molto fluide, come quelle a base di resine sintetiche; viene effettuata connettendo gli iniettori inferiori al contenitore della miscela e creando il vuoto in quelli superiori fino alla fuoriuscita della miscela.

- Ripresa delle cannule e sigillatura dei fori di iniezione

Una volta terminata l'iniezione le cannule vengono asportate e i fori vengono sigillati con malta a presa rapida.



*Fig 1.2. 7 - Esecuzione dell'intervento di iniezione (Museo Archeologico)*

### *Valutazione dell'efficacia dell'intervento:*

L'efficacia dell' intervento di consolidamento dipende in primo luogo dall' iniettabilità della muratura che influenza la diffusione della miscela. Le tecniche d'indagine più appropriate per valutare l'efficacia dell' intervento sono:

- Carotaggi e endoscopie: Forniscono un'analisi visiva della diffusione e penetrazione della miscela.
- Prove soniche: Permettono una valutazione qualitativa dell'efficacia del consolidamento in quanto rivela la consistenza della muratura.
- Prove con i martinetti piatti.

Qualsiasi indagine per la valutazione dell'efficacia è più significativa se condotta sia prima che dopo l'iniezione, ci da in questo modo la possibilità di fare un'analisi quantitativa sul miglioramento dato dall'intervento.

## **1.3. Casi studio precedenti**

Per una valutazione dell'efficacia degli interventi di iniezione di consolidanti su murature sono stati raccolti i dati di 35 campi prova in cui sono state svolte indagini soniche su muratura non consolidata, successivamente consolidati mediante iniezioni, nei quali sono anche state rieseguite le indagini soniche sulla muratura consolidata per la valutazione dell'efficacia dell'intervento.

### **1.3.1. Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni – F. Bresolato, N. Pasin (2008)**

Il programma sperimentale oggetto della tesi degli ing. Bresolato e Pasin, s'inserisce nella seconda fase di un progetto di ricerca e collaborazione tra UNIPD, TASSULLO s.p.a. ed ENEA-C.R. Casaccia, nell'ambito del progetto ReLUIIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) e prevede la realizzazione di pannelli in muratura a tre paramenti e modelli di edificio in scala 2:3.

Queste sono le sperimentazioni effettuate nel loro lavoro di tesi:

- caratterizzazione dei materiali e prove d'iniettabilità
- indagini soniche sulla qualificazione muraria dei pannelli e dei modelli di edificio
- interventi di consolidamento sui pannelli murari e sui modelli di edificio
- indagini soniche sulla valutazione dell'efficacia degli interventi di consolidamento su pannelli murari e modelli di edificio

Il lavoro di valutazione degli effetti del consolidamento con prove non distruttive è stato effettuato su un muro e su due modelli di edificio in scala 2:3 realizzati con pietre calcaree di

diversa tipologia e pezzatura, malta T30V e miscela di iniezione FEN-X/b. Per questo studio i campi su cui sono state effettuate le indagini sopra elencate sono stati realizzati in muratura a tre paramenti, costituiti da due paramenti esterni in conci di pietra sbazzati disposti a corsi suborizzontali e da un supporto interno costituito da frammenti di pietra, ottenuto come materiale di risulta della sbazzatura stessa, da consolidare. In totale sono stati appositamente costruiti otto muri, due iniettati, due consolidati con l'inserimento di tirantini, tre consolidati con tecnica combinata, e uno non consolidato.

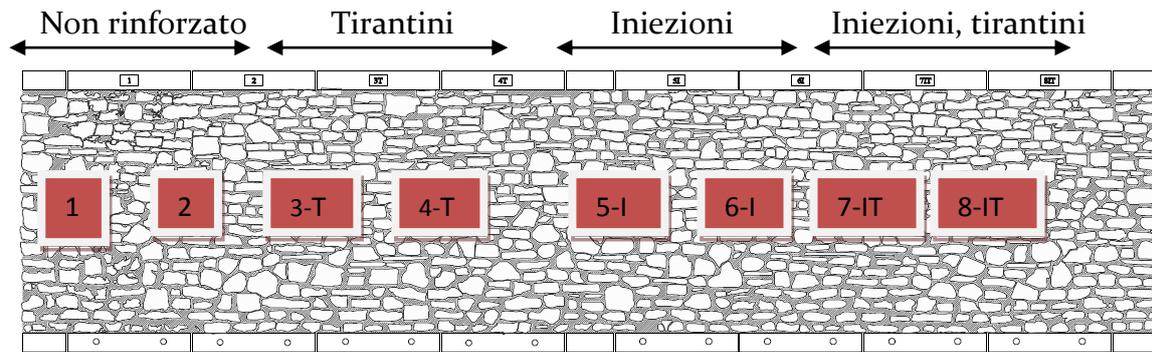


Fig. 1.3. 1- Schema geometrico realizzazione muro a tre paramenti



Fig. 1.3. 2 - Prospetto muro completo e foto primo corso di pietre

I modelli di edificio sono stati realizzati in scala 2:3, con le stesse tipologie di muratura a tre paramenti, e solai in legno a doppia orditura di tavolato con spessore di 2 cm, legato alle murature perimetrali mediante tiranti metallici.

Entrambi i modelli sono stati testati, con indagini soniche, in due fasi ben distinte: un modello è stato sottoposto a test sonico e test dinamico senza rinforzi; e valutato il livello di danneggiamento, è stato ripristinato mediante iniezioni, e sottoposto ad un'ulteriore prova su tavola vibrante (modello di edificio 1); l'altro è stato testato prima e dopo l'intervento di rinforzo mediante iniezioni (modello di edificio 2).

*Prove di caratterizzazione dei materiali*

La caratterizzazione dei materiali prevede la determinazione sperimentale delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche di una calce idraulica naturale (legante costituente il prodotto per iniezioni), della malta (esistente e da ristilatura) e del materiale lapideo costituente il supporto murario.

Queste prove sono state eseguite presso il laboratorio di prove sui materiali del dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova, e qui di seguito ne vengono riportati i risultati ottenuti seguendo la normativa di riferimento vigente UNI EN 1926:2007 del maggio 2007.

Resistenza media a compressione	212 MPa
Resistenza media a flessione	28,7 MPa
Modulo Elastico	64.340 MPa
Massa volumica apparente	2654 kg/m <sup>3</sup>
Massa volumica reale	2664 kg/m <sup>3</sup>

*Tab. 1.3. 1 - Valori di resistenza media ottenuti per le pietre*

Oltre alle pietre, è stata analizzata anche la malta utilizzata per costruire i muri e gli edifici oggetto di questo studio, denominata T30V e prodotta dalla Tassullo spa. E' una malta a medio-alta resistenza, a basso contenuto di sali idrosolubili e ritiro controllato. Nella tabella di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Resistenza media a compressione	3,40 MPa
Resistenza media a flessione	1,18 MPa
Modulo elastico	6132 MPa
Coefficiente di Poisson	0,213

*Tab. 1.3. 2 - Valori di resistenza media ottenuti per la malta.*

La miscela usata per l'opera di consolidamento sperimentale mediante iniezione di calce idraulica è denominata Fen-X/B.

Si sono verificate in laboratorio le proprietà meccaniche della miscela su dei provini opportunamente confezionati all'atto dell'intervento di consolidamento; i risultati ottenuti sono riassunti nella tabella 6.12:

Resistenza media a compressione	7,64 MPa
Resistenza media a flessione	2,88 MPa
Modulo elastico	6576 MPa
Coefficiente di Poisson	0,121

*Tab. 1.3. 3 - Valori di resistenza media ottenuti per la miscela da iniezione.*

### Indagini soniche su murature non consolidate

Per la campagna di indagine prima degli interventi di consolidamento stati scelti i pannelli 5I e 7IT per essere analizzati ciascuno con:

- una sonica diretta
- una tomografia orizzontale ad altezza 1,30 m
- una tomografia verticale

La griglia sulla quale sono state eseguite le prove soniche dirette è stata realizzata con nove righe e cinque colonne, distanziate tra loro di 25 cm.

### Interventi di consolidamento

I fori di iniezione sono stati eseguiti con un trapano con punta da 12 mm seguendo una maglia triangolare di 25/30 cm di lato, con un risultato di 11/12 fori/m<sup>2</sup>. All'interno sono state inserite delle cannule di gomma con diametro esterno di 12 mm e interno di 9 mm, lunghe 15 cm, il cui intorno è stato sigillato con malta per evitare il fuoriuscire della miscela.

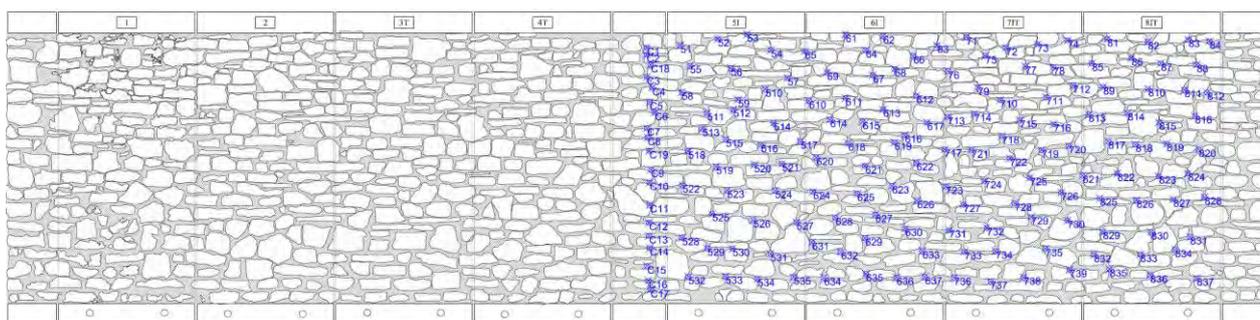


Fig. 1.3. 3- schema prospettico e fori di iniezione

Da notare il fatto che in questo caso studio non è stato effettuato il lavaggio del muro, vale a dire l'iniezione di acqua per ripulire i fori e per idratare la muratura. Questo perché si voleva simulare il comportamento di una muratura storica.

Le iniezioni sono state effettuate con una pressione tenuta attorno a 0,5/1 atm, e durante l'esecuzione si sono registrati i dati quali: il foro di iniezione, il tempo di iniezione per ciascun foro [s], il numero di "Unità di Volume Iniettato", la pressione letta sul manometro [bar], la quantità di miscela inserita nella pompa, e i fori da cui fuoriusciva la miscela. Questi dati sono stati riportati in opportune tabelle, mentre qui di seguito sono state elaborate tabelle riassuntive per ogni pannello.

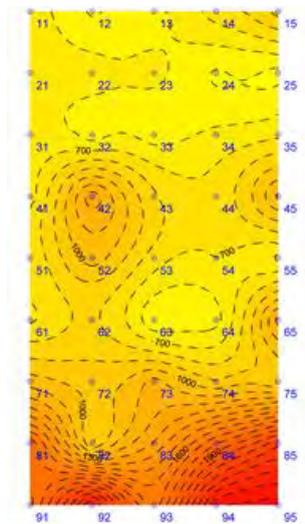
Muro	Quantità kg [f ss]	Quantità l [f ss]	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	Vuoti % [f ss]
5I	744	268	440	158	15,8%
6I	1163	419	688	248	24,8%

7IT	1066	384	631	227	22,7%
8IT	1225	441	725	261	26,1%
Medie	1049	378	621	224	22,4%

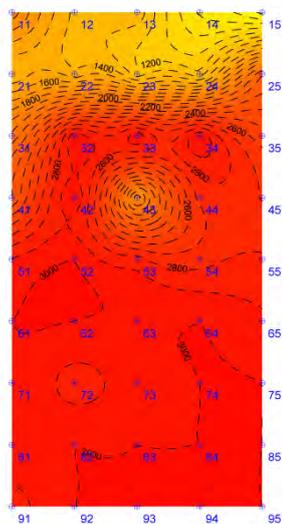
Tab. 1.3. 4 - Quantità di miscela iniettata in funzione del tempo[ss]

*Valutazione dell'efficacia dell'intervento di iniezione*

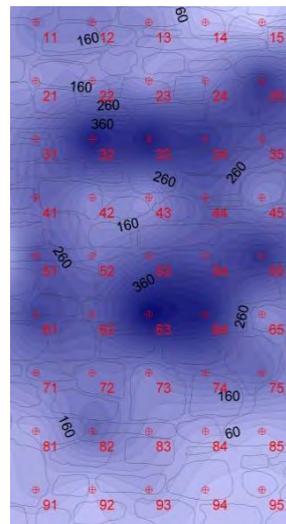
L'efficacia delle iniezioni è stata indagata mediante prove soniche dirette sui pannelli iniettati, effettuate negli stessi punti delle acquisizioni precedenti con muratura non consolidata. Per il pannello 5I si è ottenuta una velocità media globale pari a 2521,40 m/s, tipico di una muratura di buona consistenza. Per il pannelli 7IT invece La velocità media globale risulta quindi essere uguale a 2940,56 m/s, quindi è possibile ipotizzare una muratura in ottimo stato. Le velocità più basse son state registrate in corrispondenza dei punti 31, 51, 74. Dai seguenti grafici di distribuzione delle velocità soniche, abbinati ai grafici di distribuzione delle differenze percentuali di velocità e ai grafici della distribuzione delle quantità di miscela iniettata, si nota come le zone con incremento di velocità maggiore corrispondono a zone in cui è stata iniettata una consistente quantità di miscela. Da sottolineare comunque che questo confronto non può essere fatto in maniera puntuale, poiché non si hanno dati certi sui percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento.



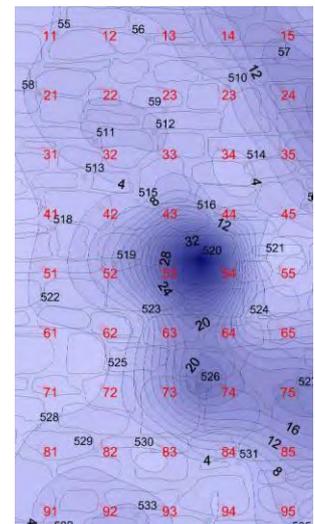
5I vel pre iniezione



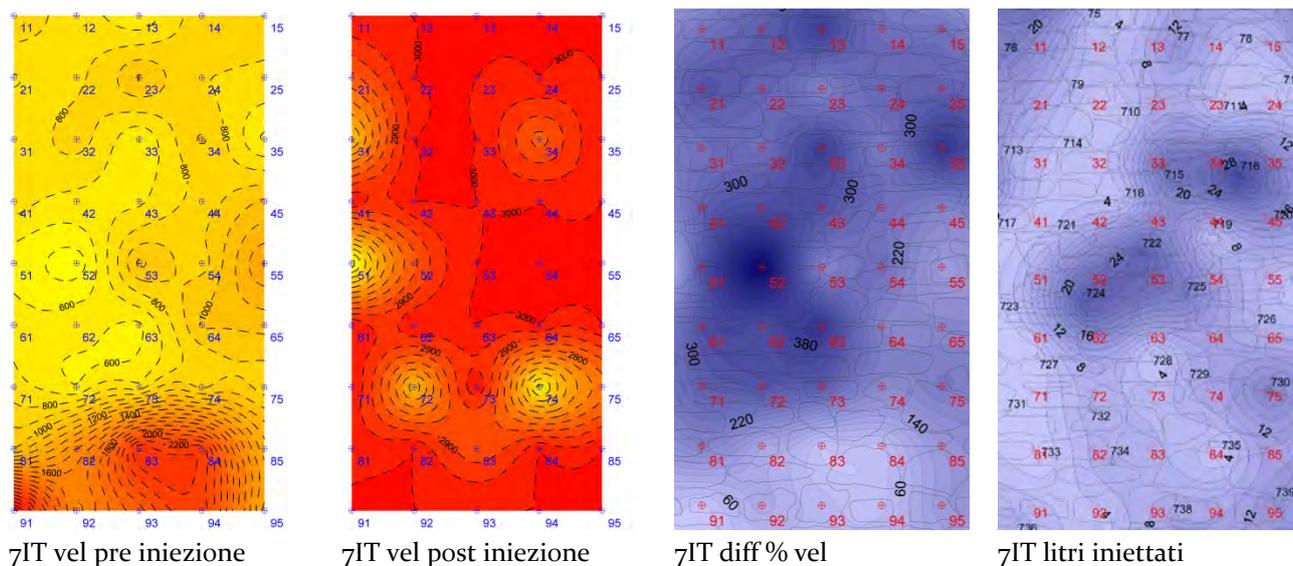
5I vel post iniezione



5I diff % velocità



5I litri iniettati



Tab. 1.3. 5 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati

### Sperimentazioni su modello di edificio in scala 2:3 (1)

Le sperimentazioni eseguite sui pannelli del muro eretto per la campagna di prove sono state ripetute anche su porzioni di muratura di un edificio in muratura in scala 2:3. In una prima fase sono state effettuate indagini soniche dirette e tomografiche per verificare la qualità della muratura. Nella seconda fase invece l'edificio è stato sottoposto alla simulazione di un evento sismico attraverso una tavola vibrante. Nella terza fase invece, le murature danneggiate sono state consolidate mediante iniezioni, ristilatura dei giunti e scuci-cuci. Nella fase precedente al consolidamento sono state effettuate le seguenti indagini:

- prova sonica in trasparenza sul prospetto B
- prova sonica in trasparenza sul prospetto C
- prova sonica in trasparenza sul prospetto D piano terra
- prova sonica in trasparenza sul prospetto D primo piano
- tomografia sonica orizzontale ad altezza 0,83 m
- tomografia sonica orizzontale ad altezza 3,12 m

### Indagini soniche su murature non consolidate

Le soniche dirette sono state effettuate seguendo una griglia composta da quattro righe e tre colonne distanziate tra loro di 33 cm, realizzando così pannelli di indagine di 66x99 cm, con spessore delle murature pari a 33 cm. Per ogni campo prova sono state effettuate tre acquisizioni per punto.

Il pannello 1B risulta piuttosto omogeneo con un picco solo nel punto 13 (1189,69 m/s), e velocità media 667,85 m/s, indice di una muratura di scarsa consistenza. Nel pannello 1C risultano velocità elevate, alcune molto elevate come i 6420 m/s in 31. Considerando che la velocità limite considerata in letteratura è 3000 m/s, nei punti in cui questa soglia è superata è stata applicata una riduzione. In questo modo la velocità media è risultata 1126,06 m/s, che permette quindi di ipotizzare una buona consistenza di quel pannello.

Nel campo 1D al piano terra la velocità media che si ottiene è 855,38 m/s, con picchi attorno ai 1300/1400 m/s in 23, 31, 33. Il campo 1D al piano primo invece è quello che presenta i risultati peggiori, con una velocità media di 569,72 m/s e punti con velocità di poco superiore ai 350 m/s. Per questo pannello la muratura si può tranquillamente ipotizzare di pessima consistenza.

#### *Interventi di consolidamento*

Come già detto, dopo la prima campagna di indagine il modello di edificio è stato sottoposto alla simulazione di un sisma tramite tavola vibrante. Per la riparazione dei danni prodotti sono stati eseguiti interventi di consolidamento tramite iniezioni e tramite scuci-cuci e ristilatura dei giunti deteriorati per ripristinare la continuità muraria. Per il modello (1) la sperimentazione si è conclusa senza ripetere le indagini soniche per valutare l'efficacia degli interventi effettuati.

#### *Sperimentazioni su modello di edificio in scala 2:3 (2)*

Il secondo modello di edificio in scala è stato analizzato con lo stesso programma di indagini ed interventi del modello (1), e in aggiunta dopo gli interventi di consolidamento sono state effettuate nuovamente con indagini soniche negli stessi punti per valutare l'efficacia dell'intervento effettuato sulle murature danneggiate

#### *Indagini soniche su murature non consolidate*

Nel pannello 2B la velocità media globale è 1038,94 m/s, con un valore molto basso in 11 pari a 682,20 m/s e valori piuttosto elevati compresi tra 1300 e 1700 m/s in 22, 42 e 43. Per quanto riguarda il campo 2C le indagini forniscono una velocità media di 2186,32 m/s tipica di murature in buono stato. Da notare che i valori più bassi, di poco inferiori a 1000 m/s sono registrati nella fascia centrale e precisamente nei punti 12 e 32. Questo dimostra l'influenza che hanno gli ammorsamenti (presenti nelle colonne laterali del pannello) sulla velocità sonica. Il campo 2Dpt ha velocità media 708,49 m/s, con un unico picco molto elevato in 11 superiore ai 3000 m/s. Il pannello sovrastante 2Dpp invece presenta velocità media 665,90 m/s, indice di una muratura di cattiva consistenza.

Oltre alle soniche dirette sono state eseguite anche due soniche tomografiche in posizione 2Dpt e 2Dpp ad altezza rispettivamente 0,83 m e 3,12 m. La griglia è stata realizzata con 9 punti per lato posti ad almeno 16,5 cm di distanza, con spessore murario sempre di 33 cm.

La tomografia sonora 2Dpt fornisce velocità comprese tra 1050 m/s e 1600/1950 m/s, con velocità più elevate alle estremità e minore nella fascia centrale. La tomografia 2Dpp invece riporta velocità comprese tra gli 850 m/s e i 1750 m/s.

### *Interventi di consolidamento*

Oltre agli interventi di ristilatura dei giunti e di scuci-cuci, l'intervento principale anche in questo modello è stato l'iniezione di calce idraulica nella totalità dei prospetti dell'edificio.

Prospetto	Quantità kg [f ss]	Quantità l [f ss]	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	Vuoti % [f ss]
<b>A</b>	609	219	361	130	13,0%
<b>B</b>	504	182	298	107	10,7%
<b>C</b>	1018	366	602	217	21,7%
<b>D</b>	1031	371	610	220	22,0%
<b>Medie</b>	791	285	468	168	16,8%

Tab. 1.3. 6 - Quantità di miscela iniettata in funzione del tempo[ss].

### *Valutazione dell'efficacia dell'intervento di iniezione*

L'efficacia dell'intervento di consolidamento è stata provata eseguendo una seconda volta le indagini soniche sia dirette che tomografiche negli stessi punti delle acquisizioni precedenti alle iniezioni. Come nella precedente sperimentazione, data l'incertezza riguardante i percorsi seguiti dalla miscela all'interno delle murature, l'unica verifica attuabile è un controllo che alle zone con un incremento di velocità maggiore corrisponda una quantità di litri iniettati consistente.

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche ottenuti con il programma Surfer è possibile effettuare visivamente un confronto tra la fase precedente al consolidamento e quella successiva, e osservare quali sono le zone con un incremento di velocità maggiore e verificare che corrispondano a zone in cui è stata iniettata una quantità consistente di miscela.

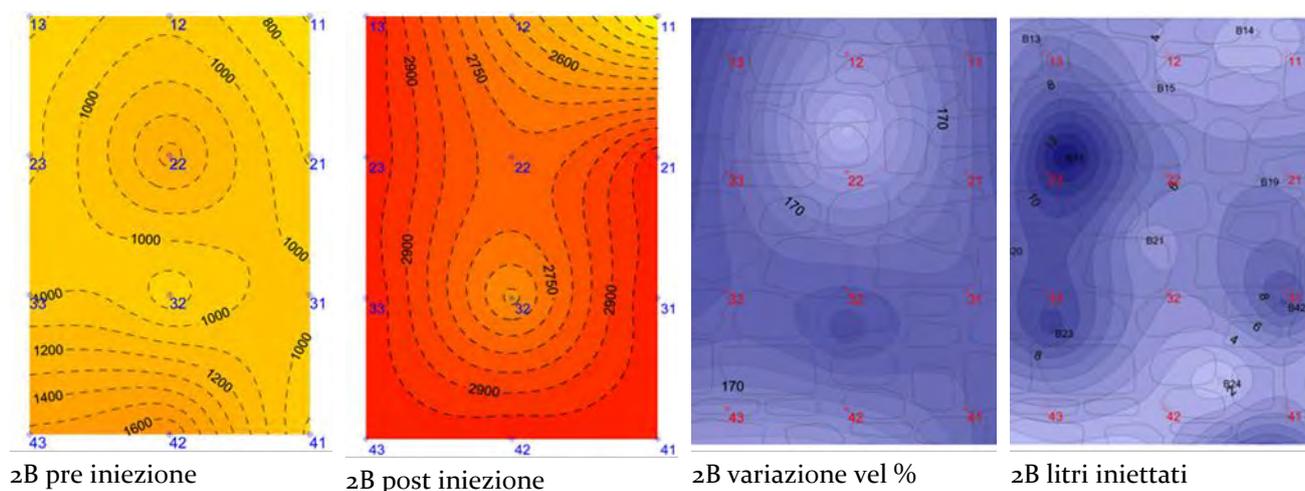


Fig. 1.3. 4 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2B

Nel campo 2B si nota che nei punti di trasmissione/ricezione 13, 23, 21 e 41 si sono registrati rispettivamente incrementi di velocità del 342%, 304%, 320%, e 263%. Infatti nelle vicinanze di questi punti le quantità di miscela iniettate sono massime, mentre la porzione centrale della muratura, in prossimità dei punti 12, 22, 32 che hanno fatto segnare incrementi di velocità minimi, ha ricevuto poca miscela.

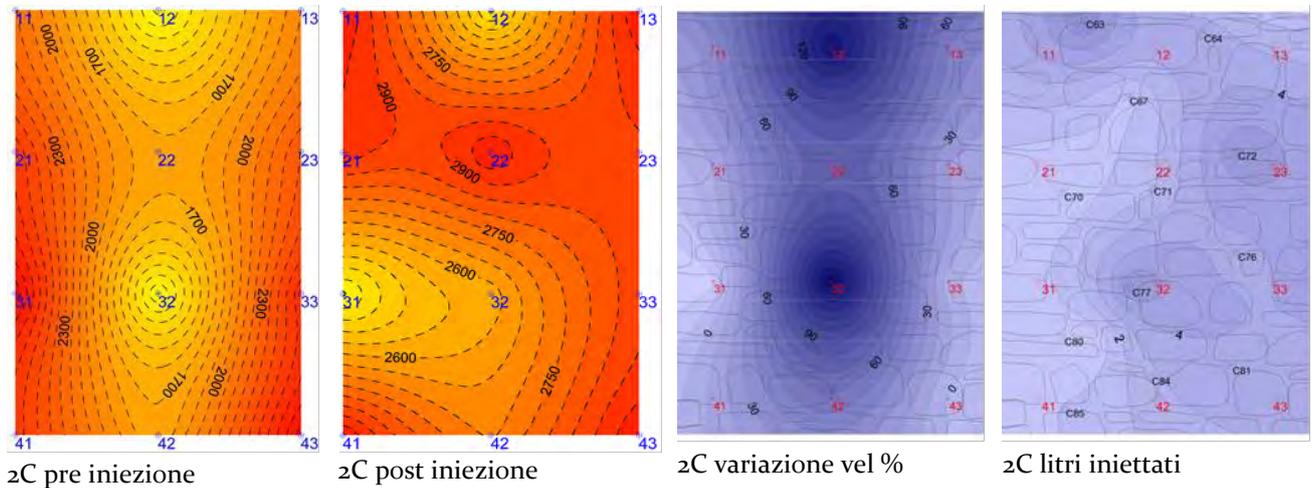


Fig. 1.3. 5 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2C

In questo caso gli incrementi di velocità più consistenti si sono verificati nei punti della colonna centrale 12 e 32, circa del 150%

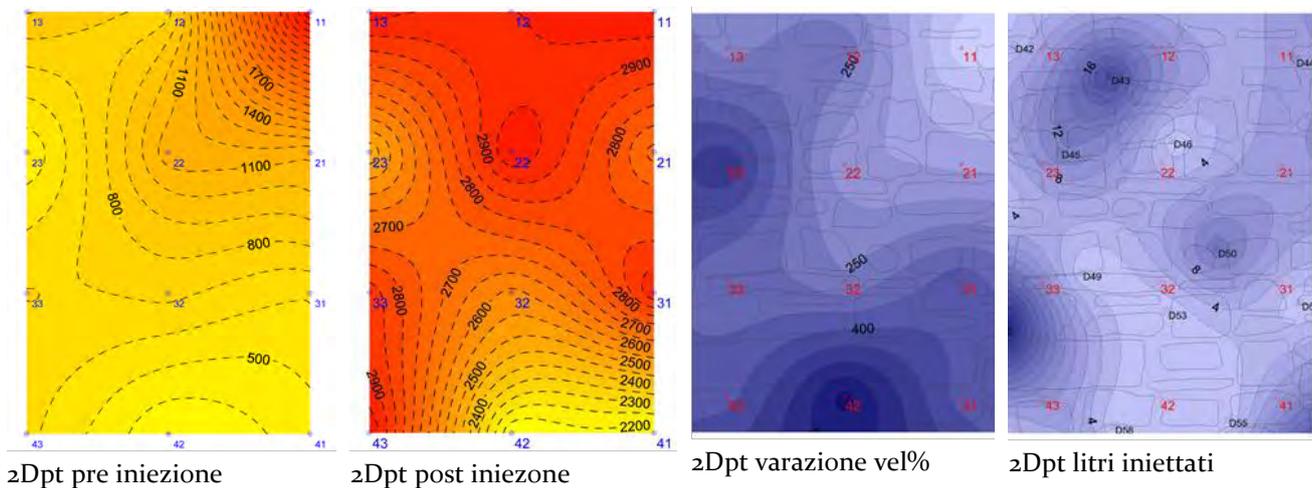


Fig. 1.3. 6 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2Dpt

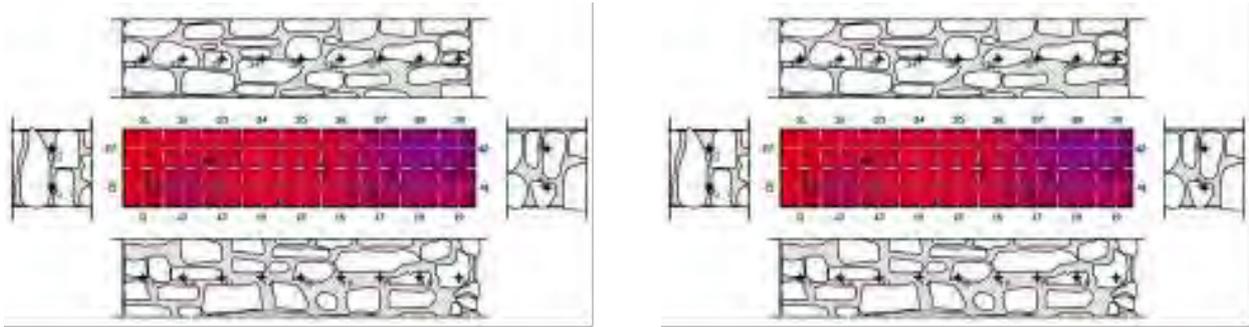


Fig. 1.3. 7 - grafici distribuzione velocità soniche tomografia 2Dpt

Anche nel campo 2Dpt si può notare che i punti con una variazione maggiore di velocità che sono 23, 31, 41, 42 e 43, corrispondono a zone della muratura in cui sono stati iniettati diversi litri di miscela. Nella tomografia si può notare un sostanziale aumento delle velocità soniche nella fascia centrale della sezione in cui è stata eseguita, ad un'altezza pari a 0,83 m.

Nel campo 2Dpp invece si nota come i punti con un incremento di velocità maggiore sono quelli reativi alla riga 2

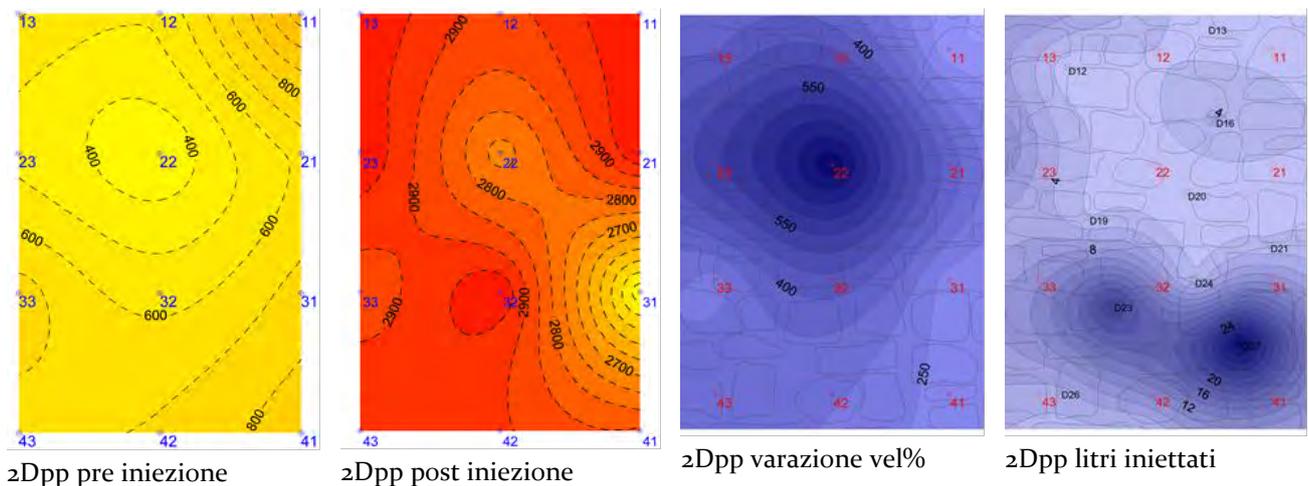


Fig. 1.3. 8 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2Dpp

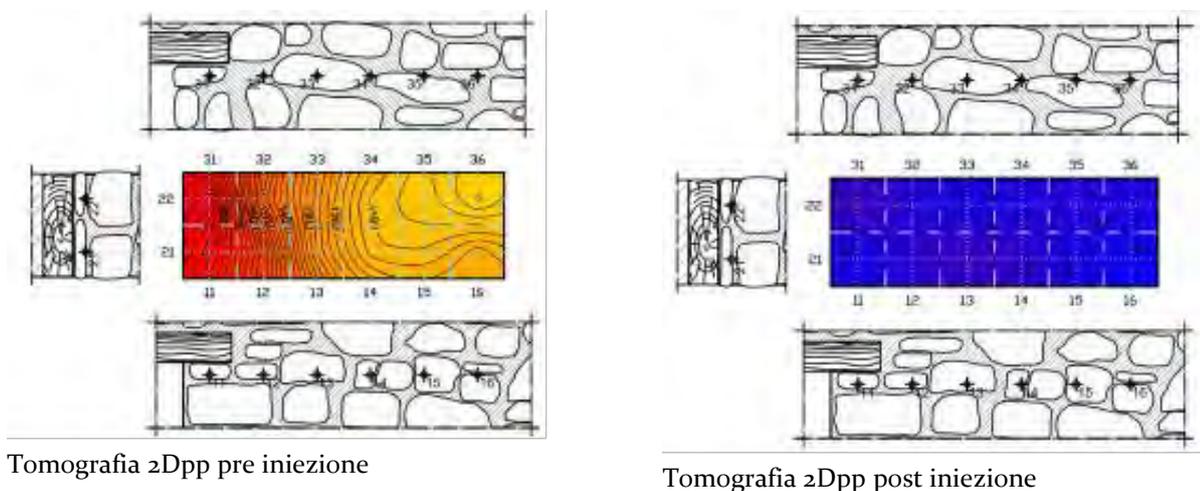


Fig. 1.3. 9 - grafici distribuzione velocità soniche tomografia 2Dpp

Modalità di prova Campione	Spessore [m]	Tomografia [m/s]		Trasparenza [m/s]		
		Pre-iniezione	Post-iniezione	Pre-iniezione	Post-iniezione	
5I	0,50	verticale	765	----	1011	2521
		orizzontale	753	----		
7IT		verticale	798	----	1018	2941
		orizzontale	797	----		
1B	0,33	----	----	668	----	
1C		----	----	1826	----	
1Dpt		1507	----	855	----	
1Dpp		1374	----	570	----	
2B		----	----	1039	2857	
2C		----	----	2176	2808	
2Dpt		1776	2417	900	2731	
2Dpp		1435	2811	666	2882	

Tab. 1.3. 7 Tabella riassuntiva delle velocità soniche.

### Conclusioni

Analizzando i risultati prodotti da queste sperimentazioni, si può notare che in tutti i campi prova si sono raggiunti con gli interventi di consolidamento valori di velocità tipici di murature di buona consistenza, partendo da una situazione iniziale di muratura di scarsa consistenza, quindi con considerevoli incrementi delle velocità soniche. Un ulteriore aspetto da considerare sta nel fatto che i pannelli e le zone con qualità murarie peggiori hanno ottenuto un miglioramento delle più consistente, raggiungendo così un buon grado di omogeneizzazione della sezione. Inoltre, non sempre le zone con tempi di iniezione elevati sono quelli con maggior incremento di velocità soniche, frutto della migrazione della miscela all'interno dei paramenti seguendo percorsi differenti e a volte molto lunghi, andando così a consolidare anche zone apparentemente distanti dai fori di iniezione.

### 1.3.2. Valutazione dell'efficacia di iniezioni per il consolidamento di muratura in pietra mediante prove non distruttive – L. Fattori, S. Scaggiante (2010-2011)

Oggetto di questa tesi di laurea è una sperimentazione eseguita presso il cantiere dell'Ente Edilscuola di Verona nell'ambito del progetto di ricerca ReLUIIS, nato dalla collaborazione tra Università degli Studi di Padova e Tassullo s.p.a.. Essa che prevede la costruzione di pannelli in muratura in scala 1:1 e 2:3 al fine di testarli con prove soniche, rinforzarli con interventi di iniezione e verificare l'efficacia dell'intervento di consolidamento eseguendo nuovamente indagini soniche per poter valutare l'effettivo miglioramento delle qualità della muratura. Inoltre è prevista una fase precedente di caratterizzazione dei materiali attraverso prove di compressione e di compressione-taglio su alcuni dei muri realizzati.

I materiali utilizzati per la sperimentazione sono malta T30V e pietre calcaree di diversa tipologia e pezzatura per la costruzione dei muri, e miscela FEN-X/B per le iniezioni. Sia la

malta che la miscela sono prodotte dalla ditta Tassullo s.p.a.. Le pietre utilizzate sono di tre tipologie differenti, classificabili come pietra rossa, pietra bianca regolare e pietra bianca irregolare, tutte provenienti dalla cava di Cugnano.

Sono state effettuate le seguenti prove per la caratterizzazione della muratura:

1. Prova a compressione uniassiale (UNI EN 1926:2007);
2. Prova a flessione sotto carico concentrato (UNI EN 12372:2007);
3. Prova per la determinazione del modulo elastico (UNI EN 14580:2005);
4. Prova per la determinazione della massa volumica reale ed apparente e della porosità totale e aperta (UNI EN 1936:2007, UNI EN 772-4:2001).

Ulteriori prove di caratterizzazione sono state effettuate sulla malta, e sulla miscela di iniezione, della quale è stata valutata l'iniettabilità con i coni ASTM e di Marsh e attraverso cilindri di muratura. Questi cilindri sono stati a loro volta testati dopo il consolidamento della miscela iniettata.

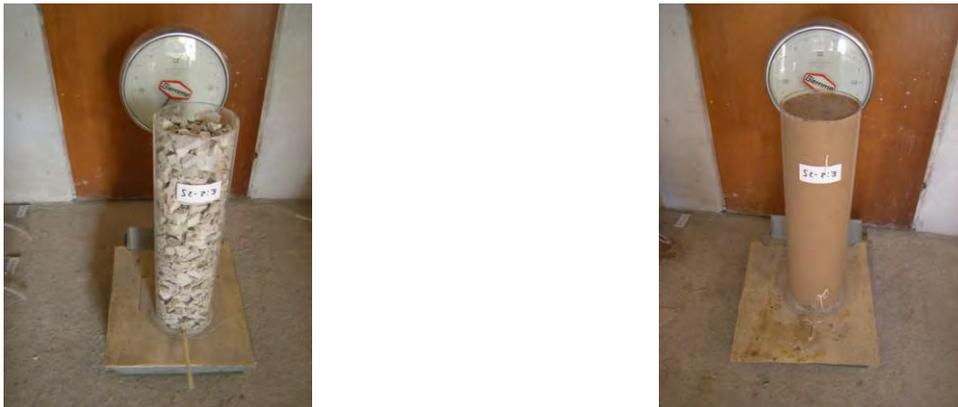


Fig. 1.3. 10 - Cilindri prima e dopo la saturazione con miscela

#### *Indagini soniche dirette pre iniezioni*

Dopo la prima fase di caratterizzazione dei materiali, sono state effettuate le indagini soniche su vari pannelli dei diversi muri, con dimensioni variabili delle griglie, ma sempre composte da maglie di punti di 20x20 cm. I risultati della prima campagna di indagini forniscono valori medi delle velocità soniche piuttosto simili tra i pannelli dello stesso muro e tra i muri stessi. I muri A, B, C sono in scala 1:1 e con spessore 50 cm, mentre i muri D ed E sono in scala 2:3 con spessore 33 cm, e presentano velocità leggermente maggiori.

Complessivamente la velocità media riscontrata nella fase precedente alle iniezioni è pari a 1212 m/s. Questo dato indica che si tratta di murature in uno stato discreto di consolidamento e che necessitano di un intervento di consolidamento.

*Indagini soniche tomografiche pre iniezione*

Nei pannelli dei muri B, C, E, ed E sono state eseguite anche indagini soniche tomografiche sia orizzontali che verticali, sfruttando le righe e le colonne centrali delle griglie delle acquisizioni precedenti. Complessivamente le velocità medie rilevate in questo tipo di prova, nella fase precedente alle iniezioni, sono pari a 1300 m/s per la tomografia orizzontale e a 1400 m/s per quella verticale. Si può quindi affermare che i valori qui riscontrati sono leggermente più alti di quelli ottenuti dalle prove in trasparenza.

*Interventi di consolidamento mediante iniezioni*

Le iniezioni di calce idraulica naturale sono state eseguite attraverso una griglia di fori eseguiti sulla muratura seguendo una griglia di triangoli equilateri di circa 25-30 cm di lato, al fine di permettere il fluire della miscela in ogni parte della muratura. In questa maniera si è ottenuta una distribuzione di 14 fori/m<sup>2</sup>. Da notare il fatto che si è iniettato solo su un lato dei muri, mentre sul retro sono stati effettuati solo dei fori di controllo secondo una griglia 60x60 cm. Come nel caso studio precedente, non è stato effettuato il lavaggio del muro per simulare meglio la situazione di muratura invecchiata, e per non rischiare di togliere spazio alla miscela riempiendo i vuoti con acqua.

Durante la fase di iniezione si sono rilevati:

- il foro di iniezione;
- il foro di uscita;
- il tempo di durata dell'iniezione per ogni foro;
- i sacchi di miscela necessari per ogni muro;
- la quantità di miscela iniettata in ogni foro.

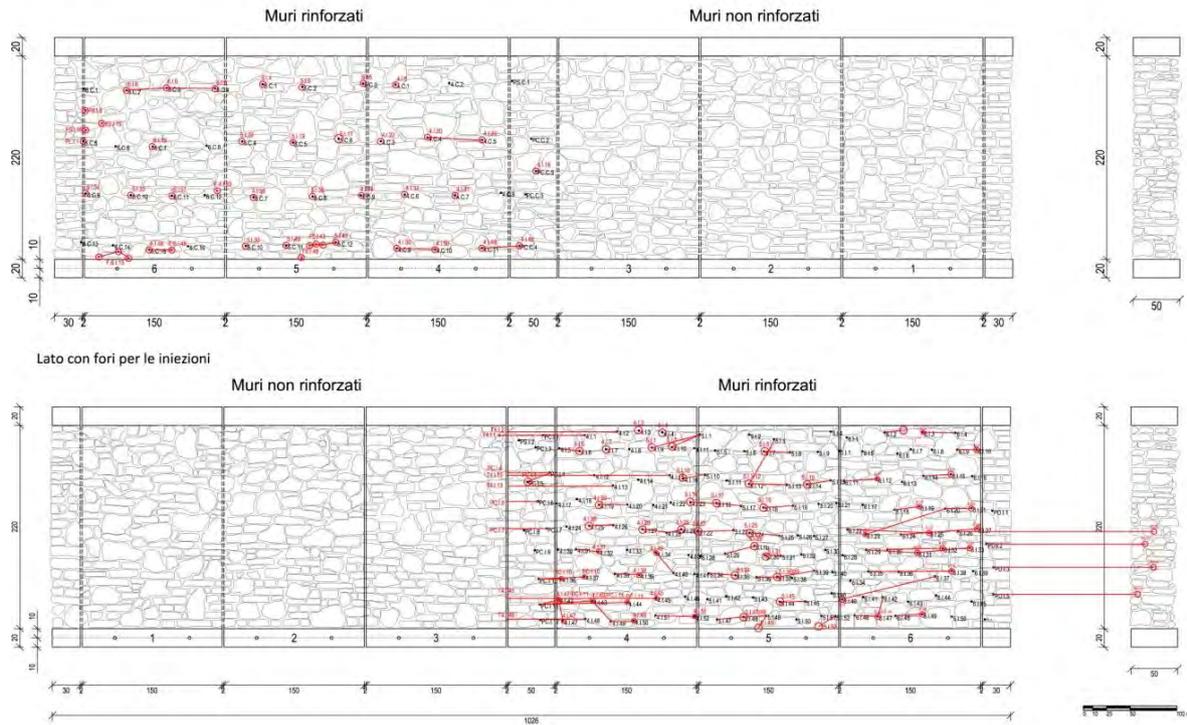


Fig. 1.3. 11 - Rilievo dei fori di uscita del muro A

Per ogni muro sono stati riportati graficamente i fori in cui si iniettava e il relativo foro o fessura da cui la miscela fuoriusciva.

	Muri	Media litri iniettati su m <sup>2</sup> per muro	Media litri iniettati su m <sup>2</sup> per tipologia di muro
<b>Muri Full Scale 1/1</b>	A	78,3	78,3
	B	75	
	C	81,6	
<b>Muri 2/3</b>	D	46	46,7
	E	47,3	

Tab. 1.3. 8 Confronto fra le medie dei litri iniettati su m<sup>2</sup> tra i muri in scala 1/1 e in scala 2/3.

### Indagini soniche post iniezioni

Le indagini soniche sono state ripetute dopo le iniezioni negli stessi punti utilizzati per le precedenti indagini. Sono state effettuate tre acquisizioni per punto per determinare un valore medio preciso. Complessivamente si è notato un incremento ed una omogeneizzazione sostanziale delle velocità, dettate dal fatto che la miscela iniettata è migrata verso gli spazi vuoti presenti nel nucleo interno dando così alla muratura una conformazione più compatta. Le velocità raggiunte, con una media globale di 3693 m/s, definisce la muratura come di buona consistenza. Inoltre, si è notato che gli incrementi di velocità maggiori si sono riscontrati nelle zone con velocità iniziale minore, dando quindi ai

pannelli oltre ad una migliore consistenza, una maggior coesione tra gli elementi e una riduzione dei vuoti.

#### *Indagini soniche tomografiche post iniezioni*

Come per le soniche dirette, anche le tomografie soniche sono state ripetute negli stessi punti della fase precedente al consolidamento. Per ciascun punto sono state effettuate 3 acquisizioni delle quali si è determinata la media, e per ogni campo sono state effettuate due 'illuminazioni'. Nella prima il segnale va dal prospetto 1 al prospetto 3 (fronte e retro), nella seconda il contrario. Anche in questo caso le velocità risultano considerevolmente aumentate, con una media di circa 3000 m/s, tipica di murature di buona consistenza.

#### *CONCLUSIONI*

Dal confronto tra risultati delle soniche dirette effettuate nella fase precedente all'intervento di consolidamento tramite iniezioni con quelli ottenuti nella fase successiva, si osserva che le velocità medie globali sono circa triplicate, passando da valori attorno ai 1200 m/s a valori superiori ai 3000 m/s. Inoltre si osserva che le zone inferiori presentano velocità maggiori, probabilmente perché durante la costruzione sono stati riempiti più vuoti rispetto alle fasce superiori, allo stesso tempo però le zone con velocità iniziali minori hanno subito un maggior incremento di velocità. Per quanto riguarda le tomografie invece, i valori sono aumentati del 200% per le orizzontali e del 100% per le verticali nei pannelli di spessore 50 cm, mentre del 90% e 80% nei pannelli da 33 cm di spessore. L'incremento minore è dovuto alla minor presenza di vuoti da riempire.

### **1.3.3. Qualificazione di murature storiche: procedure sperimentali in sito e calibrazione in laboratorio – M. Dalla Benetta (2012)**

Questa tesi di dottorato tratta lo studio di murature in pietra tramite prove a diversi livelli di invasività, eseguite sia in sito che in laboratorio. L'utilizzo di diverse tipologie di analisi permette di stimare l'affidabilità delle singole prove. Di particolare interesse le parti relative alle prove non distruttive come strumento per la qualificazione delle murature e per la valutazione dell'efficacia degli interventi di iniezione. Le indagini soniche sono state eseguite seguendo la procedura descritta nelle raccomandazioni RILEM.

#### *BARDOLINO*

Il caso studio tratta un edificio a San Colombano, nel comune di Bardolino (VR), è un ex corte rurale con annessa cappella, soggetta a un radicale restauro per una nuova destinazione d'uso residenziale. La struttura è stata oggetto di un intervento globale con sottofondazioni, consolidamento delle murature e sostituzione dei solai e della copertura.

Le indagini di questo lavoro di tesi sono state svolte sulle strutture portanti verticali, le quali durante il restauro sono state soggette a scarnitura dei giunti per una profondità di 3-4 cm, ristilatura dei giunti con malta di calce HD System, iniezione di latte di calce HD System.

Inoltre si è preferito suddividere le murature dell'edificio, comunque simili tra loro, in tre categorie:

- MP-CH-B: muratura della chiesa, realizzata in pietra a spacco e pietre arrotondate, risalente alla prima fase costruttiva, tessitura regolare e spigoli realizzati con grossi elementi squadrati, si presenta compatta e ben realizzata e non ha ricevuto grandi quantità di iniezioni.
- MP-B: muratura in pietra dell'edificio in linea, realizzato in più fasi non ben determinate, presenta spessori variabili dai 50 agli 85 cm, è costituita da pietre arrotondate e scaglie, con nucleo interno formato da scaglie e malta, e iniettata con notevoli quantitativi di miscela legante. La tessitura non è sempre ottima, variabile da zona a zona.
- MP-'800-B: muratura dell'ampliamento Ottocentesco, realizzata in pietra di uguale origine e pezzatura dei precedenti, con cantonali realizzati in grossi elementisquadrati. Metà del muro è stato ricostruito a causa di un crollo, la parte originale è stata iniettata in modo consistente.

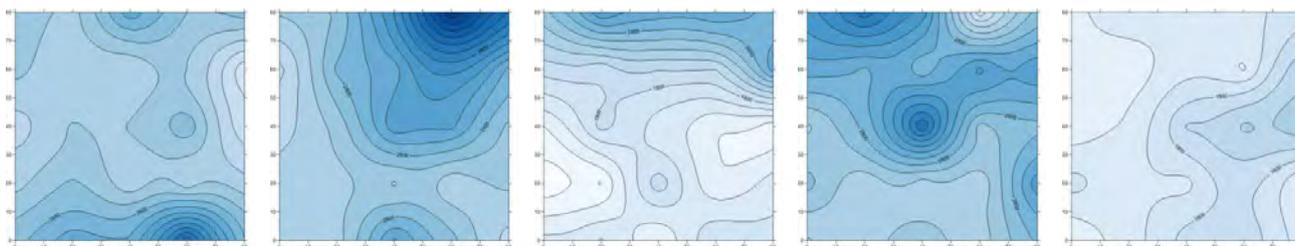
A tutte e tre le tipologie si può conferire la definizione da NTC 2008 di 'Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno consolidata con iniezioni'.

#### *Indagini soniche dirette*

Le prove soniche dirette sono state svolte seguendo una griglia di 5x5 punti con distanze reciproche di 20 cm, realizzando così un pannello di 80x80 cm.

<b>Prova</b>	<b>Tipologia Muraria</b>	<b>Spessore [cm]</b>	<b>Vel. Min [m/s]</b>	<b>Vel. Max [m/s]</b>	<b>Vel. Media [m/s]</b>
S <sub>1</sub>	MP-CH-B	0,56	1655	4353	2546
S <sub>2</sub>	MP-B	0,85	1944	5211	2824
S <sub>3</sub>	MP-B	0,50	864	3369	1883
S <sub>4</sub>	MP-'800-B	0,49	1673	4193	2838
S <sub>5</sub>	MP-B	0,65	1207	2337	1628

*Tab. 1.3. 9 - Riepilogo prove soniche*



*Fig. 1.3. 12 - grafici di distribuzione velocità soniche pannelli S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>*

## ONNA - SANT'EUSANIO FORCONESE – TEMPERA

La sperimentazione è stata avviata dopo l'evento sismico del 6 aprile 2009 con epicentro L'Aquila, e ha comportato lo studio su 21 pannelli nelle diverse località, con esecuzione di prove soniche pre consolidamento, iniezioni di diverse miscele da parte di addetti ai lavori delle diverse ditte produttrici, e prove soniche sui pannelli consolidati.

*Verifica efficacia interventi di consolidamento*

Durante lo svolgimento di ogni intervento di consolidamento è stata misurata la quantità di miscela su ogni singolo foro con metodi diversi in funzione del tipo di attrezzatura impiegata. Questo comunque non fornisce alcun dato sui percorsi seguiti dalla miscela all'interno della muratura. Come si può notare dalle immagini, la diffusione della miscela è piuttosto irregolare.

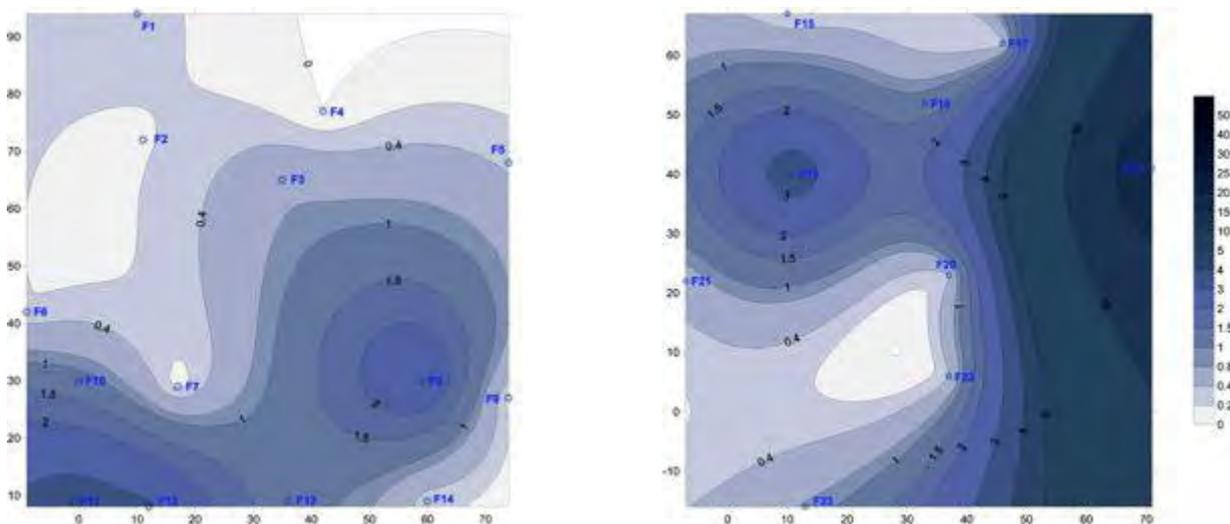


Fig. 1.3. 13 - Quantità di miscela iniettata nel pannello 01-o\_C/A lato esterno e lato interno.

Le diverse miscele utilizzate sono state classificate con le lettere A, B, C, D, E, F.

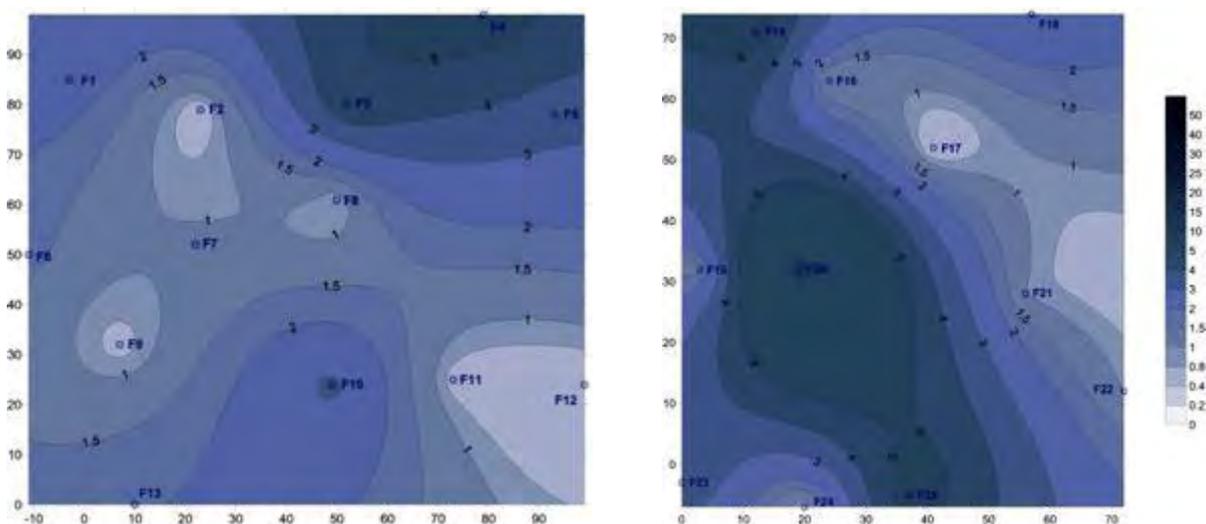


Fig. 1.3. 14 - Quantità di miscela iniettata nel pannello 02-o\_C/A lato esterno (a) e lato interno (b)

La valutazione dell'efficacia delle iniezioni è stata effettuata eseguendo prima e dopo il consolidamento prove soniche dirette, con griglie composte da maglie di 20x20 cm. Per ogni punto sono state effettuate tre acquisizioni per poter determinare una velocità media. In tutti i pannelli si nota un rapporto incrementale mediamente superiore a 3, ad eccezione di quelli iniettati con la miscela F che ha avuto problemi di maturazione dovuti al gelo.

Campione	%vuoti iniettati	Velocità pre [m/s]	Velocità post [m/s]	Incremento di velocità pre/post
01-O_C/A*	8,9	461	2357	5,1
02-O_C/A*	10,3	405	2599	6,4
03-O_U*	-	739	-	-
04-S_U	-	611	-	-
05-S_U	-	433	-	-
06-S_C/B	18,2	456	1793	3,9
07-S_C/B	10,2	401	1997	5,0
08-O_U	-	585	-	-
09-O_U	-	351	-	-
10-O_C/C*	11,1	336	1608	4,8
11-O_C/C*	13,8	454	2148	4,7
12-O_U	-	551	-	-
13-O_U	-	739	-	-
14-O_C/D	12,4	555	2378	4,3
15-O_C/D	12,7	850	2484	2,9
16-T_C/E	12,3	369	1926	5,2
17-T_C/E	11,9	457	1583	3,5
18-T_U	-	402	-	-
19-O_C/F	15,1	881	2222	2,5
20-O_C/F	7,4	767	1156	1,5
21-O_U	-	649	-	-
Media U	-	533	-	-
Media C	12,0	568	2021	3,8

\*pannelli iniettati su entrambi i lati

Tab. 1.3. 10 - Risultati dei test sonici per i pannelli non consolidati (U) e iniettati (C)

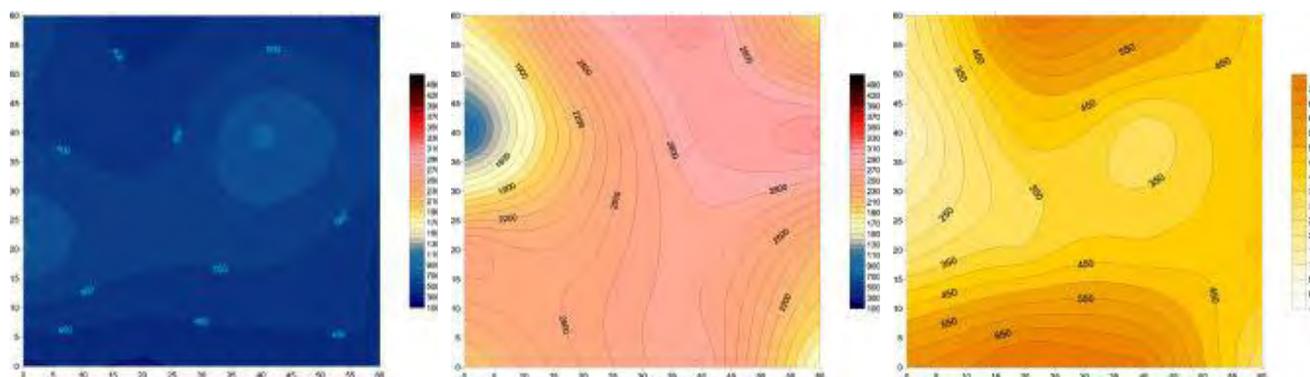


Fig. 1.3. 15 Pannello 01-O\_C/A: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

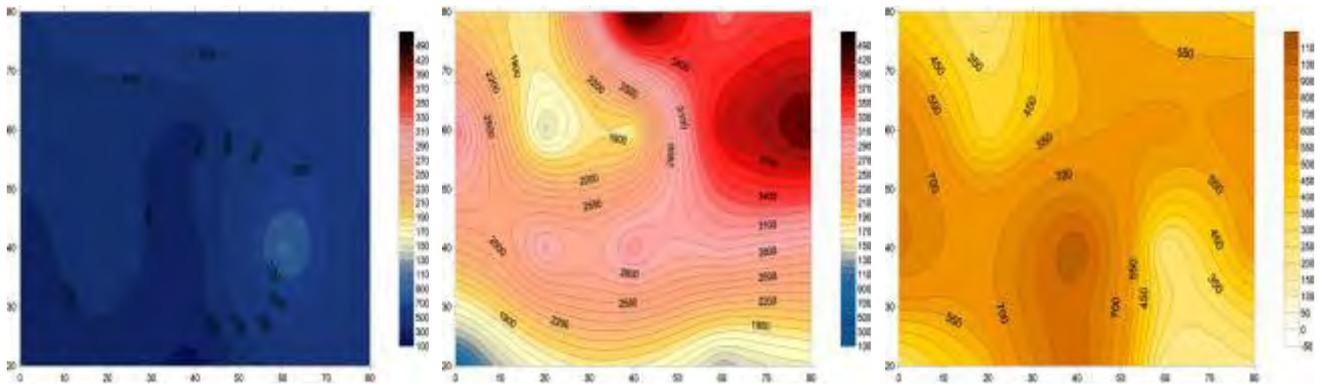


Fig. 1.3. 16 - Pannello 01-O\_C/A: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

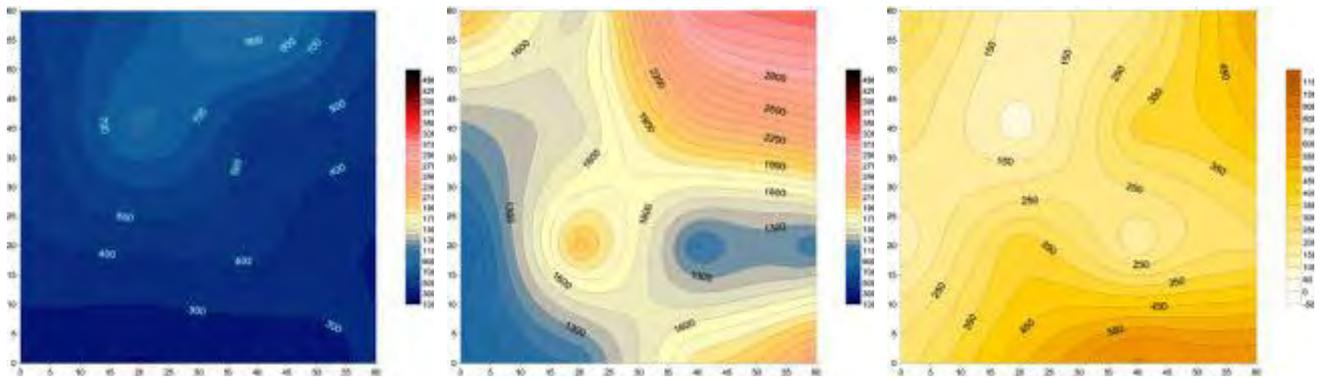


Fig. 1.3. 17 - Pannello 06-S\_C/B: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

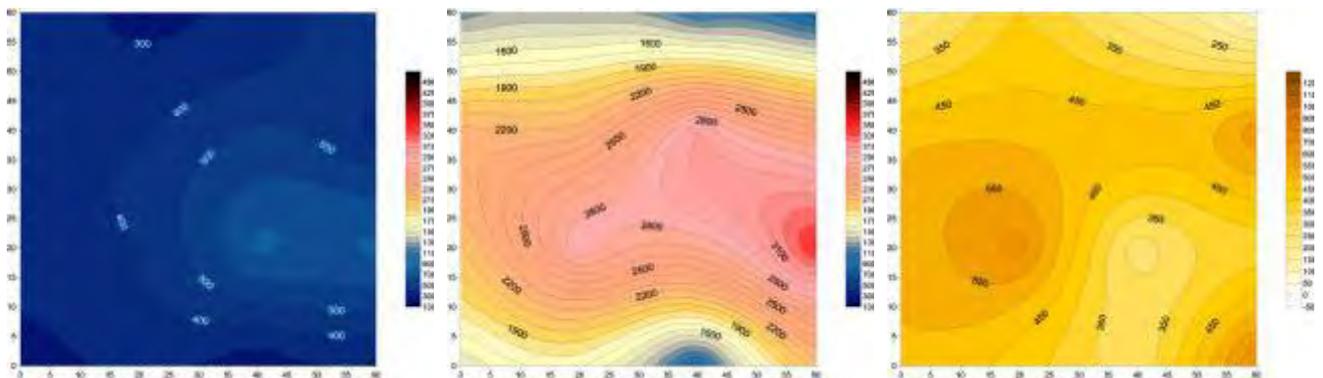


Fig. 1.3. 18 - Pannello 07-S\_C/C: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

In alcuni casi è immediato osservare le conseguenze della quantità iniettata sulla muratura. Nella figura seguente ad esempio, si nota come nella parte superiore sono state iniettate piccolissime quantità di miscela, e infatti il grafico di distribuzione delle velocità soniche in quelle porzioni presenta velocità tipiche di murature non consolidate. Però non è sempre possibile effettuare correlazioni precise, perché molto dipende dai percorsi interni seguiti dalla miscela.

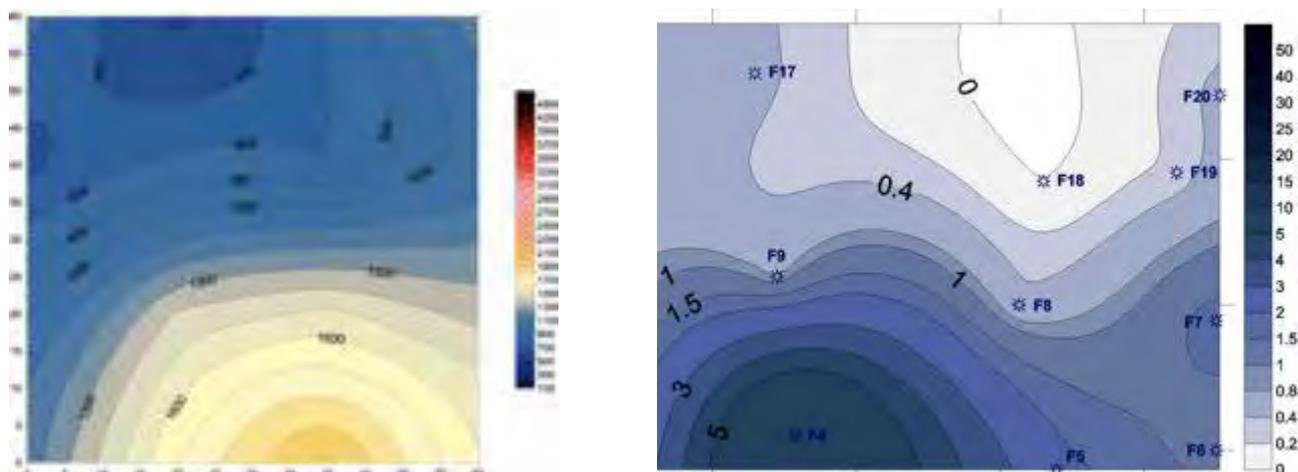


Figura 7.23 Rappresentazione grafica delle velocità sonore post-iniezione per il pannello 20-O\_C/F e delle quantità di miscela iniettata

Le prove di caratterizzazione meccanica realizzate sui provini prelevati durante le operazioni d'iniezione hanno permesso di ricavare resistenza a compressione (UNI EN 1015-11, 2007), modulo elastico (UNI 6556, 1976) e resistenza a flessione (UNI EN 1015-11, 2007).

Codice	Densità apparente [kg/dm <sup>3</sup> ]	Rapporto acqua legante	Massa volumica [kg/dm <sup>3</sup> ]	Resistenza a Flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistenza a Compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo elastico E [N/mm <sup>2</sup> ]
A_SC	1,50	0,40	1,83	1,79	37,70	8800
A_EC			1,82	2,01	32,82	7500
B_SC	1,89	0,35	1,85	3,22	27,18	10400
B_EC			1,90	1,68	25,14	10400
C_SC	1,66	0,60	1,64	1,07	17,72	5900
C_EC			1,55	1,75	13,72	3700
D_SC	1,60	0,50	1,77	4,44	30,90	11000
D_EC			1,78	2,20	31,63	10300
E_SC	1,9	0,33	1,90	1,83	5,47	5700
E_EC			1,94	1,51	4,78	5600
F_SC	1,35	0,33	1,80	1,88	18,13	8100
F_EC			-	-	-	-

Tab. 1.3. 11 - Quadro riassuntivo delle prove sulle miscele

Tutte le prove soniche eseguite sui pannelli consolidati hanno rilevato incrementi di velocità, fino ad un massimo del 586% ottenuto in uno dei pannelli ad Onna iniettato con miscela A (02-O\_C/A), ad un minimo del 54% nel pannello scarsamente consolidato miscela F (20-O\_C/F). Considerando tutti i 21 pannelli, l'incremento medio è del 271%. Inoltre si nota che le murature con qualità iniziali peggiori hanno dimostrato incrementi maggiori, invece pannelli con velocità inizialmente omogenee presentano un consolidamento non egualmente distribuito nella sezione. Comunque si può affermare che quello delle indagini

soniche dirette è un buon metodo per valutare l'efficacia delle iniezioni, poiché in molti casi zone con un consistente incremento di velocità corrispondono a zone in cui sono state iniettate buone quantità di miscela.

## 2.CASO STUDIO – IL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA

### 2.1. Inquadramento

#### 2.1.1. Inquadramento Geografico

La città di Verona è situata nel Nord – Est Italia lungo il fiume Adige agli inizi della pianura Padana, ai piedi dell'appendice meridionale dei monti Lessini.



Fig. 2.1. 1 - Inquadramento geografico (Google maps)

Il Museo Archeologico al Teatro Romano di Verona si colloca nella zona Nord – Est della città, lungo la sponda sinistra del fiume Adige, ad una quota altimetrica di circa 60 m s.l.m.



Fig. 2.1. 2 - Inquadramento geografico (Google maps)

## 2.1.2. Inquadramento Geologico

Dal punto di vista geologico l'area di studio presenta caratteristiche particolari dovute alla vicinanza al fiume. Il substrato roccioso è formato da marne di colore grigio scuro appartenenti alla Formazione delle Marne di Priabona di età eocenica, ricoperto da depositi colluvionali prevalentemente fini.

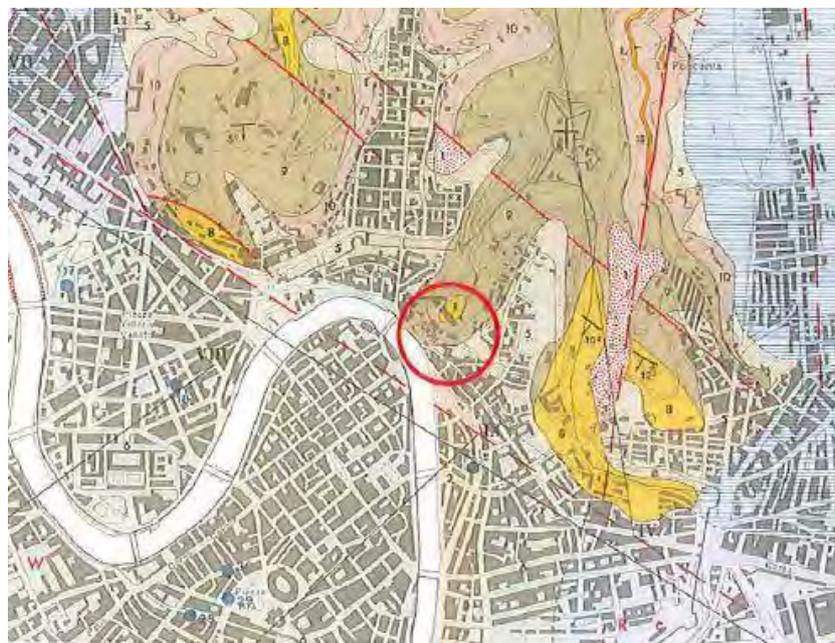


Fig. 2.1. 3 - Carta geologica del territorio del comune di Verona

Queste caratteristiche sono state studiate in previsione dell'intervento di restauro del Museo Archeologico tuttora in atto.

Inoltre il giorno 17 aprile 2012 è stato eseguito un sondaggio geognostico a rotazione a carotaggio continuo a secco con sonda cingolata. Inoltre all'interno dei fori di sondaggio sono state eseguite delle prove penetrometriche standard (STP) per determinare le caratteristiche geotecniche dei terreni.

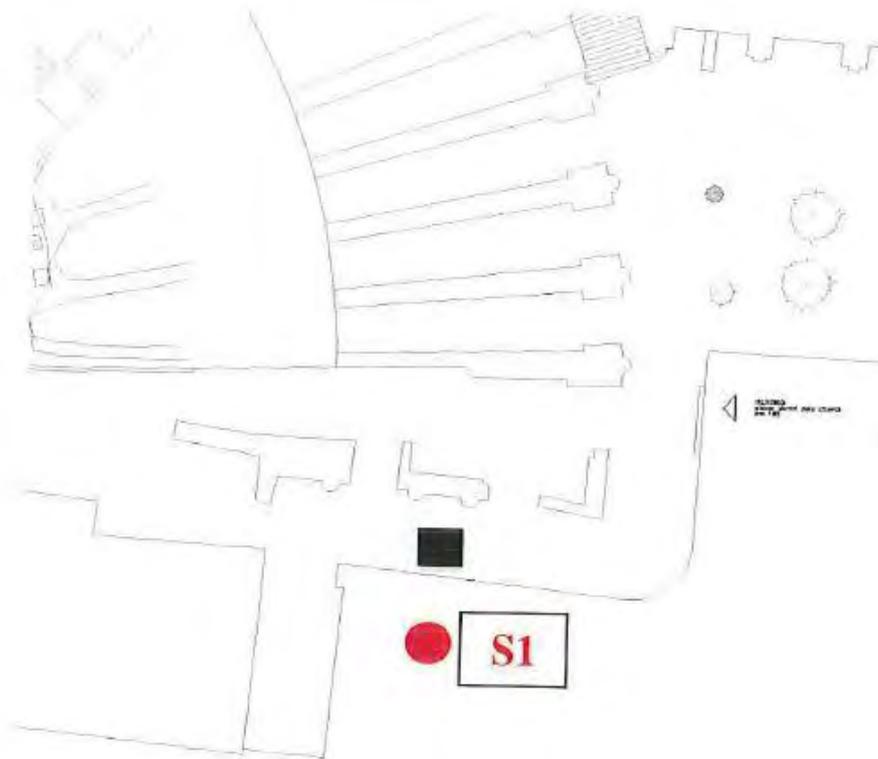


Fig. 2.1. 4 - Localizzazione del sondaggio S1

Il sondaggio, eseguito al livello del parcheggio lungo la strada, è stato utile ad individuare tre litotipi principali nel sottosuolo:

- **Litotipo A:** da p.c. a -5,0 m di profondità. Terreno di riporto ghiaioso sabbioso e sabbioso ghiaioso con matrice argillosa limosa e limosa argillosa di colore da bruno grigio a grigio bruno ad elementi di natura prevalentemente calcarea e dolomitica di forma da angolare a ben arrotondata con laterizzi e frammenti lapidei di natura calcarenitica di colore giallastro.
- **Litotipo B:** da -5,0 m a -7,2 m di profondità. Terreno ghiaioso sabbioso limoso di colore bruno grigio ad elementi di natura prevalentemente calcarea e dolomitica di forma da angolare a ben arrotondata con rari ciottoli di natura porfirica.
- **Litotipo C:** da -7,2 m a -10 m di profondità. Roccia marnosa di colore grigio scuro la cui parte sommitale risulta essere alterata

### 2.1.3. Inquadramento sismico

L'Italia è uno dei paesi con il maggior rischio sismico tra quelli dell'area del Mediterraneo. La sismicità dell'Italia è legata principalmente al fatto che essa è situata nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella euroasiatica ed è pertanto sottoposta a notevoli forze di compressione dovute ai movimenti tettonici.

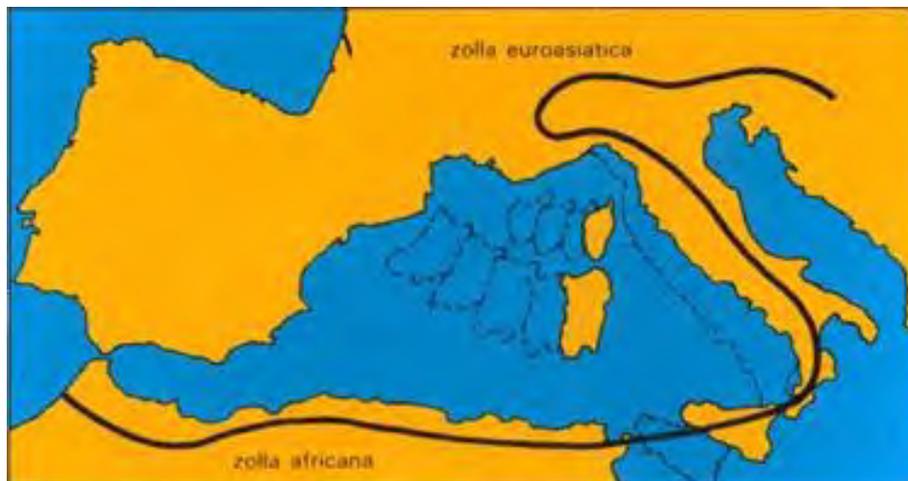


Fig. 2.1. 5- Zona di convergenza tra la zolla africana ed euroasiatica

Il rischio sismico è definito dalla combinazione dei tre seguenti fattori:

- *Pericolosità sismica*: probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco(PGA) di interesse.
- *Vulnerabilità*: la predisposizione di una struttura a subire un danno di un determinato livello a fronte di un evento sismico di una data intensità
- *Esposizione*: la maggiore o minore presenza di beni a rischio e quindi la conseguente possibilità di subire un danno (economico, in vite umane, ai beni culturali, ecc...).

Di seguito è riportata la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

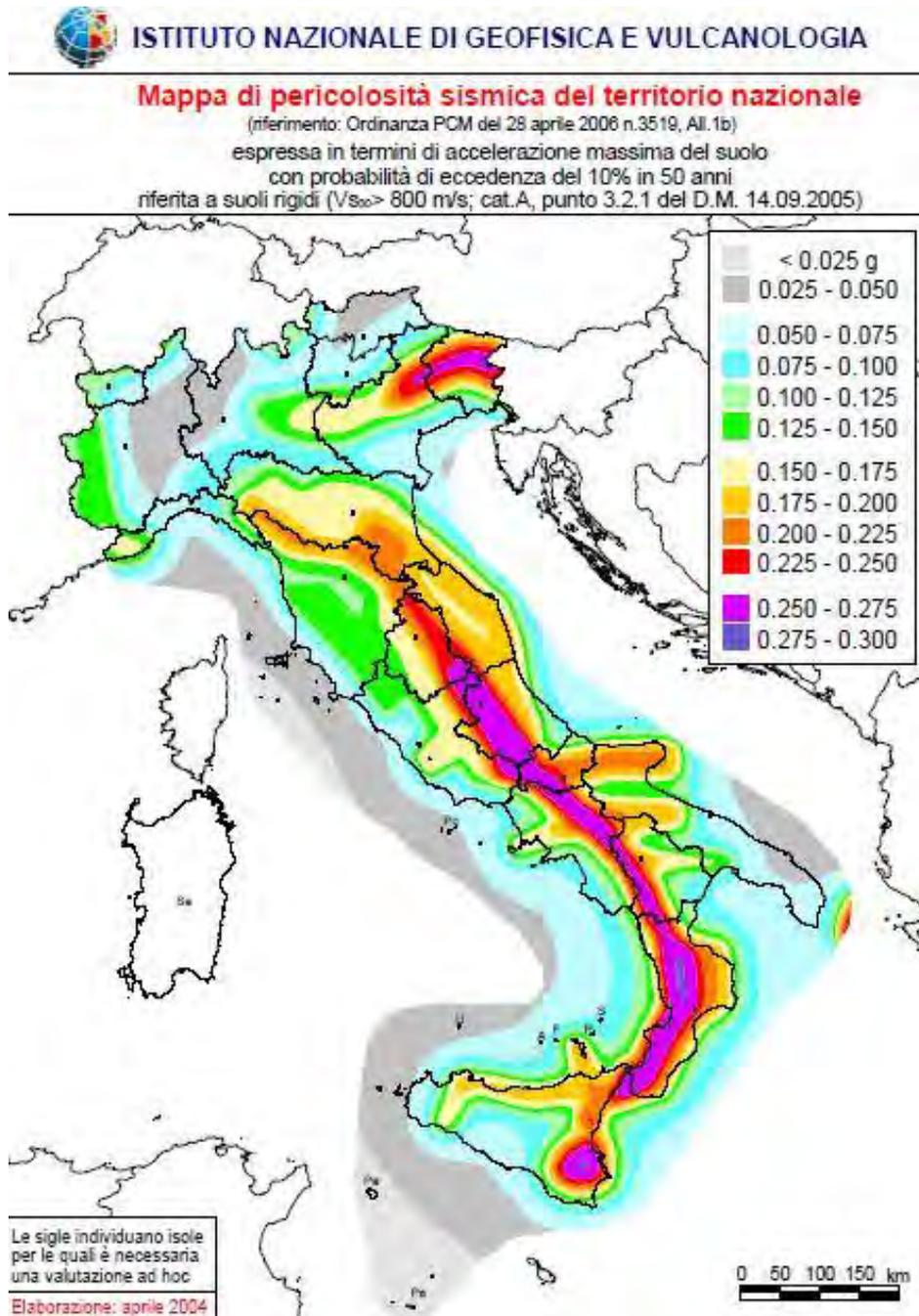


Fig. 2.1. 6 - Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale OPCM 3519 ( [www.ingv.it](http://www.ingv.it) )

La stessa mappa è presente a livello regionale, con visibili i valori massimi e minimi di accelerazione di picco al suolo per le diverse zone della regione, con una griglia ridotta che permette di ricavare i valori tipici dei diversi comuni con una certa precisione

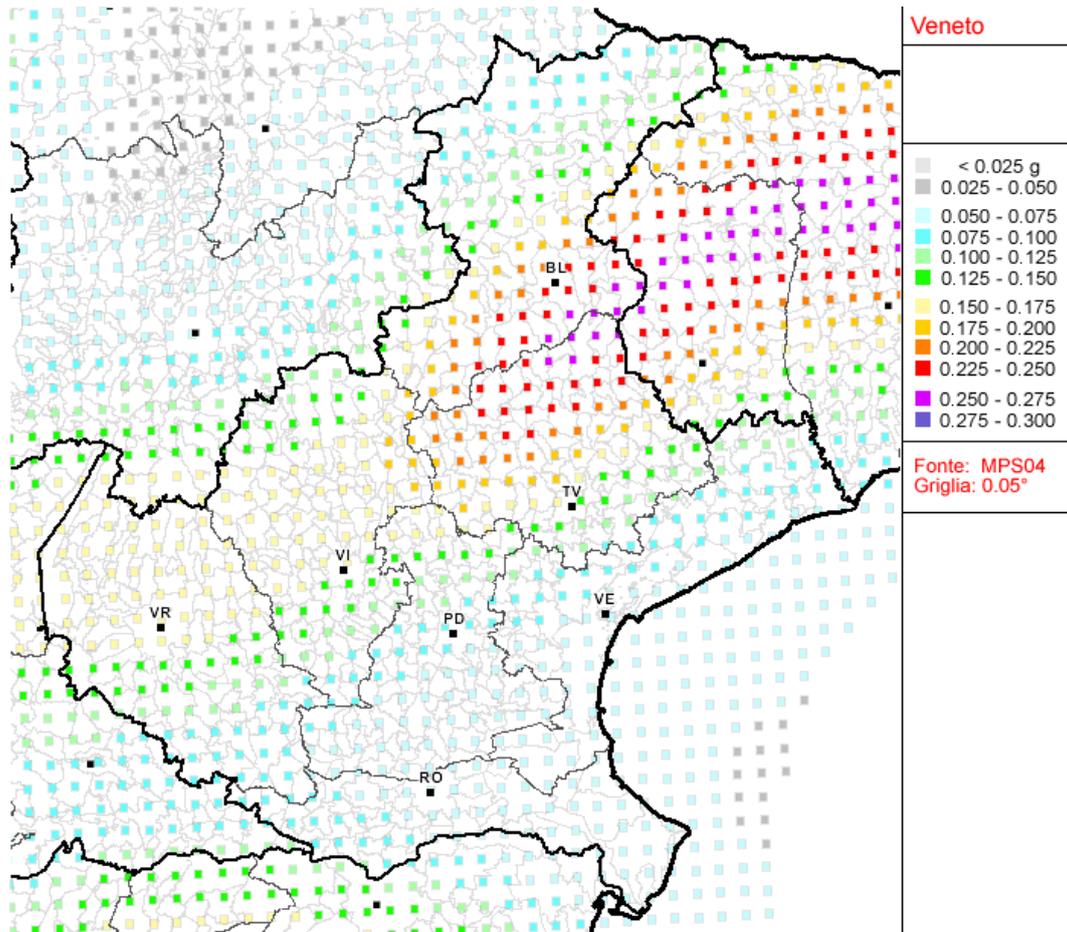


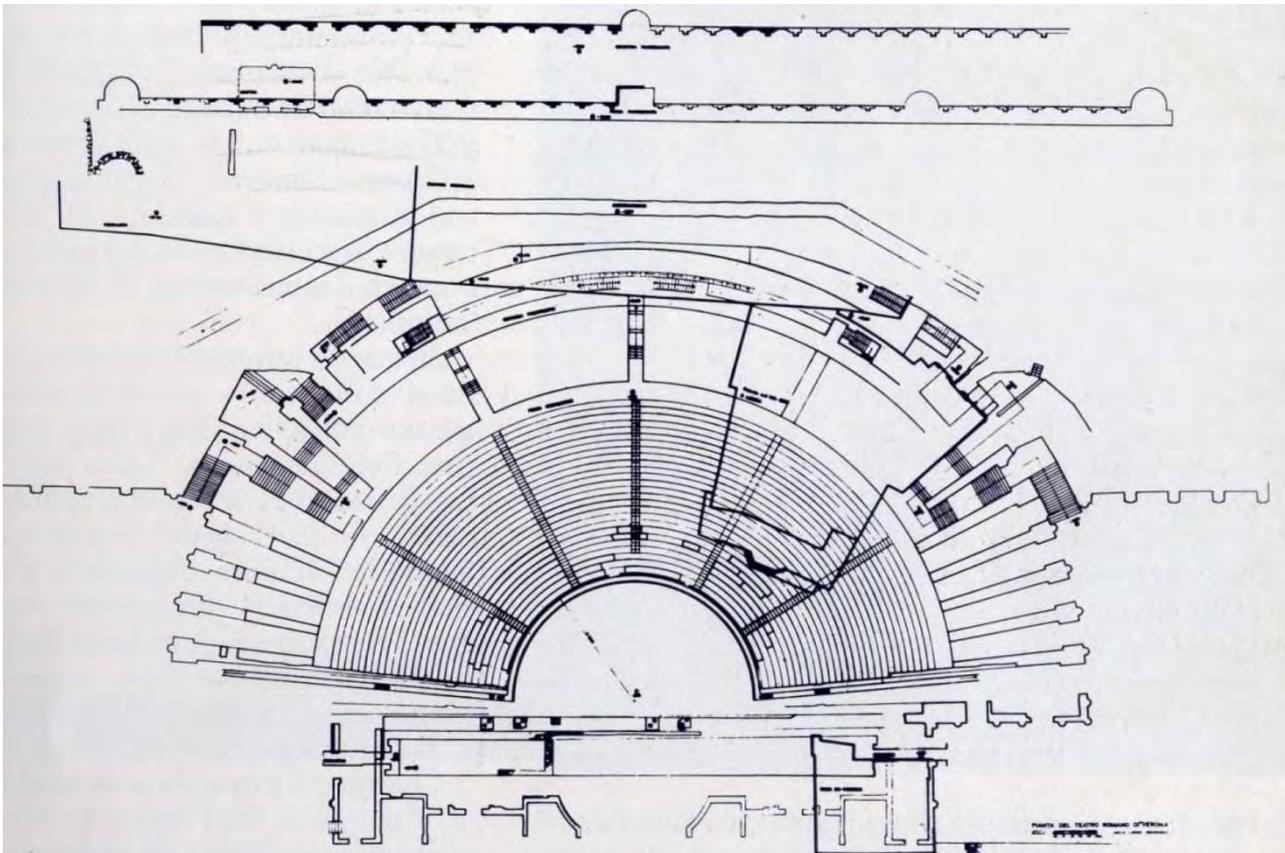
Fig. 2.1. 7 - Mappa di pericolosità sismica del Veneto OPCM 3519 ( [www.ingv.it](http://www.ingv.it) )

Per quanto riguarda la città di Verona i valori delle accelerazioni di picco variano tra 0,150g di minimo e 0,175g di massimo.

## 2.2. Storia del manufatto

### *Il Teatro*

Il Teatro Romano di Verona risale circa alla metà del I sec a.C. Questa datazione è stata ricavata in base alla coordinazione dell'impianto teatrale con il reticolato urbano, che lascia pensare all'antichità del progetto iniziale. L'edificio sorge sulle pendici meridionali del colle di San Pietro, ed è separato dall'alveo dell'Adige da un muraglione costruito in blocchetti regolari di tufo ricavato dal colle stesso, mentre è separato dal colle da una profonda intercapedine che lo isola dall'umidità e dall'infiltrazione delle acque. Il complesso teatrale si articola su diverse quote che raggiungono, dalla riva dell'Adige fino alla terza terrazza, un dislivello di cinquanta metri, che diventano sessanta se si considera la spianata occupata attualmente da Castel San Pietro, dove anticamente sorgeva un tempio.



*Fig. 2.2. 1 – Ricomposizione della pianta del Teatro Romano fino alla “seconda passeggiata” dopo gli ultimi scavi nella fossa scenica (1971)*

### *Il recupero del sito*

Le prime indagini sul sottosuolo furono compiute a metà del XVIII sec ad opera di Giovanni Maria Fontana, ma la restituzione del teatro allo stato attuale si deve ad Andrea Monga (1794-1861), facoltoso commerciante appassionato di archeologia. Egli acquistò l'area interessata dall'edificio antico e tra il 1834 e il 1844 vi compì scavi per arrivare a conoscere la sua forma originale. Monga fece demolire trenta case che insistevano sull'area, frutto di

urbanizzazioni successive, che si addossavano ai vecchi ruderi fino quasi a renderli invisibili, e successivamente iniziò gli scavi. Fu scoperta e ripulita l'intercapedine e furono ritrovati i resti dell'ambulacro all'interno del convento dei Gesuati.

Nel 1888 venne elaborato il progetto di cessione al governo italiano del Teatro Romano. Nel 1904 il Comune acquistò l'intera area e i lavori di scavo proseguirono con Ricci e Ghirardini, fino alla restituzione dell'intera cavea

Successivamente, sotto la direzione di Antonio Avena, fu scavata la fossa scenica (1938-1939), furono demolite le case ancora esistenti verso piazzetta Botte (1931-1935) e a fianco a Santa Libera.



*Fig. 2.2. 2 – Veduta generale dell'area fra Ponte Pietra e i rudere di Ponte Postumiodal livello dell'Adige (1893)*

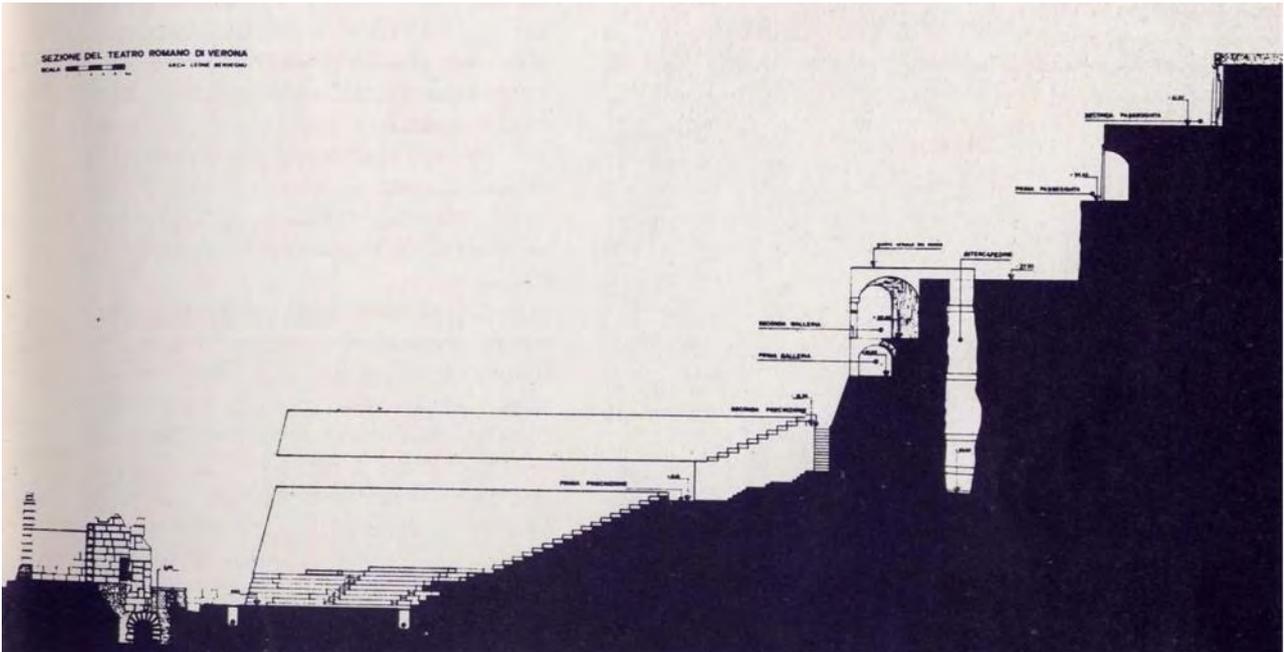


Fig. 2.2. 3 - Sezione del teatro dalla scena fino alla "seconda passeggiata" (arch. L. Benvegnù, 1980)

## ***Il museo archeologico***

### *Il convento di San Girolamo*

Il Museo Archeologico di Verona fu istituito nel 1924 su iniziativa di Antonio Avena nella sede del quattrocentesco convento dei San Girolamo, che si erge a picco alle spalle del teatro, la cui struttura fu rimessa in luce principalmente tra il 1905 e il 1914.

Prima del convento però fu costruita la chiesa di San Bartolomeo in Monte, risalente all'anno 780. Nel 1429 fu ceduta ai frati Gesuati i quali, accanto al primo chiostro del monastero, eressero nel 1432 un'altra chiesa dedicata a San Girolamo, come prescriveva un ordine di Alessandro VI.

Nel 1668 furono attuate le 'soppressioni pontificie'. La guerra contro i Turchi per il possesso dell'isola di Candia aveva prosciugato le finanze della Repubblica di Venezia, che fece richiesta a papa Clemente IX di avvalersi dei beni ecclesiastici in territorio veneto per continuare la guerra. I Gesuati furono dunque soppressi. A loro subentrarono nel 1671 i padri minori del terzo ordine di San Francesco, che a loro volta se ne andarono nel 1808 a seguito dei decreti napoleonici.

Nel 1834 la chiesa di San Bartolomeo e i fabbricati dell'ex convento di San Girolamo furono acquistati da Andrea Monga assieme a tutta l'area del teatro per procedere con gli scavi. La chiesa di San Bartolomeo fu demolita, quella di San Girolamo invece, pur sconsacrata, è ora sede del Museo Archeologico del Teatro Romano. Il trasferimento del Museo nell'ex convento di San Girolamo avvenne nel 1924 ad opera di Andrea Avena.



Fig. 2.2. 4 - I resti del teatro (scavi di Monga) in un disegno di Marco Moro stampato da Giovanni Brizeghel (1850 c.a.)

Per quanto riguarda l'evoluzione dell'edificio, non risultano particolari modifiche nel corso degli anni. L'unico dato degno di nota riguarda la parte tra il refettorio e la zona delle celle. Essa infatti, che ora è chiusa su tutti e quattro i lati, dal catasto austriaco così come da altri disegni sette-ottocenteschi si deduce avesse il lato a sud-est aperto. Da ciò si può affermare che quella porzione di edificio è sicuramente successiva ai primi anni dell'ottocento.



Fig. 2.2. 5 - Catasto Austriaco

Nei livelli inferiori del complesso del convento di San Girolamo risultano presenti resti dell'antica struttura del teatro incorporati. Essi in particolare sono riconoscibili in parti dell'antico ambulacro.

*Il recupero del museo nella fase post-bellica.*

Dalla fine del secondo conflitto mondiale in poi, vi furono una serie di interventi di recupero dell'edificio del Museo Archeologico. Nell'immediato dopoguerra la giunta comunale riconobbe la necessità, su segnalazione del Sovrintendente ai Musei e Gallerie d'Arte, di provvedere ad alcuni lavori di riparazione nel sito, tra cui la cementazione della botte di scolo dell'intercapedine, la sostituzione di numerose tegole dei tetti e il riatto di tre soffitti del museo. I lavori vennero affidati all'Impresa Tosi Pio nel 1947. Pochi anni dopo questi interventi superficiali, nel 1950 l'Ufficio Tecnico Municipale rilevò la necessità di eseguire dei lavori di manutenzione straordinaria, tra cui il rimaneggiamento del tetto dell'ex chiesa di San Girolamo e la sostituzione di alcune travature in legno di sostegno al tetto le quali, a causa dell'età, si presentavano in un pessimo stato di conservazione. Inoltre fu predisposta la demolizione e ricostruzione di alcuni soffitti pericolanti. Nel 1952 il Comune affidò alla ditta Padovani Marcello il compito di eseguire altri interventi di riparazione di lieve entità, tra cui quelli sul muro di sostegno alla passeggiata archeologica. Negli anni immediatamente successivi furono frequenti altri interventi di recupero, sempre di carattere superficiale, eccezion fatta per la sostituzione di alcune travature lignee deteriorate. Nel 1958 invece venne disposta a costruzione di un ascensore.

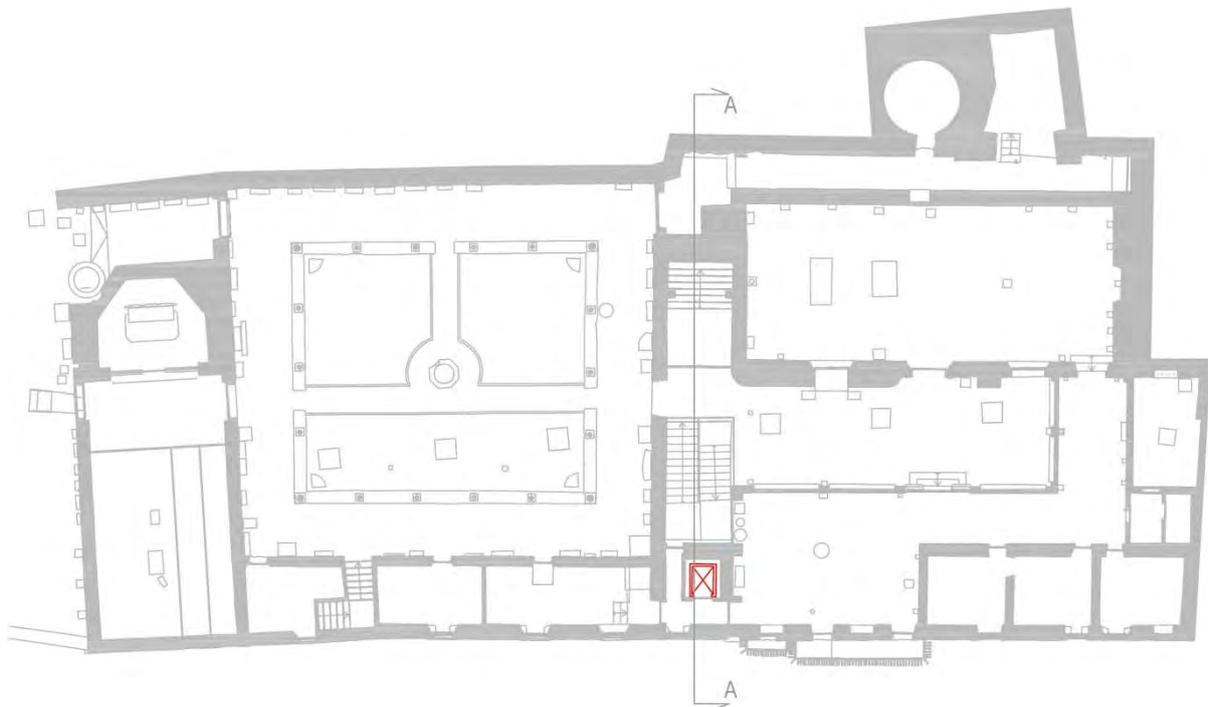


Fig. 2.2. 6 - Pianta livello IV, localizzazione ascensore

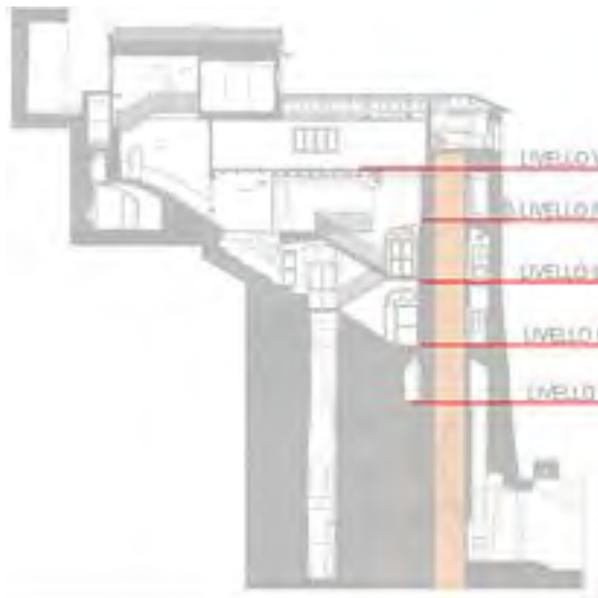


Fig. 2.2. 7 - Sezione A-A, localizzazione ascensore

Alla fine degli anni '60, il sito destava notevoli preoccupazioni *'..a causa delle condizioni di instabilità provocata dalle gallerie e grotte scavate nel monte, sulle quali insistono carichi notevoli e nelle quali si riversano abbondanti acque di filtrazione..'*, come si legge in un documento rilasciato dal Comune nel gennaio del 1972. Per questo motivo, dopo alcuni interventi tra cui il consolidamento di un tratto del voltino dell'intercapedine in corrispondenza del cavedio interno, la costruzione di un arco di rinforzo all'ingresso della grotta e altri lavori riguardanti le passeggiate archeologiche (consolidamento di un ponticello, consolidamento delle murature romane), le opere di restauro vennero sospese, sia per la pericolosità dovuta alla caduta di pietre, sia perché non era chiaro quale fosse il metodo di intervento migliore da attuare.

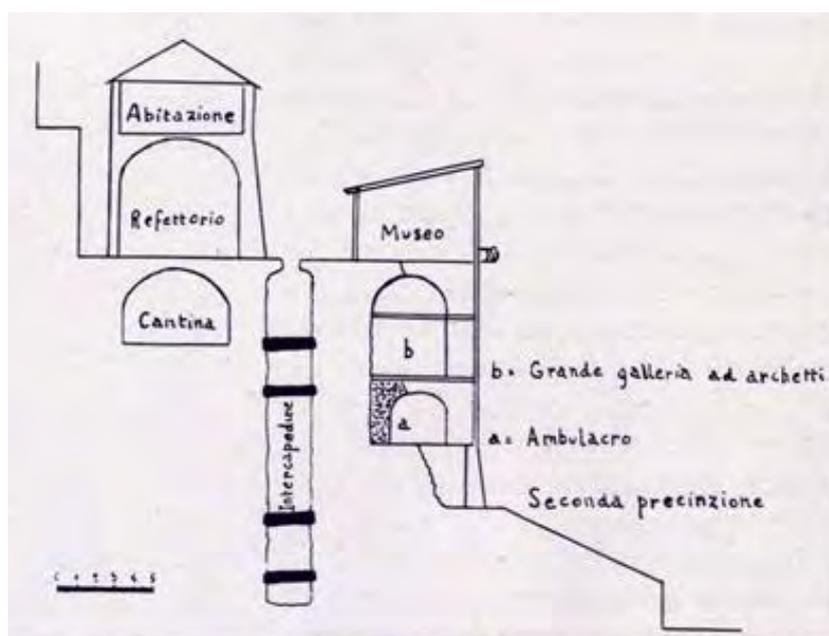


Fig. 2.2. 8 - Sezione Museo Archeologico e intercapedine

Per questo motivo il prof. Vuillermin venne incaricato di eseguire un'indagine geognostica, la cui relazione recitava *'la grotta di accesso del vallo, la grotta del Ninfo e quella ubicata dietro il refettorio...sono in gravi condizioni di instabilità'*. Pertanto vennero prese alcune decisioni urgenti, tra cui il divieto di ingresso del pubblico in alcune zone del sito, la chiusura del museo e l'abbandono dell'appartamento del custode sovrastante il refettorio, anche alla luce di alcune considerazioni che fino ad allora erano state trascurate, e cioè la possibilità per nulla remota in una città come Verona del verificarsi di un evento sismico, il quale secondo i geologi avrebbe avuto sicuramente conseguenze disastrose, specie in prossimità delle grotte.

Due anni dopo, nel 1974, iniziarono delle opere di risanamento delle strutture murarie e rocciose del museo, che si conclusero nell'anno successivo. Venne puntellata la struttura adiacente e sovrastante la scala che porta al chiostro (verso la chiesa), e nella parte del sottoportico adiacente alla stessa scala fu rimosso l'intonaco dalla parete per portare alla luce le fessurazioni e per permettere la sottomurazione e la ricucitura dove fosse necessario, con l'utilizzo di mattoni. Anche nella zona delle scale adiacenti all'ascensore venne rimosso completamente l'intonaco e vennero restaurate le murature portanti (per questo intervento è riportato l'utilizzo di 10 q.li di cemento). Per quanto riguarda il rinforzo delle strutture rocciose, nelle grotte al piano terra a sinistra dell'ascensore furono costruiti dei *'retti'* in c.a., mentre nell'intercapedine vennero realizzate strutture in c.a. di contrasto ancorate alla massa rocciosa del monte. Sempre in questi due anni si effettuarono opere di risanamento dei muri esterni della chiesa di S. Girolamo. Furono messi in opera i tiranti in ferro, rivestiti con fodera di cemento, e si intervenne anche qui con sottomurazioni e ricucitura. Inoltre vennero innalzati muri in c.a. di tamponamento lungo la parete esterna.

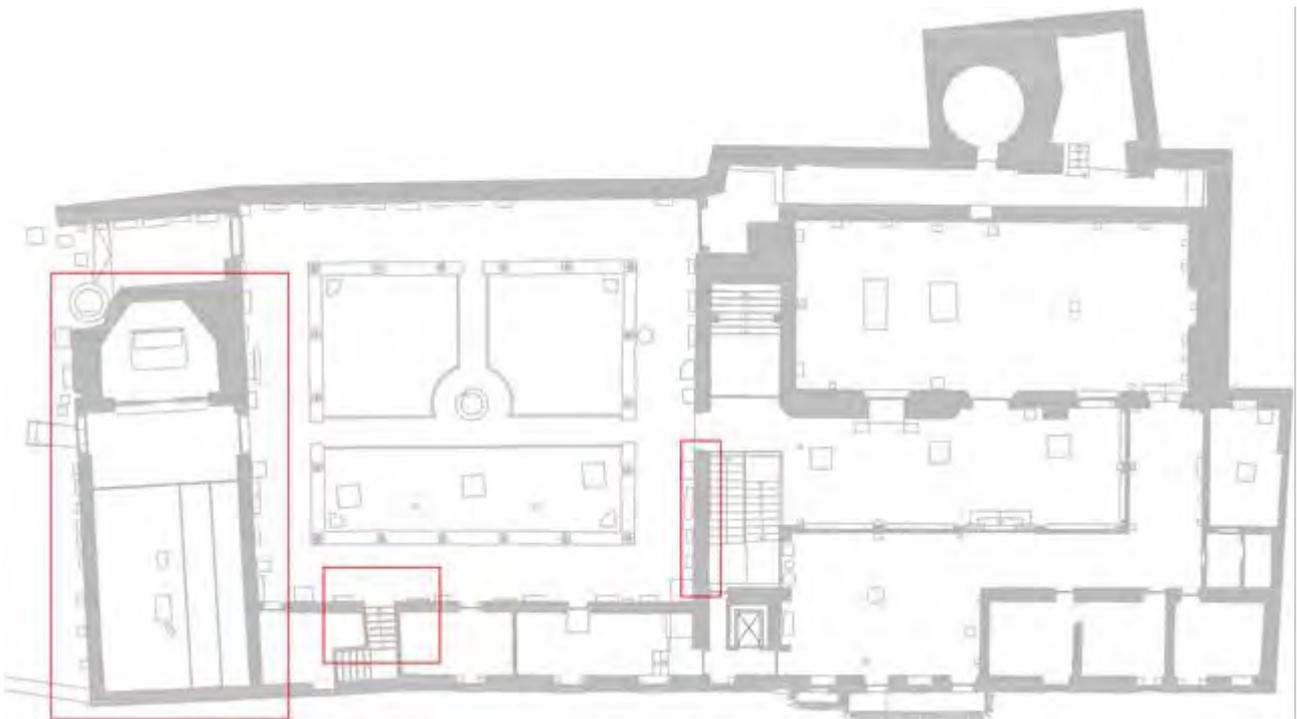


Fig. 2.2. 9 - Pianta livello IV, zone interventi 1974-75

Oltre a questi interventi dei quali si hanno notizie piuttosto esaurienti, sono citati altri piccoli interventi di riparazione di murature con scuci-cuci, però non localizzati. Questo perché fino ad allora si è operato secondo opere di restauro localizzate, solo dove si presentasse evidente necessità, e non secondo un piano generale di recupero degli edifici.

Tra la fine degli anni '70 e gli inizi degli anni '80, il Museo Archeologico fu sede di ulteriori interventi restaurativi. In particolar modo questi ultimi si concentrarono sulle coperture, le quali risultavano da tempo deteriorate e avevano già comportato interventi di sostituzione parziale di travature. Questa volta l'intervento fu di più ampia scala, e quasi tutte le coperture furono rifatte, anche perché il cattivo stato del manto di copertura aveva comportato una diminuzione delle caratteristiche di impermeabilità e un conseguente degrado delle strutture portanti lignee. Furono dunque ricostruiti secondo la tipologia del tetto in legno e laterizi forati, eccezion fatta per l'ingresso al museo dove fu adottata la tipologia a orditura in legno e doppio assito di tavole in abete separati da pannelli rigidi in poliuretano espanso. L'impermeabilizzazione invece era garantita dall'impiego di guaine bituminose. Una buona parte delle coperture venne rifatta completamente, compresa la parte strutturale, mentre per alcuni tratti evidentemente meglio conservati, l'intervento fu più superficiale e limitato al rifacimento del manto

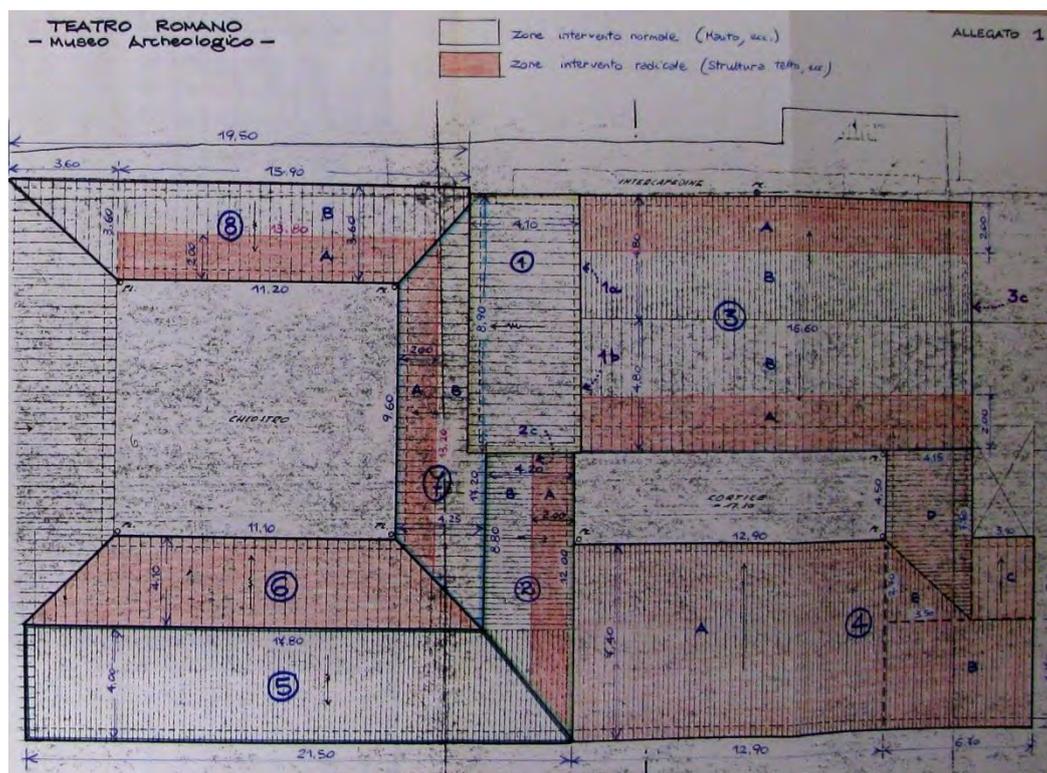


Fig. 2.2. 10 - Progetto restauro 1985, Pianta coperture

Nella pianta delle coperture elaborata per l'intervento del 1985, in rosso sono evidenziate le zone soggette ad intervento radicale di restauro (strutture tetto, manto), mentre le altre sono le coperture che hanno subito solo interventi di rifacimento del manto.

## 2.3. Analisi delle prove svolte nell'ambito di una campagna di indagine precedente

La campagna di indagine in questione è stata svolta dalla ditta “RGM prove” dell'ing. Rosa Marcello tra il 10 e il 18 Aprile 2012, e ha riguardato non solo il Museo Archeologico ma anche il Teatro Romano e Palazzo Fontana.

In totale nell'ambito della campagna sono state effettuate:

- 8 prove con martinetti piatti doppi
- 10 prove con martinetti piatti singoli
- 10 carotaggi con analisi endoscopica
- 3 rilievi dello stato tensionale dei tiranti in acciaio tramite prove dinamiche
- Verifica dell'integrità delle testate lignee con resistografi
- Prove di caratterizzazione delle malte di allettamento

Successivamente trattiamo tra queste quelle effettuate al Museo Archeologico, quindi ai livelli 4-5-6.

### 2.3.1. Martinetti piatti

Come vediamo dalle immagini successive raffiguranti la localizzazione delle prove sono stati svolti un martinetto singolo e quattro doppi al livello 4 e un martinetto singolo al livello 5.

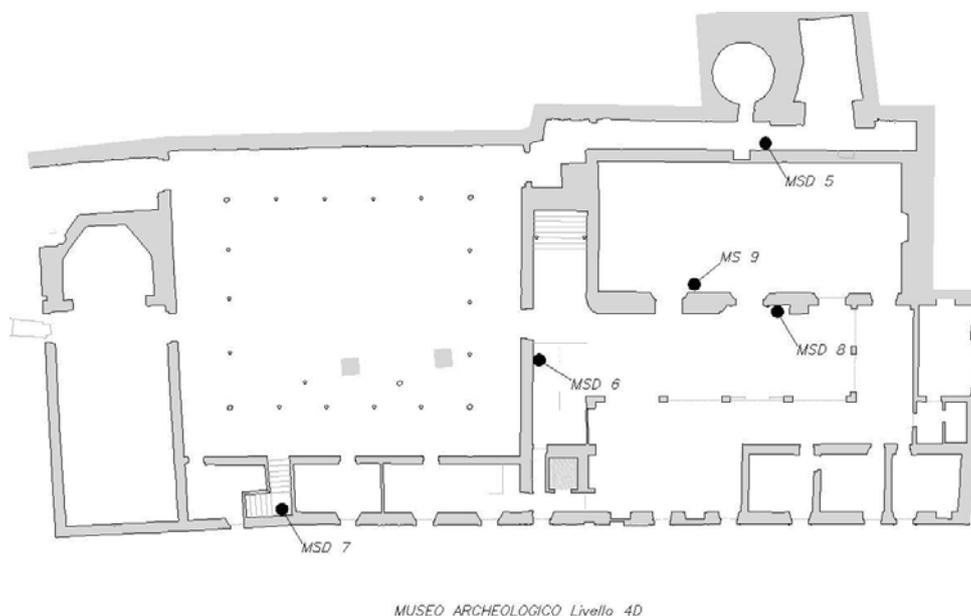


Fig. 2.3. 1 - Localizzazione martinetti piatti, livello IV (prove pregresse, Museo Archeologico)

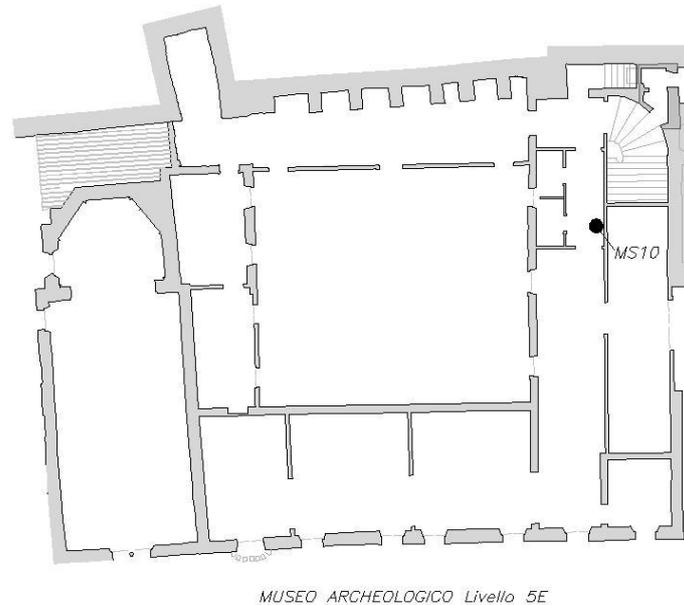


Fig. 2.3. 2 - Localizzazione martinetti piatti livello V (prove pregresse, Museo Archeologico)

### *Martinetti piatti singoli*

La prova del martinetto piatto singolo viene utilizzata per determinare la tensione agente sulla muratura presa in esame.

Prima di procedere con il taglio, tramite disco diamantato di diametro 230mm, sono state applicate superiormente e inferiormente al piano di taglio una coppia di basi deformometriche e si è misurata la distanza tra esse. Il taglio ha come effetto l'annullamento delle tensioni trasmesse e l'avvicinamento delle basi, quindi è stata rieffettuata la misura dopo il taglio. Successivamente è stato inserito il martinetto, in questo caso il modello Boviari semi ovale MP-5A 350x260x4 mm con la lamiera spessa 0.8mm, e si è impressa una tensione tale da ripristinare la situazione, e quindi la distanza tra le basi, che si aveva prima del taglio, ed è registrata la pressione impressa tramite un trasduttore di pressione collegato ad un display.

Alla pressione applicata si appone un coefficiente correttivo  $K_m$  che indica la percentuale della pressione applicata all'interno del martinetto che si riesce a trasferire alla superficie del materiale, in questo caso il valore è compreso da 0.80 a 0.89. Si applica inoltre il coefficiente 1.02 per la trasformazione della pressione da bar a  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ . Si ottiene così la tensione cui è soggetta la muratura:

$$\sigma = \frac{A_{mart} - A_{mart}^*}{A_{sa}} * K_m * P_{reg} * 1.02$$

Con  $A_{mart}$  si intende il valore dell'area del martinetto, con  $A_{mart}^*$  il valore dell'area del martinetto eventualmente sporgente dalla sagoma di taglio e con  $A_{sa}$  il valore dell'area della sagoma di taglio. Nel martinetto posto al quarto livello, M9, il valore di tensione ricavato è di  $1.32 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ , mentre in quello posto al quinto livello, M10, di  $2.15 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ .



Fig. 2.3. 3 - Martinetti piatti singoli n.9 e n.10 (prove pregresse, Museo Archeologico)

#### *Martinetti piatti doppi:*

In questo caso sono stati praticati due tagli orizzontali paralleli in corrispondenza dei giunti di malta, mediante disco diamantato di diametro 230 mm; successivamente nei tagli appena praticati sono stati posti due martinetti oleodinamici piatti della Boviari modello semi-ovale MP-8A 350x260x4 mm (spessore lamiera 0,8 mm). Sono stati applicati 3 sensori millesimali di spostamento su cui sono state effettuate le letture dei cedimenti nella zona compresa dai tagli. Una volta inseriti i martinetti sono stati messi in pressione per gradini di carico successivi monitorando e registrando contemporaneamente le deformazioni. Anche in questo caso la pressione è stata rilevata tramite un trasduttore di pressione collegato ad un display.

Tramite la prova dei martinetti piatti doppi viene ricavato il modulo elastico come rapporto tra l'incremento di pressione applicata e la deformazione media specifica calcolata su ogni gradino di carico, e anche in questo caso si appone il coefficiente correttivo  $K_m$ .

Al quarto livello sono state effettuate 4 prove con martinetti piatti doppi, i valori di modulo elastico ottenuti sono:

- MSD5:  $E=25091 \text{ N/cm}^2$
- MSD6:  $E=6807 \text{ N/cm}^2$
- MSD7:  $E=3097 \text{ N/cm}^2$
- MSD8:  $E= 3752 \text{ N/cm}^2$

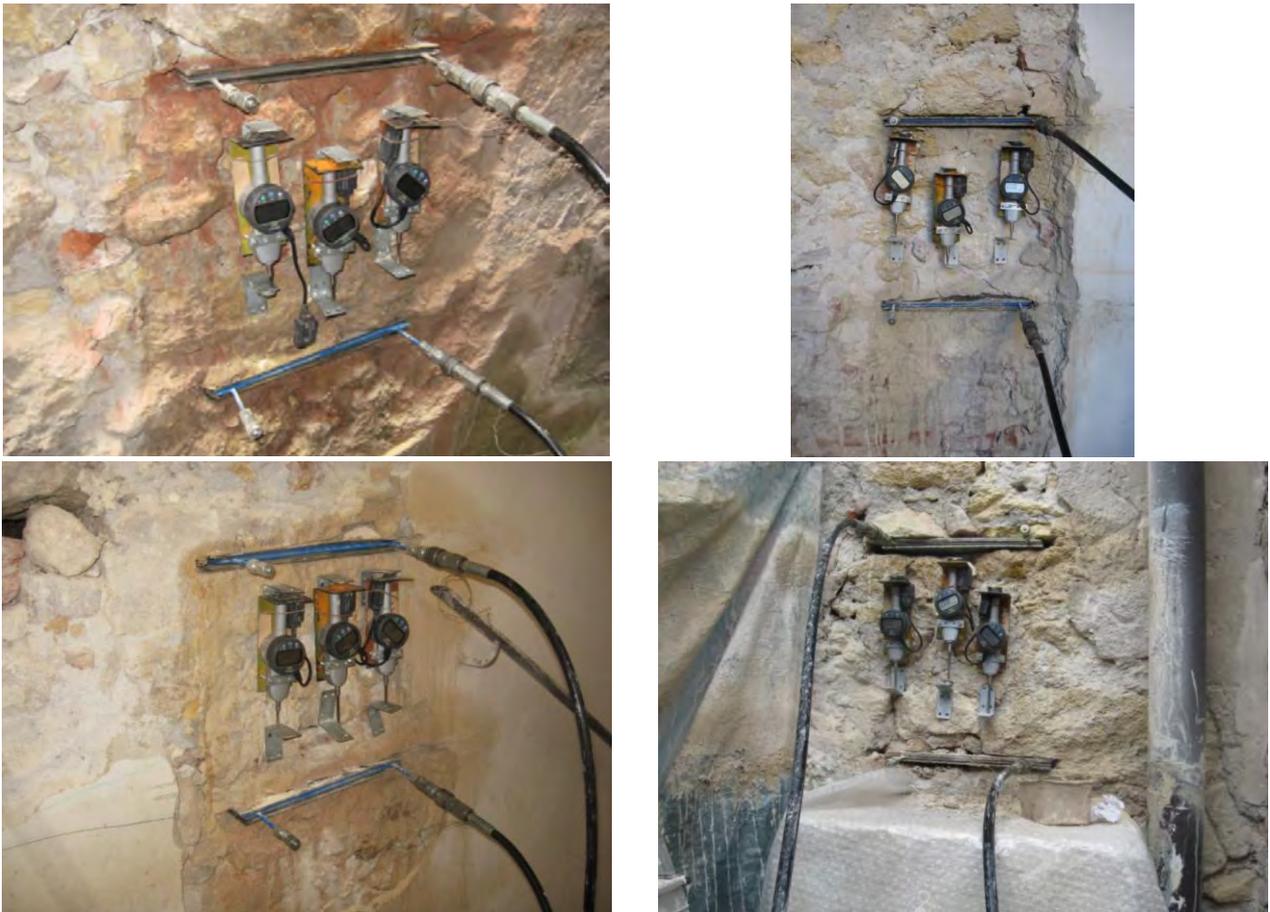


Fig. 2.3. 4 - Martinetti piatti doppi n.5 n.6 n.7 n.8 (prove pregresse, Museo Archeologico)

### 2.3.2. Carotaggi con indagine endoscopica

Nelle stesse murature sono stati effettuati anche vari carotaggi, nelle murature oggetto del nostro caso studio ne troviamo sei al quarto livello e una al quinto. Sfruttando i fori effettuati con i carotaggi è stata effettuata anche l'analisi endoscopica che consiste nell'ispezione degli strati più interni della muratura tramite i fori all'interno dei quali viene inserito un apparecchio dotato di un sistema ottico, costituito da un obiettivo e una lente tradizionale e un sistema di illuminazione. L'apparecchio viene inserito all'interno della muratura attraverso un supporto, come ad esempio un tubo di ferro, attraverso il quale viene fatto passare il filo e fissato l'apparecchio all'estremità.

E4

Questo carotaggio è stato effettuato nella stessa muratura in cui è stato effettuato il martinetto piatto doppio numero 5, all'interno del refettorio. L'analisi ha rilevato una muratura a due paramenti, di cui quello più esterno costituito da pietra legata con malta a buona coesione e quello più interno da pietra mista di varia pezzatura e malta più friabile.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA

Museo Archeologico - Piano Livello 4-D  
- Prova Endoscopica - E4 -

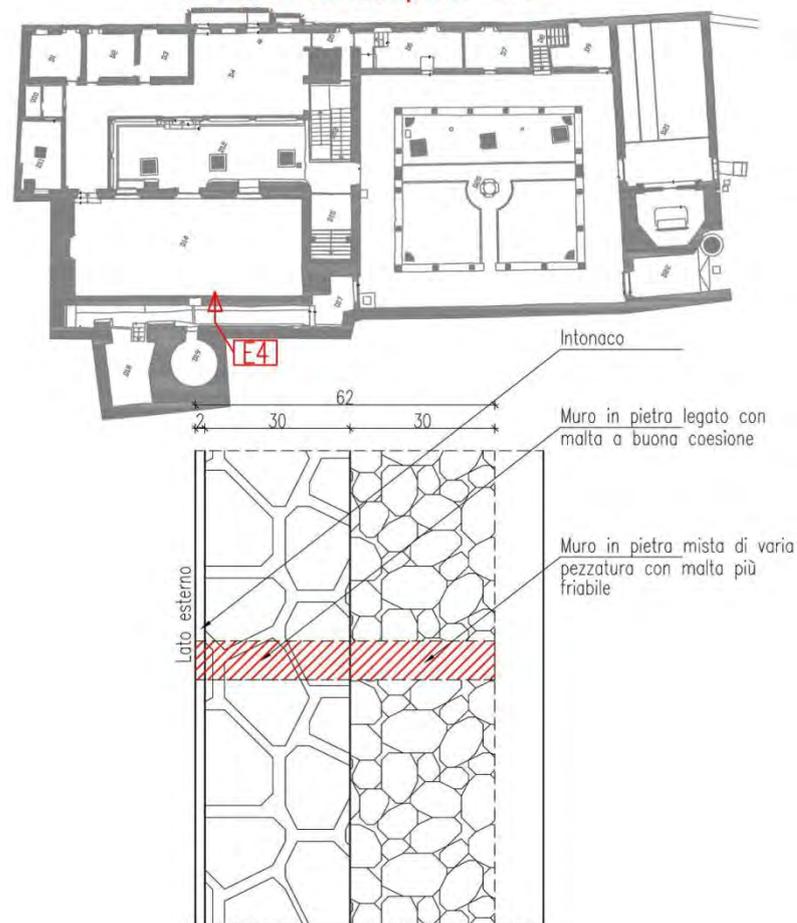


Fig. 2.3. 5 - Prova endoscopica E4 (prove pregresse, Museo Archeologico)

E5

Questo carotaggio è stato effettuato in corrispondenza del contrafforte posto sulla facciata del refettorio. Attraverso il carotaggio è stato possibile dunque analizzare sia la composizione del contrafforte che della muratura. Il contrafforte è costituito da uno strato più esterno di mattoni pieni, uno di pietra legata con malta di buona coesione e un altro strato di mattoni, la muratura è invece costituita da pietra mista di varia pezzatura con malta più friabile.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA

Museo Archeologico - Piano Livello 4-D  
- Prova Endoscopica - E5 -

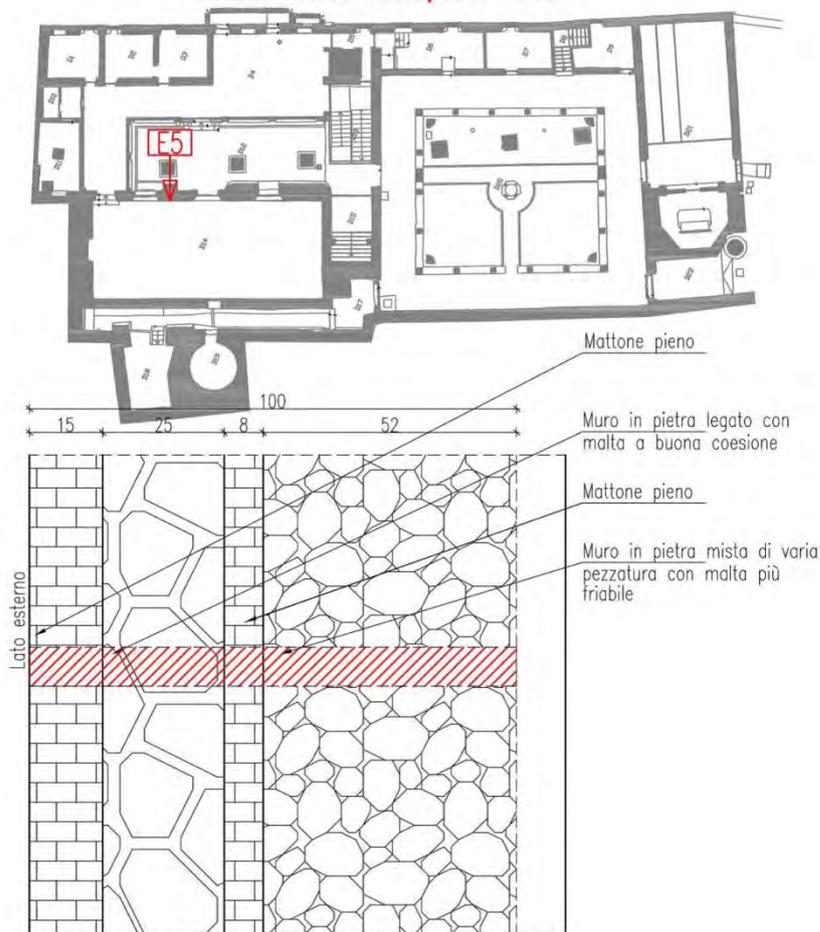


Fig. 2.3. 6 - Prova endoscopica E5 (prove pregresse, Museo Archeologico)

Dall'osservazione in sito risulta però che non tutto il contrafforte è formato da questi tre strati ma solo in alcuni punti, vediamo infatti nell'immagine sottostante che sono presenti solo alcune fasce di mattoni pieni, la parte restante è quindi formata tutta da muro in pietra legato con malta a buona coesione.



*Fig. 2.3. 7 - Prospetto contrafforte (Museo Archeologico)*

E6

Il carotaggio, e la relativa indagine endoscopica, E6 sono stati svolti nella muratura inerente la chiesa, che la separa dal chiostro. In questo caso è stata rilevata una muratura costituita da un più consistente strato esterno, spesso 40cm, di muro in pietra legato con malta con all'interno presenza di vuoti, e un sottile strato interno, spesso 5cm, di mattoni pieni.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA

Museo Archeologico - Piano Livello 4-D  
- Prova Endoscopica - E6 -

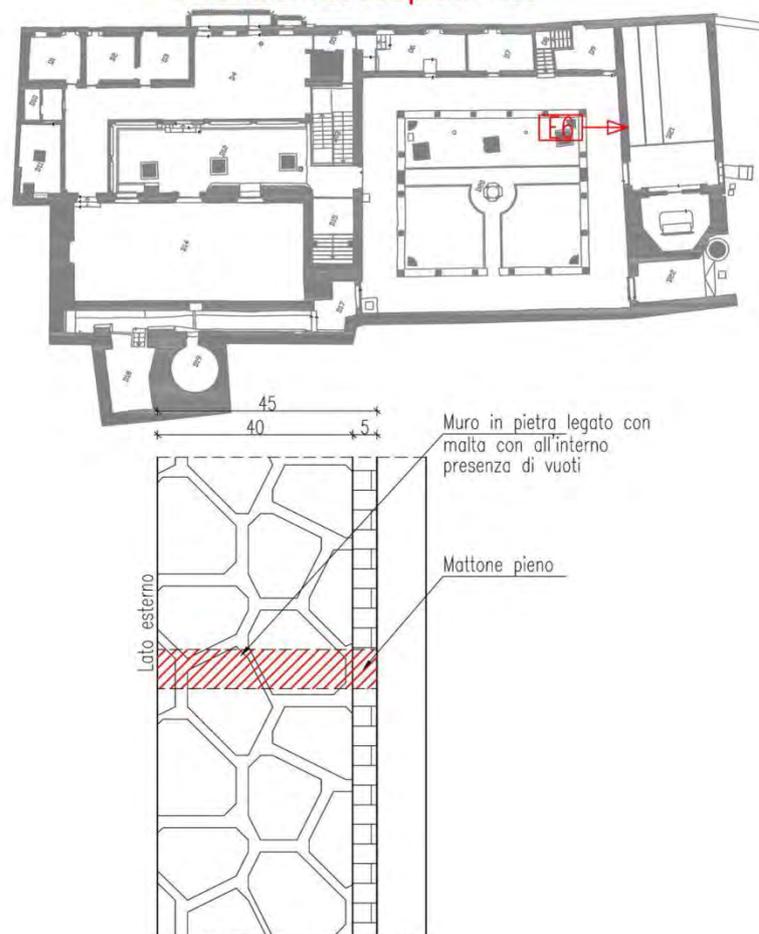


Fig. 2.3. 8 - Prova endoscopica E6 (prove pregresse, Museo Archeologico)

E7

La prova E7 è situata nella muratura esterna posta a fianco alle celle, di fronte al refettorio. In questo caso la muratura è a un paramento composto da pietra legata con malta a discreta coesione, dello spessore di 52cm.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA

Museo Archeologico - Piano Livello 4-D

- Prova Endoscopica - E7 -

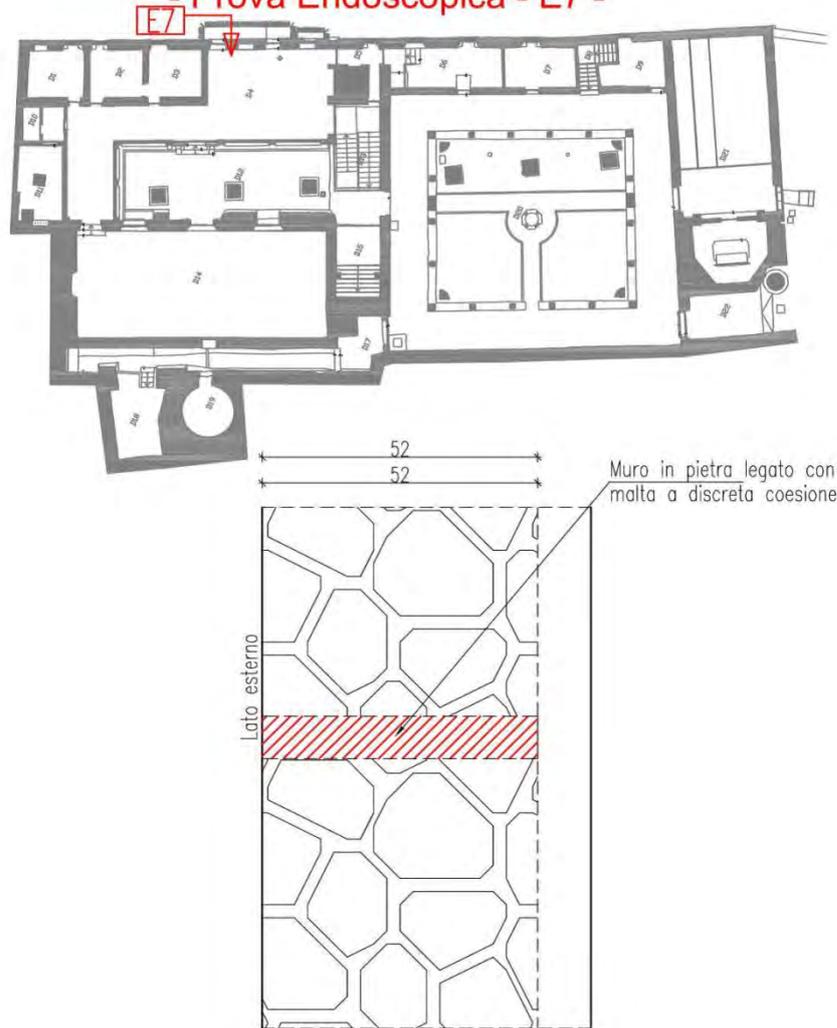


Fig. 2.3. 9 - Prova endoscopica E7 (prove pregresse, Museo Archeologico)

E8

Il carotaggio, e la relativa prova endoscopica E8, sono stati effettuati al quarto livello, nella muratura che divide le scale dal chiostro. Questa prova è stata particolarmente interessante nel nostro caso in quanto situata in un punto oggetto di indagine sonora nel corso del programma sperimentale svolto al museo archeologico. Questa muratura è composta interamente da pietra mista di varia pezzatura con malta friabile.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA  
Museo Archeologico - Piano Livello 4-D  
- Prova Endoscopica - E8 -

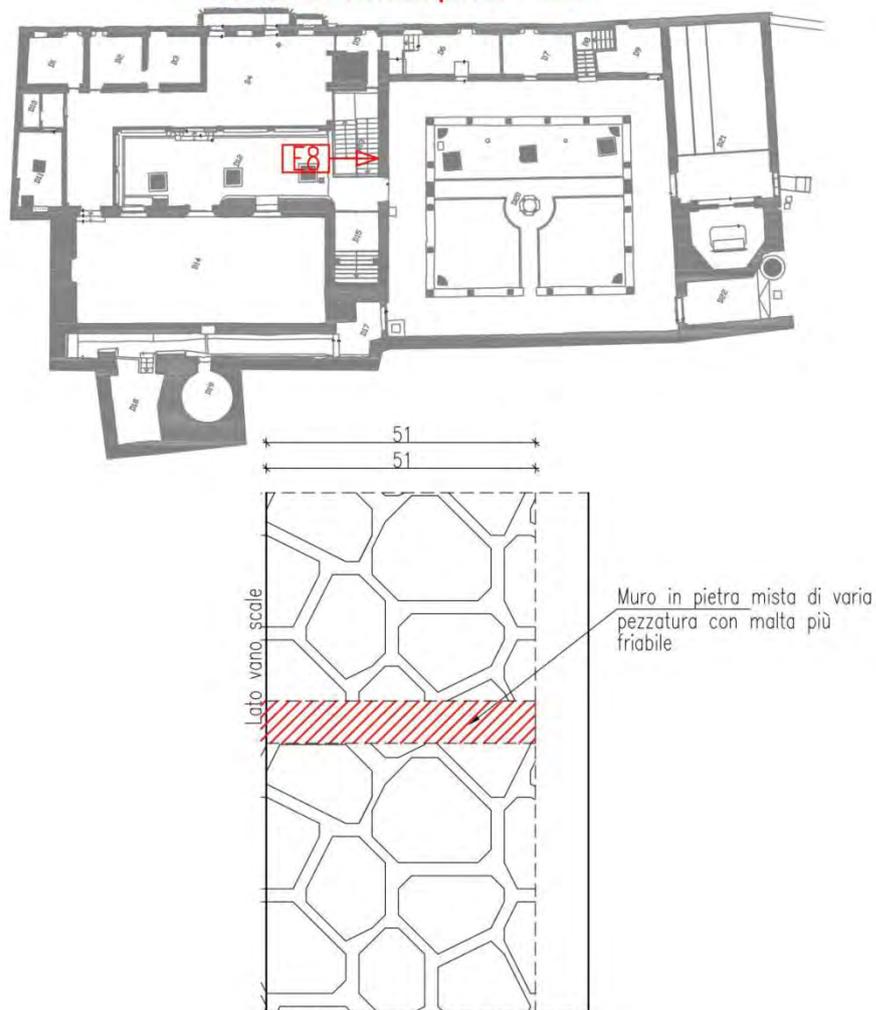


Fig. 2.3. 10 - Prova endoscopica E8 (prove pregresse, Museo Archeologico)

*E9*

Il carotaggio, e la relativa endoscopia *E9*, sono stati effettuati sulla muratura esterna delle scale che dal chiostro al quarto livello portano al museo archeologico. La muratura indagata è risultata composta da due paramenti, uno più esterno in pietra legata con malta a buona coesione e uno più interno, verso le scale quindi, composto da pietra mista di varia pezzatura con malta più friabile.

## MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO FONTANA

### Museo Archeologico - Piano Livello 4-D - Prova Endoscopica - E9 -

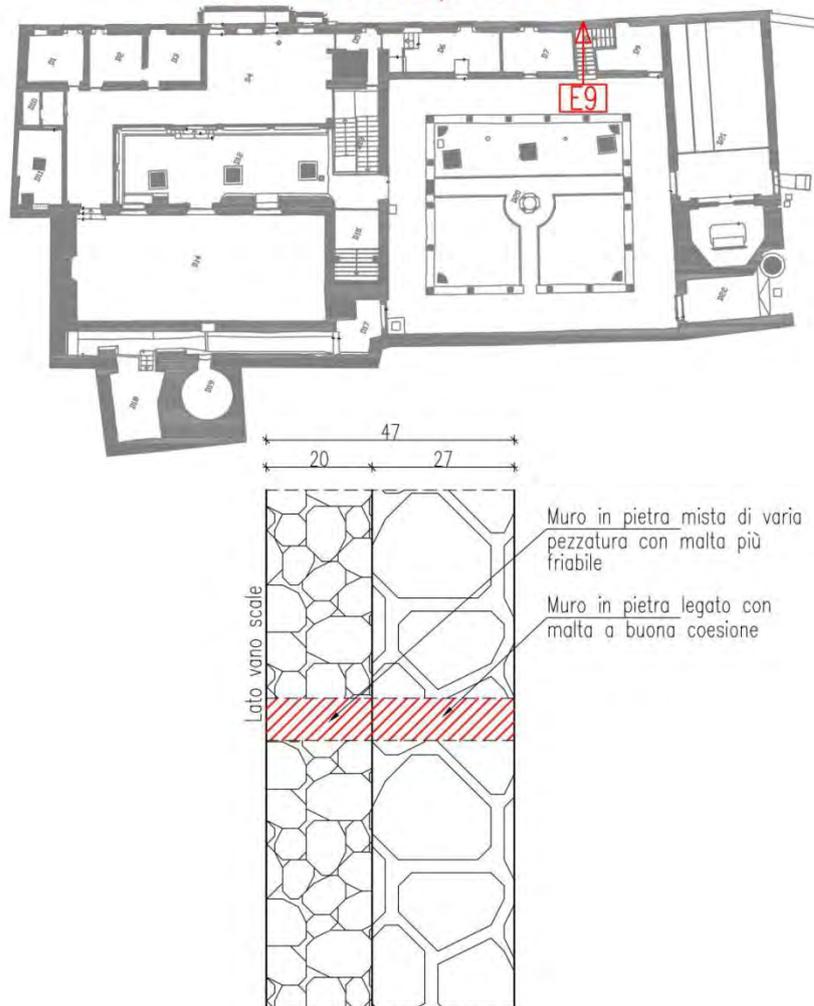


Fig. 2.3. 11 - Prova endoscopica *E9* (prove pregresse, Museo Archeologico)

*E10*

Al quinto livello è stato svolto solo questo carotaggio, situato sulla muratura più esterna sopra al chiostro. La muratura è risultata composta da uno strato di 45cm di pietra mista di piccola pezzatura con malta molto friabile, quindi tra tutte sembra essere la muratura di minore qualità.

MUSEO ARCHEOLOGICO - TEATRO ROMANO - PALAZZO  
FONTANA

Museo Archeologico - Piano Livello 5-E  
- Prova Endoscopica - E10 -

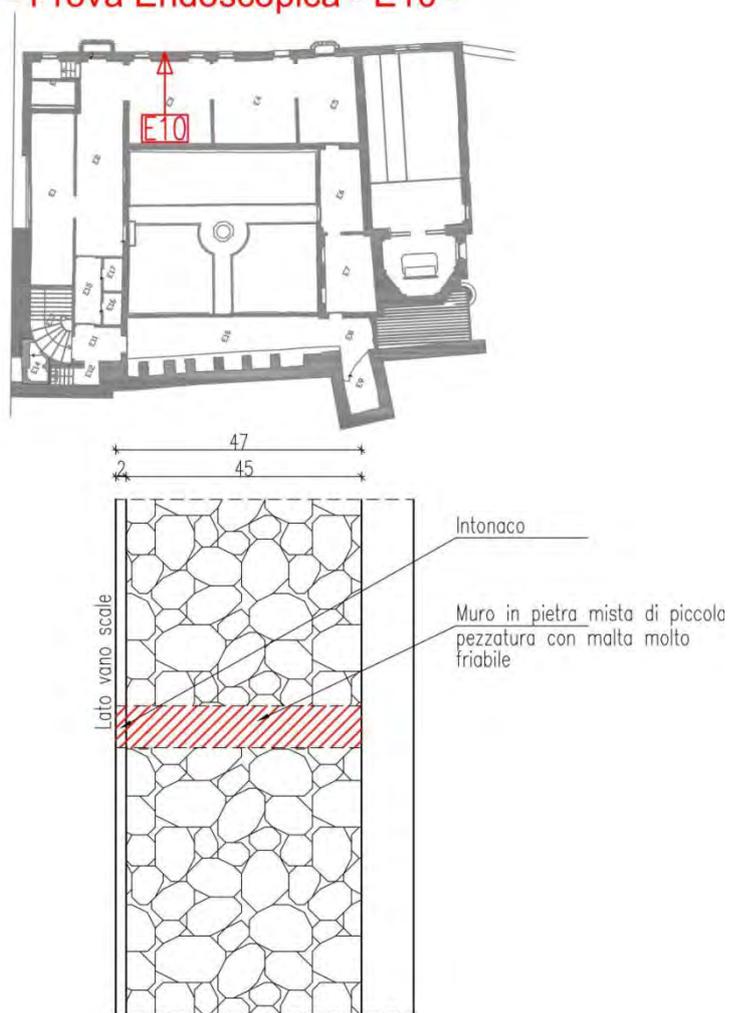


Fig. 2.3. 12 - Prova endoscopica E10 (prove pregresse, Museo Archeologico)

### 2.3.3. Verifica dell' integrità delle testate lignee

Le indagini effettuate consistono in otto prove resistografiche su teste di travi. Le prove sono state svolte attraverso Resistograph®, uno strumento in grado di misurare e restituire graficamente la resistenza opposta dal legno alla perforazione di una sottile punta d'acciaio che avanza per circa 35cm. Attraverso questo strumento è possibile individuare gli anelli di accrescimento e la loro stagionalità, nodi e lesioni; inoltre con un apposito accessorio è possibile effettuare perforazioni a 45° in modo da valutare lo stato di conservazione delle teste delle travi. Si ottengono così dei resistogrammi che indicano in ascissa la profondità di perforazione e in ordinata la resistenza opposta dal legno alla perforazione, successivamente vengono interpretati i risultati confrontandoli con resistogrammi di specie legnose note.

In tutti i punti in cui è stata eseguita questa prova il risultato è stato di un buono stato di conservazione e densità.



Fig. 2.3. 13 - Prove resistografiche refettorio (prove pregresse, Museo Archeologico)

### 2.3.4. Prove di caratterizzazione delle malte di allettamento

Sono state effettuate indagini petrografiche e chimiche su tre campioni di malte di allettamento prelevate da tre dei carotaggi effettuati, due dei quali al Museo Archeologico e corrispondenti al carotaggio 4, per il campione 2, e al carotaggio 9 per il campione 3.

Dall' analisi petrografica i tre campioni sono risultati marcatamente differenti tra loro per curva granulometrica, tipologie di aggregato e rapporti quantitativi aggregato/legante. In particolare il campione tre è risultato composto da sabbia eterogenea naturale miscelata ad un legante aereo grumoso in dosaggio quantitativo in volume pari 4/1. Il campione due è invece composto da ghiaia, sabbia eterogenea e cocciopesto a grana grossolana miscelate ad un legante aereo grumoso, e per le sue caratteristiche può essere riferita alla categoria M2.5 della classificazione secondo il D.M. 14/01/2008 mentre le altre due non sono classificabili.

Per quanto riguarda lo stato di conservazione il campione due ha mostrato una elevata tenacità al tatto, mentre il tre è risultato molto friabile.

Le analisi chimiche per il rilievo dei sali solubili della malte, hanno rilevato la presenza di scarsi quantitativi di Sali solubili rappresentati essenzialmente da solfati e nitrati.



Fig. 2.3. 14 - Campioni di carote (prove pregresse, Museo Archeologico)

## 2.4. Fase Sperimentale

### 2.4.1. Programma sperimentale

Il programma sperimentale al Museo Archeologico di Verona comprende l' esecuzione di prove soniche dirette e tomografiche nei campi prova oggetto di indagine, l' iniezione dei campi prova individuati mediante diverse miscele a matrice non cementizia e la verifica dell'efficacia di queste tramite prove soniche dirette e tomografiche e endoscopie.

#### 2.4.1.1. Prove soniche dirette

Come già anticipato le prove soniche rappresentano un valido metodo di indagine di tipo non distruttivo utile per ottenere informazioni qualitative per quanto riguarda la caratterizzazione e la descrizione delle murature. Attraverso le prove soniche è possibile determinare la velocità di propagazione di onde sonore attraverso la muratura, consentendo così di ottenere informazioni sulla consistenza muraria e sull'eventuale presenza di vuoti o disomogeneità interne lungo il percorso di trasmissione dell'onda.

Questo tipo di analisi, se applicate sia prima che dopo l'intervento di consolidamento attraverso le iniezioni di miscela, permettono una valutazione dell'efficacia dell'intervento tramite la comparazione tra i risultati ottenuti nelle due fasi; dando così un'informazione di tipo quantitativo.

*Strumentazione:*

La strumentazione fornita dall' Università degli Studi di Padova per questa campagna di indagine è composta da:

- unità centrale di acquisizione (piattaforma portatile a 16 canali dotata di processore, hard disk, monitor e tastiera National Instruments mod. NI PMA 1115 - schede di acquisizione digitale National Instruments mod. PXI NI 4472);
- martello strumentato (PCB Piezotronics mod. 086D20);
- un sensore di accelerazione (PCB Piezotronics mod. 393 B12), collegati a questa mediante cavi coassiali PCB 012R10 a bassa impedenza (lunghezza 3.0 m) e cavi coassiali RG58 a bassa impedenza (lunghezza variabile da 10.0 a 25.0 m).



Fig. 2.4. 1 – Strumentazione usata (Museo Archeologico)

*Preparazione del campo prova:*

Per l'esecuzione di questa prova è stato necessario rimuovere l'intonaco e tracciare su entrambi i lati della muratura una griglia ortogonale di riferimento formata da punti distanti tra loro 20cm nelle due direzioni, dando così forma ad un pannello quadrato di analisi avente dimensione di 80x80cm. La griglia è stata realizzata mediante l'uso di una bolla per garantire l'ortogonalità e una matita o ove possibile uno spray colorato per evidenziare i punti. Molto importante è la precisa corrispondenza tra i punti sui due lati in modo che la distanza tra due punti corrispondenti sia sempre pari allo spessore della muratura analizzata. I punti della griglia sono stati classificati con numeri composti da due cifre, una relativa alla riga e una relativa alla colonna, nominando le righe in ordine crescente a partire dall'alto verso il basso, e le colonne in modo che al punto 1.1 del lato martello corrisponda il punto 1.1 del lato accelerometro. In ogni pannello è stata riportata la numerazione del primo punto (1.1) in modo da avere un riferimento per riconoscere tutti gli altri punti.

Un'altra fase preparativa consiste nel montaggio dell'attrezzatura necessaria all'esecuzione della prova, collegando gli accelerometri ai canali di acquisizione del PXI attraverso i cavi. Per rendere più agevole la successiva fase di acquisizione dei dati sia gli accelerometri che i

cavi sono numerati in modo da avere una corrispondenza tra il canale di acquisizione, il relativo accelerometro e quindi il punto oggetto di indagine.

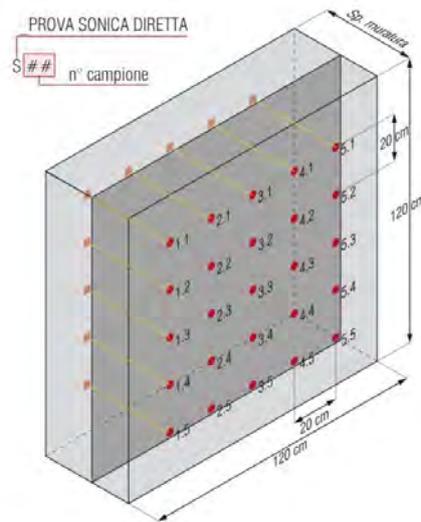


Fig. 2.4. 2 - Schema di preparazione della prova (Cescatti, 2015 )

#### *Esecuzione della prova:*

Per l'esecuzione delle prove sono state necessarie tre persone, una per battere con il martello nei punti della griglia, una per tenere l'accelerometro nel punto corrispondente sull'altro lato della muratura e una terza persona per acquisire i dati con il PXI. Per eseguire la prova correttamente è necessario utilizzare il martello sferrando colpi secchi e non eccessivamente violenti, prestando attenzione a non far vibrare il martello dopo l'impatto con la superficie della muratura per evitare di disturbare il segnale. Sempre per avere un segnale pulito è necessario tenere l'accelerometro aderente alla superficie e perfettamente immobile.



Fig. 2.4. 3 - Esecuzione della prova sonica diretta (Museo Archeologico)

*Acquisizione dei dati:*

Ad ogni colpo del martello vengono visualizzate nello schermo del PXI due curve, una relativa al segnale lanciato dal martello e l'altra relativa al segnale ricevuto dall'accelerometro. Per ogni punto sono necessarie tre acquisizioni per poter elaborare una media, in modo da avere dati più attendibili. Spesso è stato necessario battere più colpi per registrare ogni singola acquisizione, in quanto sono state selezionate e salvate solo le acquisizioni dove ci fosse un segnale pulito e dove fosse ben riconoscibile l'istante di partenza del segnale.

*Elaborazione dati:*

L'elaborazione dei dati avviene attraverso il programma *SonicheIRSnew* sviluppato dall'Università degli Studi di Padova. Il procedimento consiste nell'apertura del file relativo a un'acquisizione di un punto e allo spostamento delle due barre verticali, una relativa al segnale dell'accelerometro e un'altra relativa a quello del martello, nel punto in cui inizia il segnale, cioè dove la curva da una situazione iniziale orizzontale inizia ad avere una pendenza significativa. La distanza tra questi due punti rappresenta il tempo intercorso tra l'istante di tempo di partenza del segnale dal martello all'istante in cui questo viene ricevuto dall'accelerometro. Questo dato viene ricavato dal programma anche in forma numerica e viene copiato in un foglio di calcolo Excel, nel quale verrà calcolata la media tra le tre acquisizioni, e quindi riportando anche lo spessore del muro si ottiene la velocità sonica di trasmissione del segnale in quel punto. Una volta determinate tutte le velocità si può ricavare una media relativa all'intero pannello.

A questo punto è possibile tramite il programma di interpolazione di dati *Surfer 11* ottenere delle immagini relative alla distribuzione delle velocità soniche nel pannello. Il procedimento consiste nel elaborare una tabella con tre colonne X,Y,Z nelle quali vengono riportate rispettivamente le coordinate orizzontali, le coordinate verticali e la velocità media dei singoli punti. Inserendo questi dati nell'apposita griglia del programma si può ottenere l'immagine della distribuzione delle velocità, attraverso le quali è possibile effettuare delle considerazioni sul pannello. Infatti sono riconoscibili visivamente tramite colorazioni differenti, scelte con un'apposita scala cromatica relazionata ai valori di velocità, le zone in cui la velocità è particolarmente elevata o bassa; questo permette di avere una visione globale che rappresenta adeguatamente eventuali omogeneità o eterogeneità del pannello, quindi eventuali presenze di fessure o vuoti.

**2.4.1.2. Prove soniche tomografiche**

Le tomografie si basano sugli stessi principi e vengono realizzate attraverso le stesse strumentazioni delle soniche dirette, la differenza consiste nel fatto che il segnale parte in un punto ma viene acquisito contemporaneamente in più punti. Nel caso dei campi prova in cui sono state effettuate le soniche dirette, costituiti da una griglia di 80x80cm con punti distanti 20cm l'uno dall'altro nelle due direzioni, la tomografia viene effettuata nei punti

della riga e della colonna centrali della griglia. In questo caso, avendo cinque punti di acquisizione per la tomografia verticale e cinque per quella orizzontale, la procedura consiste nel fissaggio di una piastrina metallica nel punto centrale della griglia di coordinate 3.3 alla quale viene fissato un accelerometro attraverso un'apposita vite, in questo modo sono sufficienti 4 persone per l'esecuzione della prova e il fissaggio di una sola piastrina.

Quindi con il martello si batte nel primo punto della riga o colonna in esame e nel lato opposto il segnale viene ricevuto contemporaneamente da cinque punti. Procedendo con la prova i punti di acquisizione restano invariati mentre con il martello si procede battendo nei punti successivi della riga o colonna sulla quale si sta effettuando la prova

Nel caso invece di campi prova più complessi, come pannelli murari più estesi o come il contrafforte esaminato all'interno di questa campagna di indagine, la griglia è composta da una riga composta da molti punti e dato che i canali di acquisizione del PXI sono sei è necessario effettuare due o più acquisizioni.

#### 2.4.1.3. Interventi di consolidamento mediante iniezioni

Nel sito in esame sono stati selezionati inizialmente quattro campi prova, tre pannelli murari a tre paramenti posizionati al quarto livello e un pannello di muratura a due paramenti posizionato al quinto livello. Il motivo di questa scelta è dovuto al fatto che obiettivo di questa sperimentazione è effettuare un confronto tra tre diverse miscele di iniezione, e per una di queste tre effettuare un ulteriore confronto per valutarne l'efficacia in murature a due o tre paramenti. E' stato necessario programmare le date dell'intervento in modo da non avere temperature troppo rigide che avrebbero influenzato negativamente la viscosità della miscela e quindi l'iniettabilità, e inoltre per evitare problemi relativi al ciclo gelo-disgelo.

##### *Preparazione del pannello:*

Come prima fase si è provveduto a scarnire i giunti per eseguirne poi la ristilatura con GeoCalce® Fino in maniera da sigillare bene le cavità interne e al contempo rinforzare il paramento murario. La ristilatura ha così permesso di mettere in luce in maniera chiara la tessitura muraria così da eseguire nelle posizioni più ottimali l'esecuzione dei fori per mezzo dei trapano a roto percussione e l'inserimento delle cannule.

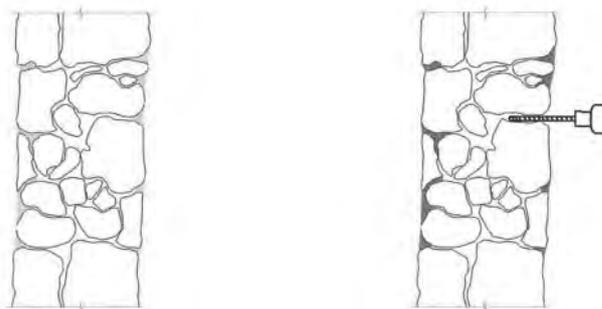


Fig. 2.4. 4 - Ristilatura dei giunti ed esecuzione dei fori (Cescatti, 2015)

I fori per l'inserimento delle cannule dovrebbero essere disposti secondo un andamento triangolare (come riportato nello schema sottostante) distanziato in base alle caratteristiche di iniettabilità del campione poiché questa disposizione permette una migliore copertura della superficie da iniettare. Nella situazione effettiva questo schema non riesce ad essere così rigoroso e ci si ritrova spesso in situazioni irregolari, questo anche a causa delle difficoltà di perforazione in alcuni punti troppo consistenti o troppo disomogenei. Quindi al contrario delle disposizioni impartite agli operatori della ditta incaricata i fori sono stati realizzati con una distribuzione abbastanza irregolare.

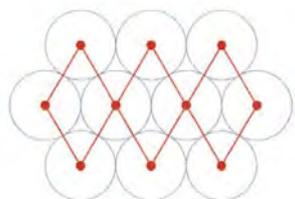


Fig. 2.4. 5 - Schema di posizionamento delle cannule (Cescatti, 2015)

Solitamente per murature di spessore inferiore ai 50-60 cm si opta per l'iniezione su un solo lato. In questa situazione sperimentale invece si sono disposte alcune cannule ispettive sul lato retrostante in modo da poter controllare l'avanzamento e la completezza del processo di iniezione. La disposizione è stata scelta in base alle aree di minor velocità sonica e quindi laddove è presente una maggiore quantità di vuoti.

Successivamente si sono identificate con un numero tutte le cannule in modo da tenere traccia del processo di iniezione e dell'andamento della miscela all'interno della muratura.

#### *Lavaggio e imbibizione della muratura:*

Dopo la preparazione del pannello si è provveduto al lavaggio e imbibizione della muratura attraverso l'iniezione di acqua fino a raggiungere la saturazione. Questo è necessario per evitare che la parete assorba l'acqua d'impasto della miscela iniettata causandone così la segregazione. Inoltre questo processo è utile anche per asportare eventuali detriti prodotti dalla perforazione o altre impurità che possono ostacolare il flusso della miscela all'interno del paramento murario.

Inoltre questo processo ci ha permesso di individuare zone dei giunti in cui erano presenti piccole fessure dalle quali è fuoriuscita dell'acqua, che quindi sono state sigillate con malta a presa rapida. Questo per evitare il più possibile la fuoriuscita di miscela durante il suo percorso all'interno della muratura, fatto che ne avrebbe interrotto prematuramente il flusso, riducendo la quantità di zone raggiunte.

#### *Iniezione della miscela:*

L'iniezione è avvenuta per mezzo di una pompa Umiblock modello Magic Plus con una prevalenza massima di 3.5 Bar. Nella parte terminale, attraverso un giunto a T, è stato inserito un manometro per la misura della pressione iniettata.

Successivamente si è completato, secondo lo standard adottato dal nostro dipartimento, il prospetto di iniezione e la tabella di iniezione in cui si riporta il percorso seguito dalla miscela e la quantità di litri iniettati calcolati sulla pressione esercitata.



Fig. 2.4. 6 - Pompa Umiblock Magic Plus

L'iniezione è stata effettuata in pressione partendo dai punti più bassi e procedendo verso l'alto, questo per evitare che iniettando in un foro della parte alta di andassero a saturare i fori inferiori e per sapere con una certa precisione quanta miscela è stata iniettata in ogni foro.

Durante l'iniezione sono stati raccolti in una apposita tabella i seguenti dati:

- foro dal quale si inietta
- posizione del foro in coordinate cartesiane rispetto alla griglia
- tempo di iniezione per ciascun foro [s]
- pressione media durante l'iniezione [bar]
- litri totali iniettati

In questo modo, con la pressione e il tempo, si è potuto ricavare la quantità di miscela iniettata in ciascun foro in litri.

*Elaborazione dei dati:*

Nella fase successiva questi dati sono stati elaborati mediante il programma Surfer per avere delle immagini relative alla distribuzione della miscela iniettata nel pannello. Per fare ciò è stata inserita nel programma una tabella di coordinate X,Y,Z rappresentanti rispettivamente le coordinate orizzontali, verticali, e i litri iniettati per ciascun foro.

#### **2.4.1.4. Valutazione dell'efficacia degli interventi**

*Soniche post-iniezioni*

Terminata la fase di iniezione è stato necessario attendere un minimo di 28 giorni per raggiungere la completa maturazione della miscela. A questo punto per valutare l'efficacia

dell'intervento si è operato effettuando nuovamente le prove soniche dirette e tomografiche nei campi prova già indagati e iniettati. Particolare attenzione è stata posta a ridisegnare le griglie nelle identiche posizioni delle indagini precedenti all'intervento, perché in molti casi non erano più visibili a causa della fuoriuscita di miscela o del distacco di malta.

Le prove sono state eseguite con le stesse modalità della fase pre-iniezione permettendo così di ricavare valori delle velocità soniche medie dei singoli punti e degli interi pannelli che permettessero un adeguato confronto. Per questo scopo sono state elaborate nuove immagini Surfer relative alle velocità post-iniezione, e altre rappresentanti la differenza percentuale di velocità nei singoli punti. Molto utile è stato confrontare queste ultime con le immagini di distribuzione di miscela iniettata, per verificare che le zone con un consistente incremento di velocità corrispondessero a zone in cui è stata iniettata una consistente quantità di miscela.

### *Endoscopie*

Come ultima fase sono state effettuate delle endoscopie in alcune zone dei pannelli, selezionate tra quelle con il maggiore e il minore incremento di velocità per verificare l'affidabilità di questa procedura di valutazione dell'efficacia controllando se a notevoli incrementi corrisponde una perfetta diffusione della miscela e viceversa.

## **2.4.2. Prove soniche dirette pre-iniezioni**

### **2.4.2.1 Campo prova 1**

Il campo prova 1 è situato al quinto livello, nel corridoio sopra al chiostro, su una muratura interna spessa 30 cm. Qui è stata effettuata l'unica sonica diretta non situata al quarto livello, quindi utile come termine di paragone; infatti questa muratura è a due paramenti invece che a tre, presentando quindi uno spessore minore rispetto alle altre.

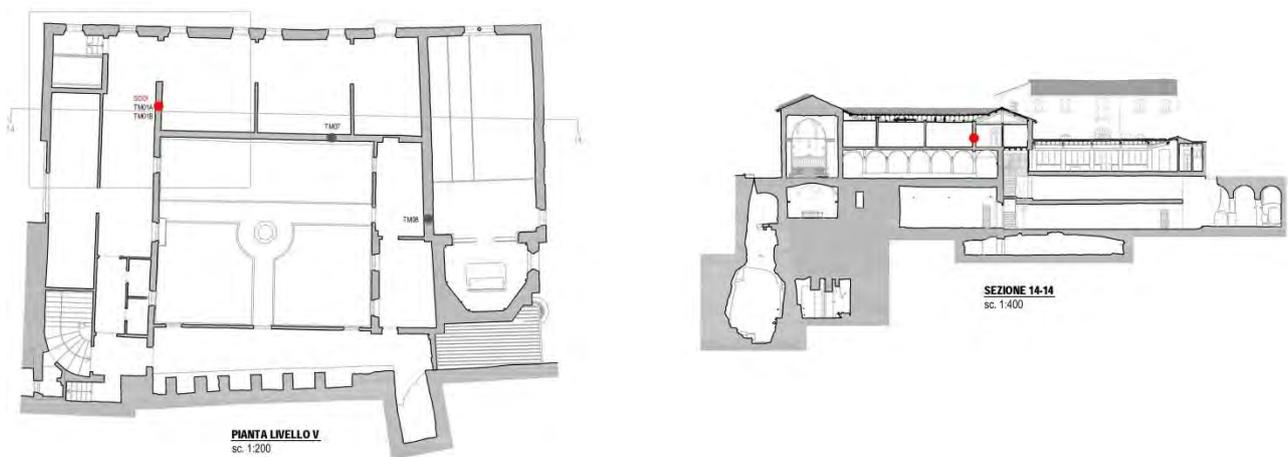


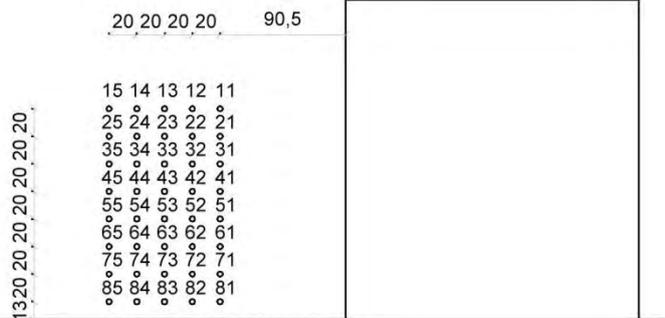
Fig. 2.4. 7 - Localizzazione campo prova 1 (Museo Archeologico)

In questo caso era già stata eseguita una sonica diretta con griglia di 25 punti divisi in cinque righe e cinque colonne distanti tra loro 20 cm. Si è deciso di aumentare la porzione di muratura indagata aggiungendo alla griglia altre tre righe da cinque punti nella parte inferiore del pannello, che è in tal modo risultato di dimensioni 80x140 cm.



Disposizione griglia ACCELEROMETRO

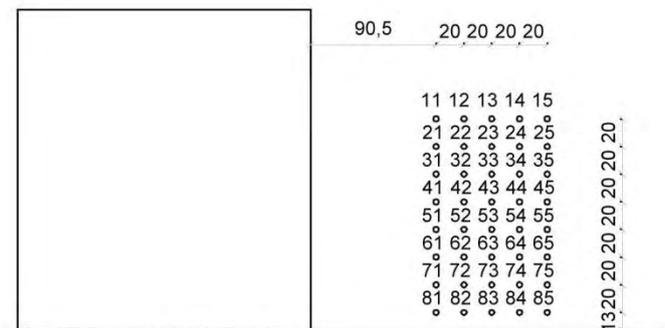
Spessore porzione di muratura indagata: 0.3m



Schema disposizione griglia ACCELEROMETRO



Disposizione griglia MARTELLO



Schema disposizione griglia MARTELLO

Fig. 2.4. 8 - Schemi disposizione griglia S01 (Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita il giorno 4 novembre 2013 alle ore 15:30. In questo caso è stato necessario tenere conto delle esigenze di cantiere ed eseguire la prova nel pomeriggio poiché la mattina c'erano lavori in corso nelle murature circostanti che avrebbero disturbato la qualità del segnale. Per ogni punto sono state registrate tre acquisizioni, delle quali si è calcolata la media. I valori sono riportati nella seguente tabella.

S1 - CAMPO PROVA LIVELLO V									
BATTUTA					sp	0.30	m		
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	Velocità	
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]	
1	1.1	5.21E-04	4.98E-04	4.53E-04	4.91E-04	2.84E-05	6%	611.24	
2	1.2	5.30E-04	4.83E-04	3.55E-04	4.56E-04	7.36E-05	16%	657.92	

3	1.3	5.00E-04	4.16E-04	4.45E-04	4.53E-04	3.49E-05	8%	661.70
4	1.4	6.14E-05	8.04E-05	8.13E-05	7.44E-05	9.19E-06	12%	4034.28
5	1.5	4.16E-04	3.53E-04	4.07E-04	3.92E-04	2.80E-05	7%	765.33
6	2.1	5.26E-04	4.40E-04	4.36E-04	4.67E-04	4.17E-05	9%	641.82
7	2.2	4.14E-04	4.28E-04	5.74E-04	4.72E-04	7.24E-05	15%	635.81
8	2.3	1.00E-04	1.37E-04	1.40E-04	1.26E-04	1.81E-05	14%	2383.47
9	2.4	2.38E-04	2.92E-04	2.15E-04	2.49E-04	3.25E-05	13%	1207.08
10	2.5	6.31E-04	6.61E-04	5.97E-04	6.29E-04	2.62E-05	4%	476.58
11	3.1	3.49E-04	3.55E-04	3.62E-04	3.55E-04	5.05E-06	1%	844.35
12	3.2	4.28E-04	4.16E-04	4.12E-04	4.19E-04	6.87E-06	2%	716.34
13	3.3	2.04E-04	2.32E-04	2.36E-04	2.24E-04	1.44E-05	6%	1339.90
14	3.4	8.47E-04	7.94E-04	1.01E-03	8.84E-04	9.30E-05	11%	339.19
15	3.5	6.14E-04	6.11E-04	5.24E-04	5.83E-04	4.14E-05	7%	514.56
16	4.1	2.16E-04	2.05E-04	1.99E-04	2.07E-04	7.10E-06	3%	1449.93
17	4.2	1.81E-04	1.29E-04	1.37E-04	1.49E-04	2.30E-05	15%	2011.13
18	4.3	1.38E-04	1.05E-04	1.10E-04	1.18E-04	1.44E-05	12%	2543.67
19	4.4	1.97E-04	1.98E-04	1.42E-04	1.79E-04	2.59E-05	14%	1674.51
20	4.5	1.36E-04	1.63E-04	1.50E-04	1.49E-04	1.07E-05	7%	2006.91
21	5.1	3.41E-04	2.70E-04	2.66E-04	2.92E-04	3.41E-05	12%	1026.05
22	5.2	4.52E-04	4.20E-04	4.66E-04	4.46E-04	1.93E-05	4%	672.20
23	5.3	3.72E-04	3.62E-04	3.13E-04	3.49E-04	2.58E-05	7%	859.94
24	5.4	4.08E-04	3.85E-04	3.97E-04	3.97E-04	9.01E-06	2%	756.13
25	5.5	4.86E-04	4.93E-04	4.84E-04	4.88E-04	3.80E-06	1%	615.13
26	6.1	5.09E-04	6.66E-04	6.24E-04	5.99E-04	6.66E-05	11%	500.44
27	6.2	2.92E-04	2.86E-04	2.96E-04	2.91E-04	4.29E-06	1%	1029.67
28	6.3	4.82E-04	5.04E-04	5.10E-04	4.98E-04	1.22E-05	2%	601.90
29	6.4	4.13E-04	4.51E-04	5.81E-04	4.82E-04	7.18E-05	15%	622.91
30	6.5	3.09E-04	3.52E-04	3.55E-04	3.39E-04	2.08E-05	6%	886.18
31	7.1	4.75E-04	4.16E-04	4.93E-04	4.62E-04	3.30E-05	7%	650.05
32	7.2	3.26E-04	4.36E-04	4.30E-04	3.98E-04	5.05E-05	13%	754.60
33	7.3	2.56E-04	2.39E-04	2.41E-04	2.45E-04	7.53E-06	3%	1222.49
34	7.4	2.88E-04	2.84E-04	1.30E-04	2.86E-04	2.14E-06	1%	1048.42
35	7.5	4.34E-04	5.16E-04	4.59E-04	4.70E-04	3.41E-05	7%	638.85
36	8.1	6.03E-04	7.15E-04	6.80E-04	6.66E-04	4.69E-05	7%	450.29
37	8.2	2.74E-04	2.60E-04	2.88E-04	2.74E-04	1.13E-05	4%	1095.46
38	8.3	4.38E-04	5.31E-04	5.51E-04	5.07E-04	4.92E-05	10%	591.98
39	8.4	1.06E-03	1.52E-03	1.58E-03	1.39E-03	2.29E-04	17%	216.53
40	8.5	5.62E-04	4.74E-04	4.47E-04	4.94E-04	4.88E-05	10%	606.77

Tab. 2.4. 1 - Tabella acquisizione dati sonica diretta So1 (Museo Archeologico)

La prova ha determinato una velocità media complessiva pari a 1009 m/s, tipica di murature di consistenza medio-bassa, con deviazione standard di 718 m/s e coefficiente di variazione pari al 71,14%, indice di una elevatissima eterogeneità nel pannello, con presenza di vuoti all'interno dello spessore murario. Nell' istogramma seguente si può infatti osservare come i valori in alcuni punti siano totalmente discordanti con il resto del pannello, come nel punto

1.4 dove si ha il picco massimo con velocità 4034,3 m/s, una fascia di buona consistenza nella riga 4 con velocità tra i 1500 e i 2500 m/s, mentre nel resto del pannello le velocità sono relativamente basse, in particolare nella zona inferiore dove solo in pochi casi si superano i 1000 m/s di velocità sonica. La velocità minima è registrata nel punto 8.4 ed è pari a 216,5 m/s dato molto strano perché inferiore alla velocità di trasmissione delle onde soniche nell'aria.

Per quanto riguarda la terza acquisizione nel punto 7.4, evidenziata in rosso nella tabella sovrastante, si ha un tempo di volo totalmente discordante con le altre due acquisizioni e quindi è stata esclusa per il calcolo del tempo medio in quel punto, perché probabilmente frutto di qualche problema durante l'esecuzione della prova, come ad esempio pietre sporgenti o intonaco che si stacca dal paramento rendendo impossibile battere con il martello sempre nello stesso punto in maniera precisa.

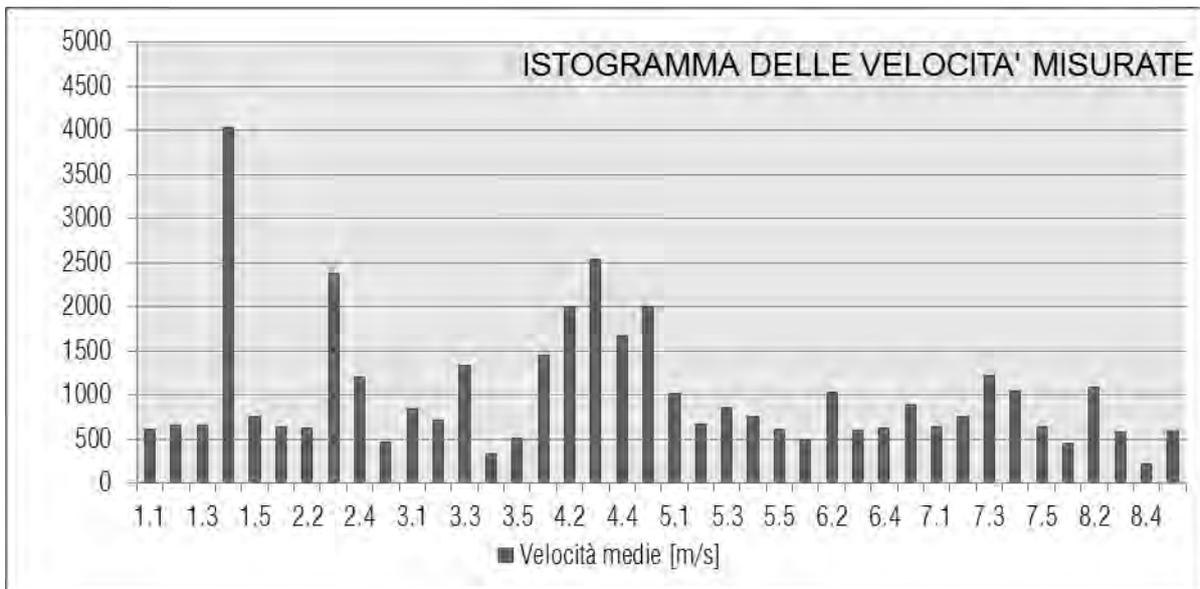


Fig. 2.4. 9 - Istogramma velocità soniche So1 (Museo Archeologico)

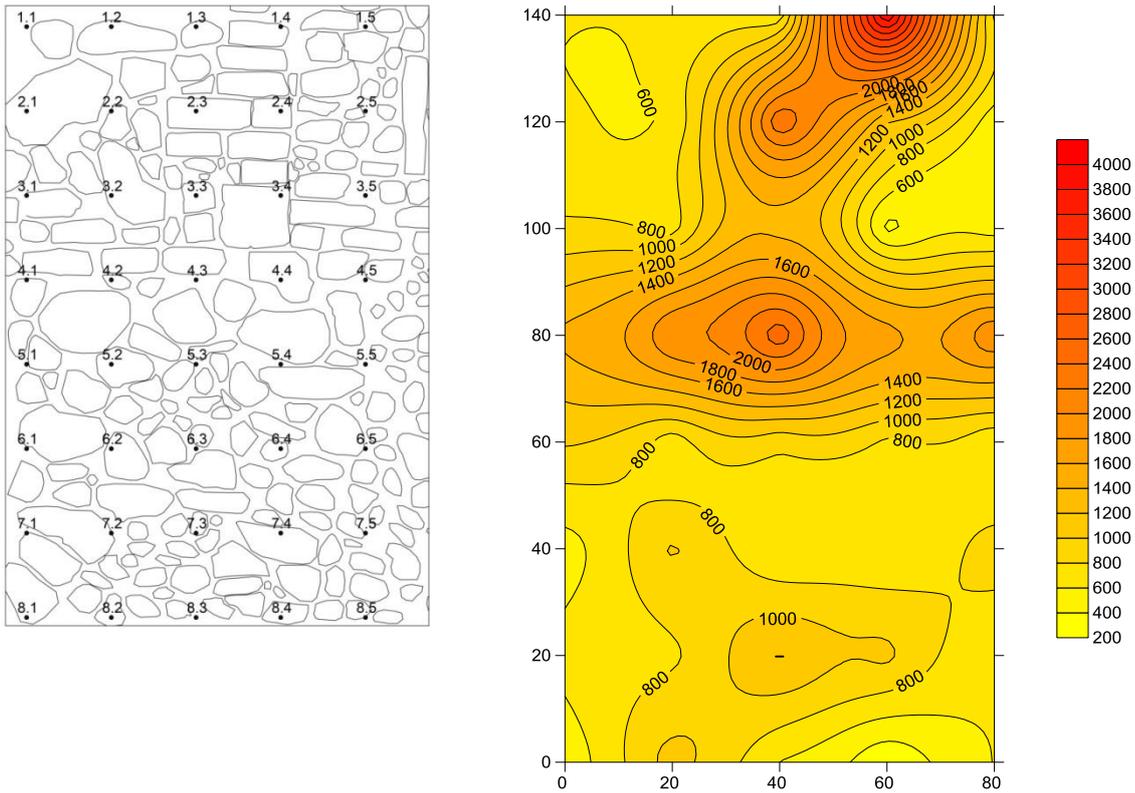


Fig. 2.4. 10 -Griglia di acquisizione e grafico di distribuzione delle velocità soniche  $So_1$  (Museo Archeologico)

Dal grafico di distribuzione delle velocità soniche si nota chiaramente il picco nel punto 1.4, la fascia di buona consistenza a metà pannello e la zona inferiore di scarsa consistenza. Dalla foto sottostante infatti è visibile come nella zona della riga 4 siano presenti inserti di mattoni pieni, aggiunti negli interventi di riparazione delle murature tramite scuci-cuci, i quali quindi determinano velocità soniche maggiori in quella porzione di muratura.

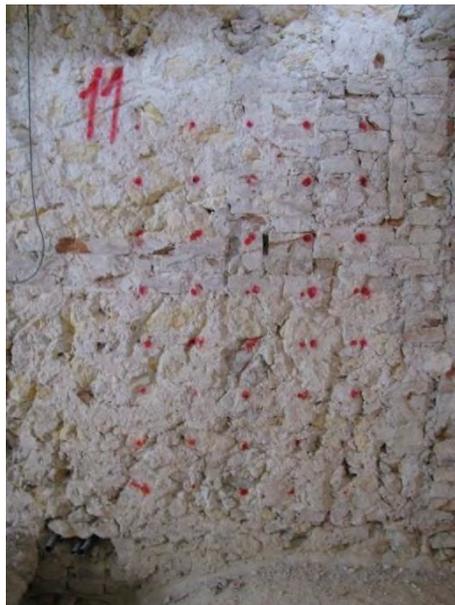


Fig. 2.4. 11 - Campo prova 1, lato martello (Museo Archeologico)

2.4.2.2. Campo prova 2

Il campo prova 2 è situato al quarto livello, all'interno di una delle celle, su una muratura interna di 36 cm di spessore. Il lato martello è quello situato all'interno dell'ultima cella, mentre il lato accelerometro è quello situato nella cella centrale.

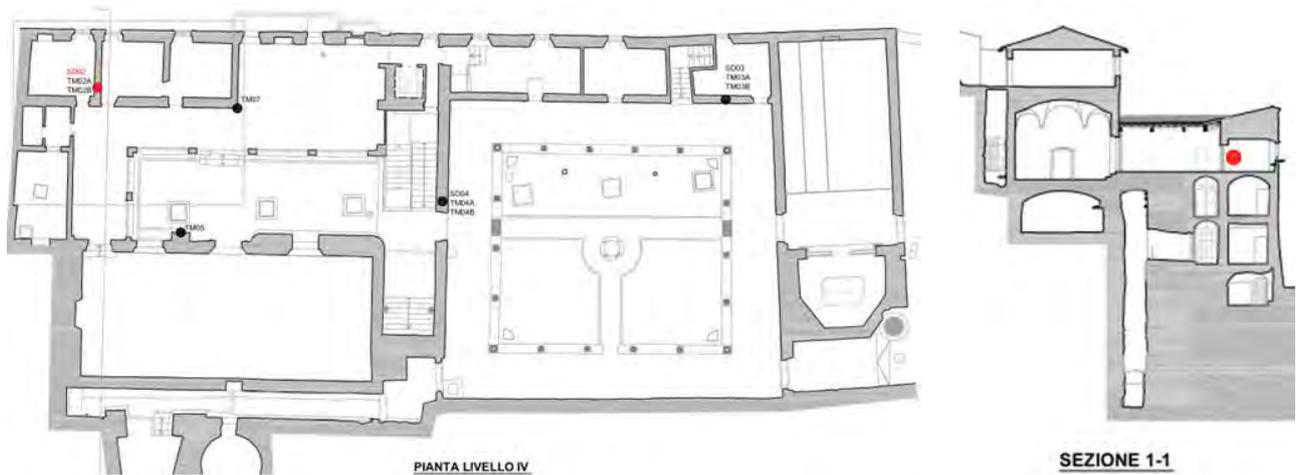


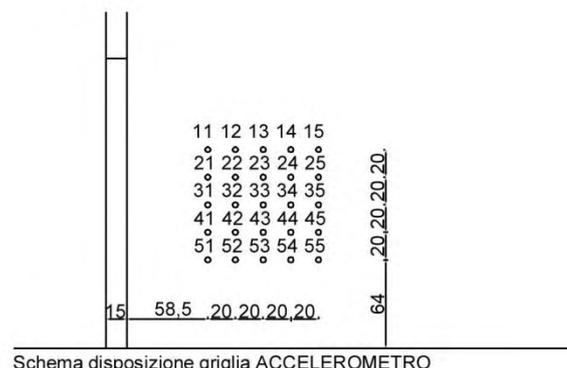
Fig. 2.4. 12- Localizzazione campo prova 2 (Museo Archeologico)

La griglia di acquisizione è stata tracciata a 64 cm dal pavimento utilizzando una griglia quadrata composta da cinque righe e cinque colonne, con i punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni.



Disposizione griglia ACCELEROMETRO

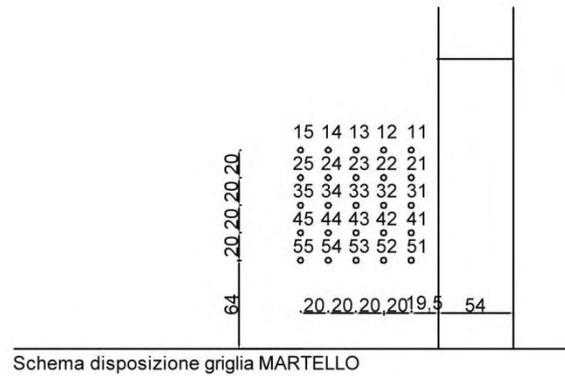
Spessore porzione di muratura indagata: 0.36m



Schema disposizione ariqiala ACCELEROMETRO



Disposizione griglia MARTELO



Schema disposizione griglia MARTELO

Fig. 2.4. 13 - Schemi disposizione griglia So2 (Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita il giorno 3 novembre 2013 alle ore 12:50. E' stato necessario attendere l'orario di pausa pranzo perché nelle strutture sovrastanti il campo prova erano in atto lavori di restauro dell'edificio, e le vibrazioni prodotte avrebbero influito sulla buona riuscita dell'indagine andando a disturbare il segnale. Per ogni punto sono state registrate tre acquisizioni, delle quali si è calcolata la media. I valori sono riportati nella seguente tabella:

S2 - CAMPO PROVA CELLE								
		BATTUTA			sp	0,36	m	
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	Velocità
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]
1	1,1	5,88E-04	6,83E-04	5,40E-04	6,04E-04	5,94E-05	10%	596,21
2	1,2	2,96E-04	3,56E-04	3,36E-04	3,29E-04	2,51E-05	8%	1094,38
3	1,3	5,15E-04	6,63E-04	5,75E-04	5,84E-04	6,06E-05	10%	616,34
4	1,4	3,94E-04	3,39E-04	4,15E-04	3,83E-04	3,20E-05	8%	941,16
5	1,5	3,63E-04	3,93E-04	4,04E-04	3,87E-04	1,74E-05	4%	931,06
6	2,1	5,05E-04	6,44E-04	7,92E-04	6,47E-04	1,17E-04	18%	556,35
7	2,2	2,10E-04	2,22E-04	2,05E-04	2,13E-04	7,06E-06	3%	1693,93
8	2,3	4,06E-04	3,64E-04	3,57E-04	3,76E-04	2,16E-05	6%	957,46
9	2,4	1,57E-04	1,43E-04	1,13E-04	1,38E-04	1,83E-05	13%	2617,99
10	2,5	2,06E-04	1,84E-04	2,05E-04	1,98E-04	9,85E-06	5%	1815,31
11	3,1	3,77E-04	3,23E-04	3,65E-04	3,55E-04	2,31E-05	7%	1014,39
12	3,2	2,56E-04	2,25E-04	2,67E-04	2,49E-04	1,78E-05	7%	1443,54
13	3,3	4,44E-04	3,93E-04	4,23E-04	4,20E-04	2,11E-05	5%	856,82
14	3,4	2,34E-04	2,26E-04	2,32E-04	2,31E-04	3,34E-06	1%	1561,64
15	3,5	2,66E-04	2,67E-04	2,94E-04	2,75E-04	1,29E-05	5%	1306,98
16	4,1	1,85E-04	1,58E-04	1,68E-04	1,70E-04	1,12E-05	7%	2111,56
17	4,2	3,42E-04	3,88E-04	3,57E-04	3,62E-04	1,95E-05	5%	994,11
18	4,3	4,19E-04	4,39E-04	4,86E-04	4,48E-04	2,80E-05	6%	804,04
19	4,4	7,14E-04	6,07E-04	6,88E-04	6,70E-04	4,58E-05	7%	537,56
20	4,5	4,23E-04	4,43E-04	6,33E-04	4,99E-04	9,45E-05	19%	720,87
21	5,1	4,07E-04	4,46E-04	4,19E-04	4,24E-04	1,64E-05	4%	849,08

22	5,2	2,45E-04	2,45E-04	2,43E-04	2,44E-04	9,00E-07	0%	1474,93
23	5,3	2,03E-04	2,34E-04	1,89E-04	1,96E-04	2,01E-05	10%	1836,69
24	5,4	1,55E-04	1,96E-04	1,64E-04	1,72E-04	1,75E-05	10%	2097,17
25	5,5	6,56E-04	6,08E-04	6,45E-04	6,36E-04	2,04E-05	3%	565,69

Tab. 2.4. 2 - Tabella acquisizione dati sonica diretta So2

La prova ha determinato una velocità media complessiva di 1200 m/s, tipica di murature di consistenza medio bassa, con deviazione standard di 559 m/s e coefficiente di variazione pari al 46,63%, indice di un elevata eterogeneità nel pannello, con presenze di vuoti all'interno dello spessore murario. Nell'istogramma seguente si può infatti osservare la grande diversità dei valori delle velocità soniche nei 25 punti indagati, con velocità massima 2617,99 m/s nel punto 2.4, ce supera di cinque volte la velocità minima registrata nel pannello pari a 537,56 m/s nel punto 4.4.

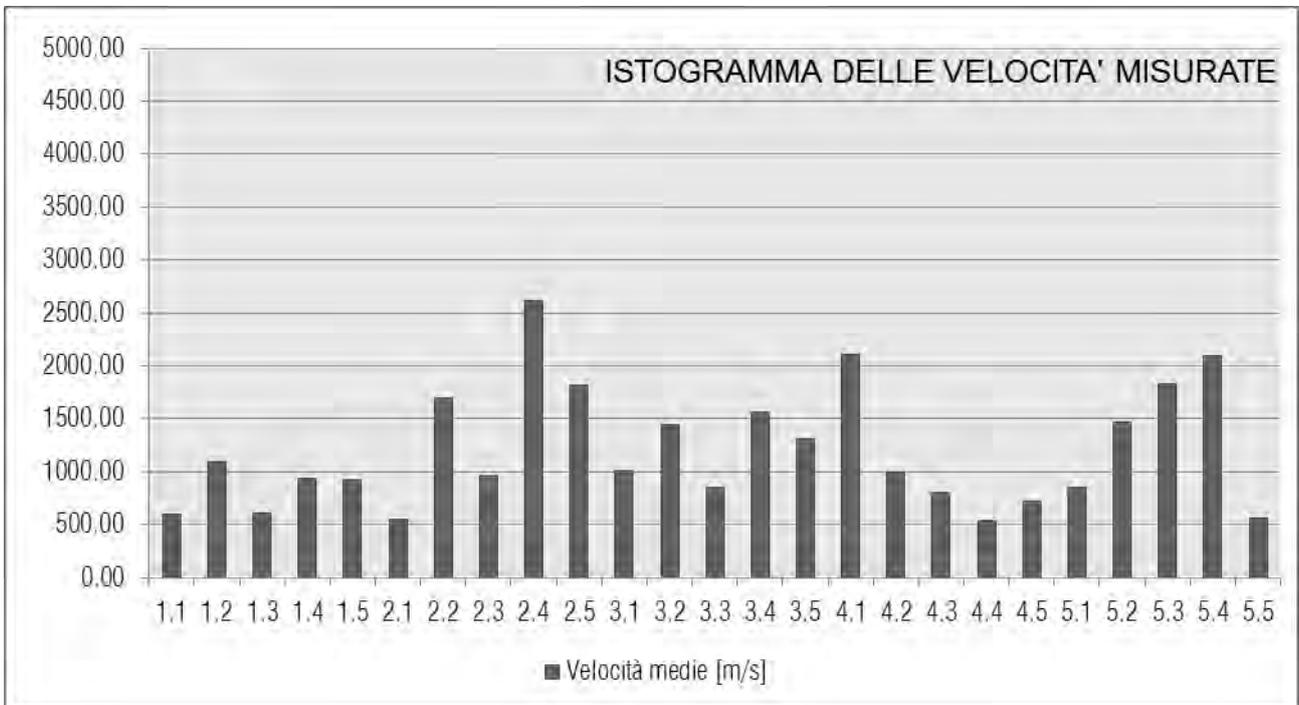


Fig. 2.4. 14 - Istogramma velocità soniche So2 (Museo Archeologico)

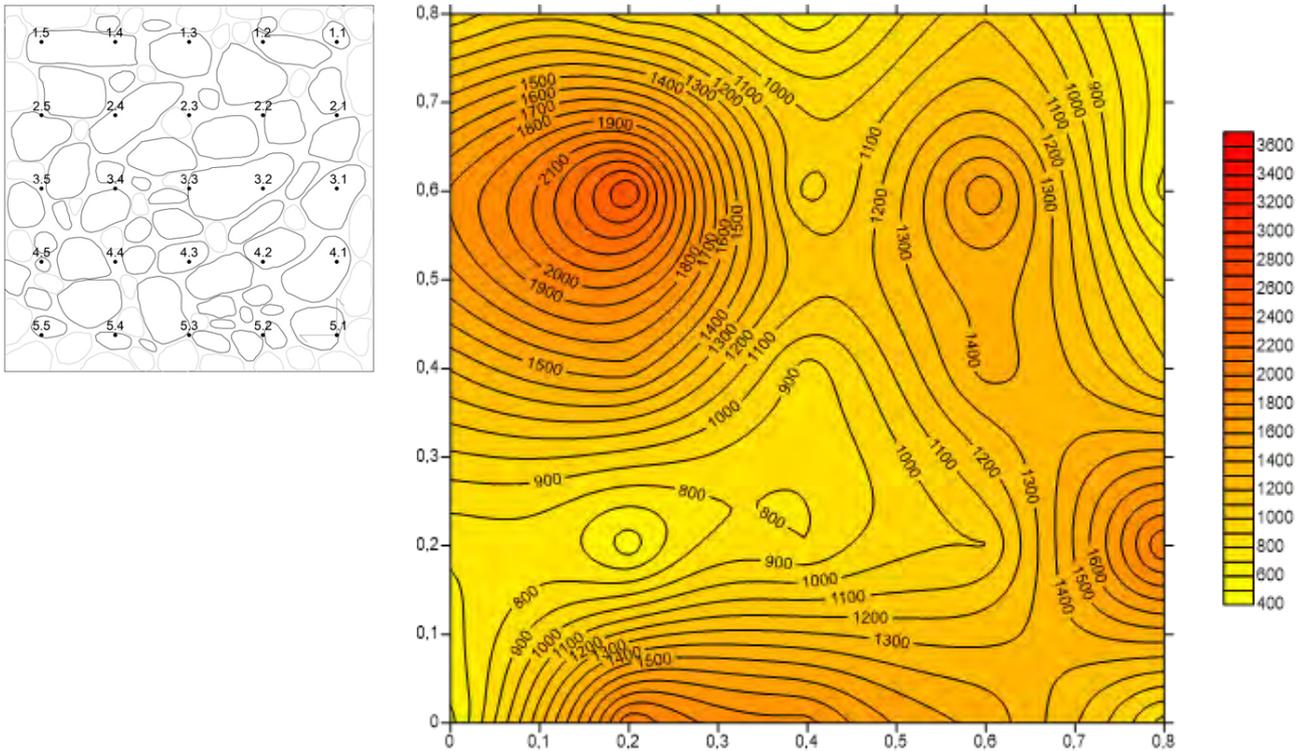


Fig. 2.4. 15 - Griglia di acquisizione e grafico di distribuzione delle velocità soniche Soz (Museo Archeologico)

Anche dal grafico di distribuzione delle velocità soniche mostra chiaramente la forte eterogeneità presente nel pannello, e sono immediatamente riconoscibili il punto 2.4 con velocità massima e il 4.4 con velocità minima.

### 2.4.2.3. Campo prova 3

Il campo prova 3 è situato al quarto livello nella stanza all'angolo est dell'edificio adiacente al chiostro e compresa tra la chiesa e le scale che portano giù al teatro. La muratura in esame, di spessore pari a 37,5 cm, è quella che divide la stanza dal chiostro con il lato martello all'interno e il lato accelerometro all'esterno sotto il portico del chiostro.

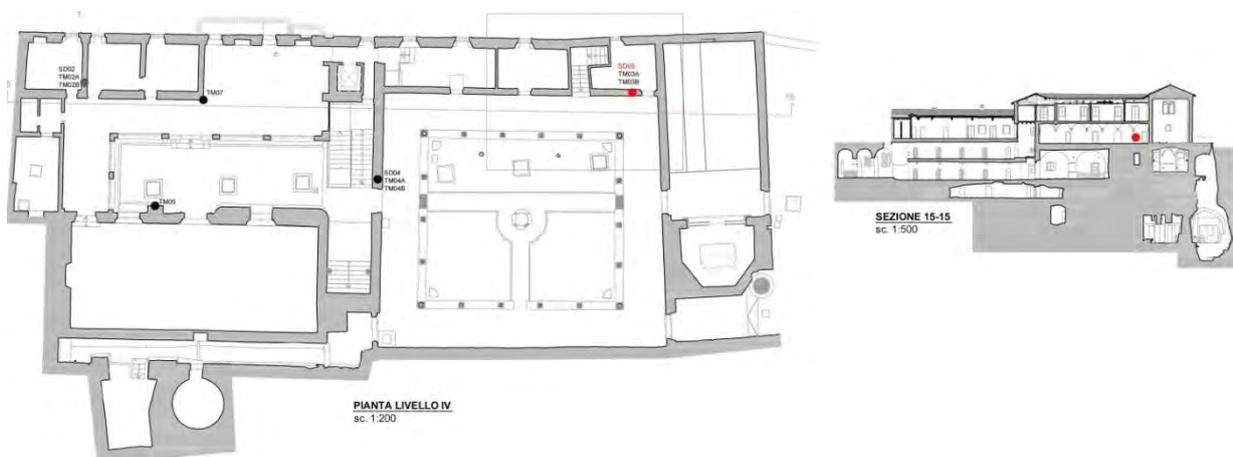


Fig. 2.4. 16 - Localizzazione campo prova 3 (Museo Archeologico)

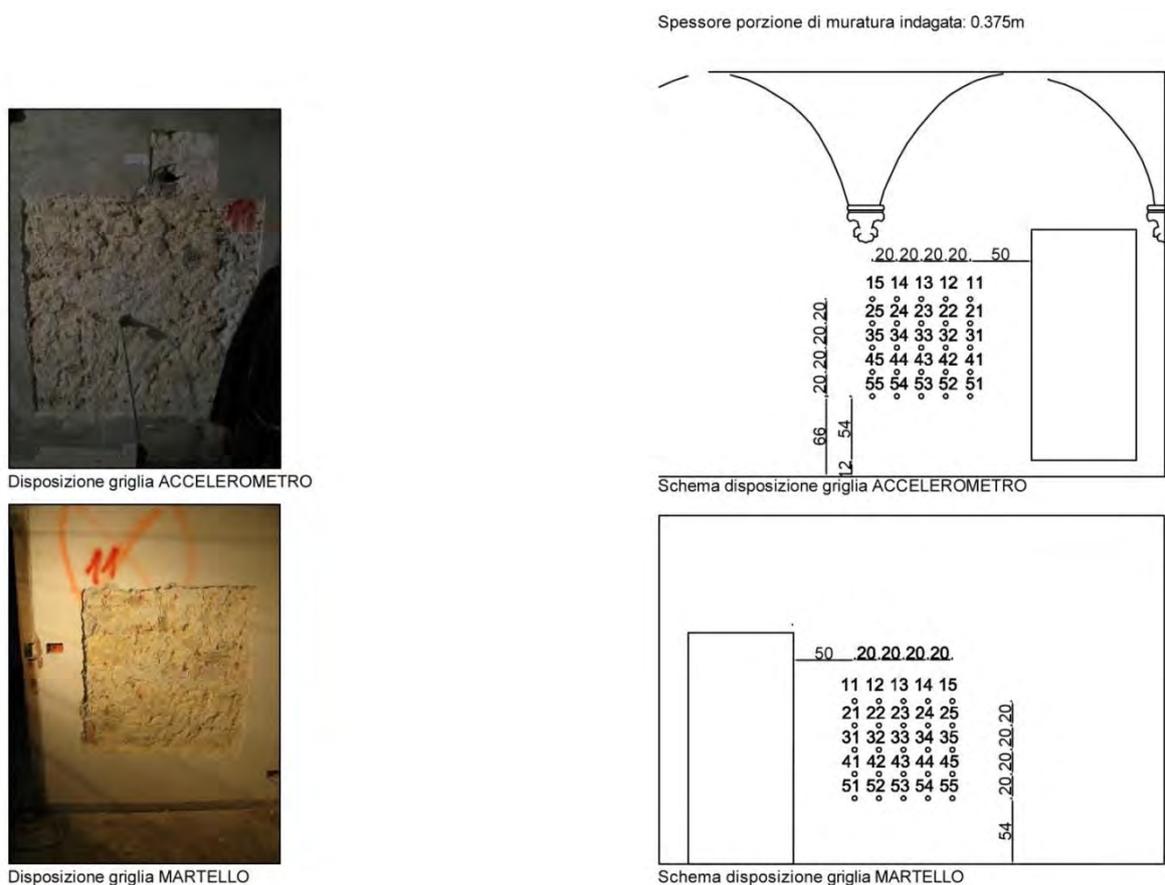


Fig. 2.4. 17 - Schemi disposizione griglia  $So_3$ (Museo Archeologico)

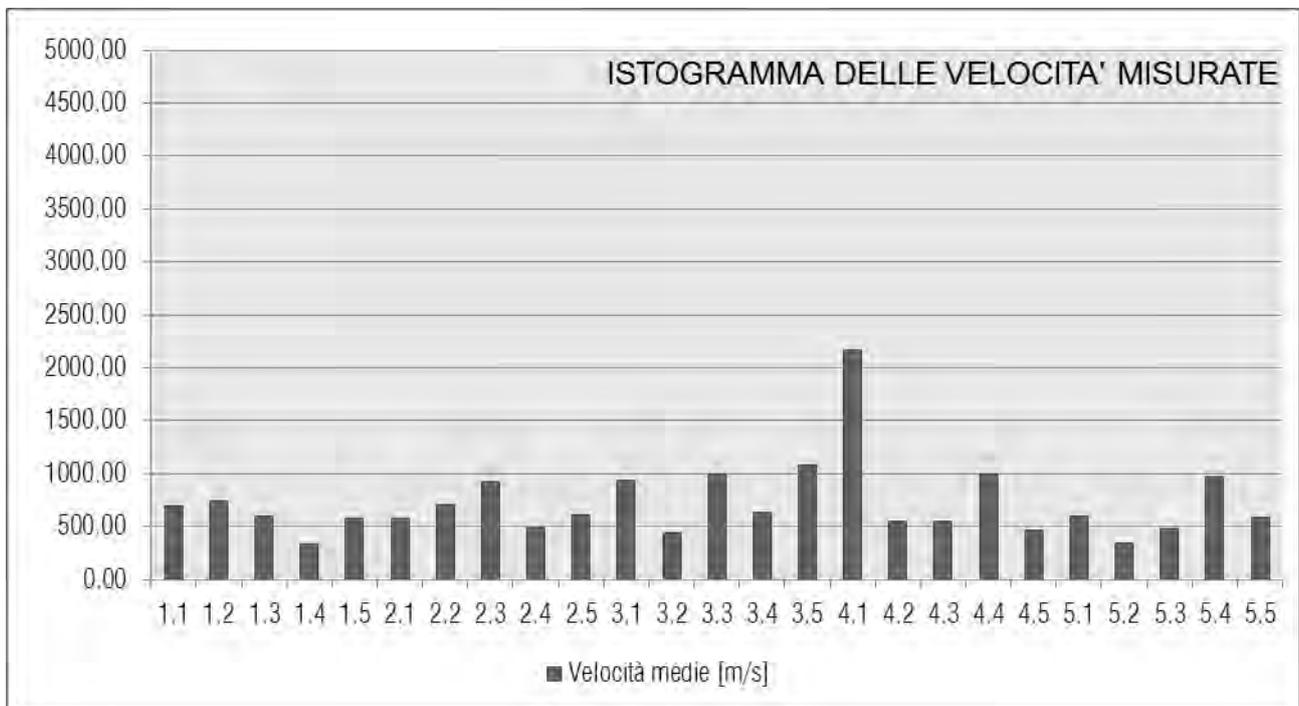
La griglia di acquisizione è stata tracciata a 66 cm di altezza dal suolo del chiostro, mentre a 54 cm di altezza dal pavimento della stanza, in quanto è presente uno scalino all'ingresso. Essa è composta da cinque righe e cinque colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni. La prova è stata eseguita il giorno 7 novembre 2013 alle ore 15:00. Per ogni punto sono state registrate tre acquisizioni, delle quali si è calcolata la media. I valori sono riportati nella seguente tabella:

S3 - CAMPO PROVA LATO CHIOSTRO								
BATTUTA					sp 0.375 m			Velocità
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]
1	0	6.31E-04	4.79E-04	5.06E-04	5.39E-04	6.63E-05	12%	695.87
2	0	5.68E-04	4.25E-04	5.19E-04	5.04E-04	5.93E-05	12%	744.34
3	0	5.26E-04	7.48E-04	6.00E-04	6.25E-04	9.23E-05	15%	600.24
4	0	5.63E-04	1.17E-03	1.06E-03	1.11E-03	5.14E-05	5%	336.53
5	0	6.40E-04	7.21E-04	6.13E-04	6.58E-04	4.58E-05	7%	570.05
6	0	5.91E-04	6.85E-04	6.96E-04	6.57E-04	4.73E-05	7%	570.70
7	0	4.80E-04	5.97E-04	5.08E-04	5.28E-04	4.98E-05	9%	709.63
8	0	4.44E-04	3.97E-04	3.75E-04	4.05E-04	2.88E-05	7%	925.26
9	0	7.67E-04	7.78E-04	7.57E-04	7.67E-04	8.84E-06	1%	488.81
10	0	5.79E-04	6.40E-04	6.30E-04	6.16E-04	2.71E-05	4%	608.37

11	0	4.43E-04	3.84E-04	3.72E-04	4.00E-04	3.08E-05	8%	938.25
12	0	6.67E-04	8.54E-04	1.04E-03	8.54E-04	1.52E-04	18%	439.05
13	0	3.95E-04	3.57E-04	3.73E-04	3.75E-04	1.57E-05	4%	1000.88
14	0	5.92E-04	5.29E-04	6.61E-04	5.94E-04	5.41E-05	9%	631.50
15	0	3.07E-04	3.81E-04	3.55E-04	3.48E-04	3.06E-05	9%	1077.91
16	0	1.70E-04	1.75E-04	1.74E-04	1.73E-04	2.42E-06	1%	2168.38
17	0	6.63E-04	6.71E-04	7.00E-04	6.78E-04	1.60E-05	2%	553.21
18	0	6.76E-04	7.20E-04	6.43E-04	6.80E-04	3.14E-05	5%	551.83
19	0	3.61E-04	3.69E-04	3.96E-04	3.75E-04	1.53E-05	4%	999.02
20	0	7.74E-04	7.87E-04	8.28E-04	7.96E-04	2.31E-05	3%	470.82
21	0	5.77E-04	6.51E-04	6.51E-04	6.27E-04	3.49E-05	6%	598.53
22	0	1.14E-03	5.91E-04	1.02E-03	1.08E-03	5.63E-05	5%	347.64
23	0	7.81E-04	1.23E-03	7.72E-04	7.76E-04	4.44E-06	1%	483.04
24	0	3.81E-04	3.76E-04	3.94E-04	3.84E-04	7.84E-06	2%	977.32
25	0	6.29E-04	7.20E-04	5.53E-04	6.34E-04	6.84E-05	11%	591.40

Tab. 2.4. 3- Tabella acquisizione dati sonica diretta So<sub>3</sub>

La prova ha determinato una velocità media complessiva pari a 723 m/s, tipica di murature di scarsa consistenza, con deviazione standard di 360 m/s e coefficiente di variazione pari al 49,8%. Il basso valore della deviazione standard indica un pannello relativamente omogeneo con valori bassi in quasi tutti i punti del pannello. Quasi tutti infatti presentano una velocità inferiore ai 1000 m/s ad eccezione del punto 4.1 che presenta una velocità pari 2168,4 m/s, mentre il valore minimo è misurato nel punto 1.4 con una velocità pari a 336,5 m/s.

Fig. 2.4. 18 - Istogramma velocità soniche So<sub>3</sub> (Museo Archeologico)

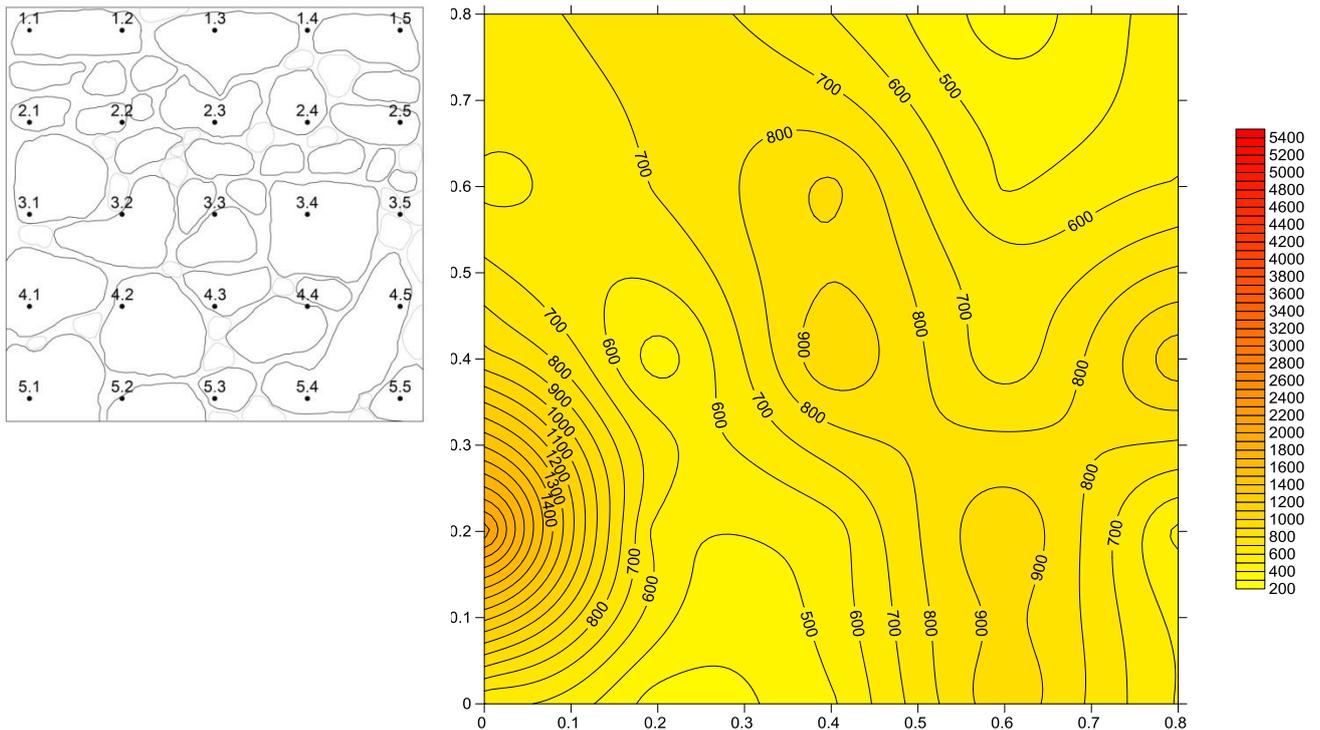


Fig. 2.4. 19 - Griglia di acquisizione e grafico di distribuzione delle velocità sonore  $So_3$  (Museo Archeologico)

Il grafico di distribuzione delle velocità sonore mostra quindi un pannello omogeneo con valori di scarsa consistenza in tutti i punti eccezion fatta per il punto di massimo 4.1, distante comunque dai massimi valori misurati negli altri pannelli murari

#### 2.4.2.4. Campo prova 4

Il campo prova 4 è situato al quarto livello nella zona centrale dell'edificio in corrispondenza della muratura adiacente alle scale che dividono la zona del chiostro da quella del refettorio, di spessore 61,5 cm. Il lato martello è quello situato sulle scale mentre il lato accelerometro è quello dalla parte del chiostro.

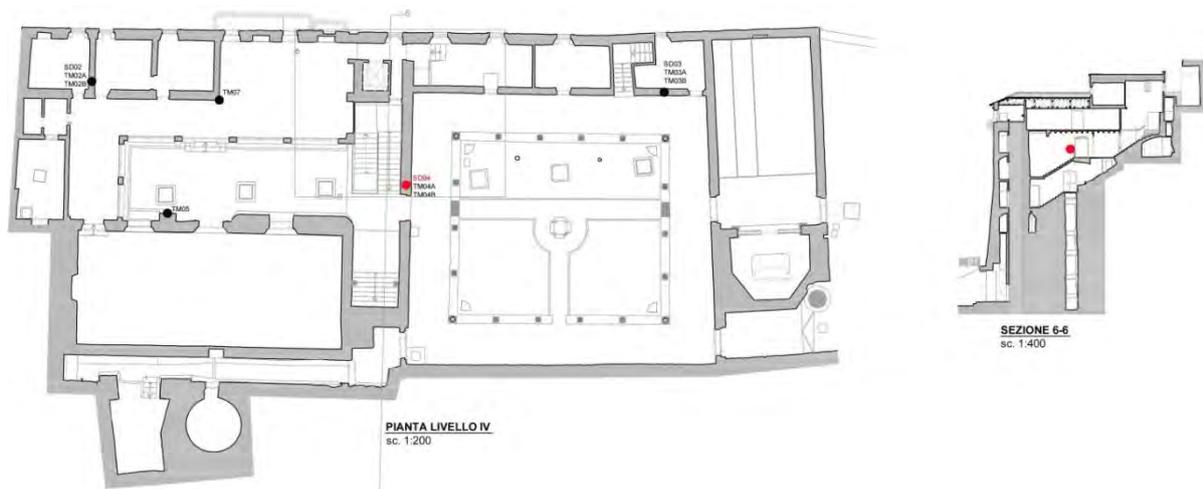


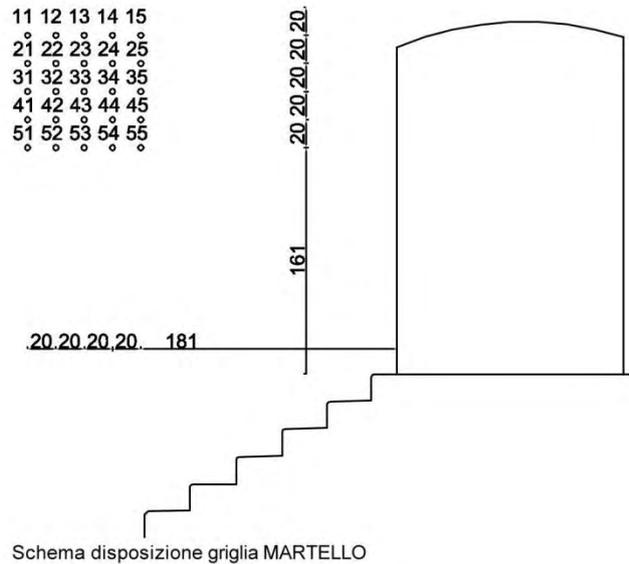
Fig. 2.4. 20 - Localizzazione campo prova 4 (Museo Archeologico)

La griglia di acquisizione è stata tracciata a 161 cm dal livello del pianerottolo delle scale utilizzando la solita griglia quadrata 80x80 cm composta da cinque righe e cinque colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni.



Disposizione prova MARTELLO

Spessore porzione di muratura indagata: 0.615m



Disposizione prova ACCELEROMETRO

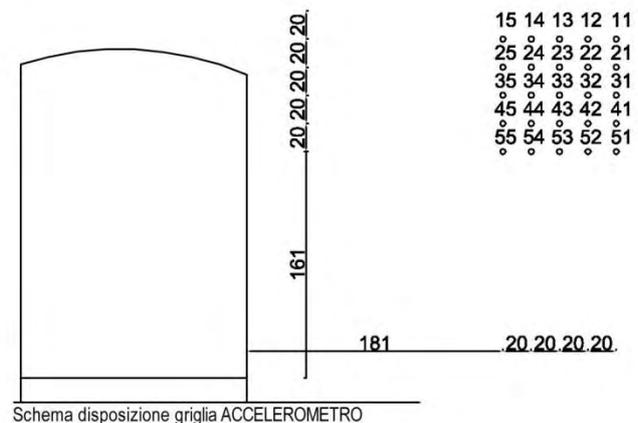


Fig. 2.4. 21 - Schemi disposizione griglia So4(Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita il giorno 5 novembre 2013 alle ore 14. E' stato necessario montare una piccola impalcatura sulle scale in modo da creare un piano di calpestio agevole per poter raggiungere i punti più alti della griglia con il martello. Per ogni punto sono state registrate tre acquisizione, delle quali si è calcolata la media. I valori sono riportati nella seguente tabella:

S4 - CAMPO PROVA LATO SCALE								
N PUNTO	ID	BATTUTA			sp 0,615 m		CoV	Velocità
		a	b	c	media	dev		
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]
1	1,1	1,16E-03	1,72E-03	1,31E-03	1,40E-03	2,40E-04	17%	439,95
2	1,2	8,34E-04	7,04E-04	7,11E-04	7,50E-04	5,98E-05	8%	820,20
3	1,3	1,12E-03	8,56E-04	1,08E-03	1,02E-03	1,17E-04	11%	602,75
4	1,4	1,63E-03	1,35E-03	1,36E-03	1,45E-03	1,29E-04	9%	425,03
5	1,5	1,46E-03	1,61E-03	1,51E-03	1,52E-03	6,15E-05	4%	403,81
6	2,1	9,04E-04	1,04E-03	1,31E-03	1,08E-03	1,68E-04	16%	568,20
7	2,2	4,72E-04	4,64E-04	4,96E-04	4,77E-04	1,36E-05	3%	1288,48
8	2,3	6,93E-04	6,45E-04	6,15E-04	6,51E-04	3,21E-05	5%	944,71
9	2,4	4,50E-04	4,91E-04	4,87E-04	4,76E-04	1,83E-05	4%	1292,33
10	2,5	9,28E-04	1,17E-03	1,09E-03	1,06E-03	9,93E-05	9%	579,75
11	3,1	9,90E-04	8,88E-04	1,11E-03	9,95E-04	8,91E-05	9%	618,14
12	3,2	5,99E-04	5,77E-04	6,16E-04	5,97E-04	1,60E-05	3%	1029,42
13	3,3	1,11E-03	1,01E-03	9,87E-04	1,03E-03	5,42E-05	5%	594,78
14	3,4	1,09E-03	1,05E-03	8,84E-04	1,01E-03	8,87E-05	9%	610,75
15	3,5	1,32E-03	1,06E-03	1,15E-03	1,17E-03	1,07E-04	9%	523,46
16	4,1	1,10E-03	1,12E-03	1,09E-03	1,10E-03	1,05E-05	1%	558,57
17	4,2	6,61E-04	7,08E-04	6,31E-04	6,67E-04	3,20E-05	5%	922,32
18	4,3	8,97E-04	7,91E-04	9,32E-04	8,74E-04	5,99E-05	7%	703,95
19	4,4							
20	4,5	1,41E-03	1,52E-03	1,57E-03	1,50E-03	6,74E-05	5%	411,05
21	5,1	8,85E-04	9,79E-04	9,93E-04	9,52E-04	4,80E-05	5%	645,76
22	5,2	1,16E-03	1,18E-03	1,11E-03	1,14E-03	3,01E-05	3%	541,47
23	5,3	7,64E-04	7,81E-04	8,78E-04	8,21E-04	5,07E-05	6%	749,15
24	5,4	4,81E-04	4,56E-04	4,03E-04	4,47E-04	3,26E-05	7%	1376,91
25	5,5	1,33E-03	7,50E-04	7,22E-04	7,36E-04	1,44E-05	2%	835,72

Tab. 2.4. 4- Tabella acquisizione dati sonica diretta So4

Da notare il fatto che in corrispondenza del punto 4.4 nel lato martello era stato precedentemente eseguito un carotaggio, quindi non è stato possibile effettuare acquisizioni in quel punto.

La prova ha determinato una velocità media complessiva pari a 729 m/s, tipica di murature di scarsa consistenza, con deviazione standard 278 m/s e coefficiente di variazione pari al 38,10%, indici di un pannello relativamente omogeneo nelle sue scarse caratteristiche. Solo in quattro punti della griglia si misurano velocità soniche superiori ai 1000 m/s, con valore massimo di 1376,91 m/s nel punto 5.4. Il valore più basso misurato è invece 403,81 m/s in corrispondenza del punto 1.5. L'istogramma seguente mostra come i valori siano tra loro abbastanza omogenei e situati a livelli piuttosto bassi.

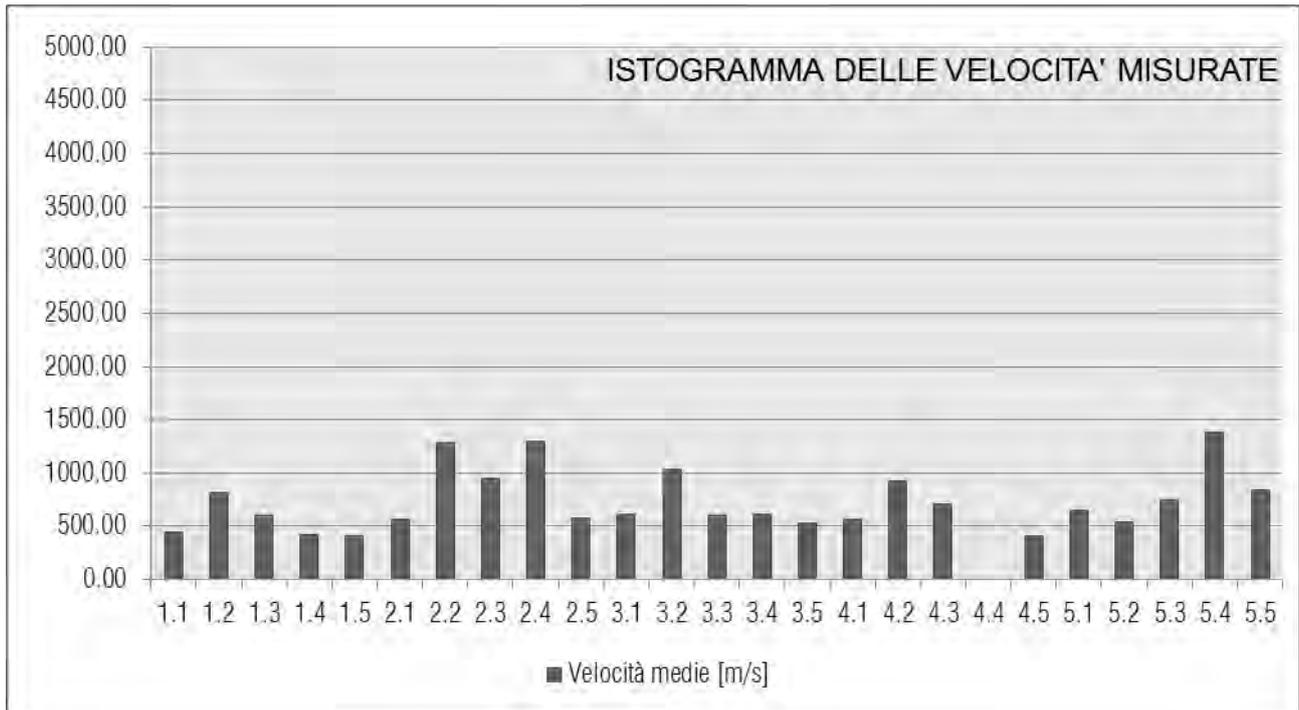


Fig. 2.4. 22- Istogramma velocità soniche  $So_4$  (Museo Archeologico)

L'elaborazione del grafico di distribuzione delle velocità soniche con il programma Surfer ha portato alla luce il problema di come trattare il punto corrispondente al carotaggio. Le metodologie ipotizzate erano porre la velocità in quel punto pari a 0 m/s, oppure pari alla velocità di trasmissione nell'aria cioè 340 m/s, oppure eliminando il punto 4.4 dalla griglia di elaborazione surfer. Dopo un'analisi dei risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno procedere con l'ultima ipotesi, e quindi cancellare il punto 4.4 dalla griglia ed elaborare un grafico in base ai dati di 24 punti e non più 25.

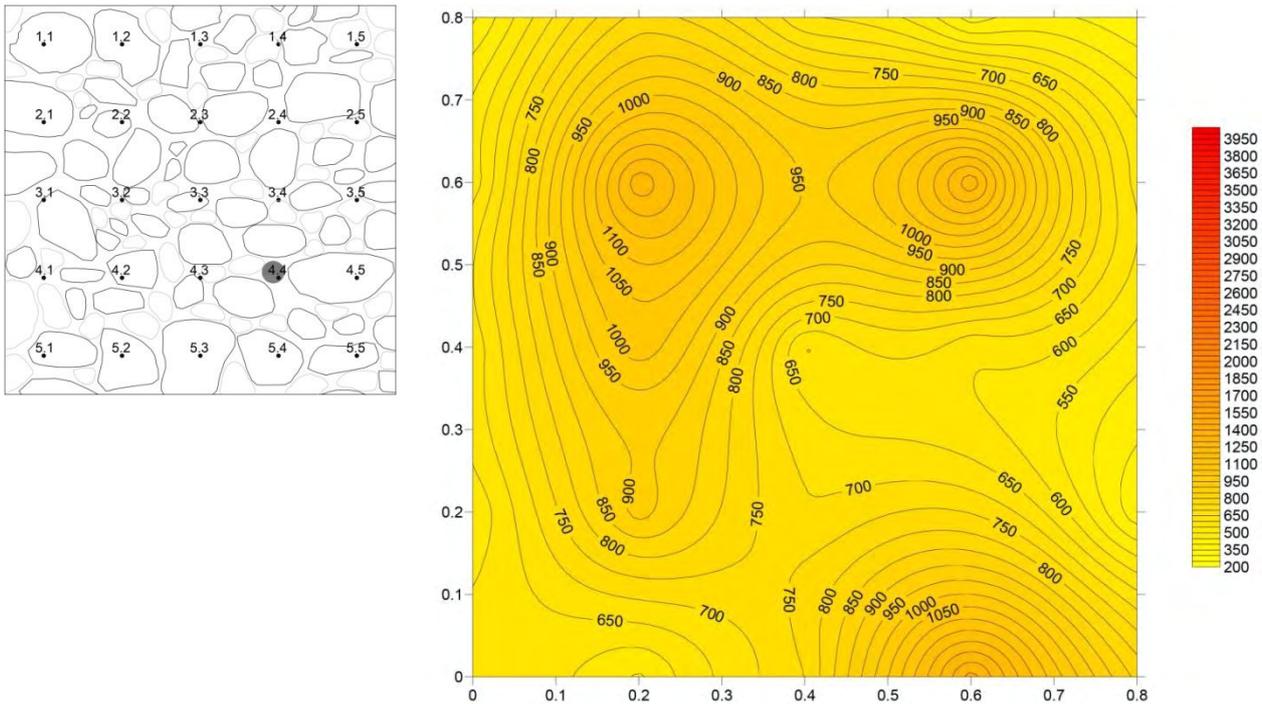


Fig. 2.4. 23 - Griglia di acquisizione e grafico di distribuzione delle velocità soniche  $So_4$ (Museo Archeologico)

### 2.4.3. Prove soniche tomografiche pre-iniezione

Le prove soniche tomografiche pre-iniezione sono state svolte nei stessi campi prova delle soniche dirette, in ogni campo sono state analizzate due sezioni, una orizzontale e una verticale.

#### 2.4.3.1. Campo prova 1

TM<sub>01A</sub>

Il campo prova 1 è l'unico situato al quinto livello. La prova è stata eseguita nei cinque punti corrispondenti alla riga 6 della griglia utilizzata per la sonica diretta  $So_1$ .

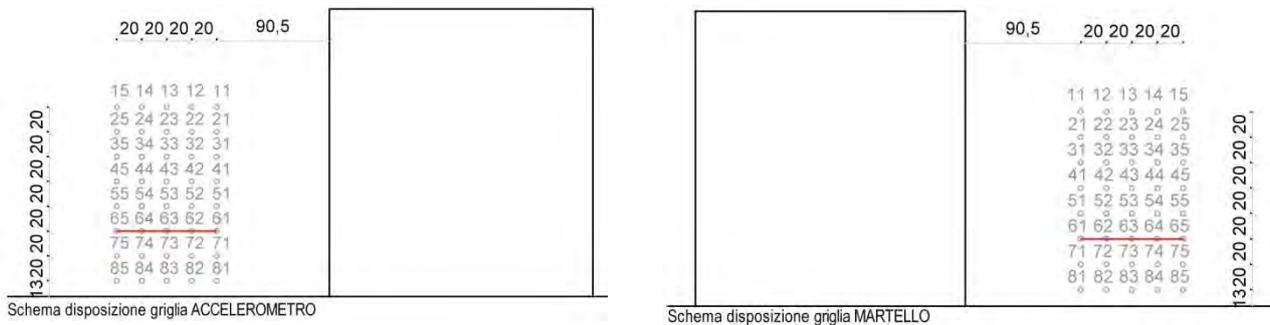
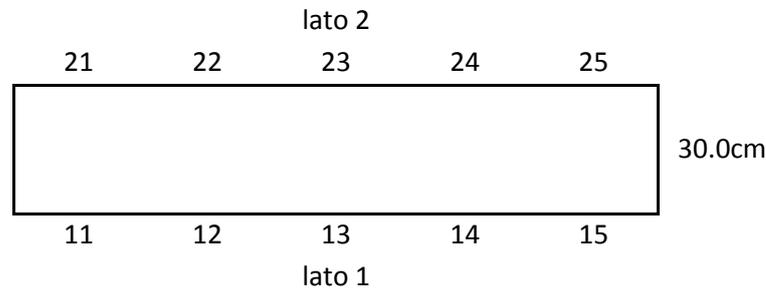


Fig. 2.4. 24 - Schema disposizione griglia TM<sub>01A</sub>(Museo Archeologico)

Sono state effettuate tre acquisizioni per ogni punto. Ai punti esaminati è stato assegnato un numero indicativo in cui la prima cifra corrisponde al lato di acquisizione e il secondo è un numero progressivo, come nello schema seguente.



Sono stati raccolti i tempi registrati con le tre acquisizioni e le relative velocità, oltre alla distanza effettiva tra i punti, questi dati sono stati quindi elaborati ottenendo il grafico di distribuzione delle velocità sonore all'interno della sezione mediana del pannello. Dal grafico possiamo osservare una sezione omogenea con valori di scarsa consistenza, leggermente più alti nella sinistra della sezione, in corrispondenza dei punti 1.5 e 2.5, dove si è registrata infatti la maggiore velocità di trasmissione.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	22.5	426
2.5	7.5	368
17.5	22.5	424
17.5	7.5	340
32.5	22.5	384
32.5	7.5	340
47.5	22.5	415
47.5	7.5	423
62.5	22.5	382
62.5	7.5	525
77.5	22.5	538
77.5	7.5	723

Tab. 2.4. 5- Tabella velocità sonore tomografiche TMO1A (Museo Archeologico)

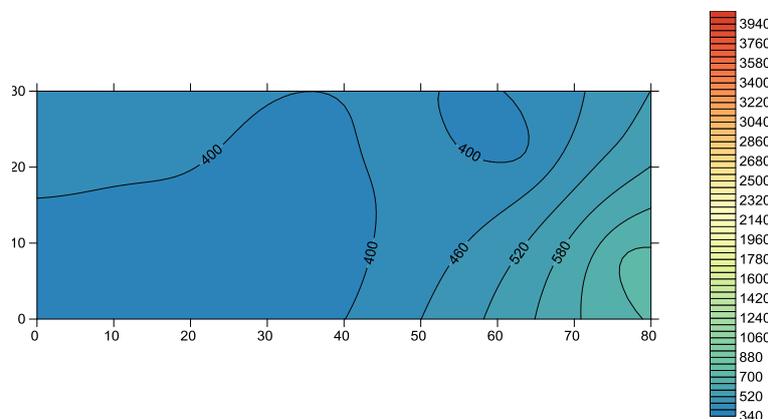


Fig. 2.4. 25 - Grafico di distribuzione velocità sonore tomografiche TMO1A (Museo Archeologico)

TM01B

Il campo prova su cui è stata eseguita la TM01B è lo stesso della TM01A ma la tomografia è in direzione verticale. Sono stati scelti i cinque punti verticali della colonna 3 posti più in basso, cioè nei punti 8.3, 7.3, 6.3, 5.3, 4.3 e sono stati registrati i dati come per la prova precedente.

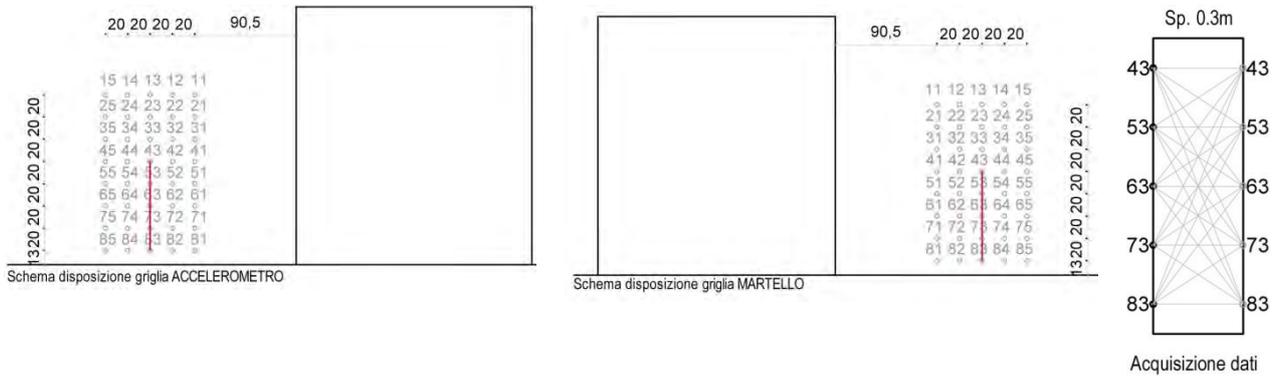
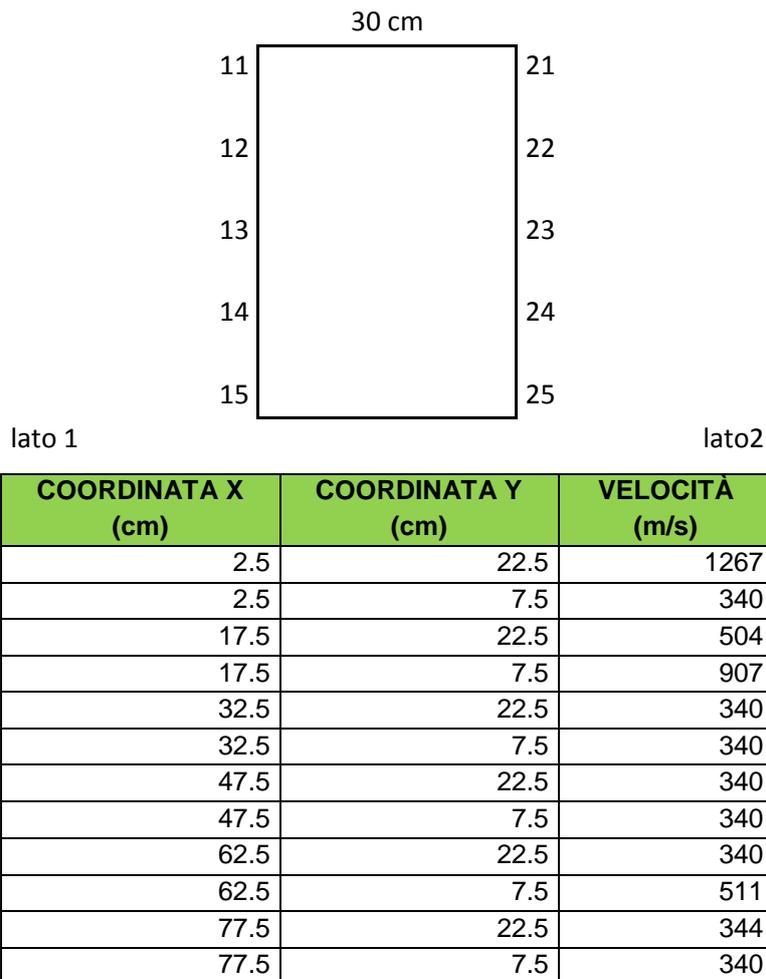


Fig. 2.4. 26 - Schema disposizione griglia TM01B (Museo Archeologico)



Tab. 2.4. 6 Tabella velocità soniche tomografiche TM01B (Museo Archeologico)

Dall'elaborazione dei dati è stata quindi ottenuta l'immagine surfer sottostante dove è possibile notare infatti l'area superiore più chiara, e quindi corrispondente a velocità maggiori, e via via verso il basso più blu, e quindi con velocità minori con una grande area bianca al centro corrispondente all'area dove la velocità è minore di 340 m/s e quindi della velocità di trasmissione nell'aria.

La velocità media massima si ha nella trasmissione del segnale tra i punti 1.1 e 2.1 ed è pari a 2848 m/s, quella minima non è invece attendibile in quanto, come già detto, minore della velocità di trasmissione nell'aria.

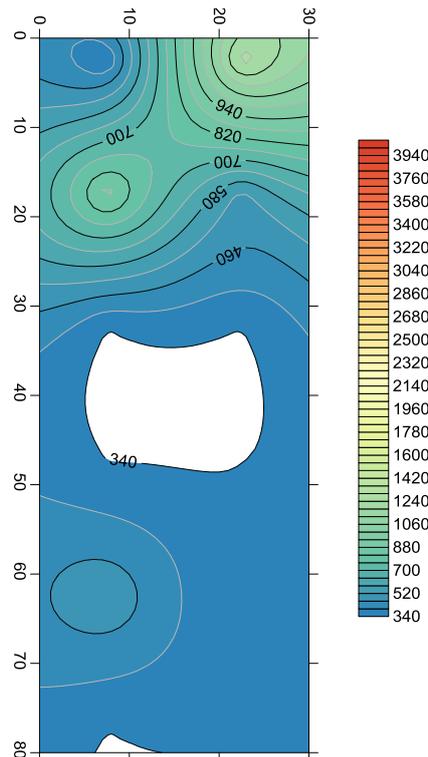


Fig. 2.4. 27- Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche  $TM_{01B}$  (Museo Archeologico)

### 2.4.3.2. Campo prova 2

#### $TM_{02A}$

Il campo prova 2 è quello situato nelle celle di fronte al refettorio al quarto livello, su una muratura spessa 36cm. La tomografia è stata effettuata nella riga di punti centrale, corrispondente alla riga 3, quindi ad un'altezza di 1.04m dal pavimento. Anche in questo caso sono state effettuate tre acquisizioni per ogni punto, cioè in ogni punto del lato martello sono stati battuti tre colpi, e nella registrazione dei dati ogni punto è stato nominato con due numeri di cui il primo sta ad indicare il lato in cui si trova. Quindi il punto 3.5 della griglia 20x20cm, del lato martello, corrisponde al punto 1.1 della tomografia e il punto 3.5 del lato accelerometro, cioè il corrispondente punto sul retro, al punto 2.1.

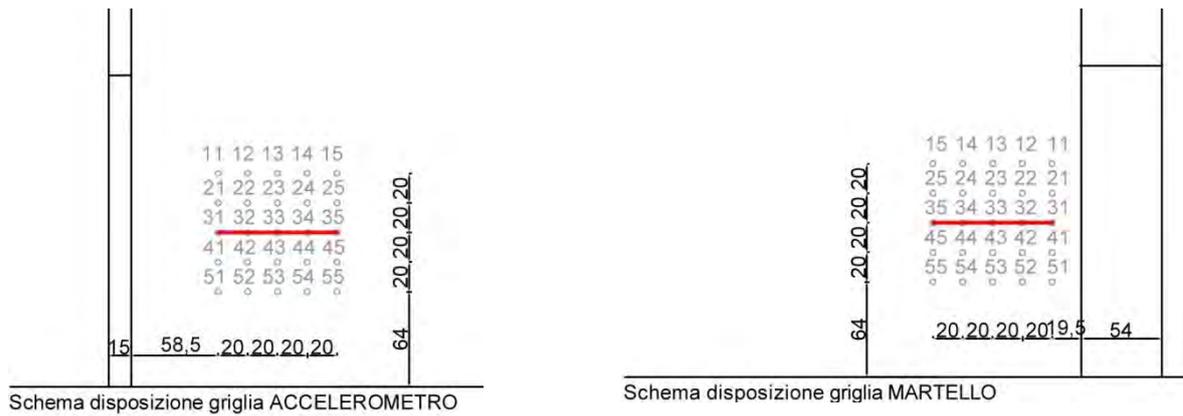
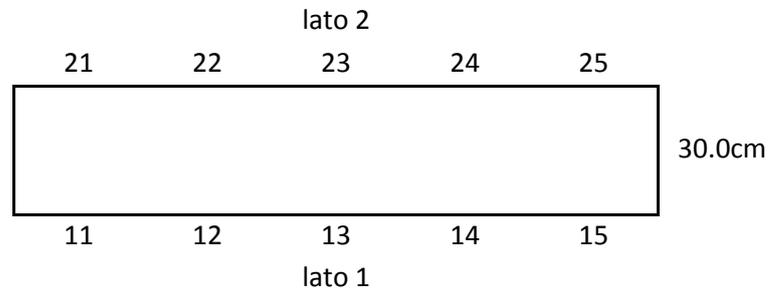


Fig. 2.4. 28 - Schema disposizione griglia TMO2A (Museo Archeologico)



COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
4	27	638
4	9	894
22	27	620
22	9	750
40	27	722
40	9	585
58	27	901
58	9	838
76	27	1232
76	9	890

Tab. 2.4. 7 - Tabella velocità soniche tomografiche TMO2A (Museo Archeologico)

Come possiamo vedere dalla tabella le velocità medie di trasmissione delle onde in questo caso non sono molto omogenee ma tutti i dati sono comunque attendibili, nessun valore infatti è minore della velocità di trasmissione delle onde nell'aria. Questi dati sono ben visibili nell'immagine grafica sottostante, vediamo infatti una zona con velocità minori, e quindi con una muratura di peggiore qualità, tra i punti 1.3 e 2.2, e invece una zona con velocità maggiori sulla destra in corrispondenza dei punti 1.5 e 2.5.

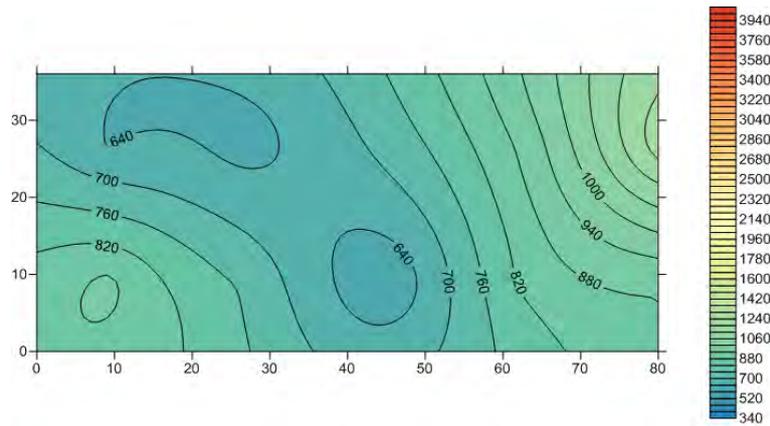


Fig. 2.4. 29 - Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMO2A (Museo Archeologico)

TMO2B

Il campo prova della tomografia TMO2B è lo stesso della TMO2A, cioè il campo prova due posto nelle celle davanti il refettorio. In questo caso è stata analizzata la sezione corrispondente ai cinque punti della colonna 3, cioè i punti 1.3, 2.3, 3.3, 4.3 e 5.3, e sono stati registrati i dati come nella prova precedente.

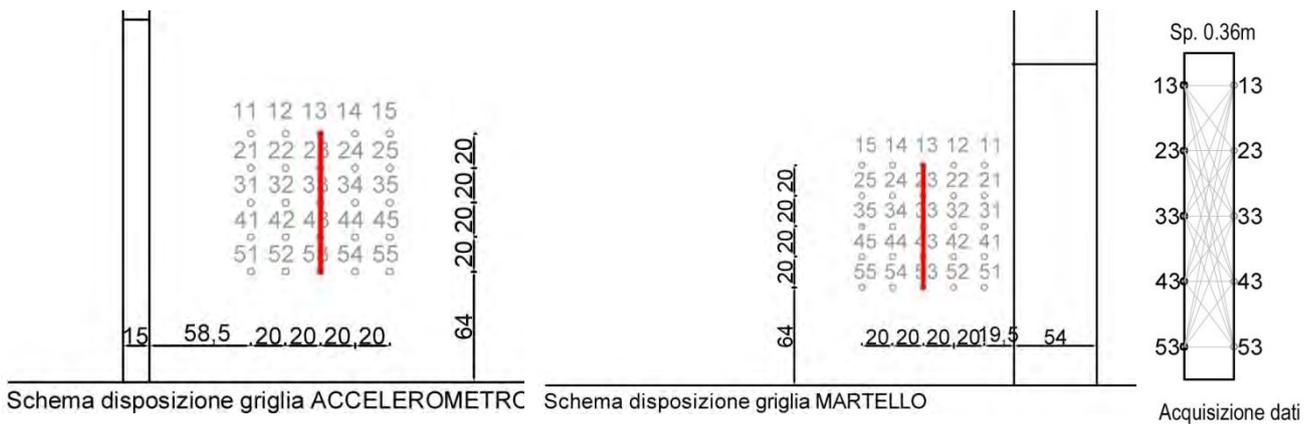
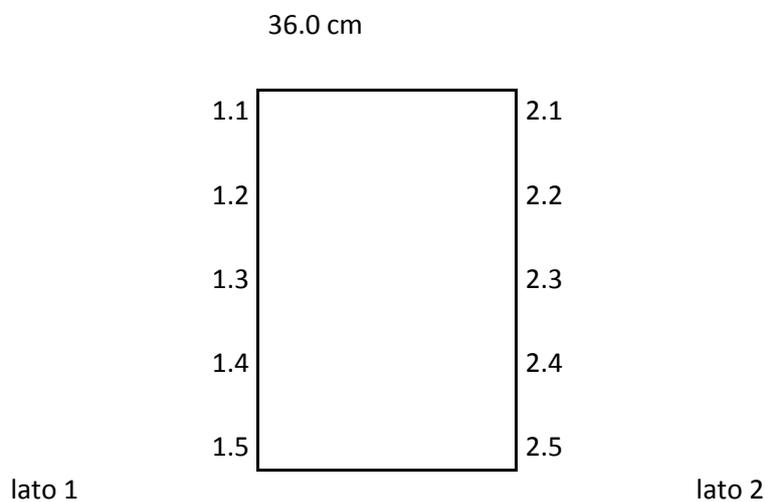


Fig. 2.4. 30- Schema disposizione griglia TMO2B (Museo Archeologico)



COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
4	27	506
4	9	701
22	27	586
22	9	511
40	27	589
40	9	610
58	27	700
58	9	633
76	27	877
76	9	775

Tab. 2.4. 8 - Tabella velocità soniche tomografiche TMo2B (Museo Archeologico)

Come per la TMo2A non ci sono stati problemi e tutti i dati risultano attendibili, mostrando però minore disomogeneità rispetto al caso precedente, con velocità che non superano mai i 1000 m/s. Dalla mappa grafica possiamo vedere una sezione omogenea con valori leggermente più bassi, che quindi coincidono ad una muratura di qualità minore, al centro della sezione nella parte alta.

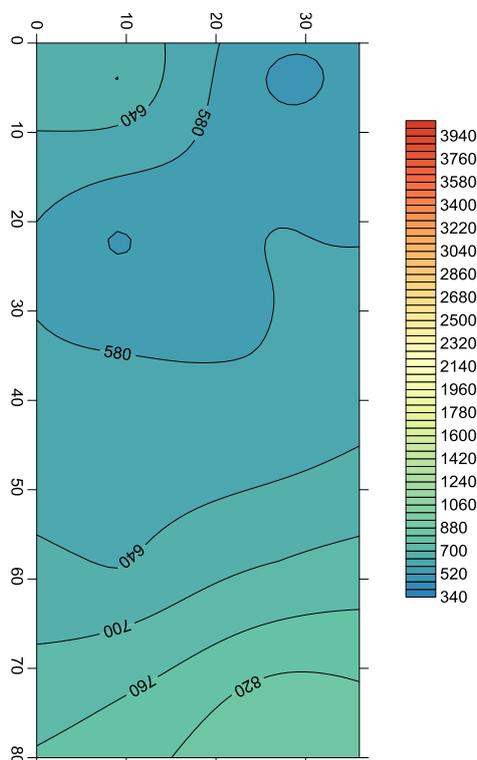


Fig. 2.4. 31 - Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMo2B (Museo Archeologico)

### 2.4.3.3. Campo prova 3

#### TM03A

Il campo prova tre è situato all'interno del chiostro ed è anch'esso costituito da una griglia di dimensioni 80x80 cm con 25 punti. La prova sonora TM03A è stata effettuata nella sezione orizzontale di mezzeria del campo prova e quindi nei punti 3.5, 3.4, 3.3, 3.2, 3.1 che sono stati rinominati con il primo numero identificativo del lato in cui si trovano e il secondo in progressione.

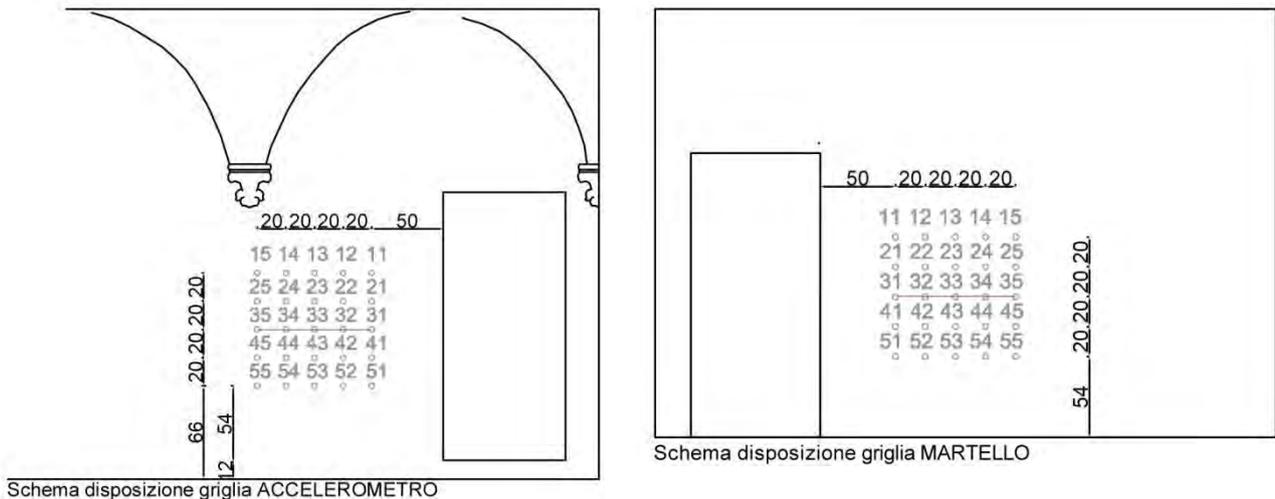
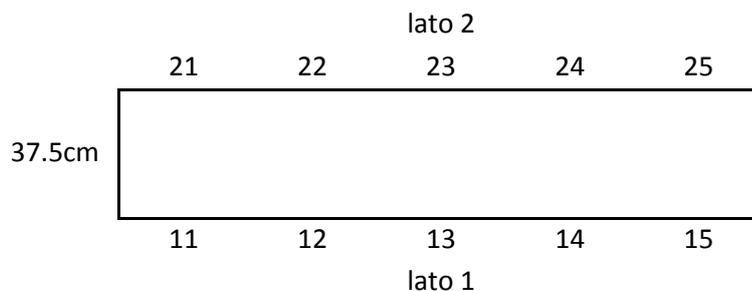


Fig. 2.4. 32 - Schema disposizione griglia TM03A (Museo Archeologico)



Come nei casi precedenti sono stati registrati i tempi di trasmissione dell'onda e la distanza tra i punti, ottenendo così la velocità media. In questo caso ci sono stati dei problemi in fase di indagine e non è stata effettuata la terza battitura sul punto 1.2, quindi in questi casi la media è stata fatta con due valori.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	28.125	508
2.5	9.375	479
21.25	28.125	452
21.25	9.375	418

40	28.125	483
40	9.375	588
58.75	28.125	521
58.75	9.375	519
77.5	28.125	530
77.5	9.375	626

Tab. 2.4. 9 - Tabella velocità soniche tomografiche TMO3A (Museo Archeologico)

Sono stati registrati valori bassi di velocità, indici di una muratura di scarsa qualità con un gran numero di vuoti all'interno, ma complessivamente omogenei come vediamo chiaramente nell'immagine grafica sottostante che non presenta aree con colori particolarmente diversi.

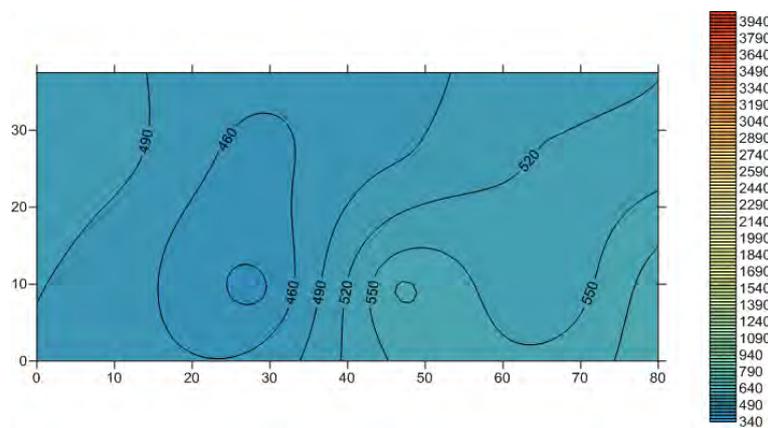


Fig. 2.4. 33- Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMO3A (Museo Archeologico)

### TMO3B

Nel campo prova 3 è stata svolta anche la prova tomografica lungo la sezione verticale, corrispondente quindi ai punti con coordinate 1.3, 2.3, 3.3, 4.3, 5.3 che anche in questo caso sono stati rinominati in progressione da 1.1 a 1.5 nel lato accelerometro, lato dove successivamente è stata effettuata l'iniezione, e da 2.1 a 2.5 nell'altro lato.

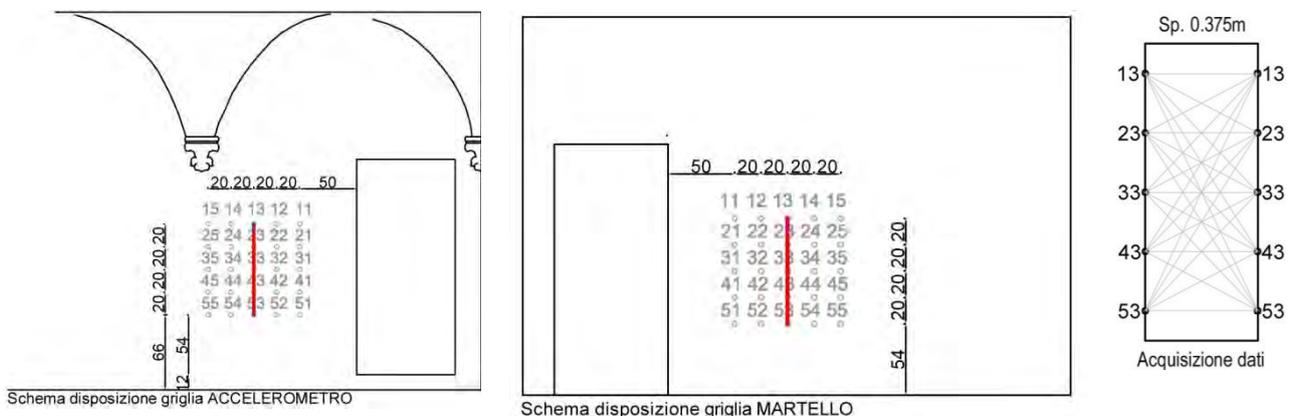
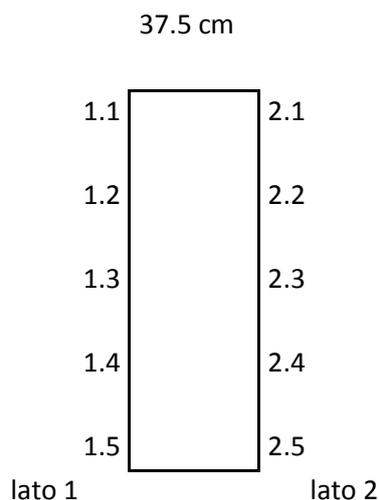


Fig. 2.4. 34 - Schema disposizione griglia TMO3B (Museo Archeologico)



La tabella sottostante indica i tempi di trasmissione dell'onda, la distanza tra i vari punti e quindi la velocità media di trasmissione. Una volta elaborati questi dati è stato possibile ottenere la mappa grafica di distribuzione delle velocità tramite il programma Surfer.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	28.125	622
2.5	9.375	454
21.25	28.125	589
21.25	9.375	657
40	28.125	589
40	9.375	680
58.75	28.125	590
58.75	9.375	595
77.5	28.125	478
77.5	9.375	579

Tab. 2.4. 10 - Tabella velocità soniche tomografiche TMO<sub>3</sub>B (Museo Archeologico)

Dalla mappa grafica della sezione ottenuta tramite il programma surfer possiamo notare una sezione mediamente di scarsa qualità muraria con una zona con caratteristiche migliori in mezzeria tra i punti di coordinate 1.3 e 1.4.

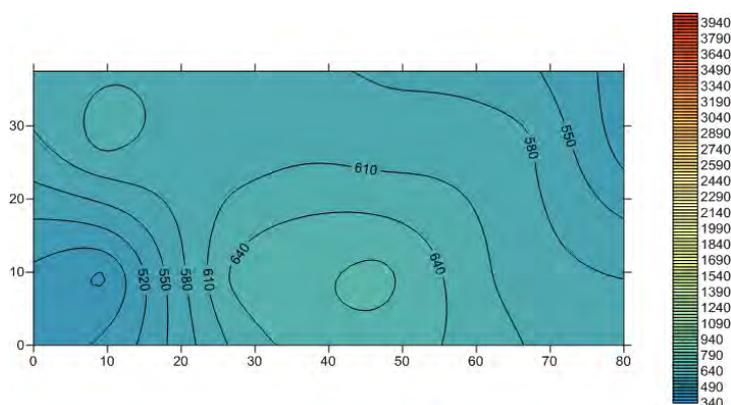


Fig. 2.4. 35 - Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMO<sub>3</sub>B (Museo Archeologico)

2.4.3.4. Campo prova 4

TMo4A

Il campo prova 4 è situato tra le scale e il chiostro al quarto livello, ed è caratterizzato da una muratura spessa 61.5cm. La sezione indagata nella prova tomografica TMo4A è quella corrispondente ai punti 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 della griglia di 80 cm usata per la prova sonica diretta So4. In questo caso non è stata scelta la sezione di mezzeria ma questa per posizionarsi più lontano dal vuoto lasciato da un carotaggio effettuato nell'ambito di una campagna di indagine precedente, situato nel punto 4.4.

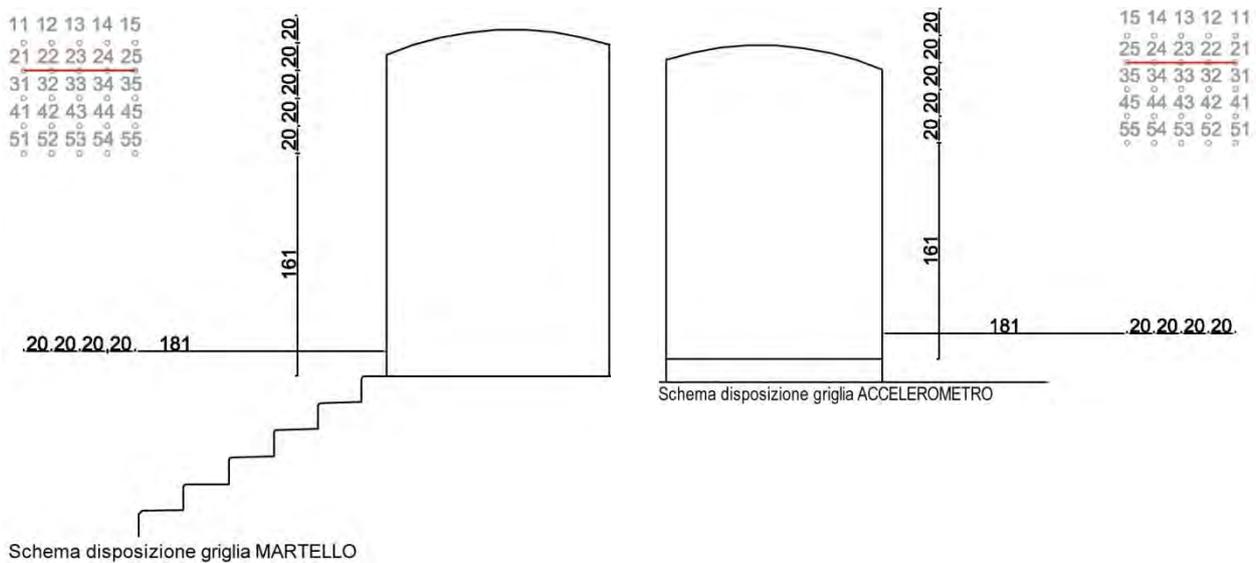
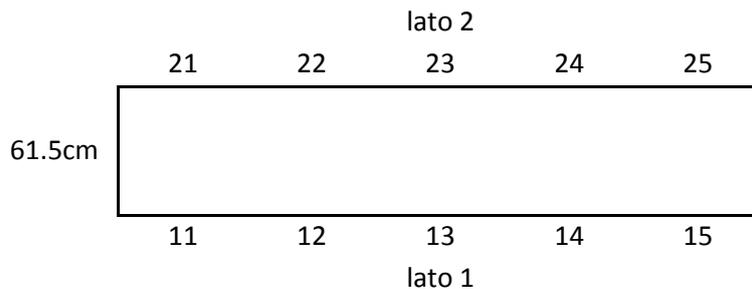


Fig. 2.4. 36 - Schema disposizione griglia TMo4A (Museo Archeologico)



Nella tabella seguente sono stati registrati i tempi di trasmissione del segnale e la distanza tra i punti, che ha permesso di calcolare così la velocità media e elaborando questi dati sono state trovate le velocità medie nei vari punti della sezione.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
-1	51.25	631
-1	30.75	941
-1	10.25	470
19.5	51.25	583
19.5	30.75	657
19.5	10.25	694

40	51.25	601
40	30.75	535
40	10.25	584
60.5	51.25	435
60.5	30.75	455
60.5	10.25	462
81	51.25	443
81	30.75	853
81	10.25	423

Tab. 2.4. 11- Tabella velocità soniche tomografiche TMo4A (Museo Archeologico)

Dalla mappa grafica della sezione ottenuta mediante surfer vediamo una sezione abbastanza omogenea con due punti dove è stata registrata una velocità meggiora e quindi una muratura migliore, molto probabilmente corrispondenti a due blocchi di pietra di grandi dimensioni.

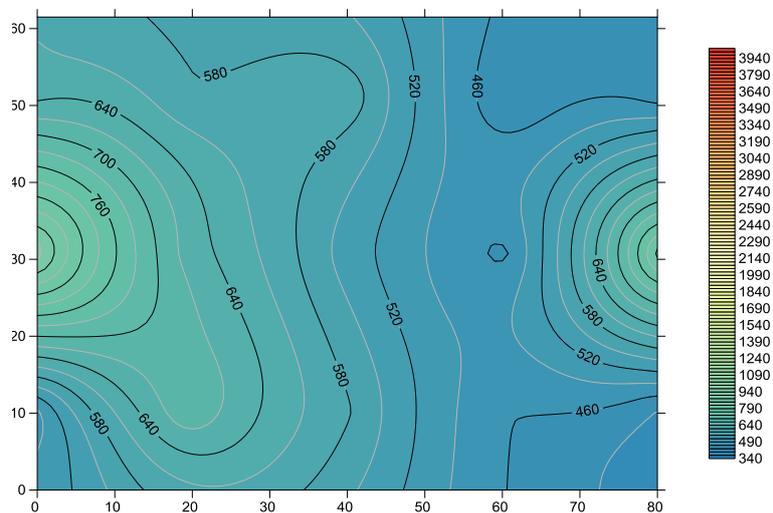


Fig. 2.4. 37 - Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMo4A (Museo Archeologico)

#### TMo4B

Nello stesso campo prova è stata effettuata anche la TMo4B che analizza una sezione verticale, e in questo caso è stata scelta quella corrispondente ai punti 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 della prova sonica diretta So4 effettuata in questo campo prova. E' stata scelta questa sezione per posizionarsi il più lontano possibile dal vuoto lasciato dal carotaggio effettuato nel punto 4.4 nell'ambito di una precedente sperimentazione.

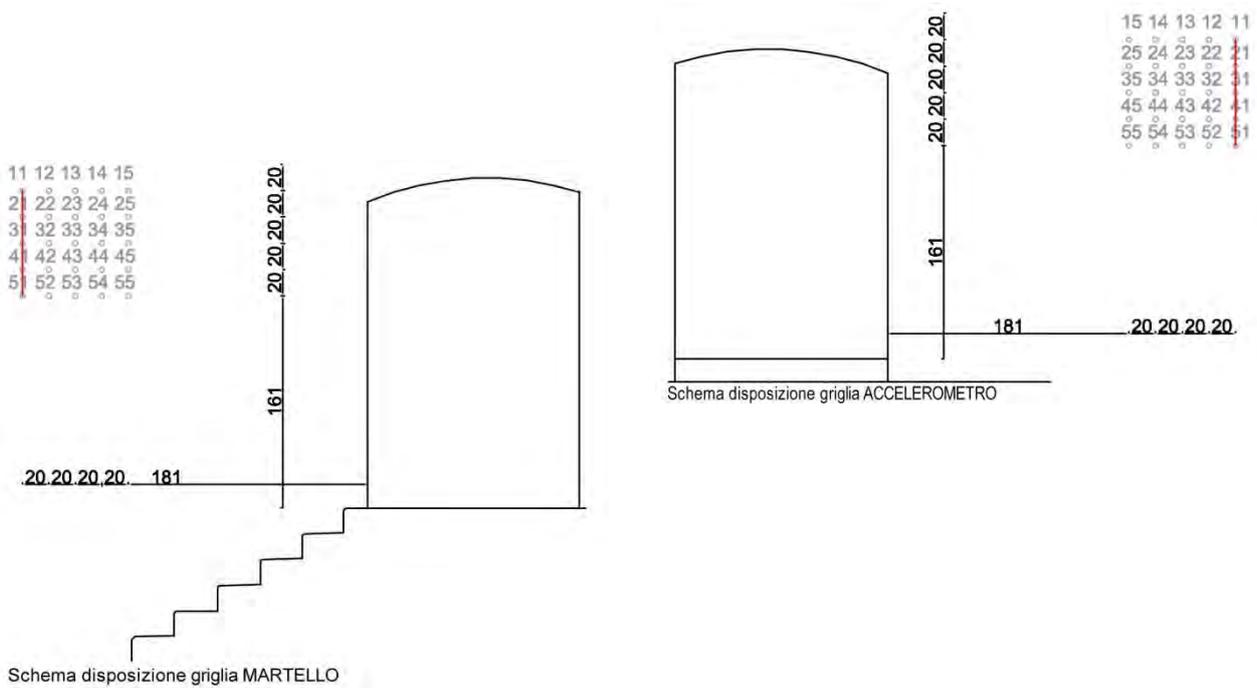
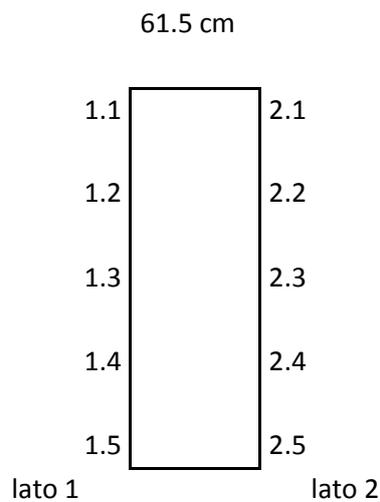


Fig. 2.4. 38 - Schema disposizione griglia TMo4B (Museo Archeologico)



Nella tabella seguente vediamo i valori di velocità nei vari punti della sezione, ricavati elaborando i dati registrati, cioè i tempi di trasmissione del segnale tra i vari punti e la distanza tra i punti.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
-1	51.25	451
-1	30.75	845
-1	10.25	1159
19.5	51.25	622
19.5	30.75	700
19.5	10.25	665

40	51.25	472
40	30.75	581
40	10.25	631
60.5	51.25	764
60.5	30.75	642
60.5	10.25	499
81	51.25	996
81	30.75	575
81	10.25	430

Tab. 2.4. 12 - Tabella velocità soniche tomografiche TMo4B (Museo Archeologico)

Nel grafico di distribuzione delle velocità soniche sottostante vediamo una sezione abbastanza omogenea con due aree caratterizzate velocità leggermente più alte, avidenziate dal colore verde.

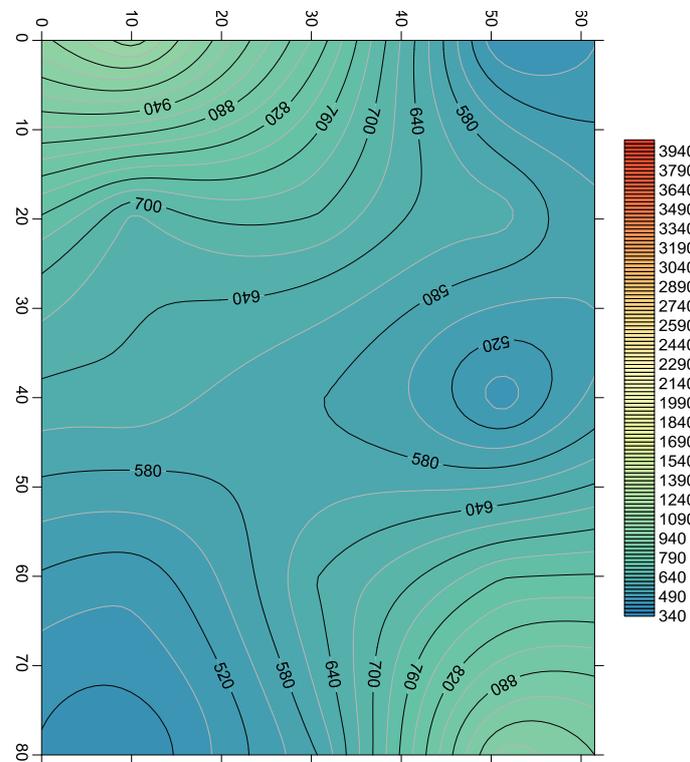


Fig. 2.4. 39 - Grafico di distribuzione velocità soniche tomografiche TMo4B (Museo Archeologico)

### 2.4.4. Ulteriori indagini conoscitive svolte mediante prove non-distruttive

Nell'ambito della campagna di indagine al Museo Archeologico di Verona sono state svolte ulteriori indagini conoscitive tramite termografie e georadar.

Queste indagini sono state svolte al livello 5, sopra al chiostro, nei campi prova dove sono state eseguite le tomografie TMo7 e TMo8.

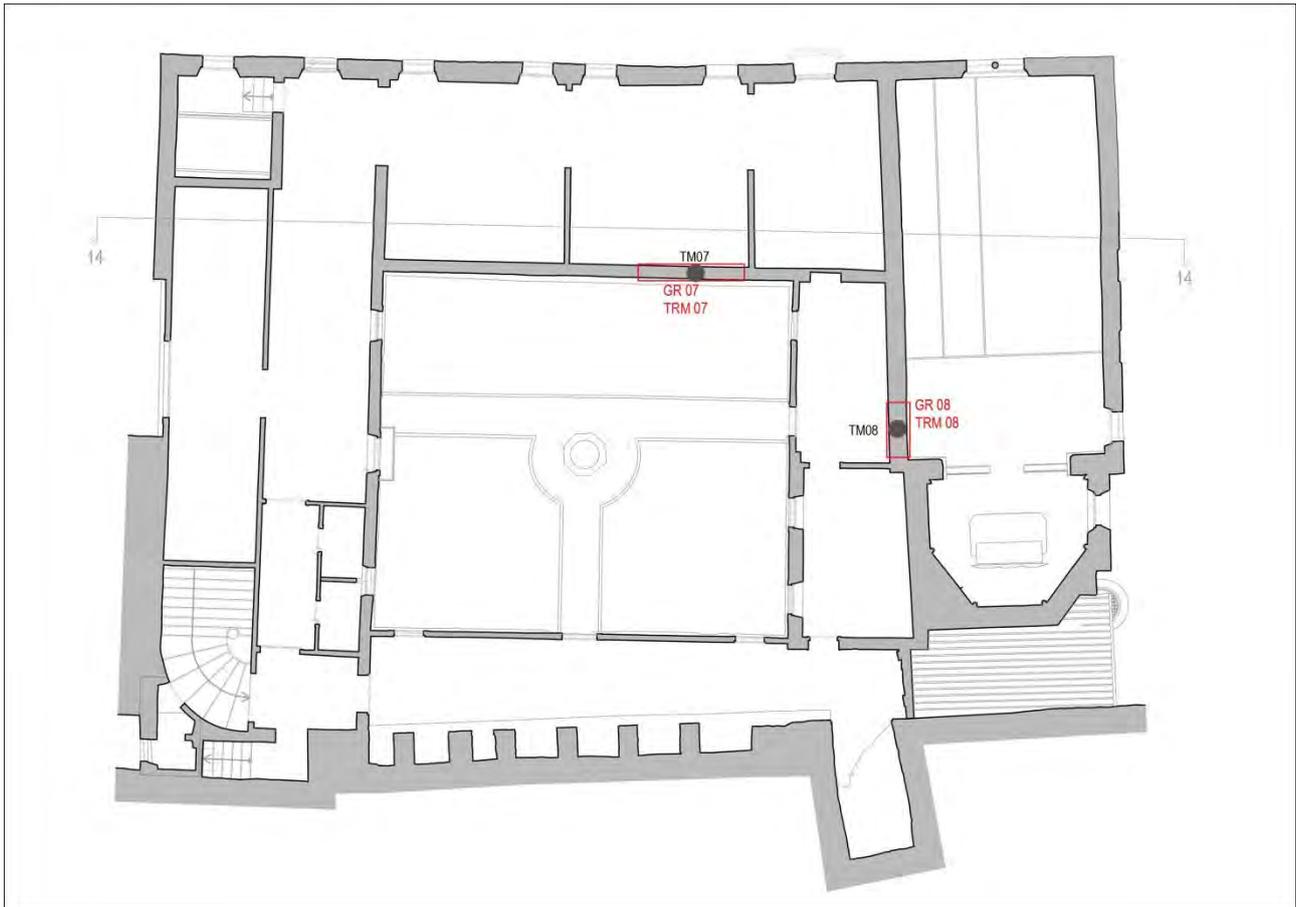


Fig. 2.4. 40 - Localizzazione prove termografiche e georadar, livello V (Museo Archeologico)

#### Termografie

Le indagini termografiche, come già visto al capitolo 2.1.1.4, si basano sulla diversa conducibilità termica di ogni materiale, quindi ogni oggetto una volta riscaldato vedrà i suoi componenti assumere temperature diverse in funzione di essa.

Nel caso del Museo Archeologico sono state eseguite due termografie, nella pianta segnate come TRMo7 e TRMo8, ma non hanno dato risultati degni di nota. Le due zone sono state infatti scaldate con una lampada, in quanto poste in una zona non sufficientemente esposta al sole e la lampada non ha permesso di scaldare sufficientemente la muratura non creando così un gradiente sufficiente a evidenziare disomogeneità all'interno della muratura.

## Georadar

Nei stessi due pannelli sono state effettuate due indagini mediante georadar, esse si basano sull'emissione di un flusso di energia elettromagnetica che viene alterato dagli oggetti incontrati durante il suo percorso, e questa alterazione può essere rilevata mediante gli echi di ritorno.

In particolare nella TRMo8 è stato interessante il confronto con la prova tomografica effettuata nello stesso campo prova, la TMo8.

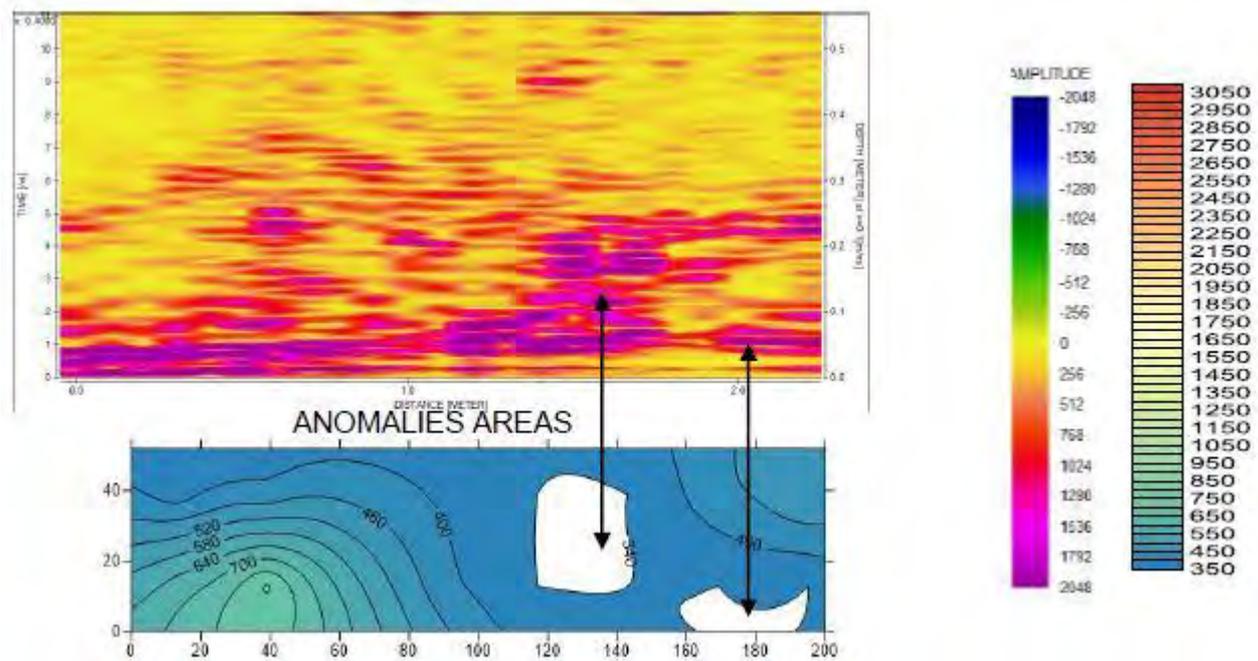


Fig. 2.4. 41 - Prova tomografica e georadar, (Cescatti et al. 2015, Museo Archeologico)

Vediamo infatti come le due prove evidenzino anomalie nella stessa zona, dovute molto probabilmente alla presenza di vuoti o ad una porzione di parete maggiormente danneggiata. In particolare il vuoto più grande è dovuto alla presenza di una canna fumaria, come è stato poi verificato durante l'intervento di sostituzione del tetto.

## 2.4.5. Intervento di consolidamento mediante iniezioni

Come primo passo di questa fase, la ditta impegnata nell'intervento di restauro in atto al Museo Archeologico ha provveduto a preparare il pannello effettuando la scarifica dell'intonaco e la scarnitura dei giunti deteriorati per permettere la ristilatura, effettuata con GeoCalce Fino. Dopo di ciò sono stati effettuati fori per l'inserimento delle cannule di iniezione, attorno alle quali è stata applicata della malta per evitare la fuoriuscita di liquidi dall'intorno del foro.

### 2.4.5.1. Campo prova 1

Il giorno 18 marzo 2014 era previsto il lavaggio del pannello murario situato al quinto livello dell'edificio. Il campo prova si presentava ristilato in modo parziale, solo nell'intorno delle cannule di iniezione. Le cannule e i rispettivi fori sono stati numerati secondo una numerazione crescente da sinistra a destra e dall'alto verso il basso, come si può vedere nella foto sottostante, per permettere la registrazione dei dati durante la fase di iniezione.



*Fig. 2.4. 42 - Numerazione delle cannule (Museo Archeologico)*

In questo campo prova sono state posizionate 28 cannule nel lato di iniezioni, corrispondente al lato martello, e due cannule di controllo per verificare eventuali fuoriuscite nel lato opposto, corrispondente al lato accelerometro.

La fase successiva consiste nel lavaggio della muratura, iniettando acqua con la stessa pompa che verrà usata per l'iniezione della miscela, e con le stesse modalità, quindi procedendo dal basso verso l'alto. Inoltre sono stati registrati i dati sulle fuoriuscite e sui tempi di iniezione anche durante la fase di lavaggio per esercitarsi sulle metodologie corrette da seguire durante l'iniezione della miscela. Già dopo il lavaggio delle prime cannule si è notato un grosso problema relativo alla ristilatura del pannello. Essendo infatti molto deteriorato ed essendo stati sigillati solo i fori nell'intorno delle cannule, si sono verificate ingenti fuoriuscite di acqua dalle numerose fessure, andando così ad impedire un completo lavaggio della muratura. Ancor più importante il fatto che queste fessure avrebbero impedito il corretto svolgimento dell'intervento di iniezione di miscela poiché a causa di esse si sarebbero rilevate numerose fuoriuscite, il che avrebbe impedito una completa iniezione del paramento. Per questo motivo si è deciso di far ristilare nuovamente

i giunti alla ditta, e siccome questo pannello era formato da pietre molto frammentate e di piccole dimensioni non è stato possibile effettuare una ristilatura dei giunti ma è stato applicato uno strato di malta sull'intero pannello.



Fig. 2.4. 43 - Prima ristilatura parziale dei giunti e successiva ristilatura completa (Museo Archeologico)

Dopo questa operazione è stato possibile effettuare il lavaggio della muratura, effettuato il giorno 20 marzo 2014. Il lavaggio ha evidenziato ingenti fuoriuscite nel prospetto posteriore del pannello in corrispondenza di un grande vuoto alla base e questo è stato influenzato anche dal fatto che in questo campo prova la muratura è a due paramenti e non tre. Successivamente questo vuoto è stato ulteriormente riempito di malta.

In questo campo la miscela utilizzata è Albaria™ Iniezione prodotta dalla ditta BASF, una boiaccia di calce pozzolanica priva di cemento di colore bianco per le iniezioni di consolidamento della muratura. Come prima fase è stata effettuata la miscelazione del prodotto con acqua, secondo le prescrizioni presenti nella scheda tecnica, quindi aggiungendo per ogni sacco di miscela del peso di 15kg una quantità d'acqua pari a 5,7litri. La miscelazione è stata effettuata con un miscelatore elettrico a immersione.

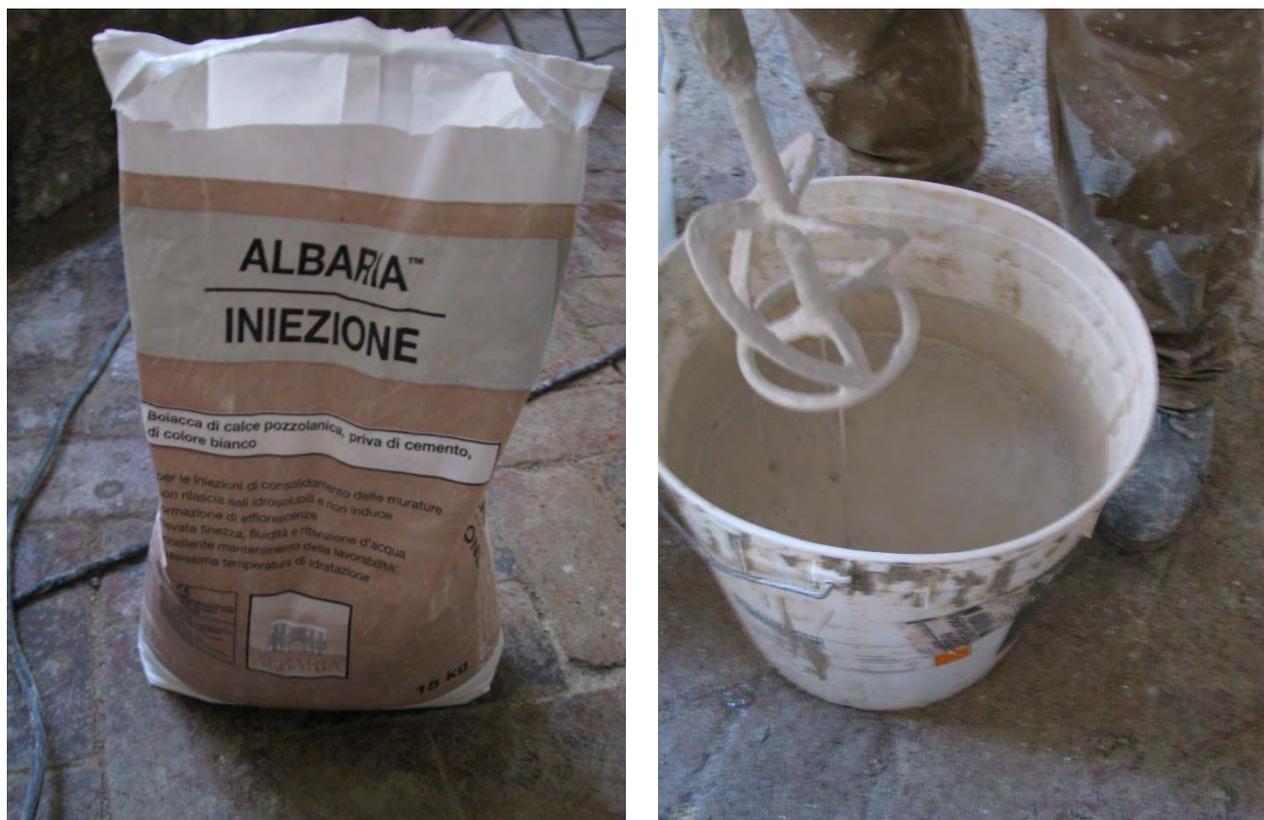


Fig. 2.4. 44- Sacco di miscela Albaria e miscelazione mediante miscelatore elettrico a immersione (Museo Archeologico)

L'iniezione è stata effettuata procedendo dalla riga più bassa a quella più alta e da destra a sinistra, quindi i primi punti iniettati sono stati il 28,27 e 26. Durante il procedimenti sono stati annotati nell'apposita tabella i seguenti dati:

- Foro iniettato
- Coordinate orizzontali e verticali del foro rispetto un punto della griglia [cm]
- Tempo di iniezione per ogni foro [s]
- Pressione media durante l'iniezione [bar]
- Foro o fessura da cui fuoriesce la miscela

Tramite questi dati si sono potuti ricavare i litri iniettati per ogni foro e la portata.

PANNELLO INIETTATO: S01 (ALBARIA, 3 sacchi)			
FORO INIETTATO	TEMPO	FORI DA CUI FUORIESCE	PRESSIONE (bar)
28	0m 21s	Fuoriesce dal buco presente sul retro	0
28bis	1m 0s	Fuoriesce dalla fessura n° 1 e dalla fessura n°17 sul retro	0,3
27	0m 29s	Fuoriesce dalla fessura n° 2	0,2

26	0m 9s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,2
25	0m 25s	Fuoriesce dalla fessura n°3	0,4
24	0m 27s	Fuoriesce dallo stesso foro e dalla fessura n°18 sul retro	0,2
23	0m 30s	Fuoriesce da sotto il foro	0,2
22	1m 10s	Fuoriesce dal foro 21, e dalla fessura n° 6 e dalla fessura n°19 sul retro	0,4
21	0m 4s	Fuoriesce dal foro 22	0,4
21bis	4s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
20	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
18	0m 7s	Fuoriesce dal foro 1 sul retro	0,1
17	0m 6s	Fuoriesce dalla fessura n°4 a fianco al foro	0,2
19	0m 17s	Fuoriesce dalla fessura n°5	0,2
Stuccatura dei fori			
16	0m 6s	Fuoriesce dalla fessura n°7	0,3
11	0m 4s	Fuoriesce da sotto il foro nella fessura n°12	0,2
12	0m 3s	Fuoriesce da sotto il foro nella fessura n°13	0,3
13	0m 3s	Fuoriesce da sotto il foro nella fessura n°14	1
14	0m 6s	Fuoriesce da sotto il foro nella fessura n°15	1
15	0m 36s	Nessuno	0,1
15bis	0m 32s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
8	0m 36s	Fuoriesce dalla fessura n°8	0,8
9	0m 3s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
10	0m 6s	Fuoriesce dalla fessura n°20 sul retro	1
4	0m 6s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
5	0m 15s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
6	0m 28s	Fuoriesce dal foro 7 e dalla fessura n°9	0,4
1	0m 33s	Fuoriesce dal retro e dalla fessura n°10	0,2
2	0m 4s	Fuoriesce da sopra il foro nella fessura n°16	0,2
3	0m 35s	Fuoriesce dalla fessura n°11	0,4
1dietro	0m 17s	Fuoriesce dallo stesso foro	1

Tab. 2.4. 13 - Tabella di annotazione iniezioni campo prova 1 (Museo Archeologico)

Numero sacchi = 3	Peso confezione = 15 kg/conf	LITRI TOTALI INIETTATI = 33,33
Eccedenza [l] = 0	Resa da scheda = 1,35 kg/l	

Dopo l'iniezione nella prima cannula, la numero 28, è stato necessario stuccare nuovamente il grande vuoto nel retro del pannello poiché si aveva una grande fuoriuscita di miscela senza che la pompa andasse in pressione, indice quindi che la miscela fluiva direttamente fuori. Inoltre dopo l'iniezione nella cannula 19 è stata necessaria un'ulteriore stuccatura attorno alle cannule. Questo problema è stato causato dal fatto che la ristilatura era stata rifatta la mattina stessa dell'iniezione, quindi la malta non era ancora indurita. Infatti in più di un caso, appena la pompa andava in pressione, la malta fuoriusciva direttamente sotto la

cannula da cui veniva iniettata, questo poiché la resistenza che incontrava all'interno del pannello era maggiore di quella fornita dalla malta non ancora indurita.

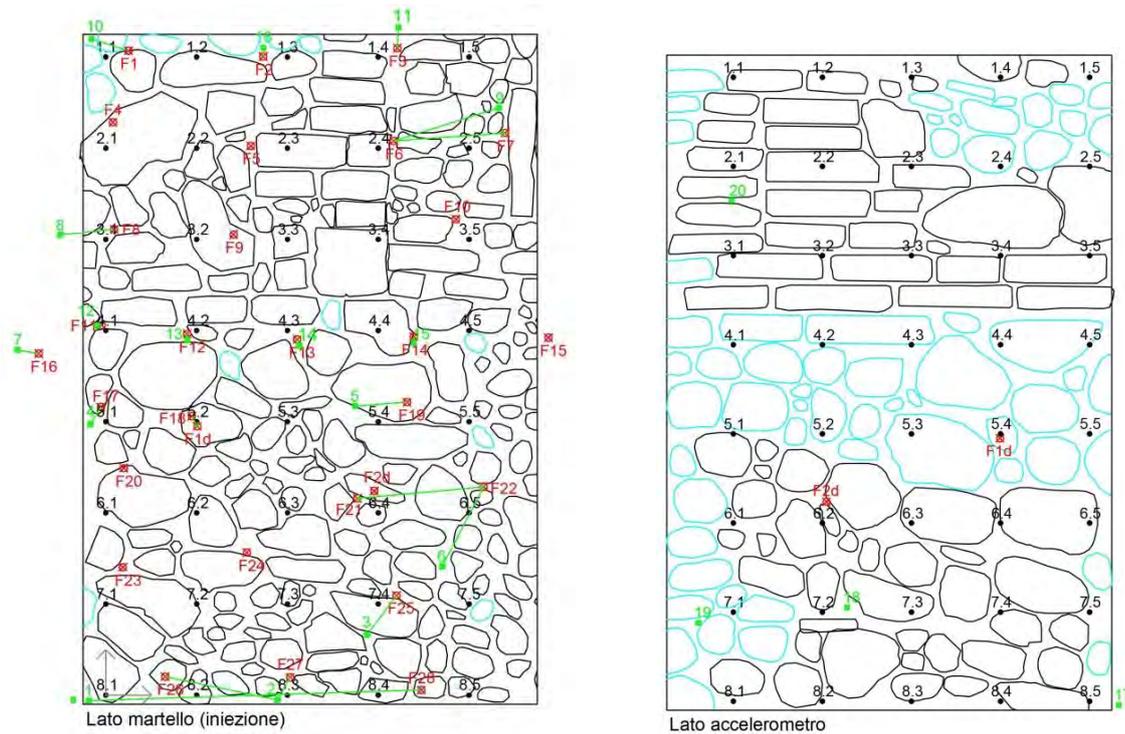


Fig. 2.4. 45- Prospetti So1 con fori di iniezione e percorsi della miscela (Museo Archeologico)

In questi prospetti sono rappresentati in nero i punti della griglia di acquisizione, in rosso i fori di iniezione e in verde i percorsi seguiti dalla miscela e le relative fessure di fuoriuscita.

Inserendo la griglia X,Y,Z composta dalle coordinate orizzontali e verticali dei fori di iniezione e dal numero di litri iniettati per foro nel programma Surfer, abbiamo ottenuto il grafico di distribuzione della miscela iniettata nel pannello che permette di visualizzare graficamente le zone in cui è stata iniettata una maggiore o minore quantità di miscela. Tuttavia questo grafico è solo indicativo poiché rappresenta la quantità di miscela iniettata per ogni foro, ma non può tenere conto dei percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento murario.

Foro iniettato	Posizione X [cm]	Posizione Y [cm]	Litri [l]
28	69.50	138.90	0.57
28bis	69.50	138.90	2.42
27	40.60	136.10	1.62
26	13.10	135.90	0.24
25	64.00	118.20	1.35
24	31.00	108.70	0.73
23	3.70	111.90	0.81

22	83.20	94.30	3.77
21	55.40	96.80	0.22
21bis	55.40	96.80	0.43
20	3.90	90.20	0.86
18	18.90	78.80	0.09
17	-1.10	76.80	0.16
19	66.30	75.70	0.46
16	-14.80	65.10	0.24
11	-0.90	58.80	0.11
12	17.90	60.70	0.12
13	42.10	61.90	0.40
14	67.00	61.30	0.81
15	97.50	61.60	0.48
15bis	97.50	61.60	4.31
8	1.80	37.80	3.88
9	28.10	38.90	0.40
10	77.10	35.60	0.81
4	1.60	14.30	0.65
5	31.90	19.50	2.02
6	63.40	18.40	1.51
7	87.90	16.70	0.00
1	5.00	-1.40	0.00
2	34.70	-0.10	0.11
3	64.20	-1.90	1.88
1dietro	-	-	2.29

Tab. 2.4. 14 - Tabella litri iniettati campo prova 1 (Museo Archeologico)

Si può considerare come in questo caso vi siano alcune fuoriuscite dallo stesso foro di iniezione ma sono presenti anche un buon numero di fuoriuscite da fori o fessure circostanti, il che dimostra come ci sia stata una buona distribuzione della miscela all'interno del paramento il quale infatti presentava caratteristiche di scarsa consistenza e quindi di una gran presenza di vuoti. Inoltre in più di un caso si è verificata una fuoriuscita di miscela nel lato posteriore indice quindi di una buona distribuzione anche in profondità. Quest'ultimo fattore però è sicuramente stato influenzato da limitato spessore della muratura e dal fatto che è a due paramenti. Da osservare il fatto che nella cannula numero 15 l'iniezione è durata parecchio senza avere un aumento di pressione e questo si può spiegare con il fatto che la miscela potrebbe aver seguito percorsi laterali al di fuori del pannello essendo posta all'estremità. Sono stati quindi iniettati più di quattro litri di miscela in quel punto.

Bisognerebbe quindi considerare il fatto che la misura dei litri iniettati nel pannello è sicuramente superiore alla quantità di miscela che effettivamente è rimasta all'interno del perimetro considerato.

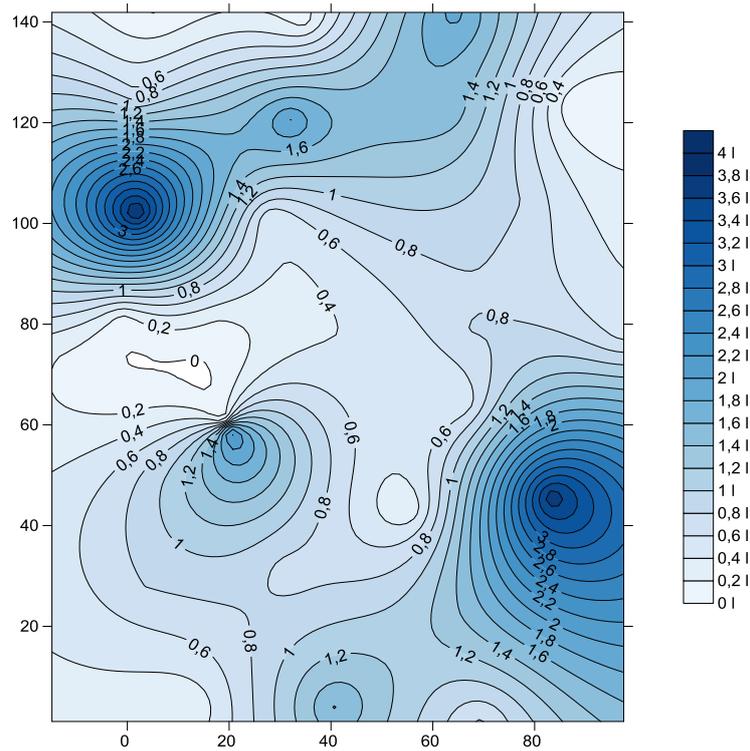


Fig. 2.4. 46 - Grafico di distribuzione dei litri iniettati campo prova 1 (Museo Archeologico)

Quindi la zona corrispondente alla cannula 15 risulta graficamente più iniettata, e quindi evidenziata con un blu molto scuro, di quello che dovrebbe essere.

Nelle due foto sottostanti si può notare il prospetto iniettato con le numerose fuoriuscite e con le cannule sigillate con l'ovatta, e il prospetto retrostante dove sono ben visibili le fessure di fuoriuscita di miscela, anch'esse sigillate con ovatta, e il vuoto nella parte inferiore che è stato stuccato.



Fig. 2.4. 47 Campo prova 1 iniettato (Museo Archeologico)

### 2.4.5.2. Campo prova 2

Come primo passo di questa fase, la ditta impegnata nell'intervento di restauro in atto al Museo Archeologico ha provveduto a preparare il pannello effettuando la scarifica dell'intonaco e la scarnitura dei giunti deteriorati per permettere la ristilatura, effettuata con GeoCalce® Fino. Dopo di ciò sono stati effettuati i fori per l'inserimento delle cannule di iniezione, attorno alle quali è stata applicata della malta per evitare la fuoriuscita di liquidi dall'intorno del foro. Dopo un primo sopralluogo si è deciso di migliorare la sigillatura dei giunti, inizialmente eseguita in modo parziale.

Le cannule e i rispettivi fori sono stati numerati con una numerazione crescente da sinistra a destra e dall'alto verso il basso, per permettere la registrazione dei dati durante la fase di iniezione.



*Fig. 2.4. 48 - Ristilatura dei giunti e inserimento delle cannule campo prova 2 (Museo Archeologico)*

La fase successiva consiste nel lavaggio dei muri iniettando acqua con la stessa pompa che verrà usata per iniettare la miscela. Questo ha permesso di notare piccole fessure ancora presenti che sono state sigillate con malta a presa rapida.

In questo campo la miscela utilizzata è stata Biocalce® Consolidante prodotta dalla ditta Kerakoll, una malta naturale eco-compatibile di pura calce naturale NHL 3.5 a norma EN 459-1. Come prima fase è stata effettuata la miscelazione del prodotto con acqua, secondo le prescrizioni presenti nella scheda tecnica, quindi aggiungendo per ogni sacco di miscela del contenuto di 25 kg, una quantità d'acqua pari a 8,3 litri. La miscelazione è stata effettuata con un miscelatore elettrico ad immersione.

L'iniezione è stata effettuata procedendo dalla riga più bassa a quella più alta, quindi i primi punti iniettati sono stati il 20,21,22,23 e 24. Durante il procedimento sono stati annotati nell'apposita tabella i seguenti dati:

-foro iniettato

-coordinate orizzontali e verticali del foro rispetto ad un punto della griglia [cm]

-tempo di iniezione per ogni foro [s]

-pressione media durante l'iniezione [bar]

-foro o fessura da cui fuoriesce la miscela

Con questi dati si sono potuti ricavare i litri iniettati per ogni foro e la portata.

PANNELLO INIETTATO: S02 ( 2sacchi - 14 litri)				
FORO INIETTATO	TEMPO	FORI DA CUI FUORIESCE	PRESSIONE (bar)	LITRI INIETTATI (l)
20	0m 9s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8	0.25
21	0m 51s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8	1.44
22	0m 14s	Fuoriesce dal foro 21	0,8	0.39
23	0m 23s	Fuoriesce dalla fessura n° 1	0,6	0.49
24	0m 36s	Fuoriesce dal foro 19	1,0	1.27
18	0m 13s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.46
17	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.28
16	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.25
15	0m 19s	Fuoriesce dalla fessura n° 7	0,8	0.54
14	1m 19s	Fuoriesce dalla fessura n° 7	0,8	2.23
13	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.25
12	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.25
11	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.25
10	0m 11s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.39
6	2m 28s	Fuoriesce dalla fessura n° 2	0,6	3.13
7	0m 17s	Fuoriesce dalla fessura n° 8	0,4	0.24
8	0m 38s	Fuoriesce dal foro 1 sul retro	0,4	0.54
9	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.28
5	0m 53s	Fuoriesce dalla fessura n° 3	1,0	1.87
4	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.28
3	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.28
2	0m 11s	Fuoriesce dalle fessure n° 4 e 5	1,0	0.39
1	1m 4s	Fuoriesce dalla fessura n° 6	0,8	1.81
3dietro	0m 15s	Fuoriesce dallo stesso foro	1,0	0.53
2dietro	1m 0s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6	1.27

Tab. 2.4. 15 - Tabella di annotazione iniezioni campo prova 2 (Museo Archeologico)

Numero sacchi = 2	Peso confezione = 25 kg/conf	LITRI TOTALI INIETTATI = 19,33
Eccedenza [litri]= 14	Rese da scheda = 1,5 [kg/l]	

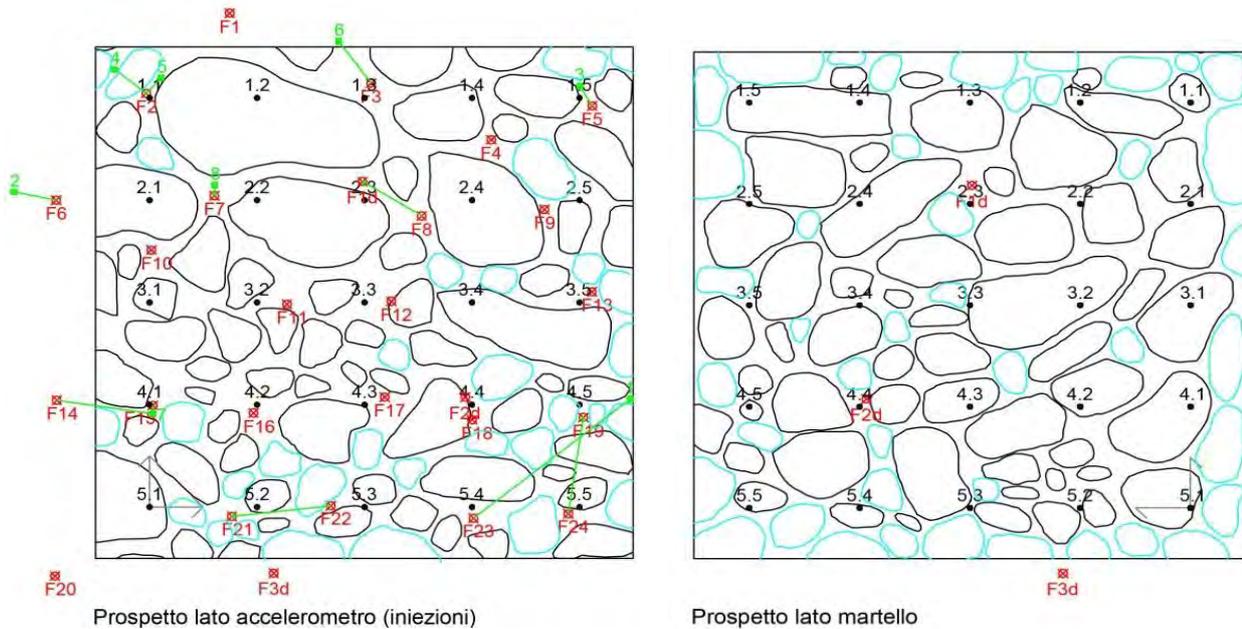


Fig. 2.4. 49 - Prospetti campo prova 2 con fori di iniezione e percorsi della miscela (Museo Archeologico)

In questi prospetti sono rappresentati in nero i punti della griglia di acquisizione, in rosso i fori di iniezione e in verde i percorsi seguiti dalla miscela.

Inserendo la griglia X,Y,Z composta dalle coordinate orizzontali e verticali dei fori di iniezione e dal numero di litri iniettati per foro nel programma Surfer, abbiamo ottenuto il grafico di distribuzione della miscela iniettata nel pannello. Tuttavia questo grafico è solo indicativo poiché è rappresentativo della quantità di miscela iniettata per ogni foro, ma non può tenere conto dei percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento murario.

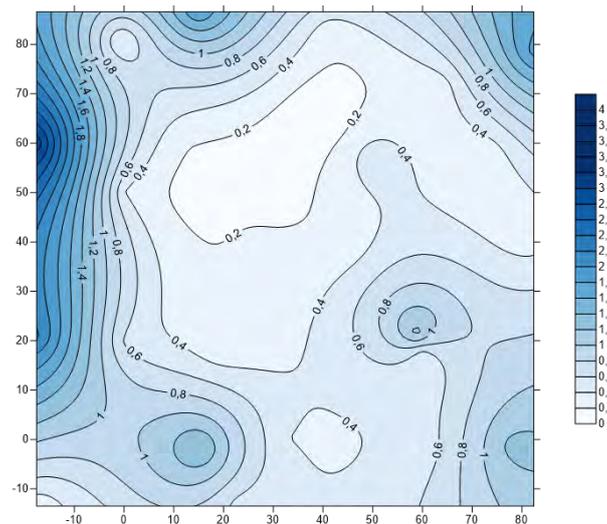


Fig. 2.4. 50 - Grafico di distribuzione dei litri iniettati campo prova 2 (Museo Archeologico)

È utile sottolineare che, come osservato dalla tabella di iniezione, non si sono riscontrate molte fuoriuscite dalle cannule limitrofe non riuscendo ad indicare una completa e profonda iniezione del paramento. È inoltre interessante notare come l'iniezione del foro 8 abbia

comportato una fuoriuscita sul lato retrostante dal foro 1 mentre l'iniezione del foro 18 non abbia restituito il medesimo risultato. Si osserva quindi che i fori predisposti quali spia non hanno riportato tutti fuoriuscite di miscela certificando ancora una presenza di vuoti. Poiché le operazioni di preparazione del campione non sono state eseguite dal dipartimento, ma per valutare l'influenza dell'esecuzione dall'impresa operante, può essere ragionevole ipotizzare che alcuni fori non siano stati estesi come prescritto fino alla profondità dei 2/3 dello spessore. Nella caso della cannula 18, infatti, sembra alquanto improbabile che il foro fosse della giusta profondità senza riscontrare fuoriuscita di miscela dal foro dietro. Per completare quindi il processo di iniezione si è optato per l'iniezione delle cannule anche retrostanti.



*Fig. 2.4. 51 - Cannule sigillate dopo l'iniezione*

Nella foto del prospetto iniettato si può osservare come le cannule, una volta iniettate, siano state sigillate con del cotone per evitare la fuoriuscita di miscela. Inoltre sono visibili i fori attorno ai quali è stato necessario aggiungere della malta a presa rapida per evitare fuoriuscite durante il flusso della miscela all'interno del paramento murario.

### 2.4.5.3. Campo prova 3

Il giorno 18 marzo 2014 è stato effettuato il lavaggio del pannello murario del campo 3, nella zona del chiostro vicino alla chiesa. Il campo prova al contrario delle prescrizioni fornite alla ditta si presentava scarificato solo in maniera superficiale e ristilato parzialmente, cioè solo nell'intorno dei fori delle cannule nel lato di iniezione, e in maniera discontinua a chiudere le fessure presenti nel lato retrostante.



*Fig. 2.4. 52 - Lavaggio del campo prova 3 (Museo Archeologico)*

Dopo aver numerato le cannule con ordine crescente da sinistra a destra e dall'alto verso il basso è stato effettuato il lavaggio che ha portato alla luce come si temeva la presenza di fessure nei giunti che non erano state sigillate. E' stato quindi richiesto alla ditta impegnata nell'intervento di restauro di provvedere ad una scarifica dei giunti più profonda e ad una successiva ristilatura effettuata in maniera continua, lasciando visibili solo le pietre e andando a coprire tutti i giunti.

Nelle due foto sottostanti si può osservare la ristilatura parziale effettuata dalla ditta, e la ristilatura rifatta secondo le direttive che erano state fornite e messe in atto solo dopo una ulteriore richiesta. Per ottenere questo risultato ottimale si è capito che la scarifica deve essere effettuata in modo completo e profondo per poter rifare completamente i giunti nella parte più superficiale della muratura.



Fig. 2.4. 53 - Prima ristilatura parziale dei giunti e successiva ristilatura completa campo prova 3 (Museo Archeologico)

In questo campo la miscela utilizzata è stata la Calce idraulica NHL della ditta RÖFIX . Come prima fase è stata la miscelazione del prodotto con acqua secondo le prescrizioni presenti nella scheda tecnica, quindi aggiungendo per ogni sacco di miscela del peso di --- kg una quantità d'acqua pari a 9litri. La miscelazione è stata effettuata con un miscelatore elettrico a immersione.



Fig. 2.4. 54 - Miscela Rofix e miscelazione mediante pompa ad immersione (Museo Archeologico)

L'iniezione è stata effettuata procedendo dalla riga più bassa a quella più alta, quindi i primi punti iniettati sono stati il 18,19 e 20. Durante il procedimento sono stati annotati nell'apposita tabella i seguenti dati:

-foro iniettato

-coordinate orizzontali e verticali del foro rispetto ad un punto della griglia [cm]

-tempo di iniezione per ogni foro [s]

-pressione media durante l'iniezione [bar]

-foro o fessura da cui fuoriesce la miscela

Con questi dati si sono potuti ricavare i litri iniettati per ogni foro e la portata.

PANNELLO INIETTATO: S03 (ROFIX, 2sacchi - 13 litri)			
FORO INIETTATO	TEMPO	FORI DA CUI FUORIESCE	PRESSIONE (bar)
18	0m 30s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,9
19	0m 11s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
20	0m 34s	Fuoriesce dal foro n°3 dietro	0,6
17	0m 22s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
13	1m 53s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
14	0m 50s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
15	0m 36s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
16	0m 20s	Fuoriesce dallo stesso foro	2
9	0m 9s	Canula posizionata male	
10	0m 43s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
11	0m 5s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
12	0m 23s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
5	0m 3s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
6	0m 11s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
7	1m 26s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
Miscela rifatta			
8	0m 4s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
1	0m 43s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
2	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
3	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
4	0m 12s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4
1DIETRO	0m 13s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
2DIETRO	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,4

Tab. 2.4. 16 - Tabella di annotazione iniezioni campo prova 3 (Museo Archeologico)

Numero sacchi = 2	Peso confezione = 25 kg/conf	LITRI TOTALI INIETTATI =
Eccedenza [litri]= 13	Rese da scheda =18 l	

Dopo aver miscelato il prodotto con l'acqua secondo le quantità prescritte e cioè 9 litri per sacco, si è subito notato come la miscela fosse troppo densa, e gli addetti ai lavori sostenevano a ragione che avrebbe intasato la pompa. E' stato aggiunto circa mezzo litro di

acqua e si è proceduto con l'iniezione. Praticamente per tutte le prime cannule dopo pochi secondi la pressione aumentava notevolmente fino alla fuoriuscita di miscela sempre dalla cannula stessa e più di una volta si è inceppata la pompa ed è stato necessario pompare dell'acqua per ripulirla. E' stata da subito evidente la difficoltà di questa miscela a penetrare nella muratura. Dopo questi problemi che hanno comportato una certa perdita di tempo, la miscela già troppo densa, aveva perso ulteriormente fluidità; si è optato dunque per rifarla aumentando il dosaggio di acqua a 11 litri per sacco. Si è così potuto procedere con l'iniezione che comunque è rimasta difficoltosa con fuoriuscite sempre dallo stesso foro di iniezione.

Solo in un caso è fuoriuscita miscela dai fori spia nel retro del pannello indice quindi di una scarsa penetrazione all'interno del paramento. Si è quindi deciso di iniettare anche attraverso i fori sul retro.

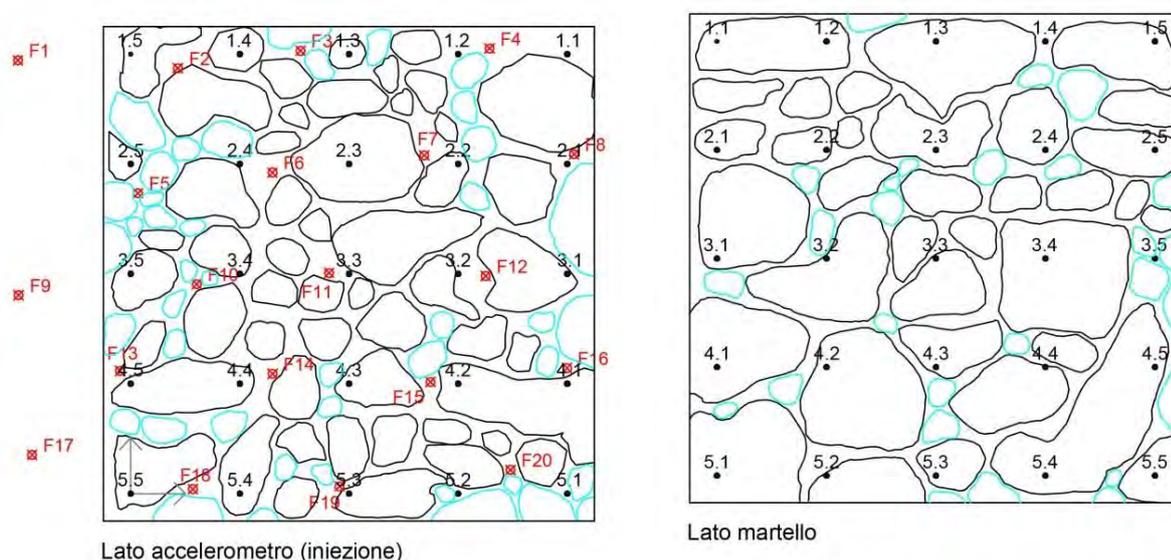


Fig. 2.4. 55- Prospetti campo prova 3 con fori di iniezione e percorsi della miscela (Museo Archeologico)

In questi prospetti sono rappresentati in nero i punti della griglia di acquisizione, in rosso i fori di iniezione e in verde i percorsi seguiti dalla miscela.

Inserendo la griglia X,Y,Z composta dalle coordinate orizzontali e verticali dei fori di iniezione e dal numero di litri iniettati per foro nel programma Surfer, abbiamo ottenuto il grafico di distribuzione della miscela iniettata nel pannello. Tuttavia questo grafico è solo indicativo poiché è rappresentativo della quantità di miscela iniettata per ogni foro, ma non può tenere conto dei percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento murario.

Foro iniettato	Posizione X [cm]	Posizione Y [cm]	Litri [l]
18	11.40	0.80	1.65
19	38.30	1.30	0.54
20	69.60	4.30	1.25

17	-18.10	7.00	1.08
13	-1.90	22.30	4.15
14	26.00	21.80	1.22
15	54.90	20.30	0.88
16	80.00	22.80	2.45
9	-20.60	36.10	0.00
10	12.00	38.10	1.58
11	36.40	40.00	0.18
12	65.00	39.60	0.84
5	1.30	54.70	0.07
6	26.00	58.40	0.40
7	53.80	61.60	4.21
8	81.20	61.80	0.10
1	-20.70	78.86	1.05
2	8.60	77.40	0.20
3	31.10	80.60	0.20
4	65.80	81.00	0.29
1D	13.40	71.00	0.48
2D	62.30	43.50	0.20
3D	53.80	-13.20	0.00

*Tab. 2.4. 17 - Tabella litri iniettati campo prova 3 (Museo Archeologico)*

In gran parte dei fori non sono state iniettate quantità di miscela considerevoli e il fatto che le fuoriuscite fossero sempre dallo stesso foro di iniezione indica che si può ipotizzare una scarsa distribuzione della miscela all'interno del paramento, con rinforzi localizzati solo nell'intorno delle cannule. La scarsa penetrazione della miscela si potrebbe attribuire ad una carenza di vuoti nella muratura ma i valori riscontrati con le indagini soniche indicano una muratura di scarsa consistenza nella quale è ipotizzabile una diffusa presenza di vuoti. Quindi la cattiva riuscita dell'intervento è da attribuirsi principalmente alle scadenti caratteristiche di fluidità della miscela.

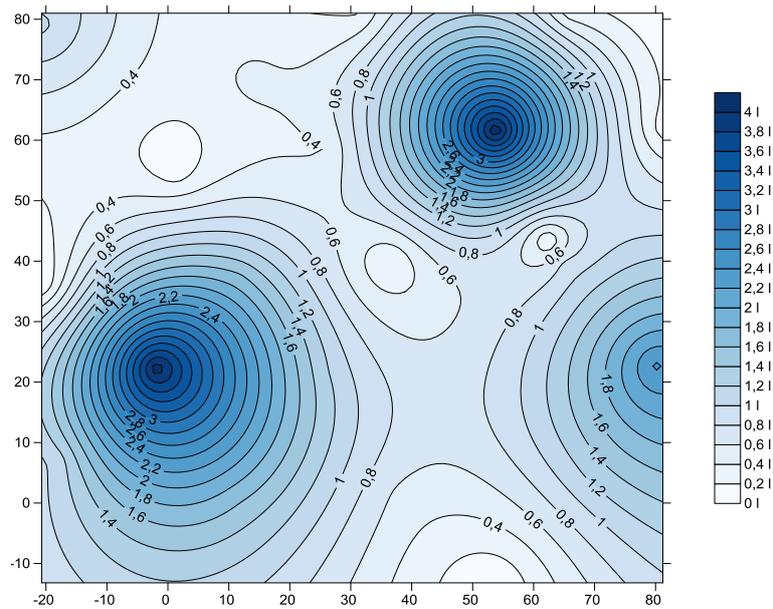


Fig. 2.4. 56- Grafico di distribuzione dei litri iniettati campo prova 3 (Museo Archeologico)

Per confermare queste ipotesi è stata osservata attentamente la miscela nella fase immediatamente successiva alla miscelazione, la quale presenta già dopo brevissimo tempo scarsissima fluidità e inoltre si può osservare tranquillamente ad occhio nudo come avvenga un' immediata segregazione tra il prodotto e l'acqua. Riassumendo dalle osservazioni effettuate si nota come questa miscela comporti dopo poco tempo una separazione tra i suoi componenti e una conseguente perdita di fluidità e quindi di iniettabilità, come si può osservare nelle foto sottostanti.



Fig. 2.4. 57 - Osservazione della miscela dopo l'iniezione campo prova 3 (Museo Archeologico)

#### 2.4.5.4. Campo prova 4

Anche in questo campo prova come prima fase si è provveduto alla preparazione del pannello tramite la scarifica dell'intonaco e la scarnitura dei giunti deteriorati per permettere la successiva ristilatura dei giunti effettuata con GeoCalce fino. Anche in questo caso la ristilatura era stata eseguita solo attorno alle cannule e si è provveduto a rifarla in maniera completa e continua. Le cannule e i rispettivi fori sono stati numerati con una numerazione crescente da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso.



*Fig. 2.4. 58 - Fuoriuscita d'acqua durante il lavaggio e ristilatura completa dei giunti (Campo prova 4*

Particolare attenzione è stata fatta per il punto 4.4 dove era presente un grosso vuoto dovuto ad un carotaggio eseguito nell'ambito di una precedente campagna di indagine. All'interno del vuoto è stato infatti inserito un sacco in nylon e questo è stato a sua volta riempito di poliuretano espanso, questo per evitare che la maggior parte della miscela iniettata fuoriuscisse dal foro, rendendo così inutile l'intervento di iniezione e falsando la fase di valutazione dell'efficacia dell'intervento stesso.



Fig. 2.4. 59 - Riempimento del foro mediante poliuretano espanso

La fase di lavaggio della muratura è stata effettuata iniettando acqua con la stessa pompa successivamente usata per l'iniezione della miscela. In questo caso la fase di lavaggio ha permesso di notare piccole fessure e cannule non adeguatamente sigillate con la conseguente fuoriuscita nell'intorno della cannula stessa. Si è provveduto dunque a sigillare l'intorno di queste cannule con malta a presa rapida per permettere un corretto svolgimento dell'intervento. Inoltre con il lavaggio si è evidenziato un problema con la cannula numero 7, essa era infatti bucata ed è stato possibile rimuoverla e sostituirla, processo che sarebbe stato più difficoltoso durante la fase di iniezione.

In questo pannello dopo aver effettuato il lavaggio si è deciso di far inserire alla ditta che si occupa dei lavori una cannula aggiuntiva, in quanto tra i fori 1,5,6 e 2 c'era un'area troppo grande sprovvista di cannule per l'iniezione e questo molto probabilmente avrebbe causato la mancata iniezione, o un' iniezione incompleta dell'area. La cannula inserita è stata denominata 5b, perché posta tra la cannula 5 e 6.

In questo campo la miscela utilizzata è la stessa utilizzata per il pannello posto al quinto piano cioè *Albaria*<sup>TM</sup> Iniezione prodotta dalla ditta BASF, una boiaccia di calce pozzolanica priva di cemento di colore bianco per le iniezioni di consolidamento della muratura. Come prima fase è stata effettuata la miscelazione del prodotto con acqua, secondo le prescrizioni presenti nella scheda tecnica, quindi aggiungendo per ogni sacco di miscela del peso di 15kg una quantità d'acqua pari a 5,7litri. La miscelazione è stata effettuata con un miscelatore elettrico a immersione.

La scelta di utilizzare la stessa miscela per questo pannello, a tre paramenti, e per il pannello del campo prova uno, a due paramenti, è stata presa per avere un ulteriore elemento di confronto nello studio dell'efficacia dell'iniezione su tipologie murarie differenti.

Anche in questo caso l'iniezione è stata effettuata procedendo dalla riga più bassa a quella più alta e da sinistra verso destra, quindi i primi punti iniettati sono stati il 17,16,15 e 14. E durante il procedimento sono stati annotati i seguenti dati:

-foro iniettato

-coordinate orizzontali e verticali del foro rispetto ad un punto della griglia [cm]

-pressione media durante l'iniezione [bar]

-foro o fessura da cui fuoriesce la miscela

Con questi dati si sono potuti ricavare i litri iniettati per ogni foro e la portata.

PANNELLO INIETTATO: S04 (ALBARIA, 2sacchi + 3,5litri)			
FORO INIETTATO	TEMPO	FORI DA CUI FUORIESCE	PRESSIONE (bar)
17	1m 32s	Fuoriesce dal foro n°16	0,2
16	1m 13s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,6
15	1m 4s	Fuoriesce dalla fessura n°1	0,6
14	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
18	0m 3s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
13	0m 14s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
12	0m 6s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
11	0m 10s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
8	0m 36s	Fuoriesce dal foro 8b	0,8
8b	0m 3s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
9	0m 10s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
10	0m 9s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
7	1m 12s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
6	0m 9s	Fuoriesce dallo stesso foro	0,8
5	1m 14s	Fuoriesce dal foro 1 sul retro	0,5
5b	0m 20s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
4	0m 8s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
1	0m 6s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
2	0m 12s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
3	0m 6s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
4dietro	0m 7s	Fuoriesce dallo stesso foro	1
3dietro	0m 5s	Fuoriesce a lato del foro a sinistra nella fessura n°2	0,8
5dietro	0m 45s	Fuoriesce a lato del foro a destra nella fessura n°3	0,8
2dietro	1m 5s	Fuoriesce dallo stesso foro	1

Tab. 2.4. 18 - Tabella di annotazione iniezioni campo prova 4 (Museo Archeologico)

Numero sacchi = 3	Peso confezione = 15 kg/conf	LITRI TOTALI INIETTATI = 25.73
Eccedenza [litri]= 7.6	Rese da scheda =1.35 kg/l	

Nei prospetti sottostanti sono rappresentati in nero i punti della griglia di acquisizione, in rosso i fori di iniezione e in verde i percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento. Nel prospetto posteriore è inoltre visibile il punto dove è stato inserito il poliuretano espanso, cioè dove è stato effettuato il carotaggio, nel punto 4.4.

Come possiamo notare tre tra i fori di controllo posti nel prospetto posteriore sono posizionati sotto all'area del pannello, questo è stato fatto per controllare quanto la miscela scende all'interno del paramento in quanto durante la fase di lavaggio le cannule poste in basso, nel prospetto dove sono state successivamente effettuate le iniezioni, avevano assorbito una grande quantità d'acqua. In particolare le cannule 15, 16 e 17.

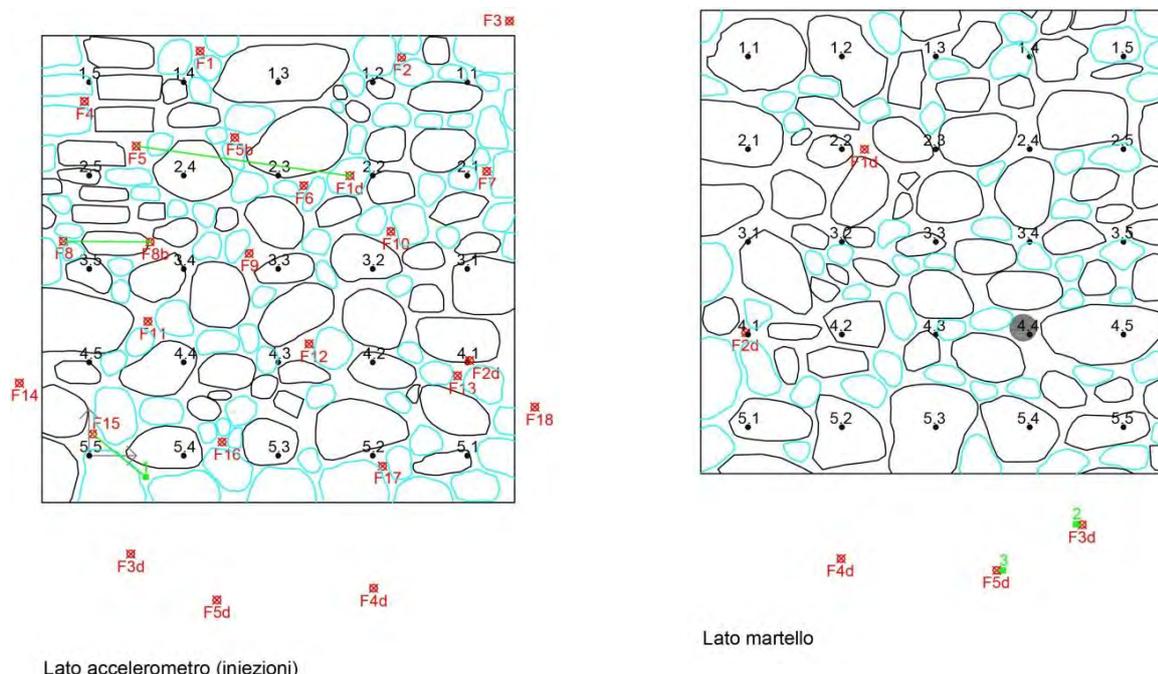


Fig. 2.4. 60- Prospetti campo prova 4 con fori di iniezione e percorsi della miscela (Museo Archeologico)

Inserendo la griglia X,Y,Z composta dalle coordinate orizzontali e verticali dei fori di iniezione e dal numero di litri iniettati per foro nel programma Surfer, abbiamo ottenuto il grafico di distribuzione della miscela iniettata nel pannello che permette di visualizzare graficamente le zone in cui è stata iniettata una maggiore o minore quantità di miscela. Tuttavia questo grafico è solo indicativo poiché rappresenta la quantità di miscela iniettata per ogni foro, ma non può tenere conto dei percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento murario.

Foro iniettato	Posizione X [cm]	Posizione Y [cm]	Litri [l]
17	62.00	-2.20	1.05

16	28.10	3.00	2.50
15	0.70	4.60	2.19
14	-14.80	15.60	0.40
18	94.30	10.40	0.17
13	77.90	17.10	0.64
12	46.50	24.00	0.34
11	12.40	28.80	0.57
8	-5.50	46.00	1.64
8b	12.90	45.80	0.17
9	33.80	43.30	0.46
10	63.80	48.00	0.41
7	84.10	61.00	3.29
6	45.40	57.80	0.41
5	10.00	66.29	2.11
5b	30.80	68.10	1.14
4	-1.00	75.90	0.46
1	23.50	86.70	0.34
2	66.10	85.30	0.69
3	88.90	93.00	0.34
4dietro	60.20	-28.40	0.40
3dietro	8.80	-21.00	0.23
5dietro	27.00	-30.90	2.06
2dietro	85.00	20.40	3.71
1dietro	55.10	60.00	0.00

Tab. 2.4. 19- Prospetti campo prova 4 con fori di iniezione e percorsi della miscela (Museo Archeologico)

Dalla mappa grafica possiamo notare come nella zona a destra del paramento (riferita al prospetto dove sono state eseguite le iniezioni) sia stata iniettata molta più miscela. Anche in questo caso però questo fattore non indica che quella parte avesse una maggiore concentrazione di vuoti o che sia stata iniettata in modo più completo in quanto è una porzione di muratura situata in posizione marginale e non possiamo sapere che percorsi ha seguito la miscela all'interno del paramento.

Un fattore significativo è invece dato dal fatto che in pochi casi abbiamo avuto fuoriuscite da cannule limitrofe o sul retro, si hanno invece avuto quasi sempre fuoriuscite dallo stesso foro. Ciò indica una iniezione incompleta e che non è andata in profondità all'interno del pannello, ma localizzata nell'intorno del foro di iniezione.

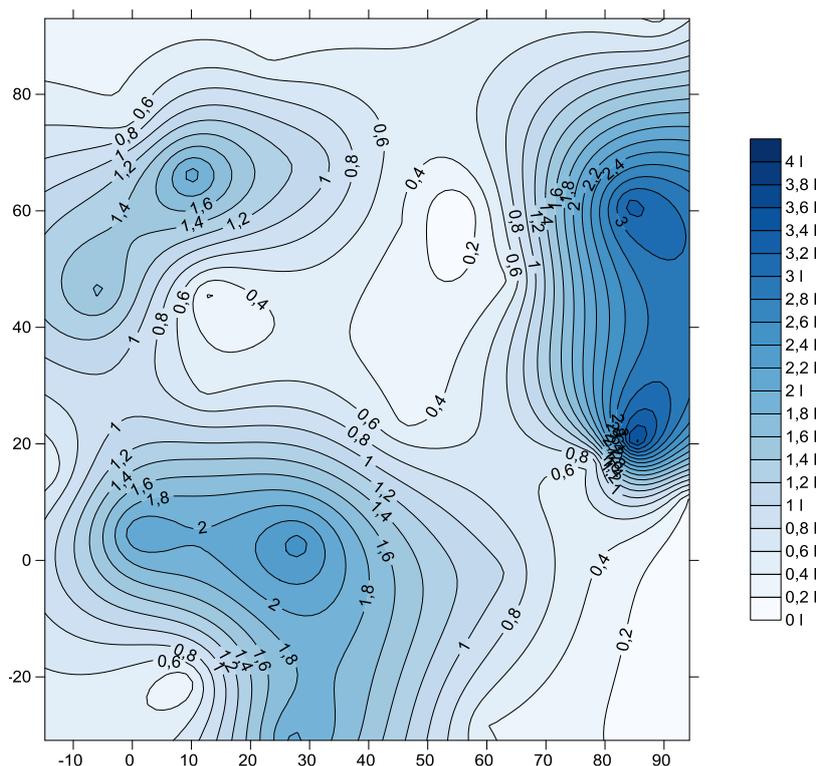


Fig. 2.4. 61 - Grafico di distribuzione dei litri iniettati campo prova 3 (Museo Archeologico)

## 2.4.6. Caratterizzazione delle miscele

Come già detto in precedenza per questa sperimentazione sono usate tre differenti miscele, così descritte nelle rispettive schede tecniche:

- Albaria<sup>TM</sup> Iniezione: miscela per iniezioni del gruppo BASF Construction Chemicals Italia, costituita da boiaccia premiscelata di calce pozzolanica, priva di cemento, a granulometria finissima ad elevata fluidità ed eccellente mantenimento della lavorabilità.

Essa è classificata come malta da muratura con compressione maggiore di 10MPa secondo la normativa europea EN1015-11, è quindi una malta a prestazione garantita con marcatura CE.

E' caratterizzata da un eccellente mantenimento della lavorabilità e da una buona ritenzione d'acqua, cioè non rilascia facilmente l'acqua di impasto alla muratura evitando così di inibire l'idratazione della boiaccia.

La fluidità è garantita in base alla prova con cono ASTM con un tempo di deflusso della miscela minore di 30s sia appena miscelata, quindi a zero secondi, che dopo 60 minuti. Sempre secondo la scheda tecnica il modulo elastico, ottenuto con una miscela con fluidità minore di 30s con il cono Marsh, è pari a  $6000 \pm 1000$  Mpa.

- Geocalce®: malta naturale certificata, eco-compatibile, della ditta Kerakoll S.p.A.. E' una malta a base di pura calce naturale NHL 3.5 e geolegante minerale. Essa contiene solo materie prime rigorosamente di origine naturale e minerali riciclati. Garantisce una resistenza a compressione maggiore di 15MPa, secondo la norma EN1015-11.
- Röfix, calce idraulica NHL5 per iniezioni. E' una malta a base di calce idraulica, sabbia calcarea macinata e additivi per migliorarne la lavorazione. Le sue caratteristiche sono un'ottima lavorabilità, un basso coefficiente di ritiro e un indurimento con ridotte tensioni. Essa garantisce una resistenza a compressione maggiore di 5MPa, e la scheda tecnica indica inoltre un modulo elastico circa pari a 3500N/mm<sup>2</sup>.

#### 2.4.6.1. Prova di fluidità in sito

Per quanto concerne la prova di fluidità si è eseguita la prova con il cono della norma americana ASTM C-939 (sotto a sinistra) e il cono 'Marsh' (sotto a destra) secondo le procedure utilizzate nel mondo accademico e armonizzate nella norma UNI EN 445-2007. Le prove sono state eseguite appena mescolata la miscela e dopo un'ora di tempo per valutarne il grado di lavorabilità. Sebbene la prova di fluidità dopo un'ora non sia prevista dalla norma è stata comunque eseguita per valutare le condizioni della miscela un'ora dopo la miscelazione e poterle confrontare con quelle iniziali, nell'ambito dell'intervento infatti è importante che la miscela non perda velocemente le sue caratteristiche di fluidità ma le mantenga fino alla fine dell'intervento stesso.

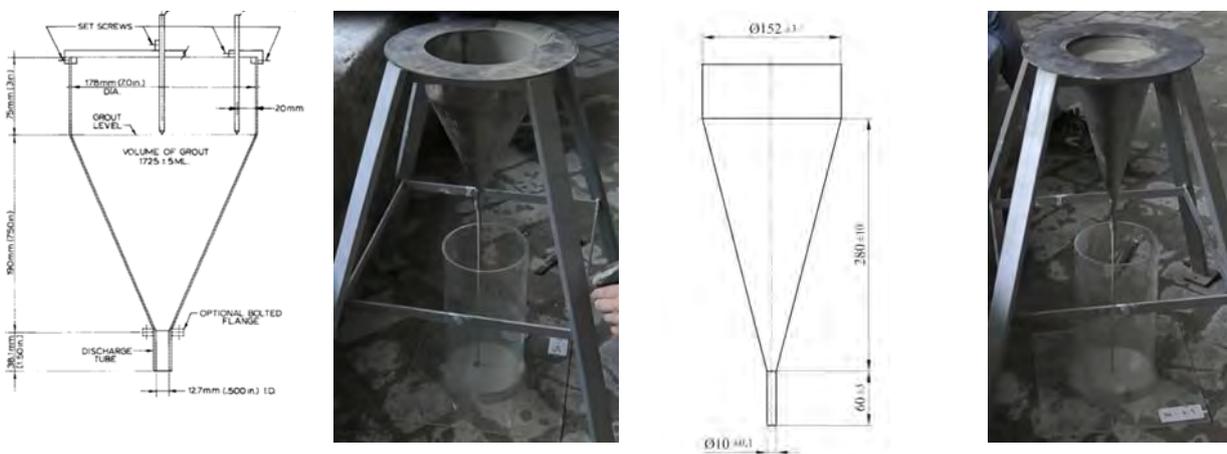


Fig. 2.4. 62 - Cono ASTM C-939 e cono Marsh (Museo Archeologico)

		CONO MARSH	CONO ASTM
ALBARIA	Fluidità a 0 secondi	33"	24"
	Fluidità dopo 60 minuti	1' 49"	48"
KERAKOLL	Fluidità a 0 secondi	2' 07"	1' 08"
	Fluidità dopo 60 minuti	1' 45"	1' 04"

ROFIX	Fluidità a 0 secondi	27"	16"
	Fluidità dopo 60 minuti	prova non eseguibile	prova non eseguibile

*Tab. 2.4. 20 - Tabella Fluidità (Museo Archeologico)*

La miscela Albaria ha dato buoni valori di fluidità a zero secondi ma con un notevole incremento, soprattutto par quanto riguarda la prova con il cono marsh dopo 60 secondi, incremento inatteso vista la buona fluidità iniziale e i valori di fluidità dati dalla scheda tecnica, che indica invece valori di fluidità sempre minori di 30" anche dopo 60 minuti. Caratteristica che può causare problemi dati dal cambiamento delle proprietà durante la fase di iniezione.

Con la miscela Röfix ci sono stati subito problemi relativi alla sua fluidità, la scheda tecnica infatti indica di aggiungere una quantità d'acqua pari a 9 litri per sacco ma è stato subito evidente che così facendo la miscela era troppo densa ed è stato così aggiunto un altro litro d'acqua ed è stata successivamente eseguita la prova fluidità, con risultati inattesi in quanto la miscela, che sembrava essere la meno densa di tutte, ha dato i risultati più bassi, con una fluidità a zero secondi di 27" con cono Marsh e 16" con cono Astm.

Non è invece stato possibile effettuare nuovamente la prova dopo un'ora in quanto la miscela si era già indurita notevolmente e non si staccava dal supporto, confermando quindi le aspettative riguardo la scarsa fluidità della stessa e la difficoltà nel suo utilizzo, in quanto più volte nel corso dell'intervento di iniezione ha creato problemi. La miscela è stata infatti filtrata prima di essere inserita nella pompa per le iniezioni in quanto non era omogenea ma presentava grumi pur essendo stata aggiunta acqua e miscelata correttamente, inoltre dopo aver iniettato alcuni fori è stato necessario rifare la miscela perché essendo troppo densa aveva intasato la pompa e non fuoriusciva più. La miscela è stata rifatta con una quantità d'acqua superiore, undici litri, rispetto a quelli indicati nella scheda tecnica, così facendo si è potuto portare a termine l'intervento di iniezione.

Per quanto riguarda la miscela Kerakoll i risultati di questa prova hanno dato valori, per quanto confrontabile dalla scheda tecnica, maggiori rispetto a quanto specificato nella stessa. Si deve riportare come tutte le miscele abbiano denotato questa problematica. Da un punto di vista della fluidità era la miscela con valori minori di deflusso, questo è stato un risultato inatteso in quanto al momento della miscelazione sembrava avere una buona fluidità, soprattutto rispetto alla miscela Röfix che ha dato da subito vari problemi ed ha dato invece buoni valori di fluidità.

È invece da sottolineare come le altre due miscele tesate abbiano dimostrato valori di fluidità che incrementavano considerevolmente nell'arco dei 60 minuti. La miscela Kerakoll, come si può notare anche dalle prove della scheda tecnica, presenta valori addirittura minori di tempo con il passare dei minuti (considerazioni possibili fino a 60 min massimo). Questo

aiuta notevolmente le operazioni poiché non si è in presenza di una miscela che cambia di molto le sue proprietà durante l'iniezione come invece si è riscontrato in altre situazioni.

#### 2.4.6.2. Prova di stabilità in sito

La prova di stabilità è consistita nell'osservare per un'ora la miscela fuoriuscita dal cono per valutarne la stabilità.

Per quanto riguarda la miscela Albaria non si è osservata la formazione di una stratificazione data dalla separazione degli elementi solidi e liquidi, infatti come possiamo osservare dalla foto questa segregazione è stata molto ridotta, indice di una buona stabilità della miscela



Fig. 2.4. 63 - Prova di stabilità miscela Albaria (Museo Archeologico)

Nel caso della miscela Kerakoll si è osservata invece la formazione di una stratificazione della sospensione della miscela stessa creando un alone chiaro di spessore circa 1 cm. Questa situazione si è verificata solamente con questa miscela.



Fig. 2.4. 64 - Prova di stabilità miscela Kerakoll (Museo Archeologico)

Per quanto riguarda la miscela Röfix invece, come già detto in precedenza, dopo un'ora si presentava eccessivamente indurita, tanto da rendere impossibile la prova di fluidità. Si può infatti osservare una forte segregazione tra gli elementi e la conseguente creazione di uno strato secco superiore.



Fig. 2.4. 65 - Prova di stabilità miscela Rofix (Museo Archeologico)

### 2.4.6.3. Prove in laboratorio

Prima di affrontare nel dettaglio le prove meccaniche eseguite sui campioni è necessario sottolineare che il prelievo delle miscele fatto in cantiere ha visto anche la maturazione in sito. Questo per essere più fedeli possibili alle condizioni termo igrometriche risentite dai campioni stessi.

Successivamente si sono eseguite le prove di caratterizzazione meccanica a 30 e 90 giorni.

Le miscele utilizzate infatti sono tutte a base di calce e i tempi di indurimento dei leganti a base di calce sono più lunghi e superano solitamente i 28 giorni quindi è necessario effettuare la prova anche dopo 90 giorni.



Fig. 2.4. 66 - Campioni di miscela testati, Prova a flessione, Prova di compressione (Museo Archeologico)

La prova di flessione dei provini di miscela 40x40x160 mm è stata condotta secondo la norma UNI EN 998:2010 e ha riportato i seguenti valori:

	CAMPIONE	MATURAZIONE [gg]	CARICO [kg]	RESISTENZA A COMPRESIONE [Mpa]	RESISTENZA A FLESSIONE [Mpa]
ALBARIA	M1A	30	1150	7.19	2.04
	M1B	30	1100	6.88	
	M1A	90	1320	8.25	2.56
	M1B	90	1330	8.31	
	M1C	90	1330	8.31	2.06
	M1D	90	1390	8.69	
KERAKOLL	M2A	30	2250	14.06	4.02
	M2B	30	2350	14.69	
	M2A	90	2590	16.19	5.26
	M2B	90	2540	15.88	
	M2C	90	2550	15.94	4.82
	M2D	90	2590	16.19	
RÖFIX	M3A	30	300	1.88	1.06
	M3B	30	330	2.06	
	M3A	90	870	5.44	1.85
	M3B	90	840	5.25	
	M3C	90	810	5.06	2.09
	M3D	90	780	4.88	

I moduli elastici delle varie miscele sono:

- Albaria:  $E = 4256$  Mpa
- Kerakoll:  $E = 10266$  Mpa
- Röfix:  $E = 3693$  Mpa

Osservando la tabella e i diagrammi sottostanti possiamo vedere come la miscela prodotta dalla ditta Kerakoll abbia dato risultati migliori sia per quanto riguarda la resistenza a compressione che quella a flessione, con una resistenza pari a più del doppio di quella delle altre miscele, in particolare rispetto alla miscela prodotta dalla ditta Röfix che ha dato risultati relativamente bassi.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti con le prove effettuate sulla miscela della Röfix possiamo notare come le resistenze a flessione e compressione aumentino notevolmente nella prova eseguita a 90 giorni rispetto ai 30, cosa che non avviene negli altri casi dove possiamo notare un andamento più omogeneo.

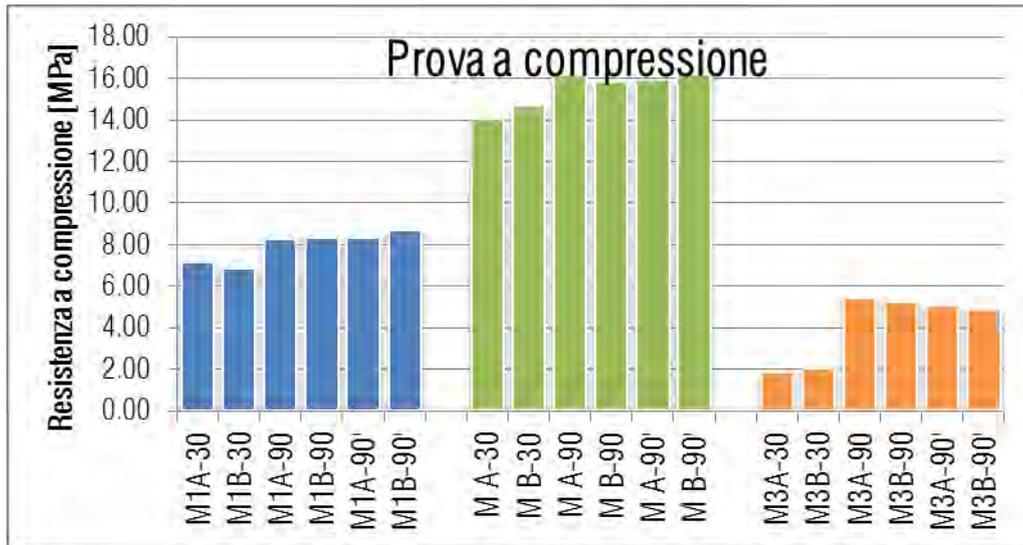


Fig. 2.4. 67 - Resistenza a compressione (Museo Archeologico)

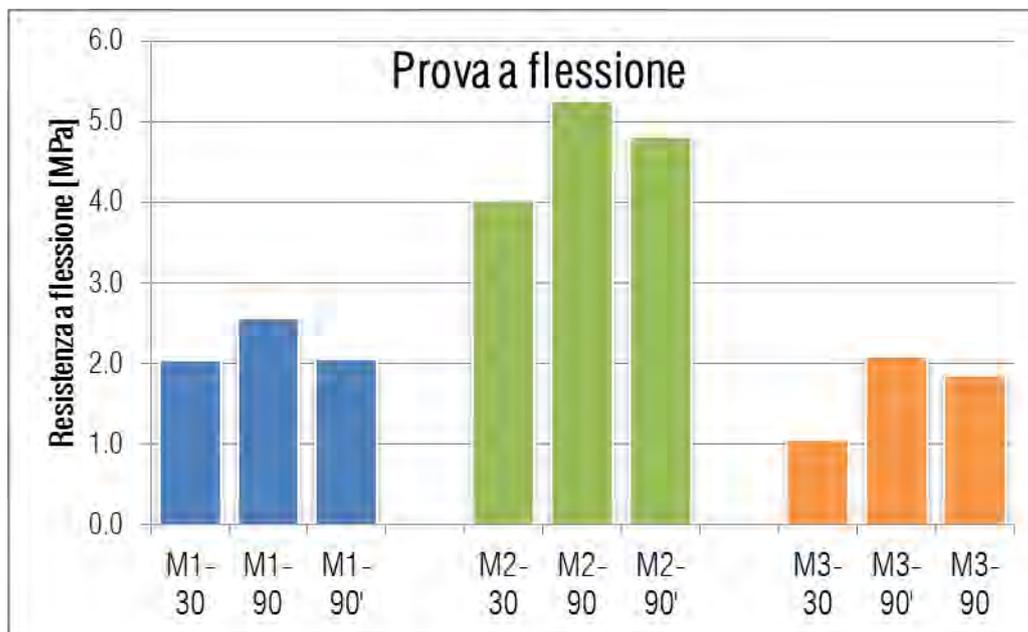


Fig. 2.4. 68 - Resistenza a flessione (Museo Archeologico)

### 2.4.7. Valutazione dell'efficacia delle iniezioni tramite prove soniche dirette, tomografiche e endoscopie

Le prove sono state eseguite il giorno 23 aprile 2014, dopo aver fatto trascorrere il tempo minimo di 28 giorni in seguito alle iniezioni per permettere la completa maturazione della miscela. E' stato necessario tracciare nuovamente le griglie perché in seguito alla ristilatura dei giunti, realizzata solo dopo le soniche effettuate nella fase precedente alle iniezioni, e a causa della fuoriuscita di miscela durante gli interventi di iniezione molti punti non erano più visibili. Questo è stato possibile grazie ai pochi punti rimasti visibili dalla fase precedente che hanno fatto da riferimento e grazie anche alle misurazioni effettuate e alle fotografie, che hanno permesso di ritracciare le griglie in maniera del tutto identica alla fase precedente, requisito fondamentale per non compromettere l'affidabilità dei risultati

#### 3.4.7.1- Campo prova 1

*Prova sonica diretta post-iniezione*



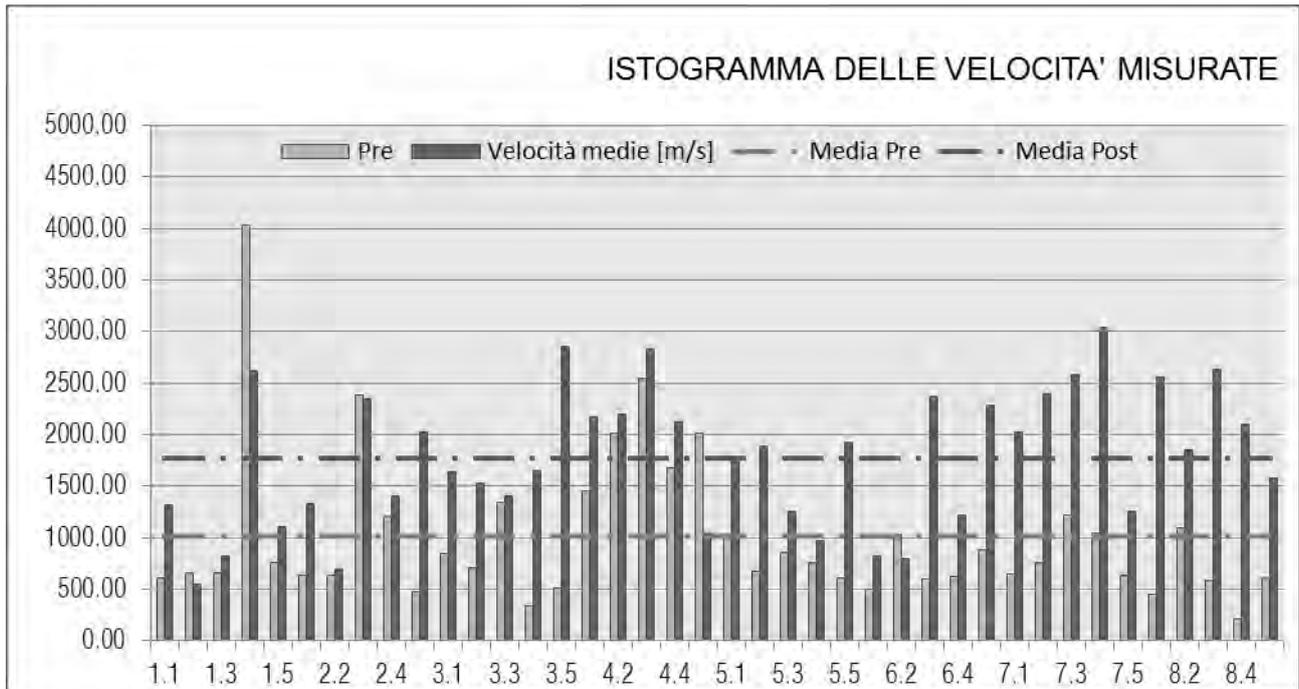
Fig. 2.4. 69 - Campo prova 1: lato martello e lato accelerometro (Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita con le stesse modalità della fase precedente, sempre con tre acquisizioni per ogni punto della griglia, composta in questo caso da 8 righe e 5 colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni, per un totale di 40 punti di acquisizione. I valori sono riportati nella seguente tabella

S1-CAMPO PROVA LATO CORRIDOIO-Prova post-iniezioni								
BATTUTA					sp	0.30	m	
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	Velocità
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]
1	1,1	2.16E-04	2.41E-04	2.28E-04	2.28E-04	1.02E-05	4%	1314.06
2	1,2	5.04E-04	5.75E-04	5.55E-04	5.45E-04	3.01E-05	6%	550.80
3	1,3	3.32E-04	3.87E-04	3.70E-04	3.63E-04	2.32E-05	6%	826.03
4	1,4	1.19E-04	1.20E-04	1.06E-04	1.15E-04	6.25E-06	5%	2614.15
5	1,5	2.60E-04	2.63E-04	2.86E-04	2.70E-04	1.19E-05	4%	1112.94
6	2,1	1.66E-04	2.39E-04	2.74E-04	2.26E-04	4.49E-05	20%	1324.97
7	2,2	4.12E-04	4.42E-04	4.28E-04	4.27E-04	1.25E-05	3%	702.32
8	2,3	1.25E-04	1.31E-04	1.28E-04	1.28E-04	2.30E-06	2%	2344.97
9	2,4	2.26E-04	2.12E-04	2.05E-04	2.14E-04	8.79E-06	4%	1400.08
10	2,5	1.54E-04	1.36E-04	1.54E-04	1.48E-04	8.38E-06	6%	2027.53
11	3,1	1.70E-04	2.15E-04	1.63E-04	1.83E-04	2.28E-05	12%	1641.59
12	3,2	1.94E-04	1.87E-04	2.09E-04	1.96E-04	9.08E-06	5%	1527.08
13	3,3	1.96E-04	2.33E-04	2.13E-04	2.14E-04	1.53E-05	7%	1400.49
14	3,4	1.74E-04	1.66E-04	2.04E-04	1.81E-04	1.65E-05	9%	1654.02
15	3,5	1.08E-04	1.08E-04	1.00E-04	1.05E-04	3.43E-06	3%	2851.08
16	4,1	1.30E-04	1.57E-04	1.27E-04	1.38E-04	1.37E-05	10%	2171.71
17	4,2	1.54E-04	1.03E-04	1.52E-04	1.37E-04	2.36E-05	17%	2194.64
18	4,3	1.10E-04	1.05E-04	1.03E-04	1.06E-04	3.09E-06	3%	2827.08
19	4,4	1.09E-04	1.39E-04	1.74E-04	1.41E-04	2.65E-05	19%	2129.57
20	4,5	2.71E-04	3.05E-04	2.87E-04	2.87E-04	1.42E-05	5%	1043.62
21	5,1	1.37E-04	1.74E-04	1.91E-04	1.67E-04	2.27E-05	14%	1792.36
22	5,2	1.59E-04	1.21E-04	1.96E-04	1.59E-04	3.06E-05	19%	1890.56
23	5,3	2.23E-04	2.23E-04	2.70E-04	2.39E-04	2.23E-05	9%	1255.86
24	5,4	3.03E-04	3.14E-04	3.13E-04	3.10E-04	4.76E-06	2%	967.31
25	5,5	1.60E-04	1.57E-04	1.51E-04	1.56E-04	4.02E-06	3%	1922.26
26	6,1	3.34E-04	3.88E-04	3.80E-04	3.67E-04	2.37E-05	6%	817.31
27	6,2	3.44E-04	3.94E-04	3.94E-04	3.77E-04	2.31E-05	6%	795.47
28	6,3	1.23E-04	1.26E-04	1.31E-04	1.27E-04	3.09E-06	2%	2366.99
29	6,4	2.67E-04	2.30E-04	2.42E-04	2.46E-04	1.53E-05	6%	1219.21
30	6,5	1.18E-04	1.35E-04	1.41E-04	1.31E-04	9.43E-06	7%	2282.01
31	7,1	1.20E-04	1.63E-04	1.60E-04	1.48E-04	1.95E-05	13%	2028.40
32	7,2	1.21E-04	1.19E-04	1.34E-04	1.25E-04	6.72E-06	5%	2401.02
33	7,3	1.36E-04	1.08E-04	1.06E-04	1.16E-04	1.38E-05	12%	2576.43
34	7,4	8.51E-05	9.50E-05	1.16E-04	9.85E-05	1.27E-05	13%	3044.28
35	7,5	2.56E-04	2.51E-04	2.08E-04	2.38E-04	2.14E-05	9%	1259.96
36	8,1	1.50E-04	1.01E-04	1.01E-04	1.17E-04	2.31E-05	20%	2558.56
37	8,2	1.82E-04	1.56E-04	1.48E-04	1.62E-04	1.46E-05	9%	1849.00
38	8,3	1.04E-04	1.33E-04	1.04E-04	1.14E-04	1.38E-05	12%	2636.05
39	8,4	1.82E-04	1.17E-04	1.29E-04	1.43E-04	2.81E-05	20%	2101.82
40	8,5	1.60E-04	2.26E-04	1.85E-04	1.91E-04	2.73E-05	14%	1574.45

Tab. 2.4. 21- Tabella acquisizione dati sonica diretta S01 post-iniezione

La prova ha restituito come risultati una velocità media complessiva del pannello di 1775 m/s, indice di una muratura di buona consistenza, una deviazione standard di 625 m/s e un coefficiente di variazione del 35,17% indici di una elevata eterogeneità del pannello. Nell'istogramma seguente si può infatti osservare come molti valori siano tra essi discordanti con un minimo nel punto 1.2 di 550,8 m/s e un massimo nel punto 7.4 pari 3444,3 m/s.



Si può notare come la zona inferiore del pannello presenti generalmente velocità piuttosto alte, solo in pochi punti inferiore ai 2000 m/s. Dal grafico di distribuzione delle velocità soniche si nota anche chiaramente la fascia in muratura in prossimità della riga 4 che presenta anch'essa una velocità media attorno ai 2000 m/s.

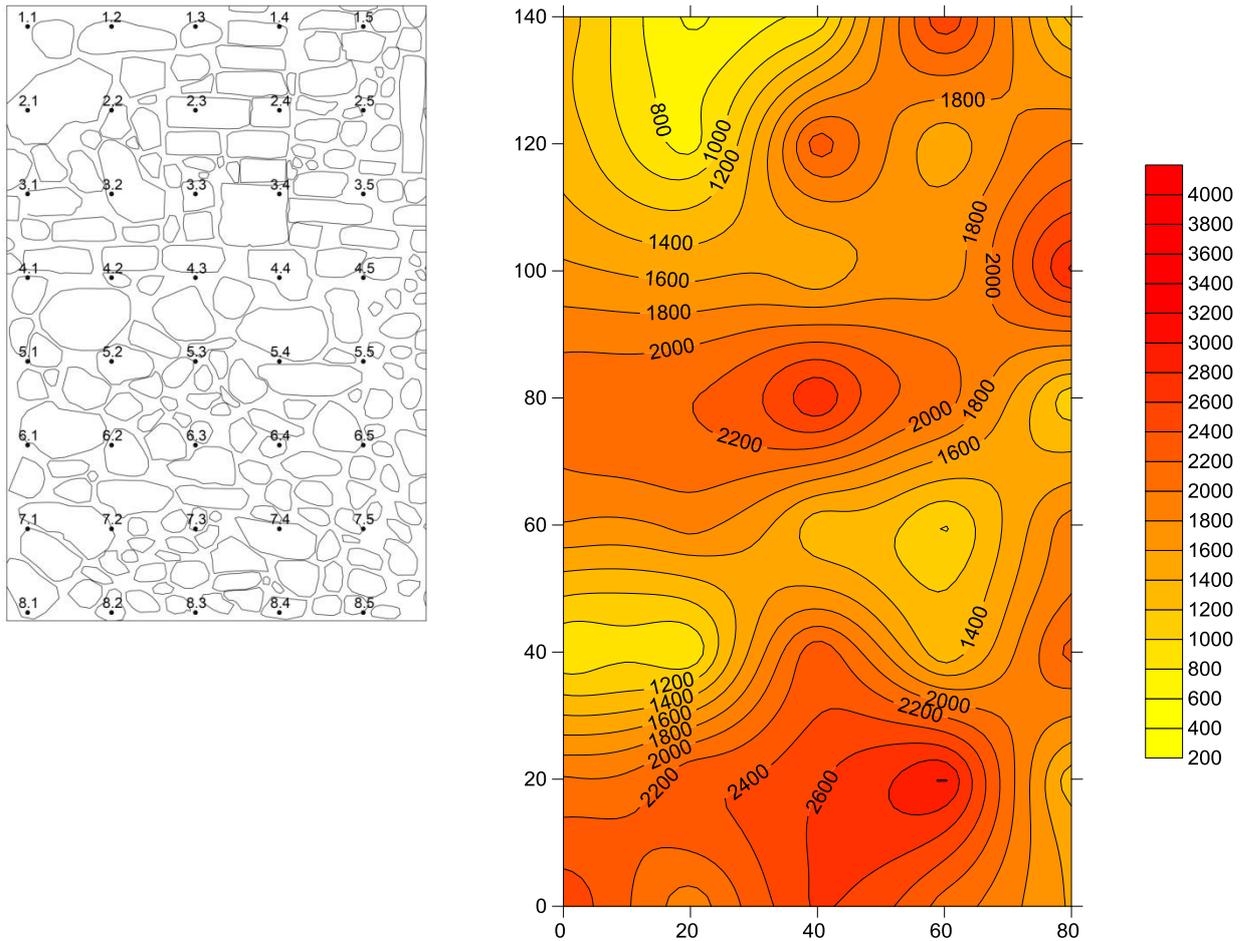


Fig. 2.4. 70 - Prospetto muratura lato martello e distribuzione delle velocità soniche post-iniezione (Museo Archeologico)

path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Velocità Pre [m/s]	Velocità Post [m/s]	Diff Velocità [%]
1.1	0.00	1.40	611.24	1314.1	214.98
1.2	0.20	1.40	657.92	550.8	83.72
1.3	0.40	1.40	661.70	826.0	124.83
1.4	0.60	1.40	4034.28	2614.2	64.80
1.5	0.80	1.40	765.33	1112.9	145.42
2.1	0.00	1.20	641.82	1325.0	206.44
2.2	0.20	1.20	635.81	702.3	110.46
2.3	0.40	1.20	2383.47	2345.0	98.38
2.4	0.60	1.20	1207.08	1400.1	115.99
2.5	0.80	1.20	476.58	2027.5	425.43
3.1	0.00	1.00	844.35	1641.6	194.42
3.2	0.20	1.00	716.34	1527.1	213.18
3.3	0.40	1.00	1339.90	1400.5	104.52
3.4	0.60	1.00	339.19	1654.0	487.64
3.5	0.80	1.00	514.56	2851.1	554.08

4.1	0.00	0.80	1449.93	2171.7	149.78
4.2	0.20	0.80	2011.13	2194.6	109.12
4.3	0.40	0.80	2543.67	2827.1	111.14
4.4	0.60	0.80	1674.51	2129.6	127.18
4.5	0.80	0.80	2006.91	1043.6	52.00
5.1	0.00	0.60	1026.05	1792.4	174.69
5.2	0.20	0.60	672.20	1890.6	281.25
5.3	0.40	0.60	859.94	1255.9	146.04
5.4	0.60	0.60	756.13	967.3	127.93
5.5	0.80	0.60	615.13	1922.3	312.50
6.1	0.00	0.40	500.44	817.3	163.32
6.2	0.20	0.40	1029.67	795.5	77.25
6.3	0.40	0.40	601.90	2367.0	393.25
6.4	0.60	0.40	622.91	1219.2	195.73
6.5	0.80	0.40	886.18	2282.0	257.51
7.1	0.00	0.20	650.05	2028.4	312.04
7.2	0.20	0.20	754.60	2401.0	318.19
7.3	0.40	0.20	1222.49	2576.4	210.75
7.4	0.60	0.20	1048.42	3044.3	290.37
7.5	0.80	0.20	638.85	1260.0	197.22
8.1	0.00	0.00	450.29	2558.6	568.20
8.2	0.20	0.00	1095.46	1849.0	168.79
8.3	0.40	0.00	591.98	2636.0	445.30
8.4	0.60	0.00	216.53	2101.8	970.67
8.5	0.80	0.00	606.77	1574.4	259.48

Tab. 2.4. 22 - Tabella differenza di velocità prima e dopo l'intervento di iniezione (Museo Archeologico)

Inserendo in una tabella per ogni punto della griglia le velocità pre iniezione e post iniezione si è potuto calcolare l'incremento percentuale per ogni punto e con questi valori realizzare un grafico di distribuzione delle variazioni percentuali per poter effettuare un confronto visivo tra le due fasi dell'intervento e relazionarle al grafico delle quantità di miscela iniettate.

Dalla tabella si può osservare che i punti che presentavano una velocità sonica pre-iniezione minore mediamente hanno avuto un incremento maggiore rispetto agli altri. I punti invece con velocità iniziale maggiore hanno avuto incrementi modesti. Questo è dovuto al fatto che le velocità iniziali minori stanno a indicare porzioni di muratura di scarsa consistenza e con forte presenza di vuoti nei quali quindi è stato più efficace l'intervento poiché si è riusciti a iniettare in essi una maggiore quantità di miscela ottenendo quindi un consolidamento maggiore. Nelle porzioni di murature che invece presentavano velocità iniziali maggiori, indice di buona consistenza, la scarsa presenza di vuoti ha determinato come era ipotizzabile un minor flusso di miscela e quindi un minore incremento di velocità sonica.

Tralasciando il punto 8.4, che presenta velocità iniziale troppo bassa per essere considerata un dato affidabile, il massimo incremento si registra nel punto 8.1 che infatti presenta velocità iniziale pari a 450,29 m/s, tipica di murature di scarsissima consistenza, e velocità finale di 2558,6 m/s, tipica di murature di buona-ottima consistenza, con un incremento del 568,2%. Il punto che presenta invece il minore incremento registrato è il 3.3 che infatti ha una velocità iniziale di 1339,90 m/s, quindi tre volte superiore al caso precedente, e velocità finale di 1400,5 m/s con un incremento del 104,52%, quindi la situazione finale è assimilabile alla situazione iniziale. Valori di questo tipo si riscontrano in diversi altri punti a conferma di quanto precedentemente affermato.

Si notano alcune particolarità in pochi punti in cui la velocità iniziale è maggiore di quella finale, fatto che non si può considerare come conseguenza dell'intervento e che quindi è da attribuire a errori nell'esecuzione della prova. Si può ipotizzare che il problema sia stato dovuto alla difficoltà di colpire con il martello lo stesso identico punto colpito nella fase precedente, anche perché la ristilatura dei giunti ha reso la superficie più omogenea ed ha eliminato i fenomeni di disgregazione della malta deteriorata riscontrati nell'esecuzione delle indagini soniche precedenti all'intervento.

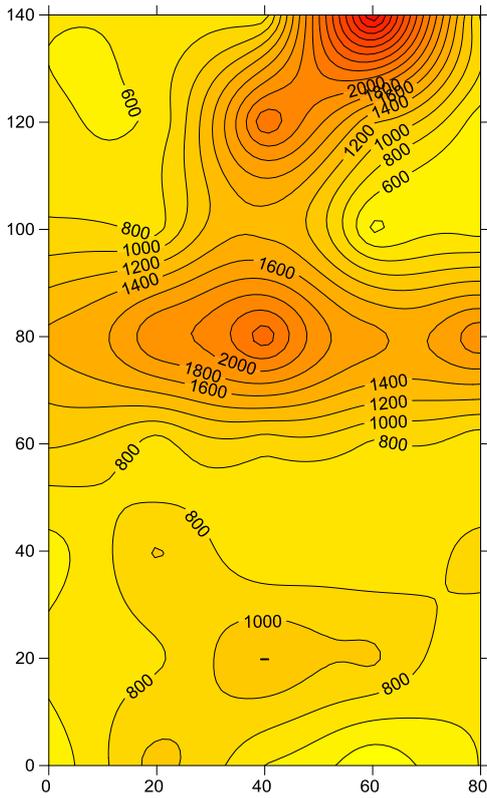


Fig. 2.4. 71 - Distribuzione velocità soniche pre-iniezione

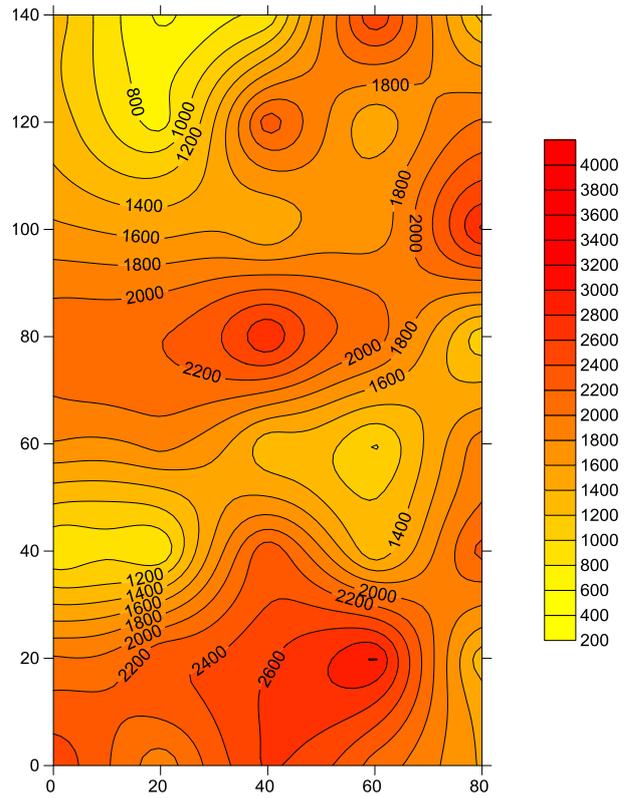


Fig. 2.4. 72 - Distribuzione velocità soniche post-iniezione

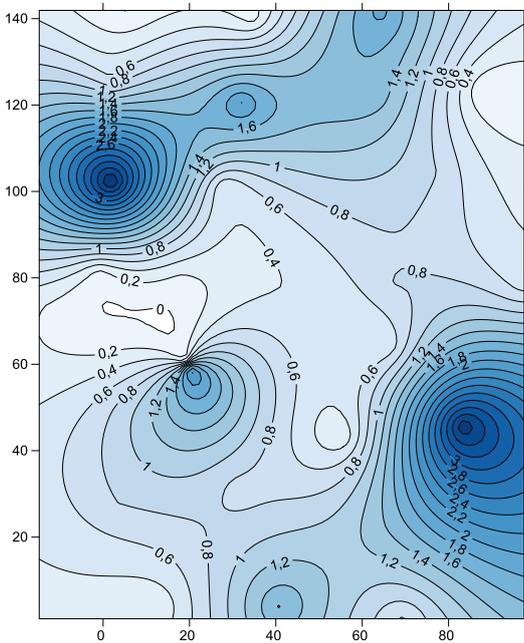


Fig. 2.4. 73 - Distribuzione litri miscela iniettati

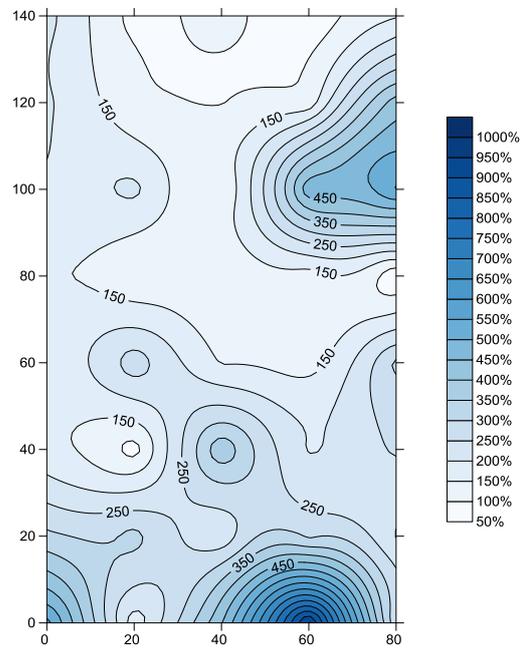


Fig. 2.4. 74 - Distribuzione differenze percentuali di velocità

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche, delle quantità di miscela iniettata e delle differenze percentuali di velocità si possono effettuare alcune considerazioni. Si può osservare infatti come il pannello pur presentando ancora un certo grado di eterogeneità, è comunque più omogeneo rispetto alla situazione iniziale. Inoltre sono riconoscibili nel grafico delle velocità soniche post iniezione le stesse zone che inizialmente presentavano già caratteristiche migliori. La differenza maggiore che si nota è l'aumento delle velocità nella parte inferiore del pannello, in cui sono state iniettate buone quantità di miscela ma non così elevate da dimostrare un tale aumento. Questo può essere riconducibile al fatto che parte della gran quantità di miscela iniettata nei fori tra la riga 5 e 6 del pannello è probabilmente fluita verso il basso andando a consolidare maggiormente questa parte del paramento.

La gran quantità di miscela iniettata in prossimità del punto 3,1 non determina invece un considerevole incremento di velocità e questo si può spiegare ipotizzando che la miscela abbia seguito percorsi laterali e che si sia distribuita in un'area molto ampia.

*Prova sonica tomografica*

TM01A Post-iniezione

La prova è stata eseguita nei cinque punti corrispondenti alla riga 6 della griglia utilizzata per la sonica diretta S01.

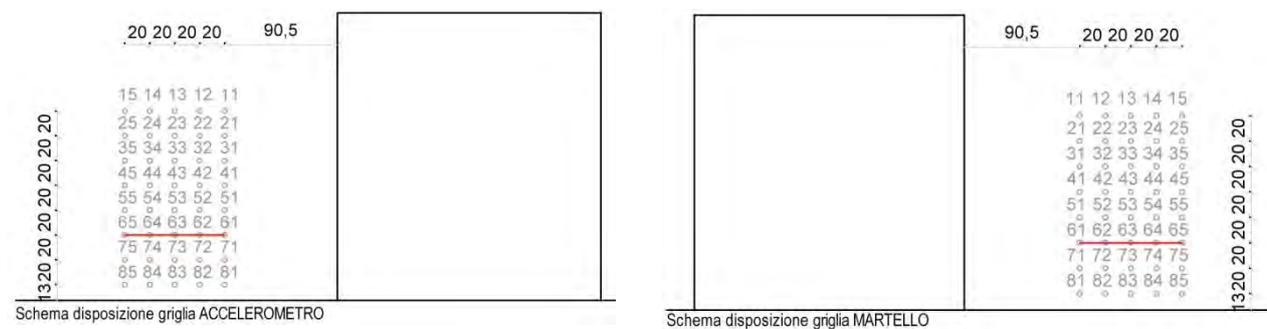


Fig. 2.4. 75 - Schema disposizione griglia TM01A (Museo Archeologico)

Come nella fase precedente all'iniezione, sono state effettuate tre acquisizioni per ogni punto e i punti sono stati numerati con due cifre, di cui la prima corrisponde al lato di acquisizione e la seconda è un numero progressivo.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	22.5	744
2.5	7.5	554
17.5	22.5	1239
17.5	7.5	896

32.5	22.5	1484
32.5	7.5	1249
47.5	22.5	1405
47.5	7.5	1749
62.5	22.5	1229
62.5	7.5	1443
77.5	22.5	1156
77.5	7.5	1942

Tab. 2.4. 23 - Tabella velocità soniche tomografiche TM01A post-iniezione (Museo Archeologico)

Dai dati registrati e dall'elaborazione di questi possiamo notare una sezione eterogenea, caratterizzata da una muratura di qualità migliore sulla sinistra della sezione.

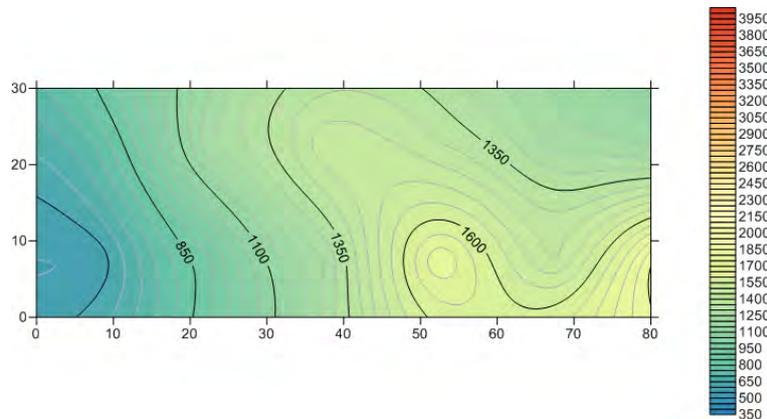


Fig. 2.4. 76 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TM01A post-iniezione (Museo Archeologico)

### TM01B

La prova è stata eseguita negli stessi punti e con le stesse modalità della fase pre-iniezione e quindi nei punti 8.3, 7.3, 6.3, 5.3, 4.3 e sono stati registrati i dati come per la prova precedente, con tre acquisizioni per ogni punto e con i punti numerati con il primo numero corrispondente al lato di acquisizione e il secondo in progressione.

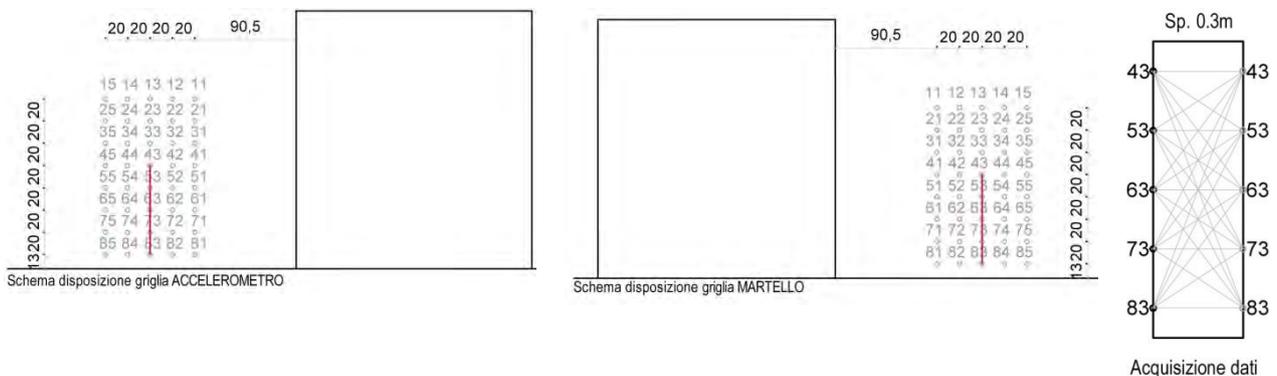


Fig. 2.4. 77 - Schema disposizione griglia TM01B (Museo Archeologico)

COORDINATA X	COORDINATA Y	VELOCITÀ
--------------	--------------	----------

(cm)	(cm)	(m/s)
2.5	22.5	1947
2.5	7.5	1626
17.5	22.5	1117
17.5	7.5	1334
32.5	22.5	969
32.5	7.5	904
47.5	22.5	1266
47.5	7.5	1240
62.5	22.5	1190
62.5	7.5	1331
77.5	22.5	1311
77.5	7.5	1254

Tab. 2.4. 24 - Tabella velocità soniche tomografiche TM01B post-iniezione (Museo Archeologico)

Dalla mappa grafica ottenuta attraverso il programma surfer possiamo osservare una sezione abbastanza omogenea, con una muratura leggermente di migliore qualità nella parte superiore in corrispondenza della fila di mattoni pieni, come nel caso della tomografia svolta prima dell'intervento di iniezione.

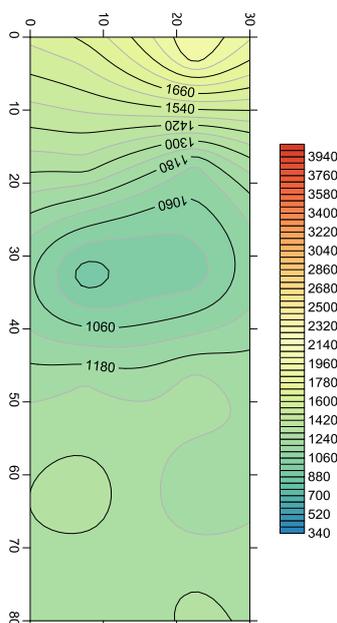


Fig. 2.4. 78 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TM01B post-iniezione (Museo Archeologico)

Inserendo in una tabella le velocità soniche ottenute con le due tomografie, verticale e orizzontale, nelle velocità pre e post iniezione abbiamo potuto valutare l'efficacia dell'intervento stesso come fatto in precedenza con la prova sonica diretta.

Nella tabella di sinistra sono elencate le velocità pre, post e la differenza percentuale tra esse della tomografia TM01A, in quella di destra della TM01B.

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
368	554	151
340	896	264
340	1249	367
423	1749	413
525	1443	275
723	1942	269
426	744	175
424	1239	292
384	1484	386
415	1405	339
382	1229	322
538	1156	215

Tab. 2.4. 25 - Differenze di velocità soniche tomografiche TM01A (Museo Archeologico)

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
340	1626	478
907	1334	147
340	904	266
340	1240	365
511	1331	260
340	1254	369
1267	1947	154
504	1117	222
340	969	285
340	1266	372
340	1190	350
344	1311	381

Tab. 2.4. 26 - Differenze di velocità soniche tomografiche TM01B (Museo Archeologico)

Confrontando le mappe grafiche delle velocità medie prima e dopo l'intervento di iniezione possiamo notare un generale miglioramento e quindi velocità maggiori sia nella sezione orizzontale, corrispondente alla prova sonica TM01A, che nella sezione verticale, corrispondente alla prova sonica TM01B. Nella seconda è possibile notare, sia prima che dopo l'intervento, una muratura migliore nella parte superiore, in linea con la prova sonica diretta effettuata; e una sezione più omogenea dopo l'intervento senza aree la cui velocità non è attendibile.

I due grafici sottostanti, sempre ottenuti tramite il programma surfer, mostrano invece la percentuale di miglioramento tra le velocità ottenute prima e dopo l'intervento. Nel caso della tomografia orizzontale, TM01A, si è registrato un aumento medio di velocità del 289%, superiore quindi all'incremento registrato tramite la prova sonica diretta su tutto il pannello, che vedeva infatti un incremento del 176%. In particolare possiamo facilmente vedere dall'immagine surfer un aumento maggiore nel centro del pannello, evidenziato dal colore blu, corrispondente quindi ad un'area meglio iniettata. Per quanto riguarda la tomografia verticale, TM01B, l'incremento registrato è del 304%, anche in questo caso quindi maggiore di quello registrato con la sonica diretta. Questo dato però non è totalmente affidabile in quanto conta anche l'incremento che si è avuto nei punti in cui la velocità prima dell'iniezione era troppo bassa per essere attendibile.

In entrambi i casi la tomografia post-iniezione ha confermato la riuscita di questa, con una muratura di migliori qualità e più omogenea.

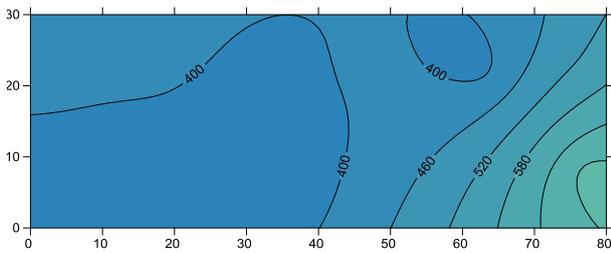


Fig. 2.4. 79 - Distribuzione velocità soniche tomografiche pre-iniezione TM01A

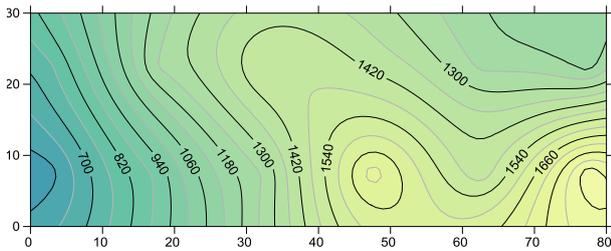


Fig. 2.4. 82 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TM01A

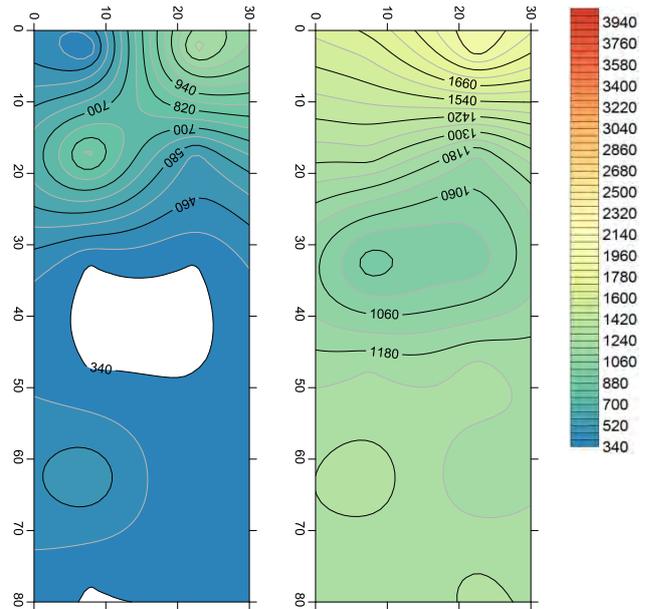


Fig. 2.4. 80 - Distribuzione velocità soniche tomografiche pre-iniezione TM01B

Fig. 2.4. 81 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TM01B

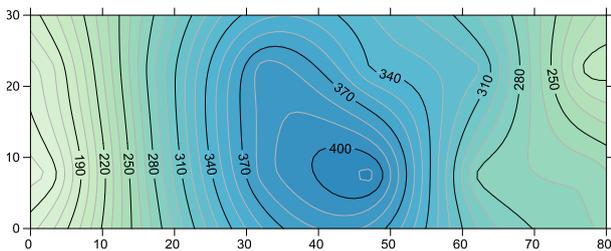


Fig. 2.4. 83 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TM01A

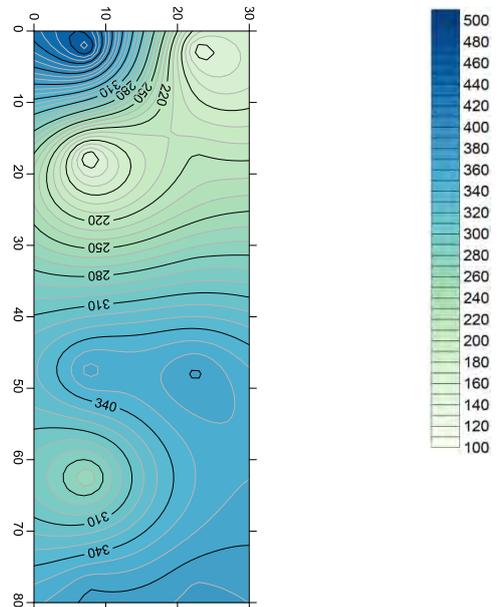


Fig. 2.4. 84 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TM01B

### Endoscopia

In questo campo prova non è stato possibile effettuare l'endoscopia in quanto il paramento era già stato demolito dalla impresa che sta eseguendo i lavori di restauro.

## 2.4.7.2. Campo prova 2

*Prova sonica diretta*

Fig. 2.4. 85 - Campo prova 2: lato accelerometro e lato martello (Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita con le stesse modalità della fase precedente, sempre con tre acquisizioni per ogni punto della griglia, composta da 5 righe e 5 colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni, per un totale di 25 punti di acquisizione. I valori sono riportati nella seguente tabella:

S2 - CAMPO PROVA CELLE									
N PUNTO	ID	BATTUTA			sp	0,36	m	CoV	Velocità
		a	b	c	media	dev	[%]		
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]	
1	1,1	2,19E-04	2,39E-04	1,82E-04	2,13E-04	2,35E-05	11%	1688,61	
2	1,2	3,32E-04	3,35E-04	3,61E-04	3,43E-04	1,28E-05	4%	1051,03	
3	1,3	2,09E-04	2,10E-04	2,05E-04	2,08E-04	2,40E-06	1%	1730,13	
4	1,4	9,29E-05	1,04E-04	1,12E-04	1,03E-04	7,98E-06	8%	3490,12	
5	1,5	2,64E-04	3,02E-04	2,85E-04	2,84E-04	1,57E-05	6%	1268,92	
6	2,1	1,26E-04	1,07E-04	1,06E-04	1,13E-04	9,33E-06	8%	3182,18	
7	2,2	9,17E-05	9,57E-05	1,10E-04	9,92E-05	7,94E-06	8%	3629,73	
8	2,3	1,35E-04	1,75E-04	1,40E-04	1,50E-04	1,80E-05	12%	2398,88	
9	2,4	1,25E-04	1,25E-04	1,20E-04	1,23E-04	2,42E-06	2%	2915,29	
10	2,5	1,73E-04	1,43E-04	1,86E-04	1,67E-04	1,80E-05	11%	2154,31	
11	3,1	3,15E-04	3,21E-04	3,18E-04	3,18E-04	2,68E-06	1%	1131,67	
12	3,2	1,82E-04	2,05E-04	2,32E-04	2,06E-04	2,01E-05	10%	1745,74	
13	3,3	2,44E-04	2,34E-04	2,34E-04	2,37E-04	4,85E-06	2%	1516,39	
14	3,4	1,99E-04	1,84E-04	2,02E-04	1,95E-04	7,86E-06	4%	1847,35	
15	3,5	1,99E-04	1,81E-04	2,04E-04	1,95E-04	9,96E-06	5%	1850,68	

16	4,1	1,11E-04	1,37E-04	1,11E-04	1,19E-04	1,22E-05	10%	3017,01
17	4,2	2,93E-04	2,32E-04	2,37E-04	2,54E-04	2,76E-05	11%	1416,37
18	4,3	1,52E-04	1,46E-04	1,46E-04	1,48E-04	2,90E-06	2%	2426,15
19	4,4	1,78E-04	1,54E-04	1,85E-04	1,72E-04	1,36E-05	8%	2087,92
20	4,5	3,09E-04	2,64E-04	3,13E-04	2,95E-04	2,26E-05	8%	1218,91
21	5,1	2,38E-04	1,98E-04	2,19E-04	2,18E-04	1,63E-05	7%	1648,33
22	5,2	2,33E-04	2,79E-04	2,51E-04	2,42E-04	1,99E-05	8%	1486,28
23	5,3	1,55E-04	1,84E-04	1,38E-04	1,46E-04	2,00E-05	14%	2458,68
24	5,4	1,16E-04	1,42E-04	1,36E-04	1,32E-04	1,14E-05	9%	2737,02
25	5,5	1,81E-04	2,26E-04	2,28E-04	2,12E-04	2,15E-05	10%	1701,40

Tab. 2.4. 27- Tabella acquisizione dati sonica diretta So2 post-iniezione

La prova ha restituito come risultati una velocità media complessiva di 2072 m/s, indice di una muratura di buona consistenza, con un incremento di 1,73 volte la velocità iniziale. Gli altri risultati ottenuti sono una deviazione standard pari a 729 m/s e un coefficiente di variazione pari al 35,17%. L'alto valore della deviazione standard è da attribuirsi al fatto che in alcuni punti si è iniettato molto riscontrando quindi forti incrementi di velocità soniche, mentre in altri si sono iniettate quantità di miscela modestissime, andando così a creare disomogeneità molto elevate tra queste porzioni di muratura, come visibile nell'istogramma seguente che rappresenta le velocità pre e post iniezione nei singoli punti.

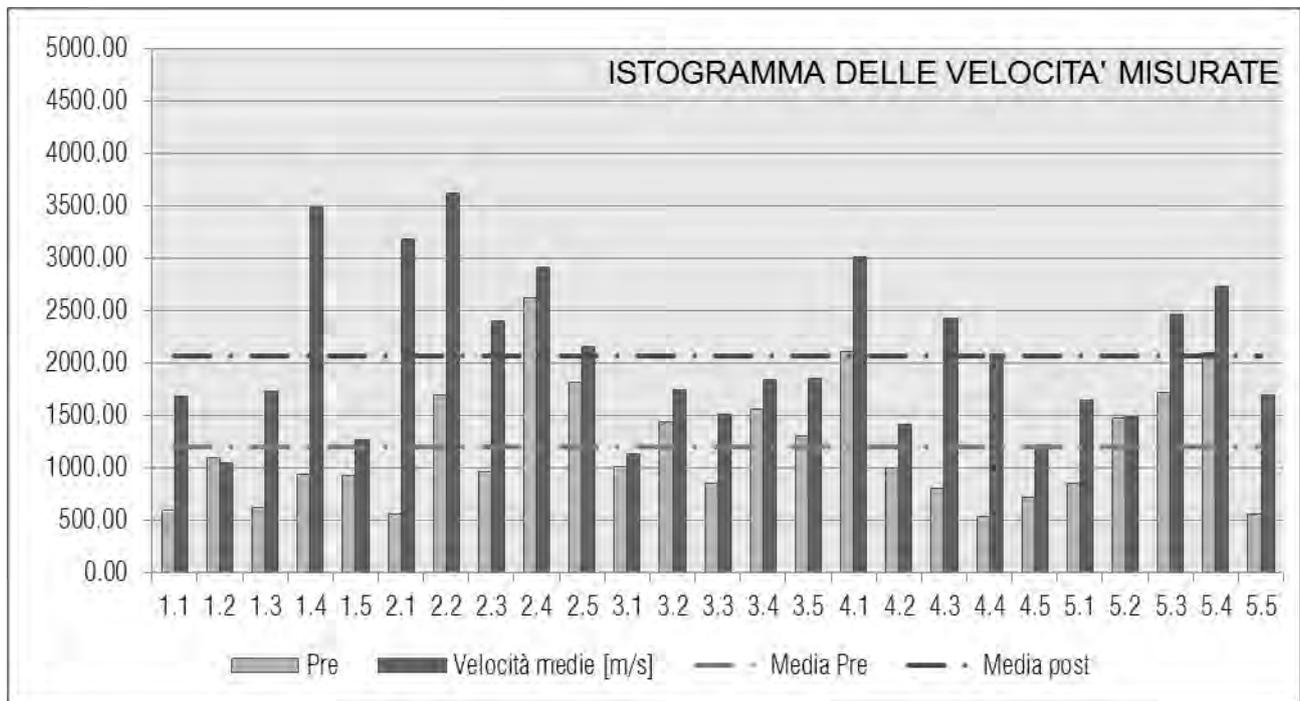


Fig. 2.4. 86- Iistogramma delle velocità soniche So2 (Museo Archeologico)

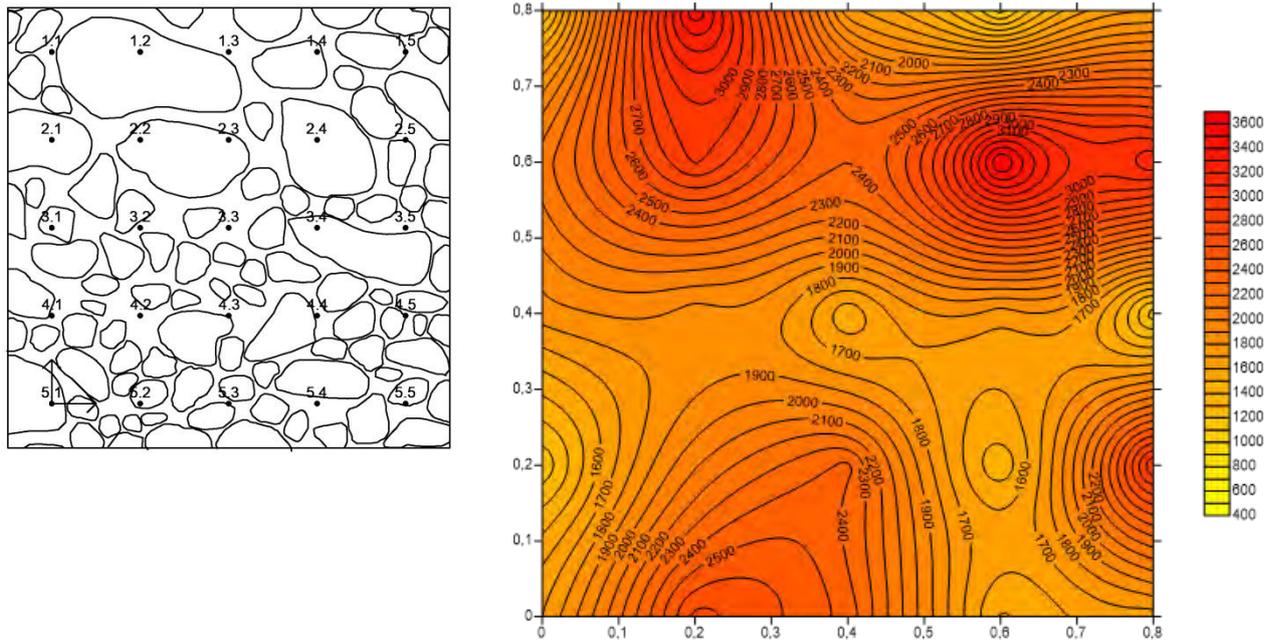


Fig. 2.4. 87 - Campo prova 2: prospetto lato accelerometro e distribuzione velocità soniche post-iniezione

Path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Velocità Pre [m/s]	Velocità Post [m/s]	Diff Velocità [%]
1,1	0,80	0,80	596,21	1688,61	283,22
1,2	0,60	0,80	1094,38	1051,03	96,04
1,3	0,40	0,80	616,34	1730,13	280,71
1,4	0,20	0,80	941,16	3490,12	370,83
1,5	0,00	0,80	931,06	1268,92	136,29
2,1	0,80	0,60	556,35	3182,18	571,98
2,2	0,60	0,60	1693,93	3629,73	214,28
2,3	0,40	0,60	957,46	2398,88	250,55
2,4	0,20	0,60	2617,99	2915,29	111,36
2,5	0,00	0,60	1815,31	2154,31	118,67
3,1	0,80	0,40	1014,39	1131,67	111,56
3,2	0,60	0,40	1443,54	1745,74	120,93
3,3	0,40	0,40	856,82	1516,39	176,98
3,4	0,20	0,40	1561,64	1847,35	118,30
3,5	0,00	0,40	1306,98	1850,68	141,60

4,1	0,80	0,20	2111,56	3017,01	142,88
4,2	0,60	0,20	994,11	1416,37	142,48
4,3	0,40	0,20	804,04	2426,15	301,74
4,4	0,20	0,20	537,56	2087,92	388,40
4,5	0,00	0,20	720,87	1218,91	169,09
5,1	0,80	0,00	849,08	1648,33	194,13
5,2	0,60	0,00	1473,48	1486,28	100,87
5,3	0,40	0,00	1724,14	2458,68	142,60
5,4	0,20	0,00	2097,17	2737,02	130,51
5,5	0,00	0,00	565,69	1701,40	300,77

Tab. 2.4. 28 - Tabella differenza velocità soniche pre e post iniezione So2 (Museo Archeologico)

Tabella riassuntiva con velocità pre e post iniezione e differenze percentuali per i punti della griglia

Inserendo in una tabella per ogni punto della griglia le velocità pre iniezione e post iniezione si è potuto calcolare l'incremento percentuale per ogni punto e con questi valori realizzare un grafico di distribuzione delle variazioni percentuali per poter effettuare un confronto visivo tra le due fasi dell'intervento e relazionarle al grafico delle quantità di miscela iniettate.

Si può notare come in diversi punti come 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.4, 5.2 l'incremento di velocità sia stato molto limitato. Da sottolineare però il fatto che quasi tutti questi presentano velocità iniziali piuttosto elevate, quindi il motivo dello scarso risultato sta nel fatto che la situazione iniziale non consolidata presenta già una buona consistenza della muratura e una limitata presenza di vuoti, fattore che impedisce il flusso della miscela all'interno del paramento murario. Viceversa, i punti 1.1, 2.1, 4.4 e 5.5 presentano velocità iniziali tra i 500 e i 600 m/s, valori tipici di murature di scarsa consistenza, e per la forte presenza di vuoti in quelle zone l'iniezione di miscela produce un consolidamento del 300-400%, con un picco per il punto 2,1 che passa da una velocità iniziale di 556,35 m/s ad una velocità pari a 3182,18 m/s, con un incremento di 5,7 volte. In generale si osserva che le porzioni di murature con velocità iniziali basse permettono una maggiore iniettabilità e quindi raggiungono incrementi di velocità maggiori. Il pannello iniettato risulta quindi consistente in tutti i suoi punti, con picchi di valori molto elevati ma, fatto molto positivo, senza punti con velocità inferiore a 1000 m/s.

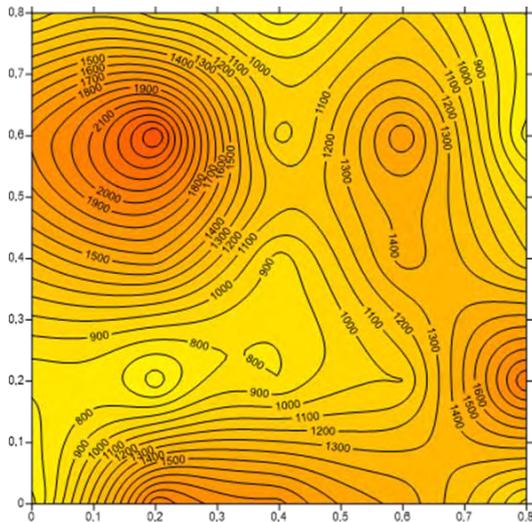


Fig. 2.4. 88 - Distribuzione velocità soniche pre-iniezione

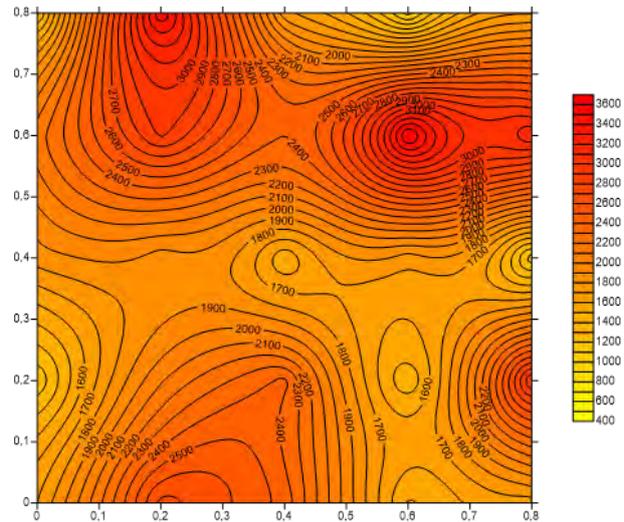


Fig. 2.4. 89 - Distribuzione velocità soniche post-iniezione

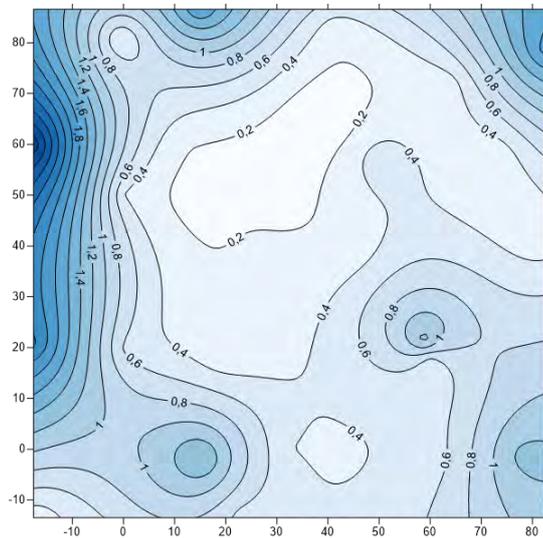


Fig. 2.4. 90 - Distribuzione litri di miscela iniettati

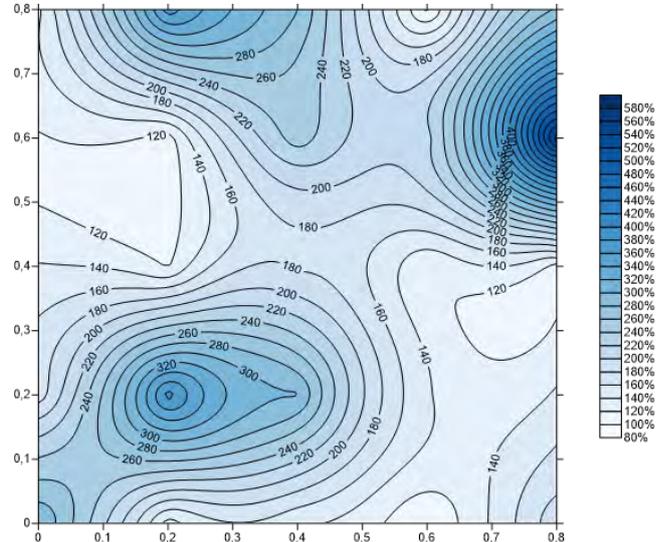


Fig. 2.4. 91 - Distribuzione delle differenze percentuali di velocità

Per verificare l'attendibilità di quest'analisi si può controllare se le zone con un consistente incremento di velocità corrispondono a zone in cui sono state iniettate consistenti quantità di miscela. Non è infatti possibile effettuare confronti puntuali in quanto non sono chiari quali siano i percorsi seguiti dalla miscela all'interno del paramento murario.

### Prova sonica tomografica

#### TM02A

La tomografia è stata effettuata nella riga di punti centrale, corrispondente alla riga 3, quindi ad un'altezza di 1.04m dal pavimento, come già visto nella fase pre-iniezione. Anche in questo caso sono state effettuate tre acquisizioni per ogni punto, cioè in ogni punto del lato

martello sono stati battuti tre colpi, e nella registrazione dei dati ogni punto è stato nominato come nella fase precedente con due numeri di cui il primo sta ad indicare il lato in cui si trova.

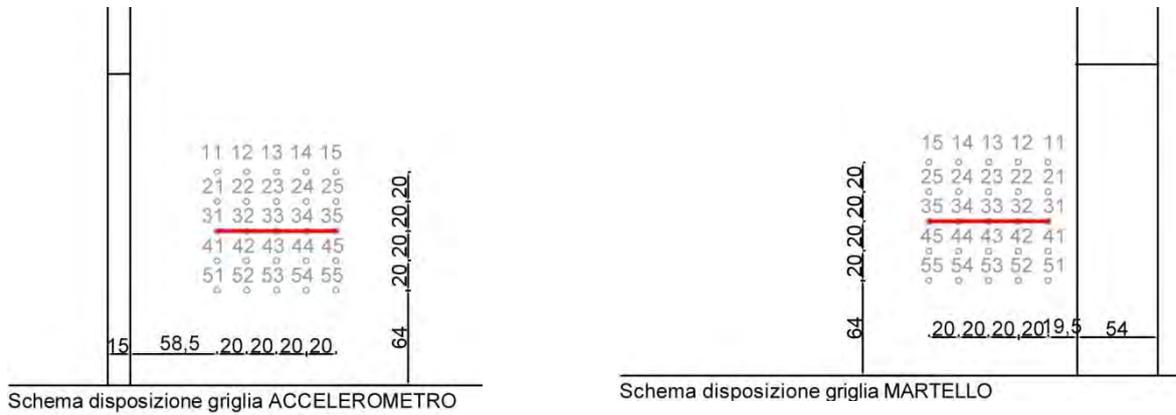


Fig. 2.4. 92 - Disposizione griglia prova sonica tomografica TMO2A(Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
4	27	965
4	9	1235
22	27	1142
22	9	1247
40	27	1385
40	9	1094
58	27	1244
58	9	1156
76	27	1279
76	9	1258

Tab. 2.4. 29 - Velocità soniche tomografiche TMO2A (Museo Archeologico)

Come possiamo vedere dai dati delle velocità medie registrate nella tabella e dalla mappa grafica sottostante la sezione si presenta omogenea. Il valore di massimo in questo caso si trova proprio in una zona che presentava velocità basse nella fase pre-iniezione quindi la miscela è sicuramente iniettata nel giusto modo filtrando attraverso la muratura nella parte più interna della sezione.

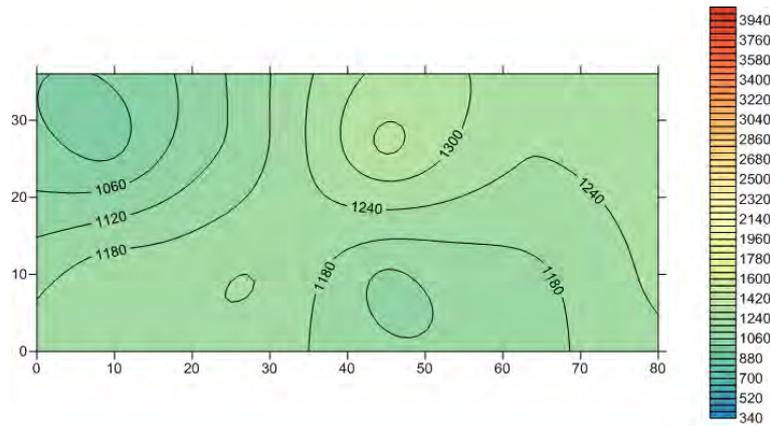


Fig. 2.4. 93- Distribuzione velocità soniche tomografiche TMOzA post iniezione (Museo Archeologico)

TMOzB

In questo caso è stata analizzata la sezione corrispondente ai cinque punti della colonna 3, cioè i punti 1.3, 2.3, 3.3,4.3 e 5.3, e sono stati registrati i dati come nella fase precedente all'iniezione.

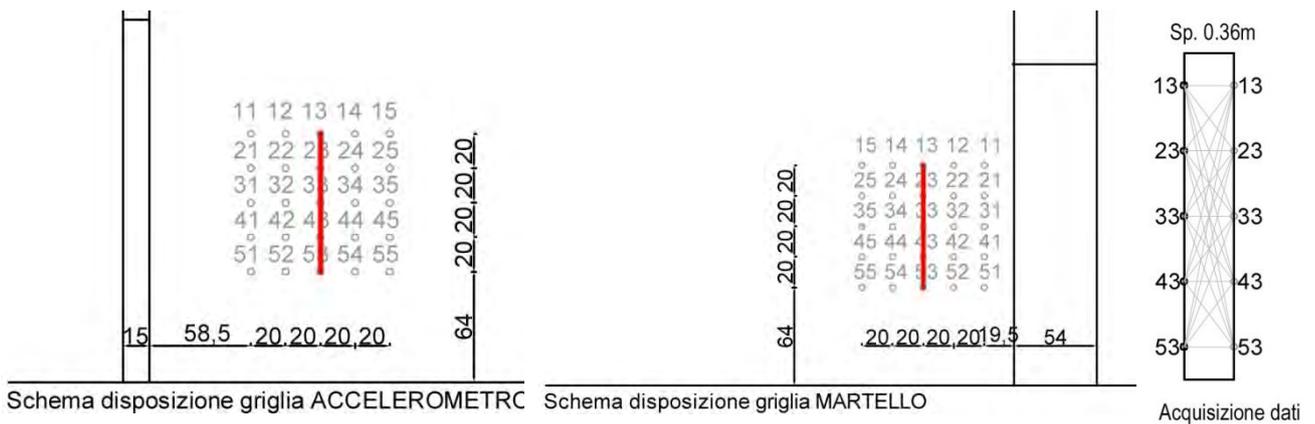


Fig. 2.4. 94 - Disposizione griglia prova sonica tomografica TMOzB(Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
4	27	1346
4	9	1393
22	27	1431
22	9	1228
40	27	1021
40	9	927
58	27	1203
58	9	1329
76	27	1136
76	9	1285

Tab. 2.4. 30- Tabella velocità soniche tomografiche TMOzB post iniezione (Museo Archeologico)

Dai dati registrati possiamo vedere velocità nel complesso elevate, e quindi una buona qualità muraria. Dalla mappa grafica vediamo quindi una sezione abbastanza omogenea con un punto che risalta, evidenziato dai caratteristici bull's eyes ovvero occhi di bue usati dal programma surfer, per una qualità muraria leggermente minore, punto posto tra le coordinate 40 e 50, quindi in prossimità del punto 3, verso l'interno della sezione.

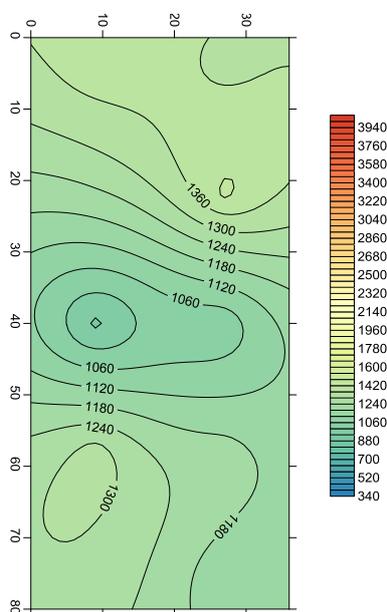


Fig. 2.4. 95 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TMo2B post iniezione (Museo Archeologico)

Anche in questo caso sono state inserite in una tabella le velocità soniche ottenute con le due tomografie, verticale e orizzontale, nelle velocità pre e post iniezione abbiamo potuto valutare l'efficacia dell'intervento stesso come fatto in precedenza con la prova sonica diretta. Nella tabella di sinistra sono elencate le velocità pre, post e la differenza percentuale tra esse della tomografia TMo2A, in quella di destra della TMo2B.

Velocità pre [m/s]	Velocità post [m/s]	Differenza pre-post [%]
894	1235	138
750	1247	166
585	1094	187
838	1156	138
890	1258	141
638	965	151
620	1142	184
722	1385	192
901	1244	138
1232	1279	104

Tab. 2.4. 31- Differenze di velocità soniche tomografiche TMo2A (Museo Archeologico)

Velocità pre [m/s]	Velocità post [m/s]	Differenza pre-post [%]
701	1393	199
511	1228	240
610	927	152
633	1329	210
775	1285	166
506	1346	266
586	1431	244
589	1021	173
700	1203	172
877	1136	130

Tab. 2.4. 32 - Differenze di velocità soniche tomografiche TMo2B (Museo Archeologico)

Dalle mappe grafiche sottostanti possiamo notare un complessivo miglioramento di entrambe le sezioni indagate e una maggiore omogeneità dopo l'intervento di iniezione. Nel caso della sezione verticale, corrispondente alla tomografia TMO2B vediamo un'area a metà sezione con velocità leggermente minore, e quindi una qualità muraria minore, in corrispondenza delle coordinate 0.1;0.4, quindi verso il lato accelerometro. In questo caso possiamo ipotizzare che la disposizione delle canule e dei vuoti intorno a quell'area non abbia permesso un ottimale passaggio della miscela fino a quel punto. Considerando infatti le caratteristiche della miscela utilizzata possiamo escludere che ciò sia dovuto da una sua eccessiva densità.

I due grafici sotto mostrano invece la percentuale di incremento di velocità di trasmissione sonora nei vari punti. Per quanto riguarda la sezione orizzontale, TMO2A, si è registrato un incremento medio di velocità pari al 154%; mentre per la sezione verticale, TMO2B, del 195%. Nella sezione verticale possiamo vedere come, nel punto osservato prima, non si sia stato un effettivo aumento della velocità, è infatti evidenziato da un punto bianco. Vediamo invece un buon aumento della velocità in alto verso il lato su cui è stata eseguita l'iniezione, questo è dovuto sia alla scarsa velocità pre-iniezione, e quindi all'elevato numero di vuoti presenti, che alla presenza di una cannula nelle vicinanze che ha quindi permesso di consolidare in modo ottimale l'area.

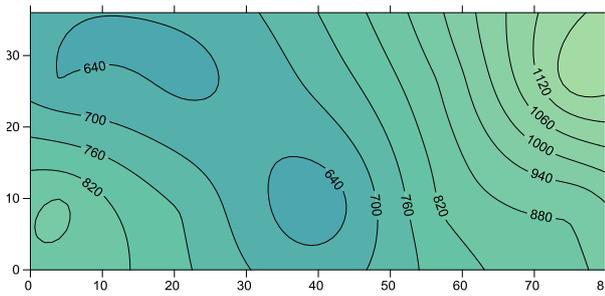


Fig. 2.4. 96- Distribuzione velocità soniche tomografiche TMO2A pre-iniezione

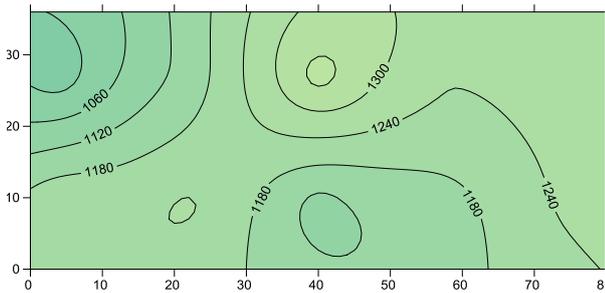


Fig. 2.4. 99 -Distribuzione velocità soniche tomografiche TMO2A post-iniezione

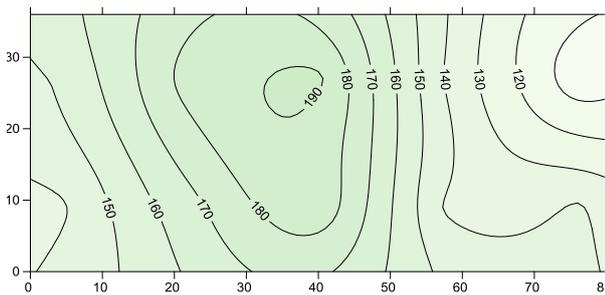


Fig. 2.4. 100 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMO2A

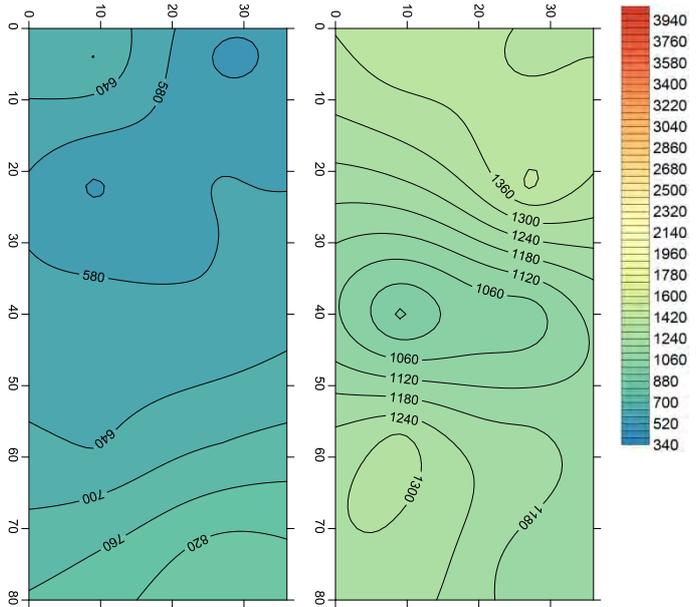


Fig. 2.4. 97 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TMO2B pre-iniezione

Fig. 2.4. 98 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TMO2B post-iniezione

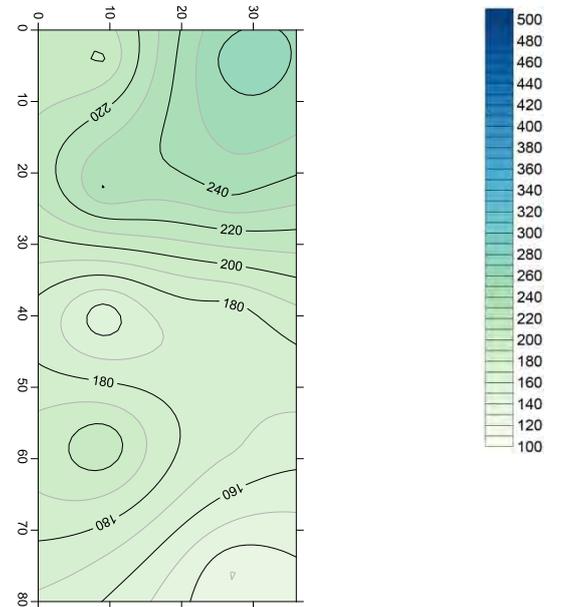


Fig. 2.4. 101 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMO2B

### *Endoscopie*

Come ultima fase sono state eseguite delle endoscopie nel pannello per validare maggiormente le considerazioni fatte, controllando il punto con il maggiore incremento di velocità e il punto con la minore velocità assoluta. L'obiettivo è verificare che nel primo caso sia riscontrata all'interno della sezione una buona penetrazione della miscela, viceversa nel secondo caso. Dopo la perforazione da parte a parte della muratura in quei punti con un trapano con punta di 3 cm di diametro, si è proceduto a ripulire il foro, come nell'immagine di seguito.



*Pulitura del foro*



*Inserimento del metro*

*Fig. 2.4. 102 – Pulitura del foro e inserimento del metro endoscopia-campo prova 2 (Museo Archeologico)*

Dopo la pulitura è stato inserito nel foro un metro, per avere un riferimento della profondità dei fotogrammi interni. Il cavo con dispositivo ottico è stato fissato alla barra in acciaio, e si è proceduto inserendo gradualmente la barra, registrando così un video e scattando delle foto ogni 5 cm

In questo campo prova sono stati scelti il punto 3.3, con velocità iniziale 856,82 m/s, finale 1516,39, con un incremento del 176,98%, e il punto 4.4, con velocità iniziale 537,56 m/s, finale 2087,92, con un incremento del 388,4%.

Punto 3.3



10cm



20cm



30cm

Punto 4.4



10cm



20cm



30cm

Come possiamo vedere dalle immagini il punto 4.4 si presenta più omogeneo e meglio iniettato rispetto al punto 3.3 dove possiamo vedere molte parti vuote dove la miscela non è riuscita a penetrare soprattutto a venti e a trenta cm. Il risultato ottenuto quindi dall'incremento di velocità, che indica come meglio iniettato il punto 4.4 rispetto al 3.3 è confermato dalle endoscopie.

### 2.4.7.3. Campo prova 3

*Prova sonica diretta*



Fig. 2.4. 103 - Campo prova 3:lato accelerometro e lato martello (Museo Archeologico)

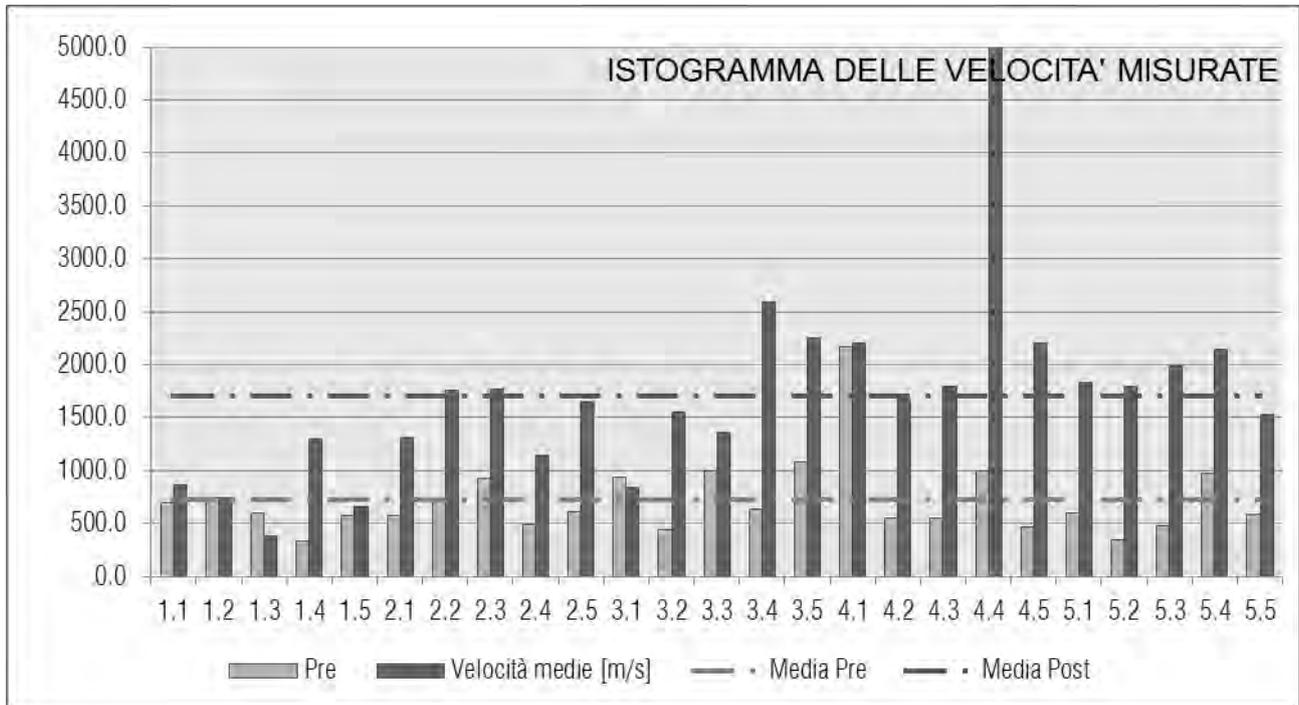
La prova è stata eseguita con le stesse modalità della fase precedente, sempre con tre acquisizioni per ogni punto della griglia, composta da 5 righe e 5 colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni, per un totale di 25 punti di acquisizione. Nelle foto si vede la griglia realizzata con maglia 10x10 cm per successive applicazioni, ma le acquisizioni sono state effettuate in questa fase solo nei punti corrispondenti alla griglia precedente con maglia 20x20 cm. I valori sono riportati nella seguente tabella:

S3 - CAMPO PROVA LATO CHIOSTRO-Prova post-iniezioni									
BATTUTA					sp	0.375	m		
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	Velocità	
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]	
1	1,1	4.61E-04	2.77E-04	4.08E-04	4.35E-04	2.64E-05	6%	862.76	
2	1,2	5.33E-04	4.96E-04	4.73E-04	5.01E-04	2.46E-05	5%	749.10	
3	1,3	8.97E-04	9.23E-04	1.14E-03	9.87E-04	1.09E-04	11%	379.94	
4	1,4	3.05E-04	2.19E-04	3.45E-04	2.90E-04	5.28E-05	18%	1294.62	
5	1,5	6.03E-04	5.04E-04	6.10E-04	5.72E-04	4.84E-05	8%	655.07	
6	2,1	2.90E-04	2.72E-04	2.98E-04	2.87E-04	1.09E-05	4%	1308.55	
7	2,2	2.14E-04	2.26E-04	1.98E-04	2.13E-04	1.14E-05	5%	1760.37	
8	2,3	1.96E-04	1.96E-04	2.45E-04	2.12E-04	2.31E-05	11%	1769.29	
9	2,4	3.98E-04	3.04E-04	2.83E-04	3.28E-04	5.02E-05	15%	1142.22	
10	2,5	2.35E-04	2.18E-04	2.27E-04	2.27E-04	6.85E-06	3%	1653.15	
11	3,1	4.46E-04	4.60E-04	4.39E-04	4.48E-04	8.91E-06	2%	836.41	
12	3,2	2.68E-04	2.13E-04	2.41E-04	2.41E-04	2.24E-05	9%	1557.42	
13	3,3	2.61E-04	2.64E-04	3.00E-04	2.75E-04	1.75E-05	6%	1362.96	
14	3,4	1.74E-04	1.26E-04	1.33E-04	1.45E-04	2.12E-05	15%	2592.94	
15	3,5	1.58E-04	1.53E-04	1.87E-04	1.66E-04	1.48E-05	9%	2257.95	
16	4,1	1.63E-04	1.86E-04	1.63E-04	1.70E-04	1.06E-05	6%	2200.06	
17	4,2	2.21E-04	2.25E-04	2.26E-04	2.24E-04	2.08E-06	1%	1672.04	
18	4,3	1.71E-04	2.18E-04	2.40E-04	2.09E-04	2.88E-05	14%	1790.35	
19	4,4	6.75E-05	8.19E-05	6.07E-05	7.00E-05	8.86E-06	13%	5355.20	
20	4,5	1.72E-04	1.69E-04	3.28E-04	1.70E-04	1.51E-06	1%	2202.97	
21	5,1	1.98E-04	1.69E-04	2.49E-04	2.05E-04	3.28E-05	16%	1825.65	
22	5,2	1.97E-04	1.84E-04	2.20E-04	2.09E-04	1.54E-05	7%	1797.79	
23	5,3	1.96E-04	1.89E-04	1.81E-04	1.89E-04	6.17E-06	3%	1989.23	
24	5,4	1.77E-04	1.58E-04	1.90E-04	1.75E-04	1.32E-05	8%	2142.08	
25	5,5	1.33E-04	2.90E-04	2.01E-04	2.46E-04	4.45E-05	18%	1527.00	

Tab. 2.4. 33 - Tabella acquisizione dati sonica diretta  $So_3$  post-iniezione (Museo Archeologico)

La prova ha restituito una velocità media complessiva del pannello di 1707,07 m/s, indice di una muratura di buona consistenza, con deviazione standard di 922 m/s e un coefficiente di variazione del 54,03% indici di un pannello murario fortemente eterogeneo. Osservando però l'istogramma seguente, rappresentativo dei valori di velocità sonora registrati nei singoli punti, si nota come il pannello sia eterogeneo ma non a tal livello. Ad influenzare

infatti i valori elevatissimi di deviazione standard e di coefficiente di variazione sono i valori di massima e minima velocità registrati nei punti 4.4 con velocità 5355,2 m/s e 1.3 con velocità 379.9 m/s, valori molto distanti da quelli registrati nel resto del pannello e quindi da considerare con le dovute precauzioni. Eliminando infatti questi due valori dal calcolo degli indici otteniamo una deviazione standard di 509 m/s e un coefficiente di variazione del 31,71%, valori molto inferiori a quelli invece registrati.



Tab. 2.4. 34 - Istogramma velocità sonore  $So_3$

Dal grafico di distribuzione delle velocità sonore si nota infatti chiaramente il massimo presente nel punto 4.4 mentre il resto del pannello è relativamente omogeneo con valori attorno ai 1500/2000 m/s. L'unica zona con caratteristiche di scarsa consistenza è quella corrispondente alla riga 1 in cui la velocità solo nel punto 1.4 supera i 1000 m/s

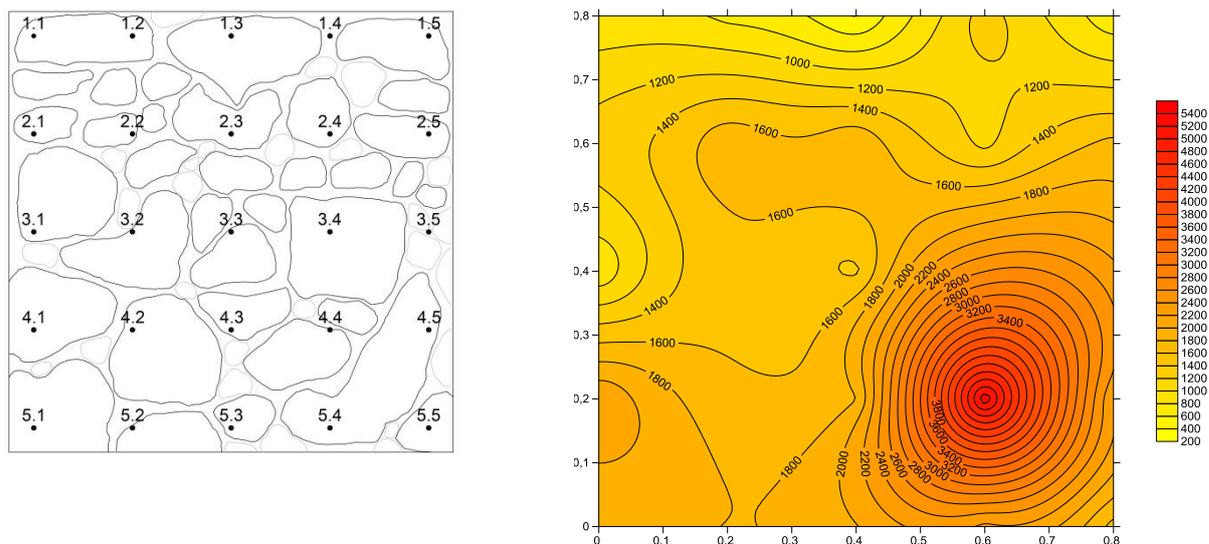


Fig. 2.4. 104 - Campo prova 3: prospetto lato accelerometro e distribuzione velocità soniche post-iniezione (Museo Archeologico)

path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Velocità Pre [m/s]	Velocità Post [m/s]	Diff Velocità [%]
1.1	0.00	0.80	695.9	862.8	123.98
1.2	0.20	0.80	744.3	749.1	100.64
1.3	0.40	0.80	600.2	379.9	63.30
1.4	0.60	0.80	336.5	1294.6	384.69
1.5	0.80	0.80	570.0	655.1	114.92
2.1	0.00	0.60	570.7	1308.6	229.29
2.2	0.20	0.60	709.6	1760.4	248.07
2.3	0.40	0.60	925.3	1769.3	191.22
2.4	0.60	0.60	488.8	1142.2	233.67
2.5	0.80	0.60	608.4	1653.1	271.73
3.1	0.00	0.40	938.3	836.4	89.15
3.2	0.20	0.40	439.0	1557.4	354.73
3.3	0.40	0.40	1000.9	1363.0	136.18
3.4	0.60	0.40	631.5	2592.9	410.60
3.5	0.80	0.40	1077.9	2257.9	209.48
4.1	0.00	0.20	2168.4	2200.1	101.46
4.2	0.20	0.20	553.2	1672.0	302.24
4.3	0.40	0.20	551.8	1790.3	324.44
4.4	0.60	0.20	999.0	5355.2	536.04
4.5	0.80	0.20	470.8	2203.0	467.90
5.1	0.00	0.00	598.5	1825.6	305.02
5.2	0.20	0.00	347.6	1797.8	517.14
5.3	0.40	0.00	483.0	1989.2	411.82

5.4	0.60	0.00	977.3	2142.1	219.18
5.5	0.80	0.00	591.4	1527.0	258.20

Tab. 2.4. 35- Tabella differenza di velocità prima e dopo l'intervento di iniezione  $SO_3$  (Museo Archeologico)

Inserendo in una tabella per ogni punto della griglia le velocità pre iniezione e post iniezione si è potuto calcolare l'incremento percentuale per ogni punto e con questi valori realizzare un grafico di distribuzione delle variazioni percentuali per poter effettuare un confronto visivo tra le due fasi dell'intervento e relazionarle al grafico delle quantità di miscela iniettate.

Dalla tabella si osserva come ad eccezione dei punti 1.1, 1.2, 1.5, 3.3 e 4.1, che hanno avuto un incremento trascurabile, nel resto del pannello gli incrementi sono stati molto elevati, da due fino a cinque volte il valore iniziale di velocità sonora. Gli incrementi maggiori si registrano, tralasciando il punto 4.4, nei punti 3.4, 4.5, 5.2 e 5.3 che presentano incrementi superiori a 400%; infatti in questi punti la velocità sonora nella situazione non consolidata è molto bassa attorno ai 500 m/s indice quindi di murature di scarsa consistenza mal conservate e con considerevole presenza di vuoti. Tutti questi punti raggiungono velocità prossime ai 2000 m/s, velocità attribuibili a murature di buona consistenza, quindi il consolidamento è stato efficiente.

Osservando che le velocità medie nel pannello non consolidato sono generalmente basse, solo in tre punti maggiori di 1000 m/s, i forti incrementi registrati confermano il fatto che questo tipo di intervento è tanto più efficace quanto è peggiore la situazione di partenza. Infatti da una velocità sonora media nel pannello di 723 m/s si passa ad una velocità media di 1707 m/s, con un incremento del 236%.

Anche in questo pannello si registrano due casi, nel punto 1.3 e 3.1, in cui la velocità post iniezione è inferiore a quella pre iniezione dato attribuibile a difficoltà nell'esecuzione della prova con le identiche modalità nelle due fasi, soprattutto perché la ristilatura effettuata solamente dopo le indagini soniche iniziali ha fornito una superficie d'indagine differente da quella iniziale rendendo così impossibile battere nello stesso identico punto, nella prima fase infatti bisognava confrontarsi con distacchi di malta e superfici irregolari.

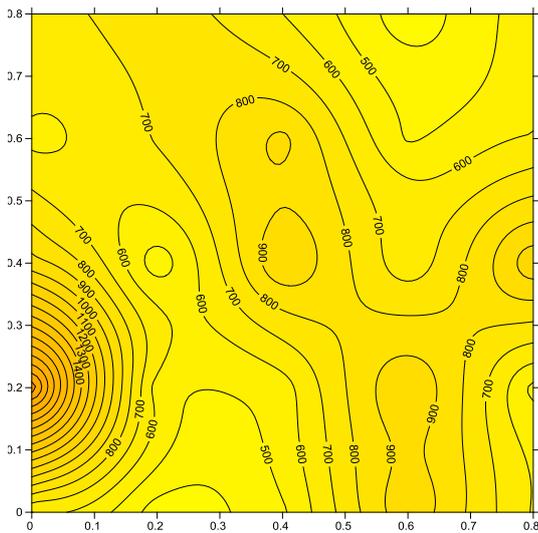


Fig. 2.4. 105 - Distribuzione velocità soniche pre-iniezione

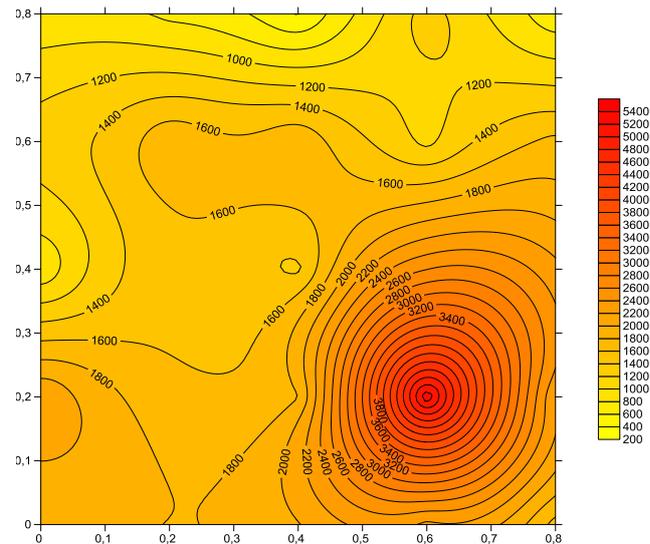


Fig. 2.4. 106 - Distribuzione velocità soniche post-iniezione

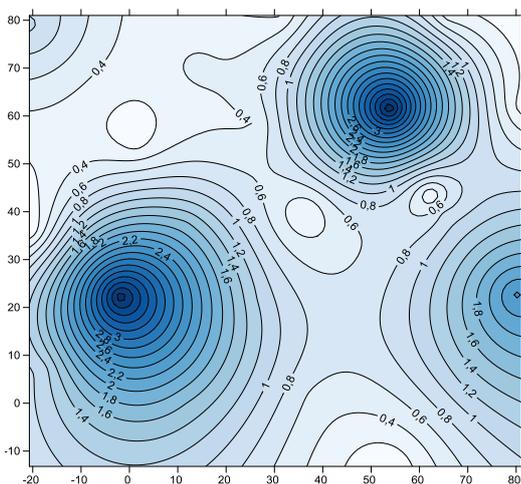


Fig. 2.4. 107 - Distribuzione litri di miscela iniettati

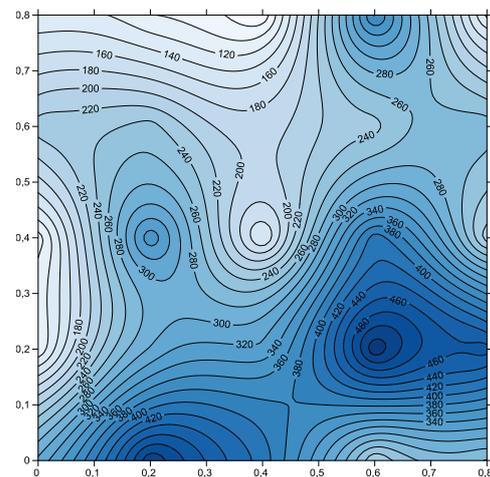


Fig. 2.4. 108 - Distribuzione differenze percentuali di velocità

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche, delle quantità di miscela iniettata e delle differenze percentuali di velocità si possono effettuare alcune considerazioni. Si nota chiaramente il punto 4.4 con la sua elevatissima velocità finale che influenza fortemente il grafico di distribuzione delle velocità soniche post iniezione e il grafico rappresentativo delle differenze percentuali di velocità nei punti.

Senza dimenticare le difficoltà riscontrate durante l'iniezione di questo pannello per l'eccessiva densità della miscela, si notano nel grafico rappresentativo dei litri di miscela iniettati chiaramente i tre fori in cui si è iniettata la maggiore quantità di miscela.

Mentre le due zone nella parte destra del pannello in cui si registrano una buona quantità di litri iniettati corrispondono a porzioni di muratura in cui l'incremento di velocità è stato

considerevole, la zona nella parte sinistra del grafico, in cui è visibile una consistente iniezione di miscela, presenta incrementi bassissimi. Questo a dimostrazione del fatto che questa miscela nonostante abbia presentato numerosi problemi per l'eccessiva densità, tale da intasare più volte la pompa di iniezione, è riuscita comunque a fluire all'interno dei vuoti presenti nello spessore murario. Si può infatti ipotizzare che parte della miscela iniettata in quel punto si sia spostata verso il centro del pannello e nella zona inferiore, a seconda della distribuzione interna dei vuoti.

### Prove soniche tomografiche

#### TMo3A

La prova sonora TMo3A è stata effettuata nella sezione orizzontale di mezzeria del campo prova e quindi nei punti 3.5, 3.4, 3.3, 3.2, 3.1 che sono stati rinominati con il primo numero identificativo del lato in cui si trovano e il secondo in progressione.

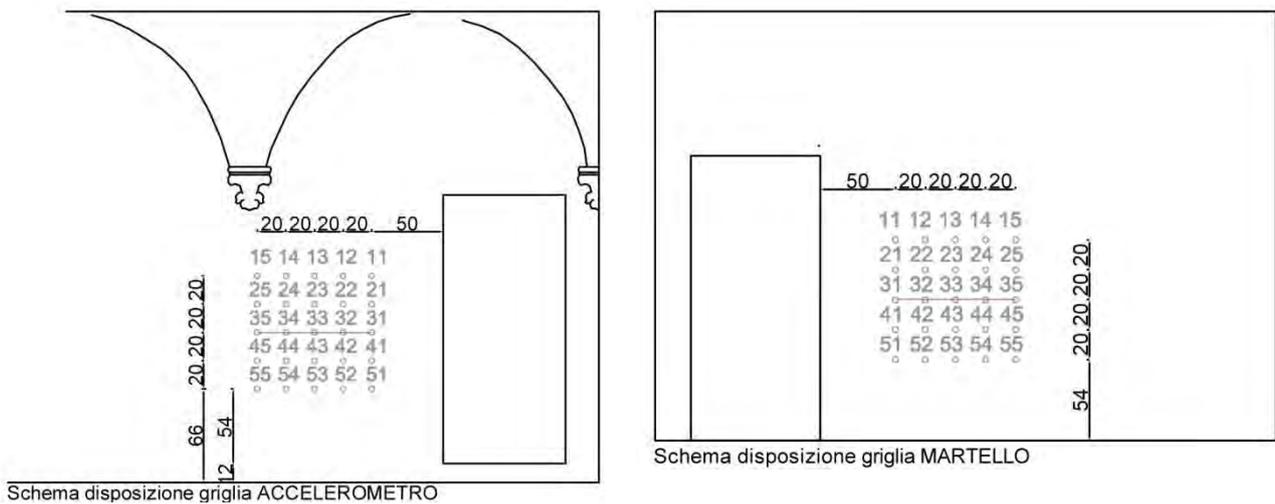


Fig. 2.4. 109 - Disposizione griglia prova sonica tomografica TMo3A (Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	28.125	1035
2.5	9.375	943
21.25	28.125	1115
21.25	9.375	1140
40	28.125	1047
40	9.375	1393
58.75	28.125	1176
58.75	9.375	1335
77.5	28.125	1460
77.5	9.375	1303

Tab. 2.4. 36 - Tabella velocità soniche tomografiche TMo3A post-iniezione (Museo Archeologico)

Le velocità acquisite nella fase post iniezione sono abbastanza omogenee e presentano quasi tutti valori sopra ai 1000 m/s. Considerando che nella fase precedente l'iniezione tutti i

valori tranne uno erano minori di 1000 m/s l'aumento dovuto all'iniezione è facilmente verificabile, dato interessante visti i vari problemi avuti in fase di intervento.

Dall' immagine grafica vediamo una sezione abbastanza omogenea leggermente più consolidata nella parte destra, ma non sono presenti aree all'interno della muratura con una qualità muraria particolarmente bassa che facciano pensare ad una iniezione non adeguata.

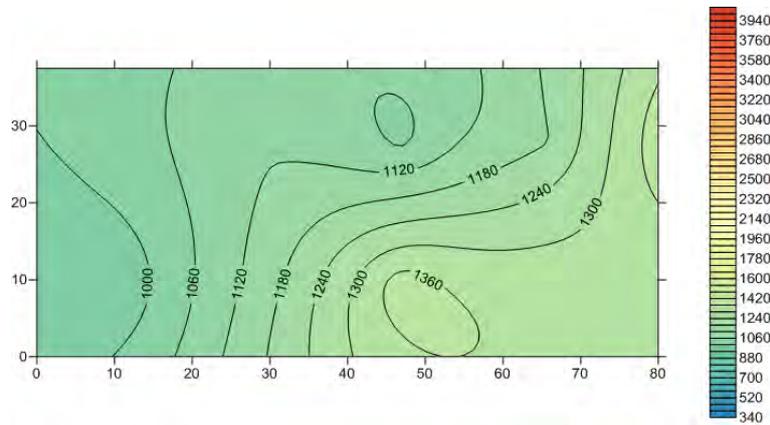


Fig. 2.4. 110- Distribuzione velocità soniche tomografiche TM03A post iniezione (Museo Archeologico)

### TM03B

Nel campo prova 3 è stata svolta anche la prova tomografica lungo la sezione verticale, come nella fase precedente all'intervento di iniezione, corrispondente quindi ai punti con coordinate 1.3, 2.3, 3.3, 4.3, 5.3 che anche in questo caso sono stati rinominati in progressione da 1.1 a 1.5 nel lato accelerometro, lato dove successivamente è stata effettuata l'iniezione, e da 2.1 a 2.5 nell'altro lato.

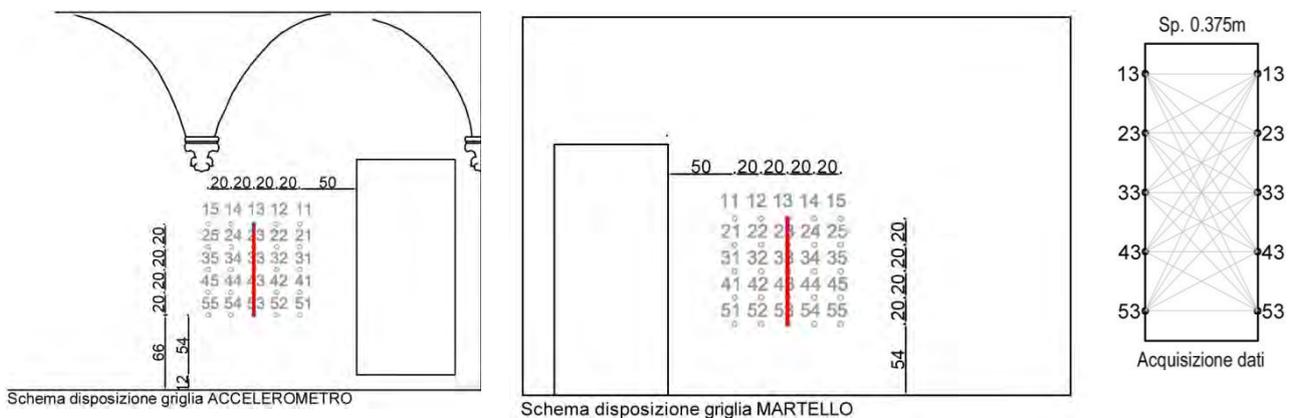


Fig. 2.4. 111 - Disposizione griglia prova sonica tomografica TM03B(Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2.5	28.125	938
2.5	9.375	610
21.25	28.125	971
21.25	9.375	869
40	28.125	961
40	9.375	896
58.75	28.125	1053
58.75	9.375	1133
77.5	28.125	992
77.5	9.375	1788

Tab. 2.4. 37 - Tabella velocità soniche tomografiche  $TM_{03B}$  post-iniezione (Museo Archeologico)

I valori ottenuti in questa fase sono mediamente più alti rispetto alla precedente ma non molto omogenei, segno di una iniezione non completa e ottimale.

La disomogeneità del pannello è confermato dalla mappa grafica ottenuta mediante il programma surfer, la zona inferiore è infatti di qualità migliore rispetto a quella superiore, rispettivamente evidenziate dai colori giallo e blu.

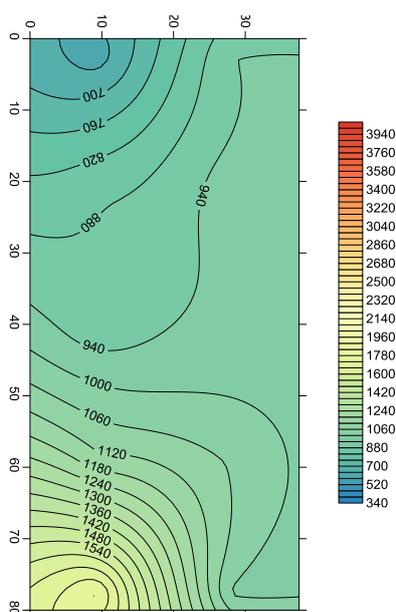


Fig. 2.4. 112 - Distribuzione velocità soniche tomografiche  $TM_{03B}$

Come nei campi prova precedenti inserendo in una tabella le velocità soniche ottenute con le due tomografie, verticale e orizzontale, nelle velocità pre e post iniezione abbiamo potuto valutare l'efficacia dell'intervento stesso come fatto in precedenza con la prova sonica diretta. Nella tabella di sinistra sono elencate le velocità pre, post e la differenza percentuale tra esse della tomografia  $TM_{03A}$ , in quella di destra della  $TM_{03B}$ .

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
479	943	197
418	1140	273
588	1393	237
519	1335	257
626	1303	208
508	1035	204
452	1115	247
483	1047	217
521	1176	226
530	1460	275

Fig. 2.4. 113 - Differenze di velocità soniche tomografiche TMO<sub>3</sub>A (Museo Archeologico)

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
454	610	134
657	869	132
680	896	132
595	1133	190
579	1788	309
622	938	151
589	971	165
589	961	163
590	1053	178
478	992	208

Fig. 2.4. 114 - Differenze di velocità soniche tomografiche TMO<sub>3</sub>B (Museo Archeologico)

Confrontando le mappe grafiche delle due sezioni ottenute mediante il programma surfer possiamo osservare un aumento omogeneo per quanto riguarda la sezione orizzontale, la TMO<sub>3</sub>A, e un aumento invece fortemente disomogeneo nella sezione verticale, la TMO<sub>3</sub>B. La differenza di aumento tra la sezione verticale e quella orizzontale è molto probabilmente dovuta alle difficoltà avute in fase di intervento con questa miscela, la miscela è infatti stata modificata più volte per raggiungere una densità ottimale in quanto con la dose d'acqua prescritta dalla scheda tecnica la miscela era troppo densa e dopo poco tempo perdeva fluidità non riuscendo così a penetrare tra i vuoti della muratura. La sezione orizzontale è infatti stata iniettata quasi contemporaneamente mentre quella verticale no, in quanto l'iniezione è stata fatta a partire dai punti più in basso e via via salendo; per questo abbiamo quindi un aumento omogeneo nella prima e nella seconda no.

Questo è confermato anche dai grafici sottostanti che rappresentano la percentuale di aumento di velocità nei vari punti, vediamo infatti come nella sezione verticale si abbia avuto un aumento maggiore nella parte inferiore e quasi nullo in quella superiore. L'aumento medio di velocità nella TMO<sub>3</sub>A è stato del 234%, mentre nella TMO<sub>3</sub>B del 176% quindi molto più basso dovuto allo scarso aumento avuto nella parte superiore del pannello.

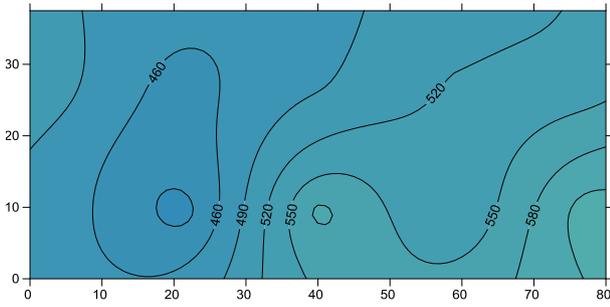


Fig. 2.4. 115 - Distribuzione velocità soniche tomografiche pre-iniezione TMO3A

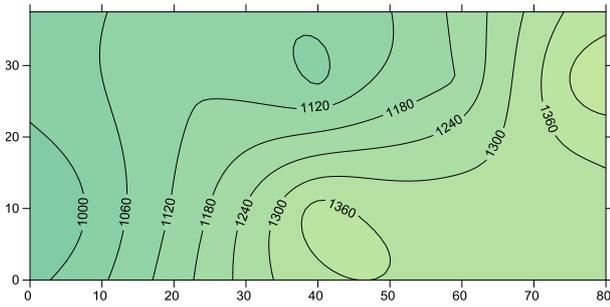


Fig. 2.4. 117 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TMO3A

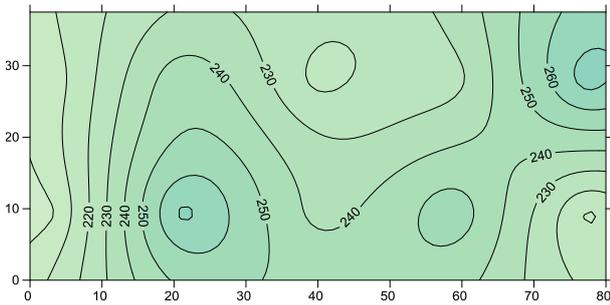


Fig. 2.4. 118 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMO3A

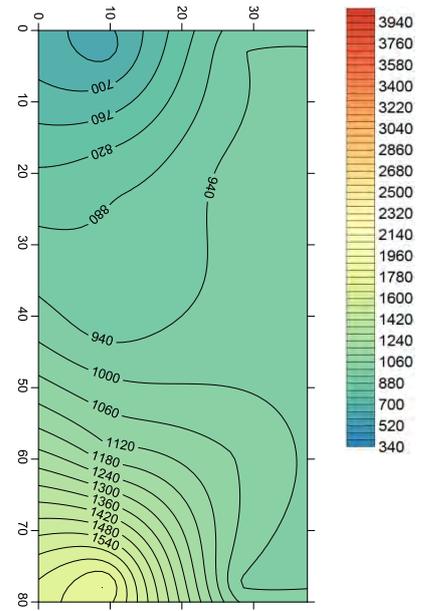


Fig. 2.4. 116 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TMO3B

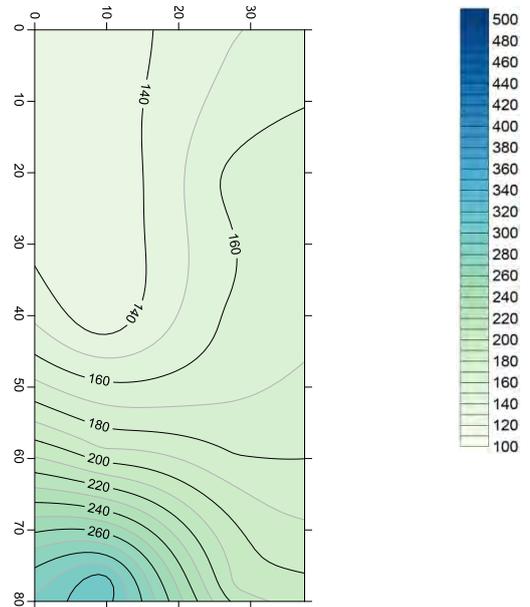


Fig. 2.4. 119 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMO3B

*Endoscopie*

In questo campo prova sono stati scelti i punti 1.3 e 5.2. In particolare il primo è stato scelto in quanto ha mostrato un calo di velocità sonica rispetto alla situazione preiniezione, passando da una velocità di 600,2 m/s ad una di 379,9 m/s, sicuramente il calo è stato dovuto a problemi nell'esecuzione della prova sonica ma è comunque indice di una cattiva iniezione della miscela. Nel secondo punto invece si è avuta una differenza percentuale di velocità del 517,14% passando da una velocità pari a 347,6 m/s ad una di 1797,8 m/s.

Punto 1.3



10cm



20cm



30cm

## Punto 5.2



10cm



20cm



30cm

Anche in questo caso possiamo vedere la differenza tra i due punti, con una superficie molto più liscia e omogenea nel secondo caso indice di una migliore penetrazione della miscela, e invece una superficie irregolare e con molti vuoti nel primo, in particolare a 10 e a 30cm, dove vediamo anche tracce di disgregazione. Nel secondo punto, molto omogeneo, abbiamo solo una porzione caratterizzata da una superficie meno liscia a 20cm.

## 2.4.7.4. Campo prova 4

*Prova sonica diretta*

Fig. 2.4. 120 - Campo prova 4: lato accelerometro e lato martello (Museo Archeologico)

La prova è stata eseguita con le stesse modalità della fase precedente, sempre con tre acquisizioni per ogni punto della griglia, composta da 5 righe e 5 colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni, per un totale di 25 punti di acquisizione. In questo caso, a differenza della fase precedente è stato possibile registrare le tre acquisizioni anche nel punto 4.4 poiché il foro del carotaggio è stato riempito con poliuretano espanso e sigillato accuratamente in superficie con la malta utilizzata per la ristilatura dei giunti. I valori sono riportati nella seguente tabella:

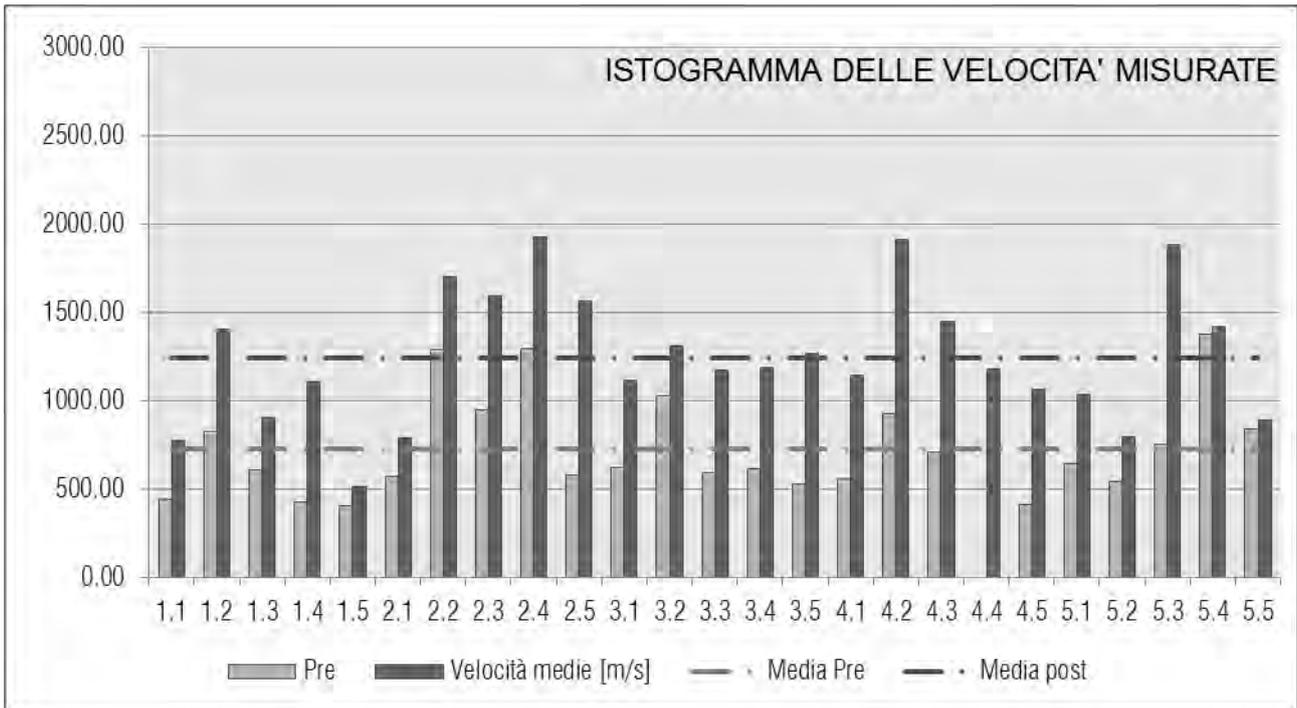
S4 - CAMPO PROVA LATO SCALE								
BATTUTA					sp 0.615 m			
N PUNTO	ID	a	b	c	media	dev	CoV	Velocità
#		[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[sec]	[%]	[m/s]
1	1,1	8.85E-04	7.51E-04	7.55E-04	7.97E-04	6.24E-05	8%	771.46
2	1,2	4.12E-04	4.46E-04	4.54E-04	4.37E-04	1.85E-05	4%	1406.10
3	1,3	7.35E-04	6.37E-04	6.77E-04	6.83E-04	4.05E-05	6%	900.59
4	1,4	5.87E-04	5.63E-04	5.20E-04	5.56E-04	2.78E-05	5%	1105.29
5	1,5	1.28E-03	1.14E-03	1.17E-03	1.20E-03	6.14E-05	5%	513.88
6	2,1	7.72E-04	7.74E-04	8.08E-04	7.84E-04	1.68E-05	2%	783.96
7	2,2	3.94E-04	3.68E-04	3.23E-04	3.62E-04	2.93E-05	8%	1700.37

8	2,3	3.68E-04	4.08E-04	3.81E-04	3.86E-04	1.67E-05	4%	1593.83
9	2,4	3.30E-04	2.87E-04	3.40E-04	3.19E-04	2.29E-05	7%	1926.97
10	2,5	4.04E-04	4.03E-04	3.76E-04	3.94E-04	1.28E-05	3%	1560.19
11	3,1	5.87E-04	5.28E-04	5.37E-04	5.51E-04	2.59E-05	5%	1116.78
12	3,2	4.14E-04	4.96E-04	5.00E-04	4.70E-04	3.96E-05	8%	1309.45
13	3,3	5.18E-04	5.46E-04	5.11E-04	5.25E-04	1.48E-05	3%	1171.32
14	3,4	4.81E-04	5.23E-04	5.50E-04	5.18E-04	2.81E-05	5%	1187.20
15	3,5	4.38E-04	4.79E-04	5.37E-04	4.85E-04	4.05E-05	8%	1269.04
16	4,1	5.70E-04	5.55E-04	4.95E-04	5.40E-04	3.23E-05	6%	1139.25
17	4,2	3.14E-04	3.13E-04	3.40E-04	3.22E-04	1.22E-05	4%	1907.55
18	4,3	4.47E-04	4.26E-04	4.01E-04	4.25E-04	1.86E-05	4%	1448.60
19	4,4	5.23E-04	5.40E-04	5.05E-04	5.23E-04	1.42E-05	3%	1176.49
20	4,5	5.65E-04	5.72E-04	5.95E-04	5.77E-04	1.30E-05	2%	1065.14
21	5,1	5.69E-04	6.23E-04	5.95E-04	5.96E-04	2.23E-05	4%	1032.55
22	5,2	8.15E-04		7.30E-04	7.72E-04	4.28E-05	6%	796.20
23	5,3	3.58E-04	2.80E-04	3.43E-04	3.27E-04	3.34E-05	10%	1881.69
24	5,4	4.11E-04	4.85E-04	4.04E-04	4.33E-04	3.65E-05	8%	1419.54
25	5,5	5.99E-04	6.54E-04	8.22E-04	6.92E-04	8.83E-05	13%	889.30

Fig. 2.4. 121 - Tabella acquisizione dati sonica diretta So4 post-iniezione

La prova ha restituito una velocità media complessiva del pannello di 1243 m/s, valore non molto elevato tipico di murature di media consistenza, con deviazione standard pari a 369 m/s e un coefficiente di variazione pari al 29,65% indici di un pannello murario abbastanza omogeneo. Da sottolineare il fatto che in nessun punto si raggiungono i 2000 m/s, il massimo infatti è 1927 m/s nel punto 2.4, il minimo valore registrato invece è pari a 513,9 m/s nel punto 1.5. Come dato positivo il fatto che solo in sei punti sui 25 della griglia i valori sono inferiori ai 1000 m/s.

L'istogramma sottostante mostra infatti come eccezion fatta per i punti di minimo i valori nel pannello risultano piuttosto omogenei.



Tab. 2.4. 38- Istogramma velocità soniche So<sub>4</sub> (Museo Archeologico)

Dal grafico di distribuzione delle velocità soniche si nota chiaramente la buona omogeneità del pannello, con velocità quasi ovunque attorno a valori medio bassi. Non sono infatti visibili discontinuità per la mancanza di valori troppo alti o troppo bassi rispetto alla media.

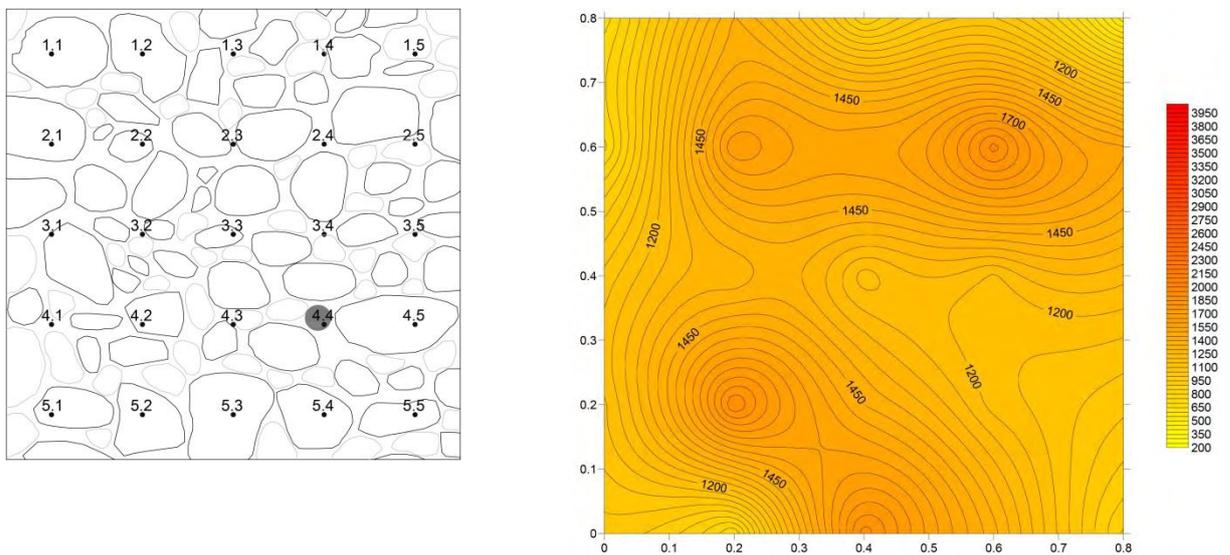


Fig. 2.4. 122 - Campo prova 4: prospetto lato accelerometro e distribuzione velocità soniche post- iniezione (Museo Archeologico)

path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Velocità Pre [m/s]	Velocità Post [m/s]	Diff Velocità [%]
1.1	0.00	0.80	439.95	771.46	175.35
1.2	0.20	0.80	820.20	1406.10	171.43
1.3	0.40	0.80	602.75	900.59	149.41
1.4	0.60	0.80	425.03	1105.29	260.05
1.5	0.80	0.80	403.81	513.88	127.26
2.1	0.00	0.60	568.20	783.96	137.97
2.2	0.20	0.60	1288.48	1700.37	131.97
2.3	0.40	0.60	944.71	1593.83	168.71
2.4	0.60	0.60	1292.33	1926.97	149.11
2.5	0.80	0.60	579.75	1560.19	269.11
3.1	0.00	0.40	618.14	1116.78	180.67
3.2	0.20	0.40	1029.42	1309.45	127.20
3.3	0.40	0.40	594.78	1171.32	196.94
3.4	0.60	0.40	610.75	1187.20	194.38
3.5	0.80	0.40	523.46	1269.04	242.43
4.1	0.00	0.20	558.57	1139.25	203.96
4.2	0.20	0.20	922.32	1907.55	206.82
4.3	0.40	0.20	703.95	1448.60	205.78
4.4	0.60	0.20		1176.49	
4.5	0.80	0.20	411.05	1065.14	259.13
5.1	0.00	0.00	645.76	1032.55	159.90
5.2	0.20	0.00	541.47	796.20	147.04
5.3	0.40	0.00	749.15	1881.69	251.18
5.4	0.60	0.00	1376.91	1419.54	103.10
5.5	0.80	0.00	835.72	889.30	106.41

Tab. 2.4. 39- Tabella differenza di velocità prima e dopo l'intervento di iniezione  $So_4$  (Museo Archeologico)

Inserendo in una tabella per ogni punto della griglia le velocità pre iniezione e post iniezione si è potuto calcolare l'incremento percentuale per ogni punto e con questi valori realizzare un grafico di distribuzione delle variazioni percentuali per poter effettuare un confronto visivo tra le due fasi dell'intervento e relazionarle al grafico delle quantità di miscela iniettate.

Gli incrementi maggiori sono registrati nei punti 1.4, 2.5 e 4.5 i quali presentano velocità soniche circa due volte e mezzo quelle iniziali. In questi punti infatti le velocità iniziali misurate sono tra le più basse del pannello, attorno ai 400-500 m/s mentre quelle finali sono in tutti e tre i casi superiori ai mille. Solo nei punti 5.4 e 5.5, che infatti hanno velocità pre-iniezione relativamente elevate, gli incrementi sono trascurabili; questo ancora una volta a dimostrazione del fatto che laddove la muratura non sia troppo degradata la scarsa presenza dei vuoti comporta un minor effetto dell'intervento di iniezione di miscele consolidanti.

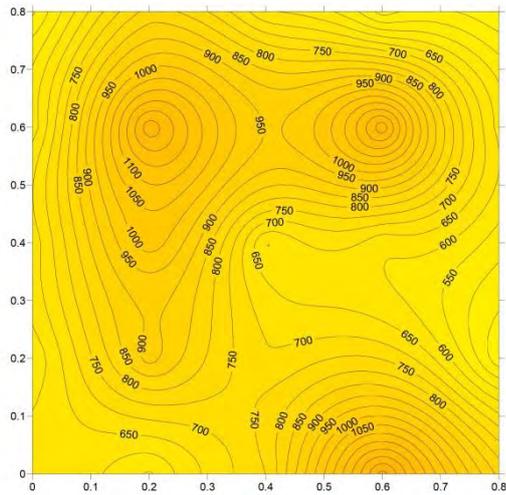


Fig. 2.4. 123- Distribuzione velocità soniche pre-iniezione

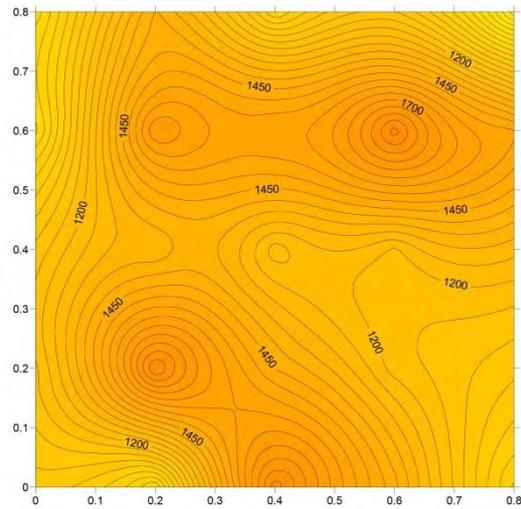


Fig. 2.4. 124 - Distribuzione velocità soniche post-iniezione

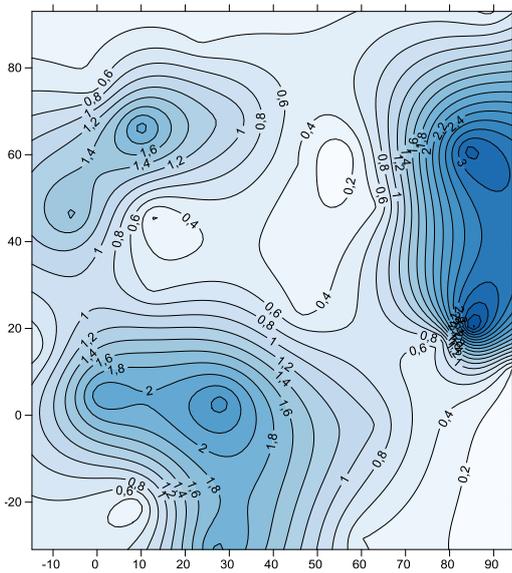


Fig. 2.4. 125 - Distribuzione litri iniettati

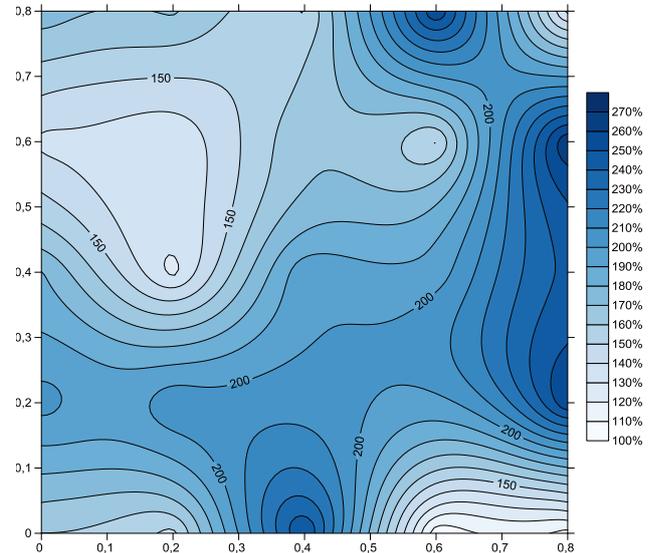


Fig. 2.4. 126 - Distribuzione differenza percentuali di velocità

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche, delle quantità di miscela iniettata e delle differenza percentuale di velocità si possono effettuare alcune considerazioni. Si nota nei grafici di distribuzione di velocità pre e post iniezione una buona omogeneità del pannello.

Dai grafici relativi alle quantità di miscela iniettate e alle differenze di velocità riscontrate si nota come in questo campo prova le maggiori variazioni di velocità sono graficamente immediatamente riconducibili alle zone in cui è stata iniettata una maggior quantità di miscela. In particolare la zona a metà altezza nella parte destra del pannello, che è quella in cui si è iniettato maggiormente, è anche quella che presenta i maggiori e più distribuiti incrementi di velocità. Lo stesso discorso si può fare per la zona a metà della prima riga in basso della griglia. Viceversa nelle zone individuabili indicativamente dalle coordinate orizzontali e verticali (20;40 cm) e (60;60 cm), relative a valori tra i più bassi per quanto

riguarda la miscela iniettata, si nota che corrispondono alle zone con valori tra i più bassi per quanto riguarda gli incrementi di velocità.

Si può quindi ipotizzare per questo pannello che la miscela sia fluita in maniera adeguata in profondità nel paramento, ma che non si sia particolarmente distribuita nelle zone adiacenti ai fori di iniezione.

### Prove soniche tomografiche

#### TMO<sub>4</sub>A

La sezione indagata nella prova tomografica TMO<sub>4</sub>A è quella corrispondente ai punti 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 della griglia di 80 cm usata per la prova sonica diretta So<sub>4</sub>. In questo caso non è stata scelta la sezione di mezzeria ma questa per posizionarsi più lontano dal vuoto lasciato da un carotaggio effettuato nell'ambito di una campagna di indagine precedente, situato nel punto 4.4.

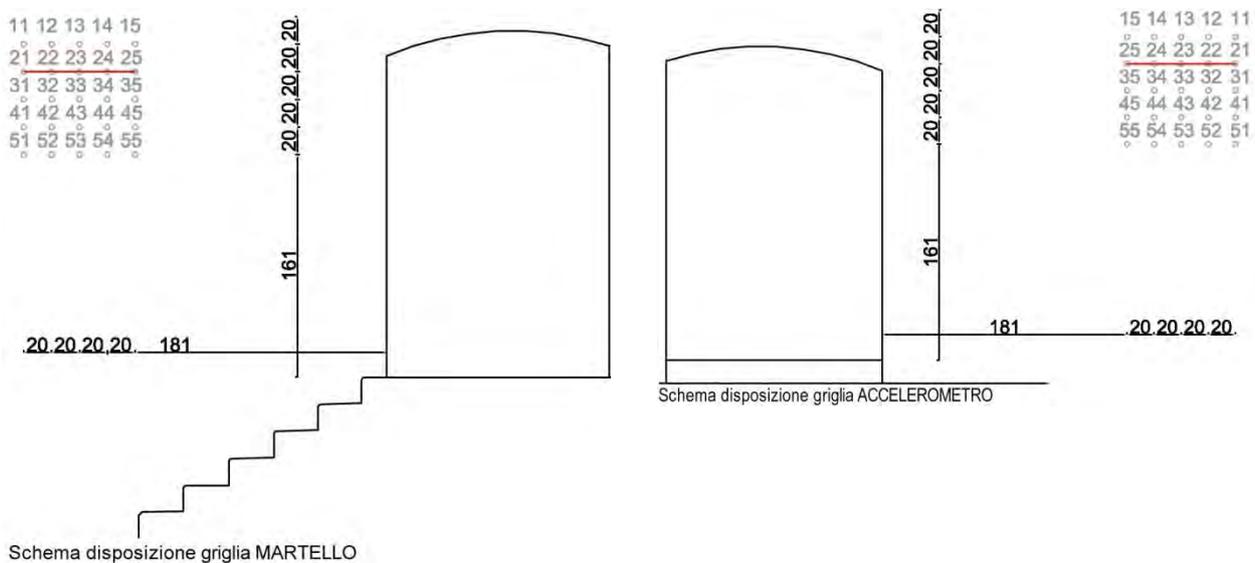


Fig. 2.4. 127 - Schema disposizione griglia TMO<sub>4</sub>A (Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
-1	51.25	1562
-1	30.75	942
-1	10.25	495
19.5	51.25	1188
19.5	10.25	968
40	51.25	1156
40	30.75	1173
40	10.25	1385
60.5	51.25	1202
60.5	30.75	1506
60.5	10.25	1649

81	30.75	1911
81	10.25	2266

Fig. 2.4. 128 - Tabella velocità soniche tomografiche TMo4A post-iniezione (Museo Archeologico)

I valori di velocità ottenuti sono mediamente alti, l'immagine ottenuta mediante il programma surfer restituisce una sezione abbastanza disomogenea con valori molto discordanti tra loro evidenziati infatti dalle aree gialle, per i valori più alti, e blu per quelli più bassi.

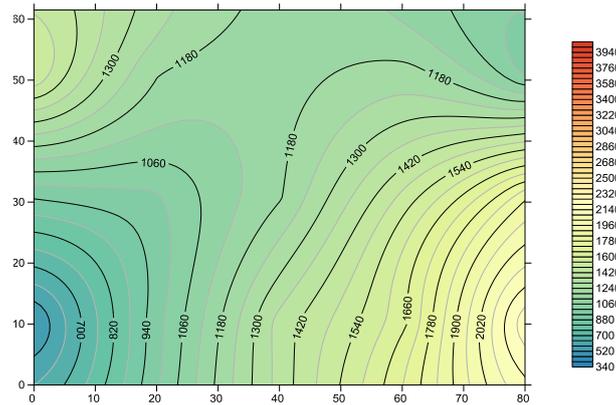


Fig. 2.4. 129 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TMo4A (Museo Archeologico)

### TMo4B

La prova TMo4B analizza una sezione verticale, e in questo caso è stata scelta quella corrispondente ai punti 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 della prova sonica diretta So4 effettuata in questo campo prova. E' stata scelta questa sezione per posizionarsi il più lontano possibile dal vuoto lasciato dal carotaggio effettuato nel punto 4.4 nell'ambito di una precedente sperimentazione.

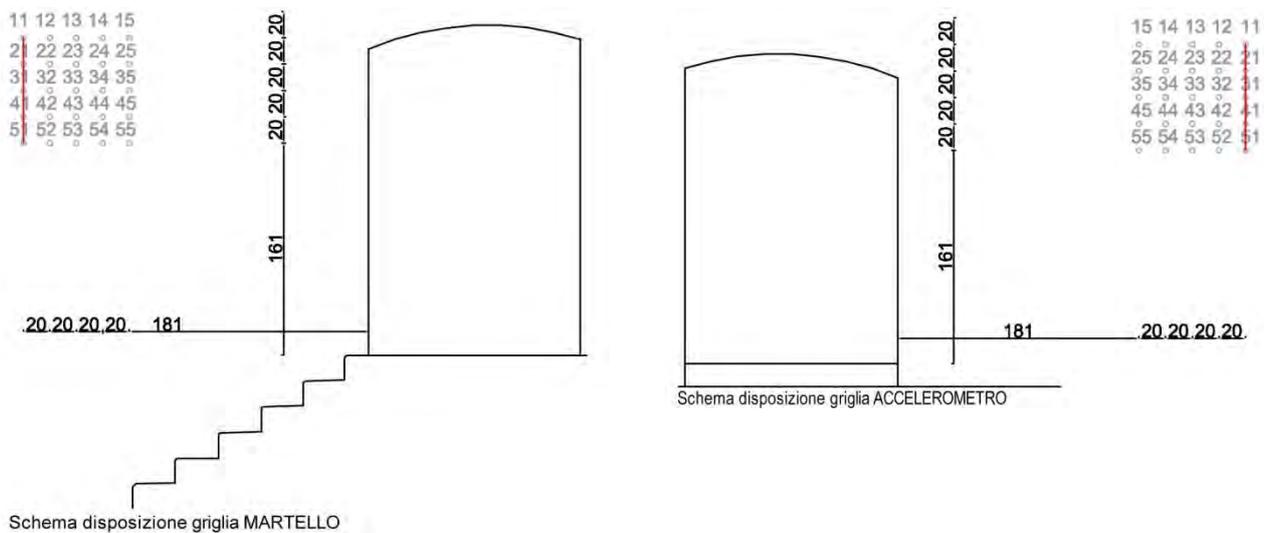


Fig. 2.4. 130- Schema disposizione griglia TMo4B (Museo Archeologico)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
-1	51.25	650
-1	30.75	886
-1	10.25	1353
19.5	51.25	1007
19.5	30.75	996
19.5	10.25	900
40	51.25	1082
40	30.75	1031
40	10.25	1017
60.5	51.25	1132
60.5	30.75	1045
60.5	10.25	969
81	51.25	1037
81	30.75	1143
81	10.25	890

Tab. 2.4. 40 - Tabella velocità soniche tomografiche TMo4B post-iniezione (Museo Archeologico)

I valori ottenuti sono complessivamente omogenei. Se osserviamo il grafico di distribuzione delle velocità sottostante vediamo infatti un'area caratterizzata da velocità maggiori in corrispondenza del punto 1.1 e una caratterizzata da velocità minori nel punto 2.1; mentre il resto della sezione presenta velocità omogenee.

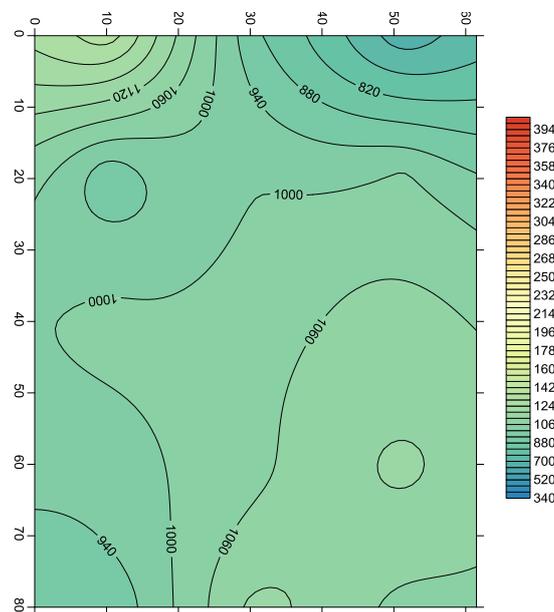


Fig. 2.4. 131 - Distribuzione velocità soniche tomografiche TMo4B (Museo Archeologico)

Come nei campi prova precedenti inserendo in una tabella le velocità soniche ottenute con le due tomografie, verticale e orizzontale, nelle velocità pre e post iniezione abbiamo potuto valutare l'efficacia dell'intervento stesso come fatto in precedenza con la prova sonica diretta.

Nella tabella di sinistra sono elencate le velocità pre, post e la differenza percentuale tra esse della tomografia TMO<sub>4</sub>A, in quella di destra della TMO<sub>4</sub>B.

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
470	495	105
694	968	139
584	1385	237
462	1649	357
423	2266	536
941	942	100
657	988	150
535	1173	219
455	1506	331
853	1911	224
631	1562	248
583	1188	204
601	1156	192
435	1202	276
443	965	218

Velocità pre	Velocità post	Differenza pre-post
[m/s]	[m/s]	[%]
1159	1353	117
665	900	135
631	1017	161
499	969	194
430	890	207
845	886	105
700	996	142
581	1031	177
642	1045	163
575	1143	199
451	650	144
622	1007	162
472	1082	229
764	1132	148
996	1037	104

Osservando i grafici di distribuzione delle velocità pre e post iniezione a confronto notiamo una buona omogeneizzazione della sezione nel caso della prova eseguita nella sezione verticale, la TMO<sub>4</sub>B, senza che ci sia un forte aumento di velocità. Nel caso della TMO<sub>4</sub>A vediamo invece un complessivo aumento ma una sezione meno omogenea, nella fase post-iniezione abbiamo infatti velocità piuttosto elevate sulla parte destra della sezione e basse invece in quella sinistra.

Osservando i due grafici più sotto, che mostrano la percentuale di aumento della velocità nella sezione, possiamo confermare quanto appena detto. Nel caso della TMO<sub>4</sub>A vediamo un aumento molto elevato in un punto rispetto al resto della sezione, in quel punto abbiamo infatti un aumento di velocità sonica del 536%, molto più alto rispetto all'aumento medio rilevato pari al 236%. Nella sezione TMO<sub>4</sub>B l'incremento di velocità è stato molto basso in tutta la sezione, con una media pari al 159%, vediamo infatti dal grafico degli incrementi che non ci sono punti con una alta percentuale di aumento.

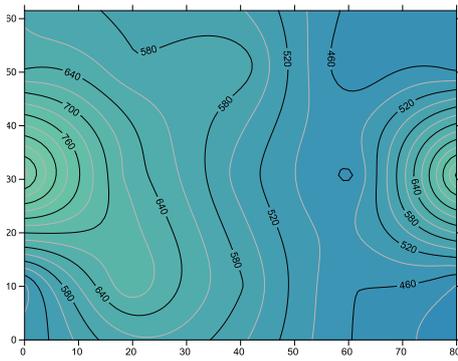


Fig. 2.4. 132 - Distribuzione velocità soniche tomografiche pre-iniezione TMo4A

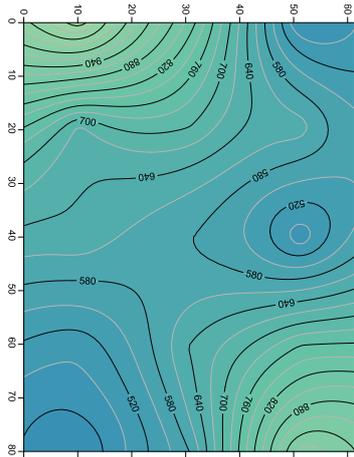


Fig. 2.4. 133 - Distribuzione velocità soniche tomografiche pre-iniezione TMo4B

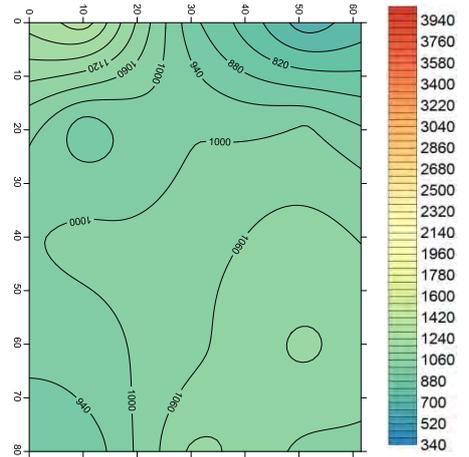


Fig. 2.4. 134 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TMo4B

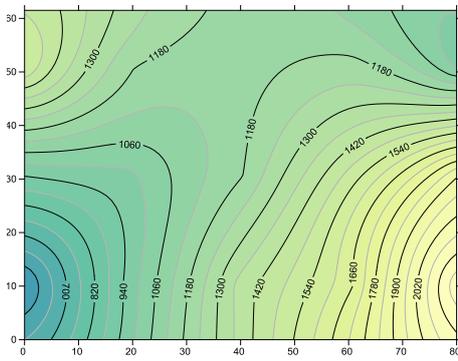


Fig. 2.4. 135 - Distribuzione velocità soniche tomografiche post-iniezione TMo4A

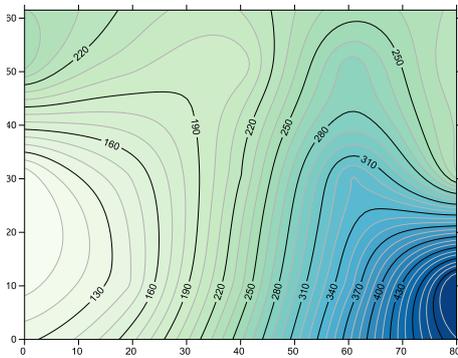


Fig. 2.4. 136 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMo4A

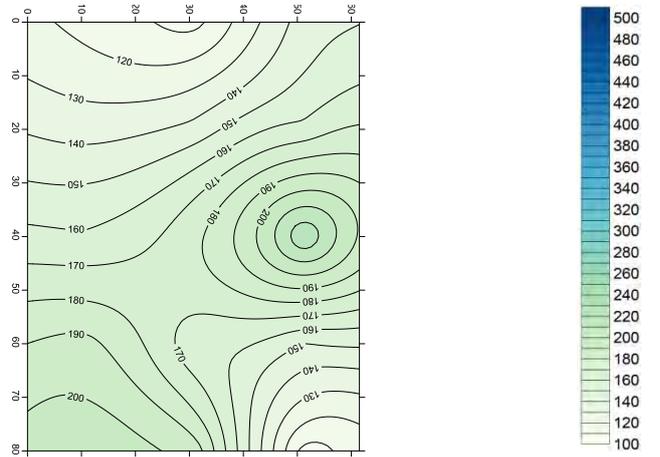


Fig. 2.4. 137 - Distribuzione differenze percentuali di velocità TMo4B

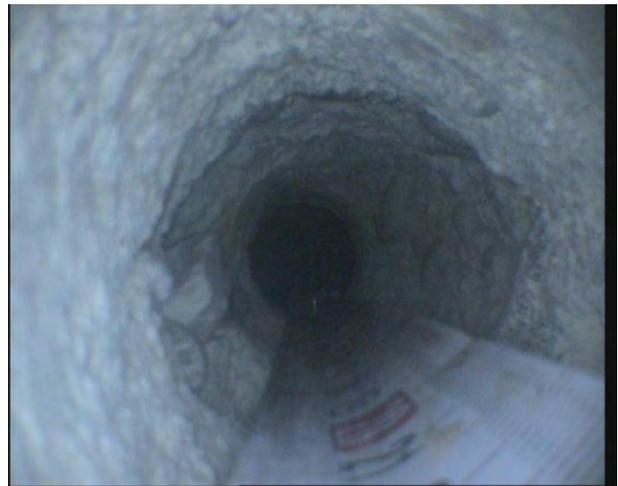
*Endoscopie*

Nel campo prova 4 sono stati scelti il punto 4.2 e il punto 4.4. Il punto 4.2 perché ha avuto un buon incremento di velocità da 523,46 m/s e 1269,04 m/s con una differenza percentuale di velocità del 242,43%. Il punto 4.4 è stato scelto invece perché lì il foro per l'endoscopia era già presente, è il punto infatti dove è presente il foro ottenuto con il carotaggio nell'ambito di una campagna di indagine precedente, in questo punto infatti abbiamo solo la velocità sonica post iniezione in quanto per effettuare l'intervento di iniezione questo foro era stato temporaneamente riempito con poliuretano espanso.

Punto 4.2:



10cm



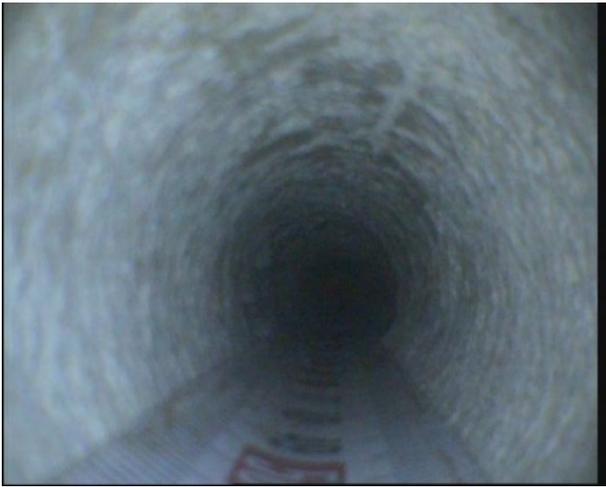
20cm



30cm



40cm



50cm



60cm

Punto 4.4



10cm



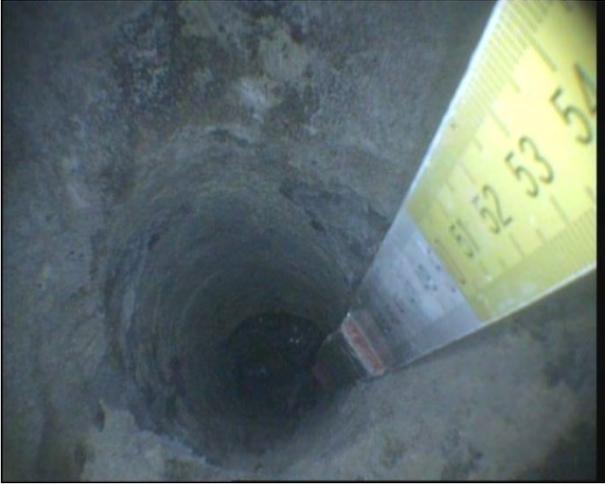
20cm



30cm



40cm



50cm

In entrambi i casi possiamo notare la buona riuscita dell'iniezione, nel punto 4.2 vediamo infatti una superficie omogenea con una scarsa presenza di vuoti. Anche nel punto 4.4. la superficie è omogenea, indice che il riempimento con resina epossidica ha aderito in modo ottimale al foro riempiendolo completamente e ostacolando il flusso della miscela attraverso il foro.

## **3. ANALISI DEI RISULTATI**

### **3.1. Confronto dei risultati ottenuti con le diverse miscele**

#### **3.1.1. Analisi delle caratteristiche meccaniche**

Come già visto nella fase sperimentale per l'intervento di iniezione sono state utilizzate tre diverse miscele, tutte a base di calce e prive di cemento. Queste tipologie di miscele sono caratterizzate da una minore resistenza meccanica rispetto a quelle a base di cemento e generalmente presentano problemi legati al ritiro. Per contro, nelle murature storiche sono preferibili per la maggiore compatibilità con le caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche dei materiali componenti le murature esistenti. Tra le grandezze più significative, la resistenza, il modulo elastico e il coefficiente di dilatazione termica; pertanto tramite l'uso di opportuni additivi si può far fronte ai problemi e ottenere un impiego efficace.

Come già visto nel capitolo 3.2.5 le diverse miscele sono state oggetto di una prova di fluidità e di stabilità in sito e di prove a flessione e compressione in laboratorio.

La prova di fluidità è stata eseguita con il cono della norma americana ASTM C-939 e con il cono Marsh. I risultati ottenuti mostrano una minore fluidità della miscela Geocalce a zero secondi, è stato infatti ottenuto un valore di fluidità, con il cono ASTM, pari a 68 secondi. Quindi un valore decisamente più alto rispetto ai 24 secondi ottenuti con la miscela Albaria e ai 16 con Röfix. Secondo la norma seguita per l'esecuzione della prova, ASTM C-939, questa deve essere eseguita entro un tempo minore di 60 sec dalla miscelazione. E' stato comunque interessante vedere come il valore di fluidità di questa miscela sia diminuito con il passare del tempo, e quindi rieseguire la prova dopo un'ora sebbene questa non sia significativa. Con la miscela Kerakoll si è infatti ottenuta una fluidità di 64 secondi, quindi di 4 secondi più bassa rispetto alla prova a zero secondi, cosa che non è avvenuta con le altre due miscele. La miscela Albaria è rimasta più stabile, con un aumento del valore di fluidità che è rimasto comunque basso anche dopo un'ora, si è infatti ottenuto un valore pari a 48 secondi. La miscela Röfix ha invece dato il risultato peggiore da questo punto di vista, infatti a fronte di un basso valore di fluidità iniziale ha mostrato una fluidità pressoché nulla dopo un'ora e non è stato possibile eseguire la prova; quindi questo ha evidenziato la difficile lavorabilità della stessa, confermata dai problemi avuti nel corso dell'intervento di iniezione.

Il diminuire della fluidità nel tempo è un dato significativo perché indice di una migliore lavorabilità della miscela nel corso dell'intervento, nell'ambito dell'esecuzione dell'intervento infatti dalla miscelazione al termine dell'intervento è possibile che passi un arco di tempo di un'ora. E' stato quindi molto importante rieseguire la prova di fluidità dopo un'ora, attraverso questa infatti si è dimostrato come il valore di fluidità a zero secondi non sia direttamente indice di una buona lavorabilità.

Nelle prove eseguite in laboratorio sono invece state studiate la resistenza a compressione, a flessione e il modulo elastico. I risultati ottenuti hanno confermato le resistenze a compressione delle rispettive schede tecniche ottenendo quindi un valore di circa 15 Mpa con la miscela Geocalce, 10Mpa con la miscela Albaria e di circa 5MPa con la miscela Röfix. In tutti e tra i casi c'è stato un leggero incremento nella prova eseguita a 90 giorni, aumento più accentuato nel caso della miscela Röfix che partiva però da risultati molto bassi, con una resistenza a compressione dopo trenta giorni pari a 2Mpa. L'aumento rilevato nella prova eseguita a 90 giorni è legato alle caratteristiche delle miscele, che essendo tutte a base di calce hanno un tempo di indurimento dei leganti più lungo che supera solitamente i 28 giorni.

Per quanto riguarda il modulo elastico abbiamo valori significativamente più alti per la miscela Kerakoll, che presenta un modulo elastico pari a 10266MPa, mentre Albaria e Röfix hanno modulo elastico rispettivamente pari a 4256MPa e 3693MPa.

La miscela Röfix è quindi quella che nel complesso ha dato risultati peggiori in quanto le caratteristiche di scarsa resistenza a compressione e flessione e il modulo elastico più basso sono associate a problemi riguardanti la fluidità e quindi la lavorabilità della stessa.

La miscela Albaria presenta caratteristiche intermedie sia di resistenza a compressione e flessione che di modulo elastico, abbinati a ottimi risultati di fluidità, essa infatti ha dato buoni risultati di fluidità sia all'istante zero che dopo un'ora. Quindi a buone caratteristiche meccaniche abbina un'ottima lavorabilità.

La miscela che ha ottenuto risultati maggiori per quanto riguarda le prove in laboratorio è stata la Kerakoll, molto probabilmente questo è dovuto alla presenza di geolegante minerale al suo interno che permette di raggiungere resistenze meccaniche elevate. Ai buoni risultati in laboratorio si aggiungono buoni valori di fluidità, che come visto in precedenza addirittura migliorano dopo un'ora garantendo quindi una buona lavorabilità della malta anche nel caso l'iniezione non avvenga negli istanti immediatamente successivi alla miscelazione.

### **3.1.2. Efficacia delle diverse miscele**

Come già visto nella fase sperimentale i 4 campi prova sono stati iniettati con le diverse miscele, nello specifico il campo prova 1 è stato iniettato con la miscela Albaria, il campo prova 2 con la miscela Geocalce della Kerakoll, il 3 con la miscela Röfix e per il quarto è stata utilizzata nuovamente la miscela Albaria. E' stata usata nuovamente la miscela Albaria in quanto è la miscela che è stata scelta dalla ditta esecutrice dei lavori per l'intervento di consolidamento di tutte le murature e quindi era interessante valutare le differenze tra l'applicazione su due muratura con diversi spessori, il campo prova 1 ha infatti uno spessore pari a 30cm e il campo prova 4 di 62cm.

Per verificare l'effettiva efficacia dell'intervento, come già visto, sono state effettuate prove soniche dirette prima e dopo l'iniezione, con le quali attraverso le analisi delle velocità abbiamo potuto valutare l'effettivo livello di consolidamento della muratura. Per valutare gli interventi sono state effettuate anche prove soniche tomografiche e endoscopie che hanno confermato i risultati ottenuti con le soniche dirette, le quali però risultano più utili in quanto forniscono un quadro completo del pannello e delle sue velocità soniche pre e post più facilmente rapportabile con i dati riguardanti l'intervento di iniezione. Nell'analisi dell'efficacia e quindi nella valutazione dei risultati ottenuti con le diverse miscele è importante considerare che i pannelli iniettati non sono tutti uguali, quindi non si andrà a valutare la velocità finale ma l'incremento di essa e il coefficiente di variazione del pannello. E' inoltre importante tenere conto che, in generale, negli interventi di iniezioni a velocità iniziali più basse corrisponde un maggiore incremento di velocità in quanto il pannello presenta più vuoti in cui la miscela fluisce.

Nella tabella seguente sono riassunti i principali risultati ottenuti nei diversi pannelli e quindi con le diverse miscele. Per ogni pannello sono indicati la velocità sonica media ottenuta con la prova sonica diretta pre-iniezione, quella ottenuta con la prova post-iniezione, e l'incremento ottenuto tra le due; il coefficiente di variazione del pannello prima e dopo l'iniezione e il rapporto tra i due, e infine la quantità di miscela iniettata (l) per m<sup>3</sup>.

Sito	Miscela	Velocità media pre [m/s]	Velocità media post [m/s]	Incremento [%]	Cov Pre [%]	Cov Post [%]	Incremento [%]	Litri/m <sup>3</sup> iniettati f (s)
S1	Albaria	1009	1775	176%	71%	35%	-50.52	96
S2	Kerakoll	1200	2072	173%	47%	35%	-24.47	44
S3	Rofix	723	1707	236%	50%	54%	8.48	74
S4	Albaria	729	1243	171%	38%	30%	-22.15	40

Tab. 3.1.1 - Risultati principali per le diverse miscele (Museo Archeologico)

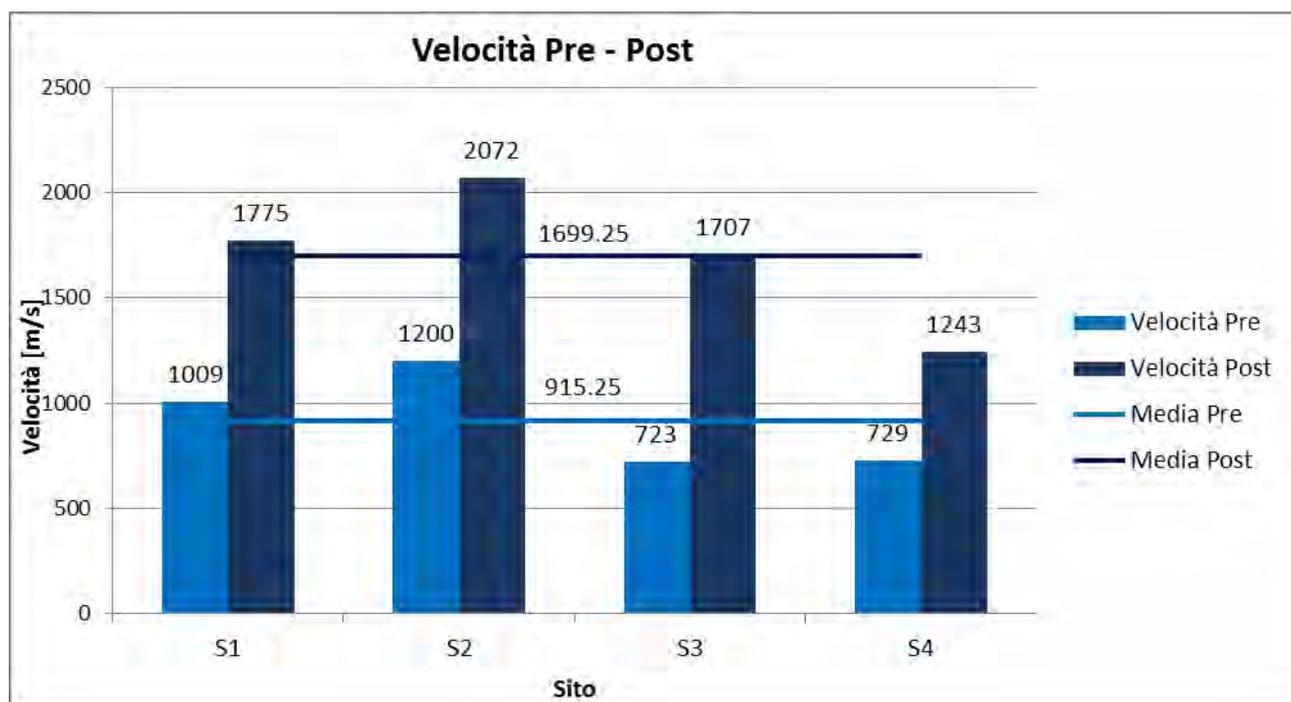


Fig. 3.1.1 - Istogramma velocità sonore pre e post iniezione ottenute con le diverse miscele (Museo Archeologico)

Come vediamo dal grafico l'incremento maggiore di velocità media, pari al 236%, si è verificato nel pannello 3, quello iniettato con la miscela Röfix ma dobbiamo considerare che questo pannello è quello con la velocità media pre-iniezione più bassa quindi questo risultato era prevedibile in quanto la muratura era caratterizzata da una forte presenza di vuoti. Per lo stesso motivo possiamo dedurre che l'incremento sia limitato nel pannello 2 a causa della buona qualità muraria, si parte infatti da una velocità pre-iniezione pari a 1200 m/s indice quindi di una minore presenza di vuoti confermata dalla quantità di miscela iniettata, pari a 44 l/m<sup>3</sup>. Si attende infatti una quantità di miscela al m<sup>3</sup> iniettata minore nelle murature con una scarsa presenza di vuoti, e quindi con una buona velocità iniziale. Queste considerazioni non sono però state confermate nel campo prova 4 dove a fronte di una scarsa velocità iniziale, i litri iniettati sono stati pochi, e conseguentemente anche l'incremento di velocità, che è stato il più basso dei tre casi. In questo caso sono da considerare eventuali problemi nella fase di intervento. Questi problemi di intervento possono essere stati causati da un non adeguato inserimento delle cannule, le quali se inserite troppo in profondità non permettono l'iniezione completa del paramento in quanto andando a ridosso del paramento opposto non permettono alla miscela di raggiungere la parte retrostante, o da un posizionamento non adeguato, in questo campo prova infatti non è stata rispettata la posizione triangolare delle cannule e conseguentemente non si è riusciti a consolidare tutta la muratura.

In generale l'intervento di iniezione ha dato in tutti e quattro i casi un aumento di velocità maggiore di 1.7 volte quella iniziale, quindi si è ottenuto un effettivo consolidamento della muratura. Un fattore molto importante da considerare è però l'omogeneità del pannello

prima e dopo l'intervento e il rapporto tra esse, infatti se ad esempio in un pannello si ha un forte aumento di velocità solo in alcuni punti e basso nei restanti si avrà comunque un buon incremento medio di velocità che però non è indice di una buona riuscita dell'intervento essendo questo efficace solo in alcune parti del pannello.

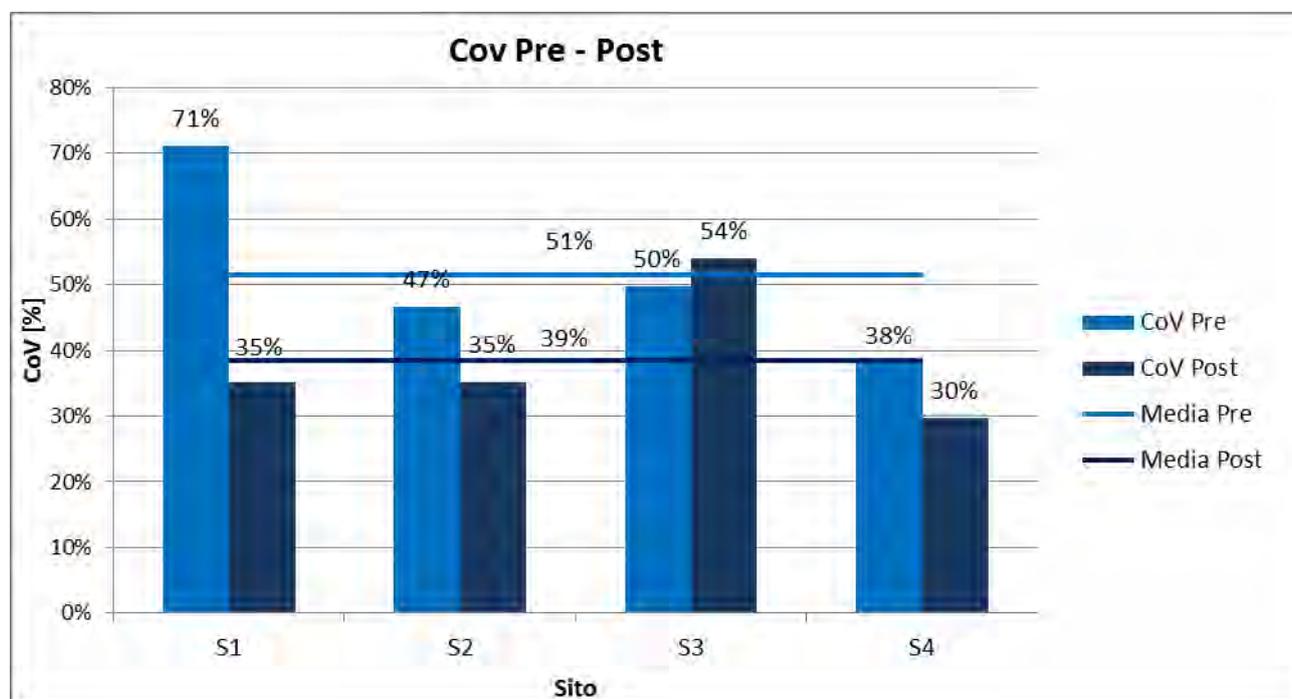


Fig. 3.1. 2 - Istogramma coefficienti di omogeneizzazione pre e post iniezione ottenuti con le diverse miscele (Museo Archeologico)

Dal grafico vediamo che il caso in cui si è ottenuta una migliore omogeneizzazione del pannello è nel campo prova 1, iniettato con Albaria, da un coefficiente di variazione iniziale altissimo, pari al 71%, si è passati ad un coefficiente di variazione del 35% ottenendo quindi una forte omogeneizzazione del pannello, il coefficiente di variazione diminuisce infatti del 50%. Bisogna però considerare vari fattori che vanno ad influenzare questi valori, in primo luogo la forte disomogeneità iniziale dovuta alla presenza di singoli mattoni dovuti ad un precedente intervento di scuci-cuci, e alla grande presenza di distacchi e vuoti nella muratura; un altro fattore è il ridotto spessore di questa muratura, che è spesso solo 30cm. Questi due fattori, la presenza di vuoti e il ridotto spessore, influenzano notevolmente l'intervento. Vediamo infatti che questo campo prova è quello in cui si ha il più alto valore di l/m<sup>3</sup> iniettati, sia perché ci sono più vuoti in cui la miscela può andare a fluire ma anche perché con uno spessore minore è più semplice posizionare le cannule alla profondità corretta e la miscela ha meno probabilità di bloccarsi, cioè di incontrare ostacoli mentre fluisce all'interno della muratura. E' interessante infatti confrontare i risultati ottenuti con la stessa miscela nei due campi 1 e 4 caratterizzati da diversi spessori della muratura. Il campo

prova 4 infatti è spesso 62cm, e sono stati iniettati  $40l/m^3$ , la metà rispetto all'altro campo prova pur partendo da una velocità sonica iniziale media minore e quindi con una maggiore presenza di vuoti.

Nel campo prova 3, iniettato con la miscela Röfix, si è invece ottenuto un incremento del coefficiente di variazione, quindi il pannello è risultato ancor più eterogeneo dopo l'iniezione. Come visto prima in questo campo prova si è ottenuto il maggiore aumento di velocità media, ma se consideriamo che è cresciuto anche il coefficiente di variazione, possiamo confermare che l'aumento di velocità non è indice di una buona riuscita dell'intervento in quanto questo è riuscito solo in alcune parti del pannello creando così un' incontrollata catena di parti deboli e parti consolidate che possono produrre comportamenti inaspettati di fronte alle azioni sismiche. Le cause di questo vanno cercate nelle caratteristiche stesse della miscela o in eventuali problemi di cantierizzazione, infatti come visto nel capito 4.1.1 la miscela ha dato molti problemi di fluidità, tali che dopo un'ora dalla miscelazione non è stato possibile rieseguire la prova di fluidità in quanto la miscela era già solidificata. Per questo motivo possiamo affermare che l'intervento è stato efficace subito dopo la miscelazione, e quindi in quei punti c'è stato un ottimo incremento di velocità, mentre ha perso via via efficacia con il passare dei minuti per la progressiva solidificazione della miscela stessa. La solidificazione infatti è stata tale da intasare la pompa di iniezione e da rendere indispensabile la miscelazione di un altro sacco, questo e altri problemi di cantierizzazioni sono affrontati nel capitolo 4.2.

Nel campo prova 2 si è registrata una diminuzione del coefficiente di variazione pari al 25% circa, si è ottenuta quindi una buona omogeneizzazione del pannello che abbinata all'incremento di velocità ottenuto, pari al 173% sono indici di una buona riuscita dell'intervento di iniezione.

Un ulteriore strumento usato per valutare l'efficacia delle iniezioni e soprattutto per verificare quanto rilevato con le prove soniche sono state le indagini endoscopiche. Come visto nel capitolo 2 in ogni campo prova sono state eseguite in due punti, nel punto in cui si è verificato il maggiore incremento di velocità sonica e nel punto in cui si è registrata la minore velocità assoluta post-iniezione. Nel primo caso l'endoscopia è stata eseguita per verificare che l'incremento di velocità sia dovuto ad una completa iniezione, ci si aspetta quindi di vedere all'interno del foro superfici omogenee senza vuoti o disgregazioni. Viceversa nel secondo caso è stata eseguita in primo luogo per confermare visivamente i dati delle soniche, quindi osservando se nel punto con velocità minore fossero presenti vuoti o disgregazioni, e in secondo luogo per cercare la causa di questo risultato.

### 3.2. Confronto dei risultati con quelli ottenuti nelle precedenti sperimentazioni

Mettendo a confronto i dati ottenuti nella campagna sperimentale in sito, oggetto di questa tesi, con i dati raccolti relativi alle precedenti sperimentazioni si possono effettuare alcune considerazioni.

MEDIE	Vel. Pre [m/s]	Vel. Post [m/s]	Incremento Vel [%]	CoV Pre [%]	CoV Post [%]	Incremento CoV [%]
<b>PROVE PREGRESSE - Tipologia II</b>	1187	3431	+189%	47	16	-66.0%
<b>CASO STUDIO - Museo Arch. VR</b>	915	1699	+85.7%	51	39	-23.5%

Tab. 3.2. 1 - Confronto dei principali risultati ottenuti con l'intervento di iniezione

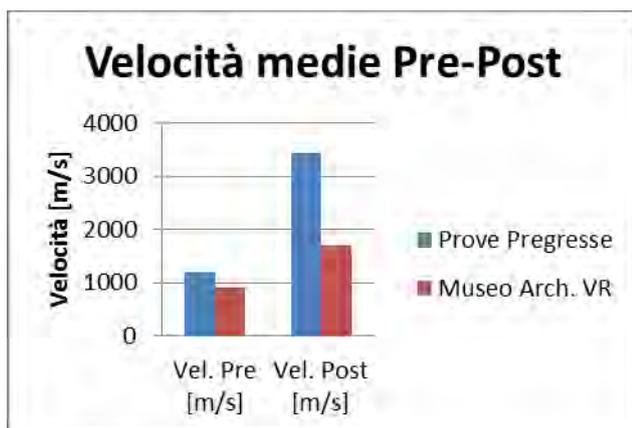


Fig. 3.2. 1 Confronto velocità soniche medie pre e post iniezione

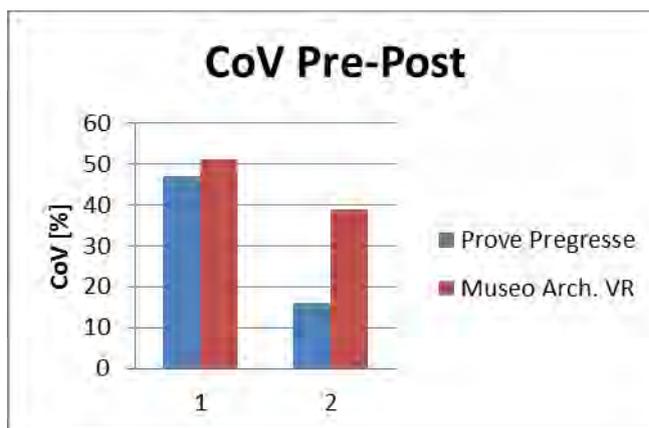


Fig. 3.2. 2 Confronto coefficienti di omogeneizzazione medi pre e post iniezione

Dai grafici possiamo vedere come sia nella media delle prove pregresse raccolte, che nella media di quelle eseguite al Museo Archeologico, ci sia un effettivo aumento della velocità sonica indice di un consolidamento della muratura. Nel caso del Museo Archeologico vediamo però un aumento minore, in percentuale pari al 85.7%, rispetto al 189% ottenuto con la media delle prove pregresse, questo è dovuto al fatto che la maggior parte delle prove pregresse sono state effettuate in murature ricostruite artificialmente per questo tipo di sperimentazioni. Il nucleo interno delle stesse è costituito infatti da sole scaglie non legate e quindi, a dispetto di quanto accade in sito, non si risente dell'effetto occludente della malta interna che diminuisce l'iniettabilità della miscela.

Per lo stesso motivo vediamo che anche la diminuzione del coefficiente di variazione è minore nel caso della sperimentazione al Museo Archeologico, proprio perché la miscela

facendo più fatica a fluire all'interno della muratura non è riuscita a riempire completamente tutti i vuoti ottenendo quindi una minore omogeneizzazione rispetto ai casi non eseguiti su murature storiche ma su murature appositamente costruite. Questo è confermato anche dalla media dei litri iniettati al m<sup>3</sup>, nel caso del Museo Archeologico la media è infatti pari a 63 l/m<sup>3</sup>, rispetto ai 98 delle prove precedenti.

L'iniettabilità è quindi strettamente legata, oltre al volume generale dei vuoti, anche alla loro dimensione media e distribuzione nel pannello.

### **3.3. Cantierabilità dell'intervento di iniezione**

Gli interventi di consolidamento di murature storiche mediante iniezione di miscele permettono di ottenere buoni risultati per quanto riguarda il miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura, l'incremento di omogeneità dei pannelli e la realizzazione di collegamenti efficaci tra i paramenti della muratura e tra le singole porzioni e i singoli elementi. Infatti questo tipo di murature storiche in pietra presenta come principale punto di forza la grande massa e l'elevatissima resistenza a compressione. Per poter sfruttare a fondo queste proprietà è necessario garantire la monoliticità della muratura e adeguati collegamenti, evitando quindi distacchi parziali di paramenti o porzioni di muratura.

Nella campagna sperimentale oggetto di questa tesi si sono potuti valutare aspetti positivi e negativi di questo tipo di intervento. Sicuramente non è un metodo di intervento non invasivo in quanto non reversibile e la sua applicazione non è possibile qualora non si possa agire sulla superficie della muratura, ad esempio in caso di pareti affrescate. Però i vantaggi che derivano dall'esecuzione di questo tipo di intervento sono stati evidenti, perché nonostante una non perfetta esecuzione si è comunque raggiunto un discreto incremento di consistenza e di omogeneità nei campi prova in esame. Va sottolineato però come i risultati siano fortemente dipendenti da un preciso rispetto delle prescrizioni.

Nella campagna in sito al Museo Archeologico di Verona l'intervento, essendo una campagna effettuata in cantiere e non in laboratorio l'intervento di iniezione è stato eseguito dall'impresa affidataria e questo ha permesso quindi di osservare le problematiche che possono sorgere nei casi reali di esecuzione dell'intervento. Ad esempio è stato necessario intervenire nell'ambito della preparazione dei pannelli in quanto questa non era stata fatta come richiesto e avrebbe compromesso la buona riuscita dell'intervento.

Va sottolineato il fatto che per l'esecuzione dell'intervento, successivo alle prove soniche effettuate a novembre, è stato necessario attendere condizioni climatiche favorevoli e quindi con temperature non troppo rigide. Questo ha portato a rinviare l'intervento fino a metà del mese di marzo 2014.

I principali problemi sono stati riscontrati nella fase di preparazione dei pannelli, questa prevede la rimozione dell'intonaco e la scarnitura giunti, e in un secondo momento la

ristilatura completa dei giunti. Nel caso del Museo Archeologico di Verona questa fase era stata eseguita in modo sommario con una non completa scarnitura dei giunti e con una stuccatura non adeguata, questi problemi sono stati evidenziati durante la fase di lavaggio della muratura. Erano state stuccati infatti solo gli intorni dei fori di iniezione mentre i giunti restanti risultavano ancora allo stato originario e quindi composti di malta deteriorata con presenza di numerose fessure, senza aver quindi compiuto la ristilatura dei giunti come previsto dalle tavole di intervento. Nella fase di lavaggio delle murature è subito emerso questo problema evidenziato da ingenti fuoriuscite di acqua in corrispondenza dei giunti non ristilati.



*Fig. 3.2. 3 - Prime ristilatura parziale e successiva ristilatura completa dei giunti*

Questo problema è rilevante poiché oltre ad impedire il corretto lavaggio della muratura compromette anche l'iniezione delle miscele poiché le piccole lesioni costituiscono punti deboli da cui la miscela fuoriesce invece che andare a saturare i vuoti. E' stato quindi necessario rimuovere parte dei giunti deteriorati ed effettuare una ristilatura in modo completo. Nel caso del pannello 2 invece la ristilatura era stata effettuata ma in modo poco efficace, anche perché non era stata effettuata una scarifica a fondo dei giunti deteriorati e quindi erano ancora presenti piccole fessure che è stato necessario sigillare con malta a presa rapida.

Un altro elemento importante su cui sono stati riscontrati problemi in cantiere riguarda il posizionamento e l'inserimento delle cannule di iniezione. Le prescrizioni erano di eseguire i fori inclinando la punta del trapano leggermente verso il basso secondo una maglia triangolare e di inserirvi le cannule fino ad una profondità compresa tra i  $2/3$  e i  $3/4$  dello spessore murario. La situazione riscontrata è stata invece differente poiché non è stata seguita in tutti i pannelli una maglia triangolare ma i fori sono stati eseguiti in modo disordinato in base alla disposizione delle pietre di maggiore dimensione, questo per non danneggiare gli elementi resistenti della muratura. Per quanta la profondità al quale sono

state inserite le cannule, non è stato possibile effettuare una indagine approfondita, ma in un caso in particolare l'esecuzione di una endoscopia ha evidenziato come la cannula fosse stata inserita troppo in profondità andando a ridosso del paramento opposto e non permettendo quindi la penetrazione della miscela nelle porzioni retrostanti. Le endoscopie sono state infatti effettuate nel punto in cui si è verificato il maggiore incremento di velocità sonica e nel punto con la velocità minore, proprio in questo punto è stata evidenziata la presenza della cannula inserita in modo non adeguato con la conseguente presenza di vuoti.

Riassumendo, nel rispetto delle condizioni climatiche, questo tipo di intervento necessita di precisione nella preparazione dei pannelli e nel corretto inserimento delle cannule, ma una volta garantita la sua corretta esecuzione permette di raggiungere risultati ottimali per quanto riguarda il consolidamento di murature storiche deteriorate e il collegamento delle sue parti.

## 4. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

La valutazione della sicurezza sismica degli edifici storici risulta complessa date le caratteristiche della muratura, che risulta essere eterogenea, anisotropa e con notevoli variazioni interne nell'ambito dello stesso edificio. Inoltre è difficile valutare le connessioni e le condizioni di vincolo tra i diversi elementi strutturali dell'edificio, le quali sono spesso carenti. Questo è uno dei punti critici poiché spesso i vari elementi strutturali si comportano in maniera indipendente se sottoposti ad azione sismica.

### 4.1. Normativa di riferimento

Per l'analisi del comportamento strutturale degli edifici storici si fa riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 (DM 14/01/2008) e alla Circolare 2 febbraio 2009, n. 617. La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi devono essere eseguiti con riferimento ai soli SLU, stati limite ultimi, quindi o rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o alla condizione di collasso (SLC).

Gli interventi sono classificati nel capitolo 8.4 delle NTC:

- **Adeguamento:** interventi atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle norme vigenti.
- **Miglioramento:** interventi atti a aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle norme vigenti.
- **Riparazioni o interventi locali:** interventi che interessano elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Per i beni di interesse culturale in zone dichiarate a rischio sismico, ai sensi del comma 4 dell'art. 29 del D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio", è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza. Con miglioramento si intende l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle condizioni correnti con un livello di protezione sismica non necessariamente uguale a quello previsto per l'adeguamento delle costruzioni. Secondo le Linee Guida "*per i beni culturali tutelati è necessario attenersi ad interventi di miglioramento, a riparazioni o ad interventi locali*". Per quanto riguarda i beni tutelati oltre agli interventi di riparazione o locali che devono essere soggetti a verifiche locali è comunque richiesta una valutazione semplificata della sicurezza complessiva per provare che questi interventi non abbiano peggiorato le condizioni precedenti.

Per quanto riguarda la progettazione degli interventi sono definiti tre diversi livelli per la valutazione della sicurezza sismica:

- **LV<sub>1</sub>** (analisi qualitativa e valutazione con modelli meccanici semplificati): la valutazione può essere eseguita attraverso metodi semplificati ma comunque in

grado di stimare l'indice di sicurezza sismica o la vita nominale. L'indice di sicurezza sismica deve essere maggiore di 1.

- LV<sub>2</sub> (valutazione su singoli macroelementi): valutazione da adottare in presenza di interventi locali su zone limitate del manufatto, che non alterano in modo significativo il comportamento strutturale. Per questa tipologia sono suggeriti metodi di analisi locale e in questo caso la valutazione dell'azione sismica allo SLV per l'intero manufatto, comunque richiesta, viene effettuata con gli strumenti del livello LV<sub>1</sub>.
- LV<sub>3</sub> (valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto): valutazione che riguarda progetti di interventi diffusi nella costruzione che non dovrebbero comunque alterare il comportamento strutturale. Le valutazioni devono essere effettuate attraverso un modello strutturale globale o attraverso i metodi di analisi locale previsti dal LV<sub>2</sub> però applicati su tutti gli elementi della costruzione.

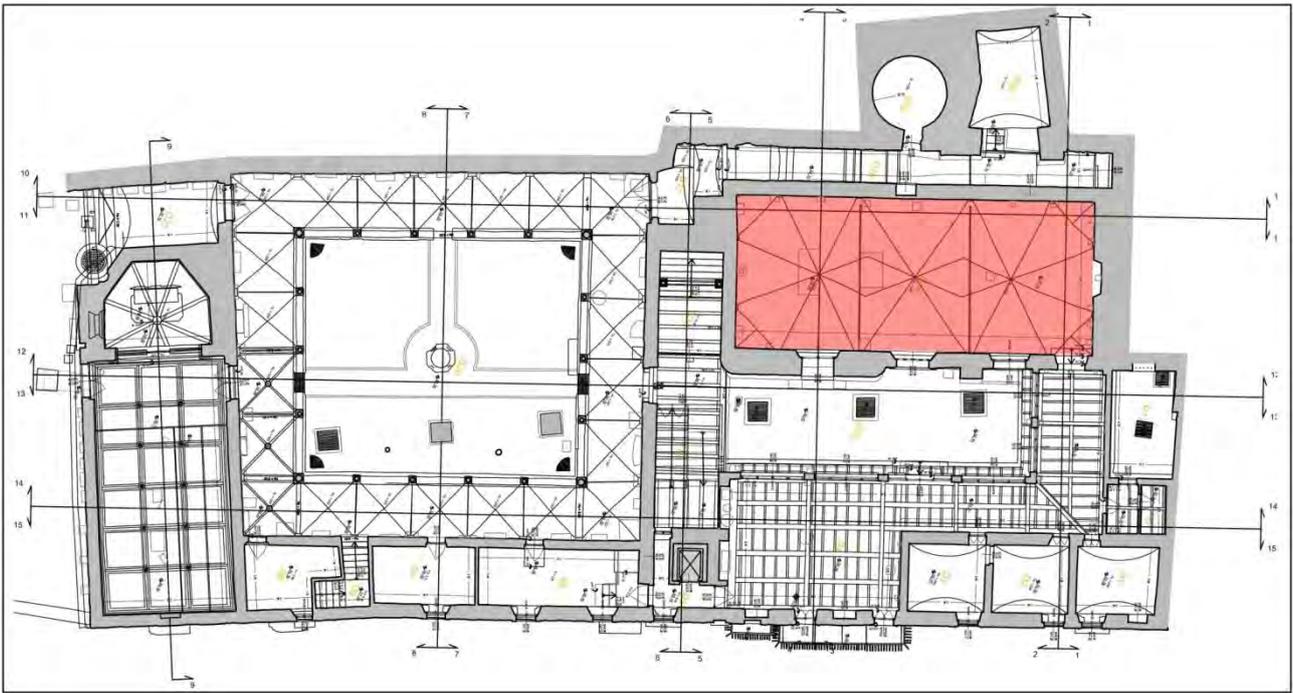
La valutazione complessiva della risposta sismica dell'edificio può quindi essere eseguita con un'esauritiva applicazione a tutti gli elementi della costruzione dei metodi utilizzati al livello LV<sub>2</sub>, cioè con l'analisi cinematica lineare e non lineare.

Nello studio del Museo Archeologico di Verona il modello di analisi è stato elaborato con una serie di verifiche locali (facenti riferimento all' LV<sub>2</sub>) condotte sui singoli macroelementi, ovvero su delle porzioni più o meno estese della struttura muraria che, nel caso di muratura di buona qualità, dovrebbero comportarsi in modo monolitico.

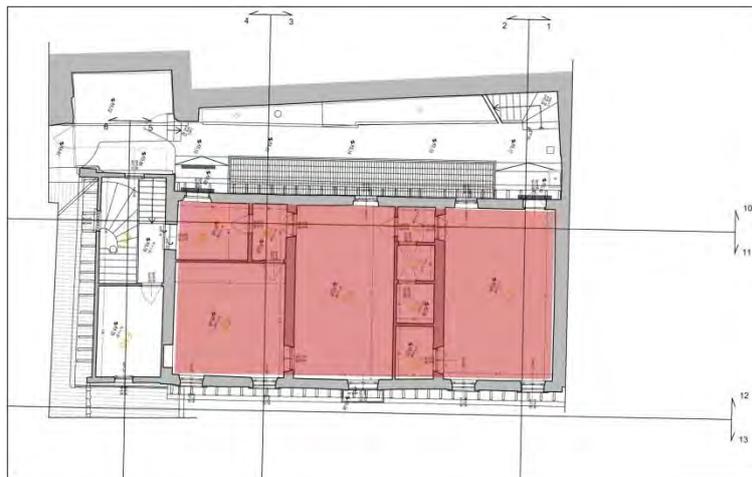
## **4.2. Individuazione dell' unità strutturale**

*“L' US dovrà avere continuità da cielo a terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata da spazi aperti, o da giunti strutturali, o da edifici contigui strutturalmente ma, almeno tipologicamente, diversi.” (DM 14/01/2008, cap. 8.7.1)*

Nell'ambito dell'analisi delle vulnerabilità al Museo Archeologico di Verona si è cercato di riconoscere una US ben definita e caratterizzata da criticità. Analizzando il sito, esso risulta caratterizzato da strutture complesse a più livelli sfalsati e addossate al pendio, in cui spesso non vi è continuità strutturale in tutte le direzioni. E' stata individuata nell'edificio del refettorio un'unità strutturale ben riconoscibile, con continuità strutturale da cielo a terra e caratterizzata da un unico processo costruttivo.

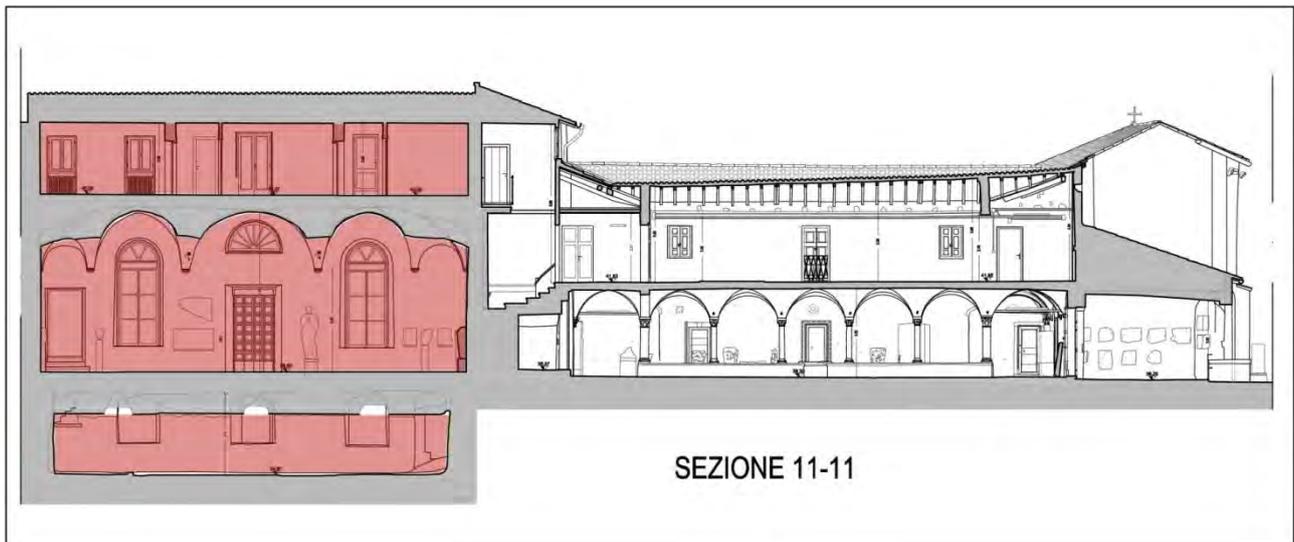


*Fig. 4.2. 1 - pianta livello IV - localizzazione U.S.*

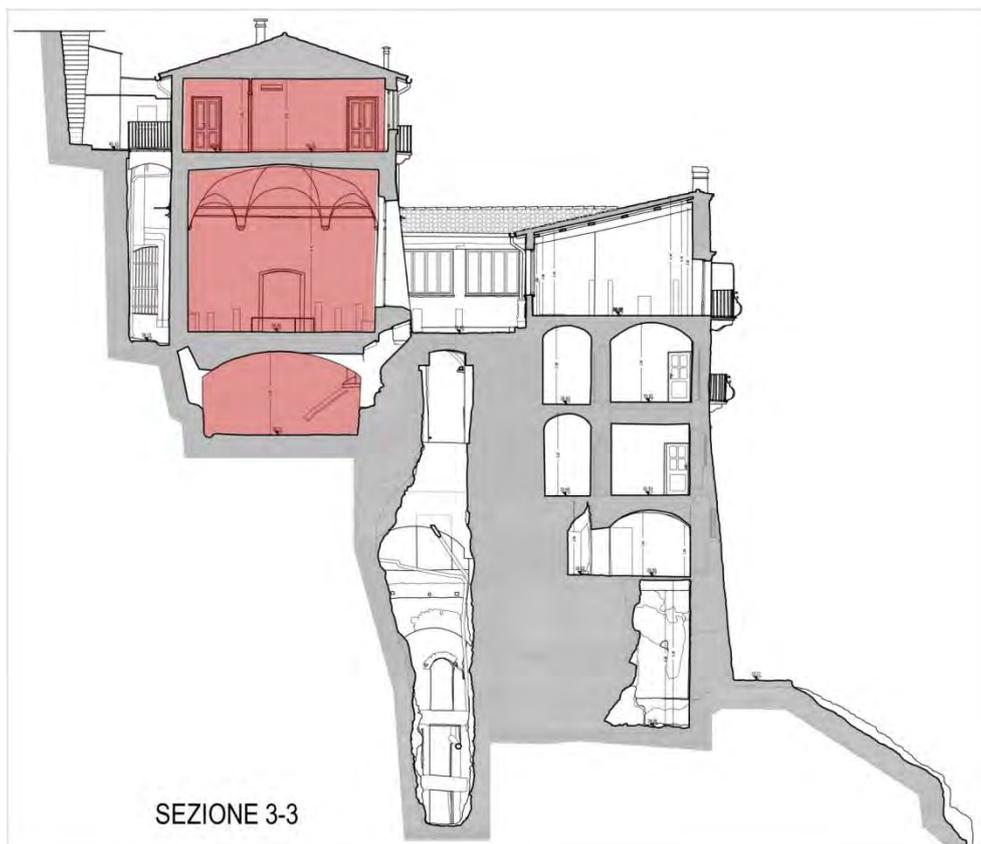


*Fig. 4.2. 2 - pianta livello IV - localizzazione U.S.*

Si nota infatti dalle piante come i muri perimetrali siano ben definiti e continui tra i due livelli. In sezione si apprezza ancora meglio la continuità delle strutture di questa US in entrambe le direzioni. In particolare nella sezione 3 si vede come il refettorio sia una struttura a sè stante, isolato tra l'intercapedine, che lo separa dal pendio, e la corte antistante.



*Fig. 4.2. 3 - sezione 11-11, individuazione U.S.*



*Fig. 4.2. 4 - sezione 3-3, individuazione U.S.*

### 4.3. Analisi dei Carichi

Il primo passo dell'analisi di un edificio è la sua conoscenza, sia dal punto di vista geometrico che dei dettagli costruttivi che dei materiali di cui è composto. Non sempre questi sono dati riscontrabili visivamente, quindi bisogna combinare l'osservazione diretta con un'approfondita ricerca storica e dove possibile con indagini in sito. Il grado di conoscenza che si può raggiungere nell'edificio in esame determina dei coefficienti correttivi che vanno preliminarmente a ridurre i valori medi di resistenza dei materiali e sono forniti dalla normativa. Questi sono definiti fattori di confidenza e i livelli sono determinati dal livello di conoscenza del manufatto.

Sono definiti tre livelli di conoscenza che determinano altrettanti fattori di confidenza. Per tutti e tre i livelli è comunque previsto il rilievo delle strutture (murature, volte, solai, scale), l'individuazione dei carichi gravanti sui singoli elementi, individuazione della tipologia di fondazioni, e il rilievo dell'eventuale quadro fessurativo e deformativo. La differenziazione è effettuata in base alle indagini in sito. Il livello di conoscenza 1 è attribuito a casi in cui le verifiche in sito siano limitate e prevede che si utilizzi il valore minimo di resistenza e il valore medio del modulo elastico forniti dalla normativa (C8A.2.1), mentre il fattore di confidenza è pari a 1,35. Il livello di conoscenza 2 è riferito a casi in cui sono state effettuate indagini in sito estese, comprendenti anche ad esempio prove con martinetti piatti. In tal caso per quanto riguarda la resistenza va considerato il valore medio dei valori presenti nella tabella C8A.2.1, mentre per quanto riguarda il modulo elastico o si considera il valore medio della tabella o la media delle prove eseguite. Il corrispondente fattore di confidenza in questo caso è pari a 1,20. Il livello di conoscenza 3 invece si raggiunge con l'esecuzione di indagini in sito esaustive che forniscano anche uno o più valori sperimentali di resistenza.. In tal caso il fattore di confidenza è 1,00.

Nel caso studio in esame si è considerato un livello di conoscenza 2 poiché in quella porzione di edificio sono state precedentemente effettuate due prove con martinetti doppi e una con martinetto singolo, oltre a ispezioni e carotaggi.

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2			Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3		verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ esaustive - caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 - caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). - caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).		1.00

Tab. 4.3. 1 - Tabella C8A.1

Avendo fissato il livello di conoscenza 2 nel caso studio sono stati considerati i seguenti valori:

- $FC = 1,20$
- Resistenze: i valori medi degli intervalli riportati in tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria considerata.
- Moduli elastici: i valori medi degli intervalli forniti dalla tabella suddetta.

La tabella C8A.2.1 fornisce i valori minimi e massimi dei parametri meccanici e il peso medio di riferimento per le diverse tipologie di muratura.

Tipologia di muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )
	Min-max	Min-max	Min-max	Min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$ )	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Tab. 4.3. 2 - Tabella C8A.2.1

I valori forniti dalla tabella sono:

- $f_m$  è la resistenza media a compressione della muratura,
- $\tau_0$  è la resistenza media a taglio della muratura,
- $E$  è il valore medio del modulo di elasticità normale,
- $G$  è il valore medio del modulo di elasticità tangenziale,
- $W$  è il peso specifico medio della muratura.

Il caso studio si riporta alla tipologia *murature a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno*. Nello specifico, la muratura presente al Museo Archeologico di Verona è quasi ovunque a uno o due paramenti senza la presenza di un nucleo interno, ma comunque la tipologia più adatta a descriverlo è quella appena citata.

Sulla base di queste considerazioni, tenendo conto del livello di conoscenza acquisito, per quanto riguarda la muratura sono stati considerati i seguenti valori, corrispondenti ai valori medi della tipologia scelta.

Tipologia di muratura	$f_m$ [N/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_o$ [N/cm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/cm <sup>2</sup> ]	$G$ [N/cm <sup>2</sup> ]	$W$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$F_c$
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	2.50	4.3	1230	410	20	1.20

Tab. 4.3. 3 - Estratto tabella C8A.2.1

### 4.3.1. Combinazione delle Azioni

Le azioni sulle costruzioni sono classificate nel capitolo 2.5.1 dell' NTC2008 in:

- *permanenti* (G): azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione e che si possono considerare costanti. Tra essi si distinguono il peso proprio degli elementi strutturali ( $G_1$ ) e il peso proprio degli elementi non strutturali ( $G_2$ )
- *variabili* (Q): azioni di intensità sensibilmente diversa nel tempo
- *eccezionali* (A): azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura quali incendi, esplosioni, urti ed impatti.
- *Sismiche* (E): azioni derivate dai terremoti

In questo caso studio ai fini delle verifiche degli stati limite è stata impiegata la combinazione sismica:

$$E + G_1 + G_2 + P + \Psi_{21} * Q_{k1} + \Psi_{22} * Q_{k2} \dots \text{ (NTC 2008 - 2.5.5)}$$

### 4.3.2. Carichi permanenti strutturali-non strutturali

#### Muratura

Il peso proprio della muratura, come già anticipato, è pari al valore fornito dalla normativa di 20 KN/m<sup>3</sup>

#### Copertura

La copertura considerata è quella esistente prima degli interventi di restauro in corso, che ne hanno previsto il rifacimento. Essa è a struttura lignea con travi principali di sezione 25x25cm, travetti di sezione 8x10cm posti ad interasse di 60cm, uno strato di tavelloni con sovrapposte una guaina e uno strato di malta, e lo strato di tegole superiore.

Per effettuare un calcolo preciso abbiamo considerato i volumi totali di questi elementi e suddivisi per l'area della copertura.

$\Upsilon$	Peso totale
------------	-------------

Travi (5)	4.5 KN/m <sup>3</sup>	23.2 KN
Travetti(66)	4.5 KN/m <sup>3</sup>	18 KN
Tavelloni	0.35 KN/m <sup>2</sup>	54.6 KN
Malta	0.38 KN/m <sup>2</sup>	59.31 KN
Guaina	0.1 KN/m <sup>2</sup>	15.6 KN
Coppi	0.6 KN/m <sup>2</sup>	187.31 KN
Totale copertura		411.1 KN
Area copertura		156.1 m <sup>2</sup>
G copertura		2.63 KN/m <sup>2</sup>

Tab. 4.3. 4 - carichi copertura

### Sottotetto

Il sottotetto presente prima dell'intervento era non praticabile e composto da travetti Varese H25, tavelloni e malta.

	γ	Peso totale
Travetti Varese	0.52 KN/m	154.4 KN
Tavelloni	0.35 KN/m <sup>2</sup>	52 KN
Malta	0.38 KN/m <sup>2</sup>	56.43 KN
Totale sottotetto		262.85 KN
Area sottotetto		148.5 m <sup>2</sup>
G sottotetto		1.77 KN/m <sup>2</sup>

Tab. 4.3. 5 - carichi sottotetto

### Volta

Per quanto riguarda la volta in mattoni si è proceduto con la sua schematizzazione e il calcolo del volume presente sopra attraverso la discretizzazione di ogni spicchio in archi e quindi il calcolo del volume superiore considerando l'altezza della volta in quel punto. Si è quindi calcolato il volume del riempimento in questo modo e poi è stato aggiunto il volume di uno strato di mattoni.

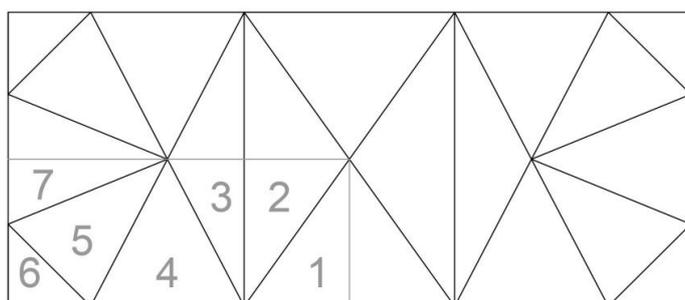


Fig. 4.3. 1 schema volta

V <sub>1</sub>	0.88 m <sup>3</sup>
V <sub>2</sub>	1.09 m <sup>3</sup>
V <sub>3</sub>	1.3 m <sup>3</sup>
V <sub>4</sub>	0.92 m <sup>3</sup>
V <sub>5</sub>	1.24 m <sup>3</sup>
V <sub>6</sub>	1.68 m <sup>3</sup>
V <sub>7</sub>	0.34 m <sup>3</sup>
Vultimo strato	3.34 m <sup>3</sup>

Tab. 4.3. 6 - carichi volta

Sia per il riempimento che per l'ultimo strato di mattoni è stato assunto come peso proprio il valore del peso proprio dei mattoni cioè  $18 \text{ KN/m}^3$ .

#### *Pavimento*

Il pavimento all'ultimo livello, quindi sopra la volta, non è ispezionabile quindi si è considerato composto dalle mattonelle in cotto che si possono osservare poste su un massetto di 6cm di spessore.

	$\gamma$	Peso totale
Massetto (6cm)	$18.5 \text{ KN/m}^3$	164.835 KN
Piastrelle di Cotto	$0.40 \text{ KN/m}^2$	59.4 KN
Totale pavimento		224.2 KN
Area pavimento		$148.5 \text{ m}^2$
$G_{\text{pavimento}}$		$1.51 \text{ KN/m}^2$

Tab. 4.3. 7 - carichi pavimento

#### *Elementi divisori interni non portanti*

Per quanto riguarda gli elementi divisori interni non portanti si può eguagliare il loro peso proprio ad un carico permanente portato uniformemente distribuito. Per valore di peso proprio per unità di lunghezza compreso tra  $2 \text{ KN/m}$  e  $3 \text{ KN/m}$  il corrispondente carico distribuito è  $g = 1.20 \text{ KN/m}^2$ .

#### *Elementi divisori interni portanti*

I muri divisori interni portanti situati all'ultimo livello sono costituiti dalla stessa muratura dei muri perimetrali per cui è stato calcolato il loro volume e si è considerato come peso proprio lo stesso valore della muratura esterna, quindi  $20 \text{ KN/m}^3$ .

### 5.3.3. Carichi variabili

Le azioni variabili vengono combinate attraverso i coefficienti di combinazione  $\Psi_{0j}$ ,  $\Psi_{1j}$ ,  $\Psi_{2j}$  espressi nella tabella 2.5.I dell' NTC2008:

Categoria / Azione Variabile	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{1j}$	$\Psi_{2j}$
Categoria A – Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B – Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C – Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D – Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F – Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso < 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G – Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H – Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota < 1.000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1.000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni Termiche	0,6	0,5	0,0

Nel caso studio in esame, avendo utilizzato la combinazione sismica delle azioni i coefficienti usati sono quelli della colonna  $\Psi_{2j}$ , quindi pari a zero per quanto riguarda vento e neve e a 0,3 per il solaio del primo piano essendo un ambiente di categoria B, cioè destinato all'uso di ufficio.

*Neve*

Il carico provocato dalla neve sulle coperture è valutato mediante l'espressione:

$$q_s = \mu_i * q_{sk} * C_E * C_t \quad (\text{NTC2008 - 3.3.7})$$

dove:

$q_s$  è il carico della neve sulla copertura,

$\mu_i$  è il coefficiente di forma della copertura fornito al capitolo 3.4.5 delle NTC,

$q_{sk}$  è il valore caratteristico di riferimento del carico della neve al suolo per un periodo di ritorno di 50 anni, fornito al capitolo 3.4.2 delle NTC,

$C_E$  è il coefficiente di esposizione, fornito al capitolo 3.4.3 delle NTC,

$C_t$  è il coefficiente termico fornito al capito 3.4.4 delle NTC.

Nel caso studio in esame  $\mu_i$  è pari a 0,8 in quanto l'inclinazione della copertura è minore di 30°,  $q_{sk}$  è pari a 1 KN/m<sup>2</sup> perché Verona è all'interno della zona 2 tra le zone di carico della neve e l'altitudine (m s.l.m.) è minore di 200m.

Invece  $C_E$  e  $C_t$  vengono presi pari a 1 in assenza di studi specifici.

In base a queste considerazioni il carico della neve sulla copertura è pari a:

$$q_s = 0.8 * 1.00 * 1 * 1 = 0.8 \text{ KN/m}^2$$

### Vento

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni variabili nel tempo che provocano effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono ricondotte ad azioni statiche equivalenti (cap 3.3.3 delle NTC).

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_b * c_e * c_p * c_d \quad (\text{NTC2008} - 3.3.2)$$

dove:

$q_b$  è la pressione cinetica di riferimento (cap. 3.3.6 delle NTC),

$c_e$  è il coefficiente di esposizione (cap. 3.3.7 delle NTC),

$c_p$  è il coefficiente di forma, funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento,

$c_d$  è il coefficiente dinamico (cap. 3.3.8 delle NTC).

La pressione cinetica di riferimento  $q_b$  vale:

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * V_b^2$$

dove:

$\rho$  è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a  $1.25 \text{ Kg/m}^3$ ,

$V_b$  è la velocità di riferimento del vento data dall'espressione:

$$V_b = V_{b,o}, \quad \text{per } a_s \leq a_o$$

$$V_b = V_{b,o} + k_a * (a_s - a_o), \quad \text{per } a_o < a_s \leq 1500\text{m}$$

$V_{b,o}$ ,  $a_o$  e  $k_a$  sono parametri forniti dalla tabella 3.3.I delle NTC in funzione della regione in cui sorge la costruzione.

$a_s$  è l'altitudine in metri s.l.m del sito dove sorge la costruzione.

### Carichi variabili di esercizio

I carichi variabili di esercizio sono diversificati in base alla categoria di utilizzo dell'edificio. Nella tabella 3.1.II sono esposti i relativi valori dei carichi per le diverse categorie.

Tabella 3.1.II – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]	$H_k$ [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	$\geq 6,00$ —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 secondo categoria di appartenenza —	1,00 — —

\* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati  
\*\* per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso

13

Tab. 4.3. 8 - valori dei carichi di esercizio per le diverse categorie di edifici

Nel caso studio in esame per quanto riguarda l'ultimo livello si ricade nella categoria B2.

#### 4.3.4. Azione sismica

Il museo archeologico di Verona si trova alle coordinate 45.447383, 11.001713.

Il primo passo consiste nella definizione della vita nominale ( $V_N$ ) e delle classe d'uso ( $C_U$ ) che sono valori forniti dalla normativa in base al tipo di costruzione e alla sua funzione attraverso le seguenti tabelle:

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	$\leq 10$
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	$\geq 50$
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

Tab. 4.3. 9 - Tabella 2.4.I

- Classe I:* Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
- Classe II:* Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
- Classe III:* Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
- Classe IV:* Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Fig. 4.3. 2 - Estratto da NTC2008, cap. 2.4.2

Per quanto riguarda questo caso studio è stata assegnata una vita nominale pari a 50anni e una classe d'uso II che determina un  $C_U$  pari a 1, ottenendo così un periodo di riferimento  $V_R$  pari a 50, determinato dalla formula:

$$V_R = V_N * C_U$$

Una volta calcolato il periodo di riferimento è possibile ottenere il periodo di ritorno  $T_R$  che è espresso in funzione del periodo di riferimento in base alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  che si differenzia in base allo stato limite che si sta verificando, nel nostro caso SLV e quindi  $P_{VR}$  corrisponde al 10% e quindi

$$T_R = 9.50 * V_R$$

Tabella 3.2.1 – Probabilità di superamento  $P_{V_R}$  al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		$P_{V_R}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tab. 4.3. 10- Tabella 3.2.1s

Una volta determinate le coordinate del sito e il periodo di ritorno nell'allegato B delle NTC si possono ricavare i valori di  $a_g, F_0, T_c^*$  con:

$a_g$  accelerazione massima del terreno espressa in  $g/10$ ,

$F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, adimensionale,

$T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro espresso in sec.

		$T_r = 475$		
LON	LAT	$a_g$	$F_0$	$T_c^*$
45.4474	11.0017	1.437	2.43	0.28

Tab. 4.3. 11 - valori per coordinate (allegato B, NTC 2008)

### Spettro di risposta elastico in accelerazione

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è espresso da una forma spettrale riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore dell'accelerazione orizzontale massima  $a_g$  su sito di riferimento rigido orizzontale. (cap. 3.2.3.2)

Esso è definito dalle seguenti espressioni, nelle quali  $T$  e  $S_e$  sono rispettivamente periodo di vibrazione ed accelerazione spettrale orizzontale:

$$\begin{array}{ll}
 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Fig. 4.3. 3- Estratto NTC2008, cap. 3.2.3.2.1

Dove:

- $S$  è il coefficiente che tiene conto della categoria del sottosuolo e delle condizioni topografiche secondo la relazione:

$$S = S_S \cdot S_T$$

Con  $S_S$  coefficiente di amplificazione stratigrafica e  $S_T$  coefficiente di amplificazione topografica.

Nel caso studio in esame  $S = 1.2 \cdot 1.2 = 1.44$

- $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$ , con  $\xi$  valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione.

Nel caso studio in esame  $\eta = 1$

- $F_0$  è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima ed ha valore minimo pari a 2.2. Nel caso studio, come già visto, è pari a 2.43
- $T_C$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro.

$$T_C = C_C * T_C^*$$

Nel caso studio in esame  $T_C = 1.42 * 0.28 = 0.40$

- $T_B$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante.

$$T_B = T_C / 3$$

Nel caso studio in esame  $T_B = 0.40/3 = 0.13$

- $T_D$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro.

$$T_D = 4.0 * \frac{a_g}{g} + 1.6$$

Nel caso studio in esame  $T_D = 2.19$

T corrisponde al primo periodo di vibrazione della struttura ed è espresso dalla formula:

$$T = C_1 * H^{3/4}$$

Con  $C_1 = 0.05$  e H altezza totale dell'edificio, quindi  $T = 0.05 * 13.02^{3/4} = 0.343$

Quindi essendo T compreso tra  $T_B$  e  $T_C$  lo spettro di risposta è definito dalla formula:

$$S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 = 5.03$$

#### 4.4. Analisi per macroelementi

Per gli edifici storici in muratura le principali modalità di collasso sono le seguenti due:

- Meccanismi fuori piano: sono principalmente ribaltamenti di pareti o porzioni di pareti soggette ad azione sismica. Questi cinematismi sono fortemente dipendenti dalla presenza o meno di connessioni tra pareti ortogonali e dall'ancoraggio dei solai.

I principali meccanismi fuori piano sono:

- Ribaltamento semplice di parete
- Ribaltamento parziale
- Flessione verticale
- Ribaltamento del cantonale
- Meccanismi nel piano: comportano la rottura a taglio della muratura con la formazione di fessure inclinate.

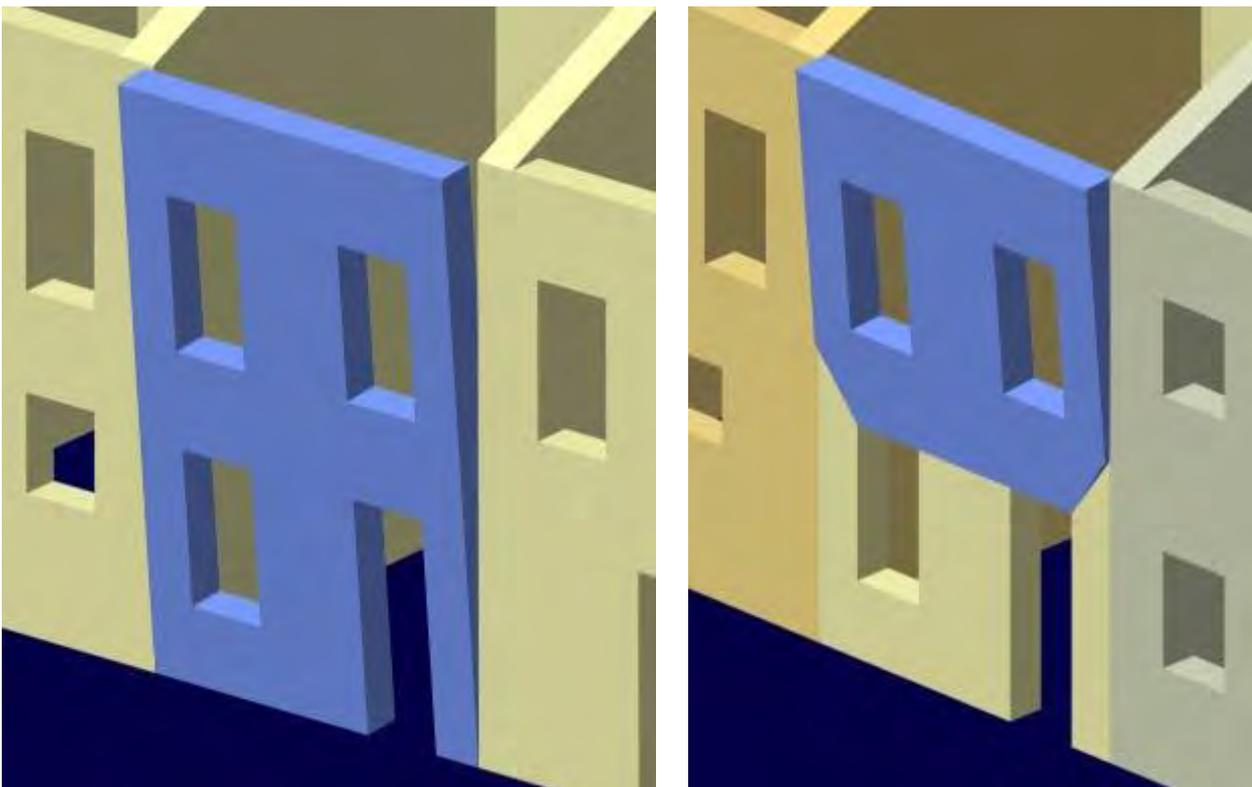
### *Meccanismi fuori piano*

Nel caso in cui un edificio non manifesti un comportamento d'insieme a causa delle caratteristiche e delle tecniche costruttive, come ad esempio in assenza di adeguato ammorsamento tra le facciate e le parteti ad esse ortogonali, è opportuno analizzarlo tramite uno studio completo dei possibili meccanismi locali, cioè che coinvolgono solo una parte delle strutture. Questi meccanismi solitamente sono uno dei punti deboli degli edifici, poiché sono meccanismi con scarsa resistenza e poco duttili.

Essi sono esposti e spiegati nelle *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*, documento emesso in collaborazione tra protezione Civile e Reluis come allegato alle Linee Guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni.

Vengono di seguito riportati i principali meccanismi locali, rispetto a quali è stato analizzato il caso studio in esame.

#### **Meccanismo I – Ribaltamento semplice di parete**



*Fig. 4.4.1 - schema ribaltamento semplice di parete*

Questo meccanismo si manifesta con la rotazione rigida di un'intera facciata o di una porzione di essa rispetto ad un asse di rotazione posto alla sua base. Il ribaltamento può essere quindi di tutta l'altezza o solo di uno o più livelli, oppure potrebbe essere solo parziale e riferito solo al paramento più esterno nel caso di murature a più paramenti non adeguatamente collegati tra loro. Esso è comunque spesso dipendente da uno scarso

ammorsamenti alle pareti ortogonali e dall'assenza di collegamenti in sommità quali cordoli o tiranti.

Il valore del moltiplicatore dei carichi critico per il quale si attiva il meccanismo si ottiene uguagliando il momento stabilizzante al momento ribaltante, come espresso nel seguente schema di calcolo.

<p>Momento stabilizzante:</p> $M_S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{s_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i$ <p>Momento ribaltante:</p> $M_R = \alpha \cdot \left[ \sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i \right] + \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} + P_H \cdot h_i$ <p>Moltiplicatore di collasso:</p> $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{s_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i - \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} - P_H \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i}$	
--	--

Fig. 4.4. 2 - schema ribaltamento semplice di parete

### Meccanismo II – Flessione verticale di parete

Questo meccanismo si verifica nel caso in cui la parete sia trattenuta in sommità, e in conseguenza di azioni fuori dal piano avviene la formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la muratura in due parti che ruotano reciprocamente attorno ad essa.

Anche in questo caso il meccanismo può verificarsi lungo tutta l'altezza della parete o solo per un o più livelli, oppure solo per il paramento più esterno. Come per il ribaltamento globale, il meccanismo è favorito da carenze di collegamenti con le pareti ortogonali.

In questo caso il valore del moltiplicatore dei carichi critico si ottiene con il principio dei lavori virtuali e non con l'equilibrio dei momenti.

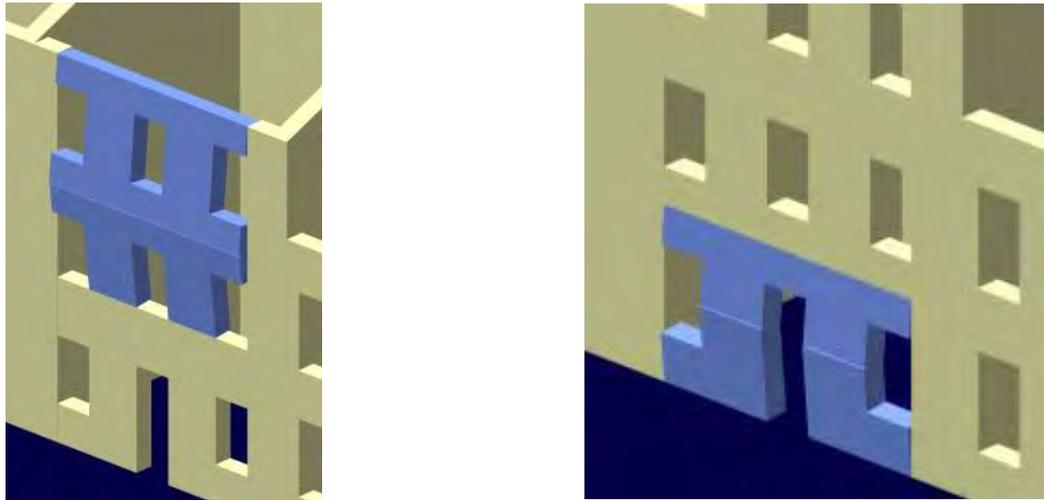


Fig. 4.4. 3 - schema flessione semplice di parete

Principio dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot [W_1 \delta_{1x} + W_2 \delta_{2x} + F_{V1} \delta_{V1x} + F_{V2} \delta_{V2x} + P_{S1} \delta_{P1x}] + F_{H1} \delta_{V1x} + F_{H2} \delta_{V2x} =$$

$$= W_1 \delta_{1y} + W_2 \delta_{2y} + F_{V1} \delta_{V1y} + F_{V2} \delta_{V2y} + N \delta_{N\psi} + P_{S1} \delta_{P1y} + P_{S2} \delta_{P2y} + T \delta_{P1x}$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{E}{W_1 y_{G1} + F_{V1} h_{V1} + P_{S1} h_P + (W_2 y_{G2} + F_{V2} h_{V2}) \frac{h_1}{h_2}}$$

Il termine E corrisponde a:

$$E = \frac{W_1}{2} s_1 + F_{V1} d_{V1} + (W_2 + P_{S2} + N + F_{V2}) s_2 +$$

$$+ \frac{h_1}{h_2} \left( \frac{W_2}{2} s_2 + P_{S2} a_2 + N d + F_{V2} d_{V2} - F_{H2} h_{V2} \right) + P_{S1} a_1 - F_{H1} h_{V1} + T h_P$$

Fig. 4.4. 4 - schema flessione semplice di parete

#### 4.4.1. Individuazione dei cinematismi

La scelta dei macroelementi da verificare è stata effettuata sulla base di diverse considerazioni. In primo luogo è stato considerato il quadro fessurativo, il quale mostra una lesione nella facciata sud in corrispondenza dell'imposta della volta.



*Fig. 4.4. 5 - quadro fessurativo facciata sud refettorio*

Inoltre sono state considerate le distribuzioni dei carichi e le caratteristiche delle strutture per rintracciare eventuali criticità. Come si può osservare nella foto seguente e nella pianta dell'edificio, la volta scarica gran parte del suo peso in corrispondenza dei due maschi murari centrali, che quindi vanno verificati.



*Fig. 4.4. 6 - foto volta refettorio (Museo Archeologico)*

La volta è stata considerata non spingente grazie alla presenza delle catene. Nella pianta dell'edificio si può osservare come i due maschi murari su cui è situata l'imposta della volta sono molto differenti tra loro, il primo infatti ha uno spessore di circa 1,2 m alla base e decresce con l'altezza fino a 0,6 m, mentre il secondo presenta già dalla base uno spessore di 0,6 m, motivo che spiega la presenza del contrafforte.

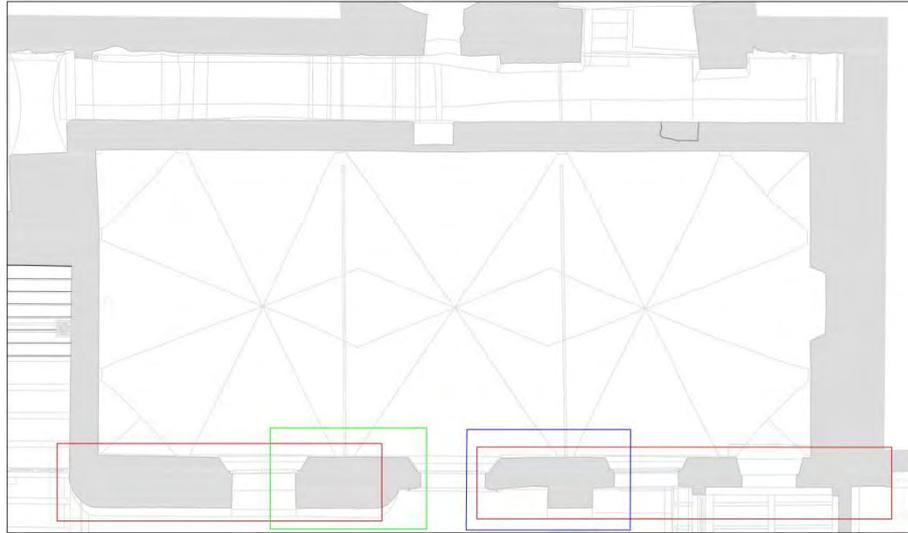


Fig. 4.4. 7 - macroelementi livello IV

Per quanto riguarda il livello superiore, è stata verificata l'intera muratura poiché in corrispondenza dell'ultimo livello lo spessore murario si riduce da circa 0,6 m a circa 0,4 m. Sempre all'ultimo livello sono stati analizzati i possibili meccanismi di piano.

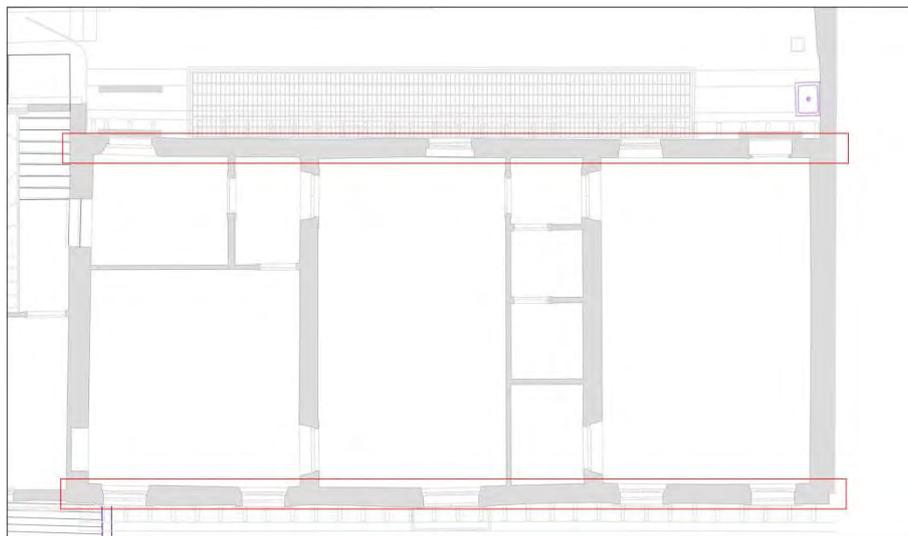


Fig. 4.4. 8 - macroelementi livello VI

Non sono stati considerati cinematici riguardanti la facciata nord ad eccezione dell'ultimo livello perché sono presenti volte di contrasto nell'intercapedine tra parete e pendio.

### 4.4.2. Cinematismo 1 - Ribaltamento semplice (fessura)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo di ribaltamento semplice dell'intera parete in esame. La scelta della parete è stata effettuata in base al quadro fessurativo, e quindi si individua come macroelemento la parete dall'estremità dell'edificio fino alla fessura.

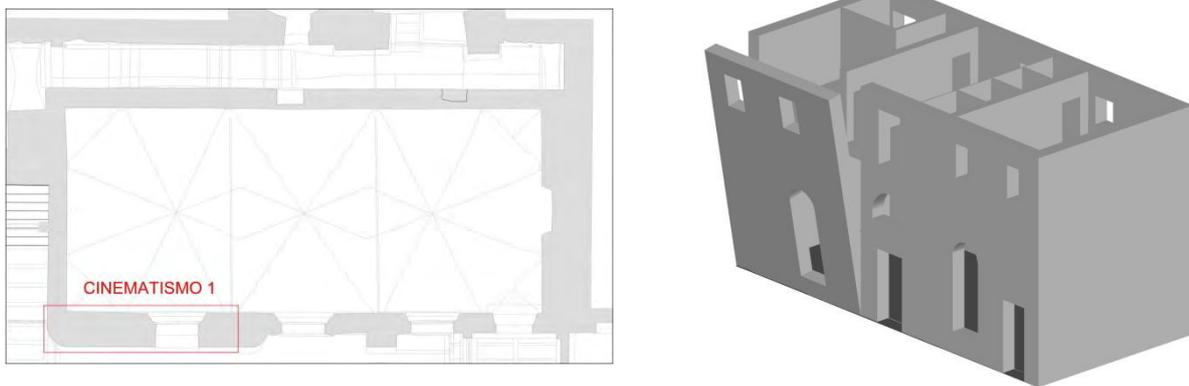


Fig. 4.4. 9 - localizzazione e schema cinematismo 1

Nella tabella seguente sono raccolti i dati utilizzati per la verifica. I carichi sono stati calcolati in base alle arre e ai volumi agenti su quella porzione di parete. Nella prima colonna della tabella, riguardante la geometria della porzione di muratura analizzata, i pedici x e y stanno ad indicare la posizione x e y del punto a cui sono apposti nella sezione. Le larghezze delle murature sono indicate con  $d_1$ ,  $d_{1_1}$ ,  $d_2$  e sono rispettivamente la larghezza di base della muratura inferiore, la larghezza in sommità della muratura inferiore e quella della muratura superiore. Nei carichi vediamo invece più volte indicata  $A_{volta}$  perché essa indica l'area del solaio che viene scaricata, appunto dalla volta, su questa parte di muratura.

GEOMETRIA		CARICHI	
$h_1=$	6,6 m	MURATURA	
$h_2=$	2,66 m	$P_1=$	789,6 KN
$l=$	7 m	$P_2=$	148,96 KN
$A_1=$	5,64 m <sup>2</sup>	VOLTA	
$A_2=$	1,064 m <sup>2</sup>		
$B_{1_x}=$	0,45 m		
$B_{1_y}=$	2,88 m	COPERTURA LAT	
$A_{cop}=$	156,09 m <sup>2</sup>	$A_{cop.lat}=$	8,47 m <sup>2</sup>
$A_{sott}=$	148,5 m <sup>2</sup>	$A_{sott}=$	31,5 m <sup>2</sup>
$d_1=$	1,2 m	$N_c=$	75,18513 KN
$d_{1_1}=$	0,61 m	COPERURA PORTATA	
$d_2=$	0,4 m	$A_{cp}=$	22,6 m <sup>2</sup>
$dN_{1_x}=$	0,26 m	$N_{cp}=$	51,84144 KN
$dN_{1_y}=$	3,9 m	TRAMEZZI PORTANTI	
		$N_{tp}=$	63,9 KN
		TRAMEZZI NON PORTANTI	
		$A_{volta}=$	20,5 m <sup>2</sup>
		$N_{tnp}=$	24,6 KN
		PAVIMENTO	

dNc <sub>x</sub> =	0,13 m	Avolta=	20,5 m <sup>2</sup>
dNc <sub>y</sub> =	9,26 m	Npav=	30,955 KN
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta=	20,5 m <sup>2</sup>
		Nes=	18,45 KN
		N1=	337,5714 KN

Tab. 4.4. 1 - valori geometrici e carichi cinematismo 1

Una volta determinati i carichi è stato calcolato t cioè la posizione, rispetto all'estradosso della muratura alla base, attorno al quale avviene la rotazione della parete. E' stato calcolato attraverso la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Una volta calcolato t, pari a 8,58cm, è stato possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.172$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e t lungo x, e  $d_{i,y}$  distanza da t lungo y.

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede determinando gli spostamenti virtuali delle forze in gioco e calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 110.84KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.80$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 1.74 m/s^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	Ψ(z)=	0.288786
Tc=	0.3976	Υ=	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 2 - verifica SLV lineare cinematico 1

Nella tabella soprastante sono elencati tutti i dati utilizzati per verificare la condizione.

$$a_0^* = 1.74 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

### 4.4.3. Cinematismo 2 – Flessione semplice (fessura)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematico di ribaltamento semplice della parete in esame. La scelta della parete è stata effettuata in base al quadro fessurativo, e quindi si individua come macroelemento la parete dall'estremità dell'edificio fino alla fessura.

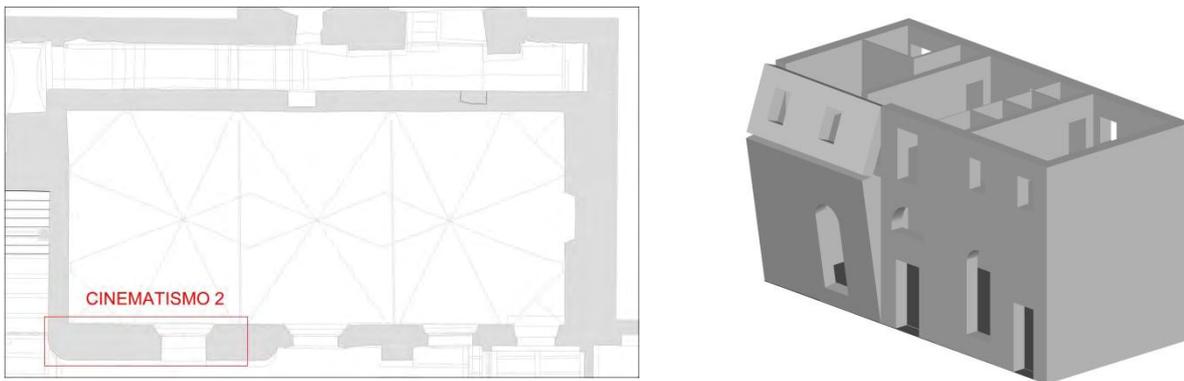


Fig. 4.4. 10 - localizzazione e schema cinematico 2

Nella tabella seguente sono raccolti i dati utilizzati per la verifica. I carichi sono stati calcolati in base alle arre e ai volumi agenti su quella porzione di parete.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6,6 m	MURATURA	VOLTA
h2=	2,66 m	P1= 789,6 KN	Avolta= 20,5 m <sup>2</sup>
l=	7 m	P2= 148,96 KN	Vvolta= 8,2125 m <sup>3</sup>

A1=	5,64 m <sup>2</sup>		Yvolta=	18 KN/m <sup>3</sup>	
A2=	1,064 m <sup>2</sup>		Nvolta=	147,825 KN	
B1 <sub>x</sub> =	0,45 m	COPERTURA LAT	COPERURA PORTATA		
B1 <sub>y</sub> =	2,88 m	Acop.lat=	8,47 m <sup>2</sup>	Acp=	22,6 m <sup>2</sup>
Acop=	156,09 m <sup>2</sup>	Asott=	31,5 m <sup>2</sup>	Ncp=	51,84144 KN
Asott=	148,5 m <sup>2</sup>	Nc=	75,18513 KN	TRAMEZZI PORTANTI	
d1=	1,2 m		Ntp=	63,9 KN	
d1 <sub>1</sub> =	0,61 m		TRAMEZZI NON PORTANTI		
d2=	0,4 m		Avolta=	20,5 m <sup>2</sup>	
dN1 <sub>x</sub> =	0,26 m		Ntnp=	24,6 KN	
dN1 <sub>y</sub> =	3,9 m		PAVIMENTO		
dNc <sub>x</sub> =	0,13 m		Avolta=	20,5 m <sup>2</sup>	
dNc <sub>y</sub> =	9,26 m		Npav=	30,955 KN	
			CARICHI VARIABILI ESERCIZIO		
			Avolta=	20,5 m <sup>2</sup>	
			Nes=	18,45 KN	
			N1=	337,5714 KN	

Tab. 4.4. 3- valori geometrici e carichi cinematismo 2

Una volta determinati i carichi è stato calcolato t cioè la posizione, rispetto all'estradosso della muratura alla base, attorno al quale avviene la rotazione della parete. E' stato calcolato attraverso la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Dalla precedente formula si ricava t, pari a 8,58cm.

Nel caso della flessione semplice le due porzioni in cui si divide la muratura ruotano attorno ai relativi poli con angoli differenti:

$$\theta * h_1 = \varphi * h_2$$

Prendendo come riferimento la cerniera cilindrica C che divide la muratura in due parti e attorno alla quale avviene la rotazione relativa tra le stesse si pone lo spostamento in direzione orizzontale di quel punto pari a 1:

$$\delta_x(C) = 1$$

In tal modo è possibile calcolare gli spostamenti orizzontali e verticali di tutti i punti di applicazione dei carichi. Una volta calcolati tutti gli spostamenti si applica il Principio dei Lavori Virtuali per calcolare il moltiplicatore critico dei carichi  $\alpha$ , uguagliano il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$PLV: L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[ \sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.32$$

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 116.10 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.84$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 3.12 \text{ m/s}^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.288786
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 4 - verifica SLV lineare cinematismo 2

Nella tabella soprastante sono elencati tutti i dati utilizzati per verificare la condizione.

$$a_0^* = 3.12 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

#### 4.4.4. Cinematismo 3- Ribaltamento semplice (maschio murario facciata)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo di ribaltamento di un maschio murario, è stato scelto in quanto in esso vanno a confluire una consistente quantità di carichi portati dalla volta.

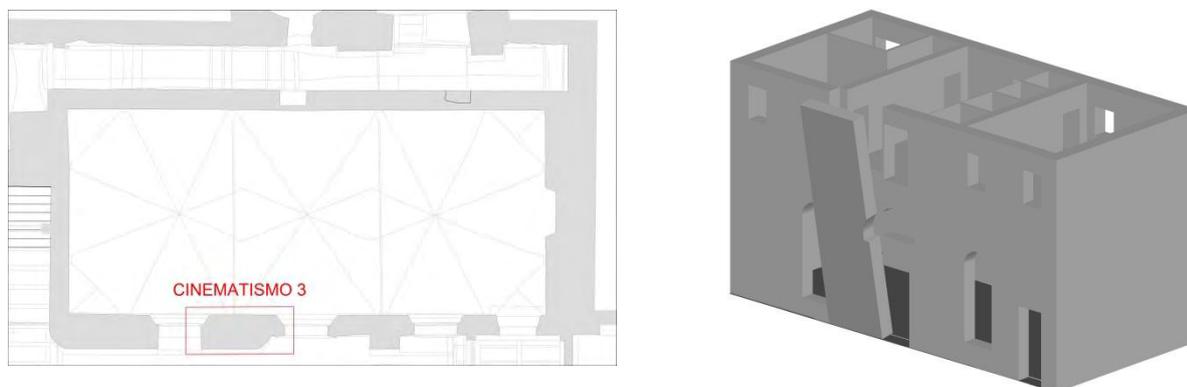


Fig. 4.4. 11 - localizzazione e schema cinematismo 3

Nella tabella seguente sono raccolti i dati utilizzati per la verifica. I carichi sono stati calcolati in base alle aree e ai volumi agenti su quella porzione di parete. In particolare sono stati calcolati i carichi portati dalla volta in questo maschio murario, quindi in base alla conformazione della volta sono stati analizzati i carichi che confluiscono sul maschio murario in oggetto.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6.6 m	MURATURA	
h2=	2.66 m	P1=	282 KN
l=	2.5 m	P2=	53.2 KN
A1=	5.64 m <sup>2</sup>	VOLTA	
A2=	1.064 m <sup>2</sup>	Avolta=	14.25 m <sup>2</sup>
B1 <sub>x</sub> =	0.45 m	Vvolta=	5.51125 m <sup>3</sup>
B1 <sub>y</sub> =	2.88 m	γvolta=	18 KN/m <sup>3</sup>
Acop=	156.09 m <sup>2</sup>	Nvolta=	99.2025 KN
Asott=	148.5 m <sup>2</sup>	COPERTURA LAT	
d1=	1.2 m	COPERTURA PORTATA	
d11=	0.61 m	Acop.lat=	2.25 m <sup>2</sup>
d2=	0.4 m	Asott=	11.25 m <sup>2</sup>
dN1 <sub>x</sub> =	0.26 m	Nc=	25.07408 KN
dN1 <sub>y</sub> =	3.9 m	TRAMEZZI PORTANTI	
dNc <sub>x</sub> =	0.13 m	Ntp=	63.9 KN
dNc <sub>y</sub> =	9.26 m	TRAMEZZI NON PORTANTI	
		Avolta=	14.25 m <sup>2</sup>
		Ntnp=	17.1 KN
		PAVIMENTO	
		Avolta=	14.25 m <sup>2</sup>
		Npav=	21.5175 KN
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta=	14.25 m <sup>2</sup>

	Nes=	12.825 KN
	N1=	266.3864 KN

Tab. 4.4. 5 - valori geometrici e carichi cinematismo 3

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$  cioè la posizione, rispetto all'estradosso della muratura alla base, attorno al quale avviene la rotazione della parete. E' stato calcolato attraverso la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Una volta calcolato  $t$ , pari a 11.14cm, è stato possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.182$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e  $t$  lungo  $x$ , e  $d_{i,y}$  distanza da  $t$  lungo  $y$ .

Si procede quindi analogamente alla determinazione degli spostamenti virtuali della forze in gioco e quindi, usando questi, al calcolo della massa partecipante al meccanismo,  $M^*$ , alla frazione di massa partecipante,  $e^*$ , e quindi all'accelerazione spettrale sismica,  $a_0^*$ :

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 53.82KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.84$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 1.76 m/s^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

La verifica lineare dello Stato Limite di salvaguarda della Vita viene effettuata attraverso la verifica dell'accelerazione spettrale sismica, essa infatti deve soddisfare la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g (P_{VR}) S}{q}; \frac{S_s (T_1) \varphi(z) \gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.224076
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 6 - verifica SLV lineare cinematismo 3

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 1.74 \geq \max(1.03; 0.73)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

#### 4.4.5. Cinematismo 4 – Flessione semplice (maschio murario)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo di flessione semplice del maschio murario evidenziato. La scelta del cinematismo è stata effettuata in base ai carichi, e quindi si individua come macroelemento il maschio murario in cui insiste l'imposta della volta. In base alla conformazione della stessa si sono analizzati i carichi che vanno a confluire sulla muratura in esame, con i relativi carichi del piano superiore e della copertura che sono portati dalla porzione di volta.

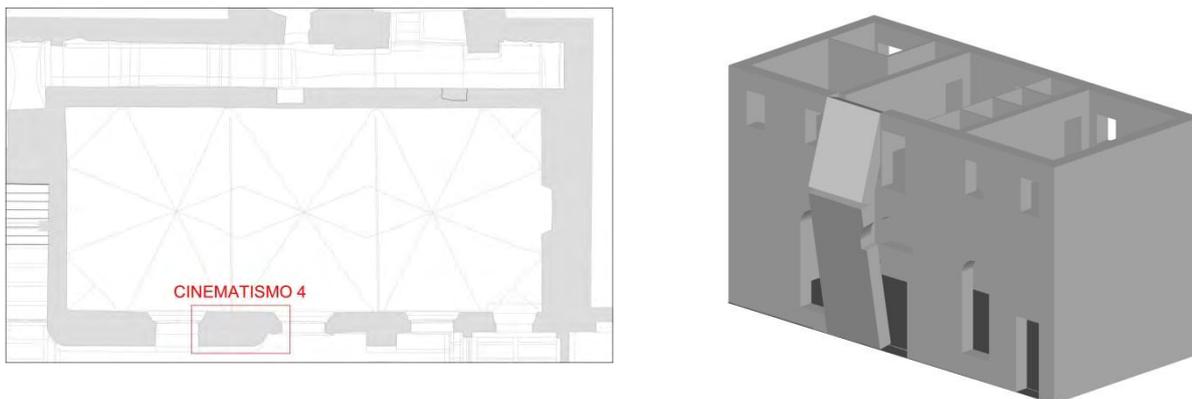


Fig. 4.4. 12- localizzazione e schema cinematismo 4

Nella tabella seguente sono raccolti i dati utilizzati per la verifica. I carichi sono stati calcolati in base alle arre e ai volumi agenti su quella porzione di parete.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6.6 m	MURATURA	VOLTA
h2=	2.66 m	P1= 282 KN	Avolta= 14.25 m2

l=	2.5 m	P2=	53.2 KN	Vvolta=	5.51125 m3
A1=	5.64 m2			Yvolta=	18 KN/m3
A2=	1.064 m2			Nvolta=	99.2025 KN
B1x=	0.45 m	COPERTURA LAT		COPERURA PORTATA	
B1y=	2.88 m	Acop.lat=	2.25 m2	Acp=	22.6 m2
Acop=	156.09 m2	Asott=	11.25 m2	Ncp=	51.84144 KN
Asott=	148.5 m2	Nc=	25.07408 KN	TRAMEZZI PORTANTI	
d1=	1.2 m			Ntp=	63.9 KN
d11=	0.61 m			TRAMEZZI NON PORTANTI	
d2=	0.4 m			Avolta=	14.25 m2
dN1x=	0.26 m			Ntnp=	17.1 KN
dN1y=	3.9 m			PAVIMENTO	
dNcx=	0.13 m			Avolta=	14.25 m2
dNcy=	9.26 m			Npav=	21.5175 KN
				CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
				Avolta=	14.25 m2
				Nes=	12.825 KN
				N1=	266.3864 KN

Tab. 4.4. 7 - valori geometrici e carichi cinematismo 4

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$  cioè la posizione, rispetto all'estradosso della muratura alla base, attorno al quale avviene la rotazione della parete. E' stato calcolato attraverso la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Dalla precedente formula si ricava  $t$ , pari a 8,58cm.

Nel caso della flessione semplice le due porzioni in cui si divide la muratura ruotano attorno ai relativi poli con angoli differenti:

$$\theta * h_1 = \varphi * h_2$$

Prendendo come riferimento la cerniera cilindrica C che divide la muratura in due parti e attorno alla quale avviene la rotazione relativa tra le stesse si pone lo spostamento in direzione orizzontale di quel punto pari a 1:

$$\delta_x(C) = 1$$

In tal modo è possibile calcolare gli spostamenti orizzontali e verticali di tutti i punti di applicazione dei carichi. Una volta calcolati tutti gli spostamenti si applica il Principio dei Lavori Virtuali per calcolare il moltiplicatore critico dei carichi  $\alpha$ , uguagliano il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$PLV: L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[ \sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.27$$

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 59.21 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.87$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 2.53 \text{ m/s}^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g (P_{VR}) S}{q}; \frac{S_e(T_1) \varphi(z) \gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.288786
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 8 - verifica SLV lineare cinematismo 4

Nella tabella soprastante sono elencati tutti i dati utilizzati per verificare la condizione.

$$a_0^* = 2.53 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

#### 4.4.6. Cinematismo 5 – ribaltamento semplice (maschio contrafforte)

E' stata effettuata l'analisi del cinematismo di ribaltamento semplice del maschio murario su cui insiste in contrafforte. Interessante in quanto il maschio murario senza contrafforte sarebbe snello e possiamo studiare la sua influenza.

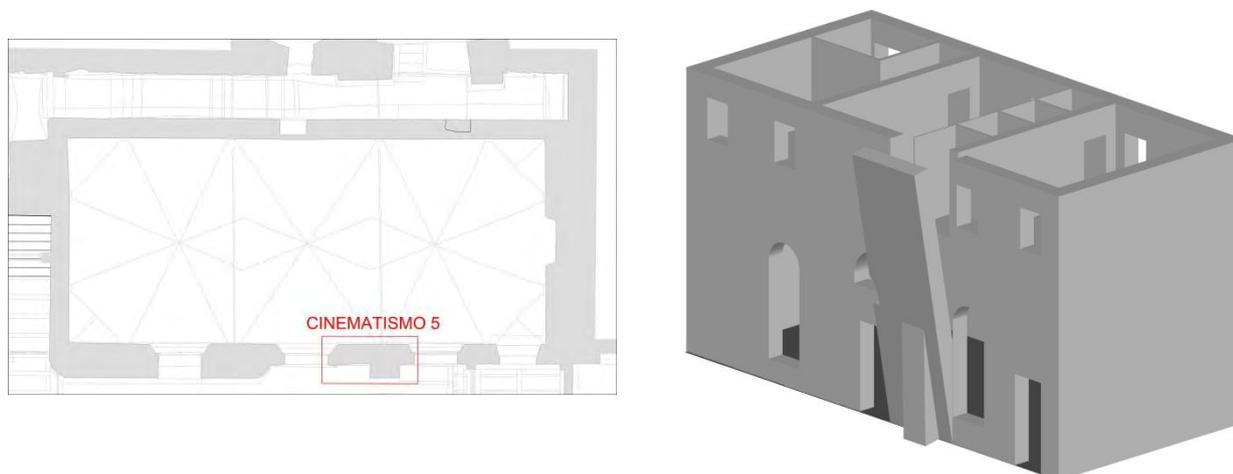


Fig. 4.4. 13 - localizzazione e schema cinematismo 5

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa. Nello specifico vediamo il carico del contrafforte denominato P3, in quanto è una porzione di muratura aggiuntiva.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6.6 m	MURATURA	
h2=	2.66 m	P1=	213.378 KN
l=	2.65 m	P2=	56.392 KN
A1=	4.026 m <sup>2</sup>	P3=	27.244 KN
A2=	1.064 m <sup>2</sup>	VOLTA	
lc=	0.98 m	Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
Acop=	156.09 m <sup>2</sup>	Vvolta= 3.910875 m <sup>3</sup>	
Asott=	148.5 m <sup>2</sup>	Yvolta= 18 KN/m <sup>3</sup>	
Ac=	1.39 m <sup>2</sup>	Nvolta= 70.39575 KN	
d1=	0.61 m	COPERTURA LAT	
d2=	0.4 m	COPERTURA PORTATA	
dc1=	0.44 m	Acop.lat=	2.4 m <sup>2</sup>
dc2=	0.125 m	Asott=	11.925 m <sup>2</sup>
Bar contr x=	0.16 m	Nc=	26.61294 KN
Bar contr Y=	2.015 m	TRAMEZZI PORTANTI	
dN1x=	0.226667 m	Ntp= 63.9 KN	
dN1y=	3.9 m	TRAMEZZI NON PORTANTI	
dNcx=	0.13 m	Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
dNcy=	9.26 m	Ntnp= 17.1156 KN	
		PAVIMENTO	
		Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
		Npav= 21.53713 KN	
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
		Nes= 12.8367 KN	

	N1= 237.6266 KN
--	-----------------

Tab. 4.4. 9 - valori geometrici e carichi cinematismo 5

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$  e  $t_{cr}$ , cioè le posizioni, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione. In questo caso  $t$ , è la posizione attorno al quale avviene la rotazione del maschio murario senza contrafforte e  $t_{cr}$  la posizione attorno alla quale avviene la rotazione del contrafforte. Le due parti sono state infatti considerate come distinte, in quanto il contrafforte è stato sicuramente aggiunto in seguito.

Come nei casi precedenti  $t$  è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Lo stesso è stato fatto per  $t_{cr}$  considerando come carico agente solo  $P_3$ , cioè il peso del contrafforte stesso, quindi:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2P_3}{3t_{cr} * l}$$

Sono stati ottenuti:

$$t = 8.96 \text{ cm}$$

$$t_{cr} = 1.24 \text{ cm}$$

È stato quindi possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.056$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e  $t$  lungo  $x$ , e  $d_{i,y}$  distanza da  $t$  lungo  $y$ . Per quanto riguarda per quanto riguarda  $P_3$   $d_{i,x}$  e  $d_{i,y}$  sono state calcolate come distanza tra il suo punto di applicazione e  $t_{cr}$ .

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede determinando gli spostamenti virtuali delle forze in gioco e calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 48.59 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.89$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.50 \text{ m/s}^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

La verifica lineare dello Stato Limite di salvaguarda della Vita viene effettuata attraverso la verifica dell'accelerazione spettrale sismica, essa infatti deve soddisfare la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T1=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	Ψ(z)=	0.288786
Tc=	0.3976	γ=	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 10 - verifica SLV lineare cinematiso 5

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 0.50 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta non soddisfatta, si procede quindi con la verifica non lineare.

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi non lineare:

Si deve determinare l'angolo  $\theta$  a cui corrisponde lo spostamento  $d_{ko}$  del punto di controllo considerato, che caratterizza la configurazione per cui si ha l'annullamento del moltiplicatore  $\alpha$  e quindi del momento stabilizzante  $M_s$ . L'angolo  $\theta$  si ottiene ponendo uguale a zero l'equazione relativa al momento stabilizzante.

$$M_s = \sum_{i=1}^n P_i R_{P_i} \cos(\beta_{P_i} + \theta) = 0$$

$$\theta = 0.63 \text{ rad}$$

Dove

$$\beta_{P_i} = \arctg \left( \frac{h_{P_i}/2}{b_i/2} \right)$$

$$R_{P_i} = \sqrt{(h_{P_i}/2)^2 + (b_i/2)^2}$$

Da cui deriva che:

$$d_{ko} = h_{bar} \text{sen} \theta = 0.27m$$

Essendo:

$$h_{bar} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = 4.24m$$

Lo spostamento spettrale  $d_o^*$  dell'oscillatore equivalente ad un grado di libertà è dato da

$$d_o^* = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{xbar} \sum_{i=1}^n N_i \delta_{x,i}} = 0.31m$$

Lo spostamento ultimo  $d_u^*$  risulta essere:

$$d_u^* = 0.4d_o^* = 0.13m$$

Lo spostamento spettrale valutato in conformità del periodo secante  $T_s$  è:

$$d_s^* = 0.4d_u^* = 0.05m$$

L'accelerazione corrispondente è:

$$a_s^* = a_o^* \left( 1 - \frac{d_s^*}{d_o^*} \right) = 0.43 \text{ m/s}^2$$

Il periodo secante vale:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}} = 2.14s$$

La condizione per cui l'analisi non lineare sia soddisfatta è:

$$d_u^* \geq \max \left( S_{DE}(T_s); S_{DE}(T_1) \varphi(z) \gamma \frac{\left( \frac{T_s}{T_1} \right)^2}{\sqrt{\left( 1 - \frac{T_s}{T_1} \right)^2 + 0.02 \frac{T_s}{T_1}}} \right)$$

Con:

$$S_{DE}(T_1) = S_E(T_1) \left( \frac{T_1}{2\pi} \right)^2 = 0.0150 \text{ m/s}^2$$

$$S_{DE}(T_s) = S_E(T_s) \left( \frac{T_s}{2\pi} \right)^2$$

Con  $S_E(T_s)$  che dipende dal valore di  $T_s$ . In questo caso  $T_s$  è compreso tra  $T_c$  pari a 0.3976s e  $T_d$  pari a 2.19s.

Quindi:

$$S_E(T_s) = a_g S \eta F_0 \left( \frac{T_c}{T_s} \right) = 0.93$$

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.13 \geq \max(0.11; 0.041)$$

La verifica non lineare risulta quindi soddisfatta.

#### 4.4.7. Cinematismo6 – flessione semplice (maschio murario contrafforte)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo di flessione semplice del maschio murario evidenziato. La scelta del cinematismo è stata effettuata in base ai carichi, e quindi si individua come macroelemento il maschio murario in cui insiste l'imposta della volta. In base alla conformazione della stessa si sono analizzati i carichi che vanno a confluire sulla muratura in esame, con i relativi carichi del piano superiore e della copertura che sono portati dalla porzione di volta. Da sottolineare la possibile criticità riguardante il ridotto spessore murario del maschio murario in esame rispetto al caso precedente, motivo per il quale si spiega la presenza di un contrafforte.

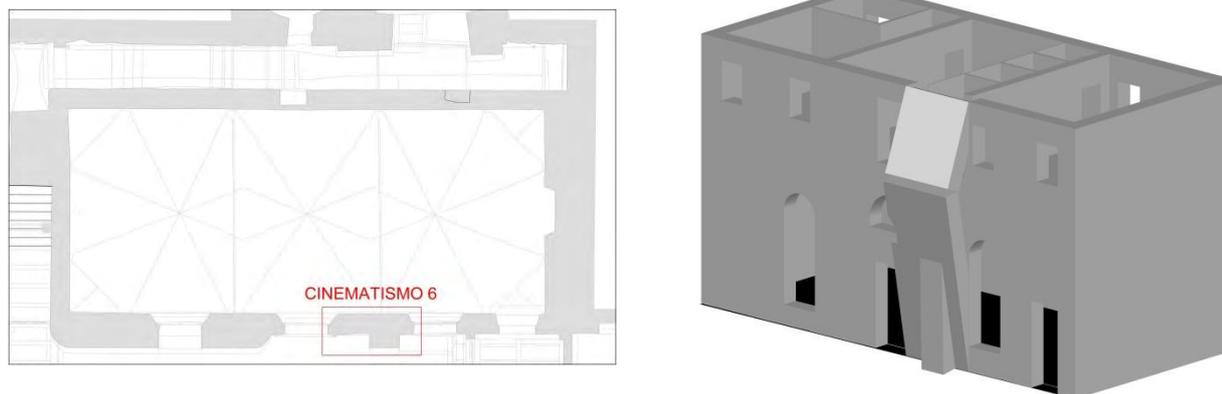


Fig. 4.4. 14 - localizzazione e schema cinematico 6

Nella tabella seguente sono raccolti i dati utilizzati per la verifica. I carichi sono stati calcolati in base alle aree e ai volumi agenti su quel maschio murario.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6.6 m	MURATURA	
h2=	2.66 m	P1=	213.378 KN
l=	2.65 m	P2=	56.392 KN
A1=	4.026 m <sup>2</sup>	P3=	27.244 KN
A2=	1.064 m <sup>2</sup>	VOLTA	
lc=	0.98 m	Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
Acop=	156.09 m <sup>2</sup>	Vvolta= 3.910875 m <sup>3</sup>	
Asott=	148.5 m <sup>2</sup>	Yvolta= 18 KN/m <sup>3</sup>	
Ac=	1.39 m <sup>2</sup>	Nvolta= 70.39575 KN	
d1=	0.61 m	COPERTURA LAT	
d2=	0.4 m	COPERTURA PORTATA	
dc1=	0.44 m	Acop.lat=	2.4 m <sup>2</sup>
dc2=	0.125 m	Asott=	11.925 m <sup>2</sup>
Bar contr x=	0.16 m	Nc=	26.61294 KN
Bar contr Y=	2.015 m	TRAMEZZI PORTANTI	
dN1x=	0.226667 m	Ntp= 63.9 KN	
dN1y=	3.9 m	TRAMEZZI NON PORTANTI	
dNcx=	0.13 m	Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
dNcy=	9.26 m	Ntnp= 17.1156 KN	
		PAVIMENTO	
		Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
		Npav= 21.53713 KN	
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta= 14.263 m <sup>2</sup>	
		Nes= 12.8367 KN	
		N1= 237.6266 KN	

Tab. 4.4. 11 - valori geometrici e carichi cinematico 6

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$  e  $t_{cr}$ , cioè le posizioni, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione. In questo caso  $t$ , è la posizione attorno al quale avviene la rotazione del maschio murario senza contrafforte e  $t_{cr}$  la posizione attorno alla quale avviene la rotazione del contrafforte. Le due parti sono

state infatti considerate come distinte, in quanto il contrafforte è stato sicuramente aggiunto in seguito.

Come nei casi precedenti  $t$  è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Lo stesso è stato fatto per  $t_{cr}$  considerando come carico agente solo  $P_3$ , cioè il peso del contrafforte stesso, quindi:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2P_3}{3t_{cr} * l}$$

Sono stati ottenuti:

$$t = 9.44cm$$

$$t_{cr} = 1.32cm$$

Nel caso della flessione semplice le due porzioni in cui si divide la muratura ruotano attorno ai relativi poli con angoli differenti:

$$\theta * h_1 = \varphi * h_2$$

Prendendo come riferimento la cerniera cilindrica  $C$  che divide la muratura in due parti e attorno alla quale avviene la rotazione relativa tra le stesse si pone lo spostamento in direzione orizzontale di quel punto pari a 1:

$$\delta_x(C) = 1$$

In tal modo è possibile calcolare gli spostamenti orizzontali e verticali di tutti i punti di applicazione dei carichi. Una volta calcolati tutti gli spostamenti si applica il Principio dei Lavori Virtuali per calcolare il moltiplicatore critico dei carichi  $\alpha$ , uguagliando il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$PLV: L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[ \sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.27$$

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 49.84 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.87$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 1.00 \text{ m/s}^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.288786
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 12 - verifica SLV lineare cinematismo 6

Nella tabella soprastante sono elencati tutti i dati utilizzati per verificare la condizione.

$$a_0^* = 1.00 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta non soddisfatta.

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi non lineare:

Nella tabella seguente sono raccolti i dati relativi alla verifica lineare eseguita con le stesse modalità dei casi precedenti:

VERIFICA SLV NON LINEARE	
$\theta=$	0,096 rad
dk0=	0,39 m
d0*=	0,3 m
du*=	0,12 m
ds*=	0,05 m
as*=	0,77 m/s <sup>2</sup>
Sde(T1)=	0,015
Ts=	1,57 s

Se(Ts)=	1,27
Sde(Ts)=	0,08

Tab. 4.4. 13 - verifica SLV non lineare cinematicismo 6

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.12 \geq \max(0.11; 0.044)$$

La verifica non lineare risulta quindi soddisfatta.

#### 4.4.8. Cinematismo 7 – Ribaltamento semplice (parete contrafforte)

E' stata effettuata l'analisi del cinematicismo di ribaltamento semplice della parete su cui insiste in contrafforte. La muratura in esame presenta spessore ridotto rispetto alle porzioni precedenti, e quindi verrà valutato se il contrafforte è sufficiente ad evitare il cinematicismo.

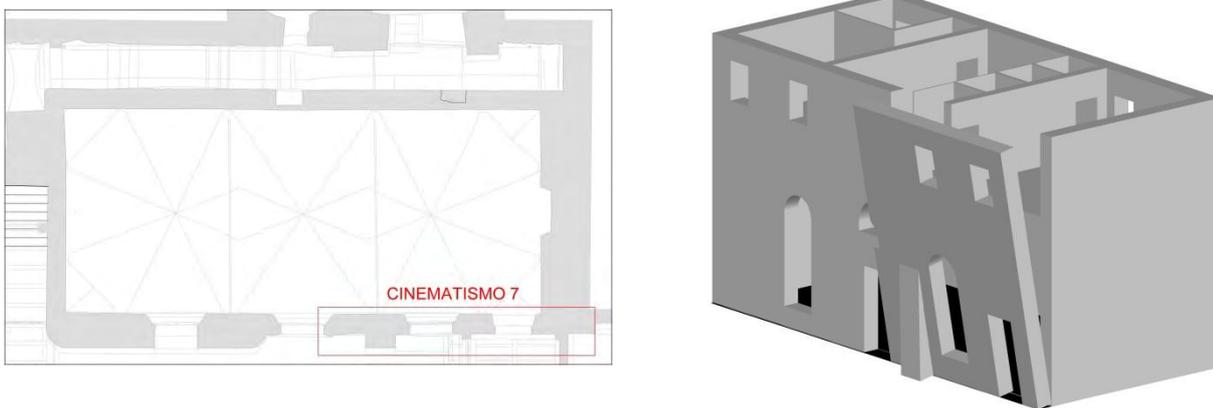


Fig. 4.4. 15 - localizzazione e schema cinematicismo 7

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa. Nello specifico vediamo il carico del contrafforte denominato P3, in quanto è una porzione di muratura aggiuntiva.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6,6 m	MURATURA	VOLTA
h2=	2,66 m	P1= 628,056 KN	Avolta= 20,5 m2
l=	7,8 m	P2= 165,984 KN	Vvolta= 8,2125 m3
A1=	4,026 m2	P3= 27,244 KN	Yvolta= 18 KN/m3
A2=	1,064 m2		Nvolta= 147,825 KN
lc=	0,98 m	COPERTURA LAT	COPERURA PORTATA
Acop=	156,09 m2	Acop.lat= 7,55 m2	Acop= 22,6 m2
Asott=	148,5 m2	Asott= 35,1 m2	Ncp= 51,84144 KN
Ac=	1,39 m2	Nc= 79,44689 KN	TRAMEZZI PORTANTI

d1=	0,61 m	Ntp=	63,9 KN
d2=	0,4 m	TRAMEZZI NON PORTANTI	
dc1=	0,44 m	Avolta=	20,5 m2
dc2=	0,125 m	Ntnp=	24,6 KN
Bar contr x=	0,16 m	PAVIMENTO	
Bar contr Y=	2,02 m	Avolta=	20,5 m2
dN1 <sub>x</sub> =	0,23 m	Npav=	30,955 KN
dN1 <sub>y</sub> =	3,9 m	CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
dNc <sub>x</sub> =	0,13 m	Avolta=	20,5 m2
dNc <sub>y</sub> =	9,26 m	Nes=	18,45 KN
		N1=	337,5714 KN

Tab. 4.4. 14 - valori geometrici e carichi cinematico 7

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$  e  $t_{cr}$ , cioè le posizioni, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione. In questo caso  $t$ , è la posizione attorno al quale avviene la rotazione del maschio murario senza contrafforte e  $t_{cr}$  la posizione attorno alla quale avviene la rotazione del contrafforte. Le due parti sono state infatti considerate come distinte, in quanto il contrafforte è stato sicuramente aggiunto in seguito.

Come nei casi precedenti  $t$  è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Lo stesso è stato fatto per  $t_{cr}$  considerando come carico agente solo  $P_3$ , cioè il peso del contrafforte stesso, quindi:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2P_3}{3t_{cr} * l}$$

Sono stati ottenuti:

$$t = 6.90cm$$

$$t_{cr} = 1.24cm$$

E' stato quindi possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.054$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e  $t$  lungo  $x$ , e  $d_{i,y}$  distanza da  $t$  lungo  $y$ . Per quanto riguarda per quanto riguarda  $P_3$   $d_{i,x}$  e  $d_{i,y}$  sono state calcolate come distanza tra il suo punto di applicazione e  $t_{cr}$ .

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede determinando gli spostamenti virtuali delle forze in gioco e calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 104.96 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.85$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.52 \text{ m/s}^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

La verifica lineare dello Stato Limite di salvaguarda della Vita viene effettuata attraverso la verifica dell'accelerazione spettrale sismica, essa infatti deve soddisfare la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T1=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.288786
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 15 - verifica SLV lineare cinematismo 7

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 0.52 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta non soddisfatta, si procede quindi con la verifica non lineare.

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi non lineare:*

Nella tabella seguente sono raccolti i dati relativi alla verifica lineare eseguita con le stesse modalità dei casi precedenti:

VERIFICA SLV NON LINEARE	
$\theta=$	0,069 rad
$dk_0=$	0,31 m
$d_0^*=$	0,369 m
$du^*=$	0,148 m
$ds^*=$	0,059 m
$as^*=$	0,440 m/s <sup>2</sup>
$Sde(T_1)=$	0,015
$T_s=$	2,302 s
$Se(T_s)=$	0,82
$Sde(T_s)=$	0,11

Tab. 4.4. 16 - verifica SLV non lineare cinematismo 7

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.15 \geq \max(0.11; 0.044)$$

La verifica non lineare risulta quindi soddisfatta.

#### 4.4.9. Cinematismo 8- Flessione semplice (parete contrafforte)

E' stata effettuata l'analisi della flessione semplice della parete su cui insiste il contrafforte. La muratura in esame presenta spessore ridotto rispetto alle porzioni precedenti, e quindi verrà valutato se il contrafforte è sufficiente ad evitare il cinematismo.

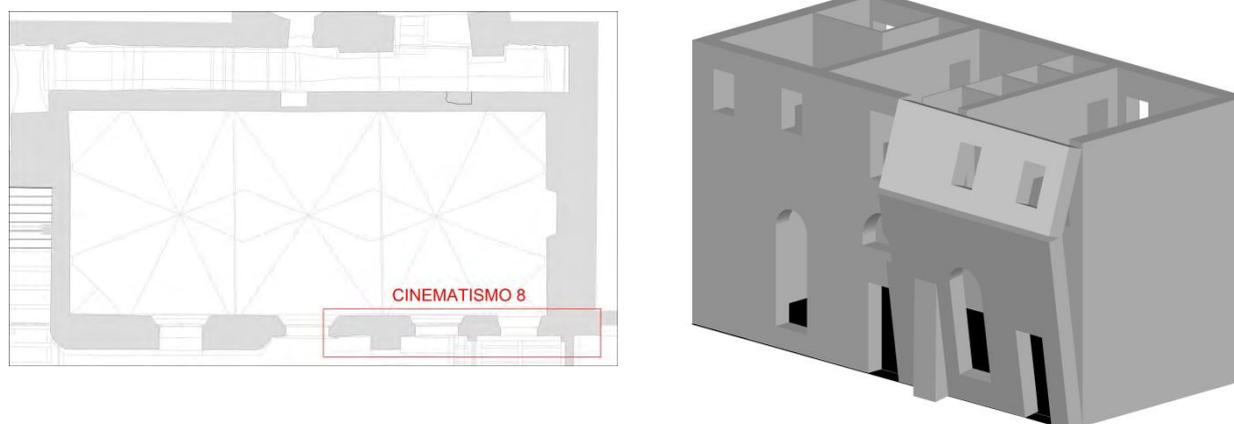


Fig. 4.4. 16 - localizzazione e schema cinematismo 8

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa. Nello specifico vediamo il carico del contrafforte denominato P<sub>3</sub>, in quanto è una porzione di muratura aggiuntiva.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	3.9 m		
h2=	5.36 m		
l=	7.8 m		
A1=	2.379 m <sup>2</sup>		
A2=	2.71 m <sup>2</sup>		
Ac=	1.48 m <sup>2</sup>		
B1x=	0.305 m		
B1y=	1.95 m		
B2x=	0.346 m		
B2y=	6.302 m		
Bcx=	0.82 m		
Bcy=	1.59 m		
Acop=	156.09 m <sup>2</sup>		
Asott=	148.5 m <sup>2</sup>		
d1=	0.61 m		
d11=	0.61 m		
d2=	0.4 m		
dN1x=	0.203333 m		
dN1y=	3.9 m		
dNcx=	0.13 m		
dNcy=	9.26 m		
		MURATURA	VOLTA
		P1= 371.124 KN	Avolta= 20.5 m <sup>2</sup>
		P2= 422.76 KN	Vvolta= 8.2125 m <sup>3</sup>
		Pc= 230.88 KN	Yvolta= 18 KN/m <sup>3</sup>
			Nvolta= 147.825 KN
		COPERTURA LAT	COPERTURA PORTATA
		Acop.lat= 7.55 m <sup>2</sup>	Acp= 22.6 m <sup>2</sup>
		Asott= 35.1 m <sup>2</sup>	Ncp= 51.84144 KN
		Nc= 79.44689 KN	TRAMEZZI PORTANTI
			Ntp= 63.9 KN
			TRAMEZZI NON PORTANTI
			Avolta= 20.5 m <sup>2</sup>
			Ntnp= 24.6 KN
			PAVIMENTO
			Avolta= 20.5 m <sup>2</sup>
			Npav= 30.955 KN
			CARICHI VARIABILI ESERCIZIO
			Avolta= 20.5 m <sup>2</sup>
			Nes= 18.45 KN
			N1= 337.5714 KN

Tab. 4.4. 17 - valori geometrici e carichi cinematismo 8

Una volta determinati i carichi è stato calcolato t e t<sub>cr</sub>, cioè le posizioni, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione. In questo caso t, è la posizione attorno al quale avviene la rotazione del maschio murario senza contrafforte e t<sub>cr</sub> la posizione attorno alla quale avviene la rotazione del contrafforte, come nel cinematismo precedente.

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

Lo stesso è stato fatto per t<sub>cr</sub> considerando come carico agente solo P<sub>3</sub>, cioè il peso del contrafforte stesso, quindi:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2P_3}{3t_{cr} * l}$$

Sono stati ottenuti:

$$t = 6.90cm$$

$$t_{cr} = 1.32 \text{ cm}$$

Nel caso della flessione semplice le due porzioni in cui si divide la muratura ruotano attorno ai relativi poli con angoli differenti:

$$\theta * h_1 = \varphi * h_2$$

Prendendo come riferimento la cerniera cilindrica C che divide la muratura in due parti e attorno alla quale avviene la rotazione relativa tra le stesse si pone lo spostamento in direzione orizzontale di quel punto pari a 1:

$$\delta_x(C) = 1$$

In tal modo è possibile calcolare gli spostamenti orizzontali e verticali di tutti i punti di applicazione dei carichi. Una volta calcolati tutti gli spostamenti si applica il Principio dei Lavori Virtuali per calcolare il moltiplicatore critico dei carichi  $\alpha$ , uguagliando il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$\text{PLV: } L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[ \sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.13$$

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 104.32 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.85$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F C} = 1.26 \text{ m/s}^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T=	0.342711	z=	3.76 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.288786
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 18 - verifica SLV lineare cinematismo 8

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$\alpha_0^* = 1.26 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

#### 4.4.10. Cinematismo 9 – Ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo in quota di ribaltamento semplice della muratura all'ultimo livello della facciata sud. Si nota come le murature dell'edificio abbiano spessore ridotto all'ultimo livello, pari a 40 cm.

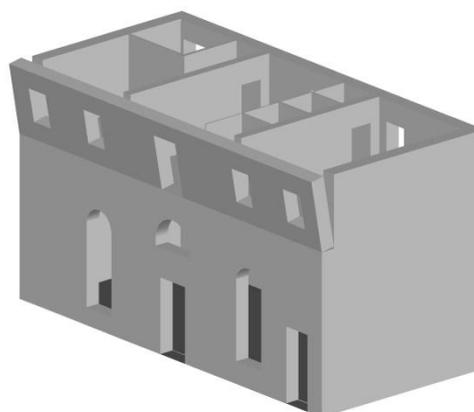


Fig. 4.4. 17 - localizzazione e schema cinematismo 9

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa.

GEOMETRIA		CARICHI	
		MURATURA	VOLTA
h1=	6,6 m	P1=	1917,6 KN
h2=	2,66 m	P2=	361,76 KN
l=	17 m	Avolta=	20,5 m2
A1=	5,64 m2	Vvolta=	8,2125 m3
A2=	1,064 m2	$\Upsilon$ volta=	18 KN/m3
		Nvolta=	147,825 KN

B1x=	0,45 m	COPERTURA LAT		COPERTURA PORTATA	
B1y=	2,88 m	Acop.lat=	16,75 m2	Acop=	22,6 m2
Acop=	156,09 m2	Asott=	76,5 m2	Ncp=	51,84144 KN
Asott=	148,5 m2	Nc=	173,8299 KN	TRAMEZZI PORTANTI	
d1=	1,2 m	Ntp= 63,9 KN			
d11=	0,61 m	TRAMEZZI NON PORTANTI			
d2=	0,4 m	Avolta= 20,5 m2			
dN1 <sub>x</sub> =	0,26 m	Ntnp= 24,6 KN			
dN1 <sub>y</sub> =	3,9 m	PAVIMENTO			
dNc <sub>x</sub> =	0,13 m	Avolta= 20,5 m2			
dNc <sub>y</sub> =	9,26 m	Npav= 30,955 KN			
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO			
		Avolta= 20,5 m2			
		Nes= 18,45 KN			
		N1= 337,5714 KN			

Tab. 4.4. 19 - valori geometrici e carichi cinematico 9

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$ , cioè le posizione, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione.

Come nei casi precedenti  $t$  è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

E' stato ottenuto:

$$t = 1.40cm$$

E' stato quindi possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.076$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e  $t$  lungo  $x$ , e  $d_{i,y}$  distanza da  $t$  lungo  $y$ .

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede determinando gli spostamenti virtuali delle forze in gioco e calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 60.05 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 1.10$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.56 \text{ m/s}^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

La verifica lineare dello Stato Limite di salvaguarda della Vita viene effettuata attraverso la verifica dell'accelerazione spettrale sismica, essa infatti deve soddisfare la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_s(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T1=	0.342711	z=	10.36 m
Cc=	1.42	Ψ(z)=	0.80
Tc=	0.3976	γ=	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 20 - verifica SLV lineare cinematismo 9

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 0.56 \geq \max(1.03; 2.58)$$

La verifica lineare risulta non soddisfatta, si procede quindi con la verifica non lineare.

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi non lineare:

Nella tabella seguente sono raccolti i dati relativi alla verifica lineare eseguita con le stesse modalità dei casi precedenti:

VERIFICA SLV NON LINEARE	
θ=	0,048 rad
dk0=	0,09 m
d0*=	0,41 m
du*=	0,17 m
ds*=	0,07 m

as*=	0,47 m/s <sup>2</sup>
Sde(T1)=	0,015
Ts=	2,35 s
Se(Ts)=	0,79
Sde(Ts)=	0,11

Tab. 4.4. 21 - verifica SLV non lineare cinematismo 9

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.17 \geq \max(0.11; 0.803)$$

La verifica non lineare risulta quindi non soddisfatta e si procede con il calcolo dei tiranti.

#### Calcolo Tiranti

Con il nome di tirante si indica solitamente una barra d'acciaio che collega due murature fra di loro con lo scopo di garantirne un movimento sincrono durante l'azione sismica e impedire fenomeni di ribaltamento fuori dal piano. Le barre di acciaio si innestano nella muratura a livello dei solai e si agganciano a quest'ultime mediante l'utilizzo di piastre di ancoraggio.

Dal punto di vista del modello di calcolo le tirantature sono schematizzabili come forze orizzontali di tipo stabilizzante. Sono stati ipotizzati tiranti in acciaio  $\phi 30$  con  $f_y$  pari a 180 MPa e quindi  $f_{yd}$  pari a 171.4 MPa.

Si determina quindi la portata di un singolo tirante che è data dal minimo dei seguenti valori di resistenza:

$$T = \min(T', T'', T''')$$

- $T'$ : meccanismo di rottura relativo allo snervamento dei tiranti

$$T' = A_s f_y = 121.11 \text{ KN}$$

- $T''$ : punzonamento della muratura

$$T'' = f_{vd} A_1 \sin 45^\circ = 31.37 \text{ KN}$$

- $T'''$ : schiacciamento della muratura

$$T''' = f_{md} ab = 21 \text{ KN}$$

Dove:

- $f_y$  è la tensione di snervamento dei tiranti
- $A_s$  è l'area della sezione trasversale dei tiranti
- a e b sono rispettivamente la larghezza e la lunghezza dei paletti di ancoraggio
- $A_1$  è pari a  $t\sqrt{2(a+t) + 2(b+t)}$
- t è lo spessore della parete su cui sono ancorati i tiranti
- $f_{md}$  è la resistenza a compressione di calcolo della muratura
- $f_{vd}$  è la resistenza a taglio di calcolo della muratura

Quindi:

$$T=21\text{KN}$$

In questo caso servirebbero dunque 5 tiranti.

Ipotizzando l'iniezione della muratura otteniamo:

$$T = \min(121.11; 53.33; 35.7) = 35.7 \text{ KN}$$

In questo caso sarebbero sufficienti 3 tiranti.

#### 4.4.11. Cinematismo 10 – Ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud – paramento esterno)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo in quota di ribaltamento semplice del paramento esterno della muratura all'ultimo livello della facciata sud.

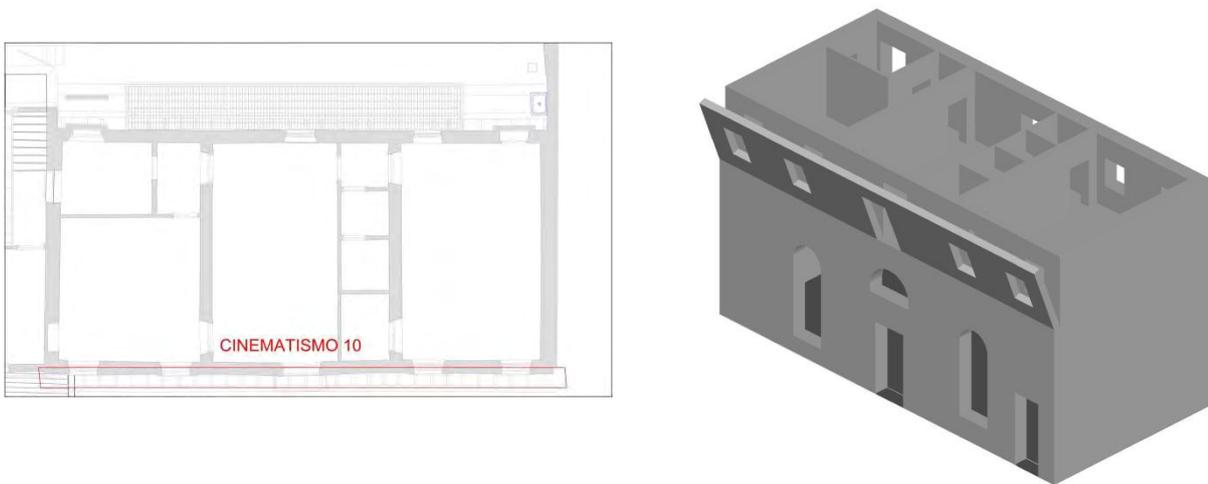


Fig. 4.4. 18 - localizzazione e schema cinematismo 10

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6,6 m	MURATURA	VOLTA
h2=	2,66 m	P1= 1917,6 KN	Avolta= 20,5 m2
l=	17 m	P2= 361,76 KN	Vvolta= 8,2125 m3
A1=	5,64 m2		γvolta= 18 KN/m3
A2=	1,064 m2		Nvolta= 147,825 KN
A2/2=	0,532 m2	COPERTURA LAT	COPERURA PORTATA
B1x=	0,45 m	Acop.lat= 16,75 m2	Acop= 22,6 m2
B1y=	2,88 m	Asott= 76,5 m2	Ncp= 51,84144 KN
Acop=	156,09 m2	Nc= 174 KN	TRAMEZZI PORTANTI
Asott=	148,5 m2		Ntp= 63,9 KN
d1=	1,2 m		TRAMEZZI NON PORTANTI
d11=	0,61 m		Avolta= 20,5 m2

d2=	0,4 m	Ntnp=	24,6 KN
dN1x=	0,26 m	PAVIMENTO	
dN1y=	3,9 m	Avolta=	20,5 m2
dNcx=	0,13 m	Npav=	30,955 KN
dNcy=	9,26 m	CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta=	20,5 m2
		Nes=	18,45 KN
		N1=	337,5714 KN

Tab. 4.4. 22 - valori geometrici e carichi cinematismo 10

Una volta determinati i carichi è stato calcolato  $t$ , cioè le posizione, rispetto all'estradosso della muratura di base attorno alle quali avviene la rotazione.

Come nei casi precedenti  $t$  è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_{max} = f_{md} = 2\sigma_{media} = \frac{2 \sum_i (P_i + N_i)}{3t * l}$$

E' stato ottenuto:

$$t = 0.47 \text{ cm}$$

E' stato quindi possibile trovare  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, andando ad eguagliare momento stabilizzante,  $M_s$ , e ribaltante,  $M_r$ :

$$M_s = \sum_i P_i d_{i,x} + \sum_i N_i d_{i,x}$$

$$M_r = \alpha [\sum_i P_i d_{i,y} + \sum_i N_i d_{i,y}]$$

$$\alpha = 0.072$$

Con  $d_{i,x}$  distanza tra il punto di applicazione della forza e  $t$  lungo  $x$ , e  $d_{i,y}$  distanza da  $t$  lungo  $y$ .

Una volta ottenuto  $\alpha$  si procede determinando gli spostamenti virtuali delle forze in gioco e calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 18.44 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 1.00$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.59 \text{ m/s}^2$$

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:*

La verifica lineare dello Stato Limite di salvaguarda della Vita viene effettuata attraverso la verifica dell'accelerazione spettrale sismica, essa infatti deve soddisfare la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_s(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44
T1=	0.342711	z=	10.36 m
Cc=	1.42	Ψ(z)=	0.80
Tc=	0.3976	Υ=	1.29
Tb=	0.132533		

Tab. 4.4. 23 - verifica SLV lineare cinematismo 10

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 0.59 \geq \max(1.03; 2.58)$$

La verifica lineare risulta non soddisfatta, si procede quindi con la verifica non lineare.

*Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi non lineare:*

Nella tabella seguente sono raccolti i dati relativi alla verifica lineare eseguita con le stesse modalità dei casi precedenti:

VERIFICA SLV NON LINEARE	
θ=	0,061 rad
dk0=	0,11 m
d0*=	0,51 m
du*=	0,21 m
ds*=	0,08 m
as*=	0,49 m/s2
Sde(T1)=	0,015
Ts=	2,57 s
Se(Ts)=	0,66
Sde(Ts)=	0,11

Tab. 4.4. 24 - verifica SLV non lineare cinematismo 10

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.21 \geq \max(0.11; 0.969)$$

La verifica non lineare risulta quindi non soddisfatta.

Per questo cinematismo l'intervento proposto è quello dell'iniezione di miscele consolidanti, in modo da impedire completamente la possibilità del distacco del paramento esterno, andando quindi a ricadere nel caso precedente.

#### 4.4.12. Cinematismo 11 – Meccanismo di piano (porzione superiore facciata sud)

Di seguito viene effettuata l'analisi circa la formazione di una catena cinematica nel piano nella parte superiore. L'azione sismica provoca la rotazione rigida di una porzione triangolare dei pannelli murari, mentre la fascia muraria superiore trasla.

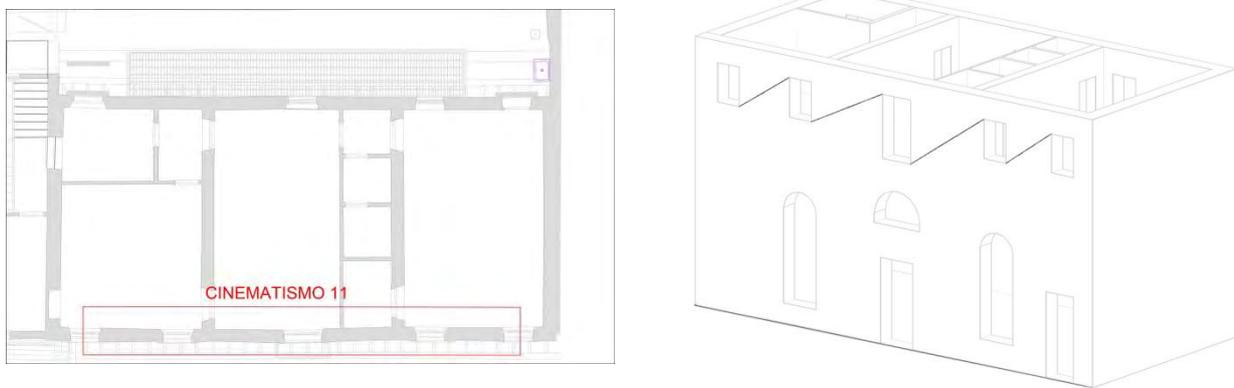


Fig. 4.4. 19 - localizzazione e schema cinematismo 11

Nella tabella seguente sono raccolti i dati geometrici e relativi ai carichi usati per la verifica. I maschi murari sono numerati da 1 a 4 e tutti i dati geometrici ad essi relativi sono seguiti dal numero che li contraddistingue.

GEOMETRIA		CARICHI	
l1=	1.83 m	P1=	10.5042 KN
l2=	2.76 m	P2=	15.8424 KN
l3=	2.81 m	P3=	27.6504 KN
l4=	1.64 m	P4=	9.4136 KN
a1=	4.105 m	N1=	25.65845 KN
a2=	4.14 m	N2=	25.8821 KN
a3=	4.19 m	N3=	26.2016 KN
a4=	4.165 m	N4=	26.04185 KN
b1=	0.41 m		
b2=	0.41 m		
b3=	0.41 m		
b4=	0.41 m		
h1=	1.4 m		
h2=	1.4 m		

h3=	2.4 m
h4=	1.4 m
h0=	0.42 m
z=	7.38 m
Acop1=	3.4445 m2
Acop2=	3.476 m2
Acop3=	3.521 m2
Acop4=	3.4985 m2

Tab. 4.4. 25 - valori geometrici e carichi cinematismo 11

Una volta determinati i carichi sono stati determinati gli spostamenti virtuali x e y, in funzione di un angolo  $\theta$  e attraverso il Principio dei Lavori Virtuali è stato calcolato  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, attraverso la formula:

$$\alpha(P_1\delta_{P_{1x}} + P_2\delta_{P_{2x}} + P_3\delta_{P_{3x}} + P_4\delta_{P_{4x}} + N_1\delta_{N_{1x}} + N_2\delta_{N_{2x}} + N_3\delta_{N_{3x}} + N_4\delta_{N_{4x}}) - (P_1\delta_{P_{1y}} + P_2\delta_{P_{2y}} + P_3\delta_{P_{3y}} + P_4\delta_{P_{4y}} + N_1\delta_{N_{1y}} + N_2\delta_{N_{2y}} + N_3\delta_{N_{3y}} + N_4\delta_{N_{4y}}) = 0$$

$$\alpha = 0.95$$

Dopo aver determinato  $\alpha$  si determinano gli spostamenti virtuali fissando un punto di riferimento e ponendo uguale a 1 il suo spostamento. Si possono quindi puoi calcolare la massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 13.80KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.81$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 9.59 m/s^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2
H=	13.02 m	S=	1.44

T1=	0.342711	z=	11.14 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.855607
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		
Td=	2.185933		

Tab. 4.4. 26 - verifica SLV lineare cinematismo 11

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 9.59 \geq \max(1.03; 2.77)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

#### 4.4.13. Cinematismo 12 – meccanismo di piano (porzione superiore facciata nord)

Di seguito viene effettuata l'analisi circa la formazione di una catena cinematica nella parte superiore della facciata nord. L'azione sismica provoca la rotazione rigida di una porzione triangolare dei pannelli murari, mentre la fascia muraria superiore trasla.

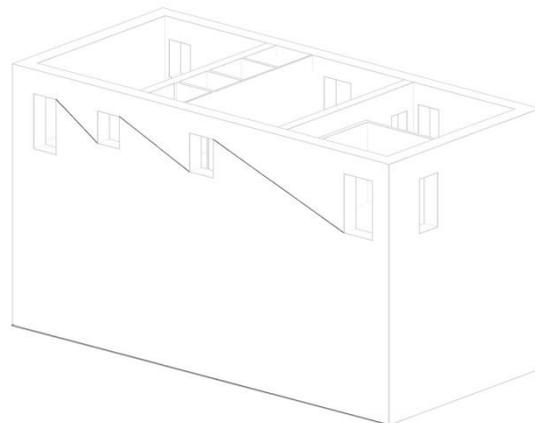
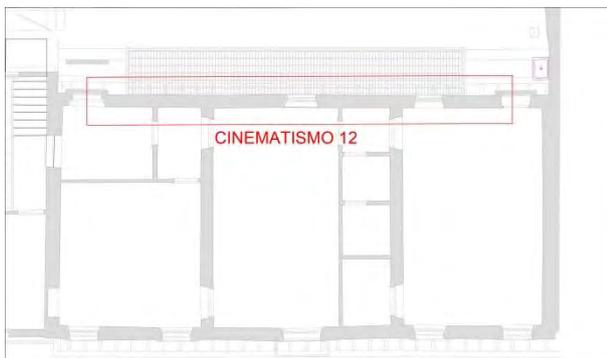


Fig. 4.4. 20 - localizzazione e schema cinematismo 12

Nella tabella seguente sono raccolti i dati geometrici e relativi ai carichi usati per la verifica. I maschi murari sono numerati da 1 a 3 e tutti i dati geometrici ad essi relativi sono seguiti dal numero che li contraddistingue.

GEOMETRIA		CARICHI	
l1=	1.94 m	P1=	8.88132 KN
l2=	3.3 m	P2=	17.8794 KN
l3=	6.06 m	P3=	53.19468 KN
a1=	4.31 m	N1=	35.65736 KN
a2=	4.21 m	N2=	34.81676 KN
a3=	8.34 m	N3=	69.53354 KN
b1=	0.42 m		

b2=	0.42 m	
b3=	0.42 m	
h1=	1.09 m	
h2=	1.29 m	
h3=	2.09 m	
h0=	0.65 m	
z=	6.62 m	
Acop1=	3.629 m2	
Acop2=	3.539 m2	
Acop3=	7.256 m2	

Tab. 4.4. 27 - valori geometrici e carichi cinematico II

Una volta determinati i carichi sono stati determinati gli spostamenti virtuali x e y, in funzione di un angolo  $\theta$  e attraverso il Principio dei Lavori Virtuali è stato calcolato  $\alpha$ , moltiplicatore critico dei carichi, attraverso la formula:

$$\alpha(P_1\delta_{P_{1x}} + P_2\delta_{P_{2x}} + P_3\delta_{P_{3x}} + N_1\delta_{N_{1x}} + N_2\delta_{N_{2x}} + N_3\delta_{N_{3x}}) - (P_1\delta_{P_{1y}} + P_2\delta_{P_{2y}} + P_3\delta_{P_{3y}} + N_1\delta_{N_{1y}} + N_2\delta_{N_{2y}} + N_3\delta_{N_{3y}}) = 0$$

$$\alpha = 1.91$$

Dopo aver determinato  $\alpha$  si determinano gli spostamenti virtuali fissando un punto di riferimento e ponendo uguale a 1 il suo spostamento. Si possono quindi poi calcolare la massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 21.70KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.97$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 16.14 m/s^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

Affinché il cinematico risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{\alpha_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_s(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

VERIFICA SLV LINEARE			
Se(T1)=	5.02835	Ss=	1.2
C1=	0.05	St=	1.2

H=	13.02 m	S=	1.44
T1=	0.342711	z=	11.14 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.855607
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		
Td=	2.185933		

Tab. 4.4. 28 - verifica SLV lineare cinematismo II

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$\alpha_0^* = 16.14 \geq \max(1.03; 2.77)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

## 4.5. Risultati

Di seguito vengono riportati schematicamente i cinematismi analizzati e i principali risultati ottenuti. In tal modo è possibile avere un riscontro immediato su quali possano essere i cinematismi più deboli e di facile attuazione per poter concentrare le attenzioni su di essi nella programmazione di eventuali interventi.

CIN.	TIPO DI CINEMATISMO	$\alpha_0^*$ [m/s <sup>2</sup> ]	VERIFICA SLV LINEARE	$d_u^*$ [m]	VERIFICA SLV NON LINEARE
1	Ribaltamento semplice	1,74	VERIFICATO (169%)		
2	Flessione semplice	3,12	VERIFICATO (303%)		
3	Ribaltamento semplice	1,76	VERIFICATO (171%)		
4	Flessione semplice	2,53	VERIFICATO (246%)		
5	Ribaltamento semplice	0,50	NON VERIFICATO (49%)	0,13	VERIFICATO (118%)
6	Flessione semplice	1,00	NON VERIFICATO (97%)	0,12	VERIFICATO (109%)
7	Ribaltamento semplice	0,52	NON VERIFICATO (50%)	0,15	VERIFICATO (136%)
8	Flessione semplice	1,26	VERIFICATO (122%)		
9	Ribaltamento semplice	0,56	NON VERIFICATO (22%)	0,17	NON VERIFICATO (21%)
10	Ribaltamento semplice	0,59	NON VERIFICATO (23%)	0,21	NON VERIFICATO (22%)
11	Meccanismo di piano	9,59	VERIFICATO (346%)		
12	Meccanismo di piano	16,14	VERIFICATO (583%)		

Tab. 4.5. 1 - riepilogo cinematismi

Si osserva come i meccanismi 5, 6 e 7, cioè quelli riguardanti la porzione di facciata snella rinforzata con il contrafforte, siano non verificati linearmente ma verificati per quanto riguarda l'analisi non lineare. Occorre comunque tenere presente che sono verificati ma non di molto, in particolare per quanto riguarda il cinematismo 6 in cui il valore dello spostamento ultimo supera il valore limite di un solo centimetro.

I cinematismi critici invece sono quelli relativi ai ribaltamenti della facciata all'ultimo livello e del paramento esterno della stessa. Per questi in particolare è stata quantificata l'effettiva utilità di un eventuale intervento di iniezione, che nel primo caso permetterebbe di ridurre il numero di tiranti necessari da 5 a 3, e nel secondo caso impedirebbe completamente il distacco del paramento andando ad annullare la possibilità di quel cinematismo.

## CONCLUSIONI

La tesi ha come oggetto la valutazione della cantierabilità e dell'efficacia di iniezioni consolidanti di miscele a matrice non cementizia con relativa applicazione in sito al Museo Archeologico di Verona. Dopo una prima analisi dei diversi metodi di indagine e di intervento su murature storiche, si è passati alla fase conoscitiva del sito. Questa è stata effettuata mediante un'approfondita ricerca storica, eseguita presso l'Archivio di Stato, l'Archivio Comunale di Verona e la Biblioteca, attraverso la quale è stato possibile conoscere le varie fasi di sviluppo del sito ed eventuali interventi di restauro effettuati negli anni. La fase conoscitiva ha inoltre previsto lo studio delle prove eseguite al Museo nell'ambito dell'intervento di restauro in atto dal 2012, in particolare martinetti piatti singoli e doppi, carotaggi e relative endoscopie, indagini geognostiche e prove di caratterizzazione delle malte.

Conclusa la necessaria fase conoscitiva si è passati alla fase sperimentale che è iniziata con l'individuazione di quattro campi prova sui quali sono state effettuate indagini soniche dirette e tomografie soniche per valutare lo stato di conservazione della muratura e per avere valori di riferimento iniziali relativi alla muratura non consolidata.

Successivamente si è passati all'intervento di consolidamento vero e proprio. Il fatto di seguire in prima persona l'intervento ha permesso di evidenziare i fattori principali per la buona riuscita dello stesso, i quali sono risultati essere la scelta del prodotto da iniettare e la tecnica di intervento. Per quanto riguarda la scelta del prodotto da iniettare, attraverso l'esperienza in sito e l'analisi delle miscele sia in sito che in laboratorio, è stato evidenziato che una caratteristica molto importante da considerare è la fluidità della miscela, in particolar modo sono stati evidenziati problemi nel caso di una perdita veloce di fluidità nel tempo. Oltre alla scelta della miscela adeguata è però molto importante come questa viene iniettata, cioè la tecnica di intervento, questo perché la mancanza di attenzione ai dettagli e quindi una non corretta tecnica di esecuzione possono compromettere il risultato finale. Nell'ambito della campagna sperimentale in sito è stato infatti più volte necessario intervenire in quanto la ditta esecutrice non aveva seguito in modo ottimale le prescrizioni, ed è stato dimostrato quanto questo può influire sul risultato finale, ad esempio nel caso di un non corretto posizionamento di una cannula che ha compromesso il consolidamento totale del pannello.

In seguito è stata studiata l'efficacia dell'intervento stesso e delle varie miscele in particolare attraverso indagini soniche dirette e tomografiche, che confrontate con quelle effettuate prima dell'intervento hanno permesso di valutare il grado di consolidamento e di omogeneizzazione della muratura in base all'aumento di velocità sonica e alla variazione del coefficiente di omogeneizzazione. E' stato molto importante combinare inoltre queste prove con le endoscopie che sono state effettuate nel punto di maggiore incremento di velocità

sonica e nel punto con la minore velocità. La combinazione di queste prove ha infatti permesso di individuare problemi nella fase di intervento o verificare eventuali carenze delle miscele individuate nella loro caratterizzazione.

E' stata infine eseguita una valutazione della sicurezza sismica dell'unità strutturale del refettorio attraverso l'analisi dei macroelementi. Questa ha evidenziato problemi nella porzione superiore con due cinematismi non verificati sia linearmente che non linearmente: il ribaltamento semplice della muratura della facciata sud e il ribaltamento del paramento esterno della stessa. Per quanto riguarda il primo è stato ipotizzato l'inserimento di tiranti, perché il cinematismo risulti verificato ne sarebbero necessari cinque, mentre in caso di intervento di iniezione sulla muratura ne basterebbero tre. Anche nel secondo caso è stata valutata l'utilità di un eventuale intervento di iniezione, infatti attraverso questo si potrebbe garantire la monoliticità della muratura in esame riportandoci quindi al caso precedente e risolvendo il problema del distacco del paramento.

Concludendo, l'esperienza in cantiere è stata di importanza primaria in quanto ha permesso di valutare molteplici aspetti di questa tipologia di intervento dimostrando come l'iniezione di miscele consolidanti sia fattibile ed efficace e non comporti particolari difficoltà ma solo il rispetto delle corrette modalità di esecuzione.

## BIBLIOGRAFIA

Berra M., Binda L., Anti L., Faticcioni A. (1992), *Utilisation of sonic tests to evaluate damaged and repaired masonries*. Proceedings of the Conference on Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, Boulder, CO, 1992, pp. 329–38.

Biancolini G. (1771), *Notizie storiche delle chiese di Verona*, Carattoni.

Boin M. (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica: indagini strumentali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi*. Palazzo Liviano – Università di Padova. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Bonvento N., Tiberi. E., (2014), *Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del complesso Cavalli*. Tesi di laurea, rel. M.R. Valluzzi, Università degli Studi di Padova.

Borelli G. (1981), *Chiese e monasteri nel territorio veronese*. A cura di Giorgio Borelli, Verona, Banca Popolare di Verona.

Bortoletto A. (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica degli edifici dell'Università di Padova, Palazzo Wollemborg*. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Cescatti E. et al. (2014), *Evaluation of injection intervention on a real case in a medieval complex*, 12th North American Masonry Conference.

Dante M. (2013), *Analisi della vulnerabilità sismica di edifici in aggregato: palazzo Levi Cases - Università di Padova*. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Forde M.C., Birjandi K.F. & Batchelor A.J. (1985), *Fault detection in stone masonry bridges by non-destructive testing*, Proc. 2nd International Conference Structural Faults & Repair, Engineering Technics Press, Edinburgh, pp. 373-379.

Franzoni L. (1988), *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Ufficio stampa del Comune di Verona, Assessorato alla Cultura, Verona.

Ghirardini G. (1906), *Il Teatro Romano di Verona*, Verona.

Lenotti T. (1955), *Chiese e conventi scomparsi*, Edizioni di “Vita veronese”.

Martini A., (2014), *Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del complesso dell'Orto botanico di Padova: la Casa del Prefetto e le Serre*. Tesi di laurea, rel. M.R. Valluzzi, Università degli Studi di Padova.

Mattiello E., (2013), *Analisi della vulnerabilità sismica di Palazzo Donghi dell'Università di Padova: studio globale e verifica locale dei macroelementi*. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Pegoraro M., (2013), *Analisi della vulnerabilità sismica: istituto di fisica "Galileo Galilei" dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi*. Tesi di laurea, rel. C.Modena, Università degli Studi di Padova.

Pengo M. (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica finalizzata agli interventi di miglioramento strutturale di Palazzo Ca' Borin*. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Pinali G. (1845), *Relazione degli scavi dell'Antico Romano Teatro*, Milano.

Ricci S. (1895), *Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico ed archeologico, con la biografia di Andrea Monga, suo scopritore, e con un'appendice di documenti editi ed inediti*, Venezia, Tip. Fratelli Visentini.

Rodofile E., (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica: Istituti Anatomici dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi*. Tesi di laurea, rel. C. Modena, Università degli Studi di Padova.

Università degli Studi di Padova (2014), "*Verifica della sicurezza sismica dei Musei Statali. Applicazione O.P.C.M. 3274/2003 s.m.i. e della Direttiva P.C.M. 12.10.2007*", Convenzione ARCUS.

Valluzzi M. R. (2000), *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Tesi di dottorato, tut. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova.

Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C. (2004b), *Behaviour and modelling of strengthened three-leaf stone masonry walls*. *Materials and Structures*, RILEM 2004;37(267):184-92.

#### **Normativa di riferimento:**

A.S.T.M. C-939 - Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).

UNI EN 998-2 (2010) - Specifiche per malte per opere murarie. Parte 2: Malte da muratura.

UNI EN 1015-11 (2007) - Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.

Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 02/02/2009 (G.U. n. 47 del 26/02/2009 – Supplemento ordinativo n. 27) “Istruzioni per l’Applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M.14/01/2008”.

Decreto Ministeriale 14/01/2008 (G. U. n. 29 del 04/02/2008 – Supplemento ordinativo n. 30) “Nuove Norme tecniche per le costruzioni”.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 12/10/2007 (G. U. n. 24 del 29/02/2008) “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni” –Ministero per i Beni e le Attività culturali – Dipartimento per i beni culturali e paesaggistici – Direzione generale per i beni architettonici e paesaggistici.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 03/05/2005 “Ulteriori modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/2003, recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica””.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3362 del 08/07/2004, “Modalità di attivazione del Fondo interventi straordinari della Presidenza del Consiglio dei Ministri, istituito ai sensi dell’art.32Ubis del D.L. 30/09/2003, n. 269, convertito, con modificazioni, dalla L. n. 326 del 24/11/2003”.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.



## APPENDICE

Nella seguente appendice sono riportate le tabelle di acquisizione delle prove soniche tomografiche eseguite al Museo Archeologico di Verona.

TM01A pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00059154	0,00055114	0,00054507	30,00	533,25
11-22	0,00082859	0,00080042	0,00084231	36,06	437,68
11-23	0,00196460	0,00197990	0,00184000	50,00	259,31
11-24	0,00190460	0,00181520	0,00166390	67,08	373,81
11-25	0,00201940	0,00237080	0,00224430	85,44	386,34
12-21	0,00065889	0,00070740	0,00089838	36,06	477,62
12-22	0,00067853	0,00073846	0,00062229	30,00	441,33
12-23	0,00134300	0,00120990	0,00139590	36,06	273,92
12-24	0,00180590	0,00157340	0,00118980	50,00	328,29
12-25	0,00215030	0,00203960	0,00164500	67,08	344,89
13-21	0,00142630	0,00155880	0,00139120	50,00	342,76
13-22	0,00081449	0,00079880	0,00066393	36,06	475,05
13-23	0,00082014	0,00083664	0,00081063	30,00	364,75
13-24	0,00094594	0,00069880	0,00122620	36,06	376,81
13-25	0,00129410	0,00114790	0,00129750	50,00	401,12
14-21	0,00183510	0,00145050	0,00200630	67,08	380,28
14-22	0,00078921	0,00097845	0,00095939	50,00	550,04
14-23	0,00071596	0,00065097	0,00067769	36,06	529,10
14-24	0,00050693	0,00063472	0,00058154	30,00	522,29
14-25	0,00074141	0,00072466	0,00059614	36,06	524,58
15-21	0,00230990	0,00210280	0,00197160	85,44	401,48
15-22	0,00110420	0,00094763	0,00102350	67,08	654,37
15-23	0,00099480	0,00086644	0,00085205	50,00	552,83
15-24	0,00099480	0,00073324	0,00075489	36,06	435,69
15-25	0,00028788	0,00024678	0,00027531	30,00	1111,15

TM01B pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00013765	0,00008325	0,00009515	30,00	2847,70
11-22	0,00022690	0,00008325	0,00025101	36,06	1927,54
11-23	0,00115070	0,00117130	0,00120370	50,00	425,45
11-24	0,00133870	0,00138300	0,00143550	67,08	484,09
11-25	0,00133870	0,00229450	0,00235200	85,44	428,26
12-21	0,00016197	0,00015326	0,00016677	36,06	2244,09
12-22	0,00017692	0,00020352	0,00022056	30,00	1497,50
12-23	0,00092089	0,00121690	0,00118400	36,06	325,62
12-24	0,00126350	0,00133230	0,00117680	50,00	397,60
12-25	0,00275400	0,00314450	0,00295350	67,08	227,34
13-21	0,00118100	0,00120000	0,00126500	50,00	411,41
13-22	0,00109460	0,00127610	0,00131830	36,06	293,25
13-23	0,00104040	0,00084984	0,00101200	30,00	310,11
13-24	0,00158710	0,00151960	0,00155600	36,06	232,01
13-25	0,00256020	0,00230470	0,00234290	50,00	208,11
14-21	0,00149820	0,00144950	0,00157790	67,08	444,67
14-22	0,00135280	0,00106840	0,00102460	50,00	435,31
14-23	0,00095266	0,00075856	0,00072571	36,06	443,92
14-24	0,00038061	0,00020668	0,00025953	30,00	1062,80
14-25	0,00073371	0,00080472	0,00085536	36,06	451,92
15-21	0,00297890	0,00261380	0,00304620	85,44	296,70
15-22	0,00266580	0,00279570	0,00289470	67,08	240,83
15-23	0,00287400	0,00262560	0,00256220	50,00	186,06
15-24	0,00116570	0,00159330	0,00113160	36,06	278,05
15-25	0,00059672	0,00057924	0,00037871	30,00	578,90

TM02A pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
11-21	0,00034734	0,00036466	0,00028086	36,00	1087,77
11-22	0,00042707	0,00039950	0,00036980	41,18	1032,69
11-23	0,00043169	0,00057286	0,00052244	53,81	1057,27
11-24	0,00127150	0,00145700	0,00123840	69,97	529,15
11-25	0,00089107	0,00135500	0,00117760	87,73	768,74
12-21	0,00041867	0,00051035	0,00039985	41,18	929,66
12-22	0,00019724	0,00024423	0,00021963	36,00	1633,64
12-23	0,00028783	0,00026687	0,00028209	41,08	1472,77
12-24	0,00063904	0,00056358	0,00069711	53,81	849,75
12-25	0,00078535	0,00075773	0,00081516	69,97	890,11
13-21	0,00105530	0,00105910	0,00110900	53,81	500,81
13-22	0,00084356	0,00091990	0,00091647	41,18	460,98
13-23	0,00033001	0,00038948	0,00033131	36,00	1027,79
13-24	0,00039648	0,00041693	0,00037393	41,18	1040,48
13-25	0,00059635	0,00063342	0,00067745	53,81	846,42
14-21	0,00163130	0,00144780	0,00129580	69,97	479,81
14-22	0,00082230	0,00096211	0,00114050	53,81	551,91
14-23	0,00039178	0,00039178	0,00038460	41,18	1057,56
14-24	0,00016233	0,00016233	0,00018130	36,00	2134,56
14-25	0,00016925	0,00016925	0,00024546	41,18	2115,56
15-21	0,00174760	0,00142700	0,00154190	87,73	558,02
15-22	0,00170780	0,00137950	0,00136600	69,97	471,36
15-23	0,00063585	0,00060945	0,00058315	53,81	882,88
15-24	0,00022485	0,00029770	0,00029476	41,18	1511,54
15-25	0,00037869	0,00040794	0,00032724	36,00	969,59

TM02B pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00059231	0,00047374	0,00056577	36,00	661,84
11-22	0,00038502	0,00046237	0,00048333	41,18	928,43
11-23	0,00076034	0,00073476	0,00075453	53,81	717,64
11-24	0,00105890	0,00110020	0,00107760	69,97	648,53
11-25	0,00118760	0,00091390	0,00131070	87,73	771,32
12-21	0,00126440	0,00090443	0,00090027	41,18	402,53
12-22	0,00072196	0,00046436	0,00036707	36,00	695,25
12-23	0,00117340	0,00106290	0,00090574	41,08	392,23
12-24	0,00127530	0,00079557	0,00092319	53,81	539,17
12-25	0,00142600	0,00118080	0,00111560	69,97	563,91
13-21	0,00124370	0,00123380	0,00120370	53,81	438,53
13-22	0,00048682	0,00077959	0,00048186	41,18	706,64
13-23	0,00022675	0,00057097	0,00039631	36,00	904,50
13-24	0,00055956	0,00050087	0,00060788	41,18	740,51
13-25	0,00068911	0,00070305	0,00077594	53,81	744,57
14-21	0,00138170	0,00135110	0,00154420	69,97	490,79
14-22	0,00085378	0,00086621	0,00107600	53,81	577,36
14-23	0,00059672	0,00063979	0,00098218	41,18	556,82
14-24	0,00042670	0,00037060	0,00036743	36,00	927,25
14-25	0,00059200	0,00046327	0,00038355	41,18	858,62
15-21	0,00135150	0,00166270	0,00164090	87,73	565,38
15-22	0,00109190	0,00079880	0,00112400	69,97	696,29
15-23	0,00087677	0,00101060	0,00095264	53,81	568,41
15-24	0,00032359	0,00047424	0,00052959	41,18	930,68
15-25	0,00035013	0,00044780	0,00037852	36,00	918,02

TM03A pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00035878	0,00038472	0,00041001	37,50	975,28
11-22	0,00085511	0,00100970	0,00072355	42,50	492,59
11-23	0,00117390	0,00124610	0,00111630	54,83	465,15
11-24	0,00156810	0,00187160	0,00158740	70,75	422,24
11-25	0,00199350	0,00232670	0,00265890	88,35	379,78
12-21	0,00101300	0,00095793		42,50	431,27
12-22	0,00063844	0,00087046		37,50	497,05
12-23	0,00100890	0,00093479		42,50	437,31
12-24	0,00123390	0,00101190		54,83	488,29
12-25	0,00197700	0,00173960		70,75	380,72
13-21	0,00102360	0,00101180	0,00100850	54,83	540,39
13-22	0,00043312	0,00044244	0,00044472	42,50	965,70
13-23	0,00038420	0,00032927	0,00033603	37,50	1071,94
13-24	0,00070162	0,00056187	0,00055184	42,50	702,35
13-25	0,00108790	0,00093132	0,00085925	54,83	571,45
14-21	0,00167550	0,00163770	0,00158340	70,75	433,46
14-22	0,00105120	0,00102450	0,00106730	54,83	523,35
14-23	0,00063794	0,00053214	0,00069274	42,50	684,45
14-24	0,00058574	0,00056981	0,00054820	37,50	660,31
14-25	0,00059252	0,00077035	0,00073579	42,50	607,53
15-21	0,00276420	0,00215590	0,00212550	88,35	376,19
15-22	0,00184070	0,00164530	0,00166650	70,75	411,94
15-23	0,00083244	0,00085925	0,00069609	54,83	688,88
15-24	0,00068646	0,00070591	0,00059994	42,50	639,96
15-25	0,00042768	0,00043832	0,00039247	37,50	893,94

TM03B pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00073528	0,00067438	0,00072659	37,50	526,62
11-22	0,00114160	0,00118340	0,00126950	42,50	354,71
11-23	0,00125640	0,00118680	0,00123350	54,83	447,38
11-24	0,00151560	0,00158600	0,00165880	70,75	445,90
11-25	0,00182610	0,00179370	0,00174440	88,35	494,11
12-21	0,00040338	0,00033385	0,00037916	42,50	1142,07
12-22	0,00032550	0,00038196	0,00043943	37,50	980,91
12-23	0,00067873	0,00054728	0,00066871	42,50	672,92
12-24	0,00106490	0,00098419	0,00109590	54,83	523,02
12-25	0,00174880	0,00161570	0,00157200	70,75	429,96
13-21	0,00057924	0,00065854	0,00059248	54,83	898,72
13-22	0,00035346	0,00037689	0,00037412	42,50	1154,40
13-23	0,00031766	0,00031408	0,00033267	37,50	1166,52
13-24	0,00062966	0,00053194	0,00056803	42,50	737,15
13-25	0,00086577	0,00102500	0,00102960	54,83	563,25
14-21	0,00092315	0,00150860	0,00123000	70,75	579,64
14-22	0,00087526	0,00100320	0,00088966	54,83	594,23
14-23	0,00031060	0,00072571	0,00042746	42,50	871,04
14-24	0,00040590	0,00054363	0,00046660	37,50	794,42
14-25	0,00085149	0,00090101	0,00082455	42,50	494,75
15-21	0,00141360	0,00147340	0,00145720	88,35	610,12
15-22	0,00117190	0,00146830	0,00135350	70,75	531,46
15-23	0,00078908	0,00073579	0,00081533	54,83	702,89
15-24	0,00049335	0,00053296	0,00050600	42,50	832,08
15-25	0,00080472	0,00073579	0,00084215	37,50	472,16

TM04A pre - CAMPO PROVA SCALE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00081718	0,00079855	0,00085061	61,50	748,07
11-22	0,00134210	0,00135880	0,00105090	64,67	517,11
11-23	0,00075334	0,00106990	0,00129970	73,36	704,72
11-24	0,00217720	0,00206820	0,00233740	85,92	391,57
11-25	0,00174760	0,00160090	0,00328250	100,91	456,54
12-21	0,00051033	0,00046909	0,00040188	64,67	1404,55
12-22	0,00065460	0,00052786	0,00053785	61,50	1072,48
12-23	0,00070204	0,00055967	0,00064209	64,67	1019,07
12-24	0,00148250	0,00158780	0,00153510	73,36	477,87
12-25	0,00194080	0,00198690	0,00208060	85,92	429,01
13-21	0,00103810	0,00108330	0,00092147	73,36	723,26
13-22	0,00074706	0,00069437	0,00067675	64,67	915,93
13-23	0,00057532	0,00056826	0,00055385	61,50	1086,94
13-24	0,00119410	0,00110900	0,00120810	64,67	552,55
13-25	0,00161180	0,00194120	0,00263980	73,36	355,38
14-21	0,00173550	0,00179100	0,00184310	85,92	480,04
14-22	0,00104030	0,00099614	0,00102680	73,36	718,45
14-23	0,00103520	0,00094450	0,00090799	64,67	671,85
14-24	0,00058736	0,00054248	0,00090799	61,50	905,37
14-25	0,00116590	0,00103520	0,00097458	64,67	610,92
15-21	0,00297570	0,00316300	0,00288830	100,91	335,36
15-22	0,00227810	0,00205440	0,00175330	85,92	423,54
15-23	0,00170340	0,00178690	0,00233150	73,36	378,03
15-24	0,00085912	0,00105290	0,00086363	64,67	698,97
15-25	0,00080871	0,00093726	0,00084619	61,50	711,76

TM04A pre-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00081718	0,00079855	0,00085061	61,50	690,30
11-22	0,00134210	0,00135880	0,00105090	64,67	1316,50
11-23	0,00075334	0,00106990	0,00129970	73,36	748,33
11-24	0,00217720	0,00206820	0,00233740	85,92	756,38
11-25	0,00174760	0,00160090	0,00328250	100,91	1103,85
12-21	0,00051033	0,00046909	0,00040188	64,67	525,90
12-22	0,00065460	0,00052786	0,00053785	61,50	774,38
12-23	0,00070204	0,00055967	0,00064209	64,67	529,97
12-24	0,00148250	0,00158780	0,00153510	73,36	569,95
12-25	0,00194080	0,00198690	0,00208060	85,92	749,15
13-21	0,00103810	0,00108330	0,00092147	73,36	502,41
13-22	0,00074706	0,00069437	0,00067675	64,67	767,57
13-23	0,00057532	0,00056826	0,00055385	61,50	513,46
13-24	0,00119410	0,00110900	0,00120810	64,67	903,41
13-25	0,00161180	0,00194120	0,00263980	73,36	1007,74
14-21	0,00173550	0,00179100	0,00184310	85,92	474,02
14-22	0,00104030	0,00099614	0,00102680	73,36	519,63
14-23	0,00103520	0,00094450	0,00090799	64,67	430,10
14-24	0,00058736	0,00054248	0,00090799	61,50	647,88
14-25	0,00116590	0,00103520	0,00097458	64,67	699,35
15-21	0,00297570	0,00316300	0,00288830	100,91	512,27
15-22	0,00227810	0,00205440	0,00175330	85,92	466,75
15-23	0,00170340	0,00178690	0,00233150	73,36	437,39
15-24	0,00085912	0,00105290	0,00086363	64,67	528,90
15-25	0,00080871	0,00093726	0,00084619	61,50	594,97

TMO1A post-iniezione					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00035072	0,00044942	0,00039184	30,00	755,05
11-22	0,00066480	0,00053967	0,00077639	36,06	546,05
11-23	0,00066969	0,00060265	0,00072150	50,00	752,32
11-24	0,00086579	0,00084966	0,00097024	67,08	749,33
11-25	0,00094490	0,00099562	0,00107360	85,44	850,40
12-21	0,00052404	0,00054668	0,00054450	36,06	669,66
12-22	0,00025622	0,00019341	0,00023280	30,00	1318,82
12-23	0,00022268	0,00015534	0,00021340	36,06	1828,90
12-24	0,00035696	0,00031590	0,00037975	50,00	1425,03
12-25	0,00062567	0,00041895	0,00054490	67,08	1266,04
13-21	0,00054515	0,00054566	0,00051316	50,00	935,18
13-22	0,00009709	0,00013956	0,00010200	36,06	3194,42
13-23	0,00014511	0,00007491	0,00010060	30,00	2807,03
13-24	0,00023692	0,00020811	0,00026962	36,06	1513,75
13-25	0,00044226	0,00038739	0,00043743	50,00	1183,82
14-21	0,00058292	0,00059834	0,00069554	67,08	1072,25
14-22	0,00017264	0,00017312	0,00016710	50,00	2924,77
14-23	0,00016829	0,00015520	0,00016687	36,06	2206,13
14-24	0,00020474	0,00022585	0,00021877	30,00	1385,98
14-25	0,00029820	0,00029063	0,00035440	36,06	1146,91
15-21	0,00075766	0,00072704	0,00080768	85,44	1118,14
15-22	0,00042057	0,00039654	0,00044183	67,08	1598,49
15-23	0,00039570	0,00036299	0,00032554	50,00	1383,47
15-24	0,00012563	0,00013343	0,00012290	36,06	2832,23
15-25	0,00015481	0,00010534	0,00015401	30,00	2173,07

TM01B post - campo prova livello V					
path	T1	T2	T3	Lungh	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00011389	0,00009580	0,00011611	30,00	2762,46
11-22	0,00026514	0,00024028	0,00028633	36,06	1366,15
11-23	0,00033306	0,00032093	0,00041304	50,00	1405,77
11-24	0,00057866	0,00050825	0,00056231	67,08	1220,25
11-25	0,00075177	0,00070984	0,00074809	85,44	1159,98
12-21	0,00012230	0,00012505	0,00011456	36,06	2988,73
12-22	0,00011501	0,00013169	0,00018493	30,00	2085,12
12-23	0,00022949	0,00033094	0,00036179	36,06	1172,88
12-24	0,00061404	0,00058225	0,00056826	50,00	850,08
12-25	0,00078779	0,00084350	0,00074759	67,08	845,94
13-21	0,00034528	0,00041599	0,00046416	50,00	1224,06
13-22	0,00039338	0,00036131	0,00035980	36,06	970,67
13-23	0,00010324	0,00010212	0,00012211	30,00	2748,34
13-24	0,00019530	0,00024539	0,00021347	36,06	1653,72
13-25	0,00040080	0,00044569	0,00043072	50,00	1174,43
14-21	0,00061114	0,00064004	0,00055141	67,08	1116,39
14-22	0,00044267	0,00057834	0,00058389	50,00	934,64
14-23	0,00018429	0,00018135	0,00018676	36,06	1958,36
14-24	0,00010533	0,00011182	0,00011673	30,00	2695,58
14-25	0,00021364	0,00024132	0,00021350	36,06	1618,35
15-21	0,00067426	0,00084394	0,00077667	85,44	1116,93
15-22	0,00061633	0,00085955	0,00066530	67,08	939,86
15-23	0,00036380	0,00044235	0,00037404	50,00	1270,98
15-24	0,00028329	0,00029941	0,00033047	36,06	1184,66
15-25	0,00013515	0,00011326	0,00013338	30,00	2357,32

TM02A post - CAMPO PROVA CELLE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
11-21	0,00031450	0,00031708	0,00026585	36,00	1203,44
11-22	0,00037655	0,00037953	0,00037055	41,18	1096,61
11-23	0,00039915	0,00035775	0,00039893	53,81	1396,78
11-24	0,00054959	0,00052528	0,00060041	69,97	1252,98
11-25	0,00067454	0,00068782	0,00082665	87,73	1202,32
12-21	0,00037113	0,00022974	0,00037030	41,18	1272,07
12-22	0,00028132	0,00013454	0,00022317	36,00	1690,06
12-23	0,00022454	0,00019192	0,00021529	41,08	1950,77
12-24	0,00042938	0,00040384	0,00044056	53,81	1267,33
12-25	0,00089170	0,00078933	0,00080474	69,97	844,45
13-21	0,00048700	0,00046354	0,00058228	53,81	1053,16
13-22	0,00021699	0,00038752	0,00036539	41,18	1273,74
13-23	0,00005343	0,00023157	0,00014125	36,00	2533,71
13-24	0,00027029	0,00028734	0,00032567	41,18	1398,62
13-25	0,00060346	0,00038260	0,00064637	53,81	988,89
14-21	0,00075513	0,00069756	0,00072535	69,97	963,76
14-22	0,00050161	0,00044449	0,00051225	53,81	1106,94
14-23	0,00021939	0,00022285	0,00024177	41,18	1806,11
14-24	0,00018159	0,00017123	0,00015442	36,00	2129,17
14-25	0,00019768	0,00021961	0,00022095	41,18	1935,64
15-21	0,00087890	0,00106060	0,00104910	87,73	880,65
15-22	0,00071190	0,00079308	0,00083046	69,97	898,80
15-23	0,00040514	0,00047147	0,00045235	53,81	1214,71
15-24	0,00018456	0,00029677	0,00030527	41,18	1570,56
15-25	0,00021575	0,00022699	0,00023668	36,00	1589,59

TM02B post - CAMPO PROVA CELLE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00021417	0,00018360	0,00018493	36,00	1853,44
11-22	0,00024001	0,00020345	0,00021745	41,18	1869,35
11-23	0,00037154	0,00040622	0,00040616	53,81	1363,64
11-24	0,00063339	0,00064463	0,00061430	69,97	1109,27
11-25	0,00096489	0,00096692	0,00106290	87,73	878,85
12-21	0,00035102	0,00035224	0,00025977	41,18	1282,83
12-22	0,00014101	0,00012083	0,00014591	36,00	2648,68
12-23	0,00031597	0,00028418	0,00042217	41,08	1205,49
12-24	0,00055445	0,00053080	0,00060631	53,81	954,33
12-25	0,00064046	0,00059463	0,00064838	69,97	1114,49
13-21	0,00060661	0,00040106	0,00054515	53,81	1039,59
13-22	0,00026229	0,00028291	0,00021075	41,18	1634,24
13-23	0,00029256	0,00026214	0,00035103	36,00	1192,41
13-24	0,00038752	0,00024392	0,00030688	41,18	1316,61
13-25	0,00071884	0,00079223	0,00051414	53,81	797,10
14-21	0,00061192	0,00057241	0,00056801	69,97	1197,88
14-22	0,00044254	0,00045608	0,00042653	53,81	1218,20
14-23	0,00024051	0,00014041	0,00022150	41,18	2050,73
14-24	0,00015274	0,00011697	0,00010334	36,00	2895,05
14-25	0,00027986	0,00024555	0,00027441	41,18	1544,60
15-21	0,00095524	0,00083101	0,00090119	87,73	979,33
15-22	0,00089913	0,00050374	0,00066468	69,97	1015,26
15-23	0,00072270	0,00025735	0,00058070	53,81	1034,31
15-24	0,00029405	0,00023483	0,00023614	41,18	1614,86
15-25	0,00026813	0,00018095	0,00019415	36,00	1679,03

TM03A post - CAMPO PROVA SCALE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00020853	0,00044142	0,00035644	37,50	1117,86
11-22	0,00041025	0,00048002	0,00046096	42,50	943,58
11-23	0,00045236	0,00045757	0,00048635	54,83	1178,06
11-24	0,00067202	0,00085649	0,00075947	70,75	927,74
11-25	0,00079262	0,00091584	0,00084356	88,35	1038,59
12-21	0,00042988	0,00037467	0,00034345	42,50	1110,63
12-22	0,00023617	0,00030661	0,00028557	37,50	1358,12
12-23	0,00040123	0,00040632	0,00042122	42,50	1037,62
12-24	0,00053380	0,00051377	0,00070225	54,83	940,04
12-25	0,00062217	0,00061961	0,00083674	70,75	1021,16
13-21	0,00035385	0,00036261	0,00042739	54,83	1438,04
13-22	0,00018262	0,00017525	0,00015232	42,50	2499,07
13-23	0,00018028	0,00018608	0,00016139	37,50	2131,69
13-24	0,00028966	0,00030372	0,00030289	42,50	1422,56
13-25	0,00029428	0,00031394	0,00031527	54,83	1781,18
14-21	0,00078356	0,00071221	0,00065947	70,75	984,81
14-22	0,00045338	0,00062620	0,00064186	54,83	955,54
14-23	0,00026321	0,00026681	0,00028990	42,50	1555,03
14-24	0,00025627	0,00017805	0,00016769	37,50	1868,74
14-25	0,00021265	0,00024612	0,00022592	42,50	1862,16
15-21	0,00086729	0,00071592	0,00088098	88,35	1075,61
15-22	0,00072036	0,00066896	0,00066863	70,75	1031,37
15-23	0,00046989	0,00041983	0,00043523	54,83	1241,48
15-24	0,00039814	0,00032230	0,00035762	42,50	1182,68
15-25	0,00027993	0,00018892	0,00024571	37,50	1574,40

TM03B post - CAMPO PROVA CHIOSTRO					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00057630	0,00042862	0,00042376	37,50	787,44
11-22	0,00083867	0,00054793	0,00056854	42,50	652,13
11-23	0,00097183	0,00073027	0,00069478	54,83	686,27
11-24	0,00150980	0,00094983	0,00098877	70,75	615,55
11-25	0,00180920	0,00125800	0,00132670	88,35	603,22
12-21	0,00030793	0,00033136	0,00034171	42,50	1299,69
12-22	0,00022074	0,00023125	0,00019496	37,50	1738,93
12-23	0,00036790	0,00040828	0,00041890	42,50	1066,87
12-24	0,00090675	0,00089406	0,00081989	54,83	627,66
12-25	0,00096859	0,00081798	0,00091479	70,75	785,72
13-21	0,00043711	0,00044357	0,00044057	54,83	1244,96
13-22	0,00024915	0,00025788	0,00022973	42,50	1730,55
13-23	0,00017066	0,00017591	0,00019496	37,50	2077,45
13-24	0,00040294	0,00036653	0,00039470	42,50	1095,20
13-25	0,00077886	0,00075335	0,00074913	54,83	721,02
14-21	0,00099014	0,00071411	0,00067265	70,75	892,97
14-22	0,00052944	0,00062387	0,00061446	54,83	930,49
14-23	0,00025388	0,00019441	0,00015473	42,50	2114,36
14-24	0,00019465	0,00018060	0,00015643	37,50	2115,93
14-25	0,00038878	0,00039228	0,00036459	42,50	1112,91
15-21	0,00088521	0,00077884	0,00078275	88,35	1083,25
15-22	0,00056340	0,00060862	0,00054139	70,75	1238,76
15-23	0,00033740	0,00036160	0,00030884	54,83	1632,10
15-24	0,00016214	0,00016467	0,00013083	42,50	2786,03
15-25	0,00022621	0,00019847	0,00022700	37,50	1726,31

TM04A post - CAMPO PROVA SCALE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/s]
11-21	0,00065066	0,00066233	0,00073678	61,50	900,10
11-22	0,00105090	0,00106520	0,00102710	64,67	617,24
11-23	0,00114430	0,00112840	0,00116330	73,36	640,51
11-24	0,00145690	0,00144980	0,00132360	85,92	609,32
11-25	0,00139420	0,00161400	0,00168640	100,91	644,85
12-21	0,00035958	0,00037061	0,00036268	64,67	1775,23
12-22	0,00040099	0,00043400	0,00039477	61,50	1500,29
12-23	0,00053587	0,00042164	0,00042556	64,67	1402,75
12-24	0,00057617	0,00049391	0,00049491	73,36	1406,27
12-25	0,00084215	0,00081692	0,00090398	85,92	1005,68
13-21	0,00044120	0,00049687	0,00048227	73,36	1549,49
13-22	0,00044591	0,00042089	0,00041799	64,67	1510,05
13-23	0,00043139	0,00042746	0,00041954	61,50	1443,22
13-24	0,00039915	0,00038521	0,00042322	64,67	1606,60
13-25	0,00049148	0,00056640	0,00057875	73,36	1344,71
14-21	0,00097062	0,00064175	0,00061477	85,92	1157,36
14-22	0,00052376	0,00057470	0,00050586	73,36	1371,80
14-23	0,00050650	0,00044594	0,00045494	64,67	1378,52
14-24	0,00032969	0,00030752	0,00031507	61,50	1937,46
14-25	0,00050868	0,00042520	0,00039897	64,67	1455,60
15-21	0,00055161	0,00057623	0,00060685	100,91	1745,15
15-22	0,00047428	0,00048503	0,00049493	85,92	1772,47
15-23	0,00040581	0,00041700	0,00037000	73,36	1845,05
15-24	0,00029384	0,00028273	0,00027433	64,67	2280,06
15-25	0,00035233	0,00048539	0,00040063	61,50	1489,89

TM04B post - CAMPO PROVA SCALE					
path	T1	T2	T3	Lungh.	VM
	[s]	[s]	[s]	[cm]	[m/S]
11-21	0,00078275	0,00082802	0,00086260	61,50	745,95
11-22	0,00042123	0,00040205	0,00042527	64,67	1553,88
11-23	0,00056340	0,00060853	0,00059532	73,36	1245,32
11-24	0,00061143	0,00063193	0,00073520	85,92	1302,77
11-25	0,00076649	0,00078940	0,00087815	100,91	1243,73
12-21	0,00090799	0,00085575	0,00101610	64,67	697,92
12-22	0,00061404	0,00060211	0,00071250	61,50	956,63
12-23	0,00079992	0,00071477	0,00076319	64,67	851,71
12-24	0,00080827	0,00072312	0,00089234	73,36	908,02
12-25	0,00106350	0,00097768	0,00110370	85,92	819,62
13-21	0,00084216	0,00093844	0,00091936	73,36	815,12
13-22	0,00049830	0,00058559	0,00062667	64,67	1134,19
13-23	0,00044526	0,00053325	0,00048456	61,50	1261,05
13-24	0,00046906	0,00049493	0,00051632	64,67	1310,60
13-25	0,00066207	0,00061257	0,00066536	73,36	1134,43
14-21	0,00081179	0,00099269	0,00101370	85,92	914,63
14-22	0,00056224	0,00077792	0,00071661	73,36	1070,03
14-23	0,00040622	0,00058784	0,00053929	64,67	1265,27
14-24	0,00041202	0,00059890	0,00058568	61,50	1155,58
14-25	0,00055140	0,00064934	0,00071477	64,67	1012,84
15-21	0,00116790	0,00116310	0,00180010	100,91	865,81
15-22	0,00088060	0,00083996	0,00105630	85,92	928,24
15-23	0,00078750	0,00080088	0,00083674	73,36	907,50
15-24	0,00052531	0,00046403	0,00061480	64,67	1209,43
15-25	0,00053229	0,00058467	0,00060272	61,50	1072,87