



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

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

TESI DI LAUREA

QUALIFICAZIONE DI MURATURE STORICHE E VERIFICA DELL'EFFICACIA DELLE INIEZIONI MEDIANTE INDAGINI SONICHE – IL CASO DEL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA

Relatore: Prof. MARIA ROSA VALLUZZI

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

Laureando: RICCARDO MAZZILLI

Anno Accademico 2014 - 2015

INDICE

INTRODUZIONE	vii
1. QUALIFICAZIONE DI MURATURE STORICHE MEDIANTE INDAGINI SONICHE	1
1.1. Stato dell'arte.....	1
1.2. Revisione Letteratura.....	5
1.2.1. Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del Complesso Cavalli – Bonvento N., Tiberi E., (2014).....	8
1.2.2. Analisi della vulnerabilità sismica di Palazzo Donghi dell'Università di Padova: studio globale e verifica locale dei macroelementi – Mattiello E. (2013)	10
1.2.3. Analisi di vulnerabilità sismica: Istituti Anatomici dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi – Rodofile E. (2013).....	13
1.2.4. Analisi della vulnerabilità sismica: Istituto di Fisica "Galileo Galilei" dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi – Pegoraro M. (2013).....	15
1.2.5. Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del complesso dell'Orto Botanico di Padova: la Casa del Prefetto e le Serre – Martini A. (2014)	16
1.2.6. Analisi di vulnerabilità sismica finalizzata agli interventi di miglioramento strutturale di Palazzo Ca' Borin – Pengo M. (2013).....	18
1.2.7. Analisi della vulnerabilità sismica di edifici in aggregato: Palazzo Levi Cases, Università di Padova – Dante M. (2013)	19
1.2.8. Analisi di vulnerabilità sismica degli edifici dell'Università di Padova, Palazzo Wollemborg – Bortoletto A. (2013)	22
1.2.9. Analisi di vulnerabilità sismica: indagini strumentali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi. Palazzo Liviano – Università di Padova – Boin M. (2013)	24
1.2.10. Verifica della sicurezza sismica del Museo Archeologico Nazionale di Arezzo –Università degli Studi di Padova (2014)	26
1.2.11. Verifica della sicurezza sismica del Museo Statale d'Arte Medievale e Moderna di Arezzo – Università degli Studi di Padova (2014)	26
1.2.12. Verifica della sicurezza sismica della Rocca di Gradara –Università degli Studi di Padova (2014) ..	27
1.2.13. Verifica della sicurezza sismica del Museo Archeologico di Ascoli Piceno – Università degli Studi di Padova (2014)	27
1.2.14. Verifica della sicurezza sismica del Palazzo Ducale di Urbino – Università degli Studi di Padova (2014) ..	28
1.3. Analisi dei dati.....	29
1.3.1. Murature in pietra.....	29
1.3.1.1. Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari).....	34
1.3.1.2. Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno.....	35
1.3.1.3. Muratura in pietre a spacco con buona tessitura.....	37
1.3.2. Muratura in mattoni pieni e malta di calce	40
1.4. Risultati	44
2. VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DELLE INIEZIONI MEDIANTE INDAGINI SONICHE	47
2.1. Stato dell'Arte	47

2.2. Casi studio precedenti	53
2.2.1. Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni – F. Bresolato, N. Pasin (2008)	54
2.2.2. Valutazione dell'efficacia di iniezioni per il consolidamento di muratura in pietra mediante prove non distruttive – L. Fattori, S. Scaggiante (2010-2011)	64
2.2.3. Qualificazione di murature storiche: procedure sperimentali in sito e calibrazione in laboratorio – M. Dalla Benetta (2012)	68
2.3. Analisi Dati	74
2.3.1. Iniezioni su muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	76
2.3.2. Iniezioni su murature a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	77
2.4. Risultati	80
3. CASO STUDIO – IL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA	81
3.1. Inquadramento geografico	81
3.2. Inquadramento geologico	82
3.3. Inquadramento sismico	84
3.4. Inquadramento storico	86
3.5. Descrizione del sito	95
3.6. Fase sperimentale	97
3.6.1. Programma sperimentale	97
3.6.2. Indagini soniche dirette per la qualificazione delle murature – fase pre iniezione	104
3.6.2.1. Prova sonica diretta So1	104
3.6.2.2. Prova sonica diretta So2	108
3.6.2.3. Prova sonica diretta So3	112
3.6.2.4. Prova sonica diretta So4	115
3.6.3. Indagini soniche tomografiche per la qualificazione delle murature	118
3.6.3.1. Prova sonica tomografica TMo5	118
3.6.3.2. Prova sonica tomografica TMo7	122
3.6.3.3. Prova sonica tomografica TMo8	125
3.6.4. Valutazione dell'efficacia delle iniezioni mediante indagini soniche dirette su muratura consolidata	127
3.6.4.1. Prova sonica diretta So1 post	127
3.6.4.2. Prova sonica diretta So2 post	133
3.6.4.3. Prova sonica diretta So3 post	138
3.6.4.4. Prova sonica diretta So4 post	143
4. ANALISI DEI DATI	149
4.1. Ottimizzazione dei metodi di interpolazione di dati	149
4.1.1. Prova Sonica So3 con griglia 10x10cm	150
4.1.2. Metodi di interpolazione	151
4.1.3. Percentuale di errore dei vari metodi	170
4.1.4. Analisi e confronto dei risultati	171
4.1.5. Analisi della percentuale di errore	172
4.2. Analisi delle indagini soniche per la qualificazione di murature	176

4.3.	Analisi delle indagini soniche per la valutazione dell'efficacia di iniezioni consolidanti.....	178
4.4.	Risultati	181
5.	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA.....	185
5.1.	Normativa di riferimento.....	185
5.2.	Individuazione dell' Unita' Strutturale	186
5.3.	Analisi dei carichi	188
5.3.1.	Combinazione delle azioni	192
5.3.2.	Carichi permanenti strutturali-non strutturali	192
5.3.3.	Carichi variabili	194
5.3.4.	Azione sismica.....	197
5.4.	Analisi per macroelementi.....	200
5.4.1.	Individuazione dei cinematismi	206
5.4.2.	Cinematismo 1 – ribaltamento semplice (fessura).....	208
5.4.3.	Cinematismo 2 – flessione semplice (fessura)	210
5.4.4.	Cinematismo 3- ribaltamento semplice (maschio murario facciata)	212
5.4.5.	Cinematismo 4 – flessione semplice (maschio murario)	215
5.4.6.	Cinematismo 5 – ribaltamento semplice (maschio contrafforte).....	218
5.4.7.	Cinematismo 6 – flessione semplice (maschio murario contrafforte)	222
5.4.8.	Cinematismo 7 – ribaltamento semplice (parete contrafforte)	226
5.4.9.	Cinematismo 8- flessione semplice (parete contrafforte).....	229
5.4.10.	Cinematismo 9 – ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud)	231
5.4.11.	Cinematismo 10 – ribaltamento semplice (porzione superiore facciata sud – paramento esterno)	235
5.4.12.	. Cinematismo 11 – meccanismo di piano (porzione superiore facciata sud).....	238
5.4.13.	Cinematismo 12 – meccanismo di piano (porzione superiore facciata nord)	241
5.5.	Risultati	243
	CONCLUSIONI	245
	BIBLIOGRAFIA	247
	APPENDICE	251

INTRODUZIONE

La normativa vigente in materia di edilizia sono le Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. del 08/01/2008 la relativa Circolare applicativa del 2 febbraio 2009, n 617. Esse, anche in seguito ai più recenti eventi sismici, hanno classificato come sismico l'intero territorio italiano. Inoltre viene posta particolare attenzione agli edifici esistenti e alla loro messa in sicurezza, e in particolare in Italia, il cui patrimonio edilizio storico è universalmente riconosciuto, questo tema è più che mai rilevante. Dopo infatti una fase storica di sviluppo delle città in cui l'urbanizzazione incontrollata ha messo in secondo piano gli edifici storici e in cui gli interventi di consolidamento degli stessi venivano eseguiti secondo modalità che le recenti esperienze hanno dimostrato essere dannose, come l'uso non corretto del cemento armato, si è passati ad una fase storica in cui è di fondamentale importanza la tutela degli edifici storici. Oltre ad un recupero dal punto di vista estetico e di fruibilità, è di fondamentale importanza il consolidamento strutturale. La normativa prevede che prima dell'esecuzione degli interventi sia effettuata un'adeguata fase conoscitiva dell'edificio, più o meno approfondita a in base a diversi fattori, non ultimo quello economico. A prescindere da questo, anche a causa dell'impossibilità di altera non sempre è possibile effettuare indagini approfondite e quindi mediamente distruttive o distruttive, quali ad esempio carotaggi o martinetti piatti. Sempre più diffuse sono le indagini non distruttive, le quali permettono con la minor invasività possibile di ricavare informazioni sullo stato di conservazione degli elementi strutturali, sulla presenza di criticità nascoste, ecc. Oggetto di questa tesi sono in particolare le indagini soniche su murature storiche, le quali permettono in maniera del tutto non distruttiva di avere informazioni sulla presenza di vuoti, disconnessioni o impianti all'interno dello spessore murario, oltre a fornire indicazioni generali sulla consistenza muraria. Sono state elaborati valori di correlazione tra la velocità sonica risultante dai test e lo stato di conservazione della muratura.

Correlazioni tra velocità soniche e condizioni della muratura (Monteforte, 1998).

Condizioni della muratura	<i>Velocità medie</i>	<i>Velocità medie</i>
	secondo (Forde, et al., 1985)	secondo (Berra, et al., 1992)
	[m/s]	[m/s]
buone	>2500	>2000
discrete	1500 ÷ 2500	1000 ÷ 2000
cattive	<1500	<1000

Oltre ad una valutazione sullo stato di conservazione della muratura, in questa tesi si vogliono elaborare anche valori di riferimento di velocità sonica per quanto riguarda la classificazione della muratura. Infatti la Circolare applicativa delle NTC fornisce nella tabella C8A.2.1 una classificazione delle tipologie murarie, con relativi valori meccanici di resistenza a compressione e trazione, modulo elastico e peso specifico, e in questo lavoro di tesi si vogliono fornire valori di riferimento anche per quanto riguarda le velocità soniche nelle tipologia murarie maggiormente diffuse negli edifici storici.

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w [daN/m ³]
	[daN/cm ²] min - max	[daN/cm ²] min - max	[daN/cm ²] min - max	[daN/cm ²] min - max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	10.0 18.0	0.20 0.32	6900 10500	2300 3500	1900
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	20.0 30.0	0.35 0.51	10200 14400	3400 4800	2000
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	26.0 38.0	0.56 0.74	15000 19800	5000 6600	2100
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	14.0 24.0	0.28 0.42	9000 12600	3000 4200	1600
Muratura a blocchi lapidei squadrati	60.0 80.0	0.90 1.20	24000 32000	7800 9400	2200
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	24.0 40.0	0.60 0.92	12000 18000	4000 6000	1800
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura < 40%)	50.0 80.0	2.40 3.20	35000 56000	8750 14000	1500
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	40.0 60.0	3.00 4.00	36000 54000	10800 16200	1200
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	30.0 40.0	1.00 1.30	27000 36000	8100 10800	1100
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	15.0 20.0	0.95 1.25	12000 16000	3000 4000	1200
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	30.0 44.0	1.80 2.40	24000 35200	6000 8800	1400

Tabella C8A.2.1 della Circolare 617/2009)

Oltre alla qualificazione e come si è detto alla classificazione delle murature, le indagini soniche sono state studiate in questo lavoro di tesi anche come strumento per la valutazione dell'efficacia di interventi di iniezione, con applicazione in sito presso il Museo Archeologico di Verona. Ulteriore passaggio è stato quello della valutazione della sicurezza simica, eseguita per macroelementi, dell'unità strutturale maggiormente significativa del complesso, vale a dire l'edificio del refettorio.

1. QUALIFICAZIONE DI MURATURE STORICHE MEDIANTE INDAGINI SONICHE

1.1. Stato dell'arte

Indagini Soniche:

Le tecniche di indagine sonora 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 sonore 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.

La tecnica assume 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 "batto" 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.

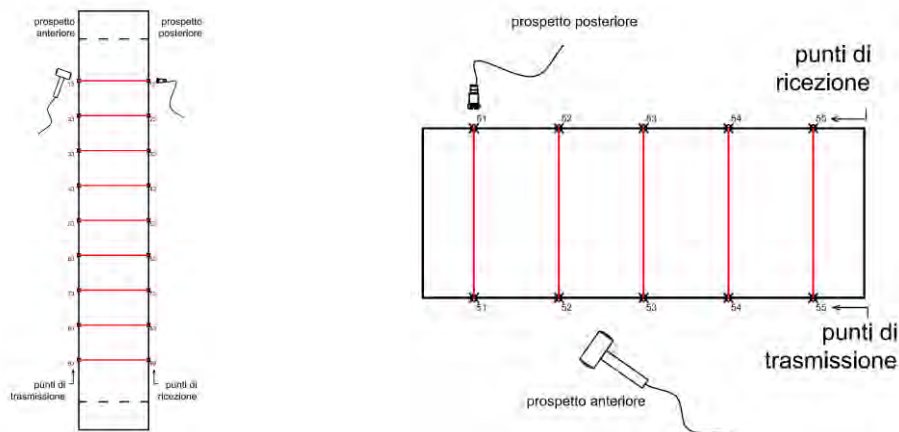


Figura 1.1. 1 - Schemi della prova sonica in trasparenza. Sezione verticale; Sezione orizzontale (Deliverable D11.1, 2004).

- 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.
- 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.

Strumentazione:

L'attrezzatura necessaria per eseguire un'indagine sonica 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.

- 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.



Figura 1.1. 2 - Foto martello e accelerometro

- 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.

- 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.



Figura 1.1. 3 - Sistema PXI

- 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.

1.2. Revisione Letteratura

In assenza di dati in normativa circa le velocità soniche per le diverse tipologie murarie, si è cercato di raccogliere un buon numero di dati relativi a sperimentazioni eseguite con prove soniche in trasparenza per la qualificazione delle murature. Gli ultimi dati raccolti si fermavano al 2005 ed erano in numero abbastanza limitato per poter effettuare delle medie affidabili. La seguente tabella è la più recente raccolta di dati sulle indagini soniche presente in letteratura.

Tip. muraria	Tip. edilizia	Spessore [m]	Intervallo di velocità [m/s]	Vel. media [m/s]	Dev. St. [m/s]	Sito	Riferimento
MATTONI	T	1,33	1647 ÷ 3847	2401	515	lato 1	(Biasiolo, 2001)
	T	1,29	1322 ÷ 4671	2379	677	lato 2	(Biasiolo, 2001)
	C	1,8	908 ÷ 1314	1090	125	S4	(Semenzato, 2005)
	C	1,1	811 ÷ 1703	1097	223	S5	(Semenzato, 2005)

	C	1,13	894 ÷ 2041	1563	306	S6	(Semenzato, 2005)
	C	1,3	770 ÷ 1419	1105	181	S7	(Semenzato, 2005)
	C	1,25	697 ÷ 1201	963	184	S8	(Semenzato, 2005)
	C	1,25	1013 ÷ 1600	1326	137	S9	(Semenzato, 2005)
	C	0,74	962 ÷ 2443	1583	390	S10	(Semenzato, 2005)
	C	1,07	1097 ÷ 2686	1779	426	S11	(Semenzato, 2005)
	P	-	1407 ÷ 1801	1603	197	POSTAZIONE 4a	(Loeffelstiel, 2005)
	P	0,8	792 ÷ 1647	1359	320	POSTAZIONE 4a	(Loeffelstiel, 2005)
	P	-	1029 ÷ 1812	1440	393	POSTAZIONE 4a	(Loeffelstiel, 2005)
	M	1	400 ÷ 3000	1308	1006	SITO1	(Modena, et al., 2000b)
	M	0,79	692 ÷ 2418	1509	476	ZONA A, B- SPONDA	(Modena, et al., 1999)
	velocità media MATTONI			1500 m/s			
MATTONI-PIETRE	C	0,95	927 ÷ 2422	1714	386	ZONA A	(Levorato, 2002)
	P	0,77	385 ÷ 1021	611	161	G1 (TERRA)	(Oliosio, 2004)
	P	1,08	356 ÷ 922	651	166	B2-B3 (INTERR)	(Oliosio, 2004)
	P	0,64	475 ÷ 1402	793	180	G7 (TERRA)	(Oliosio, 2004)
	P	1,09	611 ÷ 2408	1286	542	B4 (INTERR)	(Oliosio, 2004)
	P	0,85	1009 ÷ 2034	1658	326	SO-2	(Panizzo, 2005)
	P	1,45	753 ÷ 2315	1424	338	SO-7	(Panizzo, 2005)
	P	0,58	759 ÷ 3306	1722	882	SO-5	(Panizzo, 2005)
	M	2,2	687 ÷ 1785	969	221	N-E (CINTA)	(da Porto, 1999)
	M	1	500 ÷ 3000	1417	735	SITO1	(Modena, et al., 2000b)
	M	1	306 ÷ 1404	673	388	PARETE A- FONDAZIONE	(Modena, et al., 1999)
	M	0,83	341 ÷ 3500	1949	1459	PARETE B- FONDAZIONE	(Modena, et al., 1999)
		velocità media MATTONI-PIETRE			1239 m/s		
PIETRA	T	1,36	361 ÷ 574	420	58	NORD (PRIMO)	(Scodeller, 2006)
	T	1,3	952 ÷ 2051	1536	356	NORD (TERRA)	(Scodeller, 2006)
	T	1,31	697 ÷ 2179	1325	412	NORD (SOTTOTETTO)	(Scodeller, 2006)
	C	1,37	852 ÷ 2909	1837	568	S1	(Semenzato, 2005)
	C	0,89	1069 ÷ 2392	1695	402	S2	(Semenzato, 2005)
	C	0,81	1887 ÷ 2843	2462	202	S3	(Semenzato, 2005)
	P	1,71	1627 ÷ 2591	2155	232	zona 1 posizione6	(Mondin, 2004)
	P	1,3	1022 ÷ 2440	1823	407	zona 2 posizione6	(Mondin, 2004)
	M	1	600 ÷ 3000	1653	772	SITO1	(Modena, et al., 2000b)
	lab	0,5	1067 ÷ 3000	2660	641	1	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	868 ÷ 3000	2289	732	3	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	348 ÷ 1904	859	538	4	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	269 ÷ 3000	1068	765	5	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	467 ÷ 3000	1883	887	6	(da Porto, 1999)
lab	0,5	962 ÷ 3000	2616	658	8	(da Porto, 1999)	

lab	0,5	895 ÷ 3000	2689	669	13	(da Porto, 1999)
lab	0,5	1669 ÷ 3000	2806	431	14	(da Porto, 1999)
lab	0,5	2170 ÷ 3000	2866	266	15	(da Porto, 1999)
lab	0,5	450 ÷ 3000	2063	868	16	(da Porto, 1999)
velocità media PIETRA			1932 m/s			

Tabella 1.2. 1 - dati prove pregresse (Pasin e Bresolato, 2008)

Si è quindi cercato di analizzare delle campagne di indagine tramite prove soniche realizzate negli ultimi anni, suddividendo i dati per tipologia muraria, seguendo le classificazioni presenti in normativa. Questo per creare un database sufficientemente affidabile sia dal punto di vista del numero di dati raccolti, sia considerando la recente esecuzione di queste sperimentazioni, quindi con strumenti e modalità assolutamente paragonabili a quelli attuali. Sono state raccolte 150 prove soniche dirette per qualificazione di murature.

SONICHE DIRETTE PER CARATTERIZZAZIONE MURATURE		
I	Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	15
II	Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	36
III	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	23
VI	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	76

Tabella 1.2. 2 - numero prove raccolte

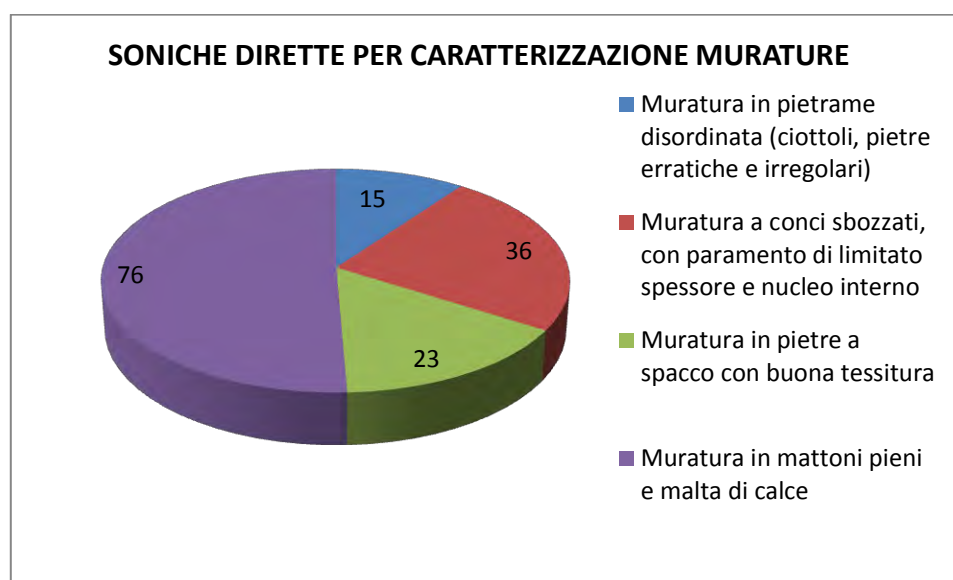


Figura 1.2. 1 - numero prove raccolte per tipologia

Tutte le prove sono state analizzate, in particolar modo nei casi in cui vi fossero valori discordanti dalle attese o dalle medie degli altri casi studio. Questo è stato utile per rendere ancora più affidabile il database, poiché in alcuni casi esaminati nel dettaglio sono emersi fattori che ne hanno comportato l'esclusione, come la presenza di interventi di

consolidamento già eseguiti oppure la poca affidabilità dei singoli segnali delle singole prove. Oltre ai valori di velocità sono stati raccolti i valori di deviazione standard e coefficiente di variazione delle singole prove, e in molti casi dove non presenti sono stati calcolati, andando ad analizzare tutti i singoli segnali registrati per ciascuna prova eseguita. Sono di seguito presentate nel dettaglio le sperimentazioni raccolte.

1.2.1. Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del Complesso Cavalli – Bonvento N., Tiberi E., (2014)

Il Palazzo Cavalli, esempio di rilievo dell'architettura residenziale del ceto patrizio insediatosi nel Quattrocento lungo il fiume Naviglio, sorge nel centro di Padova, tra la prima cinta muraria, di antiche origini, e la seconda, più recente. La sua costruzione risale alla fine del Quattrocento. Il programma sperimentale di questa tesi comprende l'esecuzione di quattro prove soniche in trasparenza, localizzate come visibile nelle piante sottostanti. Le prime tre sono state eseguite su pannelli in muratura in mattoni pieni, mentre la S4 su un pannello completamente diverso, sia per lo spessore notevolmente maggiore, sia per la tipologia di muratura in pietre a spacco con buona tessitura. Questo è piegato dal fatto che il quarto pannello è situato ad un livello inferiore dell'edificio. Le prove sono state eseguite registrando tre acquisizioni per ciascun punto, mentre la griglia di punti usati per l'acquisizione è stata cambiata nelle varie prove per adattarsi alle caratteristiche della parete presa in esame

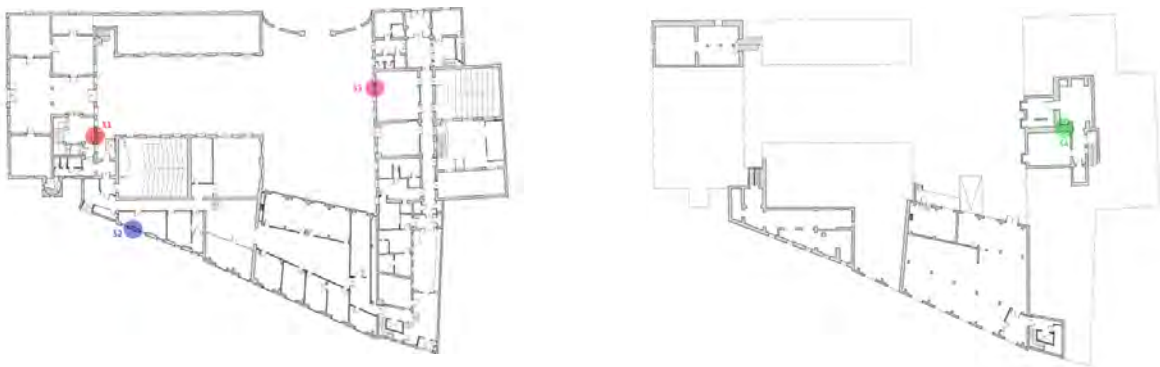


Figura 1.2. 2 - pianta

La prova S1 è stata eseguita su una muratura di 44 cm di spessore attraverso una griglia di 25 punti suddivisi in 5 righe e 5 colonne di punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni ed ha fornito come risultato una velocità media pari a 1107,89 m/s. La velocità minima del pannello è 830 m/s mentre la massima è 1679 m/s, con un CoV del 21% indice di un pannello abbastanza omogeneo.

La prova S2 è stata eseguita su una muratura di 58 cm di spessore su una griglia di 18 punti disposti in 3 righe e 6 colonne e distanziati tra loro 20 cm. In questo caso la velocità media è risultata essere pari a 2438,14 m/s, valore piuttosto elevato per la tipologia. Si nota in questo caso una velocità minima di 1233 m/s e una massima molto elevata pari a 3888 m/s, con un CoV del 31%.

La prova S₃ è stata eseguita su una muratura di 41 cm di spessore secondo la classica griglia di 25 punti divisi in 5 righe e 5 colonne. La velocità media risultante è pari a 1685 m/s con velocità minima pari a 765 m/s e massima 3177 m/s, e un CoV del 39% indice di un pannello piuttosto eterogeneo.

La prova S₄ è stata eseguita su un pannello di muratura in pietra al piano interrato spessa 180 cm attraverso una griglia di 9 punti disposti in 3 righe e 3 colonne distanti 20 cm tra loro. La velocità media è risultata pari a 619,4 m/s, con valore minimo 493 m/s e massimo 740 m/s, mentre il CoV è risultato essere pari al 16%, indice di un pannello piuttosto omogeneo. Questo dato però è sicuramente influenzato dalle dimensioni ridotte della griglia.

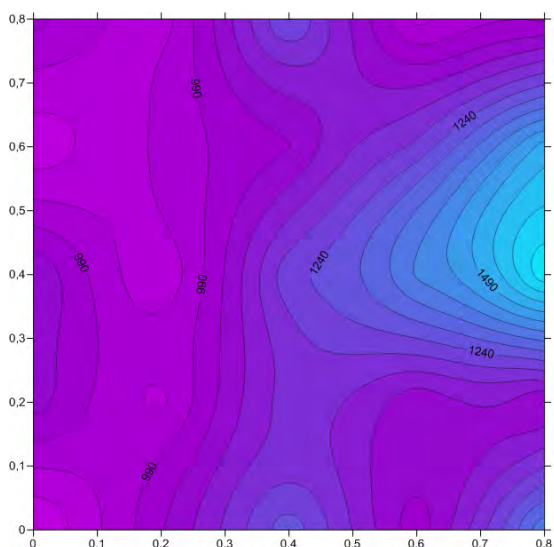


Figura 1.2. 3 - Grafico distribuzione velocità soniche S₁

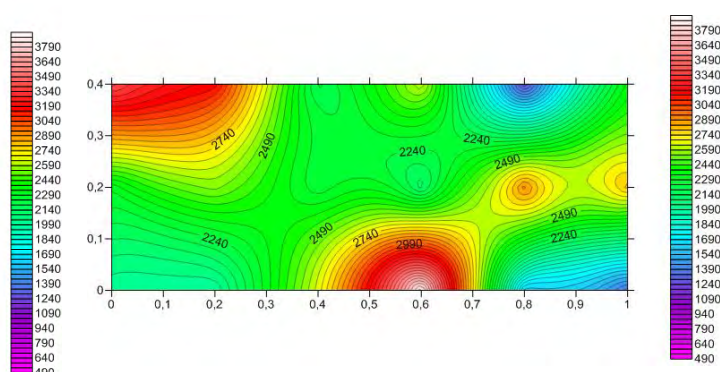


Figura 1.2. 4 - Grafico distribuzione velocità soniche S₂

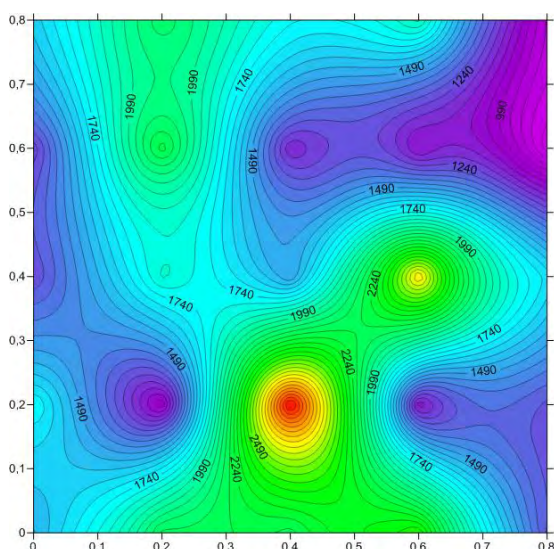


Figura 1.2. 5 - Grafico distribuzione velocità soniche S₃

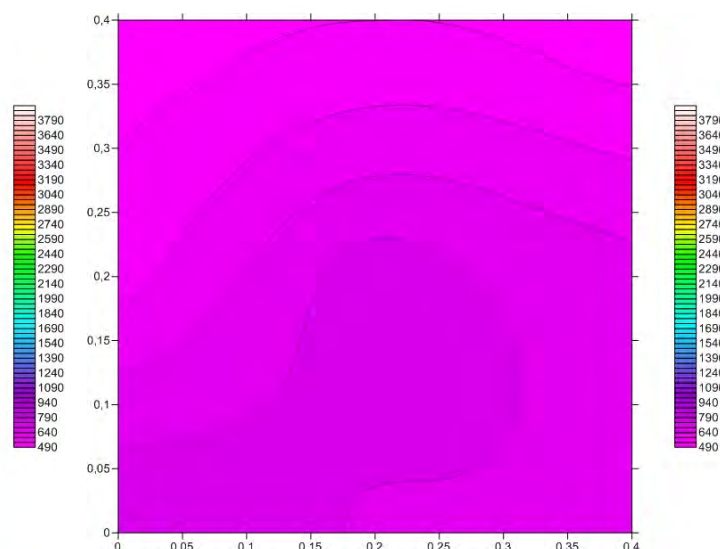


Figura 1.2. 6 - Grafico distribuzione velocità soniche S₄

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche si apprezzano visivamente le caratteristiche dei pannelli, come la discreta omogeneità attorno a valori bassi nel primo pannello, le due zone con picchi di velocità elevatissimi nel secondo pannello, la diffusa eterogeneità del terzo pannello, e i valori bassissimi e uniformi dell'ultimo pannello.

1.2.2. Analisi della vulnerabilità sismica di Palazzo Donghi dell'Università di Padova: studio globale e verifica locale dei macroelementi – Mattiello E. (2013)

L'edificio è situato a Padova e risale ai primi anni del Novecento, edificato attorno all'anno 1913. Sono state seguite sei indagini soniche su muratura portante esterna ed interna facendo attenzione a considerare le due direzioni principali in cui si sviluppa l'edificio. Vengono riportate nella pianta sottostante le posizioni in cui sono state effettuate le sei prove.



Figura 1.2. 7 - pianta

Tutti i pannelli murari analizzati sono in muratura in mattoni pieni e malta di calce con intonaco da entrambi i lati.

La prova S₁ è stata eseguita su una porzione di muratura portante interna di 61,5 cm di spessore secondo una griglia di 6x80 cm divisa in 4 righe e 5 colonne distanti tra loro 20 cm. La prova ha fornito una velocità media di 2450,13 m/s, con velocità minima 517 m/s e massima 4220 m/s. Nel pannello sono state registrate velocità molto differenti tra loro, e questo è confermato dal CoV risultante che è pari al 52%.

La prova S₂ è stata eseguita su una muratura spessa 46,5 cm attraverso una griglia 8x80 cm e ha dato come risultati una velocità media pari a 2693 m/s, minima 1620 m/s e massima 4790 m/s, indici di una muratura in ottimo stato. Il CoV risultante è pari al 21%, indice di un pannello discretamente omogeneo.

La prova S₃ è stata eseguita su un pannello spesso 43 cm attraverso una griglia 8x80 cm, con velocità media risultante pari a 2410 m/s, minima 1650 m/s e massima 3020 m/s, con un CoV del 12%, indice che questa porzione di murature è molto omogenea.

La prova S₄ è stata eseguita su una griglia 6x80 cm tracciata su una muratura spessa 40 cm. La velocità media risultante è 2095 m/s, e anche in questo caso il pannello è piuttosto omogeneo, con velocità minima 1579 m/s, massima 3155 m/s e CoV 17%.

La prova S₅ è stata eseguita su una griglia più estesa di 8x100 cm, sempre con punti distanti tra loro 20 cm nelle due direzioni ortogonali. La muratura esaminata è spessa 41,3 cm, e i risultati sono una velocità media di 1970 m/s, massima 3010 m/s, minima 767 m/s e CoV 34%. In questo caso il pannello risulta essere piuttosto disomogeneo.

La prova S₆ è stata eseguita su una muratura spessa 41,5 cm secondo una griglia 8x80 cm. La prova ha fornito una velocità media risultante pari a 1997 m/s, una minima di 1232 m/s e una massima di 2690 m/s, con un CoV del 16%, indice quindi di un pannello abbastanza omogeneo.

In tutti questi sei pannelli esaminati le velocità medie sono prossime o superiori ai 2000 m/s, quindi si può affermare che si trovano in un ottimo stato di conservazione. Inoltre solo nella S₁ ci sono alcuni punti con valori di velocità sonora bassi, mentre negli altri pannelli anche le velocità minime sono abbastanza elevate.

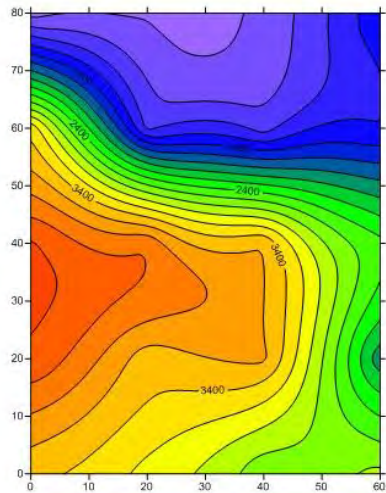


Figura 1.2. 8 - Grafico distribuzione vel soniche S1

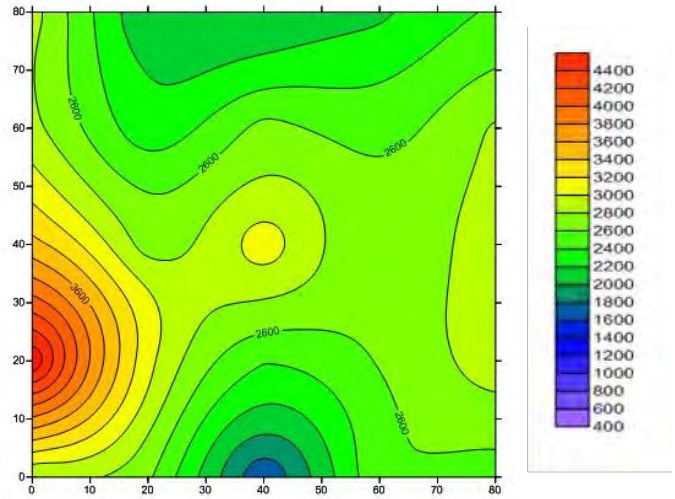


Figura 1.2. 9 - Grafico distribuzione vel soniche S2

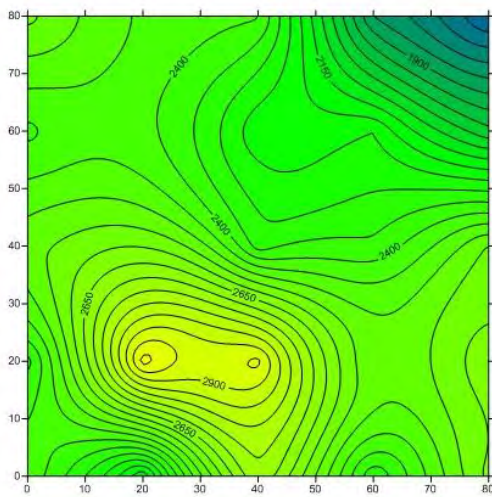


Figura 1.2. 10 - Grafico distribuzione vel soniche S3

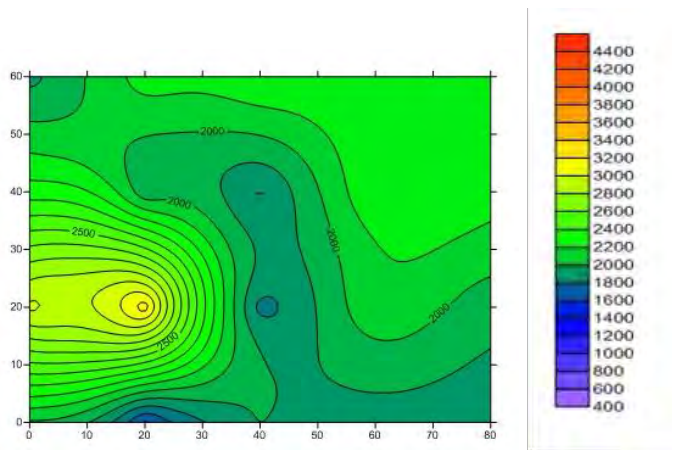


Figura 1.2. 11 - Grafico distribuzione vel soniche S4

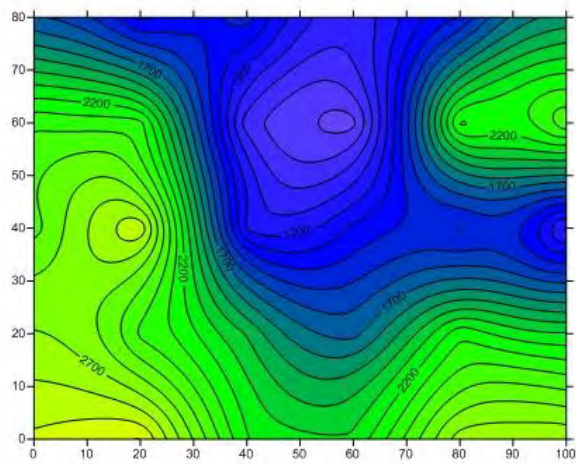


Figura 1.2. 12 - Grafico distribuzione vel soniche S5

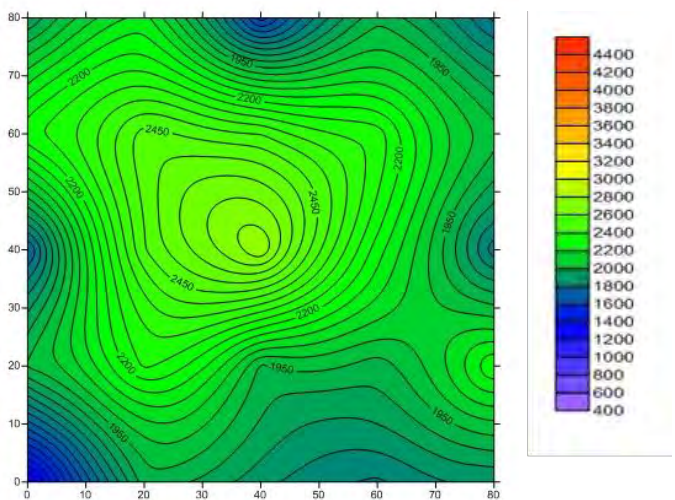


Figura 1.2. 13 - Grafico distribuzione vel soniche S6

1.2.3. Analisi di vulnerabilità sismica: Istituti Anatomici dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi – Rodofile E. (2013)

Gli istituti sorgono in via G. Falloppio e via A. Gabelli e sono stati costruiti nel 1919 su progetto dell'architetto Guido Fondelli. In questi Istituti è stata effettuata un'approfondita campagna di 11 indagini soniche dirette, delle quali vengono riportati i risultati nella seguente tabella. Tutti i campi analizzati sono in muratura in mattoni pieni e malta di calce.

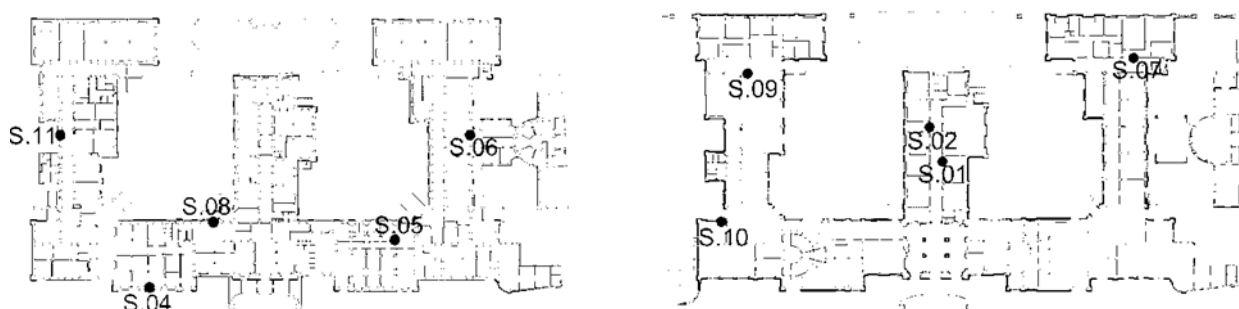


Figura 1.2. 14 - piante

PROVA	SPESSORE [m]	GRIGLIA [cm]	VEL MEDIA [m/s]	VEL MAX [m/s]	VEL MIN [m/s]	CoV [%]
S ₁	0,43	80x80	2361	3159	824	32%
S ₂	0,42	80x80	2928	3406	2380	10%
S ₃	0,42	80x80	2804	3077	2504	6%
S ₄	1,66	60x40	2104	2448	1743	29%
S ₅	0,90	80x80	1266	2227	469	44%
S ₆	0,84	80x80	1169	1576	905	13%
S ₇	0,43	80x80	2778	4061	1791	15%
S ₈	0,75	80x80	2659	3857	2269	14%
S ₉	0,75	80x80	2126	2879	1381	14%
S ₁₀	0,45	80x80	1408	2019	700	25%
S ₁₁	0,85	80x80	1749	2086	1461	9%

Tabella 1.2. 3- Risultati prove

Si nota come solo i campi 5, 6 e 10 presentino velocità medie basse indici di muratura in cattivo stato di conservazione o con presenza di vuoti, ma sono comunque superiori ai 1000 m/s. Dal punto di vista dell'omogeneità dei pannelli, opposte sono le situazioni dei pannelli 3 e 11, molto omogenei, rispetto al pannello 5, con un CoV del 44%, indice di muratura fortemente eterogenea. Nei grafici di distribuzione di velocità sonora seguenti sono apprezzabili visivamente queste considerazioni. Molto interessante è il grafico di distribuzione di velocità sonore della S₁, in cui si nota molto chiaramente una fascia

verticale con velocità molto inferiori al resto del pannello. Questo molto probabilmente indica un vuoto nella muratura in quella zona, come ad esempio potrebbe essere una canna fumaria nascosta all'interno dello spessore murario.

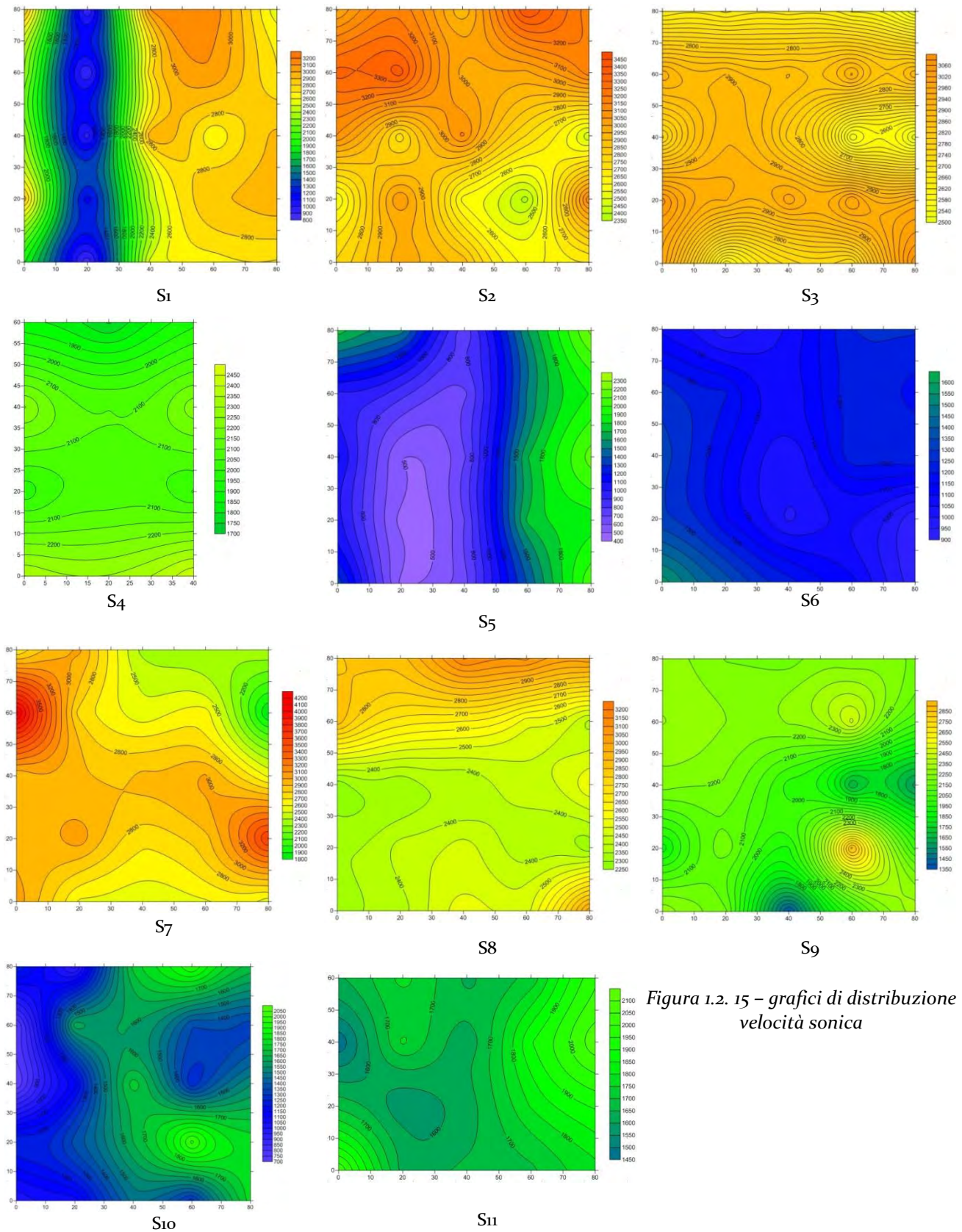


Figura 1.2. 15 – grafici di distribuzione velocità sonica

1.2.4. Analisi della vulnerabilità sismica: Istituto di Fisica "Galileo Galilei" dell'Università di Padova. Indagini strutturali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi – Pegoraro M. (2013)

L'Istituto Galileo Galilei, sede della facoltà di Fisica, è situato a Padova e la sua costruzione risale agli anni Quaranta del diciannovesimo secolo.

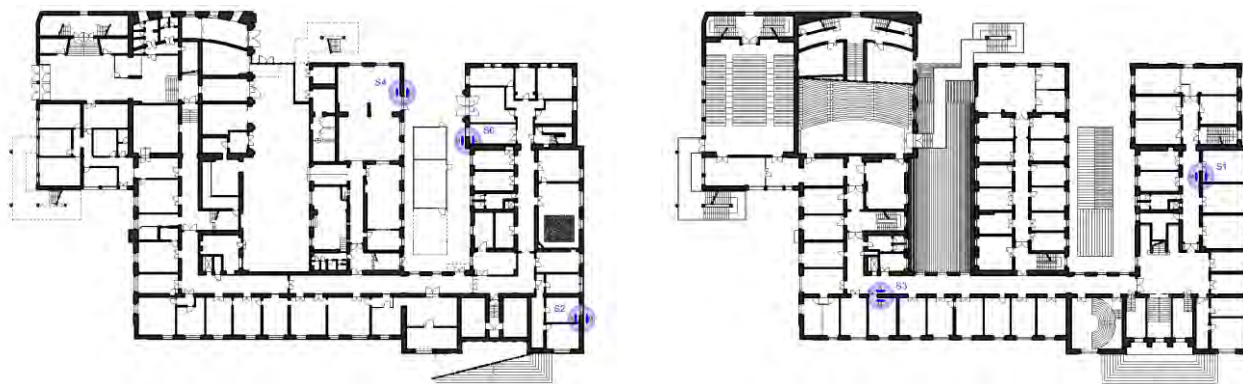


Figura 1.2. 16 - piante

In questo lavoro di valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio sono state effettuate, al fine di valutare la qualità della muratura, 6 prove soniche dirette su pannelli di muratura in mattoni pieni e malta di calce. La loro localizzazione è visibile nelle piante sovrastanti.

La prova S₁ è stata eseguita su una griglia di 80x80 cm composta da 25 punti suddivisi in 5 righe e 5 colonne distanti tra loro 20 cm, disegnata su una muratura di 42 cm di spessore. La velocità media risultante è pari a 1967 m/s, mentre i valori minimi e massimi registrati sono rispettivamente 1482 m/s e 3276 m/s. Il CoV risultante è pari al 21%, indice di un pannello discretamente omogeneo. I valori di velocità registrati indicano una muratura di buona consistenza e in buono stato di conservazione, senza particolari vuoti o distacchi.

La prova S₂ è stata eseguita su una muratura spessa 58 cm, sempre utilizzando la stessa griglia di 25 punti. I risultati anche in questo caso sono buoni, con velocità minima 1332 m/s, massima 2065 m/s, media 1774 m/s e CoV 11%, segnale della marcata omogeneità di questa porzione di muratura indagata.

La prova S₃ è stata eseguita su una muratura spessa 43 cm attraverso una griglia 40x80 cm composta da 5 righe e 3 colonne distanti tra loro 20 cm. La velocità media ottenuta è pari a 1783 m/s, con valore massimo 2304 m/s e minimo 1255 m/s. Anche in questo caso il CoV, pari al 16%, indica una buona omogeneità della muratura.

La prova S₄, eseguita su una griglia 60x80 cm composta da 5 righe e 4 colonne distanti 20 cm tra loro, ha prodotto risultati molto simili alla precedente, con velocità media 1863 m/s, massima 2300 m/s, minima 1395 m/s, e CoV 13%.

La prova S5 invece, realizzata su una muratura di 43 cm di spessore attraverso una griglia 40x40 cm (3 righe e 3 colonne), ha portato a risultati discordanti. La velocità minima è infatti pari a 281 m/s mentre la massima è 1656 m/s, con conseguente CoV del 51%. La velocità media trovata è pari a 725 m/s, quindi questo pannello analizzato risulta molto eterogeneo e in pessimo stato di conservazione.

La prova S6, realizzata attraverso una griglia 40x80 cm disegnata su una muratura spessa 59 cm ha riportato i risultati migliori, con velocità media 2008 m/s, minima 1350 m/s e massima 2589 m/s. Il CoV in questo caso è pari al 19%, relativamente basso.

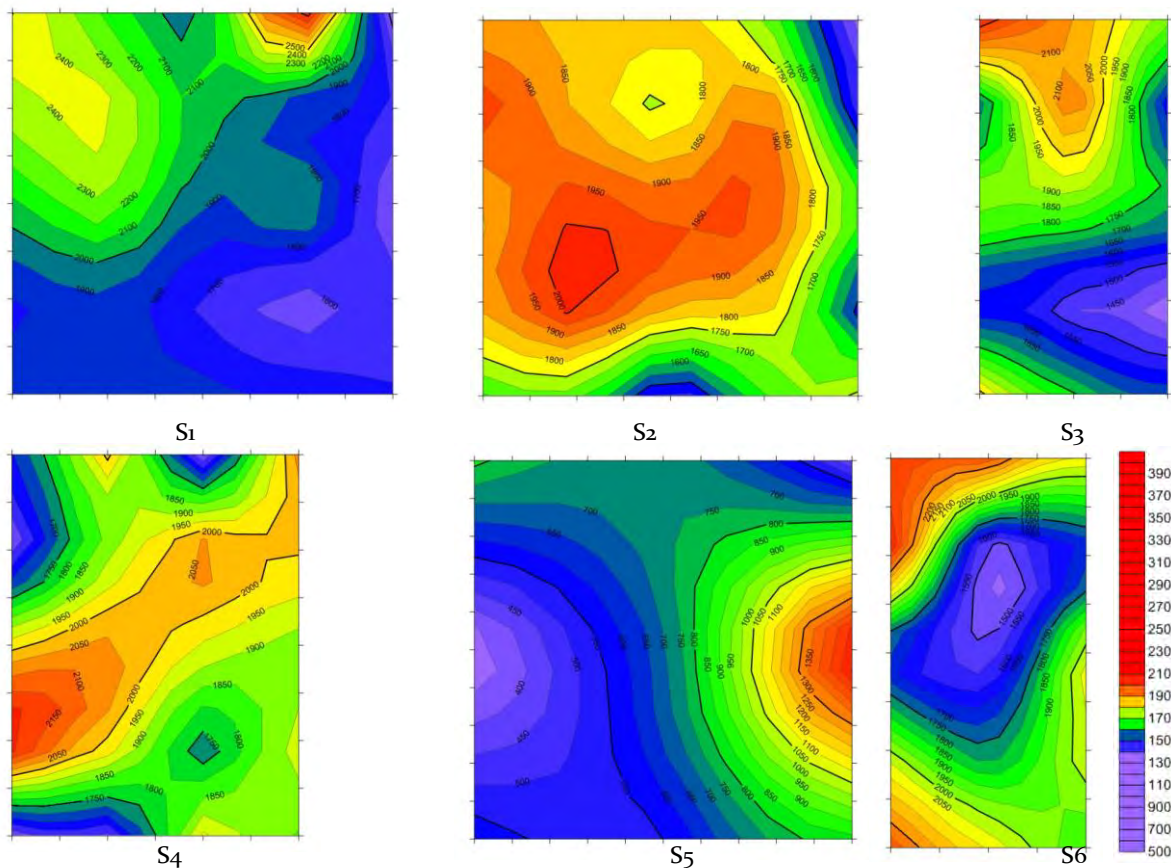


Figura 1.2. 17 - grafici di distribuzione di velocità soniche

1.2.5. Indagini conoscitive e analisi di vulnerabilità sismica del complesso dell'Orto Botanico di Padova: la Casa del Prefetto e le Serre – Martini A. (2014)

Il complesso è situato a Padova e la sua costruzione spazia tra il 1600 e il 1800. In questo sito sono state programmate 4 indagini soniche dirette su porzioni di muratura tipologicamente uguali, essendo in mattoni pieni e malta di calce, ma risalenti ad epoche diverse. La S1 è quella che è stata eseguita sulla muratura più antica del complesso, facente parte della Casa del Prefetto, che risale al XVII secolo.

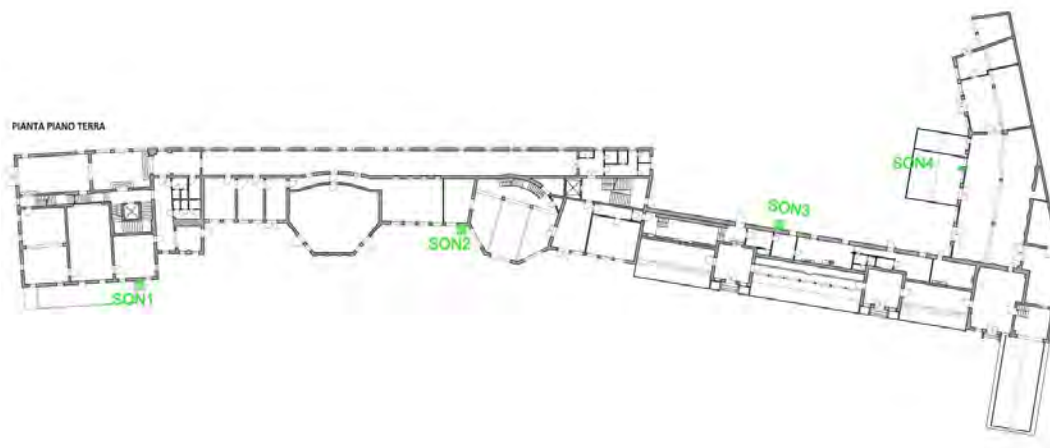


Figura 1.2. 18 - Pianta del complesso – localizzazione campi prova

La prova S₁ è stata eseguita secondo una griglia 60x60 cm composta da 4 righe e 4 colonne di punti distanti tra loro 20 cm, tracciata in una muratura spessa 40 cm. La velocità media risultante è pari a 1510 m/s, con valore minimo molto basso pari a 445 m/s e massimo 3420 m/s. I valori registrati sono tra loro molto discordanti, come conferma il valore molto elevato del CoV pari al 58%.

La prova S₂ è stata effettuata su una griglia 80x80 cm composta da 25 punti, in una muratura spessa 40 cm. I risultati riportano una velocità media pari a 1234 m/s, piuttosto bassa per questa tipologia, massima 2387 m/s e minima 708 m/s. In questo caso i valori sono più omogenei con CoV pari al 38%.

La prova S₃ è stata eseguita su una parte intonacata solo da un lato, di spessore 55 cm, attraverso una griglia di 80x80 cm. I risultati ottenuti sono tipici di una muratura di scarsa consistenza, con valore minimo 625 m/s, massimo 1339, e velocità media pari a 919 m/s, mentre il CoV è del 25%. Si nota come in questo pannello anche la velocità più elevata sia inferiore agli standard previsti per la tipologia, indicando un cattivo stato della muratura con possibile presenza di vuoti o distacchi.

La prova S₄ è stata eseguita su una griglia ridotta di 20x40 cm con soli 6 punti di acquisizione, fattore che bisogna considerare nell'analisi dei risultati, Lo spessore di questo pannello è di 46 cm. I risultati ottenuti sono una velocità media di 1090 m/s, minima molto bassa pari a 372 m/s e velocità massima 2298 m/s. L'elevato valore del CoV, pari al 61%, è frutto anche dello scarso numero di dati.

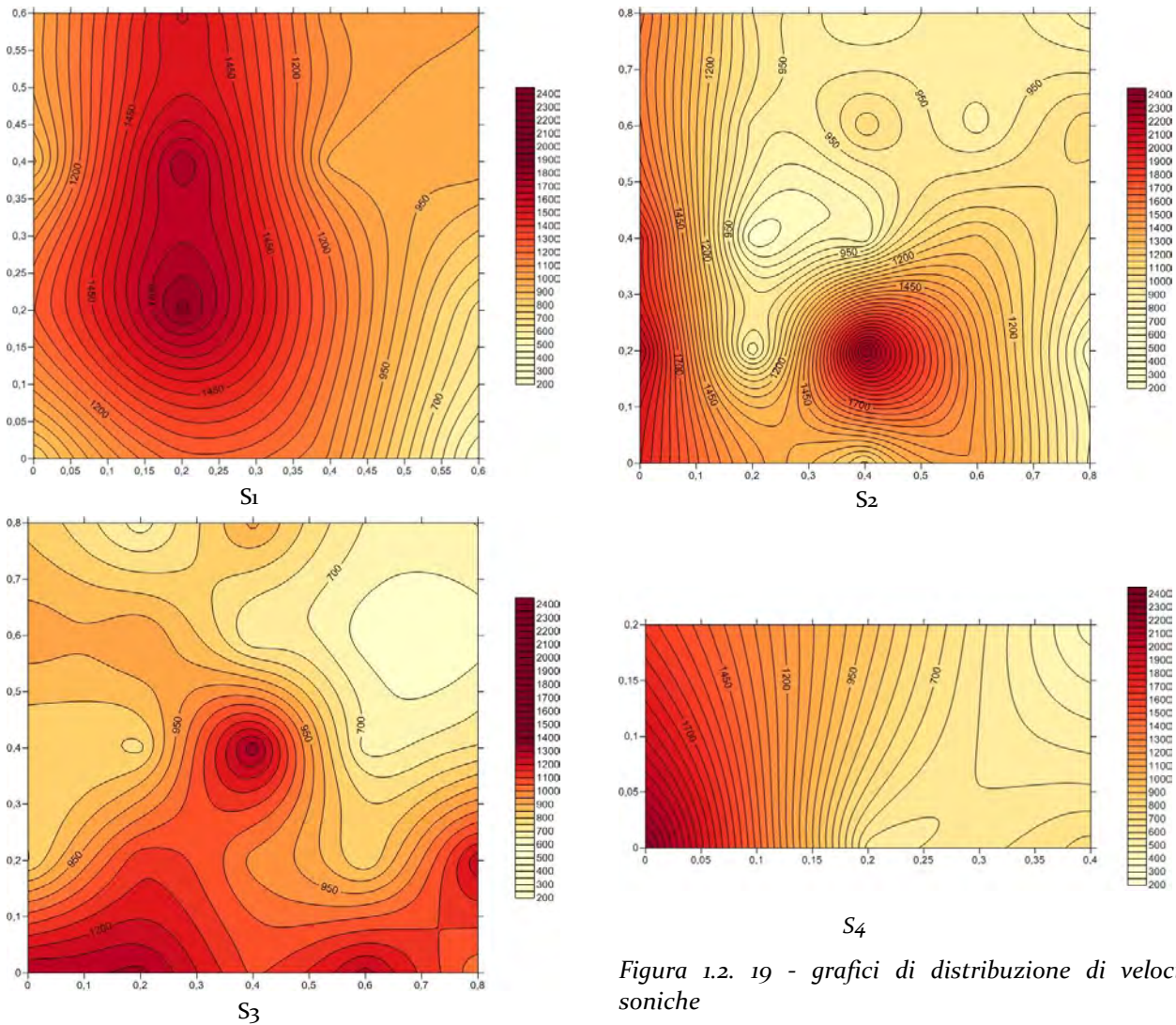


Figura 1.2. 19 - grafici di distribuzione di velocità soniche

1.2.6. Analisi di vulnerabilità sismica finalizzata agli interventi di miglioramento strutturale di Palazzo Ca' Borin – Pengo M. (2013)

L'edificio, situato a Padova, risulta costruito attorno alla metà del dodicesimo secolo. Per l'analisi della vulnerabilità sismica di questo edificio e per la qualificazione delle sue murature, alcune delle quali erano soltanto ipotizzate essere in mattoni pieni e malta di calce, sono state eseguite 6 indagini soniche dirette.

PROVA	SPESSORE [m]	GRIGLIA [cm]	VEL MEDIA [m/s]	VEL MAX [m/s]	VEL MIN [m/s]	CoV [%]
S1	0,33	80x80	2967	3781	1781	16%
S2	0,27	60x80	2245	3236	1366	20%
S3	0,35	80x40	1281	2330	539	41%
S4	0,30	60x40	1386	3090	463	54%
S5	0,40	80x80	2019	5100	679	55%
S6	0,52	80x80	1475	2083	781	18%

Tabella 1.2. 4 - risultati indagini

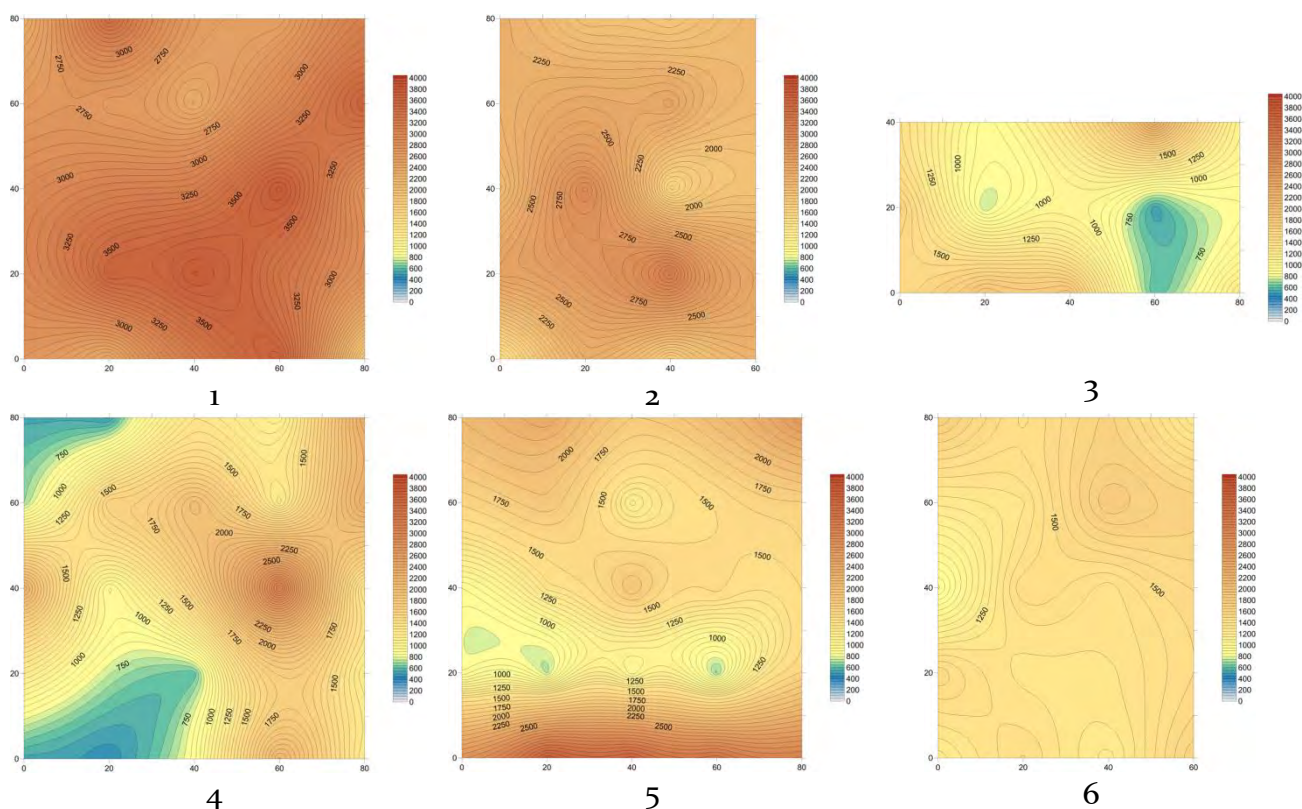


Figura 1.2. 20 - grafici di distribuzione delle velocità soniche

I risultati sono abbastanza discordanti tra loro, ma il valore molto elevato di velocità media riscontrato nella S₁ viene spiegato, dopo un’appropriata indagine storica, da un intervento di rifoderà che è stato eseguito su quella muratura negli anni Settanta, oltre al fatto che quella porzione di edificio risulta costruita in epoca più recente rispetto alle altre. Questo conferma la necessità di analizzare i risultati e rivederli in luce dei dati raccolti con la ricerca storica.

In nessun pannello comunque sono stati registrati valori medi troppo bassi, mentre non tutti risultano omogenei, come dimostra l’elevato valore del CoV per i campi 4 e 5.

Con i precedenti grafici di distribuzione di velocità sonica si può osservare come tutti i pannelli siano in buono stato con velocità abbastanza elevate e abbastanza omogenee, mentre si notano zone di discontinuità con valori di velocità molto basse nel campo 4, dove si può ipotizzare la presenza di vuoti o distacchi.

1.2.7. Analisi della vulnerabilità sismica di edifici in aggregato: Palazzo Levi Cases, Università di Padova – Dante M. (2013)

Il palazzo analizzato risale agli inizi del diciannovesimo secolo ed è situato a Padova. In questo sito sono state effettuate sei prove soniche in trasparenza in diverse porzioni dell’edificio.

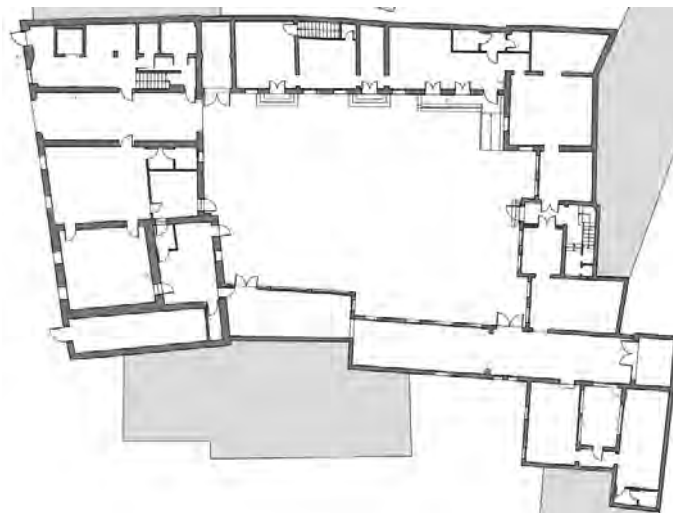


Figura 1.2. 21 - pianta

La prova S₁ è stata eseguita su una griglia di 60x80 cm divisa in 4 righe e 5 colonne, tracciata su una muratura spessa 33 cm. La velocità media risultante è pari a 935 m/s, con valori minimi e massimi rispettivamente 452 m/s e 1551 m/s e CoV abbastanza elevato pari al 33%.

La prova S₂ è stata eseguita attraverso una griglia rettangolare 40x100 cm, con 6 righe e 3 colonne di punti distanti 20 cm tra loro, tracciata su una muratura di 62 cm di spessore. Anche in questo caso le velocità registrate sono abbastanza basse, con valore minimo 508 m/s, massimo 1307 m/s e velocità media 1050 m/s. Questa porzione analizzata risulta abbastanza omogenea attorno a valori bassi, con CoV del 17%.

La prova S₃ è stata eseguita su una muratura spessa 43 cm attraverso una griglia 60x80 cm, e ha fatto registrare una velocità media di 2594 m/s, con valore minimo 2017 m/s, anch'esso molto elevato, e valore massimo 3161 m/s. Ulteriore fattore positivo di questo pannello è il basso CoV, pari all'11%, indice di un pannello molto omogeneo.

Anche prova S₄ è stata eseguita con una griglia 60x80 cm, su una muratura spessa 47 cm. Anche in questo caso i risultati sono ottimi, con velocità media 2869 m/s, velocità minima e massima rispettivamente 1927 m/s e 3563 m/s, e CoV del 14%.

La prova S₅ è stata eseguita sulla classica griglia 80x80 cm di 5 righe e 5 colonne, realizzata su una muratura spessa 32,5 cm. La velocità media risultante da queste acquisizioni è la più bassa di tutta la sperimentazione, pari a 870 m/s, con valore minimo 491 m/s e massimo 1398 m/s, con CoV del 23%.

La prova S₆, eseguita su una muratura spessa 69 cm con una griglia di acquisizione di 80x80 cm, ha fornito una velocità media di 1039 m/s, velocità minima 504 m/s e massima 1959 m/s. Questo pannello è risultato anche fortemente eterogeneo, con CoV del 40 %.

Nei seguenti grafici di distribuzione delle velocità soniche si apprezzano visivamente i risultati, come la netta differenza tra i pannelli in buono stato, corrispondenti ai campi 3 e 4, e i restanti campi prova. Si nota anche la presenza di disomogeneità nell'ultimo pannello,

come dimostrato dal valore elevato del CoV e come visibile con marcate differenze cromatiche in corrispondenza dei picchi di velocità.

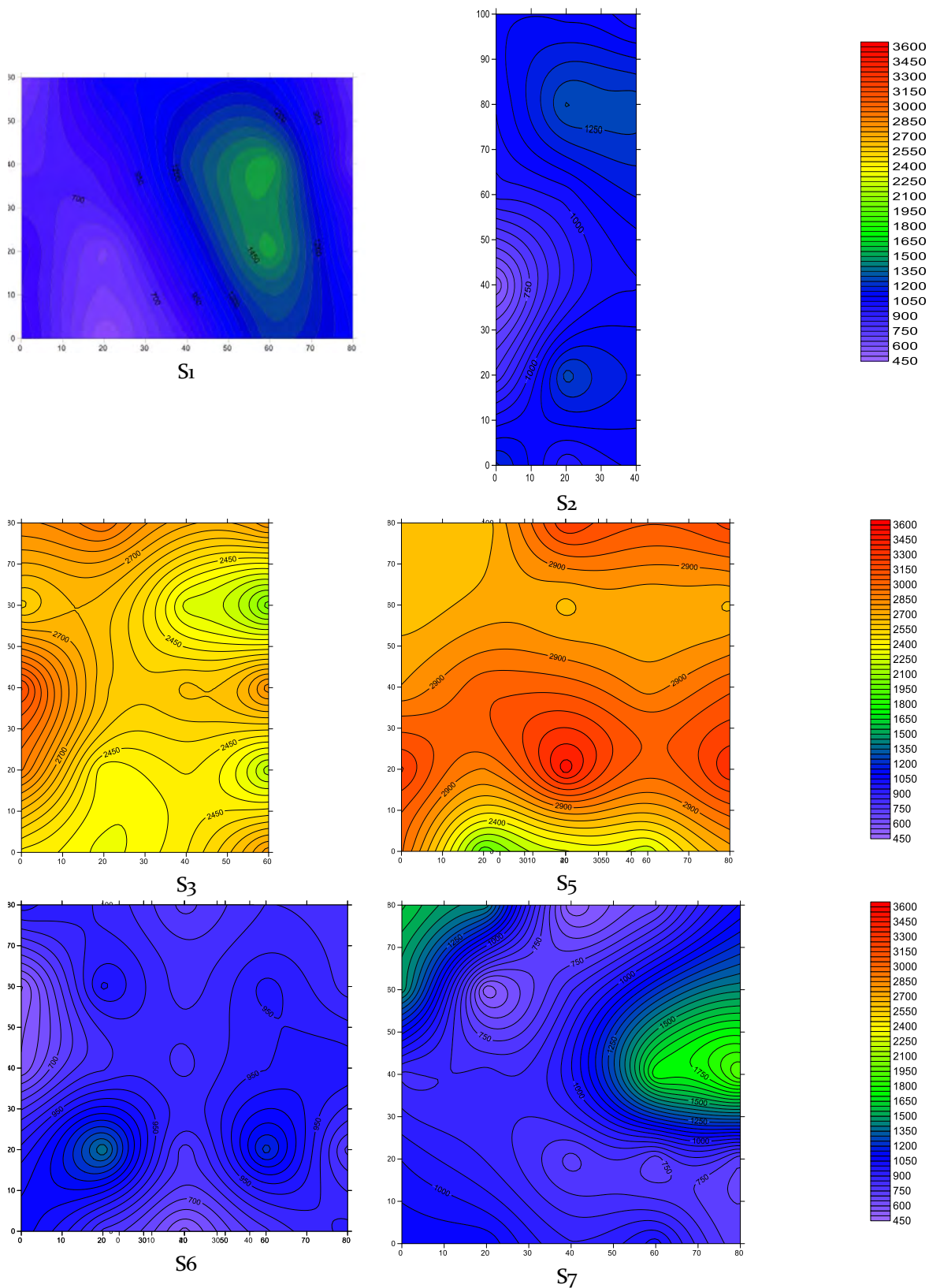


Figura 1.2. 22 – grafici di distribuzione delle velocità soniche

1.2.8. Analisi di vulnerabilità sismica degli edifici dell'Università di Padova, Palazzo Wollemborg – Bortoletto A. (2013)

L'edificio, situato a Padova, è adiacente a Palazzo Cà Borin, e risulta edificato agli inizi del diciannovesimo secolo. In questa campagna sperimentale sono state programmate 7 prove soniche in trasparenza per la qualificazione di murature significative dell'edificio, localizzate come visibile nelle piante seguenti.



Figura 1.2. 23 - piante localizzazione prove

PROVA	SPESSORE [m]	GRIGLIA [cm]	VEL MEDIA [m/s]	VEL MAX [m/s]	VEL MIN [m/s]	CoV [%]
S1	0,29	60x80	1117	3284	448	64%
S2	0,32	80x40	943	1872	440	35%
S3	0,47	60x40	546	1013	343	31%
S4	0,30	60x40	2020	2988	543	29%
S5	0,49	60x80	1153	1880	791	25%
S6	0,52	80x80	2982	4146	1608	25%
S7	0,57	40x80	596	1062	316	35%

Tabella 1.2. 5 - risultati indagini

I risultati mostrano come vi siano murature molto diverse tra loro all'interno di questo edificio. Esse sono da considerarsi tutte in mattoni pieni e malta di calce, ma i valori medi di velocità sonica sono in alcuni casi molto discordanti, come ad esempio per quanto riguarda i pannelli 3 e 7, che presentano velocità medi bassissima indice di una muratura fortemente

danneggiata o comprendente una gran quantità di vuoti. I campi 4 e 6 invece presentano velocità medie superiori ai 2000 m/s e sono quindi da considerarsi murature consistenti e in ottimo stato di conservazione. Dai seguenti grafici di distribuzione di velocità sonora si possono osservare graficamente i risultati, anche per quanto riguarda l'omogeneità dei pannelli, espressa dal CoV, che in alcuni casi è molto elevato, come nel campo 1 in cui raggiunge il 64%, fattore che si può riscontrare dal grafico relativo.

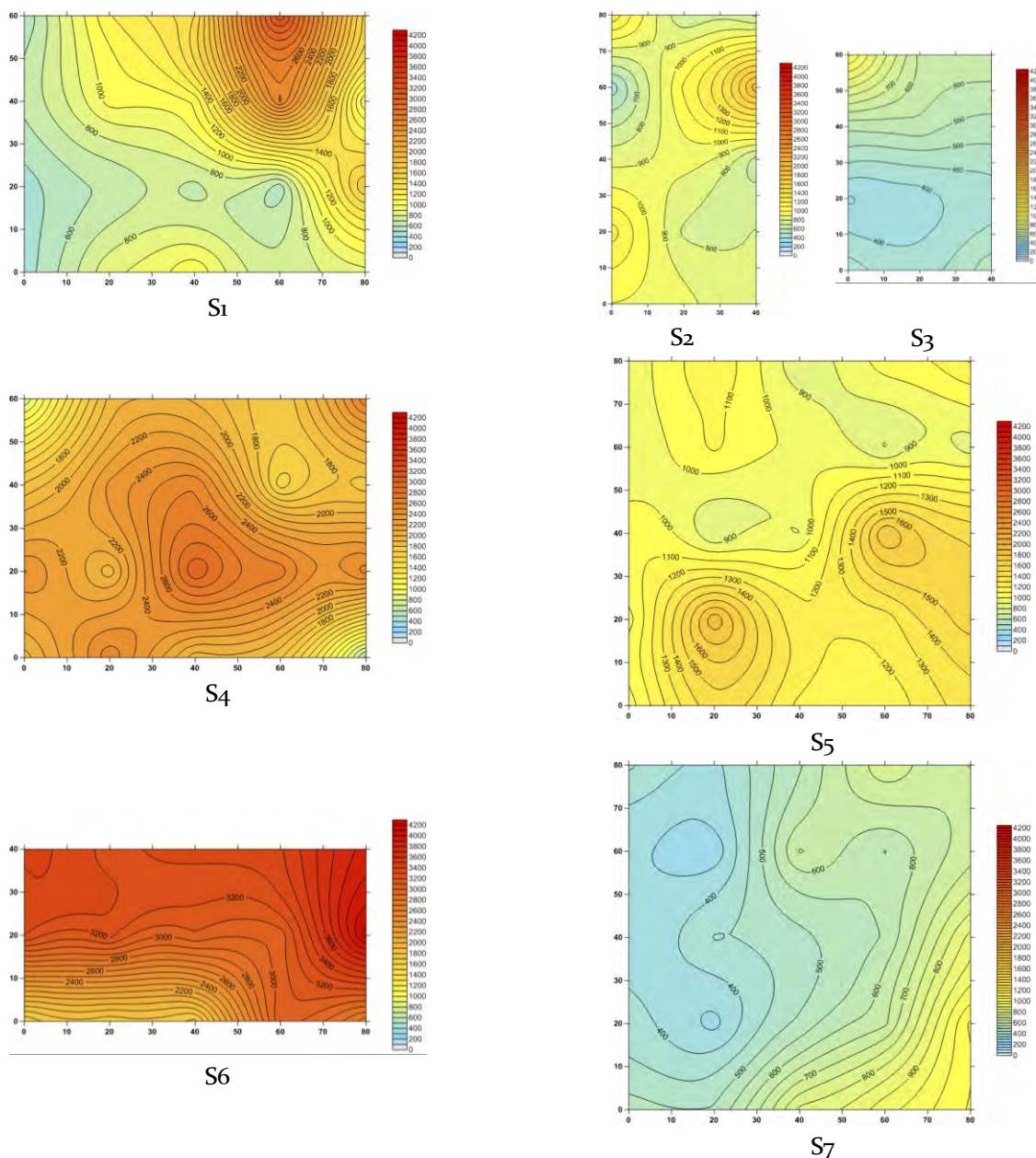


Figura 1.2. 24 - grafici di distribuzione delle velocità sonore

1.2.9. Analisi di vulnerabilità sismica: indagini strumentali e analisi locali dei cinematismi per macroelementi. Palazzo Liviano – Università di Padova – Boin M. (2013)

Il palazzo, oggi sede del Dipartimento di Lettere e Filosofia dell'Università di Padova, è stato costruito tra il 1932 e il 1943 nel centro della città incorporando i resti dell'antico palazzo del Capitano.



Figura 1.2. 25 - pianta localizzazione prove

Per questa campagna sperimentale sono state eseguite 5 indagini soniche in trasparenza per valutare lo stato di conservazione delle murature in diverse zone della struttura. Tutte le porzioni di muratura esaminate ricadono nella tipologia in mattoni pieni e malta di calce. La prova S₁ è stata eseguita secondo una griglia 60x80 cm in una muratura spessa 57 cm, ed ha fornito una velocità media di 1757 m/s, minima 1203 m/s e massima 2170 m/s. Oltre ai buoni valori di velocità riscontrati, senza zone di scarsa consistenza, anche il CoV è basso, pari al 14%, indice di una muratura omogenea. La prova S₂, eseguita su una muratura spessa 58 cm attraverso una griglia 80x80 cm, ha fornito velocità media simile alla precedente e pari a 1738 m/s, ma con valori minimo e massimo piuttosto distanti tra loro, rispettivamente 837 m/s e 2474 m/s. Questo trova conferma nel valore abbastanza alto del CoV, pari al 25%. La prova S₃ è stata eseguita con una griglia 80x80 cm disegnata su una muratura spessa 30 cm. I risultati ottenuti sono stati ottimi, con velocità media 2925 m/s, massima 3685 m/s e minima 1657 m/s, con CoV del 19%. La prova che ha fornito i risultati migliori è stata la S₄, eseguita secondo una griglia 80x80 cm su una muratura spessa 45 cm. In questo caso la velocità minima è addirittura pari a 2837 m/s, con valore massimo 3545 m/s e media 2605 m/s, indice di muratura di ottima consistenza. Anche il CoV è buono e pari al 15%. La prova S₅ è stata eseguita su una muratura in corrispondenza di un pilastro, quindi con spessore molto elevato pari a 168 cm, sempre attraverso una griglia 80x80 cm. La velocità media risultante è pari a 1850 m/s con valori comunque sempre i 1000 m/s, con valore minimo 1087 m/s e

massimo 2356 m/s. Da seguenti grafici di distribuzione delle velocità soniche si possono apprezzare visivamente i risultati, con delle interessanti particolarità in evidenza, che dimostrano l'ottimo utilizzo che si può fare delle indagini soniche per quanto riguarda l'indagine di murature attraverso metodi non distruttivi. Infatti, oltre agli elevati valori di velocità che si osservano nei pannelli 3 e 4, si nota chiaramente nel pannello 2 una fascia verticale con velocità chiaramente inferiori al resto del pannello, indice di una certa presenza di vuoti. In questo modo si può ipotizzare anche senza riscontri visivi la presenza di una canna fumaria o di qualche altra tipologia di vuoto all'interno dello spessore murario in quella posizione. Lo stesso, anche se in maniera meno marcata, si può osservare nell'ultimo pannello.

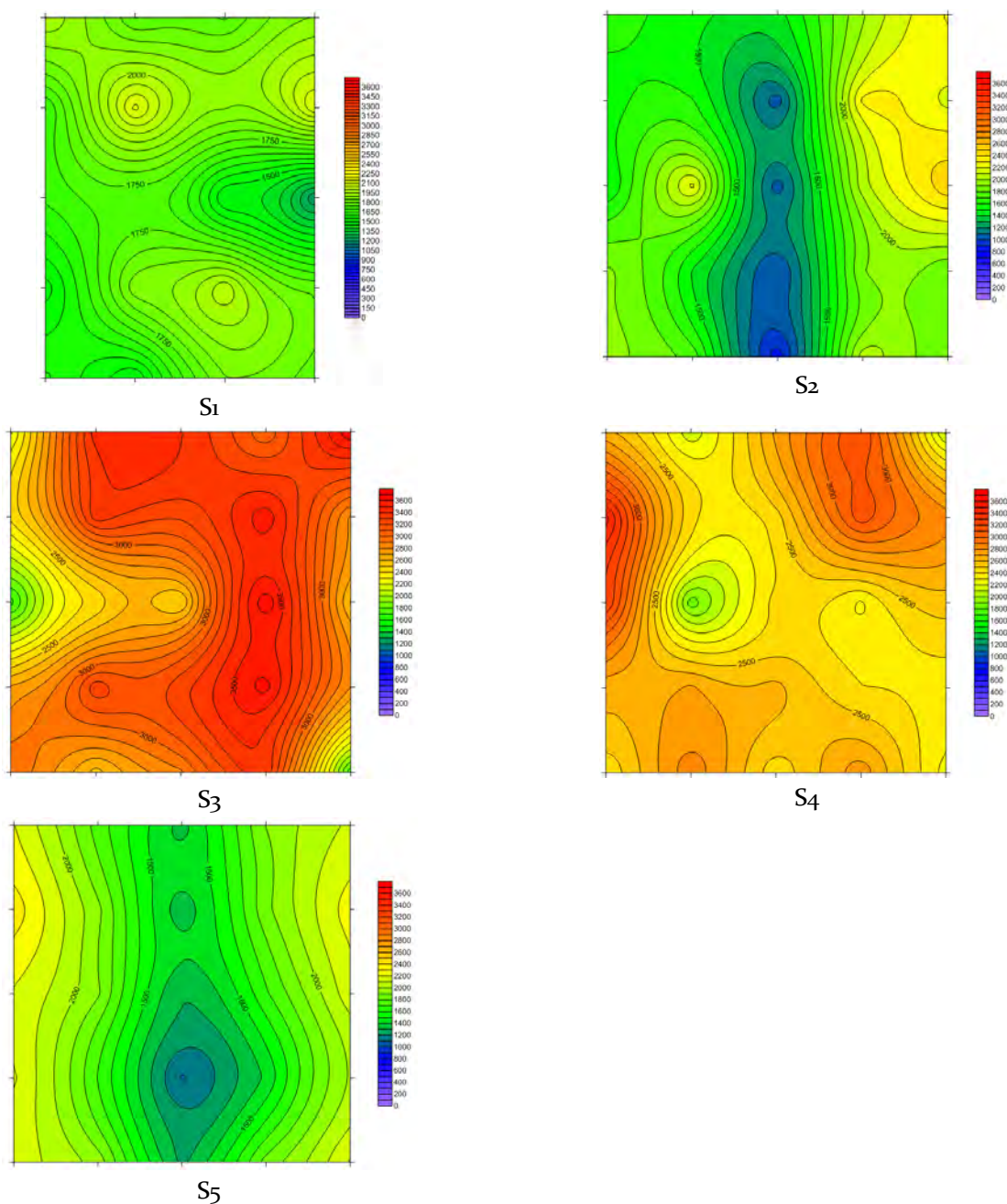


Figura 1.2. 26 - grafici di distribuzione delle velocità soniche

1.2.10. Verifica della sicurezza sismica del Museo Archeologico Nazionale di Arezzo –Università degli Studi di Padova (2014)

Il Museo Archeologico Statale “Gaio Clinio Mecenate” è situato nel centro storico di Arezzo in corrispondenza dell'ex monastero di S. Bernardo. Edificato nel XIV sec. sui resti dell'anfiteatro romano risalente a metà del II secolo d.C., fu restaurato ed ampliato tra il 1929 e il 1934. I bombardamenti del dicembre 1943 e gennaio 1944 distruggono quasi internamente la chiesa, il campanile appena completato e il chiostro settentrionale.



In questa campagna sperimentale sono state eseguite 8 indagini soniche in trasparenza in diverse porzioni di muratura dislocate su tre livelli dell'edificio. La prova S5, situata al Piano Seminterrato, è stata eseguita su una muratura in mattoni pieni e malta di calce. Le restanti, divise tra Piano Terra (pannelli 1, 2, 3, 4) e Piano Primo (pannelli 6, 7, 8), sono tutte state eseguite su porzioni di muratura in pietra a conci sbazzati. Infatti la prova S5 è quella che presenta velocità media maggiore, pari a 1631 m/s, mentre le restanti presentano velocità medie comprese tra la minima di 511 m/s in corrispondenza del pannello 6 al piano primo e la massima di 1338 m/s in corrispondenza del pannello 3 al piano terra.

1.2.11. Verifica della sicurezza sismica del Museo Statale d'Arte Medievale e Moderna di Arezzo –Università degli Studi di Padova (2014)

Il Museo Statale d'Arte Medievale e Moderna è situato nel Palazzo Bruno Ciocchi nel centro della città di Arezzo. Fu eretto a metà del XV secolo sulle preesistenze delle abitazioni di una ricca famiglia. Il Museo fu sistemato definitivamente nel 1958, dopo una decina di anni di lavori resi necessari dal secondo conflitto mondiale e dalle trasformazioni subite dall'edificio che era stato adibito ad uffici e caserma. Ulteriori interventi furono eseguiti tra il 1977 e il 1994. In questa campagna sperimentale sono state effettuate 12 indagini soniche in trasparenza. I campi 1, 2, 3, 4 e 13 situati al Piano Terra, i campi 5, 6, 7, 11 e 12 al Piano Primo e i campi prova 9 e 10 al Piano Secondo. Tutte le murature indagate sono in pietra a spacco con buona tessitura e hanno portato risultati abbastanza diversificati, con velocità medie abbastanza discordanti tra i vari pannelli. Il valore minimo è stato registrato nel campo 3 e pari a 416 m/s mentre il valore massimo è stato registrato nel pannello 6 con valore medio pari a 1300 m/s.

1.2.12. Verifica della sicurezza sismica della Rocca di Gradara – Università degli Studi di Padova (2014)

La Rocca è situata nel comune di Gradara, nelle Marche.



Figura 1.2. 27 - vista aggregato

L'edificio è nato come fortezza militare nel XII secolo, ed ha subito modifiche ed ampliamenti, come costruzioni di nuove torri o di rinforzi, fino a metà del XV secolo. Dopo gli interventi di restauro eseguiti tra il 1463 e il 1750, la fortezza fu restaurata negli anni Venti del ventesimo secolo. A metà del xx secolo divenne Museo statale. Negli anni seguenti e fino a metà anni Novanta subì frequenti interventi di recupero, anche attraverso l'uso del cemento armato, fino al 2013 in cui furono restaurati alcuni solai anche attraverso materiali fibrorinforzati e acciaio.

In questa campagna sperimentale sono state effettuate 10 indagini soniche dirette su murature tutte della stessa tipologia in mattoni pieni e malta di calce. I diversi campi prova sono dislocati su tre livelli, dei quali i campi 1, 2, 3 e 4 al Piano Terra, i campi 1°, 1B, 1C e 1D al Piano Primo e i campi 2A e 2B al Piano Secondo.

I campi 2, 3, 4 e 2B hanno fornito velocità media inferiore ai 1000 m/s, con valore minimo 659 m/s nel campo 3, mentre i valori maggiori, superiori ai 2000 m/s si sono registrati nei campi 1, 1C e 1D, con valore massimo 2445 m/s nel campo 1C.

1.2.13. Verifica della sicurezza sismica del Museo Archeologico di Ascoli Piceno – Università degli Studi di Padova (2014)

Il museo è situato nel centro storico della città di Ascoli Piceno, nelle Marche. Il palazzo in cui ha sede il Museo è di stato edificato a metà del Cinquecento, edificato su preesistenze del XIII-XIV secolo, e sembra non aver subito modifiche nel tempo. Nel 1958 l'edificio, in stato di forte degrado, viene acquistato dallo stato e sottoposto ad interventi di restauro svolti ininterrottamente fino al 1981.

In questa campagna sperimentale sono state eseguite 10 indagini soniche in modalità diretta. Tutti i pannelli analizzati corrispondono alla tipologia di muratura in pietra a spacco con buona tessitura.

I campi prova sono suddivisi tra Piano Terra, con i campi 1, 2, 3 e 4, Piano Primo, con i campi 5, 6, 7 e 8, e Piano Secondo, con i campi 9 e 10.

I risultati sono piuttosto eterogenei, con 3 campi prova con velocità media inferiore ai 1000 m/s, con minimo pari a 433 m/s nel campo 5, tutti gli altri valori compresi tra i 1000 m/s e i 2000 m/s ad eccezione del valore massimo di 2470 m/s in corrispondenza del campo 7. Quest'ultima velocità è troppo elevata per la tipologia, e anche dalla ricerca storica trovare una spiegazione nella possibile presenza di una certa quantità di mattoni, anche se in percentuale ridotta, in questo pannello murario.

1.2.14. Verifica della sicurezza sismica del Palazzo Ducale di Urbino – Università degli Studi di Padova (2014)

Il Palazzo Ducale, dove ha sede la Galleria Nazionale delle Marche, è situato nel centro storico del comune marchigiano di Urbino.



Figura 1.2. 28 - foto Palazzo Ducale

Il palazzo si sviluppa a partire dal 1459 come ampliamento di una modesta abitazione esistente, con successive annessioni nella fasi successive. Dalla fine del XIX secolo sono stati attuati numerosi interventi di consolidamento dell'edificio, gli ultimo dei quali sono tuttora in atto. In questo programma sperimentale sono state effettuate 13 indagini soniche in modalità diretta suddivise su quattro livelli, e tutte le murature indagate sono riconducibili alla tipologia in mattoni pieni e malta di calce. Al Piano Seminterrato è situato il campo 1, al Piano Terra i campi 2, 3, 4, 5, 6 e 7, al Piano Primo i campi 8,9 e 10, mentre al Piano Secondo i campi 11, 12 e 13. In quattro casi i valori di velocità media sono inferiori ai 1000 m/s, con

valore minimo pari a 501 m/s in corrispondenza della prova S2, mentre solo la prova 3 ha superato i 2000 m/s con un valore medio di 2231 m/s. Da sottolineare il fatto che i risultati della prova S8 non sono stati riportati perché poco attendibili a causa di un eccessivo rigonfiamento dell'intonaco.

1.3. Analisi dei dati

In totale sono state raccolte e catalogate 74 indagini soniche dirette per la caratterizzazione e qualificazione di murature in pietra e 76 per murature in mattoni. I dati di maggior interesse, quali valori di velocità minima, massima e media, deviazione standard e coefficiente di variazione sono stati raccolti in una tabella.

1.3.1. Murature in pietra

Nella seguente tabella sono stati riportati i dati raccolti per le murature in pietra.

MURATURE IN PIETRA									
Tip. Mur.	Sp. [m]	Intervallo di velocità [m/s]	Vel. media [m/s]	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località
I	0,57	308 ÷ 2586	790	499	63%	D1	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila
I	0,57	217 ÷ 2286	657	427	65%	D2	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila
I	0,51	411 ÷ 4217	1284	1048	82%	D3	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila
I	0,46	-	461	-		01-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,45	-	405	-		02-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,55	-	456	-		06-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,55	-	401	-		07-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,47	-	336	-		10-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,47	-	454	-		11-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,52	-	555	-		14-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,52	-	850	-		15-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,61	-	369	-		16-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,61	-	457	-		17-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,58	-	881	-		19-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	-	-
I	0,58	-	767	-		20-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	-	-

II	0,5	466 ÷ 2639	1011	576	57%	5I	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,5	423 ÷ 2783	1018	530	52%	7IT	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	433 ÷ 1190	668	178	27%	1B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	856 ÷ 3000	1826	639	35%	1C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	474 ÷ 1485	855	361	42%	1Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	295 ÷ 976	570	224	39%	1Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	682 ÷ 1704	1039	305	29%	2B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	955 ÷ 3000	2176	683	31%	2C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	299 ÷ 3000	900	682	76%	2Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,33	303 ÷ 1160	666	206	31%	2Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)
II	0,5	400 ÷ 3700	1413	961	68%	A6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	400 ÷ 3700	1048	714	68%	A5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	400 ÷ 2600	1158	663	57%	A4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	700 ÷ 2200	1206	390	32%	B6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	800 ÷ 2500	1529	710	46%	B5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	300 ÷ 2000	894	693	78%	B4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	300 ÷ 2000	1246	504	40%	C8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)

II	0,5	700 ÷ 2000	1021	279	27%	C7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	700 ÷ 1900	1118	329	29%	C6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,5	700 ÷ 1900	1043	187	18%	C5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	600 ÷ 2800	1326	831	63%	D6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	500 ÷ 2400	1082	573	53%	D5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	600 ÷ 2000	1250	460	37%	D4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	400 ÷ 3000	1200	739	62%	E8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	800 ÷ 3000	1504	606	40%	E7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	700 ÷ 2500	1485	487	33%	E6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,33	400 ÷ 2000	968	431	45%	E5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)
II	0,56	1655 ÷ 4353	2546	507	20%	S1	(Dalla Benetta, 2012)	Corte rurale	Bardolino(VR)
II	0,49	1673 ÷ 4193	2838	583	21%	S4	(Dalla Benetta, 2012)	Corte rurale	Bardolino(VR)
II	0,58	473 ÷ 1158	645	182	28%	S1	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	0,77	528 ÷ 1115	787	139	18%	S2	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	1,16	936 ÷ 1765	1339	230	17%	S3	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	1,11	401 ÷ 1279	864	247	29%	S4	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	0,57	262 ÷ 755	511	107	21%	S6	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	0,62	420 ÷ 1785	1115	331	30%	S7	(UNIPD)	Museo	Arezzo
II	0,83	639 ÷ 2139	1326	391	29%	S8	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	1,8	493 ÷ 740	619	97	16%	S4	(Bonvento, 2014)	Palazzo Cavalli	PD
III	0,70	625 ÷ 1824	1295	199	15%	S1	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,60	622 ÷ 1729	1171	291	25%	S2	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,77	566 ÷ 1775	1273	389	31%	S3	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,70	419 ÷ 2173	1246	487	39%	S4	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,69	158 ÷ 893	433	154	36%	S5	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,65	462 ÷ 1340	813	170	21%	S6	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,50	1274 ÷	2741	424	15%	S7	(UNIPD)	Museo	Ascoli

		3725							
III	0,71	226 ÷ 1625	559	380	68%	S8	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,50	313 ÷ 2972	1170	681	58%	S9	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,63	474 ÷ 3764	1598	729	46%	S10	(UNIPD)	Museo	Ascoli
III	0,86	678 ÷ 1601	1200	221	18%	S1	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,95	576 ÷ 1702	1091	363	33%	S2	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,48	176 ÷ 1076	419	209	50%	S3	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	1,12	664 ÷ 1797	1204	340	28%	S4	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,64	281 ÷ 1181	624	243	39%	S5	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,32	469 ÷ 2844	1301	645	50%	S6	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,55	220 ÷ 802	462	188	41%	S7	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,59	501 ÷ 1250	835	203	24%	S9	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,74	412 ÷ 1146	712	205	29%	S10	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,50	717 ÷ 1478	1077	231	21%	S11	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	0,52	545 ÷ 2002	1094	474	43%	S12	(UNIPD)	Museo	Arezzo
III	1,35	700 ÷ 1559	1057	300	28%	S13	(UNIPD)	Museo	Arezzo
Velocità media PIETRA = 1015 m/s; Dev. Standard media PIETRA = 423 m/s; CoV media PIETRA = 39%									

Tabella 1.3. 1 - database indagini soniche murature in pietra

Le indagini soniche hanno fornito una velocità media per le murature in pietra pari a 1015 m/s, con una deviazione standard media di 423 m/s e un coefficiente di variazione medio del 39%. Questo dimostra, oltre a caratteristiche medio basse delle murature, un grado di eterogeneità di questo tipo di murature piuttosto elevato.

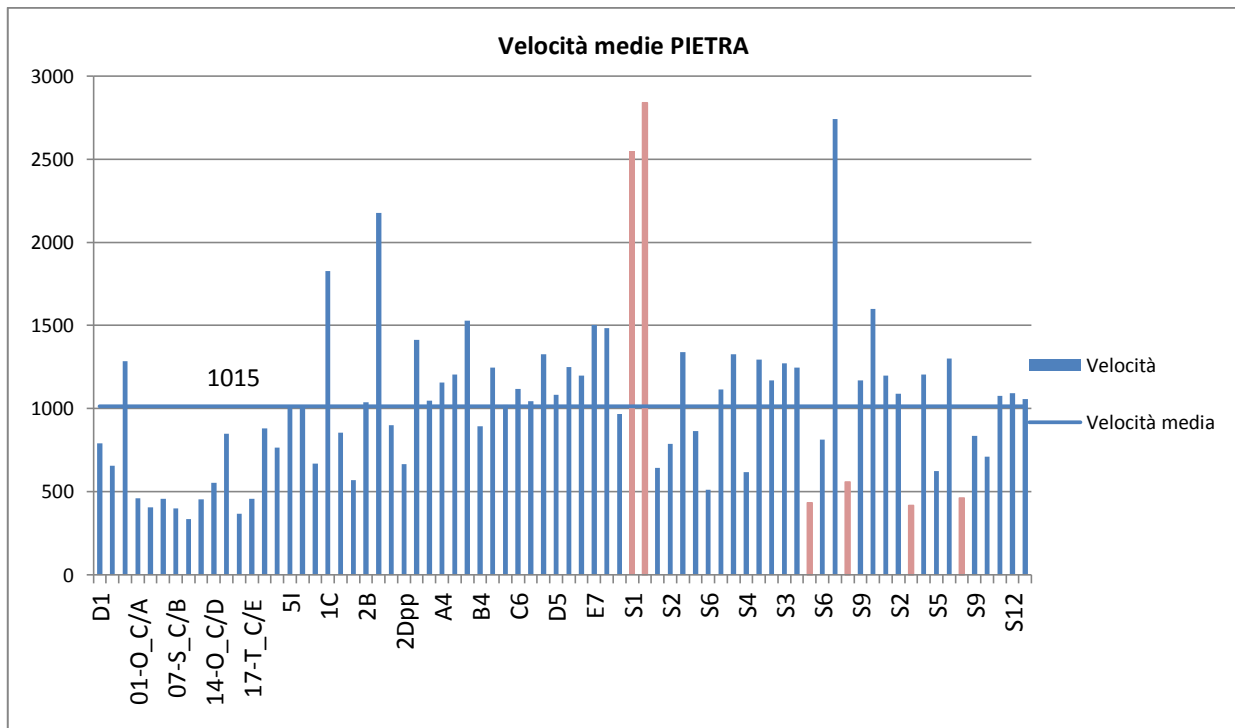


Figura 1.3. 1 - istogramma velocità medie murature in pietra

Nell'istogramma si può notare come le velocità non siano troppo discordanti dal valore medio, ad eccezione di quelle evidenziate in colore diverso le quali sono state escluse dalle valutazioni per errori di esecuzione o per presenza nello spessore murario di materiale diverso come ad esempio miscele consolidanti. Infatti le murature in pietra, caratterizzate da una marcata eterogeneità come dimostrato dall'elevato CoV, sono tra loro abbastanza omogenee per quanto riguarda la velocità media dei pannelli. Si nota anche che le prove sono suddivise quasi equamente attorno al valore medio, con 34 campi prova con velocità inferiore ai 1000 m/s e 40 con velocità superiore, suddivisi come mostrato di seguito.

INTERVALLO DI VELOCITA'	NUM. PROVE
vel<500 m/s	11
500 m/s<vel<1000 m/s	23
1000 m/s<vel<1500 m/s	32
1500 m/s<vel<2000 m/s	4
2000<vel	4

Tabella 1.3. 2 - intervalli di velocità

Si nota come la maggior parte dei valori registrati sia compreso negli intervalli prossimi al valore medio, indice che questo è frutto di molteplici valori simili tra loro e non di velocità molto elevate e velocità molto basse che si equilibrano reciprocamente.

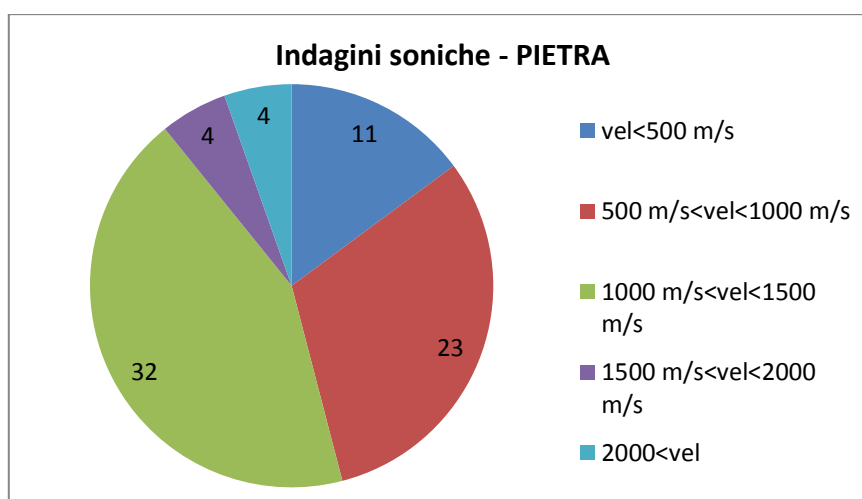


Figura 1.3. 2 - grafico intervalli di velocità pietra

Questi sono dati complessivi per le murature in pietra nel complesso. Di seguito invece vedremo suddivise le murature storiche dalle murature nuova costruzione, realizzate in laboratorio o in sito con le stesse tipologie, ma evidentemente senza gli effetti del degrado.

	NUM. PROVE	VEL. MEDIA [m/s]	DEV. ST MEDIA [m/s]	COV MEDIO
MURATURE IN PIETRA NUOVE	27	1156	516	45%
MURATURE IN PIETRA STORICHE	47	923	355	33%

Tabella 1.3. 3 - dati murature in pietra storiche e nuove

1.3.1.1. Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)

Dopo aver analizzato i dati sulle murature in pietra nel complesso, i dati sono stati divisi in base alle tipologie murarie definite in normativa. Per questa tipologia sono state raccolte 15 prove in due diverse sperimentazioni.

TIPOLOGIA MURARA I - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)											
Tip. muraria	Spessore [m]	Intervallo di velocità	Vel. media	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno di costruzione	Dati aggiuntivi
I	0,57	308 ÷ 2586	790	499	63%	D1	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila	XVIII sec.	-
I	0,57	217 ÷ 2286	657	427	65%	D2	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila	XVIII sec.	-
I	0,51	411 ÷ 4217	1284	1048	82%	D3	(Zorzi, 2014)	aggregato N. 1005	L'Aquila	XVIII sec.	-
I	0,46	-	461	-	-	01-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,45	-	405	-	-	02-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,55	-	456	-	-	06-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,55	-	401	-	-	07-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,47	-	336	-	-	10-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,47	-	454	-	-	11-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,52	-	555	-	-	14-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,52	-	850	-	-	15-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,61	-	369	-	-	16-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,61	-	457	-	-	17-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,58	-	881	-	-	19-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
I	0,58	-	767	-	-	20-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	-	-	-	-
Velocità media della tipologia = 608,2 m/s; Dev. Standard media della tipologia = 463 m/s											

Tabella 1.3. 4 - - dati soniche muratura in pietrame disordinata

I dati raccolti per la tipologia di muratura in pietrame disordinata hanno fornito come risultato una velocità media della tipologia di 608,2 m/s. Per quanto riguarda i valori di deviazione standard e di coefficiente di variazione, si deve far riferimento solo a pochi dati, quindi non si possono considerare dei valori medi attendibili.

Nel grafico seguente si può vedere la distribuzione dei diversi valori di velocità per le singole prove.

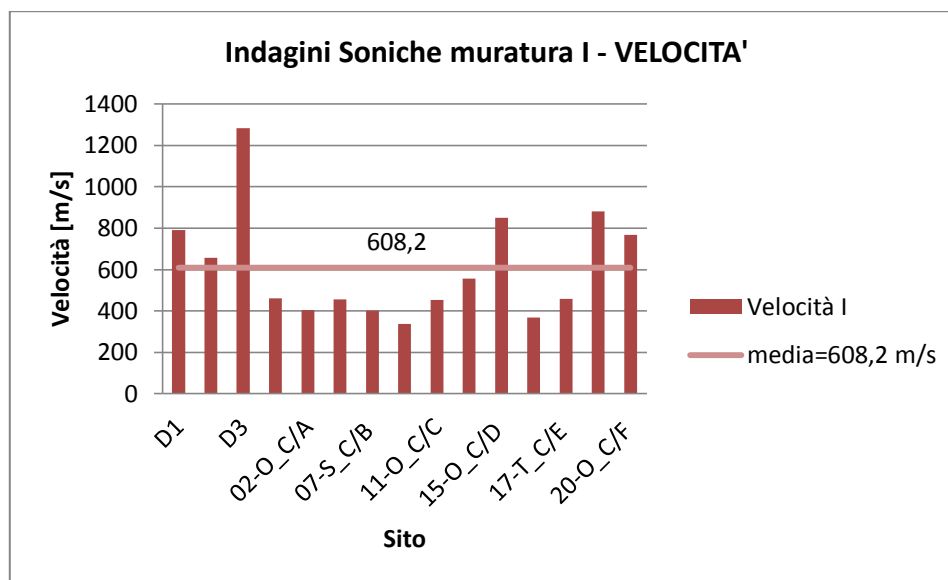


Figura 1.3. 3 - istogramma velocità soniche murature in pietrame disordinata

1.3.1.2. Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno

Per questa tipologia muraria sono state raccolte 36 prove, tutte complete dei valori minimi, massimi e medi di velocità, oltre ai valori di deviazione standard e coefficiente di variazione.

TIPOLOGIA MURARIA II - Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno											
Tip. muraria	Spessore [m]	Intervallo di velocità	Vel. media	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno di costruzione	Dati aggiuntivi
II	0,5	466 ÷ 2639	1011	576	57%	5I	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,5	423 ÷ 2783	1018	530	52%	7IT	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	433 ÷ 1190	668	178	27%	1B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	856 ÷ 3000	1826	639	35%	1C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	474 ÷ 1485	855	361	42%	1Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	295 ÷ 976	570	224	39%	1Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	682 ÷ 1704	1039	305	29%	2B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	955 ÷ 3000	2176	683	31%	2C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	299 ÷ 3000	900	682	76%	2Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,33	303 ÷ 1160	666	206	31%	2Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Laboratorio	ENEA (Roma)	2007	
II	0,5	400 ÷ 3700	1413	961	68%	A6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	400 ÷ 3700	1048	714	68%	A5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	400 ÷ 2600	1158	663	57%	A4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	700 ÷ 2200	1206	390	32%	B6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	800 ÷ 2500	1529	710	46%	B5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	300 ÷ 2000	894	693	78%	B4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	300 ÷ 2000	1246	504	40%	C8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	700 ÷ 2000	1021	279	27%	C7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	700 ÷ 1900	1118	329	29%	C6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,5	700 ÷ 1900	1043	187	18%	C5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	600 ÷ 2800	1326	831	63%	D6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	500 ÷ 2400	1082	573	53%	D5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	600 ÷ 2000	1250	460	37%	D4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	400 ÷ 3000	1200	739	62%	E8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	800 ÷ 3000	1504	606	40%	E7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	700 ÷ 2500	1485	487	33%	E6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,33	400 ÷ 2000	968	431	45%	E5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Laboratorio	ESEV (VR)	2010	
II	0,56	1655 ÷ 4353	2546	507	20%	S1	(Dalla Benetta, 2012)	Corte rurale	Bardolino (VR)	<1800	
II	0,49	1673 ÷ 4193	2838	583	21%	S4	(Dalla Benetta, 2012)	Corte rurale	Bardolino (VR)	1800	
II	0,58	473 ÷ 1158	645	182	28%	S1	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1230
II	0,77	528 ÷ 1115	787	139	18%	S2	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1230
II	1,16	936 ÷ 1765	1339	230	17%	S3	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1230
II	1,11	401 ÷ 1279	864	247	29%	S4	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1230
II	0,57	262 ÷ 755	511	107	21%	S6	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1230
II	0,62	420 ÷ 1785	1115	331	30%	S7	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1231
II	0,83	639 ÷ 2139	1326	391	29%	S8	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1232

Velocità media della tipologia = 1111,97 m/s; Dev. Standard media della tipologia = 457,88 m/s

Tabella 1.3. 5 - dati soniche muratura a conci sbazzati

Da notare che gran parte delle prove sono state eseguite su murature costruite appositamente per questo tipo di sperimentazione. Questo fattore va comunque tenuto in considerazione poiché non è presente la componente di degrado che si riscontra nell'indagine su murature storiche, quindi si può considerare che le velocità possano essere leggermente inferiori a quelle misurate.

Tutti i dati raccolti sono stati analizzati, e si è notato come i valori riferiti al caso studio di Bardolino fossero troppo elevati. Andando ad analizzare nel dettaglio la sperimentazione è emerso infatti che in corrispondenza di quei campi prova vi erano tracce di interventi di consolidamento mediante iniezioni eseguiti in precedenza, perciò questi valori sono stati

tralasciati nel calcolo dei valori medi. Per la tipologia di muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno, è stata ottenuta una velocità media risultante pari a 1112 m/s. I valori medi di deviazione standard e coefficiente di variazione sono piuttosto elevati. Questa tipologia muraria infatti risulta piuttosto eterogenea, e i valori di velocità registrati variano in intervalli piuttosto ampi.

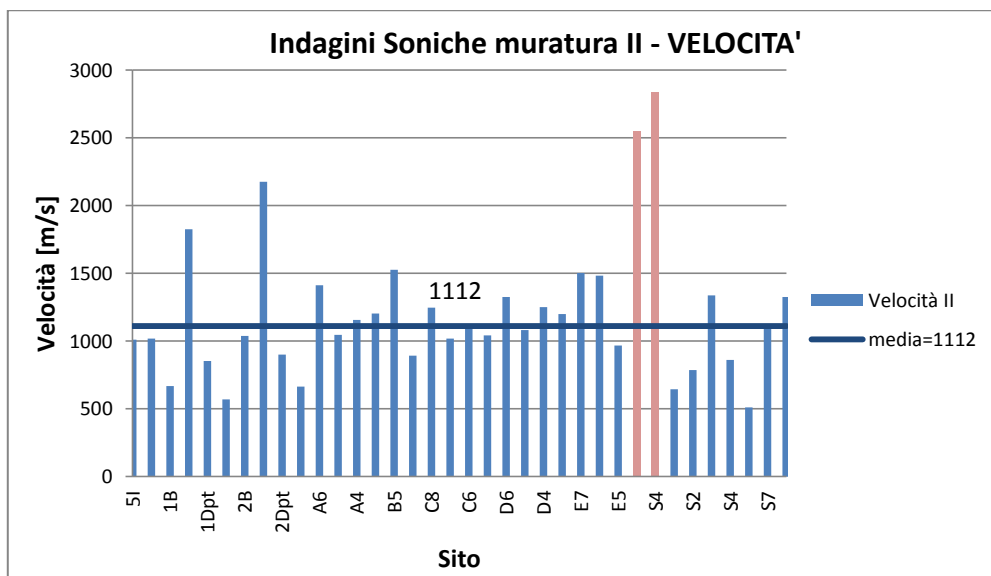


Figura 1.3. 4 - istogramma velocità soniche muratura a conci sbazzati

Anche la deviazione standard varia molto tra le diverse prove. Il valore medio di 458 m/s è piuttosto elevato, ed è frutto di alcuni picchi elevatissimi visibili nel grafico seguente. Sono comunque da considerarsi valori veritieri, in quanto in particolare questi valori apparentemente troppo elevati sono stati registrati nei casi studio di laboratorio, con murature costruite appositamente per questo tipo di sperimentazioni e quindi senza le incognite legate al degrado dei pannelli murari oggetto di indagine.

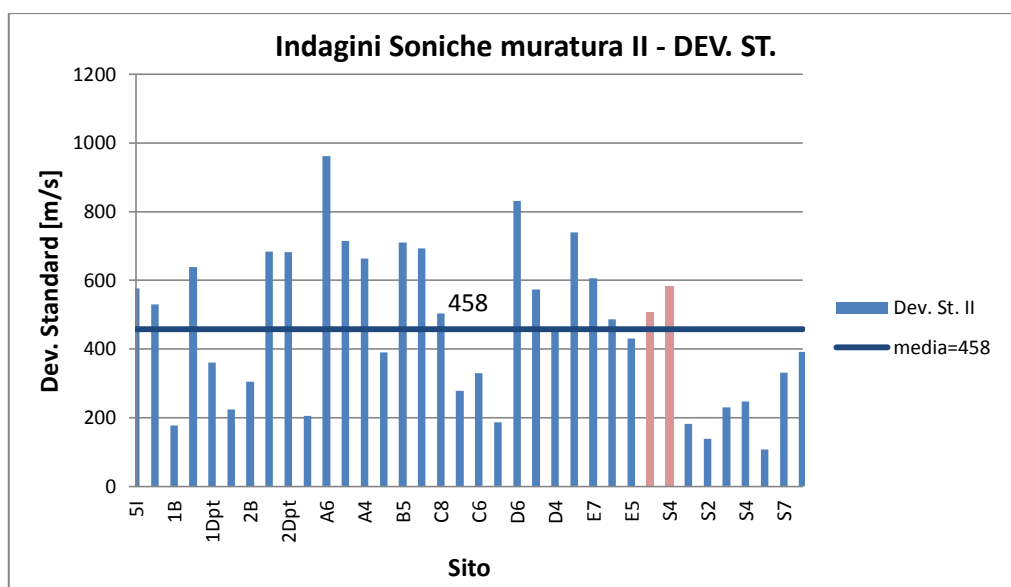


Figura 1.3. 5 - istogramma deviazione standard muratura a conci sbazzati

I valori minimi sono attorno ai 150 m/s, mentre i valori massimi sono attorno ai 900 m/s.

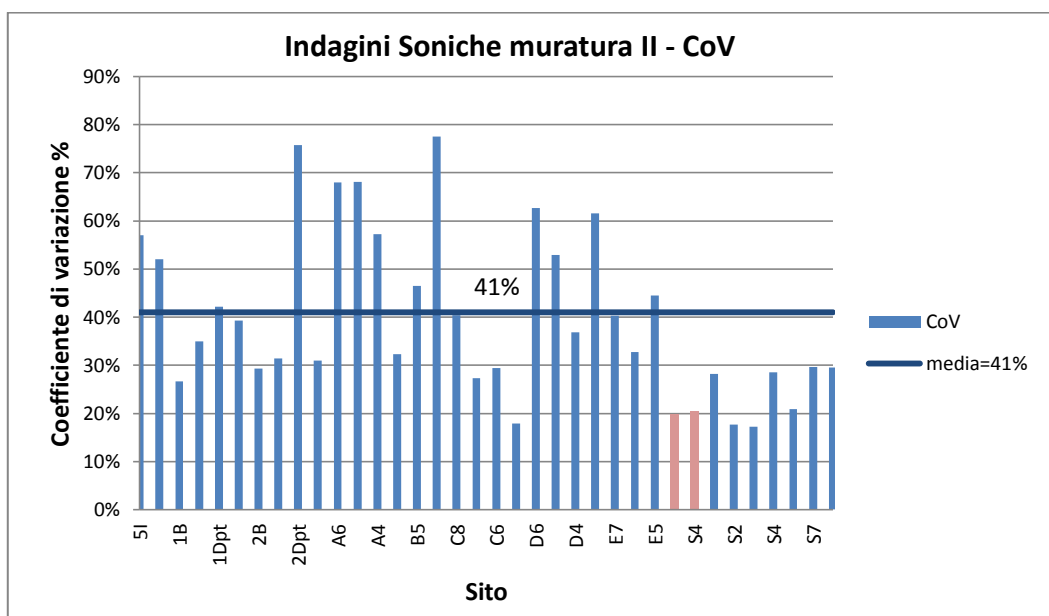


Figura 1.3. 6 - valori CoV murature a conci sbozzati

Il grafico relativo al coefficiente di variazione dimostra come questa tipologia muraria sia piuttosto eterogenea per quanto riguarda i valori di velocità sonora, con casi limite in cui il CoV è attorno al 70% e con una media comunque elevata e pari al 41%.

1.3.1.3. Muratura in pietre a spacco con buona tessitura

Per questa tipologia muraria sono stati raccolti ed analizzati i dati di 23 indagini soniche dirette, quasi tutte realizzate nell' Italia Centrale, esposti nella seguente tabella. In questo caso, diversi valori risultavano troppo bassi rispetto ai restanti dati. Dopo un'analisi delle singole acquisizioni è stato riscontrato come effettivamente in quei casi in un consistente numero di punti della griglia, talvolta quasi il 40%, si fossero registrate velocità sonore inferiori ai 300 m/s. Dato che questo non è possibile, poiché sarebbero inferiori al valore limite corrispondente alla trasmissione del segnale nell'aria, e dato che il numero così elevato non ha permesso di poter trascurare solo questi valori, sono state escluse dalle valutazioni per i valori medi della tipologia in quanto poco attendibili, probabilmente a causa di problemi durante l'esecuzione della prova.

TIPOLOGIA MURARIA III - Muratura in pietre a spacco con buona tessitura											
Tip. muraria	Spessore [m]	Intervallo di velocità [m/s]	Vel. media	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno di costruzione	Dati aggiuntivi
III	1,8	493 ÷ 740	619	97	16%	S4	(Bonvento, 2014)	Palazzo Cavalli	PD	1600	
III	0,70	625 ÷ 1824	1295	199	15%	S1	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,60	622 ÷ 1729	1171	291	25%	S2	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,77	566 ÷ 1775	1273	389	31%	S3	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,70	419 ÷ 2173	1246	487	39%	S4	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,69	158 ÷ 893	433	154	36%	S5	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,65	462 ÷ 1340	813	170	21%	S6	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,50	1274 ÷ 3725	2741	424	15%	S7	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,71	226 ÷ 1625	559	380	68%	S8	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,50	313 ÷ 2972	1170	681	58%	S9	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,63	474 ÷ 3764	1598	729	46%	S10	(UNIPD)	Museo	Ascoli	XV sec.	E=1740
III	0,86	678 ÷ 1601	1200	221	18%	S1	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,95	576 ÷ 1702	1091	363	33%	S2	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,48	176 ÷ 1076	419	209	50%	S3	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	1,12	664 ÷ 1797	1204	340	28%	S4	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,64	281 ÷ 1181	624	243	39%	S5	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,32	469 ÷ 2844	1301	645	50%	S6	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,55	220 ÷ 802	462	188	41%	S7	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,59	501 ÷ 1250	835	203	24%	S9	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,74	412 ÷ 1146	712	205	29%	S10	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,50	717 ÷ 1478	1077	231	21%	S11	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	0,52	545 ÷ 2002	1094	474	43%	S12	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740
III	1,35	700 ÷ 1559	1057	300	28%	S13	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XVII sec.	E=1740

Velocità media della tipologia = 1164,26 m/s; Dev. Standard media della tipologia = 352,21 m/s

Tabella 1.3. 6 - dati soniche su murature in pietre a spacco con buona tessitura

In tal modo per la tipologia di muratura in pietre a spacco con buona tessitura è stato calcolato un valore medio di velocità sonica pari a 1164 m/s, con valori medi minimi attorno ai 600 m/s e massimi superiori ai 1300 m/s, come si può osservare nel seguente istogramma.

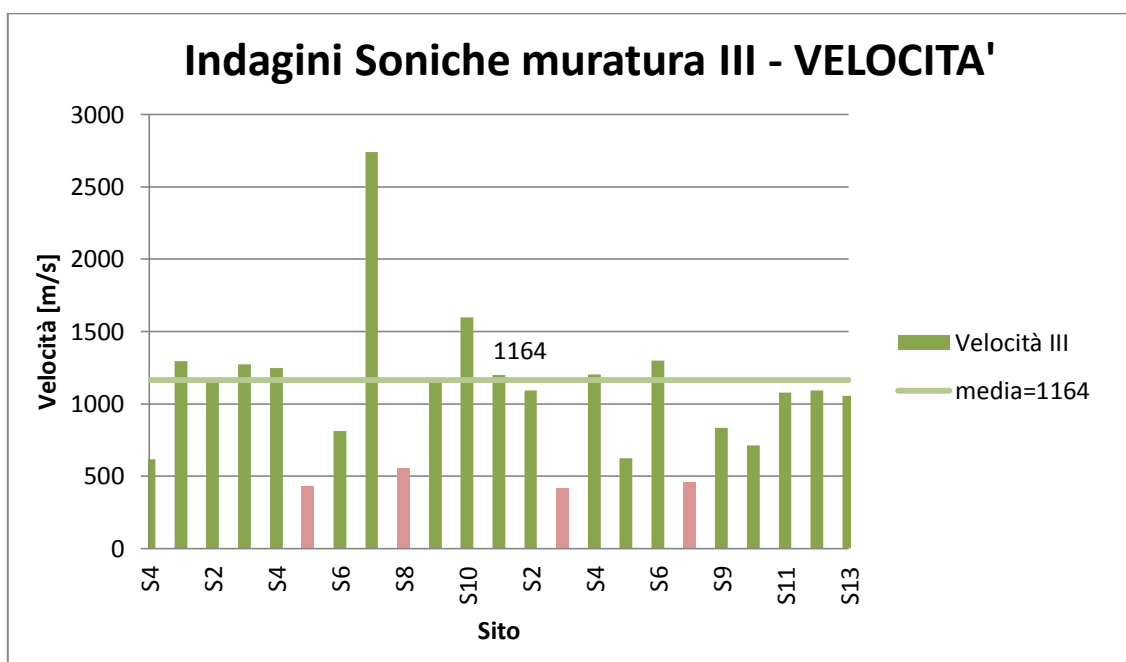


Figura 1.3. 7 - istogramma velocità soniche murature in pietre a spacco con buona tessitura

Si nota come, ad eccezione del picco di massimo nel campo S7, i valori non siano troppo discordanti tra loro. A conferma di questo il valore medio della deviazione standard è di 352 m/s, mentre il coefficiente di variazione medio della tipologia è del 31%, inferiore alle precedenti tipologie e indice di pannelli meno eterogenei.

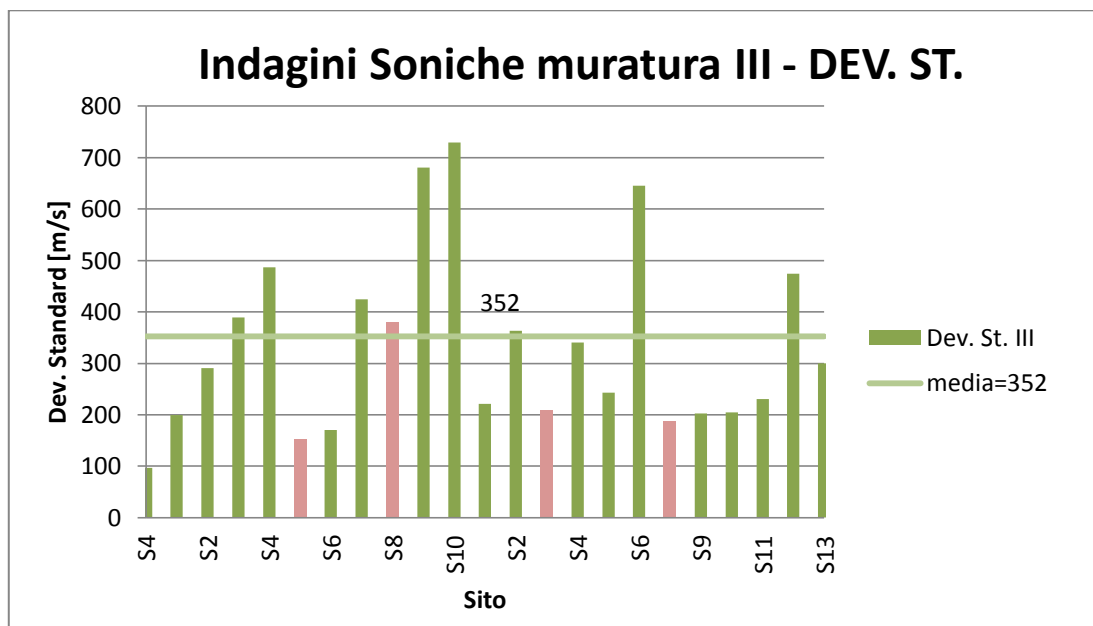


Figura 1.3. 8 - istogramma deviazione standard murature in pietre a spacco con buona tessitura

I valori minimi di deviazione standard sono attorno ai 100 m/s, mentre i valori massimi sono superiori ai 600 m/s. I valori del CoV invece sono abbastanza omogenei tra loro e la media è minore della tipologia precedente e pari al 31%.

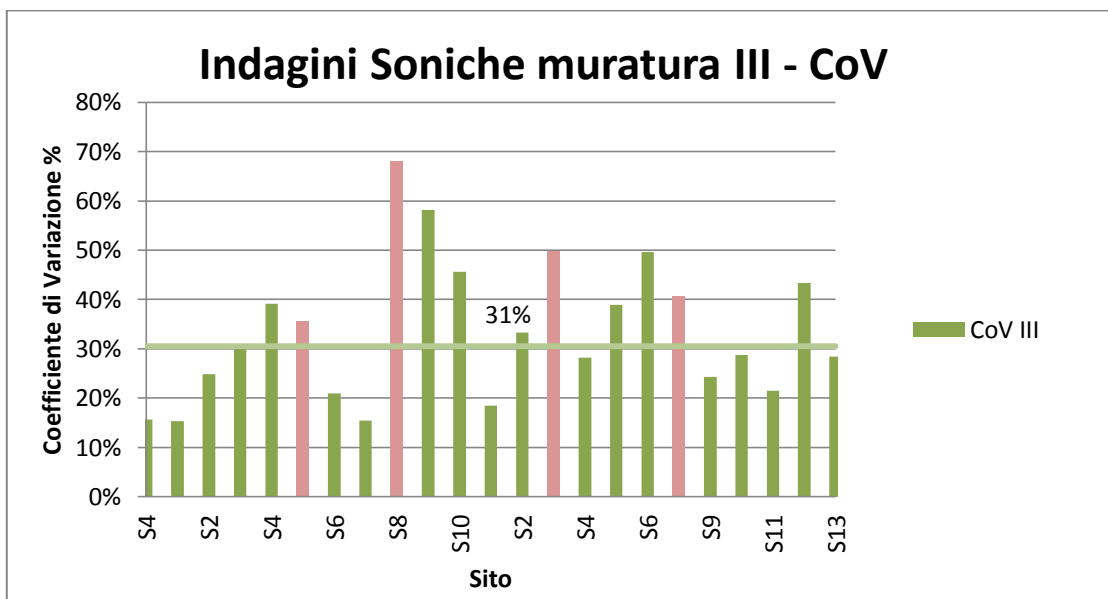


Figura 1.3. 9 - istogramma CoV muratura in pietre a spacco con buona tessitura

1.3.2. Muratura in mattoni pieni e malta di calce

In questo caso il numero di sperimentazioni raccolte è molto elevato, con i dati di 76 indagini soniche in trasparenza. Questo grazie al gran numero di studi effettuati su edifici padovani, molti dei quali sono in mattoni pieni.

TIPOLOGIA MURARIA VI - Muratura in mattoni pieni e malta di calce											
Tip. muraria	Spessore [m]	Intervallo di velocità	Vel. media	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno di costruzione	Dati aggiuntivi
VI	0,44	830 ÷ 1679	1108	235	21%	S1	(Bonvento, 2014)	Palazzo Cavalli	PD	1600	
VI	0,58	1233 ÷ 3888	2451	772	31%	S2	(Bonvento, 2014)	Palazzo Cavalli	PD	1600	
VI	0,41	765 ÷ 3177	1685	662	39%	S3	(Bonvento, 2014)	Palazzo Cavalli	PD	1600	
VI	0,61	517 ÷ 4220	2450	1277	52%	S1	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,46	1618 ÷ 4792	2693	576	21%	S2	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,43	1650 ÷ 3023	2409	298	12%	S3	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,40	1579 ÷ 3155	2095	363	17%	S4	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,41	767 ÷ 2876	1841	623	34%	S5	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,41	1232 ÷ 2690	1997	325	16%	S6	(Mattiello, 2013)	Complesso Donghi	PD	1913	
VI	0,43	824 ÷ 3159	2361	763	32%	S1	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,42	2380 ÷ 3406	2928	283	10%	S2	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,42	2504 ÷ 3077	2804	176	6%	S3	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	1,66	1743 ÷ 2448	2104	619	29%	S4	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,90	469 ÷ 2227	1266	558	44%	S5	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,84	905 ÷ 1576	1169	149	13%	S6	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,43	1791 ÷ 4061	2778	425	15%	S7	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,75	2269 ÷ 3857	2659	380	14%	S8	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,75	1381 ÷ 2879	2126	290	14%	S9	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,45	700 ÷ 2019	1408	347	25%	S10	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,85	1461 ÷ 2086	1749	161	9%	S11	(Rodofile, 2013)	Istituti Anatomici	PD	1915-1935	
VI	0,42	1482 ÷ 3276	1967	404	21%	S1	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,58	1332 ÷ 2065	1774	195	11%	S2	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,43	1255 ÷ 2304	1783	286	16%	S3	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,44	1395 ÷ 2300	1863	241	13%	S4	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,43	281 ÷ 1656	725	372	51%	S5	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,59	1350 ÷ 2589	2008	372	19%	S6	(Pegoraro, 2013)	Istituto Galileo Galilei	PD	1940	
VI	0,40	445 ÷ 3420	1510	882	58%	S1	(Martini, 2014)	Orto Botanico	PD	1600	
VI	0,40	708 ÷ 2387	1234	464	38%	S2	(Martini, 2014)	Orto Botanico	PD	1800	
VI	0,55	625 ÷ 1339	919	230	25%	S3	(Martini, 2014)	Orto Botanico	PD	1800	
VI	0,46	372 ÷ 2298	1090	669	61%	S4	(Martini, 2014)	Orto Botanico	PD	1800	
VI	0,33	1781 ÷ 3781	2967	485	16%	S1	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,27	1366 ÷ 3236	2245	446	20%	S2	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,35	539 ÷ 2330	1281	529	41%	S3	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,30	463 ÷ 3090	1386	745	54%	S4	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,40	679 ÷ 5100	2019	1118	55%	S5	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,52	781 ÷ 2083	1475	266	18%	S6	(Pengo, 2013)	Palazzo Cà Borin	PD	1150	
VI	0,33	452 ÷ 1551	935	309	33%	S1	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	
VI	0,62	508 ÷ 1307	1050	183	17%	S2	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	
VI	0,43	2017 ÷ 3161	2594	280	11%	S3	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	
VI	0,47	1927 ÷ 3563	2869	406	14%	S4	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	
VI	0,33	491 ÷ 1398	870	196	23%	S5	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	
VI	0,69	504 ÷ 1959	1039	414	40%	S6	(Dante, 2013)	Palazzo Levi Cases	PD	1800	

Tip. muraria	Spessore [m]	Intervallo di velocità	Vel. media	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno di costruzio	Dati aggiuntiv
VI	0,29	448 ÷ 3284	1117	716	64%	S1	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,32	440 ÷ 1872	943	330	35%	S2	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,47	343 ÷ 1013	546	169	31%	S3	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,30	543 ÷ 2988	2020	591	29%	S4	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,49	791 ÷ 1880	1153	291	25%	S5	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,52	1608 ÷ 4146	2982	737	25%	S6	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,57	316 ÷ 1062	596	210	35%	S7	(Bortoletto, 2013)	Palazzo Wollemborg	PD	1800	
VI	0,57	1203 ÷ 2170	1757	241	14%	S1	(Boin, 2013)	Palazzo Liviano	PD	1932-1943	
VI	0,58	837 ÷ 2474	1738	430	25%	S2	(Boin, 2013)	Palazzo Liviano	PD	1932-1943	
VI	0,30	1657 ÷ 3685	2925	562	19%	S3	(Boin, 2013)	Palazzo Liviano	PD	1932-1943	
VI	0,45	2837 ÷ 3545	2605	389	15%	S4	(Boin, 2013)	Palazzo Liviano	PD	1932-1943	
VI	0,63	1237 ÷ 1904	1632	187	11%	S5	(UNIPD)	Museo	Arezzo	XII sec.	E=1500
VI	1,16	927 ÷ 1632	1277	185	14%	S1	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,83	352 ÷ 688	502	89	18%	S2	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,53	977 ÷ 4291	2231	969	43%	S3	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	1,37	1263 ÷ 2199	1623	289	18%	S4	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	1,37	1263 ÷ 2199	1623	271	17%	S5	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	1,14	990 ÷ 1381	1197	134	11%	S6	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	1,68	681 ÷ 1448	1140	205	18%	S7	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,93	534 ÷ 1009	792	133	17%	S9	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,85	1194 ÷ 2370	1600	334	21%	S10	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,70	485 ÷ 870	660	120	18%	S11	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	1,03	721 ÷ 2028	1339	328	24%	S12	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,58	304 ÷ 1134	600	258	43%	S13	(UNIPD)	Palazzo	Urbino	XVI sec	E=1500
VI	0,90	1813 ÷ 2621	2271	235	10%	S1	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,95	574 ÷ 1138	746	142	19%	S2	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	1,35	436 ÷ 966	659	128	19%	S3	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	1,11	534 ÷ 1281	845	249	29%	S4	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,76	541 ÷ 1687	1099	215	20%	S1A	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,77	648 ÷ 2165	1434	415	29%	S1B	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,94	2097 ÷ 3078	2445	229	9%	S1C	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	1,35	1024 ÷ 2692	2075	466	22%	S1D	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,61	1267 ÷ 2306	1760	314	18%	S2A	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
VI	0,49	591 ÷ 1339	935	191	20%	S2B	(UNIPD)	Fortezza medievale	Gradara (PU)	XII-XIII sec	E=1500
Velocità media della tipologia = 1680,65 m/s; Dev. Standard media della tipologia = 392,49 m/s											

Tabella 1.3. 7 - database indagini soniche murature in mattoni

In questo caso non ci sono stati grossi problemi riscontrati durante l'esecuzione delle indagini, se non in alcuni casi relativi all'eccessivo rigonfiamento dell'intonaco. La gran quantità di prove raccolte permette di considerare i valori medi particolarmente attendibili.

La tipologia di muratura in mattoni pieni e malta di calce si ipotizzava più consistente, più omogenea e con minor presenza di vuoti. Questo è confermato dai risultati, con velocità media della tipologia pari a 1681 m/s, con coefficiente di variazione del 25%, indice quindi di murature discretamente omogenee, anche se datate. I valori di velocità non sono tutti omogenei tra loro, anche a causa di picchi molto elevati nel caso di murature ben conservate. Questo può essere osservato nel seguente istogramma.

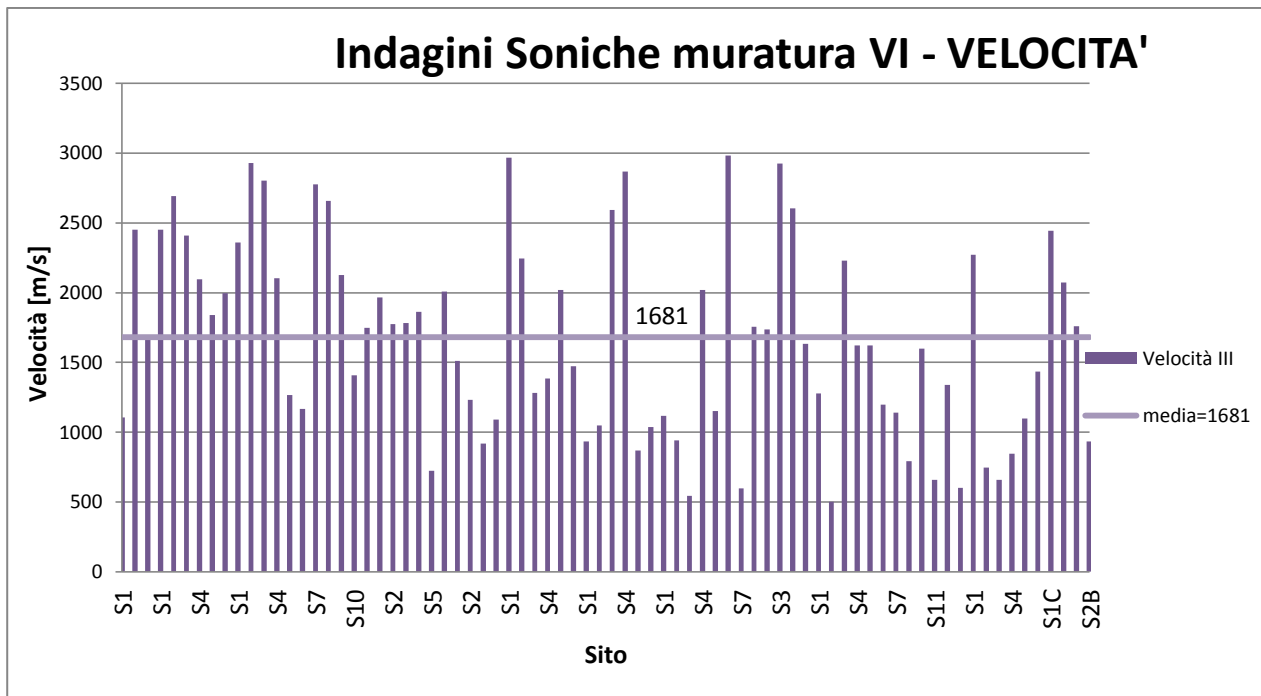


Figura 1.3. 10 - istogramma velocità soniche murature in mattoni

I valori delle velocità medie oscillano tra minimi attorno ai 600 m/s nel caso di pannelli murari degradati, fino a valori massimi superiori ai 2500 m/s nei pannelli murari in ottimo stato di conservazione.

Il valore medio della deviazione standard rimane abbastanza elevato, pari a 392 m/s, con valori che variano tra i 200 m/s fino a massimi superiori ai 1000 m/s.

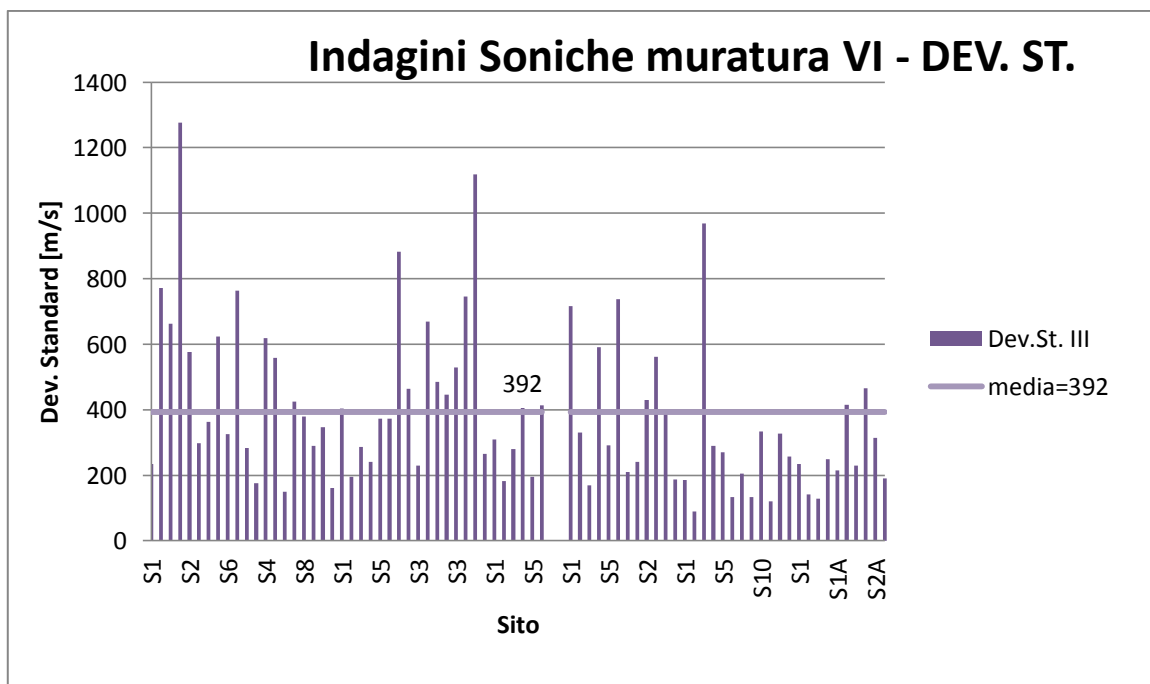


Figura 1.3. 11 - istogramma deviazione standard murature in mattoni

Dall'istogramma delle velocità medie si nota come il valore medio sia frutto di valori molto discordanti tra loro, con una sostanziale eterogeneità dei risultati. A differenza delle murature in pietra in cui la maggior parte dei valori riscontrati era negli intervalli prossimi al valore medio, nel caso di murature in mattoni i valori sono molto distribuiti e diversificati. Da sottolineare che in nessun caso, anche per murature molto datate, si è scesi sotto i 500 m/s.

INTERVALLO DI VELOCITA'	NUM. PROVE
vel<500 m/s	0
500 m/s<vel<1000 m/s	14
1000 m/s<vel<1500 m/s	19
1500 m/s<vel<2000 m/s	16
2000<vel<2500	11
2500<vel	11

Tabella 1.3. 8- intervalli velocità murature in mattoni

Si può apprezzare anche visivamente con il grafico seguente come i valori siano molto distribuiti e in maniera abbastanza omogenea nei vari intervalli.

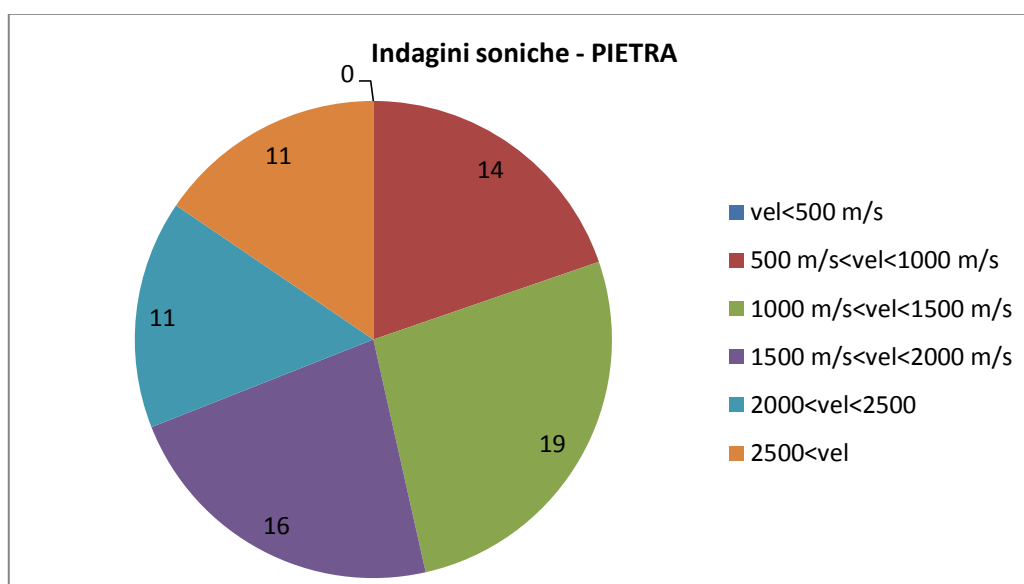


Figura 1.3. 12 - grafico intervalli velocità murature in mattoni

1.4. Risultati

Questa raccolta di dati ha permesso di ottenere dei valori di riferimento per le velocità soniche suddivisi per tipologia muraria, con relativo campo di variazione dei valori. In tal modo si può avere un'idea dei valori che ci si deve attendere eseguendo questo tipo di indagini qualora si conosca la tipologia muraria, verificando quindi la bontà o meno dei risultati. Ancora più significativo può essere un suo utilizzo nei casi in cui non si conosca la tipologia muraria e non sia possibile riconoscerla visivamente perché intonacata né sia possibile eseguire indagini più invasive come carotaggi o endoscopie. In questi casi questi valori possono fare da riferimento, anche se solo a livello indicativo, per ipotizzare la tipologia muraria solo attraverso questo tipo di indagini non distruttive.

Tipologia Muraria	Vel. Media [m/s]	Dev. St. Media [m/s]
I - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	608	463
II - Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1112	458
III - Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1164	352
VI - Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1681	392

Tabella 1.4. 1 - dati medi tipologie

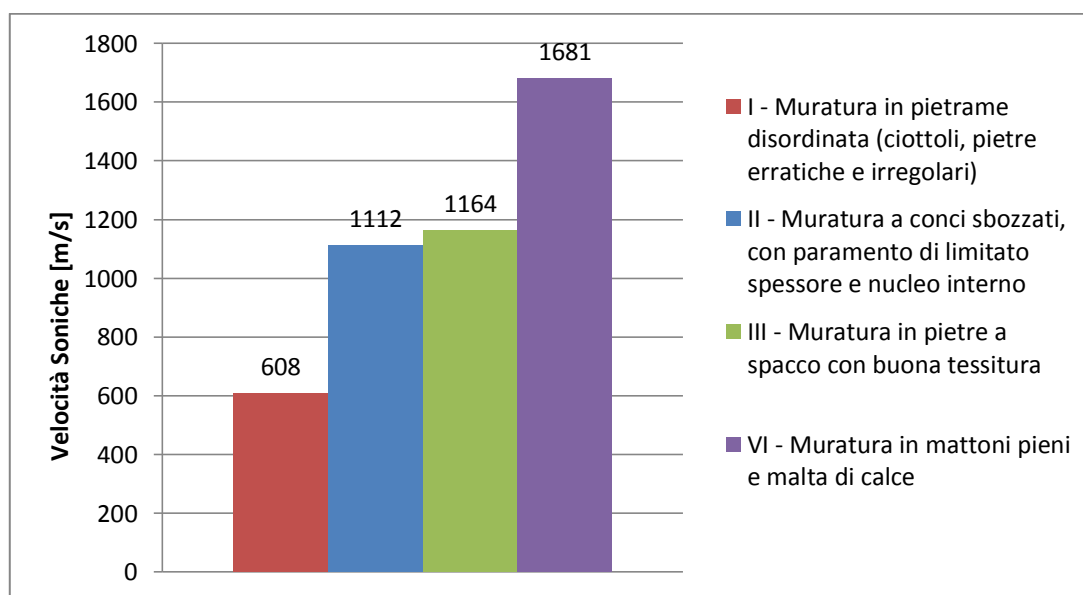


Figura 1.4. 1 - istogramma velocità medie

Il grafico riporta i valori delle velocità medie per le tipologie murarie analizzate, e il suo sviluppo crescente va di pari passo con le ipotesi iniziali, secondo le quali le velocità di queste tipologie avrebbero dovuto avere valori maggiori salendo dalla tipologia I alla VI.

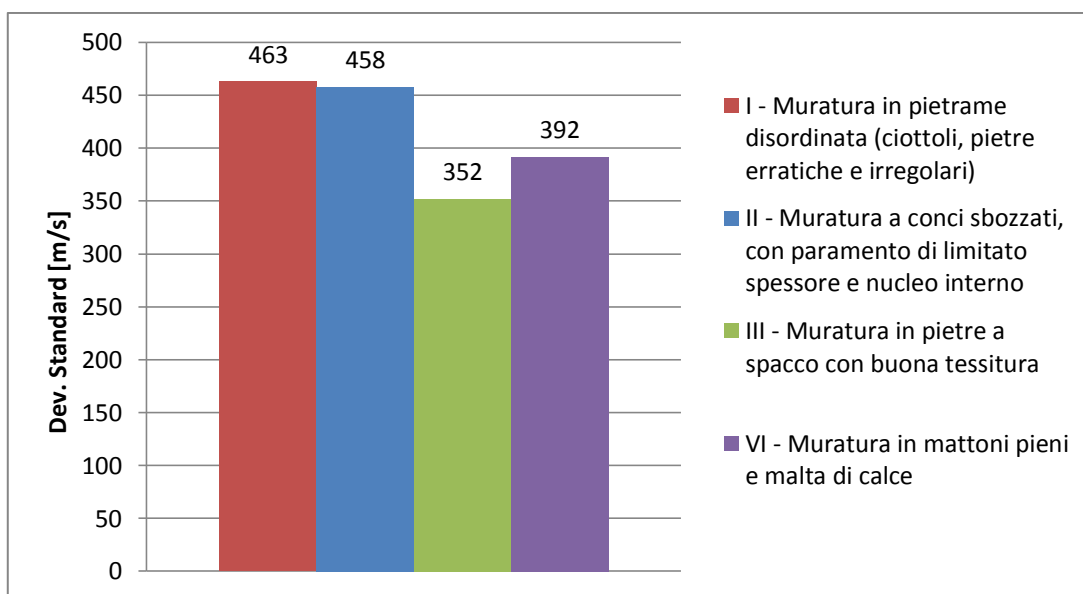


Figura 1.4. 2 - istogramma deviazione standard medie

Per quanto riguarda la deviazione standard si ipotizzava di ottenere risultati decrescenti dalla tipologia I alla VI, e questo è parzialmente confermato ad eccezione del valore relativo alla muratura in pietra a spacco con buona tessitura che si credeva dovesse risultare superiore alla deviazione standard media per murature in mattoni pieni e malta di calce.

Di seguito il grafico riassuntivo dei risultati ottenuti, con valori medi e relativo campo di variazione delle velocità soniche.

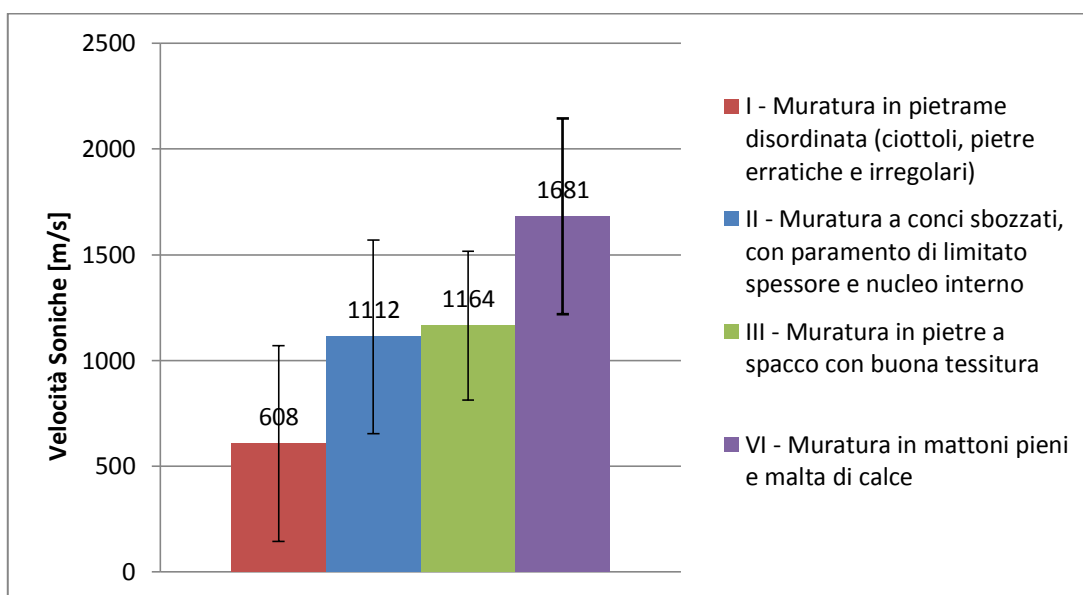


Figura 1.4. 3 - grafico valori di riferimento e campo di variazione delle velocità per le diverse tipologie

Si nota che, come era prevedibile, ci sono valori che si sovrappongono tra le diverse tipologie, ma comunque il riferimento principale è quello del valore medio della velocità sonica.

Va comunque considerato che il valore di velocità media della tipologia di muratura a conci sbozzati è presumibilmente leggermente superiore a quello che si potrebbe riscontrare in murature storiche, poiché come già detto gran parte delle sperimentazioni raccolte sono state eseguite su murature di nuova costruzione.

In conclusione, eseguendo indagini soniche dirette su murature delle quali non si conosce la tipologia, si può osservare a quale valore ci si avvicini maggiormente per poter ipotizzare la tipologia avendo quantomeno dei valori di riferimento.

2. VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DELLE INIEZIONI MEDIANTE INDAGINI SONICHE

2.1. Stato dell'Arte

Interventi di consolidamento mediante iniezione di miscele

L'intervento di consolidazione tramite miscele consolidanti prevende 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 espansivi).

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 cannule:

- 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 2/3 o 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 cannule: le cannule 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.



Figura 2.1.1 - Pannello pronto per l'iniezione (museo Archeologico di Verona)

- 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.



Fig. 1.2. 1 - Esecuzione dell'intervento di iniezione (Museo Archeologico di Verona)

- 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.

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.

2.2. 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. L'ultima raccolta di dati di questo genere è aggiornata ad interventi svolti fino al 2000.

Tip. muraria	Tip. edilizia	Spessore [m]	Vel. Media Pre [m/s]	Vel. Media Post [m/s]	Incremento [%]	Sito	Riferimento
MATTONI	M	1	1308 ± 1006	3000 ± 0	229	SITO1	(Modena, et al., 2000b)
	M	0,79	1509 ± 476	2065 ± 883	137	ZONA A, B-SPONDA	(Modena, et al., 1999)
	MEDIA =		1409	2533	180		
MATTONI-PIETRA	M	2,2	969 ± 221	1331 ± 165	137	N-E (cinta)	(da Porto, 1999)
	M	1	1417 ± 735	2025 ± 940	143	SITO 1	(Modena, et al., 2000b)
	M	1	673 ± 388	952 ± 763	141	Parete a fondazione	(Modena, et al., 1999)
	MEDIA =		1019	1436	141		
PIETRA	M	1	1653 ± 772	1021 ± 678	-62	SITO 1	(Modena, et al., 2000b)
	lab	0,5	1244 ± 977	3000 ± 0	241	1	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	986 ± 843	891 ± 798	90	3	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	880 ± 729	3000 ± 0	341	5	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	934 ± 818	3000 ± 0	321	6	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	850 ± 709	3000 ± 0	353	8	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	2689 ± 669	3000 ± 0	112	13	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	2806 ± 431	3000 ± 0	107	14	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	2866 ± 266	1132 ± 709	39	15	(da Porto, 1999)
	lab	0,5	2063 ± 868	3000 ± 0	145	16	(da Porto, 1999)
MEDIA =		1697	2404	142			

Tabella 2.2. 1 - raccolta dati soniche (Pasin e Bresolato, 2008)

Si è deciso quindi di esaminare casi studio recenti per aggiornare questo database, possibilmente ampliandolo ed analizzando dati aggiuntivi quali l'omogenizzazione dei pannelli e le caratteristiche delle miscele iniettate.

I casi raccolti sono relativi a murature in pietra, delle quali in 12 casi studio si ricade nella tipologia di muratura in pietrame disordinata, e i restanti 23 casi sono della tipologia di muratura in pietra a conci sbozzati.

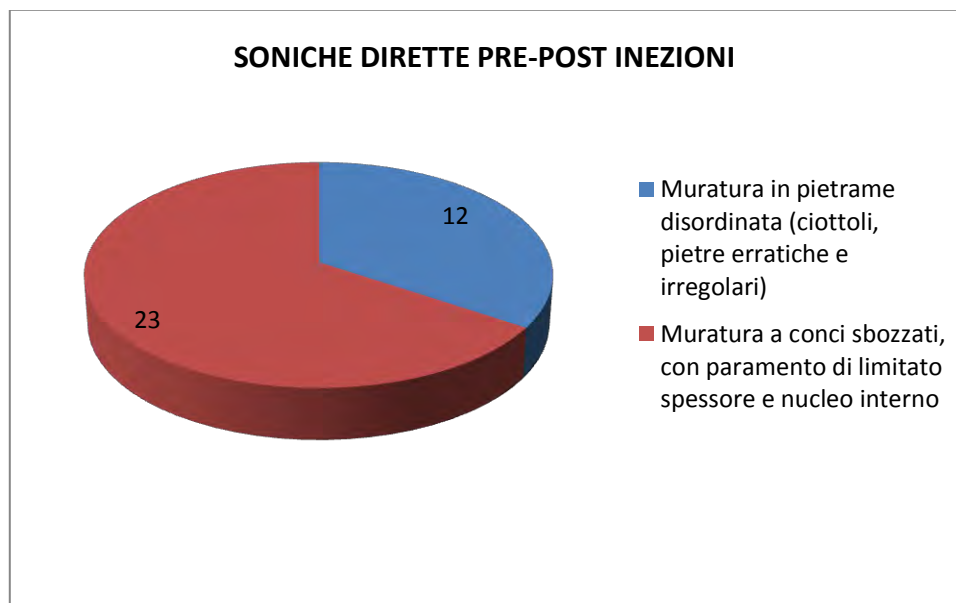


Figura 2.2. 1 - grafico prove soniche raccolte per verifica efficacia iniezioni

2.2.1. 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 ReLUIS (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.

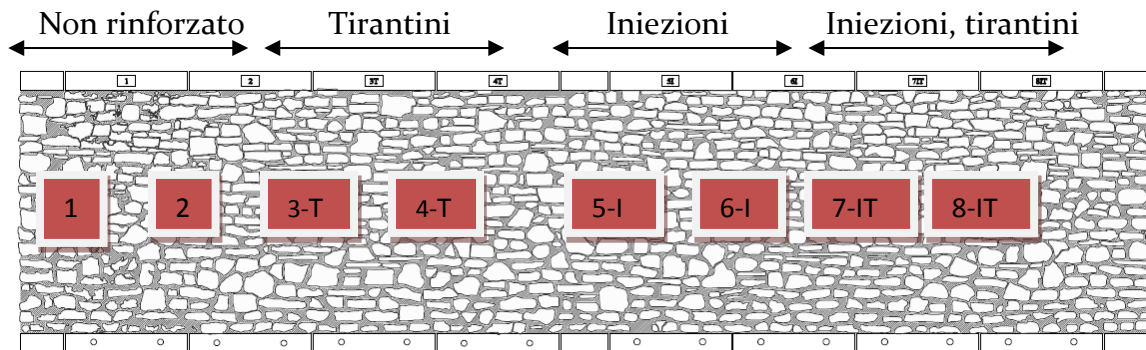


Figura 2.2. 2 - schema geometrico realizzazione muro a tre paramenti



Figura 2.2. 3 - 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 ³
Massa volumica reale	2664 kg/m ³

Tabella 2.2. 2 - 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

Tabella 2.2. 3 - 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

Tabella 2.2. 4 - Valori di resistenza media ottenuti per la miscela da iniezione.

Sperimentazioni su pannelli muratura

- 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/m². 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.

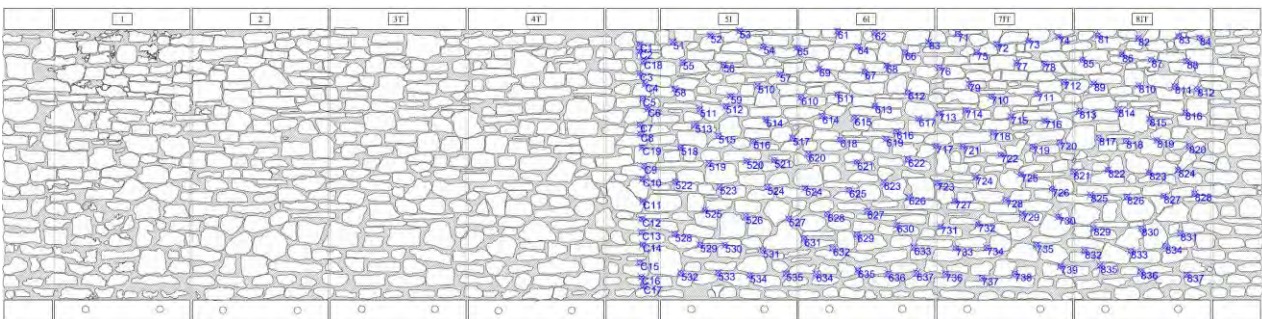


Figura 2.2. 4 - schema prospettico e fori di iniezione

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 ³	l/m ³	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%

Tabella 2.2. 5 - *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.

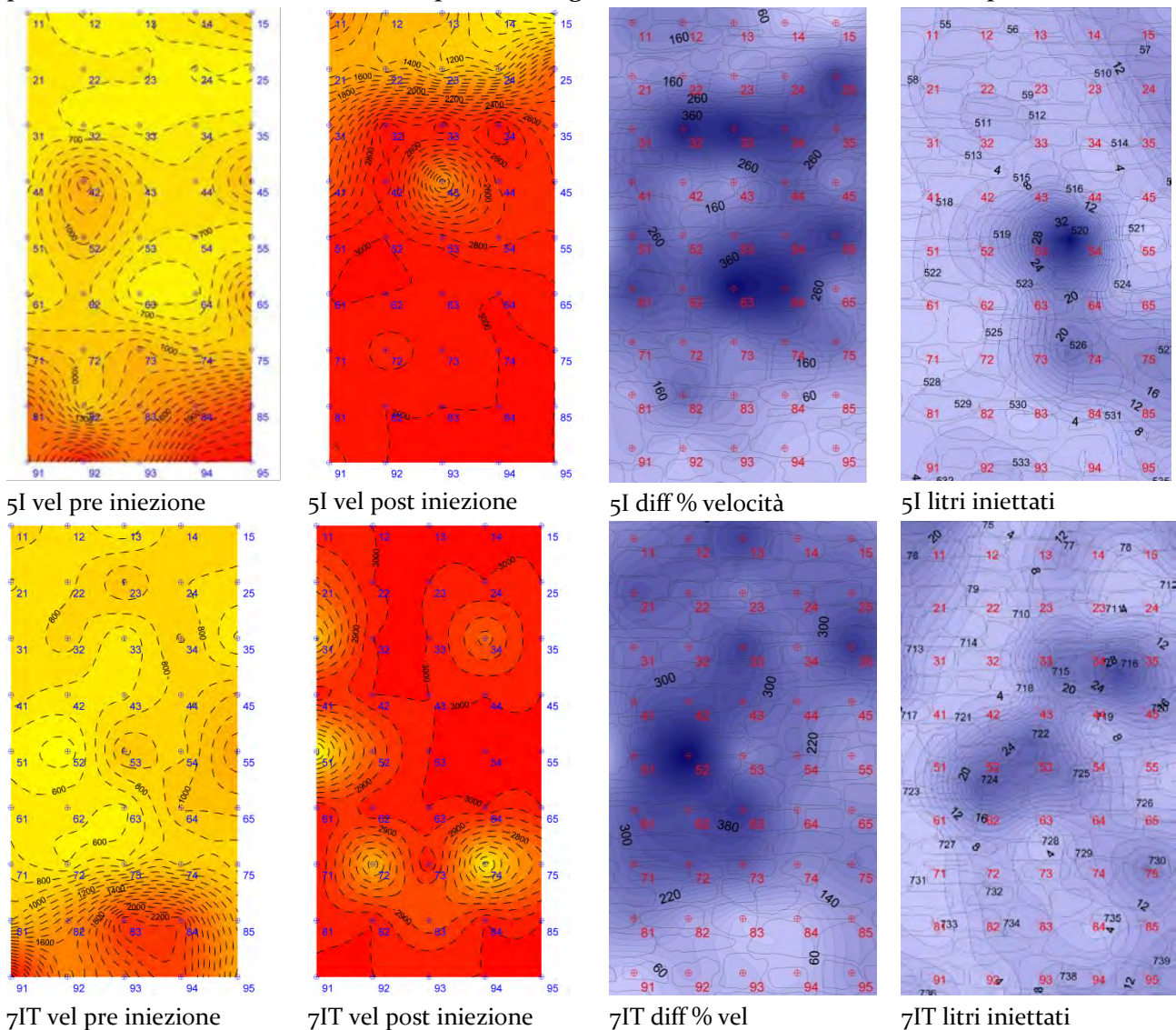


Figura 2.2. 5 - *grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati*

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

Tabella 2.2. 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.

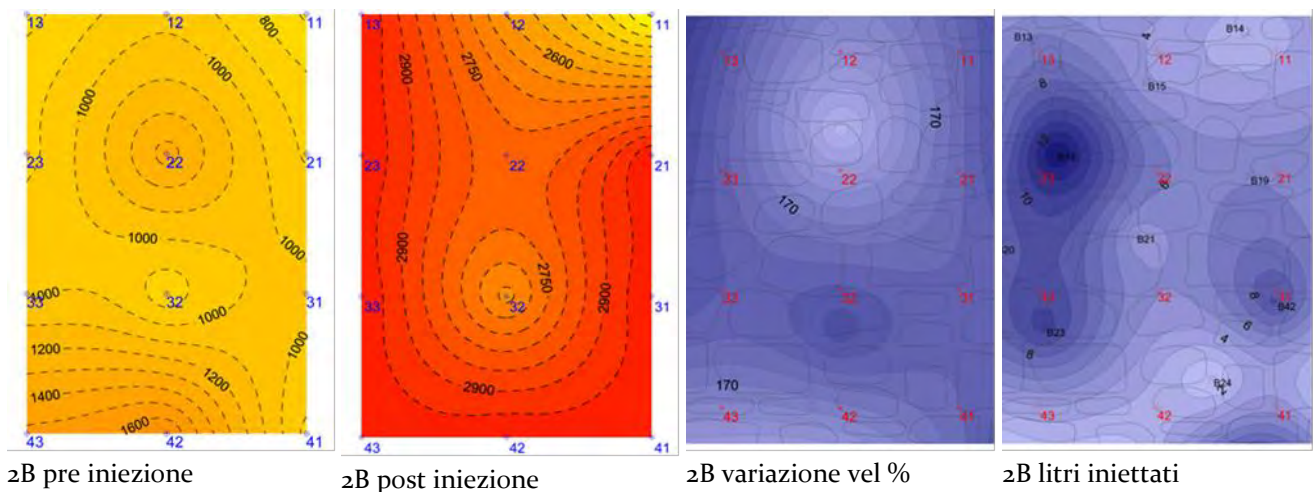


Figura 2.2. 6 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2B

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.

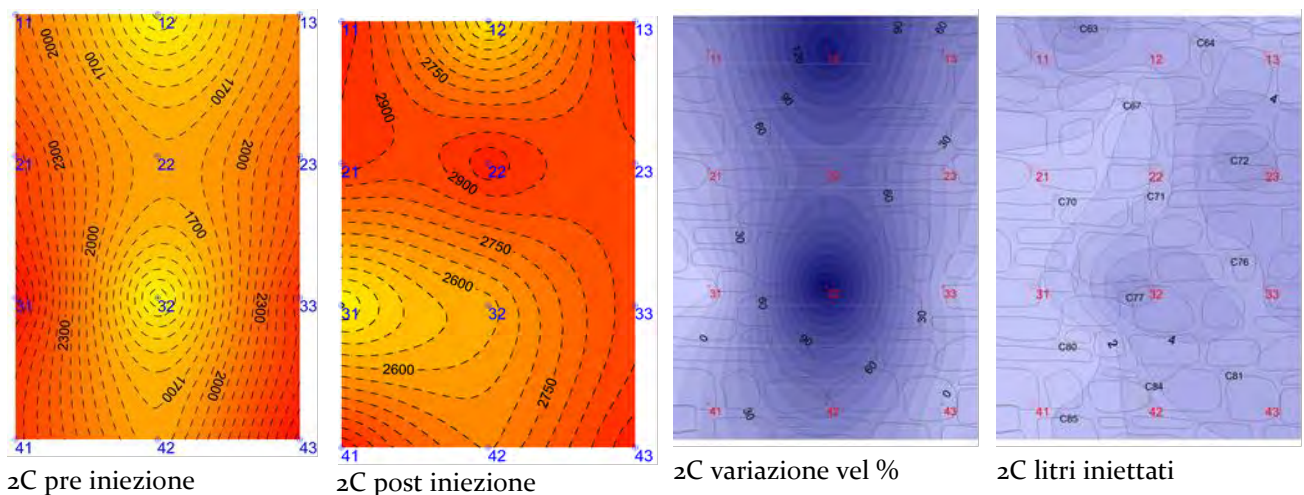


Figura 2.2. 7 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2C

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

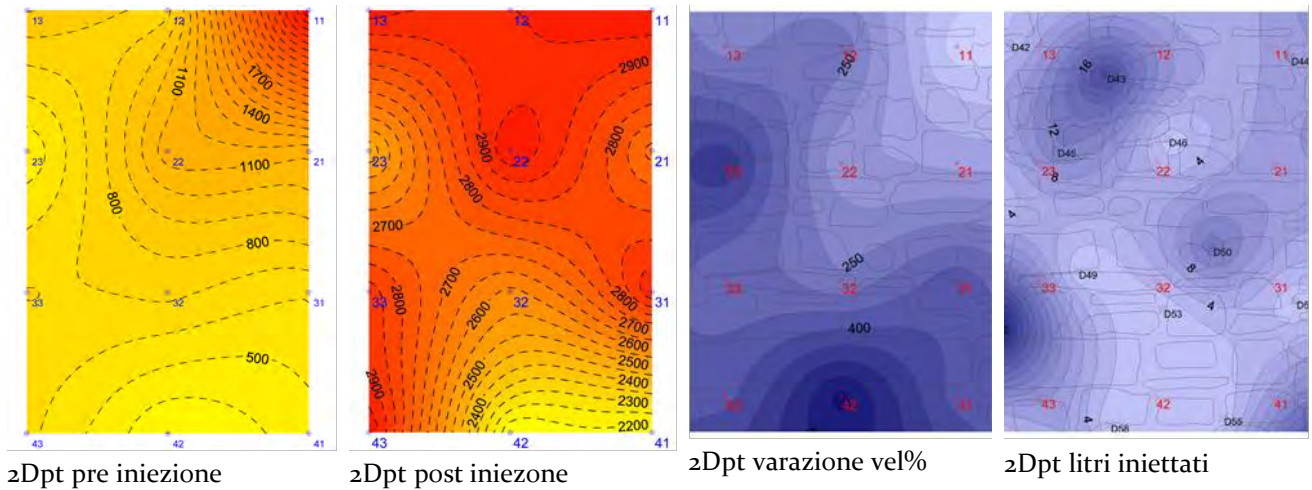


Figura 2.2. 8 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2Dpt



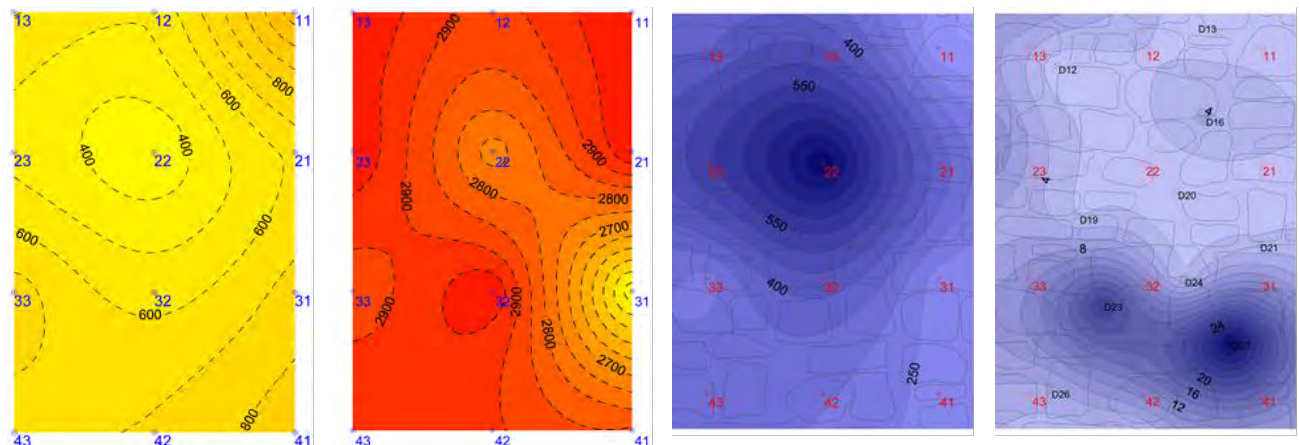
Tomografia 2Dpt post iniezione

Tomografia 2Dpt post iniezione

Figura 2.2. 9 – grafici distribuzione velocità soniche tomografia 2Dpt

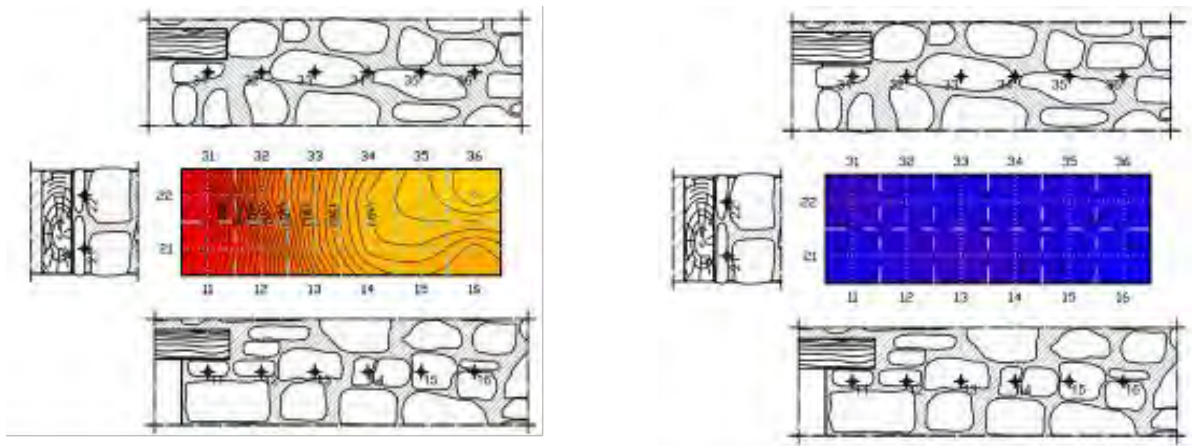
Anche nel campo 2Dpt si può notare che i punti con una variazione maggiore di velocità che sono 23, 31, 41, 42 e 43, corrispondono a zone della muratura in cui sono stati iniettati diversi litri di miscela. Nella tomografia si può notare un sostanziale aumento delle velocità soniche nella faccia centrale 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



2Dpp pre iniezione 2Dpp post iniezione 2Dpp varazione vel% 2Dpp litri iniettati

Figura 2.2. 10 - grafici distribuzione velocità soniche e litri iniettati 2Dpp



Tomografia 2Dpp pre iniezione

Tomografia 2Dpp post iniezione

Figura 2.2. 11 - 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	

Tabella 2.2. 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.

2.2.2. 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 ReLUIS, 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.

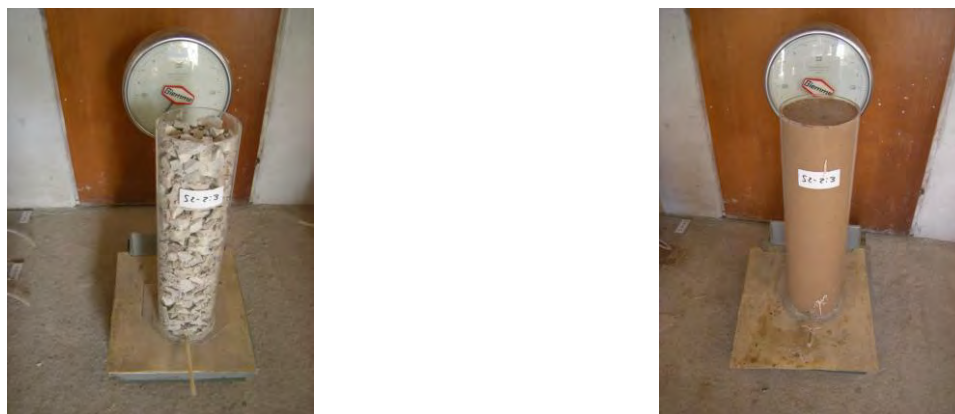


Figura 2.2. 12 - Cilindri prima e dopo la saturazione con miscela

- 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/m². 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.

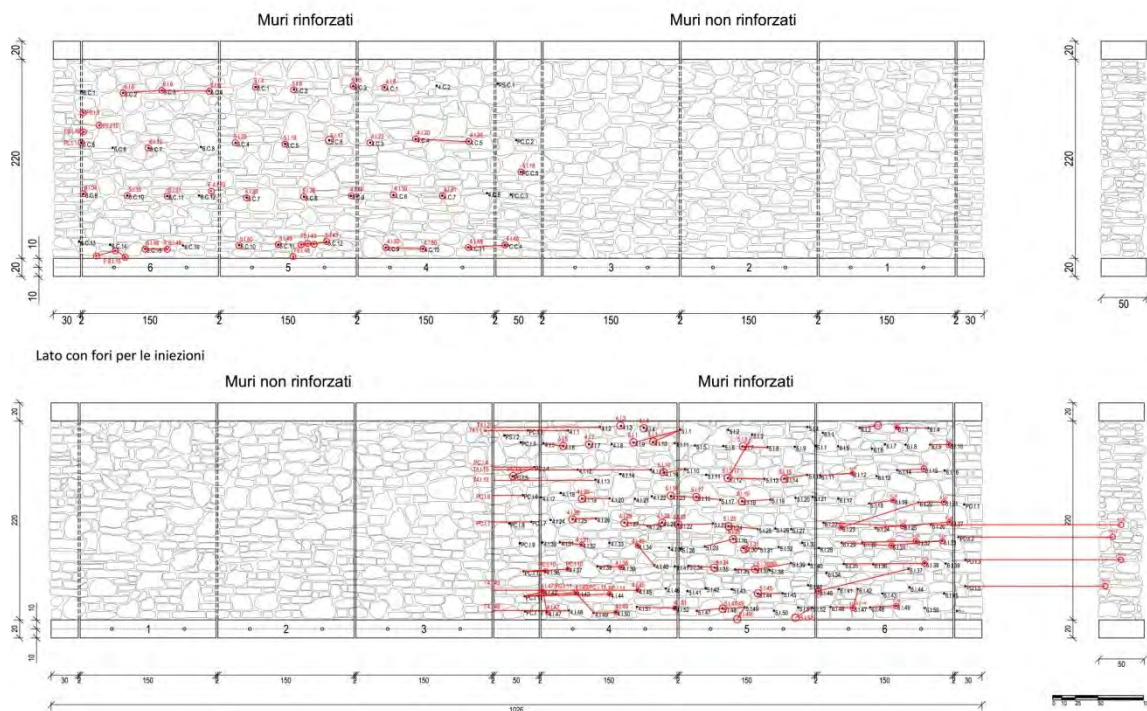


Figura 2.2.13 - Rilievo dei fori di uscita del muro A

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

Tabella 2.2. 8 - Confronto fra le medie dei litri iniettati su m² 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.

MURO \ PROVA				Diretta		Tomografia			
				Velocità (m/s)	Incr. (%)	Velocità (m/s)		Incr. (%)	
						H	V	H	V
Muratura a tre paramenti	"full scale"	A	PRE	1206	244	-	-	-	-
			POST	4149		-	-		
		B	PRE	1195	209	999	1285	287	140
			POST	3694		3870	3087		
		C	PRE	1107	177	1124	1564	184	72
			POST	3072		3196	2690		
	D	PRE	1219	198	1444	1543	100	63	
		POST	3637		2895	2524			
	E	PRE	1289	199	1960	1505	81	96	
		POST	3859		3563	2956			
	Muratura ad un paramento	"full scale"	F		8905,75	-	-	-	-

Tabella 2.2. 9 - risultati campagna sperimentale

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.

2.2.3. 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 quadrati, 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.

Prova	Tipologia Muraria	Spessore [cm]	Vel. Min [m/s]	Vel. Max [m/s]	Vel. Media [m/s]
S1	MP-CH-B	0,56	1655	4353	2546
S2	MP-B	0,85	1944	5211	2824
S3	MP-B	0,50	864	3369	1883
S4	MP-'800-B	0,49	1673	4193	2838
S5	MP-B	0,65	1207	2337	1628

Tabella 2.2. 10 - riepilogo prove soniche

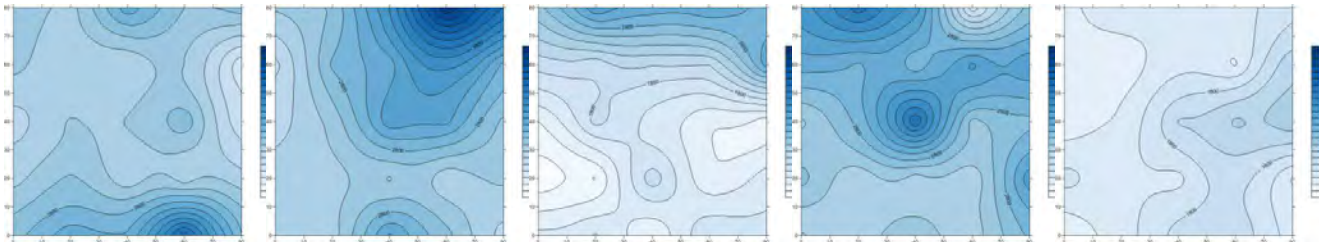


Figura 2.2. 14 - grafici di distribuzione velocità soniche pannelli S1, S2, S3, S4, S5

- 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.

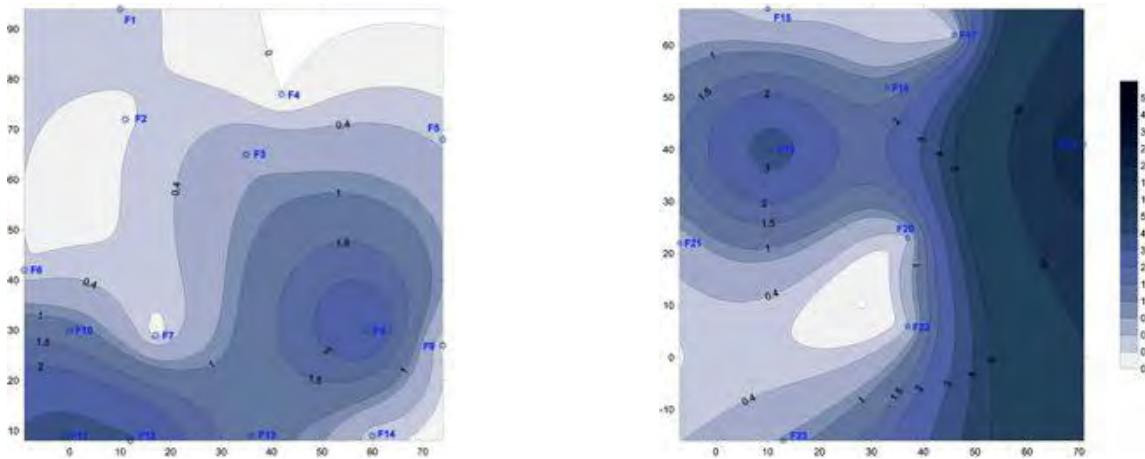


Figura 2.2. 15 - Quantità di miscela iniettata nel pannello 01-o_C/A lato esterno e lato interno.

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

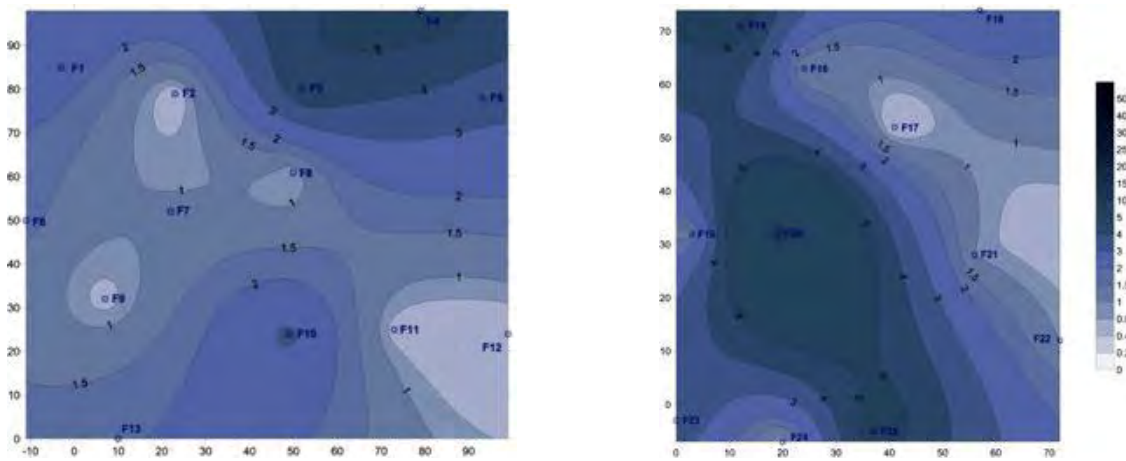


Figura 2.2. 16 - Quantità di miscela iniettata nel pannello 02-o_C/A lato esterno (a) e lato interno (b)

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

Tabella 2.2. 11 - Risultati dei test sonici per i pannelli non consolidati (U) e iniettati (C)

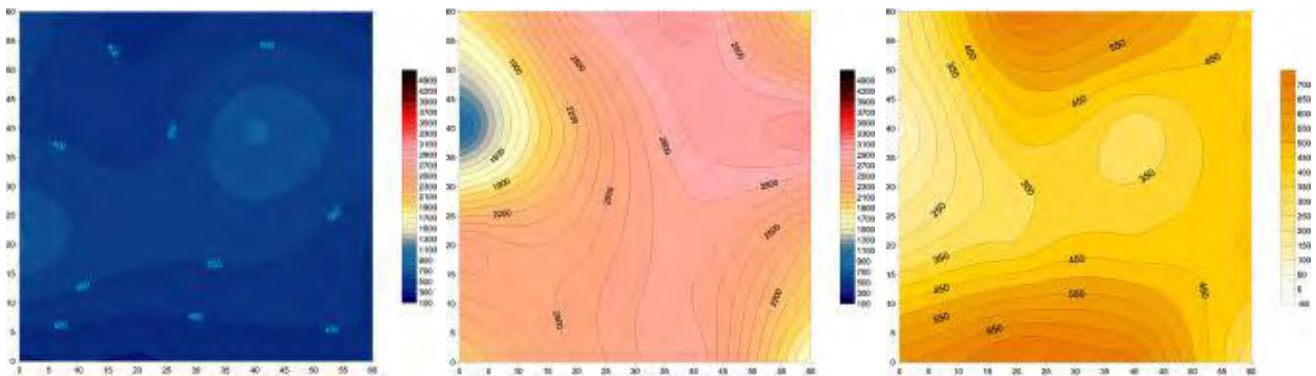


Figura 2.2. 17 - Pannello 01-O_C/A: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

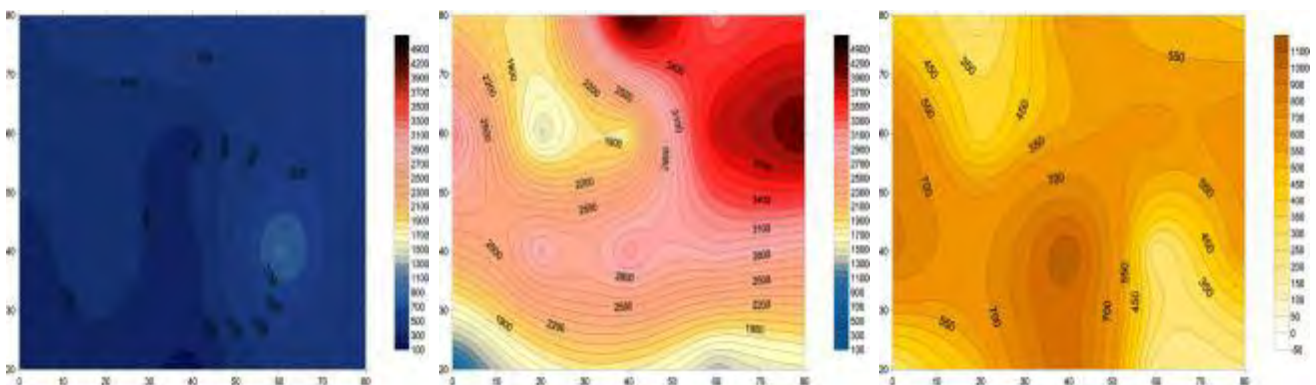


Figura 2.2. 18 - Pannello 01-O_C/A: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

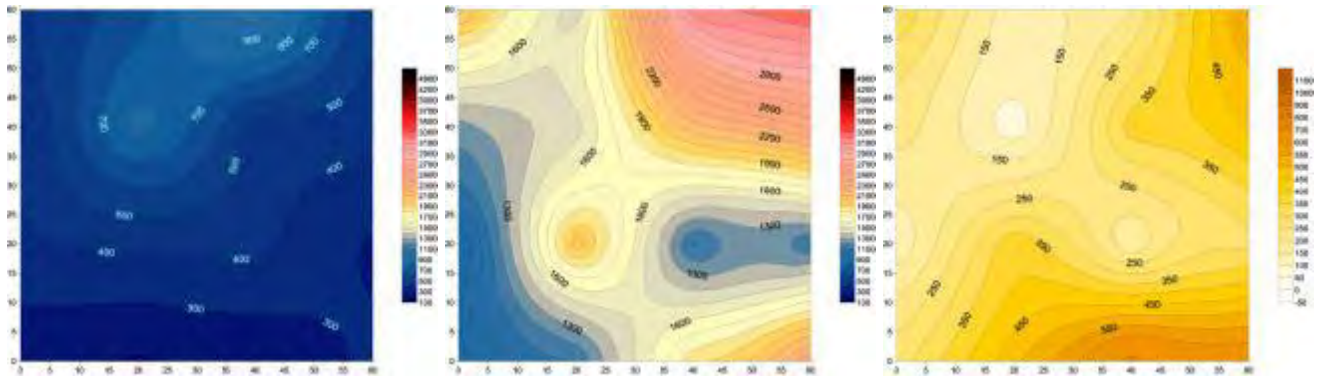


Figura 2.2. 19 - Pannello 06-S_C/B: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

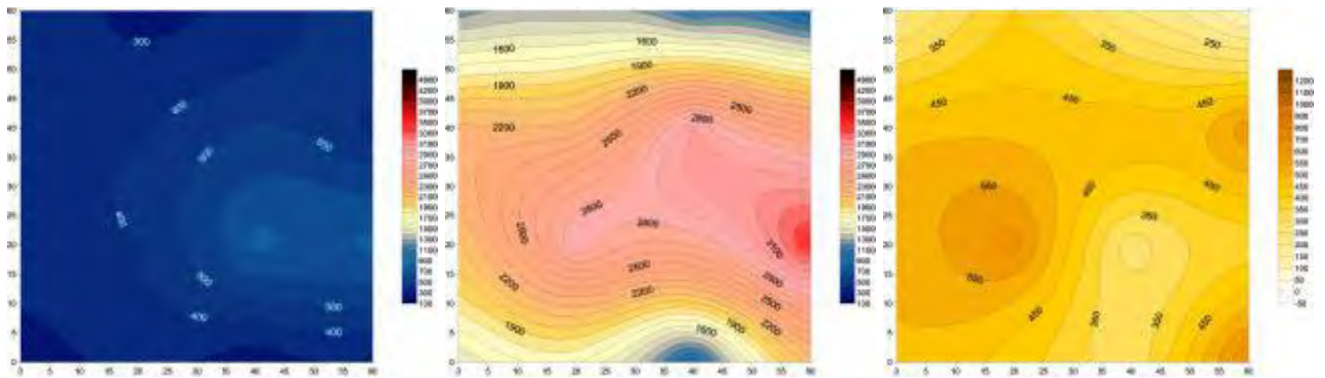


Figura 2.2. 20 - Pannello 07-S_C/C: mappa delle velocità soniche pre iniezione, mappa post iniezione, mappa con incremento di velocità percentuale

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.

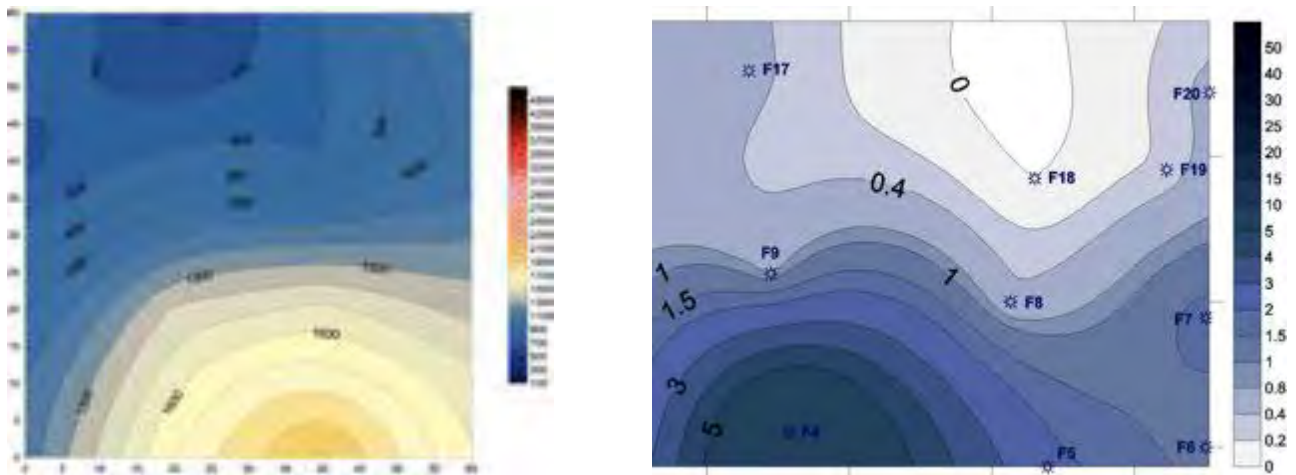


Figura 2.2. 21 - Rappresentazione grafica delle velocità soniche post-iniezione per il pannello 20-O_C/F e delle quantità di miscela iniettata

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 ³]	Rapporto acqua legante	Massa volumica [kg/dm ³]	Resistenza a Flessione [N/mm ²]	Resistenza a Compressione [N/mm ²]	Modulo elastico E [N/mm ²]
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			-	-	-	-

Tabella 2.2. 12 - 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.

2.3. Analisi Dati

I dati sono stati raccolti nella seguente tabella, completa di valori pre e post iniezione, quantità di miscela iniettata in funzione del tempo, tipologia di miscela e caratteristiche, deviazione standard pre e post iniezione, coefficiente di variazione pre e post iniezione.

Tip. Mur	Sp. [m]	Vel. media pre [m/s]	Vel. media post [m/s]	Incr. [%]	Litri/m ³ iniettati f	Sito	Riferimento	Miscela	Dev.st Pre[m/s]	Dev. st Post [m/s]	Cov Pre	Cov Post	CovPost/Co VPre
II	0,5	1011	2521	249%	158	5I	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	576	697	57%	28%	49%
II	0,5	1018	2941	289%	227	7IT	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	530	145	52%	5%	9%
II	0,33	1039	2857	275%	107	2B	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	305	227	29%	8%	27%
II	0,33	2176	2808	129%	217	2C	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	683	237	31%	8%	27%
II	0,33	900	2731	303%	220	2Dpt	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	682	310	76%	11%	15%
II	0,33	666	2882	433%	220	2Dpp	(Pasin e Bresoloto, 2008)	Fenix-B	206	164	31%	6%	18%
II	0,5	1413	4275	303%	78,3	A6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	961	569			
II	0,5	1048	4134	394%	78,3	A5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	714	652	68%	13%	20%
II	0,5	1158	4040	349%	78,3	A4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	663	798			
II	0,5	1206	3441	285%	75	B6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	390	289			
II	0,5	1529	3920	256%	75	B5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	710	517	32%	8%	26%
II	0,5	894	3722	416%	75	B4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	693	495			
II	0,5	1246	3227	259%	81,6	C8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	504	383			
II	0,5	1021	3146	308%	81,6	C7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	279	356	40%	12%	29%
II	0,5	1118	2934	262%	81,6	C6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	329	437			
II	0,5	1043	2985	286%	81,6	C5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	187	482			
II	0,33	1326	3371	254%	46	D6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	831	610			
II	0,33	1082	3703	342%	46	D5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	573	838	63%	18%	29%
II	0,33	1250	3837	307%	46	D4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	460	576			
II	0,33	1200	3982	332%	47	E8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	739	655			
II	0,33	1504	3594	239%	47	E7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	606	798	62%	16%	27%
II	0,33	1485	4088	275%	47	E6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	487	1501			
II	0,33	968	3776	390%	47	E5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	431	869			
I	0,46	461	2357	511%	127	01-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	-	-	-	-	-
I	0,45	405	2599	642%	158	02-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	-	-	-	-	-
I	0,55	456	1793	393%	181	06-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	-	-	-	-	-
I	0,55	401	1997	498%	159	07-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	-	-	-	-	-
I	0,47	336	1608	479%	113	10-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	-	-	-	-	-
I	0,47	454	2148	473%	138	11-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	-	-	-	-	-
I	0,52	555	2378	428%	183	14-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	-	-	-	-	-
I	0,52	850	2484	292%	199	15-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	-	-	-	-	-
I	0,61	369	1926	522%	124	16-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	-	-	-	-	-
I	0,61	457	2583	565%	119	17-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	-	-	-	-	-
I	0,58	881	2222	252%	152	19-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	-	-	-	-	-
I	0,58	767	1156	151%	72	20-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	-	-	-	-	-

Tabella 2.3. 1 - database iniezioni muratura in pietra

Analizzando tutti i casi studio, si è ottenuto un incremento medio del 347%. La velocità media di tutti questi casi studio passa da un valore di 963 m/s della situazione non consolidata ad un valore di 2976 m/s nella situazione consolidata, con una media di 114 l/m³ di miscela iniettata. Questi valori si riferiscono alla totalità dei casi raccolti, mentre nei paragrafi seguenti verranno analizzati suddivisi per tipologia muraria.

Di seguito vengono riportati i valori caratteristici delle varie miscele utilizzate nelle sperimentazioni. Da sottolineare che i valori di resistenza delle miscele hanno si importanza, ma comunque relativa, poiché sono tutte molto resistenti. La differenza la fa il grado di iniettabilità che si riesce ad ottenere.

Sito	Riferimento	Miscela	Res. Fless. Miscela [N/mm2]	Res. Compr. Miscela [N/mm2]	Mod. El. Miscela [N/mm2]	Litri/m ³ iniettati f (s)	Incremento [%]
5I	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	158	249%
7IT	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	227	289%
2B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	107	275%
2C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	217	129%
2Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	220	303%
2Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	2,88	7,64	6576	220	433%
A6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	78,3	303%
A5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	78,3	394%
A4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	78,3	349%
B6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	75	285%
B5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	75	256%
B4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	75	416%
C8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	81,6	259%
C7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	81,6	308%
C6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	81,6	262%
C5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	81,6	286%
D6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	46	254%
D5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	46	342%
D4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	46	307%
E8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	47	332%
E7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	47	239%
E6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	47	275%
E5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	2,75	12,48	7504	47	390%
01-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	2,01	32,82	7500	127	511%
02-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	2,01	32,82	7500	158	642%
06-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	1,68	25,14	10400	181	393%
07-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	1,68	25,14	10400	159	498%
10-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	1,75	13,72	3700	113	479%
11-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	1,75	13,72	3700	138	473%
14-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	2,2	31,63	10300	183	428%
15-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	2,2	31,63	10300	199	292%
16-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	1,51	4,78	5600	124	522%
17-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	1,51	4,78	5600	119	565%
19-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	1,88	18,13	8100	152	252%
20-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	1,88	18,13	8100	72	151%

Tabella 2.3. 2 - dati iniezioni prove pregresse murature in pietra

2.3.1. Iniezioni su muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)

Per la tipologia muraria in pietrame disordinata sono state raccolte 12 indagini soniche dirette eseguite nella fase pre iniezione e nella fase post iniezione per la valutazione dell'efficacia dell'intervento.

I - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari) - Interventi di consolidamento mediante iniezioni												
Tip. muraria	Spessore [m]	Velocità media	Velocità media	Incremento [%]	Litri/m ³ iniettati f	Sito	Riferimento	Miscela	Res. Fless.	Res. Compr.	Mod. El. Miscela	
I	0,46	461	2357	511%	127	01-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	2,01	32,82	7500	
I	0,45	405	2599	642%	158	02-O_C/A	(Dalla Benetta, 2012)	A	2,01	32,82	7500	
I	0,55	456	1793	393%	181	06-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	1,68	25,14	10400	
I	0,55	401	1997	498%	159	07-S_C/B	(Dalla Benetta, 2012)	B	1,68	25,14	10400	
I	0,47	336	1608	479%	113	10-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	1,75	13,72	3700	
I	0,47	454	2148	473%	138	11-O_C/C	(Dalla Benetta, 2012)	C	1,75	13,72	3700	
I	0,52	555	2378	428%	183	14-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	2,2	31,63	10300	
I	0,52	850	2484	292%	199	15-O_C/D	(Dalla Benetta, 2012)	D	2,2	31,63	10300	
I	0,61	369	1926	522%	124	16-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	1,51	4,78	5600	
I	0,61	457	2583	565%	119	17-T_C/E	(Dalla Benetta, 2012)	E	1,51	4,78	5600	
I	0,58	881	2222	252%	152	19-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	1,88	18,13	8100	
I	0,58	767	1156	151%	72	20-O_C/F	(Dalla Benetta, 2012)	F	1,88	18,13	8100	

Tabella 2.3. 3 - dati iniezioni su muratura in pietrame disordinata

I campi prova sono stati iniettati con differenti miscele e i risultati in alcuni casi sono discordanti. L'incremento medio di velocità sonica è comunque molto elevato, pari a 4,34 volte il valore iniziale. La velocità media di questi campi prova nella situazione precedente all'intervento è pari a 532 m/s, mentre la media delle velocità delle murature consolidate è di 2104 m/s. Il risultato migliore è stato ottenuto nel campo prova 02-O_C/A, in cui da una velocità pre iniezione di 405 m/s, indice di una muratura in pessimo stato, si è passati ad una velocità media post iniezione di 2599 m/s, indice di una muratura in ottimo stato e consistente, con un incremento addirittura del 642%. Non sempre i risultati sono stati così rilevanti, come ad esempio nel pannello 20-O_C/F, in cui da 767 m/s si passa a 1156 m/s, indice che quella muratura non ha raggiunto livelli di buona consistenza. L'incremento in questo caso è stato del 151%, piuttosto basso rispetto agli altri dati. Va considerato che sulla buona riuscita dell'intervento possono influire diversi fattori, come le caratteristiche della muratura e dei vuoti al suo interno, oppure la buona esecuzione dell'intervento, o ancora le caratteristiche della miscela. Proprio quest'ultimo aspetto è di rilevante importanza, poiché la miscela deve possedere oltre a buone caratteristiche meccaniche, anche un ottimo grado di iniettabilità. E' infatti importante garantire una buona distribuzione della miscela all'interno del paramento andando a riempire il più possibile i vuoti, per evitare di ottenere murature ancora più eterogenee rispetto alla situazione iniziale.

Notiamo infatti che nei casi raccolti i campi iniettati con la miscela A hanno fatto registrare incrementi superiori al 500%, mentre nei campi iniettati con la miscela F gli incrementi sono stati notevolmente minori.

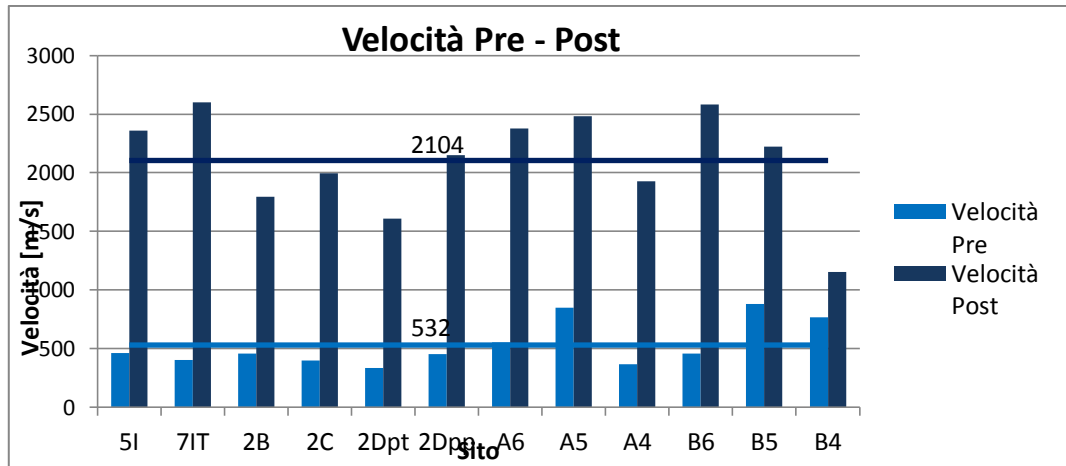


Figura 2.3. 1 - istogramma incrementi di velocità soniche muratura in pietrame disordinata

Va comunque sottolineato che anche nei campi prova in cui l'intervento è stato meno efficace, si è comunque migliorata la situazione raggiungendo in tutti i casi valori medi di velocità superiori ai 1000 m/s.

2.3.2. Iniezioni su murature a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno

Per la tipologia muraria in pietrame disordinata sono state raccolte 23 indagini soniche dirette eseguite nella fase pre iniezione e nella fase post iniezione per la valutazione dell'efficacia dell'intervento. I valori raccolti sono esposti nella seguente tabella.

II - Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno - Interventi di consolidamento mediante iniezioni														
Tip. Mur	Sp [m]	Vel media	Vel media	Incr [%]	Litri/m ³ iniettati	Sito	Riferimento	Miscela	Dev.st Pre[m/s]	Dev. st Post	Cov Pre	Cov Post	Cov Post/CoV	
II	0,5	1011	2521	249%	158	5I	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	576	697	57%	28%	49%	
II	0,5	1018	2941	289%	227	7IT	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	530	145	52%	5%	9%	
II	0,33	1039	2857	275%	107	2B	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	305	227	29%	8%	27%	
II	0,33	2176	2808	129%	217	2C	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	683	237	31%	8%	27%	
II	0,33	900	2731	303%	220	2Dpt	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	682	310	76%	11%	15%	
II	0,33	666	2882	433%	220	2Dpp	(Pasin e Bresolato, 2008)	Fenix-B	206	164	31%	6%	18%	
II	0,5	1413	4275	303%	78,3	A6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	961	569	68%	13%	20%	
II	0,5	1048	4134	394%	78,3	A5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	714	652	68%	16%	23%	
II	0,5	1158	4040	349%	78,3	A4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	663	798	57%	20%	34%	
II	0,5	1206	3441	285%	75	B6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	390	289	32%	8%	26%	
II	0,5	1529	3920	256%	75	B5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	710	517	46%	13%	28%	
II	0,5	894	3722	416%	75	B4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	693	495	78%	13%	17%	
II	0,5	1246	3227	259%	81,6	C8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	504	383	40%	12%	29%	
II	0,5	1021	3146	308%	81,6	C7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	279	356	27%	11%	41%	
II	0,5	1118	2934	262%	81,6	C6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	329	437	29%	15%	51%	
II	0,5	1043	2985	286%	81,6	C5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	187	482	18%	16%	90%	
II	0,33	1326	3371	254%	46	D6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	831	610	63%	18%	29%	
II	0,33	1082	3703	342%	46	D5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	573	838	53%	23%	43%	
II	0,33	1250	3837	307%	46	D4	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	460	576	37%	15%	41%	
II	0,33	1200	3982	332%	47	E8	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	739	655	62%	16%	27%	
II	0,33	1504	3594	239%	47	E7	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	606	798	40%	22%	55%	
II	0,33	1485	4088	275%	47	E6	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	487	1501	33%	37%	112%	
II	0,33	968	3776	390%	47	E5	(Fattori e Scaggiante, 2011)	Fenix-B	431	869	45%	23%	52%	

Tabella 2.3. 4 - dati iniezioni su murature a conci sbozzati

Per tutti questi campi prova è stata utilizzata la stessa miscela Fenix-B, quindi i risultati possono considerarsi indipendenti dal tipo di miscela, e dipendenti solamente dalle modalità di esecuzione degli interventi e dalle caratteristiche dei singoli pannelli. E' utile ricordare che questi dati sono raccolte da sperimentazioni su pannelli murari costruiti appositamente, quindi senza gli effetti del degrado. Si è comunque cercato di avvicinarsi alla situazione reale evitando il lavaggio delle murature prima dell'iniezione, in modo da avvicinarsi alla caratteristica della malta deteriorata.

La velocità media complessiva passa da un valore iniziale pre iniezione di 1187 m/s ad un valore consolidato di 3431 m/s, con un incremento medio complessivo del 302%, frutto di un iniezione media di 98 l/m³ di miscela. Solo in un campo prova l'incremento è inferiore al 200%, ma questo si spiega con l'elevato valore iniziale di velocità, indice quindi di una muratura già in buono stato e quindi povera di vuoti dove iniettare a miscela, la quale facilmente è fluita in zone limitrofe.

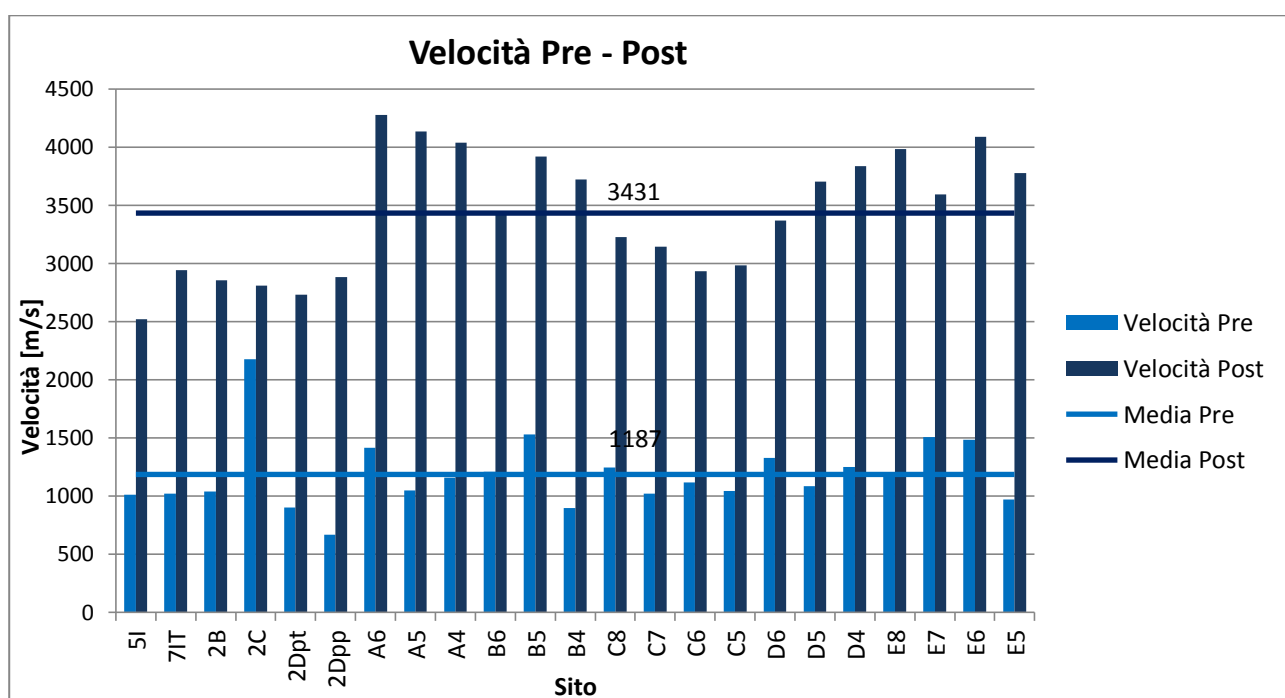


Figura 2.3. 2 - istogramma incrementi di velocità sonica murature a conci sbozzati

Per quanto riguarda la deviazione standard, il valore medio riferito alle murature non consolidate, pari a 545 m/s, è quasi uguale alla situazione post intervento, con valore medio pari a 548 m/s. Questo comunque è indice di un'omogeneizzazione dei pannelli, poiché il dato post intervento indica variazioni rispetto a valori medi più elevati, quindi in proporzione le murature risultano più omogenee.

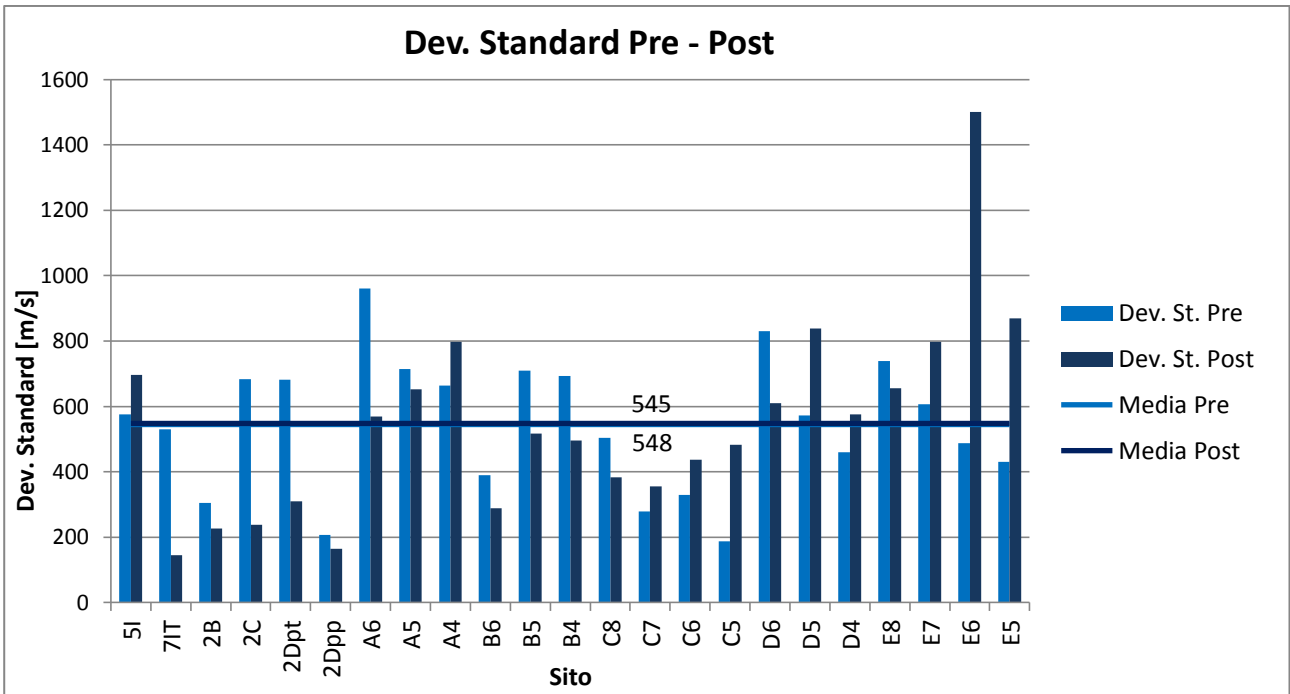


Figura 2.3. 3 - istogramma dev. standard pre e post iniezioni murature a conci sbazzati

L'omogeneizzazione dei pannelli viene espressa più chiaramente dai valori del coefficiente di variazione, il quale grazie al consolidamento con iniezioni subisce un brusco calo passando da un valore del 47% ad un valore del 16%, dimostrando un ottimo livello raggiunto.

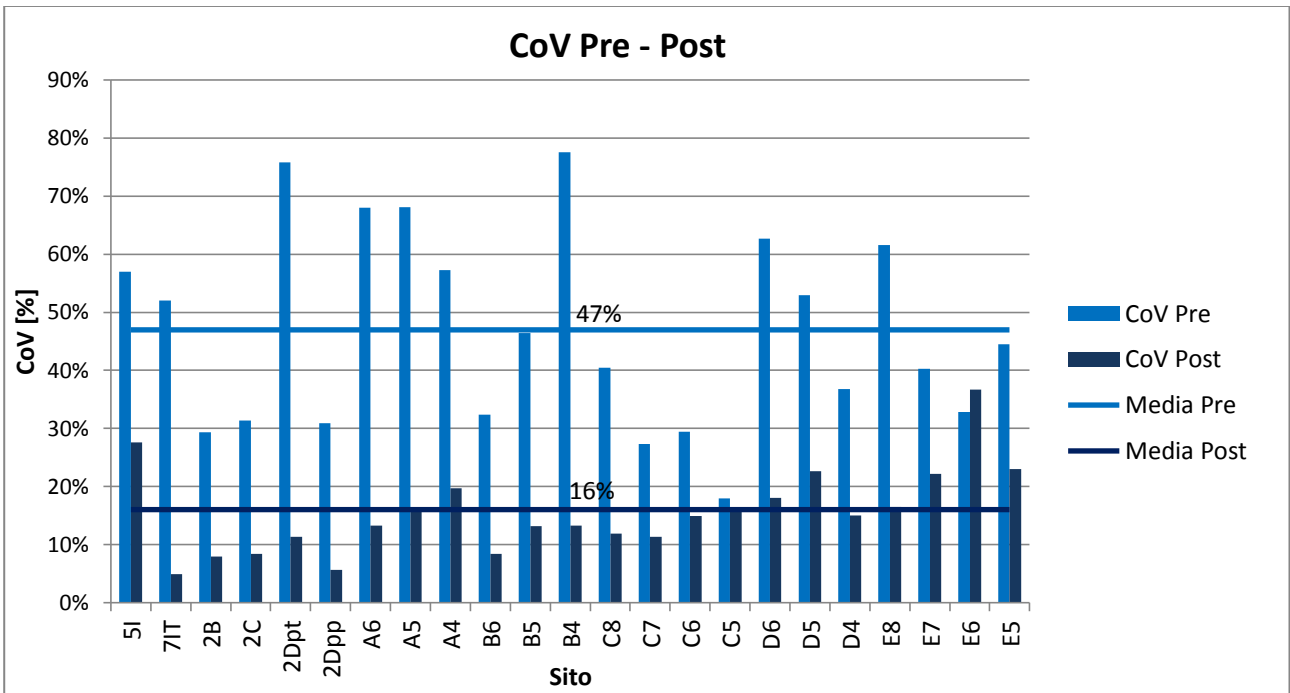


Figura 2.3. 4 - istogramma coefficiente di variazione pre e post iniezione su muratura a conci sbazzati

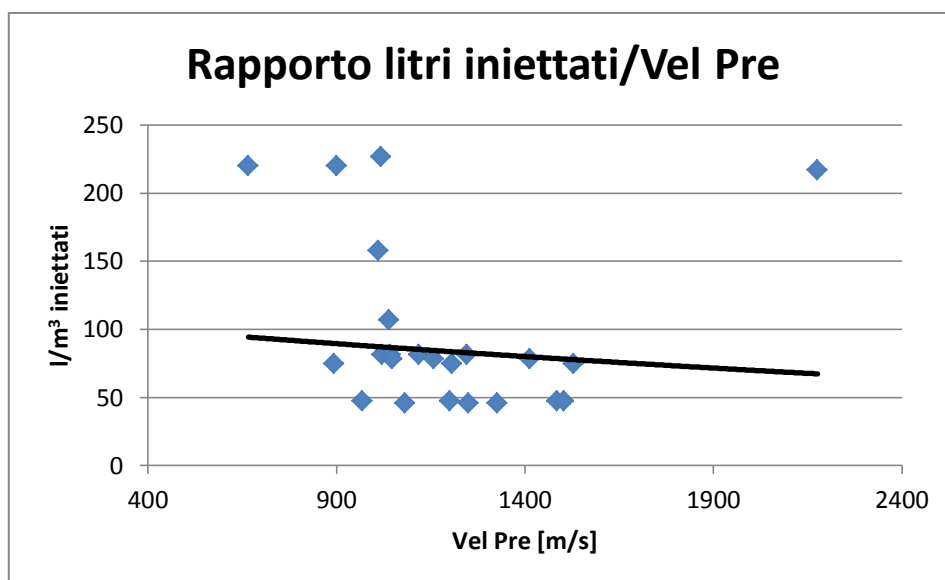


Figura 2.3. 5 - grafico rapporto litri iniettati/velocità sonica

Analizzando il rapporto tra i litri iniettati e le velocità soniche pre iniezioni viene confermato il fatto che l'iniettabilità dei pannelli diminuisce all'aumentare della velocità sonica, poiché diminuisce il anche il numero dei vuoti, come si può osservare dall'andamento del grafico soprastante.

2.4. Risultati

Questa raccolta di dati ha fornito dei valori medi che posso fare da riferimento per quanto riguarda i risultati che ci si può attendere da sperimentazioni ed interventi simili.

MEDIE	Vel. Pre [m/s]	Vel. Post [m/s]	Incremento Vel [%]	Dev. St. Pre [m/s]	Dev. St. Post [m/s]	Incremento Dev. St. [%]	CoV Pre [%]	CoV Post [%]	Incremento CoV [%]
PROVE PREGRESSE - Tipologia I	533	2104	434	-	-	-	-	-	-
PROVE PREGRESSE - Tipologia II	1187	3431	289	545	548	0,6	47	16	-66,0

Tabella 2.4.1 - raccolta valori medi pre e post iniezioni

Le murature analizzate per la tipologia I, cioè muratura in pietrame disordinata, presentano velocità iniziali molto basse ed incrementi che raggiungono valori circa 4 volte quelli iniziali. Più basso ma comunque consistente l'incremento che si è raggiunto per la tipologia II, cioè muratura a conci sbozzati, con un incremento di velocità sonica di quasi tre volte il valore iniziale, partendo però da una situazione pre consolidamento notevolmente migliore, con velocità superiore ai 1000 m/s.

3. CASO STUDIO – IL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA

3.1. 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.



Figura 3.1.1 - inquadramento geografico Verona (GoogleMaps)

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.



Figura 3.1.2 - inquadramento Museo Archeologico al Teatro Romano (GoogleEarth)

3.2. 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.

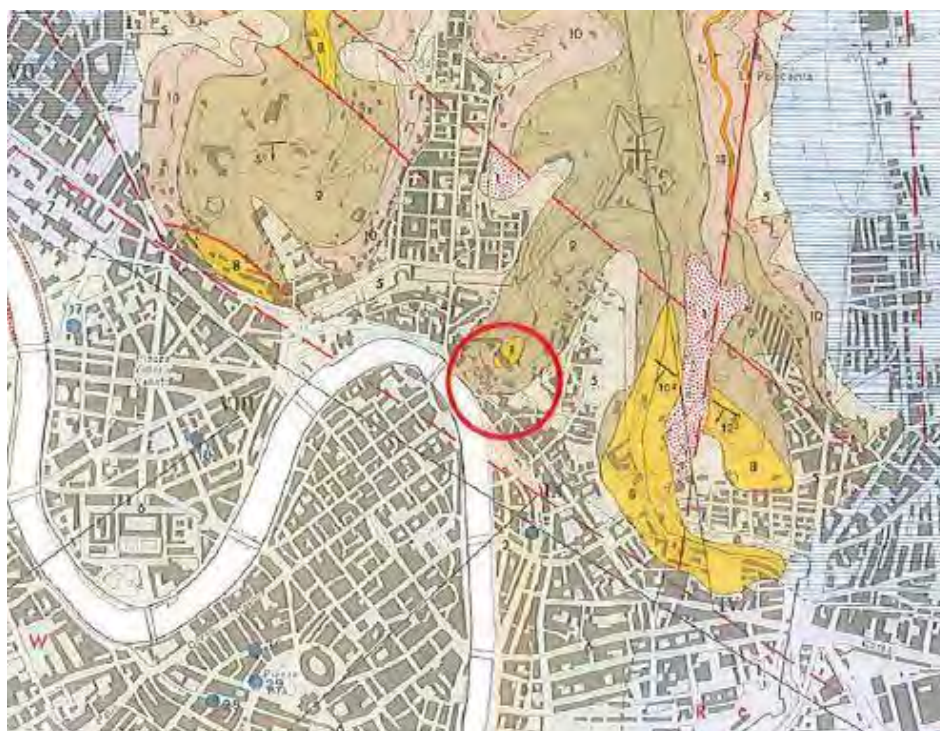


Figura 3.2.1 - carta geologica del territorio comunale di Verona e legenda

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.

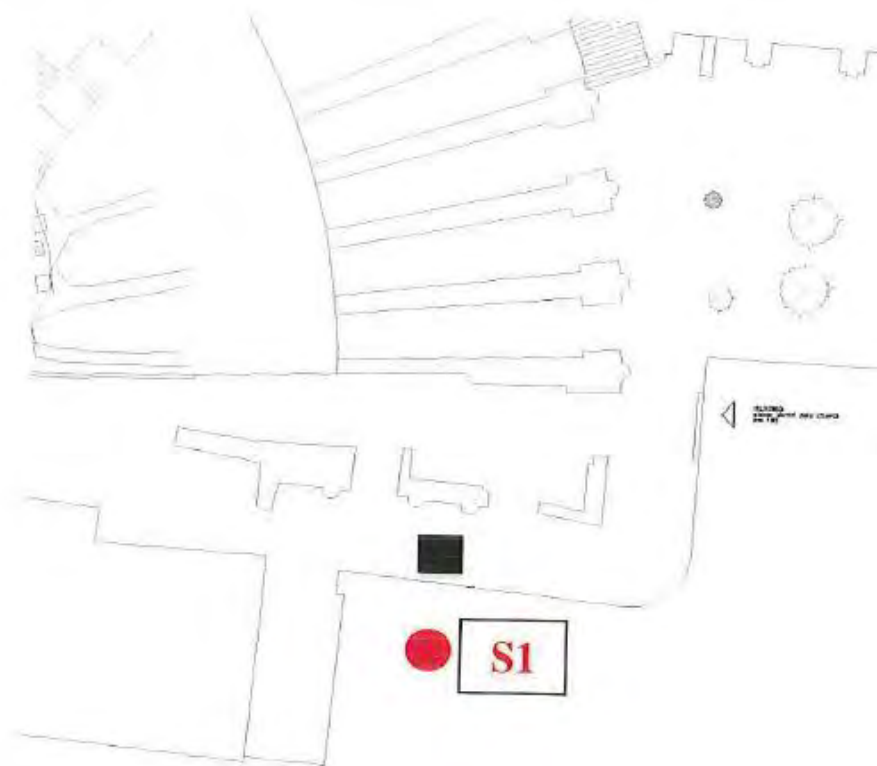


Figura 3.2. 2 - Localizzazione del sondaggio S1

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

3.3. 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.



Figura 3.3. 1 - 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.

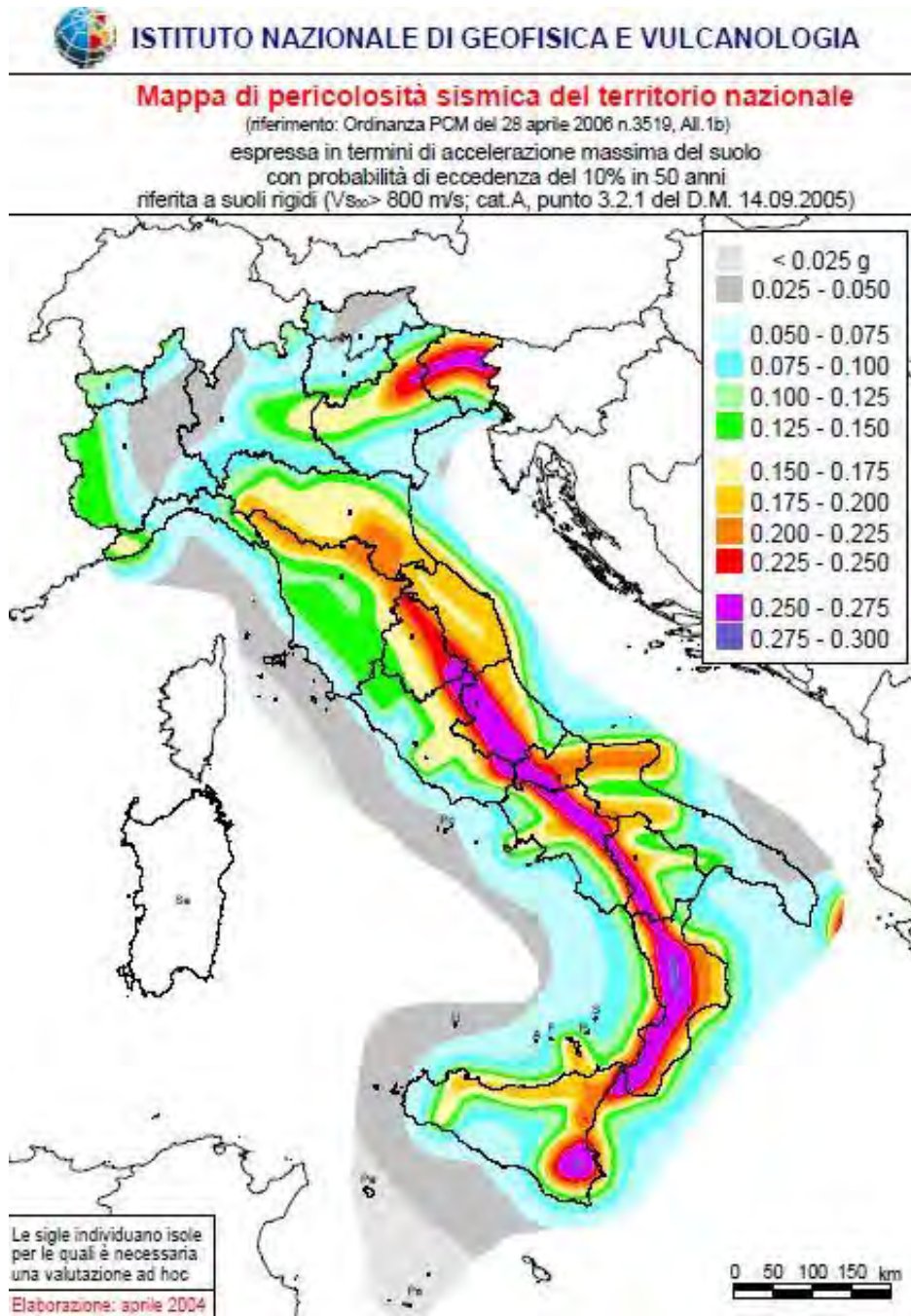


Figura 3.3. 2 - Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale OPCM 3519 (www.ingv.it)

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

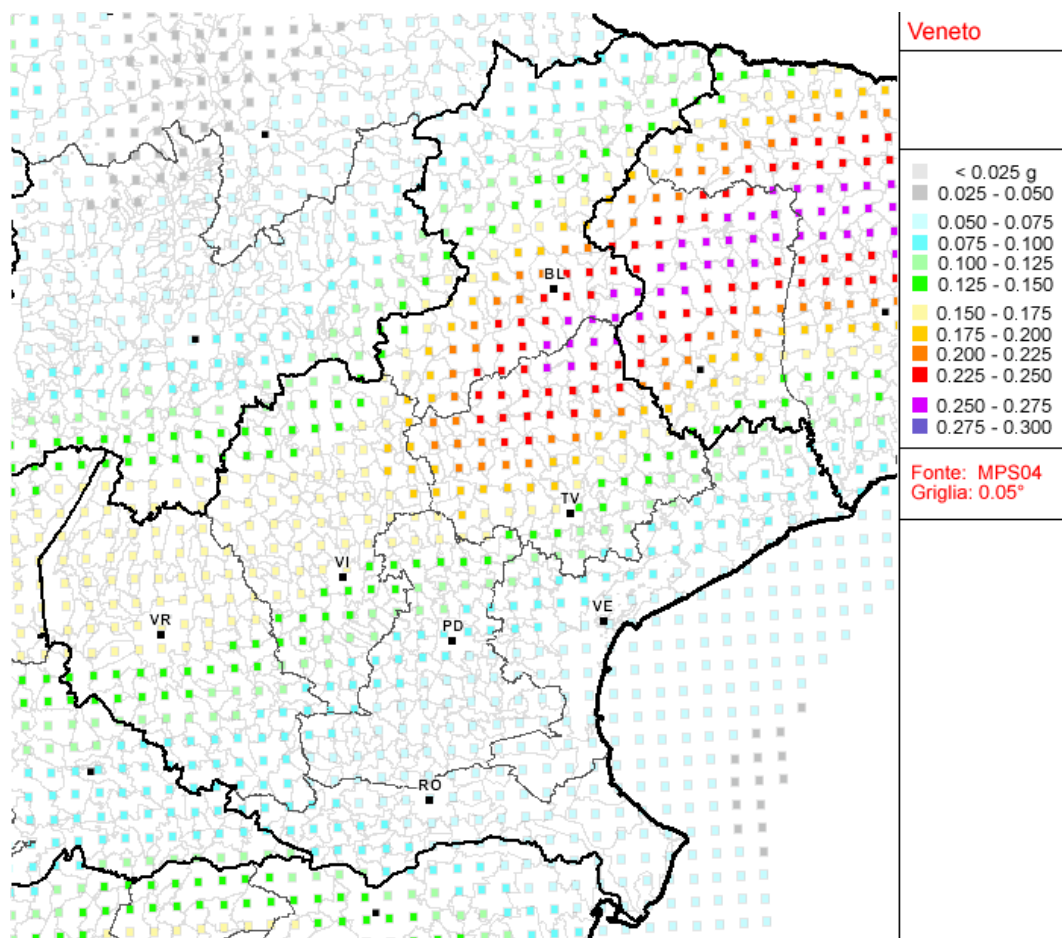


Figura 3.3. 3 - Mappa di pericolosità sismica del Veneto OPCM 3519 (www.ingv.it)

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

3.4. Inquadramento storico

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.

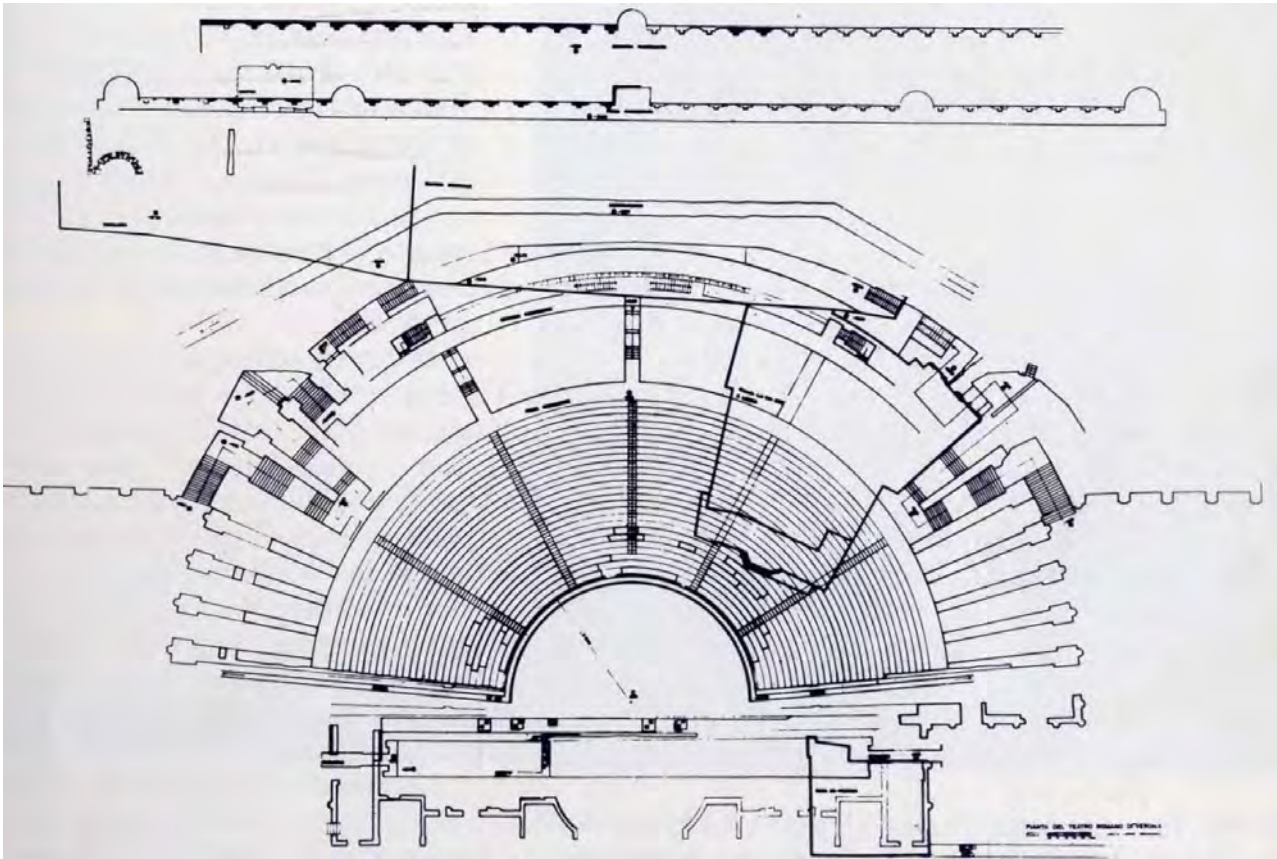


Figura 3.4. 1 - ricomposizione della pianta del Teatro Romano fino alla 'seconda passeggiata', dopo gli ultimi scavi nella fossa scenica (1971)

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



Figura 3.4. 2 - veduta generale dell'area del teatro fra Ponte Pietra e i ruderi di Ponte Postumio dal livello dell'Adige (1893)

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.

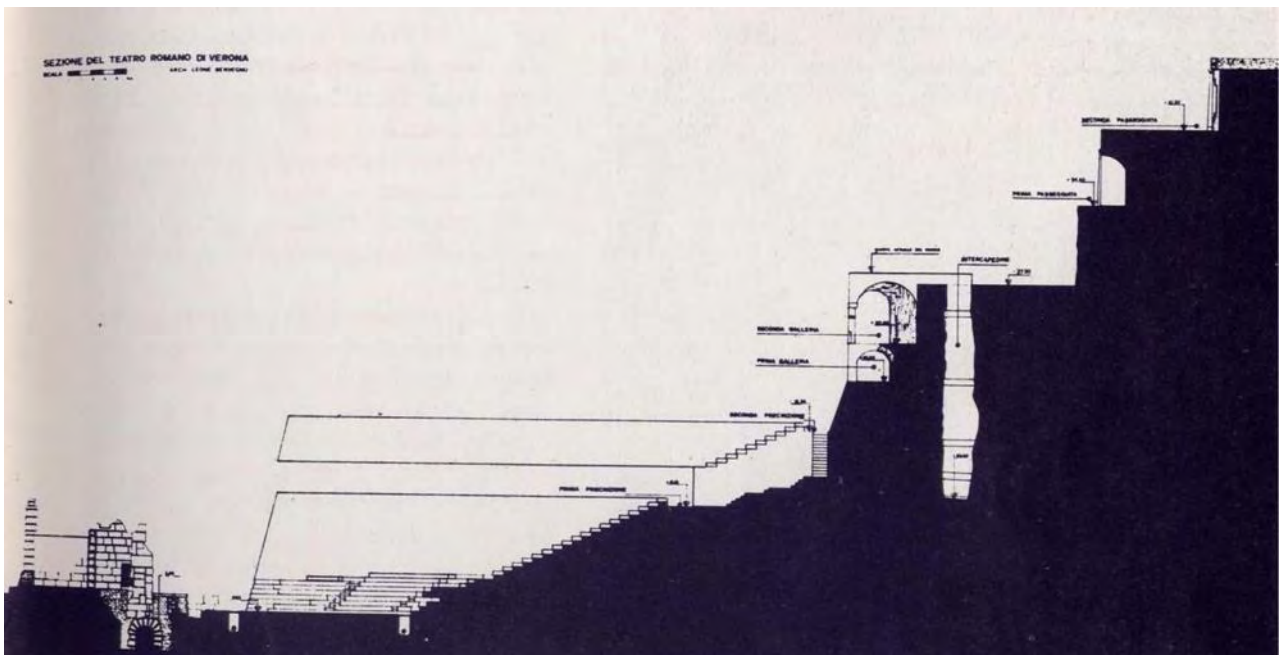


Figura 3.4. 3 - sezione del teatro dalla scena fino alla 'seconda passeggiata' (arch. L. Benvegnù, 1980)

Il Museo Archeologico

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.



Figura 3.4. 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.



Figura 3.4. 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.

Recupero del museo. 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.

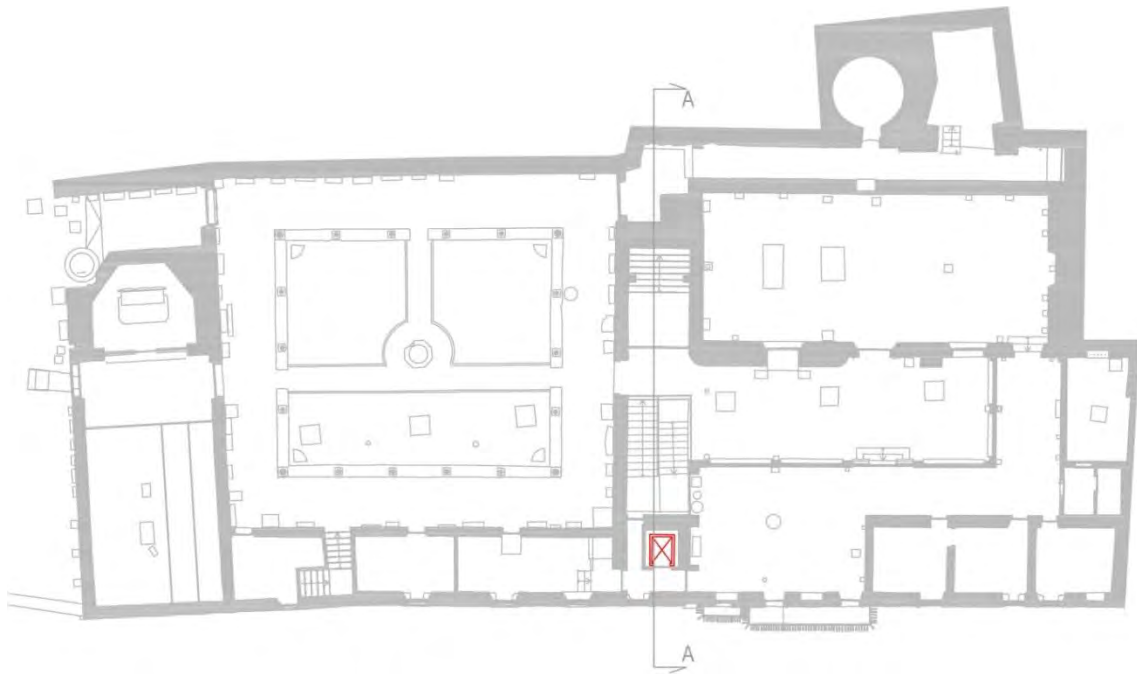


Figura 3.4. 6 - Pianta livello IV – localizzazione ascensore

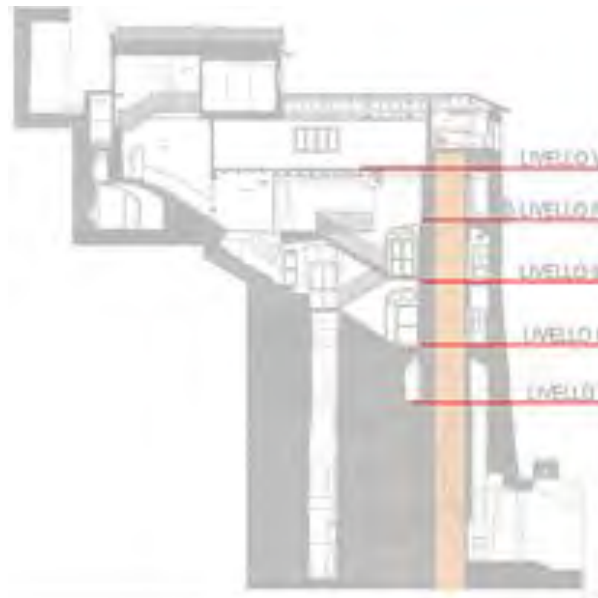


Figura 3.4. 7 - sezione A-A – localizzazione ascensore

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.

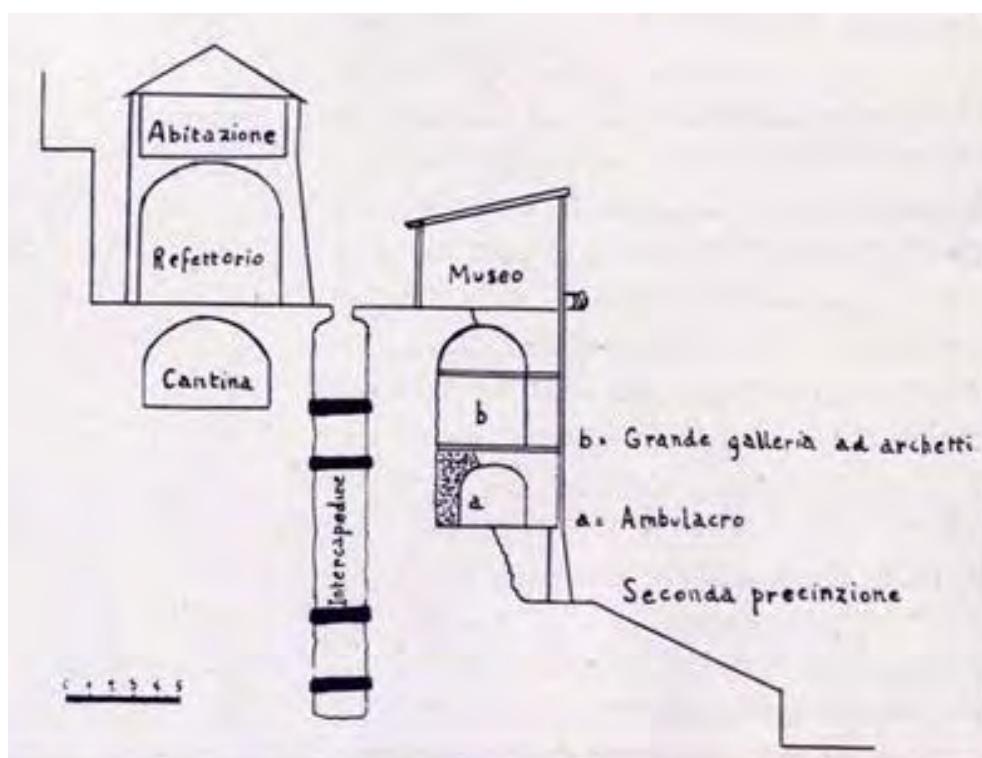


Figura 3.4. 8 - Sezione museo archeologico e intercapedine

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.

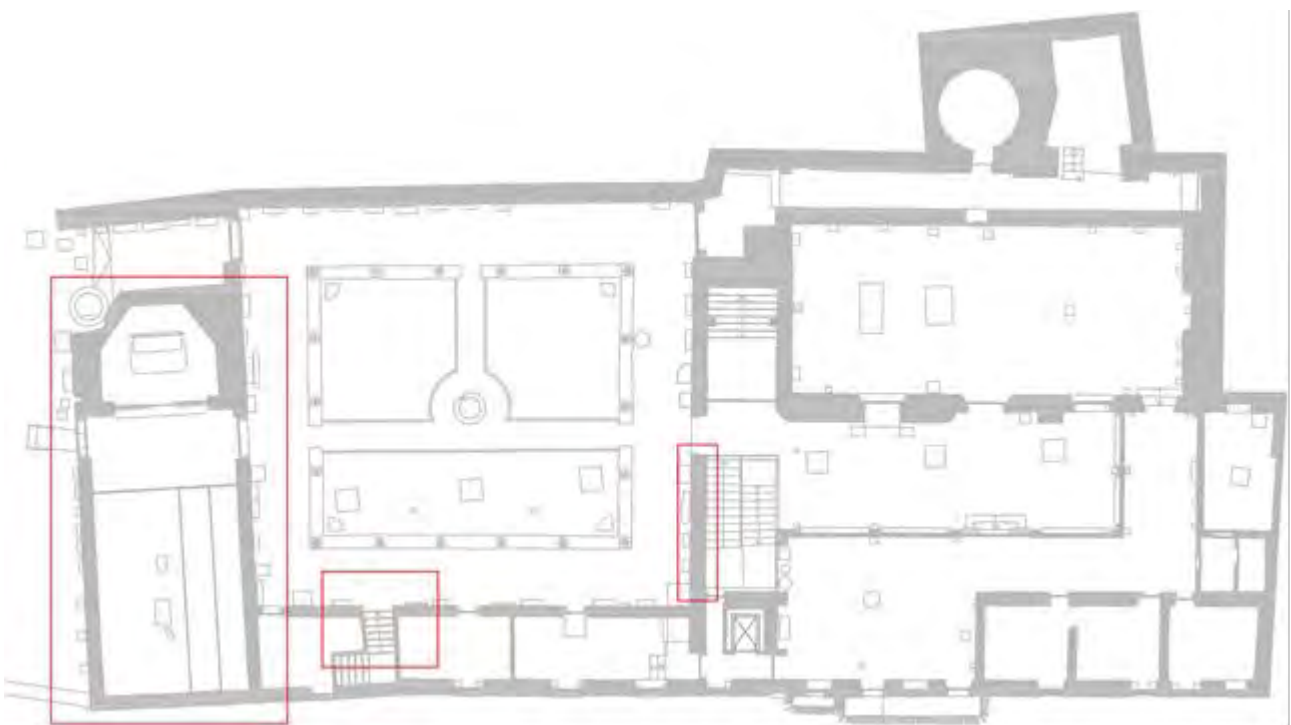


Figura 3.4. 9 - Pianta livello IV – zone interventi 1974-75

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.

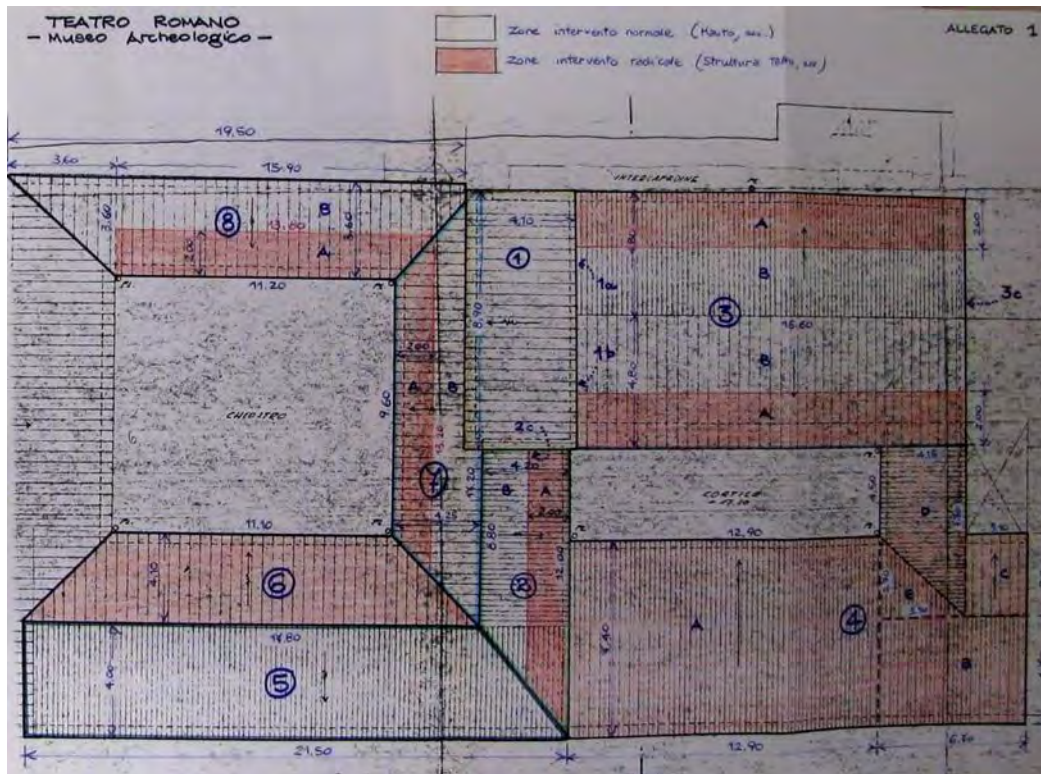


Figura 3.4. 10 - Progetto restauro museo 1985: libretto delle misure_allegato 1_pianta coperture

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.

3.5. Descrizione del sito

Il sito in cui è situato il Museo Archeologico è fortemente caratterizzato dal pendio su cui è arroccato. Infatti i vari edifici o porzioni di essi sono situati a livelli differenti, partendo dal livello di +24 m del teatro per arrivare al pavimento degli uffici sovrastanti il refettorio che sono situati ad una quota +45 m.

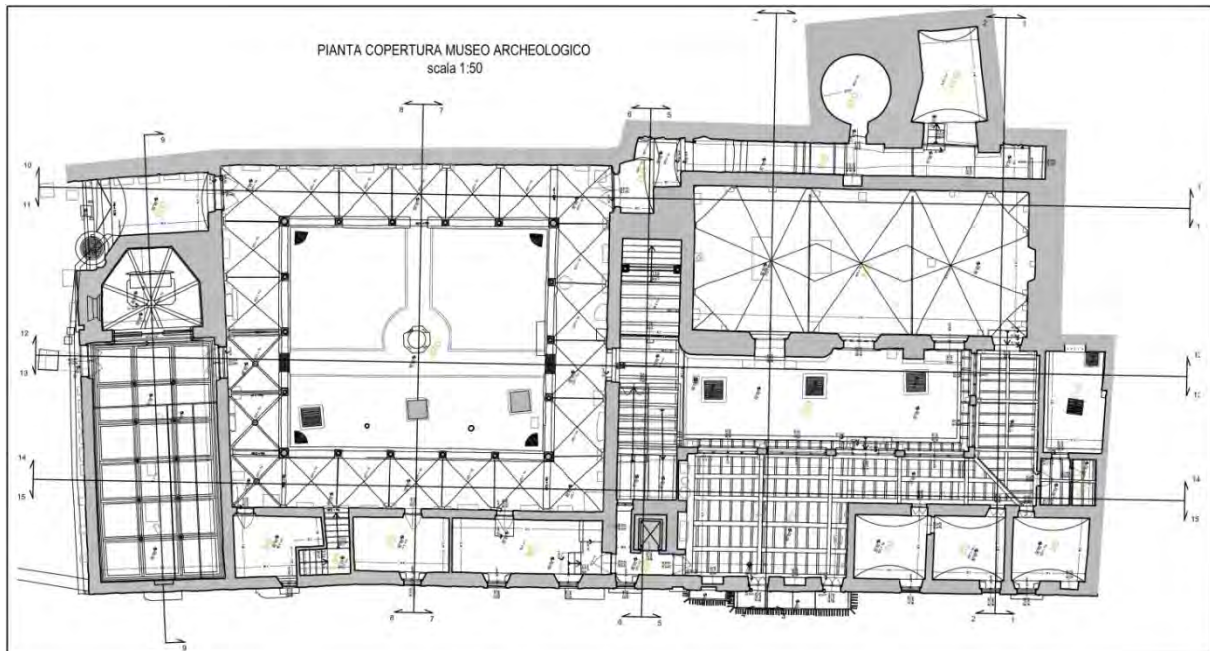


Figura 3.5. 1 - pianta livello IV

Nella pianta del quarto livello sono visibili le principali parti che costituiscono questo sito, con le celle del convento affacciate a sud sul teatro, la chiesa di San Girolamo nel lato a nord-ovest affiancata dal chiostro, mentre nel lato est è presente l'edificio del refettorio.

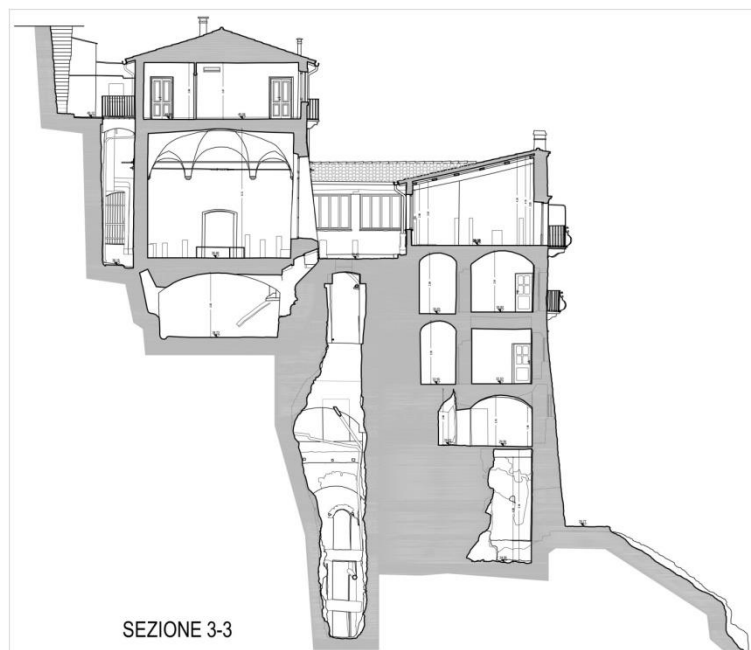


Figura 3.5. 2 - sezione

La sezione dell'edificio permette di apprezzare lo sviluppo del complesso su più livelli, con la parte anteriore che arriva fino al livello del teatro, mentre sul lato opposto si possono osservare i tre livelli dell'edificio del refettorio, con la zona sottostante con volta a botte e l'ultimo piano con gli uffici. Inoltre è possibile osservare la disposizione dell'intercapedine principale che separa il convento dal pendio. Una seconda intercapedine è situata al livello superiore.



Figura 3.5. 3 - foto sito Teatro Romano - Museo Archeologico

La foto mostra lo sviluppo del sito, dal livello del teatro, assimilabile al livello stradale, fino alla zona appena sottostante Castel San Pietro.

3.6. Fase sperimentale

3.6.1. Programma sperimentale

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).

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.

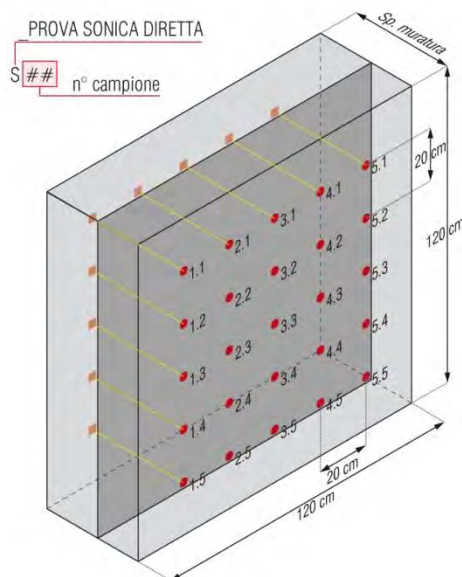


Figura 3.6. 1. schema prova sonica diretta (Cescatti, 2015)

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.

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.

Tomografie soniche

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



Figura 3.6. 2 - foto esecuzione tomografia sonora

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.

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.

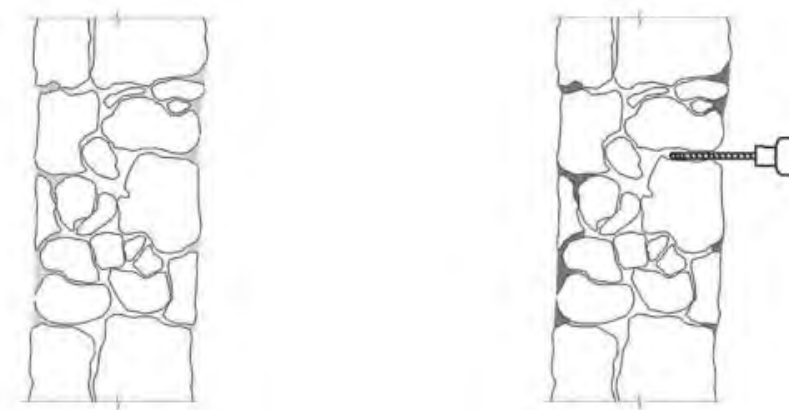


Figura 3.6. 3 - schema preparazione pannello per iniezione

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 esser 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.

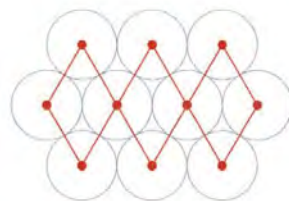


Figura 3.6. 4 - schema griglia fosi di iniezione

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.



Figura 3.6. 5 - pompa per iniezione miscela

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.

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.

3.6.2. Indagini soniche dirette per la qualificazione delle murature – fase pre iniezione

3.6.2.1. Prova sonica diretta So1

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.

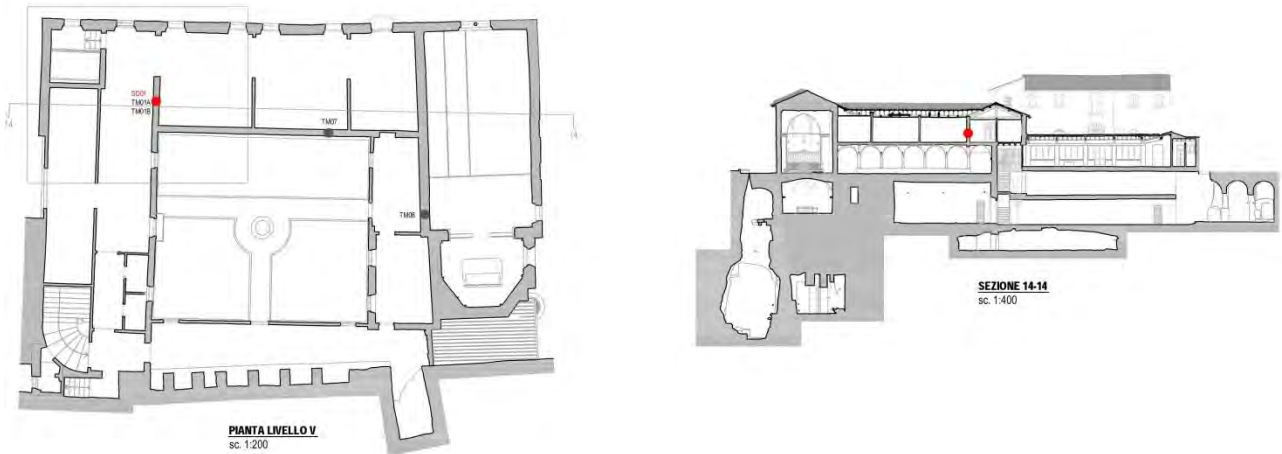


Figura 3.6. 6 - localizzazione prova sonica diretta So1

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

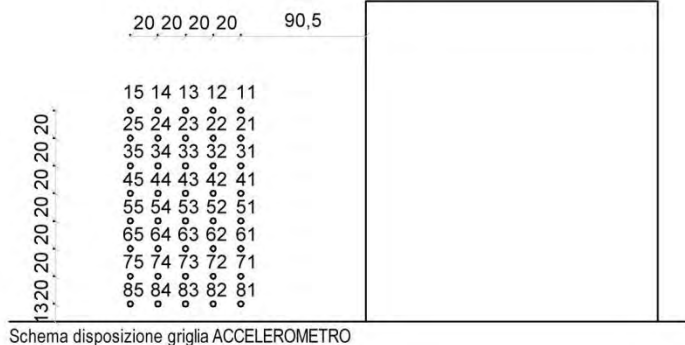
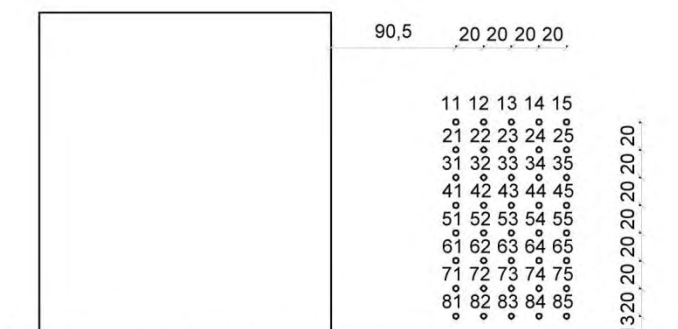


Figura 3.6. 7 - foto e schema griglia So1 lato accelerometro



Disposizione griglia MARTELLO



Schema disposizione griglia MARTELLO

Figura 3.6. 8 - foto e schema griglia lato martello

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								
N PUNTO	ID	BATTUTA			sp	0.30	m	Velocità
		a	b	c	media	dev	CoV	
#		[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

Tabella 3.6. 1 - tabella acquisizioni segnali So1

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.

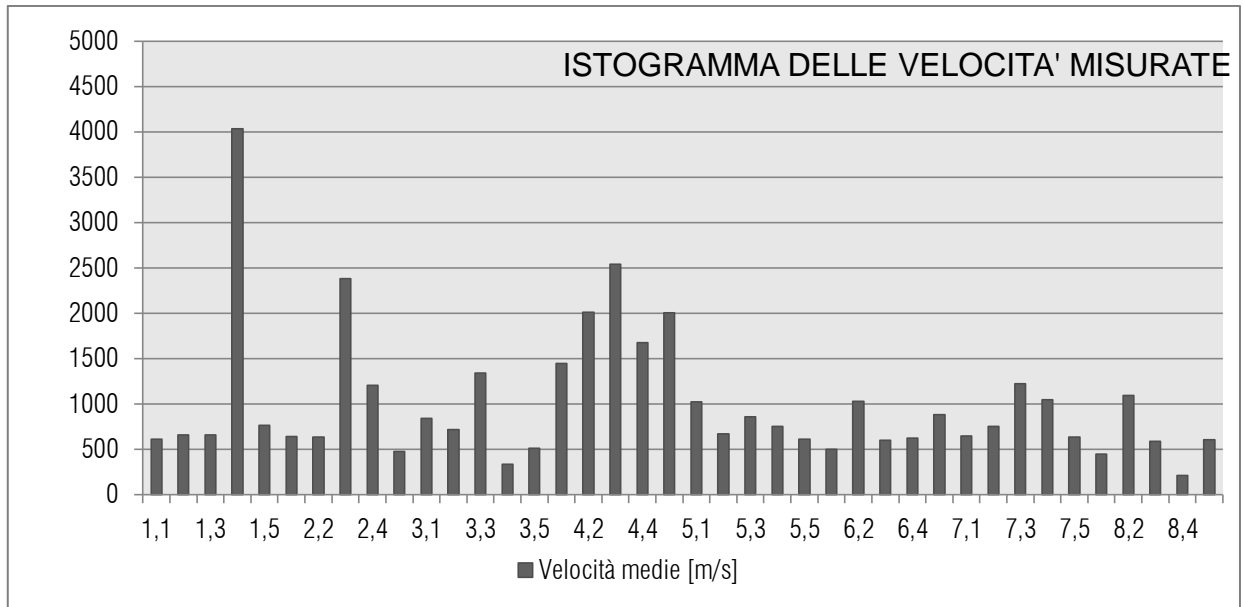


Figura 3.6. 9 - istogramma velocità soniche S_{01}

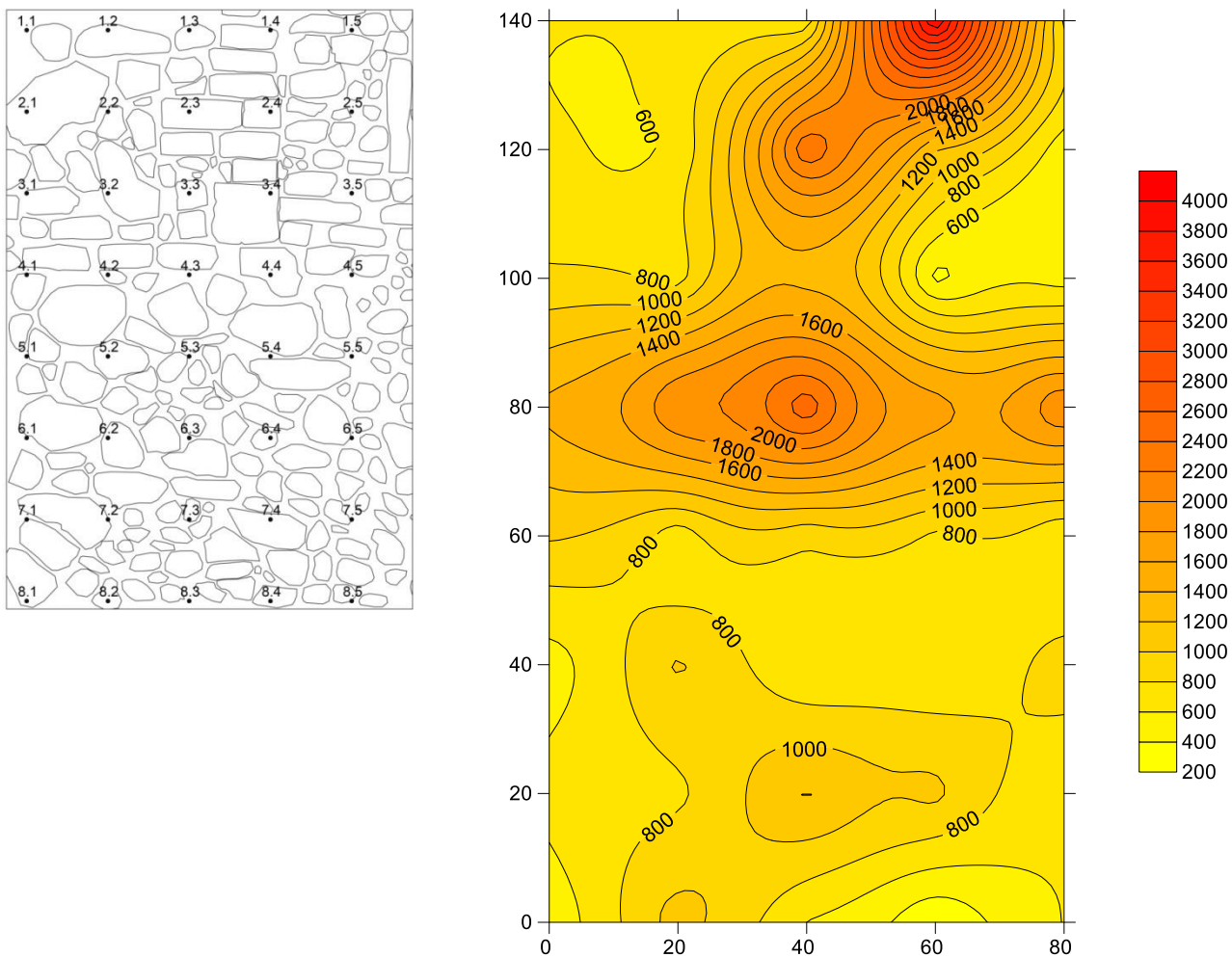


Figura 3.6. 10 - prospetto e grafico distribuzione di velocità sonica S_{01}

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.



Figura 3.6. 11 - foto prospetto So1

3.6.2.2. Prova sonica diretta So2

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.

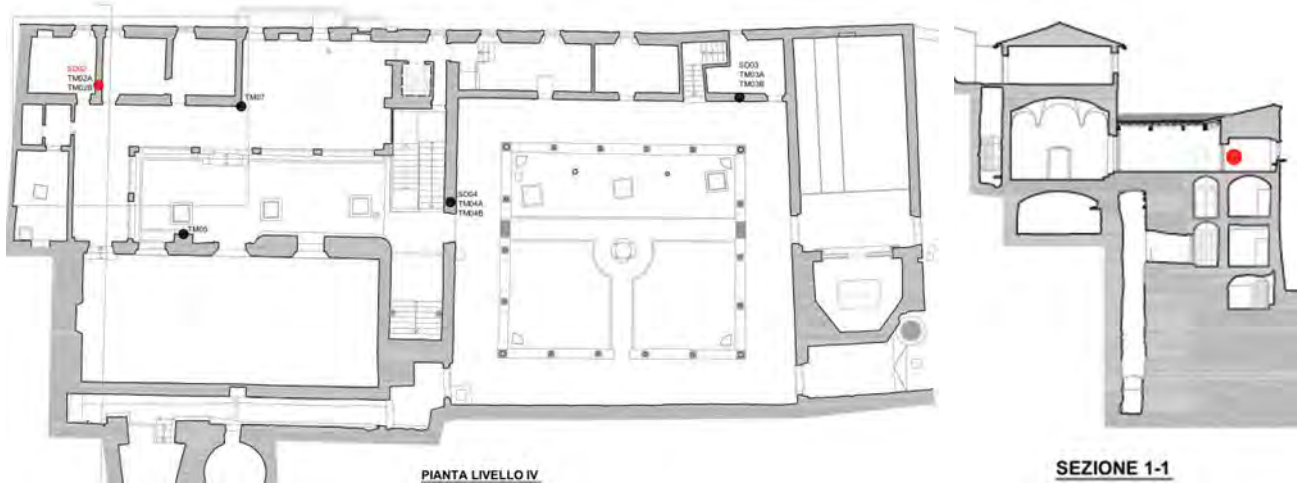


Figura 3.6. 12 - localizzazione So2

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.

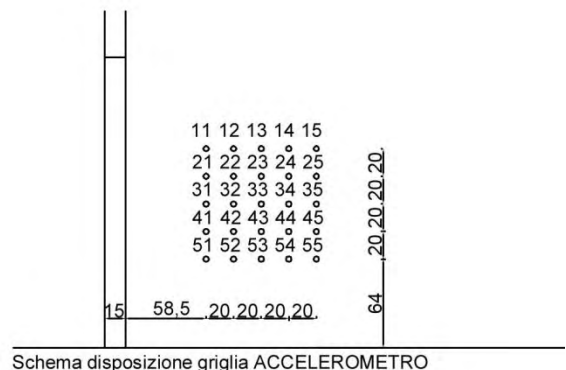


Disposizione griglia ACCELEROMETRO

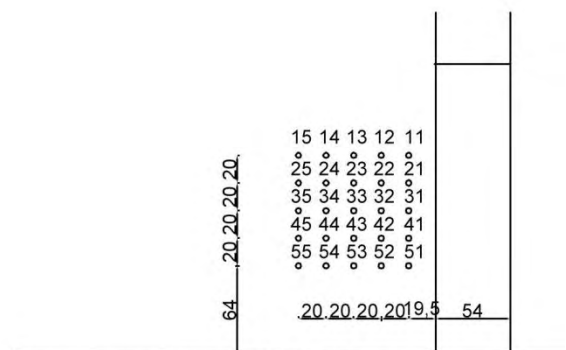


Disposizione griglia MARTELLO

Spessore porzione di muratura indagata: 0.36m



Schema disposizione griglia ACCELEROMETRO



Schema disposizione griglia MARTELLO

Figura 3.6. 13 - foto e schemi griglie So2 lato accelerometro e lato martello

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								
N PUNTO	ID	BATTUTA			sp	0,36	m	Velocità
		a	b	c	media	dev	CoV	
#		[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

Tabella 3.6. 2 - tabella acquisizione segnali 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, che supera di cinque volte la velocità minima registrata nel pannello pari a 537,56 m/s nel punto 4.4.

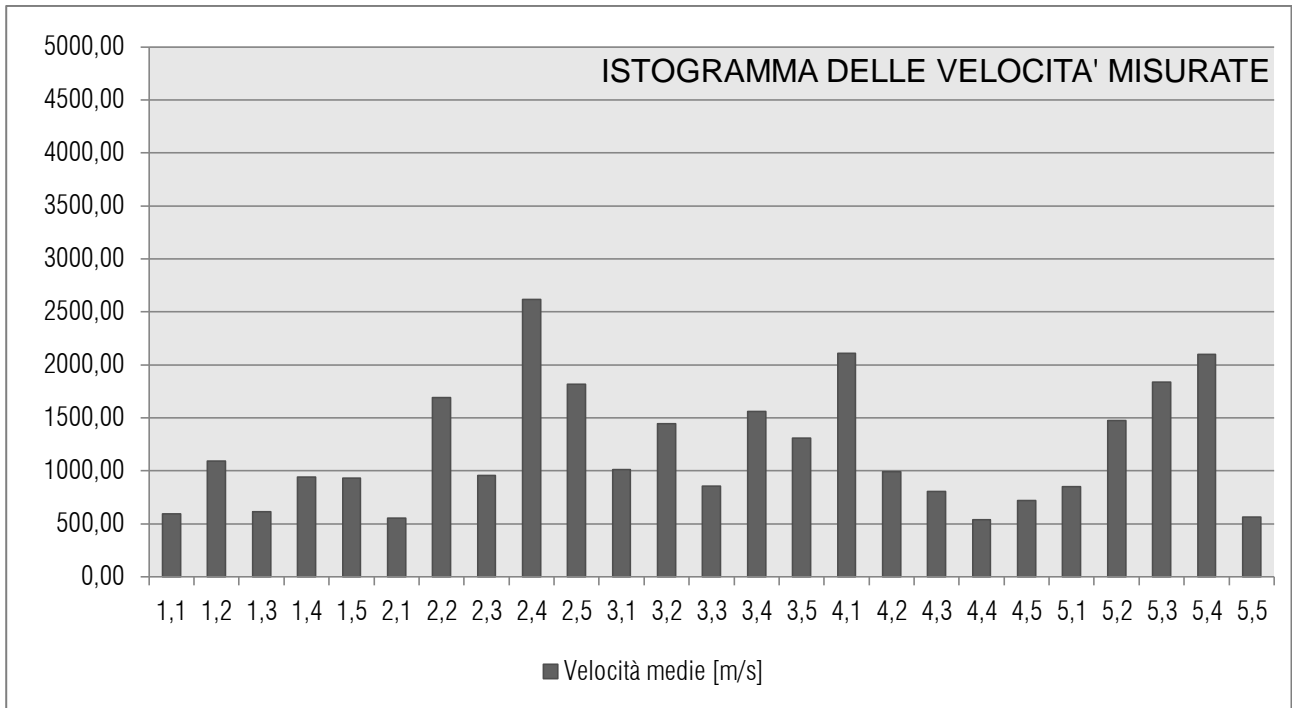


Figura 3.6. 14 - istogramma velocità soniche So₂

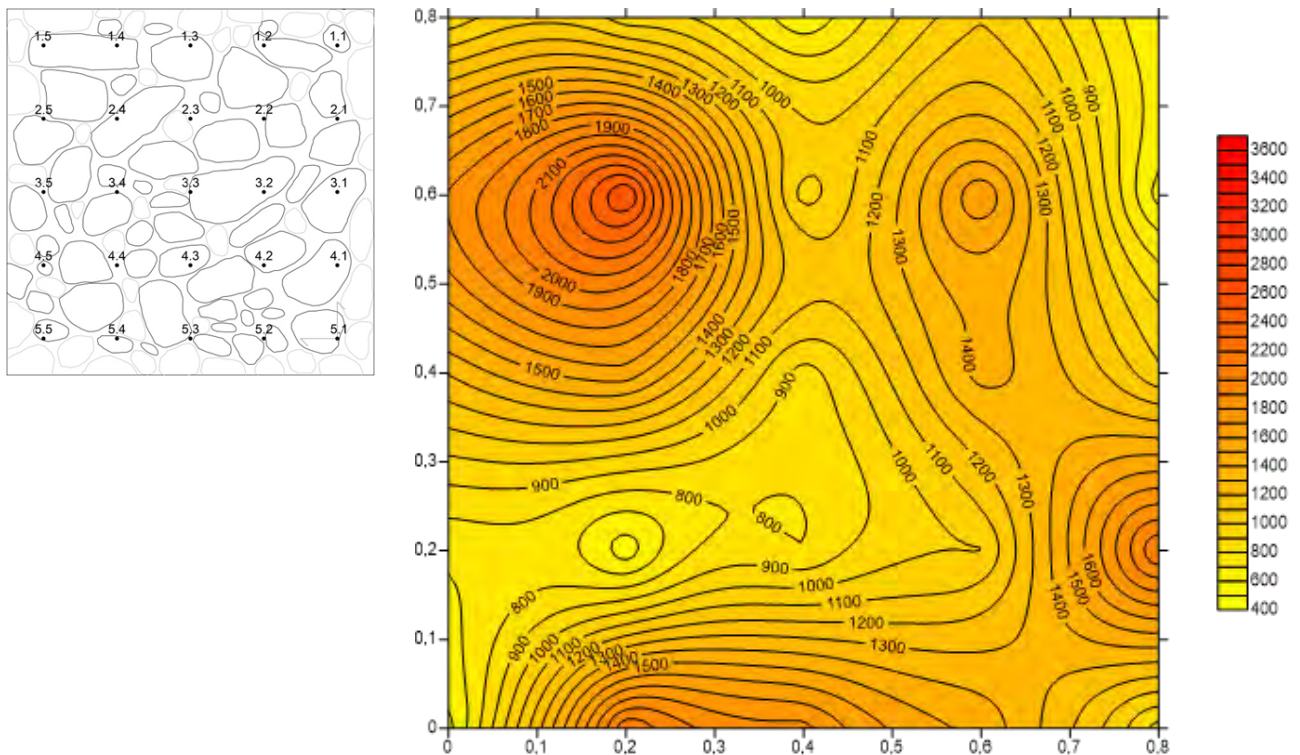


Figura 3.6. 15 - Griglia di acquisizione e grafico di distribuzione delle velocità soniche So₂

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.

3.6.2.3. Prova sonica diretta S03

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.

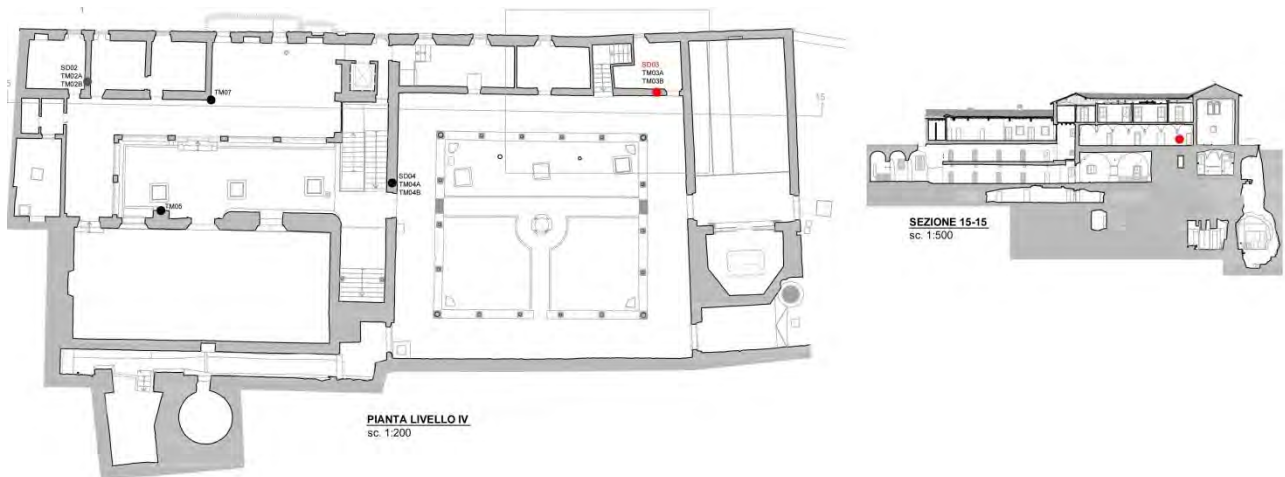


Figura 3.6. 16 - localizzazione prova sonica S03

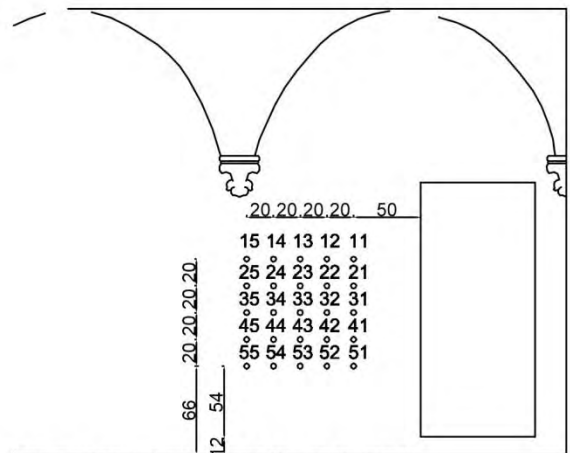
Spessore porzione di muratura indagata: 0.375m



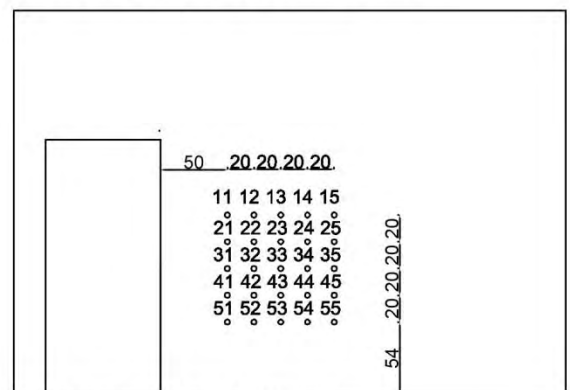
Disposizione griglia ACCELEROMETRO



Disposizione griglia MARTELLO



Schema disposizione griglia ACCELEROMETRO



Schema disposizione griglia MARTELLO

Figura 3.6. 17 - foto e schema griglia di acquisizione S03 lato accelerometro e lato martello

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									
N PUNTO	ID	BATTUTA			sp	0.375	m	CoV	Velocità
		a	b	c	media	dev			
#		[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	

Tabella 3.6. 3 - tabella acquisizione segnali So3

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.

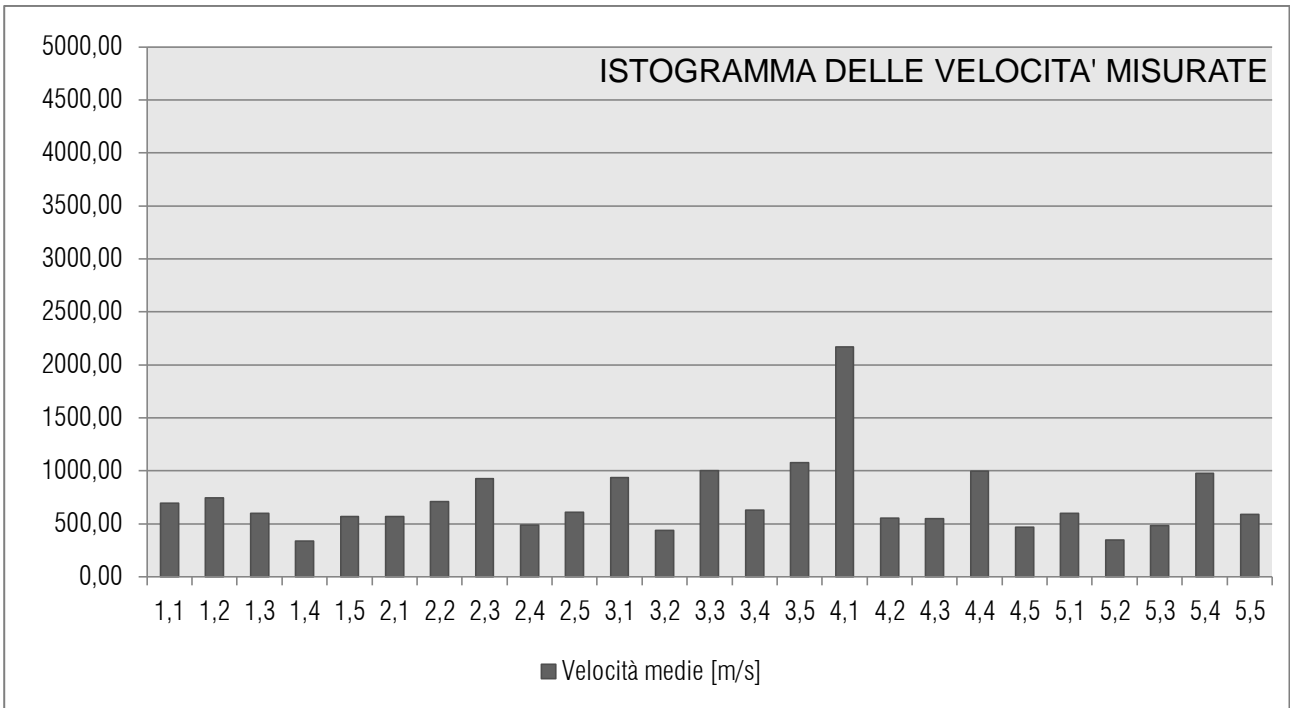


Figura 3.6. 18 - istogramma velocità soniche So_3

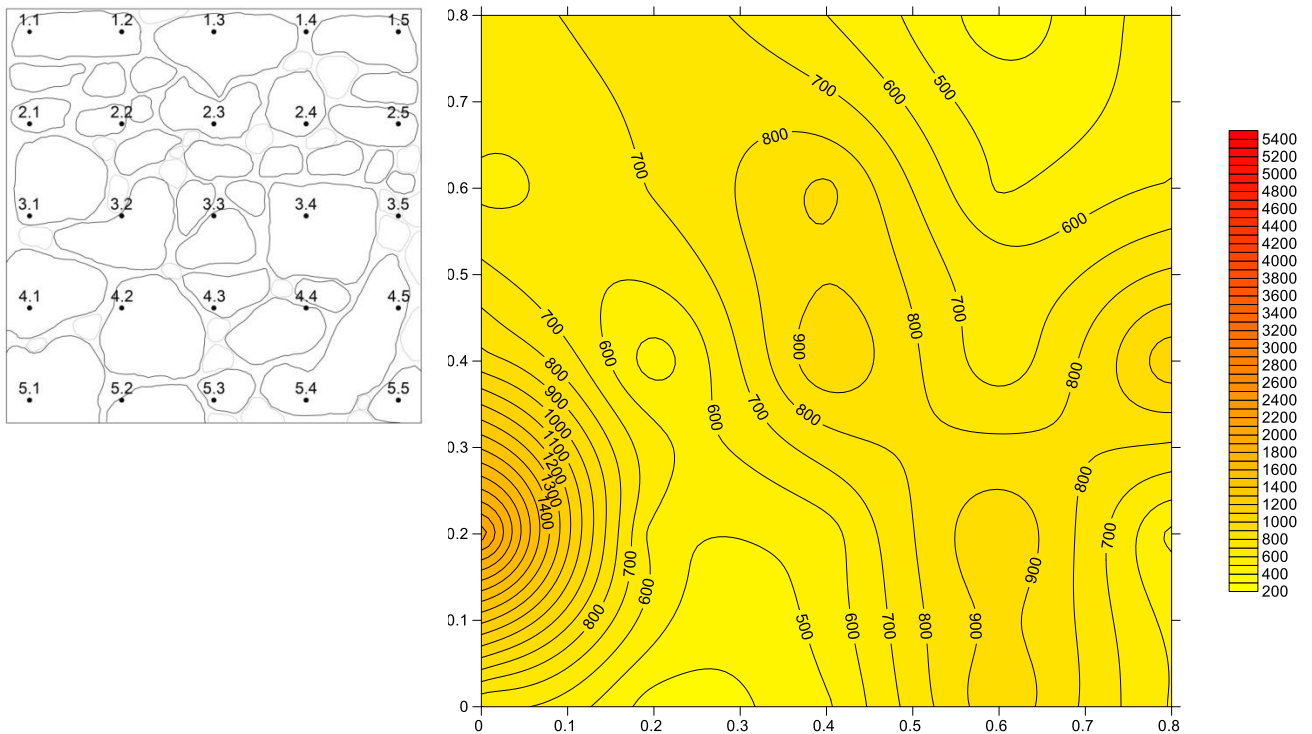


Figura 3.6. 19 - griglia di acquisizione e grafico di distribuzione velocità soniche So_3

Il grafico di distribuzione delle velocità soniche 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

3.6.2.4. Prova sonica diretta So4

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.

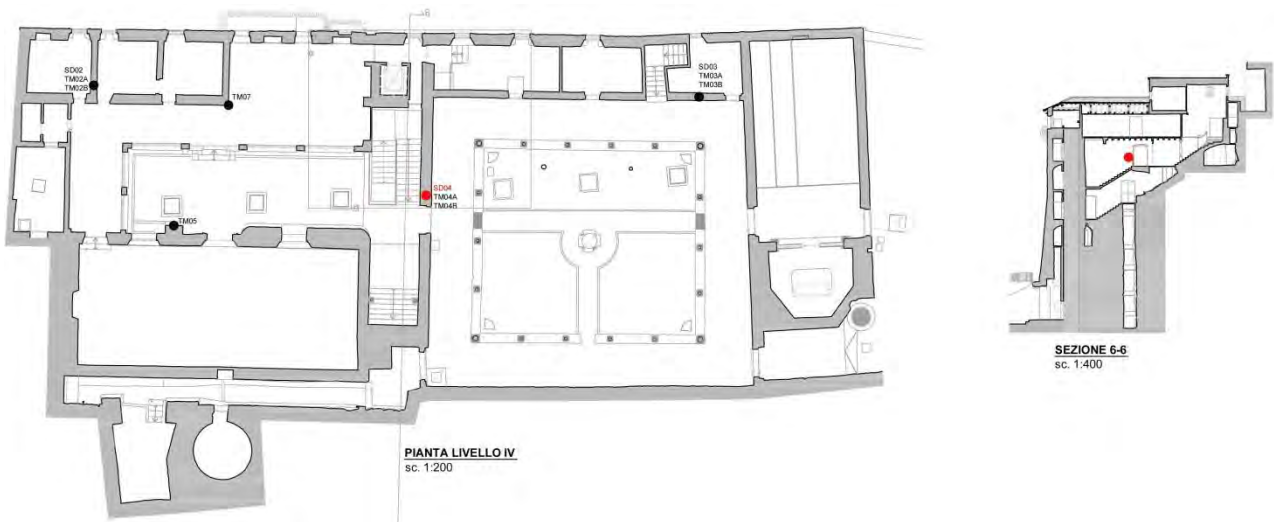


Figura 3.6. 20 - localizzazione prova sonica So4

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.

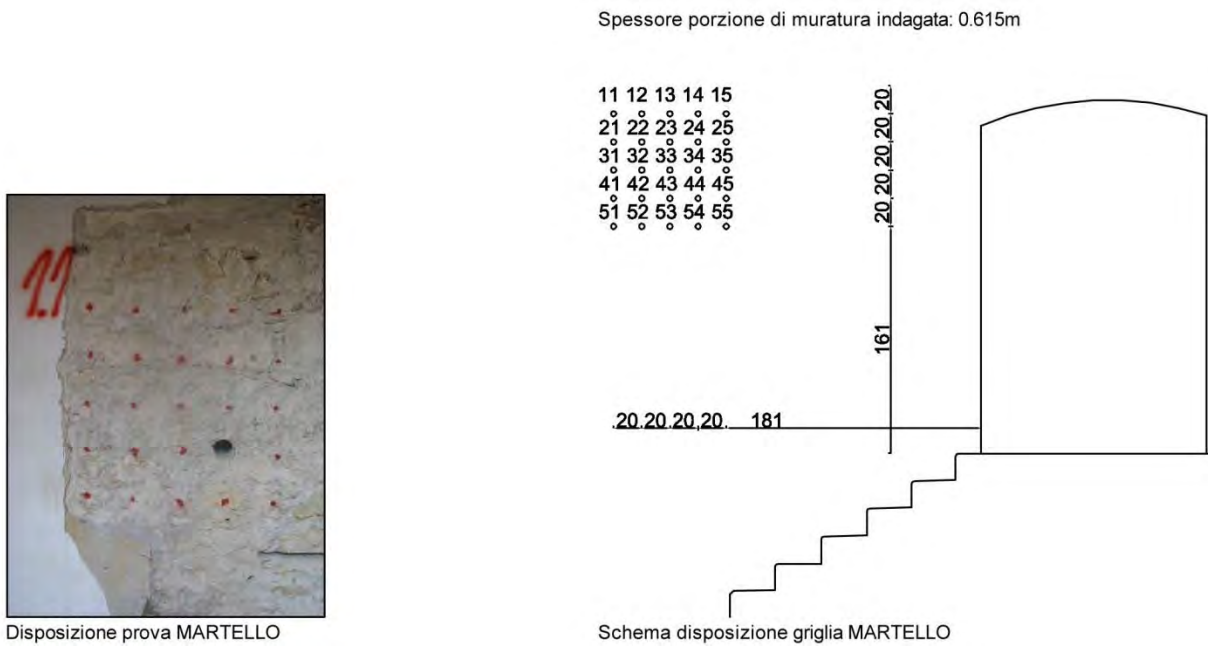


Figura 3.6. 21 - foto e schema griglia di acquisizione So4 lato martello

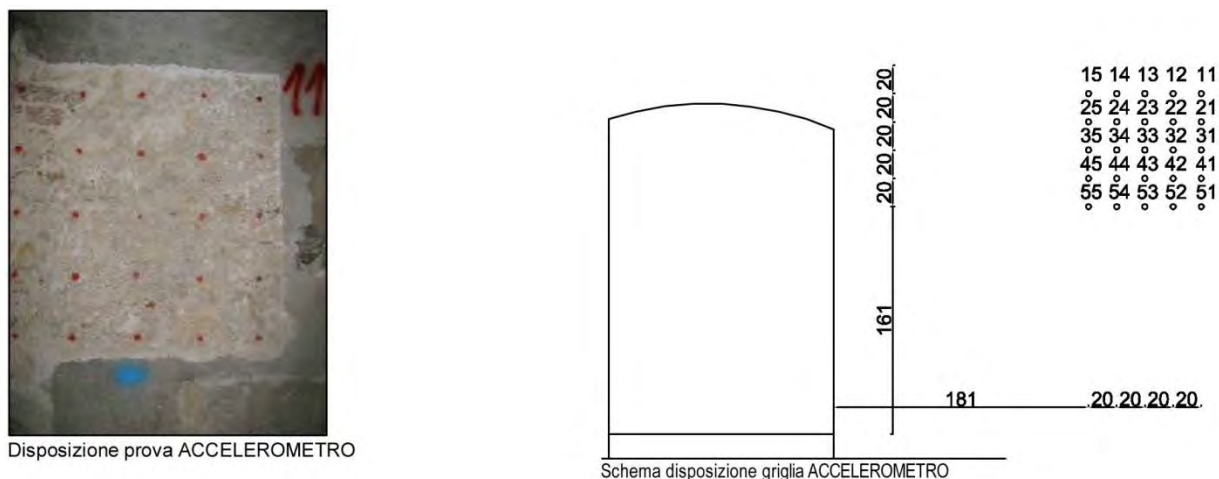


Figura 3.6. 22 - foto e schema griglia di acquisizione So₄ lato accelerometro

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 acquisizioni, delle quali si è calcolata la media. 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	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

Tabella 3.6. 4 - tabella acquisizione segnali 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.

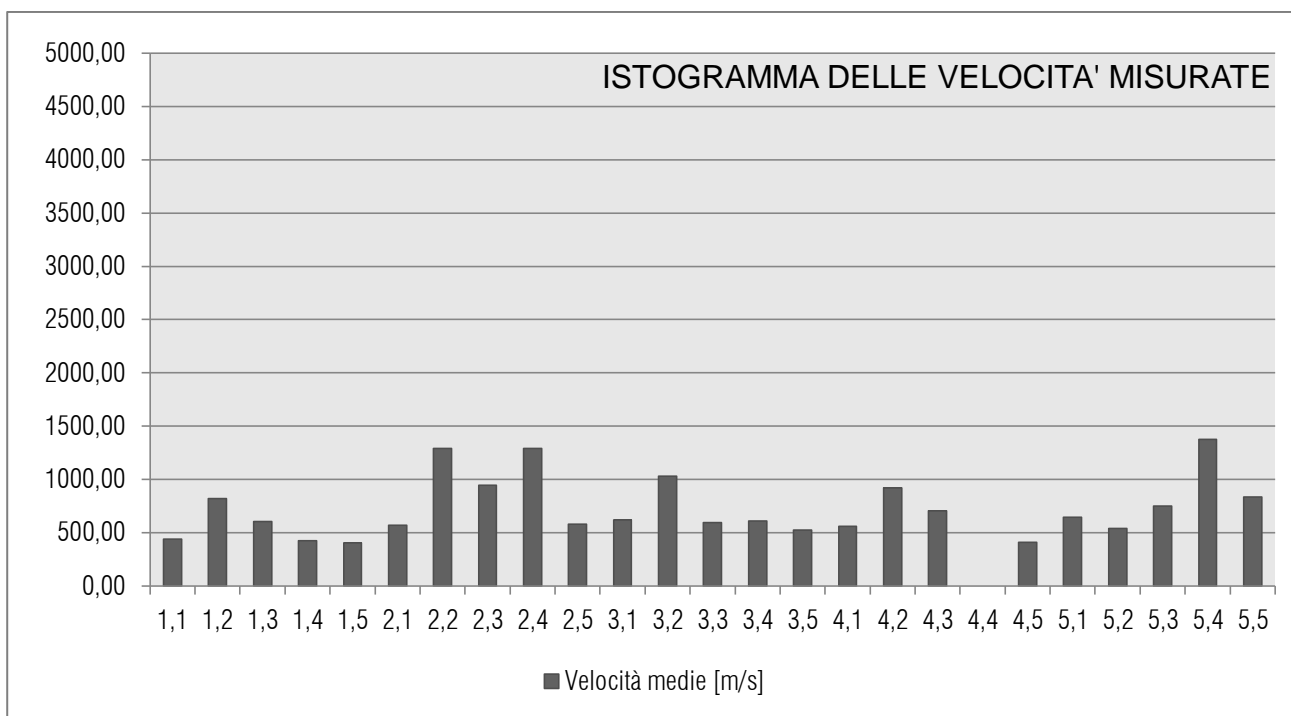


Figura 3.6. 23 - istogramma velocità soniche So4

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.

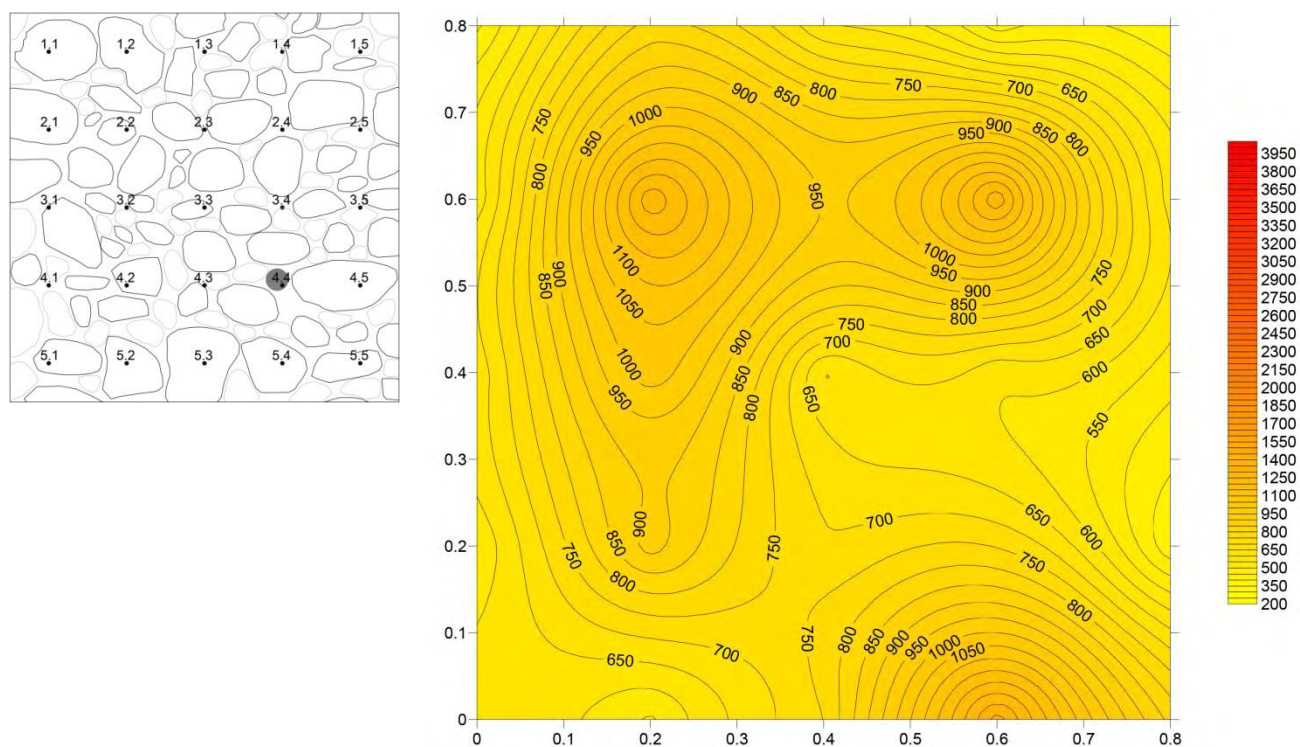


Figura 3.6. 24 - griglia di acquisizione e grafico distribuzione velocità soniche So_4

3.6.3. Indagini soniche tomografiche per la qualificazione delle murature

Nel sito in esame sono state eseguite anche delle indagini soniche tomografiche il sezioni particolari dell'edificio, in particolare un contrafforte, un angolo e due sezioni lunghe, una in corrispondenza di un tamponamento e una su una parte affrescata.

A causa dell'elevato numero di punti esaminati non è stato possibile effettuare una singola acquisizione, ma due. Di seguito sono esposti i principali risultati ottenuti.

3.6.3.1. Prova sonica tomografica TM_{05}

La prova TM_{05} è localizzata in corrispondenza del contrafforte presente a sostegno della facciata sud dell'edificio del refettorio, al quarto livello del complesso.

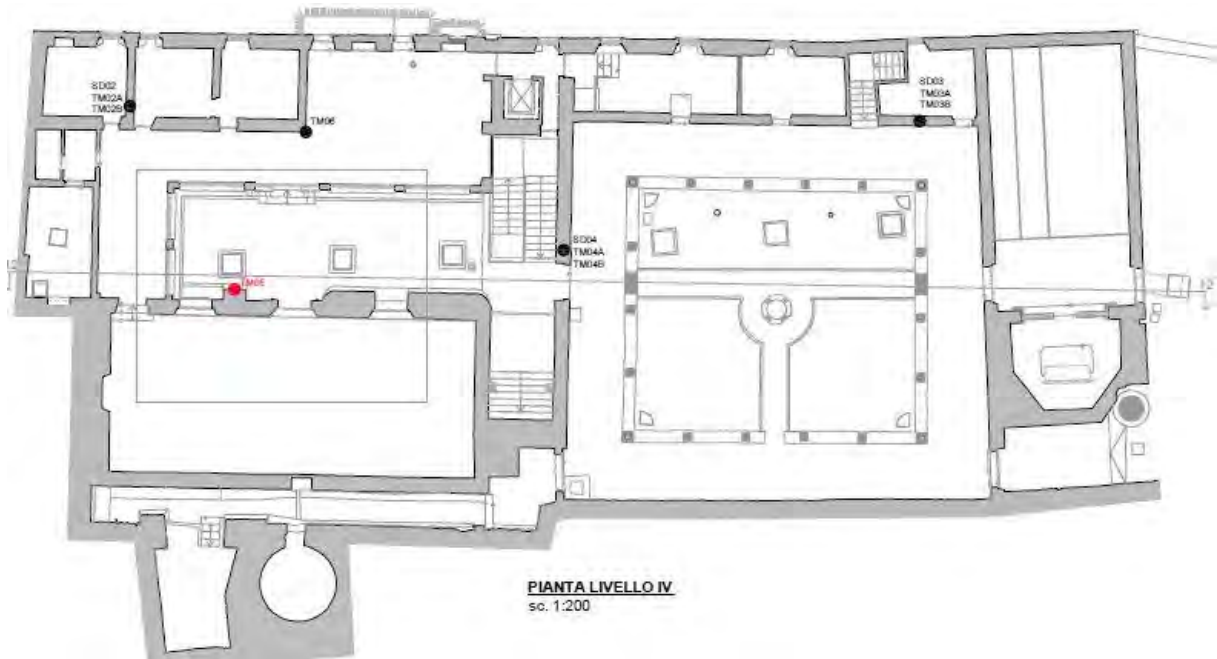


Figura 3.6. 25 - localizzazione tomografia sonica TMO5

A causa della forma complessa della sezione è stato necessario eseguire due acquisizioni distinte, con un totale di 18 punti distanti tra loro 20 cm in direzione orizzontale. Le due acquisizioni sono spiegate negli schemi sottostanti. La prova è stata eseguita su una griglia orizzontale alta 1,56 cm dal suolo, in corrispondenza di un ricorso di mattoni, caratteristico di questo contrafforte in pietra.

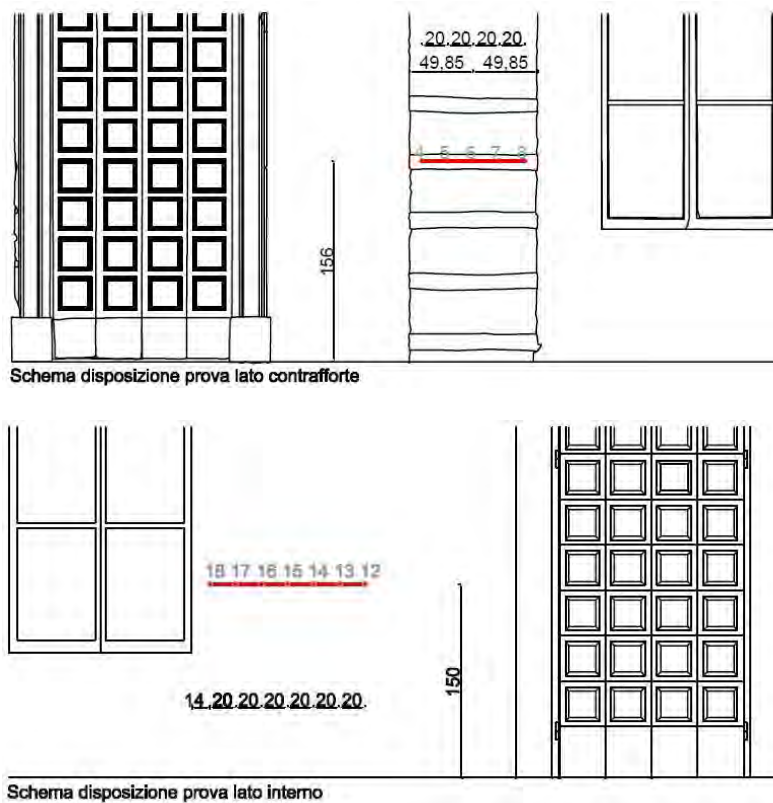


Figura 3.6. 26 - schema griglia di acquisizione TMO5

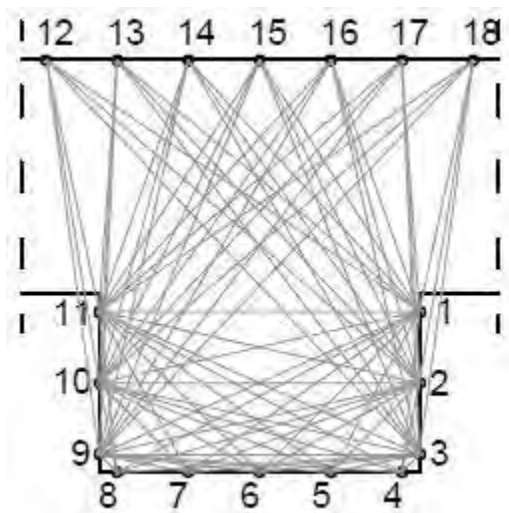


Figura 3.6. 27 - Prima acquisizione – accelerometri nei punti 1, 2, 3, 9, 10, 11 (lato esterno)

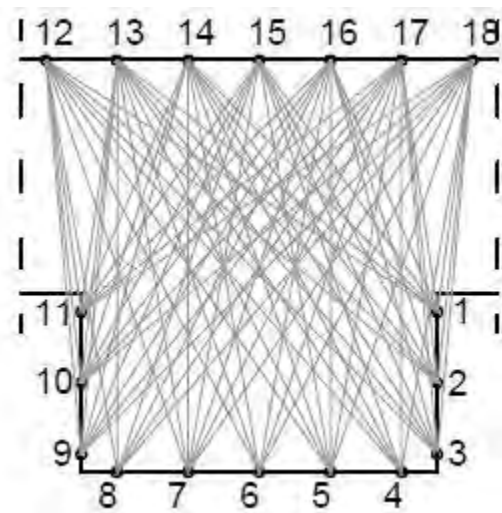


Figura 3.6. 28 - Seconda acquisizione – accelerometri nei punti 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 (lato interno)

Per ogni punto di battitura sono stati registrati tre segnali. I valori di velocità ottenuti per la sezione sono stati discretizzati in 8 pixel per quanto riguarda la prima acquisizione e in 20 pixel per quanto riguarda la seconda acquisizione. Attraverso questi valori discretizzati e le coordinate geometriche dei relativi pixel di discretizzazione, è stato possibile elaborare un grafico di distribuzione delle velocità soniche con il programma Surfer. Da sottolineare però che le attuali elaborazioni non permettono di analizzare le due acquisizioni nel complesso, ma separatamente tra loro, quindi si ottengono due grafici di distribuzione delle velocità soniche relative alle due diverse acquisizioni.

Prima acquisizione (esterno)

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
2,5	37,5	1828
2,5	12,5	1776
27,5	37,5	1741
27,5	12,5	1788
52,5	37,5	1669
52,5	12,5	1426
77,5	37,5	1786
77,5	12,5	1453
vel. Media [m/s] =		1683

Tabella 3.6. 5 - tabella velocità TMO5 - prima acquisizione

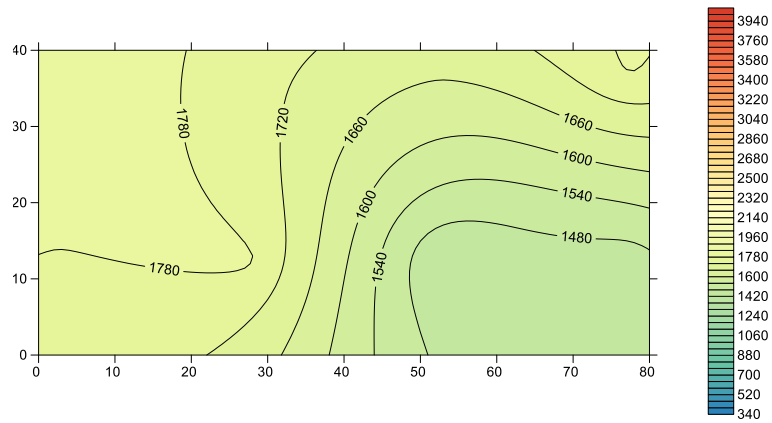


Figura 3.6. 29 - grafico distribuzione velocità soniche TM_{05} - prima acquisizione

È utile sottolineare come le velocità risultanti siano elevate per la presenza del ricorso di mattoni.

Seconda acquisizione:

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
5,5	103,5	529
5,5	80,5	529
5,5	57,5	485
5,5	34,5	484
5,5	11,5	484
28,5	103,5	587
28,5	80,5	614
28,5	57,5	608
28,5	34,5	620
28,5	11,5	634
51,5	103,5	629
51,5	80,5	627
51,5	57,5	645
51,5	34,5	668
51,5	11,5	672
74,5	103,5	617
74,5	80,5	617
74,5	57,5	600
74,5	34,5	601
74,5	11,5	601
vel. Media [m/s] =		593

Tabella 3.6. 6 - tabella velocità TM_{05} - seconda acquisizione

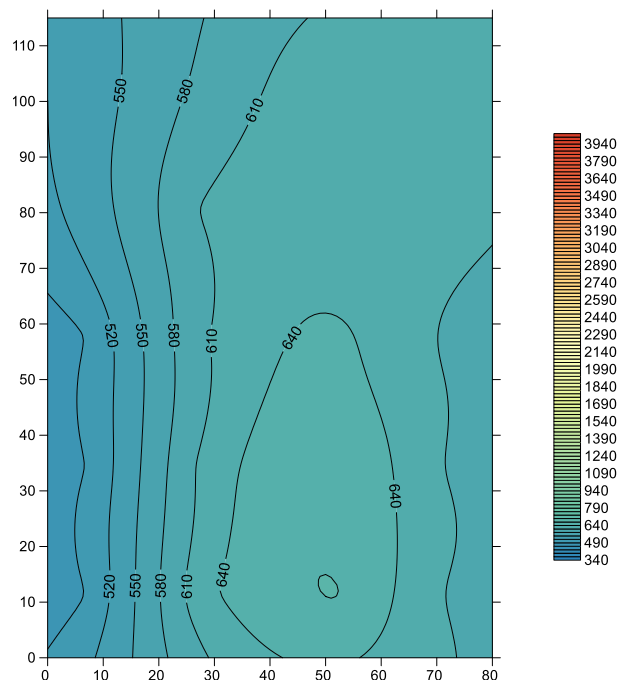


Figura 3.6. 30 - grafico distribuzione velocità soniche TM05 - seconda acquisizione

Nella seconda acquisizione la velocità media risulta inferiore poiché il segnale passa attraverso tutto l'elevato spessore murario, quindi l'incidenza della fascia esterna di mattoni diminuisce e l'incidenza dei vuoti all'interno dello spessore murario aumenta.

3.6.3.2. Prova sonica tomografica TM07

La prova è localizzata al quinto livello del complesso, in corrispondenza di una parete dove è visibile il tamponamento di un'apertura. La griglia orizzontale è composta da 13 punti distanti tra loro 20 cm, ed è situata ad un'altezza di 81 cm dal pavimento del lato interno e a 4,31 m dal suolo se si osserva dal lato esterno. La muratura esaminata presenta uno spessore di 45 cm.

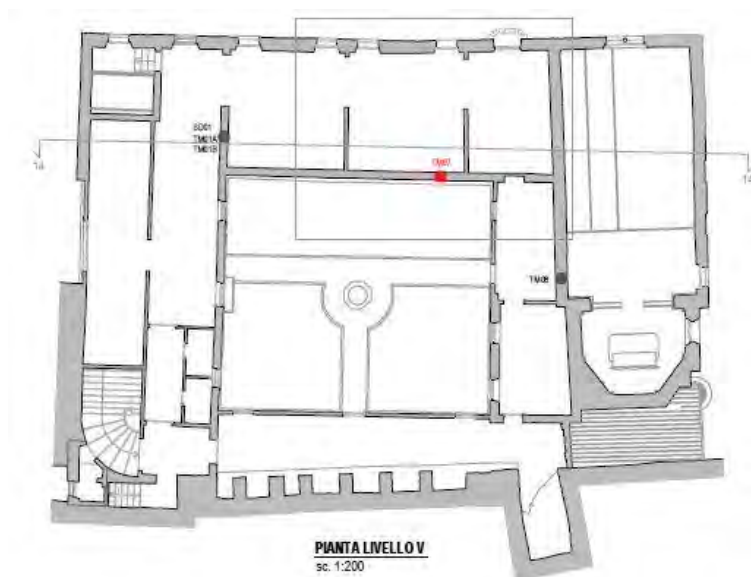


Figura 3.6. 31 - localizzazione tomografia sonica TM07

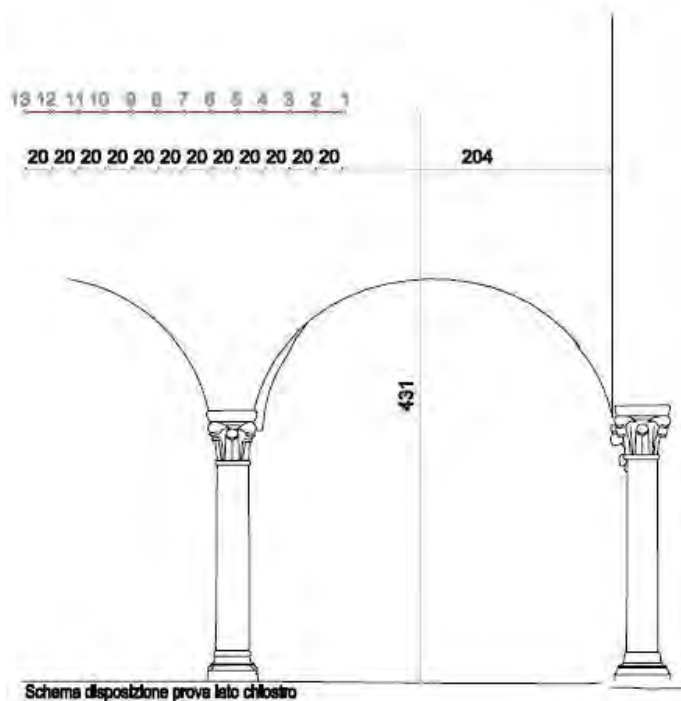


Figura 3.6. 32 - griglia di acquisizione TM07

Anche in questo caso dato l’elevato numero di punti esaminati, sono state eseguite due acquisizioni, secondo le modalità descritte negli schemi seguenti.

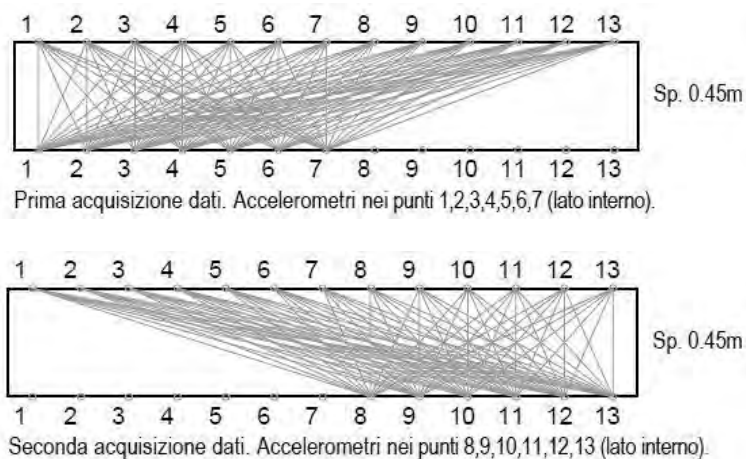


Figura 3.6. 33 - schemi prima e seconda acquisizione

Per ogni segnale sono state registrati tre segnali per poter avere una velocità media precisa. I valori di velocità ottenuti per la sezione sono stati discretizzati in 22 pixel. Attraverso questi valori discretizzati e le coordinate geometriche dei relativi pixel di discretizzazione, è stato possibile elaborare un grafico di distribuzione delle velocità sonore con il programma Surfer.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
7,5	33,75	808
7,5	11,25	886

30	33,75	524
30	11,25	940
52,5	33,75	435
52,5	11,25	711
75	33,75	550
75	11,25	527
97,5	33,75	499
97,5	11,25	383
120	33,75	376
120	11,25	340
142,5	33,75	389
142,5	11,25	340
165	33,75	340
165	11,25	340
187,5	33,75	340
187,5	11,25	340
210	33,75	340
210	11,25	340
232,5	33,75	340
232,5	11,25	824
vel. Media =		496

Tabella 3.6. 7 - tabella velocità TMO7

Il grafico di distribuzione delle velocità soniche mostra una sezione uniforme attorno a valori di velocità molto bassi.

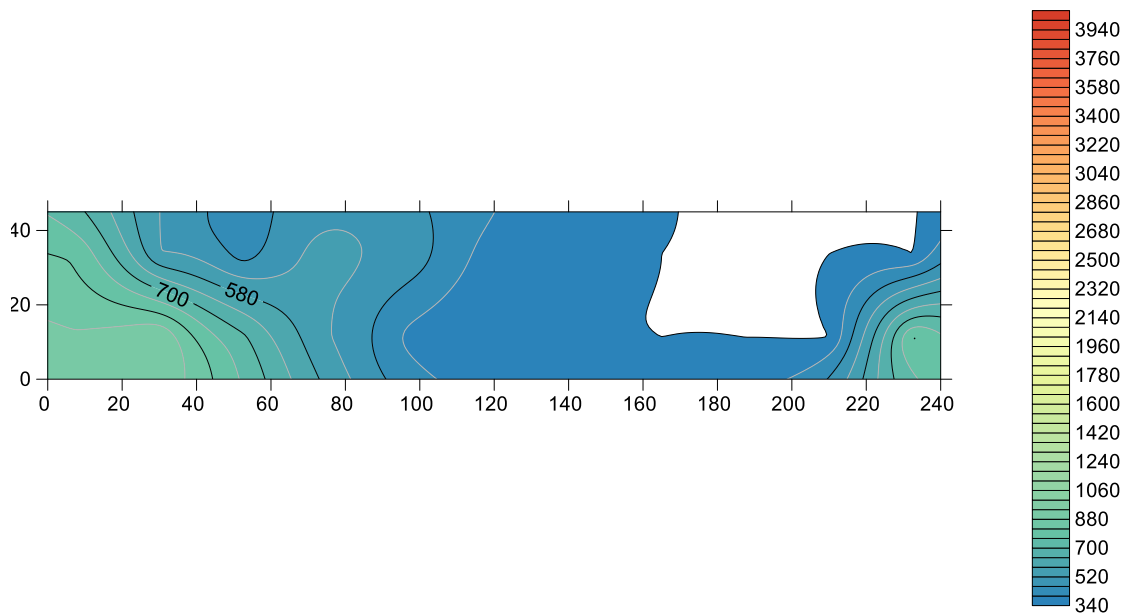


Tabella 3.6. 8 - grafico distribuzione velocità soniche TMO7

3.6.3.3. Prova sonica tomografica TMo8

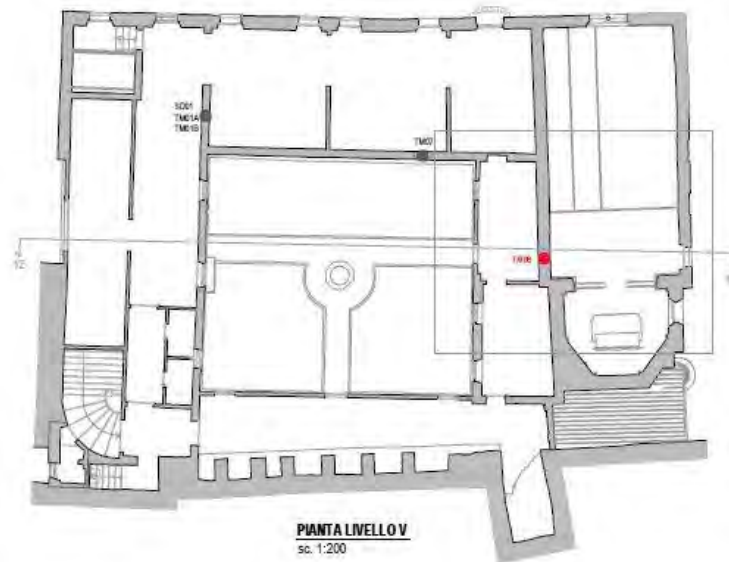


Figura 3.6. 34 - localizzazione TMo8

La prova TMo8 è localizzata al quinto livello del complesso nel muro che divide la chiesa dal chiostro. La griglia orizzontale di 11 punti distanti reciprocamente 20 cm è situata ad un'altezza di 4,41 m dal pavimento della chiesa e ad un'altezza di 70 cm dal pavimento interno del lato chiostro. La muratura in esame presenta uno spessore di 52 cm e nel lato interno alla chiesa risulta coperta da un affresco. Questo ha richiesto un certo grado di delicatezza nell'esecuzione della prova, quindi si è evitato di disegnare la griglia ma si sono utilizzati degli spaghi tesi ortogonali come riferimenti.

Anche in questo caso sono state eseguite due acquisizioni, secondo gli schemi seguenti.

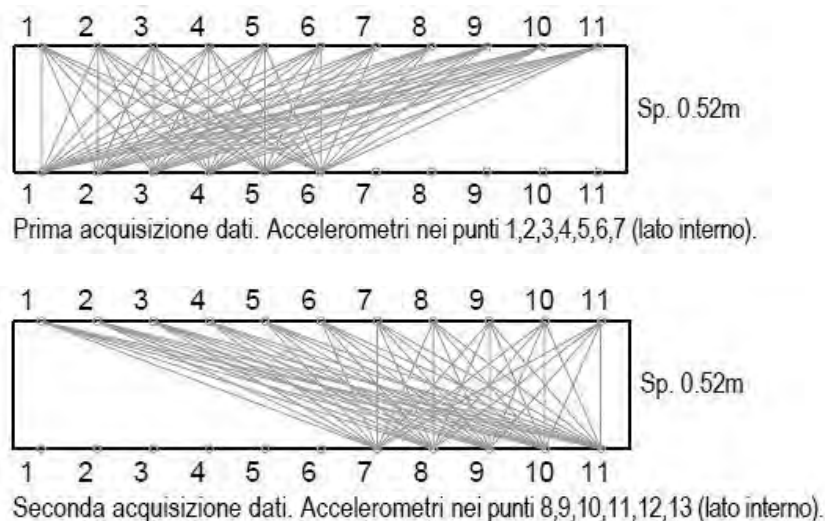


Figura 3.6. 35 - schemi prima e seconda acquisizione TMo8

Per ogni punto sono stati registrati tre segnali. In questo caso valori di velocità ottenuti per la sezione sono stati discretizzati in 16 pixel. Attraverso questi valori discretizzati e le

coordinate geometriche dei relativi pixel di discretizzazione, è stato possibile elaborare un grafico di distribuzione delle velocità sonore con il programma Surfer.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
13	39	368
13	13	666
39	39	423
39	13	827
65	39	440
65	13	591
91	39	387
91	13	416
117	39	340
117	13	340
143	39	340
143	13	340
169	39	442
169	13	340
195	39	519
195	13	340
vel. Media =		445

Tabella 3.6. 9 - tabella velocità TMO8

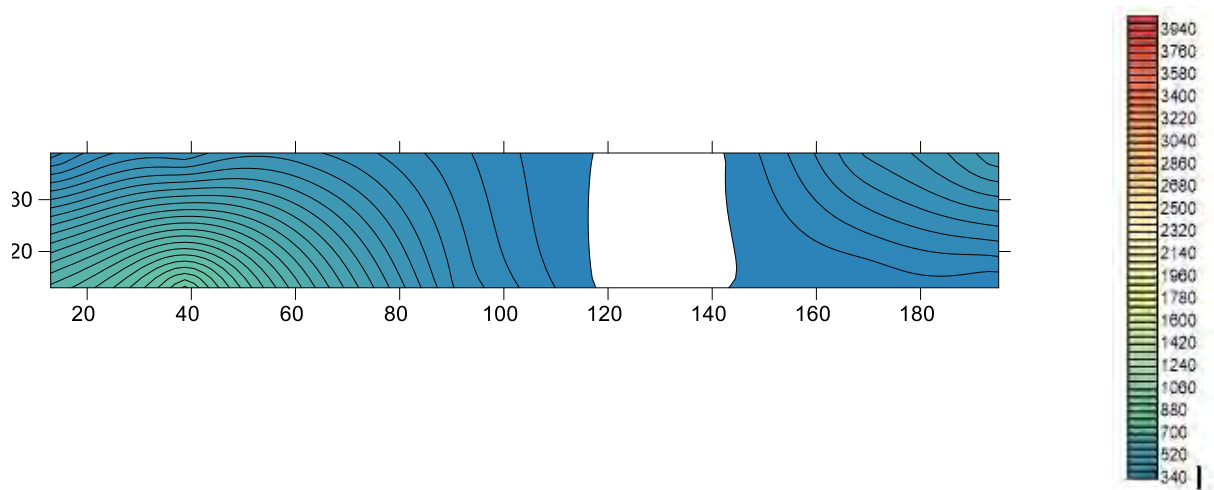


Figura 3.6. 36 - grafico distribuzione velocità sonore TMO8

Il grafico di distribuzione delle velocità sonore presenta valori quasi ovunque molto bassi, e in alcune zone pari al minimo imposto a 340 m/s.

3.6.4. Valutazione dell'efficacia delle iniezioni mediante indagini soniche dirette su muratura consolidata

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.

3.6.4.1. Prova sonica diretta S01 post



Figura 3.6. 37 - Campo prova lato martello



Figura 3.6. 38 - Campo prova lato accelerometro

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

Tabella 3.6. 10 - tabella acquisizione segnali Soi post

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.

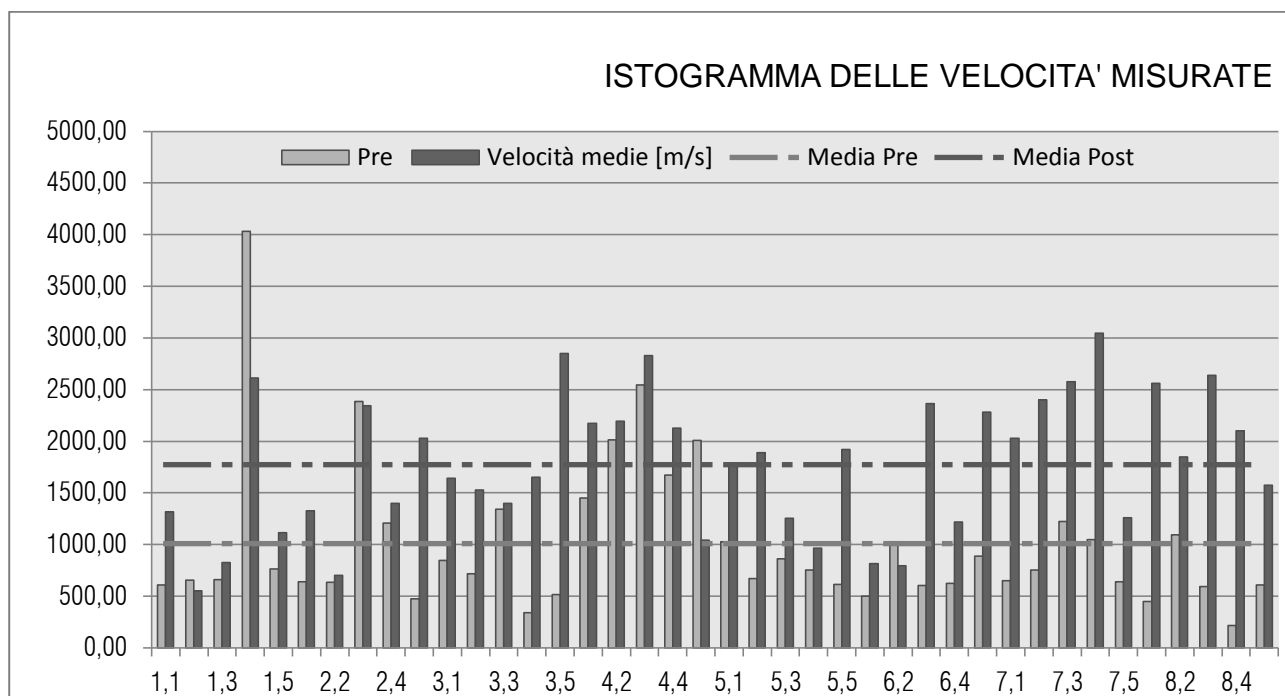


Figura 3.6. 39 - istogramma velocità soniche post iniezione

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.

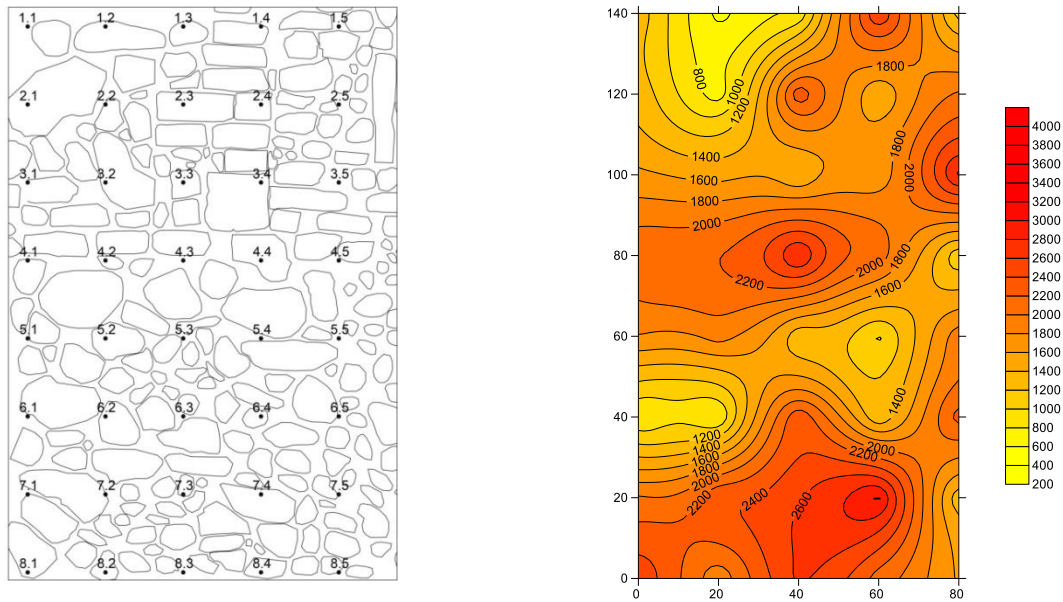


Figura 3.6. 40 - griglia di acquisizione lato martello e grafico distribuzione velocità soniche So1 post

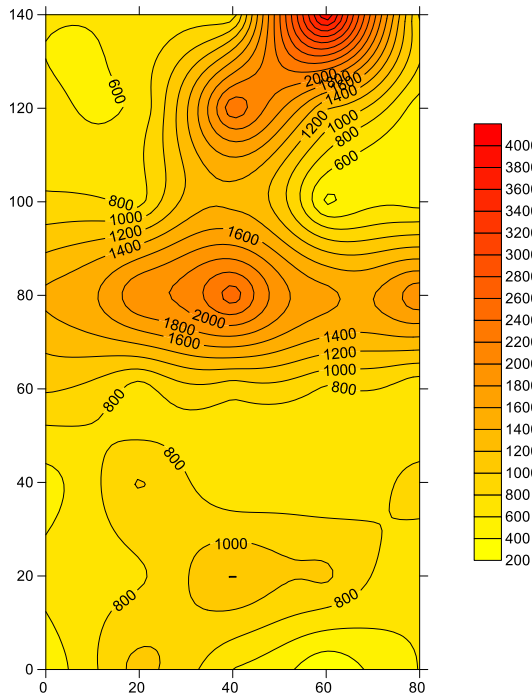
path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Velocità Pre [m/s]	Velocità Post [m/s]	Diff Velocità [%]
1.1	0.00	1.40	611.24	1314.1	214.98
1.2	0.20	1.40	657.92	550.8	83.72
1.3	0.40	1.40	661.70	826.0	124.83
1.4	0.60	1.40	4034.28	2614.2	64.80
1.5	0.80	1.40	765.33	1112.9	145.42
2.1	0.00	1.20	641.82	1325.0	206.44
2.2	0.20	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

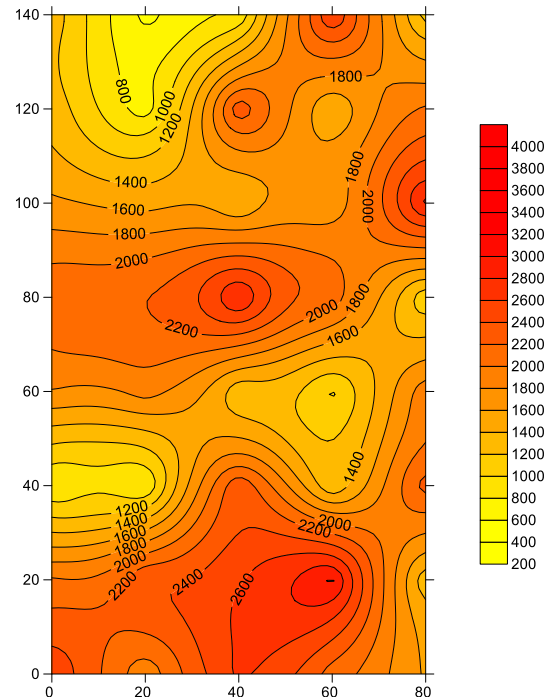
Tabella 3.6. 11 - tabella differenze di velocità *Soi post*

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

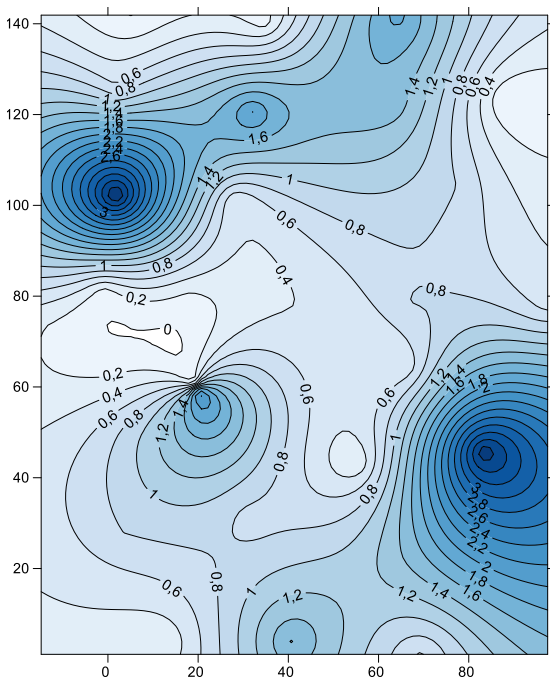
errori nell'esecuzione della prova. Si può ipotizzare che il problema sia stato dovuto alla difficoltà di colpire con il martello lo stesso identico punto colpito nella fase precedente, anche perché la ristilatura dei giunti ha reso la superficie più omogenea ed ha eliminato i fenomeni di disgregazione della malta deteriorata riscontrati nell'esecuzione delle indagini soniche precedenti all'intervento.



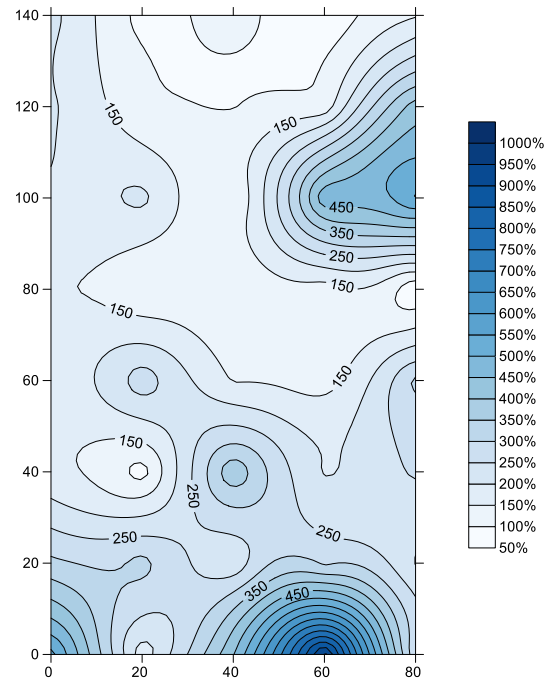
Distribuzione velocità soniche pre-iniezione



Distribuzione velocità soniche post-iniezione



Distribuzione litri miscela iniettati



Distribuzione differenze percentuali di velocità

Figura 3.6. 41 - grafici distribuzione vel. soniche pre iniezione, post iniezione, litri iniettati e differenze % 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 fluiva 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.

3.6.4.2. Prova sonica diretta So2 post



Figura 3.6. 42 - Campo prova 2 lato accelerometro



Figura 3.6. 43 - Campo prova 2 lato martello

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									
		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	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	

Tabella 3.6. 12 - tabella acquisizione segnali So2 post

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.

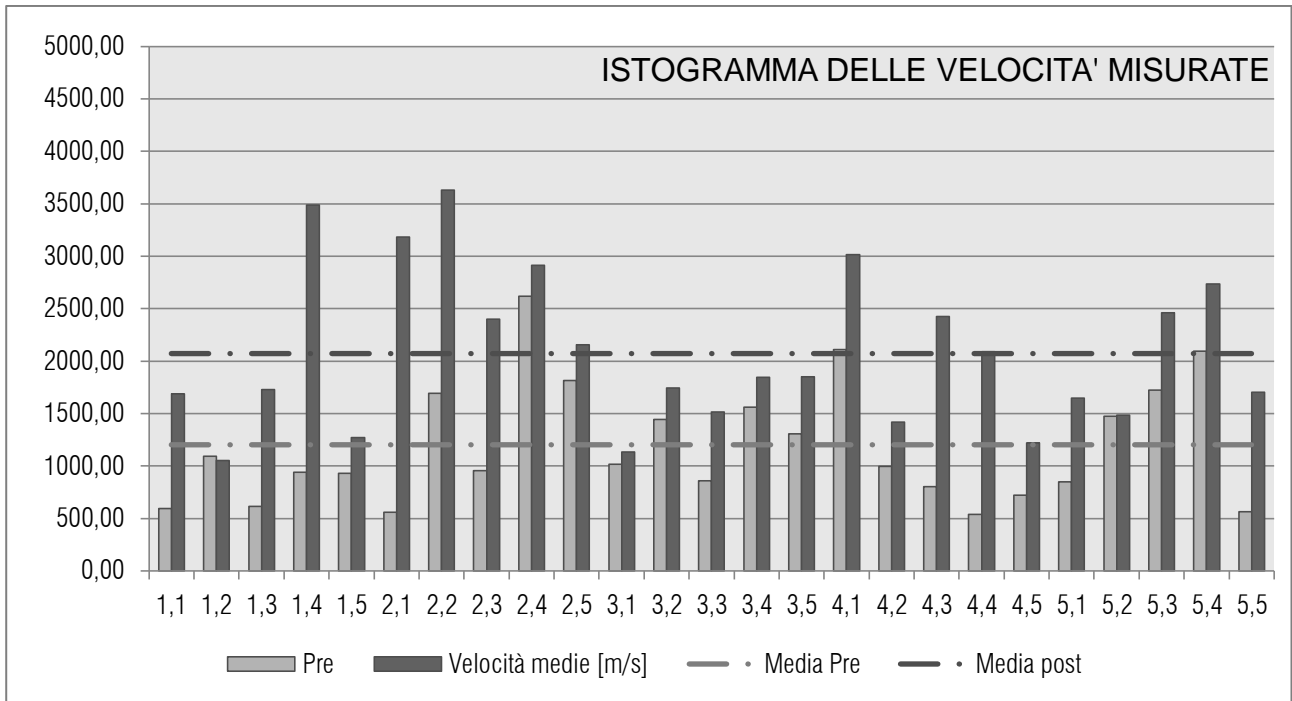


Figura 3.6. 44 - istogramma velocità soniche So2 post

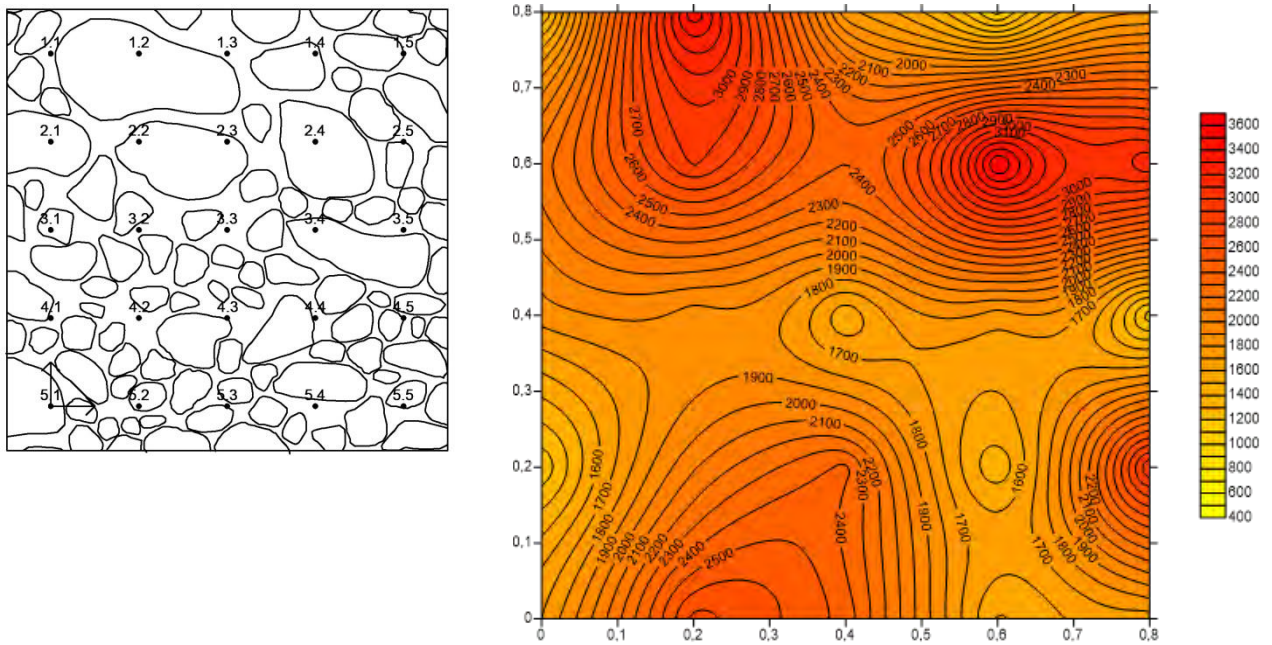


Figura 3.6. 45 - griglia di acquisizione lato accelerometro e grafico distribuzione velocità soniche So2 post

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

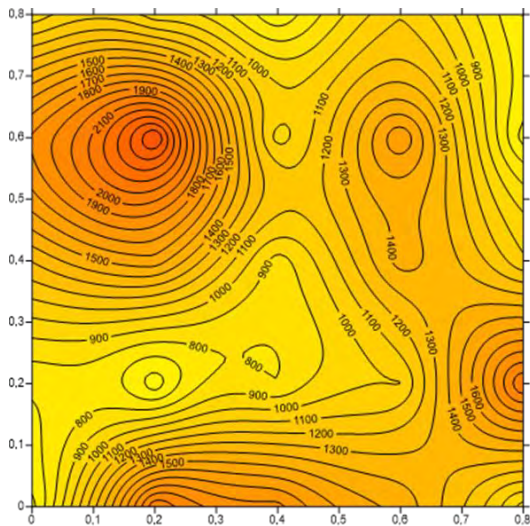
1,3	0,40	0,80	616,34	1730,13	280,71
1,4	0,20	0,80	941,16	3490,12	370,83
1,5	0,00	0,80	931,06	1268,92	136,29
2,1	0,80	0,60	556,35	3182,18	571,98
2,2	0,60	0,60	1693,93	3629,73	214,28
2,3	0,40	0,60	957,46	2398,88	250,55
2,4	0,20	0,60	2617,99	2915,29	111,36
2,5	0,00	0,60	1815,31	2154,31	118,67
3,1	0,80	0,40	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

Figura 3.6. 46 - Tabella riassuntiva con velocità pre e post iniezione e differenze percentuali per i punti della griglia

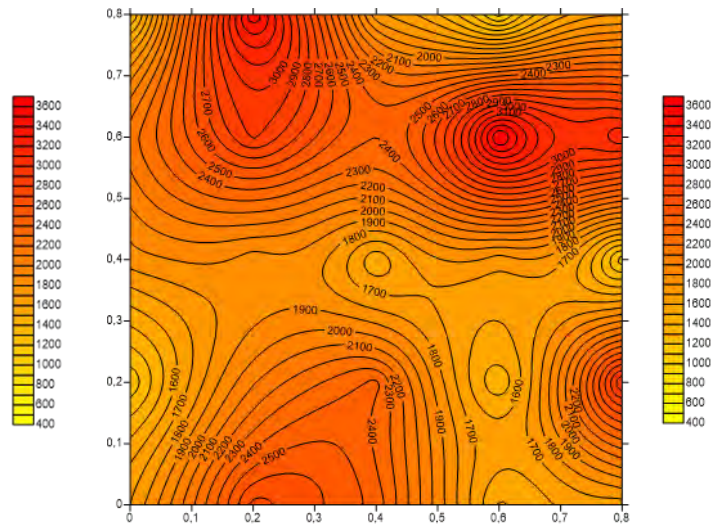
Inserendo in una tabella per ogni punto della griglia le velocità pre iniezione e post iniezione si è potuto calcolare l'incremento percentuale per ogni punto e con questi valori realizzare un grafico di distribuzione delle variazioni percentuali per poter effettuare un confronto visivo tra le due fasi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

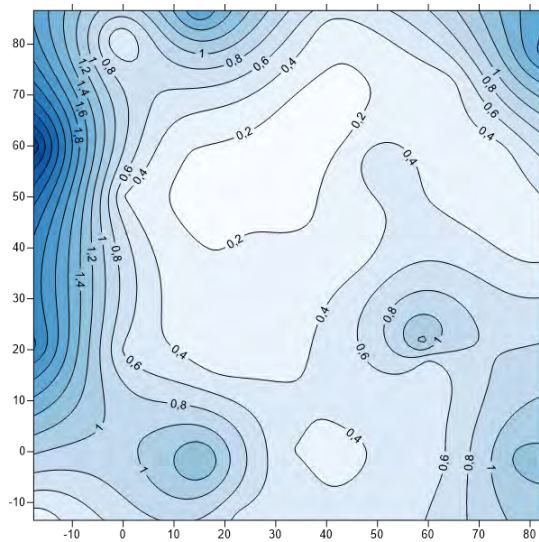
velocità maggiori. Il pannello iniettato risulta quindi consistente in tutti i suoi punti, con picchi di valori molto elevati ma, fatto molto positivo, senza punti con velocità inferiore a 1000 m/s.



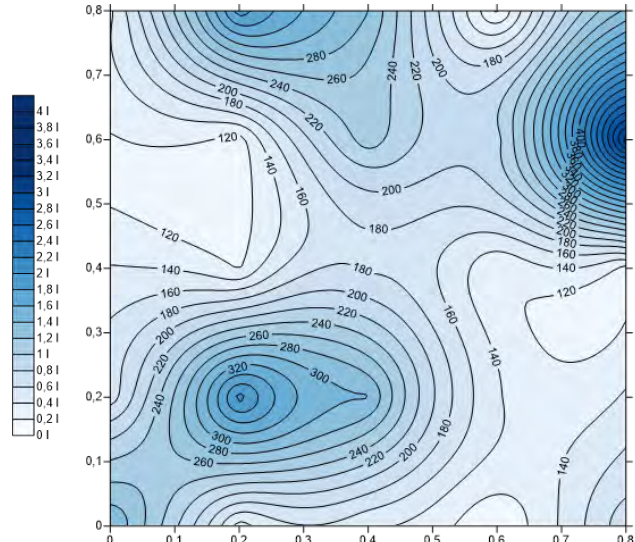
Distribuzione velocità soniche pre iniezione



Distribuzione velocità soniche post iniezione



Distribuzione litri di miscela iniettati



Distribuzione delle differenze percentuali di velocità

Figura 3.6. 47 - grafici distribuzione velocità soniche pre e post iniezione, litri iniettati e differenze % 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.

3.6.4.3. Prova sonica diretta So3 post



Figura 3.6. 48 - Campo prova 3 lato accelerometro



Figura 3.6. 49 - Campo prova 3 lato martello

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

Tabella 3.6. 13 - tabella acquisizione segnali So3 post

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.

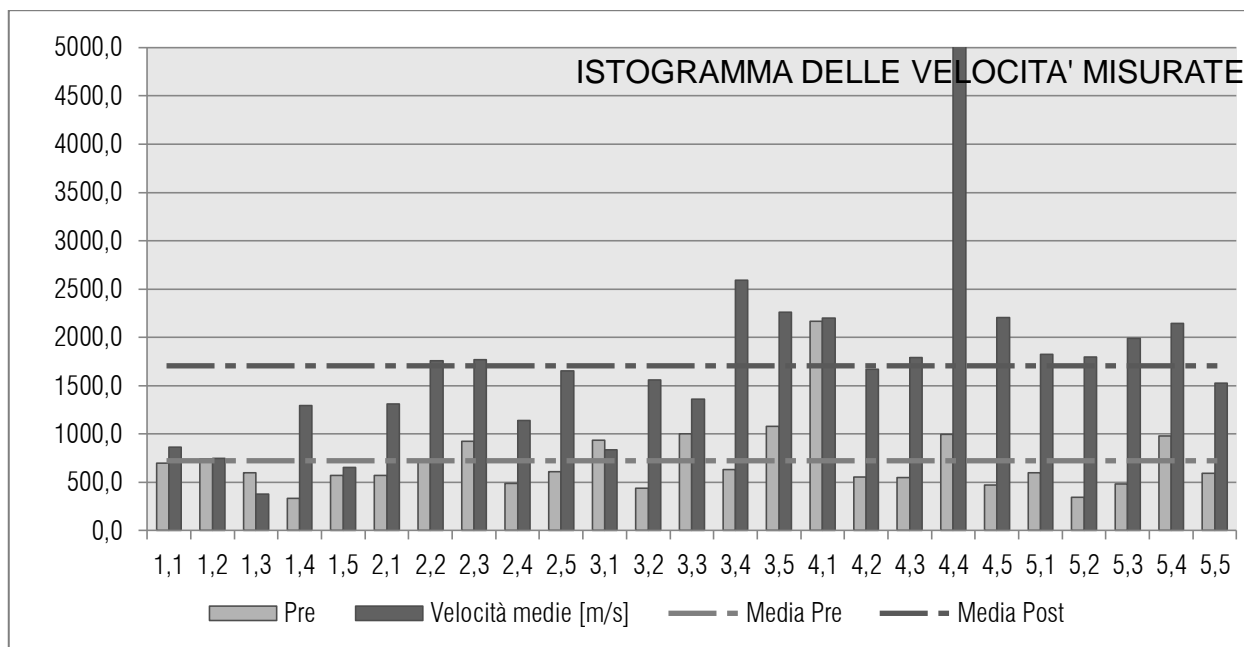


Figura 3.6. 50 - istogramma velocità soniche So3 post

Dal grafico di distribuzione delle velocità soniche 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

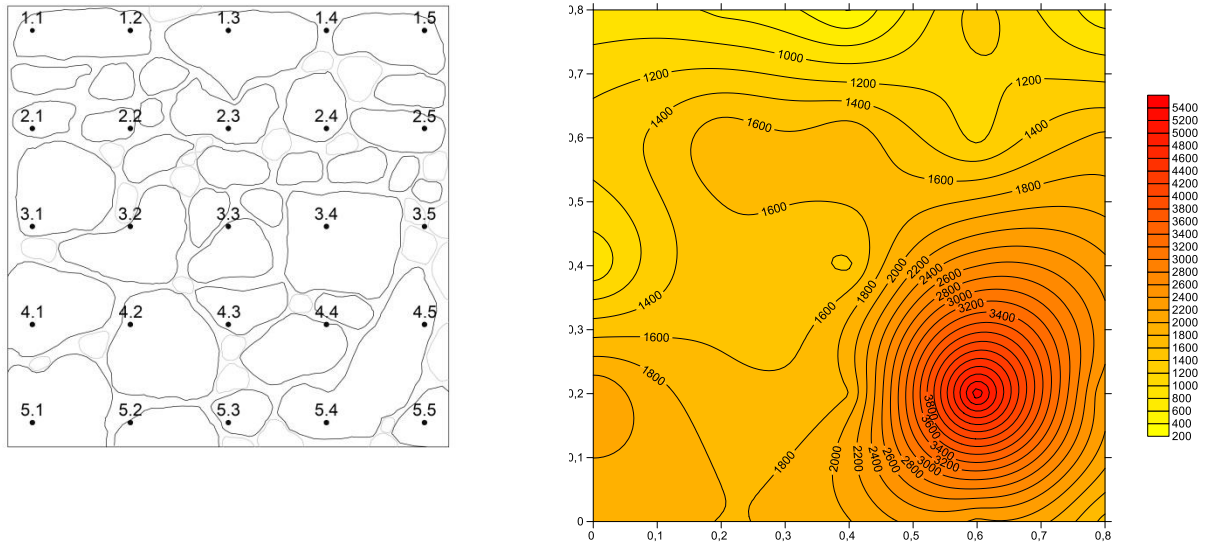


Figura 3.6. 51 - griglia di acquisizione e grafico distribuzione velocità soniche So_3 post

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

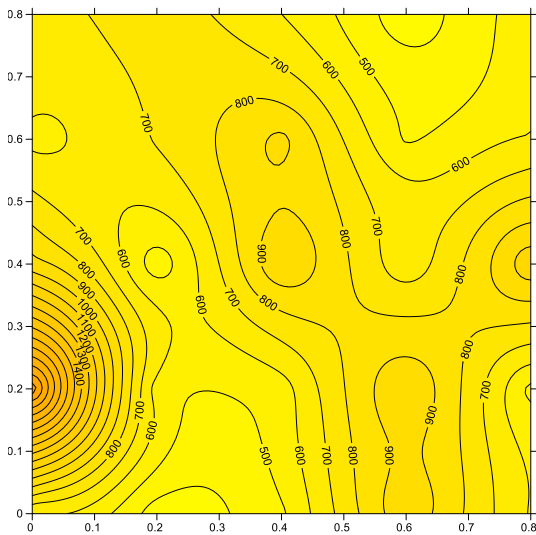
Tabella 3.6. 14 - tabella riassuntiva velocità soniche pre iniezione, post iniezione e differenze velocità

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.

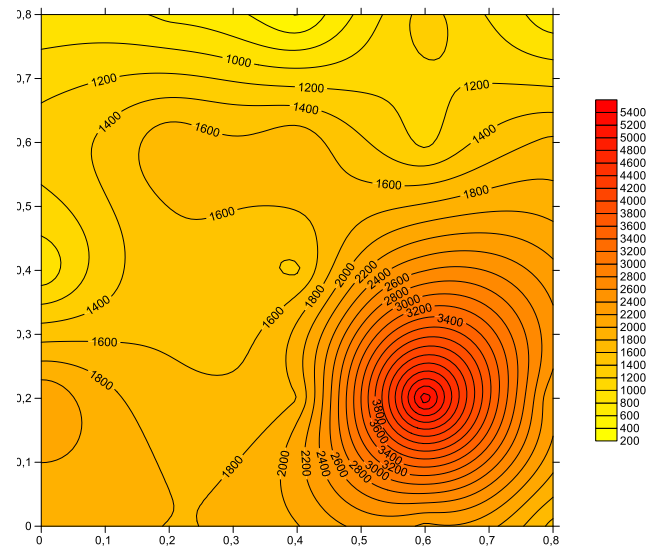
Dalla tabella si osserva come ad eccezione dei punti 1.1, 1.2, 1.5, 3.3 e 4.1, che hanno avuto un incremento trascurabile, nel resto del pannello gli incrementi sono stati molto elevati, da due fino a cinque volte il valore iniziale di velocità sonica. Gli incrementi maggiori si registrano, tralasciando 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 sonica 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 sonica media nel pannello di 723 m/s si passa ad una velocità media di 1707 m/s, con un incremento del 236%.

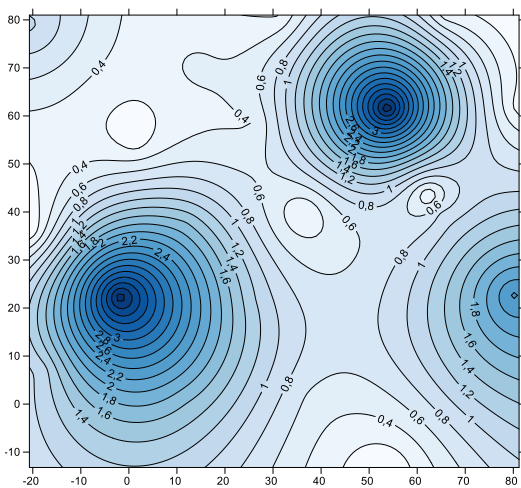
Anche in questo pannello si registrano due casi, nel punto 1.3 e 3.1, in cui la velocità post iniezione è inferiore a quella pre iniezione dato attribuibile a difficoltà nell'esecuzione della prova con le identiche modalità nelle due fasi, soprattutto perché la ristilatura effettuata solamente dopo le 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.



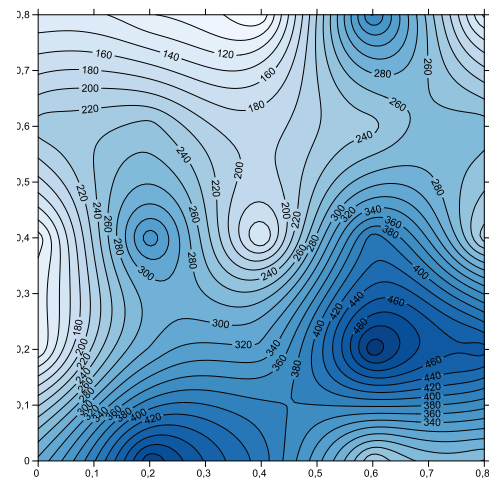
Distribuzione velocità soniche pre-iniezione



Distribuzione velocità soniche post-iniezione



Distribuzione litri di miscela iniettati



Distribuzione differenze percentuali di velocità

Figura 3.6. 52 - grafici distribuzione velocità soniche pre e post iniezione, litri iniettati e differenze % 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.

3.6.4.4. Prova sonica diretta So4 post



Figura 3.6. 53 - Campo prova 4 lato accelerometro



Figura 3.6. 54 - Campo prova 4 lato martello

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

Tabella 3.6. 15 - tabella acquisizione segnali So4 post

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.

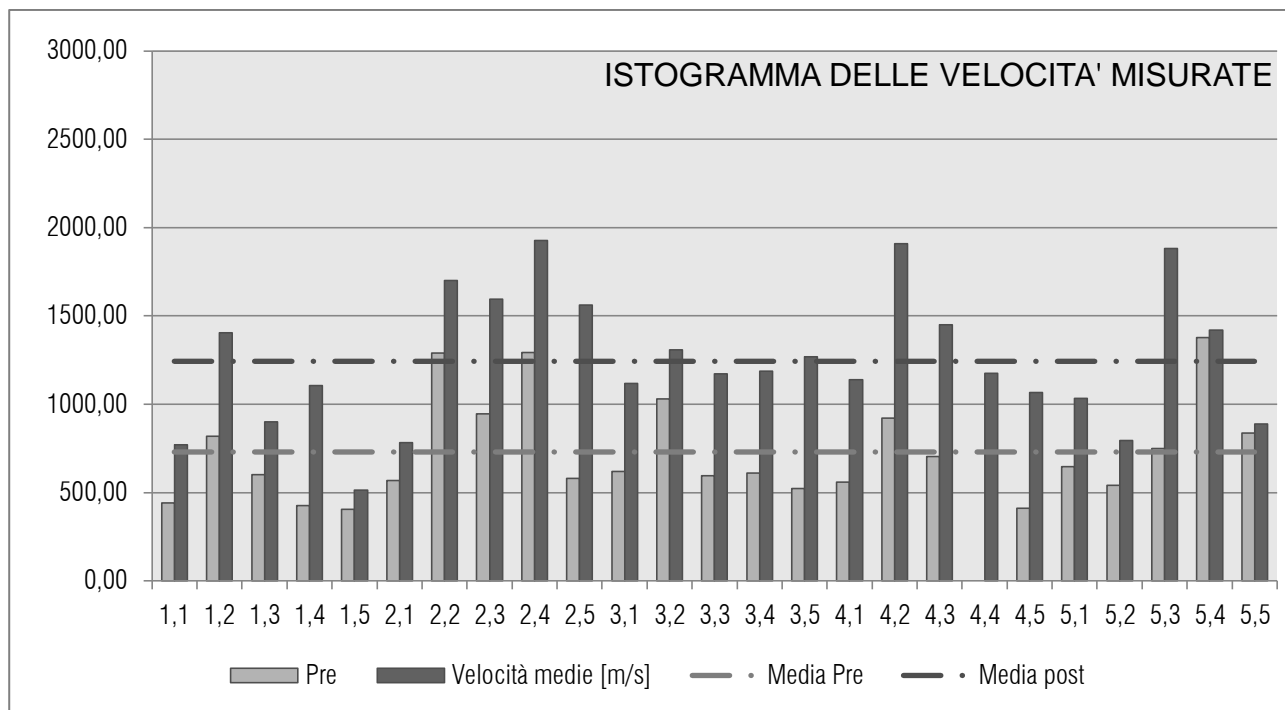


Figura 3.6. 55 - istogramma velocità soniche post iniezioni

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.

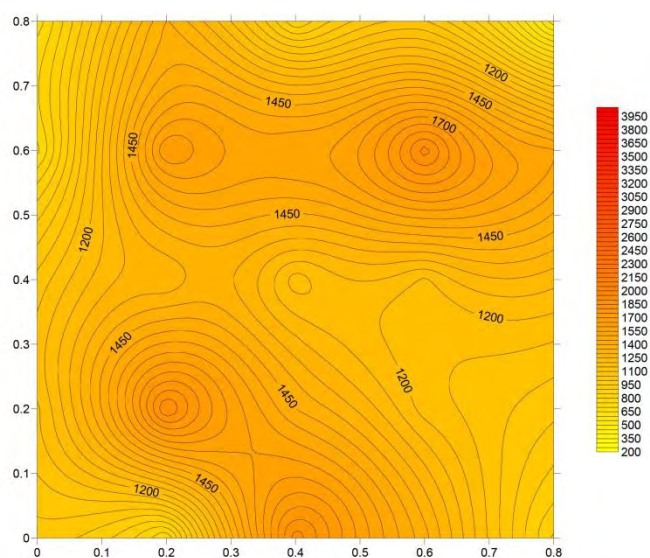
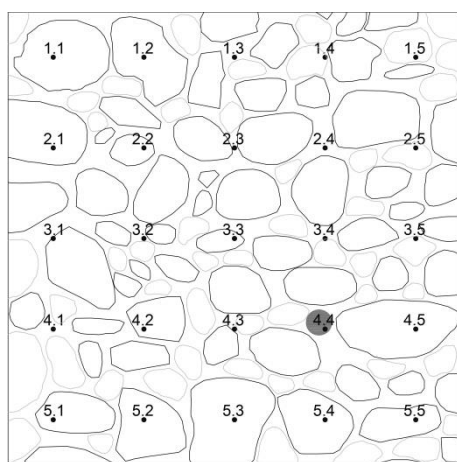


Figura 3.6. 56 - griglia di acquisizione lato accelerometro e grafico distribuzione velocità sonche So4 post

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

Tabella 3.6. 16 - tabella riassuntiva con velocità pre e post iniezione e differenza di velocità

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.

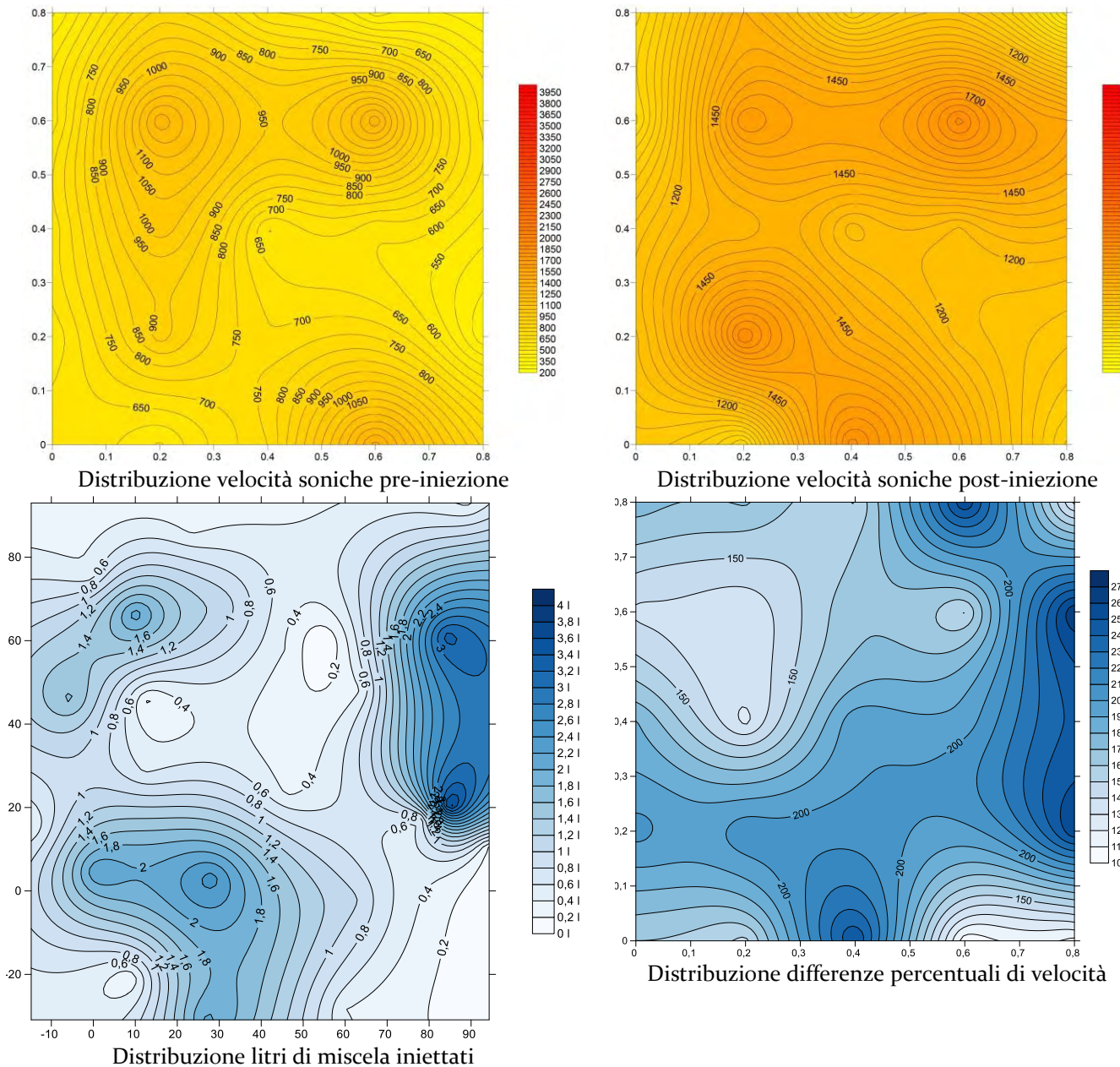


Figura 3.6. 57 - grafici di distribuzione velocità soniche pre e post iniezione, litri iniettati e differenze % di velocità

Dai grafici di distribuzione delle velocità soniche, delle quantità di miscela iniettata e delle differenze 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.

4. ANALISI DEI DATI

4.1. Ottimizzazione dei metodi di interpolazione di dati

Tutte le prove soniche effettuate nella campagna di indagine al museo archeologico sono state riportate graficamente tramite il programma Surfer, software per la visualizzazione grafica dei dati in 3d. I dati ottenuti dalle prove vengono riportati in una tabella all'interno del programma, chiamata sheet, contenente la posizione (x;y) e la velocità di trasmissione dell'onda nel punto (z), questa tabella viene salvata come file *.dat e successivamente aperta tramite il comando grid e salvata come file *.grid. La creazione del file *.grid richiede l'impostazione di alcuni parametri, tra cui il metodo di interpolazione e il numero di nodi, ossia il numero di punti per cui vogliamo che il programma calcoli z. Il file *.grid infatti contiene i dati di tutti i punti della griglia creata, dati ottenuti mediante l'interpolazione dei punti inseriti, e si differenziano quindi a seconda del metodo scelto. Successivamente salvando il file *.grid come un file *.dat otteniamo una tabella contenente i valori x,y,z, di tutti i punti.

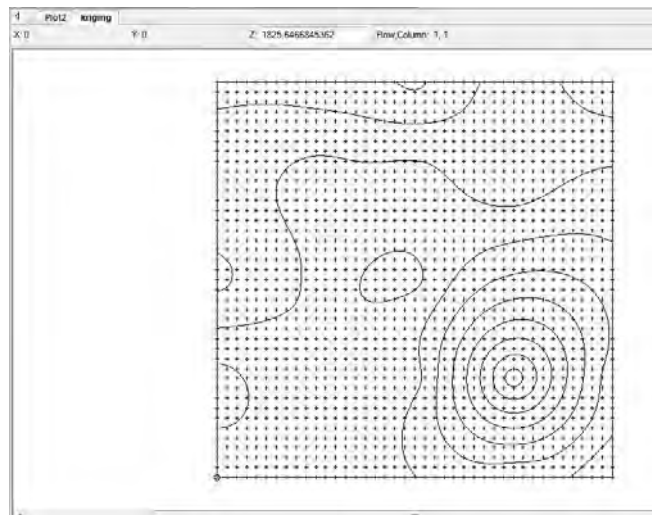


Figura 4.1. 1 - Esempio file grid

La valutazione dei diversi metodi di interpolazione è stata possibile effettuando una prova con una griglia ridotta in uno dei pannelli dove era già stata eseguita la prova sonica diretta, nello specifico nel campo prova 3, situato nel chiostro. Tutte le prove soniche della campagna di indagine prevedevano infatti una griglia 20x20, in questo campo prova è stata effettuata una ulteriore prova sonica con una griglia 10x10, quindi il pannello di dimensioni 80x80 cm risulta composto da nove colonne e nove righe di punti distanziati reciprocamente 10cm. In particolare è stata disegnata la nuova griglia in modo che contenesse i punti già esaminati con la griglia 20x20, in tal modo si ottengono 81 punti di indagine, dei quali 25 già indagati precedentemente. Così facendo è stato possibile confrontare i valori ottenuti tramite l'interpolazione dei dati risultanti dal grafico surfer della prova 20x20, con quelli ottenuti direttamente sul campo, valutando così i diversi metodi in base alla percentuale d'errore commesso. Nei punti aggiuntivi della nuova griglia

si ha dunque un valore ottenuto dal grafico surfer della 20x20 e un valore ottenuto tramite la prova sonica diretta.

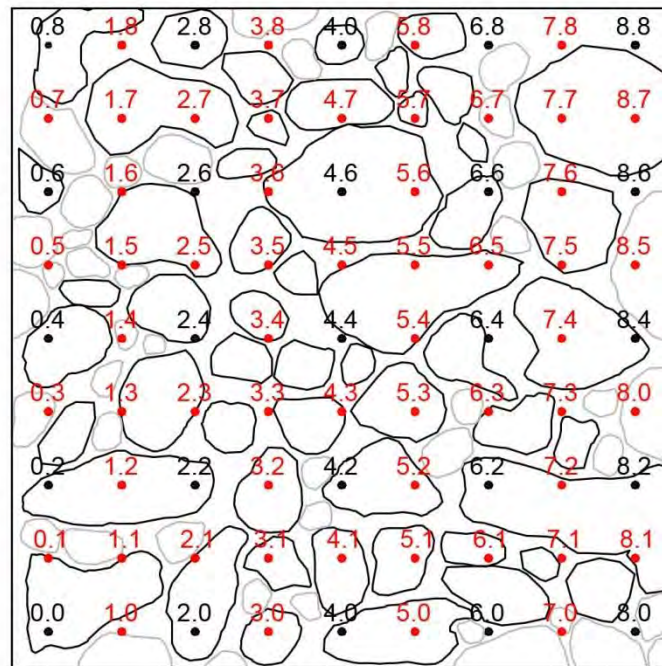


Figura 4.1. 2 - Punti 10x10 e 20x20

4.1.1. Prova Sonica S03 con griglia 10x10cm

La prova sonica con griglia 10x10cm è stata eseguita su muratura consolidata, quindi nella fase post-iniezioni, con le stesse modalità delle precedenti e con il lato martello sempre dalla parte del chiostro e il lato accelerometro all'interno della stanza.



Figura 4.1. 3 - foto griglia 10x10 cm

S03 10X10								
0.00	0.00	1793.5	0.00	0.30	1897.2	0.10	0.60	987.6
0.10	0.00	1718.2	0.10	0.30	1874.4	0.20	0.60	1760.4
0.20	0.00	1856.3	0.20	0.30	1468.7	0.30	0.60	1399.1
0.30	0.00	2287.3	0.30	0.30	1201.4	0.40	0.60	1769.3
0.40	0.00	2026.6	0.40	0.30	1323.2	0.50	0.60	1127.2
0.50	0.00	4417.8	0.50	0.30	1323.7	0.60	0.60	1278.5
0.60	0.00	2156.3	0.60	0.30	2384.1	0.70	0.60	1768.6
0.70	0.00	2437.6	0.70	0.30	1448.6	0.80	0.60	1683.2
0.80	0.00	1527.0	0.80	0.30	1278.2	0.00	0.70	1238.2
0.00	0.10	1588.5	0.00	0.40	834.3	0.10	0.70	1687.2
0.10	0.10	1710.5	0.10	0.40	1206.9	0.20	0.70	435.5
0.20	0.10	1374.2	0.20	0.40	1650.9	0.30	0.70	474.6
0.30	0.10	1748.8	0.30	0.40	1300.4	0.40	0.70	637.6
0.40	0.10	1758.1	0.40	0.40	1329.2	0.50	0.70	528.4
0.50	0.10	1888.1	0.50	0.40	1599.6	0.60	0.70	1924.4
0.60	0.10	2257.3	0.60	0.40	2889.8	0.70	0.70	1417.4
0.70	0.10	2673.9	0.70	0.40	2703.6	0.80	0.70	824.2
0.80	0.10	1254.6	0.80	0.40	2206.3	0.00	0.80	862.8
0.00	0.20	2151.6	0.00	0.50	1504.8	0.10	0.80	1859.6
0.10	0.20	2012.8	0.10	0.50	1463.2	0.20	0.80	749.1
0.20	0.20	1661.7	0.20	0.50	1730.0	0.30	0.80	557.5
0.30	0.20	2764.8	0.30	0.50	1826.0	0.40	0.80	379.9
0.40	0.20	1639.3	0.40	0.50	1005.3	0.50	0.80	1066.1
0.50	0.20	2969.2	0.50	0.50	913.9	0.60	0.80	1294.6
0.60	0.20	5259.2	0.60	0.50	1521.6	0.70	0.80	1168.0
0.70	0.20	4381.9	0.70	0.50	2230.8	0.80	0.80	655.1
0.80	0.20	2203.0	0.80	0.50	1537.3			
			0.00	0.60	1308.6			

Tabella 4.1. 1 - dati acquisizione
S03 10x10

I dati evidenziati nella tabella corrispondono ai punti in comune tra la griglia 10x10 cm e quella 20x20 cm, infatti in quei punti la prova non è stata rieseguita e sono stati inseriti i dati ottenuti precedentemente.

4.1.2. Metodi di interpolazione

La differenza tra i vari metodi di interpolazione (gridding methods) sta nel diverso algoritmo matematico usato per computare i dati nella fase di interpolazione, ogni metodo può dare quindi risultati differenti e una diversa rappresentazione dei dati.

Inverse distance to a power

Inverse distance to a power è un metodo di interpolazione dei dati basato sulla media ponderata, l'influenza di un punto rispetto ad un altro diminuisce all'aumentare della distanza del punto da quello in esame. Il peso che ha ogni dato nel concorrere alla media del

punto in esame è controllata mediante una potenza di ponderazione, maggiore è la potenza di ponderazione meno sono i punti che hanno effetto nel calcolo; quindi all'aumentare della potenza il valore nel punto si avvicinerà di più a quello del punto più vicino. Nel nostro caso i dati ottenuti con l'utilizzo di questo metodo, cioè le velocità nei singoli punti, presentano una media pari a 1755.8 m/s. La media non differisce quindi in maniera particolarmente significativa rispetto a quella ricavata con la prova eseguita con la griglia 10x10cm, che ha dato un valore di media pari a 1679.2 m/s. Sia il valore minimo che il valore massimo sono associati a punti appartenenti alla prova con la griglia 20x20cm, sono quindi valori calcolati sul campo e non interpolati dal programma; tutti i valori interpolati con questo metodo sono dunque compresi tra il valore minimo e massimo ottenuti con la prova 20x20 e corrispondono al punto con coordinate $x=0.60$ e $y=0.20$ e valore 5355.2 m/s e al punto con coordinate $x=0.40$ e $y=0.80$ e valore 379.9 m/s

Inverse distance to a power		
0.00	0.00	1825.647
0.10	0.00	1826.399
0.20	0.00	1797.785
0.30	0.00	1914.053
0.40	0.00	1989.232
0.50	0.00	2153.352
0.60	0.00	2142.082
0.70	0.00	2069.253
0.80	0.00	1526.997
0.00	0.10	1893.594
0.10	0.10	1830.04
0.20	0.10	1801.595
0.30	0.10	1887.815
0.40	0.10	2022.783
0.50	0.10	2434.777
0.60	0.10	2901.97
0.70	0.10	2501.287
0.80	0.10	2089.401
0.00	0.20	2200.059
0.10	0.20	1814.336
0.20	0.20	1672.042
0.30	0.20	1818.459
0.40	0.20	1790.346
0.50	0.20	2741.907
0.60	0.20	5355.205
0.70	0.20	2936.821
0.80	0.20	2202.967
0.00	0.30	1577.682

0.10	0.30	1627.013
0.20	0.30	1668.053
0.30	0.30	1739.19
0.40	0.30	1841.142
0.50	0.30	2332.827
0.60	0.30	2906.279
0.70	0.30	2558.335
0.80	0.30	2256.897
0.00	0.40	836.4126
0.10	0.40	1426.562
0.20	0.40	1557.417
0.30	0.40	1617.38
0.40	0.40	1362.959
0.50	0.40	1983.694
0.60	0.40	2592.943
0.70	0.40	2244.209
0.80	0.40	2257.948
0.00	0.50	1286.504
0.10	0.50	1450.958
0.20	0.50	1583.887
0.30	0.50	1611.225
0.40	0.50	1641.023
0.50	0.50	1749.599
0.60	0.50	1845.499
0.70	0.50	1882.435
0.80	0.50	1906.778
0.00	0.60	1308.55
0.10	0.60	1451.154
0.20	0.60	1760.371

0.30	0.60	1584.651
0.40	0.60	1769.285
0.50	0.60	1529.149
0.60	0.60	1142.225
0.70	0.60	1550.69
0.80	0.60	1653.148
0.00	0.70	1205.649
0.10	0.70	1273.003
0.20	0.70	1303.431
0.30	0.70	1304.113
0.40	0.70	1263.969
0.50	0.70	1335.395
0.60	0.70	1349.805
0.70	0.70	1375.229
0.80	0.70	1330.497
0.00	0.80	862.7631
0.10	0.80	1046.777
0.20	0.80	749.0961
0.30	0.80	963.4366
0.40	0.80	379.9431
0.50	0.80	1107.11
0.60	0.80	1294.621
0.70	0.80	1182.507
0.80	0.80	655.0714

media 1755.762

Tabella 4.1. 2 - velocità elaborate con Inverse Distance to a Power

Dal punto di vista grafico questo metodo da un'immagine facilmente comprensibile della distribuzione dei dati, in questo caso delle velocità, disegnando delle curve di livello. Dall'immagine infatti possiamo chiaramente individuare il punto di massimo evidenziato dal colore rosso e quello di minimo evidenziato dal colore blu. Dall'immagine sono visibili i punti che sono stati inseriti, dai quali il programma ha poi interpolato tutti gli altri, una caratteristica di questo metodo è infatti quella di creare dei "bull's eyes" ovvero delle circonferenze, più o meno evidenti, attorno a questi punti. Nel nostro caso possiamo ad esempio vederla chiaramente nei punti di minimo e massimo e nei punti con coordinate (0.40; 0.20) (0.40; 0.40) (0.80; 0.80)

La scala di colore usata per quasi tutti i metodi è la stessa e va da un minimo di 57.53 m/s ad un massimo di 5355.20 m/s.

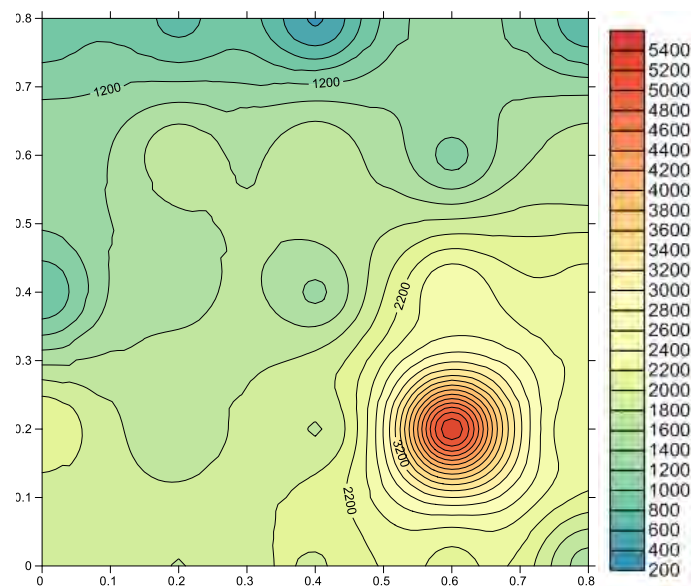


Figura 4.1. 4 - grafico distribuzione velocità sonche elaborato con Invere Distance to a Power

Kriging

Kriging è un metodo di interpolazione dati geostatistico molto utile e popolare, esso infatti produce mappe visivamente molto chiare da dati anche irregolarmente distanziati. Questo metodo esprime sia tendenze, quando una serie di punti è collegata da una cresta, che anisotropie, cioè dati isolati che non hanno un collegamento con i dati vicini e sono evidenziati dai "bull's eyes".

Possiamo notare come nel nostro caso questo metodo abbia dato un buon risultato sia dal punto di vista grafico, con una mappa chiara e facilmente comprensibile, che dal punto di vista dei valori con una media di velocità pari a 1787.94 m/s e, come per il metodo precedente, il minimo e il massimo costituiti da punti non interpolati ma inseriti, punti quindi appartenenti alla prova effettuata sul campo con griglia 20x20 cm. Troviamo quindi

Anche in questo caso la scala di colore usata va da un valore minimo di 57 m/s ad un valore massimo di 5355.20 m/s.

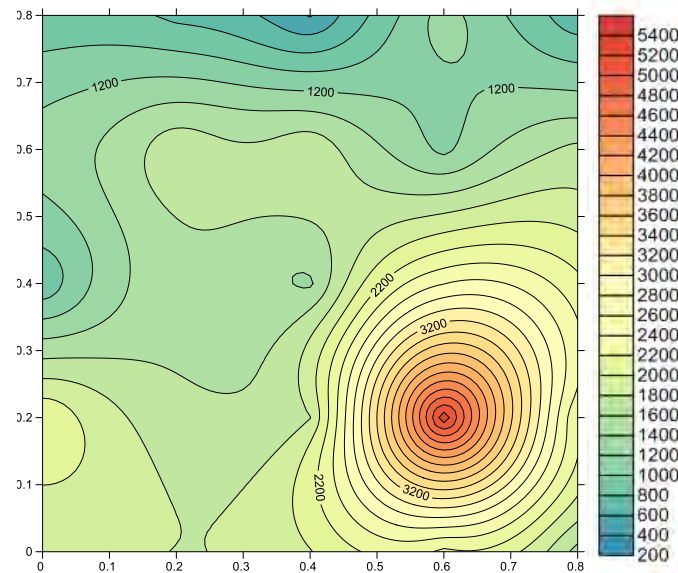


Figura 4.1. 5 - grafico distribuzione velocità soniche elaborato con Kriging

Minimum curvature

Minimum curvature è un metodo di interpolazione usato in particolare in scienze della terra, la superficie interpolata generata da questo sistema è un sottile piatto elastico lineare passante per ciascuno dei dati. Minimum curvature genera una superficie il più possibile regolare, cercando di tenere fede ai dati inseriti; non è però un interpolatore esatto quindi i dati inseriti vengono talvolta modificati nel processo di creazione della superficie.

Il processo di interpolazione con minimum curvature avviene applicando ripetutamente una equazione sulla griglia nel tentativo di renderla il più regolare possibile, ogni passaggio sulla griglia viene contato come una iterazione e questo processo continua finché i valori sono inferiori al valore massimo residuo o fino a che viene raggiunto il massimo numero di iterazioni.

Nel nostro caso l'interpolazione con minimum curvature ha dato una velocità media pari a 1693.83 m/s, anche in questo caso il massimo corrisponde al punto della griglia 20x20cm di coordinate (0.60;0.20) con velocità 5355.20 m/s, mentre il minimo è un punto tra quelli interpolati dal sistema e è nel punto con coordinate (0.30;0.80) con velocità 57,53 m/s. Questo punto minimo è il valore usato come minimo per la scala usata in quasi tutti i metodi di interpolazione, esclusi quelli non significativi o con un ordine di grandezza diverso.

Minimum curvature		
0.00	0.00	1825.65
0.10	0.00	1372.03
0.20	0.00	1797.79
0.30	0.00	1486.21
0.40	0.00	1989.23
0.50	0.00	1767.06
0.60	0.00	2142.08
0.70	0.00	270.36
0.80	0.00	1527.00
0.00	0.10	2200.13
0.10	0.10	1844.56
0.20	0.10	1600.92
0.30	0.10	1530.51
0.40	0.10	1950.89
0.50	0.10	3060.67
0.60	0.10	3630.70
0.70	0.10	2361.83
0.80	0.10	766.60
0.00	0.20	2200.06
0.10	0.20	1968.40
0.20	0.20	1672.04
0.30	0.20	1443.11
0.40	0.20	1790.35
0.50	0.20	3726.91
0.60	0.20	5355.20
0.70	0.20	3717.92
0.80	0.20	2202.97

0.00	0.30	1428.85
0.10	0.30	1551.55
0.20	0.30	1549.27
0.30	0.30	1422.68
0.40	0.30	1745.33
0.50	0.30	2982.71
0.60	0.30	3990.63
0.70	0.30	3451.59
0.80	0.30	2494.32
0.00	0.40	836.41
0.10	0.40	1196.37
0.20	0.40	1557.42
0.30	0.40	1414.49
0.40	0.40	1362.96
0.50	0.40	2044.15
0.60	0.40	2592.94
0.70	0.40	2666.40
0.80	0.40	2257.95
0.00	0.50	753.20
0.10	0.50	1335.41
0.20	0.50	1666.14
0.30	0.50	1645.97
0.40	0.50	1593.04
0.50	0.50	1617.00
0.60	0.50	1751.95
0.70	0.50	1966.97
0.80	0.50	2099.26
0.00	0.60	1308.55
0.10	0.60	1594.36

0.20	0.60	1760.37
0.30	0.60	1709.48
0.40	0.60	1769.29
0.50	0.60	1372.58
0.60	0.60	1142.22
0.70	0.60	1344.57
0.80	0.60	1653.15
0.00	0.70	1462.20
0.10	0.70	1334.35
0.20	0.70	1226.29
0.30	0.70	1023.92
0.40	0.70	968.05
0.50	0.70	1066.39
0.60	0.70	1123.77
0.70	0.70	844.46
0.80	0.70	395.73
0.00	0.80	862.76
0.10	0.80	824.73
0.20	0.80	749.10
0.30	0.80	57.53
0.40	0.80	379.94
0.50	0.80	705.13
0.60	0.80	1294.62
0.70	0.80	395.63
0.80	0.80	655.07

media 1693.832

Tabella 4.1. 4 - velocità elaborate con Minimum Curvature

Dal punto di vista grafico la mappa di colore da un risultato molto simile a quello dei metodi precedenti ma più regolare, anche qui sono facilmente riconoscibili i punti di massimo e minimo, rispettivamente evidenziati dal colore rosso e blu, e vediamo che il punto di minimo pur non essendo coincidente a quello dei metodi precedenti è vicino ad esso, si trova infatti nel punto di coordinate (0.30;0.80) mentre l'altro si trovava nel punto di coordinate (0.40;0.80).

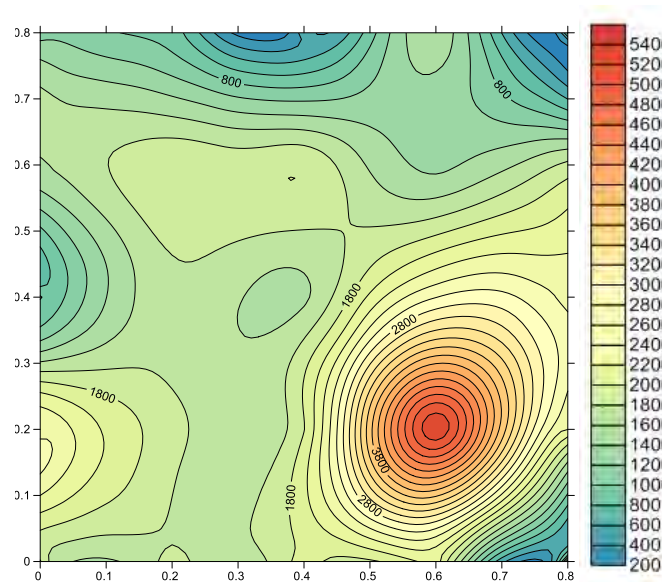


Figura 4.1. 6 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Minimum Curvature

Modified Shepard's method

Modified Shepard's method è un metodo di interpolazione simile a inverse distance to a power, anch'esso infatti si basa sulla media ponderata ma attraverso l'uso dei minimi quadrati elimina o riduce l'effetto occhio di bue tipico di inverse distance to a power. A seconda delle impostazioni questo può essere un interpolatore esatto o meno.

Nel nostro caso questo metodo ha dato una velocità media pari a 1826.73 m/s, quindi simile ai risultati precedenti e a quello ottenuto con la prova in sito con griglia 10x10 cm; e i punti di massimo e minimo tra quelli della prova eseguita con griglia 20x20 cm e quindi punti inseriti nel programma e non interpolati dallo stesso. Il punto di minimo si trova nel punto di coordinate (0.40;0.80) con velocità pari a 379.94 m/s, e il punto di massimo con coordinate (0.60;0.20) e velocità 5355.20 m/s.

Modified Shepard's method		
0.00	0.00	1825.65
0.10	0.00	1784.53
0.20	0.00	1797.79
0.30	0.00	1798.61
0.40	0.00	1989.23
0.50	0.00	2180.25
0.60	0.00	2142.08
0.70	0.00	2145.05
0.80	0.00	1527.00
0.00	0.10	2139.83

0.10	0.10	1896.55
0.20	0.10	1766.05
0.30	0.10	1765.84
0.40	0.10	2149.68
0.50	0.10	3276.62
0.60	0.10	4100.05
0.70	0.10	3609.89
0.80	0.10	2150.32
0.00	0.20	2200.06
0.10	0.20	1835.01
0.20	0.20	1672.04
0.30	0.20	1582.66

0.40	0.20	1790.35
0.50	0.20	3634.51
0.60	0.20	5355.20
0.70	0.20	4243.29
0.80	0.20	2202.97
0.00	0.30	1509.03
0.10	0.30	1532.71
0.20	0.30	1510.03
0.30	0.30	1384.14
0.40	0.30	1712.22
0.50	0.30	3006.33
0.60	0.30	4035.83

0.70	0.30	3714.75	0.60	0.50	1814.52	0.50	0.70	1143.49
0.80	0.30	2412.56	0.70	0.50	1974.33	0.60	0.70	1148.30
0.00	0.40	836.41	0.80	0.50	1945.71	0.70	0.70	1172.02
0.10	0.40	1297.54	0.00	0.60	1308.55	0.80	0.70	1150.43
0.20	0.40	1557.42	0.10	0.60	1547.49	0.00	0.80	862.76
0.30	0.40	1365.88	0.20	0.60	1760.37	0.10	0.80	838.34
0.40	0.40	1362.96	0.30	0.60	1705.73	0.20	0.80	749.10
0.50	0.40	2074.12	0.40	0.60	1769.29	0.30	0.80	544.51
0.60	0.40	2592.94	0.50	0.60	1399.52	0.40	0.80	379.94
0.70	0.40	2728.55	0.60	0.60	1142.22	0.50	0.80	839.10
0.80	0.40	2257.95	0.70	0.60	1430.90	0.60	0.80	1294.62
0.00	0.50	1040.65	0.80	0.60	1653.15	0.70	0.80	1058.46
0.10	0.50	1418.23	0.00	0.70	1182.40	0.80	0.80	655.07
0.20	0.50	1636.59	0.10	0.70	1329.66	media 1826.728		
0.30	0.50	1598.48	0.20	0.70	1388.61	<i>Tabella 4.1. 5 - velocità</i>		
0.40	0.50	1526.05	0.30	0.70	1299.37	<i>elaborate con Modified</i>		
0.50	0.50	1615.48	0.40	0.70	1189.03	<i>Shepard's Method</i>		

Dal punto di vista grafico vediamo che assomiglia molto al metodo simile ad esso inverse distance to a power, ma con l'effetto occhio di bue ridotto, non sono infatti più riconoscibili tutti i punti corrispondenti alla griglia 20x20cm e quindi ai dati inseriti. Sono comunque facilmente riconoscibili i punti di massimo e minimo come con i metodi precedenti, il punto di massimo evidenziato dal colore rosso nel punto di coordinate (0.60;0.20) e quello di minimo evidenziato dal colore blu in posizione (0.40;0.80).

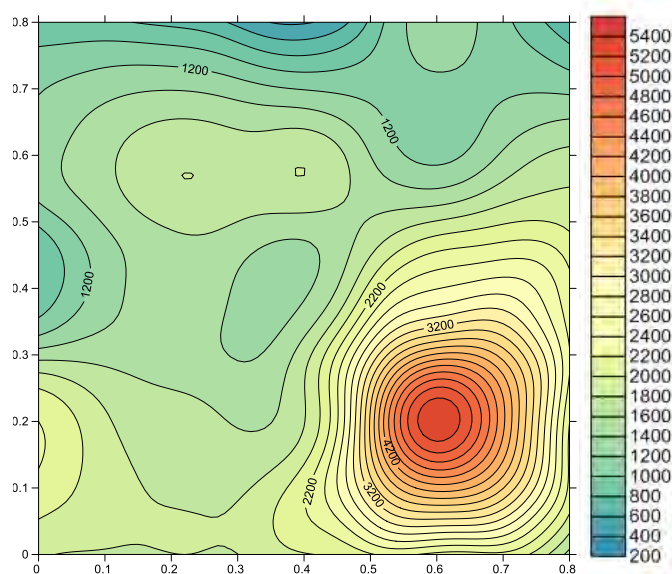


Figura 4.1. 7- grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Modified Shepard's Method

Natural neighbor

Natural neighbor è un metodo di interpolazione dei dati basato sui poligoni di Thiessen. Considerato un punto, si tracciano linee rette che lo congiungano ai punti più vicini. Successivamente a metà di tali rette se ne tracciano altre ad esse perpendicolari. L'incontro delle linee perpendicolari crea un poligono attorno al punto. L'idea fondamentale sulla quale si basano i poligoni di Thiessen è che con l'aumentare della distanza da un centro, diminuisca la sua influenza sul territorio, fino ad incontrare la zona di influenza di un altro centro. Con l'aggiunta di un nuovo punto nell'area i poligoni già esistenti si riducono di dimensione e l'area associata che è stata presa in prestito da un nuovo punto si dice "borrowed area" cioè area presa in prestito. L'algoritmo di interpolazione usato da questo metodo utilizza una media ponderata dove i pesi sono proporzionali alla zona presa in prestito.

In questo caso vediamo come nei punti alle estremità della griglia considerata, e quindi tutti i punti aventi coordinate x o y pari (0.0) oppure (0.80), evidenziati nella tabella, questo metodo di interpolazione ha dato un risultato di un ordine di grandezza diverso rispetto sia agli altri punti che agli altri metodi. Con il metodo natural neighbor infatti i contorni non sono estrapolati oltre i confini dei poligoni di Thiessen.

Nella valutazione della velocità media e dei punti di massimo e minimo non andiamo quindi a considerare questi punti. Otteniamo così una media pari a 1948.01 m/s, il punto di massimo nel punto con coordinate (0.60;0.20) e velocità 5355.20 m/s che coincide con il punto di massimo ottenuto anche con gli altri metodi finora esaminati, e il minimo nel punto con coordinate (0.40;0.70) con velocità pari a 1092 m/s.

Natural neighbor			0.60	0.10	3541.93	0.50	0.30	2775.63
0.00	0.00	1.70E+38	0.70	0.10	2806.42	0.60	0.30	3743.54
0.10	0.00	1.70E+38	0.80	0.10	1.70E+38	0.70	0.30	3103.34
0.20	0.00	1.70E+38	0.00	0.20	1.70E+38	0.80	0.30	1.70E+38
0.30	0.00	1.70E+38	0.10	0.20	1888.27	0.00	0.40	1.70E+38
0.40	0.00	1.70E+38	0.20	0.20	1672.04	0.10	0.40	1257.03
0.50	0.00	1.70E+38	0.30	0.20	1725.19	0.20	0.40	1557.42
0.60	0.00	1.70E+38	0.40	0.20	1790.35	0.30	0.40	1492.13
0.70	0.00	1.70E+38	0.50	0.20	3399.37	0.40	0.40	1362.96
0.80	0.00	1.70E+38	0.60	0.20	5355.20	0.50	0.40	2037.15
0.00	0.10	1.70E+38	0.70	0.20	3596.55	0.60	0.40	2592.94
0.10	0.10	1873.82	0.80	0.20	1.70E+38	0.70	0.40	2442.86
0.20	0.10	1759.00	0.00	0.30	1.70E+38	0.80	0.40	1.70E+38
0.30	0.10	1812.48	0.10	0.30	1566.71	0.00	0.50	1.70E+38
0.40	0.10	1984.47	0.20	0.30	1607.19	0.10	0.50	1365.80
0.50	0.10	2818.48	0.30	0.30	1595.56	0.20	0.50	1621.10
			0.40	0.30	1711.37	0.30	0.50	1612.50

0.40	0.50	1588.18	0.70	0.60	1431.10	0.10	0.80	1.70E+38
0.50	0.50	1717.04	0.80	0.60	1.70E+38	0.20	0.80	1.70E+38
0.60	0.50	1855.73	0.00	0.70	1.70E+38	0.30	0.80	1.70E+38
0.70	0.50	1911.37	0.10	0.70	1169.88	0.40	0.80	1.70E+38
0.80	0.50	1.70E+38	0.20	0.70	1235.21	0.50	0.80	1.70E+38
0.00	0.60	1.70E+38	0.30	0.70	1164.54	0.60	0.80	1.70E+38
0.10	0.60	1475.19	0.40	0.70	1092.00	0.70	0.80	1.70E+38
0.20	0.60	1760.37	0.50	0.70	1146.76	0.80	0.80	1.70E+38
0.30	0.60	1681.16	0.60	0.70	1206.85			
0.40	0.60	1769.29	0.70	0.70	1186.15			
0.50	0.60	1450.60	0.80	0.70	1.70E+38			
0.60	0.60	1142.22	0.00	0.80	1.70E+38			
							media	1948.01

*Tabella 4.1. 6 - velocità
elaborate con Natural Neighbor*

Graficamente l'immagine ottenuta è chiara e di facile interpretazione. Possiamo notare chiaramente i punti di massimo e di minimo evidenziati rispettivamente con il colore rosso e con il colore blu.

La scala di colore usata è la stessa degli altri metodi, infatti come possiamo vedere dalla mappa grafica i punti lungo i bordi, e quindi quei punti per i quali l'interpolazione ci ha dato risultati con un ordine di grandezza diverso, non sono considerati per il motivo spiegato precedentemente, con questo metodo infatti i contorni non sono estrapolati e non risultano quindi colorati nella nostra mappa.

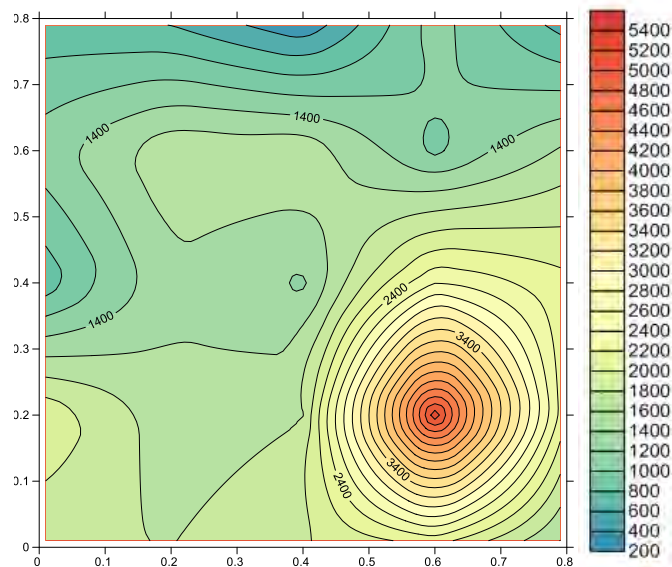


Figura 4.1. 8 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Natural Neighbor

Nearest neighbor

Il metodo di interpolazione nearest neighbor è un metodo che assegna il valore del punto più vicino a ciascun nodo di rete. Questo metodo è utile quando i dati sono distanziati ma hanno bisogno di essere tradotti in un file grid, quando i dati sono vicini invece questo

metodo è utile se ci sono dei fori, delle parti di dati mancanti. Con l'utilizzo di questo metodo abbiamo quindi ottenuto aree costituite da più punti ciascuna aventi la stessa velocità, come ad esempio il caso evidenziato in giallo nella tabella. In totale abbiamo una media di velocità pari a 1813.83 m/s e il punto di minimo e massimo costituiti da più di un punto. Un punto di quelli dei dati inseriti, cioè quelli ottenuti con la prova eseguita con una griglia di 20x20 cm, e un punto o più di uno vicino ad esso a seconda che il punto considerato si trovi nel bordo o al centro della griglia. Il minimo è infatti costituito dai punti di coordinate (0.40;0.80) e (0.50;0.80) e ha una velocità pari a 379.94 m/s, il massimo invece è al centro della mappa grafica ed è quindi costituito da quattro punti di coordinate (0.60;0.20), (0.70;0.20), (0.60;0.30) e (0.70;0.30).

Nearest neighbor			0.10	0.30	2200.06	0.30	0.60	1760.37
0.00	0.00	1825.65	0.20	0.30	1672.04	0.40	0.60	1769.29
0.10	0.00	1825.65	0.30	0.30	1672.04	0.50	0.60	1769.29
0.20	0.00	1797.79	0.40	0.30	1790.35	0.60	0.60	1142.22
0.30	0.00	1797.79	0.50	0.30	1790.35	0.70	0.60	1142.22
0.40	0.00	1989.23	0.60	0.30	5355.20	0.80	0.60	1653.15
0.50	0.00	1989.23	0.70	0.30	5355.20	0.00	0.70	1308.55
0.60	0.00	2142.08	0.80	0.30	2202.97	0.10	0.70	1308.55
0.70	0.00	2142.08	0.00	0.40	836.41	0.20	0.70	1760.37
0.80	0.00	1527.00	0.10	0.40	836.41	0.30	0.70	1760.37
0.00	0.10	1825.65	0.20	0.40	1557.42	0.40	0.70	1769.29
0.10	0.10	1825.65	0.30	0.40	1557.42	0.50	0.70	1769.29
0.20	0.10	1797.79	0.40	0.40	1362.96	0.60	0.70	1142.22
0.30	0.10	1797.79	0.50	0.40	1362.96	0.70	0.70	1142.22
0.40	0.10	1989.23	0.60	0.40	2592.94	0.80	0.70	1653.15
0.50	0.10	1989.23	0.70	0.40	2592.94	0.00	0.80	862.76
0.60	0.10	2142.08	0.80	0.40	2257.95	0.10	0.80	862.76
0.70	0.10	2142.08	0.00	0.50	836.41	0.20	0.80	749.10
0.80	0.10	1527.00	0.10	0.50	836.41	0.30	0.80	749.10
0.00	0.20	2200.06	0.20	0.50	1557.42	0.40	0.80	379.94
0.10	0.20	2200.06	0.30	0.50	1557.42	0.50	0.80	379.94
0.20	0.20	1672.04	0.40	0.50	1362.96	0.60	0.80	1294.62
0.30	0.20	1672.04	0.50	0.50	1362.96	0.70	0.80	1294.62
0.40	0.20	1790.35	0.60	0.50	2592.94	0.80	0.80	655.07
0.50	0.20	1790.35	0.70	0.50	2592.94			
0.60	0.20	5355.20	0.80	0.50	2257.95			
0.70	0.20	5355.20	0.00	0.60	1308.55			
0.80	0.20	2202.97	0.10	0.60	1308.55			
0.00	0.30	2200.06	0.20	0.60	1760.37			

media 1813.831

Tabella 4.1.7 - velocità
elaborate con Nearest Neighbor

Graficamente questo metodo non è particolarmente significativo, in quanto come possiamo vedere dalla mappa grafica essa non da informazioni sui vari punti ma solo sulle aree e non

interpola i dati ma si limita ad assegnare ad ogni punto il valore del dato più vicino senza mettere in relazione tra loro i valori di velocità dei diversi punti.

Dall'immagine infatti possiamo solo individuare l'area dove è presente il punto di massimo, evidenziata in rosso, e quella dove è presente il punto di minimo evidenziata in blu ma non possiamo individuare il punto preciso.

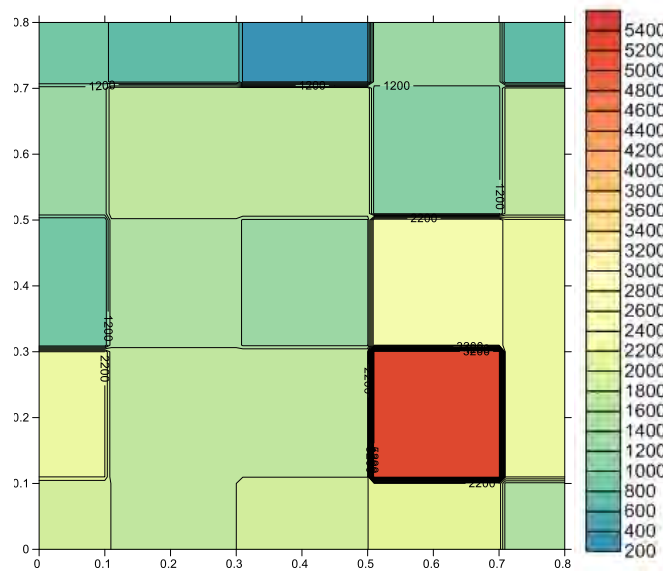


Figura 4.1. 9 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Nearest Neighbor

Polynomial regression

Polynomial regression non è un vero e proprio metodo di interpolazione dei dati, esso infatti non cerca di prevedere i valori di z sconosciuti, nel nostro caso i valori di velocità, ma ci sono diverse opzioni che si possono utilizzare per definire il tipo di superficie di tendenza. Esso infatti è utilizzato per definire tendenze su larga scala.

Questo caso ha dato come risultato un valore di velocità media pari a 1917.5 m/s, il valore di velocità minima si trova nello stesso punto di quello trovato con la trova 20x20, nel punto di coordinate (0.40;0.80) mentre quello di massimo non coincide con quello della 20x20 ma si trova vicino ad esso, nel punto di coordinate (0.70;0.20).

Polynomial regression		
0.00	0.00	1949.24
0.10	0.00	2078.14
0.20	0.00	1686.04
0.30	0.00	1400.18
0.40	0.00	1553.11

0.50	0.00	2153.22
0.60	0.00	2855.18
0.70	0.00	2930.54
0.80	0.00	1238.17
0.00	0.10	2285.61
0.10	0.10	2532.80

0.20	0.10	2298.85
0.30	0.10	2161.80
0.40	0.10	2427.22
0.50	0.10	3098.76
0.60	0.10	3848.65
0.70	0.10	3988.17

0.80	0.10	2438.21	0.40	0.40	1507.85	0.00	0.70	1792.42
0.00	0.20	1887.80	0.50	0.40	2132.29	0.10	0.70	2015.26
0.10	0.20	2227.36	0.60	0.40	2846.48	0.20	0.70	1759.89
0.20	0.20	2118.58	0.70	0.40	3114.61	0.30	0.70	1426.67
0.30	0.20	2095.88	0.80	0.40	2077.23	0.40	0.70	1276.97
0.40	0.20	2443.46	0.00	0.50	1062.21	0.50	0.70	1403.73
0.50	0.20	3165.84	0.10	0.50	1342.46	0.60	0.70	1701.94
0.60	0.20	3958.38	0.20	0.50	1205.24	0.70	0.70	1839.13
0.70	0.20	4177.73	0.30	0.50	1087.74	0.80	0.70	1225.92
0.80	0.20	2812.40	0.40	0.50	1243.65	0.00	0.80	718.83
0.00	0.30	1295.20	0.50	0.50	1713.75	0.10	0.80	1119.38
0.10	0.30	1670.45	0.60	0.50	2296.35	0.20	0.80	979.44
0.20	0.30	1620.58	0.70	0.50	2517.83	0.30	0.80	689.34
0.30	0.30	1641.98	0.80	0.50	1603.18	0.40	0.80	522.70
0.40	0.30	2003.10	0.00	0.60	1531.34	0.50	0.80	606.95
0.50	0.30	2714.94	0.10	0.60	1746.05	0.60	0.80	893.80
0.60	0.30	3501.56	0.20	0.60	1522.74	0.70	0.80	1129.78
0.70	0.30	3770.61	0.30	0.60	1277.35	0.80	0.80	826.72
0.80	0.30	2583.79	0.40	0.60	1264.64	media		1917.499
0.00	0.40	946.22	0.50	0.60	1548.66			
0.10	0.40	1295.06	0.60	0.60	1973.24			
0.20	0.40	1229.91	0.70	0.60	2132.56			
0.30	0.40	1214.75	0.80	0.60	1341.61			

Tabella 4.1. 8 - velocità elaborate con Polynomial Regression

Graficamente questo metodo evidenzia le tendenze ma non le particolarità, infatti come detto precedentemente è usato proprio per questo, per creare tendenze su larga scala.

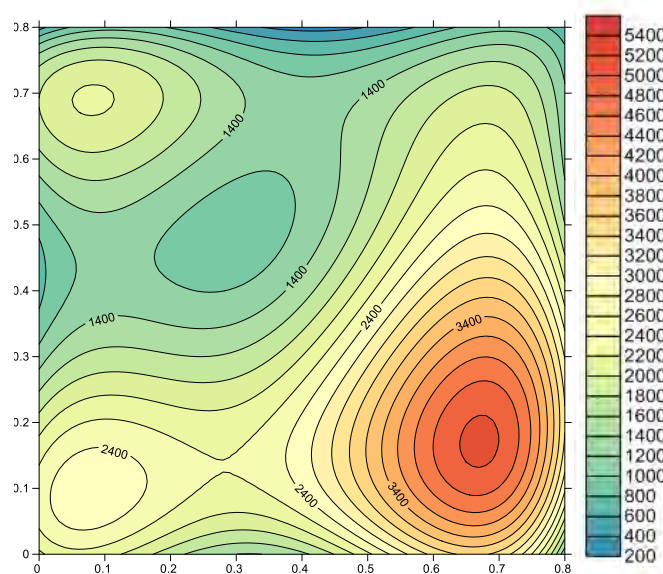


Figura 4.1. 10 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Polynomial Regression

Radial basis function

Radial basis function è un metodo di interpolazione dati considerato da molti il migliore per quanto riguarda adattarsi ai dati inseriti producendo una superficie appianata. Esso è un “exact interpolator” cioè tenta il più possibile di non modificare i dati inseriti, quindi nel nostro caso quelli relativi alla velocità sonica ottenuta tramite la prova in sito con la griglia 20x20 cm. Questo caso ha dato come risultato una velocità media pari a 1800 m/s. Anche in questo caso il valore minimo e il valore massimo sono associati a punti appartenenti alla prova eseguita con la griglia 20x20cm, sono quindi valori calcolati sul campo e non interpolati dal programma. Il minimo valore di velocità è stato riscontrato nel punto di coordinate (0.40;0.80) ed è pari a 379.94 m/s, il massimo invece è stato riscontrato nel punto di coordinate (0.60;0.20) ed è pari a 5355.20 m/s.

Radial basis function			0.10	0.30	1568.88	0.30	0.60	1729.16
0.00	0.00	1825.65	0.20	0.30	1543.47	0.40	0.60	1769.29
0.10	0.00	1833.00	0.30	0.30	1418.52	0.50	0.60	1410.60
0.20	0.00	1797.79	0.40	0.30	1718.39	0.60	0.60	1142.22
0.30	0.00	1807.20	0.50	0.30	3002.22	0.70	0.60	1440.10
0.40	0.00	1989.23	0.60	0.30	4033.45	0.80	0.60	1653.15
0.50	0.00	2209.00	0.70	0.30	3488.32	0.00	0.70	1146.30
0.60	0.00	2142.08	0.80	0.30	2425.28	0.10	0.70	1246.76
0.70	0.00	1996.80	0.00	0.40	836.41	0.20	0.70	1291.90
0.80	0.00	1527.00	0.10	0.40	1271.14	0.30	0.70	1203.35
0.00	0.10	2081.43	0.20	0.40	1557.42	0.40	0.70	1122.03
0.10	0.10	1963.06	0.30	0.40	1424.24	0.50	0.70	1139.56
0.20	0.10	1781.80	0.40	0.40	1362.96	0.60	0.70	1191.86
0.30	0.10	1717.81	0.50	0.40	2084.26	0.70	0.70	1190.13
0.40	0.10	2073.83	0.60	0.40	2592.94	0.80	0.70	1130.14
0.50	0.10	3085.23	0.70	0.40	2621.60	0.00	0.80	862.76
0.60	0.10	3779.96	0.80	0.40	2257.95	0.10	0.80	854.04
0.70	0.10	3092.72	0.00	0.50	1059.63	0.20	0.80	749.10
0.80	0.10	2000.88	0.10	0.50	1380.30	0.30	0.80	567.06
0.00	0.20	2200.06	0.20	0.50	1664.75	0.40	0.80	379.94
0.10	0.20	1937.12	0.30	0.50	1649.66	0.50	0.80	850.06
0.20	0.20	1672.04	0.40	0.50	1598.91	0.60	0.80	1294.62
0.30	0.20	1500.65	0.50	0.50	1644.06	0.70	0.80	1010.42
0.40	0.20	1790.35	0.60	0.50	1731.21	0.80	0.80	655.07
0.50	0.20	3620.65	0.70	0.50	1919.70	media		1800.00
0.60	0.20	5355.20	0.80	0.50	1942.62			
0.70	0.20	3906.63	0.00	0.60	1308.55			
0.80	0.20	2202.97	0.10	0.60	1505.53			
0.00	0.30	1507.46	0.20	0.60	1760.37			

Tabella 4.1. 9 - velocità elaborate con Radial Basis Function

Dal punto di vista grafico questo metodo ci fornisce una mappa simile a quella vista per altri metodi, come kriging o inverse distance to a power, ma con un risultato più appianato seppur rispettando i valori inseriti, come abbiamo già detto caratteristica di questo metodo.

Sono ben riconoscibili i punti di massimo e minimo, evidenziati rispettivamente in rosso e blu, e l'effetto bull's eyes è meno visibile rispetto ai metodi visti precedentemente.

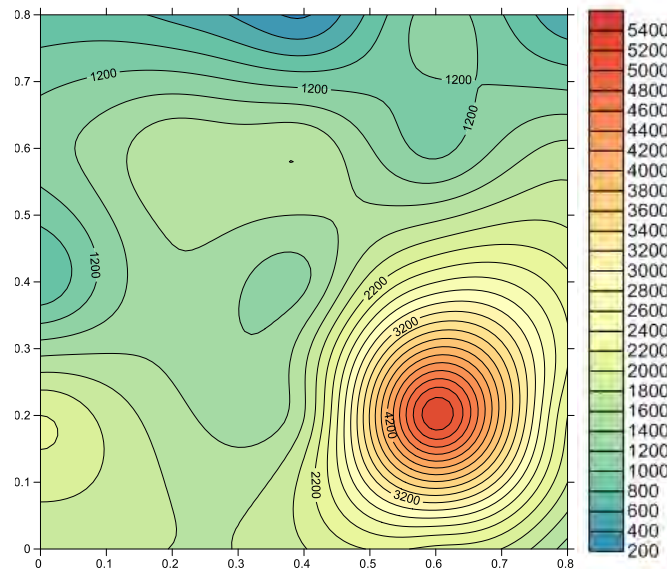


Figura 4.1. 11 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Radial Basis Function

Triangulation with linear interpolation

Il metodo di interpolazione dati triangulation with linear interpolation è un metodo basato sulla triangolazione di Delaunay. L'algoritmo alla base di questa triangolazione crea dei triangoli tracciando linee tra i punti dati, facendo in modo che il bordo di nessun triangolo sia intersecato da altri triangoli e massimizzando il minimo angolo interno dei triangoli, cioè se in un caso si possono creare due diverse configurazioni l'algoritmo crea la configurazione tale per cui il minimo angolo interno dei triangoli sia maggiore rispetto alle altre.

Il risultato è un patchwork di facce triangolari sulla griglia data. Ogni triangolo definisce un piano sopra ai nodi della griglia che si trovano al suo interno con inclinazione e elevazione del triangolo definite dai tre punti dati, quindi nel nostro caso dai punti della prova eseguita con griglia 20x20. Poiché i dati originali sono utilizzati per la creazione dei triangoli questo è un metodo di interpolazione esatto, cioè che non va a modificare, oppure li modifica di molto poco, i dati inseriti.

Questo metodo funziona in modo ottimale quando i dati inseriti sono distribuiti in modo uniforme sulla griglia, come nel nostro caso, ha dato infatti una velocità media pari a 1770.15 m/s, che quindi non si discosta troppo da quella ottenuta mediante la prova eseguita in sito con la griglia 10x10 cm. Anche in questo caso troviamo i punti di massimo e di minimo nei

punti di coordinate rispettivamente (0.60;0.20) (0.40;0.80) con velocità pari a 5355.20 m/s e 379.94 m/s, entrambi punti inseriti nel programma e non interpolati, che sono quindi stati rilevati in sito tramite la prova eseguita con la griglia 20x20cm.

Traingulation with linear interp.			0.10	0.30	1254.23	0.30	0.60	1764.83
0.00	0.00	1825.65	0.20	0.30	1614.73	0.40	0.60	1769.29
0.10	0.00	1811.72	0.30	0.30	1673.88	0.50	0.60	1455.75
0.20	0.00	1797.79	0.40	0.30	1576.65	0.60	0.60	1142.22
0.30	0.00	1893.51	0.50	0.30	3359.08	0.70	0.60	1397.69
0.40	0.00	1989.23	0.60	0.30	3974.07	0.80	0.60	1653.15
0.50	0.00	2065.66	0.70	0.30	2397.95	0.00	0.70	1085.66
0.60	0.00	2142.08	0.80	0.30	2230.46	0.10	0.70	1311.57
0.70	0.00	1834.54	0.00	0.40	836.41	0.20	0.70	1254.73
0.80	0.00	1527.00	0.10	0.40	1196.91	0.30	0.70	1259.19
0.00	0.10	2012.85	0.20	0.40	1557.42	0.40	0.70	1074.61
0.10	0.10	1998.92	0.30	0.40	1460.19	0.50	0.70	761.08
0.20	0.10	1734.91	0.40	0.40	1362.96	0.60	0.70	1218.42
0.30	0.10	1830.64	0.50	0.40	1977.95	0.70	0.70	1473.88
0.40	0.10	1889.79	0.60	0.40	2592.94	0.80	0.70	1154.11
0.50	0.10	1966.21	0.70	0.40	2425.45	0.00	0.80	862.76
0.60	0.10	3748.64	0.80	0.40	2257.95	0.10	0.80	805.93
0.70	0.10	3441.10	0.00	0.50	1072.48	0.20	0.80	749.10
0.80	0.10	1864.98	0.10	0.50	1432.98	0.30	0.80	564.52
0.00	0.20	2200.06	0.20	0.50	1658.89	0.40	0.80	379.94
0.10	0.20	1936.05	0.30	0.50	1561.66	0.50	0.80	837.28
0.20	0.20	1672.04	0.40	0.50	1566.12	0.60	0.80	1294.62
0.30	0.20	1731.19	0.50	0.50	2181.11	0.70	0.80	974.85
0.40	0.20	1790.35	0.60	0.50	1867.58	0.80	0.80	655.07
0.50	0.20	3572.78	0.70	0.50	1700.09			
0.60	0.20	5355.20	0.80	0.50	1955.55			
0.70	0.20	3779.09	0.00	0.60	1308.55			
0.80	0.20	2202.97	0.10	0.60	1534.46			
0.00	0.30	1518.24	0.20	0.60	1760.37			
						media		1770.15

Tabella 4.1. 10 - velocità
elaborate con Triangulation
with Linear Interpolation

Dal punto di vista grafico il risultato è più rigido rispetto ai metodi precedenti, non abbiamo infatti curve a costituire la nostra mappa grafica ma segmenti, sono comunque ben visibili i punti di massimo e minimo e nel complesso si ha una buona immagine della situazione.

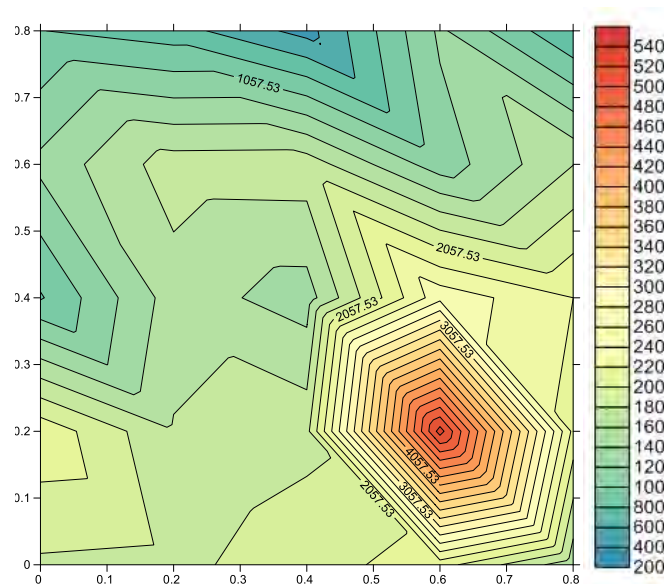


Figura 4.1. 12 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Triangulation with Linear Interpolation

Moving average

Moving average è un metodo di interpolazione dei dati basato sulla creazione di ellissi, assegna ai nodi valori dati dalla media dei punti all'interno dell'ellisse. Quindi i dati adiacenti ad ogni nodo della griglia, quindi ai punti inseriti, sono identificati centrando l'ellisse nel nodo.

Non è un metodo di interpolazione esatto, infatti i dati inseriti vengono modificati di molto, ottenendo un risultato più appianato. Come per il metodo Polynomial regression i punti di minimo e massimo sono posti rispettivamente nel punto in alto a destra e in basso a sinistra della griglia, con velocità pari a 1176.31 e 2357.85 m/s. Il metodo fornisce quindi solo un'idea dell'andamento delle velocità all'interno del pannello, senza prestare fede ai dati inseriti, tenendo conto solo delle tendenze e non delle particolarità.

Moving Average		
0.00	0.00	1670.21
0.10	0.00	2048.11
0.20	0.00	2093.51
0.30	0.00	2060.86
0.40	0.00	2074.00
0.50	0.00	2162.40
0.60	0.00	2187.33
0.70	0.00	2244.59
0.80	0.00	2357.85
0.00	0.10	1645.53
0.10	0.10	1969.09
0.20	0.10	1997.36
0.30	0.10	2023.86

0.40	0.10	1987.88
0.50	0.10	2074.07
0.60	0.10	2054.17
0.70	0.10	2114.30
0.80	0.10	2183.28
0.00	0.20	1655.84
0.10	0.20	1997.36
0.20	0.20	1943.91
0.30	0.20	1952.13
0.40	0.20	1937.18
0.50	0.20	1970.27
0.60	0.20	2035.81
0.70	0.20	2054.17
0.80	0.20	2148.78

0.00	0.30	1534.43
0.10	0.30	1839.38
0.20	0.30	1741.81
0.30	0.30	1834.63
0.40	0.30	1789.88
0.50	0.30	1864.20
0.60	0.30	1836.98
0.70	0.30	1935.28
0.80	0.30	1981.07
0.00	0.40	1457.46
0.10	0.40	1719.57
0.20	0.40	1719.45
0.30	0.40	1761.00
0.40	0.40	1707.40

0.50	0.40	1738.99
0.60	0.40	1782.58
0.70	0.40	1839.16
0.80	0.40	1874.33
0.00	0.50	1419.48
0.10	0.50	1475.49
0.20	0.50	1697.21
0.30	0.50	1716.62
0.40	0.50	1710.11
0.50	0.50	1723.59
0.60	0.50	1781.78
0.70	0.50	1840.22
0.80	0.50	1866.12
0.00	0.60	1354.10
0.10	0.60	1418.60
0.20	0.60	1664.64
0.30	0.60	1642.13
0.40	0.60	1670.17
0.50	0.60	1642.28
0.60	0.60	1762.22
0.70	0.60	1768.24
0.80	0.60	1871.39
0.00	0.70	1314.45
0.10	0.70	1299.67
0.20	0.70	1418.60
0.30	0.70	1336.70
0.40	0.70	1611.13
0.50	0.70	1655.74
0.60	0.70	1768.24
0.70	0.70	1782.75
0.80	0.70	1878.76
0.00	0.80	1176.31
0.10	0.80	1183.97
0.20	0.80	1301.38
0.30	0.80	1280.34
0.40	0.80	1345.52
0.50	0.80	1381.88
0.60	0.80	1431.25
0.70	0.80	1419.78
0.80	0.80	1456.46
media		1761.34

Tabella 4.1. II - velocità elaborate con Moving Average

Graficamente il risultato ottenuto è inutile in quanto l'immagine è poco chiara e non mostra nulla eccetto la tendenza ad avere una velocità maggiore nella parte in basso a destra del pannello e una velocità maggiore in alto a sinistra, non sottolinea nessuna particolarità e non individua i punti di massimo e minimo.

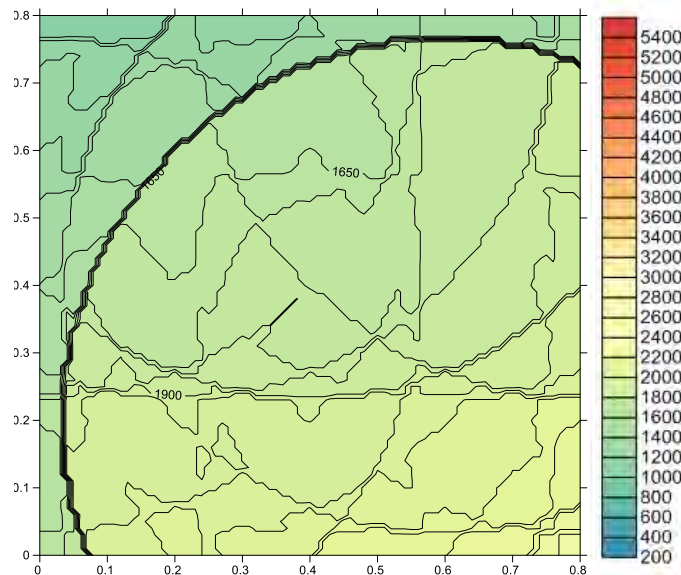


Figura 4.1. 13 - grafico di distribuzione velocità soniche elaborato con Moving Average

Data metrics

Data metrics non è un metodo di interpolazione dei dati che attraverso la media ponderata da valori di z, nel nostro caso corrispondente alla velocità, ma un metodo usato per le analisi statistiche che può dare risultati diversi a seconda delle impostazioni. Ad esempio può dare informazioni circa la distanza al dato più vicino, quindi nel nostro caso ai punti appartenenti alla griglia 20x20 cm. Non è quindi stato studiato in quanto il suo utilizzo non ha dato nessun risultato utile e paragonabile agli altri metodi.

Local Polynomial

Local polynomial è un metodo di interpolazione dei dati basato sull'approssimazione ai minimi quadrati. E' una tecnica di approssimazione volta a determinare una funzione analitica che approssimi un insieme di dati senza necessariamente passare per i dati stessi ma che gli si avvicini il più possibile, da questo possiamo dedurre che questo metodo non è un interpolatore esatto. L'approssimazione ai minimi quadrati minimizza la somma dei quadrati delle distanze dai punti, nel nostro caso costituite dalle velocità. I risultati ottenuti danno una media pari a 1705.25 m/s. Interessanti sono i punti di massimo e minimo, essi infatti sono posti come per molti altri metodi visti nei punti di coordinate (0.60;0.20) e (0.40;0.80), e quindi punti appartenenti ai punti inseriti ottenuti con la prova mediante griglia 20x20 cm, ma hanno valori totalmente diversi con un massimo pari a 3734 m/s e un minimo pari a 556.52 m/s.

Local Polynomial		
0.00	0.00	1848.50
0.10	0.00	1834.14
0.20	0.00	1830.54
0.30	0.00	1907.35
0.40	0.00	1991.06
0.50	0.00	2053.51
0.60	0.00	2065.60
0.70	0.00	1817.13
0.80	0.00	1463.69
0.00	0.10	1951.34
0.10	0.10	1855.88
0.20	0.10	1813.09
0.30	0.10	1907.46
0.40	0.10	2155.86
0.50	0.10	2606.26
0.60	0.10	2907.26
0.70	0.10	2554.87
0.80	0.10	1855.30
0.00	0.20	1972.83
0.10	0.20	1789.52
0.20	0.20	1726.15
0.30	0.20	1843.39
0.40	0.20	2106.80
0.50	0.20	2877.03
0.60	0.20	3734.52
0.70	0.20	2987.31
0.80	0.20	2147.96
0.00	0.30	1524.58
0.10	0.30	1572.99
0.20	0.30	1621.12

0.30	0.30	1728.06
0.40	0.30	2000.90
0.50	0.30	2586.13
0.60	0.30	3048.34
0.70	0.30	2806.46
0.80	0.30	2203.74
0.00	0.40	1081.84
0.10	0.40	1375.43
0.20	0.40	1532.95
0.30	0.40	1610.02
0.40	0.40	1703.88
0.50	0.40	2134.68
0.60	0.40	2462.85
0.70	0.40	2397.71
0.80	0.40	2175.30
0.00	0.50	1121.88
0.10	0.50	1344.78
0.20	0.50	1504.91
0.30	0.50	1562.54
0.40	0.50	1630.66
0.50	0.50	1768.10
0.60	0.50	1894.46
0.70	0.50	1937.75
0.80	0.50	1910.46
0.00	0.60	1196.38
0.10	0.60	1320.07
0.20	0.60	1492.22
0.30	0.60	1464.64
0.40	0.60	1520.33
0.50	0.60	1454.40
0.60	0.60	1400.69

0.70	0.60	1517.02
0.80	0.60	1596.76
0.00	0.70	1048.48
0.10	0.70	1113.68
0.20	0.70	1144.11
0.30	0.70	1114.62
0.40	0.70	1096.94
0.50	0.70	1146.43
0.60	0.70	1202.12
0.70	0.70	1196.35
0.80	0.70	1154.92
0.00	0.80	848.95
0.10	0.80	798.35
0.20	0.80	728.86
0.30	0.80	626.54
0.40	0.80	556.52
0.50	0.80	826.05
0.60	0.80	1087.72
0.70	0.80	925.79
0.80	0.80	699.51
	media	1705.25

Tabella 4.1. 12 - velocità
elaborate con Local Polynomial

Anche dal punto di vista grafico il risultato è lo stesso, cioè l'immagine grafica è simile e evidenzia gli stessi punti ma con risultati, e quindi nel nostro caso colori, diversi. Dando un'immagine del pannello più omogenea di quanto questo sia nella realtà e quindi nel nostro caso fuorviante.

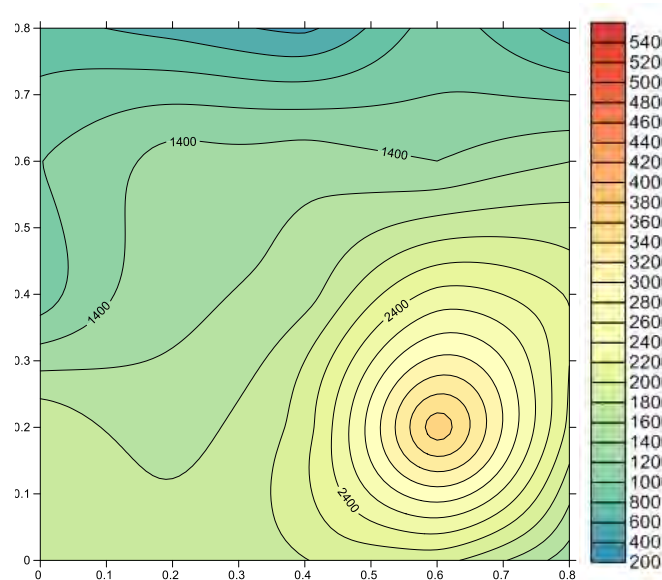


Figura 4.1. 14 - grafico distribuzione velocità soniche elaborato con Local Polynomial

4.1.3. Percentuale di errore dei vari metodi

Per ogni metodo è stata calcolata la percentuale di errore tra il valore di velocità ottenuto tramite l'interpolazione, dai valori ottenuti con la prova con griglia 20x20cm, e il valore acquisito tramite la prova sonica con griglia 10x10 cm. La percentuale è stata quindi considerata come valore assoluto per poter calcolare la percentuale di errore totale, altrimenti se così non si fosse fatto la percentuale totale sarebbe stata minore in quanto errori in positivo e in negativo si sarebbero compensati tra di loro. La percentuale totale di ogni metodo quindi non è stata ottenuta dalle velocità medie nel pannello nei due casi ma facendo la media dei valori assoluti delle percentuali d'errore punto per punto.

Nella tabella seguente possiamo vedere la media delle percentuali d'errore per ogni metodo di interpolazione:

METODI DI INTERPOLAZIONE	PERCENTUALE D'ERRORE
Kriging	27.16%
Inverse distance to a power	26.29%
Minimum curvature	30.40%
Modified Shepard's method	28.59%
Natural neighbor	33.32%
Nearest neighbor	35.73%
Polinomial regression	41.10%
Radial basis function	27.36%
Tiangulation with linear interpolation	26.12%
Moving average	40.11%
Local polynomial	28.46%

Tabella 4.1. 13 - percentuali di errore

Dalla percentuale di errore possiamo anche determinare quali tra i vari metodi sono interpolatori esatti o meno, cioè se prestano fede ai dati inseriti modificandoli il meno possibile e se nel processo di interpolazione per ottenere una mappa grafica più appianata li modificano in modo sostanziale. Per alcuni metodi questo è indicato nelle linee guida del programma, come ad esempio minimum curvature, per gli altri invece possiamo considerare come interpolatori esatti quelli che danno una percentuale di errore al massimo del 10% nei punti appartenenti alla prova con griglia 20x20 cm, e che quindi modificano solo leggermente i valori inseriti. Sono interpolatori esatti Kriging, Inverse distance to a power, Modified Shepard's method, Radial basis function e Triangulation with linear interpolation. Non lo sono invece Polinomial regression, Moving average, Local polynomial e Minimum curvature.

4.1.4. Analisi e confronto dei risultati

Dallo studio dei vari metodi di interpolazione e dalla loro valutazione, attraverso sia il calcolo della percentuale di errore che lo studio delle mappe grafiche ottenute, si è potuto fare una selezione e scartare vari metodi, infatti gli aspetti da considerare per la scelta del metodo migliore da utilizzare nell'elaborazione dei dati all'interno della nostra campagna d'indagine sono due, l'aspetto visivo, cioè la chiarezza della mappa grafica, e la percentuale d'errore.

Dal punto di vista della percentuale di errore i metodi che hanno avuto risultati migliori sono: Triangulation with linear interpolation, con una percentuale di errore media del 26.12%, Inverse distance to a power con il 26.29%, Kriging con il 27.16% e Radial basis function con il 27.36%.

Dal punto di vista grafico invece, i metodi che hanno dato un risultato più chiaro e più significativo sono: Kriging che, come già spiegato, produce un'immagine grafica chiara e accattivante sottolineando sia tendenze che particolarità; e Minimum curvature, che non è però un interpolatore esatto e ha un punto di minimo diverso da quello della prova eseguita con griglia 20x20. Altri che offrono un buon risultato grafico sono Radial basis function che offre un risultato più omogeneo rispetto ai precedenti seppur rispettando i valori inseriti; Inverse distance to a power, che graficamente ha la caratteristica di evidenziare i punti inseriti e non interpolati; e Modified Shepard's method che offre un'immagine molto chiara pur avendo una percentuale di errore leggermente più alta rispetto ai metodi considerati migliori sotto quel punto di vista. Tenendo conto di entrambi gli aspetti i metodi migliori sono Kriging, Radial basis function e Inverse distance to a power. In particolare tra questi Kriging si è rivelato il metodo più adatto alle nostre esigenze, in quanto con una buona percentuale d'errore riesce a dare un'immagine grafica ottima, soprattutto mettendo in evidenza sia tendenze che anisotropie, aspetto molto importante per l'utilizzo che abbiamo fatto noi del programma.

4.1.5. Analisi della percentuale di errore

Una volta studiati i vari metodi e ottenuto la percentuale di errore media di ogni metodo si è passato ad analizzare la distribuzione degli errori nel pannello. Questo è stato fatto sempre mediante il programma Surfing usando il metodo Kriging, risultato appunto il migliore. È stata quindi elaborata una mappa grafica della distribuzione degli errori sul pannello per ogni metodo di interpolazione, di seguito sono riportate quelle dei metodi che hanno dato i risultati migliori nello studio delle velocità soniche, e quindi Kriging, Radial basis function e Inverse distance to a power.

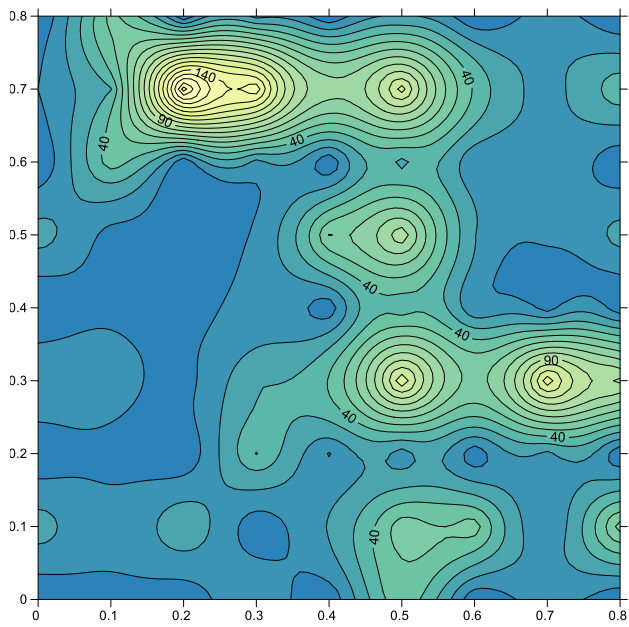


Figura 4.1. 15 - distribuzione percentuale di errore - Kriging

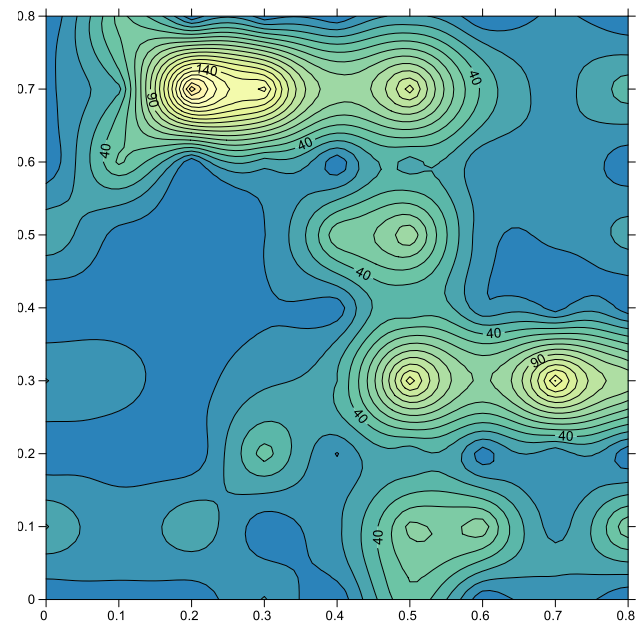


Figura 4.1. 16 - distribuzione percentuale di errore - Radial Basis Function

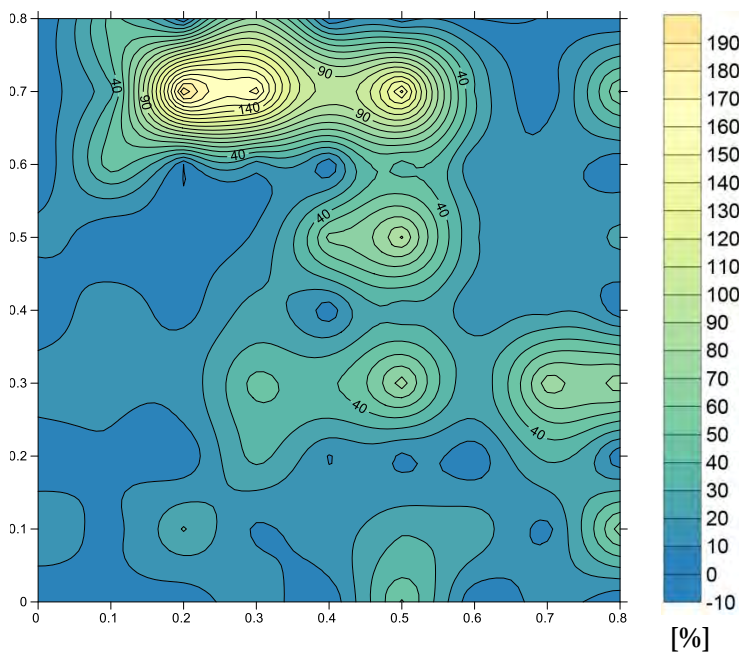


Figura 4.1. 17 - ditribuzione percentuali di errore Inverse Distance to a Power

Dalle mappe grafiche ottenute si può osservare come i punti che presentano una percentuale di errore maggiore siano concentrati principalmente in tre sezioni. Le sezioni con coordinate $y=0.7m$, $y=0.3m$ e $x=0.5m$, se infatti facciamo una media della percentuale di errore rilevate in queste sezioni otteniamo valori tra il 50 e il 60%, decisamente più alti rispetto alla media fatta considerando tutti i punti che, per questi metodi, è circa del 25/30%.

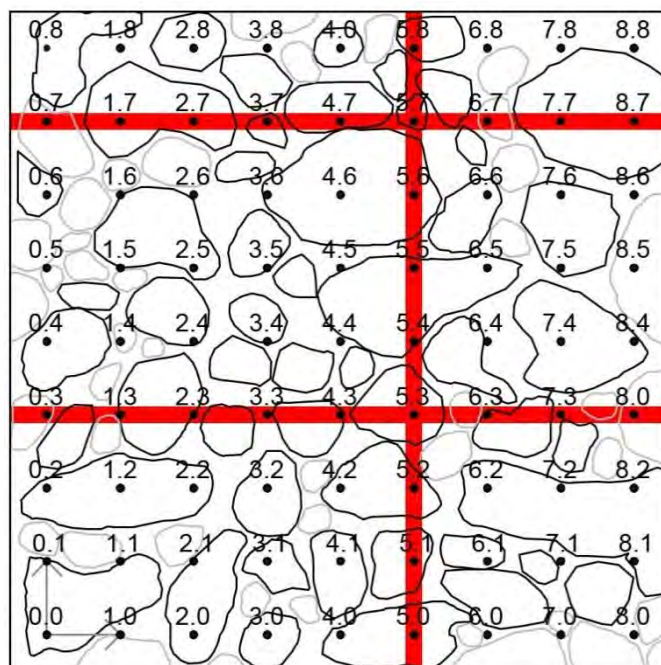


Figura 4.1. 18 - sezioni critiche

Una volta rilevate le sezioni critiche per quanto riguarda l'interpolazione dei dati, si è studiato l'andamento delle velocità in queste sezioni.

Questo è stato fatto confrontando i valori di velocità ottenuti attraverso la prova sonica eseguita in sito con una griglia 10x10cm con i valori ottenuti attraverso l'interpolazione dei dati.

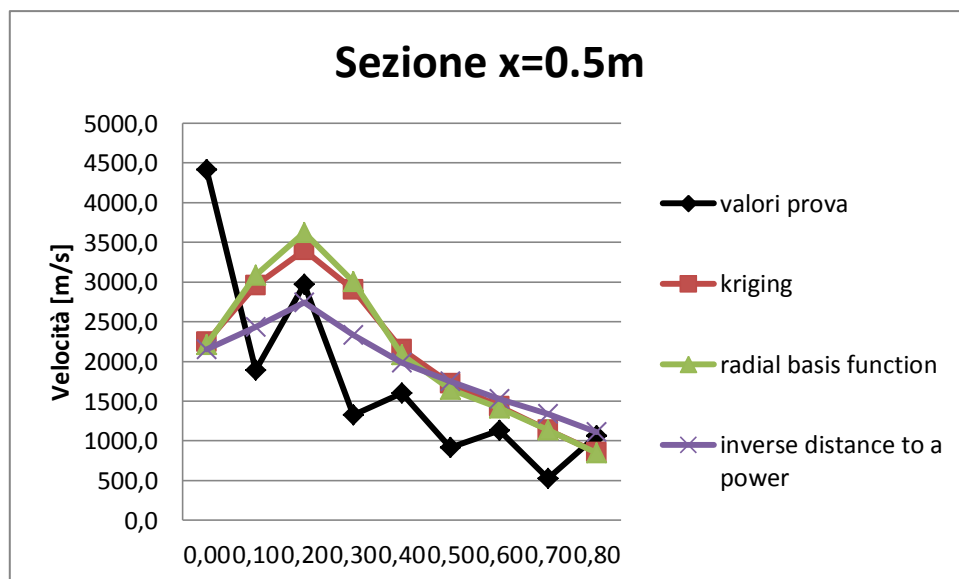
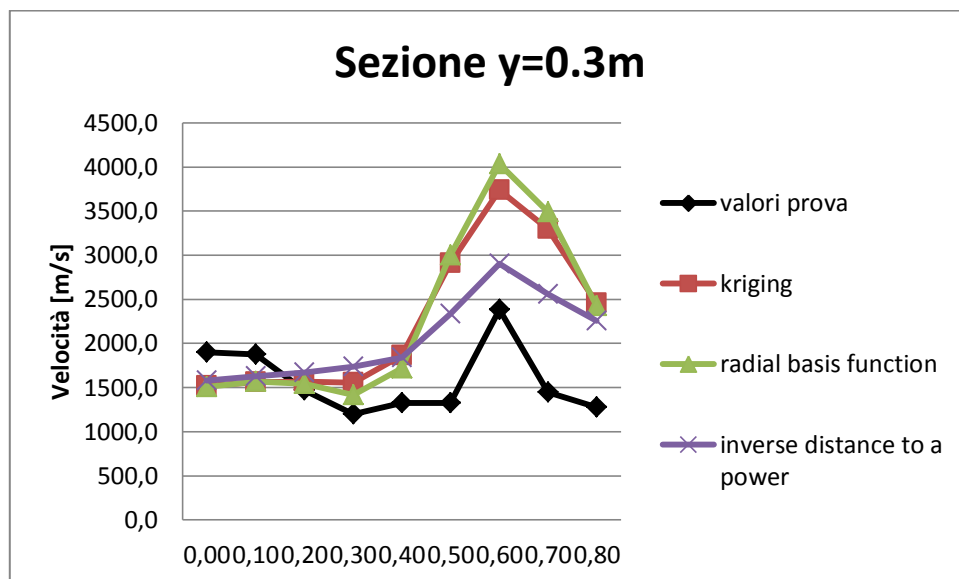
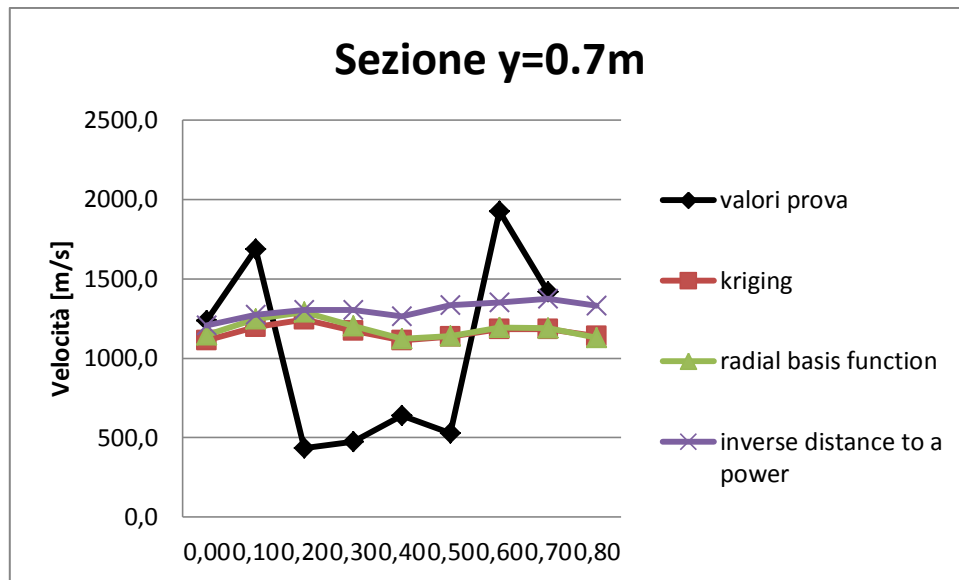


Figura 4.1. 19 – grafici andamento velocità nelle sezioni critiche

Dai grafici possiamo osservare che, in tutti e tre i casi, i valori ottenuti con l'interpolazione dei dati sono tra loro più simili rispetto a quanto lo sono con quelli ottenuti con la prova 10x10. Vediamo infatti che i valori ottenuti con i metodi Kriging e Radial basis function hanno lo stesso andamento e valori quasi uguali, e l'altro metodo, Inverse distance to a power, differisce leggermente.

Sulla base dello studio dell'andamento in queste sezioni, e delle mappe grafiche rappresentanti la percentuale di errore in ogni punto, possiamo concludere che i vari metodi di interpolazione, sebbene basati su teorie differenti, presentano le stesse zone critiche nelle quali i valori ottenuti sono discordanti con lo stesso andamento da quelli misurati direttamente con l'indagine sonora.

4.2. Analisi delle indagini soniche per la qualificazione di murature

Di seguito vengono riportati i dati raccolti nella campagna sperimentale svolta in sito al Museo Archeologico di Verona per quanto riguarda la qualificazione di murature mediante indagini soniche, in particolare soniche in trasparenza. Nella tabella seguente sono stati raccolti i dati più significativi come spessore del pannello murario, l'intervallo di velocità, la velocità media, la deviazione standard media, il coefficiente di variazione e l'anno di costruzione.

TIPOLOGIA MURARIA II - Museo Archeologico VR										
Tip. muraria	Sp. [m]	Intervallo di velocità [m/s]	Vel. media [m/s]	Dev. St. [m/s]	CoV [%]	Sito	Riferimento	Edificio	Località	Anno
II	0,30	216,5 ÷ 4034,3	1009	718	71%	S1	(Mazzilli, Milan, 2014)	Museo Archeologico	Verona	XV sec.
II	0,36	537,6 ÷ 2617,9	1200	559	47%	S2	(Mazzilli, Milan, 2014)	Museo Archeologico	Verona	XV sec.
II	0,38	336,5 ÷ 2168,4	723	360	50%	S3	(Mazzilli, Milan, 2014)	Museo Archeologico	Verona	XV sec.
II	0,62	403,8 ÷ 1376,9	729	278	38%	S4	(Mazzilli, Milan, 2014)	Museo Archeologico	Verona	XV sec.
Velocità media = 915.25 m/s; Dev. Standard media = 478,75 m/s; CoV medio= 51,4%										

Tabella 4.2. 1 - risultati indagini soniche Museo Archeologico

Si osserva come le velocità risultanti siano in tutti i campi medio basse o basse. In particolare, nei pannelli 3 e 4 la velocità media è inferiore ai 1000 m/s, indice quindi di una muratura in cattivo stato e con forte presenza di vuoti.

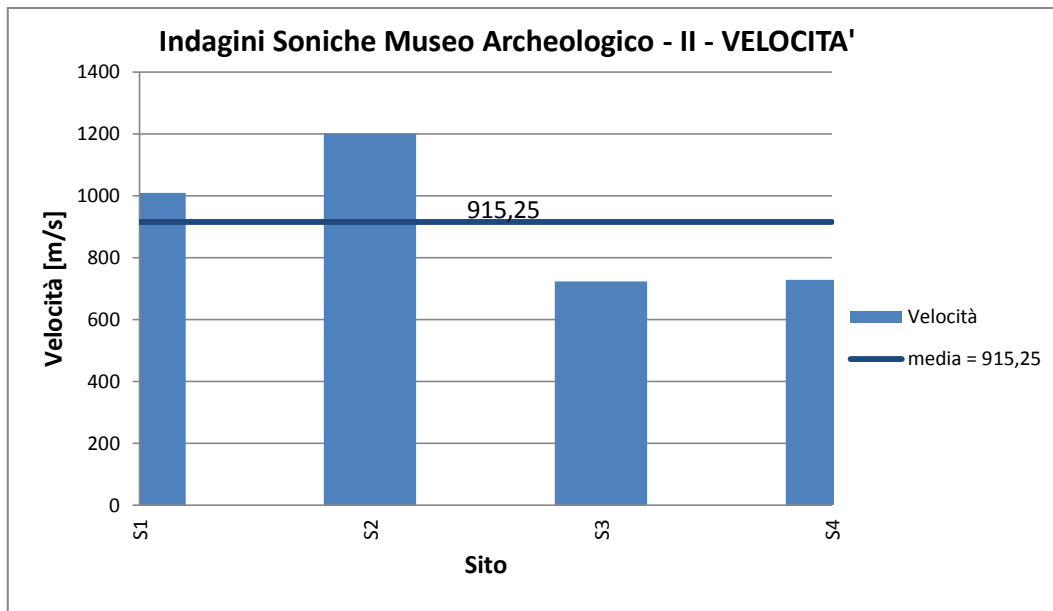


Figura 4.2. 1 - istogramma velocità soniche Museo Archeologico

Per quanto riguarda i valori della deviazione standard, è netta la differenza tra il pannello 1 e i restanti. Esso infatti presenta un valore molto elevato, con velocità molto discordanti, e questo si può in parte spiegare con la presenza di alcuni mattoni, inseriti con interventi di scuci-cuci.

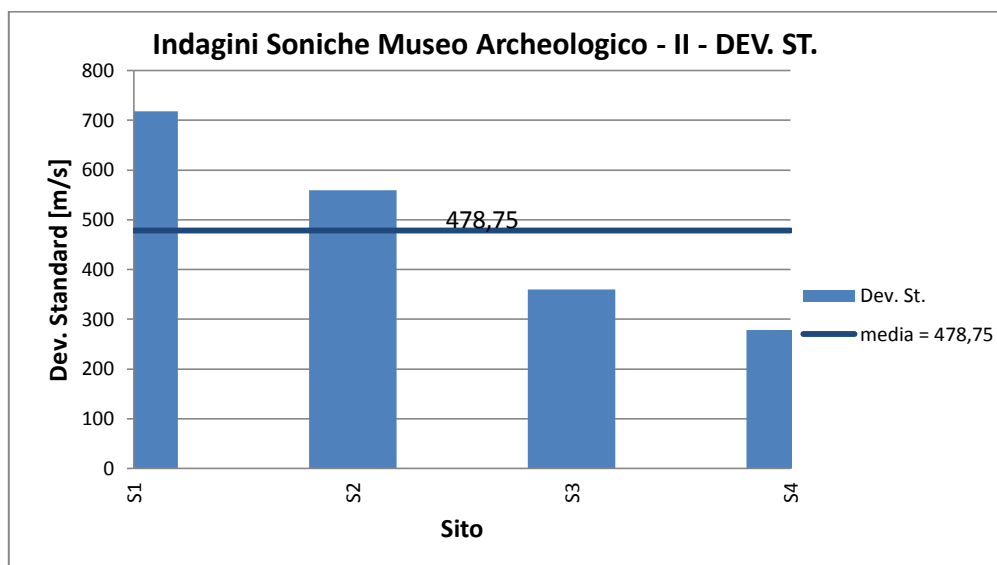


Figura 4.2. 2 - istogramma dev. standard Museo Archeologico

Le stesse considerazioni sono valide per quanto riguarda l'omogeneità dei pannelli, espressa dal coefficiente di variazione, che infatti nel pannello 1 è molto elevato e pari al 71 %, indice di un pannello fortemente eterogeneo. Lo dimostra anche la forte differenza tra il valore minimo e massimo di velocità, rispettivamente 216.5 m/s e 4034.3 m/s.

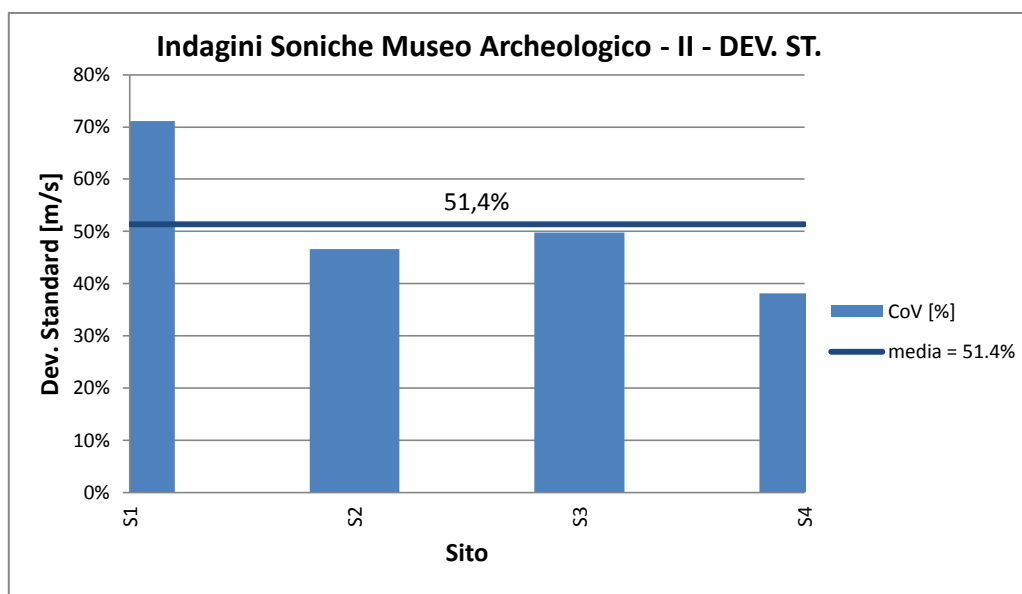


Figura 4.2. 3 - istogramma CoV Museo Archeologico

In generale si può comunque considerare come tutti e quattro i pannelli considerati siano in condizioni critiche, con velocità soniche basse e livelli di eterogeneità elevati. Si può ipotizzare una consistente presenza di vuoti all'interno dei paramenti murari analizzati.

4.3. Analisi delle indagini soniche per la valutazione dell'efficacia di iniezioni consolidanti

Le prove soniche dirette eseguite nella fase successiva all'intervento di consolidamento mediante iniezioni sono state uno strumento molto utile per valutare l'efficacia di questa tipologia di intervento. Anche se non sono possibili confronti puntuali precisi a causa dell'incertezza circa i percorsi seguiti dalla miscela all'interno dei pannelli murari, è possibile comunque effettuare considerazioni sui pannelli nel loro complesso riguardo al grado di consolidamento e di omogeneizzazione raggiunti.

Tip. muraria	Sp. [m]	Vel media pre [m/s]	Vel media post [m/s]	Incremento [%]	Litri/m ³ iniettati f (s)	Sito	Dev.st Pre [m/s]	Dev. st Post [m/s]	Cov Pre [%]	Cov Post [%]	Cov Post/Co V Pre [%]
II	0,30	1009	1775	176%	96	S1	718	625	71%	35%	49%
II	0,36	1200	2072	173%	44	S2	559	729	47%	35%	76%
II	0,38	723	1707	236%	74	S3	360	922	50%	54%	108%
II	0,62	729	1243	171%	40	S4	278	369	38%	30%	78%

Tabella 4.3. 1 - dati soniche pre e post Museo Archeologico

I risultati ottenuti mostrano incrementi di velocità sonica variabili tra circa 1,7 volte e 2,3 volte la velocità iniziale. Nei primi tre campi prova si sono raggiunte velocità medie sempre superiori ai 1700 m/s, indici di muratura di media consistenza. Solo il campo 4 presenta anche nella fase post iniezione una velocità sonica tipica di murature di medio-bassa consistenza, ed effettivamente questo è anche il pannello in cui si sono iniettati meno

litri/m³ di miscela. Questo si spiega con imprecisioni nell'esecuzione delle iniezioni, e in particolare si è riscontrato un non corretto posizionamento delle cannule di iniezione, che non sempre erano disposte alla giusta profondità (tra i 2/3 e 3/4 dello spessore murario) e non seguivano la prescritta maglia triangolare. Inoltre un fattore che potrebbe aver influenzato la buona riuscita dell'intervento è l'elevato spessore della muratura rispetto agli altri tre casi. Se si abbina infatti una non corretta disposizione delle cannule, risulta evidente come sia difficile consolidare correttamente un pannello così spesso. Si può inoltre escludere che il cattivo risultato dipenda dalla miscela, la quale infatti è la stessa utilizzata nel pannello 1, il quale ha fatto riscontrare ottimi risultati. Va comunque sottolineato il fatto che anche se il risultato non rispetta completamente le attese, si ottiene comunque un discreto miglioramento del pannello, con un incremento della velocità sonica di 1,7 volte passando da una muratura di scarsa consistenza ad una muratura di discreta consistenza.

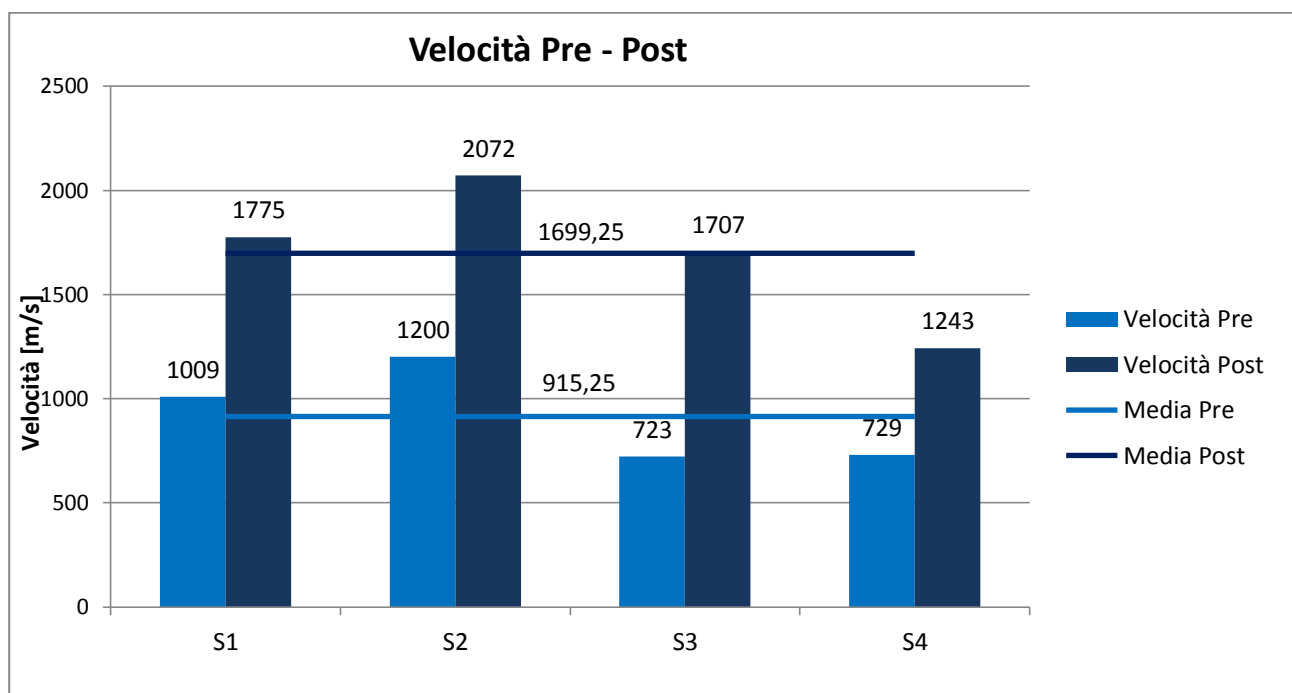


Figura 4.3. 1 - istogramma velocità pre post Museo Archeologico

Il grafico sovrastante esprime ancora meglio come comunque vi sia in ogni pannello un discreto miglioramento dalla condizione iniziale, e in generale si passa da un velocità media dei pannelli di 915 m/s ad una velocità media di circa 1700 m/s, valore tipico di murature di medio-buona consistenza.

Per quanto riguarda i valori di deviazione standard il dato è contrastante, poiché ad eccezione del pannello 1, negli altri il valore aumenta. Va comunque tenuto conto del fatto che le differenze di valori sono maggiori perché in generale tutte le velocità sono superiori alla situazione non consolidata, quindi anche le eventuali differenze sono di entità maggiore.

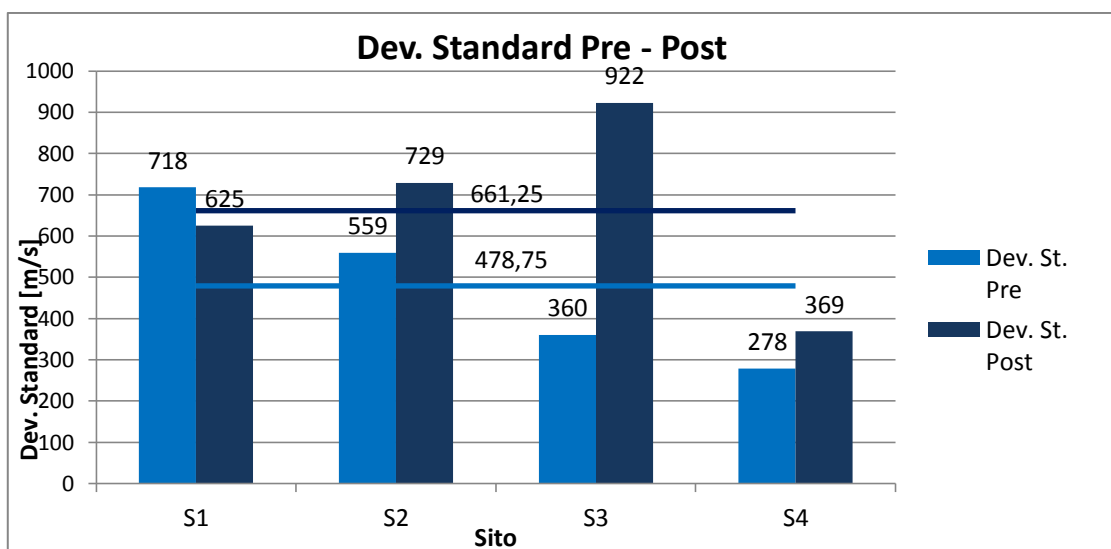


Figura 4.3. 2 - istogramma dev. standard pre post Museo Archeologico

Un altro fattore di primaria importanza è la valutazione dell'omogeneizzazione raggiunta nei pannelli. Si ricorda infatti come uno degli obiettivi, oltre al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura, sia di rendere la stessa omogenea per garantirne un comportamento monolitico eliminando eventuali punti deboli e scollegamenti. Il parametro che permette di valutare il grado di omogeneità dei pannelli è il coefficiente di variazione.

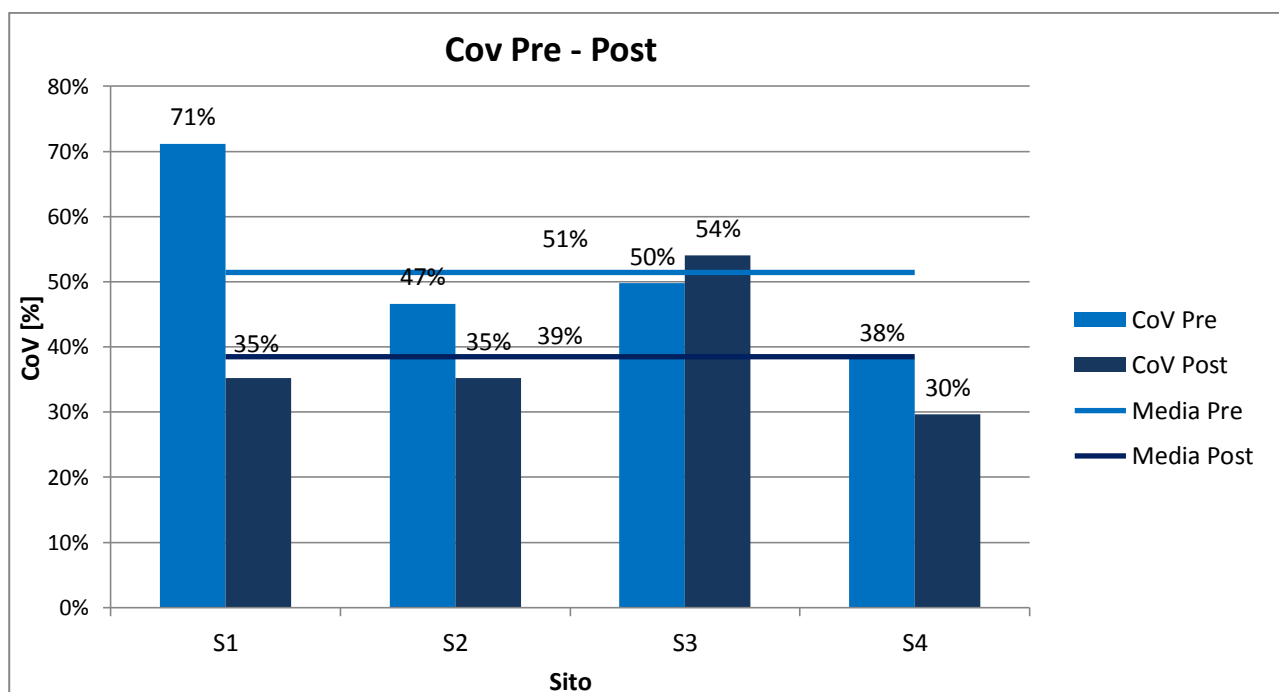


Figura 4.3. 3 - istogramma CoV pre post Museo Archeologico

Si osserva come ad eccezione del pannello 3, in tutti gli altri il CoV raggiunto è minore di quello iniziale e indice quindi di pannelli più omogenei. Per quanto riguarda il campo 3, come già spiegato nei capitoli precedenti, si ricordano le difficoltà riscontrate durante l'iniezione a causa dell'eccessiva densità della miscela. Il pannello risulta quindi più

eterogeneo perché in alcuni fori di iniezione si è riuscito ad iniettare molto ottenendo quindi ingenti incrementi di velocità, mentre in altri poco o niente, andando così ad aumentare le differenze di velocità tra i punti. Nonostante questo problema, si osserva comunque che il pannello 3 è quello che ha mostrato l'incremento maggiore di velocità, quindi anche se non si è raggiunto il livello di omogeneità sperato, si è comunque ottenuto un incremento consistente di consistenza della muratura.

Un dato fondamentale è quello relativo ai litri/m³ iniettati. Si può infatti notare come i pannelli in cui si sono iniettate la maggiori quantità di miscela siano il pannello 1, in cui si è registrato il maggior incremento di omogeneità abbinato ad un buon incremento di velocità, e il pannello 3, che è quello con il maggior incremento complessivo di velocità.

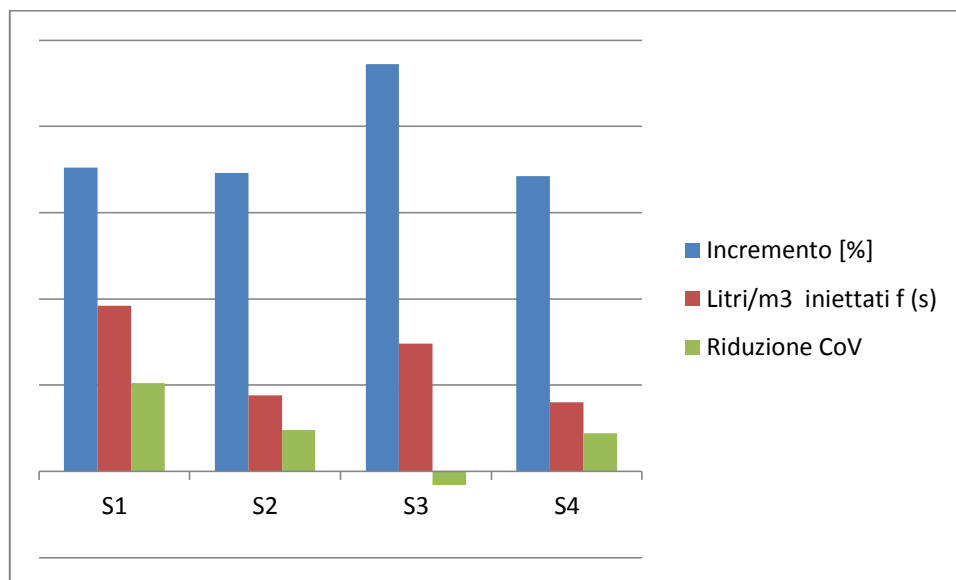


Figura 4.3. 4 - grafico litri iniettati/risultati

Si può quindi concludere che i fattori principali in questo tipo di intervento siano garantire la sua corretta esecuzione e la scelta di una miscela di buone caratteristiche meccaniche ma soprattutto anche abbastanza fluida per poter garantire un corretto e completo riempimento dei vuoti presenti nello spessore murario.

4.4. Risultati

Nel capitolo 2 di questa tesi sono state analizzate precedenti sperimentazioni riguardanti la qualificazione di murature mediante indagini soniche per avere dei valori di riferimento da utilizzare in campagne sperimentali in sito. Le prove eseguite al Museo Archeologico di Verona sono state eseguite anche in questa ottica e in questo capitolo verranno rapportati i risultati ottenuti in sito con quelli attesi in base ai risultati delle precedenti sperimentazioni. Per quanto riguarda le murature in pietra erano stati ottenuti dei valori medi, suddivisi tra murature storiche e murature di nuova costruzione.

	NUM. PROVE	VEL. MEDIA [m/s]	DEV. ST MEDIA [m/s]	COV MEDIO
MURATURE IN PIETRA NUOVE	27	1156	516	45%
MURATURE IN PIETRA STORICHE	47	923	355	33%

Tabella 4.4. 1 - risultati murature in pietra nuove e storiche

Inoltre si era osservato come la maggior parte dei casi studio riportasse velocità soniche medie comprese tra i 500 m/s e i 1500 m/s. Questi dati sono stati confermati dalla campagna in sito, che ha dato come risultati una velocità media di 915 m/s, perfettamente in linea con la media delle murature storiche in pietra analizzate, pari a 923 m/s, e con singoli valori variabili tra i 700 m/s e i 1200 m/s, quindi a cavallo degli intervalli più probabili riscontrati in letteratura. Suddividendo le murature in pietra in base alla tipologia erano stati ottenuti i seguenti valori di riferimento di velocità sonica, con relativo campo di variazione:

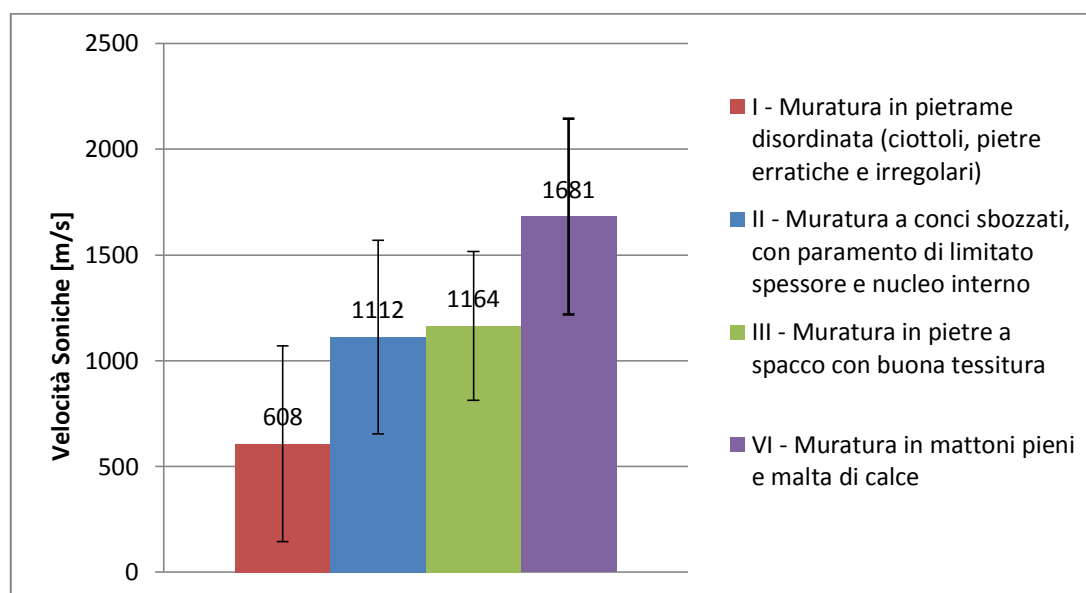


Figura 4.4. 1 - valori di velocità soniche di riferimento per tipologia

Ricordando che la maggior parte delle prove raccolte per la tipologia di muratura a conci sbozzati, la stessa presente al Museo Archeologico di Verona, erano riferite a murature di nuova costruzione e quindi verosimilmente con valori più elevati, si osserva che la velocità media ottenuta con le indagini soniche eseguite in sito in questo lavoro di tesi, pari a 915 m/s, va a ricadere nella tipologia corretta, a conferma della bontà dei risultati. Si può quindi affermare che nel caso di murature non indagabili con scarifiche o endoscopie, e la cui struttura non sia conosciuta né identificabile visivamente, i suddetti valori possano essere utilizzati come riferimento per ipotizzare la tipologia muraria attraverso la sola esecuzione di indagini soniche, e quindi con la minor invasività possibile. Nel capitolo 3 di questa tesi sono stati raccolti dati relativi a precedenti sperimentazioni riguardanti la valutazione dell'efficacia degli interventi di iniezione mediante indagini soniche. I dati raccolti hanno fornito delle indicazioni sui risultati ottenibili in sito. Di seguito sono raccolti i dati relativi ai valori medi derivati dall'analisi delle precedenti sperimentazioni e messi a confronto con i dati raccolti in sito al Museo Archeologico.

MEDIE	Vel. Pre [m/s]	Vel. Post [m/s]	Incremento Vel [%]	Dev. St. Pre [m/s]	Dev. St. Post [m/s]	Incremento Dev. St. [%]	CoV Pre [%]	CoV Post [%]	Incremento CoV [%]
PROVE PREGRESSE - Tipologia II	1187	3431	289	545	548	0,6	47	16	-66,0
CASO STUDIO - Museo Arch. VR	915	1699	186	479	661	38,0	51	39	-23,5

Tabella 4.4. 2 - confronto prove pregresse e caso studio

Si osserva come nelle precedenti sperimentazioni raccolte per la stessa tipologia di muratura a conci sbazzati l'incremento medio di velocità fosse maggiore, ma come già detto questo dato è frutto di sperimentazioni su murature a sacco di nuova costruzione pensate appositamente per questo tipo di intervento.

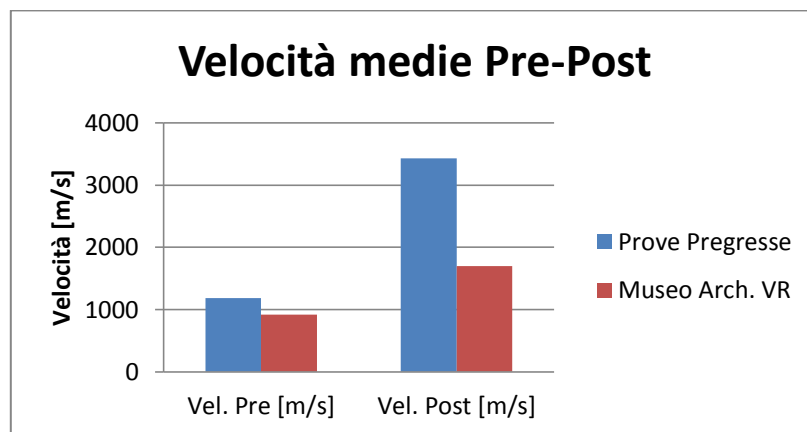


Figura 4.4. 2 - istogramma vel pre e post

Per lo stesso motivo si può spiegare il maggior livello di omogeneità raggiunto nei casi precedenti, mentre per quanto riguarda la deviazione standard i valori aumentano per motivi già precedentemente spiegati.

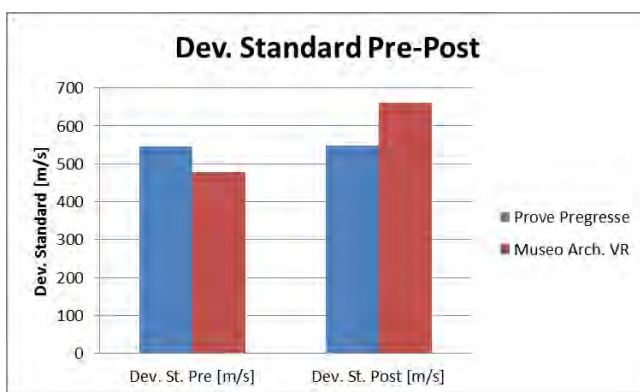


Figura 4.4. 3 - istogramma dev. Standard pre e post

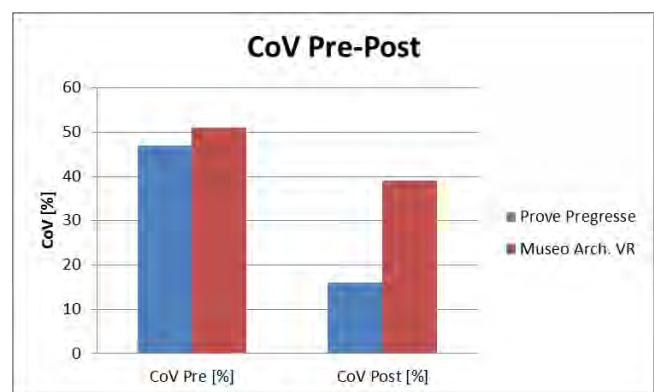


Figura 4.4. 4 - istogramma CoV pre e post

5. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

La valutazione della sicurezza sismica degli edifici storici risulta complessa data 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.

5.1. 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:

- **LV1 (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.

- LV₂ (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 LV₁.
- LV₃ (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 LV₂ però applicati su tutti gli elementi della costruzione.

La valutazione complessiva della risposta sismica dell'edificio può quindi essere eseguita con un'esaustiva applicazione a tutti gli elementi della costruzione dei metodi utilizzati al livello LV₂, 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' LV₂) 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.

5.2. Individuazione dell' Unita' 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.

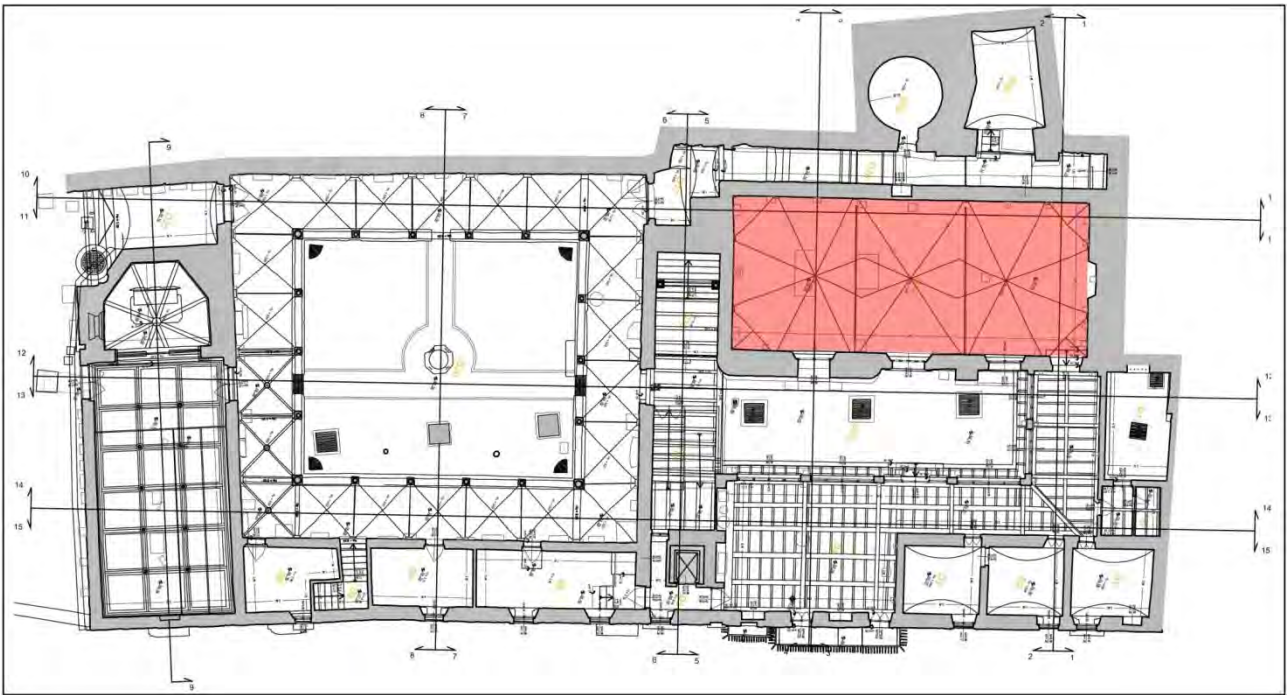


Figura 5.2. 1 - pianta livello IV - localizzazione U.S.

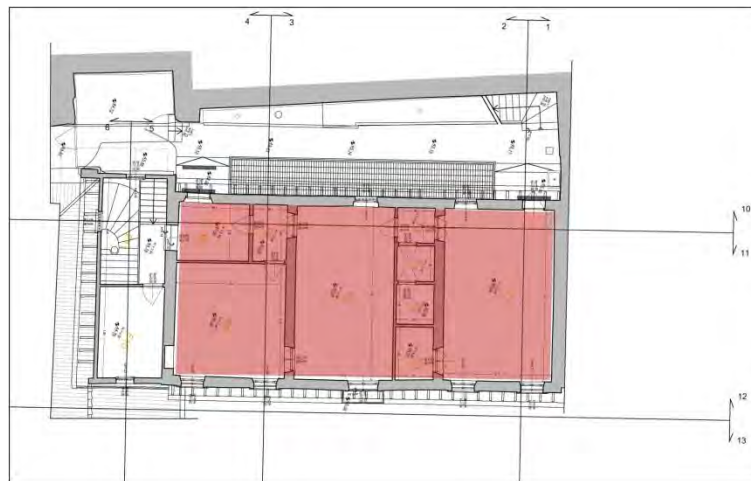


Figura 5.2. 2 - pianta livello IV - localizzazione U.S.

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.

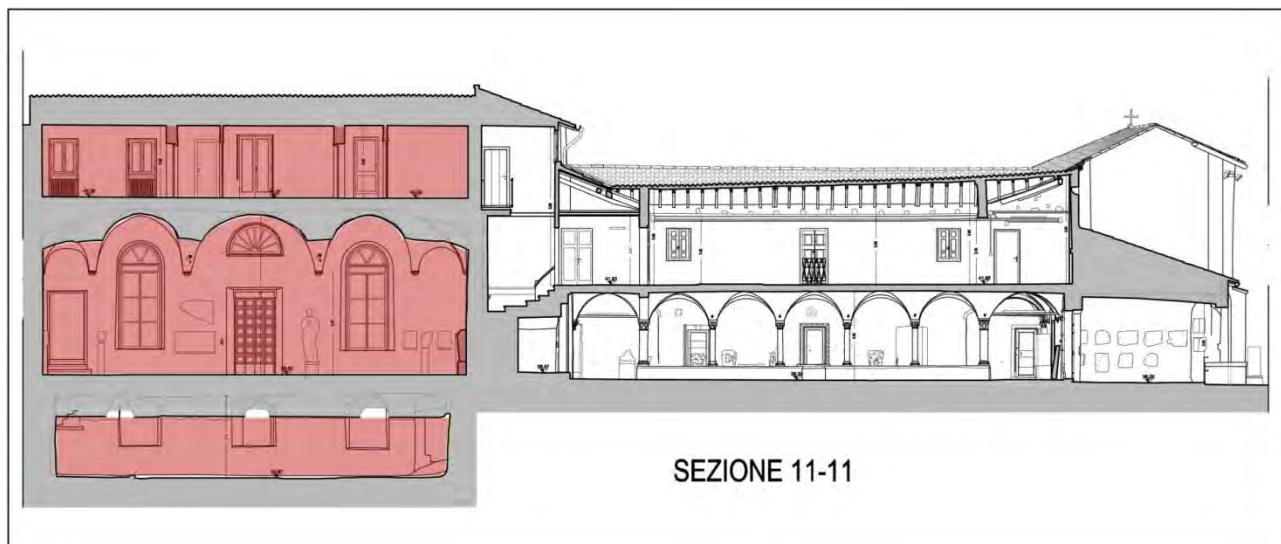


Figura 5.2. 3 - sezione 11-11, individuazione U.S.

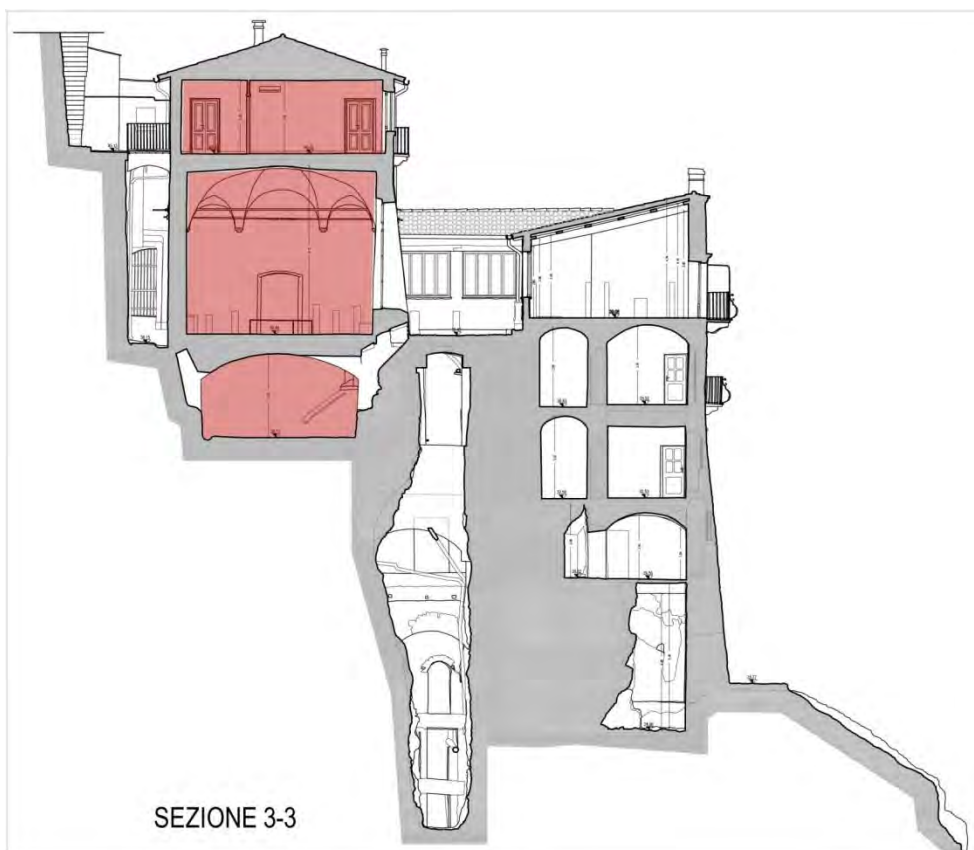


Figura 5.2. 4 - sezione 3-3, individuazione U.S.

5.3. 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

Tabella 5.3.1 - 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 ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	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

Tabella 5.3. 2 - Tabella C8A.2.1

I valori forniti dalla tabella sono:

- f_m è la resistenza media a compressione della muratura,
- τ_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 ²]	τ_o [N/cm ²]	E [N/cm ²]	G [N/cm ²]	W [KN/m ³]	F_c
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	2.50	4.3	1230	410	20	1.20

Tabella 5.3. 3 – Estratto tabella C8A.2.1

5.3.1. 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:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} * Q_{k1} + \psi_{22} * Q_{k2} \dots \quad (\text{NTC } 2008 - 2.5.5)$$

5.3.2. Carichi permanenti strutturali-non strutturali

Muratura

Il peso proprio della muratura, come già anticipato, è pari al valore fornito dalla normativa di 20 KN/m³

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.

	γ	Peso totale
Travi (5)	4.5 KN/m ³	23.2 KN
Travetti(66)	4.5 KN/m ³	18 KN
Tavelloni	0.35 KN/m ²	54.6 KN
Malta	0.38 KN/m ²	59.31 KN
Guaina	0.1 KN/m ²	15.6 KN
Coppi	0.6 KN/m ²	187.31 KN
Totale copertura		411.1 KN
Area copertura		156.1 m ²
$G_{\text{copertura}}$		2.63 KN/m ²

Tabella 5.3. 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 ²	52 KN
Malta	0.38 KN/m ²	56.43 KN
Totale sottotetto		262.85 KN
Area sottotetto		148.5 m ²
$G_{\text{sottotetto}}$		1.77 KN/m ²

Tabella 5.3. 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.

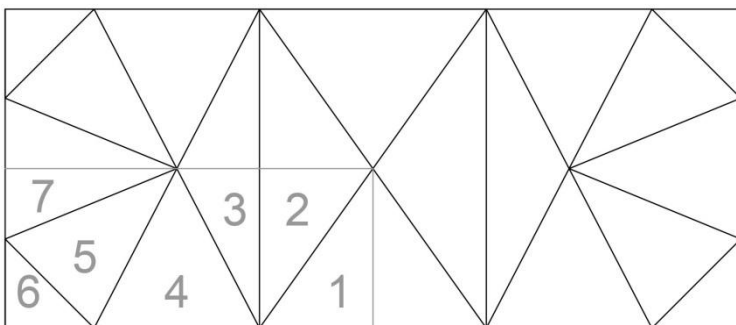


Figura 5.3. 1 - schema volta

V1	0.88 m ³
V2	1.09 m ³
V3	1.3 m ³
V4	0.92 m ³
V5	1.24 m ³
V6	1.68 m ³
V7	0.34 m ³
Vultimo strato	3.34 m ³

Tabella 5.3. 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 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.

	γ	Peso totale
Massetto (6cm)	18.5 KN/m^3	164.835 KN
Piastrelle di Cotto	0.40 KN/m^2	59.4 KN
Totale pavimento		224.2 KN
Area pavimento		148.5 m^2
$G_{\text{pavimento}}$		1.51 KN/m^2

Tabella 5.3. 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 KN/m e 3 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 KN/m^3 .

5.3.3. Carichi variabili

Le azioni variabili vengono combinate attraverso i coefficienti di combinazione ψ_{0j} , ψ_{1j} , ψ_{2j} espressi nella tabella 2.5.I dell' NTC2008:

Categoria / Azione Variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{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 Ψ_{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:

$$q_s = \mu_i * q_{sk} * C_E * C_t \quad (\text{NTC}_{2008} - 3.3.7)$$

dove:

q_s è il carico della neve sulla copertura,

μ_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 capitolo 3.4.4 delle NTC.

Nel caso studio in esame μ_i è pari a 0,8 in quanto l'inclinazione della copertura è minore di 30°, q_{sk} è pari a 1 KN/m² 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:

ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1.25 Kg/m³,

V_b è la velocità di riferimento del vento data dall'espressione:

$$V_b = V_{b,o} , \quad \text{per } a_s \leq a_o$$

$$V_b = V_{b,o} + k_a * (a_s - a_o) , \quad \text{per } a_o < a_s \leq 1500m$$

$V_{b,o}$, 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 ²]	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	3,00	2,00	1,00
	Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi	4,00	4,00	2,00
	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	5,00	5,00	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 — —	1,00 — —
	secondo categoria di appartenenza			

* 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

Tabella 5.3. 8 - Tabella 3.1.II: 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.

5.3.4. 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 ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Tabella 5.3. 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.

Figura 5.3. 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_{Vs} al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		P_{Vs} - Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 5.3. 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_o, 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

Tabella 5.3. 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:

$$\begin{array}{ll}
 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Tabella 5.3. 12 - 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 ξ 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:

$$S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 = 5.03$$

5.4. 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 ammortamento 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

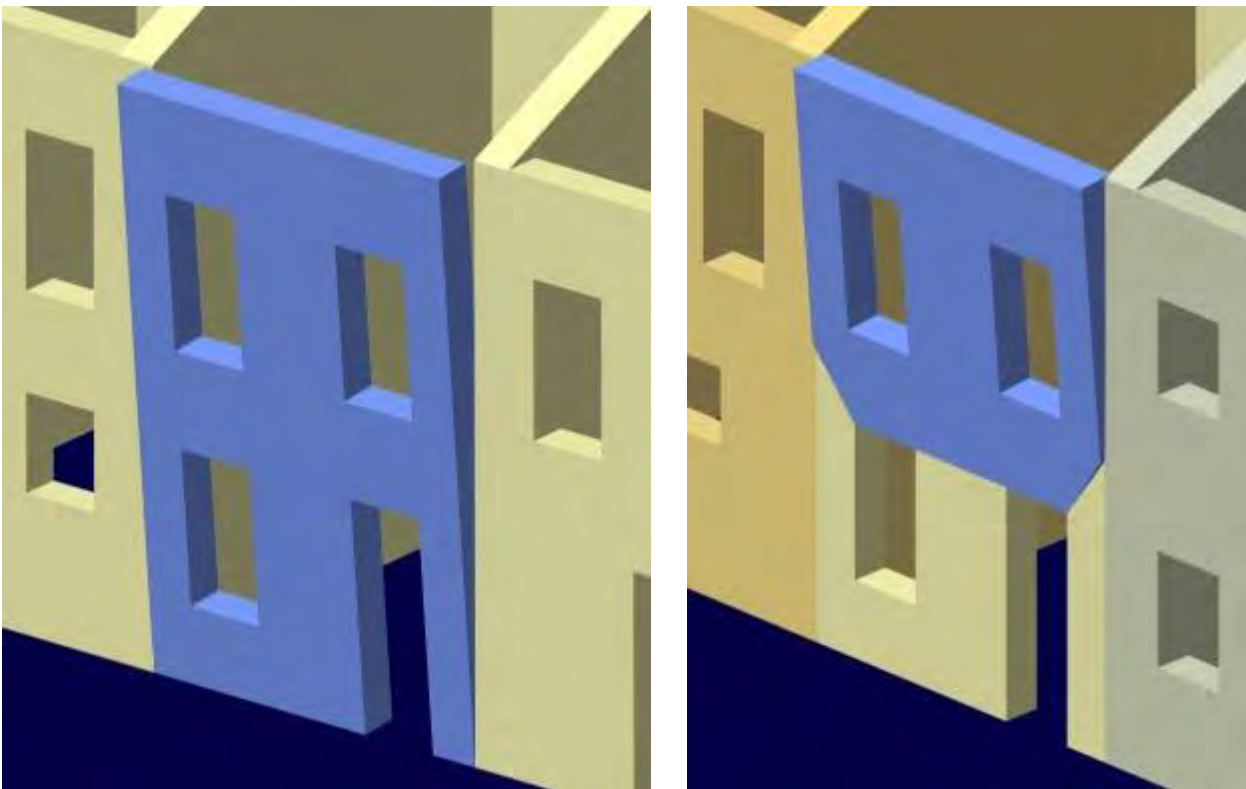


Figura 5.4. 1 - schema ribaltamento semplice di parete

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 ammassamento 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> $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{S_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i - \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} - P_H \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i}$	
--	--

Figura 5.4. 2 - schema ribaltamento semplice di parete

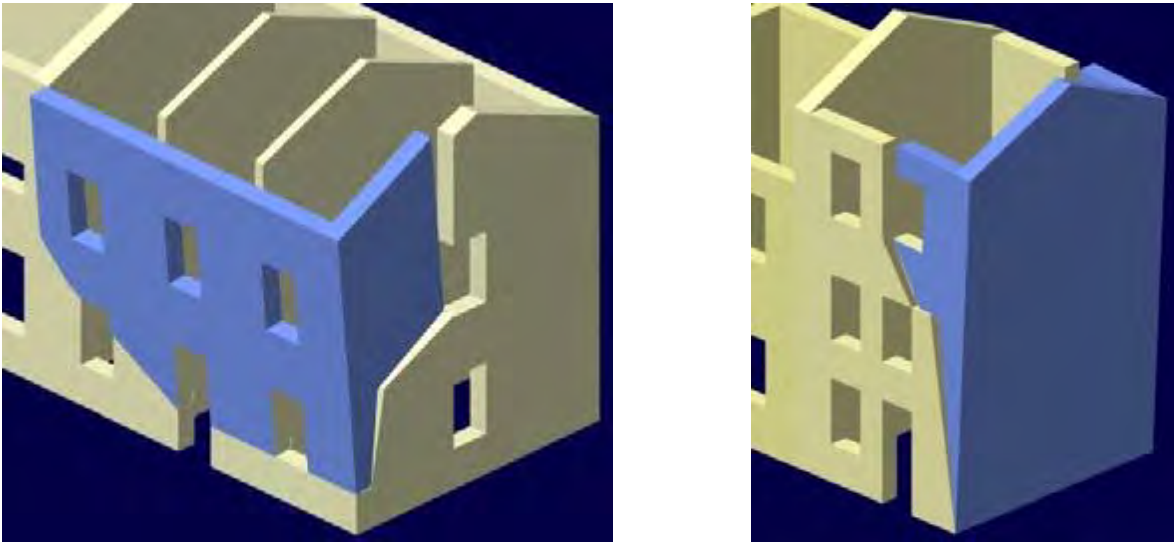
Meccanismo II – Ribaltamento composto di parete

Figura 5.4. 3 - schema ribaltamento composto di parete

Questo meccanismo si basa sulle stesse ipotesi del precedente, solo che a differenza di esso è riferito a casi in cui l'ammorsamento con le pareti ortogonali sia di buona qualità. Quindi la situazione che si verifica è ancora una rotazione rigida di una facciata o di una porzione di essa attorno ad un asse orizzontale, ma accompagnato dal trascinamento di una porzione della muratura ortogonale ammorsata. Esso si può verificare per l'intera altezza della parete o per una porzione, e può verificarsi in diverse modalità anche in relazione alle disposizione delle aperture.

Perché si verifichi questo meccanismo, oltre alle criticità già citate, all'assenza di collegamenti in sommità e alla distribuzione delle aperture, deve essere presente una muratura con ridotte caratteristiche meccaniche

Il valore del moltiplicatore di carico critico viene anche in questo caso ottenuto con l'equilibrio tra momento stabilizzante e momento ribaltante, come nel seguente schema di calcolo.

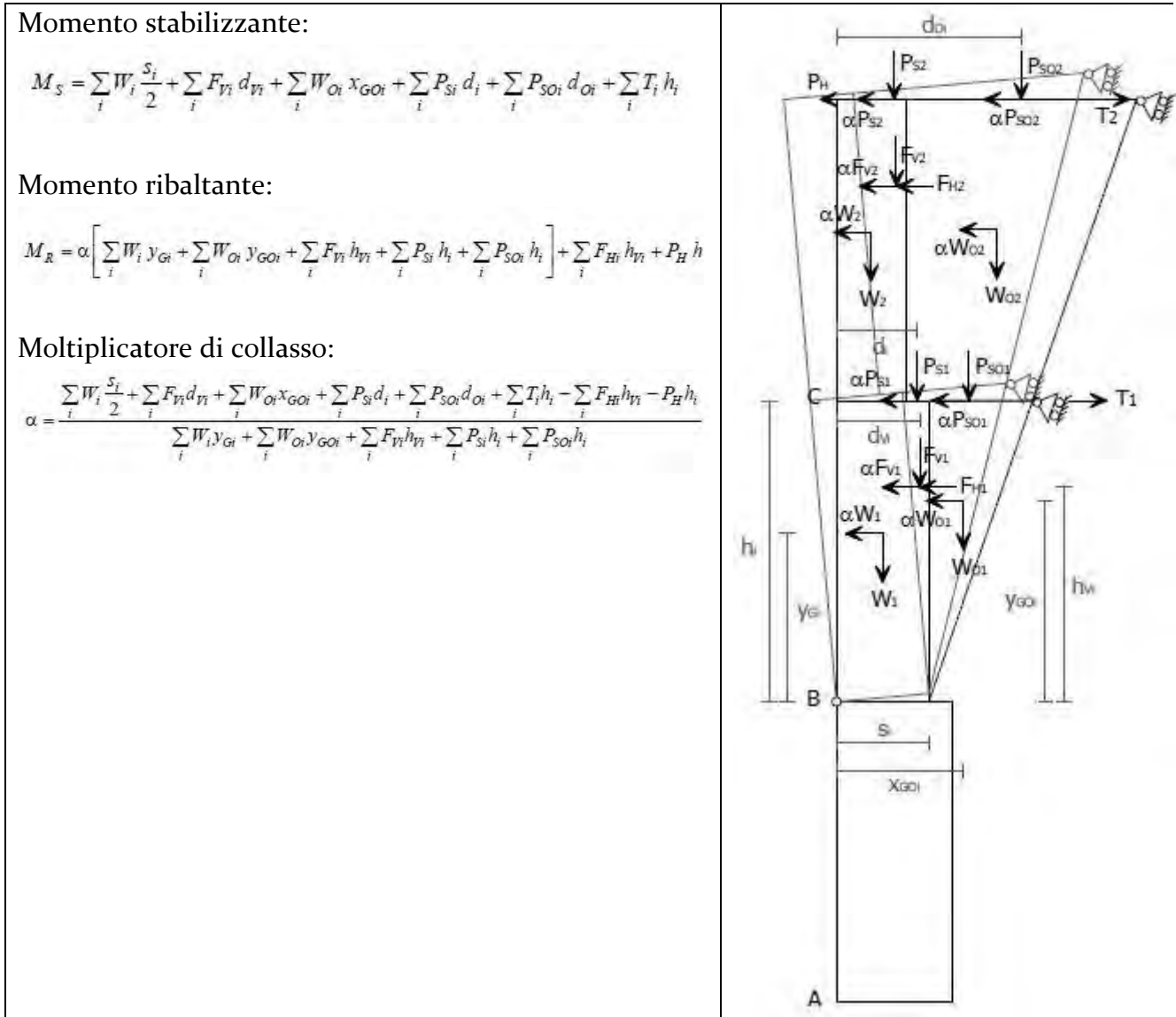


Figura 5.4. 4 - schema ribaltamento composto di parete

Meccanismo III – 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.

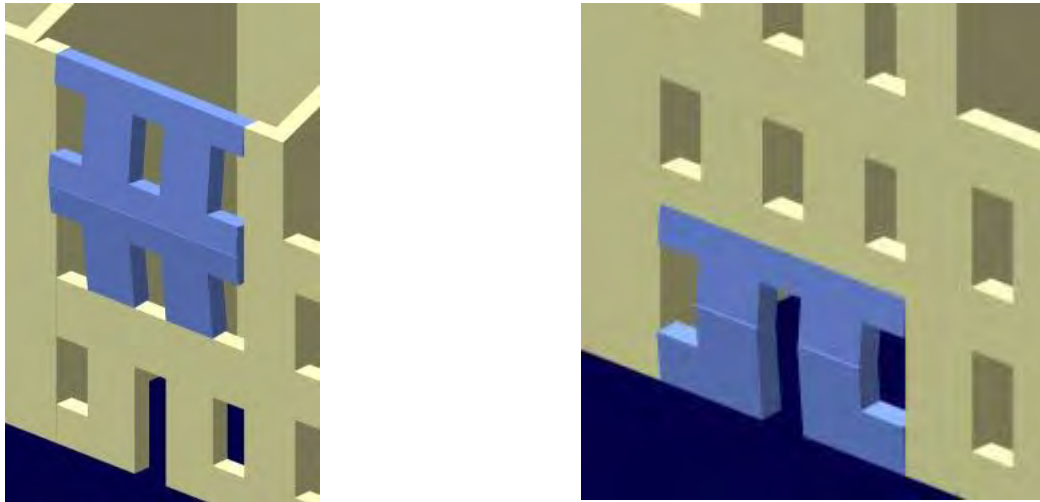


Figura 5.4. 5 - schema flessione semplice di parete

Principio dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot [W_1 \delta_{1x} + W_2 \delta_{2x} + F_{V1} \delta_{V1x} + F_{V2} \delta_{V2x} + P_{S1} \delta_{P1x}] + F_{H1} \delta_{V1x} + F_{H2} \delta_{V2x} =$$

$$= W_1 \delta_{1y} + W_2 \delta_{2y} + F_{V1} \delta_{V1y} + F_{V2} \delta_{V2y} + N \delta_{Ny} + P_{S1} \delta_{P1y} + P_{S2} \delta_{P2y} + T \delta_{P1x}$$

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:

$$E = \frac{W_1}{2} s_1 + F_{V1} d_{V1} + (W_2 + P_{S2} + N + F_{V2}) s_2 +$$

$$+ \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{W_2}{2} s_2 + P_{S2} a_2 + N d + F_{V2} d_{V2} - F_{H2} h_{V2} \right) + P_{S1} a_1 - F_{H1} h_{V1} + T h_P$$

Figura 5.4. 6 - schema flessione semplice di parete

5.4.1. 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.



Figura 5.4. 7 - 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.



Figura 5.4. 8 - foto volta refettorio

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.

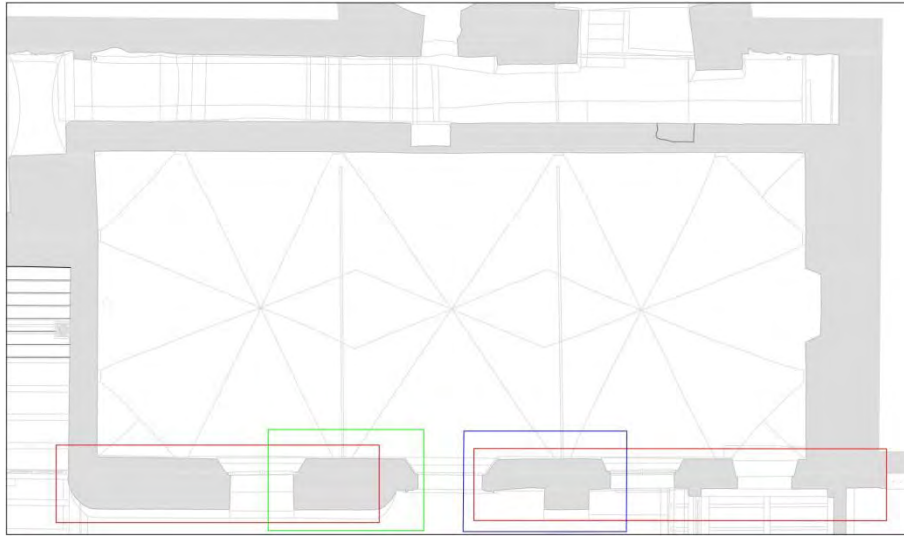


Figura 5.4. 9 - macroelementi livello IV

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.

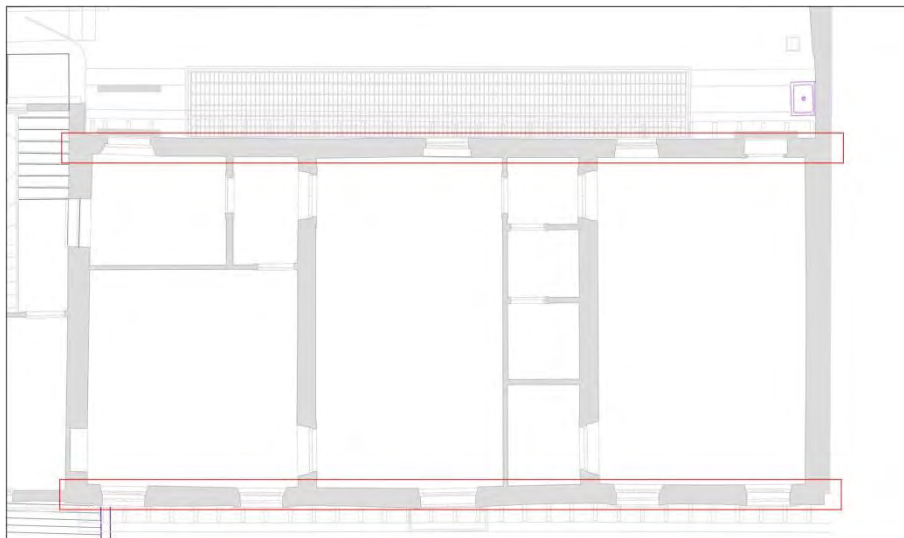


Figura 5.4. 10 - macroelementi livello VI

Non sono stati considerati cinatismi riguardanti la facciata nord ad eccezione dell'ultimo livello perché sono presenti volte di contrasto nell'intercapedine tra parete e pendio.

5.4.2. 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.

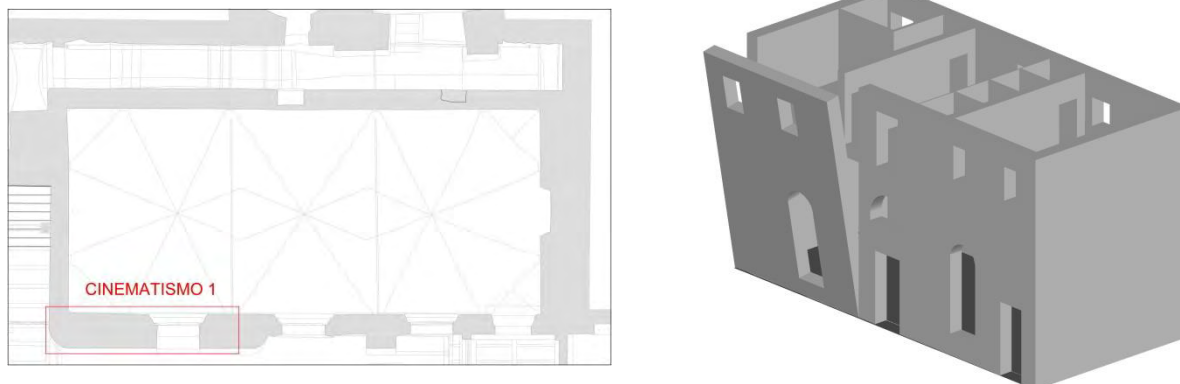


Figura 5.4. 11 – localizzazione e schema cinematismo 1

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 ²	VOLTA	
$A_2=$	1,064 m ²	$A_{volta}=$	20,5 m ²
$B_{1_x}=$	0,45 m	$V_{volta}=$	8,2125 m ³
$B_{1_y}=$	2,88 m	$\gamma_{volta}=$	18 KN/m ³
$A_{cop}=$	156,09 m ²	$N_{volta}=$	147,825 KN
$A_{sott}=$	148,5 m ²	COPERTURA LAT	
$d_1=$	1,2 m	$A_{cop.lat}=$	8,47 m ²
$d_{1_1}=$	0,61 m	$A_{sott}=$	31,5 m ²
$d_2=$	0,4 m	$N_c=$	75,18513 KN
$dN_{1_x}=$	0,26 m	COPERURA PORTATA	
$dN_{1_y}=$	3,9 m	$A_{cp}=$	22,6 m ²
$dN_{c_x}=$	0,13 m	$N_{cp}=$	51,84144 KN
$dN_{c_y}=$	9,26 m	TRAMEZZI PORTANTI	
		$N_{tp}=$	63,9 KN
		TRAMEZZI NON PORTANTI	
		$A_{volta}=$	20,5 m ²
		$N_{tnp}=$	24,6 KN
		PAVIMENTO	
		$A_{volta}=$	20,5 m ²
		$N_{pav}=$	30,955 KN

CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
Avolta=	20,5 m ²
Nes=	18,45 KN
N1=	337,5714 KN

Tabella 5.4. 1 - valori geometrici e carichi cinematico 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 α , 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 α 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 cinematico risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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		

Tabella 5.4. 2 - verifica SLV lineare cinematismo 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.

5.4.3. Cinematismo 2 – flessione semplice (fessura)

Di seguito viene effettuata l'analisi del cinematismo 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.

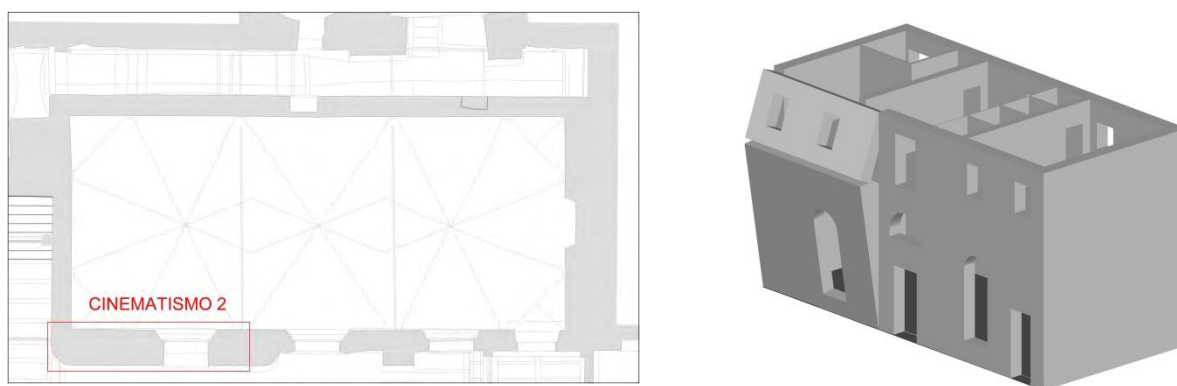


Figura 5.4. 12 - localizzazione e schema cinematismo 2

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 ²
l=	7 m	P2= 148,96 KN	Vvolta= 8,2125 m ³
A1=	5,64 m ²		Υ volta= 18 KN/m ³
A2=	1,064 m ²		Nvolta= 147,825 KN
B1 _x =	0,45 m	COPERTURA LAT	COPERURA PORTATA
B1 _y =	2,88 m	Acop.lat= 8,47 m ²	Acp= 22,6 m ²
Acop=	156,09 m ²	Asott= 31,5 m ²	Ncp= 51,84144 KN

Asott=	148,5 m ²	Nc=	75,18513 KN	TRAMEZZI PORTANTI
d1=	1,2 m			Ntp= 63,9 KN
d1 ₁ =	0,61 m			TRAMEZZI NON PORTANTI
d2=	0,4 m			Avolta= 20,5 m ²
dN1 _x =	0,26 m			Ntnp= 24,6 KN
dN1 _y =	3,9 m			PAVIMENTO
dNc _x =	0,13 m			Avolta= 20,5 m ²
dNc _y =	9,26 m			Npav= 30,955 KN
				CARICHI VARIABILI ESERCIZIO
				Avolta= 20,5 m ²
				Nes= 18,45 KN
				N1= 337,5714 KN

Tabella 5.4. 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 α , 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 α si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 116.10 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.84$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F C} = 3.12 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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.

5.4.4. 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.

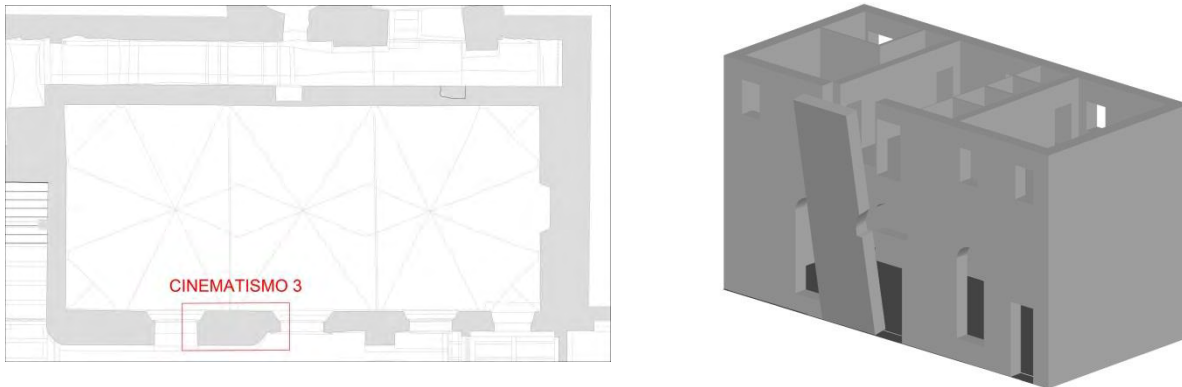


Figura 5.4.13 - localizzazione e schema cinematismo 3

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 ²	VOLTA	
A2=	1.064 m ²	Avolta=	14.25 m ²
B1 _x =	0.45 m	Vvolta=	5.51125 m ³
B1 _y =	2.88 m	Yvolta=	18 KN/m ³
Acop=	156.09 m ²	Nvolta=	99.2025 KN
Asott=	148.5 m ²	COPERTURA LAT	
d1=	1.2 m	COPERTURA PORTATA	
d11=	0.61 m	Acop.lat=	2.25 m ²
d2=	0.4 m	Asott=	11.25 m ²
dN1 _x =	0.26 m	Nc=	25.07408 KN
dN1 _y =	3.9 m	TRAMEZZI PORTANTI	
dNc _x =	0.13 m	Ntp=	63.9 KN
dNc _y =	9.26 m	TRAMEZZI NON PORTANTI	
		Avolta=	14.25 m ²
		Ntnp=	17.1 KN
		PAVIMENTO	
		Avolta=	14.25 m ²
		Npav=	21.5175 KN
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta=	14.25 m ²
		Nes=	12.825 KN
		N1=	266.3864 KN

Tabella 5.4.5 - 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 α , 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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\Psi(z)=$	0.224076
Tc=	0.3976	$\Upsilon=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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.

5.4.5. 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.

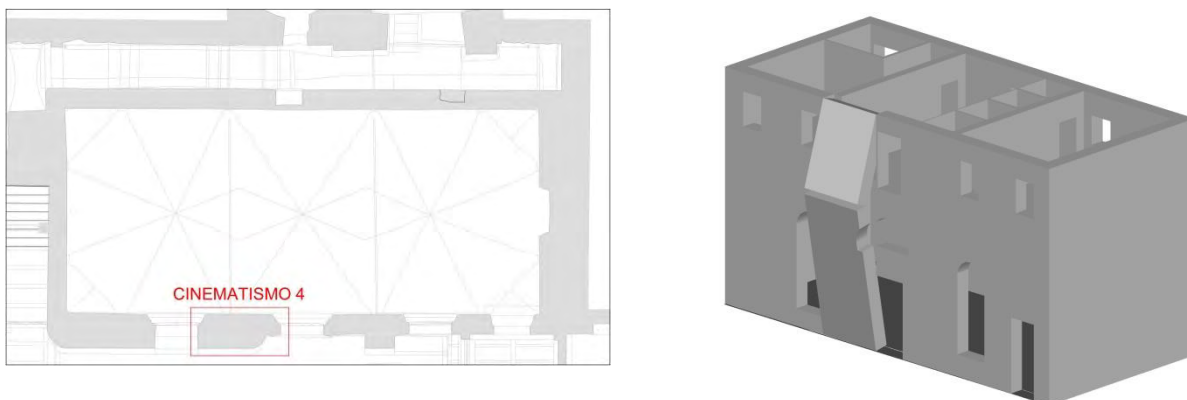


Figura 5.4. 14 - localizzazione e schema cinematismo 4

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		
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		
B1y=	2.88 m	Acop.lat= 2.25 m2	Acop= 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	

Tabella 5.4. 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 α , uguagliando il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$\text{PLV: } L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[\sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.27$$

Una volta ottenuto α si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 59.21 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.87$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 2.53 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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		

Tabella 5.4. 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.

5.4.6. 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.

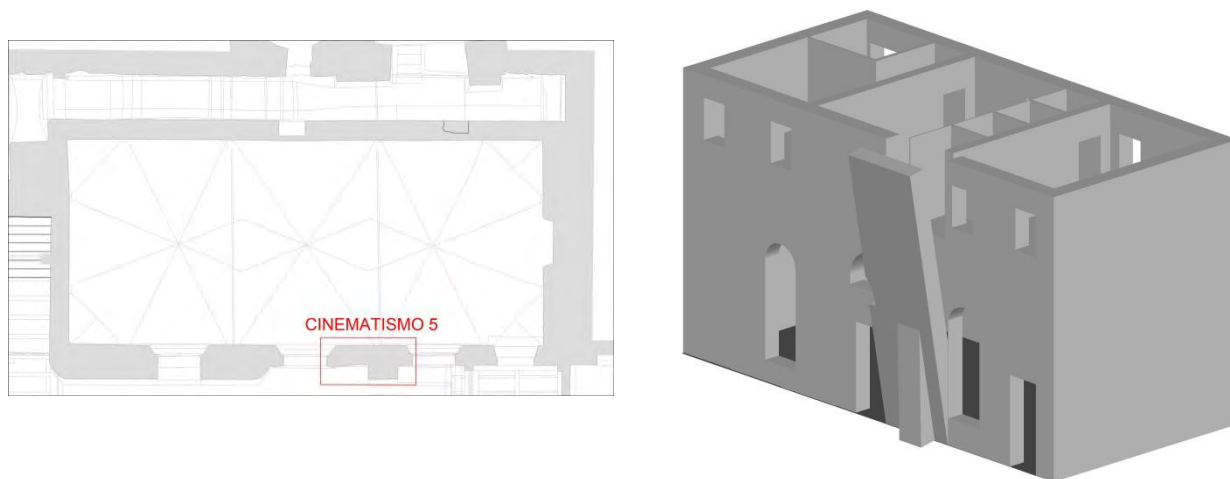


Figura 5.4. 15 - localizzazione e schema cinematismo 5

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 ²	P3=	27.244 KN
A2=	1.064 m ²	VOLTA	
lc=	0.98 m	Avolta= 14.263 m ²	
Acop=	156.09 m ²	Vvolta= 3.910875 m ³	
Asott=	148.5 m ²	Yvolta= 18 KN/m ³	
Ac=	1.39 m ²	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 ²
dc2=	0.125 m	Asott=	11.925 m ²
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 ²	
dNcy=	9.26 m	Ntnp= 17.1156 KN	
		PAVIMENTO	
		Avolta= 14.263 m ²	
		Npav= 21.53713 KN	
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta= 14.263 m ²	
		Nes= 12.8367 KN	
		N1= 237.6266 KN	

Tabella 5.4. 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:

$$t = 8.96cm$$

$$t_{cr} = 1.24cm$$

È stato quindi possibile trovare α , 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 α 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:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 48.59KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.89$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.50 m/s^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 10 - verifica SLV lineare cinematico 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 θ a cui corrisponde lo spostamento d_{ko} del punto di controllo considerato, che caratterizza la configurazione per cui si ha l'annullamento del moltiplicatore α e quindi del momento stabilizzante M_s . L'angolo θ 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:

$$d_{ko} = h_{bar} \cdot \sin\theta = 0.27m$$

Essendo:

$$h_{bar} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = 4.24m$$

Lo spostamento spettrale d_0^* dell'oscillatore equivalente ad un grado di libertà è dato da

$$d_0^* = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{xbar} \sum_{i=1}^n N_i \delta_{x,i}} = 0.31m$$

Lo spostamento ultimo d_u^* risulta essere:

$$d_u^* = 0.4d_0^* = 0.13m$$

Lo spostamento spettrale valutato in conformità del periodo secante T_s è:

$$d_s^* = 0.4d_u^* = 0.05m$$

L'accelerazione corrispondente è:

$$a_s^* = a_0^* \left(1 - \frac{d_s^*}{d_0^*} \right) = 0.43 m/s^2$$

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.

5.4.7. Cinematismo 6 – 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.

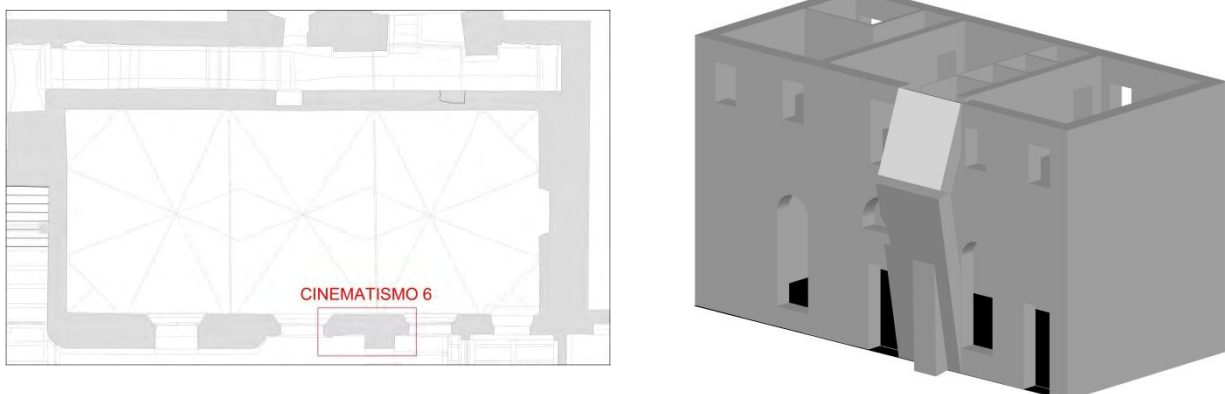


Figura 5.4. 16 - localizzazione e schema cinematismo 6

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	VOLTA
h2=	2.66 m	P1= 213.378 KN	Avolta= 14.263 m2
l=	2.65 m	P2= 56.392 KN	Vvolta= 3.910875 m3
A1=	4.026 m2	P3= 27.244 KN	Yvolta= 18 KN/m3
A2=	1.064 m2		Nvolta= 70.39575 KN
lc=	0.98 m	COPERTURA LAT	COPERTURA PORTATA
Acop=	156.09 m2	Acop.lat= 2.4 m2	Acp= 22.6 m2
Asott=	148.5 m2	Asott= 11.925 m2	Ncp= 51.84144 KN
Ac=	1.39 m2	Nc= 26.61294 KN	TRAMEZZI PORTANTI
d1=	0.61 m		Ntp= 63.9 KN
d2=	0.4 m		TRAMEZZI NON PORTANTI
dc1=	0.44 m		Avolta= 14.263 m2
dc2=	0.125 m		Ntnp= 17.1156 KN
Bar contr x=	0.16 m		PAVIMENTO
Bar contr Y=	2.015 m		Avolta= 14.263 m2
dN1x=	0.226667 m		Npav= 21.53713 KN
dN1y=	3.9 m		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO
dNcx=	0.13 m		Avolta= 14.263 m2
dNcy=	9.26 m		Nes= 12.8367 KN
			N1= 237.6266 KN

Tabella 5.4. 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 α , 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 α si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 49.84 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.87$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* F C} = 1.00 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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 ²
Sde(T1)=	0,015
Ts=	1,57 s
Se(Ts)=	1,27
Sde(Ts)=	0,08

Tabella 5.4. 13 - verifica SLV non lineare cinematismo 6

La condizione risulta quindi:

$$d_u^* = 0.12 \geq \max(0.11; 0.044)$$

La verifica non lineare risulta quindi soddisfatta.

5.4.8. Cinematismo 7 – ribaltamento semplice (parete contrafforte)

E' stata effettuata l'analisi del cinematismo 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 cinematismo.

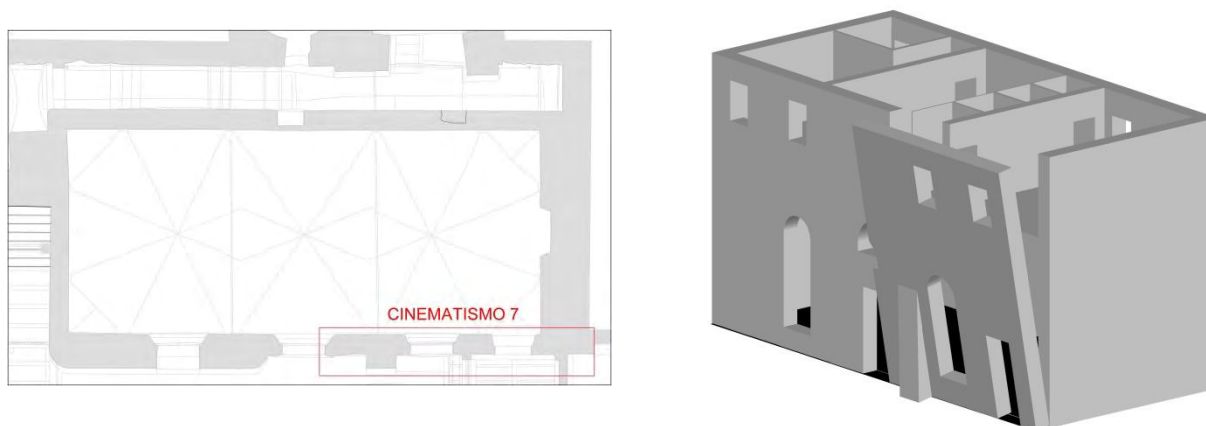


Figura 5.4. 17 - localizzazione e schema cinematismo 7

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	Acp= 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 _x =	0,23 m		Npav= 30,955 KN
dN1 _y =	3,9 m		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO
dNc _x =	0,13 m		Avolta= 20,5 m2
dNc _y =	9,26 m		Nes= 18,45 KN
			N1= 337,5714 KN

Tabella 5.4. 14 - valori geometrici e carichi cinematismo 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 α , 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 α 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:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 104.96 KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.85$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.52 m/s^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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
dk0=	0,31 m
d0*=	0,369 m
du*=	0,148 m
ds*=	0,059 m
as*=	0,440 m/s ²
Sde(T1)=	0,015
Ts=	2,302 s
Se(Ts)=	0,82
Sde(Ts)=	0,11

Tabella 5.4. 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.

5.4.9. 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.

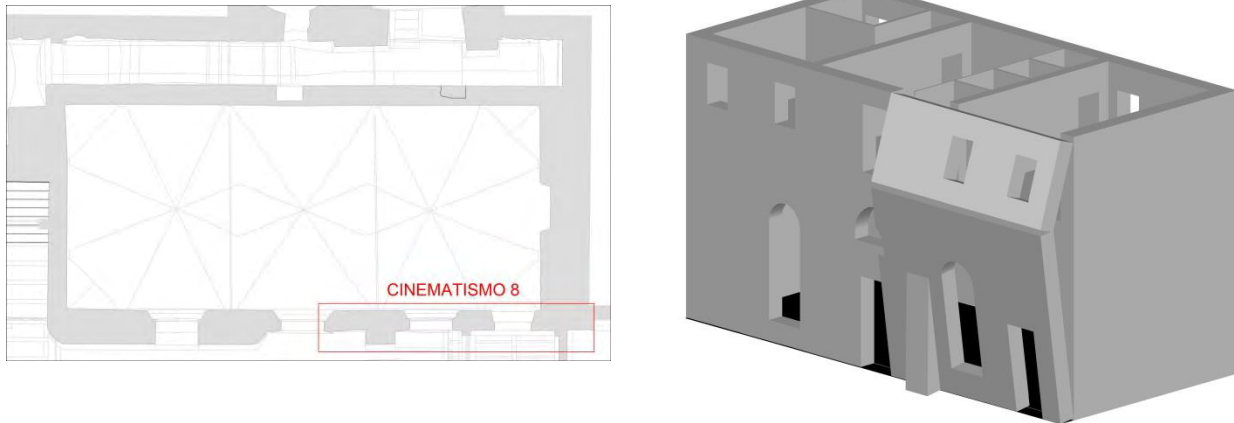


Figura 5.4. 18 - localizzazione e schema cinematismo 8

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 P₃, in quanto è una porzione di muratura aggiuntiva.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	3.9 m	MURATURA	VOLTA
h2=	5.36 m	P1= 371.124 KN	Avolta= 20.5 m2
l=	7.8 m	P2= 422.76 KN	Vvolta= 8.2125 m3
A1=	2.379 m2	Pc= 230.88 KN	Yvolta= 18 KN/m3
A2=	2.71 m2		Nvolta= 147.825 KN
Ac=	1.48 m2	COPERTURA LAT	COPERTURA PORTATA
B1x=	0.305 m	Acop.lat= 7.55 m2	Acp= 22.6 m2
B1y=	1.95 m	Asott= 35.1 m2	Ncp= 51.84144 KN
B2x=	0.346 m	Nc= 79.44689 KN	TRAMEZZI PORTANTI
B2y=	6.302 m		Ntp= 63.9 KN
Bcx=	0.82 m		TRAMEZZI NON PORTANTI
Bcy=	1.59 m		Avolta= 20.5 m2
Acop=	156.09 m2		Ntnp= 24.6 KN
Asott=	148.5 m2		PAVIMENTO
d1=	0.61 m		Avolta= 20.5 m2
d11=	0.61 m		Npav= 30.955 KN
d2=	0.4 m		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO
dN1x=	0.203333 m		Avolta= 20.5 m2
dN1y=	3.9 m		Nes= 18.45 KN
dNcx=	0.13 m		N1= 337.5714 KN
dNcy=	9.26 m		

Tabella 5.4. 17 - valori geometrici e carichi cinematismo 8

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, 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_{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:

$$t = 6.90cm$$

$$t_{cr} = 1.32cm$$

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 α , uguagliando il lavoro delle forze stabilizzanti al lavoro delle forze ribaltanti:

$$PLV: L_S = L_R$$

$$L_S = \sum_i P_i \delta_{i,y} + \sum_i N_i \delta_{i,y}$$

$$L_R = \alpha \left[\sum_i P_i \delta_{i,x} + \sum_i N_i \delta_{i,x} \right]$$

$$\alpha = 0.13$$

Una volta ottenuto α si procede calcolando i valori rispettivamente della massa partecipante al meccanismo, la frazione di massa partecipante ed infine l'accelerazione spettrale sismica:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 104.32 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.85$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 1.26 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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		

Tabella 5.4. 18 - verifica SLV lineare cinematismo 8

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 1.26 \geq \max(1.03; 0.94)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

5.4.10. 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.

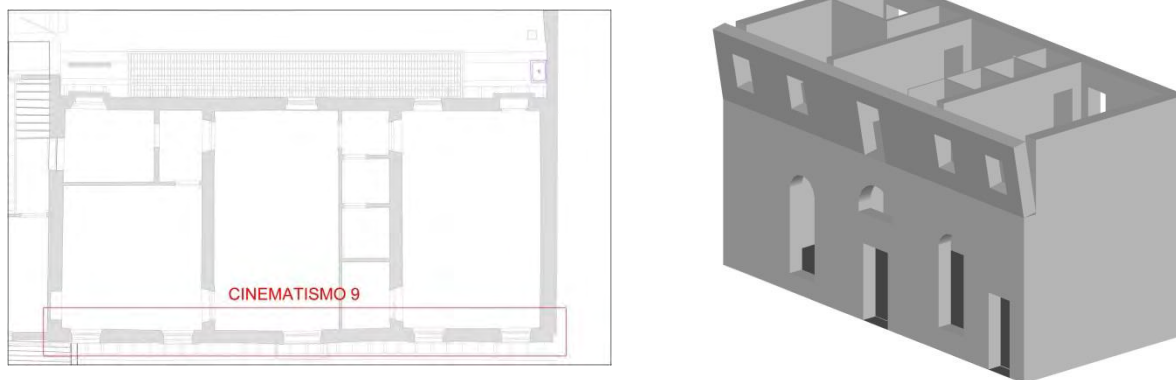


Figura 5.4. 19 - localizzazione e schema cinematismo 9

Nella tabella che segue sono raccolti i dati riguardanti la geometria analizzata, e i carichi che insistono su essa.

GEOMETRIA		CARICHI	
h1=	6,6 m	MURATURA	
h2=	2,66 m	P1=	1917,6 KN
l=	17 m	P2=	361,76 KN
A1=	5,64 m ²	VOLTA	
A2=	1,064 m ²	Avolta=	20,5 m ²
B1x=	0,45 m	Vvolta=	8,2125 m ³
B1y=	2,88 m	Yvolta=	18 KN/m ³
Acop=	156,09 m ²	Nvolta=	147,825 KN
Asott=	148,5 m ²	COPERTURA LAT	
d1=	1,2 m	Acop.lat=	16,75 m ²
d11=	0,61 m	Asott=	76,5 m ²
d2=	0,4 m	Nc=	173,8299 KN
dN1 _x =	0,26 m	COPERTURA PORTATA	
dN1 _y =	3,9 m	Acp=	22,6 m ²
dNc _x =	0,13 m	Ncp=	51,84144 KN
dNc _y =	9,26 m	TRAMEZZI PORTANTI	
		Ntp=	63,9 KN
		TRAMEZZI NON PORTANTI	
		Avolta=	20,5 m ²
		Ntnp=	24,6 KN
		PAVIMENTO	
		Avolta=	20,5 m ²
		Npav=	30,955 KN
		CARICHI VARIABILI ESERCIZIO	
		Avolta=	20,5 m ²
		Nes=	18,45 KN
		N1=	337,5714 KN

Tabella 5.4. 19 - valori geometrici e carichi cinematismo 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:

$$t = 1.40\text{cm}$$

E' stato quindi possibile trovare α , 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 α 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:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 60.05 \text{ KN}$$

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 1.10$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 0.56 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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=	10.36 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.80
Tc=	0.3976	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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	
$\theta=$	0,048 rad
$dk_0=$	0,09 m
$d_0^*=$	0,41 m
$du^*=$	0,17 m
$ds^*=$	0,07 m
$as^*=$	0,47 m/s ²
$Sde(T_1)=$	0,015
$T_s=$	2,35 s
$Se(T_s)=$	0,79
$Sde(T_s)=$	0,11

Tabella 5.4. 21 - verifica SLV non lineare cinematisimo 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

$$T'' = f_{vd} A_l \sin 45^\circ = 31.37 \text{ KN}$$

- 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_l 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.

5.4.11. 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.

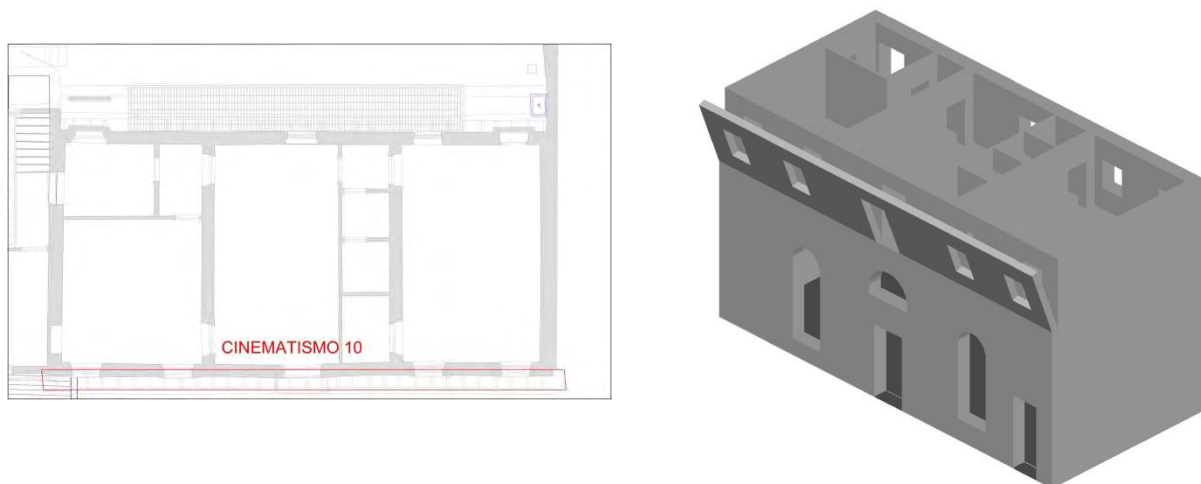


Figura 5.4. 20 - localizzazione e schema cinematico 10

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		Yvolta= 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	Acp= 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

Tabella 5.4. 22 - valori geometrici e carichi cinematico 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 α , 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 α 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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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=	10.36 m
Cc=	1.42	$\Psi(z)=$	0.80
Tc=	0.3976	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		

Tabella 5.4. 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	
$\theta=$	0,061 rad
$dk_0=$	0,11 m
$d_0^*=$	0,51 m
$du^*=$	0,21 m
$ds^*=$	0,08 m
$as^*=$	0,49 m/s ²
$Sde(T_1)=$	0,015
$T_s=$	2,57 s
$Se(T_s)=$	0,66
$Sde(T_s)=$	0,11

Tabella 5.4. 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.

5.4.12. 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.

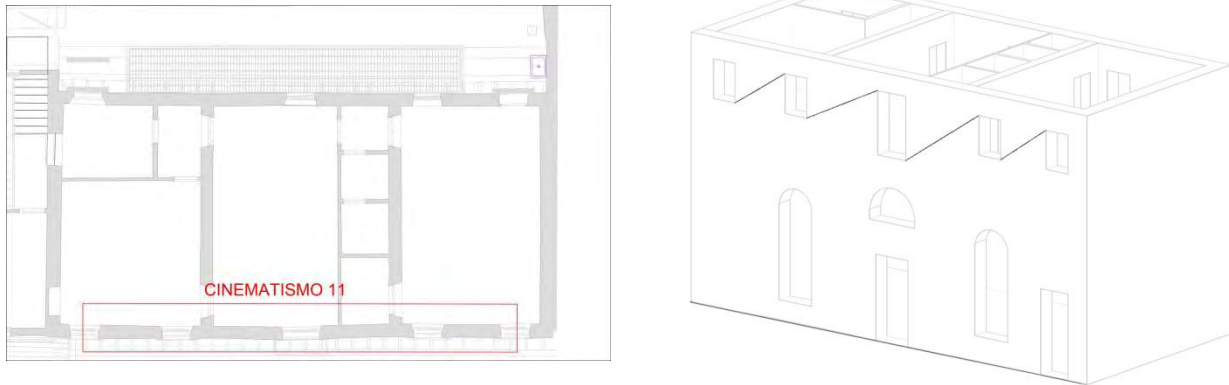


Figura 5.4. 21 - localizzazione e schema cinematismo 11

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 m ²		
Acop2=	3.476 m ²		
Acop3=	3.521 m ²		
Acop4=	3.4985 m ²		

Tabella 5.4. 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 θ e attraverso il Principio dei Lavori Virtuali è stato calcolato α , 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 α 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:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 13.80KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.81$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 9.59 \text{ m/s}^2$$

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:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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	$\gamma=$	1.29
Tb=	0.132533		
Td=	2.185933		

Tabella 5.4. 26 - verifica SLV lineare cinematismo II

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.

5.4.13. 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.

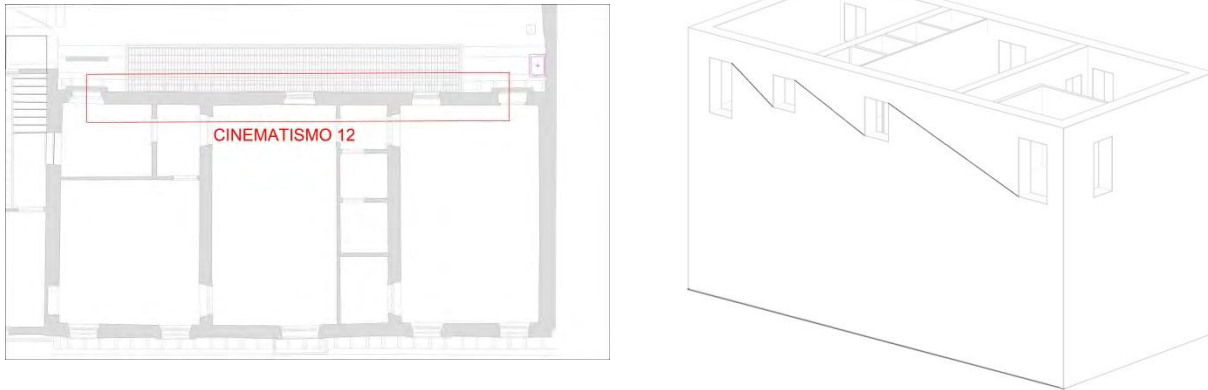


Figura 5.4. 22 - localizzazione e schema cinematismo 12

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 m ²		
Acop2=	3.539 m ²		
Acop3=	7.256 m ²		

Tabella 5.4. 27 - 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 θ e attraverso il Principio dei Lavori Virtuali è stato calcolato α , 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 α 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:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} = 21.70KN$$

$$e^* = \frac{gM^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 0.97$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = 16.14 m/s^2$$

Verifica dello Stato Limite di salvaguarda della Vita con analisi lineare:

Affinché il cinematismo risulti verificato è necessario controllare che l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo soddisfi la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \max\left(\frac{a_g(P_{VR})S}{q}; \frac{S_e(T_1)\varphi(z)\gamma}{q}\right)$$

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		

Tabella 5.4. 28 - verifica SLV lineare cinematismo II

Nella tabella soprastante sono indicati tutti i fattori utilizzati per la verifica della condizione:

$$a_0^* = 16.14 \geq \max(1.03; 2.77)$$

La verifica lineare risulta soddisfatta.

5.5. 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	α_0^* [m/s ²]	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%)		

Tabella 5.5. 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 presente tesi tratta come argomento principale le indagini soniche e la loro applicazione per quanto riguarda la qualificazione e classificazione di murature storiche e la verifica dell'efficacia di iniezioni consolidanti. Per quanto riguarda la classificazione delle murature, è stato elaborato un database raccogliendo i risultati di prove soniche pregresse e suddividendoli in base alle tipologie murarie definite dalla normativa. Questo ha permesso di ricavare dei valori di riferimento di velocità soniche per le tipologie murarie più comuni. Dopo questa fase di raccolta dati si è passati ad un'applicazione pratica al Museo Archeologico di Verona.

Inizialmente, prima di partire con il programma sperimentale, è stata effettuata un'approfondita ricerca in Archivio di Stato, Archivio Comunale di Verona e Biblioteca Comunale di Verona circa le evoluzioni storiche del sito e gli interventi in esso eseguiti, che ha permesso di redigere una cronologia del sito e di constatare come non siano stati eseguiti particolari interventi di restauro, se non per quanto riguarda il rifacimento di alcune coperture lignee.

Nella prima fase del programma sperimentale nel mese di novembre 2013 sono state eseguite indagini soniche su murature deteriorate e i risultati ottenuti sono stati analizzati sia per valutare lo stato di conservazione delle murature in esame, che sono risultate di scarsa o medio-bassa consistenza, sia in confronto ai valori di riferimento ricavati dal database, rispetto ai quali sono risultati essere in linea.

Nella seconda fase invece, dopo aver eseguito nel mese di marzo 2014 il consolidamento delle murature mediante iniezione di miscele, il mese successivo sono state nuovamente eseguite le indagini soniche negli stessi pannelli e secondo le stesse modalità. Questo ha permesso di valutare l'efficacia dell'intervento attraverso l'analisi dell'incremento di velocità e del livello di omogeneizzazione raggiunto nei campi prova. I risultati, anche se inferiori alle attese, sono stati comunque buoni, con un incremento medio di velocità sonica di circa 1,9 volte la velocità media iniziale e un aumento dell'omogeneità dei pannelli, analizzando il parametro relativo al coefficiente di variazione, diminuito mediamente del 22%.

Nell'ultima fase è stata eseguita un'analisi della vulnerabilità sismica, analizzando per macroelementi l'Unità Strutturale relativa all'edificio del refettorio. I cinematismi risultati maggiormente critici sono risultati quelli di ribaltamento del piano superiore dell'edificio, sia globale che solo relativo al paramento esterno, per i quali sono stati valutati gli interventi necessari, vale a dire l'inserimento di tiranti, e gli effetti positivi che si avrebbero con un intervento di iniezione di miscele consolidanti.

BIBLIOGRAFIA

Riferimenti bibliografici:

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.32 bis 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

Di seguito sono riportate le tabelle di acquisizione delle tomografie soniche TMo5, TMo7 e TMo8, trattate nel capitolo 4.

TMo8:

Acquisizione	path	T1	T2	T3	Lunghezze [cm]	VM [m/s]
I	1-2	0,0001848300	0,0001560600	0,0001142700	20,00	1318,22
I	1-3	0,0002571200	0,0002988300	0,0002864000	40,00	1424,59
I	1-9	0,0006776900	0,0006178900	0,0006345500	107,70	1673,98
I	1-10	0,0005995200	0,0006826800	0,0006898500	101,98	1551,38
I	1-11	0,0006264700	0,0006335200	0,0006231800	100,00	1593,06
I	2-1	0,0000818080	0,0000575710	0,0000679840	20,00	2893,48
I	2-3	0,0001438300	0,0001948500	0,0001451800	20,00	1240,03
I	2-9	0,0005557900	0,0005712400	0,0005920400	101,98	1779,68
I	2-10	0,0006516100	0,0006553400	0,0006014600	100,00	1571,99
I	2-11	0,0006918000	0,0006923200	0,0007436200	101,98	1437,86
I	3-1	0,0001738000	0,0002037100	0,0002258500	40,00	1988,86
I	3-2				20,00	
I	3-9	0,0005136100	0,0005279500	0,0004840900	100,00	1966,37
I	3-10	0,0005086800	0,0005329100	0,0005763000	101,98	1890,98
I	3-11	0,0007119000	0,0008028700	0,0007049900	107,70	1455,56
I	4-1	0,0003027000	0,0002933900	0,0002926200	46,10	1556,19
I	4-2	0,0003027000	0,0001733200	0,0001929100	26,93	1207,75
I	4-3	0,0000652670	0,0000228820	0,0000211560	11,18	3068,48
I	4-9	0,0005112700	0,0004650300	0,0005753100	90,14	1742,83
I	4-10	0,0006027200	0,0004452600	0,0005245900	93,41	1781,99
I	4-11	0,0006302400	0,0006701300	0,0010895000	100,62	1263,08
I	5-1	0,0002675000	0,0003035600	0,0002854900	54,08	1894,11
I	5-2	0,0001847600	0,0001905500	0,0001966600	39,05	2048,18
I	5-3	0,0001230800	0,0001808400	0,0001549700	30,41	1988,06
I	5-9	0,0004526600	0,0004493800	0,0004762600	70,18	1527,53
I	5-10	0,0004827200	0,0004966000	0,0005003900	74,33	1506,98
I	5-11	0,0006673500	0,0007073900	0,0006734100	83,22	1218,95
I	6-1	0,0003598300	0,0003537200	0,0003563600	67,27	1886,23
I	6-2	0,0002645900	0,0002980300	0,0003119300	55,90	1917,56
I	6-3	0,0002436500	0,0003001700	0,0002544300	50,25	1888,51
I	6-9	0,0002530300	0,0002863400	0,0002918500	50,25	1813,60
I	6-10	0,0003521500	0,0003550600	0,0003051500	55,90	1656,53
I	6-11	0,0004575700	0,0004711500	0,0004514800	67,27	1462,18
I	7-1	0,0002544300	0,0004360200	0,0004586400	83,22	2172,68
I	7-2	0,0003980700	0,0004016400	0,0003440500	74,33	1949,62

I	7-3	0,0004851200	0,0003987300	0,0003555500	70,18	1698,73
I	7-9	0,0001438900	0,0001679800	0,0001783300	30,41	1861,08
I	7-10	0,0001867700	0,0001852200	0,0002464900	39,05	1894,16
I	7-11	0,0003404400	0,0003120000	0,0003081700	54,08	1688,93
I	8-1	0,0005353700	0,0006494600	0,0006653000	100,62	1631,56
I	8-2	0,0005359700	0,0005337100	0,0006218000	93,41	1656,71
I	8-3	0,0006700300	0,0005735600	0,0005865300	90,14	1477,61
I	8-9	0,0000434150	0,0000247840	0,0000225430	11,18	3696,19
I	8-10	0,0001737500	0,0001868500	0,0001606000	26,93	1550,08
I	8-11	0,0003214200	0,0002603100	0,0002640500	46,10	1635,18
I	9-1	0,0005753200	0,0005729500	0,0005983400	107,70	1849,87
I	9-2	0,0005131600	0,0004972500	0,0005697600	101,98	1936,12
I	9-3	0,0004989300	0,0004919500	0,0004955100	100,00	2018,31
I	9-10	0,0001482400	0,0002197300	0,0001733800	20,00	1108,34
I	9-11	0,0002955000	0,0002913600	0,0003081600	40,00	1340,75
I	10-1	0,0006049100	0,0006600200	0,0004971000	101,98	1736,29
I	10-2	0,0006134600	0,0006135300	0,0004341300	100,00	1806,01
I	10-3	0,0005774400	0,0006028100	0,0005635400	101,98	1754,45
I	10-9	0,0001660900	0,0002184900	0,0001822700	20,00	1058,48
I	10-11	0,0000778470	0,0001267100	0,0001099700	20,00	1907,63
I	11-1	0,0006091100	0,0006372500	0,0006085600	100,00	1617,32
I	11-2	0,0006932700	0,0006236900	0,0006844500	101,98	1528,62
I	11-3	0,0006494300	0,0006927400	0,0006752300	107,70	1601,57
I	11-9	0,0003846900	0,0002084300	0,0002960800	40,00	1349,53
I	11-10	0,0001727600	0,0002774500	0,0003104800	20,00	788,76
I	12-1	0,0023378000	0,0022336000	0,0021112000	130,65	586,52
I	12-2	0,0024373000	0,0022779000	0,0023099000	142,44	608,28
I	12-3	0,0023609000	0,0023673000	0,0023157000	155,92	664,06
I	12-9	0,0022663000	0,0022750000	0,0020434000	110,95	505,49
I	12-10	0,0020743000	0,0028445000	0,0021999000	91,05	383,71
I	12-11	0,0021318000	0,0020533000	0,0020129000	71,21	344,68
I	13-1	0,0023539000	0,0022716000	0,0022165000	114,33	501,30
I	13-2	0,0025494000	0,0024204000	0,0023616000	126,63	518,17
I	13-3	0,0032693000	0,0030432000	0,0030546000	142,51	456,42
I	13-9	0,0026911000	0,0024525000	0,0024344000	110,95	439,23
I	13-10	0,0033103000	0,0028072000	0,0027319000	91,05	308,66
I	13-11	0,0025195000	0,0024406000	0,0024193000	71,21	289,50
I	14-1	0,0018284000	0,0021098000	0,0018573000	99,35	514,28
I	14-2	0,0021390000	0,0020330000	0,0019330000	114,41	562,21
I	14-3	0,0019859000	0,0019749000	0,0018334000	130,81	677,28
I	14-9	0,0022989000	0,0019280000	0,0017264000	114,50	576,99
I	14-10	0,0023052000	0,0024041000	0,0022914000	95,34	408,56
I	14-11	0,0022139000	0,0021170000	0,0020838000	76,62	358,33

I	15-1	0,0019765000	0,0020019000	0,0019644000	86,43	436,31
I	15-2	0,0019124000	0,0018965000	0,0019144000	103,39	541,94
I	15-3	0,0018529000	0,0018109000	0,0017910000	121,29	667,06
I	15-9	0,0018128000	0,0019600000	0,0020007000	121,29	630,24
I	15-10	0,0016861000	0,0019281000	0,0018607000	103,39	566,53
I	15-11	0,0021005000	0,0021751000	0,0022105000	86,43	399,76
I	16-1	0,0018847000	0,0018958000	0,0019281000	76,62	402,66
I	16-2	0,0022772000	0,0024209000	0,0022914000	95,34	409,21
I	16-3	0,0023906000	0,0024028000	0,0024664000	114,50	473,15
I	16-9	0,0026299000	0,0029881000	0,0029878000	130,81	456,01
I	16-10	0,0023628000	0,0023762000	0,0024511000	114,41	477,36
I	16-11	0,0022901000	0,0022911000	0,0023638000	99,35	429,16
I	17-1	0,0017434000	0,0016442000	0,0016980000	71,21	420,07
I	17-2	0,0023348000	0,0024479000	0,0024397000	91,05	378,20
I	17-3	0,0022063000	0,0023060000	0,0024088000	110,95	480,92
I	17-9	0,0023930000	0,0023476000	0,0023681000	142,51	601,42
I	17-10	0,0024809000	0,0027672000	0,0025163000	127,63	493,14
I	17-11	0,0023838000	0,0025890000	0,0023099000	114,33	470,97
I	18-1	0,0014739000	0,0014978000	0,0015375000	71,21	473,76
I	18-2	0,0019158000	0,0019740000	0,0019498000	91,05	467,75
I	18-3	0,0023052000	0,0020379000	0,0019498000	110,95	528,93
I	18-9	0,0023052000	0,0023702000	0,0026306000	155,92	640,24
I	18-10	0,0023209000	0,0024408000	0,0024265000	142,44	594,47
I	18-11	0,0023706000	0,0025693000	0,0025369000	130,65	524,22
II	1-12	0,0027687000	0,0026195000	0,0032040000	130,65	456,17
II	1-13	0,0030254000	0,0027874000	0,0029918000	114,33	389,56
II	1-14	0,0031348000	0,0029148000	0,0032139000	99,35	321,75
II	1-15	0,0023845000	0,0025613000	0,0025188000	86,43	347,36
II	1-16	0,0023080000	0,0026461000	0,0025406000	76,62	306,70
II	1-17	0,0030875000	0,0028358000	0,0026926000	71,21	247,95
II	1-18	0,0023587000	0,0021925000	0,0019931000	71,21	326,44
II	2-12	0,0019204000	0,0023500000	0,0021455000	142,44	666,03
II	2-13	0,0021101000	0,0023920000	0,0022945000	127,63	563,36
II	2-14	0,0020578000	0,0020268000	0,0020479000	114,41	559,69
II	2-15	0,0017762000	0,0018429000	0,0016780000	103,39	585,55
II	2-16	0,0018568000	0,0020291000	0,0018670000	95,34	497,18
II	2-17	0,0020403000	0,0023397000	0,0023249000	91,05	407,39
II	2-18	0,0019408000	0,0020733000	0,0018962000	91,05	462,16
II	3-12	0,0021377000	0,0022808000	0,0022426000	155,92	702,23
II	3-13	0,0023486000	0,0020866000	0,0022219000	142,51	642,22
II	3-14	0,0020322000	0,0020589000	0,0018173000	130,81	664,19
II	3-15	0,0020331000	0,0017306000	0,0018783000	121,29	644,93
II	3-16	0,0019141000	0,0019500000	0,0019585000	114,50	589,94

II	3-17	0,0024695000	0,0025023000	0,0023457000	110,95	454,87
II	3-18	0,0020386000	0,0018864000	0,0022083000	110,95	542,69
II	4-12	0,0021752000	0,0022177000	0,0022780000	152,78	687,07
II	4-13	0,0021914000	0,0022266000	0,0022734000	140,50	629,91
II	4-14	0,0019949000	0,0023532000	0,0019945000	130,15	615,60
II	4-15	0,0018683000	0,0021715000	0,0022374000	122,23	584,16
II	4-16	0,0023791000	0,0019927000	0,0021389000	117,22	540,13
II	4-17	0,0024264000	0,0024699000	0,0024647000	115,50	470,72
II	4-18	0,0016867000	0,0017130000	0,0017970000	117,22	676,70
II	5-12	0,0028361000	0,0027353000	0,0024679000	140,50	524,30
II	5-13	0,0019304000	0,0022604000	0,0022465000	130,15	606,54
II	5-14	0,0017073000	0,0018853000	0,0020662000	122,23	648,00
II	5-15	0,0017010000	0,0017100000	0,0017990000	117,22	674,97
II	5-16	0,0019444000	0,0019552000	0,0018771000	115,50	599,82
II	5-17	0,0025433000	0,0023748000	0,0025735000	117,22	469,41
II	5-18	0,0017374000	0,0019050000	0,0021830000	122,23	629,47
II	6-12	0,0019468000	0,0020082000	0,0020523000	130,15	649,96
II	6-13	0,0020989000	0,0020539000	0,0020705000	122,23	589,22
II	6-14	0,0016990000	0,0017846000	0,0018661000	117,22	657,35
II	6-15	0,0018699000	0,0016928000	0,0016993000	115,50	658,49
II	6-16	0,0016833000	0,0018290000	0,0019280000	117,22	646,40
II	6-17	0,0022856000	0,0023315000	0,0023153000	122,23	528,95
II	6-18	0,0022302000	0,0021925000	0,0022439000	130,15	585,68
II	7-12	0,0019662000	0,0020224000	0,0021736000	122,23	595,06
II	7-13	0,0018406000	0,0018334000	0,0020536000	117,22	613,97
II	7-14	0,0017910000	0,0015167000	0,0016549000	115,50	698,22
II	7-15	0,0017444000	0,0017453000	0,0018578000	117,22	657,62
II	7-16	0,0020895000	0,0019323000	0,0019442000	122,23	614,63
II	7-17	0,0022993000	0,0024686000	0,0023530000	130,15	548,32
II	7-18	0,0021715000	0,0020895000	0,0029159000	140,50	587,30
II	8-12	0,0018696000	0,0019716000	0,0019039000	117,22	612,10
II	8-13	0,0018284000	0,0021827000	0,0019501000	115,50	581,26
II	8-14	0,0017623000	0,0018696000	0,0018797000	117,22	638,04
II	8-15	0,0017587000	0,0019469000	0,0020517000	122,23	636,91
II	8-16	0,0019541000	0,0018767000	0,0020007000	130,15	669,55
II	8-17	0,0024202000	0,0025890000	0,0023500000	140,50	572,75
II	8-18	0,0022397000	0,0025027000	0,0025709000	152,78	626,72
II	9-12	0,0026711000	0,0024344000	0,0023209000	110,95	448,20
II	9-13	0,0024767000	0,0024418000	0,0024638000	110,95	450,88
II	9-14	0,0022686000	0,0020693000	0,0020589000	114,50	536,99
II	9-15	0,0022787000	0,0019412000	0,0020396000	121,29	581,31
II	9-16	0,0022375000	0,0020691000	0,0021000000	130,81	612,54
II	9-17	0,0025349000	0,0025316000	0,0024799000	142,51	566,54

II	9-18	0,0025691000	0,0025989000	0,0025674000	155,92	604,70
II	10-12	0,0019704000	0,0024476000	0,0018273000	91,05	437,37
II	10-13	0,0021868000	0,0019521000	0,0020639000	91,05	440,37
II	10-14	0,0023388000	0,0025172000	0,0023741000	95,34	395,60
II	10-15	0,0023244000	0,0022216000	0,0021772000	103,39	461,34
II	10-16	0,0025755000	0,0026957000	0,0026257000	114,41	434,64
II	10-17	0,0023918000	0,0022341000	0,0022242000	127,63	558,96
II	10-18	0,0027053000	0,0025603000	0,0024145000	142,44	556,40
II	11-12	0,0018189000	0,0016458000	0,0014963000	71,21	430,62
II	11-13	0,0020676000	0,0021339000	0,0031793000	71,21	289,44
II	11-14	0,0019172000	0,0020108000	0,0019506000	76,62	391,01
II	11-15	0,0019579000	0,0022176000	0,0021943000	86,43	407,06
II	11-16	0,0018787000	0,0020875000	0,0017748000	99,35	519,16
II	11-17	0,0024154000	0,0023479000	0,0023598000	114,33	481,52
II	11-18	0,0027279000	0,0022811000	0,0023254000	130,65	534,40

TMo7

Acquisizione	path	T1	T2	T3	Lunghezze [cm]	VM [m/s]
I	1-1	0,0013305000	0,0011810000	0,0012289000	45,00	360,92
I	1-2	0,0011748000	0,0010618000	0,0010192000	49,24	453,75
I	1-3	0,0013918000	0,0012256000	0,0010957000	60,21	486,45
I	1-4	0,0011930000	0,0014255000	0,0015923000	75,00	534,34
I	1-5	0,0021972000	0,0022051000	0,0020322000	91,79	427,95
I	1-6	0,0026453000	0,0027175000	0,0025033000	109,66	418,22
I	1-7	0,0044595000	0,0041583000	0,0044048000	128,16	295,24
I	2-1	0,0008709200	0,0007684000	0,0009469900	49,24	571,21
I	2-2	0,0007603600	0,0009178100	0,0008878600	45,00	526,10
I	2-3	0,0007995900	0,0007810500	0,0007477600	49,24	634,43
I	2-4	0,0008291200	0,0009539900	0,0010493000	60,21	637,70
I	2-5	0,0014970000	0,0015156000	0,0016370000	75,00	483,91
I	2-6	0,0015416000	0,0027926000	0,0027642000	91,79	387,92
I	2-7	0,0039297000	0,0041364000	0,0039691000	109,66	273,34
I	3-1	0,0022528000	0,0026666000	0,0021189000	60,21	256,63
I	3-2	0,0011220000	0,0012197000	0,0011720000	49,24	420,41
I	3-3	0,0008971400	0,0008823700	0,0010080000	45,00	484,30
I	3-4	0,0014879000	0,0013955000	0,0013563000	49,24	348,42
I	3-5	0,0016013000	0,0014224000	0,0012821000	60,21	419,49
I	3-6	0,0038884000	0,0037958000	0,0036094000	75,00	199,23
I	3-7	0,0052690000	0,0051184000	0,0041063000	91,79	189,99
I	4-1	0,0043495000	0,0052516000	0,0038922000	75,00	166,75
I	4-2	0,0022674000	0,0023509000	0,0029985000	60,21	237,14

I	4-3	0,0026308000	0,0033266000	0,0025834000	49,24	172,97
I	4-4	0,0002696100	0,0000650870	0,0000582630	45,00	3435,46
I	4-5	0,0003428100	0,0004166200	0,0003869300	49,24	1288,71
I	4-6	0,0008523900	0,0009513700	0,0006078300	60,21	748,98
I	4-7	0,0016982000	0,0024752000	0,0019815000	75,00	365,56
I	5-1	0,0038587000	0,0036619000	0,0042246000	91,79	234,45
I	5-2	0,0045175000	0,0031081000	0,0029067000	75,00	213,63
I	5-3	0,0023476000	0,0016800000	0,0015811000	60,21	322,04
I	5-4	0,0001305900	0,0002819500	0,0002687900	49,24	2168,30
I	5-5	0,0001793300	0,0002621700	0,0002222400	45,00	2033,93
I	5-6	0,0005112000	0,0005953100	0,0005511600	49,24	891,21
I	5-7	0,0022223000	0,0021669000	0,0014930000	60,21	307,07
I	6-1	0,0119060000	0,0106910000	0,0056883000	109,66	116,31
I	6-2	0,0104050000	0,0097079000	0,0067866000	91,79	102,37
I	6-3	0,0055643000	0,0054642000	0,0050284000	75,00	140,13
I	6-4	0,0008903600	0,0010886000	0,0008134000	60,21	646,85
I	6-5	0,0009516400	0,0007845200	0,0007198400	49,24	601,52
I	6-6	0,0003346700	0,0005988100	0,0007744700	45,00	790,42
I	6-7	0,0016102000	0,0015769000	0,0013292000	49,24	327,11
I	7-1	0,0060955000	0,0077889000	0,0077022000	128,16	178,11
I	7-2	0,0071800000	0,0072439000	0,0070059000	109,66	153,51
I	7-3	0,0053942000	0,0057271000	0,0064203000	91,79	156,98
I	7-4	0,0010559000	0,0010262000	0,0012188000	75,00	681,63
I	7-5	0,0013199000	0,0013632000	0,0012514000	60,21	459,08
I	7-6	0,0008803200	0,0005680300	0,0006083000	49,24	718,26
I	7-7	0,0009061400	0,0009574700	0,0009408100	45,00	481,38
I	8-1	0,0078865000	0,0076076000	0,0075177000	147,05	191,71
I	8-2	0,0073024000	0,0066430000	0,0075254000	128,16	179,07
I	8-3	0,0075367000	0,0066645000	0,0055755000	109,66	166,35
I	8-4	0,0017317000	0,0015078000	0,0018173000	91,79	544,54
I	8-5	0,0022320000	0,0020172000	0,0020434000	75,00	357,56
I	8-6	0,0010138000	0,0009467100	0,0009071400	60,21	629,87
I	8-7	0,0006955500	0,0012759000	0,0009624500	49,24	503,54
I	9-1	0,0084570000	0,0085850000	0,0081897000	166,21	197,62
I	9-2	0,0077057000	0,0081651000	0,0099874000	147,05	170,61
I	9-3	0,0082365000	0,0089008000	0,0078205000	128,16	154,05
I	9-4	0,0017388000	0,0019760000	0,0018028000	109,66	596,23
I	9-5	0,0021082000	0,0020452000	0,0019926000	91,79	448,04
I	9-6	0,0014519000	0,0012147000	0,0013260000	75,00	563,54
I	9-7	0,0011742000	0,0008880000	0,0009924400	60,21	591,33
I	10-1	0,0076989000	0,0086746000	0,0084227000	185,54	224,48
I	10-2	0,0080586000	0,0082270000	0,0075535000	166,21	209,16
I	10-3	0,0065110000	0,0068595000	0,0060068000	147,05	227,67

I	10-4	0,0020390000	0,0022257000	0,0020226000	128,16	611,52
I	10-5	0,0031757000	0,0027692000	0,0031419000	109,66	362,04
I	10-6	0,0019177000	0,0016707000	0,0015684000	91,79	533,98
I	10-7	0,0008003000	0,0009587700	0,0007781400	75,00	886,80
I	11-1	0,0084140000	0,0089064000	0,0083932000	205,00	239,17
I	11-2	0,0062418000	0,0083972000	0,0092480000	185,54	233,02
I	11-3	0,0067385000	0,0070409000	0,0079295000	166,21	229,69
I	11-4	0,0019542000	0,0025024000	0,0023869000	147,05	644,65
I	11-5	0,0023998000	0,0023195000	0,0023271000	128,16	545,64
I	11-6	0,0017388000	0,0015941000	0,0018222000	109,66	638,16
I	11-7	0,0013668000	0,0015964000	0,0014963000	91,79	617,48
I	12-1	0,0083123000	0,0084456000	0,0080105000	224,56	271,99
I	12-2	0,0072128000	0,0077202000	0,0075869000	205,00	273,09
I	12-3	0,0065399000	0,0057124000	0,0079712000	185,54	275,23
I	12-4	0,0022070000	0,0022836000	0,0018318000	166,21	788,66
I	12-5	0,0021378000	0,0026446000	0,0025216000	147,05	604,00
I	12-6	0,0019402000	0,0016554000	0,0017810000	128,16	715,10
I	12-7	0,0017102000	0,0016337000	0,0016686000	109,66	656,31
I	13-1	0,0068975000	0,0098602000	0,0100400000	244,18	273,36
I	13-2	0,0076352000	0,0089805000	0,0089538000	224,56	263,46
I	13-3	0,0080258000	0,0077163000	0,0075066000	205,00	264,53
I	13-4	0,0027251000	0,0026137000	0,0024346000	185,54	716,06
I	13-5	0,0029259000	0,0026149000	0,0029119000	166,21	589,90
I	13-6	0,0020362000	0,0020699000	0,0023191000	147,05	686,61
I	13-7	0,0019959000	0,0018097000	0,0020523000	128,16	656,34
II	1-8	0,0051073000	0,0050736000	0,0050647000	147,05	289,37
II	1-9	0,0063932000	0,0054664000	0,0053678000	166,21	289,44
II	1-10	0,0084408000	0,0056881000	0,0060749000	185,54	275,50
II	1-11	0,0069673000	0,0065838000	0,0065374000	205,00	306,15
II	1-12	0,0079878000	0,0079223000	0,0084537000	224,56	276,50
II	1-13	0,0098185000	0,0090085000	0,0096722000	244,18	257,04
II	2-8	0,0053341000	0,0044546000	0,0045005000	128,16	269,07
II	2-9	0,0045650000	0,0051926000	0,0047715000	147,05	303,64
II	2-10	0,0056679000	0,0056261000	0,0062952000	166,21	283,48
II	2-11	0,0061155000	0,0053766000	0,0054733000	185,54	328,09
II	2-12	0,0091643000	0,0093009000		205,00	222,04
II	2-13	0,0103860000	0,0099329000		224,56	221,03
II	3-8	0,0040945000	0,0043894000	0,0054556000	109,66	236,00
II	3-9	0,0042856000	0,0042613000	0,0050857000	128,16	282,03
II	3-10	0,0054779000	0,0081988000	0,0080704000	147,05	202,86
II	3-11	0,0087974000	0,0089112000	0,0081183000	126,21	146,60
II	3-12		0,0096102000	0,0097139000	185,54	192,03
II	4-8	0,0031204000	0,0024922000	0,0024722000	91,79	340,59

II	4-9	0,0024762000	0,0021188000	0,0021022000	109,66	491,21
II	4-10	0,0036752000	0,0036684000	0,0039182000	128,16	341,40
II	4-11	0,0034291000	0,0031376000	0,0032521000	147,05	449,30
II	4-12	0,0044667000	0,0046065000	0,0041329000	166,21	377,57
II	4-13	0,0048714000	0,0030326000	0,0030446000	185,54	508,39
II	5-8	0,0025443000	0,0025684000	0,0024842000	75,00	296,17
II	5-9	0,0022115000	0,0022647000	0,0022120000	91,79	411,72
II	5-10	0,0022893000	0,0027609000	0,0021839000	109,66	454,76
II	5-11	0,0035233000	0,0032841000	0,0028570000	128,16	397,83
II	5-12	0,0038253000	0,0034211000	0,0033178000	147,05	417,60
II	5-13	0,0047220000	0,0054740000	0,0046039000	166,21	336,91
II	6-8	0,0023908000	0,0021724000	0,0017733000	60,21	285,05
II	6-9	0,0015753000	0,0012929000	0,0012469000	75,00	546,77
II	6-10	0,0030069000	0,0021302000	0,0022648000	91,79	372,02
II	6-11	0,0033593000	0,0029268000	0,0027752000	109,66	363,06
II	6-12	0,0035342000	0,0023630000	0,0025431000	128,16	455,53
II	6-13	0,0045004000	0,0027017000	0,0028520000	147,05	438,79
II	7-8	0,0013516000	0,0013700000	0,0015643000	49,24	344,70
II	7-9	0,0010653000	0,0011339000	0,0009455100	60,21	574,37
II	7-10	0,0014750000	0,0017518000	0,0018243000	75,00	445,45
II	7-11	0,0018794000	0,0021406000	0,0019623000	91,79	460,30
II	7-12	0,0022127000	0,0020850000	0,0019679000	109,66	525,05
II	7-13	0,0019142000	0,0021985000	0,0020618000	128,16	622,69
II	8-8	0,0007489500	0,0007482600	0,0007881700	45,00	590,71
II	8-9	0,0007652500	0,0008130700	0,0006988500	49,24	648,76
II	8-10	0,0012090000	0,0012810000	0,0010347000	60,21	512,45
II	8-11	0,0015542000	0,0014446000	0,0014514000	75,00	505,60
II	8-12	0,0012133000	0,0013138000	0,0013823000	91,79	704,36
II	8-13	0,0014799000	0,0015300000	0,0014690000	109,66	734,50
II	9-8	0,0008395600	0,0008286500	0,0007007300	49,24	623,62
II	9-9	0,0005158000	0,0004140100	0,0004008600	45,00	1014,53
II	9-10	0,0006384300	0,0008392900	0,0006837700	49,24	683,48
II	9-11	0,0016755000	0,0017365000	0,0014123000	60,21	374,40
II	9-12	0,0011955000	0,0012540000	0,0012148000	75,00	614,03
II	9-13	0,0012485000	0,0011753000	0,0010169000	91,79	800,31
II	10-8	0,0006248500	0,0008253900	0,0007910800	60,21	805,88
II	10-9	0,0008308500	0,0004219600	0,0004257200	49,24	880,13
II	10-10	0,0004320100	0,0004706900	0,0004143000	45,00	1025,06
II	10-11	0,0008022000	0,0010290000	0,0011617000	49,24	493,57
II	10-12	0,0007363900	0,0007639300	0,0008422700	60,21	771,04
II	10-13	0,0007906600	0,0011555000	0,0011006000	75,00	738,49
II	11-8	0,0011395000	0,0012693000	0,0012801000	75,00	609,94
II	11-9	0,0007899500	0,0009125900	0,0007945000	60,21	723,35

II	11-10	0,0006446000	0,0010005000	0,0007828000	49,24	608,48
II	11-11	0,0003663900	0,0004306500	0,0004057700	45,00	1122,37
II	11-12	0,0004846800	0,0005624600	0,0004265700	49,24	1002,46
II	11-13	0,0005509400	0,0006938500	0,0004389100	60,21	1072,78
II	12-8	0,0012250000	0,0012729000	0,0009504200	91,79	798,54
II	12-9	0,0014789000	0,0013647000	0,0011577000	75,00	562,32
II	12-10	0,0008833000	0,0008310100	0,0006786200	60,21	754,82
II	12-11	0,0007180000	0,0006403400	0,0006014400	49,24	753,82
II	12-12	0,0004186800	0,0005355000	0,0004564200	45,00	957,04
II	12-13	0,0006375400	0,0005831500	0,0004613000	49,24	878,32
II	13-8	0,0016364000	0,0016698000	0,0015878000	109,66	672,20
II	13-9	0,0016075000	0,0014310000	0,0015602000	91,79	598,79
II	13-10	0,0011990000	0,0013423000	0,0010617000	75,00	624,48
II	13-11	0,0010676000	0,0012524000	0,0013317000	60,21	494,63
II	13-12	0,0005087900	0,0005375400	0,0006322500	49,24	880,11
II	13-13	0,0001652300	0,0001883900	0,0002412300	45,00	2269,48

TMo8

Acquisizione	path	T1	T2	T3	Lunghezze [cm]	VM [m/s]
I	1-1	0,0009799800	0,0012065000	0,0011665000	52,00	465,26
I	1-2	0,0010161000	0,0010377000	0,0010192000	55,71	543,87
I	1-3	0,0011558000	0,0012400000	0,0011192000	65,60	559,89
I	1-4	0,0014578000	0,0014405000	0,0014842000	79,40	543,53
I	1-5	0,0018234000	0,0018696000	0,0021753000	95,41	487,76
I	1-6	0,0021811000	0,0019591000	0,0018264000	112,71	566,70
I	2-1	0,0015642000	0,0015247000	0,0014247000	55,71	370,28
I	2-2	0,0008679700	0,0009551700	0,0009185700	52,00	568,99
I	2-3	0,0006066300	0,0006199800	0,0005395100	55,71	946,31
I	2-4	0,0007479700	0,0007318800	0,0007262500	65,60	892,07
I	2-5	0,0010039000	0,0010136000	0,0009605000	79,40	799,87
I	2-6	0,0013275000	0,0014087000	0,0013727000	95,41	696,61
I	3-1	0,0010719000	0,0011330000	0,0010828000	65,60	598,59
I	3-2	0,0008987400	0,0009259900	0,0008470800	55,71	625,53
I	3-3	0,0005888600	0,0005657700	0,0005689300	52,00	905,10
I	3-4	0,0006302400	0,0007015500	0,0006709500	55,71	834,51
I	3-5	0,0010372000	0,0011252000	0,0010328000	65,60	615,92
I	3-6	0,0009605500	0,0010841000	0,0009890100	79,40	785,19
I	4-1	0,0015924000	0,0015262000	0,0014925000	79,40	516,58
I	4-2	0,0012737000	0,0012807000	0,0011222000	65,60	535,28
I	4-3	0,0009576400	0,0009999800	0,0009673300	55,71	571,39
I	4-4	0,0007354000	0,0007416500	0,0007811700	52,00	690,81

I	4-5	0,0010834000	0,0009994700	0,0009913300	55,71	543,65
I	4-6	0,0009978500	0,0010355000	0,0010268000	65,60	643,11
I	5-1	0,0029637000	0,0030702000	0,0027792000	95,41	324,78
I	5-2	0,0014556000	0,0015321000	0,0018522000	79,40	492,16
I	5-3	0,0012188000	0,0011511000	0,0017132000	65,60	481,99
I	5-4	0,0009181000	0,0008759500	0,0008527700	55,71	631,44
I	5-5	0,0009014100	0,0008926600	0,0009549600	52,00	567,47
I	5-6	0,0007194500	0,0006947000	0,0007553200	55,71	770,37
I	6-1	0,0023817000	0,0025996000	0,0024373000	112,71	455,79
I	6-2	0,0019344000	0,0020131000	0,0019556000	95,41	484,88
I	6-3	0,0016418000	0,0017182000	0,0015955000	79,40	480,68
I	6-4	0,0013727000	0,0015961000	0,0013763000	65,60	452,92
I	6-5	0,0010699000	0,0012525000	0,0012945000	55,71	462,08
I	6-6	0,0010298000	0,0011687000	0,0010104000	52,00	486,15
I	7-1	0,0031672000	0,0030886000	0,0031809000	130,78	415,76
I	7-2	0,0027718000	0,0028788000	0,0025408000	112,71	412,79
I	7-3	0,0018261000	0,0024444000	0,0022034000	95,41	442,13
I	7-4	0,0018555000	0,0019411000	0,0021608000	79,40	399,84
I	7-5	0,0021506000	0,0021922000	0,0020377000	65,60	308,44
I	7-6	0,0020160000	0,0021133000	0,0017943000	55,71	282,14
I	8-1	0,0050579000	0,0050317000	0,0051087000	149,35	294,80
I	8-2	0,0040482000	0,0011343000	0,0039082000	130,78	431,58
I	8-3	0,0035271000	0,0033175000	0,0032606000	112,71	334,61
I	8-4	0,0028724000	0,0035736000	0,0035339000	95,41	286,81
I	8-5	0,0022266000	0,0022856000	0,0023539000	79,40	346,92
I	8-6	0,0022481000	0,0025674000	0,0026895000	65,60	262,23
I	9-1	0,0067639000	0,0066789000	0,0061954000	168,24	257,01
I	9-2	0,0059191000	0,0050323000	0,0062211000	149,35	260,91
I	9-3	0,0048805000	0,0049327000	0,0046491000	130,78	271,28
I	9-4	0,0045385000	0,0052550000	0,0055845000	112,71	219,88
I	9-5	0,0038501000	0,0043889000	0,0046274000	95,41	222,46
I	9-6	0,0036252000	0,0032008000	0,0034014000	79,40	232,90
I	10-1	0,0068305000	0,0071079000	0,0065251000	187,36	274,67
I	10-2	0,0051596000	0,0053264000	0,0053190000	168,24	319,34
I	10-3	0,0049015000	0,0042966000	0,0045502000	149,35	325,89
I	10-4	0,0041254000	0,0046389000	0,0046490000	130,78	292,50
I	10-5	0,0054045000	0,0044899000	0,0047173000	112,71	231,41
I	10-6	0,0043512000	0,0037985000	0,0051624000	95,41	215,01
I	11-1	0,0074198000	0,0071426000	0,0073450000	206,65	282,99
I	11-2	0,0053567000	0,0052370000	0,0053616000	187,36	352,28
I	11-3	0,0050305000	0,0049821000	0,0048147000	168,24	340,40
I	11-4	0,0047169000	0,0047521000	0,0048085000	149,35	313,82
I	11-5	0,0047957000	0,0047742000	0,0048672000	130,78	271,76

I	11-6	0,0036929000	0,0035404000	0,0048672000	112,71	279,43
II	1-7	0,0025135000	0,0029359000	0,0026510000	130,78	484,35
II	1-8	0,0040795000	0,0043924000	0,0042872000	149,35	351,16
II	1-9	0,0044861000	0,0044465000	0,0045179000	168,24	375,24
II	1-10	0,0054458000	0,0053892000	0,0057862000	187,36	338,17
II	1-11	0,0059838000	0,0061595000	0,0060439000	206,65	340,87
II	2-7	0,0014595000	0,0013387000	0,0013171000	112,71	821,64
II	2-8	0,0017988000	0,0018249000	0,0020974000	130,78	685,78
II	2-9	0,0027930000	0,0025620000	0,0026121000	149,35	562,38
II	2-10	0,0044008000	0,0039897000	0,0040859000	168,24	404,54
II	2-11	0,0049223000	0,0045153000	0,0044537000	187,36	404,63
II	3-7	0,0011724000	0,0013362000	0,0012514000	95,41	761,25
II	3-8	0,0021811000	0,0023980000	0,0023906000	112,71	485,14
II	3-9	0,0023563000	0,0024402000	0,0025848000	130,78	531,53
II	3-10	0,0028052000	0,0029610000	0,0029754000	149,35	512,55
II	3-11	0,0039006000	0,0041385000	0,0040777000	168,24	416,55
II	4-7	0,0024340000	0,0024526000	0,0026179000	79,40	317,41
II	4-8	0,0028508000	0,0028000000	0,0027407000	95,41	341,10
II	4-9	0,0028149000	0,0027938000	0,0027407000	112,71	404,98
II	4-10	0,0034236000	0,0032363000	0,0033548000	130,78	391,76
II	4-11	0,0037964000	0,0042516000	0,0038743000	149,35	375,81
II	5-7	0,0014697000	0,0013584000	0,0013975000	65,60	465,73
II	5-8	0,0019591000	0,0019076000	0,0019940000	79,40	406,44
II	5-9	0,0024066000	0,0021950000	0,0024093000	95,41	408,26
II	5-10	0,0039062000	0,0040136000	0,0040022000	112,71	283,62
II	5-11	0,0054446000	0,0046422000	0,0051251000	130,78	257,92
II	6-7	0,0019056000	0,0010331000	0,0014358000	55,71	382,06
II	6-8	0,0020064000	0,0021075000	0,0021171000	65,60	315,84
II	6-9	0,0019349000	0,0017568000	0,0015616000	79,40	453,43
II	6-10	0,0024628000	0,0021708000	0,0021406000	95,41	422,53
II	6-11	0,0030412000	0,0026863000	0,0027244000	112,71	400,06
II	7-7	0,0017715000	0,0015497000	0,0015888000	52,00	317,72
II	7-8	0,0009603500	0,0011065000	0,0010808000	55,71	530,97
II	7-9	0,0013059000	0,0012826000	0,0011482000	65,60	526,67
II	7-10	0,0012108000	0,0013367000	0,0013189000	79,40	616,08
II	7-11	0,0019393000	0,0019200000	0,0018359000	95,41	502,58
II	8-7	0,0014910000	0,0017085000	0,0019949000	55,71	321,75
II	8-8	0,0008925200	0,0009635600	0,0008658100	52,00	573,13
II	8-9	0,0007203200	0,0007652300	0,0007768300	55,71	738,74
II	8-10	0,0011538000	0,0012518000	0,0011891000	65,60	547,47
II	8-11	0,0013516000	0,0012430000	0,0009672600	79,40	668,75
II	9-7	0,0035868000	0,0036304000	0,0039473000	65,60	176,27
II	9-8	0,0024039000	0,0026546000	0,0025111000	55,71	220,79

II	9-9	0,0016830000	0,0019716000	0,0019820000	52,00	276,76
II	9-10	0,0011848000	0,0014811000	0,0014568000	55,71	405,39
II	9-11	0,0013508000	0,0015616000	0,0015878000	65,60	437,31
II	10-7	0,0034208000	0,0039332000	0,0040573000	79,40	208,74
II	10-8	0,0019734000	0,0019501000	0,0015542000	65,60	359,27
II	10-9	0,0015715000	0,0016337000	0,0019437000	55,71	324,59
II	10-10	0,0009251200	0,0010546000	0,0009950300	52,00	524,41
II	10-11	0,0009973000	0,0008758300	0,0012607000	55,71	533,31
II	11-7	0,0045630000	0,0047847000	0,0045357000	95,41	206,17
II	11-8	0,0024664000	0,0023281000	0,0022543000	79,40	337,93
II	11-9	0,0024855000	0,0021710000	0,0023112000	65,60	282,45
II	11-10	0,0011941000	0,0013099000	0,0012310000	55,71	447,47
II	11-11	0,0009551700	0,0010455000	0,0009302500	52,00	532,26