



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE - ICEA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea

SVILUPPO DI UN NUOVO SOFTWARE DI ELABORAZIONE TOMOGRAFICA PER L'APPLICAZIONE DEL METODO DI INDAGINE SONICA PER LA DIAGNOSI STRUTTURALE DELLE MURATURE ESISTENTI

Relatrice:

Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi

Correlatori:

Prof.ssa Rita Deiana

Ing. Filippo Casarin

Ing. Nicola Monteforte

Laureando:

Luca Rosato

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto la Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi per avermi permesso di svolgere questo lavoro di tesi. Questa esperienza mi ha dato infatti la possibilità di entrare in contatto diretto con le interessanti attività di sperimentazione e di ricerca in ambito universitario relative alla tutela del patrimonio edilizio storico.

Inoltre, vorrei esprimere la mia sincera gratitudine alla Prof.ssa Rita Deiana per la grande disponibilità che ha dimostrato nei miei confronti e agli Ing. Filippo Casarin e Nicola Monteforte per avermi accompagnato nella conoscenza di questi argomenti.

Un sentito e particolare ringraziamento va agli Ing. Giulia Bettiol ed Elvis Cescatti per l'aiuto e il costante sostegno dimostrati nello sviluppo del lavoro.

Desidero inoltre esprimere riconoscenza anche a tutti i ricercatori, i dottorandi, gli assegnisti, i tecnici e i tesisti che in questo lungo periodo hanno contribuito, in varie forme, a dare sostanza a questa ricerca: Matteo, Paolo, Niccolò, Sabrina, Giovanni, Mattia, Matteo, Tommaso, Marta, Riccardo e a tutti coloro che ho incontrato e conosciuto durante questa esperienza.

Un profondo ringraziamento va a tutta la mia famiglia e a Elena per avermi sempre sostenuto durante questi anni universitari ed in particolar modo ai miei genitori, per avermi sempre fatto percepire la loro incondizionata fiducia.

Ai miei più sinceri amici e ai miei compagni di corso vanno i più vivi ringraziamenti per essermi sempre stati vicini e per gli splendidi momenti trascorsi assieme.

Si ringraziano inoltre i membri della Commissione di Laurea per l'attenzione dedicatami.

INDICE

INTRODUZIONE	XI
• OGGETTO DELLA RICERCA	XIII
• OBIETTIVI DELLA TESI	XIV
• STRUTTURA DELLA TESI	XV
• LAYOUT	XVI
1. NORMATIVA VIGENTE IN MATERIA DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI EDIFICI ESISTENTI	1
1.1 NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI 2008 E CIRCOLARE APPLICATIVA DEL 2 FEBBRAIO 2009, N. 617 - “ISTRUZIONI PER L’APPLICAZIONE DELLE NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI”	2
1.1.1 STIMA DEI LIVELLI DI CONOSCENZA E DEI FATTORI DI CONFIDENZA	4
1.1.1.1 DATI NECESSARI E IDENTIFICAZIONE DEL LIVELLO DI CONOSCENZA ...	4
1.1.1.2 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA	8
1.1.1.3 TIPOLOGIE E RELATIVI PARAMETRI MECCANICI DELLE MURATURE	11
1.2 DPCM DEL 9 FEBBRAIO 2011: “LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE E LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL PATRIMONIO CULTURALE CON RIFERIMENTO ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI DI CUI AL DECRETO DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI DEL 14 GENNAIO 2008”	17
1.2.1 PERCORSO DELLA CONOSCENZA	17
1.2.1 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA	22
1.3 OSSERVAZIONI	24
2. INDAGINI SUL PATRIMONIO EDILIZIO STORICO	25
2.1 PREMESSA	25

2.2	VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA	27
2.2.1	SCHEDA DI QUALITÀ MURARIA	27
2.3	CLASSIFICAZIONE DELLE PROVE E LIVELLI DI INDAGINE	30
2.4	INDAGINI SUI MATERIALI	32
2.4.1	PRELIEVO DI MATTONI, PIETRE E MALTE	32
2.4.2	PROVE SULLE MALTE	33
2.4.3	PROVE SU PIETRE E MATTONI NUOVI O DANNEGGIATI	34
2.5	INDAGINI SULLE MURATURE	35
2.5.1	PROVE DISTRUTTIVE	37
2.5.1.1	PROVA DI COMPRESSIONE DIRETTA MONOASSIALE	38
2.5.1.2	PROVA DI COMPRESSIONE DIAGONALE	40
2.5.1.3	PROVA DI TAGLIO-COMPRESSIONE	42
2.5.2	PROVE DEBOLMENTE DISTRUTTIVE	45
2.5.2.1	MARTINETTI PIATTI SINGOLI E DOPPI	46
2.5.2.2	CAROTAGGI	50
2.5.2.3	SHOVE TEST	52
2.5.2.4	PROVA DI PENETRAZIONE	53
2.5.2.5	PULL-OUT TEST	54
2.5.2.6	PROVA DILATOMETRICA	54
2.5.3	PROVE NON DISTRUTTIVE	55
2.5.3.1	RILIEVI, MAPPATURE E RIPRESE FOTOGRAFICHE	57
2.5.3.2	MAGNETOMETRIA	58
2.5.3.3	ENDOSCOPIA	58
2.5.3.4	RADIOGRAFIA	59
2.5.3.5	TEST RADAR E GEORADAR	60
2.5.3.6	ELABORAZIONE TOMOGRAFICA	63
2.5.3.7	TERMOGRAFIA	65
2.5.3.8	PROVA SCLEROMETRICA	67
2.5.3.9	PROVE DINAMICHE	69
2.6	OSSERVAZIONI	70
3.	INDAGINI SONICHE	73
3.1	GENERALITÀ	73
3.2	STATO DELL'ARTE	77

3.3	MODALITÀ DI ESECUZIONE	79
3.3.1	PROVE DIRETTE O IN TRASPARENZA	81
3.3.2	PROVE INDIRETTE O SUPERFICIALI	82
3.3.3	PROVE TOMOGRAFICHE	82
3.4	STRUMENTAZIONE DI PROVA	83
3.4.1	MARTELLO STRUMENTATO	85
3.4.2	ACCELEROMETRO	86
3.4.3	AMPLIFICATORE DI POTENZA	88
3.4.4	CONVERTITORE ANALOGICO/DIGITALE	89
3.4.5	OSCILLOSCOPIO	90
3.4.6	SISTEMA PXI	90
3.4.7	SOFTWARE DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE	95
3.4.8	CAVI DI COLLEGAMENTO	98
3.5	OSSERVAZIONI	99
4.	RACCOLTA ED ANALISI DI PRECEDENTI SPERIMENTAZIONI	103
4.1	ANALISI DELLE CONDIZIONI STATICHE DELLA BASILICA DI SAN MARCO IN VENEZIA (ROSSI P.P., 1995)	104
4.1.1	GENERALITÀ	104
4.1.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	105
4.2	APPLICAZIONE DELLA TOMOGRAFIA SONICA NEI PROBLEMI DI DIAGNOSI STRUTTURALE (MONTEFORTE, 1998)	106
4.2.1	GENERALITÀ	106
4.2.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	108
4.3	INDAGINI SPERIMENTALI SULL'EFFICACIA DI TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO DI MURATURE STORICHE IN PIETRA (DA PORTO, 1999)	111
4.3.1	GENERALITÀ	111
4.3.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	114
4.4	ANALISI STRUTTURALE SULLA TORRE DI PIAZZA IN VICENZA (BIASIOLO, 2001)	116
4.4.1	GENERALITÀ	116
4.4.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	118
4.5	NON DESTRUCTIVE TESTING APPLIED TO HISTORIC BUILDINGS: THE CASE OF SOME SICILIAN CHURCES (BINDA ET AL., 2001)	122
4.5.1	GENERALITÀ	123

4.5.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	126
4.6	ANALISI DEL COMPORTAMENTO STATICO DELLA FACCIATA DELLA CHIESA DI SANTA MARIA DEL CARMINE IN PADOVA (LEVORATO, 2002)	128
4.6.1	GENERALITÀ	128
4.6.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	129
4.7	USO DI METODI NON DISTRUTTIVI PER LA VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DI EDIFICI STORICI. APPLICAZIONE ALL'ALTES MUSEUM DI BERLINO (MONDIN, 2004)	132
4.7.1	GENERALITÀ	132
4.7.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	133
4.8	EXPERIMENTAL TESTS ON IRREGULAR MASONRY (DA PORTO ET AL., 2004)	135
4.8.1	GENERALITÀ	135
4.8.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	138
4.9	INDAGINI STRUTTURALI E VERIFICA DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DELLA CHIESA DI SANTA MARIA ASSUNTA A REGGIO EMILIA (SEMENZATO, 2005)	143
4.9.1	GENERALITÀ	143
4.9.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	145
4.10	INDAGINI SONICHE PER LA DIAGNOSI DI STRUTTURE MURARIE A TORRE (SCODELLER, 2006)	147
4.10.1	TORRE DELLA TROMBA - GENERALITÀ	147
4.10.2	TORRE DELLA TROMBA - RISULTATI DELLE INDAGINI	149
4.10.3	CAMPANILE DI SAN ZENO - GENERALITÀ	152
4.10.4	CAMPANILE DI SAN ZENO - RISULTATI DELLE INDAGINI	153
4.11	INDAGINI SPERIMENTALI CON PROVE SONICHE SU MURATURE IN PIETRA CONSOLIDATE MEDIANTE INIEZIONI (BRESOLATO E PASIN, 2009)	155
4.11.1	PANNELLI MURARI ISOLATI - GENERALITÀ	156
4.11.2	PANNELLI MURARI ISOLATI - RISULTATI DELLE INDAGINI	158
4.11.3	MODELLI DI EDIFICIO - GENERALITÀ	162
4.11.4	MODELLI DI EDIFICIO - RISULTATI DELLE INDAGINI	164
4.12	VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI INIEZIONI PER IL CONSOLIDAMENTO DI MURATURA IN PIETRA MEDIANTE PROVE NON DISTRUTTIVE (FATTORI E SCAGGIANTE, 2011)	172
4.12.1	GENERALITÀ	172

4.12.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	175
4.13	VALUTAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ DI PROVE DI INDAGINE SPERIMENTALE A DIVERSO GRADO DI INVASIVITÀ SU MURATURA IN PIETRA A TRE PARAMENTI (ZANCHETTA, 2013)	181
4.13.1	GENERALITÀ	182
4.13.2	RISULTATI DELLE INDAGINI	183
4.14	OSSERVAZIONI	196
5.	DEFINIZIONE DELLE PROBLEMATICHE	199
5.1	GENERALITÀ	199
5.2	FASI PRELIMINARI	200
5.3	FASE DI ACQUISIZIONE	202
5.3.1	MAGLIA DI ACQUISIZIONE	203
5.3.1.1	CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE	205
5.3.1.2	CONSEGUENZE, SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE	206
5.3.2	MODALITÀ DI ACQUISIZIONE	208
5.3.2.1	CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE	208
5.3.2.2	CONSEGUENZE, SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE	209
5.3.3	SOFTWARE DI ACQUISIZIONE	214
5.3.3.1	PROBLEMATICHE DELLA PRIMA VERSIONE DEL SOFTWARE	214
5.3.3.2	SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE	217
5.3.3.3	PROBLEMATICHE DELLA SECONDA VERSIONE DEL SOFTWARE	222
5.3.3.4	SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE	225
5.4	FASE DI ELABORAZIONE	226
5.4.1	INDIVIDUAZIONE DEI TEMPI DI VOLO	226
5.4.2	CREAZIONE DEL FOGLIO DI CALCOLO	227
5.4.3	ELABORAZIONE DEI DATI	231
5.4.3.1	FASI PRELIMINARI	231
5.4.3.2	ELABORAZIONE	233
5.4.3.3	CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE	236
5.4.3.4	SOLUZIONE IMPLEMENTATA	238
5.5	FASE DI RESTITUZIONE	238
5.5.1	FORMATTAZIONE DEI DATI DI INPUT	239
5.5.2	RESTITUZIONE DELL’IMMAGINE TOMOGRAFICA	239

5.6	OSSERVAZIONI	240
6.	NUOVO SOFTWARE DI ELABORAZIONE TOMOGRAFICA	243
6.1	PREMESSA	243
6.2	GENERALITÀ	244
6.3	LINGUAGGIO DI PROGRAMMAZIONE PYTHON	245
6.4	GESTIONE DEI DATI SONICI	246
6.4.1	FOGLIO 1: GEOMETRIA DEI PUNTI DI MISURAZIONE	247
6.4.2	FOGLIO 2: PERCORSI E VELOCITÀ	250
6.4.3	FOGLIO 3: MATRICE DI RAY TRACING	253
6.4.4	FOGLIO 4: MATRICE DELLE VELOCITÀ	254
6.4.5	FOGLIO5: DATI SURFER	255
6.5	GEOMETRIA DELLA SEZIONE E DELLE MISURE	256
6.6	SOFTWARE DI ELABORAZIONE	258
6.6.1	INTERFACCIA GRAFICA	258
6.6.1.1	BARRA DEI MENU	258
6.6.1.2	INTERFACCIA DI GESTIONE DEI DATI	261
6.6.1.3	INTERFACCIA DI VISUALIZZAZIONE DEI DATI	264
6.6.2	TOMOGRAFIA SONICA COME PROBLEMA INVERSO	265
6.6.3	MATRICE DI RAY TRACING LINEARE	267
6.6.4	RISOLUZIONE DEL PROBLEMA TOMOGRAFICO	275
6.6.4.1	ALGORITMO DI KACZMARZ	276
6.6.4.2	TECNICA DI RICOSTRUZIONE ALGEBRICA (ART)	277
6.6.4.3	TECNICA ITERATIVA DI RICOSTRUZIONE SIMULTANEA (SIRT)	279
6.6.4.4	PROCEDURA DI RISOLUZIONE	279
6.6.5	RESTITUZIONE DELL'IMMAGINE TOMOGRAFICA	288
6.7	OSSERVAZIONI	291
7.	VERIFICHE E SPERIMENTAZIONI	295
7.1	PROVA TOMOGRAFICA SU LASTRA IN CALCESTRUZZO DI CARATTERISTICHE E MORFOLOGIA NOTE	295
7.1.1	LASTRA PER IL TEST	296
7.1.2	ESECUZIONE DELLA PROVA	298

7.1.3	ELABORAZIONE DEI DATI	299
7.1.3.1	SOFTWARE TOMOGRAFIA	299
7.1.3.2	SOFTWARE TOMOGRAFIANEW	301
7.1.3.3	CONFRONTO TRA SOFTWARE	306
7.2	PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI DUE PILASTRI DI PALAZZO LIVIANO A PADOVA	307
7.2.1	ESECUZIONE DELLA PROVA	308
7.2.2	ELABORAZIONE DEI DATI	308
7.2.2.1	SOFTWARE TOMOGRAFIA	308
7.2.2.2	SOFTWARE TOMOGRAFIANEW	315
7.2.2.3	CONFRONTO TRA SOFTWARE	321
7.3	PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN AGGREGATO EDILIZIO A L'AQUILA	322
7.3.1	PIANO DELLE PROVE	324
7.3.2	ESECUZIONE DELLE PROVE	326
7.3.3	ELABORAZIONE DEI DATI	328
7.3.3.1	SOFTWARE TOMOGRAFIA	328
7.3.3.2	SOFTWARE TOMOGRAFIANEW	336
7.3.3.3	CONFRONTO TRA SOFTWARE	346
7.4	PROVA TOMOGRAFICA PER LA VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELLA MAGLIA DI DISCRETIZZAZIONE SUI RISULTATI FINALI	349
7.4.1	ESECUZIONE DELLA PROVA	350
7.4.2	ELABORAZIONE DEI DATI	351
7.4.2.1	SOFTWARE TOMOGRAFIA	351
7.4.2.2	SOFTWARE TOMOGRAFIANEW	353
7.4.2.3	CONFRONTO TRA I RISULTATI	360
7.5	PROVE TOMOGRAFICHE PER LA VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DEGLI STRUMENTI DI BATTITURA	361
7.5.1	ESECUZIONE DELLE PROVE	362
7.5.2	ELABORAZIONE DEI DATI	362
7.5.3	ANALISI DEI RISULTATI	370
7.6	PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA	372
7.6.1	PIANO DELLE PROVE	373
7.6.2	ESECUZIONE DELLE PROVE	373

7.6.3	ELABORAZIONE DEI DATI	375
7.6.4	ANALISI DEI RISULTATI	383
7.7	OSSERVAZIONI	384
8.	CONCLUSIONI	387
8.1	ANALISI DI PRECEDENTI SPERIMENTAZIONI	388
8.2	DEFINIZIONE DELLE PROBLEMATICHE	389
8.3	NUOVO SOFTWARE DI ELABORAZIONE TOMOGRAFICA	390
8.4	VERIFICHE E SPERIMENTAZIONI	391
	APPENDICE	393
A.	MARTELLO STRUMENTATO o86C03	394
B.	MARTELLO STRUMENTATO MODELLO o86D20	395
C.	MARTELLO STRUMENTATO MODELLO o86D20	396
D.	ACCELEROMETRO SISMICO MODELLO 393B12	397
E.	CHASSIS NI PXI-1042Q	398
F.	CONTROLLER EMBEDDED NI PXI-8102	399
G.	SISTEMA INTEGRATO NI PMA-1115	401
H.	SCHEDA DI ACQUISIZIONE NI PCI-4472	401
I.	SCHEDA DI ACQUISIZIONE NI PCI-4472b	403
	BIBLIOGRAFIA	405
	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	413

INTRODUZIONE

L'Italia e l'Europa dispongono di un vasto patrimonio edilizio storico, costituito in gran parte da costruzioni in muratura. A causa dei numerosi eventi sismici, degli incontrollati interventi antropici e del naturale invecchiamento, questi corpi di fabbrica devono sempre più spesso essere sottoposti ad interventi mirati di tutela che ne permettono la conservazione e ne garantiscano la fruibilità e la sicurezza. Per questo motivo, negli ultimi anni si è fatto sempre più pressante il problema del recupero edilizio e del restauro, anche in relazione alle sempre più stringenti evoluzioni delle normative sismiche nazionali, che hanno classificato come sismico l'intero territorio italiano (Ordinanza 3274 del 25.03.2003 modificata dall'OPCM 3431 del 03.05.05, Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14.01.08, Norme Tecniche per le Costruzioni 2012 di prossima pubblicazione).

Allo scopo di favorire la massima efficacia delle operazioni sopracitate, risulta essere di fondamentale importanza la predisposizione di campagne di indagine conoscitive volte alla determinazione dei parametri caratteristici delle murature. Infatti solo per mezzo dei risultati ottenuti da esse è possibile definire interventi idonei alla salvaguardia del patrimonio edilizio.

La diagnosi dello stato di conservazione degli edifici presuppone una profonda conoscenza dei materiali e delle strutture. Alle informazioni qualitative ricavabili attraverso le semplici ispezioni visive e le diverse tipologie di rilievi (geometrici, del quadro fessurativo e del degrado superficiale) è necessario affiancare i dati quantitativi relativi alle caratteristiche fisico-chimiche dei materiali e a quelle meccaniche degli elementi strutturali.

I dissesti più comunemente osservati riguardano meccanismi globali (rotazioni di porzioni di edifici con conseguente fessurazione estesa delle pareti) e meccanismi locali che possono interessare particolari elementi strutturali (ribaltamento di intere pareti fuori del piano, scorrimenti rigidi degli orizzontamenti) o coinvolgere la resistenza del muro in funzione della direzione della sollecitazione rispetto al piano della parete (rottture per taglio e pressoflessione, ribaltamento di porzioni della facciata o espulsione dei paramenti).

Nella scelta della tipologia di indagine va tenuto conto del fatto che le murature storiche sono spesso fortemente disomogenee. Nella fattispecie, queste sono essenzialmente costituite da elementi lapidei non regolari (blocchi non lavorati, spesso di forma irregolare, di diverse dimensioni ed anche di diverso materiale) generalmente disposti su più paramenti accostati o mal collegati e da malte di scarsa qualità, sia per composizione che per resistenza. Per questo tipo di murature, sovente mal collegate tra loro e con gli orizzontamenti, gli effetti dovuti all'incuria, al tempo, o ad eventi eccezionali possono creare gravi danni.

Le loro caratteristiche meccaniche non possono quindi essere direttamente correlate a quelle dei singoli componenti (mattoni, pietre, giunti di malta) e, per tale motivo, la definizione del loro comportamento strutturale implica l'implementazione di una campagna di studi approfondita e variegata.

Il progetto di una tecnica di consolidamento passa attraverso alcune indispensabili fasi di analisi e studio, sintetizzabili nei seguenti punti:

- Conoscenza del supporto originario (diagnosi): Sia in relazione ai singoli costituenti (malta, elementi resistenti) che come materiale composito (tipologia e tessitura muraria, morfologia). Tale fase si avvale di alcune metodologie di indagine in sito e delle prove di laboratorio, che saranno trattate più approfonditamente nei capitoli successivi.
- Conoscenza del comportamento della struttura muraria: Sia prima che dopo l'intervento. La conoscenza della costruzione e del suo comportamento sotto i carichi applicati consente di mettere in luce le possibili deficienze strutturali per la scelta dell'intervento più adeguato, in relazione alle prestazioni volute. È poi importante non sottovalutare gli

effetti dell'intervento sul comportamento originario della costruzione, al fine di prevedere, ove possibile, il funzionamento della muratura consolidata, di valutare le eventuali inefficienze dei metodi di consolidamento e di evitare il peggioramento delle già precarie condizioni strutturali.

- **Scelta dell'intervento:** La scelta riguarda l'impiego di materiali compatibili con il supporto murario, in relazione a tecniche di consolidamento tali da migliorare la prestazione strutturale ma senza alterare in maniera eccessiva il comportamento originario.
- **Esecuzione della tecnica:** La bontà di un intervento dipende in maniera fondamentale, oltre che da un'adeguata progettazione, dalla sua corretta esecuzione. La scarsa accuratezza nella pratica costruttiva, dovuta anche alla mancanza di direttive specifiche adeguate, può inficiare del tutto la tecnica o condurre a situazioni consolidate peggiorative dell'esistente. Le modalità esecutive correntemente impiegate sono estremamente variabili, in funzione delle tradizioni e dell'esperienza degli operatori locali, e sono spesso operative in assenza di controlli di necessità ed efficacia.
- **Verifica dell'efficacia dell'intervento:** La fase di controllo dell'effettivo miglioramento prestazionale della muratura per effetto dell'intervento si avvale del supporto offerto dalla sperimentazione in sito, volta a valutare la resistenza a compressione e a taglio della muratura prima e dopo il consolidamento. Agendo sull'esistente e nella prospettiva del recupero, le prove sperimentali, si basano su metodologie d'indagine a carattere non distruttivo o debolmente distruttivo. La validità di tali tecniche per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità della muratura, tuttavia, va confermata con i risultati disponibili relativi a prove distruttive.

OGGETTO DELLA RICERCA

Oggetto della tesi è una delle metodologie di indagine non distruttiva maggiormente utilizzate nelle fasi di diagnosi della qualità muraria e di verifica

dell'efficacia degli interventi di consolidamento: l'indagine sonica. Il lavoro, sulla base dei risultati della tesi sviluppata dall'ingegner N. Monteforte nel 1998 e di alcuni casi studio individuati in letteratura, è consistito nello sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonica nella diagnosi strutturale delle murature esistenti. A questo lavoro sono seguiti una necessaria revisione dei processi di acquisizione ed elaborazione dei dati sonici ed una serie di sperimentazioni volte sia alla verifica dell'effettivo raggiungimento degli obiettivi stabiliti che all'individuazione di nuovi fronti di sviluppo della metodologia tomografica.

OBIETTIVI DELLA TESI

Questo lavoro di Tesi è inserito in un più ampio progetto di ricerca il cui obiettivo consiste nella creazione di una procedura veloce ed automatizzata di acquisizione ed elaborazione dei dati sonici tomografici che consenta la rapida estrazione delle informazioni utili per formulare ipotesi sulla qualità della muratura indagata e sugli eventuali interventi di consolidamento necessari.

Il maggior difetto della metodologia, al di là degli evidenti limiti fisici legati alla propagazione delle onde soniche nei solidi, consiste infatti nell'eccessiva lunghezza dei tempi di esecuzione della prova e di elaborazione dei dati risultanti. Questo è dovuto sia alla tipologia di strumentazione utilizzata (comunque tecnologicamente molto avanzata e difficilmente migliorabile), che ai software di gestione e calcolo, limitati o eccessivamente complessi.

Vista l'effettiva complessità del problema posto, all'interno del percorso di rinnovamento sono stati individuati una serie di sotto-obiettivi singolarmente raggiungibili. Nello specifico, in questo lavoro di Tesi sono stati affrontati e sviluppati in maniera preponderante due argomenti:

- L'analisi completa dell'attuale procedura di esecuzione della prova, con l'individuazione di tutti i problemi riscontrabili nelle diverse fasi del processo e la determinazione di possibili soluzioni pratiche;

- Lo sviluppo di un nuovo software di elaborazione dei dati tomografici che minimizzi il tempo di analisi delle informazioni e di restituzione dei risultati.

STRUTTURA DELLA TESI

In relazione all'approccio seguito per lo svolgimento del lavoro, è possibile suddividere il documento in tre parti:

1. Parte prima: Trattazione degli attuali metodi di indagine applicabili alle murature storiche, con particolare riferimento alle indagini soniche e analisi delle sperimentazioni riguardanti la metodologia tomografica;
2. Parte seconda: Analisi dei problemi e delle possibili soluzioni riguardanti il processo di esecuzione delle prove soniche tomografiche e sviluppo di un nuovo software di elaborazione dei dati;
3. Parte terza: Verifica della correttezza delle soluzioni individuate e del funzionamento del nuovo software attraverso lo svolgimento di una serie di campagne di indagine.

I capitoli iniziali mirano a fornire una panoramica generale sull'attuale stato della conservazione e del restauro in campo edilizio. Nel primo capitolo viene presentato il quadro normativo attualmente vigente in campo nazionale in merito allo studio del costruito esistente. Nel capitolo successivo, dopo una breve introduzione dedicata all'inquadramento del lavoro complessivo e del suo contesto di applicazione, vengono espone le varie tecniche di indagine disponibili nell'ambito della conservazione. Per ogni metodologia sono riportati la descrizioni, gli aspetti peculiari, i vantaggi e gli svantaggi legati all'utilizzo. Alla modalità di indagine sonica è stato invece riservato un capitolo a parte, nella fattispecie il terzo, poiché essa costituisce l'argomento centrale di questo lavoro. Nel quarto capitolo, che conclude la prima parte della tesi, vengono invece esposti, con particolare riferimento a diverse esperienze svolte presso l'Università di Padova, alcuni recenti studi inerenti le indagini soniche tomografiche. Gli esiti di queste ricerche risultano

essere indispensabili per l'individuazione e la valutazione dell'attuale livello di conoscenza dell'argomento.

La seconda parte del documento rappresenta il fulcro dell'intero lavoro di tesi. Il quinto capitolo è dedicato all'attuale processo di esecuzione delle prove tomografiche, con l'individuazione delle problematiche che lo affliggono e delle possibili soluzioni immediatamente attuabili o di futuro sviluppo. Nel capitolo successivo viene invece presentato il nuovo software di elaborazione delle prove tomografiche, appositamente realizzato con lo scopo di raggiungere il massimo livello di automazione del processo esecutivo.

Il settimo e l'ottavo capitolo, coincidenti con la terza ed ultima parte della tesi, presentano invece i risultati di alcuni test realizzati sul nuovo software con lo scopo di verificarne il corretto funzionamento e le conclusioni derivanti dall'analisi dell'intero lavoro svolto.

LAYOUT

PARTE PRIMA	
Capitolo 1	Disposizioni attualmente vigenti in Italia nell'ambito della valutazione della sicurezza degli edifici esistenti, con particolare riferimento alla fase conoscitiva della fabbrica
Capitolo 2	Criteri di valutazione delle murature e metodologie di indagine conoscitiva
Capitolo 3	Indagini soniche, con particolare riferimento ai fondamenti teorici, alle modalità di esecuzione e alle strumentazioni di prova
Capitolo 4	Sperimentazioni relative all'impiego della metodologia di indagine sonica tomografica.
PARTE SECONDA	
Capitolo 5	Problematiche relative alle diverse fasi del procedimento di indagine e possibili soluzioni di immediata o futura applicazione
Capitolo 6	Nuovo software di elaborazione dei dati sonici tomografici
PARTE TERZA	
Capitolo 7	Campagne di indagine volte alla verifica del funzionamento del software
Capitolo 8	Conclusioni

CAPITOLO 1

NORMATIVA VIGENTE IN MATERIA DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI EDIFICI ESISTENTI

Nel presente capitolo vengono presentate alcune delle disposizioni attualmente vigenti in Italia nell'ambito della valutazione della sicurezza degli edifici esistenti, con particolare riferimento alla fase conoscitiva della fabbrica e alla definizione dei livelli di conoscenza. Nello specifico, saranno analizzate alcune prescrizioni contenute nelle seguenti normative:

- *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)*;
- Circolare n.617 del 2 febbraio 2009: *“Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008”*;
- DPCM del 9 febbraio 2011: *“Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008”*.

Le prime due norme forniscono indicazioni in merito all'analisi di generici edifici esistenti mentre l'ultima fa riferimento, nello specifico, a tutti i beni culturali tutelati.

È importante ricordare che, data la notevole varietà delle tipologie strutturali e la conseguente difficoltà nella standardizzazione dei metodi di verifica e di progetto degli interventi, la normativa italiana prescrive un approccio cosiddetto “prestazionale” e fornisce solo poche regole ed indicazioni di carattere generale, al

fine di garantire la validità e la costante adattabilità delle fasi di analisi, progettazione ed esecuzione.

Nei paragrafi seguenti verranno descritte principalmente le procedure per la valutazione della sicurezza di edifici esistenti, con particolare riferimento alla fase conoscitiva dei corpi di fabbrica e alla definizione dei Livelli di Conoscenza.

1.1 NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI 2008 E CIRCOLARE APPLICATIVA DEL 2 FEBBRAIO 2009, N. 617 - “ISTRUZIONI PER L’APPLICAZIONE DELLE NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI”

I Capitoli 8 delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni e della relativa Circolare definiscono i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti.

In merito alle prime due voci, le NTC 2008 individuano i seguenti aspetti di cui è necessario tenere conto:

- *La costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;*
- *Possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;*
- *La costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;*
- *Le strutture possono presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria. (NTC 2008)*

Sulla base di queste considerazioni appare evidente come qualsiasi ipotesi relativa alla valutazione della sicurezza e al progetto degli interventi possa essere affetta da un grado di incertezza spesso maggiore rispetto a quello degli edifici di nuova progettazione. Le modalità di verifica delle costruzioni più recenti sono infatti basate sull’utilizzo di coefficienti di sicurezza parziali che, concepiti e calibrati per tener conto delle incertezze legate alla progettazione e alla concreta

realizzazione dell'edificio, consentono di gestire in maniera più corretta gli effetti delle azioni e le caratteristiche meccaniche dei materiali.

Nel caso degli edifici esistenti, per garantire una maggiore qualità dell'indagine, sono stati introdotti dei particolari Fattori di confidenza utili per l'implementazione delle verifiche di sicurezza. Nello specifico questi indici, calcolati in funzione del livello di conoscenza conseguito durante le campagne di indagine, sono utilizzati per ridurre i valori medi di resistenza dei materiali costituenti la struttura e rendere quindi i modelli di calcolo molto più simili alle reali condizioni degli edifici.

Dopo aver specificato le situazioni in cui si rivela essere necessaria la procedura di valutazione della sicurezza e aver individuato i possibili interventi volti all'adeguamento o al miglioramento della capacità resistiva dei corpi di fabbrica, le NTC impongono e descrivono le principali procedure di raccolta dei dati indispensabili per la corretta valutazione della sicurezza:

1. Analisi storico-critica: *Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato. (NTC 2008)*
2. Rilievo: *Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica. Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi. Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno. (NTC 2008)*
3. Caratterizzazione meccanica dei materiali: *Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su indagini*

sperimentali. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l'impatto in termini di conservazione del bene. I valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono valutati sulla base delle prove effettuate sulla struttura e prescindono dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni. (NTC 2008)

1.1.1 STIMA DEI LIVELLI DI CONOSCENZA E DEI FATTORI DI CONFIDENZA

1.1.1.1 DATI NECESSARI E IDENTIFICAZIONE DEL LIVELLO DI CONOSCENZA

Nell'appendice al Capitolo 8 contenuta nella Circolare applicativa n.617, vengono forniti i dati necessari all'identificazione del livello di conoscenza:

- *La conoscenza della costruzione in muratura oggetto della verifica è di fondamentale importanza ai fini di una adeguata analisi, e può essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, dell'analisi storica e delle indagini sperimentali. Tali operazioni saranno funzione degli obiettivi preposti ed andranno ad interessare tutto o in parte la costruzione, a seconda della ampiezza e della rilevanza dell'intervento previsto. (Circolare n.617 NTC 2008)*

Lo studio delle caratteristiche del corpo di fabbrica è volto alla definizione di un modello teorico che consenta di formulare sia un'interpretazione qualitativa che una valutazione quantitativa del funzionamento strutturale. Il grado di attendibilità di tale modello risulta essere direttamente proporzionale al livello di approfondimento delle indagini e alla quantità e qualità dei dati disponibili.

Gli elementi di cui, secondo norma, è necessario reperire il maggior numero di informazioni sono:

1. Geometria: *La conoscenza della geometria strutturale di edifici esistenti in muratura deriva di regola dalle operazioni di rilievo. Tali operazioni comprendono il rilievo, piano per piano, di tutti gli elementi in muratura, incluse eventuali nicchie, cavità, canne fumarie, il rilievo delle volte (spessore*

e profilo), dei solai e della copertura (tipologia e orditura), delle scale (tipologia strutturale), la individuazione dei carichi gravanti su ogni elemento di parete e la tipologia delle fondazioni. La rappresentazione dei risultati del rilievo viene effettuata attraverso piante, alzati e sezioni. Viene inoltre rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, classificando possibilmente ciascuna lesione secondo la tipologia del meccanismo associato (distacco, rotazione, scorrimento, spostamenti fuori del piano, etc.), e deformativo (evidenti fuori piombo, rigonfiamenti, depressioni nelle volte, etc.). (Circolare n.617 NTC 2008)

2. Dettagli costruttivi: *I dettagli costruttivi da esaminare sono relativi ai seguenti elementi:*

- *Qualità del collegamento tra pareti verticali;*
- *Qualità del collegamento tra orizzontamenti e pareti ed eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento;*
- *Esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture;*
- *Presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad eliminare le spinte eventualmente presenti;*
- *Presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità;*
- *Tipologia della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza riempimento a sacco, con o senza collegamenti trasversali, etc.), e sue caratteristiche costruttive (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare, etc.). (Circolare n.617 NTC 2008)*

Le verifiche dei dettagli costruttivi relative alle costruzioni esistenti in muratura si distinguono in:

- *Verifiche in-situ limitate: Sono basate su rilievi di tipo visivo effettuati ricorrendo, generalmente, a rimozione dell'intonaco e saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. I dettagli costruttivi di cui ai punti a) e b) possono essere valutati anche sulla base di una conoscenza*

appropriata delle tipologie dei solai e della muratura. In assenza di un rilievo diretto, o di dati sufficientemente attendibili, è opportuno assumere, nelle successive fasi di modellazione, analisi e verifiche, le ipotesi più cautelative; (Circolare n.617 NTC 2008)

- *Verifiche in-situ estese ed esaustive: Sono basate su rilievi di tipo visivo, effettuati ricorrendo, generalmente, a saggi nella muratura che consentano di esaminarne le caratteristiche sia in superficie che nello spessore murario, e di ammorsamento tra muri ortogonali e dei solai nelle pareti. L'esame degli elementi di cui ai punti da a) ad f) è opportuno sia esteso in modo sistematico all'intero edificio. (Circolare n.617 NTC 2008)*

La determinazione delle effettive componenti resistenti del corpo di fabbrica, del loro stato qualitativo e delle reciproche interazioni ottenuta attraverso l'implementazione delle suddette analisi, risulta indispensabile nella successiva fase diagnostica per consentire l'individuazione dell'origine e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'edificio.

1. *Proprietà dei materiali:* *Particolare attenzione è riservata alla valutazione della qualità muraria, con riferimento agli aspetti legati al rispetto o meno della "regola dell'arte". [...] Di particolare importanza risulta la presenza o meno di elementi di collegamento trasversali (es. diatoni), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la tessitura, l'orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la qualità e consistenza della malta. Di rilievo risulta anche la caratterizzazione di malte (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, livello di carbonatazione), e di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) mediante prove sperimentali. Malte e pietre sono prelevate in situ, avendo cura di prelevare le malte all'interno (ad almeno 5-6 cm di profondità nello spessore murario). (Circolare n.617 NTC 2008)*

Le indagini sulle proprietà dei materiali relative alle costruzioni esistenti in muratura si distinguono in:

- *Indagini in-situ limitate: Servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute dalla letteratura, o dalle regole in vigore all'epoca della costruzione, e per individuare la tipologia della muratura. Sono basate su esami visivi della superficie muraria condotti dopo la rimozione di una zona di intonaco di almeno 1m x 1m, al fine di individuare forma e dimensione dei blocchi di cui è costituita e da eseguirsi in corrispondenza degli angoli. Importante è anche valutare le ammorsature tra le pareti murarie e verificare la capacità degli elementi murari di assumere un comportamento monolitico in presenza delle azioni, tenendo conto della qualità della connessione interna e trasversale attraverso saggi localizzati, che interessino lo spessore murario. (Circolare n.617 NTC 2008)*
- *Indagini in-situ estese: Le indagini di cui al punto precedente sono effettuate in maniera estesa e sistematica, con saggi superficiali ed interni per ogni tipo di muratura presente. Prove con martinetto piatto doppio e prove di caratterizzazione della malta (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, etc.), e eventualmente di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) consentono di individuare la tipologia della muratura. È opportuna una prova per ogni tipo di muratura presente. Metodi di prova non distruttivi (prove soniche, prove sclerometriche, penetrometriche per la malta, etc.) possono essere impiegati a complemento delle prove richieste. (Circolare n.617 NTC 2008)*
- *Indagini in-situ esaustive: Servono per ottenere informazioni quantitative sulla resistenza del materiale. In aggiunta alle verifiche visive, ai saggi interni ed alle prove di cui ai punti precedenti, si effettua una ulteriore serie di prove sperimentali che, per numero e qualità, siano tali da consentire di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura. La misura delle caratteristiche meccaniche della muratura si ottiene mediante esecuzione di prove, in situ o in laboratorio (su elementi non disturbati prelevati dalle strutture dell'edificio). Le prove*

possono in generale comprendere prove di compressione diagonale su pannelli o prove combinate di compressione verticale e taglio. Metodi di prova non distruttivi possono essere impiegati in combinazione, ma non in completa sostituzione di quelli sopra descritti. (Circolare n.617 NTC 2008)

L'esame della qualità muraria e l'eventuale valutazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche, possibili grazie all'esecuzione delle indagini sopra descritte, hanno come finalità principale quella di stabilire se la muratura in esame presenti un comportamento strutturale idoneo a sostenere le azioni statiche e dinamiche prevedibili per l'edificio in oggetto.

Nonostante il rilievo visivo e le semplici indagini non distruttive già consentano di esprimere un giudizio in merito alla qualità dei materiali e al loro degrado, si rivela spesso necessaria, ai fini della modellazione del comportamento strutturale, la conoscenza dei parametri meccanici di deformabilità e resistenza sia dei singolo materiali che dell'intero pannello murario. La misura diretta di questi indicatori, in particolare di quelli di resistenza, rende indispensabile l'esecuzione di prove debolmente distruttive o distruttive, anche se su porzioni limitate della muratura.

Al termine dei paragrafi dedicati alla descrizione dei dati necessari ai fini della stima dei Livelli di Conoscenza e dei Fattori di Confidenza, la Circolare n.617 prescrive che:

- *I risultati delle prove debbano essere esaminati e considerati nell'ambito di un quadro di riferimento generale, che tenga conto dei risultati delle prove sperimentali disponibili in letteratura sino a quel momento per le tipologie murarie in oggetto e che consenta di valutare, anche in termini statistici, l'effettiva rappresentatività dei valori trovati. (Circolare n.617 NTC 2008)*

1.1.1.2 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Con riferimento al Livello di Conoscenza acquisito, la Circolare definisce i seguenti Fattori di Confidenza:

- *Il livello di conoscenza LC₃ si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC = 1$;*
- *Il livello di conoscenza LC₂ si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC = 1.2$;*
- *Il livello di conoscenza LC₁ si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi ed indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali; il corrispondente fattore di confidenza è $FC = 1.35$. (Circolare n.617 NTC 2008)*

Il valore del Fattore di Confidenza può quindi variare tra 1 e 1,35 e la sua applicazione è differente a seconda della tipologia di modello scelto per la valutazione della sicurezza sismica.

Allo stesso modo, per ogni tipologia muraria, la normativa definisce i seguenti valori medi dei parametri meccanici:

- LC₁:
 - *Resistenze: i minimi degli intervalli riportati in Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione;*
 - *Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta. (Circolare n.617 NTC 2008)*
- LC₂:
 - *Resistenze: medie degli intervalli riportati in Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione;*
 - *Moduli elastici: valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta. (Circolare n.617 NTC 2008)*
- *LC₃ – caso a), nel caso siano disponibili tre o più valori sperimentali di resistenza*
 - *Resistenze: media dei risultati delle prove;*

- *Moduli elastici: media delle prove o valori medi degli intervalli riportati nella Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione. (Circolare n.617 NTC 2008)*
- *LC₃ – caso b), nel caso siano disponibili due valori sperimentali di resistenza*
 - *Resistenze: se il valore medio delle resistenze è compreso nell'intervallo riportato nella Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione si assumerà il valore medio dell'intervallo, se è maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo si assume quest'ultimo come resistenza, se è inferiore al minimo dell'intervallo, si utilizza come valore medio il valore medio sperimentale;*
 - *Moduli elastici: vale quanto indicato per il caso LC₃ – caso a). (Circolare n.617 NTC 2008)*
- *LC₃ – caso c), nel caso sia disponibile un valore sperimentale di resistenza*
 - *Resistenze: se il valore di resistenza è compreso nell'intervallo riportato nella Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione, oppure superiore, si assume il valore medio dell'intervallo, se il valore di resistenza è inferiore al minimo dell'intervallo, si utilizza come valore medio il valore sperimentale;*
 - *Moduli elastici: vale quanto indicato per il caso LC₃ – caso a). (Circolare n.617 NTC 2008)*

Le relazioni tra i Livelli di Conoscenza e i Fattori di Confidenza e tra i Livelli di Conoscenza e i criteri per la determinazione dei valori medi dei parametri meccanici da utilizzare nelle fasi di analisi sono sintetizzate nella Tabella C8A.1.1 contenuta all'interno della Circolare n. 617 e qui riportate nella corrispondente Tabella 1.1.

I valori numerici dei parametri meccanici a cui la tabella fa riferimento nella colonna "Proprietà dei materiali" sono funzione della tipologia di muratura indagata e vengono presentati e discussi, sulla base delle norme indicate dalla Circolare, nel successivo paragrafo. Anche i metodi di analisi locale e globale dei meccanismi di collasso (penultima colonna della Tabella 1.1) sono ampiamente

discussi all'interno della normativa, ma non vengono approfonditi in questo lavoro di Tesi in quanto non direttamente collegati all'argomento della ricerca.

Tabella 1.1 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura (Tabella C8A.1.1 della Circolare n.617 NTC 2008)

LC	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC ₁	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 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella	Tutti	1.35
LC ₂		Verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella		1.20
LC ₃			Indagini in situ esaustive - caso a) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella -caso b) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella, valore medio dell'intervallo di Tabella; 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 LC ₃ – caso a). -caso c) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC ₃ – caso a).		1.00

1.1.1.3 TIPOLOGIE E RELATIVI PARAMETRI MECCANICI DELLE MURATURE

Al fine di individuare i corretti valori di riferimento dei parametri meccanici che possono essere adottati nelle analisi, è necessario procedere con il riconoscimento della tipologia muraria oggetto di studio:

- *Il riconoscimento della tipologia muraria è condotto attraverso un dettagliato rilievo degli aspetti costruttivi. E' noto che la muratura presenta, a scala nazionale, una notevole varietà per tecniche costruttive e materiali impiegati ed un inquadramento in tipologie precostituite può risultare problematico. I moduli di elasticità normale E e tangenziale G sono da considerarsi relativi a condizioni non fessurate, per cui le rigidità dovranno essere opportunamente ridotte. (Circolare n.617 NTC 2008)*

Le relazioni tra le tipologie di muratura e i valori medi dei più importanti parametri meccanici da utilizzare nelle fasi di analisi sono sintetizzate, nonostante le effettive difficoltà di inquadramento delle diverse classi, nella Tabella C8A.2.1 contenuta all'interno della Circolare n. 617 e sono qui riportate nella corrispondente Tabella 1.2. Nello specifico, i parametri di cui vengono individuati i valori minimi e massimi sono:

- f_m = Resistenza media a compressione della muratura;
- τ_o = Resistenza media a taglio della muratura;
- E = Valore medio del modulo di elasticità normale (in condizioni non fessurate);
- G = Valore medio del modulo di elasticità tangenziale (in condizioni non fessurate);
- w = Peso specifico medio della muratura.

Per favorire il corretto utilizzo dei valori tabellari, la Circolare n. 617 specifica che:

- *Nel caso delle murature storiche, i valori indicati nella Tabella C8A.2.1 (relativamente alle prime sei tipologie) sono da riferirsi a condizioni di muratura con malta di scadenti caratteristiche, giunti non particolarmente sottili ed in assenza di ricorsi o listature che, con passo costante, regolarizzino la tessitura ed in particolare l'orizzontalità dei corsi. Inoltre si assume che, per le murature storiche, queste siano a paramenti scollegati, ovvero manchino sistematici elementi di connessione trasversale (o di*

ammorsamento per ingranamento tra i paramenti murari). I valori indicati per le murature regolari sono relativi a casi in cui la tessitura rispetta la regola dell'arte. Nei casi di tessitura scorretta (giunti verticali non adeguatamente sfalsati, orizzontalità dei filari non rispettata), i valori della tabella devono essere adeguatamente ridotti. (Circolare n.617 NTC 2008)

Tabella 1.2 – Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura (Tabella C8A.2.1 della Circolare n.617 NTC 2008)

Tipologia di muratura	f_m	τ_o	E	G	w (kN/m ³)
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
	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 sbozzati, 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 squadrati	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

Oltre alle condizioni sopra descritte, cui fanno riferimento i parametri meccanici e il peso specifico medio delle diverse classi di muratura, la normativa afferma che:

- *Le diverse tipologie di Tabella C8A.2.1 assumono che la muratura sia costituita da due paramenti accostati, o con un nucleo interno di limitato spessore (inferiore allo spessore del paramento); fanno eccezione il caso della*

muratura a conci sbazzati, per la quale è implicita la presenza di un nucleo interno (anche significativo ma di discrete caratteristiche), e quello della muratura in mattoni pieni, che spesso presenta un nucleo interno con materiale di reimpiego reso coeso. Nel caso in cui il nucleo interno sia ampio rispetto ai paramenti e/o particolarmente scadente, è opportuno ridurre opportunamente i parametri di resistenza e deformabilità, attraverso una omogeneizzazione delle caratteristiche meccaniche nello spessore. In assenza di valutazioni più accurate è possibile penalizzare i suddetti parametri meccanici attraverso il coefficiente indicato in Tabella C8A.2.2. (Circolare n.617 NTC 2008)

Nel caso in cui la muratura in esame presenti caratteristiche migliori rispetto a quelle a cui i valori tabellari sono riferiti, la normativa prescrive che:

- *Le caratteristiche meccaniche saranno ottenute, a partire dai valori di Tabella C8A.2.1, applicando coefficienti migliorativi fino ai valori indicati nella Tabella C8A.2.2, secondo le seguenti modalità:*
 - *Malta di buone caratteristiche: Si applica il coefficiente indicato in Tabella C8A.2.2, diversificato per le varie tipologie, sia ai parametri di resistenza (f_m e t_o), sia ai moduli elastici (E e G);*
 - *Giunti sottili (< 10 mm): Si applica il coefficiente, diversificato per le varie tipologie, sia ai parametri di resistenza (f_m e t_o), sia ai moduli elastici (E e G); nel caso della resistenza a taglio l'incremento percentuale da considerarsi è metà rispetto a quanto considerato per la resistenza a compressione; nel caso di murature in pietra naturale è opportuno verificare che la lavorazione sia curata sull'intero spessore del paramento;*
 - *Presenza di ricorsi (o listature): Si applica il coefficiente indicato in tabella ai soli parametri di resistenza (f_m e t_o); tale coefficiente ha significato solo per alcune tipologie murarie, in quanto nelle altre non si riscontra tale tecnica costruttiva;*
 - *Presenza di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti: Si applica il coefficiente indicato in tabella ai soli parametri di resistenza*

(f_m e t_o); tale coefficiente ha significato solo per le murature storiche, in quanto quelle più recenti sono realizzate con una specifica e ben definita tecnica costruttiva ed i valori in Tabella C8A.2.1 rappresentano già la possibile varietà di comportamento. (Circolare n.617 NTC 2008)

In presenza di murature consolidate, o nel caso in cui si debba valutare la sicurezza dell'edificio rinforzato, la Circolare asserisce che:

- *È possibile valutare le caratteristiche meccaniche per alcune tecniche di intervento, attraverso i coefficienti indicati in Tabella C8A.2.2, secondo le seguenti modalità:*
 - *Consolidamento con iniezioni di miscele leganti: Si applica il coefficiente indicato in tabella, diversificato per le varie tipologie, sia ai parametri di resistenza (f_m e t_o), sia ai moduli elastici (E e G); nel caso in cui la muratura originale fosse stata classificata con malta di buone caratteristiche, il suddetto coefficiente va applicato al valore di riferimento per malta di scadenti caratteristiche, in quanto il risultato ottenibile attraverso questa tecnica di consolidamento è, in prima approssimazione, indipendente dalla qualità originaria della malta (in altre parole, nel caso di muratura con malta di buone caratteristiche, l'incremento di resistenza e rigidezza ottenibile è percentualmente inferiore);*
 - *Consolidamento con intonaco armato: Per definire parametri meccanici equivalenti è possibile applicare il coefficiente indicato in tabella, diversificato per le varie tipologie, sia ai parametri di resistenza (f_m e t_o), sia ai moduli elastici (E e G); per i parametri di partenza della muratura non consolidata non si applica il coefficiente relativo alla connessione trasversale, in quanto l'intonaco armato, se correttamente eseguito collegando con barre trasversali uncinato i nodi delle reti di armatura sulle due facce, realizza, tra le altre, anche questa funzione. Nei casi in cui le connessioni trasversali non soddisfino tale condizione, il coefficiente moltiplicativo dell'intonaco armato deve essere diviso per il coefficiente relativo alla connessione trasversale riportato in tabella;*

- Consolidamento con diatoni artificiali: In questo caso si applica il coefficiente indicato per le murature dotate di una buona connessione trasversale.

I valori sopra indicati per le murature consolidate possono essere considerati come riferimento nel caso in cui non sia comprovata, con opportune indagini sperimentali, la reale efficacia dell'intervento e siano quindi misurati, con un adeguato numero di prove, i valori da adottarsi nel calcolo. (Circolare n.617 NTC 2008)

I coefficienti migliorativi dei parametri meccanici sopra citati e descritti, sono esplicitati nella Tabella C8A.2.2 della Circolare applicativa e qui riportati nella corrispondente Tabella 1.3.

Tabella 1.3 – Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella C8A.2.1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato. (Tabella C8A.2.2 della Circolare n.617)

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato*
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrate	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,2	-	1,3	0,7	1,5	1,5

* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

1.2 DPCM DEL 9 FEBBRAIO 2011: “LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE E LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL PATRIMONIO CULTURALE CON RIFERIMENTO ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI DI CUI AL DECRETO DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI DEL 14 GENNAIO 2008”

La Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 fornisce precise indicazioni per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato, con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 e alla relativa Circolare applicativa n.617.

Queste Linee guida sono state redatte con l’obiettivo di specificare un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi, concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e particolarità del patrimonio culturale. La finalità è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione garantite dall’intervento di miglioramento sismico. In particolare, il documento è riferito alle sole costruzioni in muratura.

1.2.1 PERCORSO DELLA CONOSCENZA

Nel Capitolo 4 delle suddette Linee guida, viene specificato un indispensabile passaggio del percorso di valutazione della sicurezza e della conservazione:

- *La conoscenza del manufatto dovrà essere acquisita, tenendo presente quanto indicato al punto C8A della Circolare, conformemente a quanto previsto dal programma per il monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici tutelati [...] finalizzato all’acquisizione della conoscenza del patrimonio culturale italiano. [...]La conoscenza della costruzione storica in muratura è un presupposto fondamentale sia ai fini di una attendibile*

valutazione della sicurezza sismica attuale sia per la scelta di un efficace intervento di miglioramento. (DPCM 9 febbraio 2011)

Le problematiche relative alla conoscenza della costruzione storica in muratura sono quelle comuni a tutti gli edifici esistenti anche se, nel caso del patrimonio culturale tutelato, vista la sua maggior rilevanza, risulta ancora più importante la conoscenza delle caratteristiche originarie della fabbrica e le modifiche intercorse nel tempo dovute ai fenomeni di danneggiamento derivanti dalle trasformazioni antropiche, all'invecchiamento dei materiali e agli eventi calamitosi. Tuttavia:

- *[...] in relazione alla necessità di impedire perdite irrimediabili, l'esecuzione di una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva sulla fabbrica stessa. Si ha pertanto la necessità di affinare tecniche di analisi ed interpretazione dei manufatti storici mediante fasi conoscitive dal diverso grado di attendibilità, anche in relazione al loro impatto. La conoscenza può infatti essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali. (DPCM 9 febbraio 2011)*

In questa affermazione sono fortemente sottolineate le maggiori attenzioni che sono riservate agli edifici considerati patrimonio culturale rispetto a quelle, comunque non trascurabili, dovute alle strutture non tutelate. Nonostante questa differenziazione, risultano evidenti le analogie nello sviluppo dei due percorsi conoscitivi:

- *Tali operazioni saranno funzione degli obiettivi preposti ed andranno ad interessare tutto o in parte l'edificio, a seconda della tipologia dell'intervento previsto. Lo studio delle caratteristiche della fabbrica è teso alla definizione di un modello interpretativo che consenta, nelle diverse fasi della sua calibrazione, sia un'interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale, sia l'analisi strutturale per una valutazione quantitativa. Il grado di attendibilità del modello sarà strettamente legato al livello di approfondimento ed ai dati disponibili. Da questo punto di vista vengono*

introdotti diversi livelli di conoscenza, ad approfondimento crescente, al quale saranno legati fattori di confidenza da utilizzare nell'analisi finalizzata sia alla valutazione dello stato attuale sia a seguito degli eventuali interventi. (DPCM 9 febbraio 2011)

Le diverse fasi di studio e ricerca descritte nelle Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale sono simili a quelle contenute nelle NTC 2008 e nella relativa Circolare. In considerazione delle specifiche modalità di analisi strutturale, le indagini conoscitive devono concentrarsi prevalentemente su:

- 1. Identificazione della costruzione: Consiste nella corretta e completa identificazione dell'organismo e nella sua localizzazione sul territorio, al fine di individuare la sensibilità della fabbrica nei riguardi dei diversi rischi ed in particolare di quello sismico. Questa fase dell'analisi comprende anche un primo rilievo schematico del manufatto, od un semplice eidotipo, in grado di descriverne la consistenza di massima e la localizzazione di eventuali elementi particolarmente sensibili al danneggiamento che, nel caso di perdita, porterebbero ad un danno irrimediabile al patrimonio culturale, condizionandone il livello di rischio. (DPCM 9 febbraio 2011)*
- 2. Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi: La conoscenza dell'opera non può prescindere dall'analisi, anche storica, dell'evoluzione funzionale dell'edificio e delle sue articolazioni, finalizzata a riconoscere quali utilizzazioni si siano succedute nel tempo ed in quali ambienti. Il risultato di questa analisi porta infatti alla disponibilità di notizie utili per capire le ragioni delle modifiche strutturali e geometriche intervenute nel tempo e per motivare eventuali segni o notizie di dissesti. (DPCM 9 febbraio 2011)*
- 3. Rilievo geometrico: Il rilievo dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con gli eventuali edifici in aderenza. [...] In particolare dovranno essere individuati i punti significativi per un modello di calcolo, quali imposte degli orizzontamenti e dei sistemi archivoltati, entità*

dell'appoggio degli stessi sulle murature d'ambito. Inoltre dovranno essere compiutamente determinabili le masse degli elementi e i carichi gravanti su ogni elemento di parete. [...] Il rilievo di stucchi, decorazioni ed elementi non strutturali, utile ai fini dell'individuazione delle caratteristiche dei beni artistici, non deve ostacolare la precisa conoscenza della geometria degli elementi architettonico-strutturali. [...] Dovrà essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, in modo tale da consentire l'individuazione delle cause e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'organismo. (DPCM 9 febbraio 2011)

- 4. Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti: In particolare andrà evidenziata la successione realizzativa delle diverse porzioni di fabbrica, al fine di individuare le zone di possibile discontinuità e disomogeneità materiale, sia in pianta che in alzato. La storia dell'edificio può anche essere utilizzata come uno degli strumenti di controllo e verifica della risposta dell'edificio a particolari eventi naturali o antropici e delle eventuali conseguenti trasformazioni. Devono pertanto essere identificati gli eventi subiti, soprattutto quelli più significativi e traumatici, ed i corrispondenti effetti, accertabili per via documentale o tramite un rilievo analitico diretto del manufatto. [...] Ai fini della comprensione del comportamento attuale e per la definizione degli eventuali interventi di miglioramento sismico è importante individuare la natura degli interventi di consolidamento già realizzati nel passato, la loro localizzazione e gli elementi strutturali coinvolti, il periodo di realizzazione e la verifica della loro efficacia nel tempo. (DPCM 9 febbraio 2011)*
- 5. Rilievo materico costruttivo e stato di conservazione: Deve permettere di individuare completamente l'organismo resistente della fabbrica, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi. Tale riconoscimento richiede l'acquisizione di informazioni spesso nascoste, che può essere eseguita grazie a tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto o ispezioni dirette debolmente distruttive. [...] Speciale attenzione dovrà essere riservata alla valutazione della qualità muraria, tenendo conto dei modi di costruire tipici di quel*

territorio ed individuando le caratteristiche geometriche e materiche dei singoli componenti, oltre che le modalità di assemblaggio. (DPCM 9 febbraio 2011)

6. Caratterizzazione meccanica dei materiali: *La misura diretta dei parametri meccanici della muratura, in particolare di quelli di resistenza, non può essere eseguita, quindi, se non attraverso prove debolmente distruttive o distruttive, anche se su porzioni limitate. Le calibrazioni di prove non distruttive con prove distruttive possono essere utilizzate per ridurre l'invasività delle indagini di qualificazione. [...] E' evidente che, dato il carattere distruttivo delle succitate prove, esse andranno impiegate solo se ben motivate e giustificate non solo dall'uso dei relativi risultati nella modellazione della struttura, ma anche dal fatto di essere discriminanti nei confronti della valutazione o della scelta dell'intervento. [...] La programmazione delle indagini e la interpretazione dei risultati va pertanto inquadrata in procedure di carattere più complessivo, nelle quali possa assumere significato anche l'impiego di un solo dato sperimentale. (DPCM 9 febbraio 2011)*

Oltre alle tematiche di studio sopra descritte, la Direttiva introduce e prescrive una nuova e ulteriore indagine conoscitiva e una fase finale di monitoraggio:

7. Aspetti geotecnici: *Le indagini geotecniche devono permettere la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni di fondazione, tramite prove in sito e di laboratorio, finalizzata all'individuazione di modelli geotecnici adatti alle analisi di risposta sismica locale e d'interazione dinamica terreno-struttura. Le indagini geotecniche devono anche essere finalizzate allo studio della stabilità del sito in cui ricade la costruzione in esame, con particolare riguardo ai fenomeni d'instabilità dei versanti e di liquefazione dei terreni. (DPCM 9 febbraio 2011)*
8. Monitoraggio: *Il controllo periodico della costruzione rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente*

necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione. (DPCM 9 febbraio 2011)

1.2.2 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Una volta studiata ed identificata la costruzione, in relazione all'approfondimento del rilievo geometrico e delle indagini materico-costruttiva, meccanica e sul terreno e le fondazioni, viene determinato il Fattore di Confidenza FC, sulla base del quale viene calibrato il modello di analisi strutturale.

Il Fattore di Confidenza, il cui valore è compreso tra 1 e 1.35, si applica in modo diverso in funzione del modello scelto per la valutazione della sicurezza sismica. Secondo normativa, sono classificate due tipologie di modelli:

- Modelli che considerano la deformabilità e la resistenza dei materiali e degli elementi strutturali;
- Modelli che considerano l'equilibrio limite dei diversi elementi della costruzione, pensando il materiale muratura come rigido e non resistente a trazione.

Nel primo caso il Fattore di Confidenza viene applicato alle proprietà dei materiali riducendo, nello specifico, le resistenze. I valori di partenza delle caratteristiche meccaniche sono definiti in funzione del Livello di Conoscenza relativo alle proprietà dei materiali, così come avviene nel caso degli edifici di nuova costruzione (vedi Paragrafo 1.1.1.3). Nel secondo caso invece, in cui la resistenza dei materiali non viene presa in considerazione, il Fattore di Confidenza viene applicato direttamente alla capacità della struttura, con l'intento di ridurre l'accelerazione corrispondente ai diversi stati limite. In entrambi i casi, la definizione del Fattore di Confidenza deve essere riferita al materiale o alla tipologia che penalizza maggiormente lo specifico meccanismo di danno considerato.

In merito alla metodologia di calcolo dei fattori, le Linee Guida per i Beni Culturali affermano che:

- *Il Fattore di Confidenza può essere determinato definendo diversi Fattori parziali di confidenza F_{Ck} ($k=1\div 4$), sulla base dei coefficienti numerici riportati in tabella 4.1, i cui valori sono associati alle quattro categorie di indagine ed al livello di conoscenza in esse raggiunto:*

$$FC = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{Ck}$$

La Definizione dei livelli di approfondimento delle indagini e i relativi Fattori parziali di confidenza, indicati nella Tabella 4.1 della Direttiva, sono qui riportati nella corrispondente Tabella 1.4.

Tabella 1.4 – Definizione dei livelli di approfondimento delle indagini sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza. (Tabella 4.1 del DPCM 9 febbraio 2011)

Rilievo geometrico	Rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0,05$
	Rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0,12$
	Restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0,06$
	Restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche)	$F_{C2} = 0$
Proprietà meccaniche dei materiali	Parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C3} = 0,12$
	Limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0,06$
	Estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3} = 0$
Terreno e fondazioni	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d' informazioni sulle fondazioni	$F_{C4} = 0,06$
	Disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0,03$
	Estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0$

Il paragrafo della Direttiva dedicato alla descrizione dei Livelli di Conoscenza e dei Fattori di Confidenza si conclude con alcune precisazioni legate al corretto utilizzo dei fattori parziali:

- *Nel caso di presenza di diversi materiali strutturali il livello di approfondimento ed il conseguente Fattore di Confidenza FC_3 potranno essere riferiti al materiale o ai materiali maggiormente influenti sulla determinazione dell'indice di sicurezza. Nel caso in cui l'analisi sismica sia basata sulla valutazione distinta di diversi meccanismi locali potranno essere utilizzati Livelli di Conoscenza e Fattori parziali di confidenza relativi a ciascuna porzione modellata. Nel caso di valutazioni a carattere locale quando le informazioni sul terreno e le fondazioni non hanno alcuna relazione sullo specifico meccanismo di collasso, il fattore di confidenza parziale FC_4 può essere assunto pari a 0. (DPCM 9 febbraio 2011)*

1.3 OSSERVAZIONI

Dall'analisi delle normative attualmente vigenti in Italia, si evince che le indagini soniche e, più in generale, tutte le prove a carattere non distruttivo, garantiscono il pieno rispetto dei criteri di massima conservazione a discapito del raggiungimento di un più elevato livello di conoscenza, in quanto forniscono risultati prettamente qualitativi. Solo la loro integrazione con metodologie di ricerca più invasive può garantire un concreto miglioramento delle conoscenze relative ai corpi di fabbrica analizzati.

CAPITOLO 2

INDAGINI SUL PATRIMONIO EDILIZIO STORICO

Nel seguente capitolo viene analizzato il processo conoscitivo delle murature storiche che, dalle fasi di anamnesi e diagnosi, conduce a quella finale di prognosi ed eventuale intervento. Vengono nello specifico descritti gli attuali criteri di valutazione delle murature, con riferimento alle schede di qualità muraria e le metodologie di indagine conoscitiva oggi disponibili, classificate secondo il proprio grado di invasività.

2.1 PREMESSA

Viene generalmente definita "diagnostica" l'indagine conoscitiva dello stato di conservazione di manufatti, sia mobili che immobili, di valore storico e artistico, che precede un intervento conservativo o di restauro. In particolare, la diagnostica analizza le modificazioni della struttura e dei materiali costitutivi dell'oggetto prodotte dal degrado, definisce lo stato del danno, ne identifica le cause e individua le soluzioni più idonee per arrestare o contenere gli effetti dei processi di deterioramento. Oltre ad analizzare il degrado dei manufatti, la diagnostica può fornire anche indicazioni sulla capacità strutturale dei manufatti, sulla composizione dei materiali utilizzati, sulla tecnica di esecuzione, su precedenti interventi di restauro e su possibili mutamenti nella destinazione d'uso (Colombi, 2002). Tale diagnosi dovrebbe essere il risultato di un'estesa indagine sperimentale.

L'intervento di conservazione di un edificio storico, qualunque sia il suo valore architettonico e/o artistico, diviene in generale tanto più appropriato,

quanto più profonda è la conoscenza della fabbrica, dalla sua evoluzione dall'origine allo stato odierno, dai materiali, alle tecniche costruttive ed alla sua struttura portante.

Le esperienze maturate negli ultimi decenni nel campo della conservazione e del recupero dell'edilizia storica, hanno messo in evidenza la necessità di disporre, oltre che della conoscenza visiva, anche di adeguate tecniche di valutazione delle sue caratteristiche costruttive e dell'effettivo stato di danno della struttura, prima di adottare qualsiasi tecnica di intervento. Inoltre la fase diagnostica assume un ruolo fondamentale nella definizione di tempi e costi di intervento.

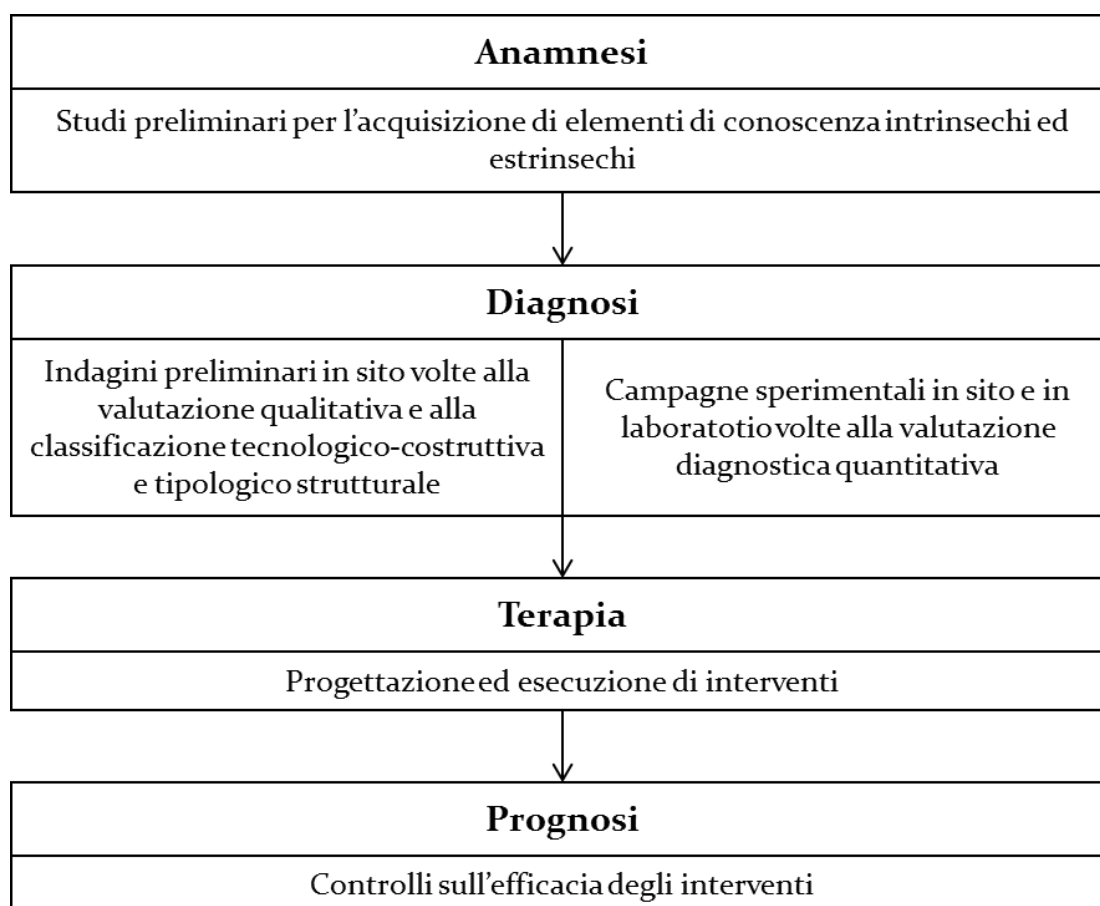


Fig. 2.1 – Fasi del processo di indagine e intervento relativi ai manufatti storici.

Dal momento che regolamenti, norme o codici di comportamento per la valutazione delle strutture murarie degli edifici storici sono attualmente in fase di stesura, risulta necessario stabilire linee guida, procedure e metodologie che consentano il controllo e la valutazione delle condizioni degli edifici esistenti. Sulla

base delle esperienze maturate in decenni di ricerche e della ricca bibliografia di riferimento, è stato possibile mettere a punto una procedura da adottare sistematicamente per qualificare le murature (Binda, et al., 1999d).

2.2 VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA

Il termine muratura descrive una struttura caratterizzata da un insieme estremamente diversificato, sia dal punto di vista dei materiali componenti che da quello della tecnica costruttiva, legata alle molteplici realtà territoriali e storiche. Trattandosi di un materiale composito, il suo comportamento strutturale non dipende esclusivamente dalle caratteristiche dei singoli elementi costituenti, ma anche e soprattutto dalle loro interazioni.

È quindi necessario in prima istanza riconoscere la tipologia muraria, definendone le principali caratteristiche, in modo da attribuirne un giudizio di qualità. Tale giudizio qualitativo è innanzitutto basato sull'osservazione visiva dei paramenti esterni e della sezione di una parete. La compilazione di una scheda di rilievo dedicata a queste informazioni si è rivelato essere il metodo più comodo per individuare sistematicamente i dati necessari e riportare una descrizione univoca che presenti scientificamente la tipologia muraria rilevata e le sue caratteristiche morfologiche (Binda et al. 2009a).

2.2.1 SCHEDA DI QUALITÀ MURARIA

La “Scheda per la valutazione della qualità muraria” è il risultato della collaborazione instaurata tra diversi esperti del settore e volta alla creazione di uno strumento completo per la raccolta dei dati provenienti dalle analisi finalizzate allo studio sugli edifici storici.

Sia nella sua forma che in alcuni dei contenuti relativi alla valutazione della qualità muraria, il documento prende ispirazione dalla “Scheda per il rilievo tipologico e dei danni sismici agli edifici” proposta dalla Prof.ssa L. Binda.

All'interno di essa sono stati inoltre inseriti i criteri proposti da A. Borri per la definizione di un indice di qualità (IQ) della muratura relazionato alle tre azioni

sollecitanti (azioni verticali, azioni orizzontali nel piano, azioni ortogonali) e il calcolo dell'LMT (Linea di Minimo Tracciato) proposto da F. Doglioni a completamento delle informazioni relative all'ingranamento sul piano esterno del paramento e in direzione trasversale.

A queste ed altre voci riportate all'interno della scheda vengono attribuiti dei valori numerici indicativi tali da raggiungere un punteggio finale che permetta di classificare numericamente la qualità di una muratura e di conseguenza la sua vulnerabilità (Binda et al. 2009a). Dal punto di vista formale, la Scheda è suddivisa in cinque parti:

1. Collocazione della muratura oggetto di analisi:
 - Descrizione dell'edificio in cui è collocata la muratura;
2. Rilievo della tipologia muraria:
 - Tessitura del paramento;
 - Caratterizzazione dei materiali del paramento;
 - Sezione muraria;
 - Caratterizzazione dei materiali del paramento;
3. Conclusioni (Livello di Conoscenza 1):
 - Osservazioni qualitative e attribuzione della tipologia muraria secondo la tabella indicata in normativa;
 - Indice di qualità (IQ);
 - Osservazioni;
4. Prove in situ e in laboratorio (Livello di Conoscenza 2):
 - Prove in situ;
 - Prove in laboratorio;
5. Analisi e valutazione del prospetto nel suo complesso:
 - Quantità e distribuzione delle aperture;
 - Parti terminali della muratura;
 - Osservazione del quadro fessurativo;
 - Analisi delle discontinuità;
 - Osservazioni.

Nella prima e nella seconda parte della scheda vengono raccolti i dati ritenuti utili alla descrizione della qualità del campione murario.

La terza unità richiede invece al compilatore di riportare le conclusioni tratte sulla base dell'osservazione visiva delle caratteristiche della muratura. Le conclusioni possono essere di due tipi: qualitative di tipo descrittivo o qualitative con l'attribuzione di una classe di appartenenza, con queste ultime basate sull'Indice di Qualità ottenibile sommando i punteggi calcolati nei diversi campi della scheda. Nel paragrafo dedicato alle osservazioni, presente sia nella prima che nella terza unità, è possibile inserire le informazioni relative all'ubicazione del campione di muratura, alla data di esecuzione dei rilievi ed all'autore degli stessi e spiegare le eventuali discordanze presenti tra le osservazioni qualitative e l'Indice di Qualità (o l'LMT).

La quarta sezione della scheda raccoglie i dati relativi alle prove svolte in situ ed in laboratorio. Questa parte è stata appositamente inserita nella fase successiva alla formulazione di un primo giudizio qualitativo in quanto costituisce un approfondimento della conoscenza del campione murario. Quest'ultima è legata all'acquisizione di parametri oggettivi relativi a vari fattori quali il comportamento meccanico della muratura, le caratteristiche fisiche e chimiche degli elementi che la compongono, la morfologia della sezione e altri. Nel caso di impossibilità di esecuzione delle indagini, la scheda può essere ugualmente compilata fino alla terza sezione e poi ripresa nella quinta, ma questa condizione non consente di raggiungere il Livello di Conoscenza 2.

L'ultima sezione è stata aggiunta per incentivare l'acquisizione dei dati relativi al prospetto murario in cui il campione analizzato è inserito. Dopo aver indagato la muratura nel dettaglio dei suoi elementi costituenti è infatti necessario portare lo studio ad una scala più ampia per poter valutare la rappresentatività dei dati raccolti sul campione murario rispetto alla struttura verticale che lo contiene. Questa scelta formale è strettamente correlata alle finalità pratiche della scheda che, per sua stessa costruzione, dovrebbe sia garantire la creazione di un database di dati che guidare le operazioni di valutazione della qualità muraria di edifici per i quali è prevista l'esecuzione di un progetto di conservazione.

2.3 CLASSIFICAZIONE DELLE PROVE E LIVELLI DI INDAGINE

La classificazione delle prove è dettata essenzialmente dal loro grado di invasività e dalla tipologia di risultato fornito. In relazione alla natura dei risultati, le indagini sperimentali si possono suddividere in due categorie:

- Analisi in sito;
- Analisi in laboratorio.

Le prime possono coinvolgere l'intero manufatto o una porzione di esso, sono di tipo qualitativo o quantitativo e forniscono stime più o meno precise dei parametri geometrici e meccanici locali o globali. Le seconde invece vengono eseguite su campioni prelevati dalla struttura e sono utili per l'individuazione dei parametri di input da utilizzare nei modelli di calcolo, soprattutto nelle valutazioni di capacità portante.

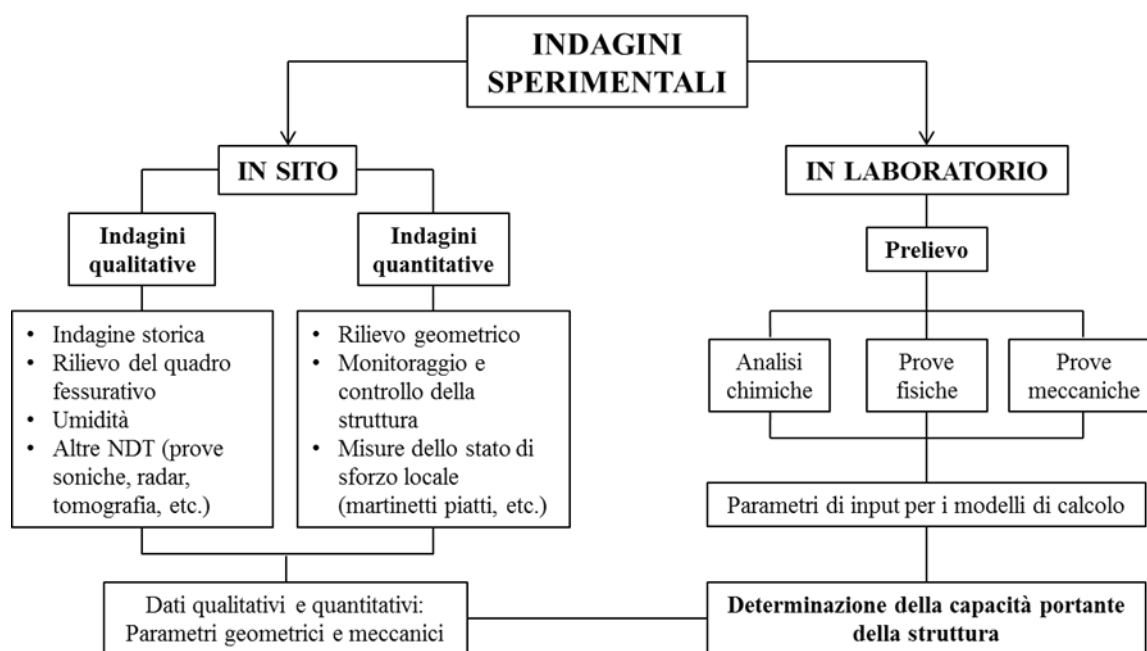


Fig. 2.2 – Finalità delle indagini sperimentali (Binda, 1994).

La classificazione per grado di invasività è invece legata alla gravità del danno che l'esecuzione delle prova comporta. Si possono individuare tre tipi di prove:

- Prove distruttive;

- Prove debolmente distruttive (MDT);
- Prove non distruttive (NDT).

Le prime causano rotture gravi e irrecuperabili e sono utili per la caratterizzazione meccanica, chimica e fisica di materiali e porzioni murarie.

Nella categoria delle indagini debolmente distruttive rientrano invece le prove che provocano distruzioni molto limitate. A causa del loro carattere locale, queste forniscono risultati precisi ma non sempre indicativi.

L'ultima categoria garantisce l'individuazione di alcuni parametri murari nel rispetto dei criteri del restauro e della conservazione. In essa sono infatti comprese tutte quelle prove che non arrecano alcun danno al manufatto o ai suoi componenti. Le indagini non distruttive sono utilizzate per la qualificazione delle murature e dei materiali componenti, per la valutazione dell'estensione dei danni meccanici, per l'individuazione del degrado superficiale, per la verifica delle proprietà dei materiali, per l'individuazione degli elementi strutturali nascosti e per il controllo dell'efficacia delle tecniche di riparazione. I parametri ottenibili da esse hanno spesso carattere qualitativo e la loro correlazione con i valori quantitativi, generalmente più indicativi delle caratteristiche murarie, è abbastanza complessa. Inoltre la maggioranza di queste tecniche è tuttora in fase di studio ed evoluzione, per cui la qualità dei risultati forniti è strettamente legata al livello tecnologico attualmente disponibile.

La ricerca sulle murature storiche si articola inoltre in una serie di livelli tra loro complementari:

1. Indagini sui materiali;
2. Indagini sulle murature;
3. Monitoraggio e controllo delle strutture.

Solo coordinando i risultati delle tre ricerche è possibile raggiungere quel livello di conoscenza indispensabile per la progettazione degli interventi di recupero.

2.4 INDAGINI SUI MATERIALI

Per quanto concerne il campo delle indagini sui materiali, la fase di prelievo di materiale per le prove di laboratorio deve essere svolta in modo da bilanciare le esigenze di significatività dei risultati e l'esigenza di non distruttività del campionamento. La stessa tecnica di prelievo è importante; infatti, il campione prelevato deve essere il più possibile indisturbato per essere effettivamente rappresentativo della situazione in sito.

Le finalità di queste prove possono essere molteplici. Esse possono infatti essere utilizzate per:

- La caratterizzazione dei materiali da un punto di vista chimico, fisico o meccanico;
- L'individuazione dell'origine stessa del materiale, per impiegarne di simili nell'intervento di riparazione;
- La conoscenza della composizione della muratura;
- La misura del degrado e della durabilità o comunque della resistenza ad agenti aggressivi di nuovi materiali da impiegare nel restauro.

Data la difficoltà di campionamento di prismi di muratura di dimensioni significative, generalmente il prelievo interessa solo singoli elementi (malta, pietre o mattoni) o assemblaggi di limitate dimensioni.

2.4.1 PRELIEVO DI MATTONI, PIETRE E MALTE

La metodologia di campionamento dipende direttamente dalle caratteristiche del singolo materiale. In linea generale, possono essere espressi alcuni principi guida:

1. Il prelievo deve essere condotto nel rispetto dell'integrità dell'edificio e dei principi della conservazione;
2. La quantità di materiale prelevato deve essere compatibile con lo scopo della prova e le richieste in termini di affidabilità della tecnica sperimentale;

3. Se il fine delle prove è la caratterizzazione e la verifica dell'estensione del danno, il prelievo di materiale deve essere effettuato su diverse parti dell'edificio; in questo modo è possibile individuare l'eventuale presenza di vari tipi di degrado;
4. Il campionamento deve riguardare porzioni dell'edificio non soggette all'azione della pioggia o a precedenti riparazioni, specialmente se il fine dell'indagine è la caratterizzazione dei leganti e degli aggregati delle malte;
5. Il numero di campioni deve essere sufficientemente alto perché il risultato sia statisticamente significativo e rappresentativo della condizione della muratura; l'insufficienza dei dati, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, compromette irrimediabilmente la bontà dei risultati.

2.4.2 PROVE SULLE MALTE

Al momento, non esistono prove standardizzate per la definizione della composizione, delle caratteristiche chimico-fisico e meccaniche di malte prelevate da edifici esistenti. Spesso è molto difficile prelevare campioni di dimensioni sufficienti per l'esecuzione di prove meccaniche; quindi, le uniche informazioni attendibili, riguardano la composizione della malta e lo stato di degrado. Infatti, le analisi chimiche e petrografiche, meno costose di altri tipi di prove, possono individuare il tipo di legante e di aggregato, il rapporto legante aggregato, il grado e l'estensione della carbonatazione, la presenza di reazioni chimiche e di sostanze di nuova formazione (reazioni pozzolaniche, reazioni tra aggregati e leganti, reazioni alcali-aggregati ecc.) (Binda, et al., 1988).

La granulometria e la distribuzione degli aggregati può essere misurata attraverso la separazione degli aggregati stessi dal legante, mediante trattamenti termici o chimici o con metodi ottici (Baronio, et al., 1991). La conoscenza della composizione di una malta, anche se non esatta, permette la riproduzione di malte o miscele da iniezione con caratteristiche simili a quelle originarie o comunque compatibili, da usare in eventuali operazioni di riparazione.

2.4.3 PROVE SU PIETRE E MATTONI NUOVI O DANNEGGIATI

Il degrado della muratura causato da agenti aggressivi non è mai uniforme e omogeneamente distribuito. In alcuni casi, se il degrado è profondo ma limitato a pochi elementi, può essere necessaria la sostituzione degli elementi stessi. In tali condizioni le prove di laboratorio possono fornire utili indicazioni per la scelta dei nuovi materiali.

Quando a causa dell'eccessiva estensione del danno l'operazione di sostituzione non è possibile, l'applicazione di appositi trattamenti superficiali può risultare efficace. Le prove di laboratorio, condotte su elementi deteriorati e non, forniscono, in questo caso, indicazioni sulla scelta del prodotto da utilizzare. In particolare, possono essere effettuati i seguenti esami:

- Prove meccaniche:
 - Prove di compressione: Utilizzate per caratterizzare sia la parte non degradata che quella degradata;
 - Prove di trazione indiretta: Utilizzate per caratterizzare sia la parte non degradata che quella degradata;
 - Prove di durezza superficiale;
 - Prove di durezza in sezione: Permettono di valutare lo sviluppo in profondità del degrado;
- Prove fisiche:
 - Misura del peso specifico;
 - Misura dell'assorbimento d'acqua per immersione totale o per risalita capillare: Ha lo scopo di valutare la durabilità del materiale e gli effetti dei trattamenti superficiali. L'assorbimento iniziale di pietre e mattoni e la ritenzione d'acqua delle malte sono inoltre essenziali nella scelta delle miscele di iniezione da utilizzare nelle operazioni di consolidamento;
 - Diffrattometria a raggi X: Consente di individuare la tipologia di sale distribuito sulla superficie o presente all'interno delle murature degradate;

-
- Porosimetria a mercurio: Permette di valutare indirettamente la trattabilità o la presenza di trattamenti superficiali;
 - Prove chimiche:
 - Individuazione di solfati alcalini: L'esatta definizione della quantità di sali presenti nella muratura è subordinata all'estrazione di campioni posti a diverse profondità;
 - Analisi ottiche e mineralogiche:
 - Osservazioni ottiche (stereomicroscopio, SEM): Utilizzate per definire le cause e il livello del degrado presente e determinare l'eventuale presenza di sali;
 - Osservazioni petrografiche su sezione sottile: Consentono di esaminare la dimensione e la distribuzione dei pori, la dimensione e la distribuzione degli aggregati, la provenienza geografica di argille e pietre e la temperatura di cottura dei mattoni;
 - Prove di durabilità:
 - Prove di gelo e disgelo: Evidenziano le prestazioni attese e il tempo di vita utile di nuovi materiali soggetti ad agenti aggressivi;
 - Prove di cristallizzazione salina: Evidenziano le prestazioni attese e il tempo di vita utile di nuovi materiali soggetti ad agenti aggressivi.

2.5 INDAGINI SULLE MURATURE

L'approccio spesso usato per verificare la sicurezza strutturale o individuare i problemi di una muratura storica si limita ad un'ispezione visiva, alla quale si affiancano prove di laboratorio su campioni di muratura e prove di carico (Binda, et al., 1998). Le esperienze maturate nel corso degli ultimi decenni hanno però dimostrato che, anche quando la struttura muraria appare omogenea in superficie, queste tecniche non sono risolutive ed economicamente efficaci. Di qui la necessità di ricorrere ad appropriate indagini diagnostiche in sito, la cui scelta si basi su una strategia mirata al complesso dei problemi evidenziati dall'analisi preliminare e dalla documentazione storica (Binda, et al., 1998). Di queste, le uniche che consentano di misurare le caratteristiche meccaniche e di deformabilità del muro

in modo quantitativo ed esatto sono quelle distruttive, che vengono eseguite su pannelli murari di grandi dimensioni mediante cicli di carico e scarico fino a rottura del pannello stesso. Le altre tecniche consentono di avere o informazioni solo qualitative sulle caratteristiche del muro (i.e. prove soniche), o informazioni quantitative su caratteristiche particolari difficilmente correlabili alla resistenza e al modulo elastico (i.e. prove sclerometriche), o infine informazioni quantitative ma puntuali su caratteristiche meccaniche, da estendere con opportuni accorgimenti a tutto il dominio della muratura (i.e. martinetti piatti). Appare evidente che questi tipi di prova, per le loro caratteristiche di non invasività totale o parziale, sono i più interessanti e sono quindi da sviluppare e calibrare per confronto con tecniche dai risultati più certi o con muri di caratteristiche note (Binda, et al., 1998).

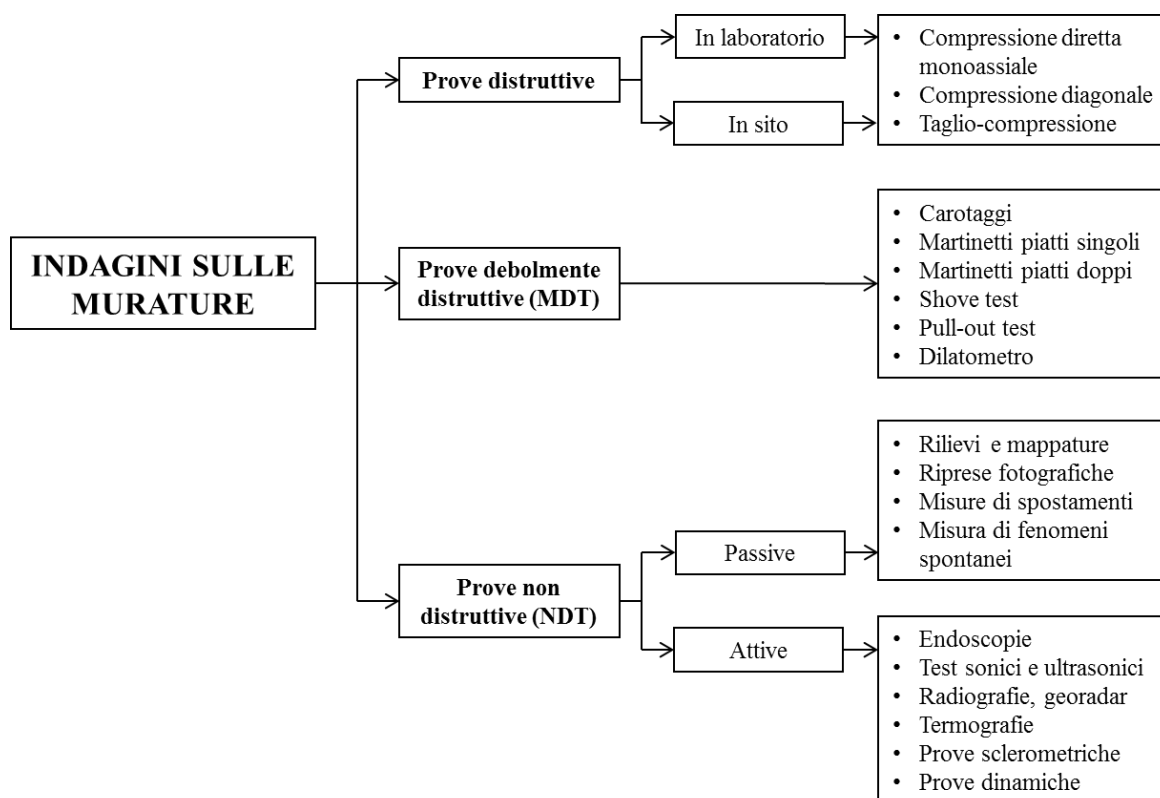


Fig. 2.3 – Indagini sulle murature (Valluzzi, 2012).

Il lavoro di confronto tra i risultati dei test distruttivi e i risultati dei test non invasivi ha già portato a buoni risultati con le tecniche delle prove soniche e dei martinetti piatti, soprattutto in merito alla valutazione della resistenza a compressione e delle caratteristiche di deformabilità della muratura soggetta a

sforzi di compressione. L'esatta determinazione della resistenza e dei parametri di deformabilità delle murature sollecitate a taglio resta invece ancora legata a procedure di prova distruttive (Mondin, 2004).

2.5.1 PROVE DISTRUTTIVE

Le prove distruttive consentono la misurazione diretta delle caratteristiche meccaniche delle murature quali resistenza e deformabilità.

Realizzate sfruttando sia gli sforzi di compressione che quelli di taglio, in sito vengono generalmente realizzate isolando il campione con dei tagli verticali per eliminare il confinamento laterale ed applicando un carico noto attraverso una opportuna struttura di contrasto. Per l'esecuzione delle prove distruttive a taglio secondo tale procedura, possono efficacemente utilizzarsi gli stipiti delle aperture come superficie sulle quali applicare l'attrezzatura di contrasto.

Un'altra configurazione utile per la stima della resistenza a taglio è quella della prova a compressione diagonale, che in sito viene riprodotta isolando un pannello su tre lati ed imprimendo l'azione lungo le direzioni diagonali.

Le medesime tecniche possono anche essere eseguite in laboratorio, previa costruzione di modelli a grandezza naturale o trasporto di campioni prelevati in cantiere.

Particolare attenzione va posta nella scelta delle dimensioni dei pannelli da testare: sono da evitare errori di scala e, per questo motivo, la dimensione minima, ovvero la larghezza del pannello, dovrebbe essere dell'ordine di almeno tre volte la massima dimensione degli elementi. Inoltre i rapporti tra altezza e larghezza e tra altezza e spessore del pannello da testare andrebbero scelti in modo da evitare effetti "di bordo", permettendo la formazione di sforzi uniformemente distribuiti nella parte centrale del campione e un meccanismo di rottura non influenzato da effetti secondari (Colonna, 1999).

L'esecuzione dei vari tipi di prova può comunque essere di volta in volta diversa in relazione al metodo di applicazione del carico e alla strumentazione disponibile.

Si riportano di seguito le descrizioni delle tre principali prove distruttive attualmente utilizzate:

- Prove di compressione diretta monoassiale;
- Prove di compressione diagonale;
- Prove di taglio-compressione.

2.5.1.1 PROVA DI COMPRESSIONE DIRETTA MONOASSIALE

La prova diretta monoassiale consiste nell'applicazione ad un pannello murario precedentemente predisposto di un carico di compressione monotono o ciclico fino al raggiungimento o al superamento della resistenza massima dell'elemento. Lo sforzo viene impartito attraverso dei martinetti idraulici che agiscono sulle due piastre di ripartizione collocate alle estremità del provino e deve essere tale da garantire sia che le tensioni verticali siano distribuite il più uniformemente possibile sul campione, sia che la risultante delle compressioni sia centrata nella sezione del provino.



Fig. 2.4 – Prova di compressione diretta monoassiale eseguita in laboratorio (sinistra) e relativo esito (destra) (Santunione e Secchiero, 2011).

Per i test di compressione in sito la prima operazione da compiere è il taglio, per mezzo di speciali seghe diamantate, di una porzione di muratura da testare. In genere si isolano le superfici laterali e la superficie sommitale del pannello, lasciando solo la base inferiore connessa alla muratura esistente. Travi in acciaio o in cemento armato sono collocate sulla base superiore del pannello per distribuire i carichi applicati. Per i campioni di muratura testati in laboratorio invece, la prova viene eseguita dopo aver realizzato due cordoli in cemento armato per assicurare la distribuzione dei carichi e l'orizzontalità del piano di applicazione degli stessi. Le dimensioni, la forma e le specifiche dei pannelli realizzati ex novo sono indicate nella normativa UNI 1052-1 e possono essere utilizzate anche per la scelta dei campioni da prelevare da murature esistenti (Modena, 2009).

Attraverso alcuni trasduttori di spostamento, vengono rilevate le deformazioni del pannello murario causate dall'applicazione del carico di compressione e vengono quindi ricavate le curve costitutive del materiale. Il posizionamento degli estensimetri anche sullo spessore del muro è di notevole importanza ai fini della misurazione della deformazione trasversale e dell'acquisizione di informazioni sullo sganciamento e sul distacco tra i paramenti dovuto allo sforzo di compressione applicato.

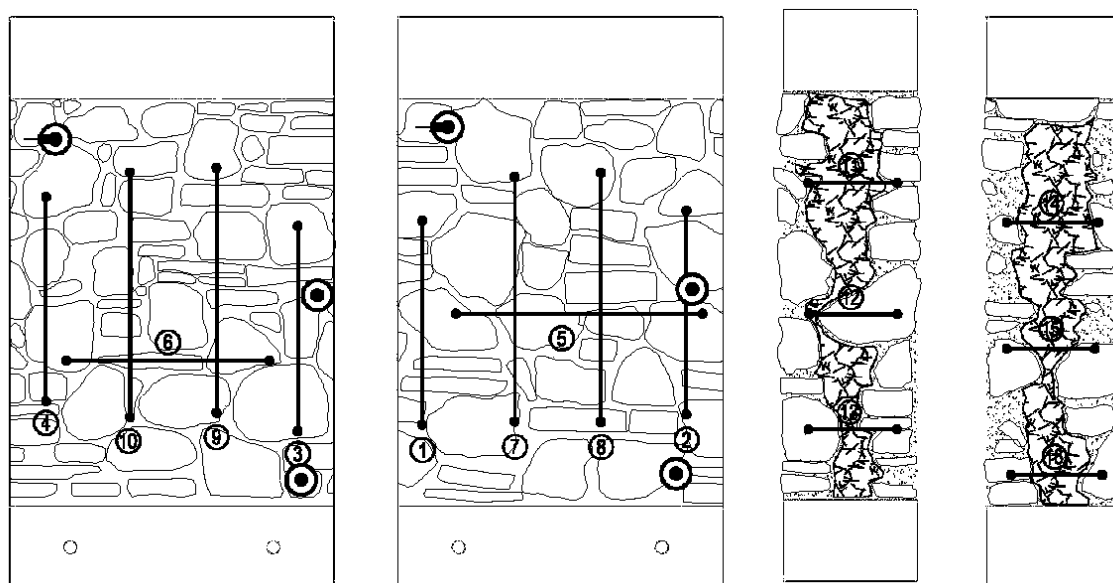


Fig. 2.5 - Disposizione dei trasduttori di spostamento nelle prove di compressione diretta (Santunione e Secchiero, 2011).

La prova è in grado di fornire i parametri necessari per la determinazione della resistenza a compressione, della relativa deformazione e del modulo di elasticità del campione. In campo pseudo-elastico è possibile ricavare anche informazioni in merito alle caratteristiche di rigidezza della muratura, come il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson. Spingendo poi il pannello in campo plastico fino a rottura, è possibile definire la resistenza ultima della struttura, ottenere alcune importanti indicazioni di massima riguardanti la capacità deformativa in compressione del provino ed osservare la modalità di collasso del pannello murario stesso.

2.5.1.2 PROVA DI COMPRESSIONE DIAGONALE

La prova di compressione diagonale consiste nell'applicazione di un carico di compressione monotona o ciclica ad un campione di muratura posizionato in diagonale con una rotazione di 45° rispetto al piano orizzontale fino al raggiungimento della rottura a taglio.

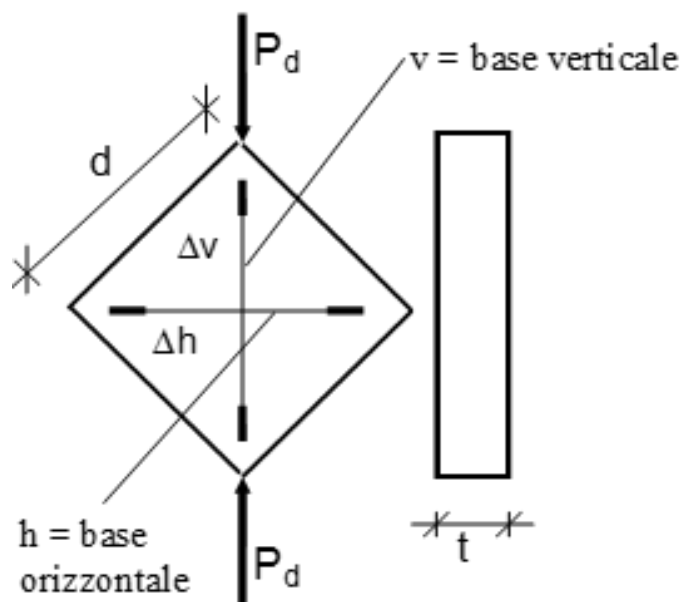


Fig. 2.6 – Schema della prova di compressione diagonale (Modena, 1994).

Nei campioni di muratura testati in laboratorio, lo sforzo viene impartito attraverso delle presse o dei martinetti idraulici che agiscono su due cordoli di cemento collocati in corrispondenza degli spigoli del provino. Per i test in sito

invece, il carico viene applicato mediante martinetti posizionati sugli spigoli di un pannello murario opportunamente isolato dal resto della struttura. In questo caso il sistema non viene ruotato rispetto al piano. Nella scelta della porzione di muratura da tagliare è necessario tenere conto dei seguenti aspetti:

- Integrità della muratura: Il pannello non deve presentare lesioni, fessurazioni e altri difetti preesistenti quali fuori piombo, presenza di nicchie o cavità dovute a canne fumarie o tubazioni per gli impianti;
- Rappresentatività del pannello: Il campione scelto deve essere rappresentativo della tipologia muraria dell'edificio.



Fig. 2.7 – Prova di compressione diagonale eseguita in laboratorio (sinistra) (Modena et al., 2000b) e prova di compressione diagonale eseguita in sito (destra) (Cappello, 2011).

Attraverso l'utilizzo di questo schema di applicazione dei carichi, si generano degli sforzi principali sia di compressione che di trazione, dato che la retta d'azione del carico forma un angolo diverso da 0° con i giunti della muratura.

Questa tecnica di indagine viene utilizzata per la misura indiretta della resistenza a taglio per fessurazione diagonale e delle caratteristiche di deformabilità a taglio dei pannelli (modulo di taglio).

Le due normative di riferimento attualmente disponibili per i test di compressione diagonale sono la RILEM TC 76-LUM: *“Tests for masonry materials*

and structures - LUM C3 Cyclic shear test for masonry panels designed to resist seismic forces del 1991 e la ASTM E 519-02 “*Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*” del 2002. Entrambe stabiliscono sia le procedure di esecuzione che le possibili modalità di interpretazione dei risultati. I metodi di analisi suggeriti da queste norme differiscono sostanzialmente dal fatto che il primo individua uno stato di tensione principale di trazione al centro del pannello che lo porta a rottura, mentre il secondo considera la formazione di uno stato di taglio puro nel pannello. In merito allo svolgimento della prova, vengono suggerite due possibili procedure:

- Raggiungimento del carico di rottura tralasciando l'analisi dello stato deformativo;
- Lettura delle deformazioni lungo le due diagonali, almeno fino alla prima fessurazione, per ottenere una curva sforzo-deformazione.

Entrambi i sistemi propongono inoltre un'ipotesi di omogeneizzazione della distribuzione dello sforzo di taglio puro al centro del pannello.

La prova può inoltre essere eseguita su provini di varie forme e dimensioni e secondo differenti modalità:

- Pannello circolare di spessore S e diametro D , ipotizzando un meccanismo di crisi dovuto al raggiungimento della tensione di rottura per trazione nel centro del pannello. La tensione di rottura viene quindi ricavata in funzione del carico verticale di collasso N , utilizzando l'espressione di Boussinesque valida per la lastra indefinita omogenea e isotropa;
- Pannello quadrato di spessore S e lato B , con disposizione del pannello a 45° rispetto al piano orizzontale e applicazione del carico lungo la diagonale dello stesso (questa tipologia è la più utilizzata).

2.5.1.3 PROVA DI TAGLIO-COMPRESSIONE

La prova di taglio-compressione consiste nell'applicazione di una forza di compressione orizzontale a metà dell'altezza di un campione di muratura

contrastato superiormente da un carico verticale. I provini da testare devono avere forma rettangolare, con altezza pari al doppio della larghezza. In tal modo, al momento dell'applicazione del carico orizzontale, i pannelli vengono suddivisi in due semi-pannelli di forma quadrata, in ognuno dei quali si sviluppa uno stato di sollecitazione analogo a quello ottenuto nelle prove di compressione diagonale.

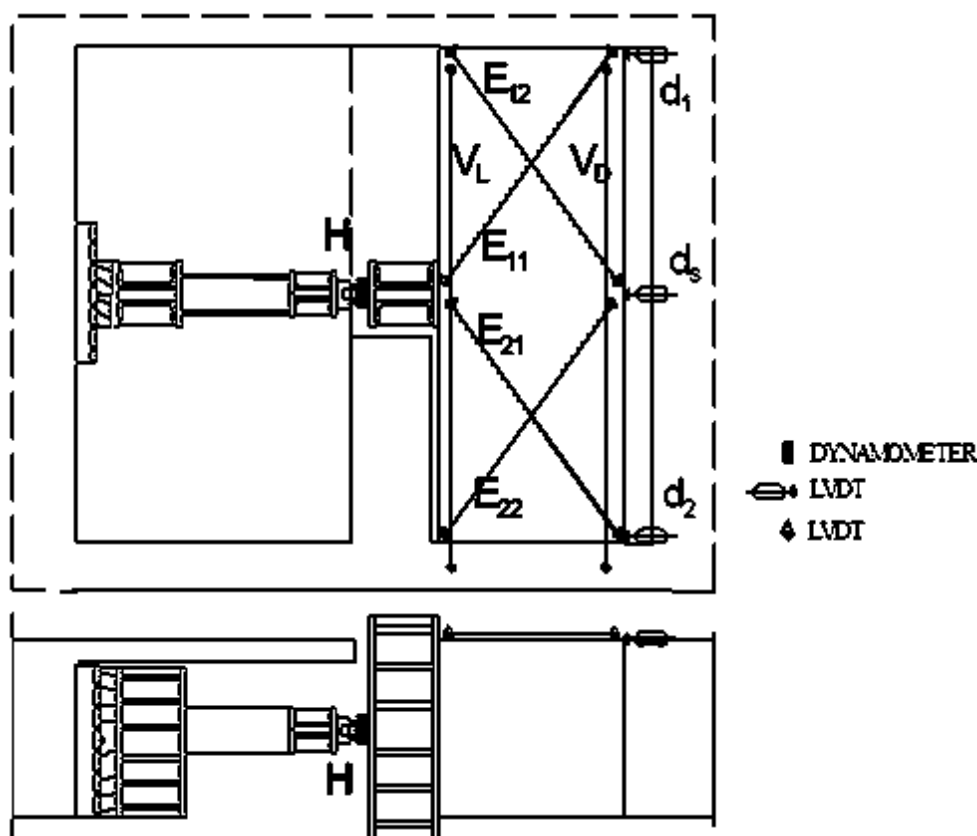


Fig. 2.8 -Schema della prova di taglio-compressione e disposizione dei trasduttori (Loeffelstiel, 2005).

L'azione viene trasmessa utilizzando due barre d'acciaio filettato orizzontali che, da un lato, sono collegate ad una trave verticale di carico posta a contrasto su una porzione di muratura diversa da quella da testare o su un'apposita struttura, dalla quale un martinetto idraulico, comprimendosi, fa muovere le barre stesse generando lo sforzo. Dalla parte opposta del campione le aste sono invece collegate ad un dispositivo di carico che, appoggiato sullo spessore laterale del pannello, si muove insieme alle barre trasmettendo lo sforzo al pannello stesso. Per eseguire la prova in modalità ciclica è invece necessario modificare la disposizione della strumentazione di prova in modo da ottenere l'inversione della direzione di carico.

Nel caso di test di taglio-compressione in sito, si procede innanzitutto al taglio dei pannelli. I tagli vengono generalmente eseguiti lungo i due lati verticali e sulla parte sommitale, per poter applicare il carico verticale al provino. In alternativa il campione può essere isolato solo lungo i due lati verticali ma, in queste condizioni, risulta impossibile controllare il carico verticale agente e i relativi sforzi nella muratura.

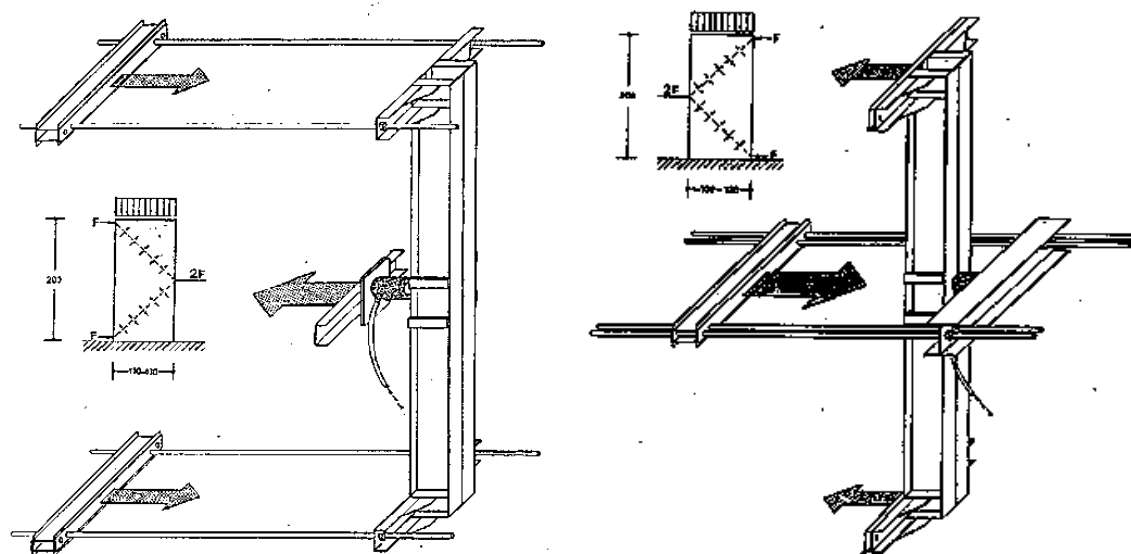


Fig. 2.9 -Strumentazione per l'esecuzione della prova di taglio-compressione in sito con (sinistra) e senza (destra) sistema di inversione del carico (Modena et al., 2000b).

La prova svolta in laboratorio consiste invece nell'applicazione di una forza di compressione verticale costante, che simula l'azione di pre-compressione verticale gravitazionale agente sulle pareti reali e di una forza di taglio orizzontale variabile in modo ciclico o monotono e corrispondente all'azione sismica agente durante un terremoto negli edifici reali. Grazie a tali carichi la prova indaga il comportamento dei maschi murari di edifici reali sottoposti ad azioni orizzontali cicliche, il cui effetto è riconducibile all'azione sismica. Data la difficoltà di simulazione del comportamento reale di una costruzione vera e propria, la prova svolta in laboratorio viene effettuata con condizioni al contorno semplificate e controllate. Sono essenzialmente due gli schemi di prova adottabili a seconda delle condizioni di vincolo della sezione superiore del muro:

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

La configurazione sviluppata più recentemente consiste in un banco di prova che si muove verticalmente e mantiene costante il carico di pre-compressione, mentre il carico orizzontale viene applicato ad altezza del baricentro del campione.

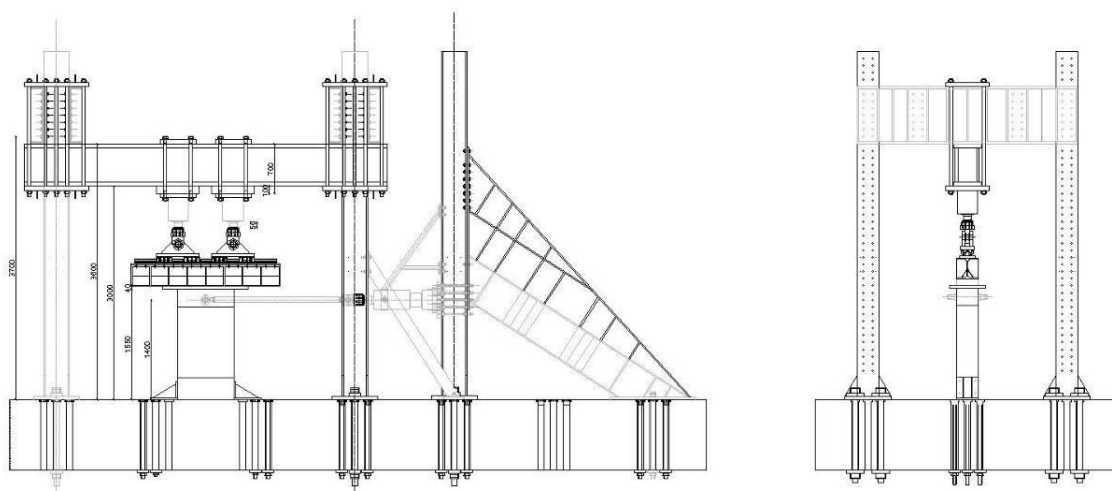


Fig. 2.10 –Strumentazione per l'esecuzione della prova di taglio-compressione in laboratorio (Santunione e Secchiero, 2011).

Strumentando opportunamente i due semi-pannelli lungo le diagonali, è possibile determinare la curva tensioni-deformazioni e quindi calcolare la resistenza a taglio e il modulo di taglio della muratura testata.

2.5.2 PROVE DEBOLMENTE DISTRUTTIVE

All'interno di questa categoria rientrano quelle prove che, pur compromettendo parzialmente la porzione di muro testata, forniscono valori numerici che possono essere direttamente estendibili alle caratteristiche

meccaniche dell'intera muratura. In particolare, dall'esecuzione di queste indagini è possibile ricavare misure dirette delle caratteristiche di resistenza e deformabilità delle strutture, misure dello stato di sforzo agente sulla struttura stessa e, oltre ai suddetti parametri quantitativi, consentono di effettuare valutazioni qualitative sulla composizione della muratura. Costituiscono quindi un valido supporto per effettuare diagnosi in vista di interventi di consolidamento e controlli sull'efficacia di questi ultimi.

È importante sottolineare che non tutte queste prove presentano il medesimo grado di affidabilità e, l'utilizzo dell'una o dell'altra, è funzione dell'elemento del quale si vuole approfondire la conoscenza.

Si riportano di seguito le descrizioni delle prove debolmente distruttive maggiormente utilizzate nelle fasi di indagine e verifica degli interventi:

- Martinetti piatti singoli e doppi
- Carotaggi
- Drill Energy test (penetrometri)
- Shove test
- Pull-out test
- Prove dilatometriche

2.5.2.1 MARTINETTI PIATTI SINGOLI E DOPPI

Questa tecnica, originariamente applicata per la determinazione dei livelli di sforzo delle murature in sito, è stata successivamente calibrata anche per la rilevazione delle caratteristiche di deformabilità. Già dalle prime applicazioni su monumenti storici sono apparse ben chiare le notevoli potenzialità del metodo. Si tratta infatti di una tecnica, forse l'unica attualmente disponibile, che è in grado di fornire informazioni attendibili sulle principali caratteristiche meccaniche di una struttura muraria, sia in termini di deformabilità che di stato di sforzo e resistenza.

I martinetti piatti sono dei cuscinetti vuoti realizzati mediante la saldatura lungo i bordi di sottili lamine d'acciaio (di spessore circa 0.6mm). Hanno forme e

dimensioni varie che permettono loro di adattarsi ad ogni tipologia di muratura e di taglio.

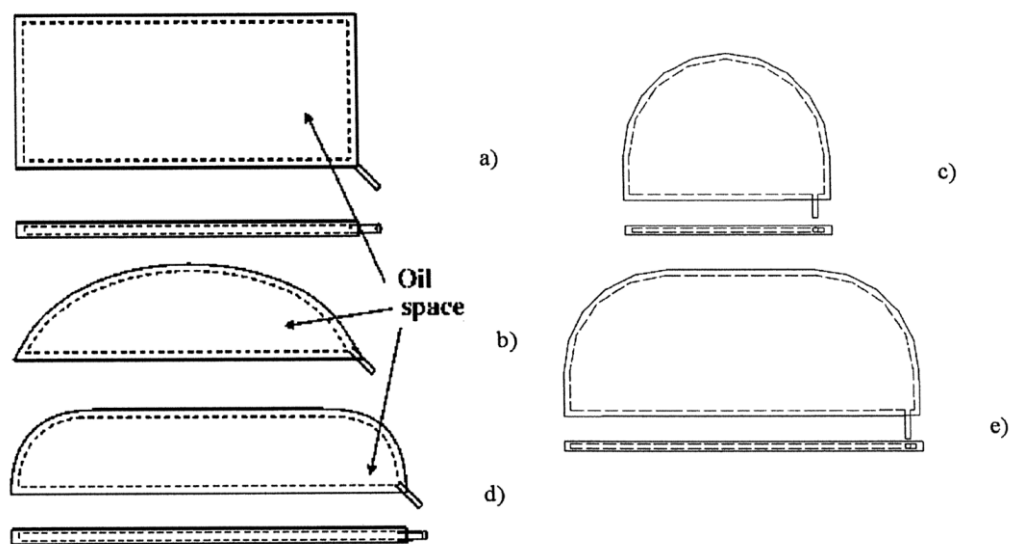


Fig. 2.11 – Geometrie dei martinetti piatti (RILEM, 1991).

La prova viene inizialmente condotta realizzando un taglio orizzontale lungo un giunto di malta. Lo stato di sforzo può essere determinato misurando, con appositi estensimetri removibili, il rilassamento causato dal taglio perpendicolare alla superficie muraria. Il rilascio, infatti, determina una parziale chiusura della fessura. Nella fase successiva viene inserito nella “tasca” praticata nella muratura un martinetto idraulico piatto realizzato con sottili lamiere di acciaio saldate e si aumenta gradualmente la pressione al suo interno fino ad annullare la deformazione generatasi in seguito al taglio. In queste condizioni la pressione all’interno del martinetto eguaglia la sollecitazione preesistente nella muratura in direzione normale al piano del martinetto e risulta quindi immediata la conoscenza dello stato tensionale del muro.

Il valore dello sforzo all’interno della struttura viene calcolato per mezzo della seguente relazione di equilibrio:

$$S_f = K_j K_a P_f$$

S_f = Valore calcolato dello sforzo

K_j = Costante di calibrazione del martinetto (<1)

K_i = Costante di taglio e del martinetto (<1)

K_j = Pressione del martinetto

In una muratura di mattoni, il taglio può essere effettuato lungo i giunti orizzontali. In genere, per questa tipologia muraria, è utilizzato un martinetto rettangolare. In altri casi il taglio può essere fatto con un disco rotante dotato di lama diamantata. Il martinetto piatto avrà quindi la stessa geometria del taglio.

L'uso dei martinetti piatti su murature di pietra irregolare non è semplice, data la difficoltà nell'individuazione di giunti continui regolari. Il taglio ed il successivo inserimento del martinetto interesserà quindi direttamente i corsi di pietra. È da sottolineare inoltre, che nel caso di murature a più paramenti la prova fornisce indicazioni riguardanti esclusivamente gli strati più esterni.

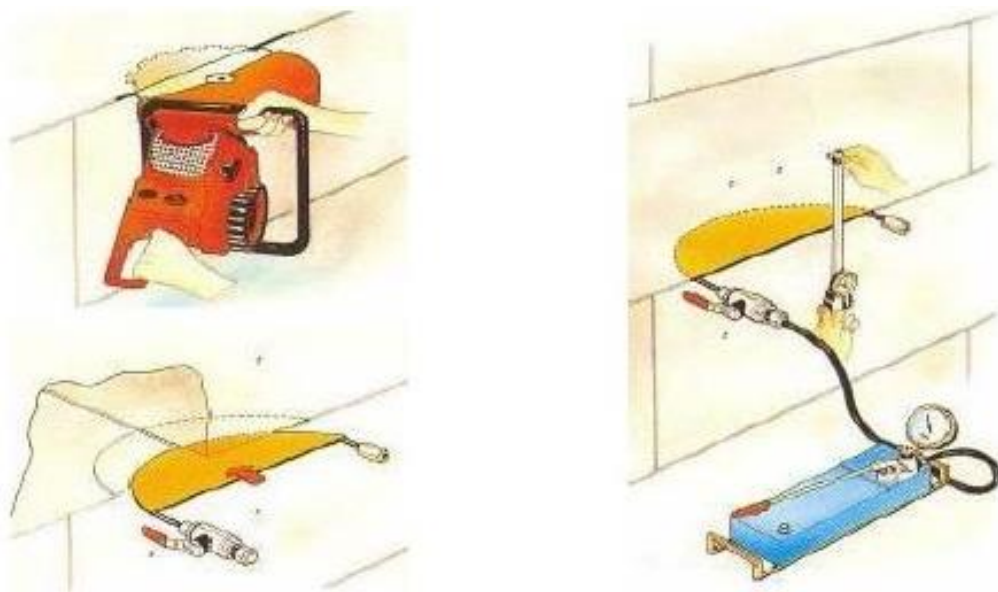


Fig. 2.12 –Fasi della prova di martinetto piatto singolo (Jurina, 2007).

Come precedentemente accennato, la prova può essere utilizzata anche per la misurazione della deformabilità della muratura. A questo scopo viene inserito all'interno della muratura, alla distanza di circa 40-50 cm dal primo e parallelamente ad esso, un secondo martinetto piatto. I due martinetti delimitano così una porzione di muratura non disturbata di dimensioni apprezzabili, su cui effettuare una vera e propria prova di compressione monoassiale. Un'apposita strumentazione posta sulla superficie consente di misurare le deformazioni verticali

e laterali. I valori del modulo elastico e della resistenza locale della muratura vengono determinati nelle fasi di carico e scarico della prova, condotta a controllo di carico. La prova con doppio martinetto piatto può essere utilizzata anche per la valutazione della resistenza a compressione delle murature. Vengono eseguiti alcuni cicli di carico con incremento graduale del livello di sollecitazione allo scopo di determinare i moduli di deformabilità della muratura per i diversi livelli di sforzo. L'incremento viene perpetuato fino all'insorgere delle prime lesioni e il valore della resistenza a compressione della muratura viene stimato, con buona approssimazione, mediante l'estrapolazione della curva sforzi-deformazioni.

Risulta interessante il confronto tra le informazioni ricavate dalla prova dei martinetti doppi e il livello di sforzo misurato con il martinetto piatto singolo. Esso consente infatti di verificare lo stato della muratura in relazione alle sue potenzialità ultime.

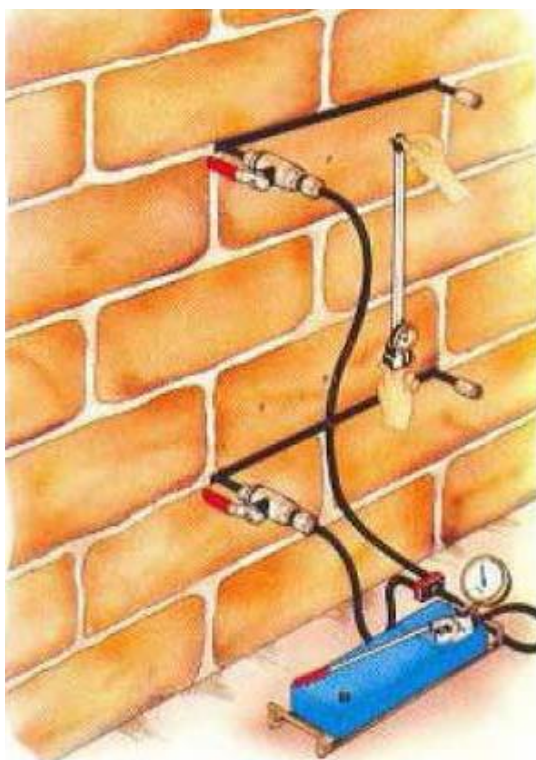


Fig. 2.13 –Esecuzione della prova di martinetto piatto doppio (Jurina, 2007).

Le normative di riferimento attualmente disponibili per i test di martinetto piatto singolo e doppio sono:

- RILEM Recommendation TC 177-MDT “*Masonry durability and on-site testing’ – LUM D.4: In-situ stress tests based on the flat jack*” (martinetto singolo);
- ASTM C 1196-04 “*Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using the flat-jack method*” (martinetto singolo);
- RILEM Recommendation TC 177-MDT “*Masonry durability and on-site testing’ – LUM D.5: In-situ stress - strain behavior tests based on the flat jack*” (martinetto doppio);
- ASTM C 1197-04 “*Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flat-jack method*” (martinetto doppio).

Queste norme dettano le raccomandazioni relative alla strumentazione da utilizzare, alle modalità di esecuzione e alle metodologie di analisi dei dati.

È inoltre importante sottolineare come nel caso di edifici bassi (uno o due piani) lo svolgimento della prova sia difficile se non impossibile, a causa della mancanza di contrasto superiore dovuta ai bassi valori dello sforzo presente nella muratura. In questo caso quindi, si può controllare lo stato di tensione solo mediante la prova con il martinetto singolo. L’eventuale prova con martinetti doppi può essere svolta solo con carichi molto bassi, traendo informazioni esclusivamente sui parametri elastici.

2.5.2.2 CAROTAGGI

L’ispezione diretta della muratura resta a tutt’oggi la tecnica più indicata per l’analisi della morfologia muraria. A volte questa può essere condotta semplicemente asportando alcuni mattoni o blocchi di pietra e rilevando e fotografando la sezione interna del muro. In altri casi è invece necessario effettuare dei carotaggi profondi in alcune zone rappresentative della struttura.

Il carotaggio è una tecnica di indagine locale consistente nella perforazione della muratura con appositi strumenti (carotatori) e nell’estrazione di campioni

(carota) che consentono il riconoscimento della stratigrafia del muro e l'individuazione della sua composizione.



Fig. 2.14 -Esecuzione della prova di carotaggio (Binda et al., 2001c).

Questa tecnica è ampiamente utilizzata nelle indagini delle murature nonostante abbia un grosso limite: l'impossibilità di ottenere campioni integri. Ciò è dovuto alle vibrazioni indotte dallo strumento di perforazione e al dilavamento della malta causato dall'acqua iniettata durante il prelievo della carota. Per tale motivo le valutazioni sull'effettiva qualità e sulla consistenza del materiale originario sono spesso difficoltose.

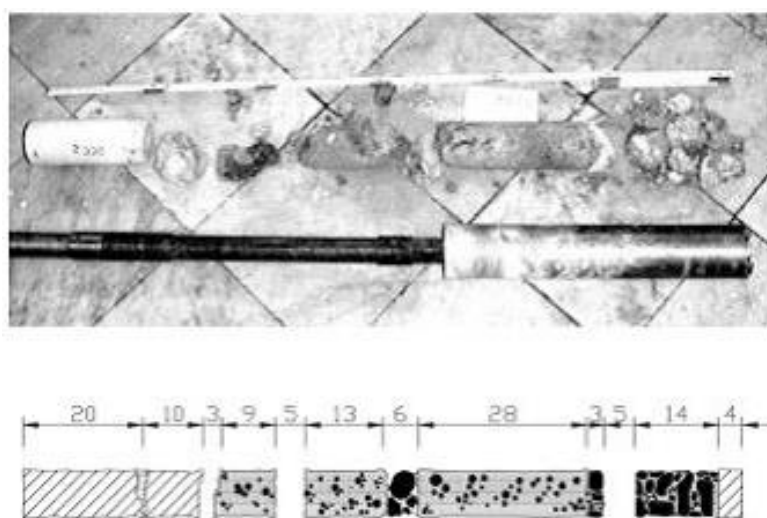


Fig. 2.15 - Analisi di una carota estratta (Binda et al., 2001c).

Le perforazioni si rivelano utili anche per l'ispezione delle murature a mezzo di endoscopi che consentono la visione diretta della sezione. L'endoscopia è una tecnica non distruttiva e per tale ragione sarà trattata esaurientemente nel paragrafo dedicato a tale tipologia di indagini.

2.5.2.3 SHOVE TEST

La prova di taglio diretto è finalizzata alla determinazione del valore medio di resistenza a taglio di una muratura in mattoni pieni e alla valutazione dell'aderenza tra la malta e gli elementi resistenti.

Il test consiste nel far slittare orizzontalmente, per mezzo di appositi martinetti, un elemento di laterizio opportunamente isolato lateralmente dal resto della muratura. La resistenza a taglio viene quindi misurata per il letto di malta adiacente al mattone caricato e calcolata sulla base dell'area lorda della giuntura, presupponendo che questa sia pienamente riempita.

La prova può essere eseguita secondo due diverse metodologie. Il primo metodo si avvale dell'utilizzo di due martinetti piatti, posti sopra e sotto la zona interessata dalla prova, che consentono il controllo dello stato di compressione del campione durante lo svolgimento della prova. Nel secondo metodo invece, la compressione del provino non viene controllata ma ne viene stimata l'entità.

Operativamente, la prima fase consiste nell'estrazione dei due mattoni (e dei relativi giunti di malta) adiacenti a quello da testare: in uno dei fori ottenuti viene inserito il martinetto idraulico che fornisce la spinta, mentre nell'altro vengono posizionati degli estensimetri per la valutazione degli spostamenti orizzontali.

Al termine della preparazione della muratura si procede con l'esecuzione della prova, che consiste nell'incremento della pressione fornita dal martinetto orizzontale fino all'ottenimento di uno spostamento continuo del mattone. Nel caso in cui si operi con il primo metodo sopra descritto, la prova viene ripetuta anche modificando i carichi verticali agenti.

In alternativa, e in entrambi i metodi, è possibile eseguire il test asportando solamente i giunti di testa adiacenti all'unità di prova. In questo caso, in

sostituzione di quelli classici più ingombranti, viene utilizzato un piccolo martinetto piatto.

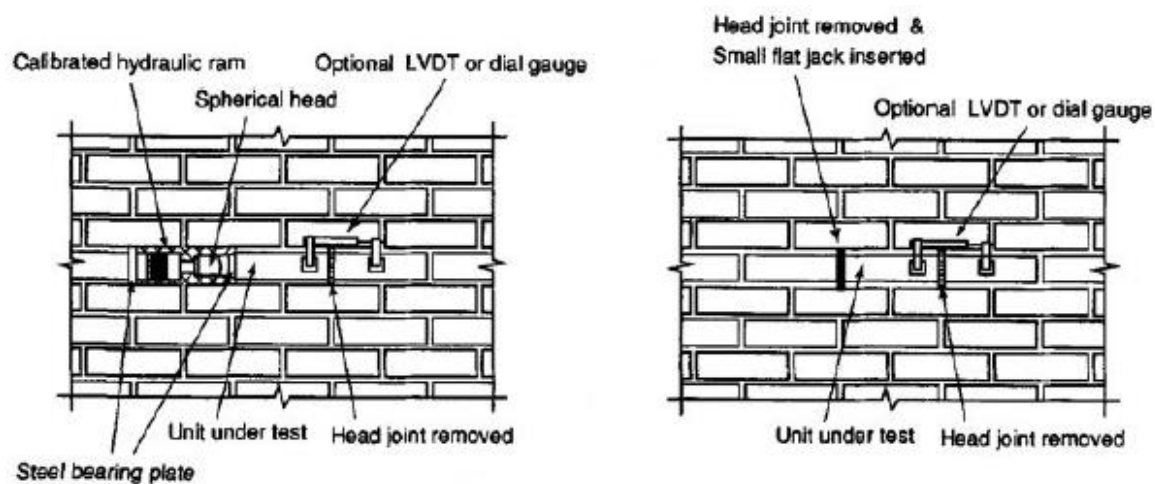


Fig. 2.16 – Schema di esecuzione dello shove test senza compressione (sinistra) e senza asporto dei mattoni (destra) (RILEM, 1996).

2.5.2.4 PROVA DI PENETRAZIONE

La prova di penetrazione ha l'obiettivo di caratterizzare la qualità della malta presente nella muratura. La consistenza dei giunti è infatti funzione dell'energia spesa da un apposito trapano strumentato per realizzare un foro di 4 mm di diametro e profondo 40-50 mm.



Fig. 2.17 – Strumentazione per l'esecuzione della prova penetrometrica (RILEM, 2004).

I limiti di questa prova sono legati alle difficoltà di calibrazione dello strumento nel caso delle malte storiche e all'impossibilità di estendere i risultati ottenuti all'intera struttura muraria.

2.5.2.5 PULL-OUT TEST

La prova di estrazione ha lo scopo di valutare la resistenza allo strappo di una barra di muratura. Lo sforzo viene individuato misurando la forza necessaria ad estrarre una vite ad elica da un giunto di malta di dimensioni consistenti. Il carico di estrazione può essere inoltre utilizzato per la determinazione della resistenza cubica, della resistenza a flessione e di quella a trazione.

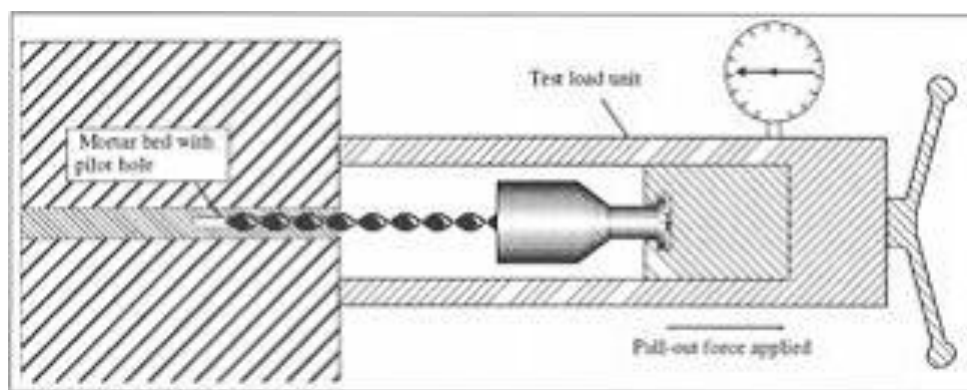


Fig. 2.18 – Schema di esecuzione della prova di pull-out (RILEM, 1996).

Oltre al limite di estendibilità dei risultati, è importante porre l'attenzione su una restrizione tecnica della prova: il carico applicato per l'estrazione della vite non deve superare quello massimo di snervamento dell'acciaio, altrimenti si ha la perdita della proporzionalità tra lo sforzo e la resistenza della malta.

2.5.2.6 PROVA DILATOMETRICA

La prova dilatometrica fornisce informazioni sulla rigidità e sulla deformabilità dei riempimenti di sezioni murarie di elevato spessore tipicamente realizzate a sacco. Si configura quindi come un test che completa i risultati offerti dei martinetti piatti che, per la loro natura, indagano solamente gli strati più superficiali della muratura.

Una speciale sonda dilatometrica viene inserita in fori realizzati con un carotatore. La sonda è provvista di un'apparecchiatura per l'applicazione di una tensione sulla parete del foro e di una strumentazione per la misura delle deformazioni. La sonda calcola il modulo di elasticità misurando la deformazione dello strato di riempimento della muratura in seguito alla pressione idrostatica uniforme applicata. Conoscendo i rapporti tra i moduli elastici corticali ed il nucleo della muratura si può stimare la distribuzione delle tensioni agenti.

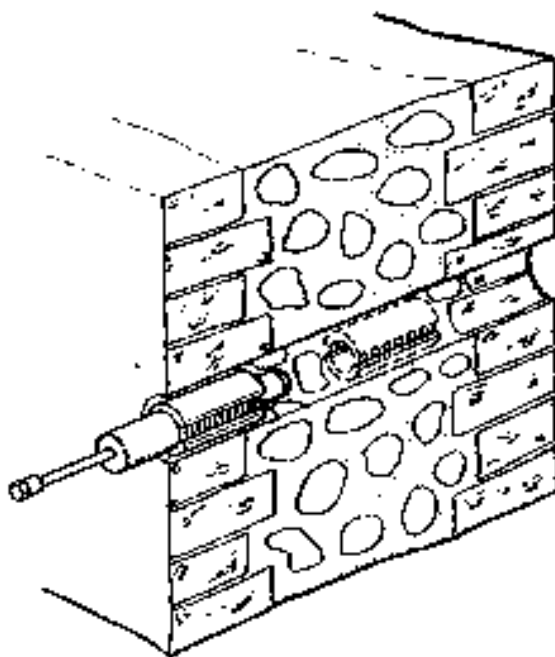


Fig. 2.19 – Schema di esecuzione della prova dilatometrica (Rossi, 1993).

2.5.3 PROVE NON DISTRUTTIVE

Le prove non distruttive rivestono un ruolo fondamentale all'interno del panorama delle indagini storiche poiché, allo stato attuale, rappresentano l'unica alternativa possibile per la realizzazione di test che consentano di ottenere informazioni utili pur garantendo la conservazione dell'edificio e del suo stato tensionale. Esse infatti si effettuano senza il prelievo di saggi o campioni e senza il danneggiamento dell'integrità della muratura. I risultati ottenibili sono però raramente di tipo quantitativo. Nella maggior parte dei casi i dati sono qualitativi, pertanto l'interpretazione di questo genere di prove deve essere basata su di una taratura sperimentale e su di una serie di ulteriori informazioni comparative.

Le tecniche non distruttive possono essere impiegate, con diverse finalità, in relazione alla tipologia di informazioni necessarie per il completamento dell'indagine conoscitiva:

- Individuazione degli elementi strutturali nascosti (strutture di solai, archi, pilastri, ecc.);
- Qualificazione della muratura e dei materiali costituenti e mappatura delle zone non omogenee (uso di mattoni differenti nello stesso edificio, ecc.);
- Valutazione dell'estensione del danno meccanico in strutture fessurate;
- Individuazione del degrado superficiale;
- Verifica delle proprietà meccaniche e fisiche dei materiali (malta, pietre, mattoni, ecc.);
- Controllo delle tecniche di riparazione (iniezioni, ristilatura dei giunti, ecc.).

L'applicazione di queste prove risulta indispensabile soprattutto nell'individuazione delle caratteristiche interne della muratura (cavità, vuoti, canne fumarie, morfologia della sezione) che, altrimenti, potrebbero essere rilevate solo con tecniche distruttive.

In relazione al grado di sollecitazione fornito alla struttura per individuarne le proprietà, è possibile classificare le prove non distruttive in due sottoclassi:

1. Prove non distruttive passive;
2. Prove non distruttive attive.

Della prima categoria fanno parte tutte le indagini visive e le analisi basate sulla misurazione di fenomeni fisici spontanei:

- Rilievi e mappature (geometrico, stato di fatto, degrado, quadro fessurativo, ecc.);
- Riprese fotografiche e televisive;
- Misura degli spostamenti (rotazioni, deviazioni dalla verticale, ecc.);
- Misura di fenomeni spontanei (magnetometria, ecc.);

Le prove non distruttive attive si basano invece sulla misurazione di fenomeni fisici indotti nella muratura per mezzo di eccitazioni meccaniche, elettriche o termiche artificiali. Di questa categoria fanno parte:

- Test sonici e ultrasonici diretti, indiretti e tomografici;
- Endoscopie;
- Radiografie, test radar e georadar;
- Termografie;
- Prove sclerometriche;
- Prove dinamiche.

Le prove qui brevemente citate verranno trattate esaurientemente nei paragrafi seguenti, ad eccezione delle prove soniche che, essendo argomento di questo lavoro Tesi, verranno discusse e approfondite in un capitolo a esse dedicato.

2.5.3.1 RILIEVI, MAPPATURE E RIPRESE FOTOGRAFICHE

La procedura da eseguire per la diagnosi di un edificio o di una muratura prevede l'esecuzione, preliminarmente a tutte le altre prove, di rilievi geometrici e del quadro fessurativo.

Queste prime operazioni hanno lo scopo di individuare i dettagli strutturali, di riconoscere gli elementi su cui intervenire con indagini più dettagliate e di identificare l'assetto strutturale dell'edificio. A garanzia di questi risultati, i rilievi devono essere accompagnati da un'analisi dell'evoluzione storica della struttura che ne giustifichi le discontinuità, le disomogeneità ed i danneggiamenti osservati nelle murature.

Attualmente, alle metodologie di rilievo classiche, sono spesso affiancate tecniche innovative piuttosto raffinate che permettono uno studio più approfondito e mirato degli elementi strutturali, anche per mezzo di modelli numerici. È il caso, ad esempio, della fotogrammetria o dei rilievi basati sul laser scanner.

2.5.3.2 MAGNETOMETRIA

La magnetometria o indagine pacometrica ha lo scopo di individuare, con discreta precisione, la presenza e la posizione di inclusioni metalliche inglobate all'interno della muratura.



Fig. 2.20 – Esecuzione della prova pacometrica (sinistra) e relativi risultati (destra) (GIEPI S.r.l.).

Il funzionamento del pacometro è basato sulla misurazione dell'assorbimento del campo magnetico prodotto dallo strumento stesso. La presenza di un materiale ferromagnetico nella struttura architettonica determina infatti un aumento della permeabilità del sistema nucleo/solenoide presente nello strumento e modifica l'impedenza (rapporto tra valore massimo della tensione e il valore massimo dell'intensità di corrente) di un solenoide rilevatore. L'entità dei cambiamenti dei valori di permeabilità e impedenza è legata alla posizione e alla dimensione dell'oggetto. L'alterazione del voltaggio viene riportata all'utilizzatore tramite un sistema analogico o digitale e registrata graficamente.

2.5.3.3 ENDOSCOPIA

L'endoscopia è una tecnica mutuata dalle discipline scientifiche mediche. Consiste nell'ispezione degli strati più interni della muratura, altrimenti inaccessibili, attraverso dei fori passanti in essa praticati (solitamente si sfruttano quelli realizzati con i carotaggi). A tal scopo si possono utilizzare sistemi ottici di

tipo rigido, costituiti da obiettivi e lenti tradizionali (boroscopi), o di tipo flessibile, formati da fibre ottiche. In entrambi i casi, gli apparecchi includono anche un sistema di illuminazione ed un oculare esterno che, abbinato ad una camera fotografica, consente la registrazione delle immagini.

Le indagini endoscopiche permettono quindi di ottenere informazioni in merito alle caratteristiche strutturali delle murature (spessore, morfologia e composizione interna) e alla presenza e dimensione di fessure e/o vuoti. Questi parametri sono utili per la valutazione degli eventuali interventi da eseguire e, in particolar modo, sono importanti per stimare l'opportunità di intervenire o meno tramite iniezioni. Inoltre le endoscopie sono spesso utilizzate, in fase di monitoraggio, per la valutazione dell'efficacia degli interventi di consolidamento.

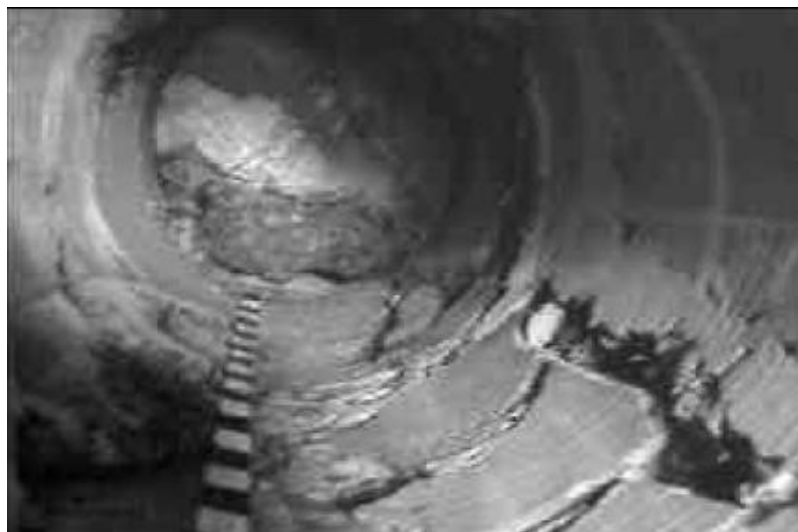


Fig. 2.21 – Esecuzione della prova endoscopica (Oliosio, 2004).

Nonostante la prova possa sembrare abbastanza invasiva (è necessaria l'esecuzione di fori nella struttura), essa viene catalogata come non distruttiva in quanto, nella maggioranza dei casi, le cavità utilizzate sono quelle già precedentemente ottenute per mezzo di carotaggi.

2.5.3.4 RADIOGRAFIA

Anche la tecnica radiografica, così come quella endoscopica, è mutuata dalle discipline scientifiche mediche. Essa si basa sul principio fisico dell'assorbimento

differenziato delle radiazioni elettromagnetiche da parte di materiali aventi diversa densità e spessore.

Dal punto di vista pratico la radiografia si esegue posizionando, sui due lati opposti della muratura, un emettitore di raggi x ed una pellicola sensibile che, una volta impressionata, mette in evidenza le irregolarità interne e le eventuali lesioni e vuoti della struttura. Le radiazioni utilizzate sono caratterizzate da onde ad altissima frequenza, dette raggi x (lunghezze d'onda λ variabili tra qualche centinaio e qualche decimo di angstrom). Il loro potere di penetrazione aumenta al crescere della frequenza e al diminuire della densità del materiale da esse attraversato.

In generale questa metodologia viene usata raramente a causa della sua pericolosità per la salute degli operatori.

2.5.3.5 TEST RADAR E GEORADAR

L'indagine radar è una tecnica sperimentale, ancora in fase di sviluppo, dalle interessanti potenzialità e versatilità. Consiste nella emissione e ricezione di impulsi elettromagnetici a larga banda (brevi successioni di onde elettromagnetiche ad alta frequenza) da parte di un'antenna appoggiata sulla superficie della struttura in corrispondenza dei punti da esaminare.

La prova si basa sul principio secondo cui un flusso di energia elettromagnetica viene alterato dagli oggetti incontrati lungo il suo percorso e che, tale alterazione, può essere rilevata attraverso degli echi di ritorno. Nel caso specifico della muratura, gli impulsi sono riflessi dalle interfacce presenti tra materiali aventi differenti proprietà elettromagnetiche (costante dielettrica o conducibilità). Attraverso l'uso di questo metodo è possibile effettuare diverse operazioni di indagine. Tra queste le più importanti sono:

- Ricerca di elementi strutturali nascosti in murature portanti e orizzontamenti;
- Individuazione di tessiture murarie nascoste da intonaci e affreschi;
- Controllo dell'efficacia delle iniezioni;

- Individuazione di difetti, fessure, vuoti ed inclusioni di materiali diversi;
- Individuazione delle morfologia delle sezioni in murature a più paramenti;
- Rilievo della presenza di umidità.

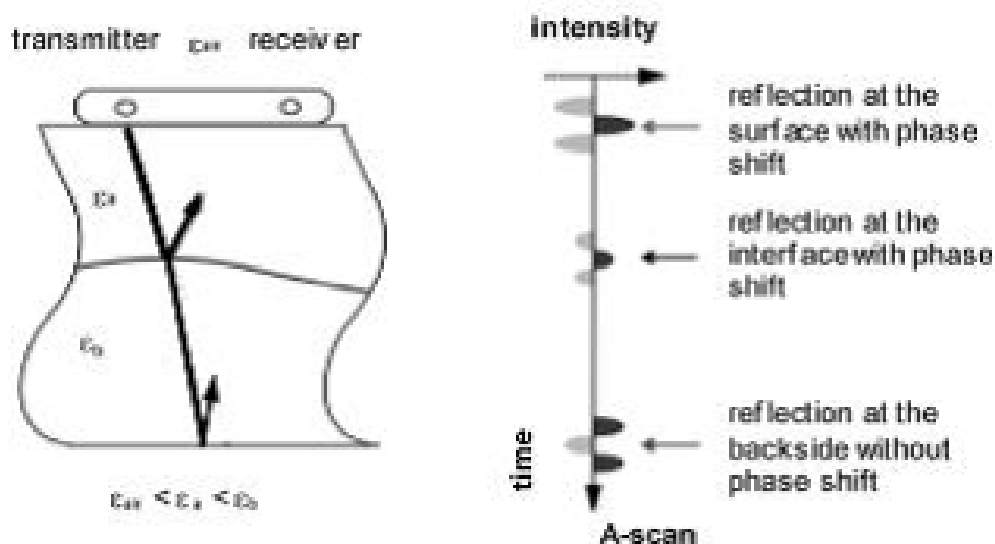


Fig. 2.22 – Principio di funzionamento della prova radar (ONSITEFORMASONRY, 2004).

L'antenna radar, in configurazione classica, è costituita da due dipoli affiancati aventi rispettivamente funzione di trasmissione e ricezione degli impulsi. Trascinando lo strumento sulla muratura da indagare si ottengono delle sezioni che esprimono l'andamento dei segnali ricevuti in funzione del tempo. L'immagine grafica prodotta dagli echi riflessi è quindi una sezione piana del mezzo irradiato in cui l'asse orizzontale rappresenta il tragitto coperto dall'antenna lungo la superficie esterna della muratura, mentre quello verticale rappresenta i tempi necessari all'onda per coprire lo spazio di andata e ritorno tra la superficie esterna e le zone di discontinuità che hanno provocato le riflessioni. Ripetendo le misurazioni a intervalli regolari lungo un determinato profilo, si ottengono immagini radar 2D. Eseguendo più profili 2D paralleli ed elaborando i dati è possibile produrre anche immagini radar 3D. Misurando il tempo necessario affinché gli impulsi attraversino tutta la sezione e siano captati dall'antenna ricevente come echi di ritorno, e conoscendo la velocità di propagazione del segnale nel mezzo, è teoricamente possibile determinare la posizione dei singoli ostacoli. Nel caso specifico della muratura, essendo un mezzo altamente disomogeneo, la valutazione della velocità

di propagazione è però molto complessa perché influenzata dai cambiamenti di materiale e dalla presenza di vuoti o di zone di umidità.

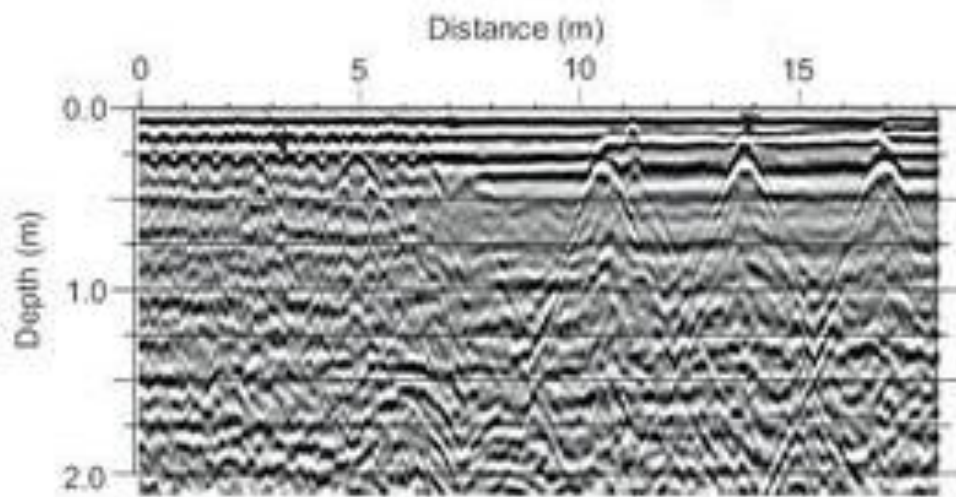


Fig. 2.23 – Immagine risultante da un indagine radar (Modena et al., 2000a).

Dal punto di vista pratico, la prova richiede una serie di accortezze e la presenza di personale esperto. In fase preliminare è opportuno eseguire la calibrazione dello strumento per impostare le caratteristiche dell'antenna in relazione alle finalità della prova e, in particolare, per verificare che il segnale abbia sufficiente potenza e corretta frequenza per attraversare la sezione. In particolar modo è indispensabile valutare correttamente la frequenza dell'onda in relazione alla profondità che si vuole raggiungere nell'indagine: a causa dei fenomeni di assorbimento infatti, all'aumentare della frequenza usata, diminuisce il grado di penetrazione dell'onda. In fase di interpretazione dei risultati è invece indispensabile saper individuare e valutare correttamente i numerosi disturbi presenti nel segnale. Questi sono dovuti principalmente a:

- Effetti della prima componente o break through: Interessano la prima parte del segnale (“nascondono” quindi le caratteristiche più esterne della muratura) e sono causati dal disturbo che si crea tra la componente ricevente e quella emittente dell'antenna e dall'impatto dell'onda con la superficie muraria;
- Echi multipli dovuti ai cambi di materiale;

- Sovrapposizione di echi laterali che possono creare immagini non esistenti di riflettori paralleli.

Per provare a limitare le componenti di disturbo viene raccomandata una scelta oculata della zona da studiare, adeguatamente lontana dagli spigoli che possono causare effetti di bordo. Essendo poi il segnale emesso fortemente polarizzato, è consigliabile ripetere le operazioni orientando l'antenna secondo diverse angolazioni, per eliminare i disturbi diffusi e migliorare la riconoscibilità degli elementi notevoli nelle immagini prodotte.

2.5.3.6 ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

Prima di affrontare e descrivere le restanti prove non distruttive attualmente disponibili nel panorama del recupero, è necessario soffermarsi su un particolare metodo di elaborazione dei dati provenienti da indagini non invasive: la tomografia. Si tratta di una tecnica di indagine iterativa che consente di ricostruire la distribuzione di un determinato parametro fisico all'interno di un solido mediante misure in trasparenza effettuate tra le superfici esterne.

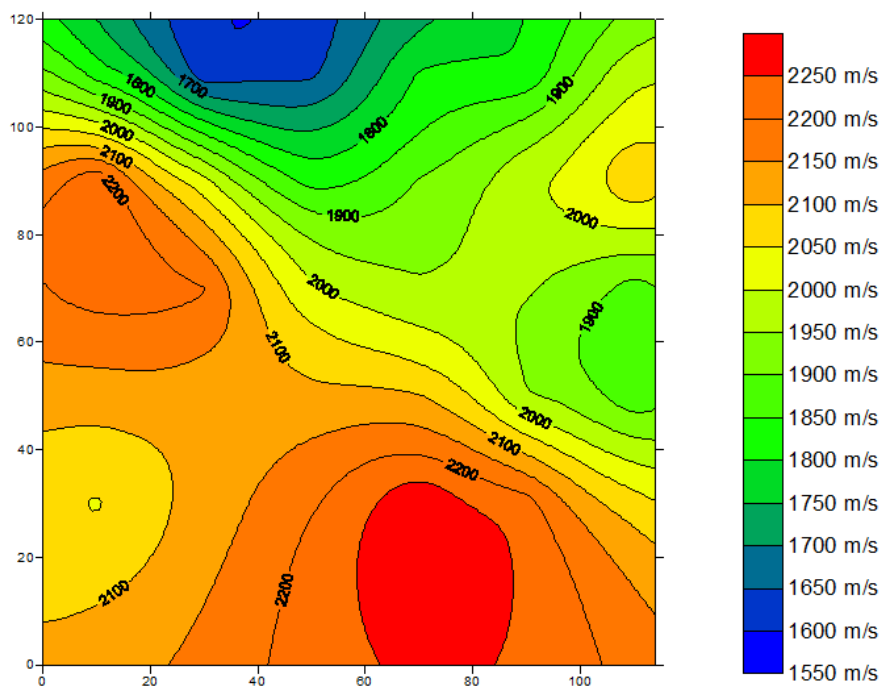


Fig. 2.24 – Immagine tomografica risultante dall'elaborazione di dati sonici (Amodio, 2000).

Il parametro che viene stimato dipende dalla natura del segnale che viene utilizzato per attraversare il mezzo e dal dato che viene estratto da ogni misura. Si potranno dunque ottenere tomografie soniche o radar in relazione alla natura dell'onda, mentre i possibili parametri da stimare potrebbero essere la velocità di propagazione delle onde elastiche o elettromagnetiche oppure le costanti di attenuazione dei segnali.

A livello pratico questa indagine rende necessaria l'acquisizione di varie serie di dati in corrispondenza di alcuni punti, disposti sulla superficie esterna dell'oggetto secondo una determinata maglia. Questi vertici sono distribuiti in maniera tale da individuare una fitta rete di percorsi che, attraversando il materiale, consentono di ricostruire una "immagine" dell'intera sezione analizzata. La successiva elaborazione dei dati con particolari algoritmi iterativi consente di ottenere le mappe di distribuzione dei parametri.

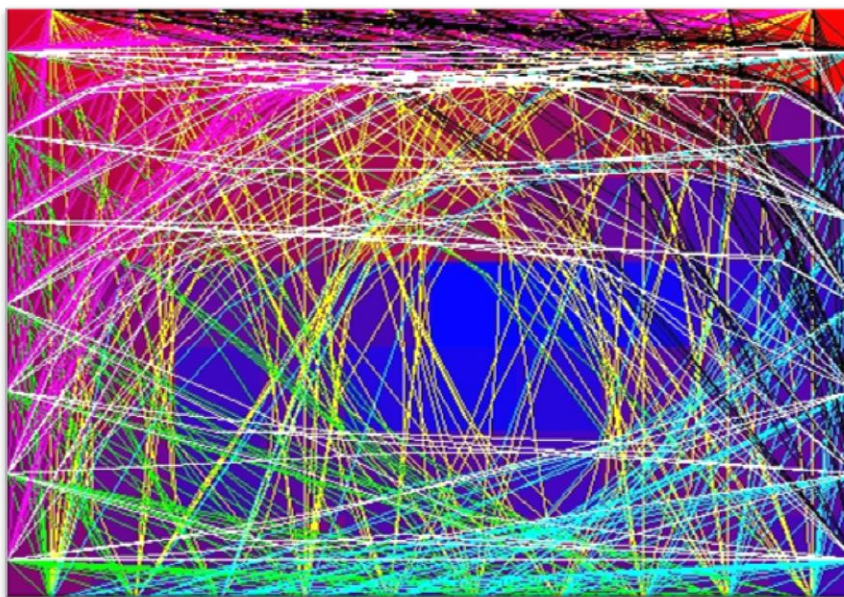


Fig. 2.25 – Percorsi compiuti da un'onda all'interno della sezione indagata (Monteforte, 1998).

Questa tecnica, grazie all'elevata risoluzione ottenibile nelle immagini, può rivelarsi particolarmente utile nella diagnosi di elementi isolati quali i pilastri o nella verifica di singole sezioni murarie. Presenta però ancora notevoli svantaggi legati agli alti costi in termini di tempi di acquisizione e di elaborazione dei dati.

2.5.3.7 TERMOGRAFIA

La termografia si basa sul principio secondo cui un qualsiasi oggetto emette una certa quantità di energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche nel campo dell'infrarosso in funzione della sua temperatura. Il flusso di energia è regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = e s T^4$$

E = Flusso energetico [W/m^2]

T = Temperatura assoluta della superficie da cui proviene il flusso E [$^{\circ}K$]

s = Costante = $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$

e = Emissività, costante adimensionale dipendente dal materiale superficiale

Immaginando che una struttura composita, come una muratura, sia esposta nelle stesse condizioni termiche (per esempio all'irraggiamento solare), i singoli elementi (pietra, malta, mattone, acciaio, ecc.) si porteranno ad una diversa temperatura in funzione delle loro proprietà termiche, ed in particolare del loro calore specifico e della loro conducibilità termica. Ciascun elemento emetterà un flusso di energia in accordo con la legge di Stefan-Boltzmann, in funzione della temperatura raggiunta e della sua emissività. L'indagine termografia consiste nella registrazione, mediante un apposito rilevatore ad infrarosso, delle temperature raggiunte dai vari elementi presenti in una struttura. Il rilevatore impiegato consente in particolare di misurare le radiazioni infrarosse (IR) comprese nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 2 e 6 μm . Mediante un sistema ottico (costituito da varie lenti) ed elettrico (capace di tramutare in un segnale elettrico l'intensità della radiazione ricevuta) le differenze di temperature vengono registrate in un termogramma, consistente nella rappresentazione grafica di tonalità monocromatiche (varianti, per esempio, dal bianco al nero) proporzionali alle diverse temperature.

Dalle temperature dei materiali si può quindi risalire alla loro densità o all'alterazione di elementi murari omogenei. La tecnica risulta utile per rilievi diagnostici di anomalie costruttive e modifiche strutturali (soprattutto per lo studio della morfologia di murature intonacate, in cui lo strato superficiale può

nascondere anomalie interne), per l'individuazione di tracce per l'impiantistica, (canne fumarie e tubazioni), per controlli sul percorso del materiale iniettato durante le fasi di iniezione e per rilievi dello stato di degrado dovuto a fessurazioni, umidità e muffe.

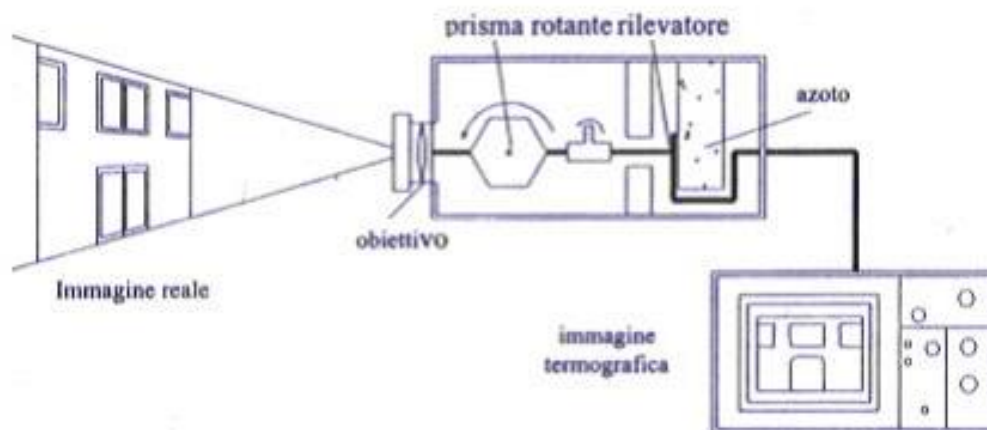


Fig. 2.26 – Schema della strumentazione utilizzata nelle indagini termografiche (Lenzi et al., 1997).

Il metodo consente di eseguire due diverse tipologie di indagine: analisi passiva e analisi attiva. Nel primo caso, si analizza la radiazione emessa dall'elemento durante i cicli termici legati ai fenomeni naturali di irraggiamento e successivo raffreddamento; nell'analisi attiva invece le superfici analizzate vengono riscaldate con modalità artificiali, come lampade o altro.

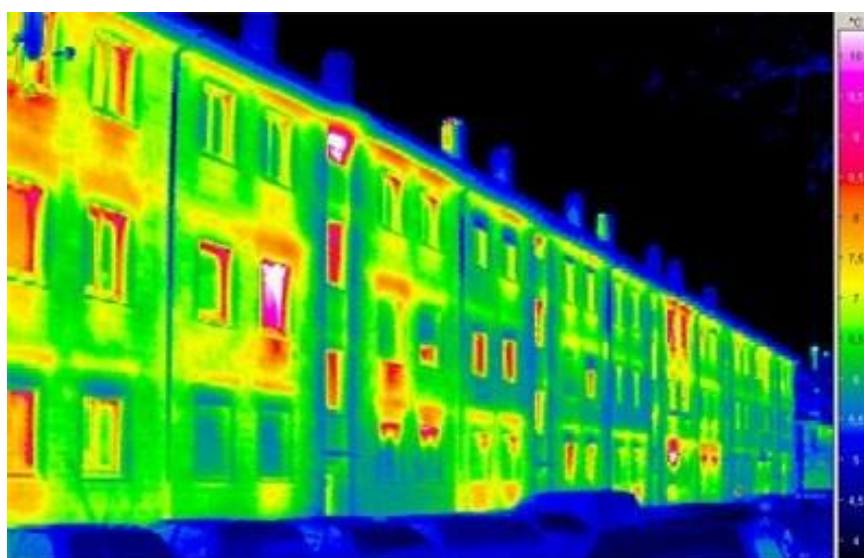


Fig. 2.27 – Risultato di un'indagine termografia (ESA S.r.l., 2012).

Una particolare applicazione di analisi termografica attiva consiste nel rilevare la distribuzione superficiale dell'umidità. La temperatura raggiunta in ogni elemento superficiale dipende infatti fortemente dal contenuto di umidità localmente presente: l'aumento di temperatura nelle zone più umide è naturalmente minore rispetto a quello delle zone più asciutte, pertanto una registrazione termografica consente di ricavare una mappatura comparativa dell'umidità superficiale. Mediante prove di essiccamento effettuate su alcuni campioni prelevati dalla struttura e sulla base delle indicazioni termografiche raccolte, diviene poi possibile determinare in assoluto e con precisione il contenuto di umidità della muratura.

L'analisi termografica risulta comoda nel caso di pareti intonacate o affrescate perché non prevede il contatto con la superficie, ma non può essere utilizzata per lo studio dell'intera sezione muraria. I limiti del metodo sono infatti legati alla scarsa penetrazione termica all'interno della struttura, essendo la profondità di indagine di soli pochi centimetri. Non è pertanto possibile, ad esempio, localizzare anomalie nascoste nella parte centrale della muratura. La termografia attiva può essere utilizzata per indagare strati collocati fino alla profondità di 10-20 cm, ma solo in relazione al particolare materiale costituente il mezzo da indagare e alle condizioni al contorno, ed è molto dispendiosa. Inoltre, le discontinuità superficiali possono distorcere e filtrare la propagazione del calore verso le zone più profonde. Anche le condizioni al contorno possono falsare l'immagine, rivelando forme inesistenti in corrispondenza di emissività locali differenziali non dovute ad effettive variazioni della struttura muraria. Infine, nonostante siano ormai disponibili programmi ad alta risoluzione termica e spaziale, è sempre necessario calibrare l'algoritmo matematico per ogni singola applicazione e quindi per ogni singolo materiale analizzato.

2.5.3.8 PROVA SCLEROMETRICA

La prova sclerometrica consente di determinare la durezza superficiale di una parete mediante la misura del rimbalzo di una massa battente proiettata sulla superficie della struttura stessa. Questo genere di prova riveste un ruolo di notevole

importanza soprattutto nell'applicazione su strutture in calcestruzzo e viene spesso utilizzata per la verifica della qualità dei giunti di malta. I limiti della tecnica sono legati alla strumentazione disponibile, calibrata per malte di cemento e, quindi, spesso inadatta per malte di calce, caratterizzate da una minore resistenza. Tuttavia queste indagini stanno da qualche tempo trovando ampia applicazione anche per le strutture in muratura, grazie all'introduzione di modelli di sclerometro (sclerometro a pendolo modificato da Van Der Klugt, sclerometro a percussione) calibrati su livelli di energia più appropriati ai vari tipi di superficie: pietra e mattone resistente, mattone di scadente qualità, malta.

Per l'esecuzione della prova si utilizza generalmente lo sclerometro a pendolo (Schmidt rebound hammer), uno strumento costituito da una molla che, opportunamente caricata e rilasciata, spinge un cilindro d'acciaio contro la parete. Il cilindro, rimbalzando all'indietro, sposta una lancetta su una scala graduata attraverso la quale è possibile rilevare, sulla base di relazioni empiriche, la durezza superficiale e la resistenza locale del materiale.



Fig. 2.28 – Sclerometro a pendolo di Van Der Klugt (sinistra) e sclerometro a percussione di Schmidt (destra) (Cappello, 2011).

In realtà, la correlazione tra durezza superficiale e resistenza a compressione dipende da alcuni parametri (come la durezza dell'aggregato lapideo, la finitura e la compattazione dello strato corticale, la presenza di intonaci o di umidità, ecc.) che possono influenzare la correlazione stessa. Il miglior impiego della sclerometria,

come avviene tipicamente per le prove non distruttive, è quello di individuare comparativamente zone relativamente più deboli e più forti (in termini di durezza superficiale e quindi di resistenza meccanica), in corrispondenza delle quali con poche e misurate prove distruttive si può determinare, in valore assoluto, la resistenza meccanica o il modulo elastico statico del materiale in sito.

La tecnica viene generalmente utilizzata in sito, sia al fine del controllo della qualità di alcune zone, sia come mezzo per evidenziare problemi locali. Può anche essere utilizzata in laboratorio per individuare alcuni parametri per il monitoraggio ed il controllo del degrado dovuto a piogge acide o a cicli di gelo e disgelo. Il metodo di interpretazione deve comunque tener conto della tipologia dei giunti (materiale e dimensione). Non risulta invece essere adatta per:

- Misurazione di valori assoluti di forza;
- Studio di giunti con rilevante presenza di sali solubili cristallizzati in superficie;
- Studio di giunti di calce poco consistente.

Nella pratica sarebbe opportuno eseguire non meno di nove - dieci prove per punto di misura ed accettare come durezza la media aritmetica dei risultati che differiscono dal valore medio di cinque unità. Le misure dovrebbero essere effettuate su aree o pannelli di muratura non più piccoli di $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ e non più grandi di $1 \times 1 \text{ m}^2$. Dovrebbero inoltre essere condotte su muratura asciutta o su porzioni di muratura caratterizzate da un analogo contenuto di umidità (accuratamente misurato tramite appositi test) di cui si dovrà tener conto in fase di interpretazione dei risultati. Le misure dell'indice sclerometrico devono far riferimento alla norma UNI EN 12504-2: *“Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico”* del 2001.

2.5.3.9 PROVE DINAMICHE

Le prove dinamiche in sito sono frequentemente utilizzate nella verifica dei comportamenti strutturali e nella valutazione dell'integrità di una struttura. Il loro principale fine è il controllo della risposta degli edifici alle vibrazioni.

Le prove sono efficienti strumenti diagnostici nel rilievo di eventuali anomalie e per la calibrazione di modelli numerici (ad esempio modelli agli elementi finiti). In particolar modo, consentono la verifica dell'efficienza e dell'affidabilità di metodi computazionali di analisi e controllo delle strutture. La disponibilità di un attendibile modello numerico interpretativo consente a sua volta un controllo diretto della struttura per carichi ordinari e la previsione della risposta a sollecitazioni eccezionali, in particolar modo dinamiche, come gli effetti del vento o di azioni sismiche. Le procedure di prova possono essere quindi indirizzate ad un periodico aggiornamento delle analisi numeriche preliminari attraverso le informazioni raccolte in sito. In tal modo il modello numerico risulta essere il più prossimo possibile all'effettivo comportamento dell'edificio.

Il programma di prove può prevedere l'uso di eccitazioni ambientali o di vibrazioni forzate. Le prime sono costituite da vento, traffico o, nel caso particolare di torri campanarie, dalle vibrazioni indotte dalle campane. Le vibrazioni forzate invece, sono prodotte da sistemi di martellamento locale o da vibrodine. È stato dimostrato che le frequenze e le forme modali ottenute da prove condotte con vibrazioni ambientali hanno generalmente un buon accordo con i risultati di prove condotte con vibrazioni forzate, che ovviamente risultano essere più costose.

Il rilievo dei dati viene generalmente effettuato tramite una rete di accelerometri installati in parti significative della struttura. L'analisi spettrale permette quindi di estrarre i parametri modali dalle registrazioni in termini di frequenza, forme modali e smorzamento, che costituiscono i parametri caratteristici della risposta locale e globale dell'edificio.

2.6 OSSERVAZIONI

L'esecuzione di alcune delle metodologie di indagine proposte nel presente capitolo rappresenta un importante crocevia nel percorso di valutazione dello stato di degrado dei materiali e di identificazione del livello di conservazione degli edifici in muratura. I dati ricavati da queste prove rappresentano infatti il punto di partenza per la stima del comportamento globale delle strutture finalizzato alla progettazione di interventi manutentivi ordinari o straordinari:

- Il rilievo geometrico, quello del quadro fessurativo, il controllo e il monitoraggio delle strutture possono fornire importanti indicazioni in merito all'evoluzione del comportamento delle strutture stesse nel tempo;
- Le prove meccaniche in situ possono restituire informazioni qualitative o quantitative relative ai parametri fisico-meccanici delle murature;
- Le prove di laboratorio sono indispensabili sia per la caratterizzazione dei materiali e dei campioni di muratura che per favorire lo sviluppo delle metodologie di indagine;
- Le prove distruttive e non distruttive forniscono informazioni qualitative che possono rivelarsi utili per la valutazione dello stato di conservazione delle pareti indagate.

Nelle campagne di indagine in situ la tendenza attuale è quella di utilizzare metodologie non distruttive. Queste tipologie di prova hanno infatti l'importante vantaggio di esser caratterizzate da bassa invasività, condizione irrinunciabile soprattutto nello studio degli edifici storici tutelati. Tuttavia la mancanza di una diretta ed affidabile correlazione tra i risultati da esse ottenuti e quelli quantitativi relativi al comportamento strutturale della muratura, costituisce un notevole limite.

Per tale motivo risulta indispensabile favorire lo sviluppo tecnologico e pratico di questo genere di prove, al fine di accrescerne l'affidabilità e di aumentarne i vantaggi, anche in relazione all'utilizzo combinato con altre tipologie di indagine.

CAPITOLO 3

INDAGINI SONICHE

Nel seguente capitolo vengono trattate e analizzate le indagini soniche, con particolare riferimento ai fondamenti teorici, al campo di applicazione, alle modalità di impiego ed esecuzione e agli strumenti atti alla loro realizzazione.

3.1 GENERALITÀ

La tecnica di indagine sonica si basa sul principio secondo cui esistono alcune relazioni che legano la velocità di propagazione delle onde elastiche in un mezzo con le proprietà elastiche del mezzo stesso e con alcune caratteristiche meccaniche e fisiche proprie del materiale che lo costituiscono.

La prova consiste nella ricezione, per mezzo di un accelerometro, dell'impulso sonoro generatosi all'interno della muratura in seguito all'impatto di un martello strumentato. Conoscendo la distanza tra il punto di trasmissione e quello di ricezione e l'intervallo di tempo intercorso tra la partenza e l'arrivo del segnale, è possibile risalire alla velocità con cui si è diffusa l'onda e, di conseguenza, ricostruire l'ipotetica distribuzione della densità interna della muratura.

Le onde soniche che attraversano il mezzo sono caratterizzate dalle stesse componenti che contraddistinguono le onde sismiche che si propagano nel terreno:

- Una componente longitudinale P, formata per compressione e successiva dilatazione nella direzione di trasmissione dell'onda. È questa l'unica componente generalmente registrata durante le prove;

- Una componente trasversale S di direzione ortogonale alla componente P, caratterizzata da velocità di propagazione minore;
- Una componente superficiale R, caratterizzata da grande ampiezza e da velocità di poco superiore alle onde longitudinali, il cui sviluppo è fortemente influenzato dallo stato di fessurazione.

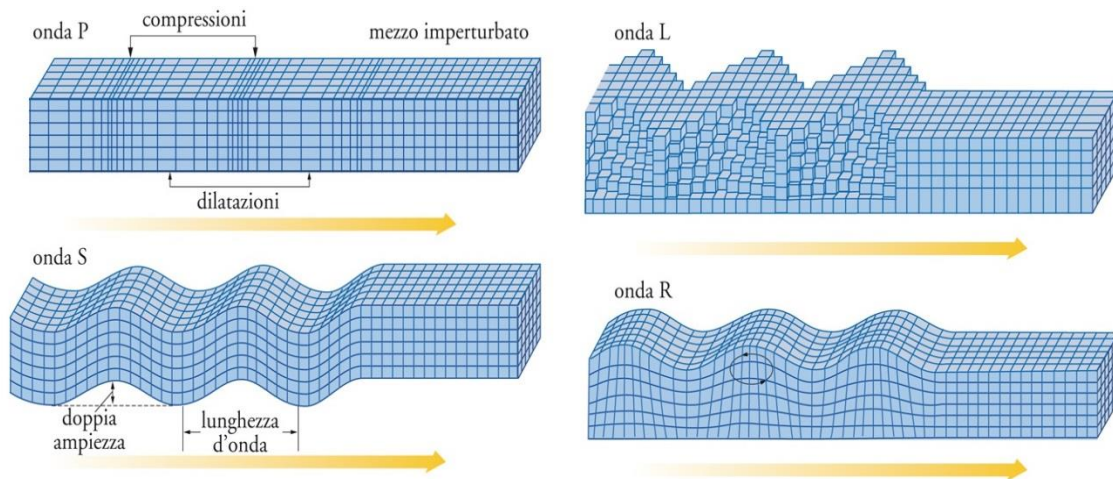


Fig. 3.1 – Componenti dell’onda elastica (Treccani).

L’impatto generato dal martello strumentato produce delle onde che si propagano internamente al materiale seguendo legge sferica: la propagazione dell’onda, dal punto d’impatto, avviene distribuendo l’energia associata alla perturbazione lungo superfici sferiche crescenti in relazione alla distanza dalla sorgente.

In linea generale, la velocità di propagazione del segnale nel caso di attraversamento di corpi elastici, omogenei e isotropi è proporzionale al modulo elastico dinamico, al coefficiente di Poisson e alla densità del mezzo. Conoscendo i valori di velocità delle onde longitudinali e trasversali si possono quindi calcolare le costanti elastiche del mezzo. La propagazione delle onde elastiche è caratterizzata dalle seguenti relazioni (Monteforte, 1998):

$$E_d = V_l^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{r^2}{2} - 1\right)}{r^2 - 1}$$

$$r = \frac{V_l}{V_t}$$

E_d = Modulo elastico dinamico (o sonico)

ρ = Densità del materiale

ν = Coefficiente di Poisson dinamico

V_l = Velocità di propagazione delle onde longitudinali

V_t = Velocità di propagazione delle onde trasversali

r = Rapporto delle velocità

Nel caso della muratura, sia per intrinseca eterogeneità e anisotropia, sia per il grande numero di tipologie esistenti, la velocità dell'onda sonora non può essere direttamente correlata alle proprietà del mezzo (resistenza e stato tensionale). Tuttavia alcuni lavori hanno dimostrato che, per una data tipologia muraria, si può individuare una relazione abbastanza marcata tra i valori di velocità delle onde sonore e il modulo di elasticità della muratura (Modena, 1997). Inoltre è stato ampiamente dimostrato che le prove sonore possono essere correttamente utilizzate per condurre analisi locali e per ottenere informazioni qualitative sulla consistenza della struttura muraria (Abbateo, et al., 1996; Epperson, et al., 1989; Berra, et al., 1992; McCann, et al., 2001).

Il limite maggiore della prova è legato alle caratteristiche costruttive e strutturali tipiche delle murature storiche (dimensioni variabili degli elementi, porosità, presenza di fessure e di superfici di interfaccia tra materiali differenti) e al conseguente effetto di attenuazione che queste provocano sull'onda. Si possono individuare due diverse tipologie di attenuazione:

- **Attenuazione geometrica:** Le onde che si propagano all'interno di un solido si attenuano allontanandosi dalla sorgente. Questo avviene per effetto della divergenza del fascio d'irradiazione: allontanandosi dall'origine, l'energia immessa si distribuisce su superfici di estensione crescente. L'intensità è quindi inversamente proporzionale al quadrato della distanza.
- **Attenuazione strutturale:** Avviene per effetto della dispersione di energia sotto forma di calore (per effetto delle deformazioni anelastiche) e a causa

della diffusione dovuta alle riflessioni subite dalle onde di pressione quando incontrano discontinuità della materia. L'attenuazione è quindi dovuta all'effetto di smorzamento generato dalle discontinuità e dai difetti presenti nel materiale.

Per ovviare ai problemi legati ai fenomeni di attenuazione, si predilige operare con lunghezze d'onda maggiori della dimensione massima delle particelle costituenti il materiale. Per ottenere lunghezze d'onda elevate è necessario impiegare basse frequenze (poche decine di Kilohertz). Per esempio, sapendo che il diametro dell'aggregato del calcestruzzo è inferiore ai 5 cm, per eseguire la prova su questo materiale è opportuno avere una lunghezza d'onda pari a 5 cm. Sapendo che la velocità delle onde P di un calcestruzzo di media qualità è pari a 4000 m/s, la frequenza risulta determinata dalla relazione:

$$f = \frac{V_p}{\lambda} = \frac{4000}{0.05} = 80 \text{ kHz}$$

La muratura presenta quindi dei comportamenti caratteristici legati al proprio livello di danneggiamento (presenza di fessure e vuoti) che possono essere relazionati con i parametri individuati dalle indagini soniche. È a tal proposito importante ricordare che la velocità sonora è elevata nei mezzi omogenei solidi, mentre subisce una forte attenuazione nell'aria. I vuoti presenti nello spessore murario producono quindi una serie di rifrazioni multiple del segnale, con conseguente allungamento del percorso (ossia diminuzione della velocità) e scostamento dall'ipotesi di propagazione diretta tra sorgente e ricevitore.

La tecnica, ampiamente utilizzata nonostante alcuni suoi limiti, assume quindi carattere qualitativo per quanto riguarda le caratteristiche elastiche del materiale e carattere quantitativo nei rapporti di variazione di tali caratteristiche da punto a punto o tra situazione ante e post consolidamento (Monteforte, 1998). A questo proposito è da sottolineare che, poiché la velocità delle onde elastiche dipende dalla consistenza del mezzo attraversato, le prove soniche risultano particolarmente indicate per la valutazione dell'efficacia di tutti i tipi di consolidamento che modifichino appunto la consistenza della muratura, come avviene nel caso di iniezioni di miscele consolidanti. Inoltre l'esecuzione di

tomografie soniche in diverse porzioni di un edificio, consente di valutare le proprietà delle sezioni trasversali degli elementi di muratura testati, con il conseguente vantaggio di ottenere dati utili per la corretta modellazione della struttura. Questo particolare utilizzo dei test tomografici è molto promettente, anche se presenta una grossa limitazione derivante dal fatto che le indagini soniche sono molto onerose in termini di tempo (sia di acquisizione che di rielaborazione dei dati), motivo per cui vengono raramente eseguite grosse campagne di prova su singoli edifici.

3.2 STATO DELL'ARTE

Le prime applicazioni della tecnica di indagine sonora alle murature risalgono alla seconda metà degli anni '60 (Aerojet, 1967).

Fin dai primi test svolti in quel periodo risultò evidente la difficoltà di interpretazione dei risultati, soprattutto nel caso di supporti fortemente disomogenei, come la muratura stessa. Per tale motivo, nel tentativo di migliorare la significatività delle prove, i diversi studi che si sono susseguiti negli anni sono stati improntati all'individuazione di intervalli arbitrari di velocità che possano essere messi in relazione con le diverse condizioni di conservazione della muratura e che permettano una rapida classificazione della gravità del danno. Un tale strumento permetterebbe infatti di prendere rapide decisioni in merito all'opportunità di eseguire degli interventi di restauro o alla necessità di verificare la penetrazione e diffusione delle miscele consolidanti.

Le esperienze di diversi gruppi di ricerca hanno consentito di definire alcune correlazioni sperimentali tra le velocità medie delle onde sonore e le condizioni della muratura e di ricavare le velocità medie caratteristiche di alcuni tra i materiali edili più comuni. Due studi in particolare hanno fornito risultati attendibili e tuttora indicativi dei parametri sopraindicati:

- In Inghilterra, le ricerche di Forde M.C., Komeyli-Birjandi F. e Batchelor A.J. (Forde, et al., 1985);

- In Italia, il lavoro sviluppato da Berra M., Binda L., Anti L. e Faticcioni A. (Berra, et al., 1992).

Tabella 3.1 – Classificazione di diverse tipologie di muratura in relazione alle velocità soniche.

Materiale	Velocità medie [m/s] (Forde, et al.)	Velocità medie [m/s] (Berra, et al.)
Muratura in buono stato	> 2500	> 2000
Muratura in discreto stato	1500 ÷ 2500	1000 ÷ 2000
Muratura in cattivo stato	< 1500	< 1000
Calcestruzzo	> 4500	-
Muratura in granito	3400	-
Muratura in arenaria	2000	-
Acqua	1430 ÷ 1680	-
Calcere e dolomite	4000 ÷ 6000	-

Sono stati inoltre individuati tre “livelli di qualità” della muratura in mattoni sulla base di valori indicativi della velocità delle onde.

Tabella 3.2 – Qualità delle murature in mattoni in relazione alle velocità soniche.

Velocità [m/s]	Qualità
< 1000	Muratura di scarsa qualità o fortemente danneggiata con presenza di grandi vuoti interni.
1000 ÷ 2000	Muratura di qualità media (rappresenta la maggioranza delle murature in mattoni esistenti).
> 2000	Muratura accuratamente costruita e conservata, dotata di buona resistenza a compressione.

Anche altri studi hanno posto l'attenzione sullo sviluppo della tecnica di indagineonica. Negli Stati Uniti, Atkinson-Noland e associati hanno svolto una ricerca sui metodi per l'indagine non distruttiva delle strutture in muratura con l'obiettivo di ottenere delle correlazioni fra le diverse grandezze. Le relazioni tra le velocità delle onde soniche e i parametri di resistenza delle murature da loro ottenute studiando muretti a due teste costruiti in laboratorio, non sono però risultate molto soddisfacenti.

Uno studio simile è stato portato avanti da due ricercatori dell'Università dell'Illinois (USA), Abrams D.P. e Epperson G.S. (Epperson, et al., 1989). Essi hanno rilevato che la velocità delle onde soniche è maggiore per percorsi orizzontali che per percorsi verticali, imputando questo fatto al minor numero di giunti di malta che l'onda incontra su percorsi orizzontali. Hanno anche constatato che le velocità sono influenzate dal valore della tensione di compressione verticale ma non sono riusciti ad ottenere un'attendibile correlazione tra le due quantità. Infine hanno ulteriormente confermato la buona capacità del metodo nel determinare la presenza di difetti nelle murature.

È invece ancora in fase di avanzamento uno studio che indaga sulla possibilità di attribuire valori quantitativi ai risultati qualitativi delle prove soniche tramite la ricerca di correlazioni di tipo empirico tra la velocità sonora e alcune grandezze meccaniche della muratura quali la resistenza a compressione. L'individuazione di tali corrispondenze garantirebbe la possibilità di interconnettere i risultati provenienti da diverse tipologie di prove in sito, quali ad esempio le prove con martinetto piatto.

3.3 MODALITÀ DI ESECUZIONE

Come accennato nei paragrafi precedenti, le prove soniche sfruttano il principio della propagazione delle onde elastiche di compressione nei solidi per indagare la condizione interne degli elementi, ovvero per localizzare eventuali disomogeneità, vuoti e difetti presenti nelle sezioni indagate.

La generazione degli impulsi sonici (o ultrasonici) avviene attraverso la percussione con appositi strumenti o con trasduttori elettrodinamici in un punto della struttura. L'onda elastica, generalmente di frequenza variabile tra i 16000 e i 20000 Hz, si propaga nella struttura ed è raccolta solitamente da uno o più accelerometri posti a contatto con la superficie della muratura. Dall'elaborazione dei dati raccolti è possibile determinare la velocità sonora di propagazione del segnale sonico nella muratura.

La fonte dell'onda acustica è un martello strumentato, un apparecchio dotato di una cella di carico nella testa d'impatto. Un opportuno sistema di acquisizione, a

cui il martello è collegato, consente di registrare la funzione tempo-ampiezza della forza esercitata. L'energia meccanica generata dall'impatto della massa battente sulla superficie di prova si trasforma in energia acustico-vibrazionale e si propaga nel mezzo. Un sensore ricevente, generalmente un accelerometro, registra e trasmette al sistema di acquisizione la risposta del materiale alla propagazione del segnale. Questa viene registrata come forma d'onda e rappresenta le variazioni di ampiezza delle vibrazioni avvenute in un brevissimo intervallo di tempo.

Ogni singola battuta di prova restituisce un valore puntuale poco indicativo delle condizioni dell'elemento. Per ovviare a questo problema, su materiali fortemente disomogenei come i muri in pietra, si dispongono più stazioni di misura entro aree omogenee di muratura secondo griglie di maglie regolari.

I parametri estratti da ciascuna coppia di forme d'onda registrate, quella prodotta dalla sorgente e quella acquisita dal ricevitore, sono l'attenuazione subita dal segnale lungo il percorso di propagazione e il cosiddetto "tempo di volo", ossia il tempo intercorso tra l'inizio del segnale trasmesso e l'inizio del segnale ricevuto. Sulla base di quest'ultimo e dell'ipotetica lunghezza del percorso compiuto dall'onda, è possibile calcolare la velocità del segnale in una determinata zona della sezione muraria. In questa fase dell'elaborazione è importante tenere presente che variazioni dei valori di velocità compresi tra $\pm 10\%$ non sono significativi, in quanto rientrano nel campo di variabilità della prova.

L'esecuzione di test sonici non richiede particolari condizioni ambientali, tuttavia le raccomandazioni RILEM 127 D.1 ne sconsigliano lo svolgimento in condizioni di pioggia o in situazioni che possano influenzare il campione e la strumentazione. In particolar modo, la presenza di umidità può invalidare completamente i risultati della prova: se la muratura è satura infatti, la tecnica non è in grado di individuare la presenza di fessure interne alla muratura perché "nascoste" dall'acqua.

Vi sono varie modalità di esecuzione della prova e la scelta di un sistema rispetto ad un altro, soprattutto nei test in sito, è legata essenzialmente alle condizioni di cantiere (accessibilità, dimensioni e geometria dell'elemento strutturale da indagare e caratteristiche dei suoi materiali componenti). In relazione alla disposizione relativa tra apparecchi di trasmissione (martello) e

ricezione (accelerometri), si possono distinguere tre diverse metodologie di conduzione delle prove soniche:

- Prove dirette o in trasparenza;
- Prove indirette o superficiali;
- Prove tomografiche.

3.3.1 PROVE DIRETTE O IN TRASPARENZA

Le prove soniche dirette (o trasparenze) si effettuano disponendo i punti di emissione e di 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.

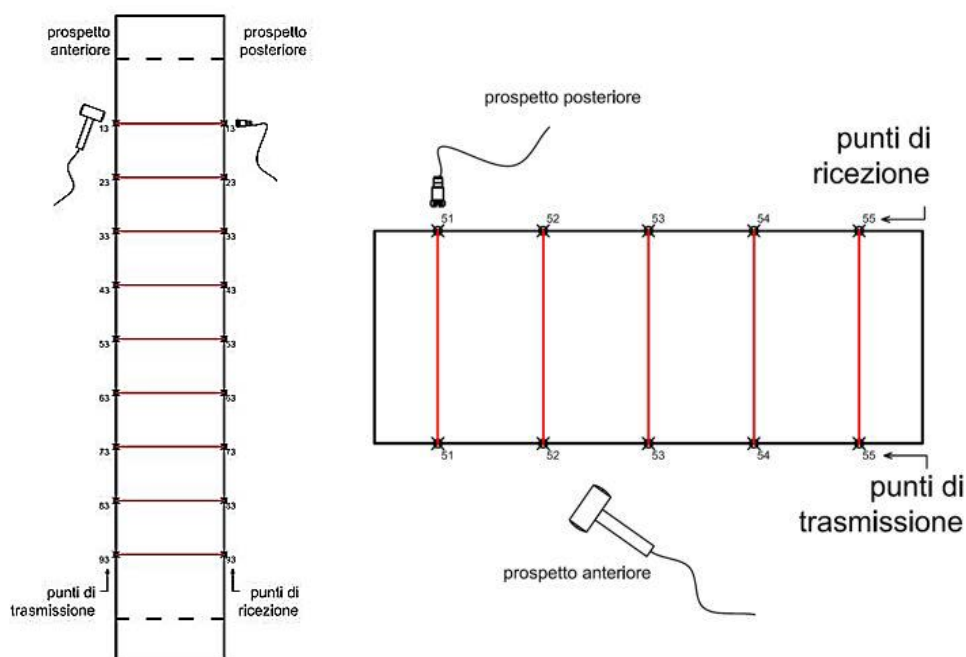


Fig. 3.2 – Schemi di esecuzione della prova sonica diretta. Sezione verticale (sinistra) e sezione orizzontale (destra) (Deliverable D11.1, 2004).

L'esecuzione di questo genere di test prevede l'utilizzo di un solo accelerometro per volta per ricevere l'impulso generato dalla battuta del martello e necessita della conoscenza dello spessore della muratura e della possibilità di accedere liberamente a entrambe le facce dell'elemento. I risultati ottenibili

dall'elaborazione dei dati sono significativi e utili per la valutazione della consistenza della sezione muraria.

3.3.2 PROVE INDIRETTE O SUPERFICIALI

Le prove soniche indirette (o superficiali) si effettuano disponendo il martello e gli accelerometri sullo stesso lato del muro e vengono solitamente eseguite lungo gli assi verticale ed orizzontale. I trasduttori ricevono onde che attraversano solamente i paramenti più esterni della muratura, per cui i risultati ricavabili da queste prove non sono collegabili alle caratteristiche dell'intera sezione.

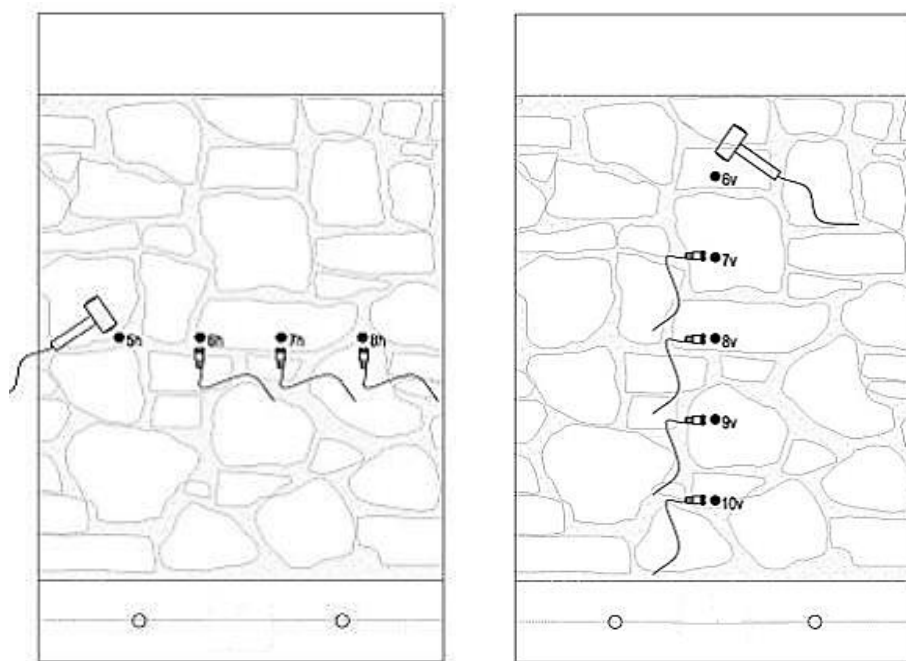


Fig. 3.3 – Schemi di esecuzione della prova sonica indiretta orizzontale (sinistra) e verticale (destra) (Fattori e Scaggiante, 2011).

3.3.3 PROVE TOMOGRAFICHE

Le prove tomografiche si effettuano disponendo il martello e gli accelerometri sui lati opposti o consecutivi dell'elemento da indagare. L'esecuzione di questo genere di test prevede l'utilizzo contemporaneo di una serie di accelerometri per la ricezione dell'impulso generato dal martello, per cui da un'unica battuta è possibile ottenere i parametri relativi ad una vasta porzione della sezione. L'elaborazione dei dati generati da queste prove consente di ricostruire la mappa delle velocità interne

della sezione muraria indagata (tomografia sonora), uno strumento utile per la formulazione di ipotesi relative alle condizioni di conservazione della muratura e al suo livello di degrado.

L'elemento discriminante per l'applicazione del metodo è la geometria della sezione. La tomografia prevede infatti l'acquisizione di un elevato numero di dati per garantire la copertura dell'intera sezione e ottenere risultati statisticamente significativi. È quindi indispensabile il libero accesso al perimetro dell'elemento da indagare, sia esso un pilastro o un setto murario.

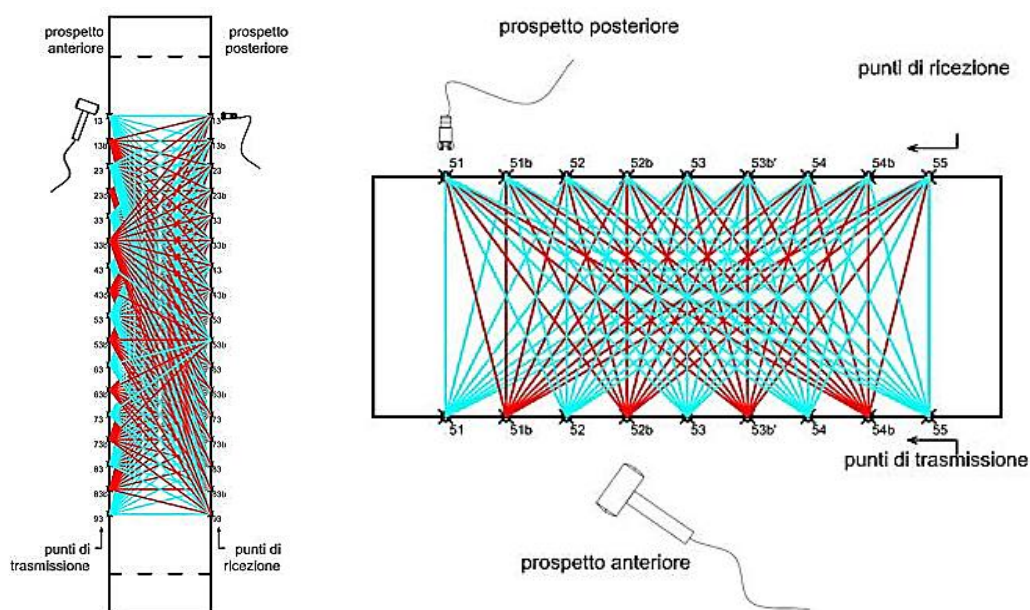


Fig. 3.4 – Schemi di esecuzione della prova tomografica. Sezione verticale (sinistra) e orizzontale (destra) (Deliverable D11.1, 2004).

Il software necessario per il calcolo del campo di velocità è l'argomento centrale di questo lavoro di tesi e il suo sviluppo sarà ampiamente discusso nei capitoli successivi.

3.4 STRUMENTAZIONE DI PROVA

L'attrezzatura necessaria per condurre un'indagine sonora è costituita fondamentalmente da sette componenti:

- Un martello strumentato (o un martello a pendolo);

- Uno o più accelerometri;
- Un amplificatore di potenza;
- Un convertitore analogico/digitale;
- Un oscilloscopio;
- Un pc con i software di acquisizione ed elaborazione dei dati;
- I cavi di collegamento tra le varie componenti.

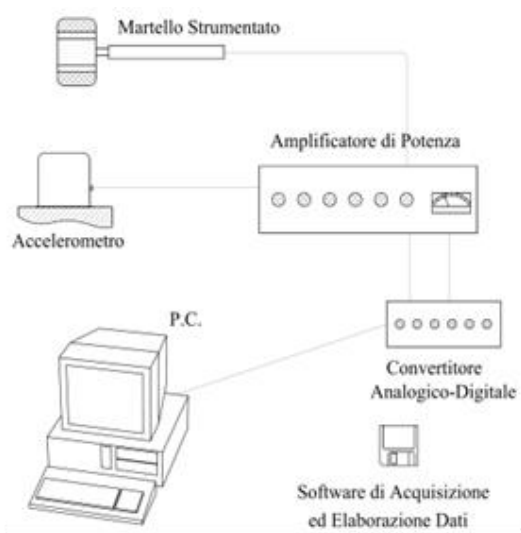


Fig. 3.5 - Attrezzatura per l'esecuzione delle prove soniche (sinistra) e schema di acquisizione completo (destra) (Monteforte, 1998).

Il martello strumentato (dotato cioè di una cella di carico) genera l'impulso sonoro in seguito al suo impatto sulla superficie esterna della muratura. In alcuni casi è possibile utilizzare un martello a pendolo, ossia un particolare strumento costituito da una massa applicata ad un pendolo che, cadendo con un angolo costante rispetto alla verticale e partendo sempre alla stessa distanza dalla superficie dovrebbe produrre un impulso costante (Abbaneo, et al., 1996). Nella realtà, le irregolarità superficiali e le condizioni al contorno provocano delle variazioni dell'ampiezza dell'impulso e del suo contenuto in frequenza, motivo per cui raramente si ricorre all'uso di questo dispositivo. Le vibrazioni della parete causate dalla propagazione dell'onda sonora vengono misurate per mezzo di accelerometri posti a diretto contatto con la superficie oppure, in base alla disponibilità di operatori e alla qualità della muratura, applicati su piastrine di

metallo di dimensioni variabili fissate alla superficie a mezzo di colla a caldo o rivetti.

I dati contenuti nei segnali, prima di essere registrati dall'oscilloscopio e memorizzati nel pc per le successive elaborazioni, vengono trattati da un amplificatore di potenza e da un convertitore analogico-digitale.

Solitamente l'amplificatore di potenza, il convertitore analogico/digitale, l'oscilloscopio e il pc con i relativi software sono integrati in un unico strumento.

L'intero processo viene completamente gestito dagli operatori grazie all'utilizzo di appositi software di acquisizione ed elaborazione.

3.4.1 MARTELLO STRUMENTATO

Il martello è lo strumento utilizzato per eccitare la struttura al fine di studiarne il comportamento dinamico. Le dimensioni e i materiali costituenti la testa, la lunghezza del manico e la velocità di impatto con la superficie, determinano l'ampiezza e la frequenza dell'impulso. Nello specifico, il materiale della testa generalmente influenza le frequenze del segnale, mentre la massa del martello e la velocità dell'impatto ne determinano l'energia. La punta del martello è smontabile e può essere sostituita con facilità scegliendo tra punte di diversa rigidità (hard, medium, soft) in relazione alle caratteristiche della muratura. All'interno della testa del martello è presente un sensore di forza al quarzo con amplificatore microelettronico integrato che trasforma la forza dell'impatto in un segnale elettrico che viene inviato agli strumenti di analisi ed elaborazione.

Il laboratorio di Costruzioni e Trasporti dispone di 2 diversi martelli strumentati prodotti entrambi dalla PCB Piezotronics:

- Il modello a manico corto o86D20
- Il modello a manico lungo o86D50

Inoltre è da poco disponibile, ma solo per particolari tipologie di indagine, un nuovo strumento appositamente acquistato dalla società Expin s.r.l. (un recente spin-off dell'Università di Padova):

- Il modello o86C03

Le caratteristiche tecniche di tutti i martelli sono riportate nelle appendici finali di questo lavoro di tesi.



Fig. 3.6 – Martelli attualmente disponibili per l'esecuzione delle indagini: il modello o86D2o (sinistra), il modello o86D5o (centro) e il nuovo modello o83Co3 (destra) (PCB Piezotronics).

3.4.2 ACCELEROMETRO

Gli accelerometri utilizzati nelle prove soniche sono dei particolari trasduttori contenenti al proprio interno un materiale piezoelettrico. Si definisce piezoelettricità una polarizzazione elettrica prodotta da sforzi meccanici in determinate classi di cristalli, che è proporzionale allo sforzo stesso e che ha un segno direttamente o inversamente variabile con esso. In un cristallo, questa carica si manifesta quando un'azione meccanica provoca la comparsa di un dipolo elettrico in ciascuna molecola, spostando il centro delle cariche positive e negative. La rottura dell'equilibrio elettrostatico produce la polarizzazione. Il cristallo deformato si comporta quindi come un condensatore a cui è applicata una differenza di potenziale. Nel caso in cui il materiale piezoelettrico non abbia una naturale struttura asimmetrica (ad esempio la ceramica, presente negli accelerometri da noi utilizzati) l'effetto piezoelettrico deve essere artificialmente realizzato per mezzo di un intenso campo elettrico esterno, il cui valore influenza fortemente la sensibilità dello strumento ma non si ripercuote in maniera significativa sui risultati. Condizione necessaria affinché la polarizzazione abbia successo, è il raggiungimento della temperatura di Curie durante il processo di esposizione al campo elettrico e il successivo raffreddamento del materiale, sempre in presenza del campo. La temperatura di Curie è la temperatura sopra la quale un materiale perde le sue proprietà ferroelettriche.

In un accelerometro piezoelettrico quindi, una massa è collegata ad un cristallo piezoelettrico che a sua volta è connesso alla struttura del trasduttore. Quando il corpo dell'accelerometro è soggetto a vibrazione, la massa si oppone per inerzia e comprime il cristallo generando delle cariche. Questa forza di compressione, per la seconda legge di Newton ($F = ma$), risulta proporzionale all'accelerazione a cui è soggetto il corpo.

Importante caratteristica dell'accelerometro è la sensibilità, definita come l'uscita elettrica per unità di accelerazione applicata. Questa può essere espressa sia come sensibilità di carica che come sensibilità di voltaggio: la prima viene misurata in Coulomb generati per g di accelerazione applicata (dove g è l'accelerazione di gravità), mentre la seconda viene espressa in Volt per g. La sensibilità dei trasduttori utilizzati per le prove soniche varia generalmente tra 100 e 1000 mV/g.

Il laboratorio di Costruzioni e Trasporti dispone di una serie di accelerometri a taglio ICP ad elevata sensibilità, modello 393B12, prodotti dalla PCB Piezotronics, le cui caratteristiche tecniche sono riportate nelle appendici finali di questo lavoro di tesi.

In un accelerometro piezoelettrico a taglio la massa sismica sollecita il cristallo a taglio anziché a compressione. Questa caratteristica rende i trasduttori maggiormente adatti per applicazioni in cui si verificano importanti distorsioni della base dovute a transienti termici oppure ad una flessibilità notevole della base stessa.

Affinché sia possibile convertire le cariche generate nel cristallo piezoelettrico in una differenza di potenziale misurabile e registrabile è necessario che il cristallo piezoelettrico sia inserito all'interno di un apposito circuito. Negli accelerometri piezoelettrici convenzionali con uscita in carica, questo circuito è esterno all'accelerometro e si trova all'interno di un amplificatore di carica (o preamplificatore) collegato in serie con esso. Questa catena di misura viene chiamata ad "alta impedenza" ed è così definita poiché l'amplificatore, per potere rilevare la differenza di potenziale prima che il condensatore (il cristallo) si scarichi, deve avere una impedenza d'ingresso del primo stadio dello stesso ordine di grandezza dell'impedenza di uscita del cristallo stesso ($> 10 \text{ G}\Omega$). L'amplificatore di carica deve poi rendere disponibile la differenza di potenziale ad un circuito in

uscita ad impedenza relativamente bassa, per consentirne il collegamento con la strumentazione di analisi del segnale o con un convertitore A/D.

Nei modelli ICP (Integrated Circuit piezoelectric) l'amplificatore di carica e la microelettronica ad esso collegata sono incorporati all'interno dell'involucro del sensore e devono essere opportunamente alimentati tramite i cavi. Con questa configurazione il segnale di uscita viene fornito in Volt e può essere collegato direttamente ad un oscilloscopio oppure ad un analizzatore di segnale. Gli accelerometri ICP non necessitano pertanto di preamplificatore esterno ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Essendo il segnale in uscita dall'accelerometro una differenza di potenziale, la catena di misura è detta a "bassa impedenza".

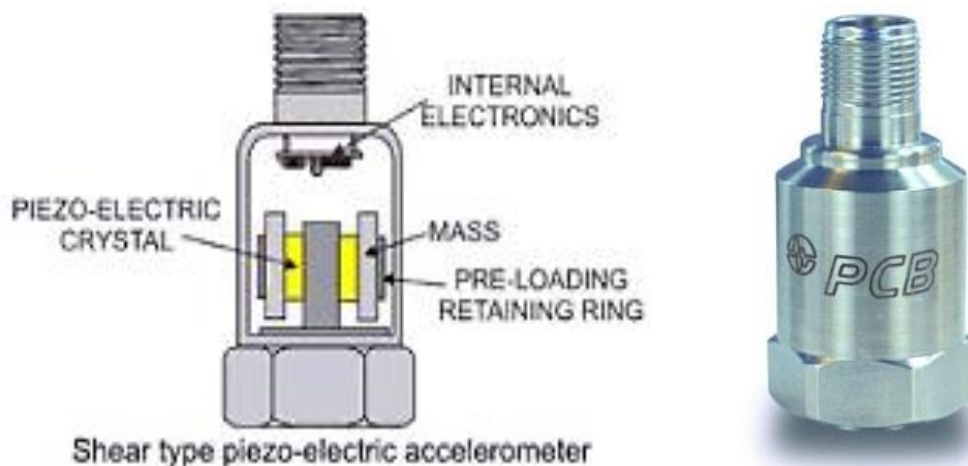


Fig. 3.7 – Struttura interna di un accelerometro a taglio ICP (sinistra) e accelerometro modello 393B12 (PCB Piezotronics).

L'utilizzo di questo genere di trasduttori implica una riduzione dei costi e il raggiungimento di sensibilità più elevate grazie anche alla riduzione del rumore generato dai cavi, ma limita notevolmente il range di temperature di utilizzo.

3.4.3 AMPLIFICATORE DI POTENZA

L'amplificatore di potenza, o finale di potenza, è un circuito elettronico costituito da una serie di transistor che è in grado di modificare l'ampiezza del

segnale immesso al suo ingresso per mezzo di una corrente. Nello specifico, l'amplificatore consente di:

- Amplificare il segnale con guadagno regolabile da 0 a 100. Questo può essere ottenuto agendo su due amplificatori separati: il primo a tre posizioni fisse ($\times 0.1$; $\times 1.0$; $\times 10.0$), il secondo con guadagno regolabile in modo continuo da 0 a 10. L'amplificazione si ottiene per moltiplicazione dei due termini;
- Fornire una corrente costante di eccitazione (corrente di BIAS) ai trasduttori, che può essere regolata da 2 a 20 mA. In genere il valore di 4 mA è adeguato per quasi tutte le applicazioni sia in laboratorio che in sito. Soltanto per cavi lunghi oltre 300 m e con impulsi ad alta frequenza può essere necessario aumentare la corrente di eccitazione oltre i 12 mA. In ogni modo il valore ottimale della corrente è quello minore a parità di risultati perché provoca un minore riscaldamento dei trasduttori;
- Eliminare dal segnale inviato alla scheda la corrente costante di eccitazione;
- Verificare l'allacciamento dei trasduttori.

Questo elemento è integrato, insieme ai successivi, in un dispositivo PXI, una delle più diffuse piattaforme modulari di strumentazione elettronica basate su PC, creata dall'americana National Instruments nel 1998 con l'obiettivo di offrire una soluzione di distribuzione personalizzabile ad elevate prestazioni e costi ridotti per i sistemi di misura e automazione complessi.

3.4.4 CONVERTITORE ANALOGICO/DIGITALE

Il convertitore analogico/digitale (A/D) è un circuito elettronico in grado di convertire un segnale analogico con andamento continuo in una serie di valori discreti "interpretabili" dall'utente. Il risultato della conversione è un codice binario ad n bit in cui il numero di valori rappresentati è legato all'ampiezza del segnale di ingresso.

I codici rappresentabili in uscita con n bit disponibili sono solo 2^n , mentre il segnale analogico di ingresso può assumere, con continuità, un infinito numero di valori. I codici devono quindi essere necessariamente associati ad un intervallo di possibili grandezze del segnale. Tale operazione viene definita quantizzazione della grandezza analogica. L'operazione di quantizzazione implica ovviamente una perdita di informazione, dato che dal codice binario di uscita non è possibile risalire al valore preciso della tensione di ingresso, ma solo all'intervallo di valori associato a quel determinato codice. Ciò si traduce in un inevitabile effetto chiamato rumore di quantizzazione, la cui influenza sui risultati di questo genere di prove è comunque trascurabile.

3.4.5 OSCILLOSCOPIO

L'oscilloscopio è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare su un grafico bidimensionale l'andamento temporale dei segnali elettrici. La frequenza massima dei segnali visualizzabili, così come la risoluzione temporale, ovvero la più rapida variazione rilevabile, dipendono dalla banda passante dello strumento.

Nel nostro caso, la funzione di visualizzazione dei segnali viene garantita e gestita autonomamente dal software di acquisizione dei dati presente nel PXI.

3.4.6 SISTEMA PXI

PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) è una robusta piattaforma basata su PC in grado di offrire una soluzione di distribuzione ad elevate prestazioni e costi ridotti per i sistemi di misura e automazione. PXI combina le funzioni di bus elettrico PCI (Peripheral Component Interconnect) con il pacchetto modulare Eurocard di CompactPCI e a questi aggiunge bus di sincronizzazione specializzati, funzioni software e componenti meccaniche ed elettriche che, nell'insieme, consentono di definire sistemi completi di test, misura e acquisizione dati. Queste apparecchiature si rivelano quindi essere ideali per molteplici scopi, dalle verifiche di produzione alle applicazioni militari e aerospaziali, dal monitoraggio macchine ai test industriali.

National Instruments, l'azienda produttrice, ha sviluppato e lanciato PXI come specifica aperta nel 1998 per fronteggiare la crescente domanda di sistemi di strumentazione complessi. Attualmente, lo sviluppo di PXI è regolato dalla PXI Systems Alliance (PXISA), un gruppo formato da oltre 50 aziende con lo scopo di promuovere lo standard, assicurare l'interoperabilità e garantire la realizzazione di nuovi componenti.

Dal punto di vista dell'architettura hardware, i sistemi PXI sono costituiti da tre componenti fondamentali:

1. Uno chassis;
2. Un controller di sistema;
3. Uno o più moduli di periferica.

Lo chassis è il robusto telaio metallico all'interno del quale sono installati tutti i principali componenti hardware. Gli chassis sono classificati sulla base del numero di slot disponibili (4, 6, 8, 14 e 18 slot) e delle dimensioni espresse in rack unit (3U e 6U), un'unità di misura utilizzata per indicare l'altezza delle componenti installate in un rack da 19 pollici o da 23 pollici (l'ampiezza del rack). Una rack unit è alta 44.45 mm e le dimensioni di un componente di montaggio vengono generalmente descritte come numero di "U". Molti chassis PXI Express alloggiavano moduli di periferica PXI e PXI Express e alcuni, come NI PXIe-1075, dispongono di slot ibridi e slot di periferica PXI Express per poter utilizzare entrambi i moduli. Questi chassis consentono di gestire più configurazioni di sistemi PXI per far fronte a diverse esigenze applicative.

Lo chassis contiene il backplane PXI ad elevate prestazioni, il quale include il bus PCI e i bus di triggering e temporizzazione. La strumentazione modulare PXI aggiunge un clock di riferimento di sistema dedicato a 10 MHz, PXI trigger bus, star trigger bus e un bus locale slot-to-slot per temporizzazione avanzata, sincronizzazione e comunicazione in banda laterale, mantenendo i vantaggi dello standard PCI. Inoltre, sulla base delle funzionalità PXI, PXI Express fornisce caratteristiche aggiuntive di temporizzazione e sincronizzazione di un clock di sistema differenziale di 100 MHz, segnale differenziale e star trigger differenziale. Mediante clocking e sincronizzazione differenziale, i sistemi PXI Express sfruttano i

vantaggi di una maggiore immunità dal rumore per i clock di strumentazione e una capacità di trasmettere a frequenze maggiori.

Il laboratorio di Costruzioni e Trasporti dispone di uno chassis NI PXI-1042Q, prodotto dalla National Instruments, le cui caratteristiche tecniche sono riportate nelle appendici finali di questo lavoro di tesi.



Fig. 3.8 – Chassis National Instruments serie 1042 (National Instruments).

Il controller di sistema, solitamente alloggiato nel primo slot a sinistra dello chassis, 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 (uscite USB e seriali, porte parallele, ecc.). Esistono tre principali categorie di controller:

- Controller Embedded PXI: eliminano la necessità di un PC esterno, in quanto forniscono un sistema completo all'interno dello chassis PXI. Sono dotati di CPU integrata, disco fisso, RAM, Ethernet, video, tastiera/mouse, periferiche seriali, USB e altre periferiche con sistema operativo Microsoft Windows e tutti i driver di periferica già installati. Sono disponibili per sistemi basati su PXI o PXI Express e sono compatibili con diversi sistemi operativi come Windows Vista/XP e con LabVIEW Real-Time;
- Controller PXI da laptop: con i kit di interfaccia NI ExpressCard MXI (Measurement eXtensions for Instrumentation) e PCMCIA CardBus, è possibile controllare i sistemi PXI direttamente da computer laptop mediante una connessione completamente trasparente al software.

All'avvio l'elaboratore riconosce tutte le periferiche del sistema PXI come schede PCI e garantisce così il controllo dei dispositivi;

- Controller PXI da PC: grazie ai kit di interfaccia NI MXI-Express e MXI-4, è possibile controllare i sistemi PXI direttamente da computer desktop, workstation o server. Il funzionamento è simile a quello dei controller da laptop.

Nello chassis del laboratorio di Costruzioni e Trasporti è alloggiato un controller PXI embedded modello 8102 le cui caratteristiche tecniche sono riportate nelle appendici finali di questo lavoro di tesi.

Il controller viene gestito dall'utente attraverso un sistema integrato NI PMA-1115 composto da un monitor 15 pollici ad inclinazione regolabile, una tastiera e un touchpad. Questa configurazione, unita alla presenza di una maniglia di trasporto, rende lo strumento facilmente trasferibile e adatto a diversi tipi di indagine in sito.



Fig. 3.9 - Controller embedded NI PXI-8102 (sinistra) e sistema integrato monitor-tastiera-touchpad NI PMA-1115 (National Instruments).

I moduli periferica sono delle schede appositamente progettate e costruite per eseguire specifiche funzioni. Sono prodotti da diverse aziende e costituiscono la componente variabile del sistema in quanto consentono di personalizzare lo chassis sulla base delle effettive esigenze degli utilizzatori finali. Al momento sono disponibili in commercio più di 1700 moduli, di cui almeno 200 prodotti da National Instruments e altri 1500 sviluppati da oltre 70 diversi costruttori.

In funzione delle attuali necessità, il PXI del Laboratorio di Costruzioni e Trasporti è stato dotato delle seguenti schede:

- NI PCI-4472: è una scheda di acquisizione del segnale dinamico a 8 canali progettata per effettuare accurate misure di dominio della frequenza. I canali di input includono il condizionamento del segnale piezoelettrico elettronico (IEPE) per accelerometri e microfoni ed eseguono la digitalizzazione simultanea dei segnali su una banda larga da DC a 45 kHz. Inoltre il modulo è sincronizzabile con applicazioni ad elevato numero di canali oppure con altre schede che utilizzano un bus RTSI;
- NI PCI-4472B: è un'estensione della famiglia di moduli NI 4472. È una scheda ottimizzata per le vibrazioni e le misure AC a bassa frequenza dotata di funzioni per l'acquisizione del segnale dinamico (DSA) a 8 canali, che consentono di effettuare misure accurate di dominio della frequenza. I canali di input includono il condizionamento del segnale piezoelettrico elettronico (IEPE) per accelerometri e microfoni ed eseguono la digitalizzazione simultanea dei segnali di input su una banda larga da DC a 45 kHz. In questo modulo è inoltre previsto un cut-off di soli 0,5 Hz per misure di vibrazioni AC di bassa frequenza valido quando la scheda è accoppiata AC;
- NI PCI-6220: è una scheda di acquisizione dati (DAQ) multifunzione della famiglia M Series a basso costo, ottimizzata per applicazioni che non presentano costi eccessivi. Come tutti i dispositivi M Series a basso costo, include particolari funzioni avanzate come la tecnologia di calibrazione NI-MCal, il controller di sistema NI-STC 2 e l'amplificatore programmabile NI-PGIA 2 che ne migliora le prestazioni e l'accuratezza.

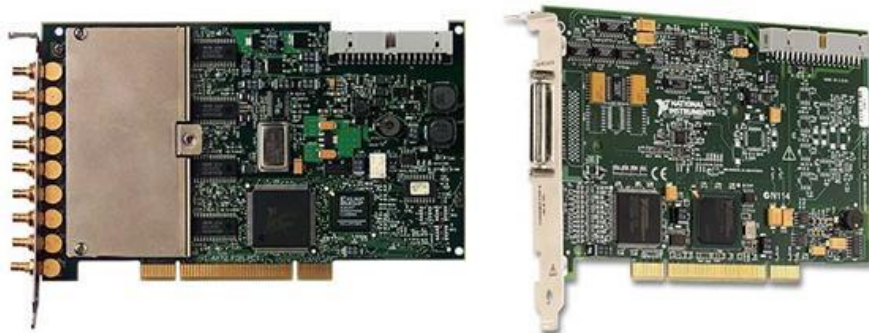


Fig. 3.10 – Scheda di acquisizione del segnale NI PCI-4472 (sinistra) e scheda DAQ NI PCI 6220 (destra) (National Instruments).

3.4.7 SOFTWARE DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE

In questo breve paragrafo viene presentata una panoramica generale dei software attualmente utilizzati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale (DICEA). Essendo questo lavoro di tesi incentrato sullo sviluppo di nuovi programmi per la gestione delle prove soniche, l'argomento verrà sviluppato solo in maniera generica e sarà affrontato più approfonditamente nei capitoli successivi.

Allo stato attuale, le fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati e di restituzione dei risultati vengono gestite tramite l'utilizzo di diversi software:

- Acquisizione e archiviazione dati: ProveSoniche;
- Elaborazione dati: Tomografia e Microsoft Excel;
- Restituzione grafica dei risultati: Golden Software Surfer.

ProveSoniche è un software per il campionamento dei segnali generati dal martello strumentato e acquisiti dai diversi accelerometri, sviluppato in collaborazione con IRS S.r.l. (Ingegneria Ricerca Sistemi) in linguaggio LabView.

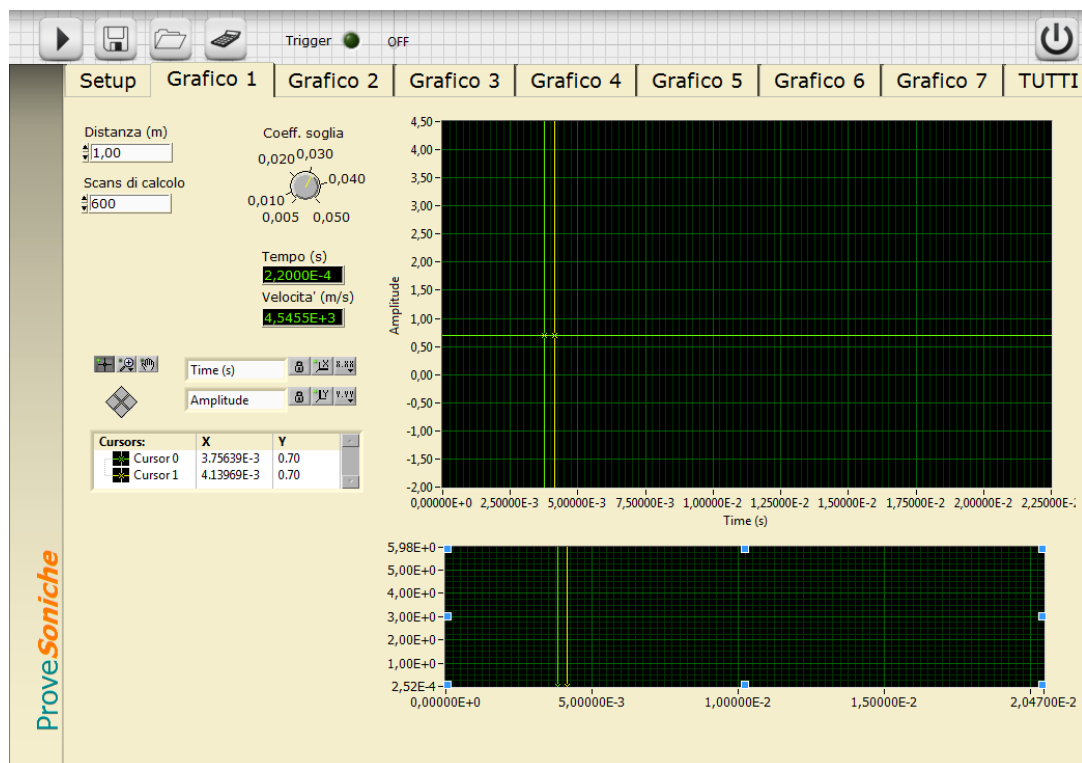


Fig. 3.11 – Interfaccia grafica del software ProveSoniche.

La fase di acquisizione ha inizio dopo il montaggio dell'apparecchiatura di prova e richiede il settaggio di due importanti parametri tra quelli presenti nel software: la frequenza di scansione e il numero totale di punti da campionare per segnale.

La frequenza di scansione è funzione del tipo di analisi da sviluppare ed è soggetta a limiti strumentali. La massima frequenza rilevabile dall'elaboratore nelle condizioni di utilizzo è di 20000 scansioni/sec. Questa frequenza garantisce un'elevata definizione e una 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. Per tale motivo è necessario definire il numero totale di punti da campionare. Solitamente la campionatura prevede l'acquisizione di 2048 scansioni in corrispondenza dei tratti iniziali dei segnali, porzioni più che sufficienti per l'analisi delle velocità di propagazione degli impulsi.

Al termine di ogni battuta, i dati relativi ai segnali acquisiti vengono salvati e archiviati in formato ASCII. I file contengono un'intestazione fissa, l'indicazione dei canali utilizzati e degli strumenti cablati, la frequenza di campionamento e tutti i valori acquisiti, disposti su un numero di colonne pari a quello dei canali usati.

```
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA Prove soniche ch0: martello (V) ch1..7:
accelerometro (V) INTERVAL 0.000010 DATA
0.008350 0.022292 0.004587 -0.012873 -0.004999
-0.085382 -0.048681 0.000025
0.006002 0.021503 0.004511 -0.011503 -0.004807
-0.085229 -0.048654 0.000033
0.007741 0.020245 0.004370 -0.008878 -0.005052
-0.085441 -0.048761 -0.000008
0.007398 0.019051 0.004089 -0.007980 -0.004982
-0.085399 -0.048832 0.000019
0.006979 0.018622 0.004240 -0.011506 -0.005250
-0.085373 -0.048973 -0.000007
0.008249 0.018547 0.004022 -0.013872 -0.005196
-0.084984 -0.048637 0.000038
0.007703 0.017913 0.003776 -0.011772 -0.005288
-0.085296 -0.048944 -0.000014
0.007512 0.016825 0.003430 -0.008926 -0.005284
-0.085102 -0.048716 0.000042
0.007119 0.016574 0.003592 -0.009076 -0.005207
-0.085272 -0.048871 -0.000005
0.008147 0.015729 0.003415 -0.011592 -0.005085
-0.085221 -0.048681 0.000049
0.006509 0.015065 0.003045 -0.011594 -0.005129
-0.084843 -0.048729 -0.000028
0.008858 0.014303 0.002958 -0.009891 -0.005030
-0.084982 -0.048665 0.000050
0.006509 0.014571 0.002632 -0.010142 -0.005189
-0.084677 -0.048918 -0.000025
0.008414 0.013720 0.002676 -0.012299 -0.004892
-0.084688 -0.048822 0.000030
0.006573 0.013099 0.002171 -0.012584 -0.005102
```

Fig. 3.12 – Formato del file ASCII prodotto dal software ProveSoniche.

Lo stadio di elaborazione, il cui scopo è quello di individuare le velocità di propagazione dei segnali all'interno delle sezioni murarie, necessita di una fase di pre-processamento dei dati acquisiti. L'operatore individua manualmente, sul grafico tempo-ampiezza relativo ai segnali generati durante una battuta, il tempo di volo dell'onda acustica e riporta il parametro in un foglio di calcolo.

Lettura	Martello Tx	Ricevitori e Rx	coordinate x (cm)		dist. (m)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	t4 (s)	tm (s)	dev.sta	coeff var	vm (m/s) da tm
			Tx	Rx									
da 1 a 3	11	31	0	0	0,5000	1,38E-04	1,57E-04	1,25E-04		0,0001402133	1,604E-05	11%	3565,99
	11	32	5	0	0,5025	1,15E-04	1,47E-04	1,36E-04		0,0001324500	1,611E-05	12%	3793,84
	11	33	10	0	0,5099	1,46E-04	1,33E-04	1,49E-04		0,0001424267	8,687E-06	6%	3580,10
	11	34	15	0	0,5220	1,62E-04	1,81E-04	1,67E-04		0,0001699367	9,614E-06	6%	3071,82
	11	35	20	0	0,5385	1,88E-04	1,90E-04	1,69E-04		0,0001824267	1,132E-05	6%	2951,96
	11	36	25	0	0,5590	1,97E-04	1,91E-04	1,49E-04		0,0001790433	2,590E-05	14%	3122,24
	11	37	30	0	0,5831	1,98E-04	1,89E-04	2,14E-04		0,0002000467	1,284E-05	6%	2914,80
	11	38	35	0	0,6103	2,07E-04	1,99E-04	2,00E-04		0,0002022200	4,560E-06	2%	3018,14
	11	39	40	0	0,6403	2,03E-04	2,68E-04	1,97E-04		0,0002225767	3,909E-05	18%	2876,82
	11	310	45	0	0,6727	2,16E-04	1,89E-04	1,73E-04		0,0001927600	2,190E-05	11%	3489,73

Fig. 3.13 – Possibile schermata di gestione dei dati sonici tramite foglio elettronico.

Nel caso di gestione di dati provenienti da prove soniche dirette o indirette, le restanti operazioni di elaborazione possono essere eseguite direttamente all'interno del foglio elettronico. Se invece l'analisi prevede la restituzione dell'immagine tomografica della sezione indagata, è necessario calcolare le velocità componenti la mappa con il software Tomografia, sviluppato dall'ing. N. Monteforte nel 1998.

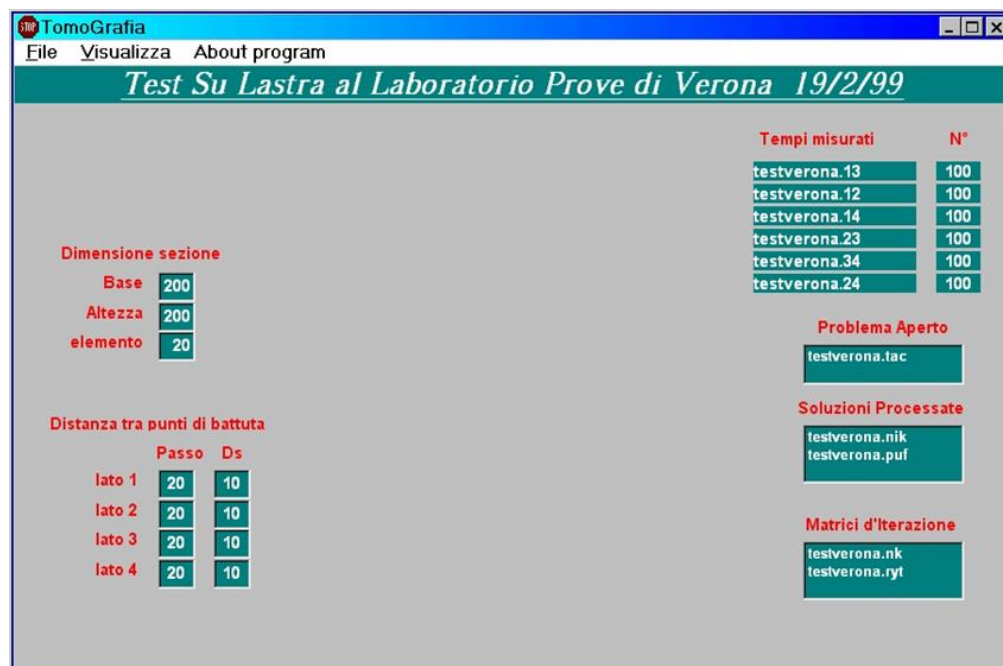


Fig. 3.14 – Finestra di interfaccia utente del software TomoGrafia (Monteforte, 1998).

L'ultimo stadio prevede la restituzione grafica dei risultati, ossia la visualizzazione a monitor delle mappe di velocità, strumento indispensabile per la valutazione dello stato di conservazione della muratura. Questa operazione viene eseguita automaticamente dal software Surfer sulla base dai dati di input (geometria della sezione e velocità interne) ad esso forniti dall'utente.

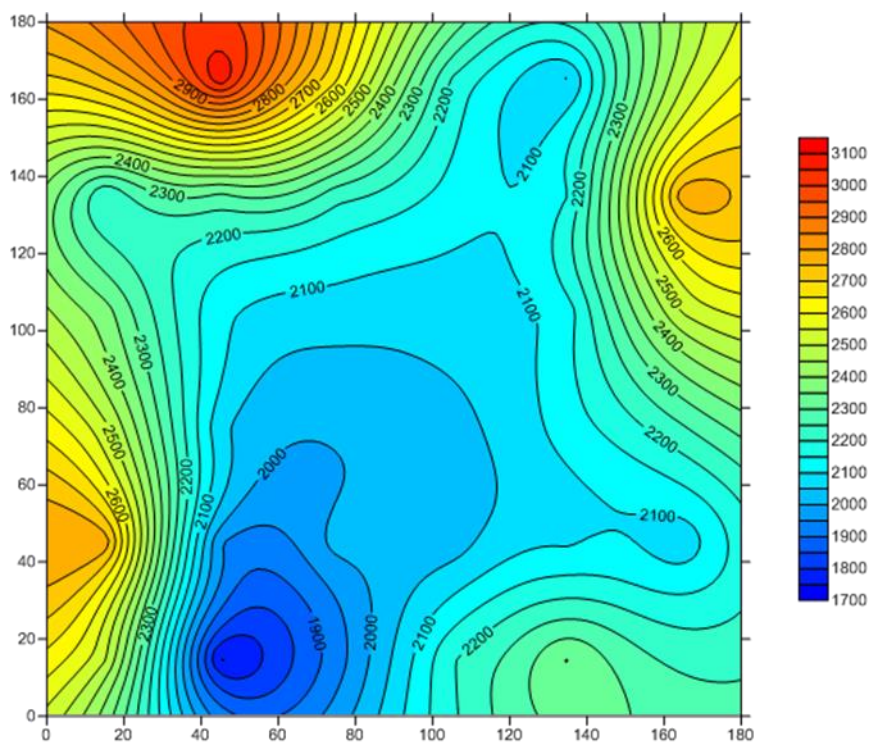


Fig. 3.15 – Restituzione grafica del software Surfer.

3.4.8 CAVI DI COLLEGAMENTO

La scelta dei cavi adatti all'esecuzione delle prove è legata essenzialmente al tipo di applicazione, alle caratteristiche degli strumenti e alle condizioni ambientali del sito.

La corretta individuazione dei cavi è necessaria per impedire che questi, in condizioni sfavorevoli, possano generare rumori sui segnali acquisiti. Lo sviluppo di interferenze è legato essenzialmente a due condizioni:

- La comparsa di una differenza di potenziale ai due capi del cavo a causa dalla continua frizione tra il conduttore e la guaina protettiva;
- La variazione della conduttività elettrica.

Entrambi gli effetti sono legati alle modalità di impiego (flessioni, distorsioni, ingarbugliamenti) e possono essere facilmente limitati fissando accuratamente i conduttori alle strutture presenti in sito per limitarne i movimenti. Inoltre è da preferire la scelta di cavi opportunamente schermati e aventi lunghezze proporzionali alle distanze tra le varie apparecchiature di misura.

Per il collegamento degli strumenti di prova si utilizzano solitamente cavi coassiali in quanto garantiscono elevata affidabilità e buone qualità antirumore.



Fig. 3.16 – Cavi di collegamento coassiali.

3.5 OSSERVAZIONI

In una metodologia di indagine in progressiva evoluzione come quella sonica, l'attenzione verso tutte le componenti del processo di esecuzione, anche le meno rilevanti, risulta indispensabile e assolutamente non trascurabile, in quanto non è possibile conoscere e valutare a priori quali effetti possano comportare le modifiche apportate ai diversi parametri della prova.

Dal punto di vista dei fondamenti teorici, la metodologia sonica, mutuata da discipline mediche e geofisiche e quindi già precedentemente approfondita, appare essere abbastanza definita. I limiti oltre i quali questa tipologia di indagine non risulta adatta agli scopi per cui è stata progettata appaiono chiari e difficilmente modificabili in quanto la maggior parte di essi sono collegati a fenomeni fisici naturali o a condizioni al contorno indipendenti dal controllo umano.

In quest'ottica, la valutazione e il miglioramento delle strumentazioni di misura può rivestire un ruolo fondamentale nel procedimento di rinnovamento

delle indagini soniche. In merito a questa considerazione è possibile formulare una serie di osservazioni:

- Il grado di precisione raggiunto dagli strumenti di misura (martelli strumentati e accelerometri) e dai dispositivi di acquisizione è consono al livello qualitativo dei dati richiesto per questo genere di indagini;
- La componente antropica riveste ancora un ruolo fondamentale all'interno dell'intero procedimento di esecuzione della prova e può alterare in maniera anche determinante i risultati finali. Nello specifico, l'influenza umana può intervenire nelle fasi di:
 - Generazione del segnale: L'intensità e la precisione delle battute effettuate con il martello strumentato possono variare notevolmente da operatore a operatore;
 - Ricezione del segnale: La disposizione e la stabilità degli accelerometri possono incrementare il livello di rumore presente nell'onda;
 - Pre-processamento del segnale: Allo stato attuale la fase di preparazione dei dati precedente all'analisi vera e propria viene completamente gestita dagli operatori ed è notevolmente soggetta a decisioni arbitrarie.
- Gli algoritmi di analisi e trattamento dei dati sono spesso complessi e non sempre affidabili e richiedono competenze specifiche abbastanza approfondite;
- Alcuni dei più importanti parametri e fattori legati all'esecuzione e all'elaborazione dei dati (dimensione delle maglie di acquisizione ed elaborazione, tipologia di ray tracing, ecc.) sono definiti solo in maniera empirica e necessitano di studi ad essi dedicati.

Alcune delle considerazioni e delle problematiche sopra citate saranno approfondite nei successivi capitoli di questo lavoro e, per alcune di esse, verranno fornite possibili alternative o nuove soluzioni.

Nonostante i limiti esistenti e la necessità di approfondimento e miglioramento di alcune sue componenti, la tecnica di indagine sonora resta comunque una delle prove più efficaci nell'ambito delle metodologie di studio non distruttive.

CAPITOLO 4

RACCOLTA ED ANALISI DI PRECEDENTI SPERIMENTAZIONI

Nel presente capitolo vengono raccolte e analizzate le principali sperimentazioni disponibili in letteratura relative all'impiego della metodologia di indagine sonica.

Lo studio dello stato dell'arte e delle campagne eseguite rappresenta un passo fondamentale nella definizione degli obiettivi che ogni nuova sperimentazione si pone. La ricerca bibliografica ha infatti lo scopo di ricercare i casi e le problematiche di partenza a cui è necessario fornire, in questo o in altri lavori, una valida risposta.

Le porzioni investigate risalgono a differenti periodi storici (dal XIII al XVII secolo) e appartengono a diverse tipologie di strutture (torri, chiese, palazzi e mura di cinta). Come la maggior parte delle murature storiche presenti sul territorio, anche quelle qui analizzate sono caratterizzate da:

- Spiccata disomogeneità;
- Composizione mista (diverse qualità di pietre e/o mattoni);
- Presenza di paramenti multipli, spesso incoerenti e debolmente connessi.

I risultati dimostrano che le velocità di trasmissione delle onde soniche misurate durante le campagne di prova possono fornire utili informazioni al fine della valutazione della consistenza e dello stato di conservazione delle murature. Questa affermazione è però certamente valida solo nel caso in cui la metodologia sonica sia integrata dai risultati forniti da altre tipologia di prova, sia distruttive che

debolmente o non distruttive. Inoltre questa tecnica, utilizzata prima e dopo l'esecuzione di interventi volti a modificare le proprietà fisiche e meccaniche della muratura, fornisce utili informazioni sull'efficacia della metodologia di consolidamento applicata.

Data la maggior attinenza con l'argomento principale di questo lavoro di Tesi, l'attenzione sarà focalizzata sui risultati derivanti dall'esecuzione di indagini soniche tomografiche.

4.1 ANALISI DELLE CONDIZIONI STATICHE DELLA BASILICA DI SAN MARCO IN VENEZIA (ROSSI P.P., 1995)

4.1.1 GENERALITÀ

La Basilica di San Marco è un monumento caratterizzato da una complessa organizzazione strutturale la cui costruzione è avvenuta in tre diverse fasi:

1. Prima fase (828 d.C.): Costruzione della prima fabbrica marciana;
2. Seconda fase (976 d.C.): Ricostruzione completa in seguito all'incendio che distrusse la Basilica e Palazzo Ducale;
3. Terza fase (1063 d.C.): Costruzione della terza fabbrica marciana, voluta dal Doge Domenico Contarini per manifestare il potere politico ed economico raggiunto da Venezia.

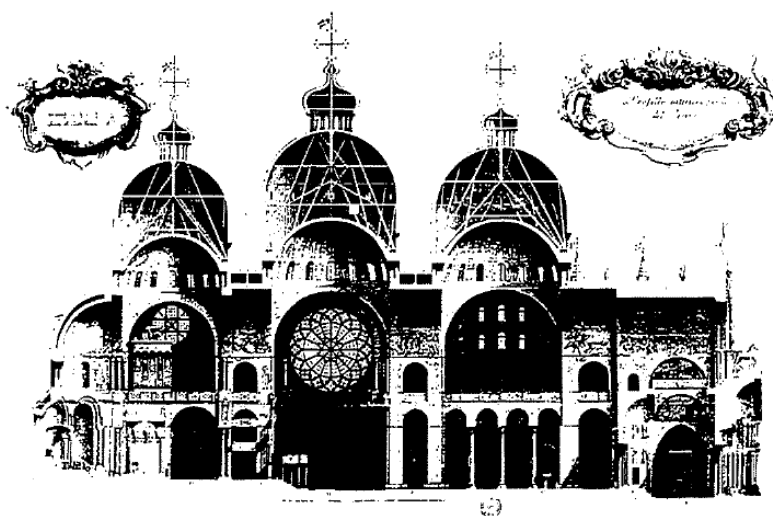


Fig. 4.1 – Sezione longitudinale della Basilica (A. Visentini, XVIII secolo) (Rossi P.P., 1995).

L'avvio di un programma di indagini diagnostiche per l'accertamento delle condizioni statiche della Basilica, si è reso necessario in seguito all'individuazione di chiari segni di deformazione e degrado delle pareti murarie, degli archi, delle volte, delle cupole e del pavimento causati dalle continue modifiche apportate alla struttura e dai numerosi eventi distruttivi (terremoti ed incendi). Il programma di ricerca, caratterizzato da un approccio di tipo numerico e sperimentale, si è articolato nelle seguenti fasi:

- Indagine storica;
- Rilievo topografico e fotogrammetrico con analisi dettagliata del quadro fessurativo;
- Indagini geotecniche e analisi delle strutture di fondazione;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Tomografie soniche;
 - Indagini radar;
 - Carotaggi meccanici e rilievi endoscopici tramite sonda televisiva;
 - Prove con martinetti piatti;
 - Prove di laboratorio;
- Installazione di un sistema di monitoraggio;
- Modello matematico dell'intera struttura.

4.1.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Come previsto dalla campagna di ricerca, sono state eseguite alcune indagini non distruttive mediante tomografia sonora al fine di individuare la presenza di eventuali anomalie all'interno del corpo murario. Le prove sono stata condotte su due pilastri la cui collocazione all'interno della struttura è visibile nella planimetria qui riportata.

Dai risultati ottenuti si è potuto notare come il Pilastro 1, consolidato mediante iniezioni negli anni 60 del secolo scorso, presenti un campo di velocità elevato nella zona più interna, ossia nella parte interessata dall'intervento di consolidamento. Al contrario, i valori di velocità relativi al Pilastro 2 mostrano che

la struttura indagata presenta caratteristiche meccaniche molto scadenti. Questi esiti sono consoni con la mancata esecuzione di operazioni di rinforzo dell'elemento.

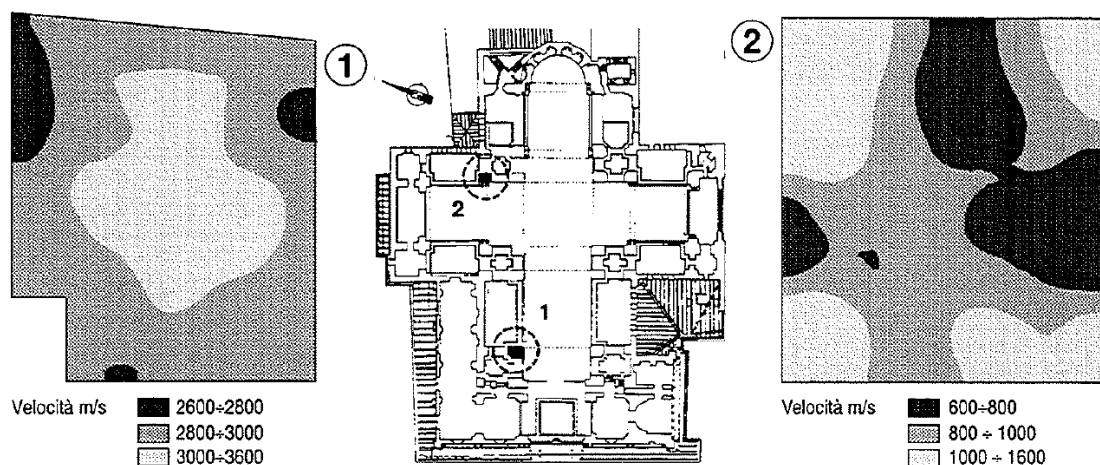


Fig. 4.2 - Risultati ottenuti mediante indagini di tomografia sonica su due pilastri (Rossi P.P., 1995).

I risultati forniti dalle altre prove (martinetti piatti, carotaggi, rilievi endoscopici) hanno chiaramente evidenziato come il Pilastro 2 sia sottoposto a condizioni di carico molto gravose in relazione alle scadenti caratteristiche meccaniche della muratura.

Per tale motivo si è ritenuto opportuno svolgere indagini più dettagliate nella parte inferiore del pilastro, privata del rivestimento in marmo. Le tre nuove tomografie soniche, realizzate a differenti altezze, hanno confermato i bassi valori di velocità misurati nella prova precedente.

4.2 APPLICAZIONE DELLA TOMOGRAFIA SONICA NEI PROBLEMI DI DIAGNOSI STRUTTURALE (MONTEFORTE, 1998)

4.2.1 GENERALITÀ

L'approfondita campagna di indagine sonica descritta dall'ing. Monteforte nel proprio lavoro di Tesi, è stata eseguita su una delle strutture storiche più note della città di Padova: il campanile del Monastero benedettino di Santa Giustina.



Fig. 4.3 – L'Abbazia di Santa Giustina (sinistra) e la sua torre campanaria (destra).

Elevato nel XIII secolo fino ad una quota di circa 40 metri, fu modificato durante la ricostruzione del monastero avvenuta nel XVI-XVII secolo con l'aggiunta di nuovi piani che ne raddoppiarono l'altezza complessiva.

A seguito di queste trasformazioni è stato osservato il progressivo peggioramento del quadro fessurativo, caratterizzato sia da grandi crepe sviluppate per l'intera lunghezza della sezione più bassa che da piccole fessure diffuse. Per contenere il crescente degrado strutturale causato dal raddoppio dei carichi gravanti sulla porzione più antica del campanile, sono stati intrapresi alcuni urgenti interventi di riparazione localizzata, limitati alla ricostruzione delle crepe più importanti, allo scuci-cuci, al rinforzo con armatura o iniezioni e alla cerchiatura della torre.

Il programma di ricerca, basato esclusivamente sull'esecuzione di prove debolmente o non distruttive e realizzato successivamente agli interventi di consolidamento, si è articolato nelle seguenti fasi:

- Indagine storica;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Prove soniche indirette;
 - Tomografie soniche;
 - Indagini radar;

- Carotaggi meccanici e rilievi endoscopici tramite sonda televisiva.

Le analisi hanno evidenziato una tipologia muraria a “sacco”, costituita da paramenti esterni in mattoni. Le uniche differenze nella tessitura muraria sono state riscontrate nei pannelli del primo piano: nello strato esterno della parete i laterizi sono stati sostituiti da blocchi di trachite mentre, in alcune zone dello strato interno, si è notata la presenza di inclusioni di pietra della stessa tipologia. In questo secondo caso è stata inoltre appurata la presenza di un conglomerato interno scadente, non omogeneo e ricco di vuoti.

4.2.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Al fine di caratterizzare la morfologia della sezione muraria è stata eseguita la tomografia sonica orizzontale su tre lati di una porzione di parete della torre campanaria. Per favorire la massima integrabilità e il miglior confronto possibile tra i dati ottenuti, lo stesso elemento è stato sottoposto anche a prove soniche indirette, prove radar e carotaggi.

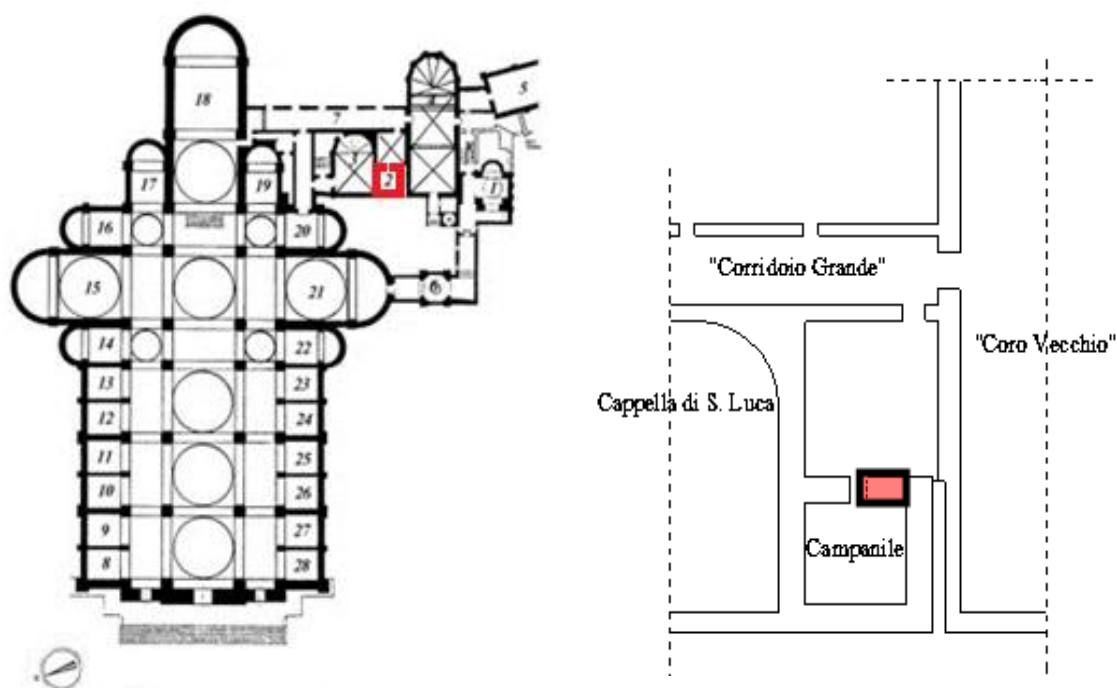


Fig. 4.4 - Planimetria della Basilica (sinistra) e della torre campanaria (destra). In rosso sono evidenziate la posizione del campanile e della muratura sottoposta all'indagine (Monteforte 1998).

Le indagini condotte con test sonici indiretti, pur non essendo supportate dal confronto con i dati relativi a prove antecedenti gli interventi di consolidamento, hanno evidenziato il discreto stato della muratura. La velocità media di propagazione delle onde elastiche si è attestata sui 1200 m/s, salvo talune zone in cui sono stati raggiunti picchi positivi di 1500 m/s e negativi di 600 m/s.

L'indagine tomografica orizzontale è stata eseguita sulla stessa muratura di spessore 140 cm, secondo un passo di acquisizione di 20 cm. Lungo i due lati più lunghi della sezione sono stati disposti rispettivamente 10 punti di battuta-ricezione mentre, lungo il lato corto, i punti utilizzati sono stati 7, per un totale di 27 posizioni di acquisizione e 240 misurazioni. L'analisi tomografica ha consentito di individuare con precisione quattro zone della muratura caratterizzate da campi di velocità ben definiti:

- 1000 ÷ 1400 m/s: Parte centrale interna della sezione in cui è presente il conglomerato scadente. I valori medio-bassi di velocità indicano correttamente la presenza di possibili anomalie alternate a zone di maggiore densità;
- 1400 ÷ 1600 m/s: Porzione posta lungo il bordo della sezione in cui è rilevabile ad occhio nudo la presenza della parete in mattoni. Questo campo di velocità interessa anche una zona interna in cui è probabilmente presente conglomerato dotato di migliori caratteristiche meccaniche;
- 1600 ÷ 1800 m/s: Parte corrispondente alla zona più interna del blocco di trachite. I valori relativamente bassi sono imputabili a distacchi interni, alla scarsa giunzione tra i blocchi o al deterioramento dell'elemento stesso;
- 1800 ÷ 2000 m/s: Porzione corrispondente allo spessore del blocco di trachite. Anche in questa zona il campo di velocità pare essere influenzato dalla presenza di alcuni difetti quali distacchi o scarso collegamento tra gli elementi;
- 2000 ÷ 2200 m/s: Valori molto simili a quelli ipotizzabili per una pietra trachitica non degradata.

L'esecuzione di un carotaggio, effettuato dall'interno del campanile fino al raggiungimento dello strato di pietra esterno, ha permesso di validare le informazioni ottenute tramite l'elaborazione dei dati tomografici. Il primo strato della carota, corrispondente alla parte più esterna della muratura, è risultato essere composto da mattoni quasi integri mentre il secondo, coincidente con la tessitura più interna, è parso essere inconsistente. La sovrapposizione dell'immagine tomografica con quella del campione estratto e il loro confronto con le riprese endoscopiche, avvalorano ulteriormente la qualità dei risultati forniti dall'indagine tomografica.

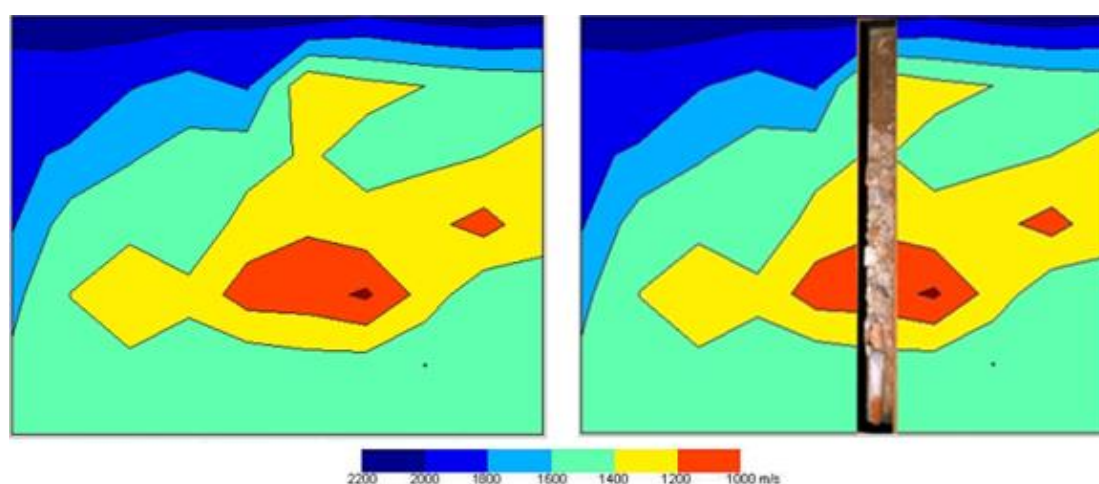


Fig. 4.5 – Tomografia sonora della muratura del campanile di Santa Giustina (sinistra) e confronto tra la tomografia sonora e il campione di muratura estratto (destra) (Monteforte 1998).

Nonostante la correttezza delle informazioni estratte sia stata comprovata da diverse tipologie di indagine, appare chiaro uno dei maggiori limiti delle prove soniche: esse forniscono solo indicazioni qualitative e non quantitative sulla presenza di vuoti, fessure o disomogeneità. Questa carenza è da attribuirsi all'utilizzo di onde elastiche, caratterizzate da una lunghezza d'onda dell'ordine di 20÷30cm e all'esistenza di un fondamentale principio fisico: qualsiasi sia il dispositivo di rilevamento utilizzato, è impossibile individuare oggetti le cui dimensioni lineari siano minori rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata per indagare il mezzo. Questo assioma condiziona notevolmente l'apparato sperimentale del metodo tomografico perchè non consente di suddividere la sezione indagata in pixel più piccoli e precisi.

La scelta delle onde elastiche resta comunque la migliore alternativa possibile, in quanto le condizioni dei paramenti murari storici impediscono l'utilizzo di segnali ultrasonici perché sensibilmente attenuabili.

4.3 INDAGINI SPERIMENTALI SULL'EFFICACIA DI TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO DI MURATURE STORICHE IN PIETRA (DA PORTO, 1999)

4.3.1 GENERALITÀ

Questo lavoro, sviluppato dall'ing. Francesca Da Porto nel 1999, si fonda su una serie di indagini condotte sulla cinta muraria del Comune di Cittadella.

Il centro storico di Cittadella, grosso Comune della provincia settentrionale di Padova, è caratterizzato da una pianta ellittica irregolare ed è circondato da una cinta muraria monumentale che si sviluppa per un perimetro di quasi 1500 metri.



Fig. 4.6 – Il centro storico di Cittadella (Da Porto, 1999).

La nascita di questo borgo fortificato è legata alle esigenze difensive della città patavina in epoca medievale: esso infatti si contrapponeva all'avamposto di Castelfranco Veneto nel trevigiano e, insieme alle città murate di Monselice, Este e Montagnana, assicurava la protezione della città dalle invasioni esterne.

La fortificazione di Cittadella, la cui costruzione sembra risalire al 1220 su progetto di Benedetto da Cartura, raggiunge l'altezza di circa 13/14 metri ed è caratterizzata dalla presenza di 32 torri, quattro delle quali, in corrispondenza dei punti cardinali, hanno uno sviluppo particolare e fungono da porte cittadine.



Fig. 4.7 - La cinta muraria di Cittadella. Il paramento esterno (sinistra) e quello rivolto verso l'interno del Comune (destra) (Da Porto, 1999).

Dal punto di vista tipologico, le mura sono caratterizzate da una struttura abbastanza variegata. I due paramenti esterni, fino ad una certa quota non costante, sono costituiti da corsi alterni di mattoni disposti di testa e ciottoli del Brenta saltuariamente intramezzati da mattoni di coltello. Ad altezze superiori, ma solo in alcune zone della cinta, è riconoscibile un paramento composto da corsi a due teste in cui i mattoni, disposti sia di testa che di taglio, sono sporadicamente intramezzati da corsi di pietra. Il riempimento contenuto tra i due paramenti esterni è realizzato con la tecnica dell'opus concretum, ossia con la disposizione di strati regolari di ciottoli e pezzi di laterizio di medie dimensioni alternati a strati di malta. Le mura presentano sezione rettangolare e, lungo il paramento esterno, sono caratterizzate dalla presenza di una piccola scarpa visibile per un'altezza variabile tra 0 e 30 cm.



Fig. 4.8 – Tessitura muraria dei paramenti esterni (sinistra) e del riempimento interno (destra) della cinta muraria (Da Porto, 1999).

Al fine di limitare gli effetti del degrado e garantire la massima conservazione della struttura muraria, è stata predisposta una campagna di consolidamento che, almeno secondo il progetto iniziale, avrebbe dovuto interessare solamente il terzo e il quarto settore del quadrante nord orientale della cinta muraria in prossimità di Porta Bassano. Il peggioramento del quadro di danno ha però reso necessario l'ampliamento dell'intervento di consolidamento alle porzioni murarie adiacenti a quelle inizialmente stabilite. Nello specifico, il programma si è articolato nei seguenti interventi:

- Occlusione dei cunicoli interni attraverso l'iniezione di miscele consolidanti;
- Ripristino della continuità muraria tramite interventi di scuci-cuci su crepe localizzate;
- Iniezione di miscela consolidanti nella zona inferiore del paramento esterno fino ad un'altezza di circa 3,2 metri dalla quota del terreno. L'intervento ha riguardato l'intero tratto di muratura oggetto di intervento, comprese le torri;
- Rinforzo delle fondazioni del torresino centrale e cerchiatura delle fondazioni delle altre torri;

- Posizionamento, lungo il paramento esterno delle mura, di una serie di puntoni di sostegno e loro copertura per mezzo di un nuovo terrapieno.

Nell'ambito di questo progetto di recupero, il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova ha effettuato una serie di indagini sperimentali sulle porzioni murarie al fine di individuarne le iniziali condizioni e di valutare la qualità dell'intervento di consolidamento. Il programma di ricerca, basato esclusivamente su indagini debolmente o non distruttive, si è articolato nelle seguenti prove:

- Prove soniche dirette pre e post intervento;
- Tomografie soniche pre e post intervento;
- Carotaggi meccanici.

4.3.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Sia le prove soniche dirette che quelle tomografiche sono state eseguite su un pannello murario di dimensione 400 x 200 cm e spessore 220 cm posto in prossimità del puntone centrale del quarto settore del quadrante nord orientale.



Fig. 4.9 – Pannello sottoposto ad indagine tomografica (Da Porto, 1999).

Nella fase antecedente gli interventi di consolidamento, entrambe le tipologie di indagine hanno evidenziato il cattivo stato della muratura.

Nello specifico, la prova tomografica verticale, eseguita disponendo 6 punti di battuta-ricezione con passo di 30 cm lungo ciascun lato, per un totale di 12 posizioni di acquisizione e 36 misurazioni, ha restituito una velocità media di propagazione delle onde elastiche pari a circa 800 m/s, con picchi massimi positivi di 1050 m/s e negativi di 650 m/s. Inoltre la tomografia ha evidenziato la presenza di una fascia diagonale, estesa dal basso verso l'alto e dall'interno verso l'esterno della cinta, avente caratteristiche leggermente migliori rispetto a quelle delle altre zone indagate. I valori riscontrati sono risultati paragonabili con quelli ricavati dai test sonici diretti in cui, pur avendo raggiunto apici di velocità maggiori (circa 1800 m/s), la media si è comunque attestata sugli 800 m/s.

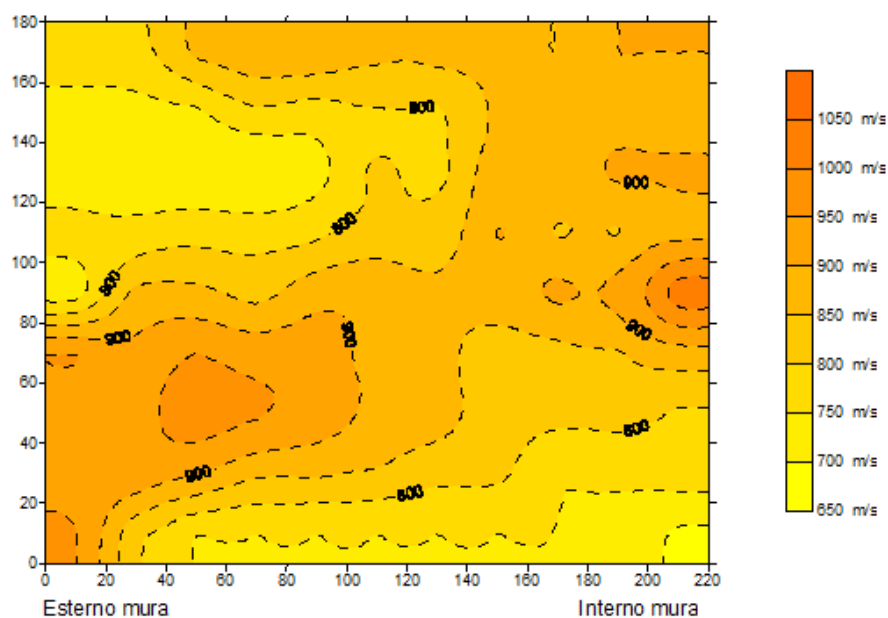


Fig. 4.10 – Risultato della prova tomografia nella fase precedente alle iniezioni (Da Porto, 1999).

La ripetizione della prova tomografica nella fase successiva all'esecuzione degli interventi sulla muratura, ha mostrato un discreto miglioramento delle condizioni complessive. Nella fascia meno danneggiata l'incremento della qualità muraria ha consentito di ottenere velocità prossime ai 1300 m/s mentre, nelle restanti zone, il consolidamento ha permesso di raggiungere i 1000 m/s anche nei punti maggiormente danneggiati. Anche in questo caso i valori di velocità riscontrati nelle due tipologie di indagine sono risultati paragonabili, anche se la tecnica sonica diretta ha evidenziato incrementi puntuali maggiori rispetto a quelli

osservati nell'analisi tomografica (anche 1500 m/s). In alcuni punti infatti, l'incremento percentuale delle velocità è stato addirittura del 90%.

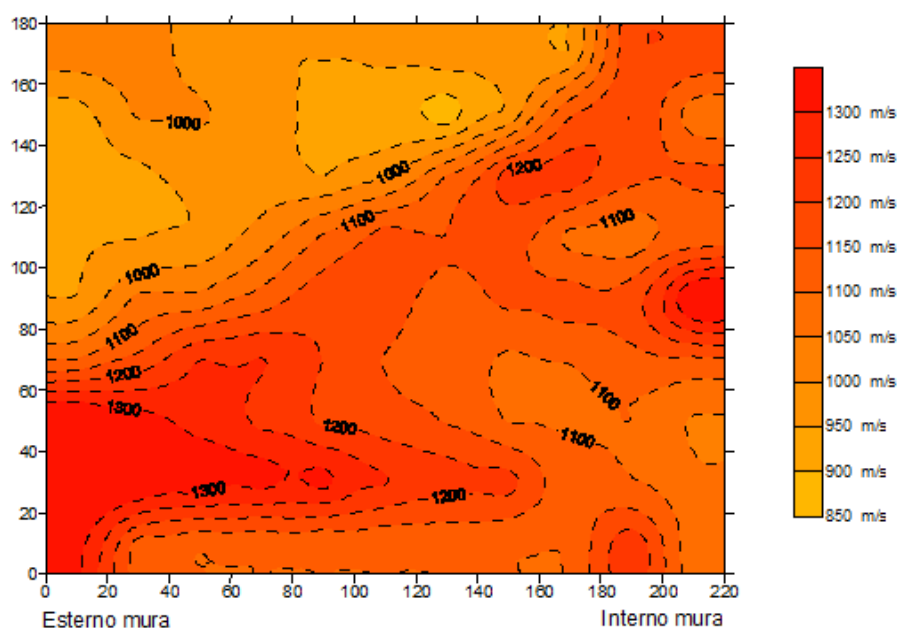


Fig. 4.11 – Risultato della prova tomografia nella fase successiva alle iniezioni (Da Porto, 1999).

L'avvicinamento reciproco dei valori limite dell'intervallo delle velocità soniche ha dimostrato che l'intervento iniettivo risulta essere più efficace nelle zone di muratura aventi condizioni iniziali peggiori, in quanto garantisce una maggiore omogeneizzazione delle caratteristiche interne.

Oltre a ricavare interessanti informazioni in merito alle condizioni della cinta muraria di Cittadella prima e dopo l'intervento di consolidamento, questa campagna di indagine ha permesso di verificare la validità della tecnica d'indagine tomografica per la valutazione delle caratteristiche qualitative degli elementi.

4.4 ANALISI STRUTTURALE SULLA TORRE DI PIAZZA IN VICENZA (BIASIOLO, 2001)

4.4.1 GENERALITÀ

La campagna di indagine descritta dall'ing. Biasiolo nel proprio lavoro di Tesi, è stata eseguita su un importante simbolo architettonico della città di Vicenza: la Torre Bissara (o Torre di Piazza).

Elevata nel XII secolo per volere della famiglia Bissari, riuscì a sfuggire al terribile terremoto che colpì la città veneta nel 1347. Verso la metà del quattrocento subì un importante intervento di sopraelevazione che la portò a raggiungere la quota attuale. Nel 1945 fu colpita da un bombardamento anglo-americano che ne incendiò la sommità e ne fece crollare il cupolino e che rese necessaria una importante (e discussa) opera di ricostruzione e restauro.



Fig. 4.12 – Uno scorcio della Torre di Piazza e dell’adiacente Basilica Palladiana (sinistra) e un particolare della sommità della torre (destra) (Biasiolo, 2001).

La Torre è costituita da un fusto in muratura molto snello, con sezione alla base di circa 6.20 x 6.50 metri ed un’altezza complessiva di poco inferiore a 83 m. Lo spessore della muratura in laterizio a tre teste varia dai circa 250 cm della base ai 140 cm della fascia sottostante la cella campanaria, sopra la quale si innalza, per oltre 12 m, la porzione terminale di forma ottagonale con muri dello spessore di 75-80 cm. Grazie ad una serie di analisi e al costante monitoraggio messo in atto dai primi anni del dopoguerra, sono stati constatati una significativa inclinazione della struttura in direzione Nord-Ovest e un livello di pericolosità tale da renderne necessario il miglioramento strutturale attraverso sistematici interventi di consolidamento.

Il programma di indagine dell'ing. Biasiolo, volto all'individuazione delle corrette tecniche di rinforzo e alla verifica dei loro effetti, è stato improntato sull'esecuzione di prove debolmente o non distruttive. In particolare:

- Indagine storica;
- Indagini geotecniche:
 - Prove penetrometriche;
 - Sondaggi geognostici verticali a carotaggi continui;
 - Sondaggi geognostici inclinati a carotaggi continui;
- Prove di resistenza dei mattoni;
- Prove con martinetto piatto;
- Prove soniche dirette e indirette;
- Tomografie soniche pre e post intervento.

4.4.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

La Torre è stata sottoposta a quattro indagini tomografiche, due in direzione orizzontale e due in verticale.

Le prime sono state eseguite disponendo i punti di battuta-ricezione a 25 cm dal bordo esterno di ciascun paramento murario e con passo di 30 cm, mentre nelle seconde è stata utilizzata una maglia rettangolare di 7 x 10 punti di acquisizione posti con interasse variabile di 25-27 cm. Entrambe le tipologie di prova hanno consentito di valutare il degrado iniziale e i successivi effetti del consolidamento di una delle porzioni di muratura poste nella fascia sottostante la cella campanaria (spessore di circa 150 cm). Nello specifico, le indagini tomografiche hanno restituito i seguenti risultati:

- Prima tomografia orizzontale (h = 1.40 m):
 - Pre-iniezione: Distribuzione di velocità caratteristica di murature leggermente danneggiate o in discreto stato. È stato possibile osservare il progressivo incremento delle velocità soniche nel passaggio dal paramento interno (circa 1100 ÷ 1300 m/s) a quello esterno della cella campanaria (circa 1700 m/s). I risultati hanno

rispecchiato l'effettivo stato della muratura che, nella porzione rivolta verso l'interno, presentava fessurazioni verticali, disgregazioni e parziali distacchi degli elementi resistenti;

- Post-iniezione: È stato riscontrato un incremento delle velocità soniche uniformemente distribuito all'interno sezione e compreso tra il 10 e il 18%.

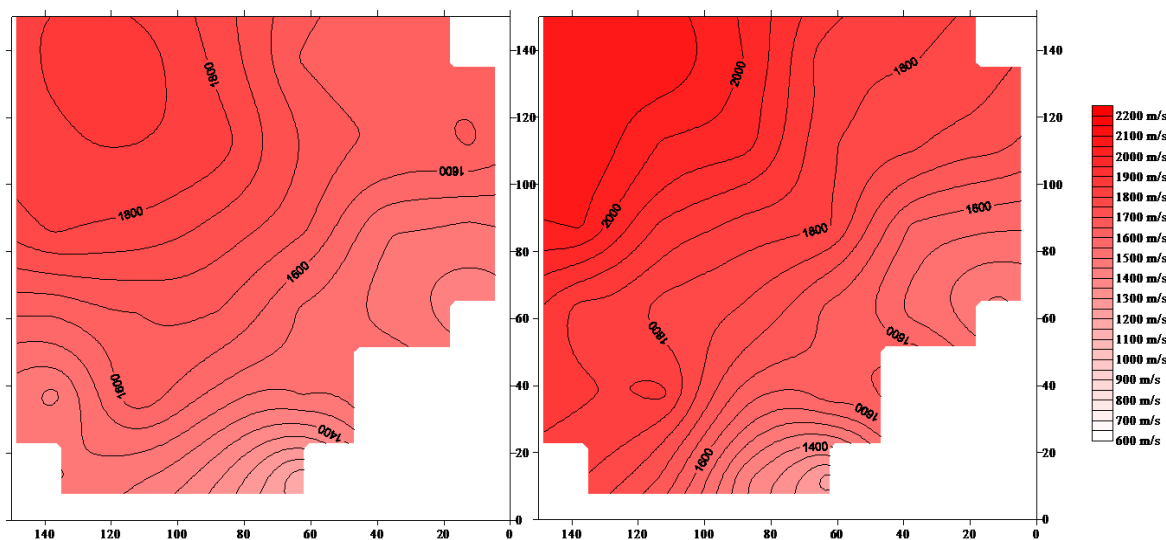


Fig. 4.13 – Risultati della prima tomografia orizzontale eseguita prima (sopra) e dopo (sotto) l'intervento di consolidamento (Biasiolo, 2001).

- Seconda tomografia orizzontale ($h = 3.05$ m):
 - Pre-iniezione: In questo caso è stato possibile osservare la netta variazione delle velocità soniche nel passaggio dal paramento interno di scarsa qualità (circa $500 \div 600$ m/s) a quello esterno di migliori caratteristiche (circa $1400 \div 1600$ m/s);
 - Post-iniezione: È stato osservato un deciso incremento delle velocità soniche ($20 \div 30\%$), probabilmente legato alle scarse caratteristiche della muratura. Il miglioramento più evidente è stato riscontrato nel paramento rivolto verso l'interno della cella campanaria, caratterizzato da una consistenza iniziale inferiore rispetto a quella delle restanti parti della sezione.

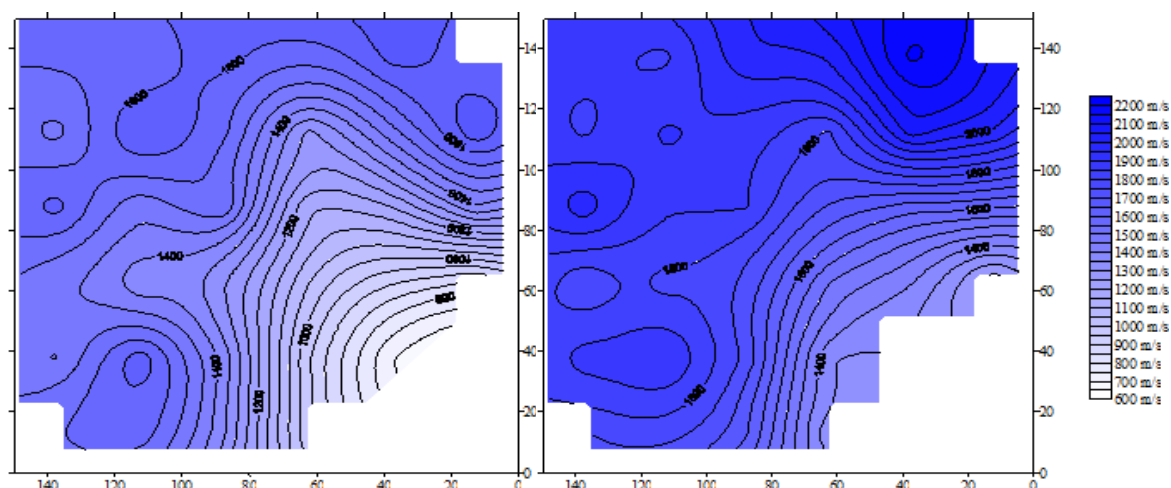


Fig. 4.14 – Risultati della seconda tomografia orizzontale eseguita prima (sopra) e dopo (sotto) l'intervento di consolidamento (Biasiolo, 2001).

- Prima tomografia verticale ($h = 0.75 \div 3.27$ m, lati 1 e 3):
 - Pre-iniezione: In questo caso è stato possibile osservare una progressiva ma contenuta variazione delle velocità soniche nel passaggio dal paramento interno (circa 1000 m/s) a quello esterno (circa 1500 m/s). La sezione indagata è risultata essere più omogenea rispetto a quelle analizzate con tomografia orizzontale, ad eccezione di una ristretta zona posta in prossimità della parete interna della cella campanaria, caratterizzata da velocità inferiori ai 1000 m/s e quindi scarsamente consolidata;
 - Post-iniezione: È stato riscontrato un incremento delle velocità soniche abbastanza disomogeneo. Nelle zone caratterizzate da muratura di discrete condizioni è stato rilevato un aumento contenuto delle velocità, stimabile tra il 12 e il 16% dei valori iniziali. Nella porzione più danneggiata invece, il miglioramento è risultato essere sensibile, con incrementi superiori al 30%. L'intervento si è quindi rivelato essere più incisivo nelle zone caratterizzate da livelli di consolidazione inferiori.

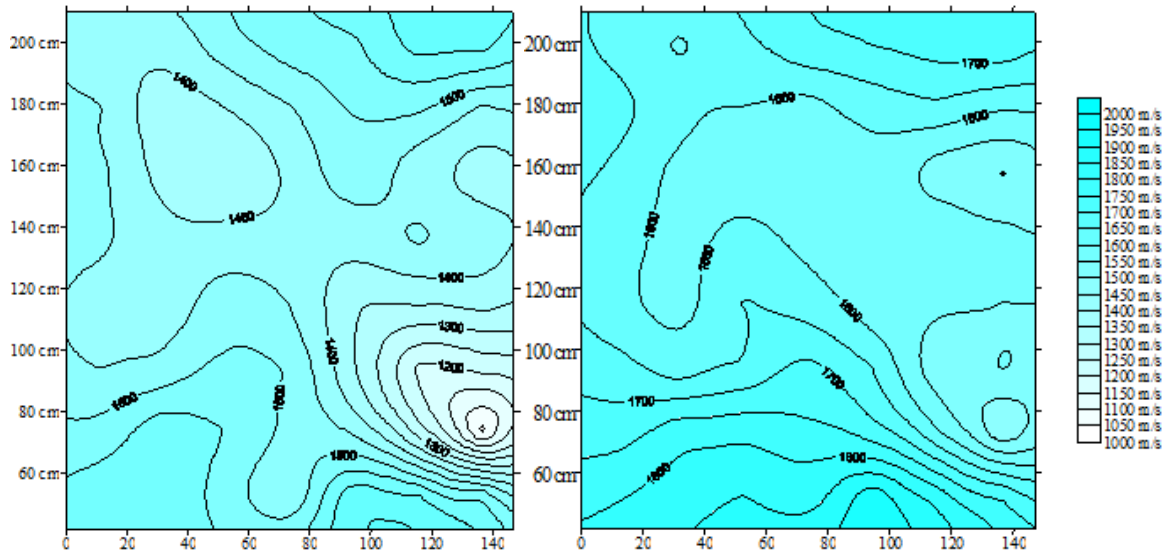


Fig. 4.15 – Risultati della prima tomografia verticale eseguita prima (sinistra) e dopo (destra) l'intervento di consolidamento (Biasiolo, 2001).

- Seconda tomografia verticale ($h = 0.75 \div 3.27$ m, lati 2 e 4):
 - Pre-iniezione: Distribuzione di velocità caratteristica di murature leggermente danneggiate o in discreto stato. È stato possibile osservare il progressivo incremento delle velocità soniche nel passaggio dal paramento interno (circa $1100 \div 1300$ m/s) a quello esterno della cella campanaria (circa 1700 m/s). I risultati hanno rispecchiato l'effettivo stato della muratura che, nella porzione rivolta verso l'interno, presentava fessurazioni verticali, disgregazioni e parziali distacchi degli elementi resistenti;
 - Post-iniezione: È stato riscontrato un incremento delle velocità soniche abbastanza contenuto e uniformemente distribuito all'interno sezione, compreso tra il 10 e il 15%. Solo in prossimità di un foro iniettato con molta miscela consolidante è stato misurato un valore superiore del 30% rispetto a quello iniziale. Anche questi risultati, come i precedenti, hanno evidenziato la modalità di distribuzione delle miscele all'interno delle murature eterogeneamente consistenti.

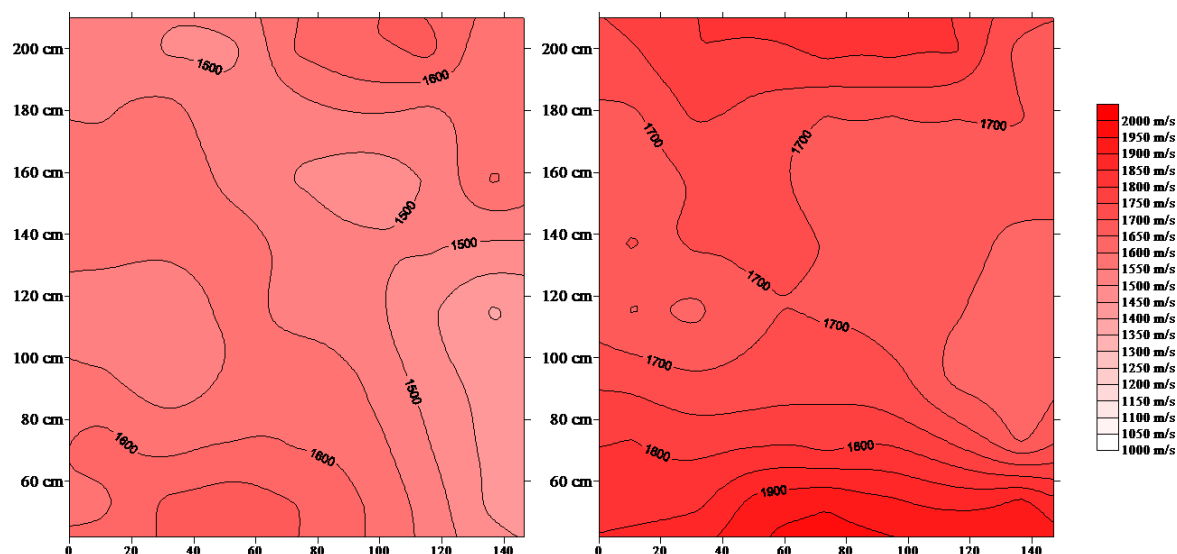


Fig. 4.15 – Risultati della prima tomografia verticale eseguita prima (sinistra) e dopo (destra) l'intervento di consolidamento (Biasiolo, 2001).

In seguito al confronto tra i risultati ottenuti, è stato possibile verificare l'efficacia dell'intervento di consolidamento per mezzo di iniezioni. L'incremento generalizzato ma non uniforme delle velocità soniche misurate con la tecnica tomografica ha inoltre evidenziato il reale comportamento delle miscele consolidanti: a parità di composizione, queste tendono ad emigrare verso le zone a più alto indice dei vuoti. In conseguenza di ciò, sono state riscontrate variazioni maggiori delle velocità soniche in corrispondenza delle porzioni di muratura più danneggiate.

L'esecuzione di una serie di indagini soniche in trasparenza e superficiali ha inoltre consentito di confermare quanto dedotto dai risultati tomografici e di classificare le murature della Torre di Piazza come murature in discreto stato (Forde et al., 1985)

4.5 NON DESTRUCTIVE TESTING APPLIED TO HISTORIC BUILDINGS: THE CASE OF SOME SICILIAN CHURCHES (BINDA ET AL., 2001)

I casi studio analizzati dalla prof.ssa Binda e dai suoi collaboratori hanno previsto l'indagine di due edifici storici accomunati da analogie nella geometria

strutturale, nella tecnica di costruzione, nei materiali e nei danni presenti. Le due chiese siciliane, quella di S. Nicolò l'Arena e la Cattedrale di Noto, furono infatti costruite entrambe alla fine del XVII secolo e, dopo il terremoto del 1990, mostrarono ambedue danni simili nei diversi elementi strutturali.

L'improvviso crollo della Cattedrale, avvenuto nel 1996, mise drasticamente in luce ciò che le perfette condizioni dei rivestimenti in pietra dei pilastri avevano celato per alcuni anni: lo sviluppo di un significativo quadro fessurativo causato sia dagli eventi sismici che dai fenomeni di creep a lungo termine.

Lo studio di entrambi gli edifici ha richiesto l'impiego di simili metodologie d'indagine, caratterizzate da prove complementari di diversa invasività ma, data la mancanza di dati tomografici relativi alla Cattedrale di Noto, viene qui analizzato il solo caso riguardante la Chiesa di S. Nicolò l'Arena.

4.5.1 GENERALITÀ

La costruzione della Chiesa di S. Nicolò l'Arena a Catania ebbe probabilmente inizio nel 1687 e terminò, con ritmi costruttivi irregolari, attorno alla meta del '700. I numerosi eventi sismici di cui fu vittima l'edificio nel 1693, nel 1818 e nel 1848 e i bombardamenti che, durante secondo conflitto mondiale, colpirono la Regione, contribuirono a danneggiare significativamente la struttura della Chiesa e, in particolare, i suoi pilastri.

Nel 1990, in seguito al sisma che colpì la zona, venne riscontrata la comparsa di grandi fessure verticali, subverticali e diagonali sui due pilastri posti all'ingresso della chiesa. Da una prima analisi visiva non risultò comunque chiaro se le crepe fossero già presenti o fossero invece state accentuate dal terremoto.

Il vasto programma di studio condotto dalla prof.ssa Binda e dai suoi collaboratori, costituito da indagini soniche, prove di martinetto piatto, carotaggi e boroscopie, è stato predisposto con l'obiettivo di studiare le reali condizioni strutturali dell'edificio e di progettare adeguati interventi di conservazione e ripristino.

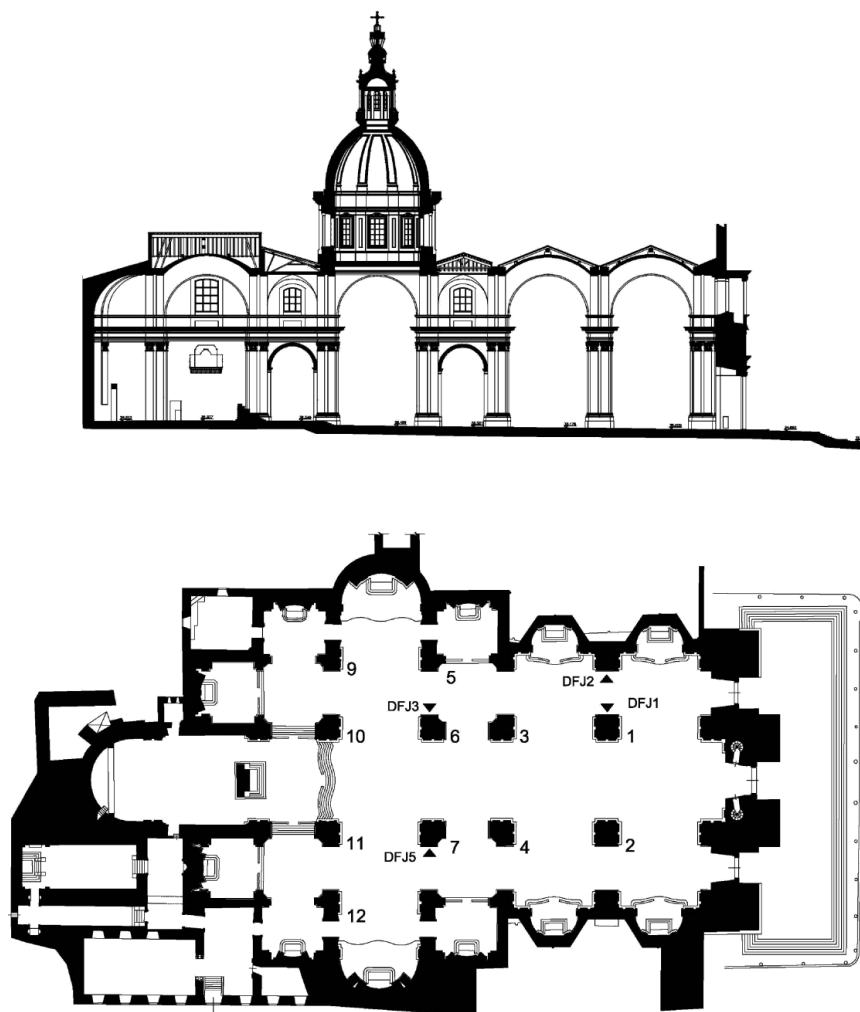


Fig. 4.16 – Localizzazione in sezione (sopra) e in pianta (sotto) dei pilastri danneggiati e testati durante la campagna di indagine (Binda et al., 2001).

L'analisi del quadro fessurativo dei due pilastri indagati ha evidenziato una preoccupante diffusione di difetti e disomogeneità, probabilmente antecedenti l'evento sismico. La presenza, oltre che di alcune lesioni causate da sforzi di taglio, di numerose fessurazioni chiaramente generate dalle elevate sollecitazioni di compressione, ha reso necessaria l'estensione delle indagini a tutti i pilastri della Chiesa.

L'analisi storico-materica dei sostegni, resa possibile dall'asportazione del loro rivestimento in pietra, ha messo in luce una tessitura muraria caratterizzata da pietre vulcaniche e malta di calce. Tuttavia, ad un esame più approfondito, è stato possibile rilevare la commistione di due differenti tipologie murarie:

- Una muratura costituita da blocchi regolari di pietra solida di grandi dimensioni e da macerie di riempimento, legati tra loro con malta piuttosto resistente;
- Una muratura, sempre in pietra, caratterizzata da blocchi disomogenei e da uno strato di copertura piuttosto debole ed incoerente (circa 300 mm di spessore) costituito da frammenti di tegole, pietre e malta (chiamato “incoccio”).

I pilastri 1 e 2, caratterizzati da pesanti lesioni, sono stati classificati come appartenenti alla seconda tipologia muraria.

Le caratteristiche meccaniche delle due tessiture sono infine state determinate realizzando dei test di martinetto piatto doppio sui pilastri 1, 2, 6 e 7.

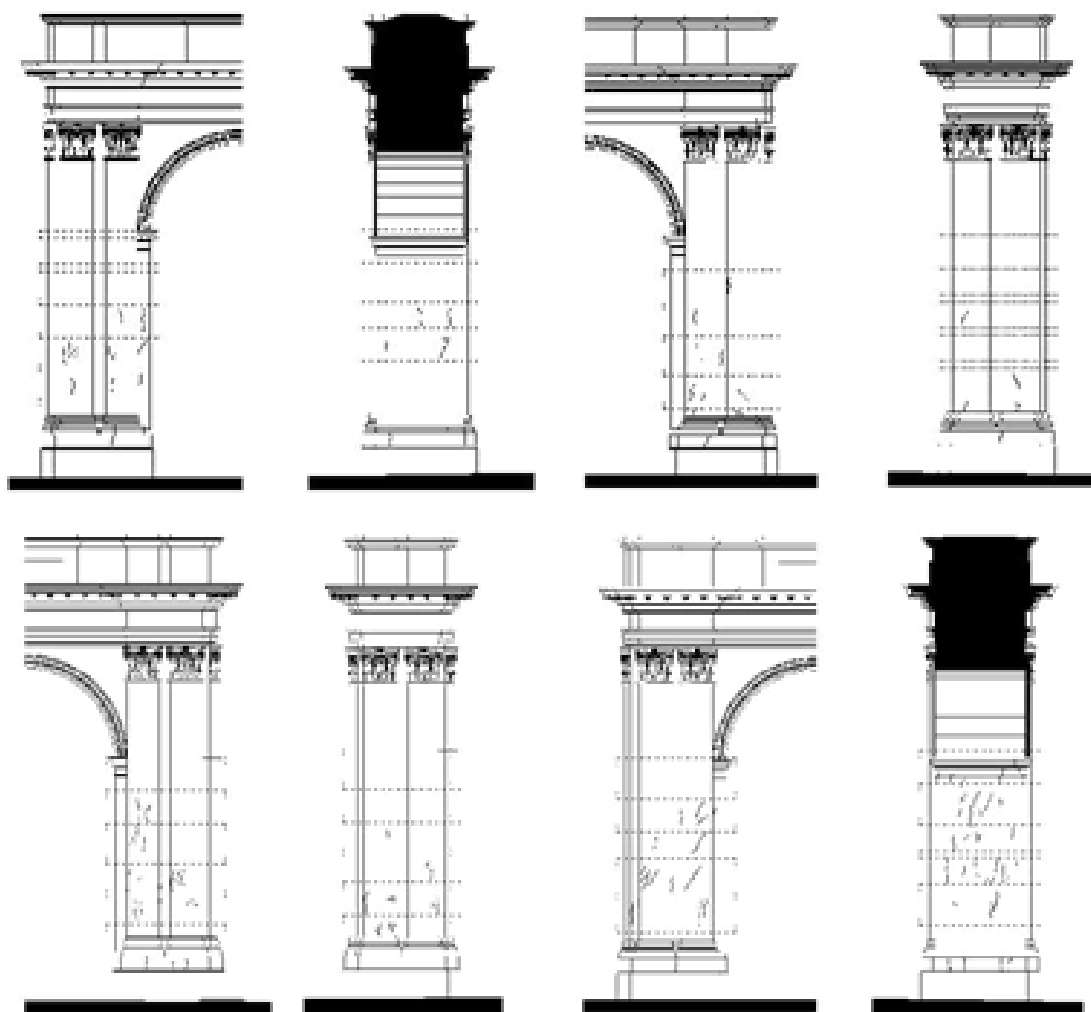


Fig. 4.17 – Rilievo del quadro fessurativo dei pilastri 1 (sopra) e 2 (sotto) (Binda et al., 2001).

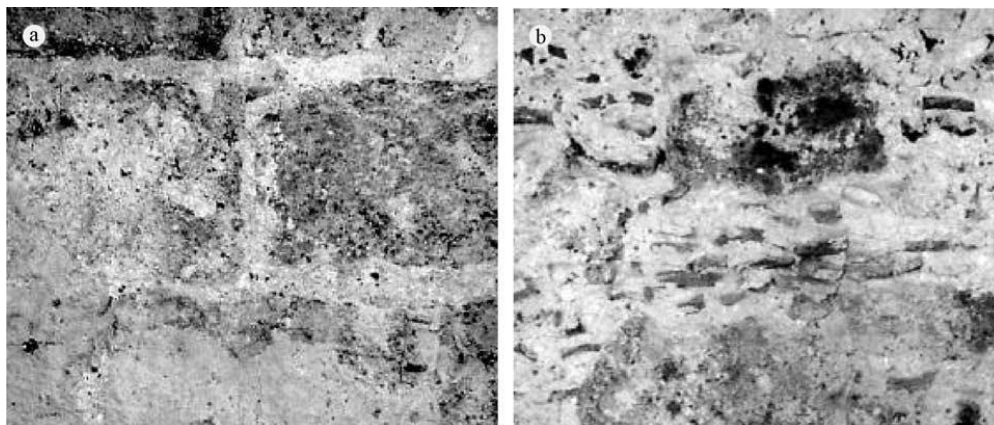


Fig. 4.18 – Particolare del rilievo della tessitura muraria dei pilastri: i blocchi regolari (sinistra) e “l’incoccio” (destra) (Binda et al., 2001).

4.5.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Ai dati ricavati dall’analisi delle prove di martinetto piatto, molto utili per lo studio e la classificazione dei paramenti esterni dei pilastri, sono stati affiancati quelli derivanti dalle indagini tomografiche, molto più adatte per la valutazione della composizione e delle caratteristiche degli strati più interni degli elementi studiati.

La campagna di indagine condotta sui pilastri 1 e 2 della Chiesa di S. Nicolò l’Arena è consistita nell’esecuzione di una serie di tomografie orizzontali a varie altezze e in alcune tomografie verticali.

Nel caso delle sezioni orizzontali, la distribuzione della velocità è risultata caratterizzata da valori medi relativamente elevati sia alla base che alla sommità dei pilastri e da valori molto bassi in corrispondenza delle fasce mediane.

Questi risultati hanno pienamente comprovato le analisi visive precedentemente effettuate, in quanto è chiaramente emersa la corrispondenza tra la presenza di evidenti fessurazioni e i bassi valori di velocità sonica. Questa valutazione è stata inoltre confermata dagli esiti delle tomografie verticali eseguite sugli stessi elementi.

Le prove realizzate sugli altri pilastri della chiesa hanno invece restituito distribuzioni di velocità generalmente maggiori rispetto a quelle dei due sostegni di ingresso. Anche in questo caso i risultati dell’analisi hanno validato l’ipotesi iniziale

secondo cui lo stato di danneggiamento più gravoso era quello associato ai pilastri 1 e 2.

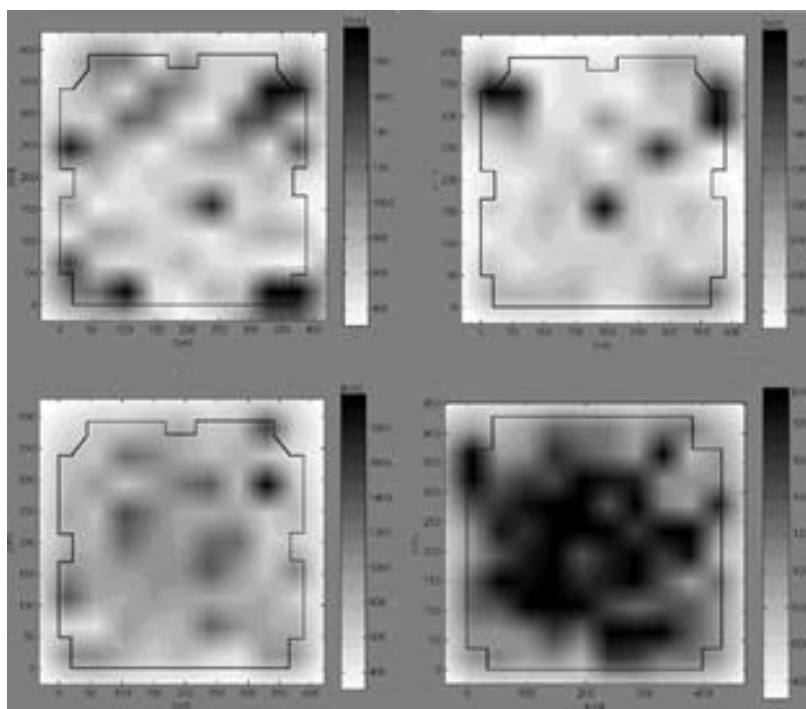


Fig. 4.19 – Tomografie orizzontali del pilastro 2 rilevate rispettivamente alle quote di 7.6 (alto a sinistra), 4.9 (alto a destra), 3.8 (basso a sinistra) e 1.8 metri (basso a destra) (Binda et al., 2001).

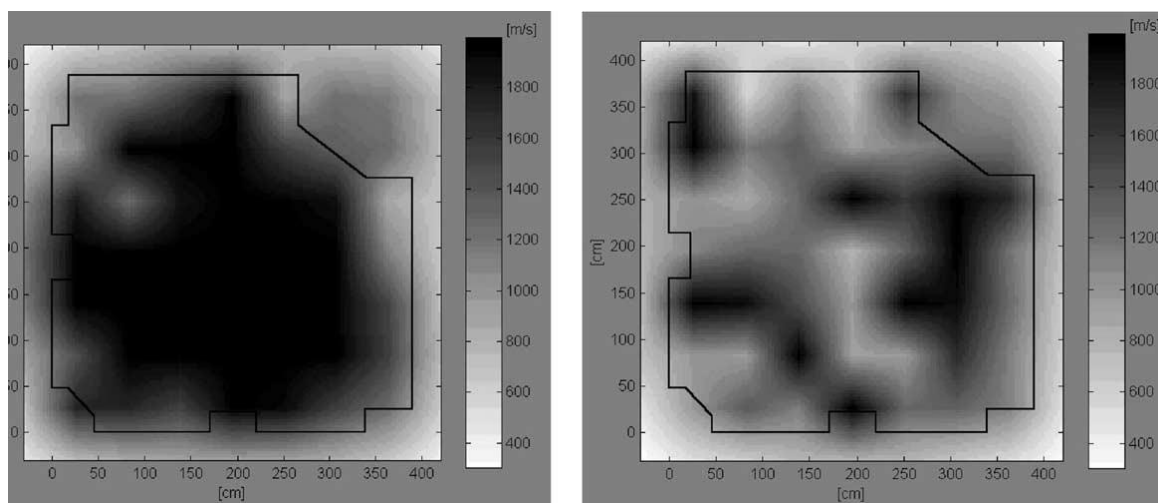


Fig. 4.20 – Tomografie orizzontali delle sezioni poste a 5.8 metri dei pilastri 6 (sinistra) e 10 (destra) (Binda et al., 2001).

Le indagini condotte sui pilastri della Chiesa di S. Nicolò l'Arena hanno dimostrato gli indubbi vantaggi legati all'utilizzo della tomografia sonica come strumento di analisi non distruttiva complementare a quelli più invasivi.

4.6 ANALISI DEL COMPORTAMENTO STATICO DELLA FACCIATA DELLA CHIESA DI SANTA MARIA DEL CARMINE IN PADOVA (LEVORATO, 2002)

4.6.1 GENERALITÀ

Il comportamento statico della facciata della Basilica del Carmine a Padova fu analizzato nel 2001 dall'ing. Levorato nell'ambito del proprio lavoro di Tesi.

Edificata nel XVI secolo sulle spoglie di un'antica chiesa trecentesca, fu più volte rimaneggiata nel corso dei secoli a causa dei danni provocati da una serie di tragici eventi quali il terremoto del 1696 e i bombardamenti dei due conflitti mondiali (1917 e 1944). L'attuale facciata, che nei progetti originari prevedeva la presenza di un loggiato mai realizzato, fu completata nel Settecento.



Fig. 4.21 – La Basilica di Santa Maria del Carmine a Padova (Levorato, 2002).

Fino ad una quota che si attesta attorno ai 10 metri, la facciata è quella risalente al XIV secolo. Questa porzione, avente uno spessore di 95 cm e caratterizzata dalla presenza di varie sporgenze, rientranze ed elementi sconnessi, è composta da una muratura mista costituita da laterizi e conci lapidei di forma variabile tra loro legati da giunti di malta irregolari. Ad una prima analisi visiva, la

superficie esterna della facciata denota inoltre la mancanza di alcuni elementi murari e la presenza di importanti lesioni verticali. Al contrario, la porzione superiore, ricostruita con mattoni regolari durante il XVI secolo, risulta essere abbastanza uniforme.

Il programma di indagine, volto all'individuazione del comportamento statico della facciata, si è articolato nell'esecuzione delle seguenti prove:

- Indagine storica;
- Rilievo geometrico e rilievo critico;
- Analisi dettagliata del quadro fessurativo;
- Prove con martinetto piatto singolo e doppio;
- Prove soniche dirette;
- Tomografie soniche;
- Installazione di un sistema di monitoraggio delle fessure con estensimetri rimovibili;
- Modellazione agli elementi finiti.

4.6.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

L'area di muratura sottoposta ad investigazione, collocata ad una quota di 6 metri dal piano del terreno, è stata scelta in relazione alla presenza di un'evidente fessurazione verticale.

Sul pannello così individuato sono state condotte una prova sonica diretta con maglia di 6 x 7 punti disposti rispettivamente con passo di 20 e 25 cm e quattro tomografie soniche, due orizzontali (passo 20 cm) in coincidenza della lesione e due verticali, poste rispettivamente a 20 e 80 cm dalla stessa fessurazione (passo 25 cm). La scelta di tale disposizione è stata influenzata dalla volontà di dimostrare nuovamente il corretto funzionamento del metodo tomografico e di studiare la correlazione tra la velocità delle onde soniche e le caratteristiche della muratura.

Come inizialmente ipotizzato, i risultati ottenuti dalla prova sonica diretta hanno evidenziato una progressiva diminuzione dei valori di velocità in corrispondenza della zona lesionata e hanno inoltre permesso di rilevare la

presenza di ulteriori discontinuità diffuse in vari punti del pannello testato. Dal punto di vista prettamente numerico, la distribuzione delle velocità soniche si è attestata su un intervallo compreso tra i 900 e i 2500 m/s.

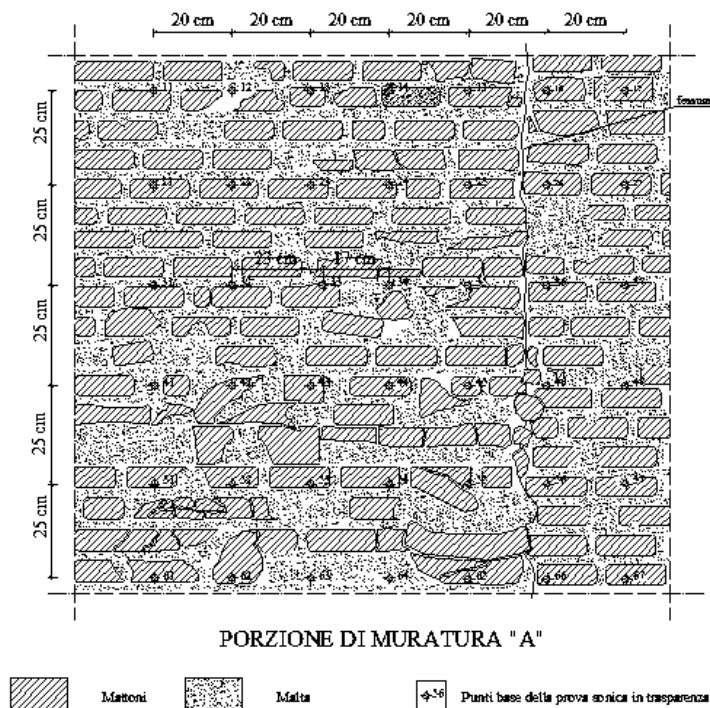


Fig. 4.22 – Rilievo della porzione di facciata investigata (Levorato, 2002).

Anche le analisi tomografiche hanno confermato quanto già dedotto dagli esiti delle prove dirette:

- Tomografia orizzontale inferiore: Caratterizzata da valori di velocità preoccupanti, tipici di murature danneggiate e in cattivo stato di conservazione (900 ÷ 1200 m/s). L'immagine tomografica ha comunque evidenziato il decremento delle velocità in corrispondenza della lesione verticale;
- Tomografia orizzontale superiore: Rispetto alla precedente, si è distinta per una distribuzione di velocità migliore, caratteristica di murature in discreto stato di conservazione (1300 ÷ 1600 m/s). In questo secondo caso, più che nel precedente, è risultata lampante la variazione in prossimità della fessurazione.

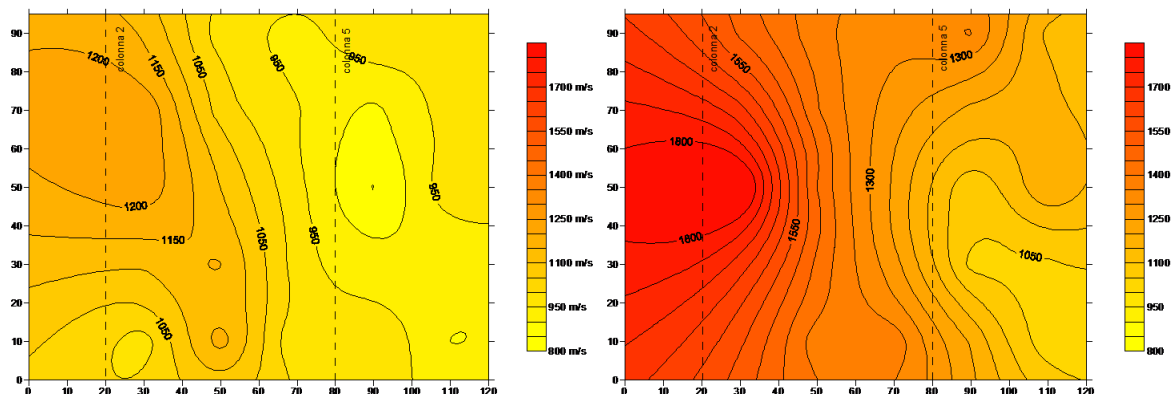


Fig. 4.23 – Tomografia sonica orizzontale inferiore (sinistra) e superiore (destra) (Lavorato, 2002).

- Tomografia verticale lontana dalla lesione: Caratterizzata da valori di velocità accettabili, tipici di murature in discreto stato di conservazione ($1000 \div 1800$ m/s). Data la distanza, la distribuzione non ha minimamente risentito della presenza della fessurazione. L'immagine tomografica ha comunque evidenziato un decremento delle velocità in corrispondenza della zona più bassa del pannello. Tale variazione è consona alla presenza di molti elementi irregolari e alla mancanza di alcuni di essi;
- Tomografia verticale vicina alla lesione: Rispetto alla precedente, si è distinta per una distribuzione di velocità peggiore, caratteristica di murature danneggiate o in cattivo stato di conservazione ($800 \div 1200$ m/s). In questo secondo caso è risultata evidente l'attigua presenza della fessurazione.

Sulla base dei risultati forniti dalle indagini eseguite, è stato possibile riscontrare la presenza di una muratura abbastanza disomogenea, costituita da zone relativamente solide e altre caratterizzate da condizioni preoccupanti. Inoltre, l'evidente decremento delle velocità in corrispondenza delle sezioni di muratura più prossime alla lesione, ha portato a concludere che la fessurazione verticale presente rappresenta un importante fenomeno che può notevolmente influenzare il comportamento della facciata nel suo intero spessore.

Anche questa sperimentazione, così come le precedenti, ha messo in luce la qualità dei test tomografici come strumento di studio delle caratteristiche morfologiche delle murature storiche.

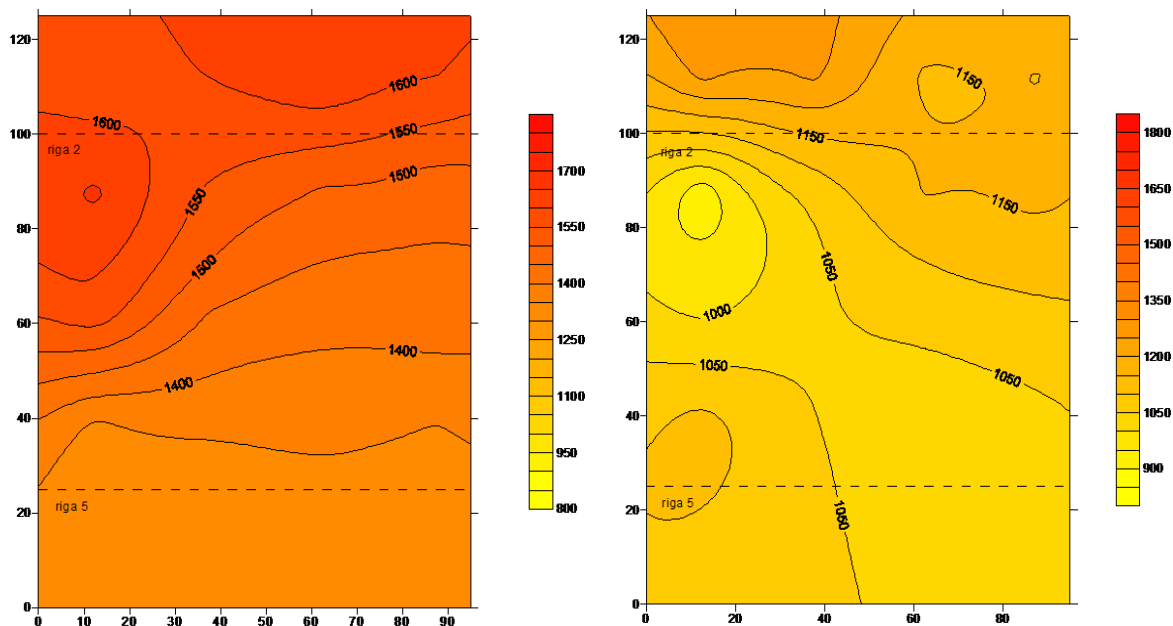


Fig. 4.24 - Tomografia sonica verticale lontana (sinistra) e vicina (destra) alla fessurazione della facciata (Levorato, 2002).

4.7 USO DI METODI NON DISTRUTTIVI PER LA VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DI EDIFICI STORICI. APPLICAZIONE ALL'ALTES MUSEUM DI BERLINO (MONDIN, 2004)

4.7.1 GENERALITÀ

Eretto secondo i canoni dell'architettura neoclassica tra il 1823 ed il 1828 ad opera dell'architetto Karl Friedrich Schinkel e inizialmente progettato per ospitare la collezione d'arte della famiglia reale, l'Altes Museum (letteralmente "Museo Vecchio") finì ben presto per ospitare reperti antichi di vario genere. In seguito ai danneggiamenti causati da un incendio durante la Seconda guerra mondiale fu sottoposto, dal 1958 al 1966, ad una serie di interventi di restauro strutturale e di redistribuzione degli spazi interni.

Dal punto di vista materico, il museo è caratterizzato da una commistione di elementi di diversa origine e consistenza. A causa della natura poco compatta del terreno sottostante, il piano interrato è costituito da una pietra di origine calcarea poggiate su una fondazione a pali di legno. I piani superiori, fino al sottotetto compreso, sono costruiti in laterizio, mentre le colonne del frontone principale,

poggiate su un solido basamento architettonicamente arricchito dalla presenza di piccoli mattoni non strutturali, sono costituite da pietra arenaria compatta.



Fig. 4.25 – La facciata principale dell’Altes Museum di Berlino (Mondin, 2004).

Il programma di ricerca, basato esclusivamente sull’esecuzione di prove debolmente o non distruttive e volto alla caratterizzazione della muratura e del suo stato di degrado, si è articolato nelle seguenti fasi:

- Indagine storica;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Indagini georadar;
 - Test microsismici tomografie geoelettriche;
 - Prove soniche dirette e indirette;
 - Tomografi sonicche;
 - Carotaggi meccanici e rilievi endoscopici tramite sonda televisiva;
 - Prove con martinetti piatti;
 - Prove di hole drilling.

4.7.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

A differenza delle precedenti sperimentazioni, nello studio delle caratteristiche degli elementi resistenti dell’Altes Museum è stato scelto un diverso approccio di indagine: i paramenti murari dei piani fuori terra sono stati analizzati

solamente mediante l'impiego di prove soniche dirette e superficiali mentre, le colonne del porticato frontale, sono state sottoposte ad analisi tomografica sonica.

In mancanza di valori confrontabili e in relazione all'attinenza con questo lavoro di Tesi, vengono qui esposti esclusivamente i dati relativi alle indagini svolte sugli elementi del porticato.

La tomografia sonica è stata condotta disponendo 6 punti di battuta-ricezione lungo la circonferenza esterna di una delle colonne della facciata (diametro 140 cm). Come inizialmente ipotizzato, data la natura rocciosa del materiale costituente l'elemento, l'esame ha evidenziato una distribuzione di velocità abbastanza uniforme ed elevata, compresa nell'intervallo 2200÷2700 m/s. Ad una più approfondita analisi è però risultata evidente la presenza di una zona di scarsa qualità in corrispondenza di uno degli interventi di risarcimento effettuati dopo la Seconda guerra mondiale.

La carenza di dati acquisiti ha consentito di ottenere alcune informazioni generiche sulla consistenza delle colonne ma non ha permesso di ricavare precise indicazioni in merito alla qualità degli elementi del porticato.

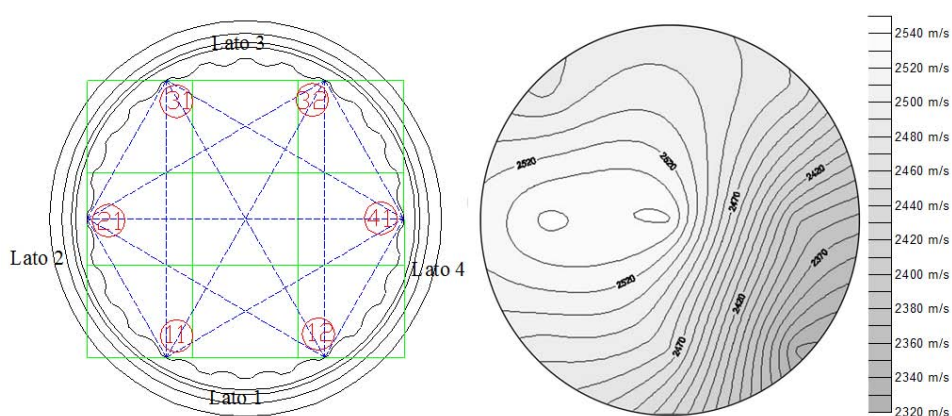


Fig. 4.26 – Schema di distribuzione dei punti di battuta-ricezione (sinistra) e risultato dell'indagine sonica tomografica (Mondin, 2004).

È comunque importante rilevare la stretta correlazione esistente tra la velocità di propagazione delle onde soniche e le caratteristiche del mezzo attraversato. Nel confronto tra le analisi riguardanti i paramenti in laterizio e quelle relative alle strutture in pietra, appare infatti evidente il consistente incremento delle velocità riscontrabile negli elementi rocciosi.

4.8 EXPERIMENTAL TESTS ON IRREGULAR MASONRY (DA PORTO ET AL., 2004)

4.8.1 GENERALITÀ

Questa sperimentazione, promossa dall'Università degli studi di Padova, ha avuto come obiettivi lo studio e la valutazione del comportamento meccanico di muri in pietra multistrato consolidati con diverse tecniche d'intervento e con diversi materiali.

L'esecuzione di prove soniche (dirette, indirette e tomografiche) su campioni sperimentali appositamente realizzati garantisce un maggior controllo e una miglior qualità dei risultati rispetto alle indagini in sito in quanto l'oggetto di indagine è noto a priori, condizione generalmente non riscontrabile nei casi reali in cui, a meno della realizzazione di prove distruttive, spesso non è possibile conoscere la composizione interna della muratura. L'applicazione di indagini soniche in laboratorio rappresenta inoltre un'ottima opportunità per calibrare il metodo sonico e definire un intervallo di velocità cui poter fare riferimento nelle sperimentazioni future.

Nella ricerca condotta dall'ing. Francesca da Porto sono stati realizzati 17 pannelli murari costituiti da due paramenti esterni in conci di pietra calcarea sbozzati disposti a corsi suborizzontali e da un riempimento interno costituito dal materiale di risulta della sbozzatura stessa. I campioni di muratura sono stati volutamente eseguiti senza collegamenti tra i due paramenti esterni al fine di impedirne il comportamento globale unitario. I vari modelli, di dimensioni 80 x 140 cm e spessore 50 cm, contenuti all'interno di due cordoli di calcestruzzo da 20 cm, sono stati suddivisi in gruppi e sottoposti a 8 diverse tipologie di consolidamento:

1. Iniezione semplice con miscela consolidante a base di calce idraulica naturale (FEN-X A): Realizzata praticando in media 10 fori al m² su un solo lato del muro e senza prelavaggio;
2. Iniezione semplice con diversa miscela consolidante a base di calce idraulica naturale (FEN-X B) Realizzata praticando in media 10 fori al m² su un solo lato del muro e senza prelavaggio;

3. Ristilatura dei giunti: Realizzata su entrambi i lati di ogni pannello mediante scarnitura e successivo riempimento dei giunti con malta di calce idraulica premiscelata con sabbia (Tassullo T30V). In questo caso il muro è stato lavato con acqua a bassa pressione, al fine di eliminare eventuali polveri o detriti;
4. Inserimento di tirantini metallici: Realizzato mediante posizionamento di 4 barre per un totale di 3.6 tiranti/m². In alcuni muri l'intervento è stato eseguito con barre di acciaio ad aderenza migliorata del diametro di 6 o 10 mm;
5. Tecnica combinata di iniezione e ristilatura dei giunti;
6. Tecnica combinata di iniezione e inserimento di tirantini metallici;
7. Tecnica combinata di ristilatura e inserimento di tirantini metallici;
8. Tecnica combinata di iniezione, ristilatura dei giunti e inserimento dei tirantini metallici.

Dato il carattere prettamente sperimentale dei campioni murari realizzati, il programma di indagine si è articolato in una serie completa di prove sia distruttive che debolmente o non distruttive:

- Prove soniche dirette pre e post intervento;
- Prove soniche indirette pre e post intervento;
- Tomografie soniche pre e post intervento;
- Prove di martinetto piatto;
- Prove di compressione diretta monoassiale.

Il riepilogo dettagliato delle tipologie di intervento impiegate e dell'intero programma di indagine applicato ai pannelli murari è riportato nella Tabella 4.1.

Le prove soniche e tomografiche, dettagliatamente descritte nel paragrafo successivo, sono state eseguite solamente sui pannelli sottoposti ad interventi di iniezione e ristilatura dei giunti. Il prospetto completo delle indagini non distruttive realizzate è riportato nella Tabella 4.2.

Tabella 4.1 - Programma sperimentale delle prove eseguite sui muri consolidati con tecniche differenti I₁ = Iniezione 1, I₂ = Iniezione 2, R = Ristilatura, T = Tirantini (Da Porto et al., 2004).

Sigla muri	Tecnica usata	Compressione pre/post consolidamento	Compressione solo post consolidamento	Martinetto piatto pre/post consolidamento	Prove soniche pre/post consolidamento
4X	Nessuno	4X*	-	-	-
5I ₁ , 6I ₁ , 13I ₁	I ₁	5I ₁ , 6I ₁	13I ₁	5I ₁	5I ₁ , 6I ₁ , 13I ₁
1I ₂ , 8I ₂ , 16I ₂ 3R, 7R, 15R	I ₂ R	1I ₂ , 8I ₂ 3R, 7R	16I ₂ 15R	- 3R	1I ₂ , 8I ₂ , 16I ₂ 3R, 15R
2T, 9T, 11T	T	2T, 9T	11T	-	-
14I ₁ R	I ₁ + R	-	14I ₁ R	-	14I ₁ R
12I ₁ T	I ₁ + T	-	12I ₁ T	-	-
10RT	R + T	-	10RT	-	-
17I ₁ RT	I ₁ + R + T	-	17I ₁ RT	-	-

* Muro non consolidato, testato assieme a quelli riparati (28 e 60 giorni dopo la costruzione).

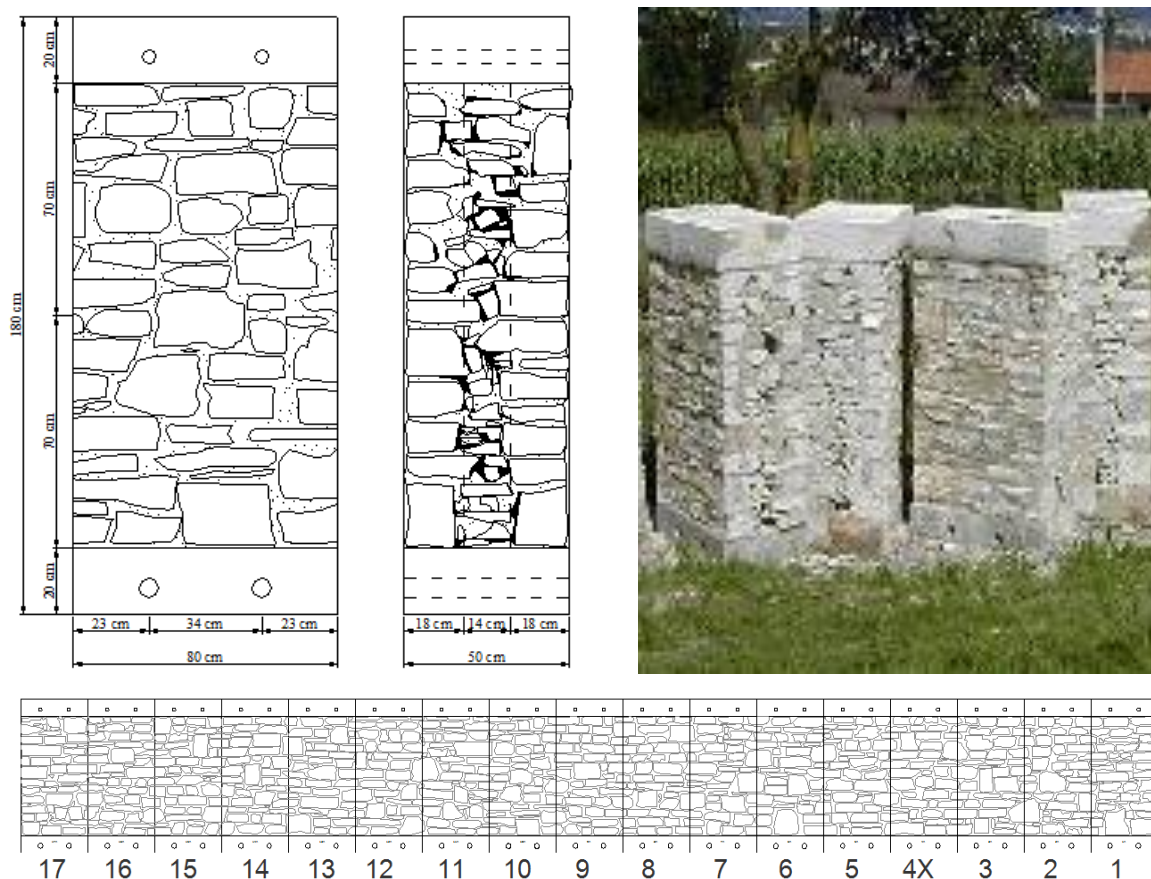


Fig. 4.27 - Tessitura muraria (sinistra), esempio di alcuni pannelli terminati (destra) e sequenza completa dei muri realizzati (sotto) (Da Porto et al., 2004).

Tabella 4.4 – Lista completa delle prove NDT effettuate nelle diverse fasi (Da Porto et al., 2004).

Test	Sonica diretta			Tomografia verticale			Tomografia del nucleo			Tomografia orizzontale			Sonica indiretta		
	Originale	Dopo il test	Rinforzato	Originale	Dopo il test	Rinforzato	Originale	Dopo il test	Rinforzato	Originale	Dopo il test	Rinforzato	Originale	Giunti rimossi	Giunti ristilati
1l2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-
3R	x	x	x	x	x	x	-	-	-	x	x	x	x	-	x
4X	-	x	-	-	x	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-
5l1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-
6l1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-
8l2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-
13l1	x	-	x	x	-	x	x	-	x	x	-	x	-	-	-
14l1R	x	-	x	x	-	x	x	-	x	x	-	x	x	x	x
15R	x	-	x	x	-	x	-	-	-	x	-	x	x	x	x
16l2	x	-	x	x	-	x	x	-	x	x	-	x	-	-	-

4.8.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

L'esecuzione delle prove soniche dirette è stata ripetuta nelle diverse condizioni di muratura non consolidata, consolidata e rotta ed ha fornito i seguenti risultati:

- Ad eccezione del muro 13, in tutti i pannelli è stata riscontrata la presenza di una zona a più elevata velocità (circa 3000 m/s) nella fascia vicina al cordolo inferiore. Questo comportamento è riconducibile sia alla diversa lavorazione del primo strato, in cui i blocchi di pietra sono stati adagiati su un piano liscio regolare e il nucleo è stato maggiormente riempito di malta per avere una base compatta di giacitura del paramento interno, sia per l'effetto dell'assestamento del pannello sotto il proprio peso;
- Ad eccezione di alcuni muri in cui le velocità riscontrate non sono mai scese al di sotto dei 1500 m/s (condizioni discrete/buone) e di qualche campione marcatamente inconsistente (velocità inferiori a 600-700 m/s), nella maggior parte dei pannelli non ancora sottoposti a prova di compressione sono state individuate alcune zone di qualità via via decrescente caratterizzate da velocità comprese tra i 400 e i 3000 m/s;

- Tutte le indagini realizzate in seguito alla rottura per compressione dei pannelli hanno evidenziato, come previsto, una consistente diminuzione delle velocità soniche;
- Tutti i pannelli sottoposti a iniezione hanno restituito valori di velocità abbastanza elevati (intorno ai 3000 m/s), indice di buona qualità della muratura. Gli incrementi rispetto ai campioni non consolidati, soprattutto in alcuni pannelli, hanno raggiunto percentuali prossime anche al 1000%.

In generale, questi risultati hanno permesso di affermare che gli incrementi maggiori delle velocità sono riscontrabili nei muri che presentano condizioni di partenza peggiori.

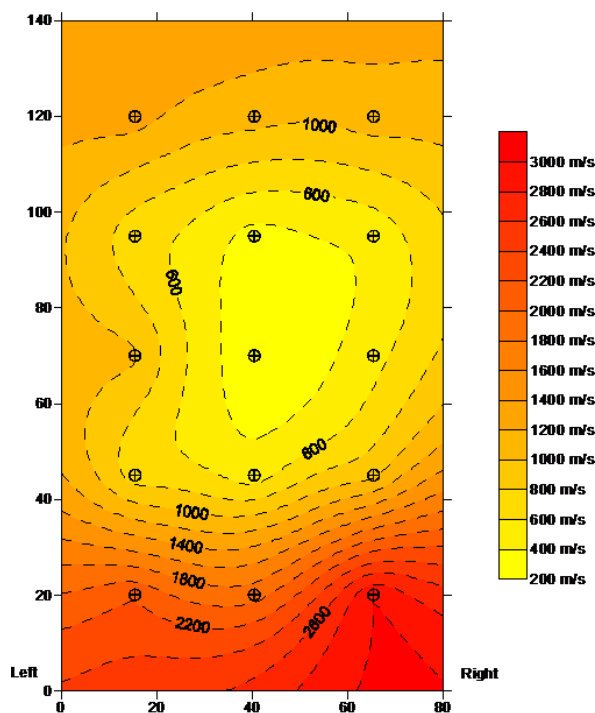


Fig. 4.28 – Risultato della prova diretta eseguita sul pannello 5 non consolidato (Da Porto, 1999).

La campagna sperimentale è proseguita con l'esecuzione di una serie di tomografie verticali e orizzontali. Le prime sono state realizzate disponendo 5 punti di battuta-ricezione, con passo di 25 cm, lungo le due facce principali dei pannelli, per un totale di 10 posizioni di acquisizione e 25 misurazioni. Le altre invece hanno interessato tutti e quattro i lati dei campioni e hanno richiesto la disposizione, con passo di 25 cm, di 10 punti di acquisizione, 3 sui lati più lunghi e 2 su quelli più

corti. In questo secondo caso le misurazioni complessive sono state 13. In relazione ai risultati ottenuti è stato possibile elaborare le seguenti considerazioni:

- Indipendentemente dalle condizioni dei pannelli, si è notato che le velocità misurate nelle tomografie orizzontali sono maggiori rispetto a quelle delle tomografie verticali. Questo comportamento è probabilmente conseguenza del fatto che il 50% delle misurazioni eseguite lungo le facce laterali sono relative all'attraversamento dei paramenti esterni della muratura che, per implicite modalità di realizzazione, sono dotati di migliori caratteristiche fisiche e meccaniche. Inoltre anche i segnali che, nel loro percorso ipotetico, si discostano dalle zone più consistenti, tendono ad influenzare il risultato delle elaborazioni degli altri pixel della maglia.
- Ad eccezione del muro 13, in tutti i pannelli sottoposti a tomografia verticale è stata riscontrata la presenza di una zona a più elevata velocità (circa 3000 m/s) nella fascia vicina al cordolo inferiore. Questo comportamento è riconducibile sia alla diversa lavorazione del primo strato, in cui i blocchi di pietra sono stati adagiati su un piano liscio regolare e il nucleo è stato maggiormente riempito di malta per avere una base compatta di giacitura del paramento interno, sia per l'effetto dell'assestamento del pannello sotto il proprio peso;
- In alcuni casi, dopo l'esecuzione della prova di compressione, le indagini tomografiche verticali hanno riscontrato un leggero incremento delle velocità, stimabile intorno al 10-20% dei valori iniziali. Questa variazione, apprezzabile soprattutto nei pannelli caratterizzati da velocità iniziali abbastanza basse, potrebbe essere attribuita agli effetti della prova di compressione stessa che avrebbe inavvertitamente favorito la compattazione dello strato di riempimento interno, con conseguente miglioramento della qualità muraria.

Per agevolare la comparazione dei risultati, nella Tabella 4.3 vengono riportati i valori delle velocità soniche tomografiche misurate nelle fasi precedenti e successive agli interventi di consolidamento.

Tabella 4.3 – Velocità rilevate nelle tomografie soniche pre e post intervento (Da Porto et al., 2004).

Spessore [m]	Intervallo di velocità [m/s]	Velocità media[m/s]	Posizione di prova
0.50	642 ÷ 3000	1911 ± 889	1 (tomografia nucleo)
	827 ÷ 3000	2758 ± 611	1 (tomografia orizzontale)
	609 ÷ 3000	1760 ± 887	1 (tomografia verticale)
	658 ÷ 3000	1862 ± 887	3 (tomografia orizzontale)
	492 ÷ 3000	1233 ± 668	3 (tomografia verticale)
	279 ÷ 1206	501 ± 185	4 (tomografia nucleo)
	415 ÷ 3000	832 ± 701	4 (tomografia orizzontale)
	302 ÷ 1667	715 ± 339	4 (tomografia verticale)
	231 ÷ 894	529 ± 187	5 (tomografia nucleo)
	341 ÷ 3000	1041 ± 899	5 (tomografia orizzontale)
	263 ÷ 1515	534 ± 295	5 (tomografia verticale)
	553 ÷ 1862	890 ± 297	6 (tomografia nucleo)
	643 ÷ 3000	1328 ± 827	6 (tomografia orizzontale)
	274 ÷ 1667	770 ± 429	6 (tomografia verticale)
	603 ÷ 3000	1283 ± 681	8 (tomografia nucleo)
	1309 ÷ 3000	2474 ± 662	8 (tomografia orizzontale)
	436 ÷ 3000	1652 ± 991	8 (tomografia verticale)
	867 ÷ 3000	2257 ± 709	13 (tomografia nucleo)
	1017 ÷ 3000	2658 ± 620	13 (tomografia orizzontale)
	717 ÷ 3000	1663 ± 835	13 (tomografia verticale)
	540 ÷ 3000	1896 ± 833	14 (tomografia nucleo)
	1992 ÷ 3000	2806 ± 365	14 (tomografia orizzontale)
	715 ÷ 3000	2121 ± 881	14 (tomografia verticale)
	301 ÷ 3000	1994 ± 982	15 (tomografia orizzontale)
	918 ÷ 3000	2054 ± 797	15 (tomografia verticale)
	892 ÷ 3000	1822 ± 681	16 (tomografia nucleo)
799 ÷ 3000	1971 ± 822	16 (tomografia orizzontale)	
424 ÷ 3000	1097 ± 709	16 (tomografia verticale)	
Velocità media della tipologia: 1586 m/s			

Il confronto tra i risultati ottenuti dalle diverse tipologie di indagine ha consentito di elaborare alcune ipotesi:

- Con buona approssimazione è possibile affermare che una diversa discretizzazione della sezione avrebbe permesso di conseguire risultati più omogenei e meno dipendenti dai percorsi delle onde soniche;

- Analizzando i risultati derivanti dalla metodologia tomografica sono stati notati degli incrementi e dei picchi di velocità inferiori rispetto a quelli misurati nelle prove in trasparenza. Questa discrepanza è probabilmente dovuta al fatto che le tomografie, a differenza delle prove dirette, ricavano i valori delle velocità mediando i tempi di volata delle diverse onde che si incrociano all'interno della sezione studiata.

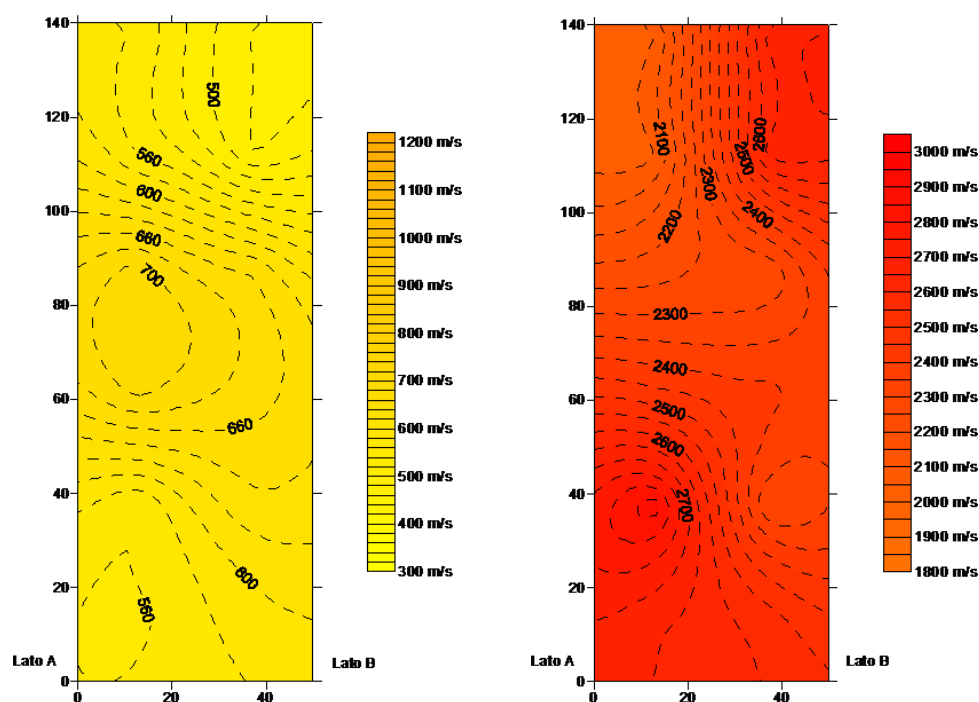


Fig. 4.29 – Risultati delle tomografie verticali eseguite sul pannello 6 non consolidato (sinistra) e sul pannello 15 consolidato (destra) (Da Porto et al., 2004).

In relazione a quanto precedentemente scritto, si è ritenuto corretto giungere alla conclusione che :

- Indipendentemente dalla tecnica di indagine utilizzata, la metodologia iniettiva sembra condurre ad una migliore omogeneizzazione delle sezioni, con incrementi di velocità maggiori in corrispondenza di valori iniziali minori. Tale comportamento è conseguenza della migrazione delle miscele consolidanti verso le zone più ricche di vuoti e fessurazioni;

- La metodologia tomografica sembra garantire una migliore qualità dei risultati nel caso di analisi della distribuzione delle velocità su una superficie.

4.9 INDAGINI STRUTTURALI E VERIFICA DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DELLA CHIESA DI SANTA MARIA ASSUNTA A REGGIO EMILIA (SEMENZATO, 2005)

4.9.1 GENERALITÀ

Questa sperimentazione ha avuto come obiettivi lo studio e la verifica della vulnerabilità sismica del principale edificio religioso della città di Reggio Emilia: la Cattedrale di Santa Maria Assunta.



Fig. 4.30 – La Cattedrale di Santa Maria Assunta a Reggio Emilia (Semenzato, 2005).

Sottoposta a numerose ricostruzioni e modifiche nel corso dei secoli, la chiesa si presenta attualmente con un impianto a croce latina a tre navate con arcate a tutto sesto impostate su pilastri e con tre absidi semicirculari. Al centro della croce

si erge la grande cupola principale mentre altre due cupole minori ornano le cappelle absidali. Al di sotto della zona individuata dal transetto e dal presbiterio è presente una cripta. L'elemento caratterizzante dell'intero complesso ecclesiastico è sicuramente la torre campanaria ottagonale (tiburio) posta in facciata, costruita nel 1268 in seguito al crollo della struttura precedente.

La muratura della chiesa risulta essere per la maggior parte composta da mattoni di argilla che, pur appartenenti a diverse fasi storiche, appaiono disposti con una tessitura organica e compatta. In seguito alla rimozione di parte dell'intonaco della parete interna della facciata è stata inoltre rilevata la presenza di un rivestimento di spessore 16 cm e altezza variabile composto da lastre di pietra. La stessa tipologia di roccia è stata riscontrata anche nella struttura originaria di alcuni dei pilastri romanici della navata centrale.

Alla luce degli obiettivi dello studio, il programma di ricerca, basato esclusivamente sull'esecuzione di prove debolmente o non distruttive, si è articolato nelle seguenti indagini:

- Indagine storica;
- Analisi dello stato di fatto;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Prove soniche dirette;
 - Tomografie soniche;
 - Prove con martinetti piatti.

Data la complessità dell'evoluzione temporale degli elementi strutturali del Duomo, lo studio delle fonti storiche e l'analisi dello stato di fatto dell'edificio sono risultati di fondamentale importanza per l'individuazione delle posizioni di prova più significative. Le indagini soniche dirette sono state utilizzate per sondare le caratteristiche della facciata principale, del muro orientale del tiburio di facciata, della zona del transetto in prossimità degli archi trionfali e della cripta, mentre le analisi tomografie soniche hanno permesso di esaminare la morfologia interna del primo e del terzo pilastro del colonnato settentrionale della navata centrale.

4.9.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Così come avvenuto nello studio del comportamento strutturale dell'Altes Museum di Berlino, anche nel caso della Chiesa di Santa Maria Assunta è stato scelto un approccio di indagine diverso rispetto alle altre sperimentazioni: le prove soniche e quelle tomografiche sono state realizzate in zone diverse dell'edificio, rendendo impossibile qualsiasi tipo di comparazione.

In mancanza di valori confrontabili e in relazione all'attinenza con questo lavoro di Tesi, vengono qui esposti esclusivamente i dati relativi alle indagini tomografiche svolte sui pilastri della navata principale. A titolo informativo, le analisi soniche hanno evidenziato la presenza di una muratura in discreto stato di conservazione nonostante la costruzione di molti degli elementi indagati risalga ad epoche molto distanti tra loro.

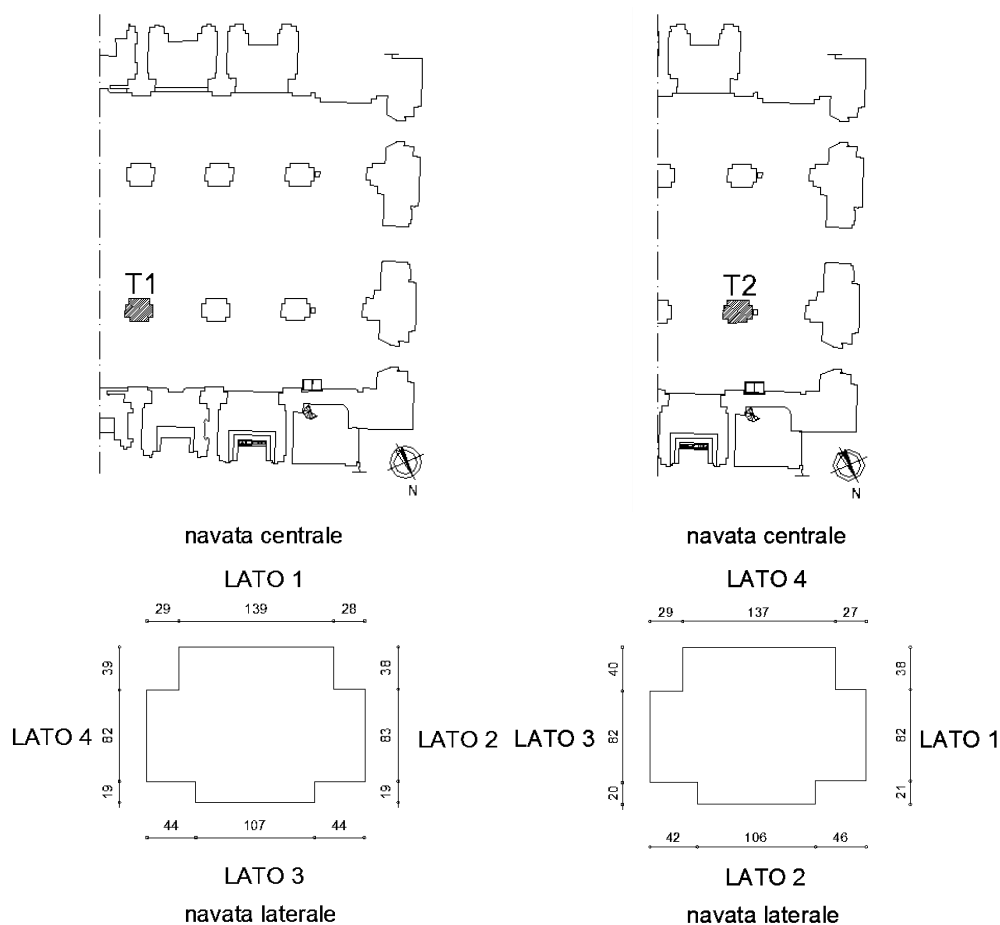


Fig. 4.31 – Collocazione in pianta dei pilastri sottoposti ad indagine tomografica (sopra) e loro rilievo geometrico (sotto) (Semenzato, 2005).

Entrambe le tomografie soniche sono state condotte disponendo rispettivamente 5 punti di battuta-ricezione con passo di 20 cm lungo i due lati più lunghi e 4 punti di misurazione con passo di 25 cm lungo i due lati corti.

Per il primo pilastro, nonostante l'immagine tomografica abbia chiaramente evidenziato la presenza di una zona di più scarse caratteristiche meccaniche in prossimità del nucleo, è stato possibile affermare che la qualità muraria è quella caratteristica delle tessiture in condizioni discrete. Questa considerazione deriva dal fatto che anche nelle zone ritenute mediocri e ad eccezione di pochi punti isolati, la velocità non è mai scesa al di sotto dei 1000 m/s. La differenza della distribuzione dei valori sonici ha quindi consentito di mettere in luce la scadente qualità dell'ammorsamento tra la struttura resistente interna e quella più esterna.

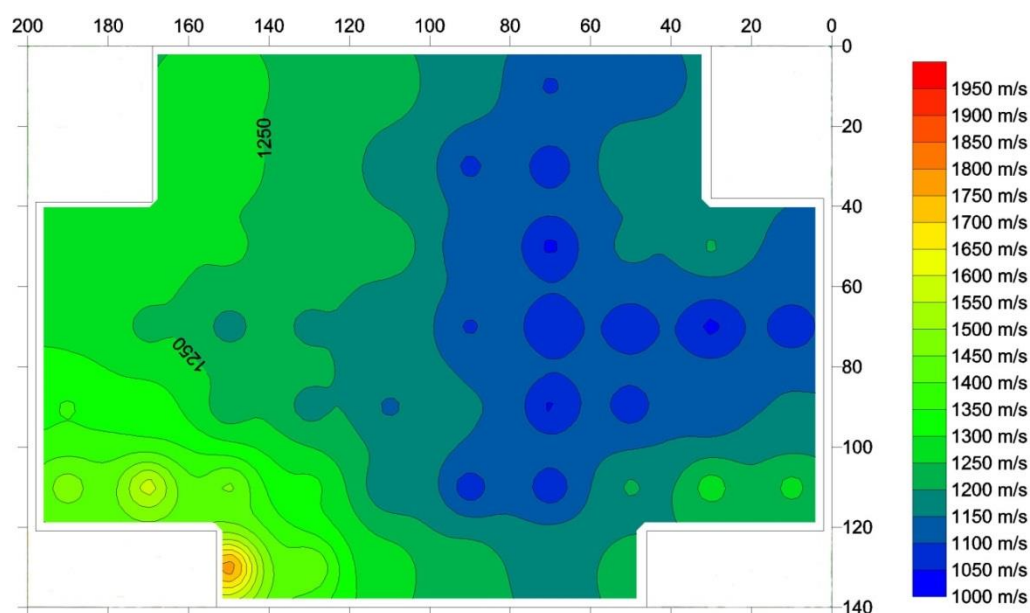


Fig. 4.32 - Tomografia sonica orizzontale del pilastro 1 (Semenzato, 2005).

Anche per il secondo pilastro sono risultate valide le considerazioni fatte per il caso precedente. L'individuazione di una zona di peggiori caratteristiche meccaniche in prossimità di uno degli spigoli non ha potuto influire sul giudizio di discreta qualità della tessitura muraria. Ad una più precisa analisi è stata addirittura riscontrata una distribuzione di velocità caratterizzata da valori massimi e minimi superiori a quelli del pilastro 1.

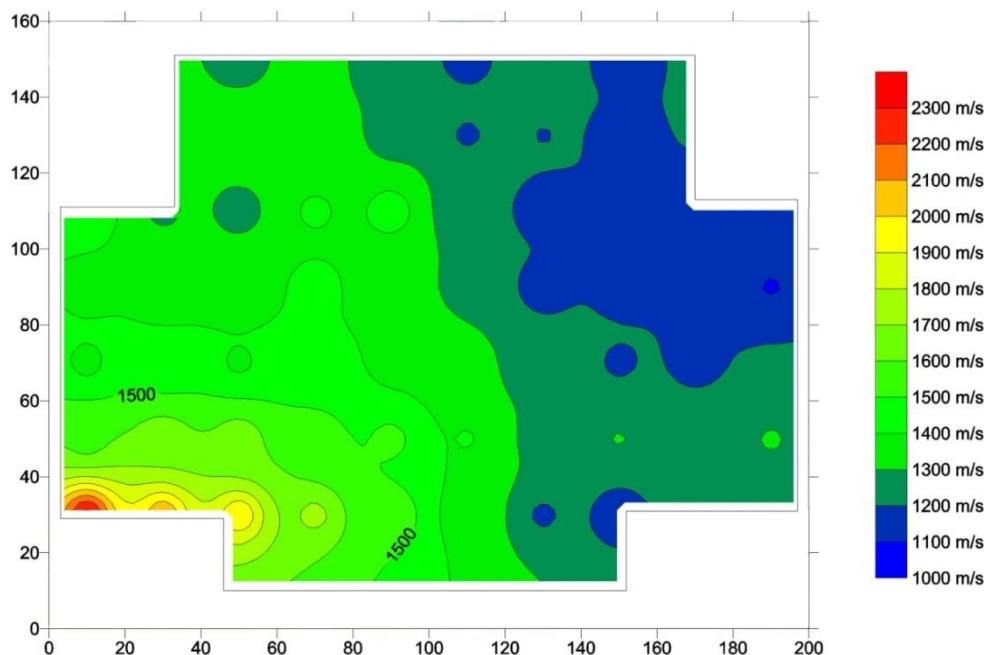


Fig. 4.33 – Tomografia sonica orizzontale del pilastro 2 (Semenzato, 2005).

La carenza di dati acquisiti ha consentito di ottenere solamente alcune informazioni generiche sulla consistenza e sulla morfologia dei pilastri della Cattedrale. Lo sviluppo di analisi più approfondite risulta quindi essere strettamente legato al numero di segnali sonici registrati in fase di acquisizione.

4.10 INDAGINI SONICHE PER LA DIAGNOSI DI STRUTTURE MURARIE A TORRE (SCODELLER, 2006)

I casi studio analizzati dall'Ing. Scodeller hanno previsto l'indagine di due edifici storici accomunati dalla medesima tipologia edilizia: la Torre della Tromba a Trento e il campanile della Basilica di San Zeno a Verona.

4.10.1 TORRE DELLA TROMBA - GENERALITÀ

La Torre della Tromba, situata nel centro storico di Trento a due passi da Piazza del Duomo, nacque probabilmente in concomitanza con la formazione romana della città, anche se non sono disponibili documenti certi che possano attestarlo. Acquistata dalla comunità di Trento nel 1470, subì una consistente serie di modifiche: nel XV secolo la torre fu abbassata ed adattata ad edificio municipale

attraverso la costruzione di una nuova merlatura mentre, nel XVIII secolo, con il cambio di destinazione d'uso e la sua trasformazione in carcere comunale, fu nuovamente sopraelevata e coperta con un tetto a 4 falde sormontato da una lanterna. Nel 1914 un consistente intervento di rinnovamento portò alla demolizione del corpo scale esterno e alla costruzione degli attuali gradini interni in cemento armato, inoltre fu demolito il tetto a quattro falde e la sommità della Torre fu ridefinita con la merlatura che ancora oggi la caratterizza.



Fig. 4.34 - La Torre della Tromba a Trento (Scodeller, 2006).

Dal punto di vista materico, è possibile individuare due distinte tessiture murarie: una inferiore realizzata in grossi blocchi di pietra squadrata e lavorata a bugnato ed una superiore (da metà altezza) costituita da mattoni di cotto.

Nell'ambito dello studio e della progettazione del restauro della Torre, il programma di ricerca, basato esclusivamente sull'esecuzione di prove non distruttive, si è articolato nelle seguenti indagini:

- Indagine storica;
- Analisi del degrado e dello stato di fatto;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Prove soniche dirette;

- Tomografie soniche.

Dalle informazioni risultanti dall'analisi del degrado, è emersa la necessità di indagare approfonditamente lo stato di conservazione dei muri perimetrali, contraddistinti dalla presenza di danneggiamenti sia di carattere locale (dislocamento degli elementi lapidei in aggetto e dei merli) che diffuso (degrado superficiale con sfarinamento dei conci e dilavamento dei giunti di malta). La mancanza di impalcature esterne ha impedito lo studio dell'edificio per la sua intera altezza (circa 33 m), ciononostante le analisi compiute sono state ritenute significative in quanto hanno riguardato le porzioni di muratura più antiche e maggiormente sollecitate sia dal peso proprio della struttura che dagli eventuali carichi esterni. Nello specifico ci si è limitati a tre siti di indagini ad altezze differenti comprese tra il piano campagna e circa 17 m da esso, tutti appartenenti alla stessa verticale e accessibili da entrambi i lati; quest'ultima è prerogativa necessaria per poter effettuare una prova sonica in trasparenza.

4.10.2 TORRE DELLA TROMBA - RISULTATI DELLE INDAGINI

Il programma di indagine sonica ha previsto l'esecuzione di una serie di prove localizzate in diversi punti della struttura:

- Una prova sonica diretta sul setto murario compreso fra l'androne della torre e la Sala Enel;
- Una prova sonica diretta sul setto murario compreso fra il sottotetto della Sala degli Stucchi e quello della stanza attigua, entro il perimetro della torre;
- Una prova sonica diretta e una tomografia sonica sul setto murario compreso fra la Sala degli Stucchi e quella attigua, entro il perimetro della torre.

Per la maggiore attinenza con questo lavoro di Tesi, vengono qui esposti esclusivamente i risultati relativi alle indagini soniche e tomografiche eseguite sulla parete della Sala degli Stucchi.

Sul pannello individuato, avente uno spessore di 136 cm, sono state condotte una prova sonica diretta con maglia di 3 x 4 punti disposti con passo costante di 30 cm e una tomografia sonica orizzontale su tre lati, realizzata con la disposizione di un totale di 12 punti (4 per ogni lato) posti a distanze variabili da 23 a 27 cm (48 misurazioni complessive).

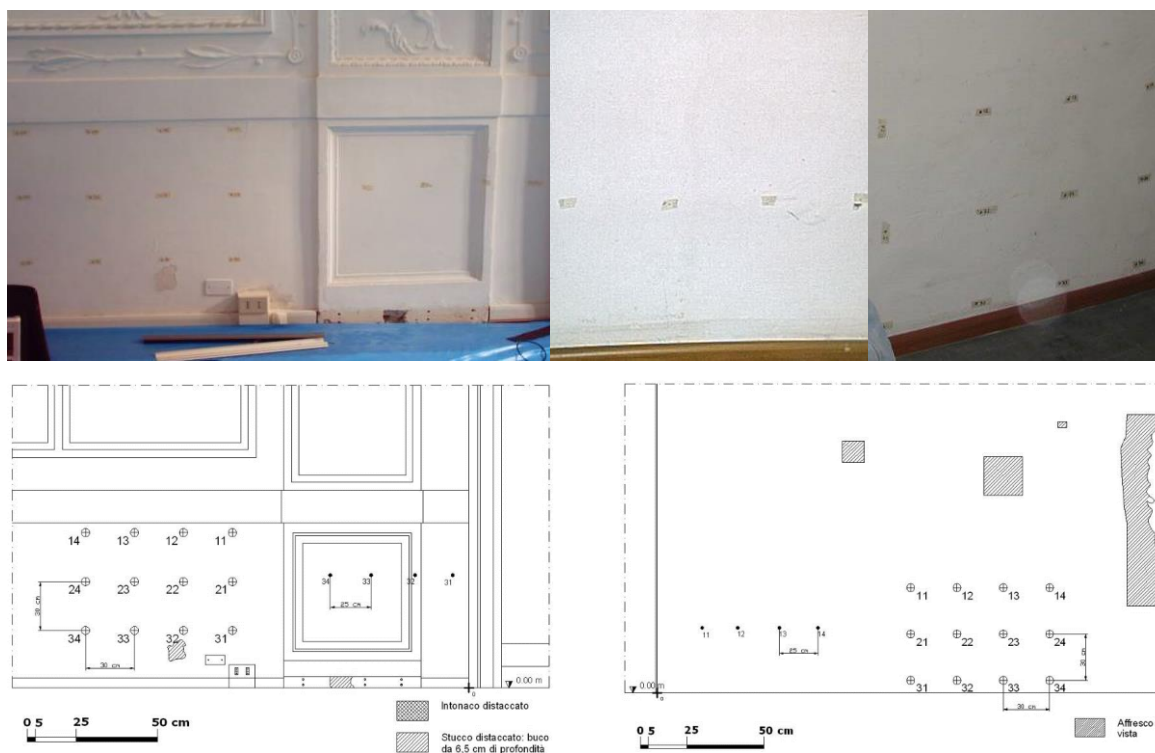


Fig. 4.35 – Disposizione dei punti di battuta e ricezione delle prove (Scodeller, 2006).

Dall'analisi dei dati acquisiti mediante indagine sonica è risultata una distribuzione delle velocità decisamente scadente, caratteristica di murature fortemente danneggiate (circa 350÷450 m/s). Tali valori, che in condizioni normali sarebbero stati considerati preoccupanti, hanno subito un oculato ridimensionamento in quanto hanno riguardato un pannello murario caratterizzato dalla presenza di un pesante strato di intonaco a stucco di mediocri condizioni.

L'impossibilità di individuare la reale orditura e la composizione mineralogica dei conci della parete, unita agli effetti dissipativi legati alla presenza dello strato intonacato, non hanno quindi consentito di esprimere un giudizio significativo in merito alle reali condizioni murarie.

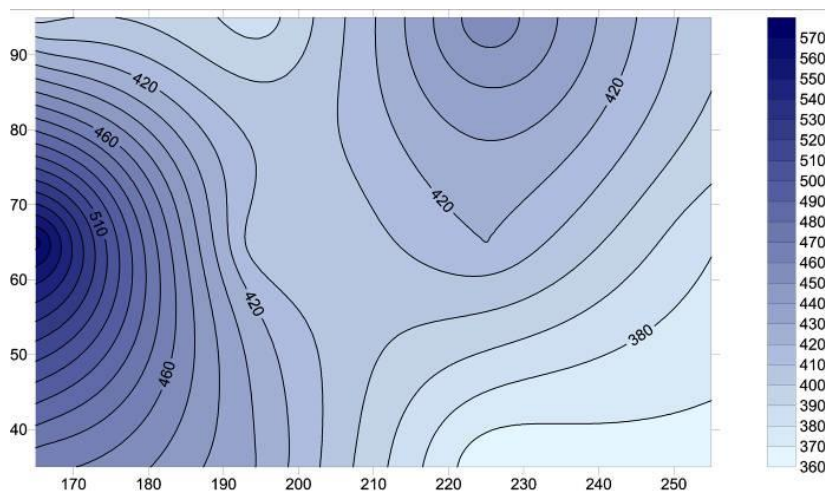


Fig. 4.36 – Risultato della prova sonica diretta eseguita nella Sala degli Stucchi (Scodeller, 2006).

Anche la tomografia orizzontale, eseguita sulla medesima parete ma in posizione diversa rispetto alla prova diretta, ha evidenziato una distribuzione di velocità decisamente modesta (circa $800 \div 1200$ m/s) ma comunque migliore rispetto alla precedente. Purtroppo l'influenza legata alla presenza di uno stipite di marmo in corrispondenza di uno degli spigoli del setto, unita all'alterazione dovuta alla superficie intonacata, sembra aver inficiato anche gli esiti di questa seconda indagine. È infatti ipotizzabile che l'elemento marmoreo abbia calmierato gli effetti dissipativi dell'intonaco, restituendo un campo di variazione delle velocità diverso.

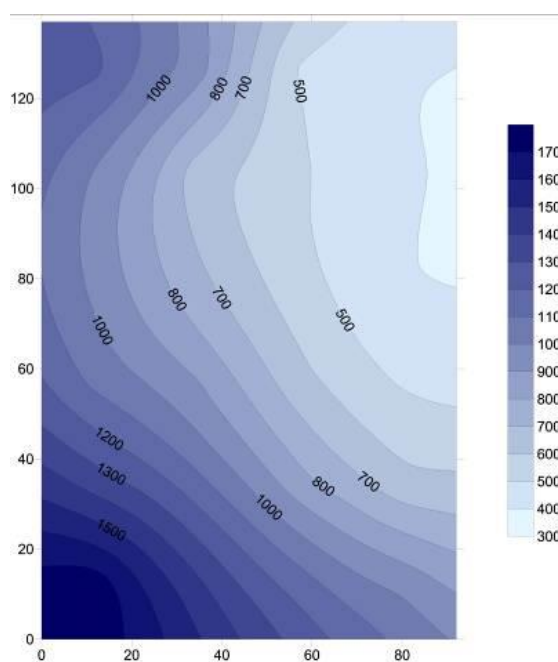


Fig. 4.37 – Risultato della prova tomografica eseguita nella Sala degli Stucchi (Scodeller, 2006).

Questa indagine, a differenza delle precedenti, mette in evidenza alcuni dei problemi legati all'utilizzo della metodologia sonica nello studio del comportamento strutturale degli edifici storici. L'assenza di alcune condizioni basilari come, nel caso specifico, l'impossibilità di rimozione degli strati "dannosi", può compromettere in maniera decisiva gli esiti delle indagini, rendendone problematica o addirittura inutile l'esecuzione.

4.10.3 CAMPANILE DI SAN ZENO - GENERALITÀ

Il campanile della Basilica Di San Zeno fu eretto tra la prima metà dell'anno 1000 e la fine del 1200 sulle spoglie dell'antica struttura campanaria dell'VIII secolo.

La struttura, che raggiunge l'altezza complessiva di 72 metri, è suddivisa in 5 piani da cornici ad archetti di tufo ed è coperta da un'imponente cuspidate corredata dalla presenza di quattro pinnacoli angolari.



Fig. 4.38 – La Basilica di San Zeno a Verona (sinistra) e il suo campanile (destra) (Scodeller, 2006).

Il programma di ricerca, basato esclusivamente sull'esecuzione di prove parzialmente o non distruttive e volto all'analisi delle condizioni della cella campanaria, si è articolato nelle seguenti indagini:

- Indagine storica;
- Analisi del degrado e dello stato di fatto;

- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - Tomografie soniche;
 - Carotaggi meccanici.

Gli esiti dei rilievi fotografico e architettonico sono risultati indispensabili al fine di individuare gli elementi più consoni all'esecuzione delle prove. In relazione ai risultati ottenuti, è stato deciso di concentrare le indagini sui pilastri della cella campanaria superiore, aventi altezza maggiore rispetto a quelli della cella inferiore, fortemente sollecitati, sia staticamente (quando l'impianto è fermo) che dinamicamente (quando esso è in funzione) dal castello campane sovrastante e caricati dal peso della cupola superiore. Dati i cospicui sforzi agenti in questi sostegni, si è ritenuta accettabile l'estensione dei risultati sonici ottenuti anche ai pilastri dei livelli inferiori.

4.10.4 CAMPANILE DI SAN ZENO - RISULTATI DELLE INDAGINI

Il programma di indagine sonica ha previsto la realizzazione di due tomografie orizzontali del pilastro angolare sud-est appartenente alla loggia superiore del campanile, avente uno spessore di circa 186 cm. Dal punto di vista morfologico-materico, l'elemento è risultato essere costituito da un paramento esterno caratterizzato da blocchi di pietra arenaria ben squadrati e connessi attraverso giunti regolari molto sottili e da un nucleo interno formato da un insieme di conci di mattone e pietra arenaria di forma irregolare, probabilmente derivanti dal taglio dei blocchi monolitici utilizzati per il paramento esterno.

Le tomografie, eseguite rispettivamente ad un'altezza di 55 e 185 cm dal davanzale prospiciente, hanno richiesto la disposizione di 16 punti di battuta con passo irregolare, per un totale di 96 misurazioni soniche.

La prima elaborazione ha restituito una distribuzione di velocità molto soddisfacente, caratteristica di murature in buono stato di conservazione (circa 1800÷2500 m/s). È comunque apparsa evidente la disomogeneità legata alla presenza del nocciolo interno di minor compattezza. Ciononostante, data l'elevata qualità dei materiali utilizzati e delle giunzioni realizzate, anche la zona più interna

è stata considerata di buona fattura. Inoltre l'analisi ha confermato le ipotesi relative al paramento esterno del pilastro che, come da ispezione visiva, è risultato essere molto ben conservato.

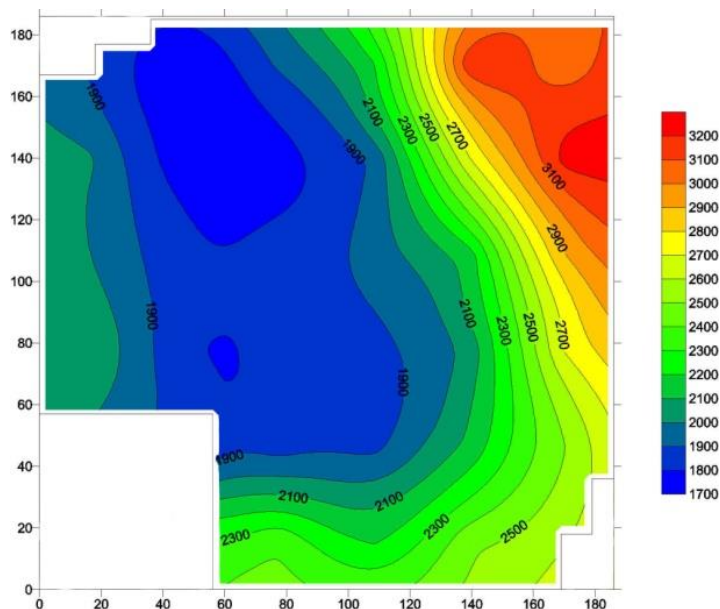


Fig. 4.39 – Risultato della tomografia sonora eseguita a quota 55 cm (Scodeller, 2006).

Il confronto tra l'indagine tomografica e i dati derivanti dal carotaggio meccanico hanno ulteriormente avvalorato i risultati delle analisi.

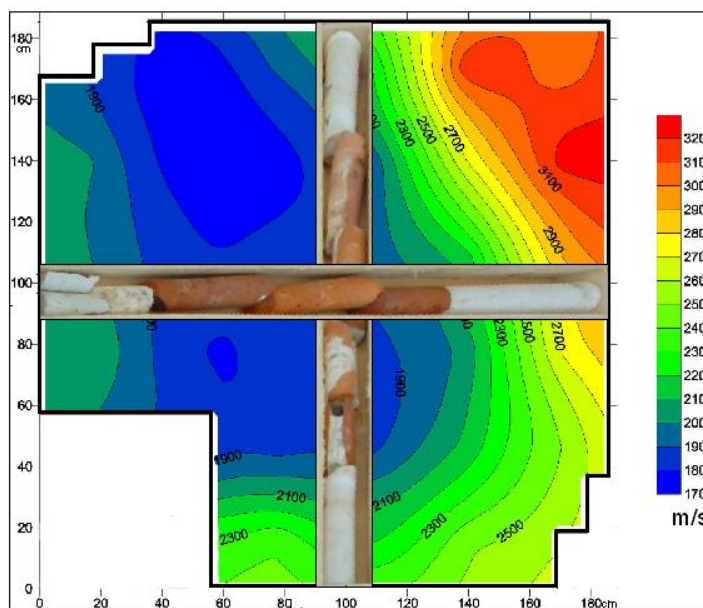


Fig. 4.40 – Confronto tra la tomografia sonora eseguita a quota 55 cm e il carotaggio meccanico (Scodeller, 2006).

Anche nella seconda elaborazione tomografica, qualitativamente molto simile alla precedente, è apparsa netta la differenza di distribuzione delle velocità nel passaggio tra il paramento esterno e il nucleo più interno del pilastro. Data la conformità con i risultati ottenuti nella prima tomografia, si è ritenuto corretto formulare le medesime conclusioni e valutare la muratura come in buono stato di conservazione.

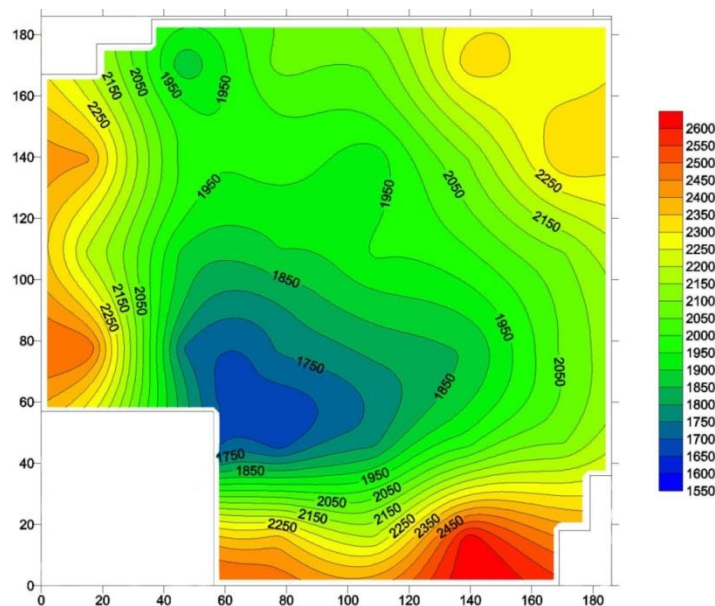


Fig. 4.41 – Risultato della tomografia sonora eseguita a quota 185 cm (Scodeller, 2006).

Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile evitare l'esecuzione di una inutile campagna di consolidamento mediante iniezioni dei sostegni della cella campanaria e delle altre strutture. Ciononostante, è stata suggerita la realizzazione di una serie di interventi di restauro strutturale locale volti al risarcimento di alcune delle lesioni presenti.

4.11 INDAGINI SPERIMENTALI CON PROVE SONICHE SU MURATURE IN PIETRA CONSOLIDATE MEDIANTE INIEZIONI (BRESOLATO E PASIN, 2009)

Il programma sperimentale sviluppato dagli ingegneri Bresolato e Pasin nel proprio lavoro di Tesi ha rappresentato la naturale prosecuzione del progetto di

ricerca nato dalla collaborazione tra Università di Padova, Tassullo s.p.a. e Enea-C.R. Casaccia e volto all'individuazione di adeguate soluzioni per il consolidamento di murature in pietra multistrato (vedi Paragrafo 4.8).

L'esecuzione di prove soniche (dirette, indirette e tomografiche) su campioni sperimentali appositamente realizzati garantisce un maggior controllo e una miglior qualità dei risultati rispetto alle indagini in sito in quanto l'oggetto di indagine è noto a priori, condizione generalmente non riscontrabile nei casi reali in cui, a meno della realizzazione di prove distruttive, spesso non è possibile conoscere la composizione interna della muratura. L'applicazione di indagini soniche in laboratorio rappresenta inoltre un'ottima opportunità per calibrare il metodo sonico e definire un intervallo di velocità cui poter fare riferimento nelle sperimentazioni future.

Nello specifico, questa indagine ha interessato dei singoli pannelli murari isolati e due modelli di edificio in scala 2:3, tutti caratterizzati da una tipologia di muratura in pietra a tre paramenti. I diversi campioni sono stati testati sia in fase precedente che successiva all'intervento, con l'intento di ottenere importanti informazioni in merito all'efficacia della tecnica di consolidamento scelta.

4.11.1 PANNELLI MURARI ISOLATI - GENERALITÀ

L'indagine complessiva è stata sviluppata su 8 pannelli murari costituiti da due paramenti esterni in conci di pietra sbozzati disposti a corsi suborizzontali e da un riempimento interno costituito dal materiale di risulta della sbozzatura stessa. I vari modelli realizzati, aventi dimensioni 130 x 260 cm e spessore 50 cm, sono stati suddivisi in coppie e, dopo una prima fase di analisi delle loro caratteristiche non consolidate, sono stati sottoposti a diverse tecniche di rafforzamento:

1. Due pannelli (1 e 2) non hanno subito alcun tipo di intervento;
2. Due pannelli (3 e 4) hanno subito un intervento di inserimento di tirantini metallici;
3. Due pannelli (5 e 6) sono stati sottoposti ad iniezione semplice con miscela consolidante a base di calce idraulica naturale (FEN-X B);

4. Due pannelli (7 e 8) sono stati sottoposti ad un intervento congiunto di iniezione e inserimento di tirantini metallici.

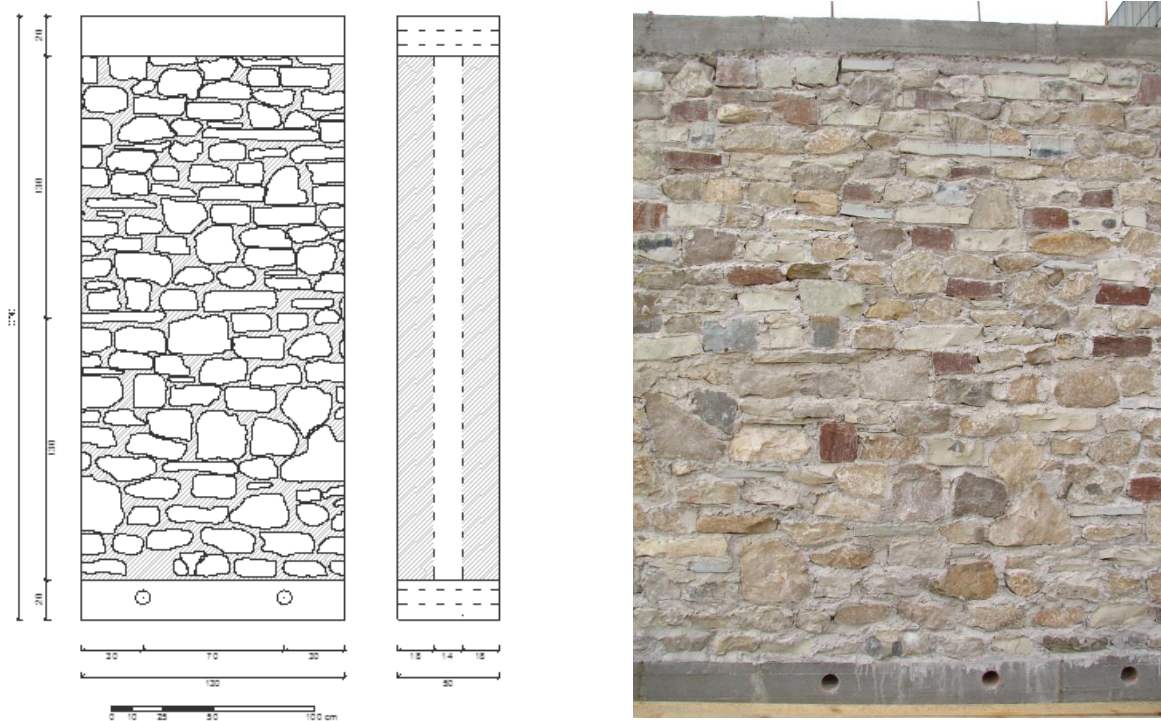


Fig. 4.42 - Schema di pannello murario a tre paramenti (sinistra) e sua realizzazione (destra) (Bresolato e Pasin, 2009).

Dato il carattere prettamente sperimentale dei campioni murari realizzati, il programma di indagine si è articolato in una serie di prove volte alla caratterizzazione sia dei pannelli stessi che dei materiali da costruzione utilizzati:

- Prove di caratterizzazione della pietra;
- Prove di caratterizzazione della malta
- Prove di caratterizzazione della miscela consolidante;
- Prove di iniettabilità e di caratterizzazione dei cilindri iniettati;
- Prove soniche dirette pre e post interventi;
- Tomografie soniche pre e post interventi.

Il riepilogo dettagliato delle tipologie di rinforzo utilizzate e delle indagini soniche eseguite sui pannelli murari è riportato nella Tabella 4.4.

Tabella 4.4 – Programma sperimentale delle tecniche di consolidamento e delle indagini eseguite sui pannelli murari a tre paramenti. I = Iniezione, T = Tirantini (Bresolato e Pasin, 2009).

Sigla muri	Tecnica usata	Prove soniche dirette pre/post consolidamento	Tomografie pre/post consolidamento
1	Nessuna	-	-
2	Nessuna	-	-
3T	Tirantini metallici	-	-
4T	Tirantini metallici	-	-
5I	Iniezioni	2	4
6I	Iniezioni	-	-
7IT	Iniezioni + Tirantini	2	4
8IT	Iniezioni + Tirantini	-	-

4.11.2 PANNELLI MURARI ISOLATI - RISULTATI DELLE INDAGINI

L'esecuzione delle prove soniche tomografiche, che ha coinvolto solo due degli otto pannelli realizzati, secondo l'originale programma avrebbe dovuto essere ripetuta nelle diverse condizioni di muratura non consolidata e consolidata, come si evince dalla Tabella 4.4 precedentemente presentata. Purtroppo però l'analisi tomografica è stata effettivamente realizzata solo nella fase precedente agli interventi di rinforzo, motivo per cui il confronto tra i dati sonici è risultato essere difficoltoso e qualitativamente insoddisfacente. Ciononostante in questo paragrafo si tenta di individuare, ove possibile, una correlazione tra le informazioni derivanti dalle diverse tipologie di prova.

Le indagini soniche hanno previsto la collocazione di una griglia di 9 x 5 punti in corrispondenza di ognuno dei due lati delle murature. Tutte le 45 posizioni di misurazione sono state disposte ad intervalli costanti di 25 cm l'una dall'altra, a 15 cm dai bordi esterni e a 30 cm dalle estremità inferiore e superiore dei campioni.

Le tomografie soniche orizzontali sono invece state realizzate disponendo 9 punti di battuta-ricezione su ognuna delle due facce del pannello, mantenendo un passo costante di 12.5 cm e una distanza di 15 cm dai bordi esterni. Le tomografie verticali hanno invece richiesto la disposizione di 17 posizioni di misurazione per ogni lato del campione, con un passo costante di 12.5 cm e una distanza dai bordi superiore e inferiore pari a 30 cm.

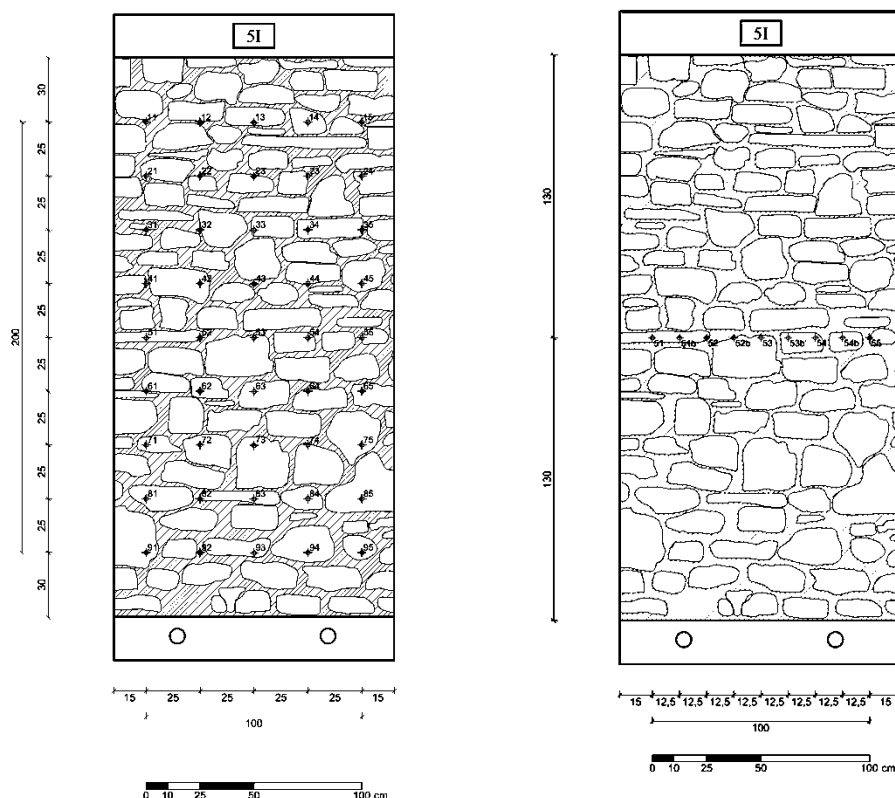


Fig. 4.43 – Disposizione dei punti di battuta della prova sonica diretta (sinistra) e della tomografia sonica orizzontale (destra) (Bresolato e Pasin, 2009).

In relazione alle indagini effettuate sul pannello 51, sono state riscontrate le seguenti condizioni:

- Nella fase precedente all'esecuzione del consolidamento mediante iniezioni, la tomografia orizzontale ha mostrato la presenza di una muratura dotata di scarse caratteristiche meccaniche, restituendo una distribuzione di velocità sonica riconducibile a paramenti storici in pessimo stato di conservazione (circa 600÷900 m/s). I valori misurati hanno evidenziato la disomogeneità del nucleo interno del pannello e hanno rispecchiato quelli ricavati dalla prova sonica diretta realizzata allo stesso livello, i quali hanno restituito una velocità media di propagazione delle onde pari a circa 750 m/s;
- Anche la prova tomografica verticale, in cui la velocità media di trasmissione si è attestata attorno a 750 m/s, ha confermato l'ipotesi di presenza di una muratura in cattive condizioni di consistenza. A differenza

dell'analisi precedente però, l'indagine verticale non ha evidenziato la disomogeneità del nucleo interno. Inoltre è stato possibile riscontrare un rilevante aumento delle velocità in prossimità del cordolo di calcestruzzo inferiore (circa 1100 m/s), probabile conseguenza della diversa disposizione degli elementi resistenti, adagiati su un piano liscio e regolare e dell'effetto di assestamento dovuto al peso proprio della muratura;

- In seguito all'iniezione di miscele consolidanti è stato riscontrato un generale aumento delle velocità soniche (circa 2200 ÷ 3000 m/s) nell'intera sezione, a riprova della qualità dell'operazione di rinforzo eseguita e della marcata predisposizione della metodologia sonica all'individuazione della corretta morfologia muraria.

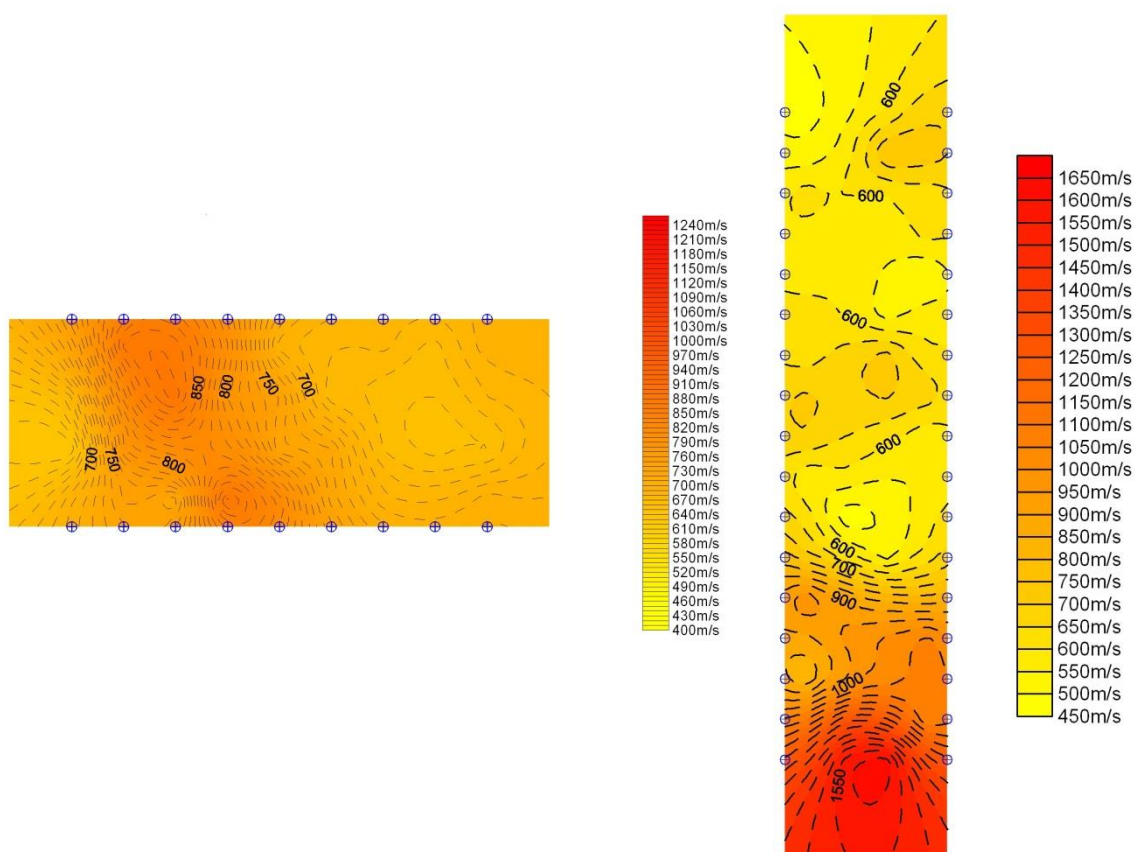


Fig. 4.44 – Risultati delle tomografie soniche orizzontale (sinistra) e verticale (destra) realizzate sul pannello 51 non consolidato (Bresolato e Pasin, 2009).

In merito alle indagini effettuate sul pannello 7IT, è stato possibile elaborare le seguenti considerazioni:

- Nella fase precedente all'esecuzione del consolidamento mediante iniezioni, la tomografia orizzontale ha mostrato la presenza di una muratura dotata di scarse caratteristiche meccaniche, restituendo una distribuzione di velocità sonora riconducibile a paramenti storici in pessimo stato di conservazione (circa 500÷1000 m/s). I valori misurati hanno evidenziato la marcata disomogeneità del nucleo interno del pannello e hanno rispecchiato quelli ricavati dalla prova sonora diretta realizzata allo stesso livello, i quali hanno restituito una velocità media di propagazione delle onde pari a circa 840 m/s;
- Anche la prova tomografica verticale, in cui la velocità media di trasmissione si è attestata attorno a 800 m/s, ha confermato l'ipotesi di presenza di una muratura in cattive condizioni di consistenza e ha rispecchiato i dati ricavati dal test sonico diretto realizzato sulla stessa colonna. L'indagine verticale ha inoltre evidenziato la presenza di tre zone caratterizzate da intervalli di velocità ben definiti: una fascia alta contraddistinta da velocità prossime ai 500 m/s, una zona mediana con una distribuzione contenuta nell'intervallo 700÷1000 m/s e una porzione inferiore in cui è stato possibile riscontrare un rilevante aumento delle velocità (circa 1250 m/s), probabile conseguenza della diversa disposizione degli elementi resistenti, adagiati su un piano liscio e regolare e dell'effetto di assestamento dovuto al peso proprio della muratura;
- In seguito all'iniezione di miscele consolidanti e all'inserimento dei tirantini metallici trasversali è stato riscontrato un generale aumento delle velocità sonore (circa 2400 ÷ 3000 m/s) nell'intera sezione, a riprova della qualità delle operazioni di rinforzo eseguite e della marcata attitudine della metodologia sonora all'individuazione delle reali condizioni morfologiche delle murature indagate.

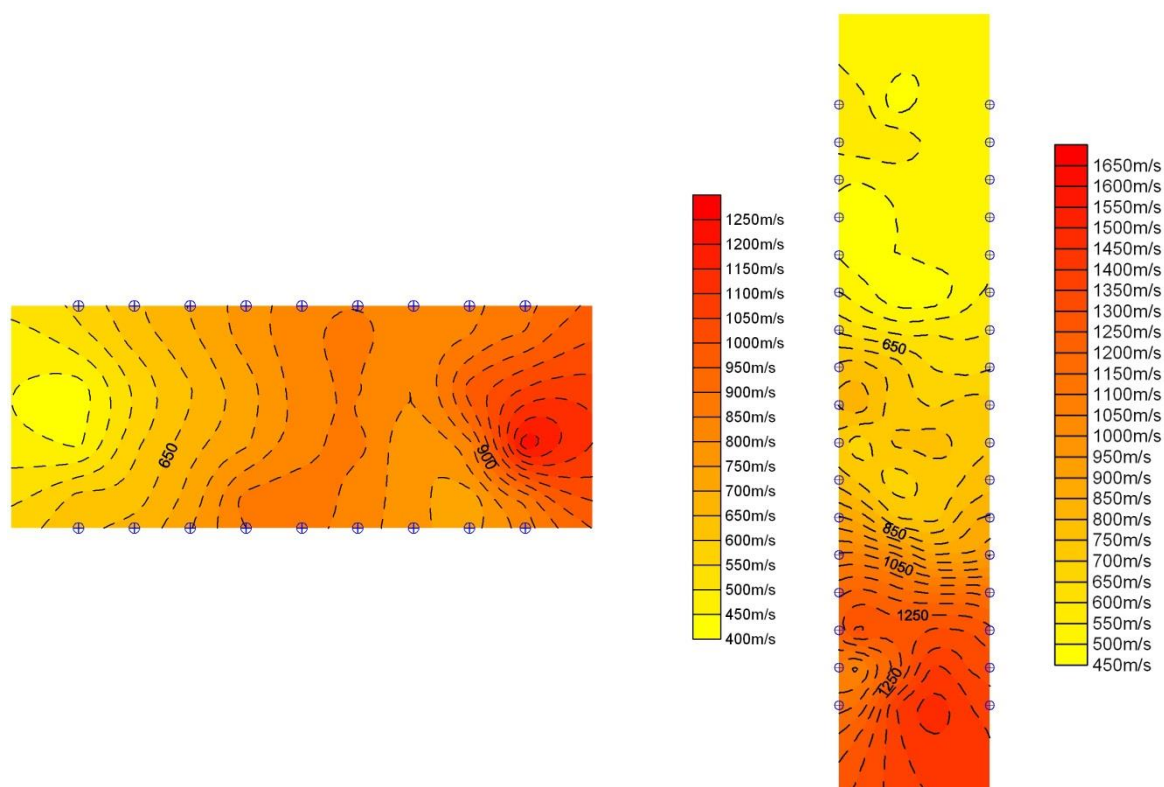


Fig. 4.45 – Risultati delle tomografie soniche orizzontale (sinistra) e verticale (destra) realizzate sul pannello 7IT non consolidato (Bresolato e Pasin, 2009).

4.11.3 MODELLI DI EDIFICIO - GENERALITÀ

Per la sperimentazione in oggetto, sono stati realizzati dei modelli in scala 2:3 di edificio a 2 livelli con pianta regolare, costituiti da pareti in pietra aventi le stesse caratteristiche dei pannelli murari descritti precedentemente (ma con spessore di 33 cm) e da solai in legno a doppia orditura di tavolato con spessore di 2 cm, legato alle murature perimetrali mediante una serie di tiranti metallici (tipo nastri forati).

Ogni edificio è stato costruito secondo una pianta rettangolare di dimensioni 2,4 x 2,8 metri e con un'altezza complessiva di 3,6 metri ed è stato caratterizzato da una particolare disposizione della forometria.

Dato il carattere prettamente sperimentale dei modelli realizzati, il programma di indagine si è articolato in una serie di prove volte alla caratterizzazione del comportamento dei prototipi stessi e allo studio dei materiali da costruzione utilizzati:

- Prove di caratterizzazione della pietra;

- Prove di caratterizzazione della malta
- Prove di caratterizzazione della miscela consolidante;
- Prove di iniettabilità e di caratterizzazione dei cilindri iniettati;
- Prove soniche dirette pre e post interventi;
- Tomografie soniche pre e post interventi.

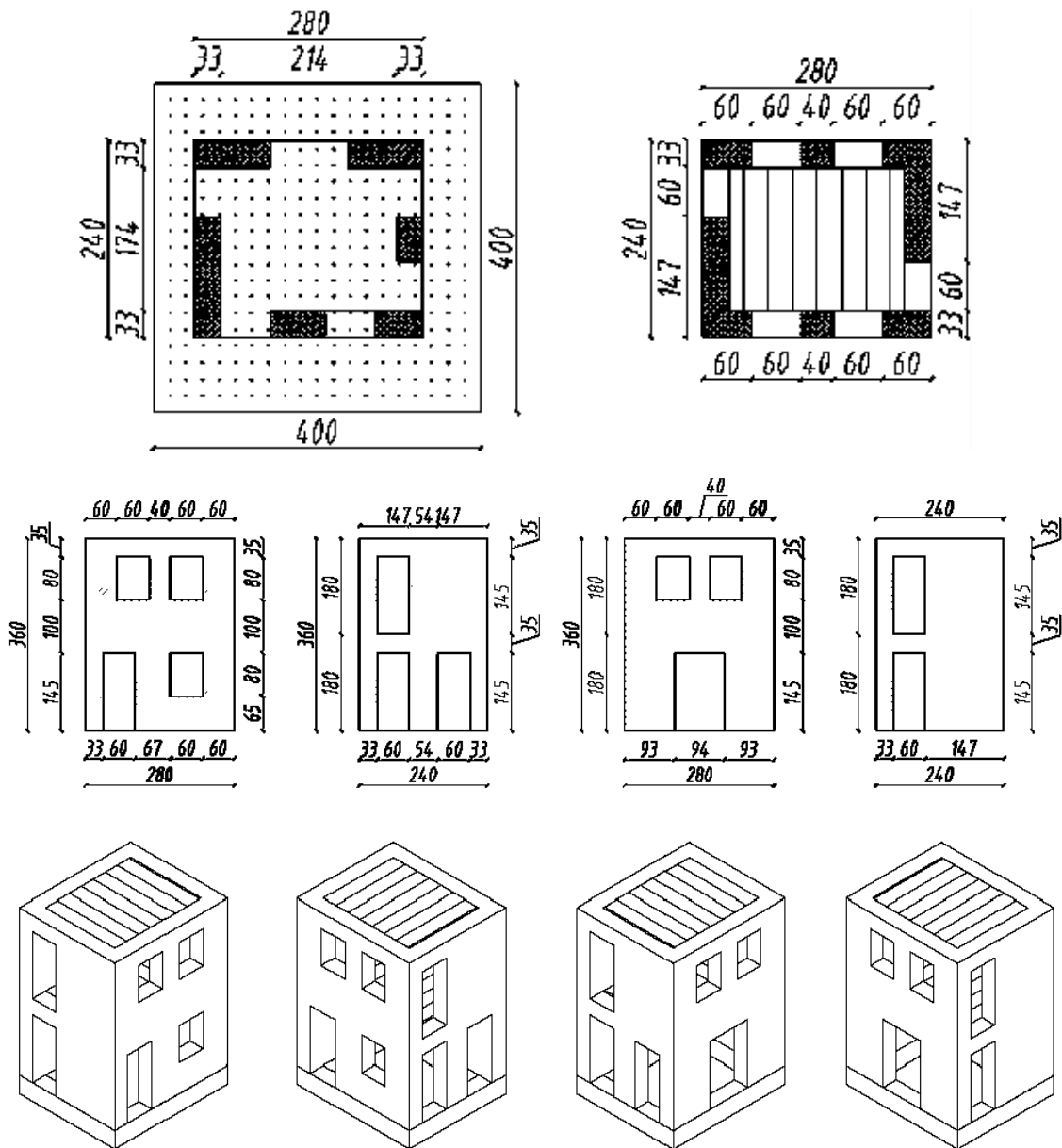


Fig. 4.46 – Piante, prospetti e viste assonometriche dei modelli realizzati (Bresolato e Pasin, 2009).

Pur utilizzando le stesse metodologie di indagine conoscitiva, la sperimentazione è stata appositamente diversificata sottoponendo i due modelli a differenti sollecitazioni e tecniche di rinforzo:

- Il primo modello (1), dopo una prima fase di analisi delle caratteristiche, è stato sottoposto ad un test dinamico senza rinforzi mediante tavola vibrante. Una volta valutato il livello di danneggiamento mediante indagini soniche e apportate le opportune riparazioni (iniezioni, scuci-cuci, ristilatura dei giunti), l'edificio è stato nuovamente sottoposto alla medesima prova di sollecitazione dinamica;
- Il secondo modello (2) è stato invece utilizzato esclusivamente per la verifica dell'efficacia della tecnica di iniezione.

In relazione all'attinenza con questo lavoro di Tesi, vengono qui esposti esclusivamente i risultati relativi alle indagini tomografiche svolte sul secondo modello di edificio nelle fasi precedente e successiva all'intervento di consolidamento.

4.11.4 MODELLI DI EDIFICIO - RISULTATI DELLE INDAGINI

L'esecuzione delle prove soniche tomografiche ha coinvolto solo una delle quattro pareti dell'edificio (parete D) ma ha consentito un diretto confronto tra la fase precedente e quella successiva all'intervento di consolidamento.

La prima tomografia orizzontale, denominata 2Dpt, è stata eseguita disponendo le posizioni di battuta-ricezione lungo i quattro lati di muratura disponibili, ad una quota di 82,5 cm dal piano del terreno. I punti sono stati allineati secondo un passo costante di 16,5 cm e ad una distanza di 8,25 cm dai bordi perimetrali del pannello. In tutto la tomografia è stata realizzata utilizzando 22 punti di acquisizione, di cui 18 posizionati lungo i due lati più lunghi e 4 allineati sulle facce più piccole.

La tomografia precedente all'intervento, restituendo una distribuzione di velocità sonica riconducibile a quella di paramenti storici in buono stato di conservazione (circa $1500 \div 2200$ m/s), ha mostrato la presenza di una muratura dotata di soddisfacenti caratteristiche meccaniche. I valori misurati hanno evidenziato una non preoccupante disomogeneità di consistenza tra la porzione

centrale, caratterizzata da velocità inferiori e le zone più esterne del pannello indagato, dotate di migliori caratteristiche.

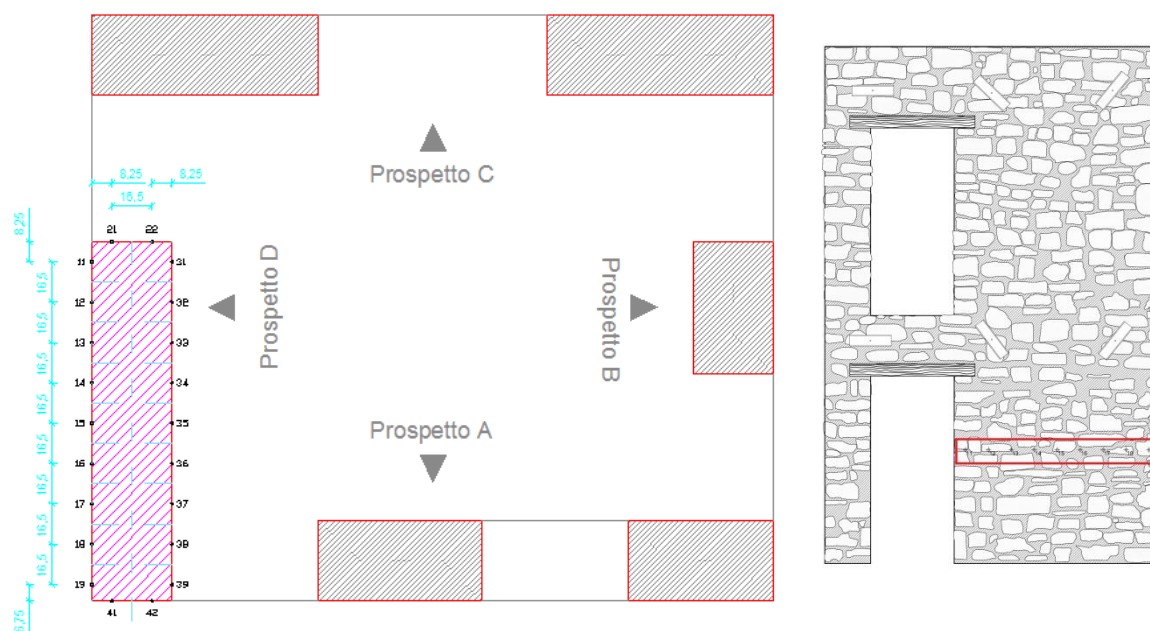


Fig. 4.47 - Pianta della disposizione dei punti di battuta-ricezione (sinistra) e prospetto esterno della parete D con indicazione del livello della prova 2Dpt (destra) (Bresolato e Pasin, 2009).

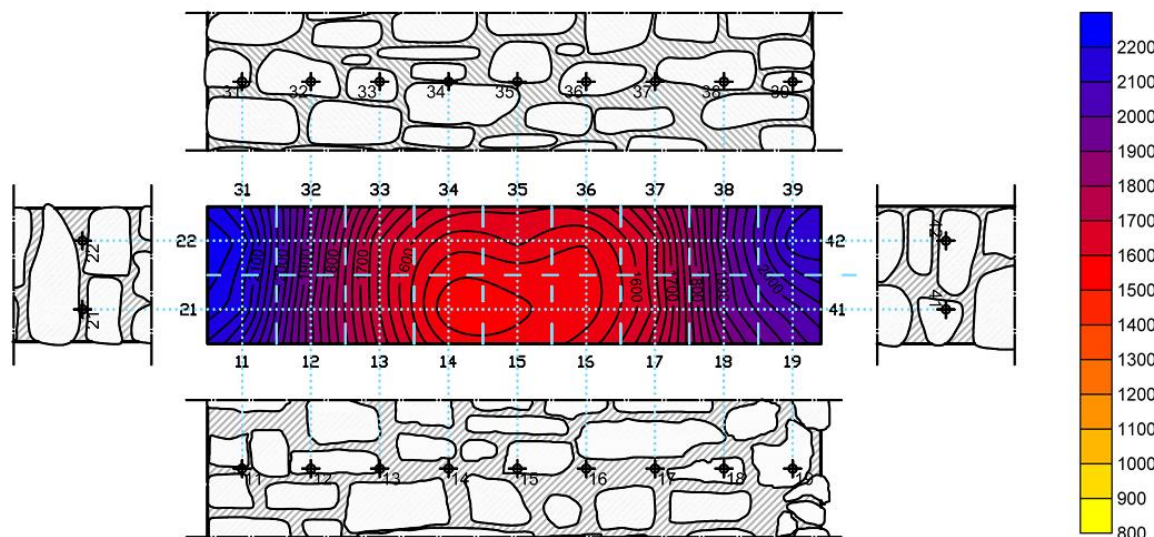


Fig. 4.48 - Tomografia sonora 2Dpt pre-iniezione (Bresolato e Pasin, 2009).

Nonostante le ottime qualità meccaniche dimostrate, il pannello è stato comunque sottoposto a consolidamento mediante iniezioni.

La tomografia successiva all'intervento, restituendo una distribuzione di velocità sonora riconducibile a quella di paramenti storici in ottimo stato di

conservazione (circa $2100 \div 2600$ m/s), ha riconfermato le conclusioni dedotte dall'analisi precedente. Come nel caso della tomografia pre-iniezione, i valori misurati hanno evidenziato una non preoccupante disomogeneità di consistenza tra la porzione centrale, caratterizzata da velocità inferiori e le zone più esterne del pannello indagato, dotate di migliori caratteristiche.

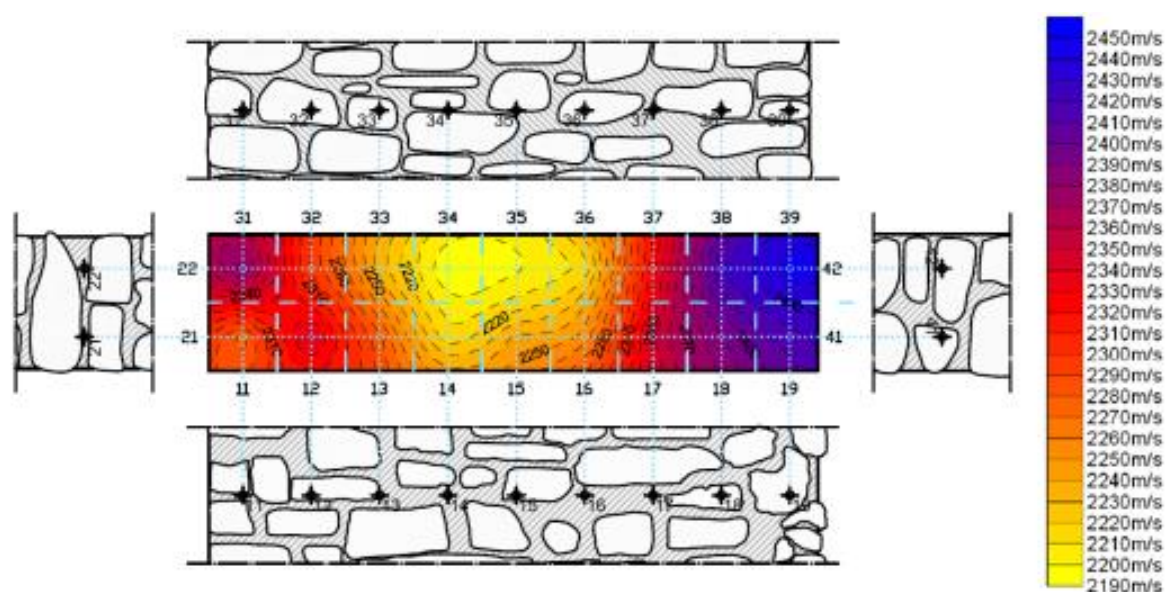


Fig. 4.49 - Tomografia sonora 2Dpt post-iniezione (Bresolato e Pasin, 2009).

Al fine di valutare l'influenza del numero e della tipologia dei percorsi sugli esiti delle prove tomografiche, è stata realizzata una particolare elaborazione in cui sono state utilizzate solamente le misurazioni acquisite lungo le due facce più lunghe del pannello indagato.

Dal punto di vista quantitativo il risultato si è rivelato essere abbastanza sorprendente. Nel caso dell'elaborazione dei dati acquisiti nella fase precedente all'intervento di consolidamento, pur evidenziando la presenza della stessa disomogeneità riscontrata nell'analisi su quattro lati, la tomografia ha restituito una distribuzione di velocità caratterizzata da un intervallo di valori inferiore (circa $1600 \div 1900$ m/s).

Il calcolo eseguito sulle misurazioni relative alla fase successiva all'iniezione ha invece mostrato una mappatura completamente diversa rispetto all'omologa ricavata dall'analisi su quattro lati. Nello specifico, si è notata una redistribuzione

dei valori caratterizzata da una generalizzata omogeneizzazione della distribuzione di velocità e dalla presenza di uno spigolo particolarmente compatto.

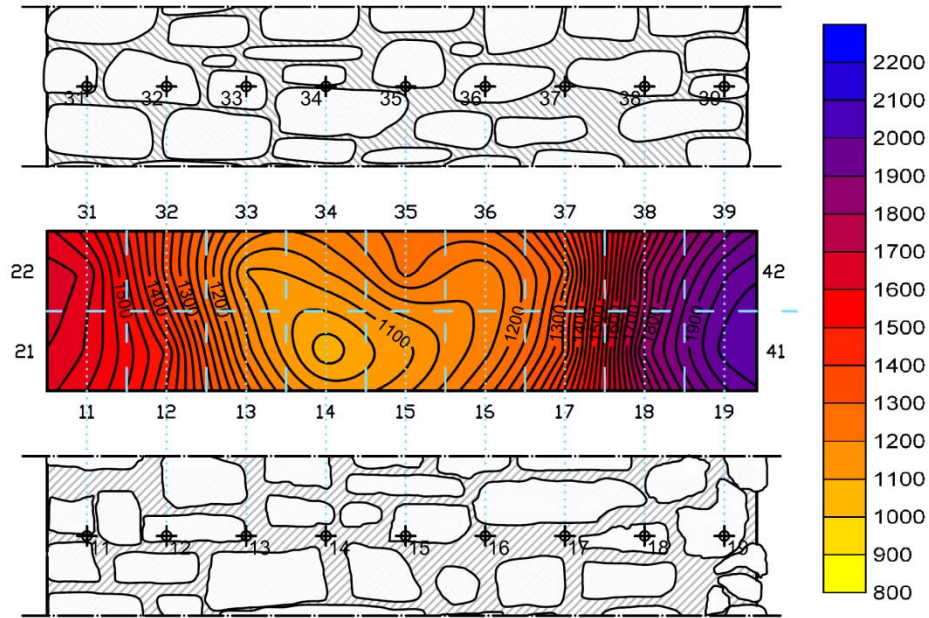


Fig. 4.50 – Tomografia sonora 2Dpt pre-iniezione su due lati (Bresolato e Pasin, 2009).

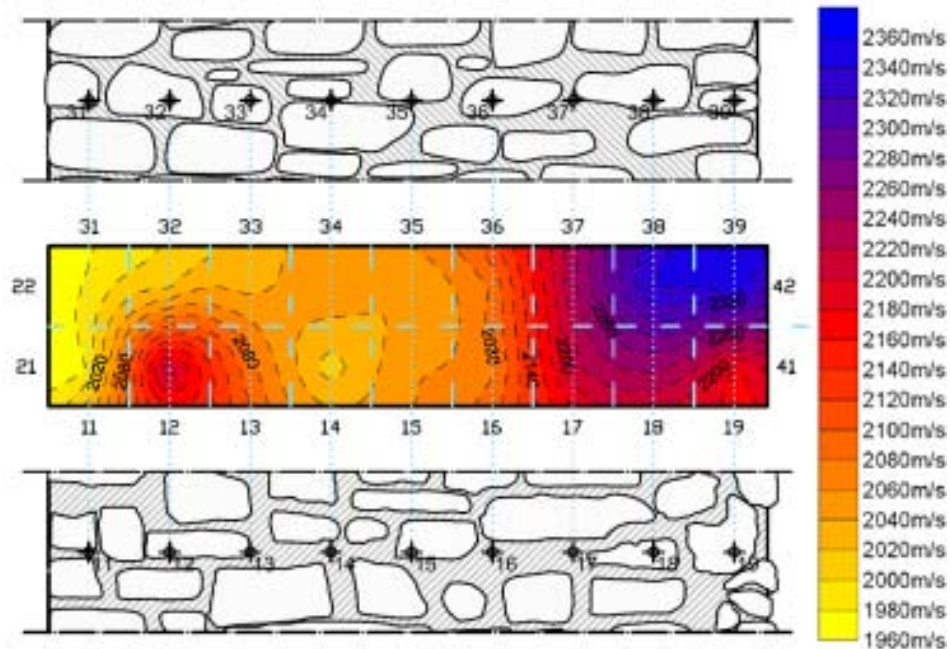


Fig. 4.51 – Tomografia sonora 2Dpt post-iniezione su due lati (Bresolato e Pasin, 2009).

In relazione ai risultati di queste particolari elaborazioni si è ritenuto opportuno concludere che la distribuzione delle velocità soniche può essere

positivamente influenzata dalle misurazioni eseguite in prossimità degli spigoli. Tale comportamento è probabilmente legato alla trasmissione dei segnali su brevi distanze: in accordo con il principio di Fermat è infatti possibile ipotizzare che le onde misurate vicino agli angoli si propaghino lungo la superficie esterna del paramento (più solida) piuttosto che attraverso traiettorie interne.

La seconda tomografia orizzontale, denominata 2Dpp, è stata invece eseguita disponendo le posizioni di battuta-ricezione lungo tre lati del pannello, ad una quota di 3,12 metri dal piano del terreno. I punti sono stati allineati secondo un passo costante di 16,5 cm e ad una distanza di 8,25 cm dai bordi perimetrali del pannello. In tutto la tomografia è stata realizzata utilizzando 14 punti di acquisizione, di cui 12 posizionati lungo i due lati più lunghi e 2 allineati sulla faccia più piccola.

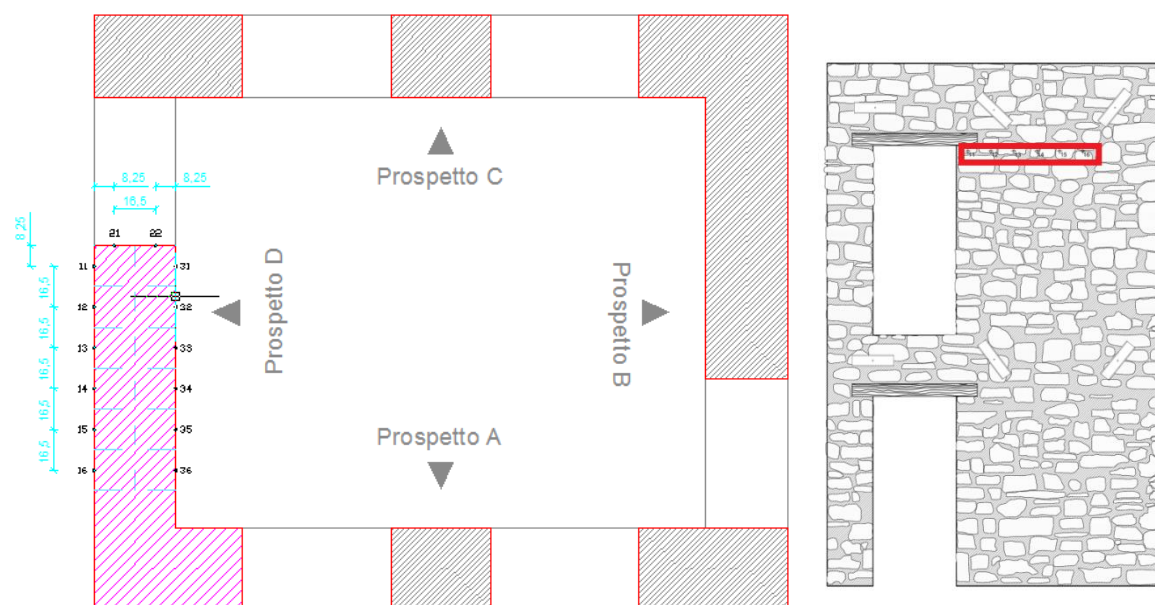


Fig. 4.52 - Pianta della disposizione dei punti di battuta-ricezione (sinistra) e prospetto esterno della parete D con indicazione del livello della prova 2Dpp (destra) (Bresolato e Pasin, 2009)

La tomografia precedente all'intervento, restituendo una distribuzione di velocità sonora riconducibile a quella di paramenti storici in discreto stato di conservazione (circa 1000÷1800 m/s), ha mostrato la presenza di una muratura dotata di caratteristiche meccaniche accettabili. I valori misurati hanno evidenziato

una non preoccupante disomogeneità di consistenza tra la porzione del pannello vicina all'innesto con la parete A, caratterizzata da velocità inferiori e le zona più prossima allo stipite della porta, dotata di migliori caratteristiche.

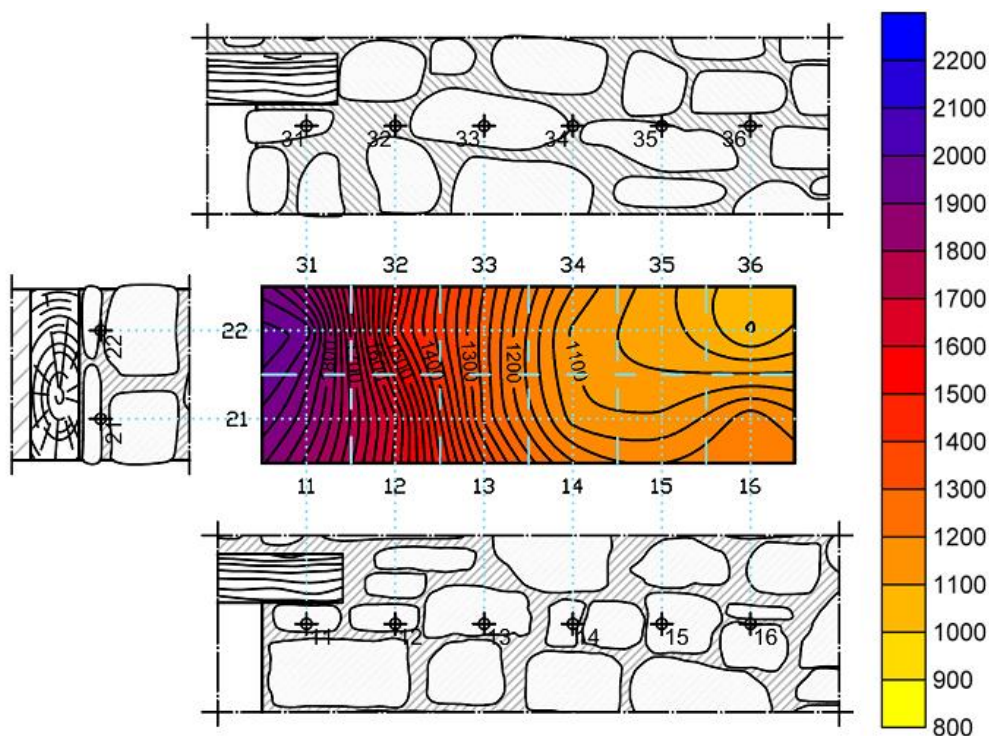


Fig. 4.53 – Tomografia sonica 2Dpp pre-iniezione (Bresolato e Pasin, 2009).

Nonostante le discrete qualità meccaniche mostrate, il pannello del primo piano, così come il precedente, è stato sottoposto a consolidamento mediante iniezioni.

La tomografia successiva all'intervento, restituendo una distribuzione di velocità sonora riconducibile a quella di paramenti storici in ottimo stato di conservazione (circa $2600 \div 2800$ m/s), ha mostrato un notevole incremento della qualità muraria. A differenza della tomografia pre-iniezione, i valori misurati hanno evidenziato una omogeneizzazione della consistenza all'interno della sezione.

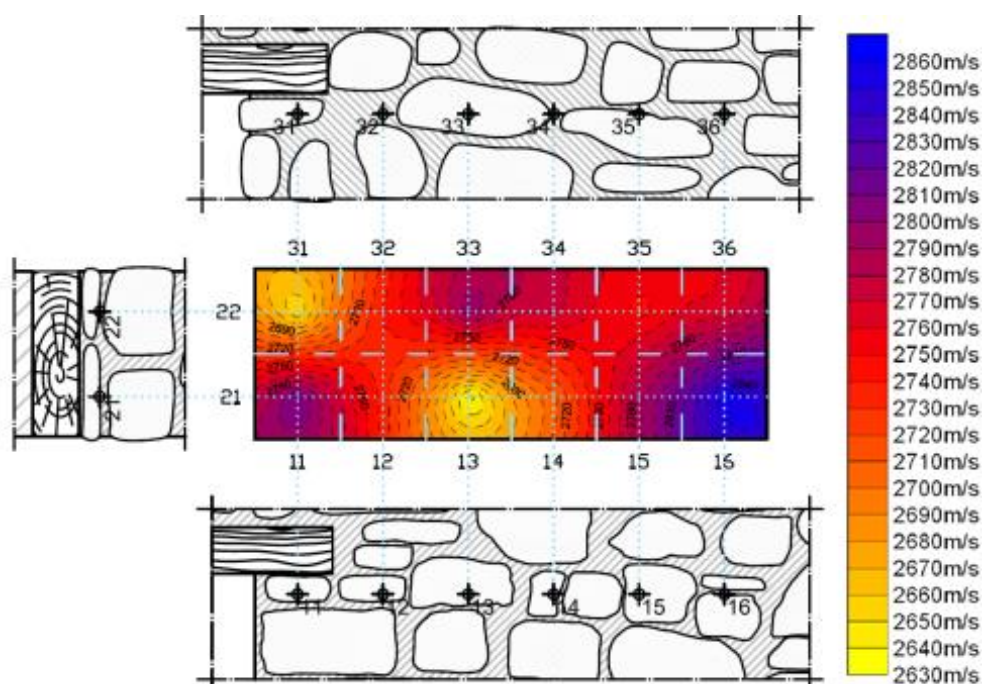


Fig. 4.54 – Tomografia sonora 2Dpp post-iniezione (Bresolato e Pasin, 2009).

Al fine di valutare l'influenza del numero e della tipologia dei percorsi sugli esiti delle prove tomografiche, anche per il secondo pannello indagato è stata realizzata una particolare elaborazione in cui sono state utilizzate solamente le misurazioni acquisite lungo le due facce più lunghe.

Dal punto di vista quantitativo il risultato si è rivelato essere abbastanza sorprendente. Nel caso dell'elaborazione dei dati acquisiti nella fase precedente all'intervento di consolidamento, pur evidenziando la presenza della stessa disomogeneità riscontrata nell'analisi su tre lati, la tomografia ha restituito una distribuzione di velocità caratterizzata da un intervallo di valori inferiore (circa $850 \div 1700$ m/s).

Il calcolo eseguito sulle misurazioni relative alla fase successiva all'iniezione ha invece mostrato una mappatura molto simile all'omologa ricavata dall'analisi su tre lati.

In relazione ai risultati di queste particolari elaborazioni si è ritenuto opportuno concludere che la distribuzione delle velocità soniche può, in alcuni casi, essere positivamente influenzata dalle misurazioni eseguite in prossimità degli spigoli. Tale comportamento è probabilmente legato alla trasmissione dei segnali

su brevi distanze: in accordo con il principio di Fermat è infatti possibile ipotizzare che le onde misurate vicino agli angoli si propaghino lungo la superficie esterna del paramento (più solida) piuttosto che attraverso traiettorie interne.

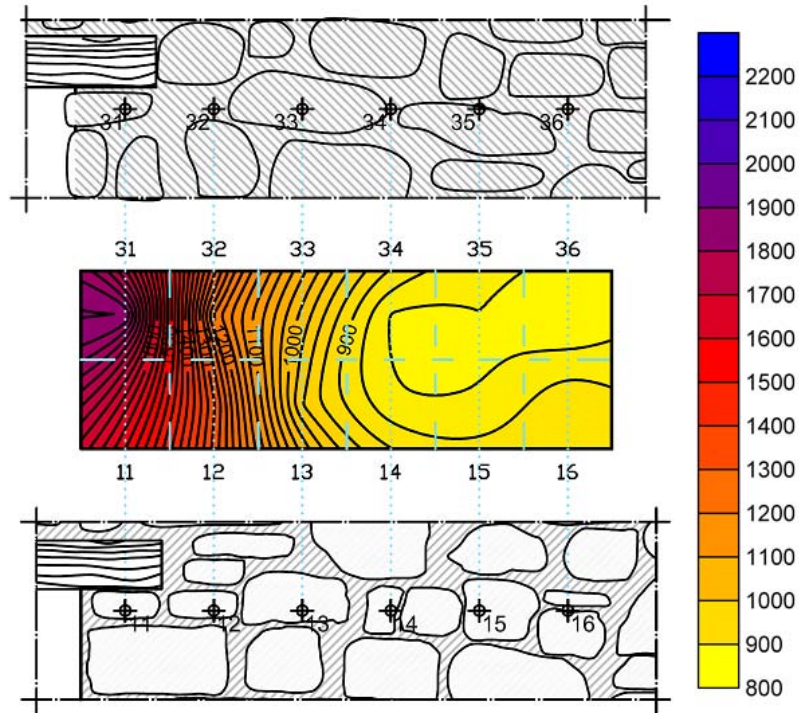


Fig. 4.55 - Tomografia sonica 2Dpp pre-iniezione su due lati (Bresolato e Pasin, 2009).

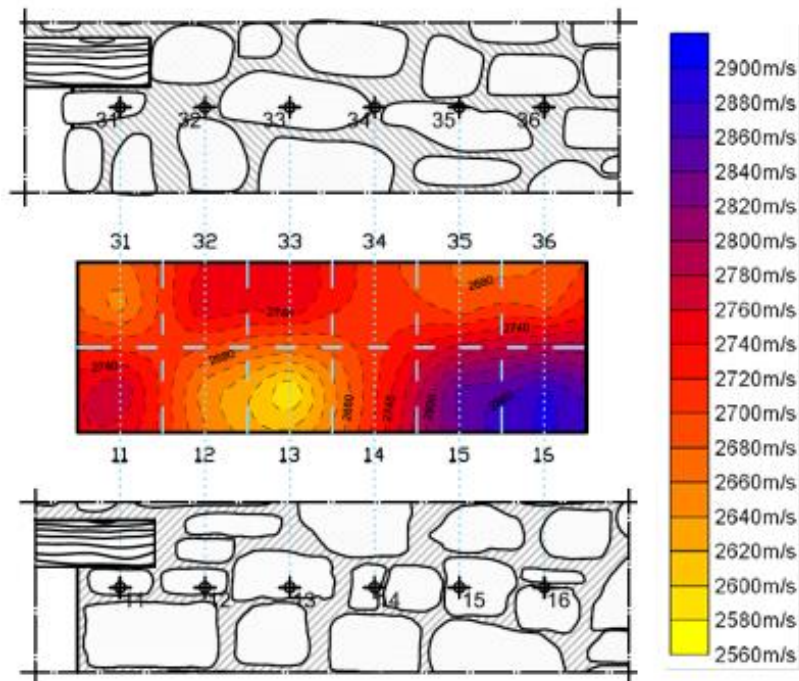


Fig. 4.56 - Tomografia sonica 2Dpp post-iniezione su due lati (Bresolato e Pasin, 2009).

4.12 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI INIEZIONI PER IL CONSOLIDAMENTO DI MURATURA IN PIETRA MEDIANTE PROVE NON DISTRUTTIVE (FATTORI E SCAGGIANTE, 2011)

Il lavoro di Tesi sviluppato dagli ingegneri Fattori e Scaggiante, inserito all'interno dei due più ampi progetti denominati NIKER (New Integrated Knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from Earthquake-induced Risk) e ReLuis II, ha avuto l'obiettivo di valutare l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei pannelli murari in pietra in seguito all'intervento di consolidamento mediante iniezione di miscele di calce idraulica.

Questo programma sperimentale ha rappresentato la naturale prosecuzione del progetto di ricerca nato dalla collaborazione tra Università di Padova, Tassullo s.p.a. e Enea-C.R. Casaccia e volto all'individuazione di adeguate soluzioni per il consolidamento di murature in pietra multistrato (vedi Paragrafi 4.8 e 4.11).

Come già precedentemente affermato, l'esecuzione di prove soniche (dirette, indirette e tomografiche) su campioni sperimentali appositamente realizzati garantisce un maggior controllo e una miglior qualità dei risultati rispetto alle indagini in sito in quanto l'oggetto di indagine è noto a priori, condizione non sempre riscontrabile nei casi reali. L'applicazione di indagini soniche in laboratorio rappresenta inoltre un'ottima opportunità per calibrare il metodo sonico e definire un intervallo di velocità cui poter fare riferimento nelle sperimentazioni future.

Nello specifico, questa indagine ha interessato una serie di pannelli murari in pietra a tre paramenti in scala 1:1 e 2:3. I diversi campioni sono stati testati sia in fase precedente che successiva all'intervento, con l'intento di ottenere importanti informazioni in merito all'efficacia della tecnica di consolidamento scelta.

4.12.1 GENERALITÀ

L'indagine complessiva è stata sviluppata su pannelli ricavati da 6 differenti muri continui costituiti da due paramenti esterni in conci di pietra sbozzati disposti a corsi suborizzontali e da un riempimento interno costituito dal materiale di risulta della sbozzatura stessa. Per la loro realizzazione sono state utilizzate

pietre calcaree provenienti dalla cava di Cugnano (BL) e malta T30V prodotta dalla Tassullo s.p.a.. Le caratteristiche dimensionali delle varie murature realizzate sono riportate nella Tabella 4.5.

Tabella 4.5 – Caratteristiche dei pannelli del programma sperimentale (Fattori e Scaggiante, 2011).

Sigla muro	Scala	Dimensioni [m]	Numero pannelli realizzati	Numero pannelli consolidati con iniezioni	Lunghezza singolo pannello [m]
A	1:1	10,26 x 2,60 x 0,50	6	3	1,50
B	1:1	7,26 x 1,60 x 0,50	6	3	1,00
C	1:1	9,30 x 1,65 x 0,50	8	4	1,00
D	2:3	6,06 x 1,40 x 0,33	6	3	0,80
E	2:3	7,70 x 1,55 x 0,33	8	4	0,80
F*	1:1	4,06 x 1,60 x 0,18	4	-	1,00

* Muratura a paramento singolo

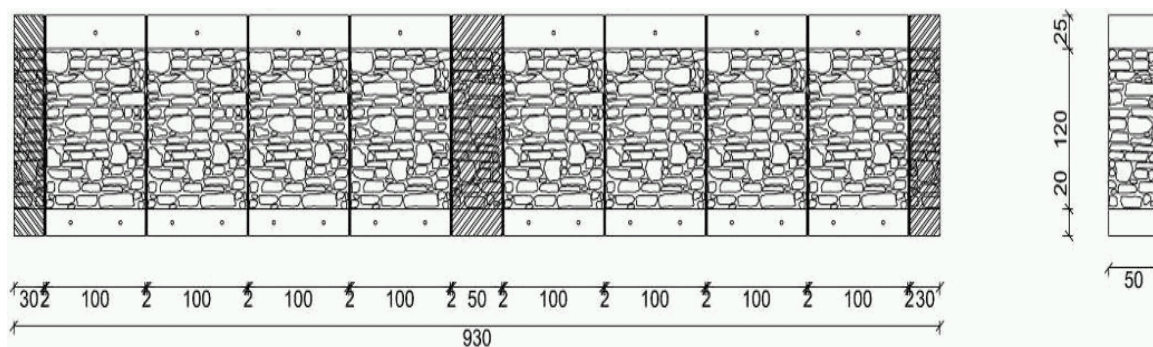


Fig. 4.57 – Prospetto di realizzazione del muro C (sopra) e risultato finale della sua costruzione (sotto) (Fattori e Scaggiante, 2011).

Dato il carattere sperimentale dei campioni murari realizzati, il programma di indagine si è articolato in una serie esaustiva di prove distruttive e non distruttive

volte alla caratterizzazione dei pannelli stessi e dei materiali da costruzione utilizzati:

- Prove di caratterizzazione della pietra;
- Prove di caratterizzazione della malta
- Prove di caratterizzazione della miscela consolidante;
- Prove di iniettabilità e di caratterizzazione dei cilindri iniettati;
- Prove soniche dirette e indirette pre e post interventi;
- Tomografie soniche pre e post interventi;
- Prove di martinetto piatto;
- Prove di compressione e taglio-compressione.

Il riepilogo dettagliato delle indagini soniche eseguite sui diversi pannelli murari è riportato nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6 – Programma sperimentale delle indagini soniche eseguite (Fattori e Scaggiante, 2011).

Muro	Pannello	Tipologia di prova pre-iniezione	Tipologia di prova post-iniezione
A	4	1 diretta	1 diretta
	5	1 diretta	1 diretta
	6	1 diretta	1 diretta
B	4	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	5	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	6	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
C	5	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	6	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	7	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	8	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
D	4	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	5	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	6	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
E	5	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	6	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	7	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
	8	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche	1 diretta + 2 indirette + 2 tomografiche
F	3	1 diretta + 1 indiretta	1 diretta + 1 indiretta
	4	1 diretta + 1 indiretta	1 diretta + 1 indiretta

4.12.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

Per ognuno dei pannelli individuati sono state realizzate una tomografia sonica verticale e una orizzontale, sia nella fase precedente che in quella successiva all'intervento di consolidamento.

Per l'esecuzione pratica delle indagini è stata prevista la seguente disposizione dei punti di battuta-ricezione:

- Pannelli ricavati dalle murature B e C:
 - Tomografia orizzontale: 4 punti su ognuna delle due facce della parete con passo costante di 20 cm;
 - Tomografia verticale: 5 punti su ognuna delle due facce della parete con passo costante di 20 cm;
- Pannelli ricavati dalle murature D ed E:
 - Tomografia orizzontale: 3 punti su ognuna delle due facce della parete con passo costante di 20 cm;
 - Tomografia verticale: 4 punti su ognuna delle due facce della parete con passo costante di 20 cm.

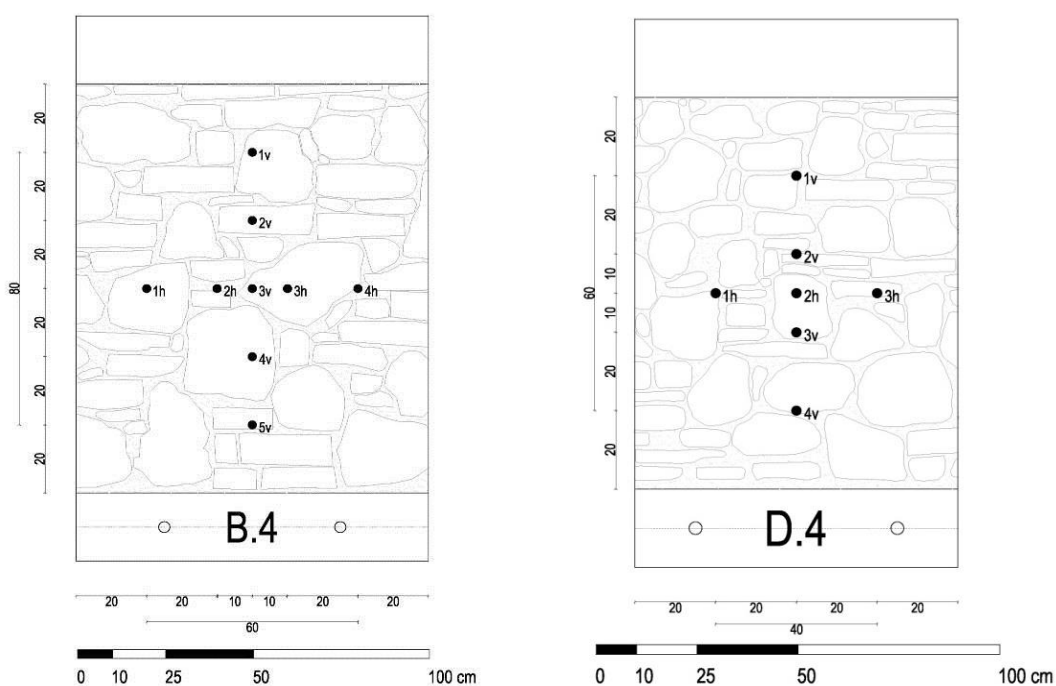


Fig. 4.58 – Distribuzione dei punti di acquisizione per l'esecuzione delle tomografie soniche nel caso di pannelli provenienti dalle murature B e C (sinistra) e D ed E (destra) (Fattori e Scaggiante, 2011).

Suddividendo l'analisi in relazione alla scala costruttiva dei diversi pannelli è stato possibile riscontrare che:

- Pannelli in scala 1:1:
 - Nella fase precedente all'esecuzione del consolidamento mediante iniezioni, la tomografia orizzontale ha mostrato la presenza di una muratura dotata di scarse caratteristiche meccaniche, restituendo una distribuzione di velocità sonica abbastanza omogenea e riconducibile a parametri storici in cattivo stato di conservazione (circa 800÷1200 m/s per i pannelli B e 600÷1000 per i pannelli C). Anche la prova tomografica verticale, in cui la velocità di trasmissione si è attestata nell'intervallo 1110÷1400 m/s per i modelli B e 1300÷1600 per i modelli C, ha confermato l'ipotesi di muratura in cattive condizioni di consistenza. Inoltre questa seconda indagine ha evidenziato la presenza di una porzione inferiore di muratura caratterizzata da velocità più elevate, probabile conseguenza della diversa disposizione degli elementi resistenti, adagiati su un piano liscio e regolare e dell'effetto di assestamento dovuto al peso proprio della muratura;
 - In seguito all'iniezione di miscele consolidanti è stato riscontrato un aumento generalizzato delle velocità soniche sia nella sezione orizzontale (circa 3800÷4100 m/s per i muri B e 3100÷3400 m/s per i C) che in quella verticale (circa 3100÷3400 m/s per i pannelli B e 2300÷2800 per i C), a riprova della qualità dell'operazione di rinforzo eseguita e della marcata attitudine della metodologia sonica all'individuazione delle reali condizioni morfologiche delle murature indagate.
 - Ad una più attenta analisi è stato possibile osservare che l'incremento delle velocità e, di conseguenza, il miglioramento delle condizioni meccaniche, è stato più cospicuo in corrispondenza dei punti sottoposti a tomografia orizzontale. Questa condizione dimostra che le miscele utilizzate hanno garantito maggiori benefici alle zone della

muratura che, in condizioni iniziali, erano caratterizzate da uno scarso consolidamento interno.

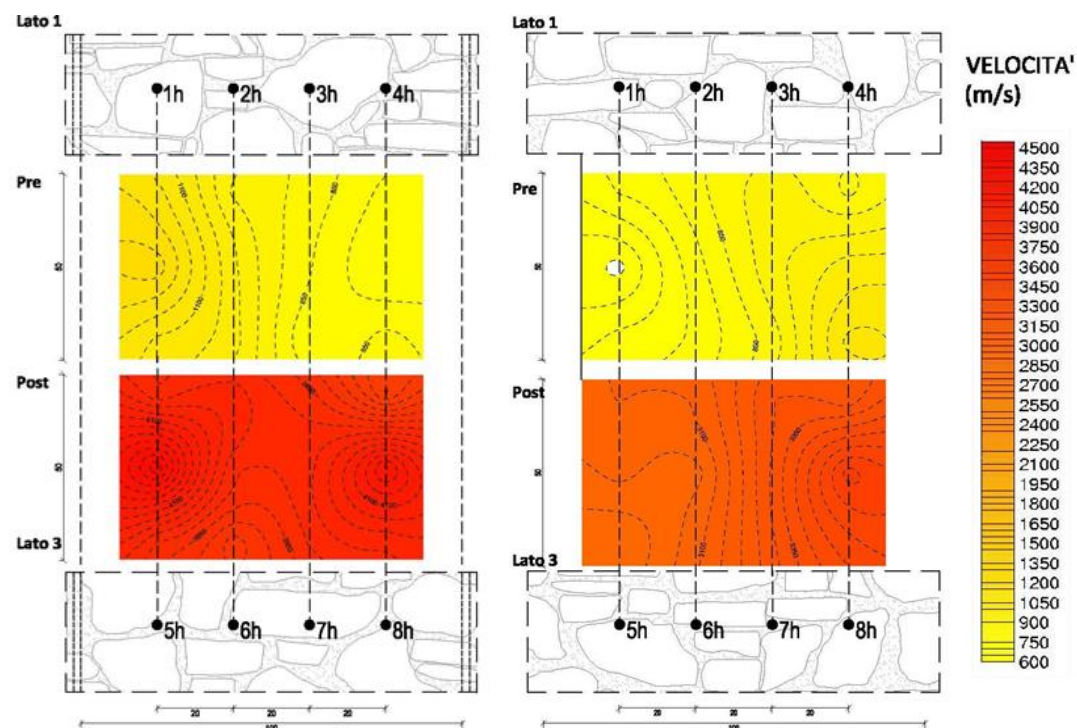


Fig. 4.59 – Confronto tra le tomografie orizzontali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura B (sinistra) e C (destra) (Fattori e Scaggiante, 2011).

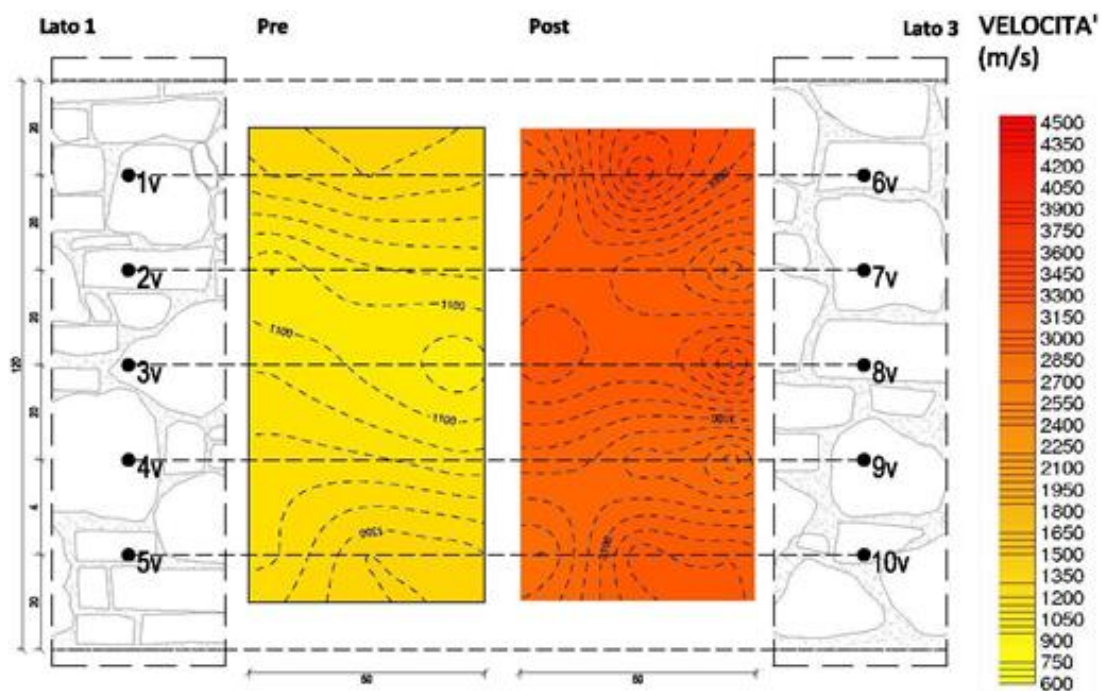


Fig. 4.60 – Confronto tra le tomografie verticali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura B (Fattori e Scaggiante, 2011).

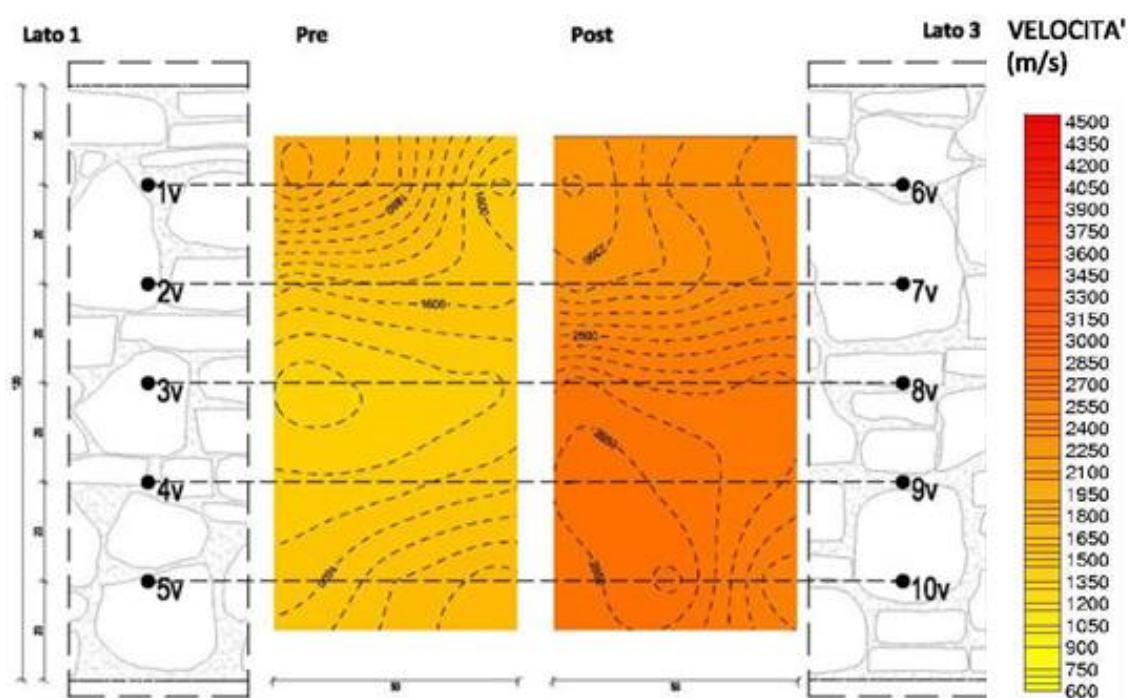


Fig. 4.61 – Confronto tra le tomografie verticali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura C (Fattori e Scaggiante, 2011).

- Pannelli in scala 2:3:
 - Nella fase precedente all'esecuzione del consolidamento mediante iniezioni, la tomografia orizzontale ha mostrato la presenza di una muratura dotata di caratteristiche meccaniche soddisfacenti, restituendo una distribuzione di velocità sonica abbastanza omogenea e riconducibile a paramenti storici in discreto, stato di conservazione (circa $800 \div 1500$ m/s per i pannelli D e $1600 \div 1650$ per i pannelli E). Anche la prova tomografica verticale, in cui la velocità di trasmissione si è attestata nell'intervallo $1850 \div 2100$ m/s per entrambe le tipologie costruttive, ha confermato l'ipotesi di muratura in discrete condizioni di consistenza. A differenza delle analisi condotte sui pannelli in scala 1:1, le indagini verticali realizzate sui modelli D ed E non hanno evidenziato la presenza di particolari disomogeneità all'interno della sezione;
 - In seguito all'iniezione di miscele consolidanti è stato riscontrato un aumento generalizzato delle velocità soniche sia nella sezione

orizzontale (circa $2500 \div 3000$ m/s per i muri D e $3100 \div 3800$ m/s per gli E) che in quella verticale (circa $3800 \div 4300$ per entrambe le tipologie), a riprova della qualità dell'operazione di rinforzo eseguita e della marcata attitudine della metodologia sonica all'individuazione delle reali condizioni morfologiche delle murature indagate.

- Ad una più attenta analisi è stato possibile osservare che l'incremento delle velocità complessivo è stato inferiore rispetto a quello verificatosi nei modelli in scala 1:1. Tale variazione è presumibilmente dovuta al fatto che, in fase di costruzione, il paramento interno dei pannelli D ed E è stato riempito con materiale di risulta di dimensioni inferiori rispetto a quello dei due muri precedenti, favorendo la creazione di un nucleo più compatto.

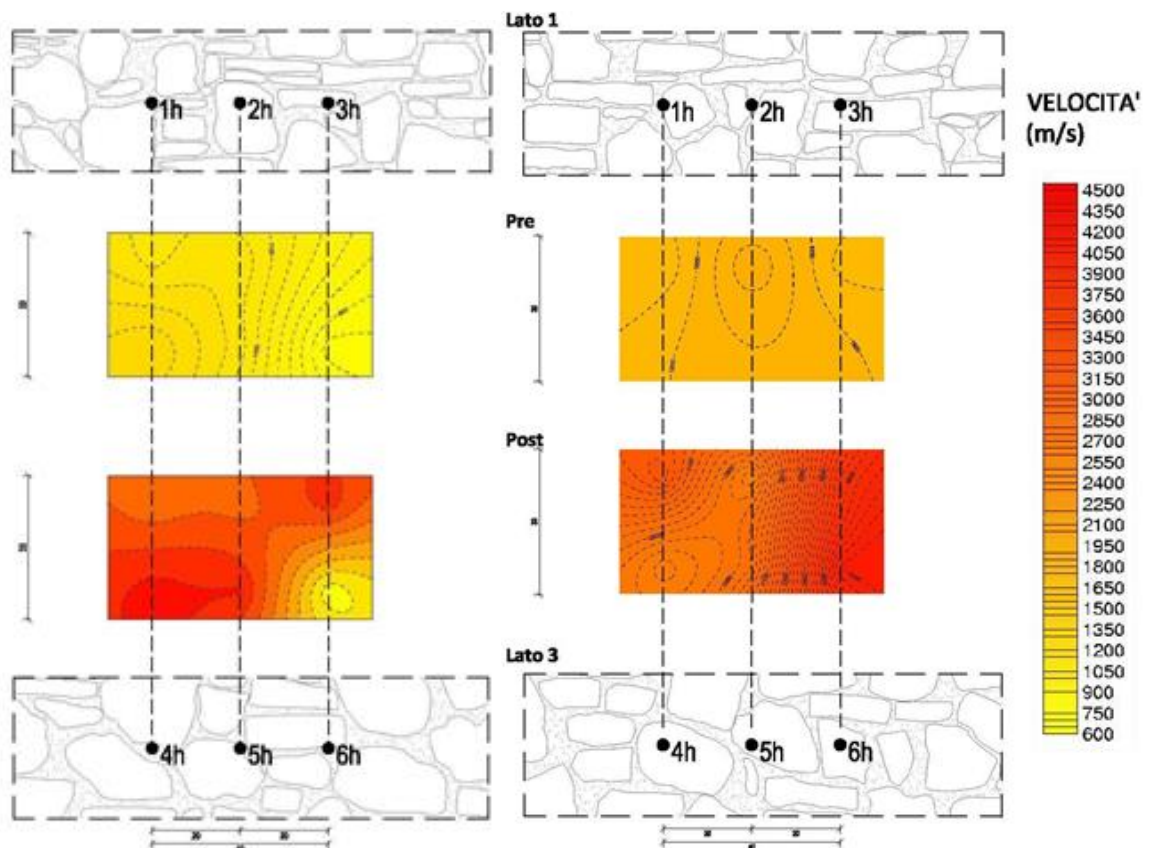


Fig. 4.62 – Confronto tra le tomografie orizzontali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura D (sinistra) ed E (destra) (Fattori e Scaggiante, 2011).

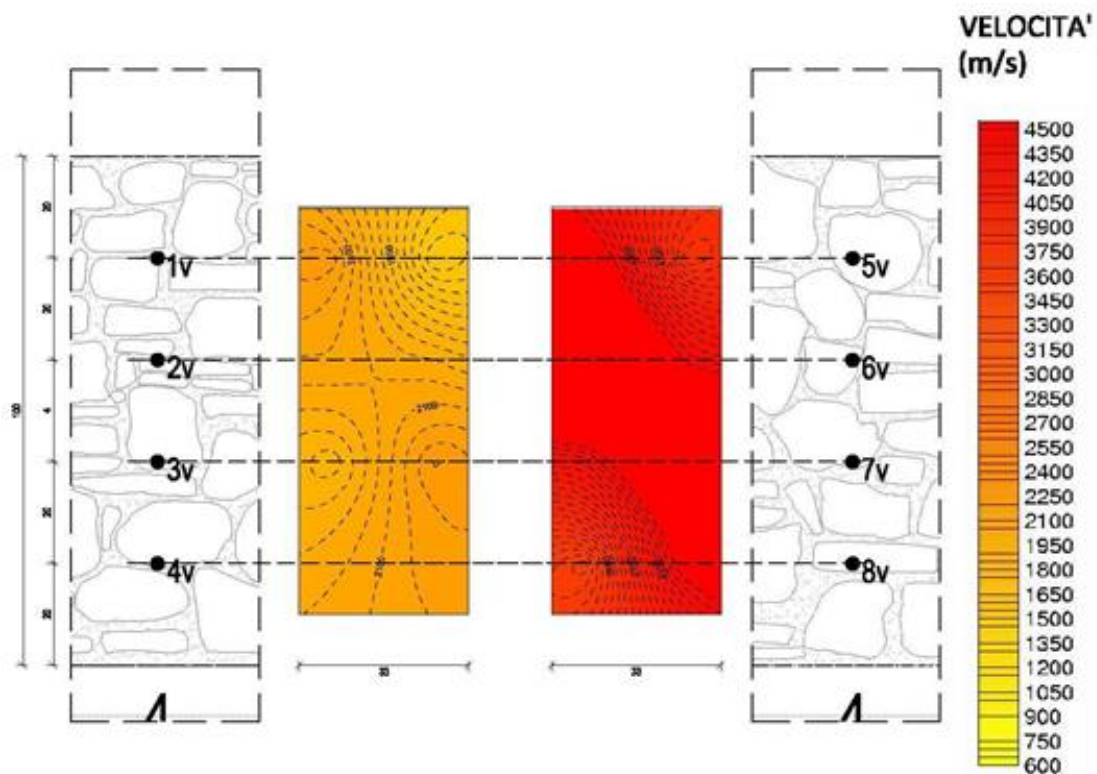


Fig. 4.63 - Confronto tra le tomografie verticali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura D (Fattori e Scaggiante, 2011).

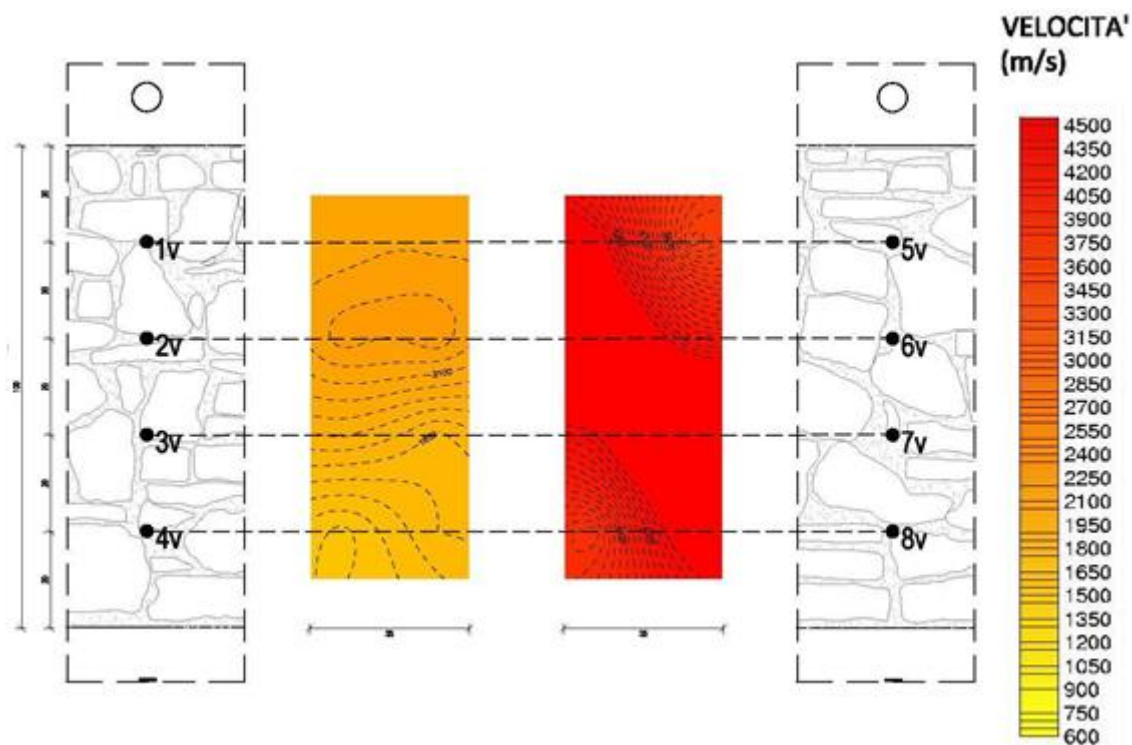


Fig. 4.64 - Confronto tra le tomografie verticali pre e post iniezione realizzate su pannelli appartenenti alle tipologie di muratura E (Fattori e Scaggiante, 2011).

4.13 VALUTAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ DI PROVE DI INDAGINE SPERIMENTALE A DIVERSO GRADO DI INVASIVITÀ SU MURATURA IN PIETRA A TRE PARAMENTI (ZANCHETTA, 2013)

Il lavoro di Tesi sviluppato dall’ingegner Gloria Zanchetta, inserito all’interno di due più ampi progetti denominati NIKER (New Integrated Knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from Earthquake-induced Risk) e ReLUIIS II (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), ha avuto l’obiettivo di approfondire la conoscenza e di valutare l’affidabilità nell’impiego di metodologie diagnostiche sperimentali a diverso grado di invasività e di valutare l’efficacia di interventi di consolidamento su murature in pietra a tre paramenti, consolidate e non, costruite con materiali e tecniche tipici delle murature dell’edilizia minore e diffusa italiana (Zanchetta, 2013).

Questo programma sperimentale ha rappresentato la naturale conclusione del progetto di ricerca nato dalla collaborazione tra Università di Padova, Tassullo s.p.a. e Enea-C.R. Casaccia e volto all’individuazione di adeguate soluzioni per il consolidamento di murature in pietra multistrato (vedi Paragrafo 4.12).

Nello specifico, questa indagine ha interessato gli stessi pannelli murari in pietra a tre paramenti utilizzati dagli ingegneri Fattori e Scaggiante nel proprio lavoro di Tesi. I diversi campioni, tutti provenienti dal muro di tipologia A (vedi Paragrafo 4.12.1) sono stati testati con l’intento di ottenere importanti informazioni in merito all’efficacia dei metodi di indagine utilizzati e della tecnica di consolidamento scelta.

Come già precedentemente affermato, l’esecuzione di prove soniche (dirette, indirette e tomografiche) su campioni sperimentali appositamente realizzati garantisce un maggior controllo e una miglior qualità dei risultati rispetto alle indagini in sito in quanto l’oggetto di indagine è noto a priori, condizione non sempre riscontrabile nei casi reali. L’applicazione di indagini soniche in laboratorio rappresenta inoltre un’ottima opportunità per calibrare il metodo sonico e definire un intervallo di velocità cui poter fare riferimento nelle sperimentazioni future.

4.13.1 GENERALITÀ

L'indagine complessiva è stata sviluppata su pannelli ricavati dalla muratura A, realizzata secondo i criteri descritti nel Paragrafo 4.12.1 e costituita da due paramenti esterni in conci di pietra sbazzati disposti a corsi suborizzontali e da un riempimento interno costituito dal materiale di risulta della sbazzatura stessa. Per la sua realizzazione sono state utilizzate pietre calcaree provenienti dalla cava di Cugnano (BL) e malta T30V prodotta dalla Tassullo s.p.a..

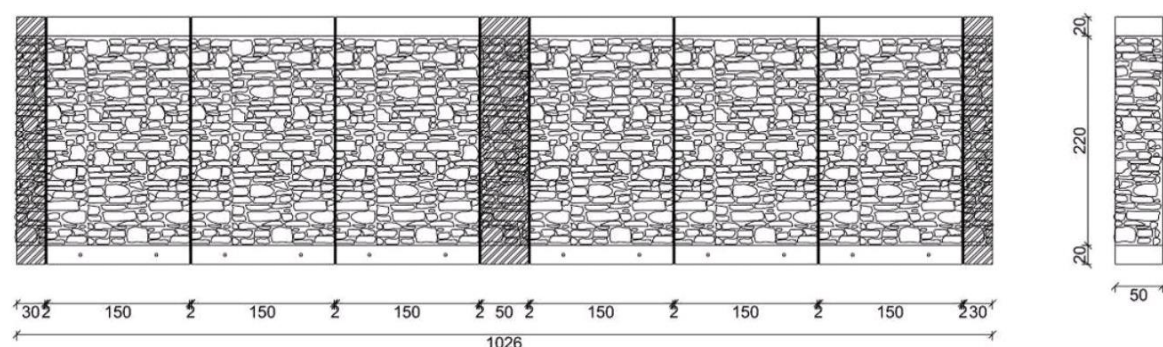


Fig. 4.65 – Prospetto di realizzazione del muro A (sopra) e risultato finale della sua costruzione (sotto) (Fattori e Scaggiante, 2011).

Il programma di indagine, sviluppato in collaborazione con il Politecnico di Milano, si è articolato in una serie esaustiva di prove (distruttive, semi-distruttive e non distruttive) e ha consentito di approfondire e completare le analisi svolte nelle precedenti sperimentazioni. Nello specifico sono state realizzate:

- Prove soniche dirette e indirette;
- Tomografie soniche;

- Prove di martinetto piatto;
- Prove di compressione diagonale.

Le indagini maggiormente invasive sono state realizzate con l'intento di determinarne l'affidabilità in termini di qualità dei risultati e di valutare le caratteristiche meccaniche della murature.

Per maggior attinenza con questo lavoro di Tesi, vengono di seguito trattati solamente i risultati relativi alla metodologia tomografica sonora, con l'obiettivo di dimostrarne l'attendibilità sia in termini assoluti che nel confronto con altre tecniche di indagine non distruttive. Il riepilogo dettagliato delle prove soniche eseguite sui diversi pannelli murari è riportato nella Tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Programma sperimentale delle indagini soniche eseguite sui pannelli (Zanchetta, 2013).

Pannello	Consolidamento	Ente	Stato	Tipologia di prova sonora
A ₁	No	POLIMI	Non fessurato	1 diretta
				1 tomografia verticale
				2 tomografie orizzontali
A ₃	No	POLIMI	Non fessurato	1 diretta
				1 indiretta verticale
		UNIPD	Non fessurato	2 tomografie orizzontali
A ₄	Si	POLIMI	Non fessurato	dirette
				indirette
		UNIPD	Fessurato	1 tomografia orizzontale
A ₅	Si	POLIMI	Non fessurato	1 diretta
		UNIPD	Non fessurato	1 diretta*

* Prova sonora eseguita prima e dopo l'intervento di consolidamento (Fattori e Scaggiante, 2011)

4.13.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

In collaborazione con il Politecnico di Milano sono state eseguite alcune indagini tomografiche sui pannelli non iniettati A₁, A₃ e A₄. Queste prove sono risultate essere molto utili per il perfezionamento delle conoscenze relative alle

caratteristiche delle murature e per la realizzazione di un confronto tra la metodologia operativa impiegata dall'ente milanese e quella utilizzata nel Laboratorio di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova.

In questo paragrafo vengono presentati i risultati delle prove eseguite dal Politecnico di Milano sul pannello A₁ e da entrambe le università sul pannello A₃ e sono inoltre esposti gli esiti relativi alle indagini realizzate dal Dipartimento Icea sul muro A₄, utilizzati per eseguire una comparazione tra la tecnica sonica e quella georadar.

Sul pannello A₁ sono state eseguite due tomografie orizzontali (H₁ e H₂) ed una verticale (V₁), tutte caratterizzate da una griglia di elaborazione quadrata di dimensione 15 cm. Tutti i dati relativi a queste prime analisi sono tratti dalla Tesi "Applicazioni di tomografie acustiche per lo studio del costruito storico e la progettazione degli interventi conservativi", scritta nel 2012 dall'ingegner Marco Fabio Meana.

L'elaborazione della prima prova orizzontale è stata eseguita con l'ausilio di combinazioni differenti di misurazioni effettive e fittizie e secondo una discretizzazione di pixels variabile. Con il termine "misure effettive" vengono indicate tutte le rilevazioni dei tempi di volo elaborate sulla base dei dati effettivamente acquisiti, mentre con l'espressione "misure fittizie" viene fatto riferimento ad alcuni valori calcolati a posteriori e non corrispondenti a misurazioni realmente acquisite (Meana, 2012).

Per maggior conformità con la metodologia utilizzata dal Dipartimento Icea, vengono qui presentati esclusivamente i risultati relativi all'elaborazione eseguita utilizzando le misure effettive.

In relazione all'immagine tomografica ottenuta, si è potuto constatare che il software di elaborazione (TomoTool) non sembra essere in grado di individuare la reale morfologia interna della muratura. La mappa della distribuzione delle velocità non ha infatti mostrato l'esistenza di zone di migliori caratteristiche meccaniche in corrispondenza delle due fasce murarie esterne e non ha indicato la presenza di una porzione più interna caratterizzata da basse velocità. Tale inadempienza può essere dovuta sia ad errori di calcolo degli algoritmi di risoluzione che allo scarso

numero di traiettorie acquisite le quali, pur consentendo la risoluzione matematica del problema tomografico, potrebbero non essere state sufficienti per ottenere una mappa delle velocità realistica.

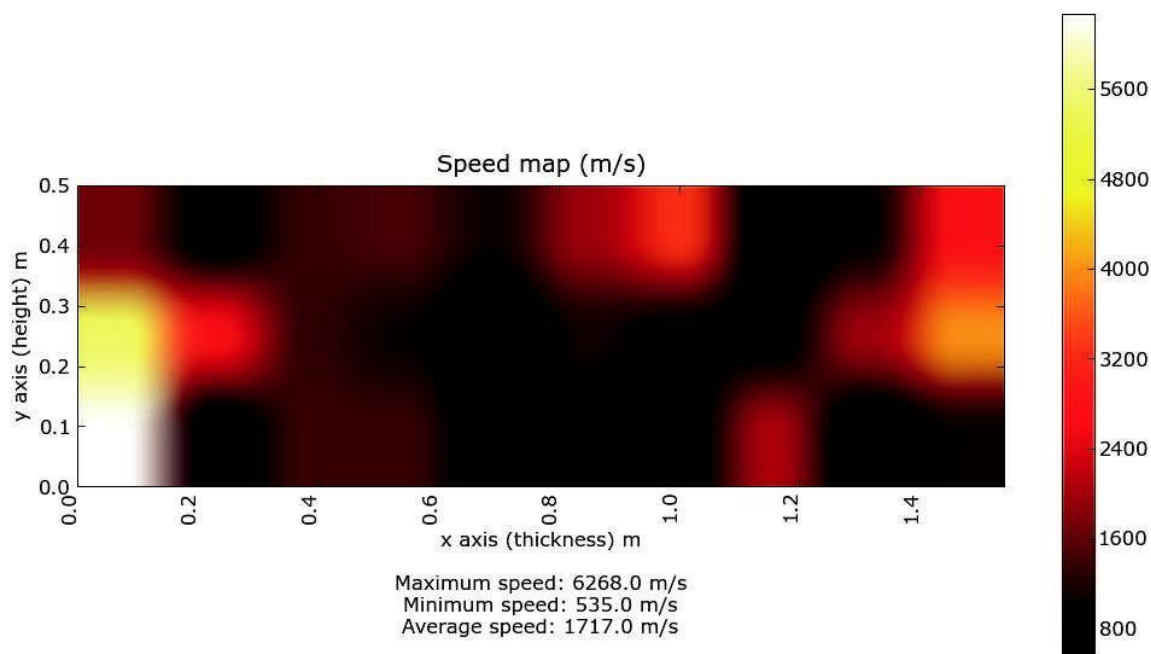


Fig. 4.66 - Mappa tomografica della sezione orizzontale H₁ del pannello A₁ (Meana, 2012).

Così come avvenuto per la prima acquisizione orizzontale, anche per la sezione H₂, posta a 67 cm dal suolo, l'immagine tomografica è stata ottenuta elaborando solamente le 47 misurazioni raccolte in cantiere. Sulla base delle caratteristiche costruttive del pannello e delle considerazioni sviluppate nelle precedenti sperimentazioni, si è inizialmente supposto che l'elaborazione potesse restituire una distribuzione delle velocità caratterizzata da valori più elevati rispetto a quelli misurati nella tomografia H₁ (posta ad una quota maggiore).

Nella realtà, osservando l'immagine risultante non è stato possibile identificare né la stratificazione orizzontale supposta né la differenziazione delle velocità tra i due paramenti esterni e il nucleo centrale. Dal confronto con i risultati relativi all'elaborazione H₁ è stata addirittura riscontrata una diminuzione generalizzata delle velocità, in netto contrasto con l'ipotesi iniziale. Purtroppo non è stato possibile stabilire le reali cause di questo comportamento, ma si è supposto

che il decremento possa essere dovuto all'utilizzo di materiali dotati di peggiori caratteristiche meccaniche o all'insufficienza del numero di dati acquisiti.

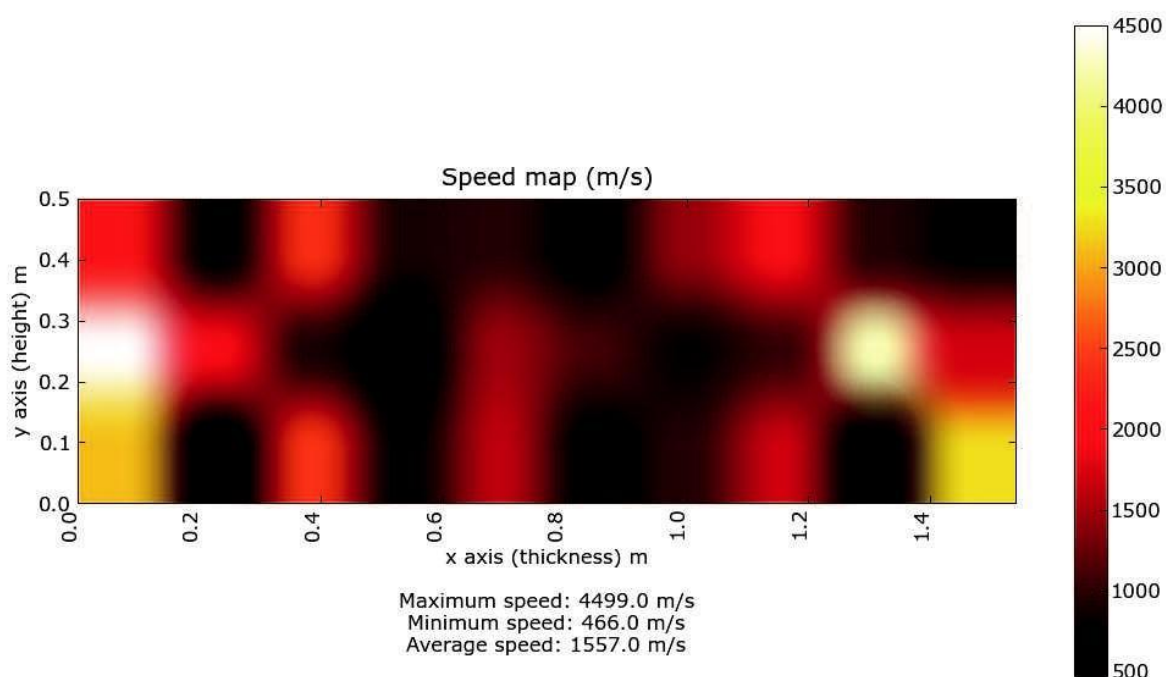


Fig. 4.67 – Mappa tomografica della sezione orizzontale H₂ del pannello A₁ (Meana, 2012).

L'ultima tomografia eseguita sul pannello A₁, quella verticale, è stata realizzata con l'obiettivo di evidenziare le eventuali differenze materiche e di tessitura esistenti tra i diversi livelli del campione. Così come nelle precedenti, anche in questa elaborazione sono state utilizzate solamente le 47 misurazioni effettive adottate in cantiere.

La mappa tomografica ha evidenziato la presenza di due zone caratterizzate da bassi valori di velocità (circa 600÷900 m/s), una in corrispondenza del basamento del pannello e una disposta ad una quota medio-alta. Nelle restanti porzioni, la muratura è risultata essere abbastanza omogenea e caratterizzata da una distribuzione delle velocità prossima ai 1500 m/s.

Questi risultati hanno ovviamente disatteso le aspettative iniziali e hanno generato ulteriori dubbi sulla credibilità delle indagini tomografiche effettuate in questa particolare campagna diagnostica. Ciononostante non si è ritenuto corretto formulare un giudizio sulle prove tomografiche basato esclusivamente sul soddisfacimento di una serie di ipotesi arbitrarie.

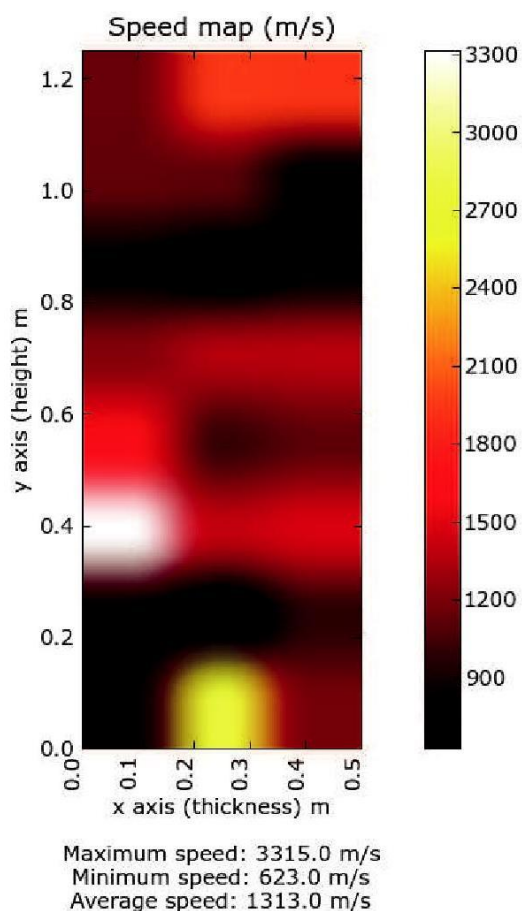


Fig. 4.68 – Mappa tomografica della sezione verticale V₁ del pannello A₁ (Meana, 2012).

Sul campione di muratura A₃ sia l'Università di Padova che il Politecnico di Milano hanno eseguito due prove tomografiche orizzontali poste a quote differenti: la tomografia T₁ (H₂ per il Politecnico) a quota 67 cm e la tomografia T₂ (H₁ per il Politecnico) a quota 174 cm.

In merito alle elaborazioni svolte dall'università milanese, è importante sottolineare la profonda modifica avvenuta nella fase di misurazione dei tempi di volo. In questa seconda analisi infatti, la griglia di acquisizione è stata infittita fino ad ottenere delle celle quadrate di dimensione 9 cm. Inoltre è stato stabilito di adottare una collocazione alternata dei punti di battuta e ricezione, sia lungo lo stesso lato che rispetto alla superficie opposta. Questa particolare disposizione ha consentito di ottenere un numero di misurazioni effettive molto maggiore rispetto a quello delle tomografie realizzate sul pannello A₁ (228 contro 47), sia nel caso delle acquisizioni manuali che in quello delle acquisizioni automatizzate attraverso

l'utilizzo dell'algoritmo AIC. Ogni elaborazione è stata eseguita utilizzando tre differenti risoluzioni dei pixels, rispettivamente 7, 8 e 9 cm e imponendo diversi valori di velocità massima ammissibile.

Le tomografie realizzate dall'Università di Padova hanno invece richiesto la disposizione dei punti di battuta-ricezione con un passo maggiore rispetto a quello utilizzato dal Politecnico (16 cm contro 9 cm) a causa di alcuni limiti presenti nel software. Il numero di misurazioni ottenute (132), inferiore a quello del Politecnico, è stato comunque sufficiente per garantire la completa copertura dell'intera sezione.

Per favorire un confronto approfondito tra le due diverse tecniche di indagine è stato necessario realizzare sia tomografie complete (su 4 lati) che parziali (su 2 lati). Per il Politecnico tale scelta ha comportato un raddoppio del lavoro di acquisizione in quanto, a seguito della disposizione sfalsata dei punti di battuta-ricezione, è stato necessario eseguire due diverse campagne di misurazione parziale per ogni sezione.

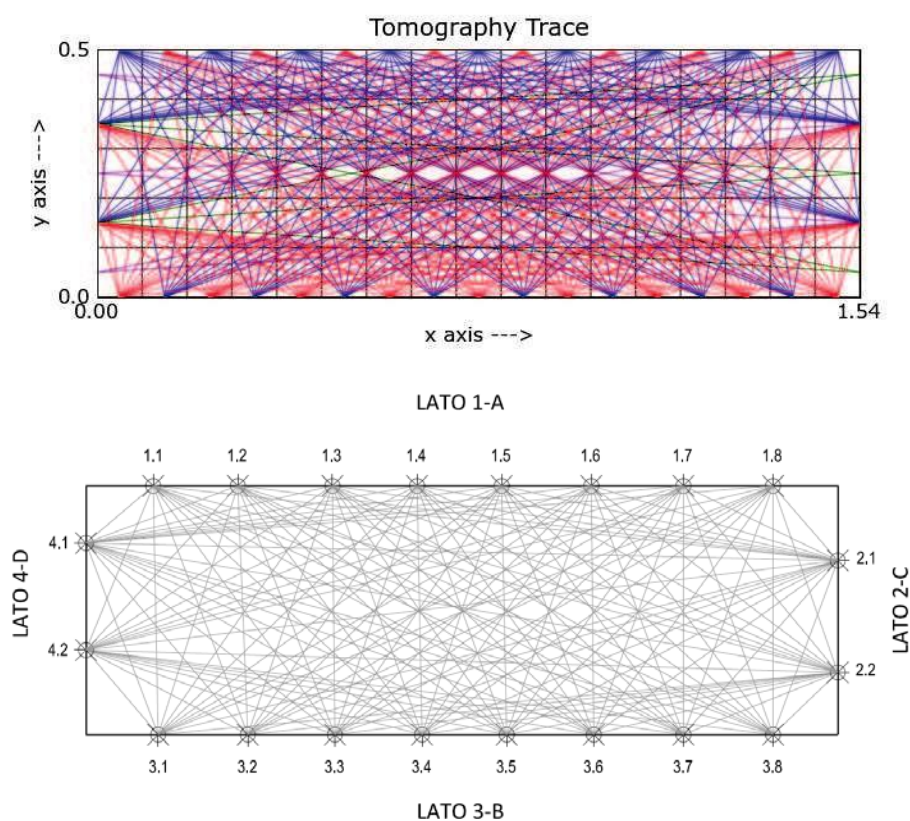


Fig. 4.69 – Confronto tra lo schema di prova completo del Politecnico di Milano (sopra) (Meana, 2012) e lo schema completo del Dipartimento icaa (sotto) (Zanchetta, 2013).

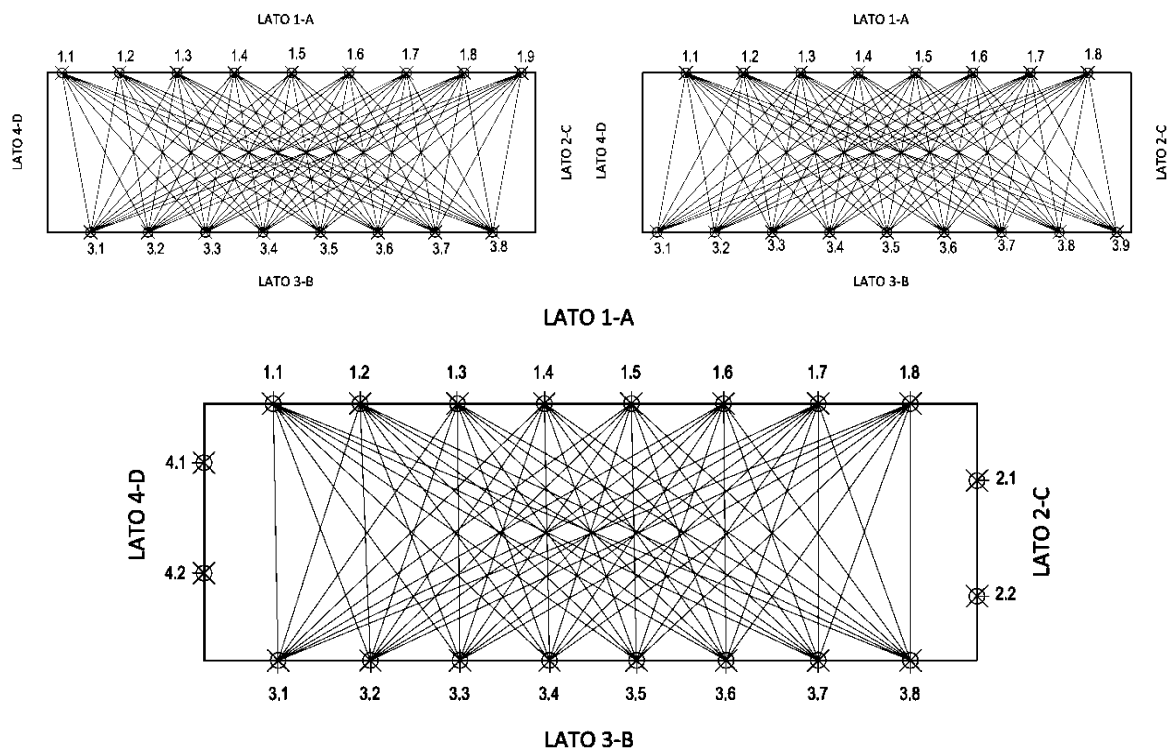


Fig. 4.70 – Confronto tra gli schemi di prova parziali del Politecnico di Milano (sopra) (Meana, 2012) e lo schema parziale del Dipartimento ica (sotto) (Zanchetta, 2013).

L'elenco delle elaborazioni tomografiche eseguite dai due istituti su ciascuna sezione considerata è riportato nella Tabella 4.8.

Tabella 4.7 – Programma sperimentale delle indagini soniche eseguite sui pannelli, C = tomografia completa, A = tomografia parziale o adattata (Zanchetta, 2013).

Muro	Tomografia				Strumentazione	Elaborazione	
	Quota	Tipo	N°	Sigla		I	II
A ₃	67 cm	Completa	1	A ₃ -C-T ₁	UNIPD	UNIPD	
			1	A ₃ -C-T ₁ *	POLIMI	POLIMI AIC	POLIMI
		Adattata	1	A ₃ -A-T ₁	UNIPD	UNIPD	
			2	A ₃ -A-T ₁ *	POLIMI	POLIMI AIC	UNIPD
		A ₃ -A-T ₁ **					
	174 cm	Completa	1	A ₃ -C-T ₂	UNIPD	UNIPD	
			1	A ₃ -C-T ₂ *	POLIMI	POLIMI man.	POLIMI
		Adattata	2	A ₃ -C-T ₂ *	POLIMI	UNIPD	
A ₃ -C-T ₂ **							

* Prima disposizione dei punti di misurazione per la campagna di indagine adattata (parziale)

** Seconda disposizione dei punti di misurazione per la campagna di indagine adattata (parziale)

La mappa tomografica A₃-C-T₁ ha permesso di evidenziare chiaramente la presenza di tre differenti zone all'interno del campione: un settore, posto nella parte sinistra del pannello, caratterizzato da velocità di attraversamento abbastanza elevate (circa 2200÷2600 m/s), una piccola porzione, collocata nella zona destra della muratura in corrispondenza del nucleo interno, contraddistinta da basse velocità (circa 1000 m/s) e un'ultima zona centrale omogenea e diffusa dotata di caratteristiche intermedie (circa 1200÷1400 m/s). Il miglioramento delle condizioni riscontrato in prossimità del limite sinistro è stato probabilmente causato dall'infiltrazione di parte della miscela di iniezione utilizzata durante le operazioni di consolidamento del pannello A₄ adiacente.

In merito alla prova A₃-C-T₁* elaborata dal Politecnico si riportano i risultati di due differenti analisi: una relativa all'acquisizione manuale, realizzata imponendo un valore massimo di velocità ammissibile pari a 3500 m/s e una dimensione dei pixels di risoluzione uguale a 8 cm e una derivante dall'acquisizione automatizzata, caratterizzata dallo stesso valore di velocità e da un differente dimensionamento delle maglie (9 cm). In entrambe le elaborazioni è apparsa evidente la presenza della stessa suddivisione interna individuata dall'analisi svolta dall'Università di Padova. L'unica differenza riscontrabile è derivata dal confronto tra le velocità medie calcolate che, nel caso delle tomografie realizzate dal Politecnico, sono risultate essere leggermente maggiori.

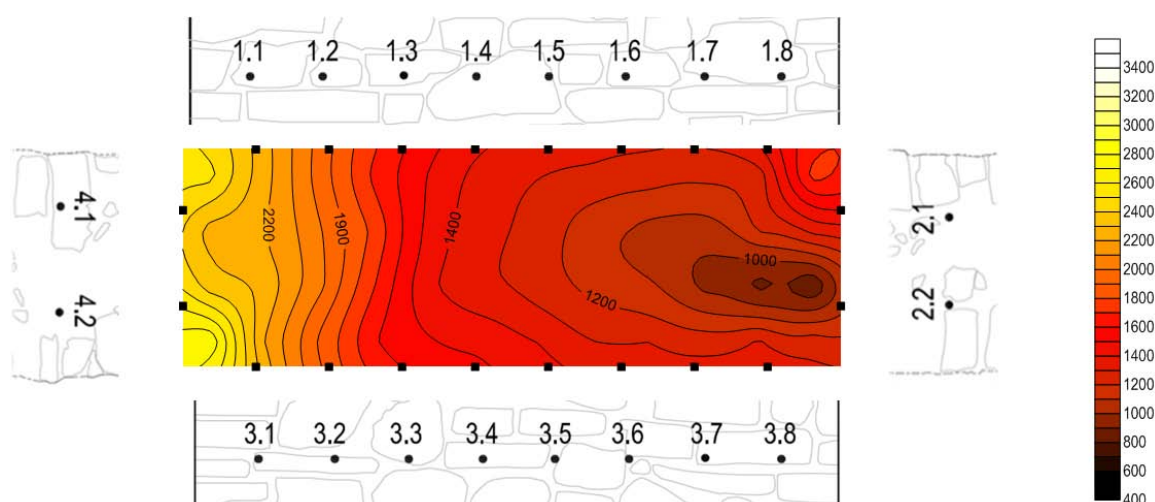


Fig. 4.71 – Mappa tomografica A₃-C-T₁ (Zanchetta, 2013).

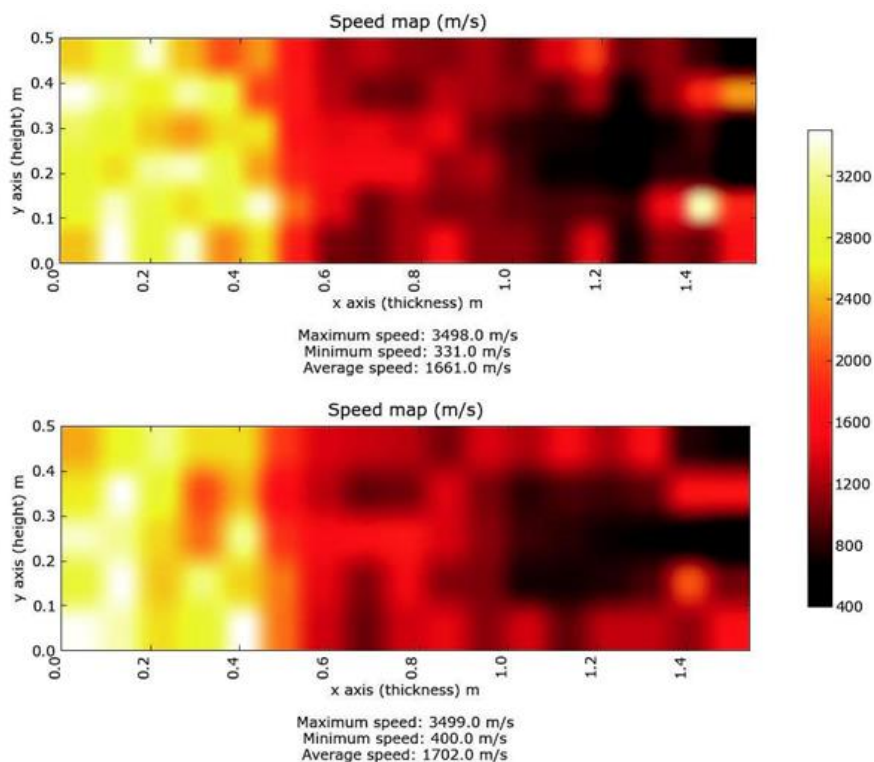


Fig. 4.72 – Mappe tomografiche A₃-C-T₁* relative all’acquisizione manuale (sopra) ed automatizzata (sotto) (Meana, 2012).

La mappa tomografica A₃-C-T₂ ha chiaramente evidenziato quella che si è ipotizzata essere la reale morfologia interna del pannello: le zone corrispondenti ai due paramenti esterni della muratura sono infatti risultate essere caratterizzate da velocità più elevate (circa 1400÷1800 m/s) rispetto a quelle della fascia coincidente con il nucleo incoerente interno (circa 900 m/s).

Le due tomografie A₃-C-T₂*, elaborate secondo gli stessi criteri descritti nel caso precedente, hanno restituito delle distribuzioni di velocità del tutto simili a quelle individuate nell’elaborazione dell’Università di Padova. Le uniche differenze riscontrabili sono derivate dal confronto tra le velocità medie calcolate, leggermente maggiori nelle indagini del Politecnico e dall’analisi delle porzioni di muratura poste in prossimità dei lati più corti e degli angoli del pannello. Sulla base di questa seconda comparazione è stata riscontrata la presenza di alcune zone caratterizzate da velocità diametralmente opposte tra loro. Tale differenza è stata attribuita alla diversa programmazione degli algoritmi di risoluzione che, nel caso del software del Politecnico, non permettono l’interpolazione dei valori di velocità delle celle della griglia.

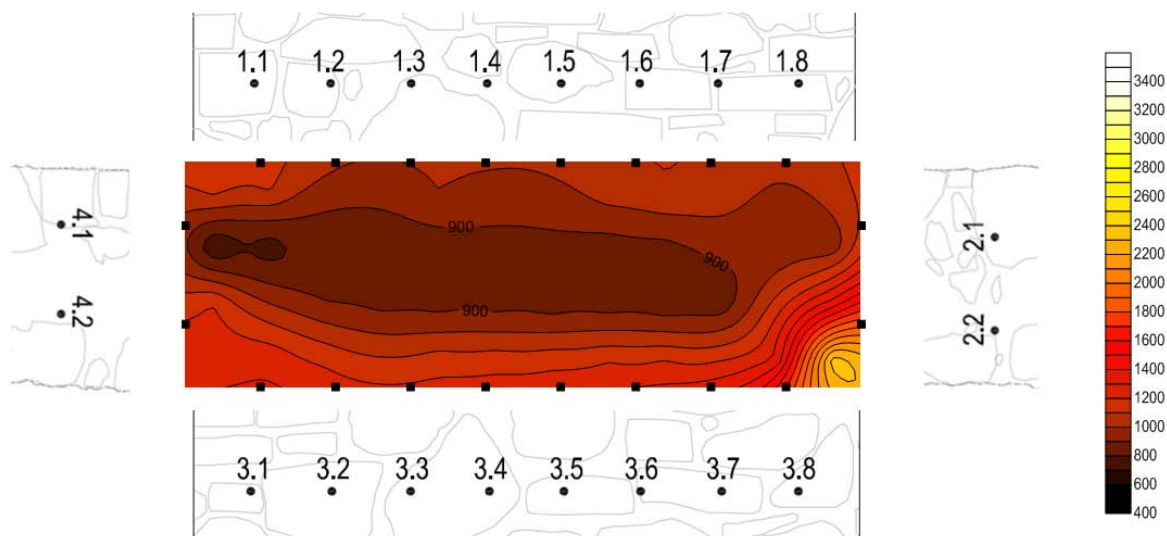


Fig. 4.73 - Mappa tomografica A3-C-T2 (Zanchetta, 2013).

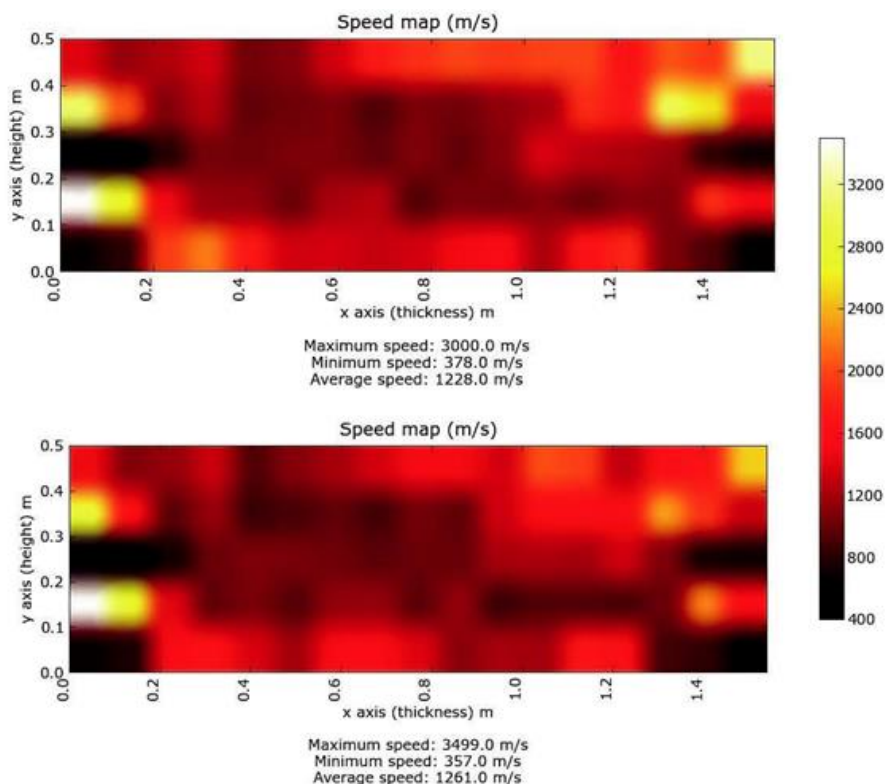


Fig. 4.74 - Mappe tomografiche A3-C-T2* relative all'acquisizione manuale (sopra) ed automatizzata (sotto) (Meana, 2012).

Le tomografia parziali A3-A-T1, A3-A-T1* e A3-A-T1**, realizzate utilizzando le strumentazioni e i software di elaborazione di entrambe le università, hanno restituito delle distribuzioni di velocità molto simili tra loro e analoghe a quelle ottenute nelle analisi complete precedentemente espone.

In relazione a questi primi confronti è stato possibile riscontrare sia la discreta affinità tra i due metodi di indagine utilizzati che l'indipendenza dei risultati dal numero di dati acquisiti ed elaborati.

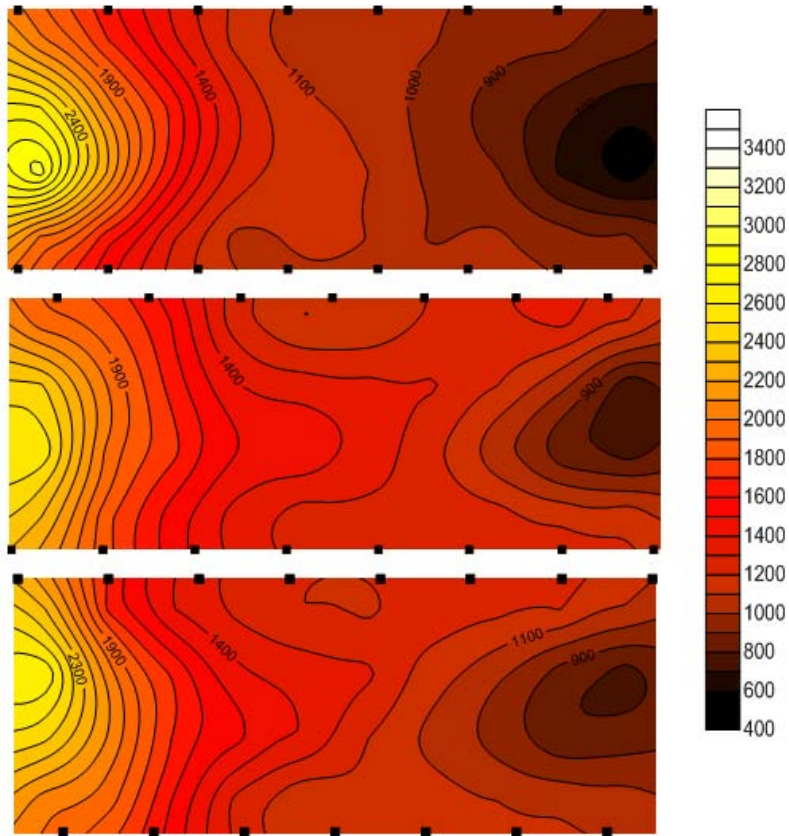


Fig. 4.75 – Mappe tomografiche A_3-A-T_1 , $A_3-A-T_1^*$ e $A_3-A-T_1^{**}$ elaborate con il software dell'Università di Padova (Zanchetta, 2013).

Le tomografie parziali $A_3-A-T_2^*$ e $A_3-A-T_2^{**}$, realizzate utilizzando i dati acquisiti con le strumentazioni del Politecnico ed elaborati con il software di Padova, hanno restituito, a differenza delle precedenti, delle distribuzioni di velocità molto contrastanti. Tali differenze sono state attribuite all'influenza di alcuni particolari fattori quali l'utilizzo di dati provenienti da maglie di acquisizione differenti o l'introduzione di errori manuali nella fase di affinamento dei dati effettuata con il software IRSNew. La mancanza di risultati paragonabili a quelli ottenuti in quest'ultima elaborazione non ha però permesso di definire chiaramente le reali cause del problema.

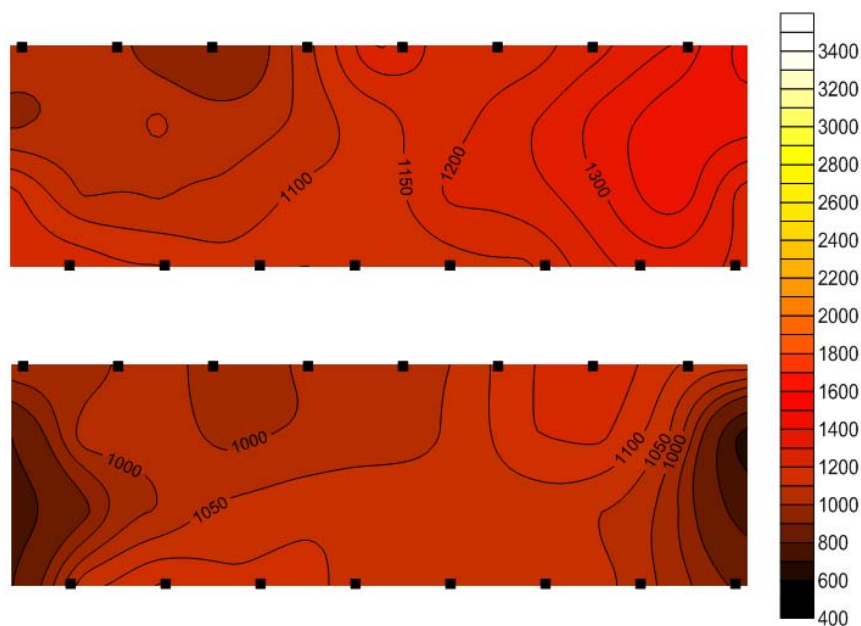


Fig. 4.76 – Mappe tomografiche A3-A-T2* e A3-A-T2** elaborate con il software dell’Università di Padova sulla base dei dati acquisiti con la strumentazione del Politecnico (Zanchetta, 2013).

L’ultimo campione di muratura disponibile, il pannello A4 iniettato e fessurato a seguito di una prova di compressione diagonale, è stato testato con l’obiettivo di impostare un confronto tra le indagini tomografiche realizzate con il metodo georadar (GPR) e quelle derivanti dall’elaborazione dei dati sonici.

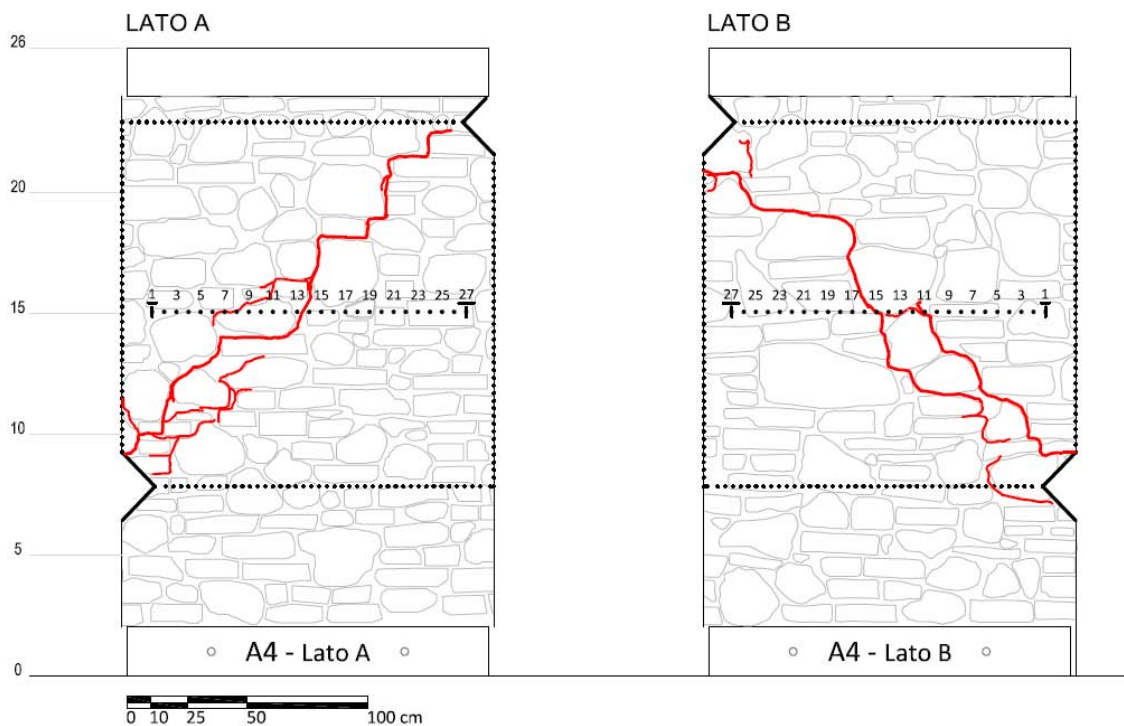


Fig. 4.77 – Prospetto del pannello A4 e disposizione dei punti di acquisizione (Zanchetta, 2013).

Entrambe le tipologie di analisi, eseguite su una sezione di muratura posta a 1,50 metri dal livello del terreno, hanno previsto la disposizione di 27 punti di acquisizione, allineati su ciascun lato lungo del pannello secondo un intervallo costante di 5 cm.

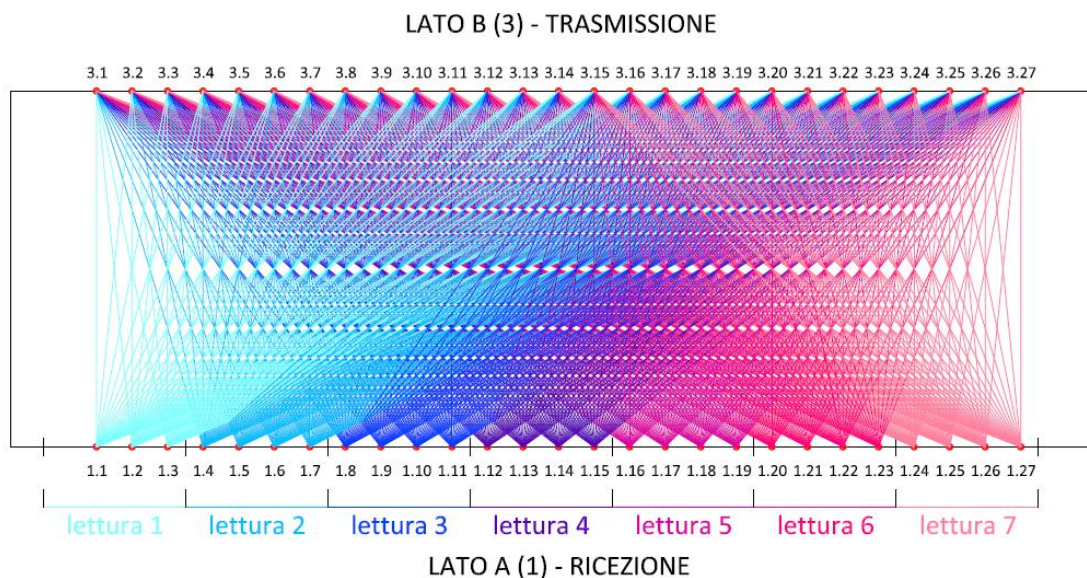


Fig. 4.78 – Schema delle letture soniche eseguite (Zanchetta, 2013).

La mappa tomografica sonica ha chiaramente evidenziato quella che si è ipotizzata essere la reale situazione interna del pannello in seguito all'esecuzione della prova di compressione diagonale: la porzione posta in corrispondenza delle grosse fessurazioni trasversali è infatti risultata essere caratterizzata da velocità inferiori (circa 1500÷1700 m/s) rispetto a quelle delle zone adiacenti (superiori a 2000 m/s). Tuttavia, nel confronto tra le due metodologie, l'indagine sonica è apparsa essere meno dettagliata rispetto a quella georadar, caratterizzata da una distribuzione delle velocità meglio definita e verosimilmente più attendibile. Tale differenza, con ogni probabilità legata ad errori di post-processamento dei dati acquisiti, ha comunque permesso di esprimere un giudizio positivo sulla qualità e la validità di entrambe le tecniche di indagine.

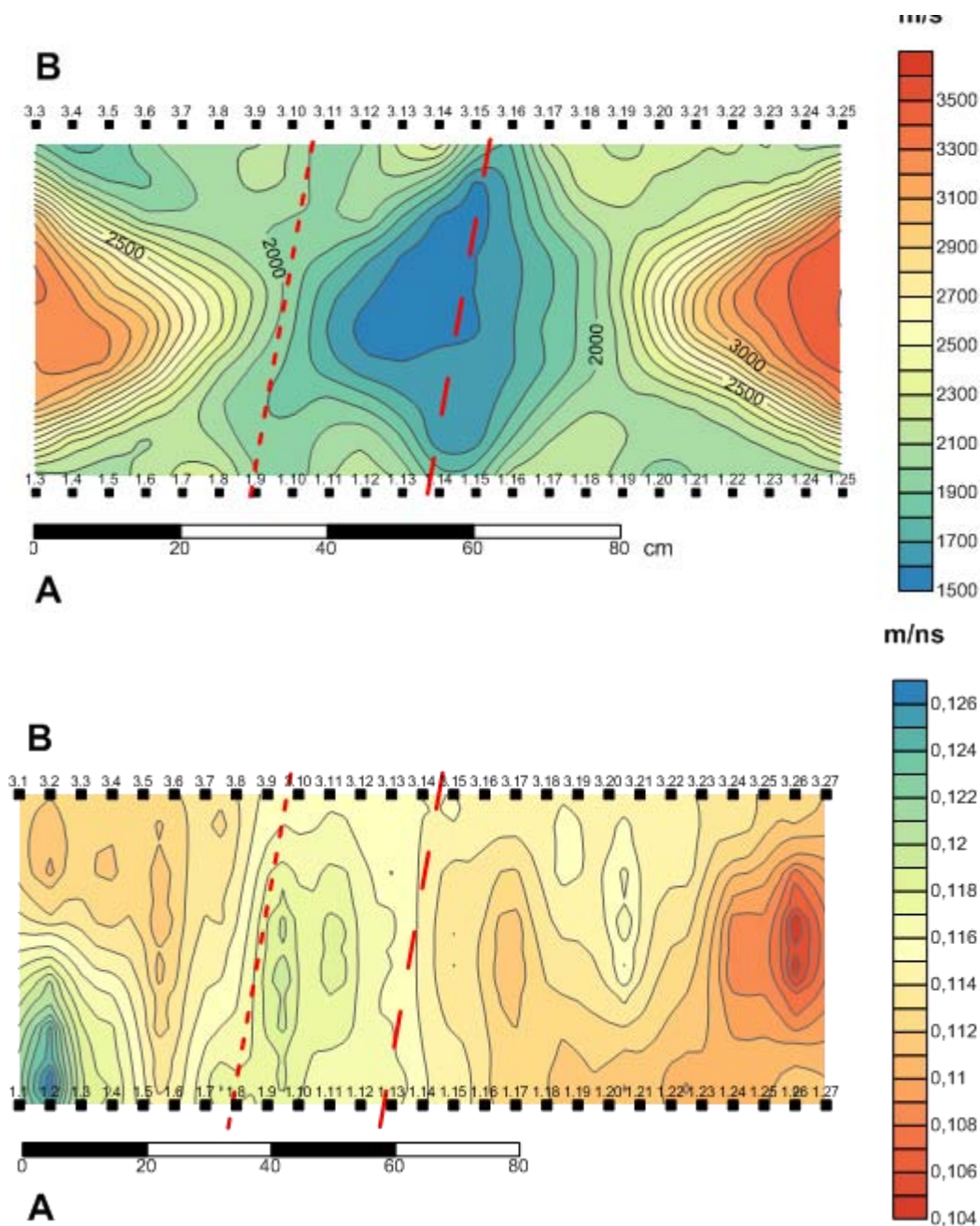


Fig. 4.79 - Confronto tra tomografie soniche e radar realizzate sul pannello A4 (Zanchetta, 2013).

4.14 OSSERVAZIONI

La catalogazione e la presentazione delle ricerche sperimentali eseguite in sito e in laboratorio è stato indispensabile per ricostruire l'attuale panorama delle conoscenze riguardanti sia l'oggetto delle indagini, ossia le murature storiche, che lo stato di evoluzione della metodologia tomografica sonica. In particolar modo questa analisi ha permesso di formulare le seguenti considerazioni:

- Tra tutte le metodologie di indagine non distruttive, la tomografia sonica è quella che può fornire informazioni più affidabili e complete in merito alle condizioni morfologiche interne delle pareti. Allo stato attuale questa tipologia di prova non permette di valutare quantitativamente i più interessanti parametri meccanici delle murature ma, tra tutte le metodologie non invasive, è quella che garantisce la miglior correlazione con i dati provenienti da prove distruttive, per antonomasia le più caratterizzanti dal punto di vista fisico-meccanico.
- La prova si rivela essere particolarmente utile per lo studio dell'efficacia degli interventi di consolidamento. In tutti i casi analizzati infatti, il confronto tra i dati ricavati nelle fasi precedente e successiva alle operazioni di rinforzo ha evidenziato, se non il miglioramento, quantomeno una variazione del grado di consolidazione interno delle murature. Questi risultati sottolineano ancora una volta la reale predisposizione della tecnica nell'individuazione della distribuzione dei danni presenti nei pannelli indagati.
- L'applicazione della prova a strutture le cui caratteristiche sono note a priori, presupposto difficile da ottenere negli edifici storici protetti, è una condizione indispensabile al fine di calibrare la metodologia di indagine e uniformarne le modalità operative.
- La velocità di propagazione delle onde soniche all'interno di una parete è influenzata sia dalla morfologia interna (distribuzione degli elementi, presenza di vuoti o fessure, ecc.) che dalle caratteristiche dei singoli elementi componenti la muratura (laterizi, pietre porose, rocce dure, ecc.). Nello specifico, la velocità dei segnali è direttamente proporzionale al grado di consistenza dell'intero pannello e alla densità dei materiali costituenti.
- La qualità dei risultati ottenuti sembra essere fortemente correlata al numero di misurazioni effettuate e, di conseguenza, al passo di distribuzione dei punti di battuta-ricezione.

- La metodologia tomografica applicata alle murature storiche trae i suoi fondamenti da discipline mediche e geofisiche. Purtroppo però il suo utilizzo nel campo ingegneristico e strutturale pare essere ancora limitato e poco approfondito. Al di là dei principi teorici di funzionamento, restano infatti da definire specificatamente molteplici parametri e funzionalità il cui contributo potrebbe essere determinate per garantire l'evoluzione della prova (passo di acquisizione, numero di misurazioni, tipologia di ray tracing, soglie di velocità ecc.). Sia le operazioni pratiche di raccolta dei dati che lo sviluppo degli algoritmi di risoluzione della prova sono tuttora empirici e legati alle abitudini dei diversi operatori.
- Dal punto di vista dell'evoluzione tecnologica, questa metodologia è quella più suscettibile a nuovi sviluppi. I molteplici studi affrontati in questi anni hanno evidenziato le potenzialità di questo metodo di indagine ma ne hanno spesso tralasciato o trascurato i difetti. Oltre ai già citati limiti fisici legati alle modalità di propagazione delle onde soniche e alla loro attenuazione, è importante tenere in considerazione le problematiche connesse all'applicazione pratica della prova. Gli eccessivi tempi di acquisizione ed elaborazione, uniti alla mancanza di prescrizioni normative tecnico-pratiche hanno contribuito a confinare notevolmente l'utilizzo della prova a favore di metodologie nettamente più rapide e meno dispendiose dal punto di vista computazionale (con risultati ovviamente peggiori).

CAPITOLO 5

DEFINIZIONE DELLE PROBLEMATICHE

Nel seguente capitolo viene analizzata in maniera approfondita la metodologia attualmente utilizzata per l'esecuzione delle indagini soniche tomografiche. Vengono individuate, in maniera ordinata e sistematica, tutte le problematiche e i limiti che affliggono le diverse fasi del procedimento e ne vengono dedotte alcune possibili soluzioni, sia di immediata applicabilità che di futuro studio.

5.1 GENERALITÀ

La procedura di indagine sonora, così come descritta nei capitoli precedenti, appare essere caratterizzata da modalità di realizzazione standardizzate e relativamente rigide. Nella realtà, le scelte concettuali ed esecutive compiute dagli operatori, oltre a modificare concretamente i procedimenti di acquisizione ed elaborazione, possono causare importanti variazioni negli esiti finali. Per garantire la massima qualità delle soluzioni risultano quindi importanti lo studio e la normalizzazione di tutte quelle componenti del processo esecutivo caratterizzate da un elevato livello di soggettività. Verranno ora descritte le modalità di esecuzione delle prove attualmente messe in atto dagli operatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale dell'Università di Padova, con particolare riferimento alle indagini tomografiche.

5.2 FASI PRELIMINARI

La fase di acquisizione può avere inizio solo dopo l'individuazione delle zone di muratura più adatte all'esecuzione delle indagini. La scelta, nel caso di indagini di laboratorio, risulta essere limitata dalla disponibilità numerica e dalla dimensione dei pannelli di prova, mentre può rivelarsi più complessa nel caso di prove realizzate in siti o cantieri di elevata estensione o complessità. Per quest'ultima condizione, in cui la conoscenza delle strutture è spesso limitata ad un'analisi visiva e tattile, è importante fare riferimento a criteri di scelta che siano il più possibile oggettivi e che tengano in giusta considerazione le peculiarità e le caratteristiche del corpo di fabbrica oggetto di indagine.

Il primo passo da compiere consiste nell'individuazione delle porzioni di edificio più adatte allo scopo dell'indagine. La scelta viene solitamente compiuta sulla base dei seguenti criteri:

1. Individuazione di zone fruibili dagli operatori e sufficientemente estese da accogliere l'intera batteria di attrezzature di prova. È importante ricordare che le apparecchiature di acquisizione, spesso concepite per applicazioni di laboratorio, risultano essere ingombranti e pesanti e quindi difficilmente trasferibili in cantieri eccessivamente vasti o complessi. Inoltre il costo dei macchinari impone agli operatori una certa accortezza nella disposizione e nell'utilizzo degli stessi, con conseguente limitazione delle possibili zone di indagine. Generalmente vengono quindi individuate aree sicure in cui sia possibile installare un bancone per la strumentazione di prova;
2. Possibilità di accesso a tutti i lati dell'elemento strutturale, sia esso una parete o un pilastro. Spesso, soprattutto negli edifici con sviluppo in altezza (strutture multipiano, strutture a torre, campanili), la scelta dei paramenti da indagare è limitata dall'impossibilità di raggiungere zone poste a quote elevate. È quindi importante verificare la presenza o eventualmente la possibilità di installazione di impalcature o ponteggi;
3. Scelta di murature e pilastri strutturalmente significativi o caratteristici di alcune zone dell'edificio, onde limitare il carattere di puntualità della prova

stessa. I test sonici sono spesso inserite all'interno di un più vasto e completo piano di indagine conoscitiva in cui i risultati derivanti dalle diverse tipologie di prova devono poter essere interconnessi e valutati complessivamente. Lo studio di elementi che, pur disponendo delle caratteristiche sopradescritte, risultino essere isolati o non significativi, può quindi rivelarsi inutile e dispendioso;

4. Disponibilità di un allacciamento alla rete elettrica.



Fig. 4.1 – Individuazione di un pannello significativo ai fini dell'indagine (sinistra) ed esecuzione di una prova in una zona complessa ma accessibile agli operatori e alla strumentazione (destra).

Terminata la fase di identificazione delle zone più consone all'esecuzione dei test sonici, l'operatore procede alla selezione delle sezioni di muratura da indagare valutando le seguenti caratteristiche:

1. Il quadro indagato deve essere sufficientemente isolato, cioè posto in zone in cui la presenza di altri elementi (strutturali o non) non alteri il comportamento dell'elemento e, di conseguenza, i risultati dell'indagine. A tal fine è consigliabile disporre i punti di battuta e ricezione ad una quota sufficientemente distaccata dall'intradosso del solaio soprastante e dall'estradosso di quello sottostante e ad adeguata distanza da aperture o elementi strutturali quali paraste o imposte delle volte. È inoltre consigliabile evitare zone di muratura poste in prossimità di impianti o di loro diramazioni (canaline, scatole di derivazione, ecc.);

2. Ove possibile, in assenza di murature di pregio o soggette a rigidi vincoli di conservazione, è consigliabile individuare pareti scarificate o in cui sia consentita la rimozione degli strati di intonaco superficiali. Questo accorgimento assicura una maggior qualità in fase di acquisizione poiché evita quella contaminazione dei dati strettamente legata alle diverse caratteristiche fisiche dei materiali costituenti la muratura.



Fig. 4.2 – Individuazione della miglior posizione possibile per il pannello di prova (sinistra) e scarificazione di una parete da indagare (destra).

Individuati tutti i campioni di muratura da sottoporre ad indagine, è possibile procedere all'esecuzione pratica della prova.

5.3 FASE DI ACQUISIZIONE

Al completamento delle fasi preliminari sopraindicate, succedono due diverse operazioni tra loro connesse: la scelta e la creazione della maglia di acquisizione e il montaggio e la messa in esecuzione di tutta l'attrezzatura di prova. Gli strumenti necessari e le modalità di svolgimento dell'indagine sono stati trattati approfonditamente nel Capitolo 3; per tale motivo, nei paragrafi seguenti, verranno analizzate esclusivamente quelle peculiarità che caratterizzano, sia nell'individuazione della griglia di acquisizione che nelle modalità pratiche di realizzazione della prova, le scelte e le procedure di esecuzione proprie degli operatori del Dipartimento ICEA. Per ognuna di esse verranno individuati pregi e

difetti e, in questo secondo caso, verranno fornite alcune possibili alternative volte a migliorare il procedimento complessivo.

5.3.1 MAGLIA DI ACQUISIZIONE

La scelta della maglia di acquisizione, cioè della distribuzione dei punti di battuta e ricezione sulla superficie di indagine, riveste un ruolo fondamentale, ma spesso trascurato, nel corretto compimento della prova.

Solitamente il criterio di selezione della distanza tra i punti di battuta o ricezione è legato esclusivamente a due parametri e alle implicazioni che questi comportano:

- L'attenuazione del segnale;
- La lunghezza d'onda.

È risaputo che un qualsiasi segnale, durante la sua propagazione, subisce una riduzione dell'ampiezza che è direttamente proporzionale alla lunghezza del percorso che esso compie (distanza dalla sorgente) e all'eterogeneità del mezzo che attraversa (smorzamento per discontinuità). La prima condizione ha ripercussioni sulla dimensione massima indagabile del campione: pur sapendo che nei mezzi omogenei, a parità di condizioni, all'aumentare della frequenza diminuisce l'attenuazione, è impensabile e scorretto eseguire misurazioni tra punti di battuta e ricezione posti a grande distanza tra di essi. La noncuranza verso questa condizione comporta l'acquisizione di dati gravemente compromessi e inutili ai fini dello studio.

L'attenuazione dovuta all'eterogeneità del mezzo è invece più strettamente collegata alla scelta della frequenza del segnale e quindi al secondo criterio di individuazione della maglia di acquisizione. Essendo la muratura, per intrinseche caratteristiche strutturali, un mezzo notevolmente eterogeneo, decade la condizione per cui ad alte frequenze corrispondono minori attenuazioni. È proprio questo il motivo per cui è sconsigliabile eseguire prove ultrasoniche su paramenti storici. Questo vincolo limita notevolmente il range di possibili frequenze

utilizzabili per l'esecuzione della prova ma non è sufficiente per individuare l'intervallo delle possibili distanze a cui disporre i punti.

Risulta quindi necessario prendere in considerazione il secondo parametro sopracitato: la lunghezza d'onda. Questa, oltre ad essere notoriamente funzione della frequenza ($f = 1/\lambda$) e quindi già di per sé limitata delle considerazioni precedentemente esposte, impone un altro determinante limite: un generico dispositivo, sia esso l'occhio umano o uno strumento di misura, non è in grado di rilevare oggetti (nel nostro caso vuoti o fessure) le cui dimensioni lineari siano inferiori alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata dal dispositivo stesso. Ciò implica che, per mappare in maniera precisa la sezione indagata, sarebbe necessario utilizzare lunghezze d'onda molto piccole. Questa affermazione entra però in contrasto con ciò che è stato esposto precedentemente in quanto la scelta di piccole lunghezze d'onda implicherebbe la trasmissione di segnali ad alte frequenze, poco adatti allo studio delle murature.

Ecco dunque che risulta necessario definire un compromesso che permetta di evitare l'eccessiva attenuazione del segnale e, al contempo, consenta di individuare, il più precisamente possibile, i vuoti e le inclusioni presenti all'interno della muratura.

In aggiunta a ciò è importante considerare che l'attuale livello di sviluppo tecnologico non consente una rapida esecuzione delle indagini soniche. I tempi necessari per l'acquisizione dei dati sonici sono direttamente proporzionali alle modalità di prova (diretta, indiretta, tomografica), alle dimensioni dell'elemento da indagare e alla fittezza della maglia dei punti di battuta-ricezione. In particolare, la scelta di un numero elevato di posizioni di martellamento rallenta notevolmente lo svolgimento del test.

Sulla base di queste considerazioni e dei suggerimenti dell'ingegner Monteforte è stato individuato un passo di acquisizione pari a circa 20 cm, ove applicabile, o comunque non inferiore a 10-15 cm.



Fig. 4.3 – Disposizione dei punti di misurazione (sinistra) e maglia di acquisizione completa (destra).

5.3.1.1 CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE

Nella pratica, le indicazioni proposte precedentemente sono spesso assoggettate alle scelte e alle necessità degli operatori o alle peculiarità riscontrate nei diversi elementi indagati. Valutando una serie di campagne di prova, è stato possibile riscontrare alcune particolari modalità esecutive non ordinarie che, più di altre, sono utilizzate durante la fase di creazione della maglia di acquisizione. Tra queste, le più ricorrenti sono:

1. Disposizione dei punti di battuta con passo irregolare;
2. Scelta di una maglia di acquisizione fatta senza considerare lo spessore della muratura indagata;
3. Scelta di una maglia di acquisizione fatta senza considerare la relazione con la mesh di elaborazione;
4. Creazione di griglie di punti eccessivamente lunghe in proporzione agli spessori da indagare.

Tutte le considerazioni sopra esposte verranno attentamente analizzate nel paragrafo successivo. Per ognuna di esse saranno individuate le eventuali problematiche e le relative conseguenze e, ove possibile o necessario, saranno indicate le ipotetiche soluzioni o le plausibili alternative.

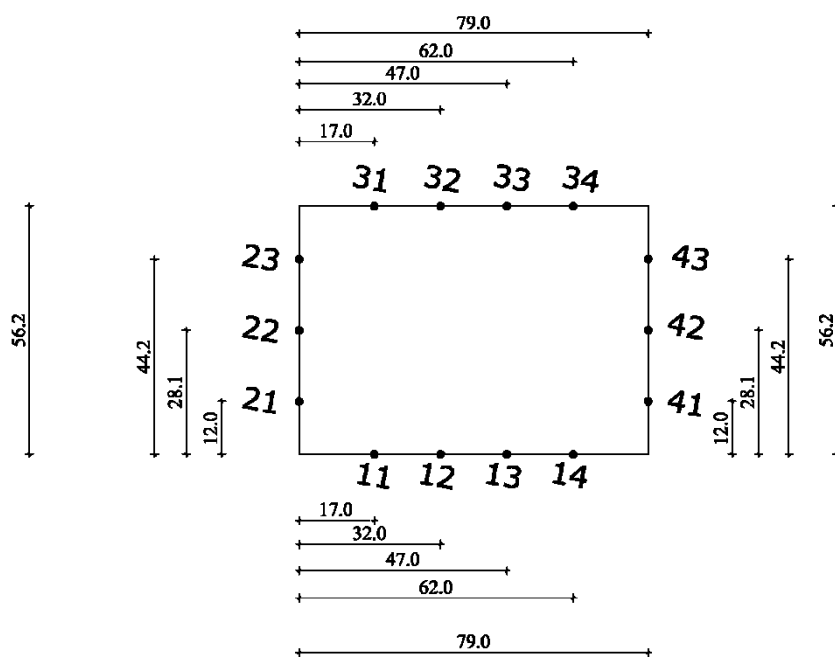


Fig. 4.4 - Disposizione dei punti di acquisizione con passo irregolare.

5.3.1.2 CONSEQUENZE, SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE

La decisione di disporre i punti di battuta e ricezione ad intervalli irregolari non sembra comportare né particolari vantaggi né conseguenze negative all'interno del procedimento complessivo di indagine e, per tale motivo, non ne è chiara l'utilità. La collocazione dei punti con passo costante resta quindi la soluzione più valida e semplice, in quanto evita agli operatori di generare e propagare eventuali errori di calcolo e misura dalla fase di acquisizione a quella di elaborazione.

Anche le considerazioni espresse nei punti 2 e 3 non sembrano poter influenzare la qualità dell'indagine. Dopo un'iniziale ed errata valutazione, si era ritenuto opportuno instaurare una stretta relazione di uguaglianza tra le dimensioni della maglia di acquisizione e quelle della maglia di elaborazione. Inoltre, la necessità di utilizzare mesh di forma quadrata, unita alla considerazione precedente, implicava l'obbligo di valutare il passo di acquisizione sulla base dello spessore della muratura indagata, allo scopo di garantire una costante spaziatura lungo i diversi lati di indagine e una conseguente regolarità nelle dimensioni della maglia di calcolo.

Nella pratica, l'aggiornamento del software di elaborazione dei dati sonici, di cui tratteremo approfonditamente nei capitoli successivi, ha permesso di superare questi vincoli dimensionali, garantendo così una maggior libertà di valutazione delle caratteristiche dell'acquisizione.

L'unico eventuale limite legato allo spessore della muratura, può presentarsi nella scelta del passo dei punti nelle prove tomografiche complete (cioè su 4 lati). In questo particolare caso, la necessità di avere a disposizione un buon numero di acquisizioni lungo i lati corti dell'elemento da indagare, unita all'esigenza di conservare la regolarità di distribuzione dei punti, impone la scelta di una maglia di acquisizione dimensionata in relazione alla lunghezza dei lati stessi. Eccessive spaziature tra i punti, comporterebbero la registrazione di un numero di dati insufficienti per la corretta valutazione della qualità della muratura mentre, la disposizione con passo ravvicinato, andrebbe contro i principi fisici della propagazione delle onde soniche espressi nei paragrafi precedenti.

In merito alla massima lunghezza della griglia di acquisizione, è necessario fare alcune opportune considerazioni.

Per quanto detto nei paragrafi precedenti, l'attenuazione nella propagazione delle onde è un dato di fatto non trascurabile. Se la componente strutturale è direttamente proporzionale alla densità del mezzo attraversato e quindi, variabile da caso a caso, quella geometrica non pare poter essere condizionata da fattori esterni diversi dalla lunghezza del percorso compiuto dall'onda sonora. Per tale motivo, nelle indagini tomografiche è consigliabile evitare di realizzare griglie di dimensioni eccessive o, comunque, di acquisire segnali congiungenti punti posti a distanze eccessive in quanto, la loro scarsa significatività, potrebbe influire negativamente sulla qualità dell'elaborazione. A queste considerazioni va aggiunta l'esigenza di prendere in considerazione la relazione tra la lunghezza della maglia e lo spessore della muratura, in quanto anche i segnali generati con angoli eccessivamente acuti rispetto al piano di battitura possono risultare poco significativi ai fini dell'elaborazione.

Allo stato attuale non esiste un criterio univoco per la definizione della massima dimensione della griglia di acquisizione e dell'angolo del ventaglio di

misure oltre il quale non considerare talune misurazioni. È però possibile fare riferimento alle indicazioni fornite dalla professoressa Rita Deiana, del Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica (DBC) che, attraverso alcuni studi empirici validi per la tecnica di indagine georadar, ha individuato in 45 gradi il limite oltre il quale è plausibile non considerare validi i dati acquisiti per eccessiva distanza tra sorgente e ricevitore.

Per il futuro progresso della tecnica sonica, è comunque consigliabile incentrare parte degli studi sull'individuazione di questi limiti al fine di eliminare, ove possibile, ogni possibile causa di errore.

5.3.2 MODALITÀ DI ACQUISIZIONE

Anche nelle procedure di svolgimento della prova, così come avvenuto nella scelta delle maglie di acquisizione, è possibile individuare delle modalità operative abbastanza standardizzate e legate sia alle tradizioni esecutive che ai limiti degli strumenti di indagine.

Ciononostante, analizzando e valutando le varie esperienze svolte all'interno di diverse campagne di prova, è stato possibile individuare alcuni punti su cui può essere conveniente intervenire o che, a prescindere dalla loro effettiva realizzazione, possono essere considerati come buoni spunti per future ricerche sul miglioramento delle modalità di prova.

5.3.2.1 CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE

La scelta di determinate procedure esecutive può dipendere dalla metodologia di lavoro adottata dagli operatori, dalle caratteristiche della muratura indagata e dal livello tecnologico delle apparecchiature di prova. In merito a queste condizioni, è possibile e opportuno fare alcune osservazioni:

1. La gestione del martello strumentato è affidata totalmente agli operatori;
2. Le modalità di battuta possono variare;
3. Il numero delle battute utili può mutare notevolmente da prova a prova;

4. Il numero di acquisizioni è fortemente vincolato dai tempi necessari per l'esecuzione della prova e l'elaborazione dei dati e dalle caratteristiche tecniche degli strumenti di misura;
5. La gestione degli accelerometri è condizionata dalle proprietà della superficie muraria e dal numero di addetti disponibili per l'esecuzione della prova.

5.3.2.2 CONSEQUENZE, SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE

L'apporto di modifiche ai punti indicati nel paragrafo precedente potrebbe garantire un aumento della qualità dei dati registrati in quanto, la variazione delle modalità esecutive, comporterebbe l'acquisizione di segnali meno rumorosi o statisticamente più validi. Questi mutamenti sarebbero possibili intervenendo in due ambiti:

- Il miglioramento delle condizioni di svolgimento della prova a favore per gli operatori;
- L'evoluzione delle attrezzature di indagine.

L'utilizzo dei martelli strumenti è gestito totalmente dagli addetti ai lavori. Questa situazione può avere delle ripercussioni sulla qualità dei segnali in quanto, ogni singola battuta, viene fortemente condizionata dai movimenti umani. Intensità, precisione e fermezza possono variare notevolmente da colpo a colpo e da operatore ad operatore e causare variazioni delle caratteristiche delle onde soniche generate. Gli effetti negativi possono inoltre essere amplificati dai considerevoli tempi di esecuzione della prova in quanto, la dilatazione del periodo di acquisizione, comporta l'aumento della stanchezza degli operatori a scapito della bontà della battuta.

Allo stato attuale non è possibile quantificare la reale influenza della componente umana sulla rumorosità dei segnali generati. È comunque ipotizzabile che l'utilizzo di strumenti di battuta automatici possa garantire una maggiore costanza e precisione nell'esecuzione della prova e contribuire a migliorare, anche se non sensibilmente, la qualità dei dati acquisiti. In futuri studi potrebbe quindi

rivelarsi utile la sperimentazione di nuovi apparecchi basati su meccanismi a pendolo o a molla accuratamente progettati e tarati per non risultare instabili o eccessivamente invasivi. Come ulteriore vantaggio, lo sviluppo di strumentazioni automatiche di battitura potrebbe garantire la diminuzione del numero di operatori necessari per l'esecuzione delle campagne di prova, con conseguente diminuzione dei costi complessivi.

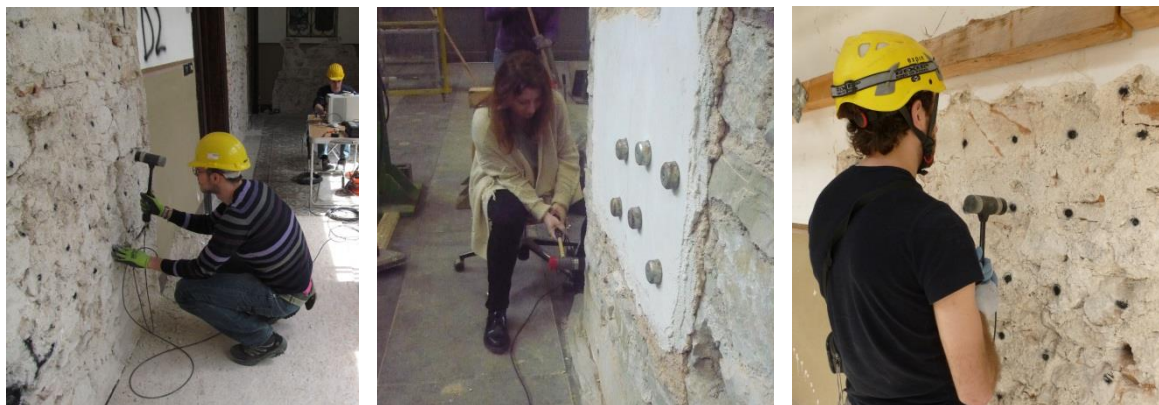


Fig. 4.5 – Alcune modalità di battitura.

Come precedentemente accennato, l'eccessiva e spesso inevitabile dilatazione dei tempi di indagine comporta l'aumento della stanchezza degli addetti alla prova. Questa può comunque essere calmierata intervenendo sia nella fase preliminare di individuazione delle sezioni da indagare che in quella di scelta delle modalità di battitura.

In merito al primo punto, pur rispettando tutti i criteri di identificazione dei campioni espressi precedentemente, è consigliabile evitare campagne di prova fatte su porzioni di muratura ubicate in punti scomodi o difficilmente raggiungibili, come ad esempio le zone poste ad altezze eccessive, le fasce basse o quelle distanti dalle posizioni raggiungibili dagli operatori.

In fase di svolgimento della prova si può invece intervenire sulle modalità di battitura. È possibile individuare due diverse tipologie di esecuzione:

- Battitura continua;
- Battitura controllata.

Nella prima metodologia, per ogni coppia di punti battuta-ricezione, l'addetto al martello continua nel suo lavoro di battitura fino a che non vengono acquisiti 3 segnali di qualità accettabile. Questa tecnica viene generalmente utilizzata quando gli operatori impegnati nell'indagine non possono rimanere in contatto tra loro per coordinarsi, anche se alcuni la preferiscono anche in campagne di prova standard. Questa modalità può, a lungo andare, rivelarsi molto dispendiosa in quanto, soprattutto nelle indagini in cui la muratura è notevolmente rovinata, risulta necessario effettuare un elevatissimo numero di battute prima di individuare i 3 segnali utili. Nel caso in cui la scelta fosse legata esclusivamente all'impossibilità di collegamento tra i tecnici, è consigliabile sfruttare mezzi di comunicazione a distanza come walkie-talkie o cellulari.

Nel metodo di battitura controllata invece, l'addetto allo strumento di acquisizione dirige l'operatore che gestisce il martello indicandogli l'istante in cui eseguire la battuta. Nella maggior parte dei casi analizzati e proporzionalmente al peso del martello strumentato utilizzato nell'indagine, questa tecnica sembra ridurre notevolmente il numero di colpi totali e limitare conseguentemente la stanchezza degli operatori.

All'eccessiva lunghezza dei tempi di preparazione, di esecuzione e, come sarà spiegato nei prossimi paragrafi, di elaborazione, è legata anche la decisione di acquisire solamente 3 informazioni per ogni coppia di punti battuta-ricezione. L'analisi dei dati è basata sul periodo ipoteticamente impiegato da un segnale per compiere il tragitto compreso tra due punti, calcolato come media dei tempi acquisiti per ogni coppia sorgente-ricevitore. L'incremento del numero massimo di misure registrate potrebbe comportare due vantaggi:

- Da un punto di vista statistico, garantirebbe l'aumento della precisione nel calcolo della media dei tempi. All'aumentare del numero degli elementi di un campione corrisponde infatti la diminuzione della deviazione standard, un parametro che rappresenta il grado di dispersione delle misure rispetto al valor medio. Nella pratica, un numero elevato di acquisizioni

consentirebbe di effettuare una maggiore compensazione, ossia una più efficace limitazione degli errori dovuti all'acquisizione di dati errati;

- Da un punto di vista di elaborazione, consentirebbe agli operatori di limitare ulteriormente gli errori attraverso la rimozione completa di tutti i dati considerati sbagliati a priori. L'eliminazione dal calcolo di tutte le componenti indesiderate garantirebbe inoltre un'ulteriore affinamento della compensazione, con conseguente miglioramento della qualità delle informazioni utili per l'analisi. Avendo a disposizione solamente tre misurazioni, questa cancellazione risulterebbe impossibile e deleteria perché comprometterebbe ulteriormente la già limitata precisione statistica dei calcoli.

Purtroppo, allo stato attuale, l'aumento del numero di rilevazioni risulta assolutamente impraticabile perché dilaterrebbe in maniera esponenziale i già elevati tempi di acquisizione ed elaborazione dei dati.

L'ultima osservazione in merito alle modalità di acquisizione delle indagini soniche riguarda la gestione degli accelerometri e, in particolar modo, la modalità di sostegno di questi alla superficie muraria. In fase di indagine si utilizzano diverse tecniche:

- Sostegno manuale;
- Sostegno con basette e cola a caldo;
- Sostegno con basette e viti a muro.

Nella prima metodologia, uno o più operatori sorreggono manualmente gli accelerometri mantenendoli a contatto con la superficie. Da un punto di vista qualitativo questa tecnica può implicare un incremento della rumorosità nei segnali acquisiti dovuta all'instabilità del sostegno (cambiamenti di posizione, stanchezza, ecc.). Da un punto di vista operativo invece, comporta l'aumento delle persone necessarie per il completamento della prova in quanto l'operatore destinato al controllo degli accelerometri non può dedicarsi ad altre mansioni e, comunque, non può gestire più di due rilevatori per volta. Solitamente questa modalità viene

utilizzata per l'esecuzione di prove in trasparenza, in cui è sufficiente l'impiego un solo accelerometro, o in accoppiamento con altre tecniche di sostegno.

Il ricorso alle basette risulta necessario nel caso in cui il numero di accelerometri da sostenere sia cospicuo, (comunque non superiore a 7 a causa dei limiti della strumentazione di acquisizione) nonostante possa implicare l'aumento dei tempi di preparazione dell'indagine. Nella pratica, i singoli rilevatori sono avvitati su appositi supporti metallici e fissati sulla superficie per mezzo di colla a caldo o viti da muro. L'utilizzo delle basette è comunque vincolato al valore della muratura da indagare e alla qualità dei materiali costituenti la parete stessa. Essendo una metodologia rischiosa (la colla a caldo può rovinare gli strati più superficiali) e invasiva (per le viti a muro è necessario eseguire fori col trapano), non può essere utilizzata per analisi di elementi vincolati o di pregio. Inoltre il suo funzionamento non è garantito su supporti incoerenti o fortemente danneggiati a causa della mancanza di presa sia della colla che delle viti. Nel caso in cui le condizioni di utilizzo non risultassero avverse, l'impiego della tecnica è fortemente consigliato per l'esecuzione di indagini tomografiche perché riduce notevolmente il numero di addetti necessari al completamento della prova.

L'impiego di una tecnica rispetto ad un'altra non è esclusivo, anzi, l'utilizzo contemporaneo dei diversi metodi spesso ne garantisce lo sfruttamento dei pregi.

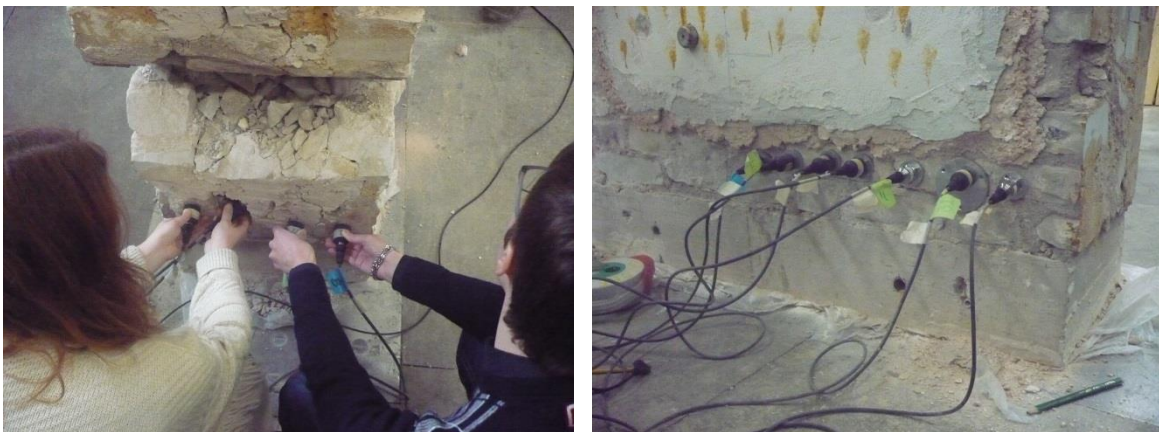


Fig. 4.6 – Modalità di sostegno degli accelerometri manuale (sinistra) e tramite basette metalliche incollate o avvitate alla muratura (destra).

5.3.3 SOFTWARE DI ACQUISIZIONE

Il software di acquisizione dei dati, progettato in collaborazione tra il Dipartimento ICEA e la società padovana IRS S.r.l. in linguaggio LabVIEW, rappresenta uno degli elementi centrali delle indagini soniche. Il programma, installato su un'apposita apparecchiatura dotata di schede di acquisizione e di un sistema di controllo integrato, consente di gestire agevolmente la lettura dei segnali generati dal martello strumentato e dagli accelerometri e di visualizzarne l'andamento.

Attualmente nel Laboratorio di Costruzioni e Trasporti sono disponibili due diverse versioni del software, installate su due differenti macchine: una più recente e l'altra più datata. Al di là del funzionamento, che non verrà qui approfondito, è importante evidenziare che in entrambe le varianti sono presenti alcune problematiche che necessitano di un'approfondita analisi e che per tale motivo, verranno trattate nell'immediato seguito.

5.3.3.1 PROBLEMATICHE DELLA PRIMA VERSIONE DEL SOFTWARE

La maggior parte dei limiti che affliggono la prima versione del software, denominata IRS-Soniche, sono legati ad errori di programmazione che non influenzano il corretto svolgimento delle prove ma ne possono rallentare o complicare l'utilizzo:

1. Interfaccia grafica scadente;
2. Errore di visualizzazione di alcuni pulsanti all'interno dell'interfaccia grafica di interazione tra utente e apparecchio;
3. Errore di visualizzazione dell'andamento dei segnali acquisiti nei grafici tempo-ampiezza;
4. Malfunzionamento della funzione "Calcola" indispensabile per l'individuazione del tempo di volo dell'onda.

La prima considerazione riguarda l'aspetto generale del software che, a prima vista, appare abbastanza disordinato e di non facile comprensione. Dopo i primi

tentativi, l'utilizzo diviene semplice e automatico, ma l'interfaccia rimane comunque poco intuitiva soprattutto per utenti poco esperti o intraprendenti.

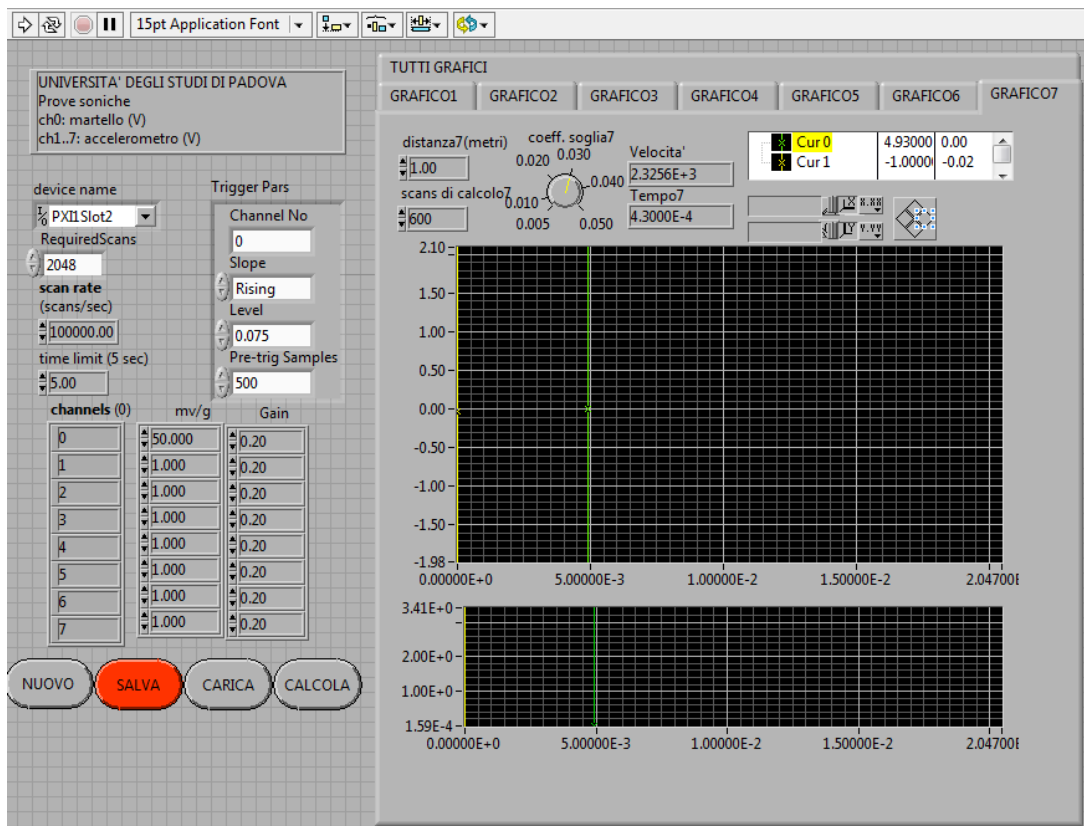


Fig. 4.7 – Interfaccia grafica del software IRS-soniche.

A questa pecca grafica se ne aggiunge una ben più fastidiosa legata alla visualizzazione di alcuni utili pulsanti, indispensabili sia in fase di acquisizione, per il controllo della qualità dei segnali registrati, che di prima elaborazione, per l'individuazione del tempo di volo dell'onda sonora. Ad ogni grafico tempo-ampiezza visualizzabile dal software (sono otto, sette grafici singoli ed uno complessivo), sono associati automaticamente una serie di pulsanti, raccolti in diverse palette in relazione alle rispettive funzioni. Tra queste, una delle più importanti è la Graph Palette (Paletta del grafico), una tavolozza contenente tre pulsanti per gestire la visualizzazione dell'andamento dei segnali acquisiti. Nello specifico, questi permettono di:

- Pulsante 1: Se premuto, consente all'utente di spostare gli indicatori che individuano i punti esatti di partenza del segnale generato dal martello e di

arrivo dello stesso all'accelerometro e, di conseguenza, di rilevare il tempo di volo dell'onda;

- Pulsante 2: Permette all'operatore di eseguire alcuni tipi di zoom, sia positivi che negativi, nella finestra grafica;
- Pulsante 3: Permette all'utente di spostarsi a proprio piacimento all'interno della finestra grafica del segnale.

A causa di un errore di programmazione, le diverse palette risultano essere sovrapposte una all'altra e quindi non immediatamente utilizzabili. Il problema è purtroppo riscontrabile in tutte le schede di visualizzazione dei segnali che compongono il programma e, pur essendo temporaneamente risolvibile, risulta essere stucchevole e ripetitivo, in quanto si ripresenta ad ogni lancio del software.

Un'ulteriore inesattezza riguarda l'interazione tra il software e alcune impostazioni del sistema operativo che gestisce la macchina in cui è installato il programma. In particolar modo, l'errore è collegato alla gestione dei caratteri separatori dei numeri impostata di default nel sistema. Questa incompatibilità, come la precedente, si ripercuote sulla visualizzazione di tutti i grafici tempo-ampiezza: il segnale, che dovrebbe avere il classico andamento sinusoidale smorzato nel tempo, risulta essere composto da una serie di onde quadre non significative e inutili ai fini dell'elaborazione.

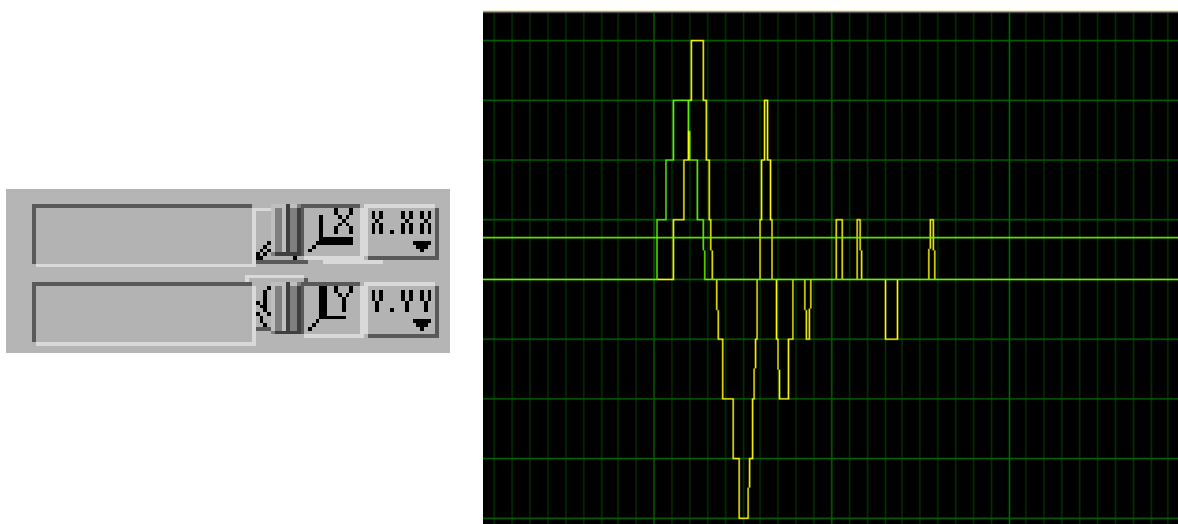


Fig. 4.8 – Errore di visualizzazione della Graph Palette (sinistra) e dei segnali acquisiti (destra).

L'unico errore di natura non grafica rappresenta il vero grosso limite del software di acquisizione. Come già spiegato precedentemente in vari punti, il compito principale del programma dovrebbe essere quello di registrare i segnali e, per ognuno di essi, individuare il tempo di volo, un parametro indispensabile per il calcolo della distribuzione delle velocità all'interno della sezione indagata. Il tempo di volo, o tempo di ritardo, corrisponde al periodo che intercorre tra l'istante in cui il segnale inizia a diffondersi nel mezzo e quello in cui esso viene percepito dai rilevatori disposti sulla superficie muraria. I due istanti, quello di partenza e quello di arrivo, sono facilmente ma grossolanamente individuabili per via grafica, in quanto corrispondono all'inizio dei fronti di salita dei massimi picchi dei segnali generati dal martello strumentato e registrati dagli accelerometri.

La precisa identificazione di questi punti dovrebbe essere gestita automaticamente dal software per mezzo di una particolare funzione associata ad un pulsante, denominato "Calcola", presente all'interno dell'interfaccia grafica. Purtroppo però la routine di calcolo non funziona correttamente e, di conseguenza, l'individuazione automatizzata non risulta accettabile. In assenza di alternative, gli operatori sono costretti ad analizzare personalmente ogni segnale acquisito e ad individuare manualmente il tempo di volo.

Questo limite è davvero notevole dal punto di vista computazionale in quanto impedisce un rapido controllo dei dati acquisiti e, soprattutto, dilata esponenzialmente i tempi di elaborazione, soprattutto nel caso delle indagini tomografiche.

5.3.3.2 SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE

Tralasciando l'aspetto grafico complessivo, il cui miglioramento richiederebbe la completa riscrittura del programma e di cui discuteremo nei prossimi paragrafi, è possibile individuare alcuni piccoli accorgimenti che consentono di risolvere, almeno temporaneamente, i restanti errori grafici.

In merito alla visualizzazione dei pulsanti di gestione dei grafici tempo-ampiezza, è possibile intervenire manualmente in ogni scheda del software mettendo in atto la seguente procedura:

- a. Cliccare con il tasto destro del mouse sulla finestra di visualizzazione del grafico per aprire un menù a tendina dotato di diverse opzioni;
- b. Spostare l'indicatore del mouse sopra la voce *Visible Items* per aprire un sottomenù con ulteriori opzioni;
- c. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sulla voce *Scale Legend* per eliminare la spunta presente a fianco alla voce.

Al termine di queste operazioni, la *Graph Palette* ritorna visibile e immediatamente utilizzabile. Ripetere il procedimento per tutte le schede presenti nel software per abilitare la visualizzazione della palette. Alla chiusura della sessione di lavoro le impostazioni non vengono salvate, motivo per cui è necessario eseguire nuovamente la procedura sopra descritta ad ogni avvio del software.

L'errore di visualizzazione dei grafici tempo-ampiezza è invece risolvibile modificando alcune impostazioni del sistema operativo. In particolar modo, è necessario invertire il funzionamento dei caratteri separatori dei numeri impostato di default. Nei sistemi Windows la configurazione standard è:

- Carattere "punto": Ha la funzione di raggruppatore di cifre (separatore delle migliaia);
- Carattere "virgola": Ha la funzione di separatore decimale.

Per risolvere il problema del corretto funzionamento della finestra dei grafici è sufficiente mettere in atto la seguente procedura:

- a. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sul pulsante *Start* posizionato in basso a sinistra nella Barra delle applicazioni per visualizzare il Menu Start;
- b. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sulla voce *Pannello di controllo* per aprire la finestra corrispondente;

- c. A seconda del sistema operativo, la visualizzazione delle voci nella finestra del Pannello di controllo può essere differente. Nel caso di sistemi più datati (in cui è disponibile solo la Visualizzazione per icone) cliccare con il tasto sinistro del mouse sull'icona *Paese e lingua* per aprire la relativa finestra, se invece si dispone di una versione più recente (in cui è presente anche la Visualizzazione per categorie), premere sul link *Cambia tastiere o altri metodi di input* posto sotto la voce *Orologio e opzioni internazionali*;
- d. Nella finestra *Paese e lingua*, selezionare la scheda *Formati* e cliccare sul pulsante *Impostazioni aggiuntive*;
- e. Nella finestra *Personalizza formato*, selezionare la scheda *Numeri*. Nella casella di testo corrispondente alla voce *Separatore decimale* inserire il carattere punto (.) e, in quella associata alla voce *Simbolo raggruppamento cifre*, immettere il carattere virgola(,);
- f. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sui pulsanti *Applica*, sia nella finestra *Personalizza formato* che in quella *Paese e lingua*.

Salvando queste impostazioni, ad ogni avvio del software IRS-Soniche, non si presentano più i problemi di visualizzazione dei grafici. È comunque importante ricordare che la modifica delle configurazioni di default potrebbe causare malfunzionamenti in altri programmi, motivo per cui è consigliabile ripristinare le impostazioni classiche nel caso in cui il Pc sia usato frequentemente per scopi diversi da quello di acquisizione dei dati sonici.

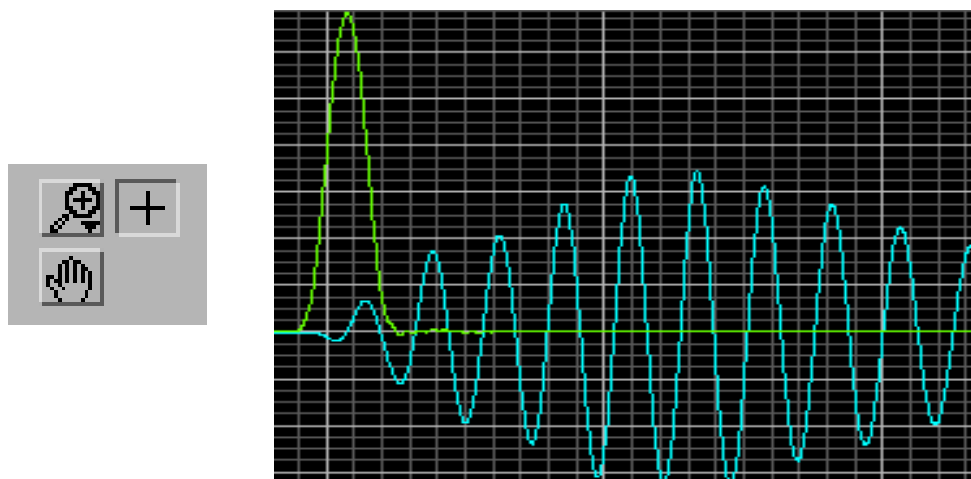


Fig. 4.9 – Visualizzazione corretta della Graph Palette (sinistra) e dei segnali acquisiti (destra).

La correzione del malfunzionamento della routine “Calcola” non è stato preso in considerazione in questo lavoro di Tesi, motivo per cui non se ne conoscono precisamente il comportamento e i relativi difetti. Sulla base dei numerosi test effettuati, è comunque plausibile ipotizzare il fatto che l’erronea individuazione dei punti di partenza dei massimi picchi delle onde soniche sia legata ad un impreciso filtraggio dei dati. L’impossibilità di eliminare completamente le componenti rumorose presenti nei segnali sembra infatti impedire la definizione di un adeguato e universale criterio di lisciamento e depurazione delle informazioni soniche registrate.

Ciononostante si è ritenuta opportuna la formulazione di due ipotesi teoriche per la risoluzione del malfunzionamento. Pur non essendo supportate né dalla conoscenza approfondita del reale problema, né dalla consapevolezza dell’esistenza di una eventuale tecnologia utile per la loro messa in pratica, si ritiene corretto esporle in breve:

- Prima ipotesi: Attraverso un apposito ciclo iterativo, leggere e allocare in un vettore tutte le ordinate (ampiezza dell’onda) dei punti che discretizzano il segnale registrato. Partendo dall’inizio dell’array, operare una serie di confronti tra una coordinata e quella memorizzata nella posizione precedente: se queste sono uguali, si prosegue con la comparazione successiva, altrimenti significa che il segnale sta cambiando pendenza. Per verificare che la variazione dell’ampiezza corrisponda effettivamente all’inizio del picco dell’onda e non ad un disturbo generico, è necessario inserire un ciclo di controllo che esegua un confronto tra l’ordinata del punto identificato come partenza del fronte reale di salita e quelle dei punti successivi: se il valore è in costante crescita allora la coordinata scelta è effettivamente quella corretta, altrimenti è necessario ripetere le operazioni precedenti (tranne la memorizzazione dei dati) partendo dal punto corrispondente all’inizio del picco successivo a quello appena scartato.

Questo metodo presenta notevoli difficoltà, soprattutto per il fatto che pare essere molto complessa l’individuazione del corretto criterio di uscita dai

cicli: in quali condizioni il cambio di pendenza è considerato un disturbo del segnale o il fronte di discesa del picco corretto? Può essere plausibile utilizzare come parametro di controllo un numero massimo di punti superato il quale il ciclo termina? Oppure può rivelarsi più utile un'ulteriore controllo basato sul confronto tra le coordinate?

La complessità di tutti questi problemi è direttamente proporzionale al livello di rumore presente nel segnale, motivo per cui il metodo è difficilmente applicabile a onde caratterizzate da un alto grado di disturbo. Inoltre va tenuta in giusto conto la possibilità che il picco reale registrato dall'accelerometro sia negativo, ciò renderebbe necessaria l'introduzione di nuovi criteri di comparazione delle coordinate;

- Seconda ipotesi: Attraverso un apposito ciclo iterativo, leggere e allocare in un vettore solo le ordinate dei punti precedenti al picco massimo. Partendo dall'ultima dato memorizzato (quella corrispondente al vertice superiore del fronte di salita), ripercorrere a ritroso il vettore eseguendo una serie di confronti tra una coordinata e quella memorizzata nella posizione precedente: se queste sono diverse, si prosegue con la comparazione successiva, altrimenti significa che in corrispondenza di quel punto è avvenuto il cambiamento di pendenza. Per verificare che la variazione dell'ampiezza corrisponda effettivamente all'inizio del picco dell'onda e non ad un assestamento temporanei, è necessario inserire un ciclo di controllo che esegua un confronto tra l'ordinata del punto identificato come partenza del fronte reale di salita e quelle dei punti precedenti: se i valori sono relativamente simili allora la coordinata scelta è effettivamente quella corretta, altrimenti è necessario riprendere le operazioni precedenti (tranne la memorizzazione dei dati) partendo dal punto in cui riprende la discesa del fronte d'onda.

Anche questo metodo, come il precedente, presenta notevoli difficoltà legate alla complessità dell'individuazione del corretto criterio di uscita dai cicli: in quali condizioni il mancato cambio di pendenza è considerato un temporaneo livellamento del segnale o l'inizio del fronte di salita del picco? Può essere plausibile utilizzare come parametro di controllo un numero

massimo di punti superato il quale il ciclo termina? Oppure può rivelarsi più utile un'ulteriore controllo basato sul confronto tra le coordinate? A queste problematiche va aggiunta la complicazione legata al riconoscimento del reale picco massimo del segnale, parametro fondamentale per la partenza di tutto procedimento di calcolo.

Così come nella prima ipotesi, anche in questo metodo la complessità è direttamente proporzionale al livello di rumore presente nel segnale, motivo per cui la procedura è difficilmente applicabile a onde caratterizzate da un alto grado di disturbo. Inoltre va tenuta in giusto conto la possibilità che il picco reale registrato dall'accelerometro sia negativo, ciò renderebbe necessaria l'introduzione di nuovi criteri di comparazione delle coordinate.

Da quanto detto, appare evidente come l'elevata variabilità dell'andamento dei segnali impedisca l'automazione delle operazioni. A tal proposito, potrebbe essere plausibile, in future sperimentazioni, la rivalutazione al ribasso dei livelli di sensibilità delle apparecchiature, allo scopo di provare ad eliminare, già in fase di acquisizione, parte di quelle componenti di rumore che complicano notevolmente l'elaborazione dei dati. Nel caso in cui questo tentativo comportasse l'introduzione di nuovi grossolani errori nella valutazione delle velocità soniche e si rivelasse pertanto errato, potrebbe rendersi necessario lo sviluppo di un nuovo sistema di post-lisciamiento dei segnali acquisiti.

5.3.3.3 PROBLEMATICHE DELLA SECONDA VERSIONE DEL SOFTWARE

Nel 2012, il proseguimento della collaborazione tra il Dipartimento e I.R.S., ha portato all'aggiornamento del vecchio software di acquisizione e alla conseguente nascita nato della nuova applicazione Prove Soniche.

Dal punto di vista puramente grafico, l'intervento è stato utile e ben riuscito perché ha consentito di migliorare notevolmente l'interfaccia utente e di rendere il programma maggiormente intuitivo e facilmente usufruibile. Inoltre è stato risolto il problema legato alla sovrapposizione delle diverse palette per la gestione delle finestre grafiche: la distribuzione dei pulsanti ora risulta essere chiara e ordinata.

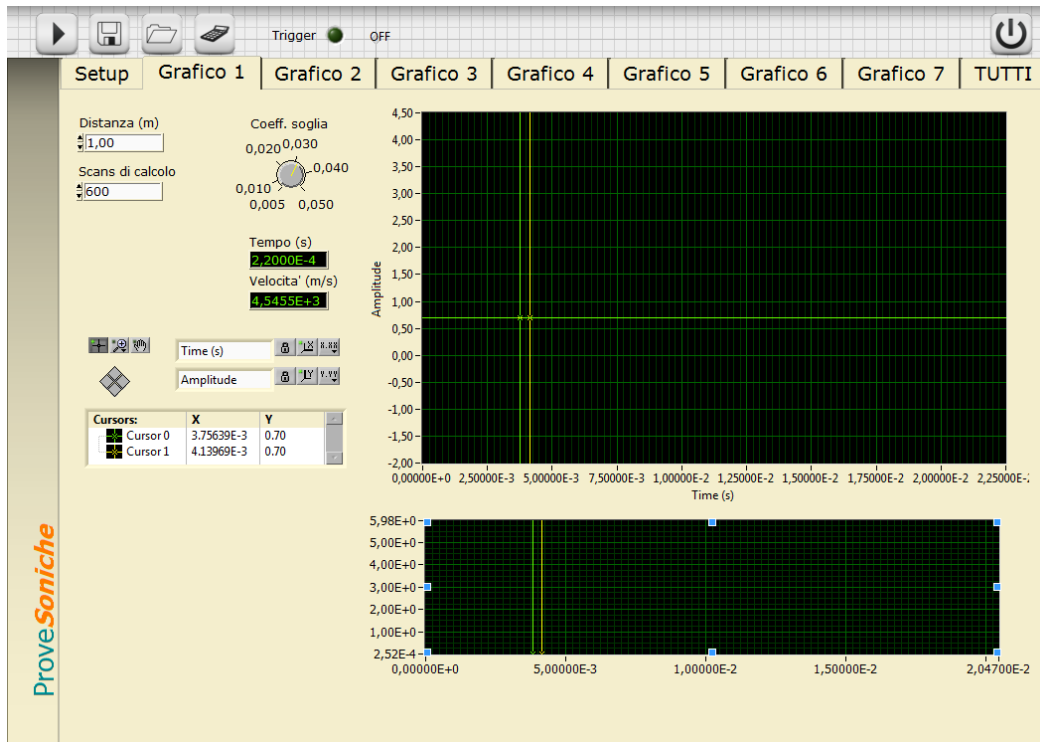


Fig. 4.10 – Interfaccia grafica del software ProveSoniche.

Nonostante gli sforzi però, le maggiori problematiche che affliggevano la vecchia versione si sono perpetuate nella seconda, rendendola di fatto poco innovativa. In particolare, i due grossi limiti per cui non è stato possibile individuare una soluzione sono:

1. Errore di visualizzazione dell'andamento dei segnali acquisiti nei grafici tempo-ampiezza;
2. Malfunzionamento della funzione “Calcola” indispensabile per l'individuazione del tempo di volo dell'onda.

Nel caso descritto al primo punto, rispetto alla versione precedente, si è in alcuni casi riscontrato un peggioramento del funzionamento dovuto alla presenza di particolari condizioni. All'errore legato alla gestione dei caratteri separatori dei numeri, se n'è aggiunto uno dovuto ad una recente innovazione verificatasi nel campo informatico: il passaggio dai processori con architettura a 32 bit a quelli con architettura a 64 bit. Nella pratica, i termini 32 e 64 bit indicano la larghezza del formato standard di una variabile semplice e quindi, la dimensione dei registri

interni della CPU (Central Process Unit) utilizzata negli elaboratori. Questa evoluzione ha comportato un cambiamento profondo, in quanto la maggior parte dei sistemi operativi e dei software ha dovuto subire pesanti modifiche per adattarsi alle nuove funzionalità. Fortunatamente i vecchi programmi, progettati per architetture a 32 bit, sono comunque supportati attraverso alcune modalità di compatibilità:

- Hardware: prevede l'impiego di un processore che sia in grado di supportare anche il vecchio set di istruzioni a 32 bit;
- Software: implica l'utilizzo di sottosistemi del sistema operativo principale, come ad esempio il WoW64 (Windows 32-bit on Windows 64-bit) per le piattaforme Windows;
- Attraverso l'implementazione del nucleo di un processore a 32 bit all'interno del chip del processore a 64 bit.

Grazie a queste strategie, il software Prove Soniche può essere utilizzato agevolmente anche nei più recenti sistemi operativi. Ciononostante, in alcune macchine si è paventato il solito grave difetto nella visualizzazione dei grafici tempo-ampiezza: il segnale, che dovrebbe avere il classico andamento sinusoidale smorzato nel tempo, risulta essere composto da una serie di onde quadre non significative e inutili ai fini dell'elaborazione. In questi particolari casi, l'inversione delle impostazioni di default dei caratteri separatori dei numeri, procedura corretta per la risoluzione dei problemi del vecchio software, si è rivelata essere insufficiente ai fini della risoluzione del malfunzionamento.

Anche in questo caso, l'unico errore di natura non grafica rappresenta il vero grosso limite del nuovo software di acquisizione. La precisa identificazione dei punti di inizio dei fronti di salita dei picchi dei segnali dovrebbe essere gestita automaticamente dal software per mezzo di una particolare funzione associata ad un pulsante, denominato "Calcola", presente all'interno dell'interfaccia grafica. Purtroppo però anche in questo caso, nonostante i tentativi di miglioramento fatti, la routine di calcolo non pare funzionare correttamente e, di conseguenza, l'individuazione automatizzata non risulta accettabile. In assenza di alternative, gli

operatori sono costretti ad analizzare personalmente ogni segnale acquisito e ad individuare manualmente il tempo di volo.

Questo limite è davvero notevole dal punto di vista computazionale in quanto impedisce un rapido controllo dei dati acquisiti e, soprattutto, dilata esponenzialmente i tempi di elaborazione, soprattutto nel caso delle indagini tomografiche.

5.3.3.4 SOLUZIONI E POSSIBILI ALTERNATIVE

In merito all'errore di visualizzazione dei grafici tempo-ampiezza non legato a problemi di compatibilità software, il malfunzionamento è facilmente risolvibile mettendo in atto la procedura di modifica delle impostazioni di sistema valida per il vecchio software e descritta nel paragrafo 5.3.3.2.

Nel caso in cui invece la compatibilità tra il software e il sistema operativo non sia assicurata, l'unica soluzione plausibile pare essere l'operazione di virtualizzazione. In informatica il termine virtualizzazione indica la possibilità di astrarre le componenti hardware degli elaboratori al fine di renderle disponibili ai software in forma di risorsa virtuale. Tramite questo processo è quindi possibile creare un insieme costituito da una serie di componenti hardware virtuali (Hard Disk, RAM, CPU, ecc.) che prende il nome di macchina virtuale e su cui è possibile installare dei software come, ad esempio, i sistemi operativi e le relative applicazioni.

Quindi per risolvere l'errore di visualizzazione dei grafici tempo-ampiezza dei segnali nel caso in cui si disponga di sistemi operativi di nuova generazione è necessario:

- a. Scaricare e installare nel proprio elaboratore uno dei tanti software gratuiti per la virtualizzazione;
- b. Al termine della creazione della macchina virtuale, installare in essa un sistema operativo a 32 bit;
- c. Mettere in atto la procedura per l'inversione delle impostazioni di default dei caratteri separatori dei numeri, così come descritta nel paragrafo 5.3.3.2;

- g. Installare nella macchina virtuale il nuovo software Prove Soniche e procedere alla fase di elaborazione dei segnali.

Salvando queste impostazioni nel sistema virtuale, ad ogni avvio del software non si presentano più i problemi di visualizzazione dei grafici.

Come spiegato precedentemente, la correzione del malfunzionamento della routine "Calcola" non è risultata valida nemmeno nel nuovo programma e resta quindi il maggior ostacolo al raggiungimento della massima automazione del sistema acquisizione-elaborazione.

5.4 FASE DI ELABORAZIONE

Attualmente per l'elaborazione dei segnali sonici si eseguono, in relazione alla modalità di acquisizione, due diverse procedure operative: una valida per la manipolazione dei dati provenienti da prove dirette e una utile per la gestione delle informazioni acquisite durante le indagini tomografiche. Entrambe le metodologie prevedono l'utilizzo dell'applicazione Prove Soniche, dei fogli di calcolo e di un software di restituzione grafica delle immagini ma, mentre la prima si esaurisce facilmente nel calcolo diretto delle velocità dei percorsi, la seconda, richiede l'esecuzione di una fase intermedia di post-elaborazione dei tempi di volo misurati.

In questo paragrafo verrà spiegato il procedimento utilizzato dagli operatori del Dipartimento ICEA per l'elaborazione delle indagini tomografiche.

5.4.1 INDIVIDUAZIONE DEI TEMPI DI VOLO

La prima operazione da compiere, l'individuazione dei tempi di volo dei segnali acquisiti, si rende necessaria a causa del malfunzionamento del software Prove Soniche precedentemente spiegato. A causa di questo problema, l'operatore è costretto ad analizzare singolarmente tutti i segnali registrati e ad individuare manualmente i punti di inizio dei picchi corrispondenti alla partenza e all'arrivo dell'onda. Solamente grazie a questa procedura è possibile ricavare gli esatti tempi

di volata necessari per il calcolo delle velocità di propagazione. Concretamente, per l'esecuzione di questa fase, è necessario eseguire le seguenti operazioni:

- a. Aprire il software Prove Soniche (dopo aver verificato tutte le condizioni di funzionamento riportate nei paragrafi 5.3.3.2 e 6.3.3.4);
- b. Cliccare sul pulsante *Carica* e selezionare il file relativo all'acquisizione che si vuole elaborare;
- c. Nella finestra del grafico, spostare manualmente le barre verticali per individuare i punti di inizio dei picchi corrispondenti agli inizi della trasmissione e della ricezione del segnale e determinare così il tempo di volo dell'onda;
- h. Copiare il tempo di volo individuato nell'apposita cella di un foglio di calcolo preimpostato.

Purtroppo questa fase, come spiegato in precedenza, rappresenta il più grosso limite dell'intero procedimento di indagini sonica. L'impossibilità di calcolare automaticamente i tempi di volata dei segnali misurati, amplifica esponenzialmente il tempo necessario all'ottenimento dei dati utili per la valutazione della qualità della muratura studiata.

Allo stato attuale non esistono soluzioni che consentano di risolvere questo annoso malfunzionamento del software.

5.4.2 CREAZIONE DEL FOGLIO DI CALCOLO

L'inserimento dei tempi di volo precedentemente individuati all'interno di un foglio calcolo preimpostato costituisce il passaggio intermedio prima del calcolo delle velocità soniche. La formattazione delle righe e delle colonne del file è la seguente:

- Colonna A - Numero del percorso: È un indice crescente associato univocamente ad ogni coppia sorgente-ricevitore;
- Colonna B - Ventaglio di acquisizione: Indica quali sono i lati di trasmissione e ricezione dei percorsi inseriti nella colonna successiva;

- Colonna C - Percorso: Contiene, per ogni possibile percorso, la coppia di indici corrispondenti rispettivamente ai punti di generazione e ricezione del segnale;
- Colonne D, E, F, G, H - Tempi misurati: Contengono i tempi ottenuti dalla fase di elaborazione dei segnali eseguita con il software Prove Soniche. Generalmente, per ogni percorso, si hanno a disposizione solamente tre misure anziché cinque;
- Colonna I - Tempo medio: Contiene il tempo di volo medio impiegato dal segnale a compiere il percorso individuato da una determinata coppia di punti. Viene calcolato come media aritmetica dei tempi presenti nelle colonne precedenti (da D ad H);
- Colonna J - Velocità media: Contiene la velocità media impiegata dal segnale per compiere il tragitto individuato da una determinata coppia di punti. Viene calcolata come rapporto tra la lunghezza del percorso (Colonna L) e il tempo medio (Colonna I);
- Colonna K - Unità di misura della velocità: Contiene l'unità di misura della velocità (m/s);
- Colonna L - Lunghezza del percorso: Contiene la lunghezza di ogni percorso. Viene calcolata applicando il teorema di Pitagora al triangolo in cui l'incognita, coincidente con l'ipotenusa, è la lunghezza del percorso e i due cateti possono corrispondere, a seconda dei casi, allo spessore della muratura, alla lunghezza della muratura, al passo dei punti di acquisizione-ricezione o a suoi multipli;
- Colonna M - Lunghezza del percorso calcolata dal programma: Questa colonna, inizialmente vuota, è destinata ad accogliere i valori delle lunghezze dei percorsi calcolate secondo l'algoritmo contenuto all'interno del software TomoGrafia;
- Colonna N - Differenza delle lunghezze: Contiene la differenza tra la lunghezza del percorso calcolata secondo il teorema di Pitagora (Colonna L) e quella calcolata dal software TomoGrafia (Colonna M);

- Colonna O - Tempo medio: Contiene nuovamente il tempo di volo medio impiegato dal segnale a compiere il percorso individuato da una determinata coppia di punti. Viene calcolato come media aritmetica dei tempi presenti nelle colonne precedenti (da D ad H);
- Colonna P - Velocità media: Contiene nuovamente la velocità media impiegata dal segnale per compiere il tragitto individuato da una determinata coppia di punti. Viene calcolata come rapporto tra la lunghezza del percorso (Colonna L) e il tempo medio (Colonna I);
- Colonna Q - Confronto delle velocità: In questa colonna viene eseguita un'operazione di confronto tra la velocità media calcolata (Colonna P) e la velocità massima attesa per la tipologia di muratura indagata. Se questa risulta maggiore, allora la velocità media calcolata è accettabile, altrimenti viene ricalcolato il tempo di volo dell'onda come rapporto tra la velocità massima attesa e la lunghezza del percorso calcolata con il teorema di Pitagora;
- Colonna R - Tempi corretti: In questa colonna vengono riportati nuovamente i tempi medi impiegati dai segnali per compiere i rispettivi tragitti. Se la relativa velocità media è risultata accettabile, i tempi corrispondono a quelli presenti nella Colonna I, altrimenti vengono ricalcolati secondo il criterio individuato nella Colonna Q.

Oltre a questi dati, il foglio elettronico deve contenere anche un piccolo schema che rappresenti le dimensioni della sezione indagata e la distribuzione dei punti di ricezione e trasmissione del segnale.

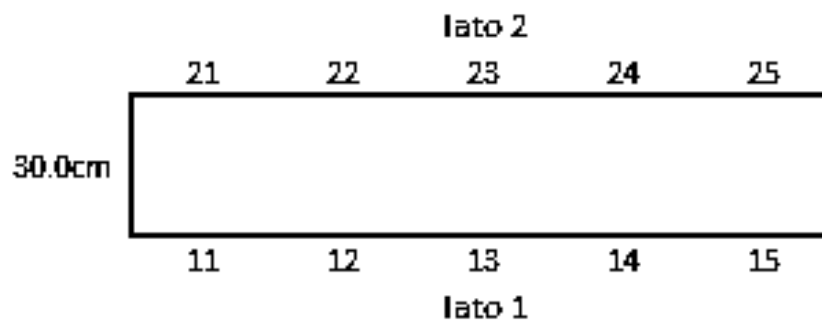


Fig. 4.11 – Schema di distribuzione dei punti di acquisizione preparato nel foglio elettronico.

n° path	path	T1	T2	T3	T4	T5	TM	Delta Tempi
1	11-21	0.0005915400	0.0005511400	0.0005450700			0.0005625833	0.0005625833
2	11-22	0.0008285900	0.0008004200	0.0008423100			0.0008237733	0.0008237733
3	11-23	0.0019646000	0.0019799000	0.0018400000			0.0019281667	0.0019281667
4	11-24	0.0019046000	0.0018152000	0.0016639000			0.0017945667	0.0017945667
5	11-25	0.0020194000	0.0023708000	0.0022443000			0.0022115000	0.0022115000
6	12-21	0.0006588900	0.0007074000	0.0008983800			0.0007548900	0.0007548900
7	12-22	0.0006785300	0.0007384600	0.0006222900			0.0006797600	0.0006797600
8	12-23	0.0013430000	0.0012099000	0.0013959000			0.0013162667	0.0013162667
9	12-24	0.0018059000	0.0015734000	0.0011898000			0.0015230333	0.0015230333
10	12-25	0.0021503000	0.0020396000	0.0016450000			0.0019449667	0.0019449667
11	13-21	0.0014263000	0.0015588000	0.0013912000			0.0014587667	0.0014587667
12	13-22	0.0008144900	0.0007988000	0.0006639300			0.0007590733	0.0007590733
13	13-23	0.0008201400	0.0008366400	0.0008106300			0.0008224700	0.0008224700
14	13-24	0.0009459400	0.0006988000	0.0012262000			0.0009569800	0.0009569800
15	13-25	0.0012941000	0.0011479000	0.0012975000			0.0012465000	0.0012465000
16	14-21	0.0018351000	0.0014505000	0.0020063000			0.0017639667	0.0017639667
17	14-22	0.0007892100	0.0009784500	0.0009593900			0.0009090167	0.0009090167
18	14-23	0.0007159600	0.0006509700	0.0006776900			0.0006815400	0.0006815400
19	14-24	0.0005069300	0.0006347200	0.0005815400			0.0005743967	0.0005743967
20	14-25	0.0007414100	0.0007246600	0.0005961400			0.0006874033	0.0006874033
21	15-21	0.0023099000	0.0021028000	0.0019716000			0.0021281000	0.0021281000
22	15-22	0.0011042000	0.0009476300	0.0010235000			0.0010251100	0.0010251100
23	15-23	0.0009948000	0.0008664400	0.0008520500			0.0009044300	0.0009044300
24	15-24	0.0009948000	0.0007332400	0.0007548900			0.0008276433	0.0008276433
25	15-25	0.0002878800	0.0002467800	0.0002753100			0.0002699900	0.0002699900

VM	Lunghezze path	media	VM	confronta	tempi corretti
533.25	m/s	30.00	cm	ok	0.0005625833
437.68	m/s	36.06	cm	ok	0.0008237733
259.31	m/s	50.00	cm	ok	0.0019281667
373.81	m/s	67.08	cm	ok	0.0017945667
386.34	m/s	85.44	cm	ok	0.0022115000
477.62	m/s	36.06	cm	ok	0.0007548900
441.33	m/s	30.00	cm	ok	0.0006797600
273.92	m/s	36.06	cm	ok	0.0013162667
328.29	m/s	50.00	cm	ok	0.0015230333
344.89	m/s	67.08	cm	ok	0.0019449667
342.76	m/s	50.00	cm	ok	0.0014587667
475.05	m/s	36.06	cm	ok	0.0007590733
364.75	m/s	30.00	cm	ok	0.0008224700
376.81	m/s	36.06	cm	ok	0.0009569800
401.12	m/s	50.00	cm	ok	0.0012465000
380.28	m/s	67.08	cm	ok	0.0017639667
550.04	m/s	50.00	cm	ok	0.0009090167
529.10	m/s	36.06	cm	ok	0.0006815400
522.29	m/s	30.00	cm	ok	0.0005743967
524.58	m/s	36.06	cm	ok	0.0006874033
401.48	m/s	85.44	cm	ok	0.0021281000
654.37	m/s	67.08	cm	ok	0.0010251100
552.83	m/s	50.00	cm	ok	0.0009044300
435.69	m/s	36.06	cm	ok	0.0008276433
1111.15	m/s	30.00	cm	ok	0.0002699900

Fig. 4.12 - Esempio di compilazione di un foglio di calcolo.

5.4.3 ELABORAZIONE DEI DATI

L'elaborazione tomografica rappresenta certamente la fase più delicata dell'intero processo di indagine in quanto implica l'utilizzo di TomoGrafia, un particolare software sviluppato nel 1998 dall'ing. Nicola Monteforte.

L'obiettivo dell'applicazione, scritta in linguaggio Visual Basic 6, è quello di ricostruire le immagini tomografiche delle sezioni indagate sulla base dei tempi di volo registrati durante il processo di acquisizione e delle lunghezze dei relativi percorsi teorici.

Nei paragrafi successivi verranno descritte le modalità operative necessarie al raggiungimento di tale scopo.

5.4.3.1 FASI PRELIMINARI

I dati sonici, raccolti nella fase di acquisizione e parzialmente elaborati nel foglio di calcolo, devono essere nuovamente e preventivamente trattati affinché possano essere utilizzati dal programma TomoGrafia. In particolare, è necessario creare una quantità di file ASCII (American Standard Code for Information Interchange) pari al numero di illuminazioni eseguite. Con il termine illuminazione vengono indicate tutte le coppie non invertibili e non ripetibili di lati lungo cui sono state eseguite le misurazioni. Ogni file deve essere salvato con un nome evocativo della campagna di indagine effettuata e con l'estensione corrispondente agli indici dei lati dell'illuminazione a cui il file fa riferimento (ad esempio: ProvaMuroLaboratorio.13, ProvaLiviano.24). All'interno di ognuno di essi devono essere memorizzati, in colonna, tutti i tempi medi di volata precedentemente stimati all'interno del foglio di calcolo.

Al termine di questa fase, è possibile lanciare l'esecuzione del software. Alla prima apertura, l'applicazione si presenta con una semplice interfaccia grafica contenente alcuni campi di inserimento obbligatori. I dati richiesti all'utente sono:

- Il nome della campagna di prova o altre note facoltative (data e luogo di esecuzione, ecc.);
- Le dimensioni geometriche della sezione (base e altezza);

- Il passo di discretizzazione, ossia la dimensione dei pixel che andranno a comporre la mesh di elaborazione;
- Il passo dei punti di battuta/ricezione per ogni lato della sezione.

Oltre a queste caselle di testo, l'interfaccia contiene alcune etichette all'interno delle quali vengono automaticamente inseriti i nomi dei file risultanti dalle successive operazioni di elaborazione dei dati.

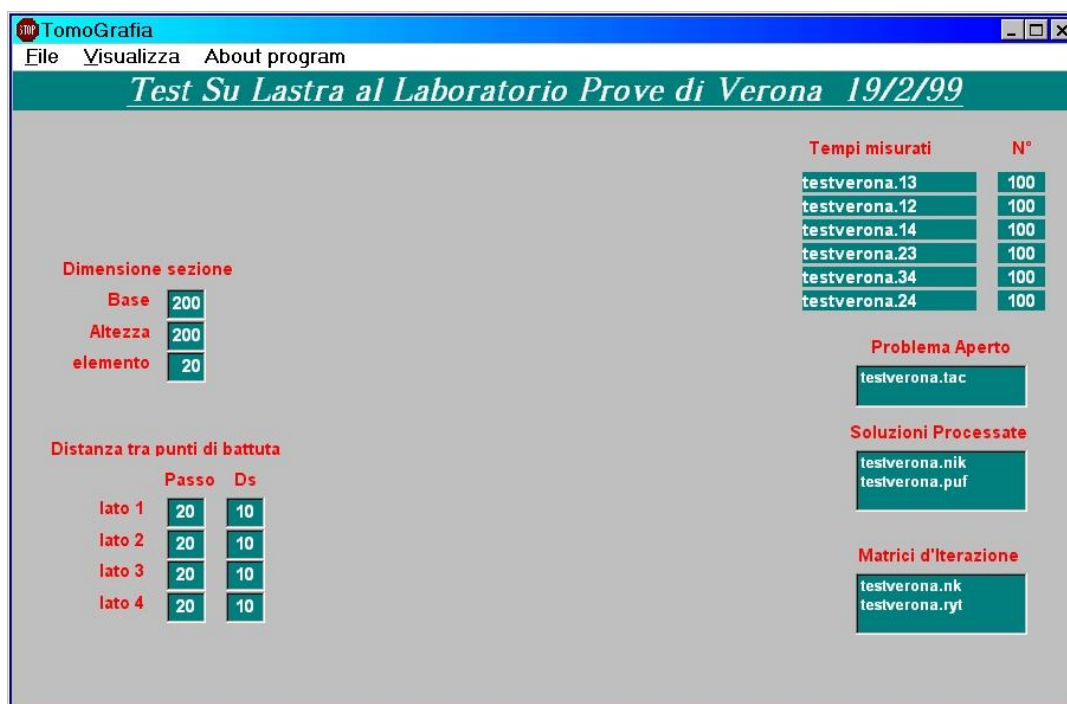


Fig. 4.13 – Interfaccia utente principale del software TomoGrafia (Monteforte, 1998).

Completata la compilazione dei campi obbligatori, è necessario salvare il progetto (si consiglia di utilizzare sempre lo stesso nome per tutti i file riguardanti la stessa campagna di indagine) e procedere all'apertura della successiva finestra grafica di elaborazione. La procedura da eseguire per fare ciò è la seguente:

- a. Con il tasto sinistro del mouse, cliccare sulla voce *Visualizza* contenuta all'interno della *Barra dei menu*;
- b. Nel relativo menu a tendina cliccare sulla voce *Sezione* per aprire la finestra *FormSezione*.

All'interno di questa nuova interfaccia, sono presenti due campi grafici di diverse dimensioni contenenti la sezione e la griglia di discretizzazione automaticamente create dal software sulla base dei dati geometrici inseriti nella prima finestra utente. Oltre alle etichette grafiche, l'interfaccia si compone di una serie di campi di inserimento dati già settati su valori base, ma modificabili dall'utente in relazione alle caratteristiche del problema.

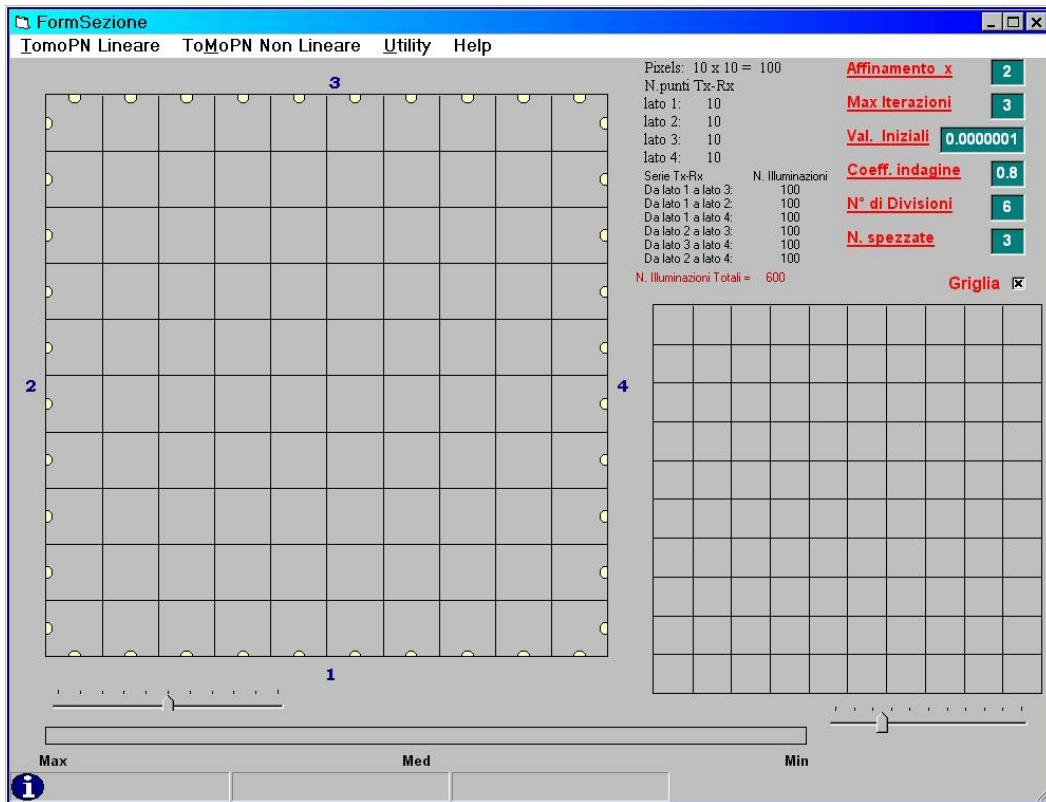


Fig. 4.14 - Interfaccia grafica FormSezione del software TomoGrafia (Monteforte, 1998).

5.4.3.2 ELABORAZIONE

Per ottenere la soluzione del metodo tomografico, ossia per conoscere la distribuzione delle velocità all'interno della sezione indagata, oltre ai tempi medi di volo è necessario ipotizzare il tipo di percorso compiuto da ogni segnale per giungere agli accelerometri. In genere, per motivi legati alla difficoltà di implementazione di altri algoritmi e all'eccessivo onere computazione che questi comporterebbero, l'ipotesi più utilizzata è quella di percorso lineare, cioè si suppone che le onde attraversino la sezione propagandosi lungo una linea retta.

Sulla base di questa assunzione, il software elabora i dati e restituisce una mappa della distribuzione delle velocità. Il procedimento da eseguire per ottenere l'immagine è il seguente:

- a. Con il tasto sinistro del mouse, cliccare sulla voce *TomoPN Lineare* contenuta all'interno della Barra dei menu della finestra *FormSezione*;
- b. Nel relativo menu a tendina cliccare sulla voce *Ray Tracing Lineare*;
- c. Nello stesso menu cliccare sulla voce *Matrice d' iterazione Lineare*;
- d. Sempre nel medesimo menu a tendina cliccare sulla voce *Solutore Lineare*.

La soluzione del problema tomografico rientra nell'ambito dei cosiddetti problemi inversi, ossia in un contesto di indagine generico in cui, a partire da una serie di misurazioni indirette (tempi di volo), si cercano di definire alcune informazioni riguardanti una certa grandezza fisica o un intero sistema. In generale, data l'equazione:

$$t = S \times v$$

in cui:

t = Vettore dei tempi di volo (noti)

S = Matrice dei percorsi dei raggi rettilinei (noti)

v = Vettore delle velocità soniche (incognite)

si vuole invertire il problema per determinare i componenti incogniti del vettore delle velocità (o lentezze) soniche. Per fare ciò è inizialmente necessario definire una più precisa equazione che metta in relazione i tempi di volo e le velocità soniche:

$$T(l) = (S \times \Delta l - \Delta t)^T \times (S \times \Delta l - \Delta t)$$

$T(l)$ = Vettore dei tempi di volo in funzione delle lentezze soniche

S = Matrice dei percorsi dei raggi rettilinei

Δl = Differenza di lentezza da apportare all'ipotesi iniziale di modello per ottenere il modello delle lentezze reali

Δt = Differenza tra i tempi di volo misurati e quelli calcolati sulla base del

modello teorico delle lentezze

$$(S \times \Delta l \times \Delta t)^T = \text{Vettore trasposto}$$

L'algoritmo di risoluzione di questa equazione si basa sul Metodo dei Minimi Quadrati, una tecnica di regressione che permette di individuare la funzione che meglio rappresenta un certo insieme di dati. In particolare, il criterio di calcolo impone che la funzione ipoteticamente più corretta sia quella che minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra i dati misurati e quelli calcolati con la funzione stessa. Sulla base di questo principio, l'equazione di risoluzione risulta essere la seguente:

$$\Delta l = (S^T \times S)^{-1} \times S^T \times \Delta t$$

Δl = Differenza di lentezza da apportare all'ipotesi di modello per ottenere il modello delle lentezze reali

S^T = Matrice trasposta dei percorsi dei raggi rettilinei

S = Matrice dei percorsi dei raggi rettilinei

$(S^T \times S)^{-1}$ = Matrice inversa

Δt = Differenza tra i tempi di volo misurati e quelli calcolati sulla base del modello teorico delle lentezze

All'interno dell'applicazione è inoltre prevista la possibilità di rielaborare i risultati ottenuti con l'assunzione di linearità, ipotizzando che le onde compiano il proprio tragitto seguendo percorsi non lineari. Per fare ciò, è comunque necessario eseguire le operazioni sopradescritte, in quanto la rielaborazione necessita dei valori calcolati con le ipotesi lineari. La procedura esecutiva è la seguente:

- a. Ripetere la sequenza di operazioni precedente;
- b. Con il tasto sinistro del mouse, cliccare sulla voce *TomoPN Non Lineare* contenuta all'interno della Barra dei menu della finestra *FormSezione*;
- c. Nel relativo menu a tendina cliccare sulla voce *Ray Tracing Non Lineare Fronte d'Onda*;
- d. Nello stesso menu cliccare sulla voce *Matrice d' iterazione Non Lineare*;

- e. Sempre nel medesimo menu a tendina cliccare sulla voce *Solutore Non Lineare*.

Al termine delle elaborazioni, all'interno di uno dei campi grafici contenuti nella finestra FormSezione viene visualizzata l'immagine tomografica finale in cui, ad ogni pixel, viene associato un colore in relazione ad una determinata scala cromatica.

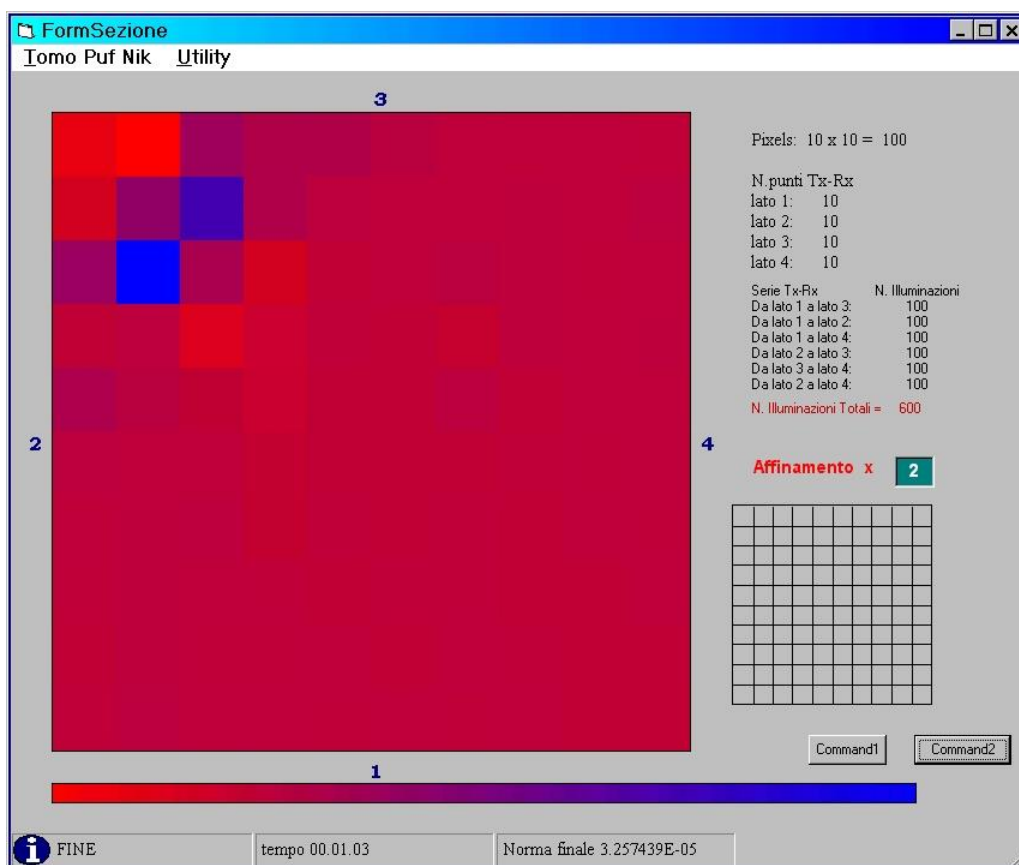


Fig. 4.14 - Visualizzazione dell'immagine tomografica (Monteforte, 1998).

5.4.3.3 CONSIDERAZIONI E POSSIBILI PROBLEMATICHE

Purtroppo all'interno del software TomoGrafia e, più in generale, dell'intera fase di elaborazione, si sono nel tempo sviluppati una serie di limiti e imprecisioni tali da aver reso necessaria una completa e profonda revisione di tutto il processo sonico. In particolare, è possibili evidenziare:

1. L'utilizzo di un linguaggio di programmazione ormai obsoleto come Visual Basic 6.0;
2. Le continue modifiche del software in funzione dei casi di studio;
3. Il mancato passaggio di competenze tra l'ing. Monteforte e gli operatori del Dipartimento ICEA.

Visual Basic è un linguaggio di programmazione event driven (orientato agli eventi) derivato dal BASIC, uno dei primi codici di programmazione ad alto livello. Le sue caratteristiche peculiari sono la semplicità di utilizzo, la facilità di creazione di interfacce grafiche e la praticità nel collegamento alle basi di dati. L'ultima versione, Visual Basic 6.0, ha smesso di essere supportata dalla Microsoft (azienda autrice del linguaggio) nel 2008 e, per tale motivo, risulta essere ormai obsoleta. L'assenza di sviluppi genera ovvie difficoltà nella gestione del software TomoGrafia in quanto obbliga gli utenti a lavorare su macchine (reali o virtuali) dotate di sistemi operativi superati e, inoltre, non permette di sfruttare le più recenti e innovative tecniche e funzionalità di programmazione.

Purtroppo per motivi legati ai numerosi impegni lavorativi, l'ing. Monteforte non è riuscito a garantire un'uniforme e armonioso sviluppo di TomoGrafia. L'impossibilità di migliorare le caratteristiche generali e di aggiornare il software in relazione alle diverse necessità degli operatori e alle innovazioni sviluppatesi nel campo delle indagini soniche, rappresenta un grosso limite, in quanto rende necessaria la costante modifica della sintassi del programma sulla base delle peculiarità dei casi di studio. Questo genere di evoluzione temporanea, oltre a non comportare un miglioramento complessivo del software, è causa di un ulteriore dispendio di tempo e di energie e di un allungamento dell'intera fase di elaborazione.

L'ultimo grosso limite del procedimento di analisi dei dati sonici è legato al fatto che nessun operatore del Dipartimento ICEA conosce o sa utilizzare il software TomoGrafia. A causa di questa particolare situazione, ogni elaborazione deve essere eseguita di persona dall'ing. Monteforte, con conseguente dilatazione

dei tempi di indagine e con il rischio di generare errori aggiuntivi a seguito dello scambio indiretto delle informazioni.

Nonostante queste lacune, è doveroso riservare un sentito ringraziamento all'ing. N. Monteforte per il grosso lavoro svolto e per la disponibilità continuamente dimostrata nei confronti delle richieste e delle necessità degli addetti ai lavori del Dipartimento.

5.4.3.4 SOLUZIONE IMPLEMENTATA

La presa di coscienza delle effettive problematiche presenti nella fase elaborazione è motivo fondante dello sviluppo di questo lavoro di Tesi. Nel capitolo successivo verranno ampiamente descritti il nuovo metodo di analisi dei dati, il rinnovato software di gestione delle tomografie soniche e le scelte poste alla base di queste innovazioni.

5.5 FASE DI RESTITUZIONE

Le immagini generate dal software TomoGrafia, seppur sufficientemente chiare, non permettono di interpretare correttamente la reale distribuzione delle velocità all'interno della sezione. A causa di questo limite grafico, si rende necessario l'utilizzo di un ulteriore software: Golden Software Surfer.

Surfer è uno strumento per la modellazione, il tracciamento e la visualizzazione bi e tridimensionale di tracciati, contorni e superfici, ampiamente utilizzato in campo topografico e geofisico. Sulla base delle informazioni di input e della tipologia di interpolazione di dati scelta dall'utente, il software è in grado di restituire un'immagine che rappresenta la distribuzione delle velocità soniche all'interno della sezione indagata.

Nei paragrafi successivi verranno descritte le modalità operative necessarie al raggiungimento di tale scopo.

5.5.1 FORMATTAZIONE DEI DATI DI INPUT

La prima operazione da compiere consiste nella creazione di un file di testo o di un foglio di calcolo contenente, nell'ordine, i seguenti dati:

- Coordinata x del pixel i-esimo;
- Coordinata y del pixel i-esimo;
- Velocità del pixel i-esimo calcolata dal software TomoGrafia.

È importante prestare attenzione alla corretta assegnazione di ogni velocità al rispettivo elemento della maglia e, soprattutto, all'inserimento delle coordinate x e y corrispondenti al centro del pixel e non ai suoi vertici.

5.5.2 RESTITUZIONE DELL'IMMAGINE TOMOGRAFICA

La procedura di restituzione dell'immagine tomografica da eseguire all'interno del software Surfer è la seguente:

- a. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sulla voce *Grid* contenuta nella Barra dei menu della finestra principale del programma;
- b. Nel relativo menu a tendina selezionare l'opzione *Data* per aprire la finestra corrispondente;
- c. Nella finestra *Open Data* selezionare il file contenente le informazioni tomografiche e premere il tasto *Apri*. Nel caso in cui il file sia composto da più di un foglio, il software richiede di individuare solamente quello contenente i dati utili;
- d. Eseguita la scelta, il programma apre il form *Grid Data* contenente una serie di parametri che l'utente deve impostare per proseguire nella creazione della griglia tomografica:
 - X: Nel menu a tendina selezionare la colonna del file dati contenente le coordinate x;
 - Y: Nel menu a tendina selezionare la colonna del file dati contenente le coordinate y;

- Z: Nel menu a tendina selezionare la colonna del file dati contenente le velocità soniche;
- Gridding Method: Nel menu a tendina selezionare la modalità di interpolazione dei dati desiderata;
- Output Grid File: Selezionare il percorso della directory in cui salvare il file che il software crea al termine dell'elaborazione;
- Grid Line Geometry: Se necessario, queste caselle di testo consentono di modificare i dati geometrici della griglia.

Al termine delle selezioni premere il tasto *Ok*. Il software genera automaticamente due file: uno con estensione *.grd* contenente il risultato dell'elaborazione tomografica ed un report riassuntivo delle operazioni eseguite;

- e. Cliccare con il tasto sinistro del mouse sulla voce *Map* contenuta nella Barra dei menu della finestra principale del programma;
- f. Nel relativo menu a tendina selezionare l'opzione *Data* e nel successivo elenco individuare, tra le possibili opzioni, il tipo di mappa desiderato;
- g. Nella finestra *Open Grid* selezionare il file *.grd* precedentemente creato e premere il tasto *Apri* per generare la mappa di distribuzione delle velocità.

Il processo di elaborazione dei dati sonici termina dunque con la creazione dell'immagine tomografica, per mezzo della quale divengono finalmente possibili le prime valutazioni qualitative sulle caratteristiche della muratura indagata.

5.6 OSSERVAZIONI

L'analisi delle modalità operative di misurazione, gestione ed elaborazione dei segnali sonici sopra trattata, si inserisce all'interno di un più ampio progetto di revisione della metodologia di indagine sonica tomografica volto a migliorarne l'efficacia e a favorirne la diffusione nell'ambito dello studio del costruito esistente.

Da questo esame si evince che, all'interno del processo di esecuzione della prova, sono numerosi i fattori che possono influenzarne gli esiti. Nello specifico, al

fine di favorirne l'evoluzione e la standardizzazione, è necessario approfondire lo studio ed eventualmente apportare innovazioni nei seguenti ambiti:

- Maglia di acquisizione:
 - Dimensione della griglia di acquisizione;
 - Modalità e distanza di disposizione dei punti di trasmissione-ricezione del segnale;
 - Definizione di una eventuale relazione tra la maglia di misurazione e la mesh di elaborazione dei dati.
- Modalità di acquisizione:
 - Tecniche di utilizzo degli strumenti di misura;
 - Numero e qualità dei segnali da acquisire;
 - Distanza massima tra i punti di trasmissione e ricezione delle onde.
- Software di acquisizione:
 - Definizione di una metodologia automatica di individuazione del tempo di volo dei segnali.
- Sezione e maglia di elaborazione:
 - Forma e dimensione della sezione e dei pixel di elaborazione e loro rapporto;
 - Relazione tra la disposizione dei punti di misura e la tipologia di mesh da utilizzare nell'analisi tomografica.
- Ray tracing;
- Algoritmi di risoluzione:
 - Linguaggio di programmazione ideale;
 - Metodo di risoluzione.
- Modalità e software di restituzione delle immagini tomografiche;
- Integrazione tra software.

Data la complessità e l'abbondanza dei parametri sopra descritti è necessario che il raggiungimento del massimo obiettivo di automazione e standardizzazione della prova tomografica sia affrontato per livelli, onde evitare lo sviluppo incontrollato della metodologia di indagine o la generazione di ulteriori nuove

problematiche. Per tale motivo, all'interno di questo lavoro di tesi, l'attenzione è stata incentrata solamente sulla fase di elaborazione dei dati.

L'analisi dei fattori sopracitati rappresenta comunque il punto di partenza su cui impostare le future strategie di innovazione della tecnica tomografica sonica.

CAPITOLO 6

NUOVO SOFTWARE DI ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

Il seguente capitolo è interamente dedicato alla presentazione del nuovo software di elaborazione dei dati tomografici sonici. Dopo l'iniziale introduzione relativa all'evoluzione della metodologia di indagine e la presentazione del linguaggio di programmazione utilizzato per la scrittura del programma (Python), vengono analizzati i fondamenti teorici e gli algoritmi risolutivi posti alla base del nuovo software di elaborazione TomoGrafiaNew.

6.1 PREMESSA

Di fronte alla necessità di stabilire l'integrità delle murature, le prove non distruttive si rivelano essere uno strumento di indagine estremamente utile, in quanto permettono di determinare caratteristiche non visibili direttamente sulla superficie della muratura e altrimenti individuabili solo attraverso prove distruttive. Attualmente le indagini non invasive più diffuse sono le prove soniche e ultrasoniche e le prove georadar e, per entrambe, esiste una particolare metodologia di analisi dei dati denominata tomografia, argomento centrale di questo lavoro di Tesi.

Dato che le prove non distruttive possono fornire risultati qualitativi abbastanza rilevanti, è di estrema importanza garantire la corretta acquisizione ed elaborazione dei dati. Purtroppo però nel caso delle tomografie soniche l'intero processo di realizzazione della prova è tuttora suscettibile di modifiche e

interpretazioni arbitrarie che ne rendono gli esiti certamente validi e utili, ma non in senso assoluto.

La scelta di rivedere le modalità operative di misurazione ed analisi dei segnali sonici deriva proprio dall'intento di creare un procedimento automatico ed universale di esecuzione delle prove tomografiche che ne limiti l'arbitrarietà e che le renda un riferimento certo nell'ambito delle metodologie di indagine non invasiva. La complessità dell'obiettivo posto ha però reso necessaria la scomposizione del problema in varie sottoclassi tra loro interconnesse che, affrontate singolarmente e successivamente ricongiunte, possono garantire la necessaria evoluzione della metodologia. Lo sviluppo di un nuovo software di elaborazione dei dati sonici tomografici si inserisce esattamente in questo contesto di ricerca.

6.2 GENERALITÀ

Tomografia è un termine che deriva dalla parola greca *τομος* (tomos) e significa taglio o sezione (Fontanini, 2011).

L'impiego di tecniche tomografiche nacque negli anni '30 grazie al radiologo italiano Alessandro Vallebona che propose un metodo per rappresentare una singola sezione del corpo umano su una pellicola radiografica basato sull'utilizzo dei principi della geometria proiettiva. Tale tecnica fu largamente utilizzata in campo medico fino alla metà degli anni '80 quando, grazie all'avvento del calcolatore, venne gradualmente soppiantata. La metodica posta alla base della tomografia computerizzata fu ideata e realizzata dall'ingegnere inglese Godfrey Hounsfield e dal fisico sudafricano Allan Cormack, vincitori del premio Nobel per la medicina nel 1979 con il progetto "Development of Computer Assisted Tomography". I successi ottenuti in campo medico tra gli anni '70 e '80 spinsero all'utilizzo delle tecniche tomografiche anche in altri campi scientifici quali la geofisica, la sismologia e, più tardi, l'ingegneria civile (Fontanini, 2011).

La metodologia utilizzata in ambito ingegneristico per le analisi tomografiche è abbastanza simile a quella usata per la TAC (Tomografia Assiale Computerizzata) in campo medico, ma risulta essere più complessa dal punto di

vista della trattazione matematica. I fasci di raggi X utilizzati in medicina infatti, seppur attenuati diversamente a seconda dei tessuti attraversati, seguono delle traiettorie rettilinee all'interno del corpo umano, motivo per cui il problema tomografico può essere risolto attraverso equazioni lineari. I raggi sonori (o sismici) invece, sono deviati dalle disomogeneità presenti nel mezzo che attraversano quindi la traiettoria reale dei raggi è fortemente dipendente dalla distribuzione interna dei parametri fisici. Le equazioni che governano la tomografia sonica sarebbero quindi non lineari, ma per evitare l'eccessivo onere computazione vengono linearizzate utilizzando procedimenti iterativi che mirano ad aggiornare il campo delle velocità ad ogni iterazione (Fontanini, 2011).

Un'altra differenza fondamentale tra la tomografia medica e quella strutturale è la copertura angolare ottenibile. Nella TAC il paziente è situato al centro del tomografo mentre i tubi radiogeni (sorgenti) ed i rilevatori sono montati su un anello rotante. Questa geometria di acquisizione fornisce una copertura angolare a 360° e garantisce un'altissima risoluzione dell'immagine. In campo ingegneristico non è ovviamente possibile ottenere una distribuzione di sorgenti e ricevitori altrettanto efficace, il che influisce in maniera determinante sui risultati conseguibili (Fontanini, 2011).

6.3 LINGUAGGIO DI PROGRAMMAZIONE PYTHON

Python è un linguaggio di programmazione ad alto livello (come C, C++ o Java) rilasciato pubblicamente per la prima volta nel 1991 dal programmatore olandese Guido van Rossum.

Python supporta diversi paradigmi di programmazione, come quello object-oriented (con supporto all'ereditarietà multipla), quello imperativo e quello funzionale ed offre una tipizzazione dinamica forte. È fornito di una libreria built-in estremamente ricca che, unitamente alla gestione automatica della memoria e a robusti costrutti per la gestione delle eccezioni, lo rendono uno dei linguaggi più completi, comodi e semplici da utilizzare e imparare.

La sintassi è pulita e snella così come i costrutti, abbastanza chiari e mai ambigui. In aggiunta a questo, la scelta di costruire i blocchi logici semplicemente

allineando le righe con la stessa indentazione ha contribuito ad incrementare la leggibilità e l'uniformità del codice, favorendo la cooperazione e l'interscambio di file tra diversi autori.

Python è inoltre un linguaggio pseudocompilato: un interprete analizza il codice sorgente (contenuto in file testuali con estensione .py) e, se sintatticamente corretto, lo esegue automaticamente. A differenza di altri linguaggi quindi, non esiste una fase di compilazione separata in cui, partendo dal sorgente, vengono generati file eseguibili. In più questa caratteristica rende Python un linguaggio portabile. Una volta scritto un codice completo infatti, esso può essere eseguito sulla gran parte delle piattaforme attualmente disponibili sul mercato (Microsoft Windows, MAC e GNU/Linux), purché in esse sia installata la corretta versione dell'interprete.

L'ultima importante considerazione è relativa al fatto che Python è un free software: sia il download dell'interprete per la propria piattaforma che l'uso del linguaggio nelle proprie applicazioni è completamente gratuito. Inoltre esso può essere liberamente modificato e redistribuito secondo le regole di una licenza che è pienamente open-source.

La scelta del linguaggio di programmazione da utilizzare per la scrittura del nuovo software è stata fortemente consigliata da Gianluca Giacometti, tecnico del Dipartimento ICEA. L'indiscutibile serie di vantaggi sopra descritti ha fortemente avvalorato la decisione presa, consentendo lo sviluppo di un'applicazione pratica e semplice e al contempo aperta e già predisposta a nuove future modifiche.

6.4 GESTIONE DEI DATI SONICI

In mancanza di un software unico di gestione e analisi dei dati, è stato necessario regolamentare il passaggio delle informazioni dalla fase di acquisizione a quella di elaborazione. Secondo la metodologia attualmente utilizzata, al termine delle fasi di pre-processamento dei segnali, accuratamente descritta nel Capitolo 5, i dati relativi ai tempi di volo delle onde devono essere inseriti all'interno di un foglio di calcolo. Tale passaggio operativo è stato mantenuto anche nella nuova impostazione ma, a differenza del caso precedente,

il foglio elettronico è divenuto indispensabile non solo per la memorizzazione dei dati sonici ma anche per il controllo della geometria della sezione e la gestione dei risultati provenienti dalla successiva elaborazione.

Il problema presente all'interno del programma Prove Soniche relativo alla corretta individuazione dei tempi di volo delle onde non è stato risolto, ma la possibilità di coordinare tutti i dati attraverso un unico foglio gestionale rappresenta un'alternativa momentaneamente molto valida al fine della diminuzione del tempo complessivo di analisi delle informazioni e restituzione dei risultati numerici e grafici.

Il foglio di calcolo che l'operatore deve compilare e fornire al nuovo software di elaborazione tomografica è composto da 5 fogli così strutturati:

- Foglio 1: Geometria dei punti di misurazione;
- Foglio 2: Percorsi e velocità;
- Foglio 3: Matrice di ray tracing;
- Foglio 4: Matrice delle velocità;
- Foglio 5: Dati Surfer.

6.4.1 FOGLIO 1: GEOMETRIA DEI PUNTI DI MISURAZIONE

Il primo foglio del file contiene tutti i dati relativi alla disposizione dei punti di battuta-ricezione lungo il perimetro esterno dell'elemento indagato. In esso non rientrano le informazioni geometriche inerenti la sezione in quanto queste sono gestite dall'utente direttamente nel nuovo software di elaborazione. Nello specifico, il foglio è composto da 3 colonne:

- A. Lato-Punto;
- B. Coordinata x (cm);
- C. Coordinata y (cm).

La prima colonna contiene dei valori numerici che identificano univocamente i punti di battuta-ricezione. Questo indice è composto da due numeri: il primo, compreso nell'intervallo 1÷4, indica il lato della sezione in cui è localizzato il punto

mentre il secondo, variabile da 1 a n, è un valore crescente con la distanza dall'origine che identifica ogni singolo punto appartenente ad un determinato lato.

Ai fini dell'elaborazione, la numerazione dei lati, in rigoroso senso orario, deve essere la seguente:

- Lato 1 = Lato inferiore;
- Lato 2 = Lato sinistro;
- Lato 3 = Lato superiore;
- Lato 4 = Lato destro.

La disposizione dei lati, così come il criterio di numerazione dei punti, deve essere così mantenuta in tutte le elaborazioni eseguite, indipendentemente dal numero di facce coinvolte nell'indagine. Anche nei casi di elaborazioni tomografiche eseguite su due lati contrapposti, l'indice identificativo della faccia deve rimanere costante, motivo per cui potranno risultare solamente le coppie di lati 1-3 e 2-4 e non 1-2 o 3-4. La conservazione di questa condizione è indispensabile al fine del corretto funzionamento dell'applicazione.

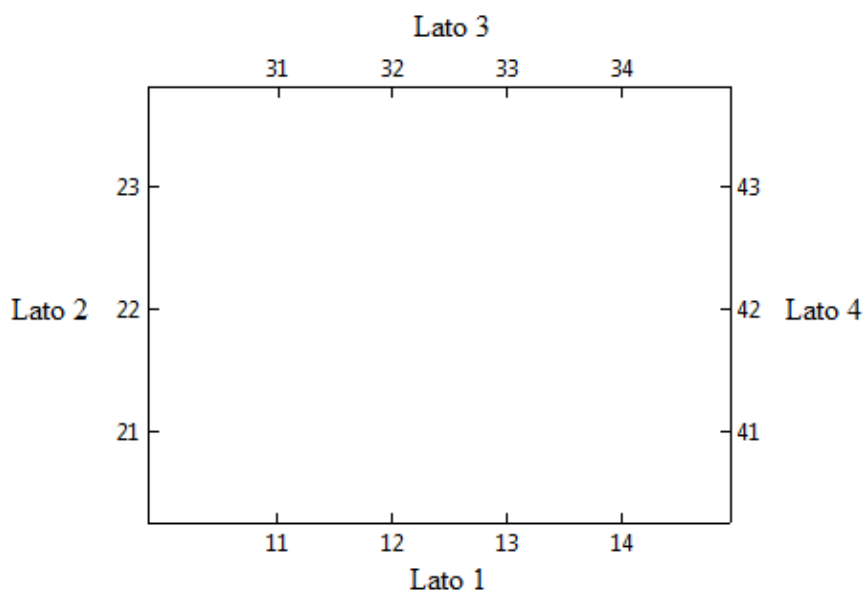


Fig. 6.1: Disposizione standard dei lati della sezione e numerazione dei punti di acquisizione.

Le due colonne successive richiedono l'inserimento delle coordinate geometriche delle posizioni di acquisizione utilizzate. Entrambe le grandezze

devono avere come unità di misura il centimetro e devono essere calcolate secondo un sistema di riferimento particolare: sia i valori x che i valori y vanno determinati in relazione ad un punto di origine situato in corrispondenza del vertice sinistro basso della prima cella di discretizzazione della sezione che, per consuetudine, è quella presente nell'angolo sud-ovest dell'immagine. È importante individuare correttamente la reale ubicazione dell'origine delle coordinate in quanto, in alcuni casi, questa potrebbe non coincidere con il vertice fisico della sezione indagata. Questa condizione si può verificare nelle tomografie su due facce, in cui gli estremi indagabili possono essere scelti arbitrariamente dagli operatori, oppure nel caso in cui la mesh di elaborazione sia diversa dall'effettiva maglia di acquisizione utilizzata.

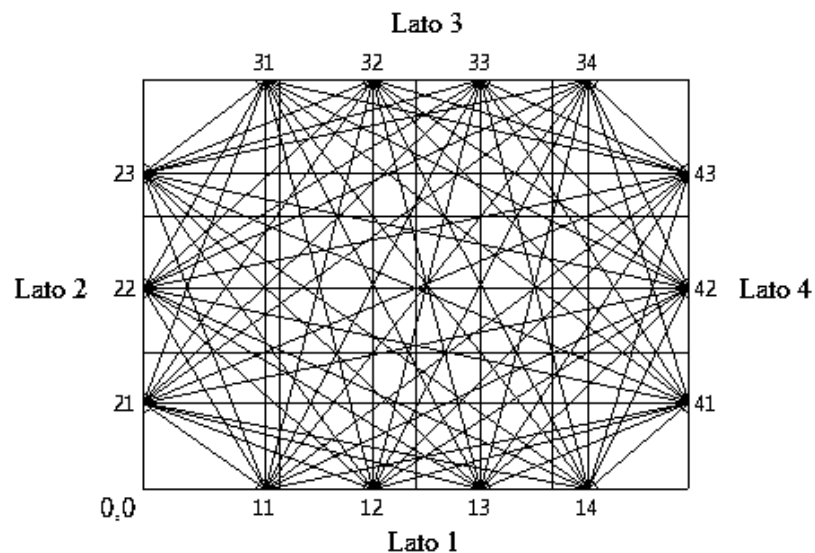


Fig. 6.2: Indicazione dell'origine rispetto alla quale calcolare le coordinate dei punti di acquisizione.

LATO-PUNTO	COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)
15	5	0
17	15	0
19	25	0
111	35	0
113	45	0
115	55	0
117	65	0
119	75	0
121	85	0
123	95	0

Fig. 6.3: Layout del foglio "Geometria dei punti".

6.4.2 FOGLIO 2: PERCORSI E VELOCITÀ

Il secondo foglio del file contiene tutti i dati relativi ai segnali sonici acquisiti e i risultati finali dell'elaborazione eseguita con il nuovo software. Per tale motivo, a differenza del precedente, questo foglio viene solo parzialmente gestito dall'operatore in quanto alcuni dei valori presenti sono automaticamente inseriti in esso durante la fase di calcolo e analisi eseguita dal programma. In totale sono utilizzate 14 colonne:

- A. Lato-Punto Tx;
- B. Lato-Punto Rx;
- C. X Tx (cm);
- D. Y Tx (cm);
- E. X Rx (cm);
- F. Y Rx (cm);
- G. T₁ (s);
- H. T₂(s);
- I. T₃(s);
- J. T_{medio}(s);
- K. Velocità iniziale stimata (m/s);
- L. Velocità iniziale corretta (m/s);
- M. Velocità calcolata (m/s);
- N. Velocità calcolata corretta (m/s).

Le prime due colonne, gestite interamente dall'utente, contengono gli indici corrispondenti alle posizioni di acquisizione dei segnali: nella prima vengono inseriti i valori identificativi dei punti di battuta mentre nella seconda sono contenuti quelli relativi ai punti di ricezione dell'onda.

Le quattro colonne successive sono destinate ad accogliere le coordinate relative ai punti di acquisizione inseriti nelle due serie precedenti. Onde evitare spiacevoli ripetizioni e notevoli perdite di tempo, la gestione di questi dati viene interamente demandata al software di elaborazione. Questo, sulla base del raffronto tra gli indici di identificazione dei punti di misurazione contenuti sia nel

primo che nel secondo foglio, è in grado di assegnare le corrette coordinate di acquisizione e ricezione ad ogni segnale. Al termine delle analisi quindi, il foglio risulterà completo e corredato dei dati geometrici precedentemente tralasciati.

LATO-PUNTOTX	LATO-PUNTO RX	X TX (cm)	Y TX (cm)	X RX (cm)	Y RX (cm)
11	21	17	0	0	13
11	22	17	0	0	26
11	23	17	0	0	39
11	31	17	0	17	57
11	32	17	0	32	57
11	33	17	0	47	57
11	34	17	0	62	57
11	41	17	0	76	13
11	42	17	0	76	26
11	43	17	0	76	39
12	21	32	0	0	13
12	22	32	0	0	26
12	23	32	0	0	39
12	31	32	0	17	57
12	32	32	0	32	57
12	33	32	0	47	57
12	34	32	0	62	57
12	41	32	0	76	13
12	42	32	0	76	26
12	43	32	0	76	39
13	21	47	0	0	13
13	22	47	0	0	26
13	23	47	0	0	39
13	31	47	0	17	57
13	32	47	0	32	57

Fig. 6.4: Layout delle prime sei colonne del foglio "Percorsi e velocità" al termine dell'elaborazione eseguita dal software TomoGrafiaNew.

Le colonne T_1 , T_2 , T_3 , controllate dall'operatore, contengono i tempi di volo dei segnali. Come già spiegato nei capitoli precedenti, l'acquisizione di tre misurazioni per ogni coppia sorgente-ricevitore è una scelta lungamente ponderata che consente di effettuare una piccola compensazione dei dati (anche se statisticamente poco significativa) ed eventualmente lascia all'utente la possibilità di eliminare le acquisizioni risultate errate in seguito alla fase di post-processamento. Naturalmente il software di elaborazione può lavorare su un unico valore del tempo di volo per ogni segnale, motivo per cui i tre intervalli di propagazione misurati vengono riassunti nel loro valore medio aritmetico, contenuto nella colonna T_{medio} . Quest'ultimo può essere facilmente calcolato utilizzando la funzione messa a disposizione dal foglio di calcolo, per cui non sono stati implementati ulteriori algoritmi all'interno del software di

elaborazione. La quantità di celle occupate da queste prime dieci colonne è pari al numero di misurazioni effettivamente acquisite per ogni coppia di punti sorgente-ricevitore.

T1 (s)	T2 (s)	T3 (s)	Tmedio (s)
7.2289E-05	5.6061E-05	5.3924E-05	6.0758E-05
1.1556E-04	1.2304E-04	1.0173E-04	1.1344E-04
2.9602E-04	1.6190E-04	1.6032E-04	2.0608E-04
2.0574E-04	2.0578E-04	2.1790E-04	2.0981E-04
2.1026E-04	1.7770E-04	1.8429E-04	1.9075E-04
2.6923E-04	2.7278E-04	2.6369E-04	2.6857E-04
3.1531E-04	4.0178E-04	3.3540E-04	3.5083E-04
3.0817E-04	3.0899E-04	2.8955E-04	3.0224E-04
3.7113E-04	3.2698E-04	2.9921E-04	3.3244E-04
3.9063E-04	4.4231E-04	2.8620E-04	3.7305E-04
1.1725E-04	1.4836E-04	1.6318E-04	1.4293E-04
1.0096E-04	1.4566E-04	1.5989E-04	1.3550E-04
2.5582E-04	-	3.9064E-04	3.2323E-04
1.9321E-04	1.8150E-04	2.0694E-04	1.9388E-04
1.8425E-04	1.9066E-04	1.8338E-04	1.8610E-04
2.0590E-04	2.1353E-04	2.1792E-04	2.1245E-04
2.4338E-04	3.4005E-04	2.4520E-04	2.7621E-04
2.5984E-04	3.3017E-04	3.3826E-04	3.0942E-04
2.5636E-04	2.3574E-04	2.3577E-04	2.4262E-04
2.6772E-04	3.9837E-04	3.2410E-04	3.3006E-04
2.1263E-04	3.1129E-04	2.7017E-04	2.6470E-04
1.8465E-04	2.4655E-04	1.9084E-04	2.0735E-04
3.1143E-04	2.7885E-04	4.3582E-04	3.4203E-04
2.4001E-04	2.5389E-04	2.5509E-04	2.4966E-04
2.0868E-04	2.0135E-04	2.2079E-04	2.1027E-04

Fig. 6.5: Layout delle quattro colonne del foglio "Percorsi e velocità" contenenti i tempi acquisiti.

Le ultime quattro colonne del foglio sono destinate ad accogliere i risultati finali dell'analisi tomografica e sono quindi appannaggio del programma TomoGrafiaNew. La colonna *Velocità iniziale stimata* contiene le velocità dei pixel dell'ipotetico modello iniziale calcolate come media delle velocità dei tratti di percorso contenuti in ogni cella. I valori riportati nella colonna successiva sono invece frutto di un controllo effettuato dal software sui dati del modello: a causa di ben noti limiti fisici, la velocità di propagazione all'interno di una muratura in pietra o laterizio non può essere inferiore a 340 m/s (velocità nell'aria) o superiore a 3000÷3500 m/s. Purtroppo la mancanza di controlli in fase di acquisizione non assicura questa condizione, motivo per cui all'interno del software è stato predisposto un algoritmo di rilevazione degli eventuali errori delle velocità e di sostituzione di tali valori con quelli di fondo scala inferiore e superiore. La

colonna *Velocità calcolata* contiene la soluzione finale restituita dall'algoritmo iterativo del software TomoGrafiaNew mentre nell'ultima colonna sono presenti gli stessi risultati finali depurati però degli eventuali errori. Il criterio di sostituzione dei valori fuori scala è il medesimo impostato e spiegato precedentemente ($340 \text{ m/s} < \text{velocità} < 3500 \text{ m/s}$). La quantità di celle occupate da queste ultime quattro colonne è pari al numero di pixel utilizzati per la discretizzazione della sezione, mentre il riempimento è eseguito riga per riga partendo dalla velocità corrispondente al primo pixel posto in basso a sinistra della sezione.

Velocità iniziale stimata (m/s)	Velocità iniziale corretta (m/s)	Velocità calcolata (m/s)	Velocità corretta (m/s)
2387.558946	2387.558946	2269.227036	2269
2304.545667	2304.545667	2224.644193	2224
2269.692989	2269.692989	1899.14111	1899
2324.881708	2324.881708	2892.254264	2892
2419.740241	2419.740241	10626.28394	3500
2347.350484	2347.350484	2631.54264	2631
2282.848826	2282.848826	2324.714579	2324
2247.633374	2247.633374	1632.695995	1632
2133.012386	2133.012386	966.7826929	966
2359.276237	2359.276237	2401.306767	2401
2338.880664	2338.880664	2233.174351	2233
2420.866673	2420.866673	2515.914165	2515

Fig. 6.6: Layout delle ultime quattro colonne del foglio "Percorsi e velocità" al termine dell'elaborazione eseguita dal software TomoGrafiaNew.

6.4.3 FOGLIO 3: MATRICE DI RAY TRACING

La matrice di ray tracing è un vettore bidimensionale caratterizzato da un numero di righe pari alle misurazioni effettivamente acquisite per ogni coppia di punti sorgente-ricevitore e da un numero di colonne pari ai pixel utilizzati per la discretizzazione della sezione. Al suo interno sono riportate le lunghezze di tutti i tratti dei percorsi contenuti nelle diverse celle. Il terzo foglio del file, interamente gestito e compilato dal software di elaborazione, è destinato ad accogliere tale matrice. Il criterio di riempimento delle celle è simile a quello utilizzato nei fogli precedenti ed avviene sempre partendo dal primo pixel in basso a sinistra della sezione.

È importante tenere presente che nelle versioni del software Microsoft Excel[®] precedenti al 2010, le uniche gestibili dalla nuova applicazione, il numero di

colonne disponibili in ogni foglio è pari a 256. Nella scelta della maglia di discretizzazione, ossia nella definizione delle dimensioni della matrice di ray tracing, risulta quindi indispensabile considerare tale limite per evitare la creazione di un numero di pixel eccessivo.

MATRICE DI RAY TRACING									
21.40093	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22.70094	0	0	0	8.363506	0	0	0	0	0
20.72661	0	0	0	20.72661	0	0	0	1.090874	0
19	0	0	0	19	0	0	0	0	19
7.858753	11.78813	0	0	0	19.64688	0	0	0	0
4.294182	17.17673	0	0	0	21.47091	0	0	0	0
3.227658	20.97978	0	0	0	9.682975	14.52446	0	0	0
2.047974	19.45575	19.45575	19.45575	0	0	0	0	0	0
2.185586	20.76307	20.76307	3.404471	0	0	0	17.3586	0	0
2.397451	22.77579	9.28244	0	0	0	13.49335	20.96233	0	0
20.50803	14.03181	0	0	0	0	0	0	0	0
13.38027	16.75012	0	0	11.10067	0	0	0	0	0
4.08273	20.4945	0	0	24.57723	0	0	0	1.293538	0
0	19.64688	0	0	0	19.64688	0	0	7.858753	0
0	19	0	0	0	19	0	0	0	0
0	19.64688	0	0	0	3.929377	15.71751	0	0	0
0	12.88255	8.588364	0	0	0	21.47091	0	0	0
0	6.256402	19.81194	19.81194	0	0	0	0	0	0
0	6.969236	22.06925	8.309473	0	0	0	13.75977	0	0
0	8.017672	20.62666	0	0	0	4.762634	23.8817	0	0

Fig. 6.7: Layout di una porzione del foglio “Matrice di ray tracing” al termine dell’elaborazione eseguita dal software TomoGrafiaNew.

6.4.4 FOGLIO 4: MATRICE DELLE VELOCITÀ

Il penultimo foglio del file di calcolo contiene gli stessi dati riportati dal software TomoGrafiaNew nella colonna *Velocità corretta* appartenente al foglio “Percorsi e velocità”. In questo caso però i risultati finali sono trascritti in forma matriciale e rispecchiano la disposizione dei pixel di discretizzazione della sezione.

La trascrizione dei medesimi valori all’interno di un nuovo foglio ha una duplice valenza: fornire all’operatore una visione più comprensibile della reale distribuzione delle velocità e agevolare il software nelle operazioni di gestione dei dati.

MATRICE DI DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ									
4726	4739	4619	4580	4665	4550	4974	4914	5016	4927
4745	4782	4476	4588	4255	4200	5053	5175	4880	4767
4857	4680	4643	4041	3805	4200	4694	4681	4844	4798
4902	4912	4197	4110	4477	4685	4714	4833	4693	4688
4927	4842	4839	4446	4552	4640	4728	4643	4626	4898
4821	4820	4678	4573	4665	4611	4737	4966	4497	4782
4678	4781	4754	4538	4740	4765	4299	3997	4843	4745
4810	4796	4802	4604	4732	4810	4095	4114	4856	4758
4581	4780	4704	4796	4533	4523	4829	4754	4660	4815
4686	4781	4551	4833	4767	4837	4714	4623	4843	4740

Fig. 6.8: Layout del foglio “Matrice delle velocità” al termine dell’elaborazione eseguita dal software TomoGrafiaNew.

6.4.5 FOGLIO 5: DATI SURFER

A causa dei limiti grafici del linguaggio Python e della difficoltà computazionale legata all’implementazione di un efficiente algoritmo di interpolazione dei dati, è risultato necessario demandare la creazione delle immagini ad un software commerciale dedicato, il Golden Software Surfer.

Il quinto ed ultimo foglio del file, interamente gestito e compilato dal software di elaborazione, consente appunto di creare il collegamento tra le fasi di elaborazione dei dati e di restituzione dell’immagine tomografica. Al suo interno sono presenti 3 colonne:

- A. Coordinata x (cm);
- B. Coordinata y (cm);
- C. Velocità (m/s).

Le prime due colonne sono destinate ad accogliere le coordinate relative al centro dei pixel costituenti la sezione. Come nei casi precedenti, l’origine del sistema è coincidente con il vertice sinistro basso della prima cella di discretizzazione della sezione che, per consuetudine, è quella presente nell’angolo sud-ovest dell’immagine. L’ultima colonna contiene invece i valori delle velocità relative a ciascun pixel.

A differenza dei casi precedenti, la trascrizione dei dati avviene partendo dalla prima cella presente nell’angolo in alto a sinistra e prosegue colonna per colonna.

COORDINATA X (cm)	COORDINATA Y (cm)	VELOCITÀ (m/s)
10	190	4726
10	170	4745
10	150	4857
10	130	4902
10	110	4927
10	90	4821
10	70	4678
10	50	4810
10	30	4581
10	10	4686
30	190	4739
30	170	4782
30	150	4680
30	130	4912
30	110	4842
30	90	4820
30	70	4781
30	50	4796
30	30	4780
30	10	4781

Fig. 6.9: Layout di una porzione del foglio "Dati Surfer" al termine dell'elaborazione eseguita dal software TomoGrafiaNew.

6.5 GEOMETRIA DELLA SEZIONE E DELLE MISURE

Il nuovo software di elaborazione è in grado di gestire solamente sezioni di forma quadrata e rettangolare, o comunque elementi il cui perimetro sia riconducibile ad esse. Tale scelta è dettata principalmente da due fattori: la difficoltà di implementazione di un algoritmo adatto alla risoluzione di sezioni poligonali generiche e la non effettiva necessità di gestione di elementi aventi forme particolari. L'implementazione di questa opzione sarà comunque riconsiderata all'interno dei futuri progetti di aggiornamento del software.

Ogni elemento indagato deve essere discretizzato secondo una griglia composta da n righe ed m colonne di dimensioni costanti, con lo scopo di originare $n \times m$ pixel di forma quadrata. Ognuno di essi, grazie agli algoritmi implementati nel software di elaborazione, viene caratterizzato dal valore di un parametro fisico (velocità o lentezza sonora) in relazione al quale è possibile ricostruire l'immagine tomografica della sezione indagata.

Come già spiegato e mostrato nel paragrafo precedente, i punti di trasmissione-ricezione devono essere disposti lungo i lati esterni dei pixel perimetrali e numerati in ordine progressivo da sinistra a destra, per i lati orizzontali e dal basso verso l'alto, per i lati verticali (vedi Fig. 6.2). Allo stesso modo le facce della sezione devono essere contrassegnate da un indice crescente in senso orario, a partire dal lato posto in coincidenza con l'ascissa di un ipotetico piano cartesiano (vedi Fig. 6.1).

In generale questa disposizione evita la ripetizione di singole misure lungo lo stesso percorso generata dall'involontaria inversione dei punti di battuta-ricezione. Ciononostante è consigliabile, soprattutto in fase di sperimentazione della prova, eseguire alcune misurazioni a posizioni invertite in quanto in certi casi studio sono state riscontrate delle discrepanze tra le acquisizioni derivanti da segnali generati in sensi opposti.

Anche la corretta definizione dei ventagli di illuminazione, ossia degli insiemi di misure relative a due lati, deve essere accuratamente progettata. In questo caso l'ordine di esecuzione della prova non ha ripercussioni sull'esito finale, ma il controllo delle fasi di acquisizione assicura comunque la corretta esecuzione dell'indagine ed evita la possibile perdita di dati.

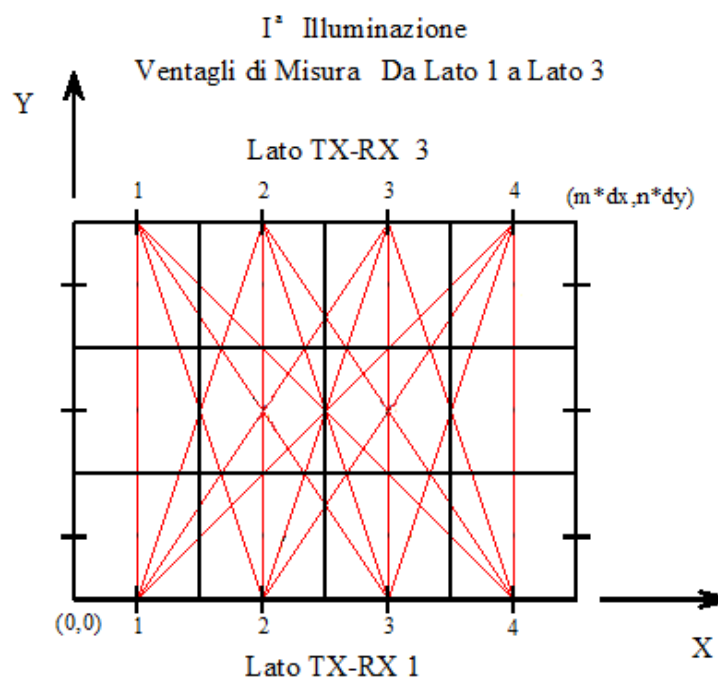


Fig. 6.10: Ventaglio di illuminazione da Lato 1 a Lato 3 (Monteforte, 1998).

6.6 SOFTWARE DI ELABORAZIONE

6.6.1 INTERFACCIA GRAFICA

L'interfaccia grafica del nuovo software di elaborazione tomografica si presenta, al primo impatto, semplice e intuitiva. All'interno della finestra utente è possibile individuare tre distinte zone:

- Barra dei menu;
- Interfaccia di gestione dei dati;
- Interfaccia di visualizzazione dei dati.

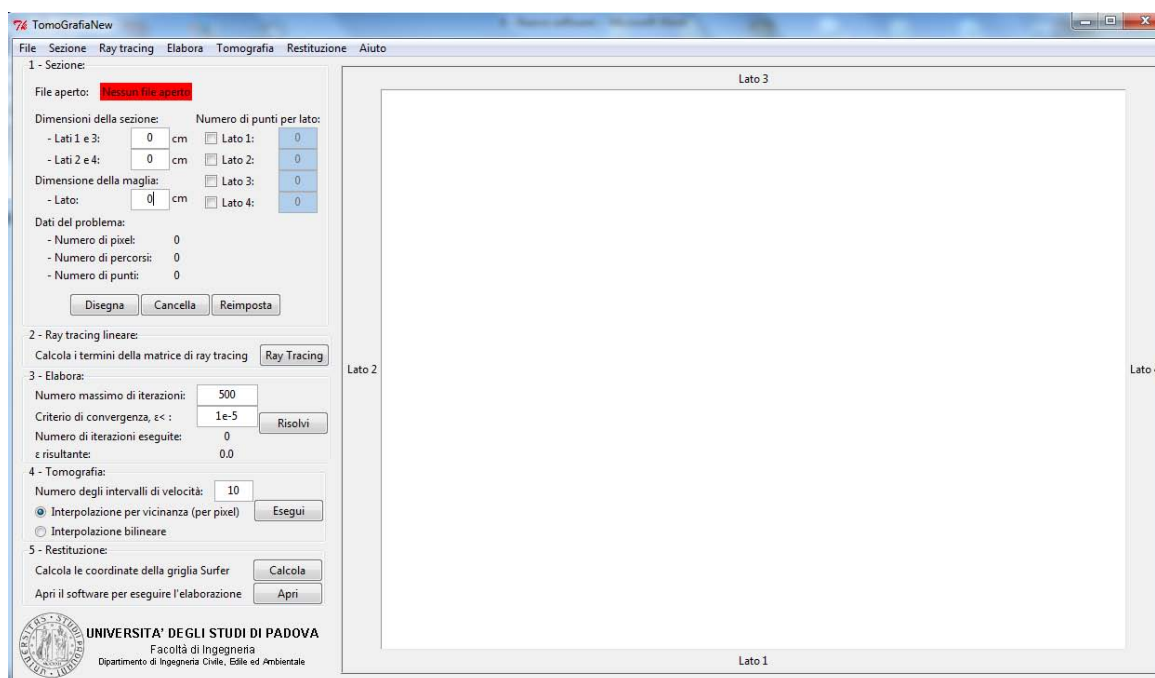


Fig. 6.11: Interfaccia grafica del software TomoGrafiaNew.

6.6.1.1 BARRA DEI MENU

Posta nella parte superiore della finestra utente, la Barra dei Menu raccoglie in un unico elemento tutte le funzionalità rese disponibili dal software, consentendo di eseguire le stesse operazioni svolte dai pulsanti presenti nelle altre interfacce. Inoltre può velocizzare l'esecuzione dell'elaborazione in quanto suggerisce i tasti di scelta rapida associati alle diverse funzioni. La barra è composta da 7 menu:

1. File;
2. Sezione;
3. Ray tracing;
4. Elabora;
5. Tomografia;
6. Restituzione;
7. Aiuto.

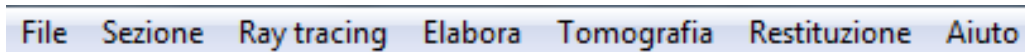


Fig. 6.12: Barra dei menu del software TomoGrafiaNew.

Nel menu *File* sono presenti due sottomenu che consentono di avviare il software e di terminarne definitivamente l'esecuzione. La voce *Apri (Ctrl+O)* consente di scegliere il foglio elettronico da cui l'utente intende prelevare le informazioni geometriche e soniche con cui eseguire l'elaborazione. Questo passaggio è indispensabile in quanto la mancata apertura del file impedisce qualsiasi tipo di operazione.

Il sottomenu *Chiudi (Ctrl+Q)* può invece essere utilizzato dall'operatore per chiudere il programma al termine della sessione di lavoro. La stessa funzionalità è garantita dalla pressione del pulsante rosso posto nell'angolo in alto a destra dell'interfaccia grafica ma, a differenza di questo, la voce presente nel sottomenu avvisa l'utente che la sessione sta per essere chiusa permettendogli eventualmente di annullare l'operazione.

Nel menu *Sezione* sono presenti le voci che consentono all'operatore di effettuare una prima elaborazione dei dati geometrici della sezione e di visualizzarne i risultati nell'interfaccia grafica. La funzione *Disegna (Ctrl+D)*, sulla base delle informazioni geometriche contenute nel foglio di calcolo e dei valori inseriti in alcune caselle di testo presenti nella finestra, calcola il numero di pixel, di percorsi e di punti di battuta-ricezione relativi al problema che sta analizzando e disegna la sezione nell'apposita interfaccia grafica. La voce *Cancella (Ctrl+E)* viene

utilizzata per ripulire la finestra grafica mentre il comando *Reimposta* (*Ctrl+R*) setta tutti i valori delle caselle di testo a 0.

La voce *Ray tracing* (*Ctrl+T*), contenuta all'interno del menu *Ray tracing* consente all'utente di avviare il calcolo della matrice dei percorsi lineari, elemento indispensabile per la valutazione della distribuzione delle velocità. Al termine di questa operazione il software trascrive automaticamente i valori calcolati nel terzo foglio del file di calcolo associato al problema.

La funzione *Risolvi* (*Ctrl+S*), presente nel sottomenu *Elabora*, consente di avviare l'algoritmo iterativo di risoluzione del problema tomografico. Ai fini della corretta esecuzione del calcolo è necessario che l'utente, prima di iniziare l'elaborazione, imposti i valori di alcuni parametri presenti nell'interfaccia.

All'interno del menu *Tomografia* è invece presente la voce *Esegui* (*Ctrl+I*). Questa funzione restituisce una prima elaborazione grafica molto grossolana della distribuzione delle velocità all'interno della sezione.

Nel menu *Restituzione* sono invece presenti due sottomenu che permettono di interfacciarsi con il software di elaborazione e visualizzazione dell'immagine tomografica (Golden Software Surfer). Il pulsante *Calcola* (*Ctrl+C*) viene utilizzato per calcolare le coordinate dei punti centrali dei pixel indispensabili per la corretta elaborazione della tomografia mentre, attraverso la voce *Apri* (*Ctrl+V*), l'utente avvia automaticamente il software di restituzione grafica.

Infine nell'ultima voce della Barra dei menu, *Aiuto*, è presente la funzione *Istruzioni* (*Ctrl+H*) che apre una finestra contenente un brevissimo manuale dell'utente.

6.6.1.2 INTERFACCIA DI GESTIONE DEI DATI

L'interfaccia di gestione dei dati rappresenta la parte principale del software in quanto, insieme al foglio elettronico, consente di completare l'elaborazione tomografica. Al suo interno è possibile individuare 5 unità:

1. Sezione;
2. Ray tracing lineare;
3. Elabora;
4. Tomografia;
5. Restituzione.

The screenshot displays the data management interface of TomoGrafiaNew, organized into five distinct sections:

- 1 - Sezione:**
 - File aperto: Nessun file aperto
 - Dimensioni della sezione:
 - Lati 1 e 3: 0 cm
 - Lati 2 e 4: 0 cm
 - Dimensione della maglia:
 - Lato: 0 cm
 - Numero di punti per lato:
 - Lato 1: 0
 - Lato 2: 0
 - Lato 3: 0
 - Lato 4: 0
 - Dati del problema:
 - Numero di pixel: 0
 - Numero di percorsi: 0
 - Numero di punti: 0
 - Buttons: Disegna, Cancella, Reimposta
- 2 - Ray tracing lineare:**
 - Calcola i termini della matrice di ray tracing
 - Ray Tracing
- 3 - Elabora:**
 - Numero massimo di iterazioni: 500
 - Criterio di convergenza, $\epsilon <$: 1e-5
 - Numero di iterazioni eseguite: 0
 - ϵ risultante: 0.0
 - Risolvi
- 4 - Tomografia:**
 - Numero degli intervalli di velocità: 10
 - Interpolazione per vicinanza (per pixel) (selected)
 - Interpolazione bilineare
 - Esegui
- 5 - Restituzione:**
 - Calcola le coordinate della griglia Surfer
 - Calcola
 - Apri il software per eseguire l'elaborazione
 - Apri

Fig. 6.13: Interfaccia di gestione dei dati del software TomoGrafiaNew.

Il primo elemento presente nell'interfaccia *Sezione* è un label in cui, all'esecuzione della funzione *Apri*, viene inserito il nome del foglio di calcolo contenente la disposizione dei punti di trasmissione-ricezione e i tempi di volo dei segnali.

Nella parte sottostante sono presenti le caselle di testo, i check-button e i pulsanti relativi ai dati geometrici della sezione e alla loro elaborazione. Nelle caselle di testo *Lati 1 e 3*, *Lati 2 e 4* e *Lato*, vanno inserite rispettivamente le lunghezze delle facce orizzontali e delle facce verticali e la dimensione dei pixel della maglia di discretizzazione. Attraverso i check-button *Lato 1*, *Lato 2*, *Lato 3* e *Lato 4* è invece possibile abilitare o disabilitare le relative caselle di testo poste a fianco di essi. L'inserimento o meno dei dati in questi spazi è collegato alla reale disposizione dei punti di battuta-ricezione: l'utente deve abilitare le caselle di testo e inserire il numero esatto di punti di misurazione solo se la faccia è effettivamente coinvolta nell'acquisizione. In caso contrario il check-button non deve essere selezionato. Nella parte terminale della prima unità dell'interfaccia sono presenti i label *Numero di pixel*, *Numero di percorsi* e *Numero di punti* che, utilizzati dal software per visualizzare i dati relativi al problema tomografico, non sono gestibili dall'utente.

Infine i pulsanti *Disegna*, *Cancella* e *Reimposta* consentono rispettivamente di: calcolare i parametri del problema tomografico e visualizzare la sezione nella finestra grafica, ripulire la finestra grafica e resettare tutti i valori inseriti dall'utente nelle caselle di testo sopra indicate.

All'interno dell'interfaccia *Ray tracing lineare* è posizionato un pulsante denominato *Ray tracing* che consente all'utente di avviare il calcolo della matrice dei percorsi lineari, elemento indispensabile per la valutazione della distribuzione delle velocità.

Nella sezione *Elabora* sono contenuti 5 elementi: due caselle di testo, due label e un pulsante.

Il tasto *Risolvi* consente di avviare l'algoritmo iterativo di risoluzione del problema tomografico. Ai fini della corretta esecuzione del calcolo è necessario che

l'utente, prima di iniziare l'elaborazione, imposti i valori dei criteri di uscita dal ciclo di risoluzione contenuti nelle caselle *Numero massimo di iterazioni* e *Criterio di convergenza*. Infine nei label *Numero di iterazioni eseguite* e ε risultante vengono riportati gli effettivi valori dei parametri risultanti dall'esecuzione dell'algoritmo di calcolo delle velocità söniche.

Con il pulsante *Esegui*, presente all'interno della sezione *Tomografia*, è invece possibile ottenere una prima restituzione grafica molto grossolana della distribuzione delle velocità all'interno della sezione.

Oltre all'impostazione del numero di intervalli in cui il range delle velocità deve essere suddiviso, controllabile attraverso la casella di testo *Numero degli intervalli di velocità*, l'utente può decidere se visualizzare la mappa tomografica derivante dall'interpolazione dei dati per vicinanza o bilineare. La prima tipologia consiste nell'assegnare ad ogni pixel del dominio il valore del punto campionato più vicino. Il risultato è una tassellazione, ossia la creazione di un'immagine costituita da celle univocamente determinate aventi valori costanti di velocità. La seconda è invece il risultato di una doppia interpolazione lineare dei dati eseguita lungo le due direzioni principali dell'immagine.

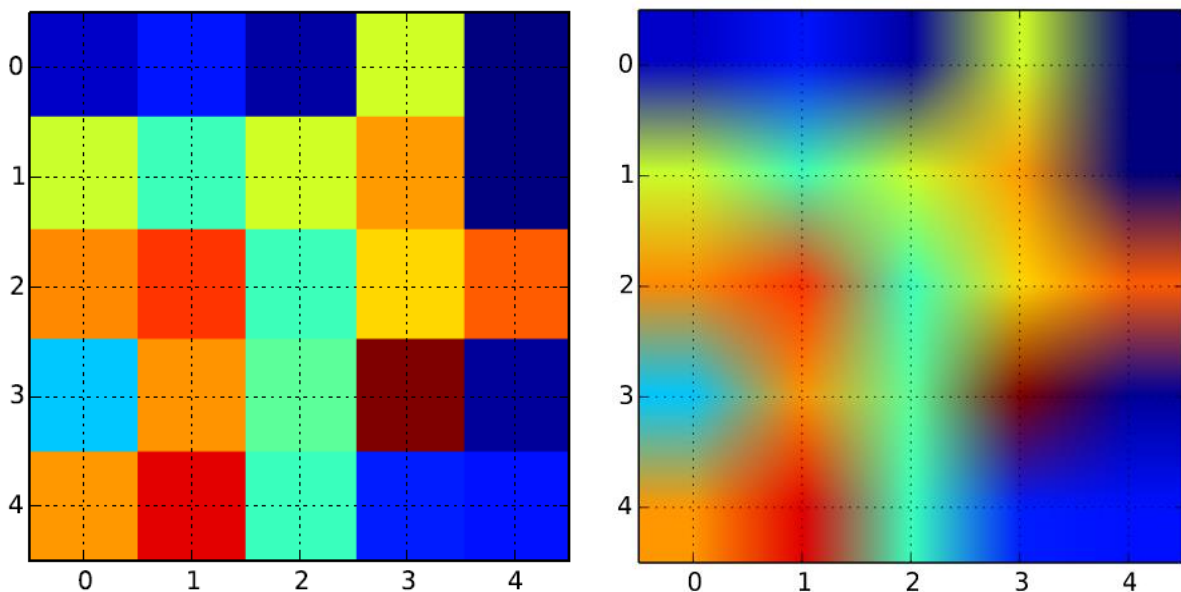


Fig. 6.14: Risultato finale di un interpolazione per vicinanza (sinistra) e di una bilineare (destra).

Infine nella sezione *Restituzione*, l'ultima presente all'interno dell'interfaccia di gestione dei dati, sono presenti due pulsanti che permettono il collegamento con il software di elaborazione e visualizzazione dell'immagine tomografica (Golden Software Surfer). Il pulsante *Calcola* viene utilizzato per determinare le coordinate dei punti centrali dei pixel, indispensabili per la corretta elaborazione della tomografia mentre, attraverso la voce *Apri*, l'utente può automaticamente avviare il software di restituzione grafica.

6.6.1.3 INTERFACCIA DI VISUALIZZAZIONE DEI DATI

L'interfaccia di visualizzazione dei dati, controllabile attraverso i pulsanti *Disegna* e *Cancella* precedentemente descritti, consente all'utente di ottenere una rapida rappresentazione della geometria della sezione e degli ipotetici percorsi lineari compiuti dai segnali sonici all'interno del mezzo. La finestra grafica è caratterizzata da una sezione totalmente bianca in cui, al termine dell'elaborazione, viene visualizzata l'immagine e da alcune didascalie che, disposte lungo il perimetro esterno dell'interfaccia, rammentano all'utente l'esatta disposizione dei lati di indagine.

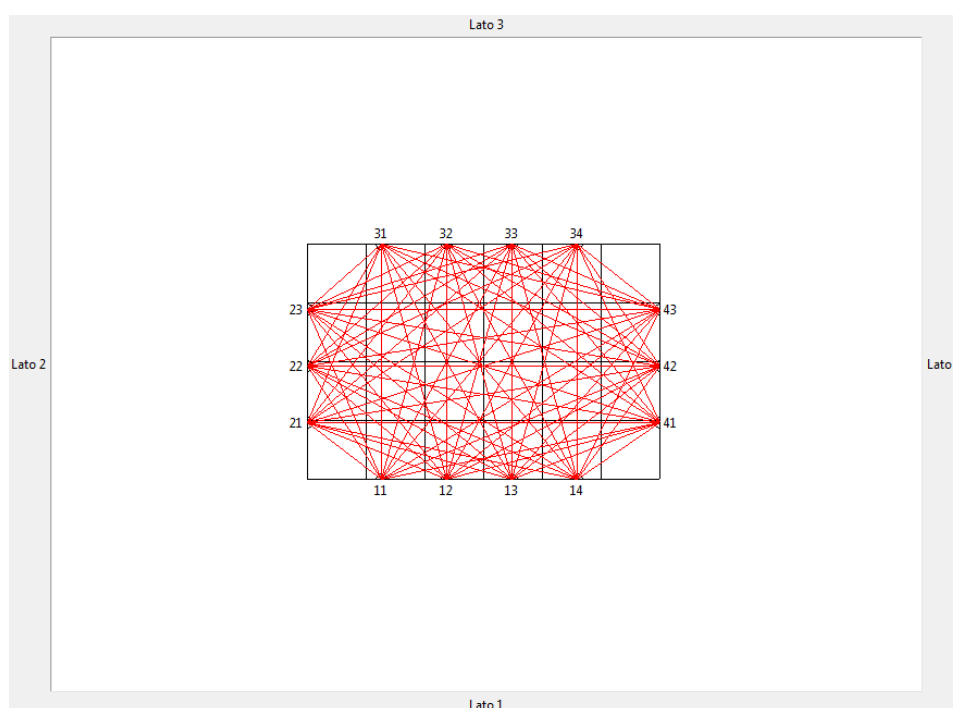


Fig. 6.15: Interfaccia di gestione dei dati del software TomoGrafiaNew.

L'immagine raffigurata nella finestra ha carattere indicativo e può aiutare l'operatore ad individuare gli eventuali errori presenti all'interno del foglio di calcolo o dell'interfaccia di gestione dei dati.

6.6.2 TOMOGRAFIA SONICA COME PROBLEMA INVERSO

Ai fini della risoluzione dei problemi connessi alle indagini non distruttive, spesso caratterizzate da informazioni incognite o da grandezze non quantitative di difficile stima, è necessario individuare la relazione che lega i parametri fisici che caratterizzano un certo modello m ad un insieme di osservazioni sperimentali che costituiscono un set di dati d . Se i fondamenti del problema fisico studiato sono noti, allora è possibile specificare una funzione G tale che (Emolo, 2011):

$$G(m) = d$$

Il problema diretto consiste nel calcolare d dato m mentre, il problema inverso, consente di ricavare m dato d . Il caso dell'indagine tomografica è un tipico esempio di problema inverso in cui, note le lunghezze dei percorsi dei segnali e i tempi impiegati da questi a compiere il loro tragitto, è possibile individuare la velocità (o lentezza) di propagazione delle onde elastiche.

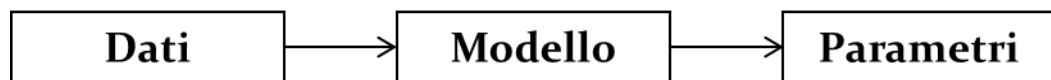


Fig. 6.16: Schema di risoluzione di un problema inverso.

Supponendo che la lentezza (inverso della velocità) in un punto x sia $s(x)$ e che il percorso del raggio γ sia noto, allora il tempo di volo lungo quel percorso è dato dall'integrale lineare:

$$t = \int_{\gamma} s(x(l)) dl$$

Nel caso delle murature e, più in generale, dei mezzi fortemente eterogenei, per effetto dei fenomeni di riflessione e rifrazione i raggi possono cambiare direzione. A causa dell'eccessivo onere computazionale richiesto e, pur conoscendo

il livello di approssimazione che tale scelta avrebbe comportato, è stato deciso di trascurare tali fenomeni fisici e di considerare i raggi come linee rette. In tal modo il problema inverso è stato trattato come un problema lineare.

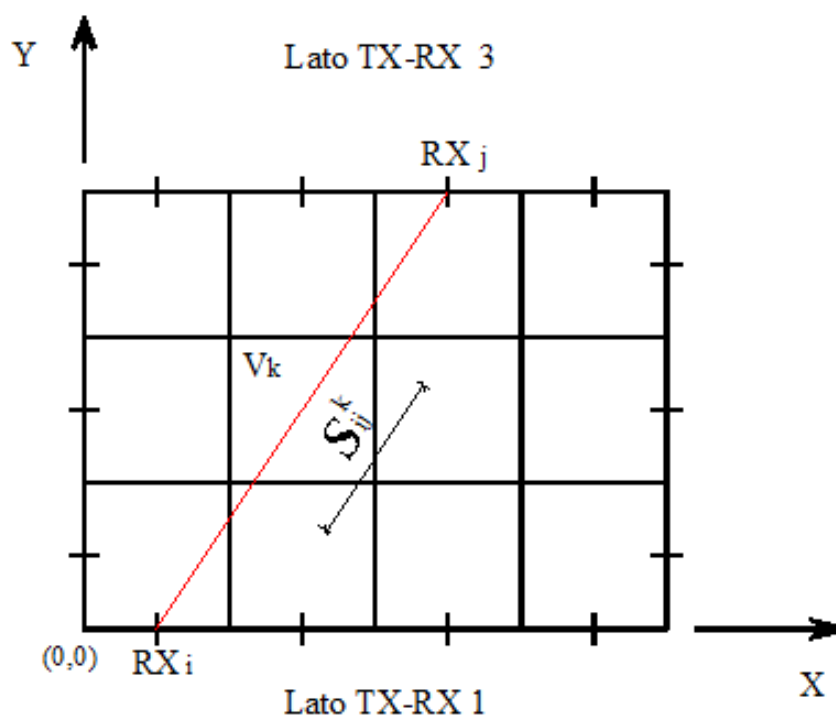


Fig. 6.17: Ipotesi di percorso lineare delle onde soniche (Monteforte, 1998).

Il problema risulta quindi essere caratterizzato da una serie di equazioni, in numero pari a quello dei segnali acquisiti, in cui i termini noti corrispondono ai tempi di volo delle onde soniche e le incognite alle velocità di ciascun pixel in cui la sezione è stata discretizzata.

Nelle analisi tomografiche soniche è possibile supporre che l'energia che viaggia da una sorgente ad un ricevitore si propaghi lungo un percorso (raggio) molto stretto. La copertura dei raggi può variare significativamente nel modello in studio e può quindi fornire maggiori informazioni circa le proprietà fisiche ricavate nelle zone più densamente campionate rispetto a quelle desunte nelle regioni scarsamente campionate (Emolo, 2011).

6.6.3 MATRICE DI RAY TRACING LINEARE

Sulla base delle ipotesi di propagazione lineare delle onde soniche e di discretizzazione della sezione con maglie di forma quadrata, è necessario calcolare il valore dei segmenti di ogni percorso compresi nei diversi pixel della sezione e salvare tali dati in un'apposita matrice.

Per fare ciò è stato implementato un algoritmo di calcolo geometrico basato sui dati effettivamente disponibili:

- Posizione dei punti di trasmissione-ricezione;
- Dimensioni della sezione;
- Dimensione dei pixel della maglia di discretizzazione;
- Numero di pixel della sezione.

La risoluzione è legata all'esecuzione di due differenti funzioni collegate da rapporto padre-figlio: la prima, *matriceRayTracingLineare*, ha il compito di prelevare sequenzialmente dal foglio di calcolo le coordinate dei punti di battuta-ricezione relative a ciascun segnale e di passarle alla funzione figlia *rayTracingLineare* che calcolerà la lunghezza di tutti i segmenti che, contenuti nei diversi pixel, compongono ogni percorso. Al termine dell'elaborazione, i nuovi dati calcolati verranno trasferiti alla routine padre che li scriverà nell'apposito foglio del file di calcolo in forma matriciale. Questo metodo di risoluzione è il medesimo utilizzato dell'Ing. N. Monteforte nel proprio lavoro di tesi e, data la sua validità, è stato ripreso e semplicemente aggiornato.

Il codice sorgente della subroutine padre *matriceRayTracingLineare* è così costituito:

1. Viene aperto il foglio di calcolo contenente i dati relativi alla disposizione geometrica dei punti di trasmissione-ricezione:

```
def matriceRayTracingLineare(self, event=None):
    try:
        self.fileAperto = open_workbook(scegliFile, formatting_info=True)
        self.foglio2 = self.fileAperto.sheet_by_index(1)
```

```
self.foglio3 = self.fileAperto.sheet_by_index(2)
self.scrivi = xlutils_copy(self.fileAperto)
self.foglio3scrivi = self.scrivi.get_sheet(2)
except:
    self.erroreApertura = tkMessageBox.showwarning("Errore", "Prima di
        procedere devi aprire il file di origine dei dati",
        icon="warning")
return
```

2. La funzione *matriceRayTracingLineare* legge dal foglio di calcolo le coordinate dei punti di battuta ricezione e le passa alla subroutine figlia *rayTracingLineare*:

```
try:
    z = 1
    a = 1
    self.pInizio = Punto()
    self.pFine = Punto()
    while z <= self.numTotPercorsi.get():
        self.pInizio.x = self.foglio2.cell_value(z,2)
        self.pInizio.y = self.foglio2.cell_value(z,3)
        self.pFine.x = self.foglio2.cell_value(z,4)
        self.pFine.y = self.foglio2.cell_value(z,5)
        self.rayTracingLineare(self.pInizio, self.pFine)
```

3. La funzione *rayTracingLineare*, attraverso uno specifico algoritmo, elabora i dati ricevuti e ritorna le lunghezze calcolate alla subroutine padre *matriceRayTracingLineare* che provvederà a inserire i risultati nel foglio di calcolo:

```
b=1
c=0
d=0
while b <= self.nPixelTot:
    self.foglio3scrivi.write(a,c,self.percorsiPixel[d])
```

$$b = b+1$$

$$c = c+1$$

$$d = d+1$$

$$a = a+1$$

$$z = z+1$$

4. La funzione esegue un controllo per verificare che le operazioni di calcolo siano state eseguite correttamente:

```
self.esecuzioneCorretta = tkMessageBox.showinfo("Esecuzione terminata", "La
funzione di ray tracing è stata eseguita
correttamente", icon="info")
```

```
os.remove(scegliFile)
```

```
self.scrivi.save(scegliFile)
```

except:

```
self.erroreEsecuzione = tkMessageBox.showwarning("Errore", "Errore di
esecuzione: controlla i dati di ingresso e ripeti
l'operazione", icon="error")
```

```
return
```

L'algoritmo di risoluzione contenuto all'interno della subroutine *rayTracingLineare* si basa su una serie di calcoli legati alla geometria sia della maglia di discretizzazione che dei percorsi dei segnali. Gli elementi da considerare ai fini del calcolo delle lunghezze dei tratti di percorso contenuti nei diversi pixel sono:

- L'equazione parametrica della retta r congiungente la coppia di punti trasmissione-ricezione;
- L'angolo α che la retta r forma con l'ascissa;
- L'angolo γ formato dalla semi diagonale del pixel considerato con la retta passante per il centro del pixel stesso e perpendicolare ad r ;
- La distanza d tra il centro del pixel e la retta r ;

- La distanza d' tra il centro del pixel e la retta r' , parallela ad r e passante per il vertice del pixel stesso.

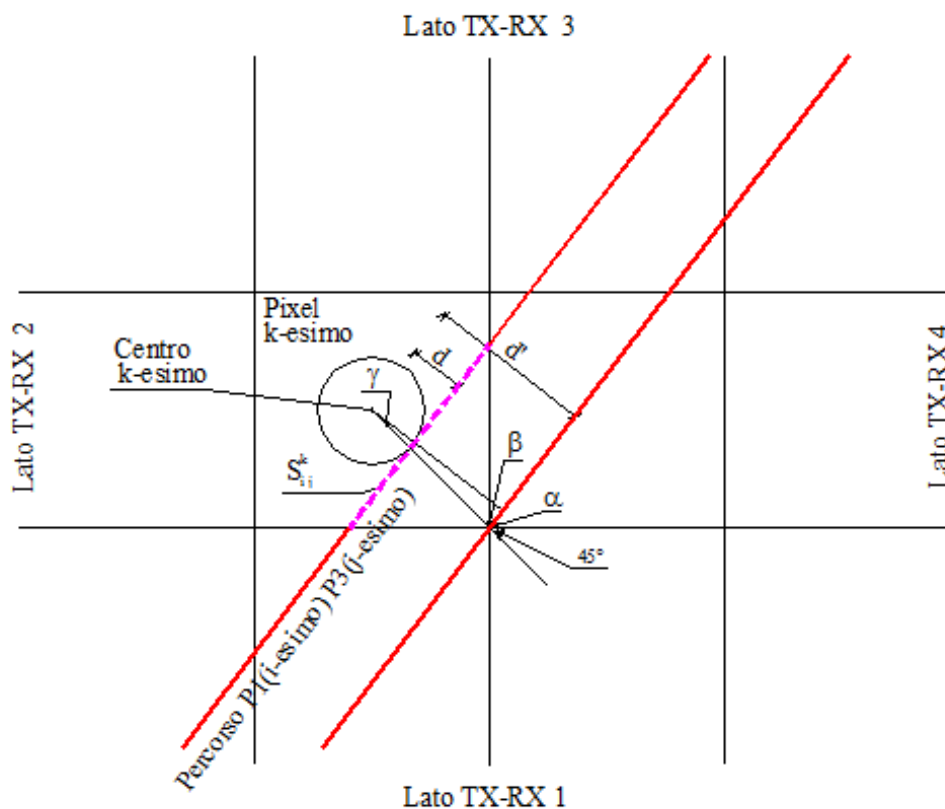


Fig. 6.18: Elementi geometrici considerati nella funzione *rayTracingLineare* (Monteforte, 1998).

Oltre alle grandezze sopra descritte, l'algoritmo si appoggia ad una serie di variabili attraverso le quali è possibile individuare la modalità con cui i vari percorsi attraversano i diversi pixel. Il codice sorgente della subroutine *rayTracingLineare* è così costituito:

1. Vengono definite le variabili geometriche e non da utilizzare all'interno della funzione di calcolo:

```
defrayTracingLineare (self, pInizio, pFine):
    self.nPixelTot = self.numTotPixel.get()
    self.pI = Punto()
    self.pI = self.pInizio
    self.pF = Punto()
    self.pF = self.pFine
```

```

self.alfa = 0
self.gamma = 0
self.coeffAng = 0
i = 1
j = 0
self.percorsiPixel = [0]*self.nPixelTot
self.pCentro = Punto()

```

2. Viene eseguito un controllo sulle ordinate dei punti relativi ad ogni singolo percorso. Se la coordinata y del punto di arrivo è inferiore a quella del punto di partenza, allora queste vengono scambiate. In questo modo l'angolo α successivamente calcolato sarò sempre riferito all'ascissa dell'ipotetico piano cartesiano di riferimento:

```

if self.pI.y > self.pF.y:
    self.pAppoggio = self.pF
    self.pF = self.pI
    self.pI = self.pAppoggio

```

3. La subroutine discrimina i percorsi verticali e orizzontali da tutti gli altri attraverso una comparazione delle ascisse e delle ordinate dei punti di partenza e arrivo del percorso passati dalla funzione padre *matriceRayTracingLineare*. Questa operazione viene eseguita in quanto le lunghezze di tali percorsi non necessitano di calcoli particolari essendo esse uguali alle dimensioni dei pixel della maglia di discretizzazione:

```

if self.pI.x == self.pF.x:
    j = int(self.pI.x / self.elemento.get())
    while i <= self.nPixelAlt:
        self.percorsiPixel[(i-1)*self.nPixelBase+j] = self.elemento.get()
        i = i+1
elif self.pI.y == self.pF.y:
    i = int((self.altezza.get() - (self.altezza.get()-self.pI.y))/self.elemento.get()+1)

```

```

while j <= self.nPixelBase-1:
    self.percorsiPixel[(i-1)*self.nPixelBase+j] = self.elemento.get()
    j = j+1

```

4. La funzione *rayTracingLineare* calcola le lunghezze dei tratti dei restanti percorsi non perpendicolari:

else:

```

self.coeffAng = (self.pF.y - self.pI.y) / (self.pF.x - self.pI.x)
self.alfa = math.fabs(math.atan(self.coeffAng))
if self.alfa < math.pi/4:
    self.alfa = math.pi/2 - self.alfa
self.gamma = self.alfa - math.pi/4
self.percorsoMax = self.elemento.get() / math.sin(self.alfa)
self.distCentroVert = self.elemento.get() * math.cos(self.gamma) /
math.sqrt(2)
self.coeff1 = -self.coeffAng
self.coeff2 = 1
self.coeff3 = self.pI.x * self.coeffAng - self.pI.y
while i <= self.nPixelAlt:
    while j <= self.nPixelBase-1:
        k = (i-1)*self.nPixelBase+j
        self.pCentro.x = ((j+1)*self.elemento.get())-(self.elemento.get()/2)
        self.pCentro.y = (i*self.elemento.get())-(self.elemento.get()/2)
        self.distCentroRetta = math.fabs ((self.coeff1 * self.pCentro.x +
            self.coeff2 * self.pCentro.y + self.coeff3) /
            math.sqrt(self.coeff1**2 + self.coeff2**2))
        if self.distCentroRetta > self.distCentroVert:
            self.percorsiPixel[k] = 0
    else:
        self.percorsiPixel[k] = (self.distCentroVert - self.distCentroRetta) /
            (math.sin(self.alfa) * math.cos(self.alfa))
        if self.percorsiPixel[k] < 1*math.e**-10:

```

```

self.percorsiPixel[k] = 0
elif self.percorsiPixel[k] > self.percorsoMax:
self.percorsiPixel[k] = self.percorsoMax
j = j+1
i = i+1
j = 0
return self.percorsiPixel

```

Il funzionamento della porzione di codice appena descritto può essere così schematizzato:

- Vengono calcolate le prime grandezze geometriche relative al percorso in analisi:

$$\alpha = \left| \tan^{-1} \left(\frac{pF.y - pI.y}{pF.x - pI.x} \right) \right|$$

$$\gamma = \alpha - \frac{\pi}{4}$$

$$\text{percorsoMax} = \frac{\text{Dimensione pixel}}{\sin \alpha} \quad (*)$$

$$d' = \frac{\text{Dimensione pixel} \times \cos \gamma}{\sqrt{2}}$$

$$\text{coeff1} = - \left(\frac{pF.y - pI.y}{pF.x - pI.x} \right) \quad (**)$$

$$\text{coeff2} = 1$$

$$\text{coeff3} = pI.x \left(\frac{pF.y - pI.y}{pF.x - pI.x} \right) - pI.y \quad (***)$$

La formula (*) viene utilizzata per calcolare il percorso elementare che si ottiene quando l'illuminazione taglia i due lati opposti del pixel. Questo valore è importante per stabilire la modalità con cui il segnale attraversa

una determinata cella. Le formule (**) e (***) corrispondono invece al coefficiente angolare e all'intercetta della retta r ;

- Iterativamente, scorrendo le righe e le colonne della griglia di discretizzazione, viene individuato il pixel a cui le analisi devono essere riferite e, di esso, vengono calcolate le coordinate del centro e la distanza di questo dalla retta r :

$$k = (i - 1) \times \text{numeroColonne} + j (*)$$

$$p\text{Centro}.x = (j + 1) \times \text{Dimensione pixel} - \frac{\text{Dimensione pixel}}{2}$$

$$p\text{Centro}.y = i \times \text{Dimensione pixel} - \frac{\text{Dimensione pixel}}{2}$$

$$d = \left| \frac{(\text{coeff1} \times p\text{Centro}.x) + (\text{coeff2} \times p\text{Centro}.y) + \text{coeff3}}{\text{coeff1}^2 + \text{coeff2}^2} \right|$$

La formula (*) serve per calcolare l'indice univoco che identifica il pixel in riferimento al quale vengono eseguiti i calcoli;

- Viene eseguito il confronto tra d e d' per individuare la modalità di attraversamento del pixel relativa al percorso analizzato:
 - Se $d > d'$: Il pixel considerato non viene attraversato dal percorso, per cui all'interno del vettore di appoggio corrispondente alla matrice di ray tracing, in corrispondenza dell'indice relativo al pixel, viene inserito un valore nullo:

$$\text{percorsiPixel}(k) = 0 (*)$$

Il vettore (*) è la variabile in cui vengono inserite le lunghezze dei percorsi, ossia la matrice di ray tracing convertita in vettore monodimensionale. Ogni volta che la funzione viene richiamata, modifica solo i valori relativi al pixel in analisi;

-
- Se $d \leq d'$: Il pixel considerato viene attraversato dal percorso e l'algoritmo deve stabilire la modalità con cui questo taglia il pixel:

$$\text{percorsiPixel}(k) = \frac{d' - d}{\sin \alpha - \cos \alpha}$$

Se $\text{percorsiPixel}(k) \approx 0$ allora il percorso tocca il vertice del pixel.

Se $\text{percorsiPixel}(k) < \text{percorsoMax}$ allora il pixel viene tagliato lungo i due lati adiacenti e il valore di $\text{percorsiPixel}(k)$ è quello corretto.

Se $\text{percorsiPixel}(k) > \text{percorsoMax}$ allora il pixel viene tagliato lungo i due lati opposti e il valore di $\text{percorsiPixel}(k)$ deve essere sostituito con quello di percorsoMax .

- Il vettore dei percorsi viene ripassato alla subroutine padre e riconvertito in forma matriciale.

6.6.4 RISOLUZIONE DEL PROBLEMA TOMOGRAFICO

Come accennato nel Paragrafo 6.6.2, il problema tomografico è un tipico problema inverso in cui, date alcune osservazioni sperimentali, si vuole pervenire alla definizione di particolari caratteristiche fisiche del modello studiato. Il sistema lineare di equazioni che caratterizza un'indagine tomografica è il seguente:

$$G \times m = d$$

In esso G coincide con la matrice di ray tracing, m rappresenta il vettore delle velocità o lentezze soniche incognite e d raccoglie i tempi di volo dei segnali acquisiti.

La particolarità della matrice di ray tracing è che essa è una matrice sparsa, ossia un vettore bidimensionale in cui la maggior parte degli elementi ha valore nullo. In tali condizioni, le tecniche di risoluzione dei sistemi lineari basate sulla fattorizzazione delle matrici non funzionano adeguatamente. Per questo motivo è necessario fare ricorso a metodi di risoluzione iterativi che, generando una successione di modelli m , convergono alla soluzione ottimale del sistema. Dal punto di vista computazionale l'utilizzo di questi algoritmi comporta anche un

risparmio di memoria all'interno dell'elaboratore in quanto, per essere elaborati, non richiedono lo sviluppo di nuove matrici dense.

Ai fini della risoluzione del problema tomografico, si è scelto di utilizzare un metodo iterativo denominato SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique). Questa metodologia è una variante dell'algoritmo di Kaczmarz e della Tecnica di Ricostruzione Algebrica (ART) che, pur non impegnando severamente l'elaboratore, consente di ottenere immagini tomografiche di buona qualità

6.6.4.1 ALGORITMO DI KACZMARZ

L'algoritmo di Kaczmarz è un algoritmo facile da implementare che si utilizza per risolvere sistemi lineari di equazioni del tipo $Gm = d$.

Questa metodologia si basa sulla constatazione che ciascuna delle N righe del sistema definisce un iperpiano a M dimensioni in \mathbb{R}^N . In uno spazio vettoriale di dimensione n , un iperpiano è un sottospazio di dimensione $n-1$. Partendo da una soluzione iniziale $m^{(0)}$, l'algoritmo giunge alla convergenza finale proiettando iterativamente la soluzione i -esima sull'iperpiano definito dalla riga $i+1$ -esima della matrice G e ripetendo a cascata tale operazione fino a raggiungere l' N -esimo iperpiano. Al termine di tale fase, l'algoritmo inizializza un nuovo ciclo di proiezioni e ripete le operazioni sopradescritte fino al raggiungimento di un'opportuna convergenza (Emolo, 2011).

Affinché tale metodo sia applicabile, è necessario definire la relazione che consente di calcolare la proiezione di un vettore sull'iperpiano definito dall'equazione i -esima del sistema. Tale equazione, il cui scopo è quello di individuare il valore aggiornato di m , è la seguente (Emolo, 2011):

$$m^{(i+1)} = m^{(i)} - \frac{G_{i+1,*}m^{(i)} - d_{i+1}}{G_{i+1,*}G_{i+1,*}^T} G_{i+1,*}^T = m^{(i)} + \beta G_{i+1,*}^T$$

Il funzionamento dell'algoritmo di Kaczmarz può quindi essere così schematizzato:

1. Sia $m^{(0)} = 0$;
2. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, si calcola $m^{(i+1)}$;

3. Se la soluzione non ha raggiunto la convergenza si ritorna al punto 2.

La velocità di convergenza dell'algoritmo è proporzionale alla disposizione reciproca degli iperpiani: se questi sono approssimativamente perpendicolari tra loro allora la risoluzione è rapida, se invece due o più di essi risultano essere quasi paralleli allora la convergenza risulta molto lenta (Emolo, 2011).

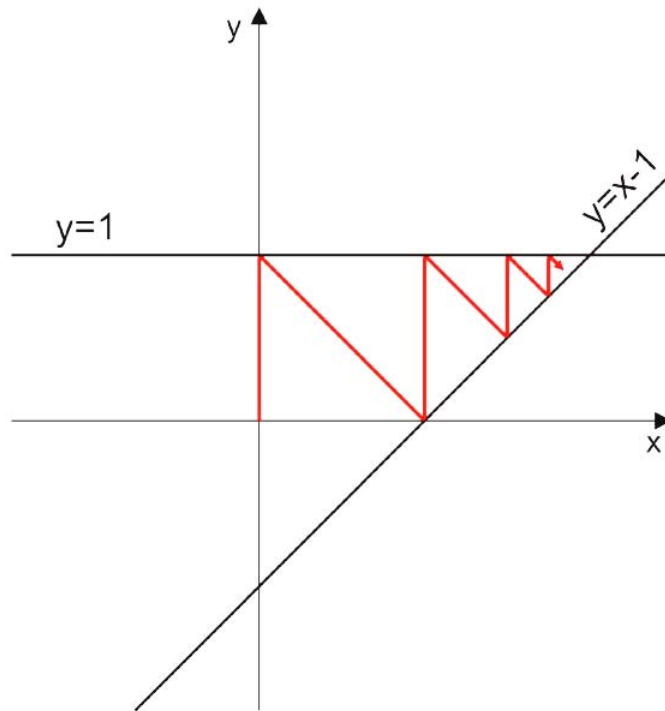


Fig. 6.19: Esempio di risoluzione eseguita con l'algoritmo di Kaczmarz (Emolo, 2011).

6.6.4.2 TECNICA DI RICOSTRUZIONE ALGEBRICA (ART)

La Tecnica di Ricostruzione Algebrica (ART) è una particolare versione dell'algoritmo di Kaczmarz creata appositamente per la risoluzione dei problemi tomografici.

Rispetto al metodo risolutivo da cui deriva, la metodologia ART, ad ogni iterazione, aggiorna la soluzione $m^{(i+1)}$ aggiungendo un multiplo di una riga di G alla soluzione precedente $m^{(i)}$. Ai fini della corretta risoluzione del sistema, in questa tecnica viene utilizzata un'approssimazione grossolana che consiste nella sostituzione di tutti gli elementi non nulli della riga $i+1$ -esima della matrice G con il

valore 1 (Emolo, 2011). Inoltre è importante ricordare che il tempo di volo approssimato lungo un raggio $i+1$ -esimo può essere calcolato con la formula:

$$q_{i+1} = \sum_{\substack{\text{cella } j \\ \text{del raggio} \\ i+1}} m_j l$$

Nella pratica, per la matrice G modificata secondo la convenzione sopra descritta, l'algoritmo determina l'errore del tempo di volo del raggio $i+1$ -esimo e lo divide per il numero di pixel N_{i+1} attraversati da quel raggio e per la dimensione l delle maglie. Questo fattore di correzione viene quindi moltiplicato per un vettore i cui elementi sono uguali a 1 per i pixel appartenenti al percorso del raggio $i+1$ -esimo. Tale procedura ha l'effetto di suddividere la necessaria correzione su tutte le celle effettivamente attraversate dal raggio considerato (Emolo, 2011). La formula di aggiornamento dei valori di m può quindi essere così schematizzata:

$$m_j^{(i+1)} = \begin{cases} m_j^{(i)} + \frac{d_{i+1}}{L_{i+1}} - \frac{q_{i+1}}{lN_{i+1}} \\ m_j^{(i)} \end{cases}$$

La prima equazione deve essere utilizzata se la cella j considerata viene effettivamente attraversata dal raggio $i+1$ mentre la seconda formula viene applicata nel caso contrario. Il funzionamento dalla tecnica ART può quindi essere così schematizzato:

1. Sia $m^{(0)} = 0$;
2. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, sia N_i il numero di pixel attraversati dal raggio i -esimo;
3. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, sia L_i la lunghezza del raggio i -esimo;
4. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $j = 1, 2, \dots, M$, sia:
 - $m_j^{(i+1)} = m_j^{(i)} + \frac{d_{i+1}}{L_{i+1}} - \frac{q_{i+1}}{lN_{i+1}}$ se il pixel j appartiene al raggio $i+1$ -esimo;
 - $m_j^{(i+1)} = m_j^{(i)}$ se il pixel j non appartiene al raggio $i+1$ -esimo;
5. Se l'algoritmo ha raggiunto la convergenza, la soluzione è $m^{(N)}$, altrimenti si pone $m^{(0)} = m^{(N)}$ e si riparte dal punto 4 (Emolo, 2011).

6.6.4.3 TECNICA ITERATIVA DI RICOSTRUZIONE SIMULTANEA (SIRT)

La Tecnica Iterativa di Ricostruzione Simultanea (SIRT) è una metodologia di risoluzione dei problemi inversi che, derivata dalla tecnica ART, è in grado di restituire immagini di qualità leggermente più elevata. Il miglioramento è dovuto al fatto che nell'algoritmo SIRT tutti gli N aggiornamenti di $m_j^{(i+1)}$ ottenuti, sono calcolati per ciascun pixel j del modello e per ogni raggio che attraversa quel pixel. Tutti gli aggiornamenti individuati per una certa cella j sono quindi mediati e poi applicati al modello per ottenere il nuovo valore di m_j (Emolo, 2011).

Il funzionamento della Tecnica Iterativa di Ricostruzione Simultanea può quindi essere così schematizzato:

1. Sia $m_0 = 0$;
2. Per $j = 0, 1, 2, \dots, M$, sia K_j il numero di raggi che attraversano la cella j ;
3. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, sia L_i la lunghezza del raggio i -esimo;
4. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, sia N_i il numero di pixel attraversati dal raggio i -esimo;
5. Sia $\Delta m_0 = 0$;
6. Per $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $j = 1, 2, \dots, M$, sia:
 - $\Delta m_j = \Delta m_j + \frac{d_{i+1}}{L_{i+1}} - \frac{q_{i+1}}{N_{i+1}}$ se il pixel j appartiene al percorso $i+1$ -esimo;
 - $\Delta m_j = \Delta m_j$ se il pixel j non appartiene al percorso $i+1$ -esimo;
7. Per $j = 0, 1, 2, \dots, M$, sia $m_{j+1} = m_j + \frac{\Delta m_j}{K_j}$
8. Se l'algoritmo ha raggiunto la convergenza, la soluzione ottenuta è quella corrente, altrimenti si riparte dal punto 5 (Emolo, 2011).

6.6.4.4 PROCEDURA DI RISOLUZIONE

Avendo a disposizione la matrice di ray tracing precedentemente calcolata e i tempi di volo dei segnali acquisiti in sede di campagna di indagine, è stata definita la funzione di calcolo della distribuzione delle velocità soniche, denominata *soluzioneSirt*.

Oltre all'algoritmo di valutazione vero e proprio, ai fini della risoluzione del problema tomografico e in accordo con le regole di buona programmazione che suggeriscono di evitare la ridondanza del codice, sono state create due brevi subroutine esterne per la lettura dei dati disponibili.

La prima funzione, denominata *leggiTempi*, viene richiamata dall'algoritmo principale per acquisire i tempi di volo dei segnali contenuti all'interno del foglio di calcolo:

```
def leggiTempi (self, event=None):  
    i = 1  
    self.tempiAcquisiti = []  
    while i <= self.numTotPercorsi.get():  
        self.tempiAcquisiti.append(self.foglio2.cell(i,9).value)  
        i = i+1  
    return self.tempiAcquisiti
```

L'altra subroutine, *leggiMatrice*, ha invece il compito di leggere e passare alla funzione principale l'intera matrice di ray tracing presente all'interno del terzo foglio del file di calcolo:

```
def leggiMatrice (self, event=None):  
    a = 1  
    b = 0  
    self.matriceRay = zeros((self.numTotPercorsi.get( ),self.numTotPixel.get( )))  
    while a <= self.numTotPercorsi.get( ):  
        while b < self.numTotPixel.get( ):  
            self.matriceRay[a-1,b] = self.foglio3.cell(a,b).value/100  
            b = b+1  
        a = a+1  
        b = 0  
    return self.matriceRay
```

All'interno del codice sorgente della subroutine *soluzioneSirt* vengono eseguite in cascata le seguenti operazioni:

1. Viene aperto il foglio di calcolo contenente tutti i dati utili ai fini della risoluzione (tempi di volo, matrice di ray tracing, ecc.). Il software controlla che effettivamente l'utente abbia aperto il file prima di procedere all'elaborazione dei dati:

```
def soluzioneSirt(self, event=None):
```

```
    try:
```

```
        self.fileAperto = open_workbook(scegliFile, formatting_info=True)
```

```
        self.foglio1 = self.fileAperto.sheet_by_index(0)
```

```
        self.foglio2 = self.fileAperto.sheet_by_index(1)
```

```
        self.foglio3 = self.fileAperto.sheet_by_index(2)
```

```
        self.foglio4 = self.fileAperto.sheet_by_index(3)
```

```
        self.scrivi = xlutils_copy(self.fileAperto)
```

```
        self.foglio1scrivi = self.scrivi.get_sheet(0)
```

```
        self.foglio2scrivi = self.scrivi.get_sheet(1)
```

```
        self.foglio4scrivi = self.scrivi.get_sheet(3)
```

```
        self.foglio5scrivi = self.scrivi.get_sheet(4)
```

```
    except:
```

```
        self.erroreApertura = tkMessageBox.showwarning("Errore", "Prima di  
procedere devi aprire il file di origine dei dati",  
icon="warning")
```

```
    return
```

2. Vengono richiamate le due subroutine *leggiTempi* e *leggiMatrice* necessarie per fornire all'algoritmo i tempi di volo e i valori dei tratti di percorso ad essi relativi:

```
        self.leggiTempi( )
```

```
        self.leggiMatrice( )
```

3. Vengono calcolate le lunghezze totali dei percorsi compiuti dai segnali all'interno della sezione e il numero di pixel attraversati da ciascun raggio:

```

i = 0
j = 0
self.lunghezzaTotalePercorso = [0]*(self.numTotPercorsi.get())
self.numPixelAttraversatiPerPercorso = [0]*(self.numTotPercorsi.get())
while i < self.numTotPercorsi.get():
    while j < self.numTotPixel.get():
        self.lunghezzaTotalePercorso[i] = self.lunghezzaTotalePercorso[i] +
            self.matriceRay[i,j]
        if self.matriceRay[i,j] > 0:
            self.numPixelAttraversatiPerPercorso[i]=self.numPixelAttraversati
                erPercorso[i] + 1
        j = j+1
    i = i+1
    j = 0

```

4. Vengono calcolate le velocità di tutti i tratti di percorso individuati all'interno dei diversi pixel. Inoltre viene creata una particolare matrice avente le stesse dimensioni di quella di ray tracing e contenente le cifre 1 o 0 in relazione alla presenza o meno di valori positivi all'interno del vettore di ray tracing stesso:

```

i = 0
j = 0
self.matriceRayo1= zeros((self.numTotPercorsi.get(),self.numTotPixel.get()))
self.velocitaPixelPercorso=zeros((self.numTotPercorsi.get(),self.numTotPixel
.get()))
while i < self.numTotPercorsi.get():
    while j < self.numTotPixel.get():
        if self.matriceRay[i,j] != 0:
            self.velocitaPixelPercorso[i,j]=self.matriceRay[i,j]/(self.tempiAcquisi
                ti[i]*self.matriceRay[i,j]/
                self.lunghezzaTotalePercorso[i])
            self.matriceRayo1[i,j] = 1
        else:

```

```
self.velocitaPixelPercorso[i,j] = 0
```

```
self.matriceRayo1[i,j] = 0
```

```
j = j+1
```

```
i = i+1
```

```
j = 0
```

5. Viene individuato il modello iniziale di distribuzione delle velocità soniche all'interno della sezione. Il valore ipotetico di ogni pixel corrisponde alla media delle velocità dei percorsi contenuti nella cella stessa. All'interno di questa porzione dell'algoritmo è presente anche una funzione di controllo dell'esattezza del modello che sostituisce le velocità fuori scala con i valori minimo e massimo solitamente considerati come limiti nel caso di indagini soniche sulle murature (340 e 3500 m/s). Inoltre da questa sezione della subroutine in poi, per evitare l'esecuzione di calcoli con numeri molto grandi e per ridurre gli errori legati alle operazioni stesse, tutte le velocità vengono convertite nella grandezza inversa, la lentezza sonica ($1/v$) Al termine dell'elaborazione i risultati vengono riportati nelle relative colonne presenti all'interno del foglio di calcolo:

```
i = 0
```

```
j = 0
```

```
numeroPercorsiPerPixel = [0]*self.numTotPixel.get( )
```

```
self.velocitaPrimoTentativo = [0]*self.numTotPixel.get( )
```

```
while j < self.numTotPixel.get( ):
```

```
    while i < self.numTotPercorsi.get( ):
```

```
        self.velocitaPrimoTentativo[j] = self.velocitaPrimoTentativo[j] +
```

```
            self.velocitaPixelPercorso[i,j]
```

```
        if self.velocitaPixelPercorso[i,j] != 0:
```

```
            numeroPercorsiPerPixel[j] = numeroPercorsiPerPixel[j] + 1
```

```
        i = i+1
```

```
    self.velocitaPrimoTentativo[j] = 1/(self.velocitaPrimoTentativo[j] /
```

```
        numeroPercorsiPerPixel[j]) #(m/s)
```

```
    j = j+1
```

```
    i = 0
```

```
self.velocitaPrimoTentativoCorretta = [0]*self.numTotPixel.get( )
a = 0
while a < self.numTotPixel.get( ):
    if self.velocitaPrimoTentativo[a] > 1.0/340:
        self.velocitaPrimoTentativoCorretta[a] = 1.0/340
    elif self.velocitaPrimoTentativo[a] < 1.0/3500:
        self.velocitaPrimoTentativoCorretta[a] = 1.0/3500
    else:
        self.velocitaPrimoTentativoCorretta[a]= self.velocitaPrimoTentativo[a]
    a = a+1

b = 0
while b < self.numTotPixel.get( ):
    self.foglio2scrivi.write(b+1, 11, 1/self.velocitaPrimoTentativo[b])
    self.foglio2scrivi.write(b+1, 12, 1.0/self.velocitaPrimoTentativoCorretta[b])
    b = b+1
```

6. Vengono dichiarate e inizializzate le ultime variabili indispensabili per l'esecuzione dell'algoritmo SIRT:

```
self.matriceRayoiTrasposta = self.matriceRayoi.transpose( )
self.smorzamento = 1.0
self.soluzione = self.velocitaPrimoTentativoCorretta #m/s
numIterazioni = 0
self.delta = 0.0
```

7. Viene iterativamente calcolata la soluzione con l'algoritmo di ricostruzione SIRT. Questa porzione del codice è suddivisa in diverse sezioni tra loro connesse:

- Inizializzazione del ciclo di calcolo e controllo sul numero di iterazioni eseguite. Nel caso in cui questo fosse maggiore del valore limite impostato dall'utente, l'elaborazione viene conclusa senza aver raggiunto la convergenza:

```

a = 0
while a==0:
    numIterazioni = numIterazioni + 1
    if numIterazioni > self.numIter.get( ):
        self.erroreCalcolo = tkMessageBox.showerror("Errore", "Il numero
            massimo di iterazioni è stato superato prima del
            raggiungimento del criterio di convergenza. \n
            Cambia il numero di iterazioni o il criterio di
            convergenza e riprova.", icon="error")
    return

```

- Calcolo iterativo delle velocità all'interno dei pixel:

```

self.nuovaVelocitaStimata = self.soluzione #m/s
i = 0
self.erroreVelocita = [0]*self.numTotPixel.get( )
self.tempoApprossimato = 0.0
while i < self.numTotPercorsi.get( ):
    self.tempoApprossimato = dot(self.matriceRayo1[i,:],
        self.nuovaVelocitaStimata)
    self.delta = (self.tempiAcquisiti[i]/self.lunghezzaTotalePercorso[i]) -
        (self.tempoApprossimato/self.numPixelAttraversatiPer
        Percorso[i])
    self.erroreVelocita = self.erroreVelocita + (self.delta *
        self.matriceRayo1Trasposta[:,i])
    i = i+1
self.nuovaVelocitaStimata = self.nuovaVelocitaStimata +
    (self.smorzamento*self.erroreVelocita/
    numeroPercorsiPerPixel)

```

- Controllo dell'effettiva convergenza della soluzione. Se il calcolo è corretto il ciclo termina e il software esegue la porzione di algoritmo successiva, altrimenti ripete le operazioni sopra descritte:

```

if (numpy.linalg.norm(self.nuovaVelocitaStimata -
self.soluzione)/(1+numpy.linalg.norm(self.soluzione))) < self.epsilon.get():
    a = 1
    self.numIterFatte.set(numIterazioni)
    self.epsilonCalcolato.set("{0:.7f}".format(numpy.linalg.norm
        (self.nuovaVelocitaStimata-self.soluzione) /
        (1+numpy.linalg.norm(self.soluzione))))
    self.risoluzioneCorretta = tkMessageBox.showinfo("Esecuzione
        terminata", "La funzione di risoluzione è
        stata eseguita correttamente", icon="info")
    self.soluzione = self.nuovaVelocitaStimata
i = 0
while i < self.numTotPixel.get():
    self.foglio2scrivi.write(i+1,13, 1/self.nuovaVelocitaStimata[i])
    i = i+1

```

- Controllo dell'esattezza della soluzione e sostituzione delle eventuali velocità risultanti fuori scala con i valori minimo e massimo solitamente considerati come limiti nel caso di indagini soniche sulle murature (340 e 3500 m/s). Al termine dell'elaborazione i risultati vengono riportati nelle relative colonne presenti all'interno del foglio di calcolo:

```

j = 0
self.velocitaFinale =[0]*self.numTotPixel.get()
while j < self.numTotPixel.get():
    if (1/self.nuovaVelocitaStimata[j]) < 340:
        self.foglio2scrivi.write(j+1,14, 340)
        self.velocitaFinale[j] = 340
    elif (1/self.nuovaVelocitaStimata[j]) > 3500:
        self.foglio2scrivi.write(j+1,14, 3500)
        self.velocitaFinale[j] = 3500
    else:
        self.foglio2scrivi.write(j+1,14, int(1/self.nuovaVelocitaStimata[j]))

```

```

        self.velocitaFinale[j] = int(1/self.nuovaVelocitaStimata[j])
    j = j+1
self.nPixelBase = int(self.base.get()/self.elemento.get( ))
self.nPixelAlt = int(self.altezza.get()/self.elemento.get( ))
self.matriceVelocita = zeros((self.nPixelAlt,self.nPixelBase))
a = 0
b = 0
c = 0
while a < self.nPixelAlt:
    while b < self.nPixelBase:
        self.matriceVelocita[self.nPixelAlt-a-1,b] = self.velocitaFinale[c]
        self.foglio4scrivi.write(self.nPixelAlt-a,b,self.velocitaFinale[c])
        b = b+1
        c = c+1
    a = a+1
    b = 0

```

- Scrittura della soluzione in forma matriciale all'interno del quinto foglio del file di calcolo e salvataggio dei dati:

```

self.nPixelBase = int(self.base.get( )/self.elemento.get( ))
self.nPixelAlt = int(self.altezza.get( )/self.elemento.get( ))
a = 0
b = 0
c = 1
while b < self.nPixelBase:
    while a < self.nPixelAlt:
        self.foglio5scrivi.write(c,2,self.matriceVelocita[a,b])
        a = a+1
        c = c+1
    b = b+1
    a = 0
os.remove(scegliFile)

```

```
self.scrivi.save(scegliFile)
```

6.6.5 RESTITUZIONE DELL'IMMAGINE TOMOGRAFICA

All'interno del software TomoGrafiaNew sono presenti due diverse modalità di restituzione dell'immagine tomografica.

La prima, realizzata attraverso i costrutti messi a disposizione dal linguaggio Python, consente di ottenere delle discrete immagini, indicative dello stato di fatto della sezione indagata ma non adatte ad un'analisi approfondita e precisa dei parametri qualitativi (vedi Fig. 6.14). La funzione creata, denominata *coloraSezione*, consente all'utente di selezionare la modalità di interpolazione dei dati (per vicinanza o bilineare) ed è così costruita:

1. Viene aperto il foglio di calcolo contenente la matrice delle velocità soniche (Foglio 4). Il software controlla che effettivamente l'utente abbia aperto il file prima di procedere all'elaborazione dei dati:

```
def coloraSezione(self, event=None):  
    try:  
        self.fileAperto = open_workbook(scegliFile, formatting_info=True)  
        self.foglio4 = self.fileAperto.sheet_by_index(3)  
    except:  
        self.erroreApertura = tkMessageBox.showwarning("Errore", "Prima di  
            procedere devi aprire il file di origine dei dati",  
            icon="warning")  
  
        return
```

2. I valori contenuti all'interno del foglio di calcolo vengono letti e inseriti all'interno di una matrice d'appoggio che l'algoritmo utilizza per ricostruire l'immagine tomografica:

```
a = 1  
b = 0  
self.nPixelBase = int(self.base.get( )/self.elemento.get( ))
```

```

self.nPixelAlt = int(self.altezza.get( )/self.elemento.get( ))
self.matriceVelocita = zeros((self.nPixelAlt,self.nPixelBase))
while a <= self.nPixelAlt:
    while b < self.nPixelBase:
        self.matriceVelocita[a-1,b] = self.foglio4.cell(a,b).value
        b = b+1
    a = a+1
    b = 0

```

3. In relazione alla modalità di interpolazione dei dati e del numero di intervalli di suddivisione del range di velocità scelti dall'operatore, la funzione ricostruisce l'immagine tomografica:

```

if self.varElaborazione.get( ) == 1:
    plt.figure(1)
    plt.title("Interpolazione per vicinanza")
    plt.imshow(self.matriceVelocita, cmap=plt.cm.jet, interpolation='nearest')
    plt.axis("off")
elif self.varElaborazione.get( ) == 2:
    plt.figure(2)
    plt.title("Interpolazione bilineare")
    plt.imshow(self.matriceVelocita, cmap=plt.cm.jet, interpolation='bilinear')
    plt.axis("off")

self.valoreMin = amin (self.matriceVelocita)
self.valoreMax = amax (self.matriceVelocita)
self.valoriColorbar = linspace(self.valoreMin, self.valoreMax,
                                self.numIntervalli.get( )#self.numSuddivisioni)
plt.colorbar (orientation="horizontal", spacing='proportional',
              ticks=self.valoriColorbar, boundaries=self.valoriColorbar)
plt.show( )

```

La seconda modalità di costruzione dell'immagine non consente invece la restituzione diretta della tomografia, ma permette di predisporre i dati affinché questi possano elaborati da un software esterno di interpolazione e visualizzazione.

Questa operazione viene gestita da due diversi algoritmi. La subroutine *coordinateGrigliaSurfer* calcola le coordinate dei punti centrali dei pixel di discretizzazione della sezione e li trascrive nell'apposito foglio di calcolo mentre la funzione *apriSoftwareSurfer* avvia il programma esterno di restituzione grafica. La prima delle due subroutine è così costruita:

1. Viene aperto il foglio del file di calcolo in cui inserire le coordinate. Il software controlla che la procedura di apertura venga eseguita correttamente:

```
def coordinateGrigliaSurfer (self, event=None):
    try:
        self.fileAperto = open_workbook(scegliFile, formatting_info=True)
        self.scrivi = xlutils_copy(self.fileAperto)
        self.foglio5scrivi = self.scrivi.get_sheet(4)
    except:
        self.erroreApertura = tkMessageBox.showwarning("Errore", "Prima di
            procedere devi aprire il file in cui inserire le
            coordinate", icon="warning")
    return
```

2. Le coordinate dei punti centrali dei pixel vengono calcolate e inserite nel foglio di calcolo. Al termine dell'operazione il file viene salvato e chiuso:

```
self.nPixelBase = int(self.base.get( )/self.elemento.get( ))
self.nPixelAlt = int(self.altezza.get( )/self.elemento.get( ))
i = 1
a = 0
b = 0
while a < self.nPixelBase:
    while b < self.nPixelAlt:
```

```

self.foglio5scrivi.write (i,0,((self.elemento.get( )/2) +
                        (self.elemento.get( )*a)))
self.foglio5scrivi.write (i,1,(self.altezza.get() - (self.elemento.get()*(b+1))
                        + (self.elemento.get( )/2)))

i = i+1
b = b+1

a = a+1
b = 0

self.calcoloCorretto = tkMessageBox.showinfo ("Esecuzione terminata", "La
                        funzione di calcolo delle coordinate è stata eseguita
                        correttamente", icon="info")

os.remove(scegliFile)
self.scrivi.save(scegliFile)

```

La funzione *apriSoftwareSurfer* è invece costituita da un'unica istruzione per l'apertura del software di restituzione dell'immagine. All'interno di questa deve essere inserito il percorso completo del file di esecuzione del programma Surfer. In mancanza di questa specifica, la subroutine non è in grado di avviare automaticamente il software, rendendone necessaria l'apertura manuale da parte dell'operatore:

```

def apriSoftwareSurfer(self, event=None):
    subprocess.Popen(["C:\.....\.....\....."])
    return

```

6.7 OSSERVAZIONI

Lo sviluppo di una nuova metodologia di analisi ed elaborazione dei dati sonici tomografici rappresenta il primo step di una più vasta ricerca il cui obiettivo è la creazione di una procedura automatica di esecuzione e gestione delle prove tomografiche, che ne limiti il grado di arbitrarietà e che le renda un riferimento solido nell'ambito delle metodologie di indagine non invasiva.

A tal fine è stato necessario formulare una serie di ipotesi e imporre alcune condizioni che, seppur attentamente valutate e motivate, necessitano di costante controllo e restano suscettibili a continue modifiche ed evoluzioni. In relazione a questa considerazione è possibile formulare le seguenti osservazioni:

- Il linguaggio di programmazione Python si è rivelato adatto per l'implementazione del nuovo software di elaborazione. La licenza gratuita, le numerose documentazioni presenti in letteratura e la vasta disponibilità di moduli di programmazione (algoritmi precostituiti) hanno consentito lo sviluppo di un'applicabile automatica, portabile e di facile utilizzo. Inoltre questo paradigma potrebbe in futuro consentire la creazione di un software unico di gestione dell'intero processo sonico, dall'acquisizione dei segnali alla restituzione delle immagini tomografiche anche se, allo stato attuale, per quest'ultima operazione il linguaggio non ha fornito le prestazioni attese;
- L'utilizzo di un foglio di calcolo sembra essere la modalità di gestione e archiviazione dei dati più adatta al caso tomografico. Purtroppo persistono alcuni piccoli problemi di interfacciamento tra questi file e il software di elaborazione che, seppur non determinanti nell'esito dei risultati, possono creare fastidi agli utenti. Nella maggior parte dei casi queste limitazioni sono comunque assenti o facilmente superabili;
- La scelta di limitare le sezioni indagabili a quelle di forma quadrata o rettangolare è stato tema di discussione e confronto. In virtù dei numerosi casi studio disponibili in letteratura, la maggioranza dei quali caratterizzati da sezioni riconducibili a queste due tipologie, si è deciso di tralasciare temporaneamente la gestione delle forme complesse al fine di favorire una più stabile implementazione degli algoritmi di risoluzione;
- L'assunzione di propagazione lineare delle onde elastiche rappresenta una grossolana approssimazione del reale comportamento dei segnali sonici all'interno dei mezzi eterogenei. Ciononostante, l'eccessiva complessità computazionale di sviluppo di un software per la gestione dei percorsi non rettilinei ha impedito l'abbandono di questa ipotesi. Al fine del

superamento di questo limite è consigliabile la formazione un'equipe di lavoro interdisciplinare che coinvolga anche esperti di informatica e matematica;

- La Tecnica Iterativa di Ricostruzione Simultanea (SIRT) sembra rappresentare, allo stato attuale delle conoscenze e in relazione al rapporto tra qualità dei risultati e tempi di elaborazione, la migliore metodologia disponibile per la risoluzione dei problemi inversi coinvolgenti le matrici sparse (matrice di ray tracing).

CAPITOLO 7

VERIFICHE E SPERIMENTAZIONI

Nel seguente capitolo vengono presentate una serie di campagne di indagine realizzate sia in alcuni cantieri di Padova, Verona e L'Aquila che all'interno del Laboratorio di Costruzioni e Trasporti del Dipartimento ICEA. Ove possibile, i dati sono stati elaborati sia con il software creato dall'ing. N. Monteforte che con la nuova applicazione TomoGrafiaNew, al fine di verificarne il corretto funzionamento. Inoltre vengono esposti gli esiti relativi al confronto tra i risultati ottenuti da un test realizzato utilizzando due diversi strumenti di acquisizione.

7.1 PROVA TOMOGRAFICA SU LASTRA IN CALCESTRUZZO DI CARATTERISTICHE E MORFOLOGIA NOTE

Il primo test di funzionamento effettuato sul nuovo software di elaborazione TomoGrafiaNew è stato utile per verificare sia l'attendibilità delle ipotesi progettuali che la correttezza degli algoritmi di risoluzione impostati attraverso l'uso del linguaggio Python.

La prova, eseguita dall'ing. N. Monteforte nel 1998, ha interessato una lastra di calcestruzzo di dimensioni e caratteristiche note. La scelta di tale campione, spiccatamente poco rappresentativo delle reali condizioni murarie riscontrabili nella maggior parte dei casi reali, è stata motivata dalle caratteristiche del materiale utilizzato e dalla conoscenza della morfologia interna, opportunamente creata secondo alcune indicazioni prestabilite. Infatti, come già affermato nei precedenti capitoli, l'esecuzione di prove soniche (dirette, indirette e tomografiche) su

campioni sperimentali appositamente realizzati garantisce generalmente un maggior controllo e una miglior qualità dei risultati rispetto alle indagini in sito e può favorire l'evoluzione del metodo sonico e delle sue diverse fasi.

7.1.1 LASTRA PER IL TEST

La lastra, di dimensioni 200 x 200 x 25 cm, è stata creata utilizzando un calcestruzzo omogeneo ($R_{ck}=25$ MPa, $D_{max}=0.25$ cm) e alcuni materiali caratterizzati da densità diverse. La scelta del cemento e l'attenta esecuzione del getto all'interno dell'apposito cassero hanno consentito di creare un pannello isotropo dal punto di vista delle velocità e fortemente eterogeneo rispetto agli ostacoli interni appositamente inseriti. Inoltre l'inserimento di uno strato di materiale fonoassorbente tra la piastra e il piano di posa ha consentito di vincolare il percorso delle onde soniche, costringendole a scegliere sempre traiettorie interne al pannello anche in presenza degli ostacoli. Gli elementi inglobati all'interno della lastra sono stati:

- Un pannello fonoassorbente in polistirolo di dimensioni 100 x 2 x 25 cm, disposto a taglio per simulare l'effetto di una frattura passante;
- Alcuni blocchi di laterizio, per un ingombro totale di 30 x 30 x 25 cm, inseriti per simulare l'effetto del cambio di densità.

Sia le dimensioni della lastra che degli ostacoli sono state determinate in funzione della capacità di acquisizione della strumentazione sonica disponibile al momento dell'esecuzione della prova.

Onde evitare lo sviluppo di grossolani errori di acquisizione, è stata calcolata la massima risoluzione del metodo, ossia la lunghezza minima del percorso dell'onda al di sotto della quale la misura perde di significato. Impostando la frequenza di campionamento della scheda di acquisizione pari a 200000 scan/secondo e ipotizzando una velocità dell'onda sonica all'interno del calcestruzzo dell'ordine di 4500 m/s, la risoluzione è risultata essere:

$$\text{Risoluzione} = \frac{\text{Velocità sonica}}{\text{Frequenza di campionamento}} = \frac{450000 \text{ m/s}}{200000 \text{ scan/s}} = 2.25 \text{ cm}$$

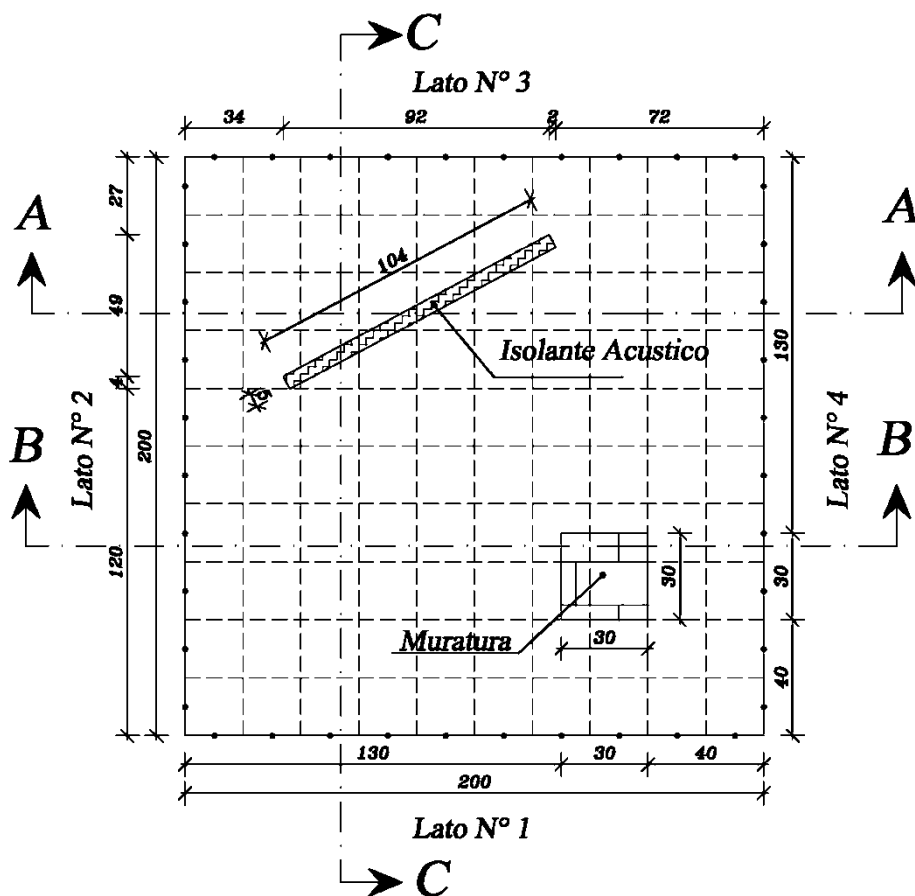


Fig. 7.1: Schema costruttivo della lastra di calcestruzzo (Monteforte, 1998).

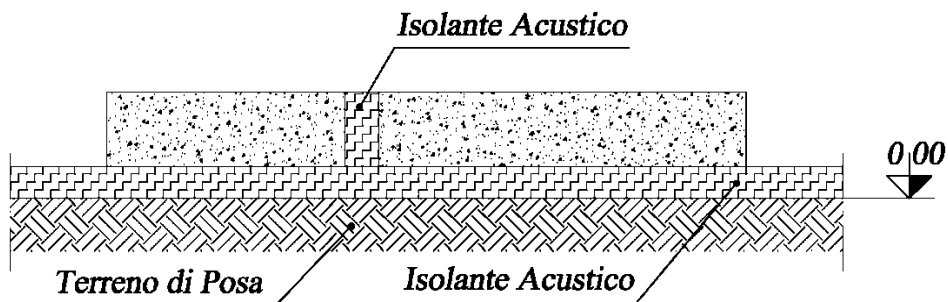


Fig. 7.2: Sezione A-A della lastra di calcestruzzo (Monteforte, 1998).

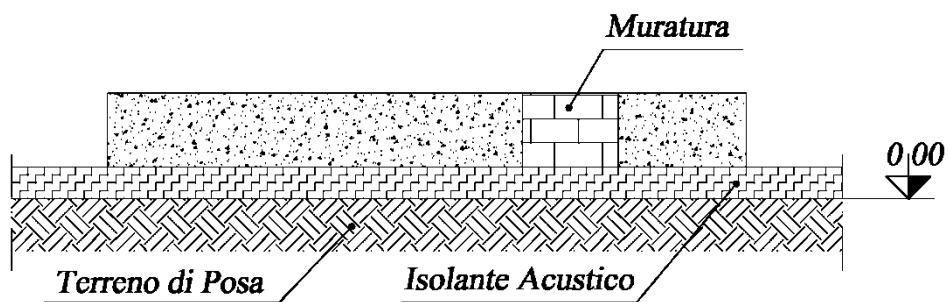


Fig. 7.3: Sezione B-B della lastra di calcestruzzo (Monteforte, 1998).

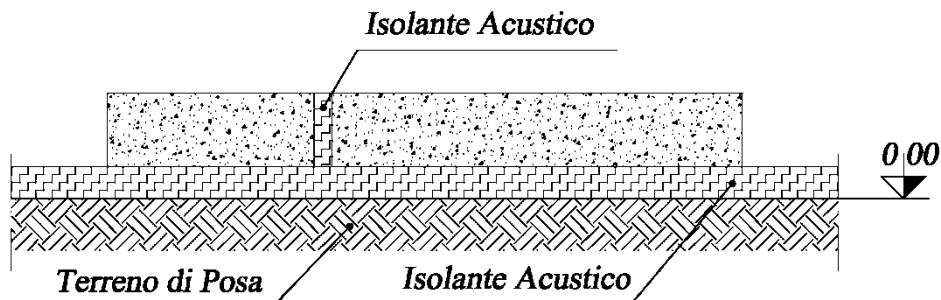


Fig. 7.4: Sezione C-C della lastra di calcestruzzo (Monteforte, 1998).



Fig. 7.5: Quattro particolari della fase di esecuzione: la disposizione degli elementi interni (alto-sinistra), il getto del calcestruzzo (alto-destra), la lastra terminata (basso-sinistra) e pronta per l'esecuzione della prova tomografica (basso-destra) (Monteforte, 1998).

7.1.2 ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova sonica su schema tomografico è stata eseguita il 19 febbraio 1999 presso la Fondazione Edil Scuola di Verona, prima che il calcestruzzo superasse il periodo di maturazione di 28 giorni.

La tomografia è stata realizzata disponendo 10 punti di trasmissione-ricezione lungo ognuno dei quattro lati e utilizzando una griglia di campionamento con passo costante di 20 cm, consentendo l'acquisizione di 600 misurazioni. In merito alla procedura di esecuzione si può fare riferimento ai capitoli precedenti.

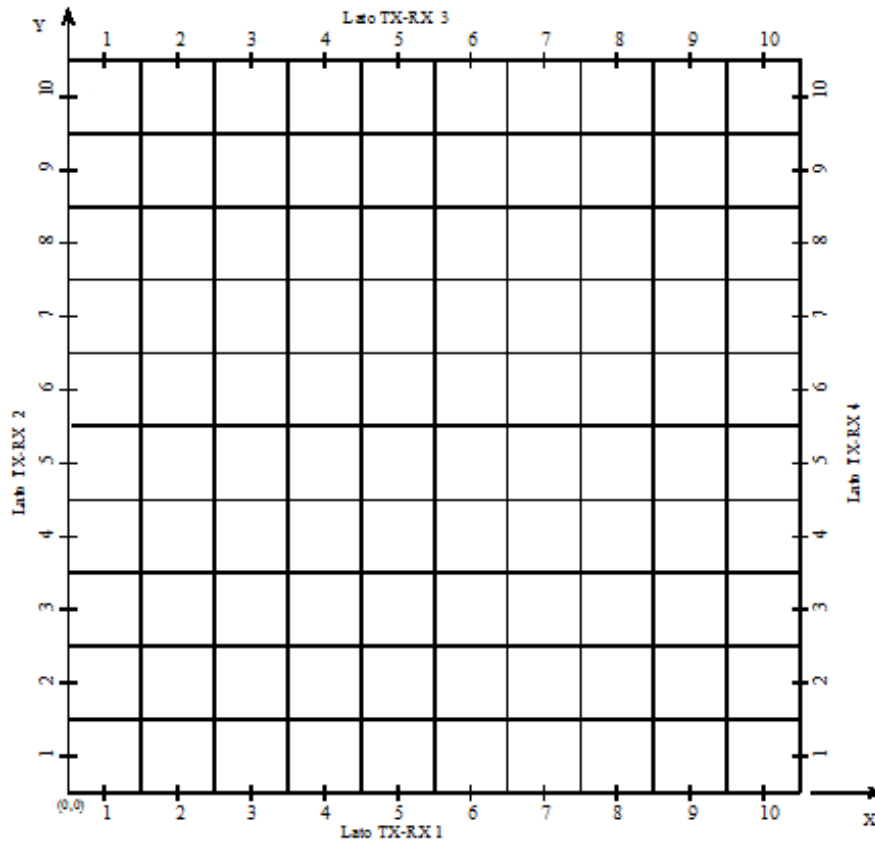


Fig. 7.6: Designazione dei lati e disposizione dei punti di trasmissione-ricezione (Monteforte, 1998).

7.1.3 ELABORAZIONE DEI DATI

7.1.3.1 SOFTWARE TOMOGRAFIA

Per l'elaborazione dei dati acquisiti durante la campagna di indagine, l'ing. N. Monteforte si è avvalso di un'applicazione da lui stesso sviluppata all'interno del proprio lavoro di tesi, il software *TomoGrafia*. Sviluppato in linguaggio Visual Basic 6, questo programma è stato progettato con l'intento di riuscire a ricostruire le immagini tomografiche delle sezioni indagate sulla base dei tempi di volo registrati durante il processo di acquisizione e delle lunghezze dei relativi percorsi teorici.

Lo studio sulla propagazione delle onde soniche all'interno della lastra di calcestruzzo ha consentito all'ingegnere di testare il proprio software e di calibrarlo in funzione di successive analisi eseguite in altre campagne di indagine (vedi Paragrafo 4.2).

Oltre ai tempi di volo dei segnali e ai dati geometrici relativi alla piastra e alla disposizione dei punti di battuta-ricezione, l'analisi tomografica ha richiesto

l'individuazione di un passo di discretizzazione (dimensione dei pixel in cui suddividere la sezione) adatto allo scopo. In relazione alla maglia di acquisizione e ad alcune considerazioni relative alla lunghezza d'onda dei segnali trasmessi, è stato scelto un passo di elaborazione pari a 20 cm.

Nella Tabella 7.1 sono riportati i valori delle velocità dei pixel sulla base dei quali il software ha ricostruito l'immagine tomografica.

Tabella 7.1 - Velocità soniche della sezione restituite dal software TomoGrafia (Monteforte, 1998).

4600	4550	4558	4570	4565	4310	3250	3487	4557	4600
4620	4650	4610	4300	3254	2800	2500	3354	4556	4585
4554	4500	3125	3000	2500	2700	3254	3435	4557	4568
4500	2500	2500	2500	3124	3310	3368	3324	4541	4553
4520	3010	3025	3025	3250	3358	4556	4525	4538	4552
4540	4530	4542	4531	4529	4512	3580	3470	3420	4517
4555	4535	4549	4546	4549	4521	2800	2500	2250	4509
4580	4560	4567	4551	4550	3945	2500	2500	2200	4512
4610	4580	4578	4562	4557	3850	3500	3580	2484	4553
4620	4569	4571	4567	4560	4553	4562	4558	4571	4541

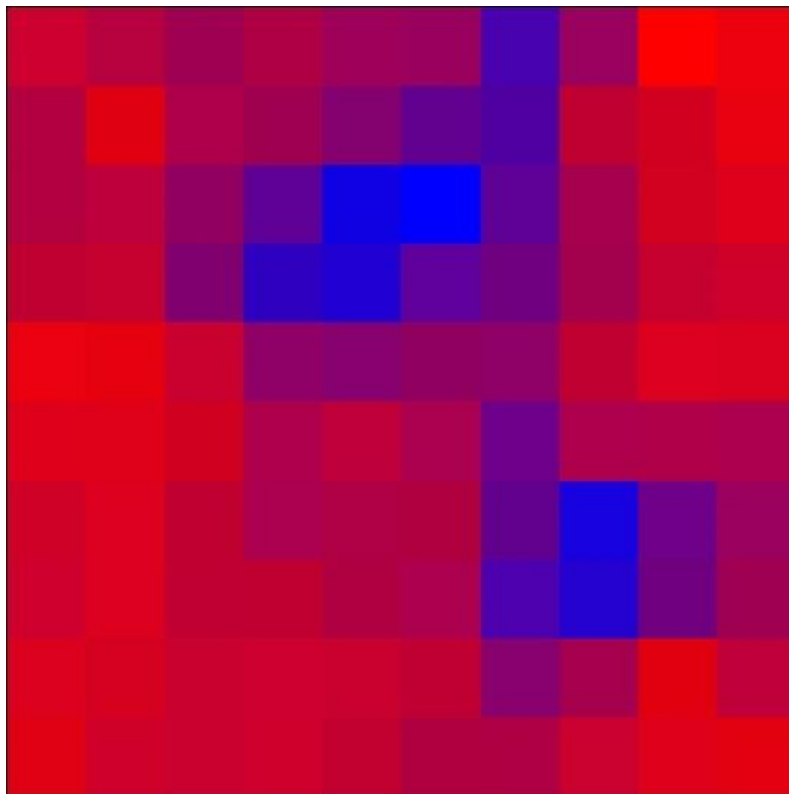


Fig. 7.7: Immagine tomografica generata dal software TomoGrafia (Monteforte, 1998).

7.1.3.2 SOFTWARE TOMOGRAFIA NEW

Al fine di verificare il funzionamento del nuovo software, sono state eseguite due elaborazioni tomografiche dei dati sonici relativi alla lastra di calcestruzzo testata dall'ing. N. Monteforte. Queste analisi hanno richiesto una piccola modifica dell'algoritmo di risoluzione infatti, a causa dell'elevata compattezza del calcestruzzo, è stato necessario alzare il limite superiore di troncamento della velocità da 3500 m/s a 4500 m/s (vedi Paragrafo 6.6.4.4).

La prima elaborazione è stata eseguita utilizzando un passo di discretizzazione pari a 20 cm. Nella Tabella 7.2 sono riassunti i valori dei parametri iniziali e finali risultanti al termine dell'analisi.

Tabella 7.2 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita con passo di discretizzazione pari a 20 cm.

Numero di pixel	100
Numero di percorsi	600
Numero di punti di trasmissione-ricezione	40
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	565
ϵ risultante	0

Nella Tabella 7.3 sono invece riportati i valori delle velocità dei pixel sulla base dei quali il software ha ricostruito l'immagine tomografica.

Tabella 7.3 – Velocità soniche della sezione restituite dal software TomoGrafiaNew (passo 20 cm).

4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4476	4500	4255	4200	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4041	3805	4200	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4197	4110	4477	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4446	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4497	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4299	3997	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4095	4114	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500

Le restituzioni grafiche eseguite sfruttando l'algoritmo di interpolazione dei dati interno al software hanno nitidamente evidenziato la presenza dei due ostacoli inglobati nella piastra.

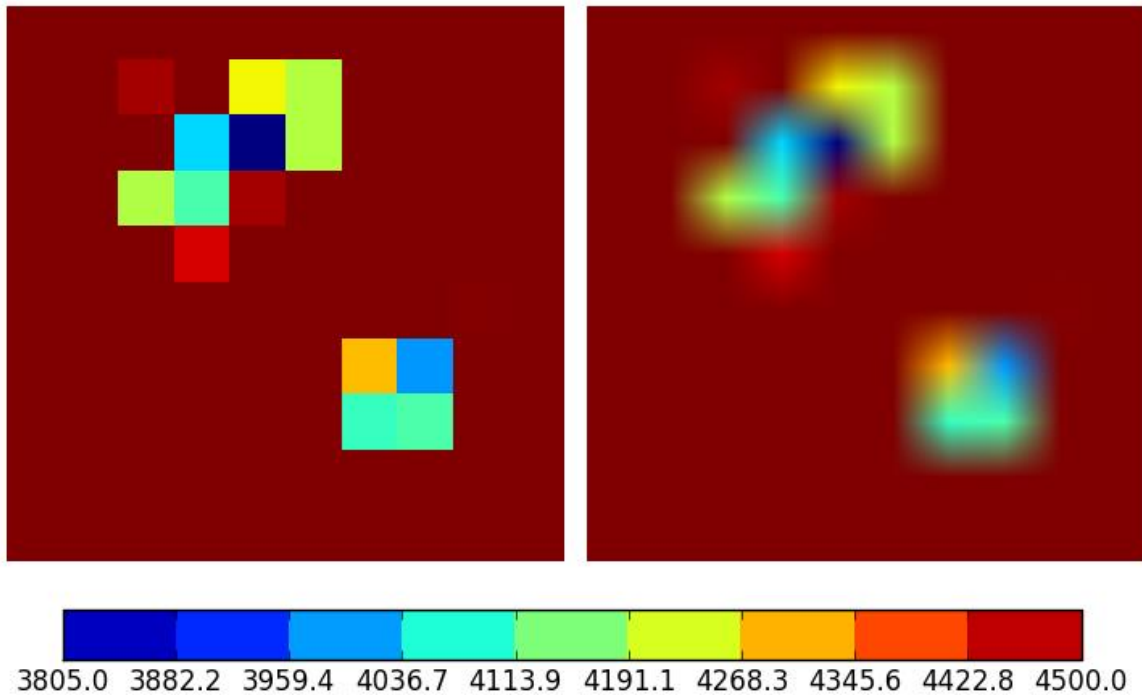


Fig. 7.8: Immagini tomografiche della lastra generate dal software TomoGrafiaNew con interpolazione per vicinanza (sinistra) e bilineare (destra).

Per ottenere la mappa della distribuzione delle velocità attraverso l'uso del software Surfer è stato invece necessario selezionare una diversa tipologia di interpolazione dei dati, il kriging. Questo metodo, impostato di default ad ogni avvio del programma per la sua adattabilità ad un'ampia gamma di dati, utilizza le linee di tendenza individuabili nella mappa per eseguire l'estrapolazione nelle aree carenti di informazioni. In alcuni casi questa elaborazione può restituire valori inferiori o superiori all'intervallo di velocità consentito ma, dato il carattere indicativo dell'analisi tomografica, questo effetto collaterale non costituisce un problema.

Anche l'immagine generata utilizzando il software di modellazione Surfer ha chiaramente evidenziato la variazione delle velocità in corrispondenza dei due elementi inseriti all'interno della lastra.

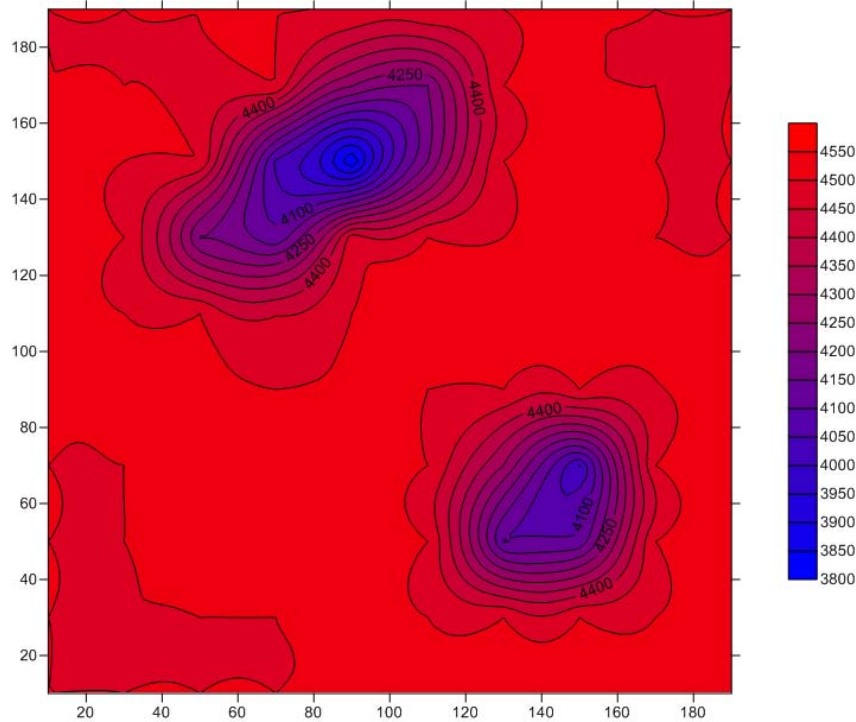


Fig. 7.9: Immagine tomografia della lastra generata dal software Surfer.

La prima elaborazione è stata invece eseguita utilizzando un passo di discretizzazione nettamente inferiore al precedente e pari a 12.5 cm. Tale scelta ha ovviamente consentito di ottenere una più fitta suddivisione della sezione. Nella Tabella 7.4 sono riassunti i valori dei parametri iniziali e finali risultanti al termine dell'analisi.

Tabella 7.4 - Parametri relativi all'elaborazione eseguita con passo di discretizzazione pari a 12.5 cm.

Numero di pixel	256
Numero di percorsi	600
Numero di punti di trasmissione-ricezione	40
Numero massimo di iterazioni	2000
Criterio di convergenza (ε)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	1284
ε risultante	0

Nella Tabella 7.5 sono invece riportati i valori delle velocità dei pixel sulla base dei quali il software ha ricostruito l'immagine tomografica.

Tabella 7.5 – Velocità sonore della sezione restituite dal software TomoGrafiaNew (passo 12,5 cm).

4500	4500	4500	4500	4500	4267	4500	4500	4103	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4304	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4455	4500	4344	4455	4197	4500	3780	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4200	4230	3624	4254	4014	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4410	4500	4500	4415	4205	4013	3674	4403	4468	4500	4500	4500	4471	4500	4461	4500
4500	4500	4500	4312	4464	4005	4295	4437	4500	4500	4500	4500	4500	4477	4500	4500
4426	4500	4500	4500	4468	4137	4500	4435	4500	4500	4500	4500	4244	4500	4486	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4420	4500	4500	4482	4500	4500	4500	4446	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4399	4500	4235	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4469	4401	4500	4500	4500	4434	4500	4500	4500	4500
4500	4432	4500	4500	4500	4266	4500	4500	4500	4500	4255	3884	4414	4477	4500	4500
4381	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4372	3357	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4277	4500	4369	4500	4500	4123	4500	4377	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4459	4482	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
4500	4500	4500	4500	4421	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500

Le restituzioni grafiche eseguite sfruttando l’algoritmo di interpolazione dei dati interno al software hanno nitidamente evidenziato la presenza dei due ostacoli inglobati nella piastra.

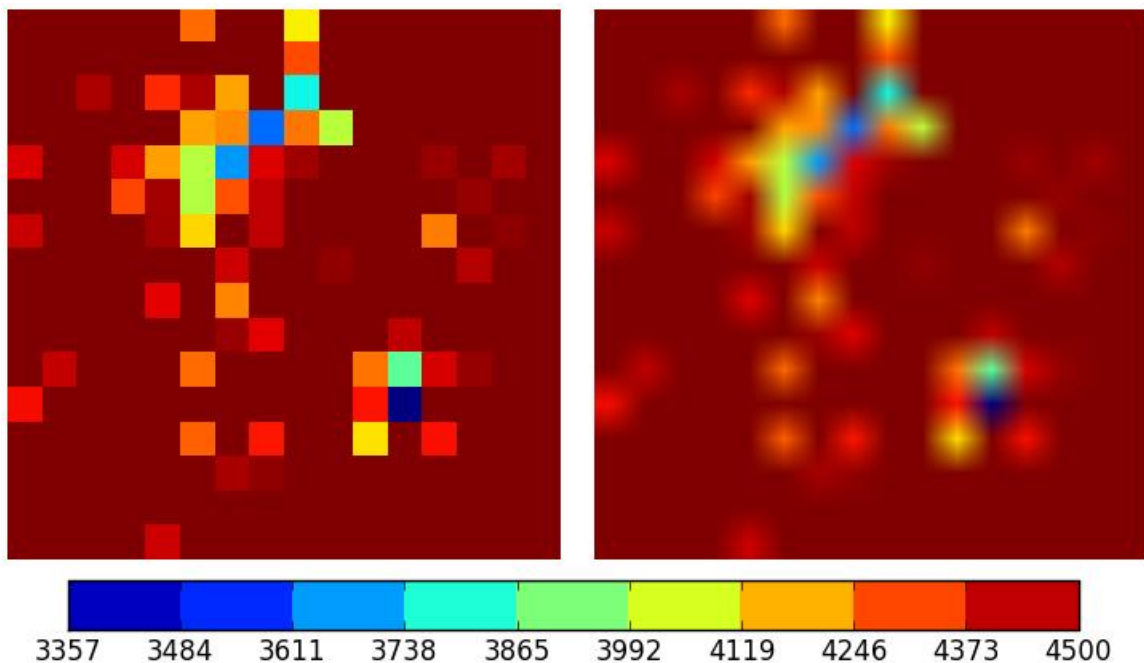


Fig. 7.10: Immagini tomografiche della lastra generate dal software TomoGrafiaNew con interpolazione per vicinanza (sinistra) e bilineare (destra).

Il maggiore infittimento della maglia di discretizzazione ha fatto emergere la presenza di alcune zone di calcestruzzo caratterizzate da velocità leggermente difformi ma, data la vicinanza dei valori della scala delle velocità, tale variazione può essere considerata trascurabile.

Anche l'immagine generata utilizzando il software di modellazione Surfer ha chiaramente evidenziato la variazione delle velocità in corrispondenza dei due elementi inseriti all'interno della lastra.

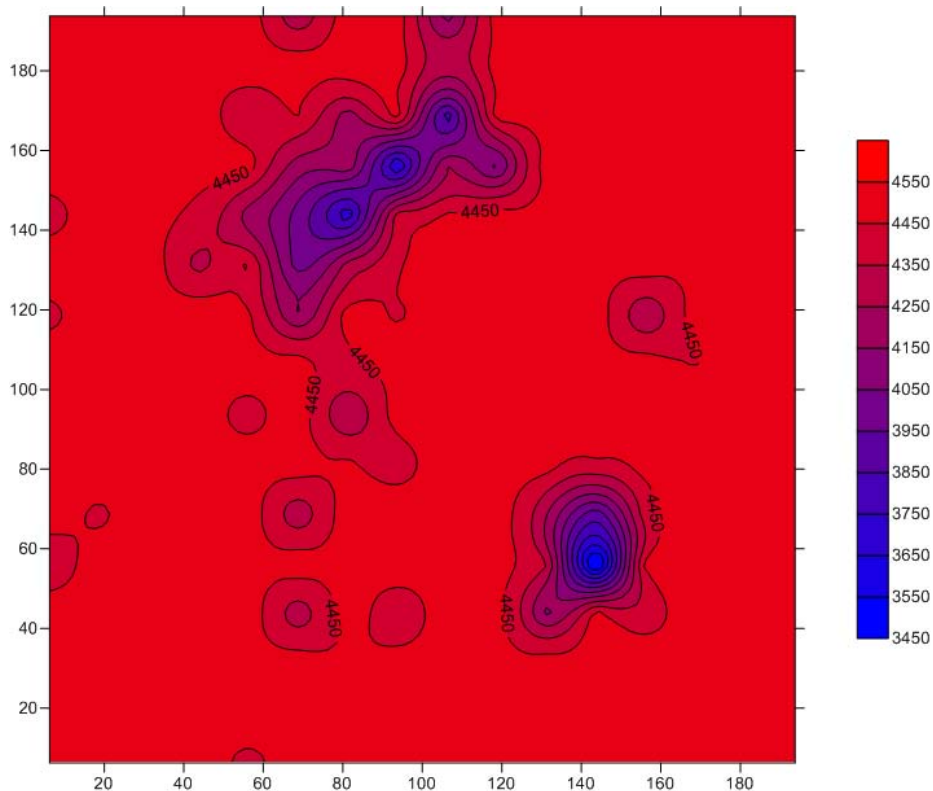


Fig. 7.11: Immagine tomografia della lastra generata dal software Surfer.

In relazione al confronto tra le due elaborazioni eseguite con il nuovo software TomoGrafNew è possibile affermare che:

- L'applicazione funziona correttamente e consente di ricostruire mappe di distribuzione della velocità sonora di buona qualità;
- La modifica delle dimensioni della maglia di discretizzazione non comporta conseguenze quali la variazione delle mappe o l'introduzione di

errori di calcolo. Tale comportamento, abbastanza difforme dai casi reali, è probabilmente legato alle specifiche caratteristiche della lastra.

7.1.3.3 CONFRONTO TRA SOFTWARE

Per il confronto tra i risultati conseguiti con le due diverse modalità di elaborazione si fa riferimento alle sole analisi eseguite utilizzando un passo di discretizzazione di 20 cm.

Entrambi i software sembrano funzionare correttamente in quanto evidenziano la reale morfologia interna. Le uniche differenze effettivamente riscontrabili riguardano i valori delle velocità soniche in corrispondenza degli ostacoli che, nel caso del metodo dell'ing. N. Monteforte, risultano essere inferiori.

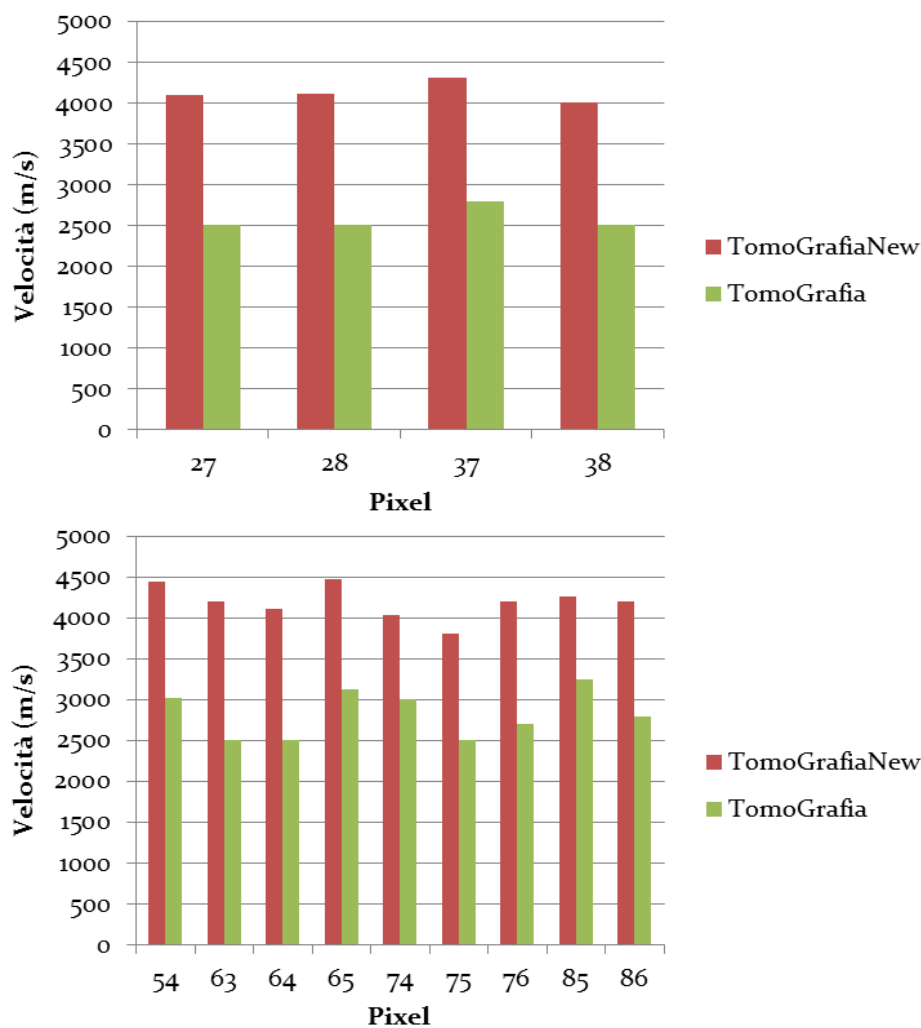


Fig. 7.12: Istogrammi di confronto tra le velocità calcolate dai due software in corrispondenza degli ostacoli presenti nella lastra di calcestruzzo. Il laterizio (sopra) e il polistirolo (sotto)

Tale variazione è probabilmente legata all'algoritmo di risoluzione che, nel caso del nuovo software TomoGrafiaNew, applicando iterativamente le correzioni a tutti i pixel della sezione interessati da un determinato percorso, tende a fornire valori maggiormente mediati, limando i picchi superiori e inferiori di velocità. L'andamento regolare riscontrabile in entrambe le distribuzioni consente comunque di formulare le medesime considerazioni qualitative in merito all'elemento indagato.

7.2 PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI DUE PILASTRI DI PALAZZO LIVIANO A PADOVA

Il secondo test di funzionamento effettuato sul nuovo software di elaborazione è stato utile per verificare la validità degli algoritmi di risoluzione nel caso di analisi riguardanti elementi poco danneggiati e sconosciuti dal punto di vista della morfologia e della composizione interna.

La prova, gestita da un gruppo di lavoro coordinato dagli ing. G. Bettiol e M. Fava, ha interessato due pilastri del porticato retrostante Palazzo Liviano a Padova.

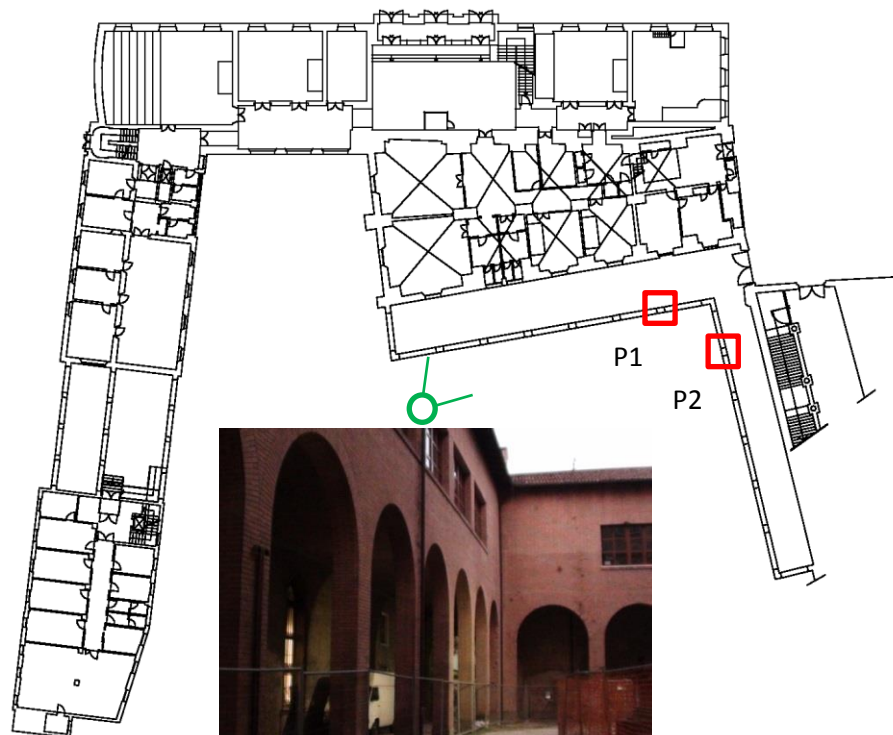


Fig. 7.13: Localizzazione dei pilastri del porticato oggetto dell'indagine tomografica.

7.2.1 ESECUZIONE DELLA PROVA

La campagna di indagine complessiva ha previsto l'esecuzione di 6 prove soniche su schema tomografico, 3 per ognuno dei pilastri del portico.

I pilastri, rispettivamente di dimensioni 79 x 56 e 79 x 53 cm, sono stati analizzati disponendo gli strumenti di misurazione a tre diverse quote: 4.20, 2.80 e 1.40 metri dal piano del terreno. La collocazione ad altezze elevate è stata possibile grazie alla presenza di alcuni ponteggi precedentemente installati per l'esecuzione di altri lavori. Le tomografie sono state realizzate disponendo 12 punti di trasmissione-ricezione lungo il perimetro dei pilastri, 4 sui lati più lunghi e 3 su quelli più corti, utilizzando una griglia di campionamento con passo variabile da 12 a 17 cm. Tale collocazione ha consentito di acquisire 73 misurazioni per ogni prova.

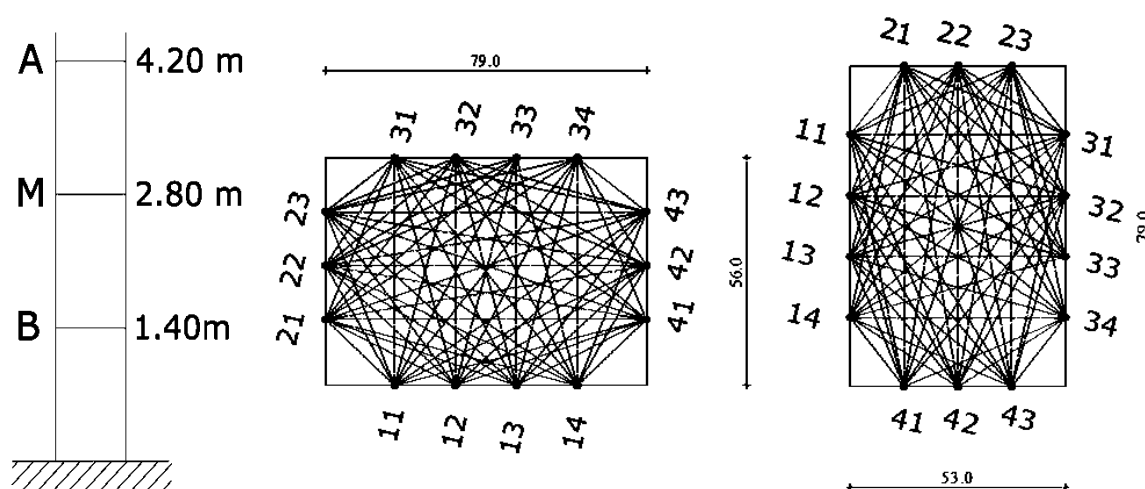


Fig. 7.14: Disposizione dei punti di trasmissione-ricezione in prospettiva (sinistra) e in sezione (centro e destra) (Bettiol e Fava, 2013).

7.2.2 ELABORAZIONE DEI DATI

7.2.2.1 SOFTWARE TOMOGRAFIA

Per l'elaborazione dei dati acquisiti durante la campagna di indagine è stato necessario definire una particolare maglia di discretizzazione non perfettamente coincidente con il perimetro esterno dei pilastri. Tale scelta è stata obbligata dalle caratteristiche dell'algoritmo di ray tracing, programmato per eseguire il calcolo delle lunghezze dei percorsi solamente su pixel di forma quadrata. In relazione a

questo particolare limite e al rapporto tra lunghezza e larghezza dei pilastri, è stato scelto un passo di elaborazione pari a 14 cm, per una copertura totale di 84 x 56 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori delle velocità dei pixel relativi alla tre sezioni del pilastro P₁ (A, M e B), sulla base dei quali l'applicazione ha ricostruito l'immagine tomografica. Ognuna di esse è corredata dalla relativa mappa ottenuta tramite l'utilizzo del software Surfer.

- Pilastro P₁, sezione A:

Tabella 7.6 – Velocità soniche della sezione A del pilastro P₁ restituite dal software TomoGrafia.

2036	1921	1744	1604	1748	1724
1748	1710	1702	1570	1708	1666
1652	1738	1694	1678	1855	2025
1736	1961	1778	1758	1955	2063

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere una zona centrale caratterizzata da una velocità media stimabile in 1700 m/s e due porzioni di maggiore consistenza in corrispondenza degli angoli superiore sinistro e inferiore destro (circa 1900÷2100 m/s).

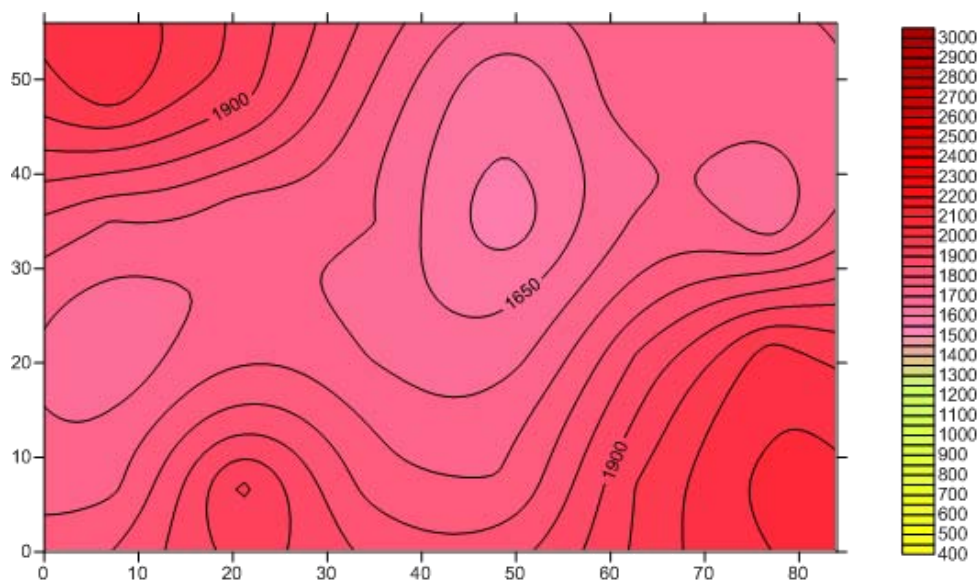


Fig. 7.14: Immagine tomografia della sezione A del pilastro P₁ (Bettiol e Fava, 2013).

- Pilastro P1, sezione M:

Tabella 7.7 – Velocità soniche della sezione M del pilastro P1 restituite dal software TomoGrafia.

1826	1864	1699	1575	1587	1402
1903	1803	1692	1533	1494	1478
1795	1820	1654	1577	1442	1557
1749	1792	1721	1637	1709	1680

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere un graduale aumento delle velocità dalla zona di destra a quella posta più a sinistra, ma la variazione è comunque contenuta in un intervallo abbastanza ristretto (circa 1400÷1800 m/s).

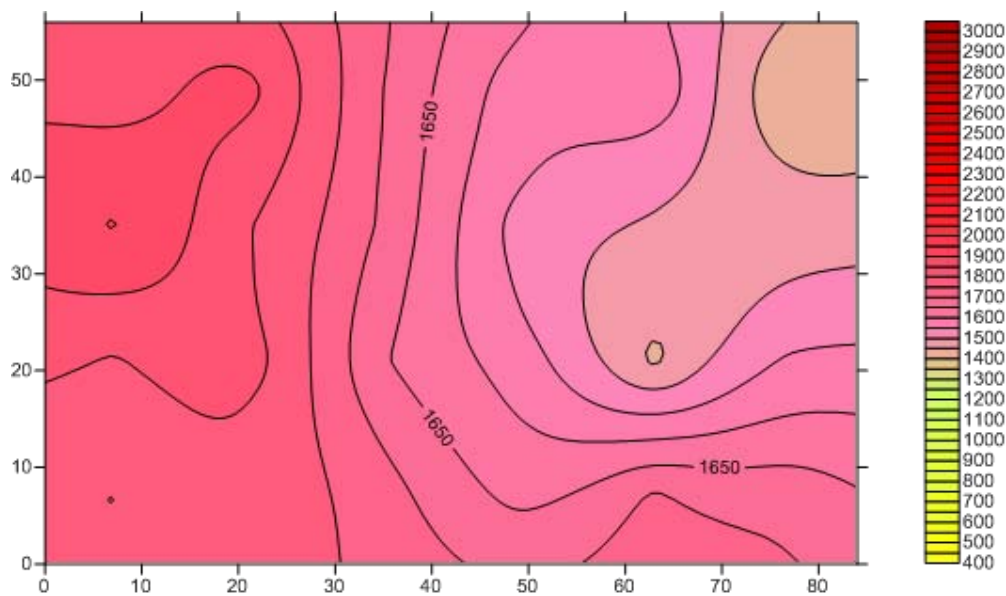


Fig. 7.15: Immagine tomografia della seziona M del pilastro P1 (Bettiol e Fava, 2013).

- Pilastro P1, sezione B:

Tabella 7.8 – Velocità soniche della sezione B del pilastro P1 restituite dal software TomoGrafia.

1990	2048	1811	1722	1920	2084
1875	1862	1913	1819	1769	1909
1868	1878	1918	1890	1910	1943
2081	2017	1885	1898	2151	1994

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). Anche in questo caso è possibile distinguere una zona centrale compatta caratterizzata da una velocità media stimabile in 1900 m/s e delle porzioni di maggiore consistenza in corrispondenza dei quattro angoli della sezione (circa 2200÷2300 m/s).

La presenza di una morfologia interna molto simile ai casi precedenti ma caratterizzata da valori di velocità maggiori, può portare a ipotizzare che il livello di consolidamento sia stato influenzato dal peso proprio della struttura.

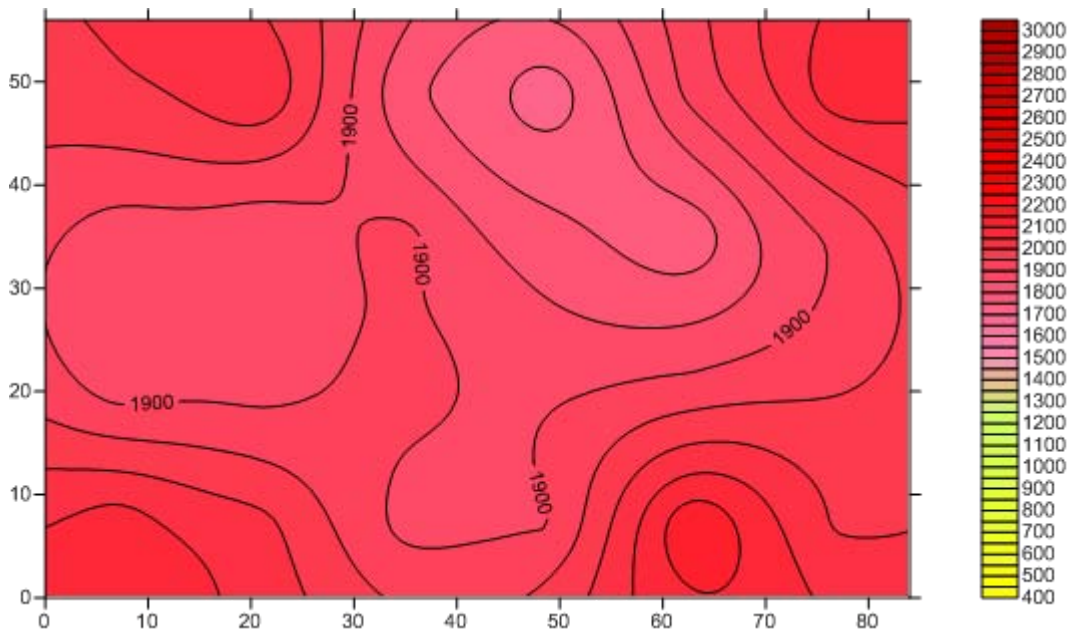


Fig. 7.16: Immagine tomografia della sezione B del pilastro P1 (Bettiol e Fava, 2013).

Dopo l'analisi delle tomografie eseguite sul primo pilastro, vengono riportati i valori delle velocità dei pixel relativi alla tre sezioni del pilastro P2 (A, M e B), sulla

base dei quali l'applicazione ha ricostruito l'immagine tomografica. Ognuna di esse, come nei casi precedenti, è corredata dalla relativa mappa ottenuta tramite l'utilizzo del software Surfer.

- Pilastro P2, sezione A:

Tabella 7.9 – Velocità soniche della sezione A del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafia.

2686	2584	2445	2333	2257	2671
2440	2381	2388	2346	2230	2313
2305	2237	2318	2306	2050	2063
2466	2399	2352	2332	2275	2261

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). È comunque possibile distinguere una piccola zona, posta in prossimità del lato destro dell'immagine, caratterizzata da una velocità inferiore rispetto al resto della sezione (circa 2100 m/s). La porzione di maggiori dimensioni è invece contrassegnata da una velocità media pari a circa 2400 m/s.

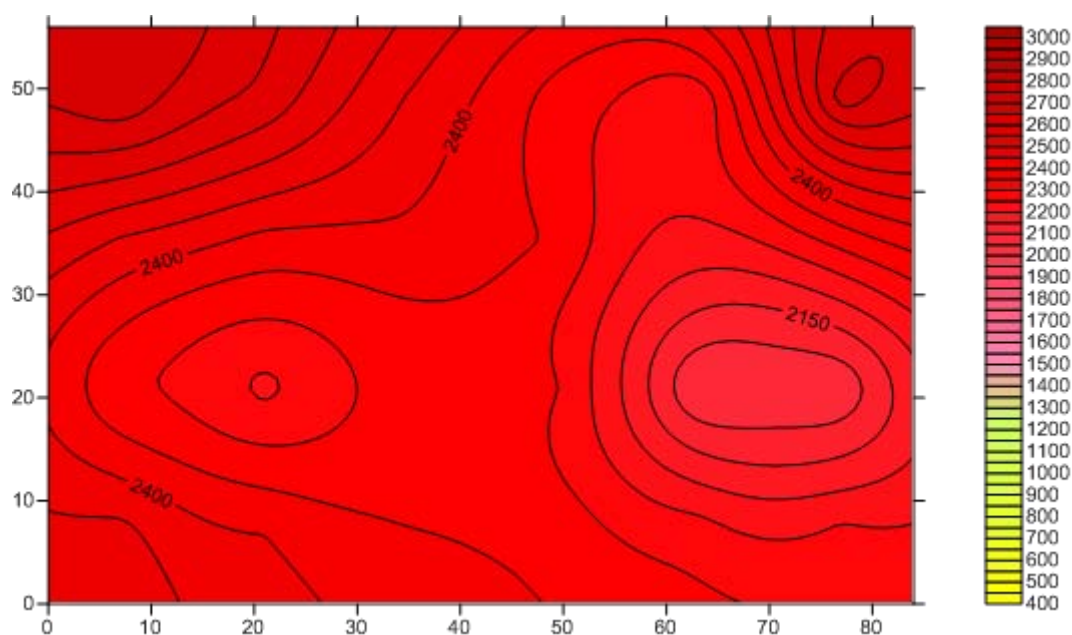


Fig. 7.17: Immagine tomografia della sezione A del pilastro P2 (Bettiol e Fava, 2013).

- Pilastro P2, sezione M:

Tabella 7.10 – Velocità soniche della sezione M del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafia.

2067	1799	1581	1548	1719	2279
1750	1597	1532	1542	1633	1708
1572	1423	1436	1555	1588	1683
1793	1669	1479	1607	1827	1928

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione lievemente disomogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere una porzione poco compatta in corrispondenza del nucleo del pilastro (circa 1300 m/s) e un successivo graduale aumento delle velocità dalla zona più interna a quella più esterna. Tala variazione è comunque contenuta in un intervallo abbastanza ristretto (circa 1600÷1900 m/s). Gli improvvisi picchi riscontrabili nei due angoli superiori dell'immagine sono probabilmente riconducibili ad alcune singolarità.

Appare comunque netta la differenza rispetto ai risultati ottenuti dall'analisi della sezione posta a quota superiore.

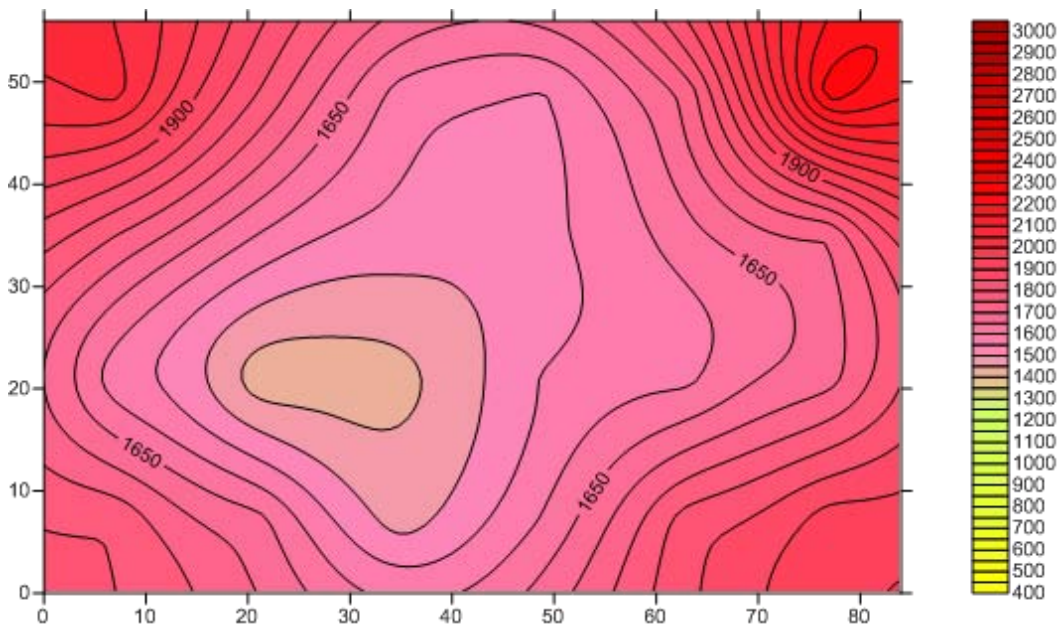


Fig. 7.18: Immagine tomografia della sezione M del pilastro P2 (Bettiol e Fava, 2013).

- Pilastro P2, sezione B:

Tabella 7.11 – Velocità soniche della sezione B del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafia.

1413	2018	2208	2265	2381	2878
1947	2408	2322	2351	2298	2291
2364	2345	2303	2311	2206	2314
2369	2360	2255	2285	2373	2361

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). La porzione di maggiori dimensioni è caratterizzata da una velocità media pari a circa 2400 m/s mentre, nei due angoli superiori, è possibile distinguere la presenza di due zone dotate di condizioni tra loro opposte: uno spigolo molto consistente ed un altro, quello di sinistra, nettamente meno compatto.

La distribuzione complessiva è riconducibile a quella riscontrata nella sezione più alta, motivo per cui non risulta possibile formulare ipotesi in merito alle cause che possono avere favorito il maggior compattamento della zona indagata.

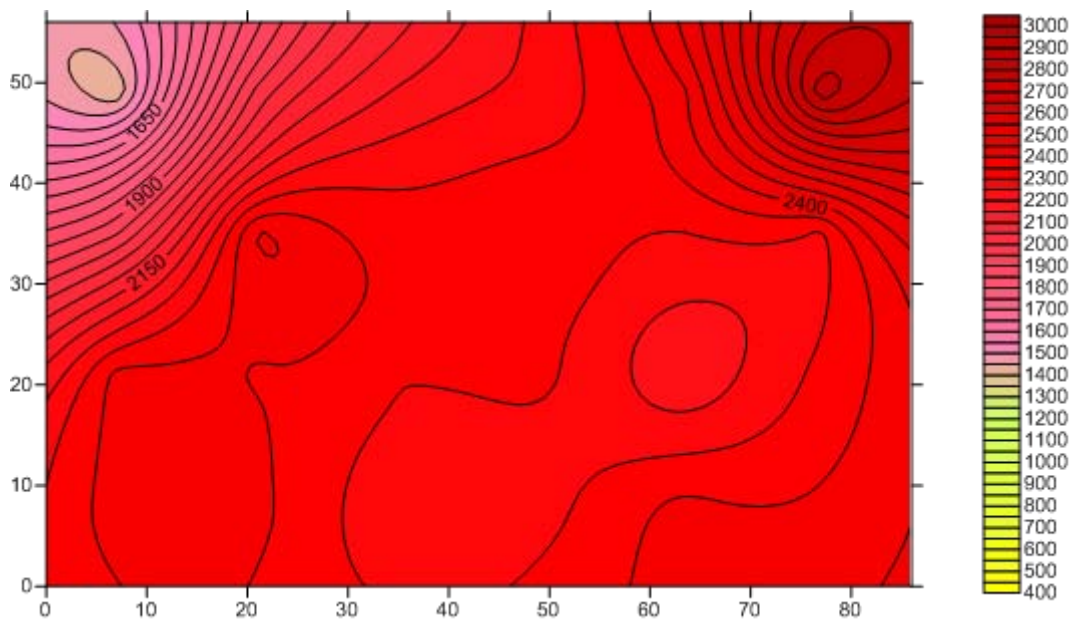


Fig. 7.19: Immagine tomografia della sezione B del pilastro P2 (Bettiol e Fava, 2013).

7.2.2.2 SOFTWARE TOMOGRAFIA NEW

Così come avvenuto nel caso precedente, anche per l'elaborazione eseguita con il nuovo software è stato necessario definire una particolare maglia di discretizzazione non perfettamente coincidente con il perimetro esterno dei pilastri. Tale scelta è stata obbligata dalle caratteristiche dell'algoritmo di ray tracing, programmato per eseguire il calcolo delle lunghezze dei percorsi solamente su pixel di forma quadrata. In relazione a questo particolare limite e al rapporto tra lunghezza e larghezza dei pilastri, è stato scelto un passo di elaborazione pari a 19 cm (maglia di 3x4 pixel), per una copertura totale di 76 x 57 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori dei parametri iniziali e finali risultanti al termine delle analisi tomografiche e le velocità dei pixel relative alla tre sezioni dei pilastri P1 e P2 (A, M e B), sulla base delle quali l'applicazione ha ricostruito le immagini. Ognuna di esse è corredata dalla relativa mappa ottenuta tramite l'utilizzo del software Surfer.

- Pilastro P1, sezione A:

Tabella 7.12 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione A del pilastro P1.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	194
ϵ risultante	0

Tabella 7.13 – Velocità soniche della sezione A del pilastro P1 restituite dal software TomoGrafiaNew.

3500	1579	1004	2046
1033	1912	2357	957
2961	1664	1009	3500

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di media

qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere una zona centrale caratterizzata da una velocità media stimabile in 1700 m/s e decrescente verso i bordi della sezione. I picchi di velocità riscontrati negli spigoli sono probabilmente legati all'effetto di alcune singolarità o alla propagazione delle onde soniche lungo il filo esterno della muratura anziché verso l'interno.

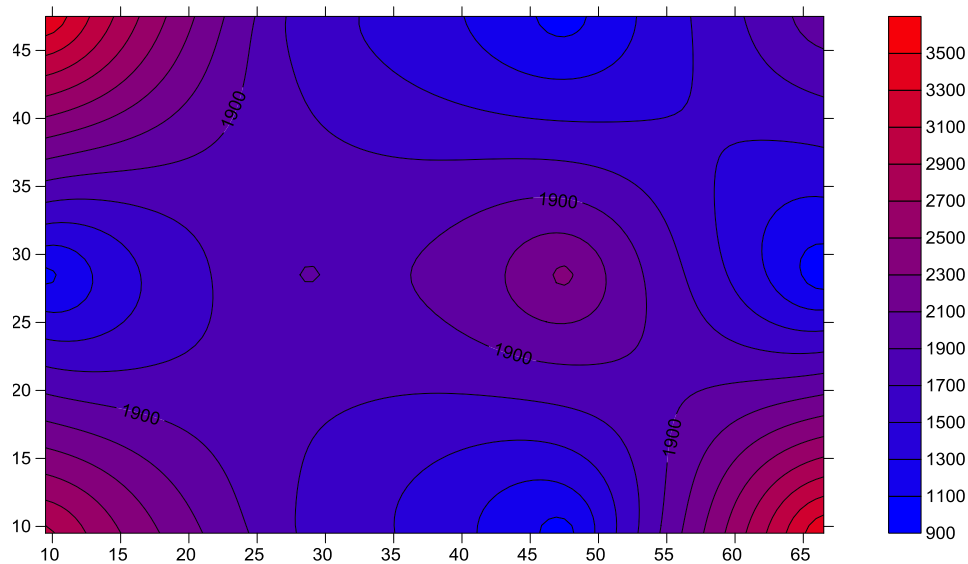


Fig. 7.20: Immagine tomografia della sezione A del pilastro P1.

- Pilastro P1, sezione M:

Tabella 7.14 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione M del pilastro P1.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	220
ϵ risultante	0

Tabella 7.15 – Velocità soniche della sezione M del pilastro P1 restituite dal software TomoGrafiaNew.

1505	2278	1210	1320
3069	1892	1510	1012
1424	2455	945	2638

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza disomogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori comunque riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere un graduale aumento delle velocità dalla zona di destra a quella posta più a sinistra, con variazioni considerevoli nelle porzioni situate in prossimità dei due lati estremi dell'immagine. I picchi di velocità inferiori e superiori riscontrati nelle vicinanze degli spigoli sono probabilmente legati all'effetto di alcune singolarità.

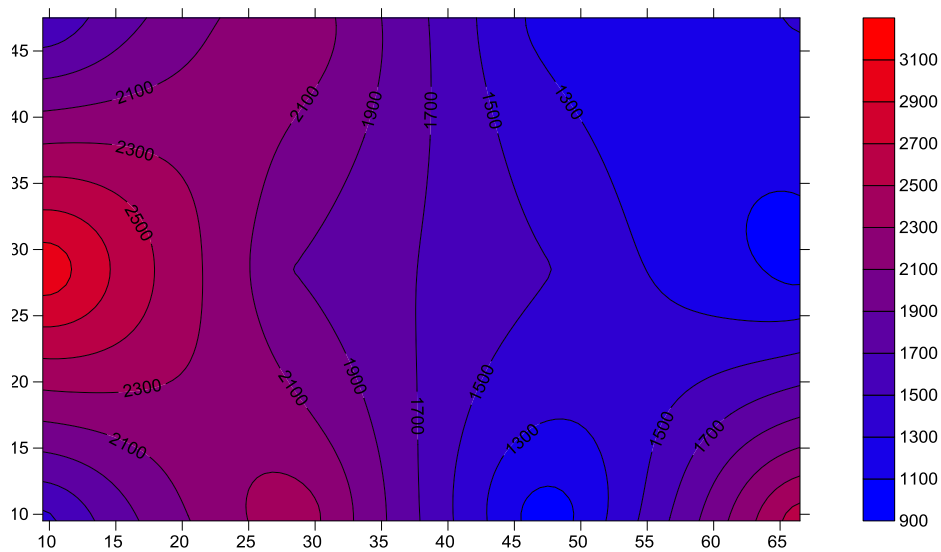


Fig. 7.21: Immagine tomografia della sezione M del pilastro P1.

- Pilastro P1, sezione B:

Tabella 7.16 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione B del pilastro P1.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	132
ϵ risultante	0

Tabella 7.17 – Velocità soniche della sezione B del pilastro P1 restituite dal software TomoGrafiaNew.

3195	1416	1174	2750
1238	2592	2609	1175
3196	1627	1382	3500

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere chiaramente la presenza di un nucleo centrale molto compatto (circa $1900 \div 2300$ m/s) mentre risulta difficile l'interpretazione delle caratteristiche delle porzioni più esterne del pilastro.

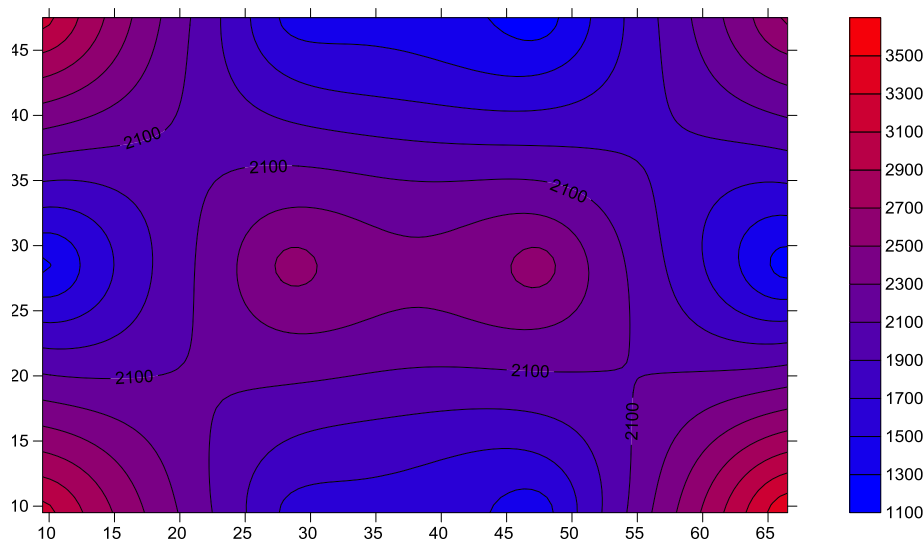


Fig. 7.22: Immagine tomografia della sezione B del pilastro P1.

- Pilastro P2, sezione A:

Tabella 7.18 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione A del pilastro P2.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	183
ϵ risultante	0

Tabella 7.19 - Velocità soniche della sezione A del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafiaNew.

3500	3283	2046	2666
1825	2066	3500	1327
2571	2331	2039	2148

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione delle velocità riconducibile a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere un nucleo centrale di buone caratteristiche la cui velocità è attestabile nell'intervallo 2300÷3000 m/s e osservare un progressivo peggioramento delle condizioni in prossimità dei due lati esterni della sezione.

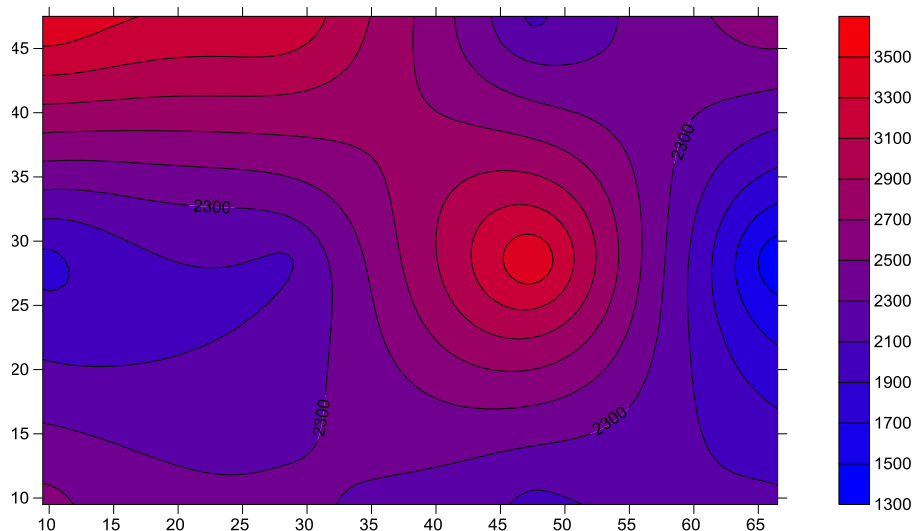


Fig. 7.23: Immagine tomografia della sezione A del pilastro P2.

- Pilastro P2, sezione M:

Tabella 7.20 - Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione M del pilastro P2.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	188
ϵ risultante	0

Tabella 7.21 – Velocità soniche della sezione M del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafiaNew.

3074	1677	1393	1687
1063	1409	1634	1359
2408	991	1594	2343

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione omogenea delle velocità all'interno del pilastro (circa 1200÷1600 m/s), con valori riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). Gli improvvisi picchi riscontrabili negli angoli dell'immagine sono probabilmente riconducibili ad alcune singolarità. Appare comunque netta la differenza rispetto ai risultati ottenuti dall'analisi della sezione posta a quota superiore.

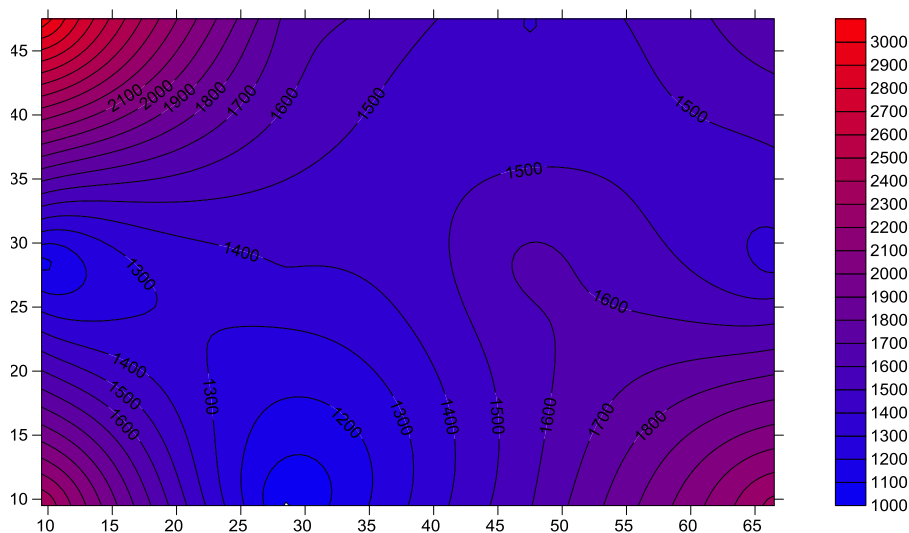


Fig. 7.24: Immagine tomografia della sezione M del pilastro P2.

- Pilastro P2, sezione B:

Tabella 7.22 – Parametri relativi all'elaborazione eseguita sulla sezione B del pilastro P2.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	73
Numero di punti di trasmissione-ricezione	14
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	197
ϵ risultante	0

Tabella 7.23 - Velocità soniche della sezione B del pilastro P2 restituite dal software TomoGrafiaNew.

966	2401	2233	2515
3500	2631	2324	1632
2269	2224	1899	2892

L'immagine generata ha evidenziato una distribuzione abbastanza omogenea delle velocità all'interno del pilastro, con valori riconducibili a murature di qualità medio/alta e buono stato di conservazione (Berra et al., 1992). È possibile distinguere un graduale incremento delle velocità nel passaggio dalla zona destra a quella sinistra dell'immagine, comunque circoscrivibile ad un intervallo abbastanza limitato (circa 2200÷2600 m/s).

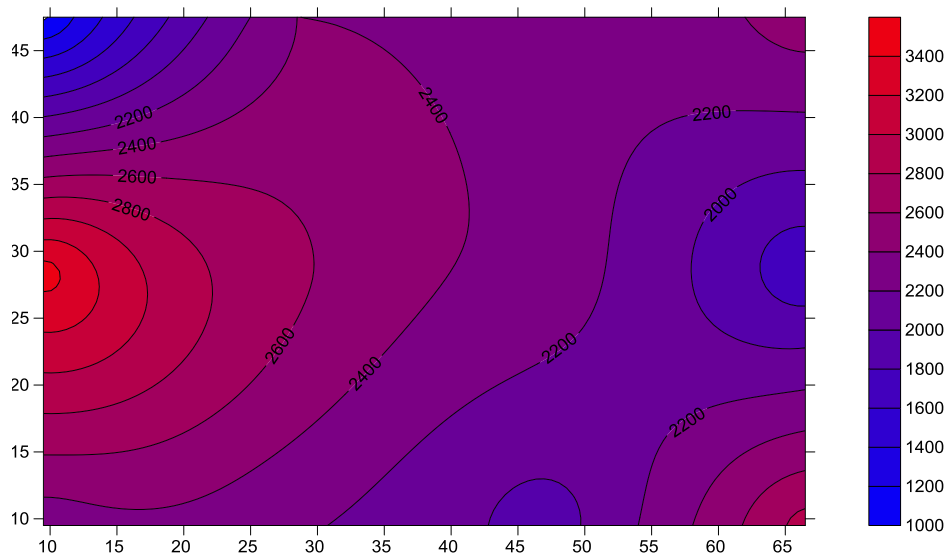


Fig. 7.24: Immagine tomografia della sezione B del pilastro P2.

7.2.2.3 CONFRONTO TRA SOFTWARE

Il confronto tra i risultati conseguiti con le due modalità di elaborazione è stato notevolmente influenzato dal diverso dimensionamento delle maglie di discretizzazione. Inoltre la complessità di lettura dei dati è stata ulteriormente complicata dalla scarsa conoscenza degli elementi indagati dovuta all'assenza di informazioni derivanti da altre prove conoscitive.

In linea generale entrambi i software sembrano aver funzionato correttamente, anche se in alcuni dei casi esaminati le distribuzioni di velocità individuate sono risultate essere parzialmente differenti tra loro.

Molto probabilmente la scelta di utilizzare un passo di discretizzazione di 19 cm, con conseguente sviluppo di una maglia di soli 3 x 4 pixel, non ha consentito di sfruttare appieno le potenzialità del nuovo software. Al fine di verificarne più approfonditamente il funzionamento e di favorire un più proficuo confronto tra le due metodologie di elaborazione, è quindi consigliabile eseguire nuovamente una serie di test utilizzando entrambi i software e modificando le dimensioni delle celle di discretizzazione.

7.3 PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN AGGREGATO EDILIZIO A L'AQUILA

Il terzo test di funzionamento effettuato sul nuovo software di elaborazione è stato utile per verificare la validità degli algoritmi di risoluzione nel caso di analisi riguardanti elementi fortemente danneggiati e per testare l'affidabilità dei risultati nel confronto tra prove eseguite prima e dopo alcuni interventi di consolidamento.

Il complesso programma di prove eseguito a L'Aquila nel periodo compreso tra aprile e luglio del 2013, è stato sviluppato all'interno del progetto di consolidamento di un aggregato del centro storico pesantemente danneggiato dal sisma del 2009. L'edificio, identificato dal codice 1005, è l'unità di testa di un gruppo di palazzi situati tra Corso Vittorio Emmanuele, Vicolo Cavalieri di Malta e Via Giuseppe Verdi.

L'aggregato, sviluppato in altezza per tre piani, è caratterizzato da una pianta trapezoidale piuttosto regolare e dalla presenza di un ampio cortile interno di forma rettangolare. Nonostante l'apparente semplicità compositiva, uno studio accurato svolto dal progettista dell'intervento di consolidamento, ha dimostrato che la struttura ha subito una serie di pesanti trasformazioni nel tempo che ne hanno restituito la composizione attuale. Alla luce dei pesanti danni riportati in conseguenza al sisma del 2009, è plausibile ipotizzare che gli interventi localizzati

eseguiti abbiano provocato un deciso cambiamento del comportamento meccanico dell'intero edificio.



Fig. 7.25: Localizzazione dell'aggregato 1005 (sinistra) e immagine della facciata esterna rivolta verso Corso Vittorio Emanuele (destra).

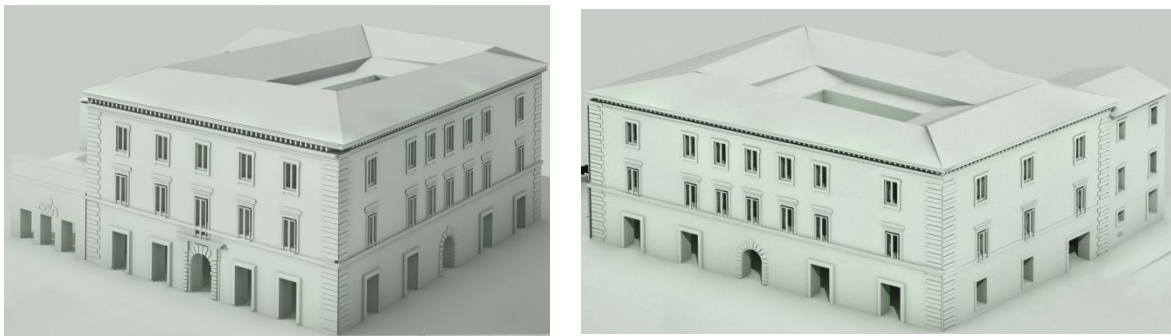


Fig. 7.26: Modelli tridimensionali del complesso. Vista da Corso Vittorio Emanuele (sinistra) e da Vicolo Cavalieri di Malta (destra) (Mazzaro, 2014).

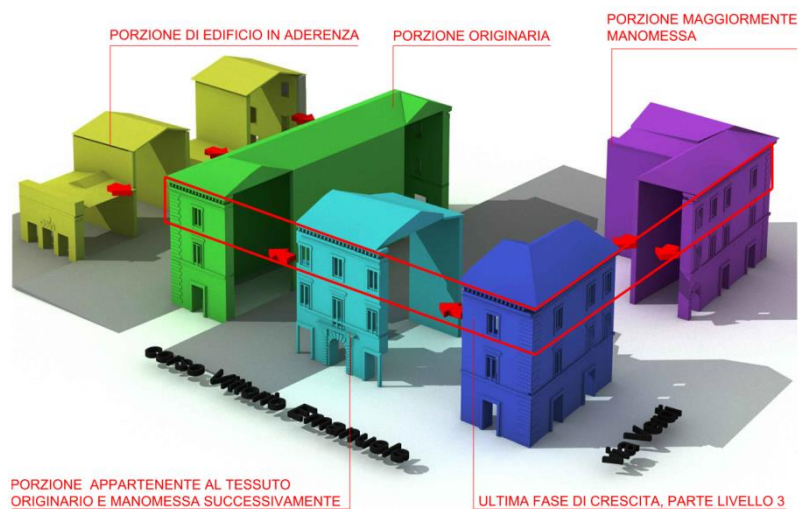


Fig. 7.27: Fasi dell'evoluzione storica dell'edificio (Mazzaro, 2014).

Il progetto di risanamento, fortemente vincolato dalla Soprintendenza per i beni culturali, ha previsto l'esecuzione di un intervento di consolidamento murario mediante iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale accoppiato all'applicazione di una griglia di fibre unidirezionali in SRG da entrambi i lati dei paramenti murari, tra loro collegate con connettori in SRG. Tale operazione ha consentito di creare un'incamiciatura totale delle murature e ha dato vita ad un sistema il cui scopo è quello di ottenere un comportamento monolitico del paramento murario.

7.3.1 PIANO DELLE PROVE

Il piano delle prove per la valutazione dell'efficacia degli interventi di rinforzo murario, ha previsto l'esecuzione di tre diverse campagne di indagine così articolate:

- Conoscenza preliminare (29-30 aprile 2013):
 - Sopralluogo e scelta dei pannelli murari da testare;
 - Indagini soniche dirette e tomografiche;
 - Endoscopie.
- Intervento di consolidamento (28-29 maggio 2013):
 - Applicazione delle fibre e dei connettori in SRG;
 - Iniezioni di malta a base di calce idraulica naturale.
- Valutazione dell'efficacia degli interventi (8-9-10 luglio 2013):
 - Indagini soniche post iniezione sui pannelli consolidati;
 - Prove di compressione diagonale;
 - Prove di martinetto piatto doppio.

L'esecuzione delle prove sopra citate ha previsto l'individuazione di cinque pannelli murari sufficientemente ampi e caratterizzati da opportune condizioni al contorno opportune. Nel dettaglio, i cinque campioni selezionati sono stati:

- D1: Pannello campione rappresentativo della muratura. Non consolidato e soggetto a prova di compressione diagonale;

- D2: Pannello campione rappresentativo della muratura. Iniettato e consolidato con gli SRG e sottoposto a prova di compressione diagonale;
- D3: Pannello campione rappresentativo della muratura. Iniettato e consolidato con gli SRG e sottoposto a prova di compressione diagonale;
- MPD_NC: Pannello campione rappresentativo della muratura. Non consolidato e soggetto a prova di martinetto piatto doppio;
- MPD_C: Pannello campione rappresentativo della muratura. Iniettato e consolidato con gli SRG e sottoposto a prova di martinetto piatto doppio.

Data l'attinenza con il presente lavoro di Tesi, verranno successivamente analizzati solamente i risultati derivanti dalle prove di indagine sonica tomografica eseguite sui pannelli D1, D2 e D3, caratterizzati rispettivamente da uno spessore di 57, 57 e 51 cm.

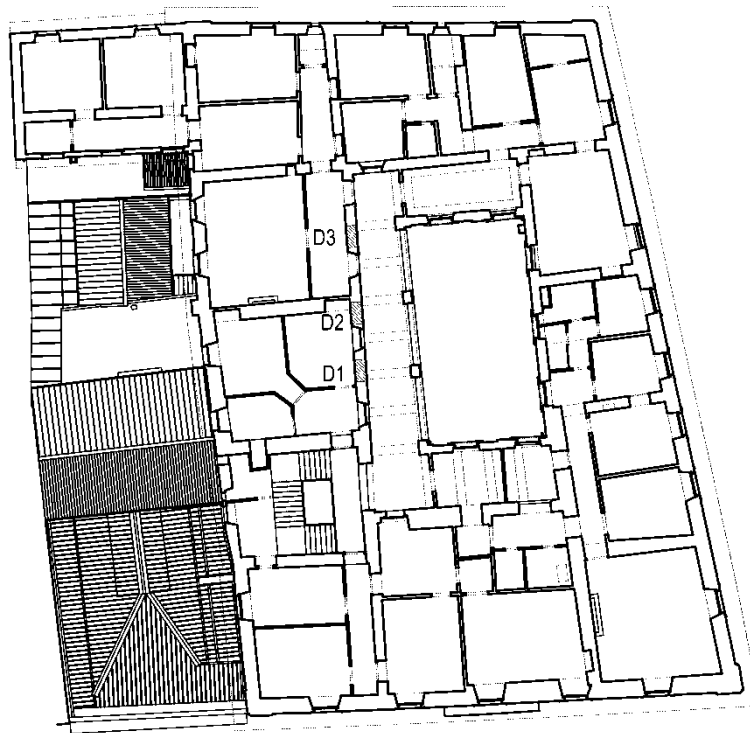


Fig. 7.28: Disposizione in pianta dei pannelli D1, D2 e D3 sottoposti a indagine tomografica.

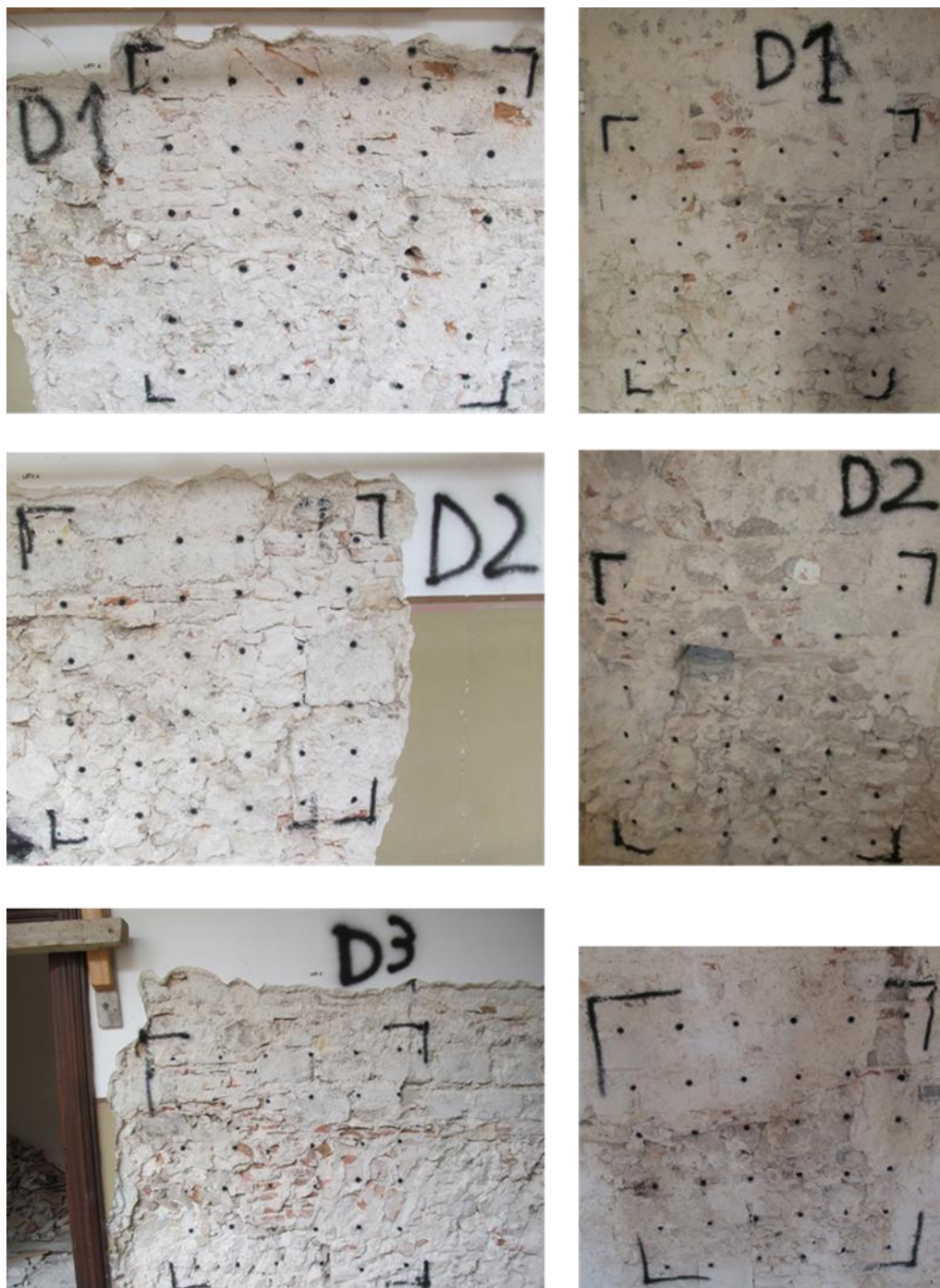


Fig. 7.29: Pannelli D1, D2 e D3 sottoposti a indagine tomografia, facce A (sinistra) e B (destra).

7.3.2 ESECUZIONE DELLE PROVE

Le prove soniche su schema tomografico sono state eseguite nei giorni 29-30 aprile e 8-9-10 luglio 2013 ed hanno coinvolto complessivamente cinque operatori, tre addetti al sostegno degli accelerometri, uno alla generazione dei segnali tramite la battitura col martello e uno dedicato all'acquisizione dei tempi di volo.

La campagna di indagine complessiva ha previsto l'esecuzione di 10 prove soniche su schema tomografico, 6 nella fase precedente e 4 in quella successiva agli interventi di consolidamento. Le tomografie, sia verticali che orizzontali (identificate dalle sigle V e H), sono state realizzate disponendo 6 punti di trasmissione-ricezione lungo ognuna delle due facce dei pannelli e utilizzando una griglia di campionamento con passo costante di 20 cm. Tale collocazione ha consentito l'acquisizione di 36 misurazioni per ogni prova.

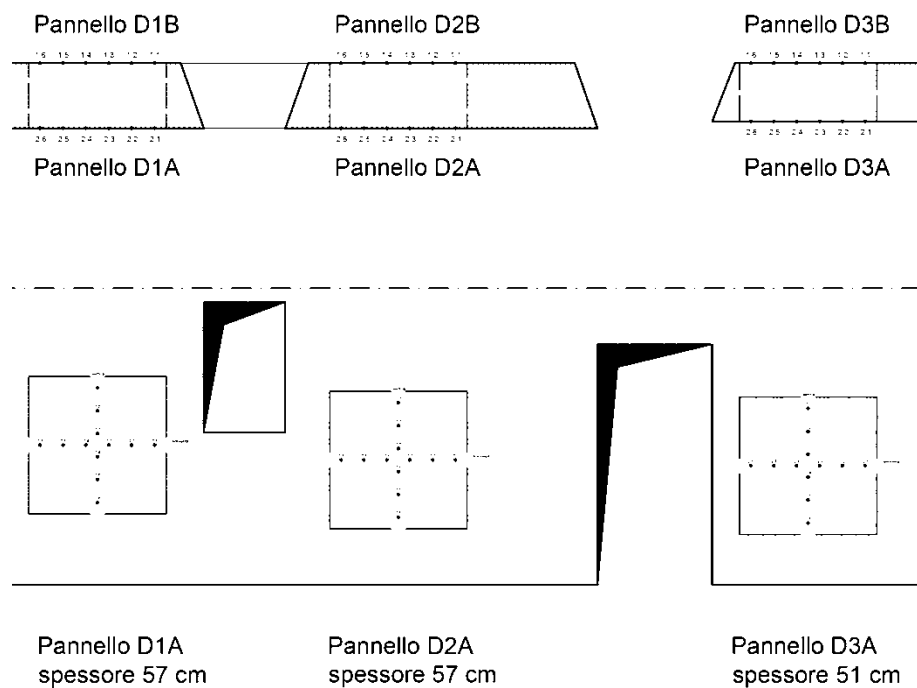


Fig. 7.30: Disposizione in sezione e prospetto dei punti di acquisizione tomografica.



Fig. 7.31: Alcune fasi di esecuzione delle prove tomografiche.

7.3.3 ELABORAZIONE DEI DATI

7.3.3.1 SOFTWARE TOMOGRAFIA

Per l'elaborazione dei dati acquisiti durante la campagna di indagine è stato necessario definire una particolare maglia di discretizzazione non perfettamente coincidente con lo spessore delle murature testate. Tale scelta è stata obbligata dalle caratteristiche dell'algoritmo di ray tracing, programmato per eseguire il calcolo delle lunghezze dei percorsi solamente su pixel di forma quadrata. In relazione a questo particolare limite e alla distanza reciproca di collocazione dei punti di prova, è stato scelto un passo di elaborazione pari a 20 cm, per una copertura totale di 60 x 120 cm (3x6 pixel).

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori delle velocità dei pixel relativi alle sei elaborazioni eseguite nella fase precedente agli interventi di consolidamento murario. Sulla base di questi e dei dati geometrici delle sezioni, l'applicazione dell'ing. N. Monteforte e il software Surfer hanno consentito di ricostruire le diverse immagini tomografiche.

- Pannello D1 non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.24 - Velocità soniche della sezione H del pannello D1 restituite dal software TomoGrafia.

345	432	544	567	645	634
375	397	500	552	654	742
534	454	476	531	555	776

Tabella 7.25 - Velocità soniche della sezione V del pannello D1 restituite dal software TomoGrafia.

863	739	735	753	616	567
1200	928	734	661	530	460
1176	872	675	555	580	592

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare un graduale ma contenuto aumento delle velocità nel passaggio

dalla zona sinistra a quella destra della sezione (circa 400÷700 m/s). Nella mappa verticale è riscontrabile la stessa tipologia di variazione tra le zone poste a diverse quote, anche se la differenza tra i valori ottenuti risulta essere più marcata (circa 500÷1100 m/s).

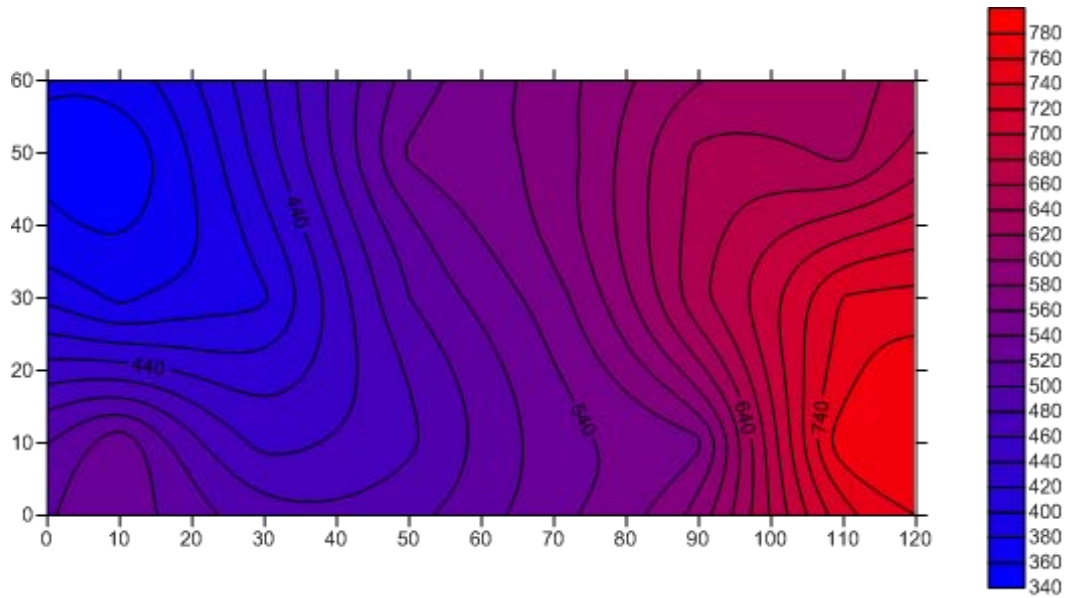


Fig. 7.32: Immagine tomografia della seziona H del pannello D1 non consolidato.

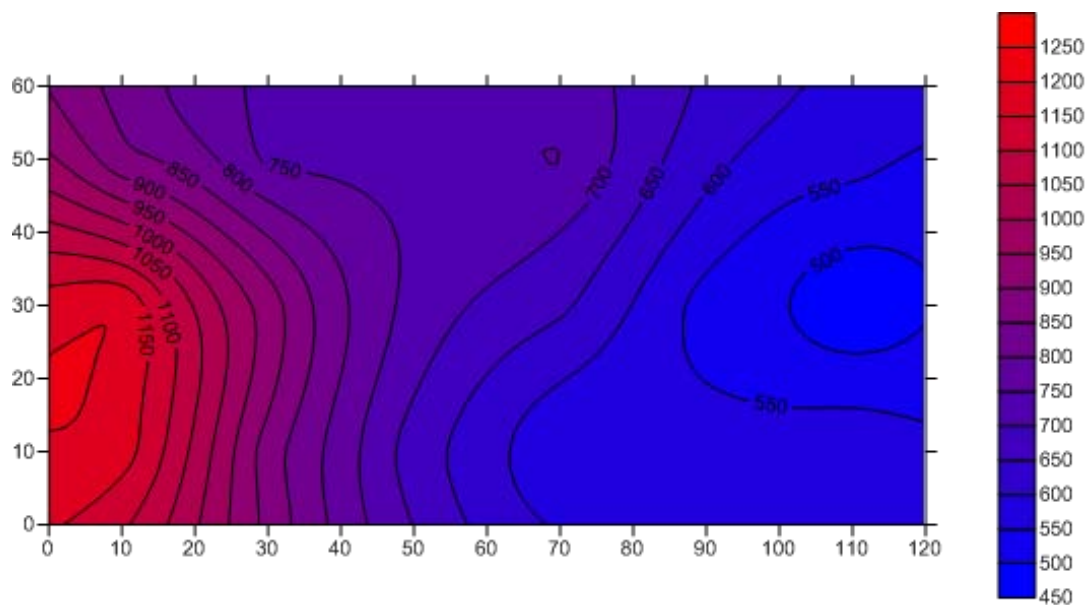


Fig. 7.33: Immagine tomografia della seziona V del pannello D1 non consolidato.

- Pannello D2 non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.26 – Velocità soniche della sezione H del pannello D2 restituite dal software TomoGrafia.

372	377	366	300	275	400
406	384	345	306	281	473
378	360	337	310	300	413

Tabella 7.27 – Velocità soniche della sezione V del pannello D2 restituite dal software TomoGrafia.

668	592	630	763	721	610
970	787	744	655	455	286
1055	963	708	518	450	371

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata omogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità inferiori ai limiti fisicamente consentiti ma dipendenti esclusivamente dalla modalità di interpolazione dei dati (circa 300÷450 m/s). Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un graduale aumento delle velocità nel passaggio dalla zona superiore a quella inferiore (circa 300÷1000 m/s).

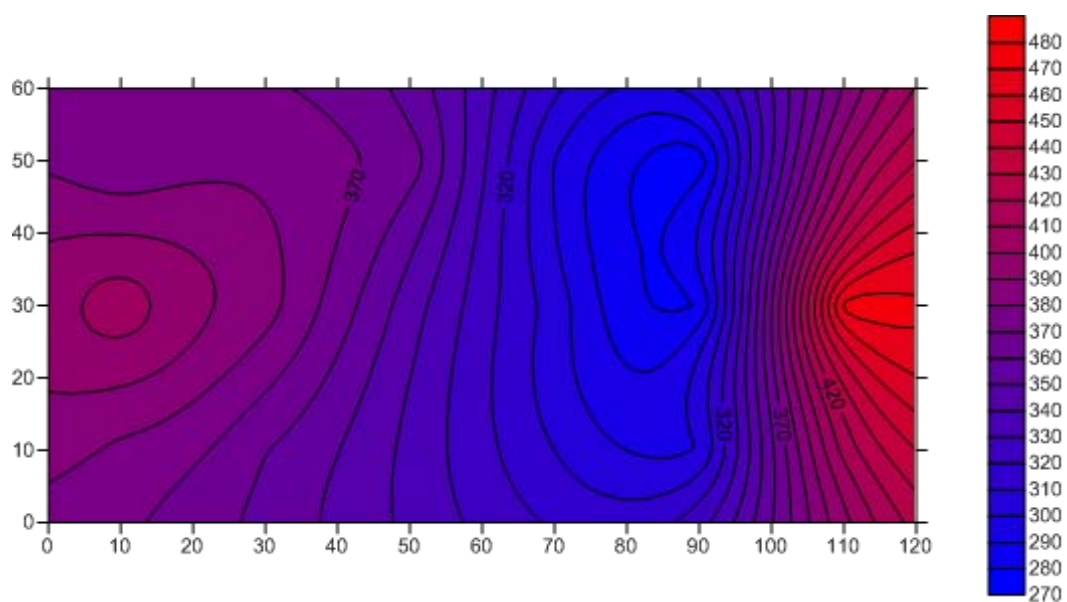


Fig. 7.34: Immagine tomografia della seziona H del pannello D2 non consolidato.

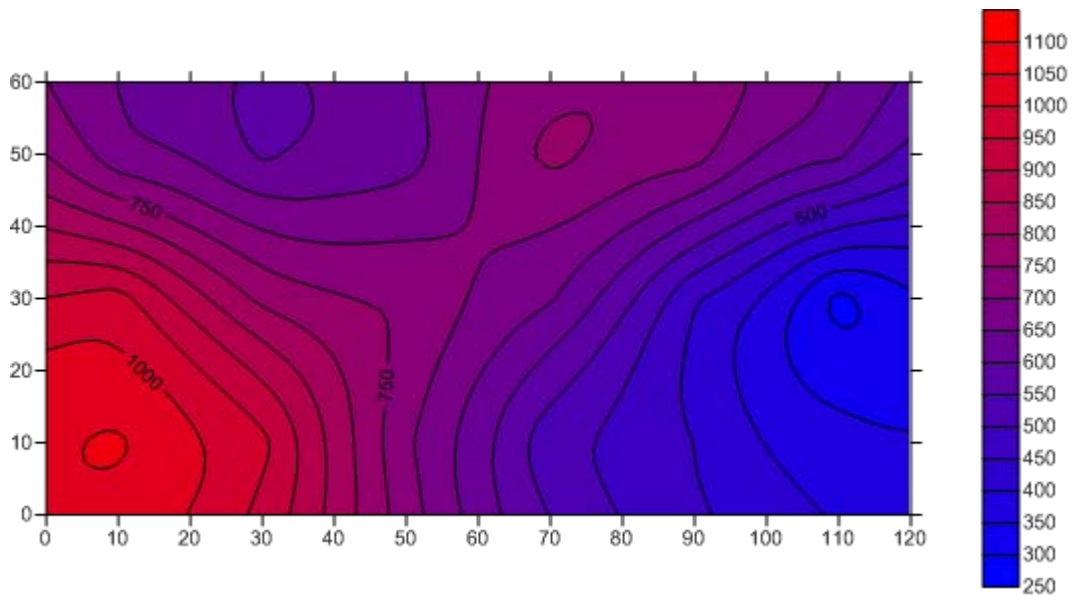


Fig. 7.35: Immagine tomografia della sezione V del pannello D2 non consolidato.

- Pannello D3 non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.28 – Velocità soniche della sezione H del pannello D3 restituite dal software TomoGrafia.

539	423	400	378	391	500
614	450	394	381	466	728
348	448	398	410	462	452

Tabella 7.29 – Velocità soniche della sezione V del pannello D3 restituite dal software TomoGrafia.

1714	1015	575	489	611	672
2780	1111	670	630	612	638
1264	972	694	589	661	671

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata omogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità contenuti nell'intervallo 380÷450 m/s. Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un graduale aumento delle velocità nel passaggio dalla zona superiore a quella inferiore (circa 6500÷1150 m/s). L'improvviso incremento della

consistenza in corrispondenza della fascia sottostante potrebbe essere connesso alla presenza di un elemento resistente interno conservatosi in migliori condizioni o all'effetto di una singolarità.

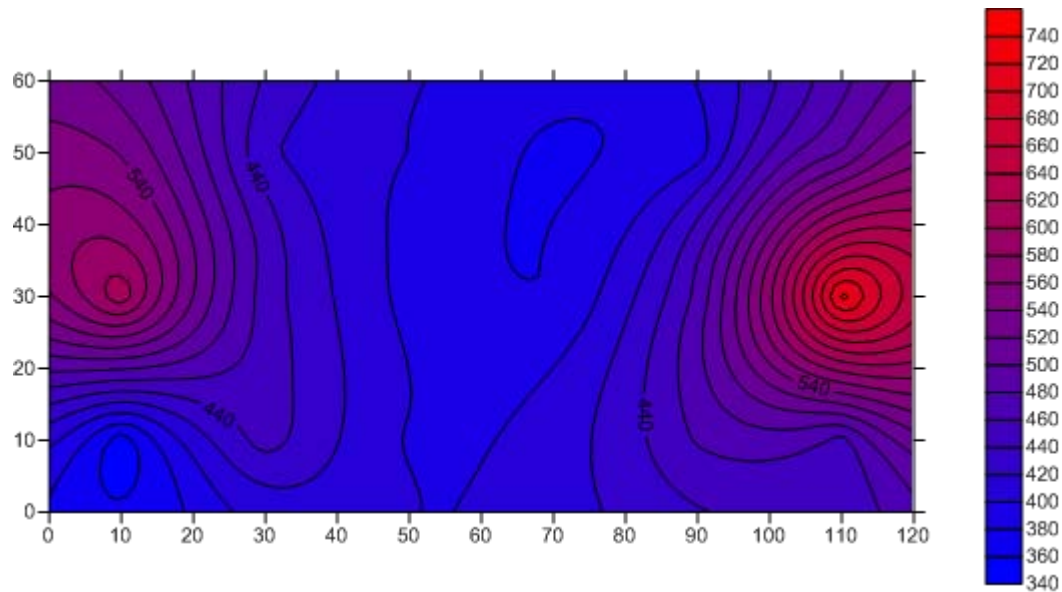


Fig. 7.36: Immagine tomografia della seziona H del pannello D3 non consolidato.

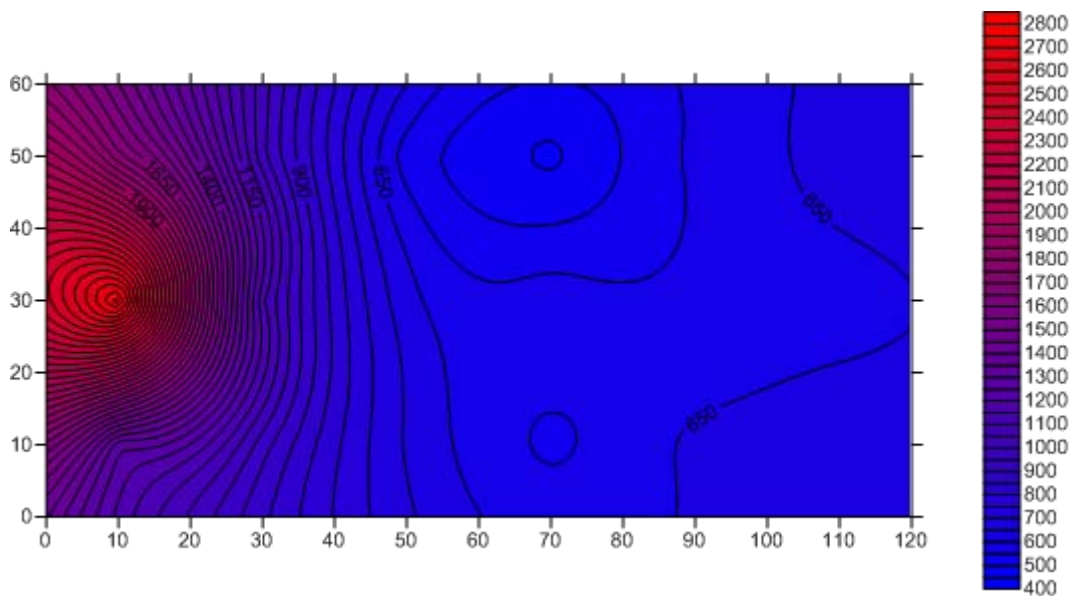


Fig. 7.37: Immagine tomografia della seziona V del pannello D3 non consolidato.

Tutte le sezioni indagate hanno evidenziato la presenza di morfologie interne tra loro molto simili, caratterizzate da velocità soniche nettamente inferiori ai valori ottimali e riconducibili a murature fortemente danneggiate. In relazione a

tali considerazioni e al fine del miglioramento delle condizioni complessive dell'opera, sono apparsi necessari il progetto e l'esecuzione di interventi di consolidamento murario.

L'esecuzione delle operazioni di rinforzo è stata preliminarmente eseguita sui pannelli D2 e D3 ed ha consentito di valutare la reale efficacia di una nuova tipologia di miscela consolidante prodotta dall'azienda Kerakoll S.p.a..

- Pannello D2 consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.30 – Velocità soniche della sezione H del pannello D2 restituite dal software TomoGrafia.

1610	1751	1649	1384	1220	1129
1237	1493	1599	1520	1364	950
1285	1341	1418	1591	1608	1543

Tabella 7.31 – Velocità soniche della sezione V del pannello D2 restituite dal software TomoGrafia.

1866	1716	1740	1613	1425	1358
1845	1814	1812	1619	1267	924
1688	1916	1808	1565	1342	1282

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata disomogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità prossimi ai 1300 m/s in corrispondenza dei vertici destro alto e sinistro basso e migliori condizioni di consolidamento in prossimità dei due restanti spigoli (circa 1500÷1700 m/s). In generale i maggiori incrementi percentuali delle velocità sono stati osservati nelle zone caratterizzate da un peggior stato di conservazione iniziale. Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un graduale aumento delle velocità nel passaggio dalla zona superiore a quella inferiore (circa 1150÷1800 m/s). In questo caso però, a differenza dell'analisi precedente e di molti altri casi studio disponibili in letteratura, i miglioramenti più consistenti sono stati riscontrati nelle porzioni di muratura inizialmente meno danneggiate.

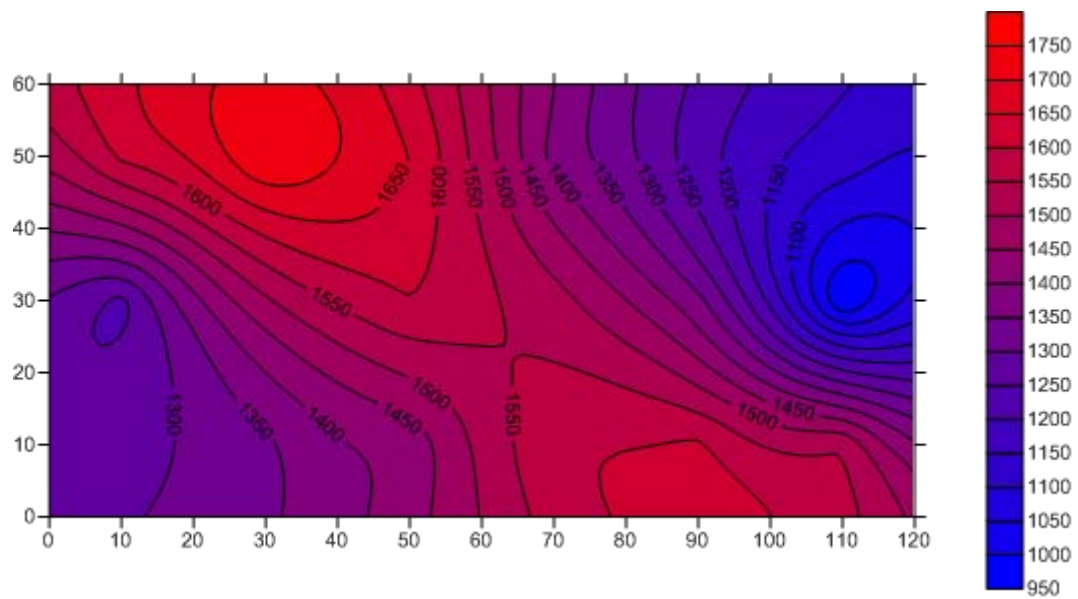


Fig. 7.38: Immagine tomografia della sezione H del pannello D2 consolidato.

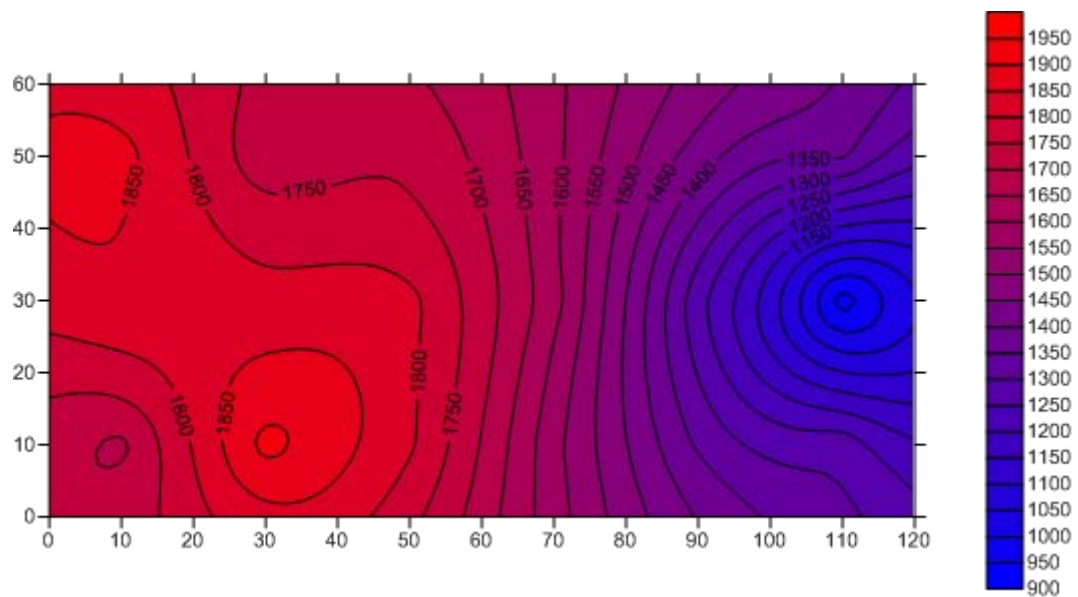


Fig. 7.39: Immagine tomografia della sezione V del pannello D2 consolidato.

- Pannello D3 consolidato, sezioni H e V:

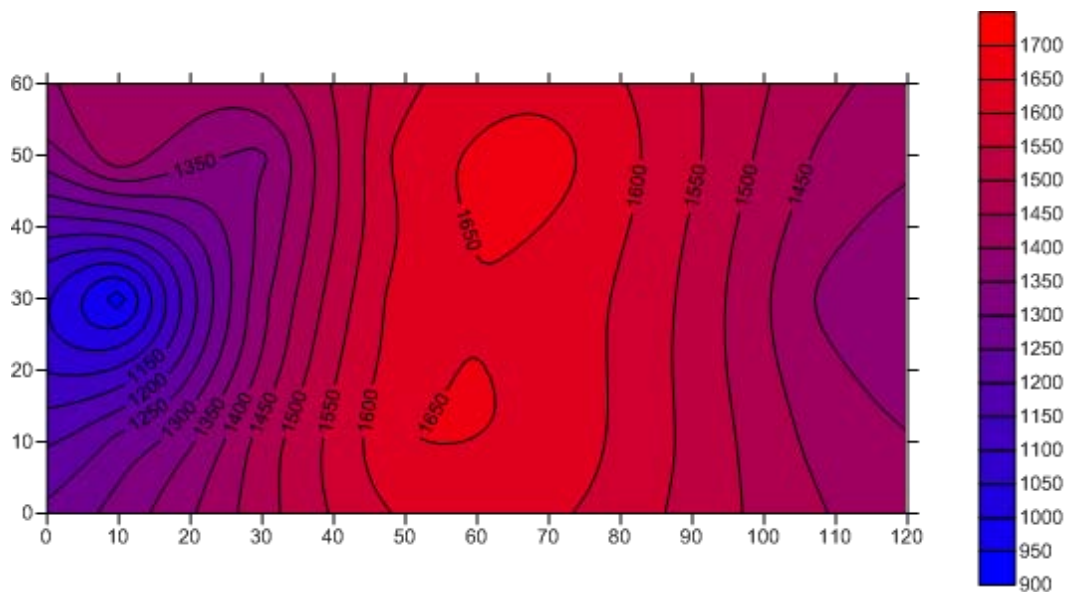
Tabella 7.32 – Velocità sonore della sezione H del pannello D3 restituite dal software TomoGrafia.

1443	1341	1625	1669	1559	1431
923	1387	1627	1627	1534	1376
1267	1473	1648	1636	1537	1426

Tabella 7.33 – Velocità soniche della sezione V del pannello D₃ restituite dal software TomoGrafia.

2740	2448	1954	1704	1739	1504
3385	2684	2017	1758	1627	1376
2535	2404	1965	1811	1719	1589

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è nuovamente riscontrabile una generalizzata omogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità contenuti nell'intervallo 1150÷1650 m/s. In generale i maggiori incrementi percentuali delle velocità sono stati osservati nelle zone caratterizzate da un peggior stato di conservazione iniziale (fascia centrale). Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un graduale aumento delle velocità nel passaggio dalla zona superiore a quella inferiore (circa 1500÷2500 m/s). Anche in questo caso però, a differenza dell'analisi precedente e di molte altre indagini disponibili in letteratura, i miglioramenti più consistenti sono stati riscontrati nelle porzioni di muratura inizialmente meno danneggiate. Le improvvise variazioni della consistenza osservabili in entrambe le immagini potrebbero invece essere ricondotti all'effetto di alcune singolarità.

Fig. 7.40: Immagine tomografia della seziona H del pannello D₃ consolidato.

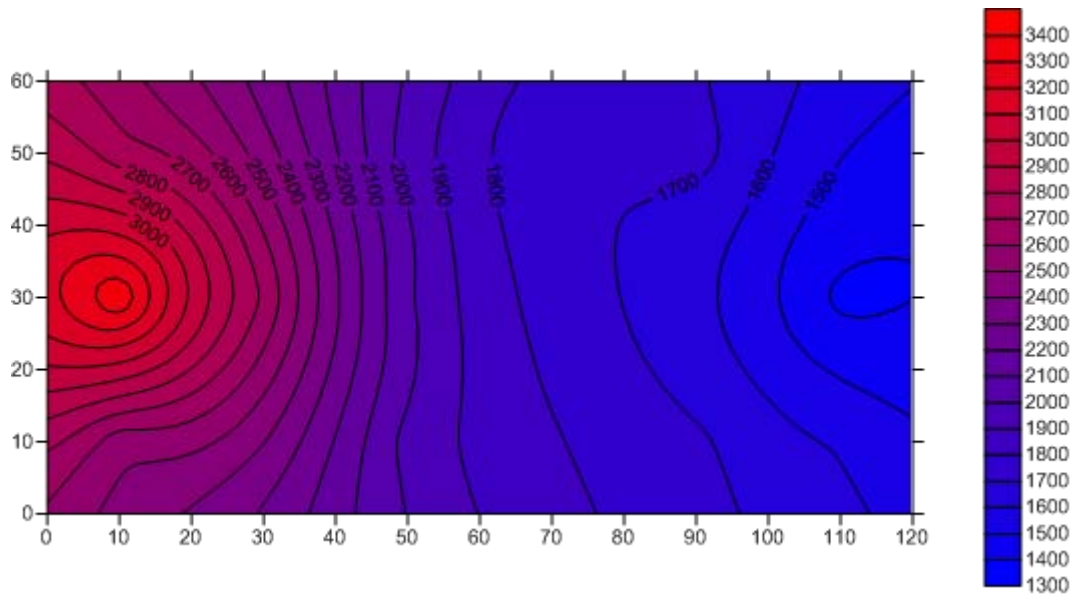


Fig. 7.41: Immagine tomografia della seziona V del pannello D3 consolidato.

In relazione alla modalità di diffusione delle miscele all'interno dei pannelli iniettati e al confronto tra le analisi eseguite nelle fasi precedente e successiva all'intervento di consolidamento, è possibile affermare che le operazioni di rinforzo eseguite non sono risultate soddisfacenti in quanto gli incrementi di consistenza ottenuti non sono stati consoni con i valori attesi dai progettisti.

7.3.3.2 SOFTWARE TOMOGRAFIANEW

A differenza delle analisi precedenti, per l'elaborazione dei dati eseguita con il nuovo software è stato possibile definire due particolari maglie di discretizzazione perfettamente coincidenti con lo spessore delle murature testate. Nello specifico è stato scelto un passo pari a 19 cm per i pannelli D1 e D2 e uguale a 17 cm per il campione D3 caratterizzato da una spessore inferiore. In entrambi i casi tali valori hanno consentito di ottenere una griglia di 3x6 pixel quadrati, a scapito però di una minore copertura dimensionale della sezione (114 e 102 cm invece di 120 cm).

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori dei parametri risultanti al termine delle analisi tomografiche e le velocità dei pixel relative alle sei elaborazioni eseguite nella fase precedente agli interventi di consolidamento murario. Sulla base di queste e dei dati geometrici delle sezioni, i software

TomoGrafiaNew e Surfer hanno consentito di ricostruire le diverse immagini tomografiche.

- Pannello D₁ non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.34 – Parametri iniziali e finali relativi alle elaborazioni H e V eseguite sul pannello D₁.

	H	V
Numero di pixel	18	18
Numero di percorsi	36	36
Numero di punti di trasmissione-ricezione	12	12
Numero massimo di iterazioni	1000	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	581	642
ϵ risultante	0	0

Tabella 7.35 – Velocità soniche della sezione H del pannello D₁ restituite dal nuovo software.

340	407	780	567	790	1411
340	340	651	347	2854	340
340	340	340	965	340	340

Tabella 7.36 – Velocità soniche della sezione V del pannello D₁ restituite dal nuovo software.

3500	340	1254	486	625	734
372	340	443	340	340	340
340	340	1660	340	1265	1189

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare un graduale ma contenuto aumento delle velocità nel passaggio dalla zona sinistra a quella destra della sezione (circa 400÷800 m/s). L'improvvisa variazione della consistenza osservabile nella parte centrale dell'immagine potrebbe invece essere ricondotta all'effetto di una singolarità. Nella mappa verticale è invece riscontrabile una generalizzata omogeneità della consistenza

interna della sezione, con valori stimabili in un intervallo compreso tra 400 e 800 m/s. Le variazioni delle velocità in prossimità dei lati più lunghi dell'immagine potrebbero essere dovuti al miglior grado di conservazione dei paramenti esterni rispetto al nucleo interno della parete testata o alla scelta di alcuni punti di trasmissione-ricezione posti in corrispondenza di elementi resistenti particolarmente rigidi. Anche in questo secondo caso l'aumento della consistenza osservabile nell'angolo superiore sinistro dell'immagine potrebbe essere ricondotto all'effetto di una singolarità.

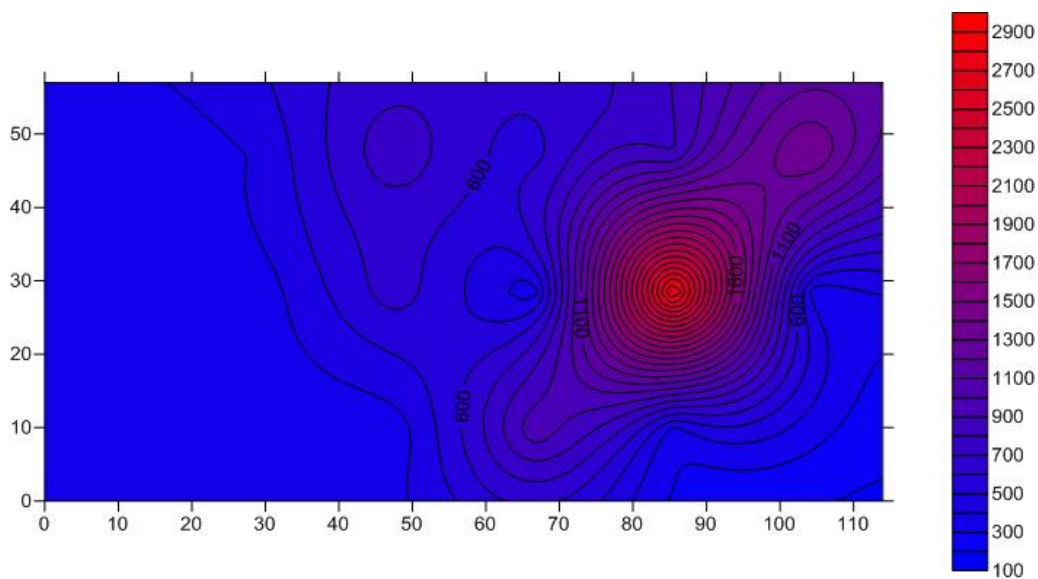


Fig. 7.41: Immagine tomografia della sezione H del pannello D1 non consolidato.

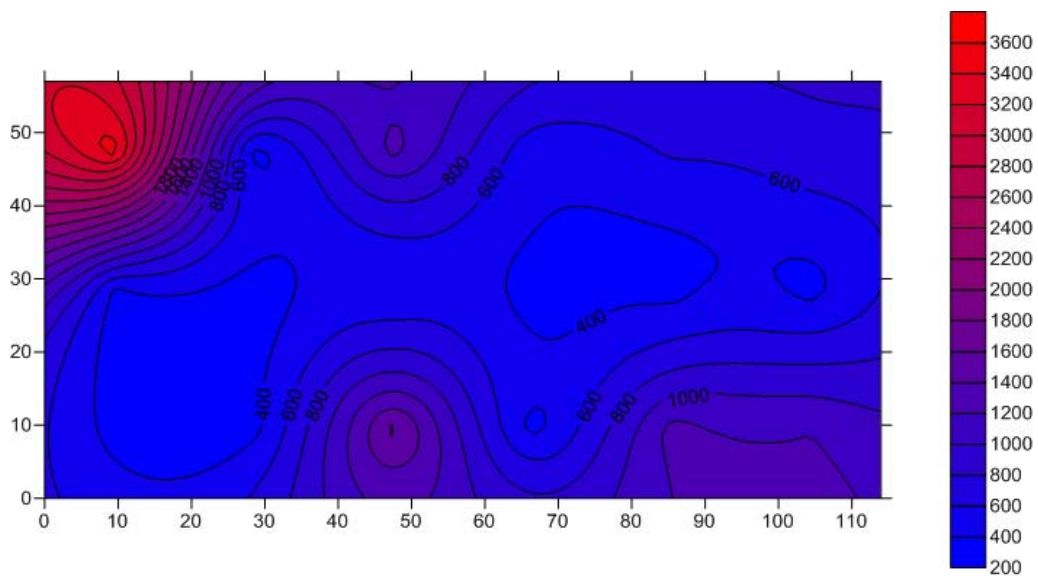


Fig. 7.42: Immagine tomografia della sezione V del pannello D1 non consolidato.

- Pannello D2 non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.37 – Parametri iniziali e finali relativi alle elaborazioni H e V eseguite sul pannello D2.

	H	V
Numero di pixel	18	18
Numero di percorsi	36	36
Numero di punti di trasmissione-ricezione	12	12
Numero massimo di iterazioni	1000	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	610	506
ϵ risultante	0	0

Tabella 7.38 – Velocità soniche della sezione H del pannello D2 restituite dal nuovo software.

343	340	1683	340	340	3500
703	3500	340	348	340	340
340	340	619	340	340	2293

Tabella 7.39 – Velocità soniche della sezione V del pannello D2 restituite dal nuovo software.

407	604	398	542	3500	3500
340	340	3500	741	340	340
340	340	348	440	572	340

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata omogeneità della consistenza interna della sezione, con valori stimabili in un intervallo compreso tra 300 e 700 m/s.

Anche nella mappa verticale è possibile individuare una distribuzione delle velocità molto simile a quella del caso orizzontale, con valori stimabili all'interno dello stesso range di variazione.

È inoltre ipotizzabile che le improvvise variazioni di consistenza osservabili in entrambe le immagini siano dovute all'effetto di una singolarità o alla modalità di elaborazione dei dati implementata nell'algoritmo di risoluzione.

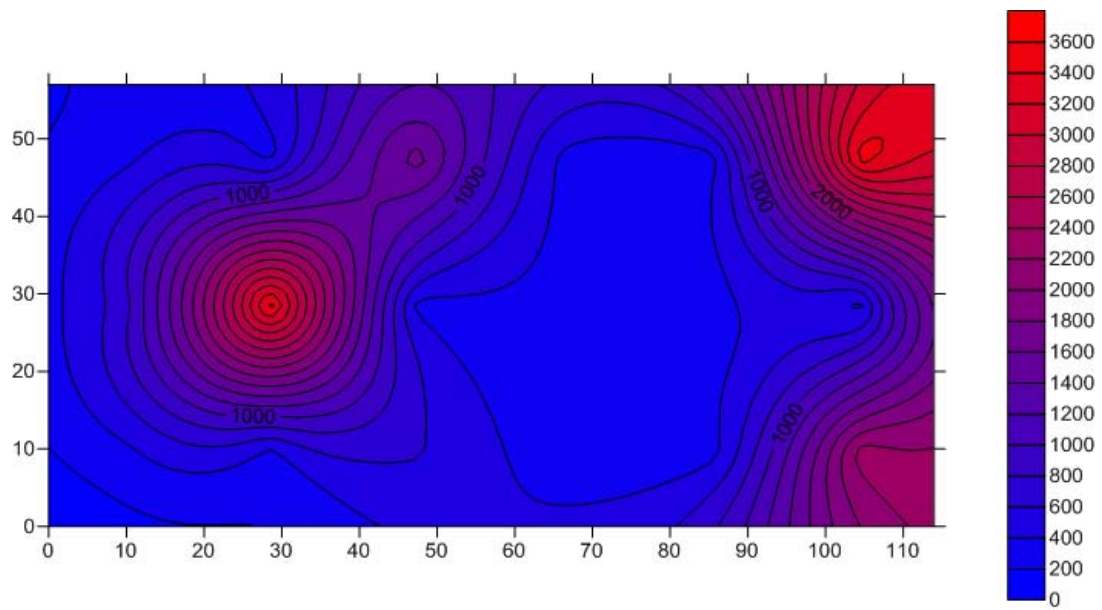


Fig. 7.43: Immagine tomografia della seziona H del pannello D2 non consolidato.

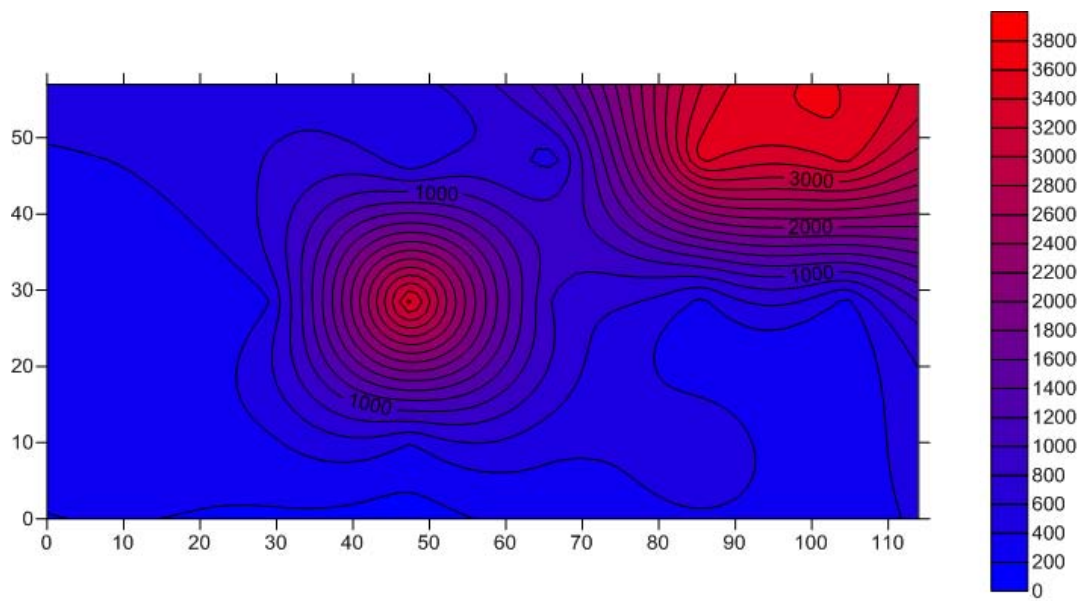


Fig. 7.44: Immagine tomografia della seziona V del pannello D2 non consolidato.

- Pannello D₃ non consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.40 – Parametri iniziali e finali relativi alle elaborazioni H e V eseguite sul pannello D₃.

	H	V
Numero di pixel	18	18
Numero di percorsi	36	36
Numero di punti di trasmissione-ricezione	12	12
Numero massimo di iterazioni	5000	2000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	3125	1939
ϵ risultante	0	0

Tabella 7.41 – Velocità soniche della sezione H del pannello D₃ restituite dal nuovo software.

3281	460	362	480	358	767
340	340	520	340	340	1314
340	2332	340	628	873	340

Tabella 7.42 – Velocità soniche della sezione V del pannello D₃ restituite dal nuovo software.

561	1928	340	340	594	340
470	340	496	757	340	340
340	340	340	885	340	340

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata omogeneità della consistenza interna della sezione, con valori stimabili in un intervallo compreso tra 300 e 800 m/s.

Anche nella mappa verticale è possibile individuare una distribuzione delle velocità molto simile a quella del caso orizzontale, con valori stimabili all'interno dello stesso range di variazione.

Rispetto ai casi precedenti, è importante notare l'assenza di pixel caratterizzati da velocità eccessivamente diverse rispetto alla tipologia di distribuzione riscontrata per le sezioni. È possibile ipotizzare che tale effetto

benefico sia legato alla dimensione della maglia di elaborazione e alla conseguente diminuzione della lunghezza massima di parete indagata.

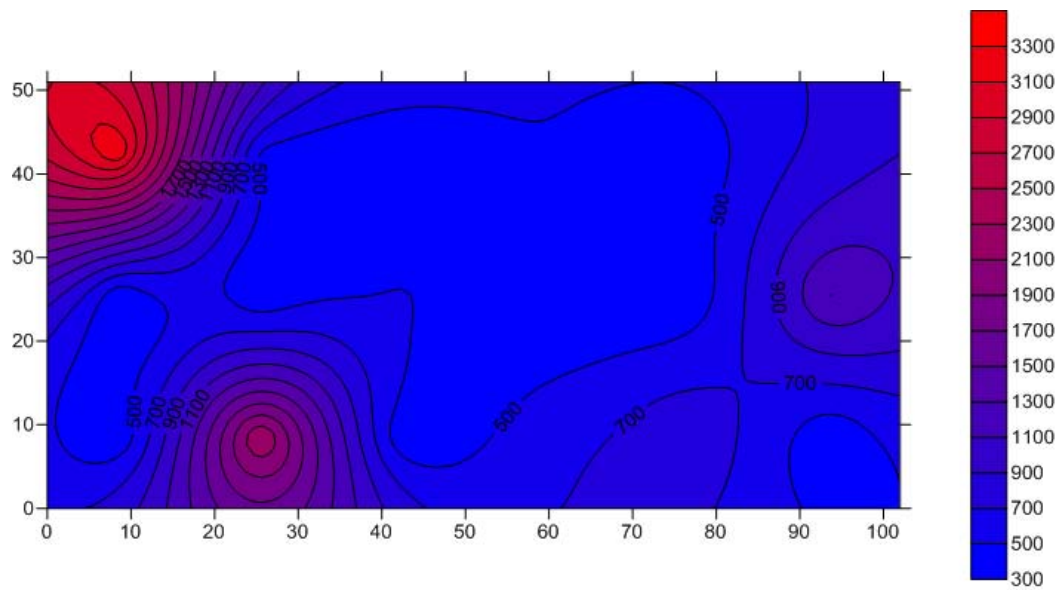


Fig. 7.45: Immagine tomografia della seziona H del pannello D3 non consolidato.

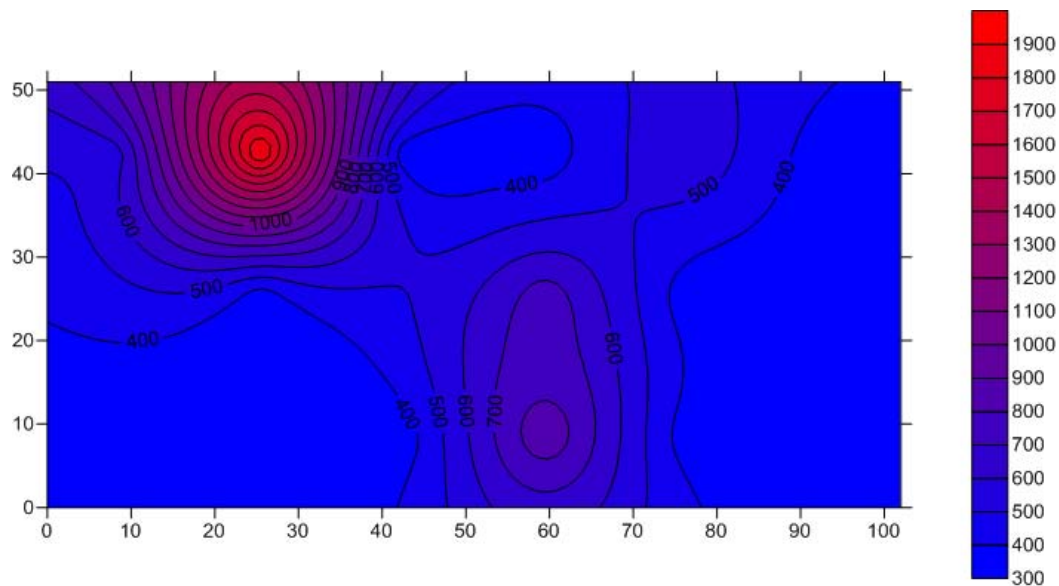


Fig. 7.46: Immagine tomografia della seziona V del pannello D3 non consolidato.

Tutte le sezioni indagate hanno evidenziato la presenza di morfologie interne tra loro molto simili, caratterizzate da velocità soniche nettamente inferiori ai valori ottimali e riconducibili a murature fortemente danneggiate. In relazione a tali considerazioni e al fine del miglioramento delle condizioni compressive

dell'opera, sono apparsi necessari il progetto e l'esecuzione di interventi di consolidamento murario.

Nelle seguenti pagine sono riportati, in successione, i valori delle velocità dei pixel e le immagini tomografiche relativi alle quattro elaborazioni eseguite sui pannelli D2 e D3 nella fase successiva agli interventi di consolidamento murario.

- Pannello D2 consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.43 - Parametri iniziali e finali relativi alle elaborazioni H e V eseguite sul pannello D2.

	H	V
Numero di pixel	18	18
Numero di percorsi	36	36
Numero di punti di trasmissione-ricezione	12	12
Numero massimo di iterazioni	1000	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	528	421
ϵ risultante	0	0

Tabella 7.44 - Velocità soniche della sezione H del pannello D2 restituite dal nuovo software.

2105	3500	1292	1739	734	943
1027	1247	3500	1167	3500	549
1128	1272	981	2543	1371	2735

Tabella 7.45 - Velocità soniche della sezione V del pannello D2 restituite dal nuovo software.

2711	1948	1797	1308	1077	2026
2702	1265	3410	3168	1206	643
1226	3500	1800	1450	943	1301

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata disomogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità stimabili all'interno dell'ampio intervallo 1100÷2700 m/s. In generale è

osservabile un incremento percentuale delle velocità abbastanza diffuso in tutte le zone della sezione, sia in quelle fortemente danneggiate che in quelle meglio conservate.

Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un brusco aumento delle velocità nel passaggio dalla zona superiore a quella inferiore (da 1200 a 2400 m/s). Risulta abbastanza complessa la formulazione di ipotesi in merito alle cause di un comportamento così eterogeneo.

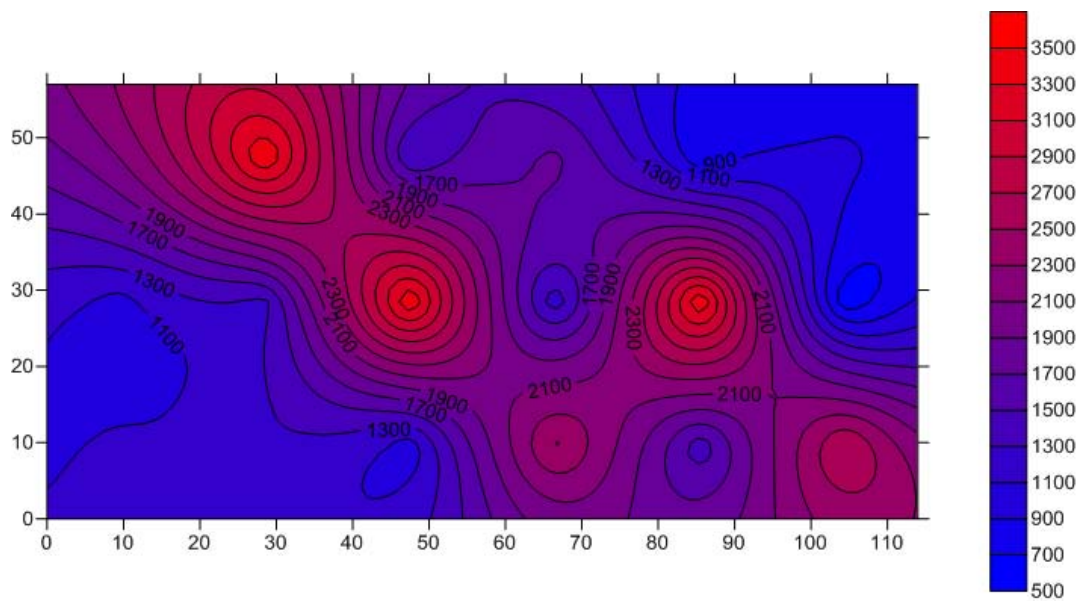


Fig. 7.47: Immagine tomografia della sezione H del pannello D2 consolidato.

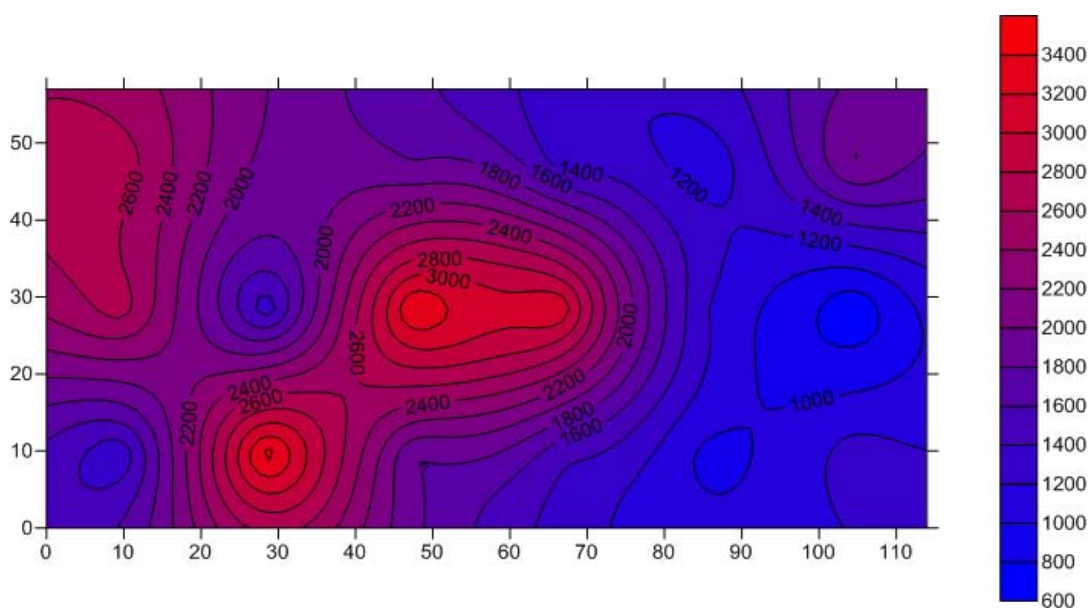


Fig. 7.48: Immagine tomografia della sezione V del pannello D2 consolidato.

- Pannello D₃ consolidato, sezioni H e V:

Tabella 7.46 – Parametri iniziali e finali relativi alle elaborazioni H e V eseguite sul pannello D₁.

	H	V
Numero di pixel	18	18
Numero di percorsi	36	36
Numero di punti di trasmissione-ricezione	12	12
Numero massimo di iterazioni	5000	5000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	2115	2562
ϵ risultante	0	0

Tabella 7.47 – Velocità soniche della sezione H del pannello D₃ restituite dal nuovo software.

1093	473	1728	1064	1473	670
991	340	1987	2566	1169	3500
1086	1122	3468	2691	2896	1608

Tabella 7.48 – Velocità soniche della sezione V del pannello D₃ restituite dal nuovo software.

340	3500	2048	975	3500	760
1375	2462	1448	2359	1364	3500
3500	3500	2382	1188	2172	969

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di media qualità e discreto stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è riscontrabile una generalizzata disomogeneità delle condizioni interne, con valori di velocità stimabili all'interno dell'ampio intervallo 900÷2900 m/s. In generale è osservabile un aumento delle velocità abbastanza diffuso in quasi tutte le zone della sezione, ad eccezione di una piccola porzione posta in prossimità del lato sinistro dell'immagine.

Nell'immagine verticale è invece possibile osservare un miglioramento disomogeneo ma generalizzato della consistenza, con valori di velocità stimabili nell'intervallo 1800÷2400 m/s. L'incremento percentuale minore è stato osservato

in corrispondenza di una porzione di muratura caratterizzata da migliori condizioni iniziali.

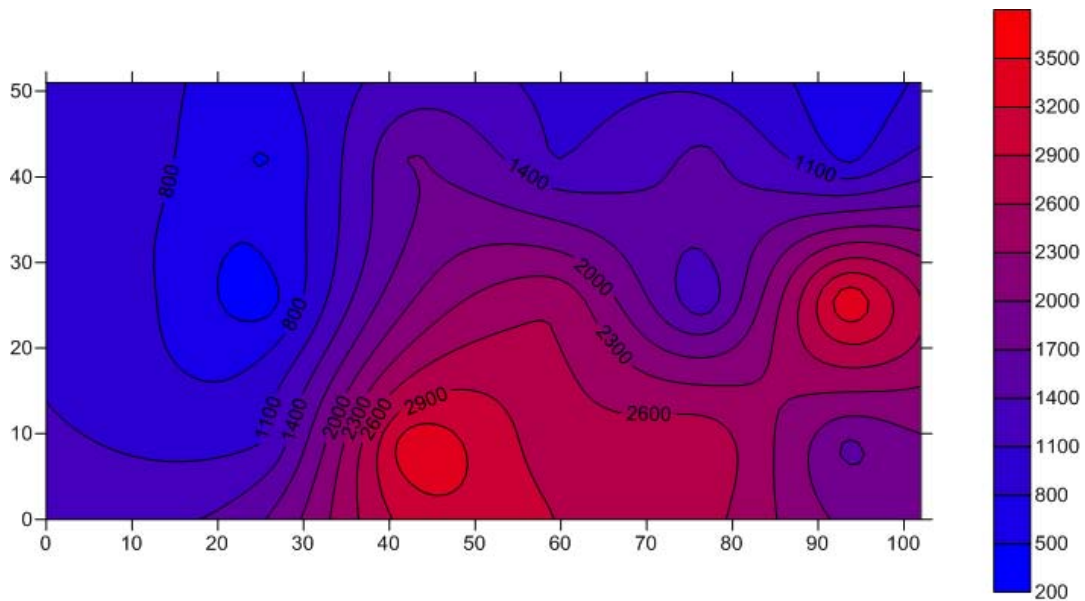


Fig. 7.49: Immagine tomografia della sezione H del pannello D3 consolidato.

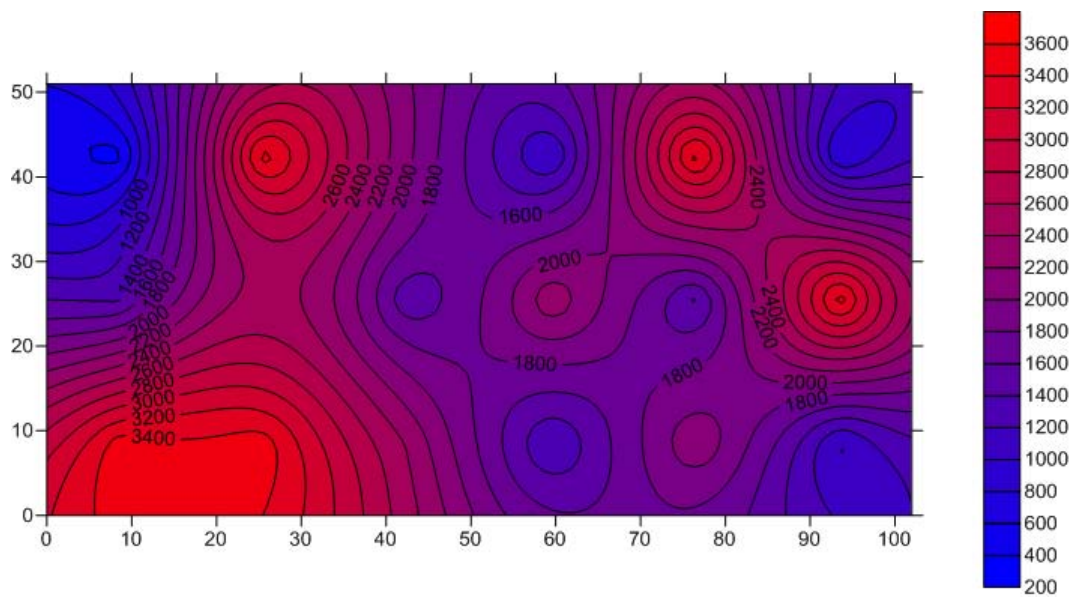


Fig. 7.50: Immagine tomografia della sezione V del pannello D3 consolidato.

7.3.3.3 CONFRONTO TRA SOFTWARE

Ad un prima superficiale analisi è possibile affermare che entrambi i software sembrano aver funzionato correttamente in quanto le distribuzioni di velocità ottenute sono risultate concordi con le iniziali ipotesi relative allo stato di

conservazione delle murature indagate. Ciononostante sono apparse evidenti le differenze presenti nelle diverse immagini tomografiche, sia dal punto di vista dei valori numerici che da quello della morfologia interna. Tali variazioni potrebbero essere dovute alla tipologia di algoritmo di risoluzione implementato nei due software o alla scelta di differenti maglie di discretizzazione, coincidenti o meno con l'effettivo perimetro esterno dei pannelli.

Vengono di seguito riportati i confronti tra gli andamenti delle velocità calcolati con i due diversi software. In azzurro sono indicati i limiti degli intervalli relativi ai tre diversi livelli di qualità della muratura individuati da Berra M. et al. nel 1992 (vedi Paragrafo 3.2).

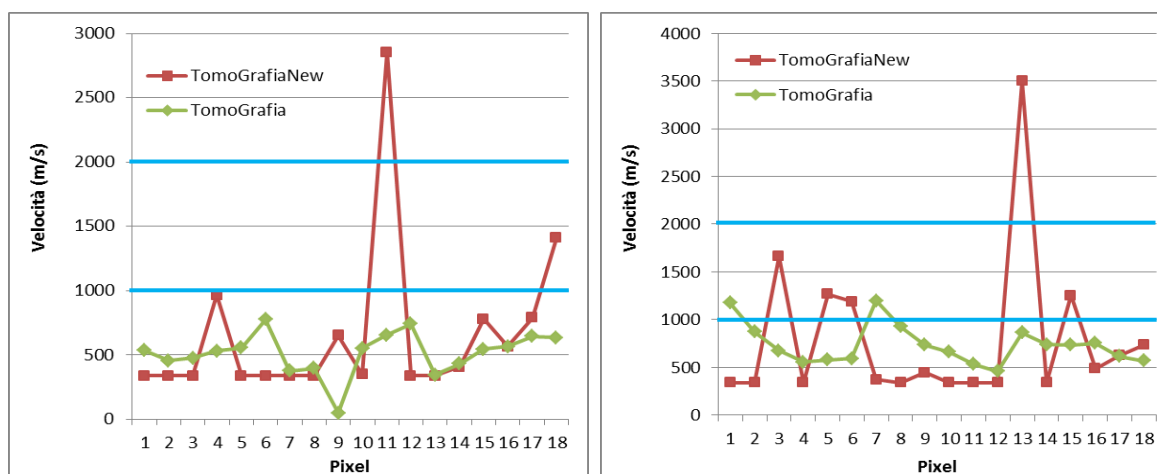


Fig. 7.51: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con i due software. Tomografie D1H (sinistra) e D1V (destra) nella fase precedente all'intervento di consolidamento.

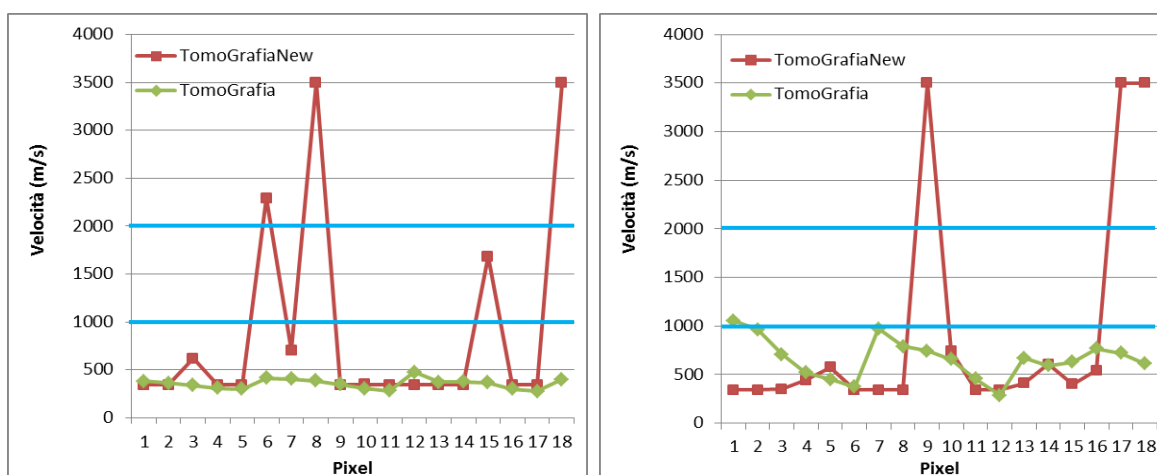


Fig. 7.52: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con i due software. Tomografie D2H (sinistra) e D2V (destra) nella fase precedente all'intervento di consolidamento.

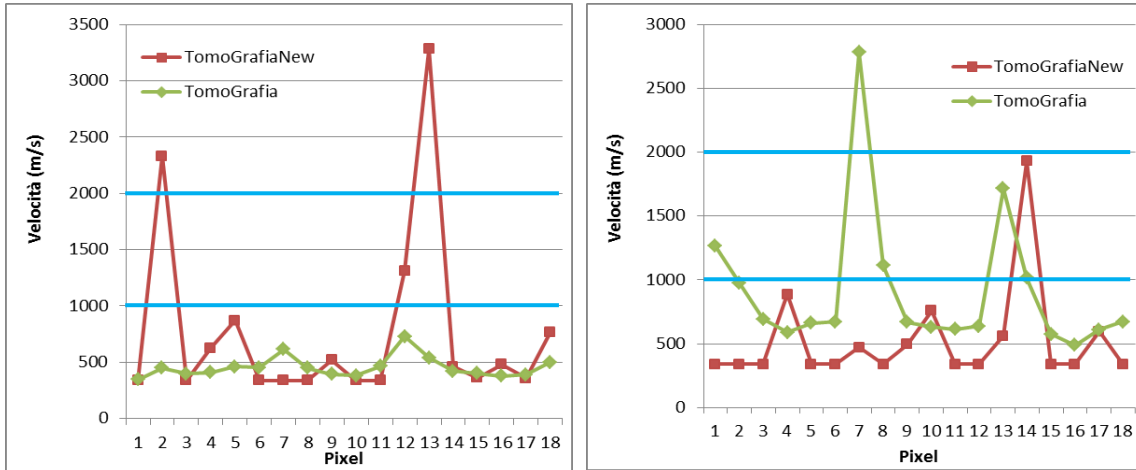


Fig. 7.53: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con i due software. Tomografie D3H (sinistra) e D3V (destra) nella fase precedente all'intervento di consolidamento.

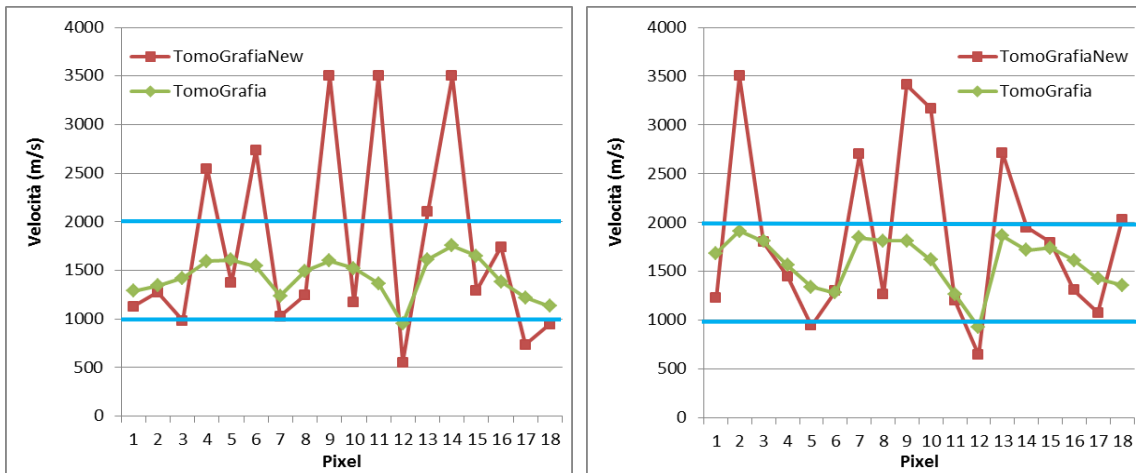


Fig. 7.54: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con i due software. Tomografie D2H (sinistra) e D2V (destra) nella fase successiva all'intervento di consolidamento.

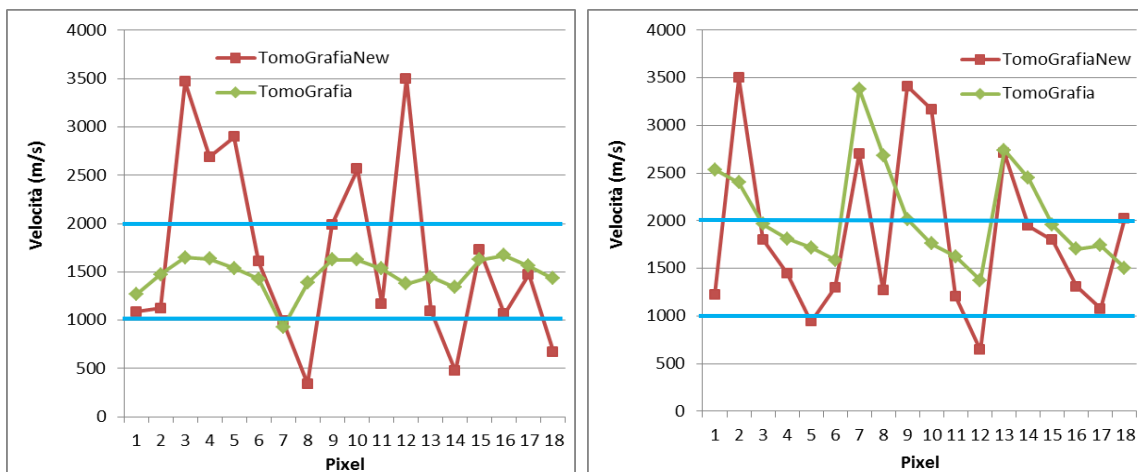


Fig. 7.55: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con i due software. Tomografie D3H (sinistra) e D3V (destra) nella fase successiva all'intervento di consolidamento.

In linea generale, nelle analisi precedenti all'esecuzione degli interventi di consolidamento, le distribuzioni di velocità restituite dai due software hanno evidenziato andamenti simili solo a tratti e con valori numericamente differenti tra loro ma comunque ascrivibili nello stesso intervallo di qualità muraria, quello caratteristico di pareti fortemente danneggiate o malamente conservate. Come già accennato nei paragrafi precedenti, la presenza di alcuni improvvisi picchi di velocità può essere ricondotta all'esistenza di alcune singolarità o alla modalità di calcolo dei dati implementata nel software TomoGrafiaNew.

Dallo studio dei risultati delle elaborazioni eseguite nella fase successiva agli interventi di consolidamento sono invece apparse indicazioni differenti. Gli andamenti complessivi sono risultati essere molto simili tra loro ma, mentre i valori calcolati con la vecchia metodologia sono risultati essere abbastanza costanti e relativamente bassi, nel caso del nuovo software le velocità ottenute hanno raggiunto valori anche molto elevati e compresi in un intervallo nettamente più ampio.

Allo stato attuale non risulta possibile definire quale dei due programmi risulti essere più adatto per questa tipologia di indagine. È pertanto necessario favorire il più ampio confronto tra le due tecniche di risoluzione al fine di valutarne vantaggi, svantaggi e possibili miglioramenti.

7.4 PROVA TOMOGRAFICA PER LA VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELLA MAGLIA DI DISCRETIZZAZIONE SUI RISULTATI FINALI

Il quarto test di funzionamento effettuato sul nuovo software di elaborazione è stato utile sia per verificare ulteriormente la validità degli algoritmi di risoluzione che per testare l'influenza sul risultato finale di due importanti parametri geometrici: il passo di disposizione dei punti di misura e la dimensione dei pixel di discretizzazione.

I dati utilizzati all'interno di questa prova sono relativi alla campagna di indagine svolta dall'Università di Padova in collaborazione con il Politecnico di Milano e descritta all'interno dei Paragrafi 4.12 e 4.13. Nello specifico le analisi

fanno riferimento ai test tomografici sonici e georadar eseguiti sul pannello A4 iniettato e fessurato a seguito di una prova di compressione diagonale.

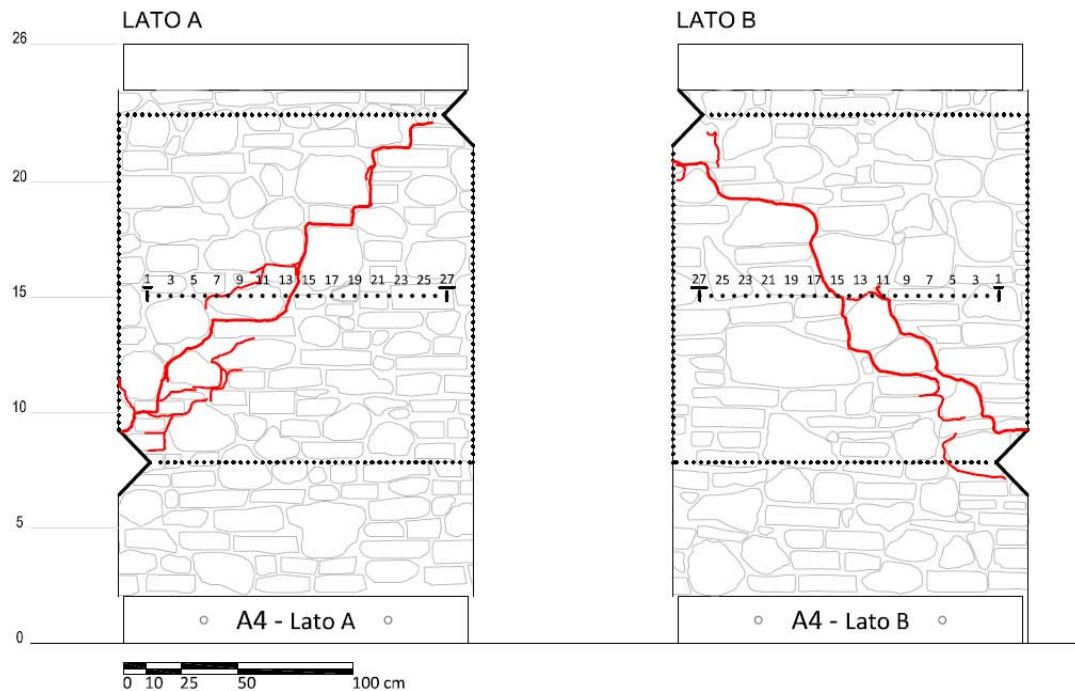


Fig. 7.56: Prospetto della disposizione dei punti di acquisizione. In rosso le fessurazioni conseguenti all'esecuzione della prova di compressione diagonale (Zanchetta, 2013).

7.4.1 ESECUZIONE DELLA PROVA

L'indagine sonica su schema tomografico è stata eseguita il giorno 10 ottobre 2012 all'interno del Laboratorio di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova ed ha coinvolto complessivamente quattro operatori: due addetti al sostegno degli accelerometri, uno alla generazione dei segnali tramite la battitura col martello e uno dedicato all'acquisizione dei tempi di volo.

La prova, eseguita ad una quota di 1,50 m dal piano del terreno, è stata realizzata collocando 27 punti di trasmissione-ricezione lungo ognuna delle due facce dei pannelli e utilizzando una griglia di campionamento con passo costante di 5 cm. Tale disposizione ha consentito di acquisire una quantità di misure nettamente maggiore rispetto ai casi generalmente studiati (729, suddivise tra 7 letture) e di coprire in maniera uniforme l'intera area indagata.

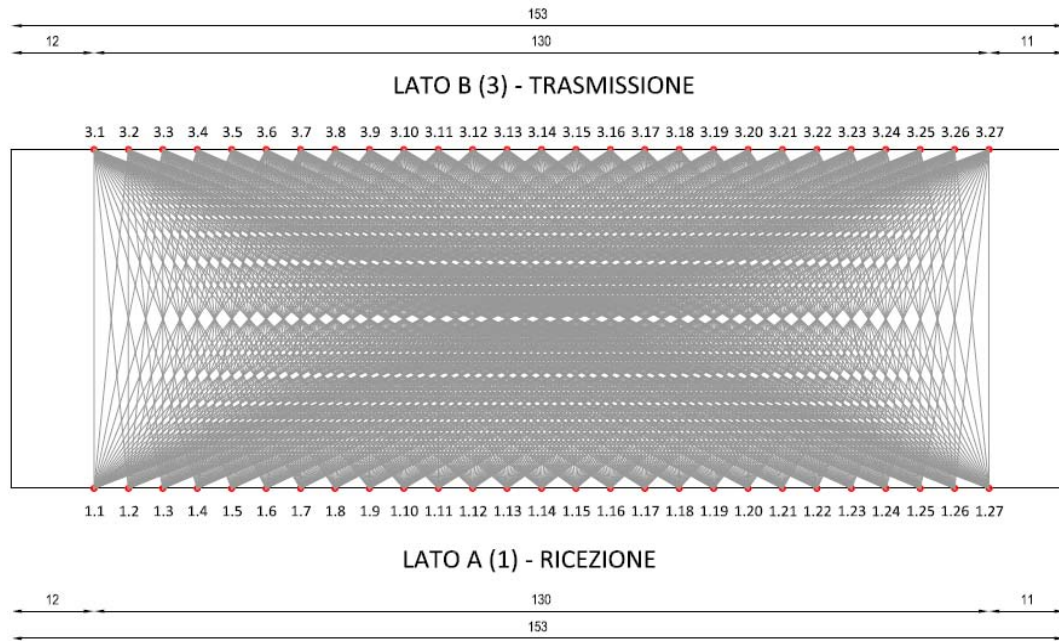


Fig. 7.57: Schema delle misurazioni soniche eseguite (Zanchetta, 2013).



Fig. 7.58: Alcune fasi di esecuzione della prova tomografica (Zanchetta, 2013).

7.4.2 ELABORAZIONE DEI DATI

7.4.2.1 SOFTWARE TOMOGRAFIA

Nella fase di elaborazione dei dati, le misurazioni relative ai punti più esterni della sezione (1.1, 1.2, 1.26, 1.27 e omologhi sul lato 3) sono state eliminate al fine di ridurre i rischi di introduzione di errori legati all'eccessiva distanza tra sorgenti e ricevitori. Per l'analisi dei segnali sonici acquisiti durante la campagna di indagine è stata definita una maglia di discretizzazione perfettamente coincidente con lo

spessore della muratura testata. Nello specifico è stato scelto un passo di elaborazione di 5 cm, per un totale di 10 x 23 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 115 cm.

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i valori delle velocità dei pixel calcolati dall'applicazione dell'ing. N. Monteforte, sulla base dei quali il software Surfer ha consentito la ricostruzione dell'immagine tomografica.

Tabelle 7.49a e 7.49b – Velocità soniche della sezione indagata restituite dal software TomoGrafia.

3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14
1909	1763	1811	1986	2053	2085	2096	2104	1908	1999	2235	2366
2382	2037	1895	1876	1983	2042	2142	2088	1916	2086	2073	1907
3075	2547	2253	2041	2023	2016	2006	1996	1994	2035	1792	1581
3285	2991	2746	2496	2285	2163	2040	1954	1889	1738	1597	1556
3333	3204	2952	2810	2595	2394	2190	1951	1744	1630	1552	1542
3211	3258	3192	3036	2712	2432	2116	1918	1691	1566	1567	1583
3194	3233	3180	2869	2457	2155	1985	1877	1744	1629	1607	1627
3137	2957	2657	2362	2190	2016	1926	1863	1933	1858	1728	1656
2602	2315	2183	2082	2154	2081	1926	1951	2028	2084	1910	1631
2055	2084	2057	2149	2232	2237	2010	1925	2093	2125	2086	1835
1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14

3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24	3.25
1924	1780	2193	2243	2133	2241	2205	2212	2208	2077	2082
1579	1733	2007	2259	2270	2189	2190	2190	2176	2274	2615
1562	1705	1919	2092	2177	2151	2239	2353	2588	2974	3355
1599	1669	1794	1931	2156	2372	2571	2840	3211	3410	3475
1603	1676	1779	1936	2202	2545	2886	3182	3359	3411	3500
1587	1691	1832	1928	2136	2496	2895	3112	3260	3419	3500
1641	1690	1812	1940	2118	2302	2508	2724	3097	3323	3431
1642	1757	1929	2073	2077	2064	2126	2256	2522	2857	3255
1637	1897	2088	2165	2114	2075	2053	2061	2144	2261	2518
1857	2144	2177	2150	2065	1939	2002	2028	2032	2055	2068
1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25

La mappa delle velocità risultante ha suffragato quella che si è ipotizzata essere la reale morfologia interna del pannello in seguito all'esecuzione della prova di compressione diagonale: la porzione posta in corrispondenza delle grosse

fessurazioni è infatti risultata essere caratterizzata da velocità inferiori (circa 1500÷1700 m/s) rispetto a quelle delle zone adiacenti (superiori a 2000 m/s). Tuttavia è apparsa complicata la precisa definizione del profilo interno della sezione in quanto, a causa di probabili errori di post-processamento dei dati acquisiti, l'indagine è risultata essere meno dettagliata del previsto.

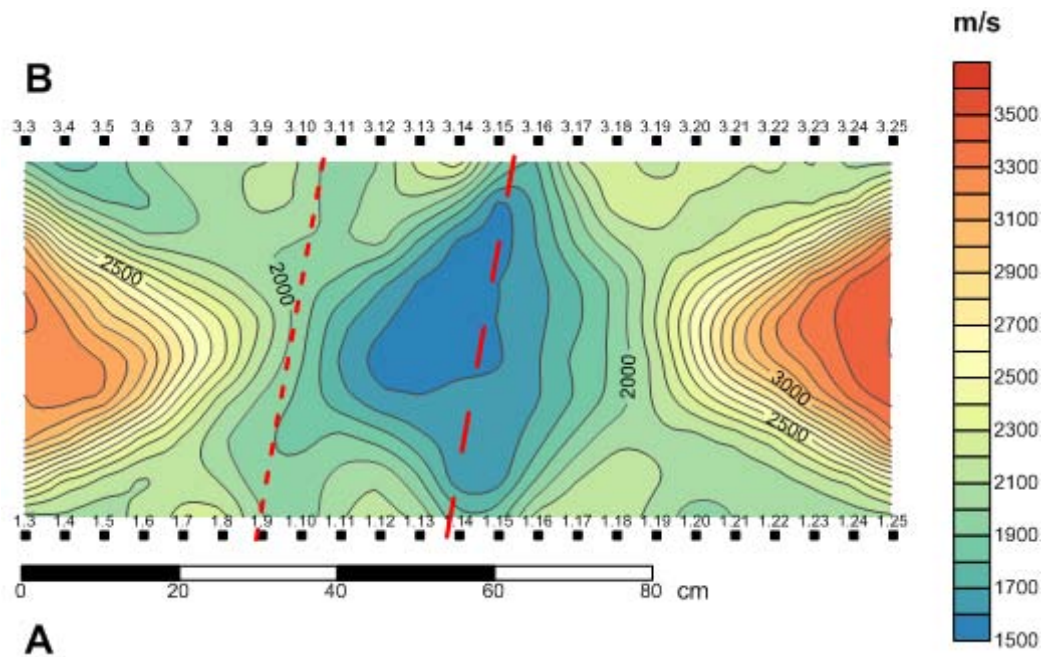


Fig. 7.59: Immagine tomografica restituita dal software TomoGrafia (Zanchetta, 2013).

7.4.2.2 SOFTWARE TOMOGRAFIANEW

A differenza dell'elaborazione precedente e al fine di determinare la relazione esistente tra la dimensione della mesh di discretizzazione e la qualità dei risultati finali, l'analisi dei dati è stata eseguita definendo quattro differenti maglie di elaborazione:

1. Passo di discretizzazione di 5 cm, per un totale di 10 x 23 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 115 cm;
2. Passo di discretizzazione di 10 cm, per un totale di 5 x 12 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 120 cm;
3. Passo di discretizzazione di 12.5 cm, per un totale di 4 x 9 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 112.5 cm;

4. Passo di discretizzazione di 17 cm, per un totale di 3 x 7 pixel ed una copertura complessiva di 51 x 119 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori dei parametri risultanti al termine delle analisi tomografiche e le velocità dei pixel relative alle quattro elaborazioni eseguite impostando i diversi passi di discretizzazione. Sulla base di queste e dei dati geometrici delle sezioni, il software Surfer ha consentito di ricostruire le diverse immagini tomografiche.

- Passo di discretizzazione 5 cm:

Tabella 7.50 - Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 5 cm.

Numero di pixel	230
Numero di percorsi	529
Numero di punti di trasmissione-ricezione	46
Numero massimo di iterazioni	20000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	14478
ϵ risultante	0

Tabelle 7.51a e 7.51b - Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 5 cm.

3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14
340	1424	835	701	874	1894	524	834	462	1446	340	340
340	438	340	566	3500	724	3500	2955	340	340	340	340
340	340	364	3500	841	3500	340	340	3500	340	959	455
340	391	340	340	340	340	340	3216	3500	578	619	2204
340	340	340	340	340	340	340	3500	1105	3500	2126	883
340	340	340	3500	340	735	585	530	737	758	1691	2155
340	340	340	340	1011	340	1183	3500	594	1353	816	1111
340	340	3500	340	340	1079	340	757	340	527	607	1170
340	340	1189	799	340	340	380	340	854	340	3500	646
556	1736	340	1266	906	340	340	1671	340	340	340	340
1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14

3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24	3.25
340	973	340	623	925	934	956	340	1239	403	3500
340	340	3127	340	1460	340	1447	340	340	340	478
340	688	340	3326	340	2004	340	952	340	475	340
461	3374	604	2534	616	340	1198	340	340	340	340
3500	918	1378	566	1303	444	340	340	340	340	340
784	1696	3500	3500	3002	340	340	340	340	340	340
1855	1556	3500	1868	340	978	340	1938	340	340	340
820	1947	3500	340	989	3500	340	340	340	444	340
954	1457	340	1696	340	340	2327	1525	424	340	3500
340	340	787	941	458	340	410	340	399	684	340
1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25

La mappa delle velocità generatasi al termine dell'analisi è risultata essere completamente diversa da quella ottenuta con il software dell'ing. N. Monteforte. Supponendo valida l'ipotesi secondo cui il danno dovrebbe essere concentrato in prossimità delle fessurazioni diagonali visibili in prospetto, la restituzione ottenuta può essere considerata completamente errata. In relazione ai valori di velocità ottenuti e all'elevato numero di iterazioni eseguite dall'algoritmo, è possibile presumere che un passo di discretizzazione eccessivamente piccolo sfavorisca la convergenza del metodo, dando origine a risultati scorretti.

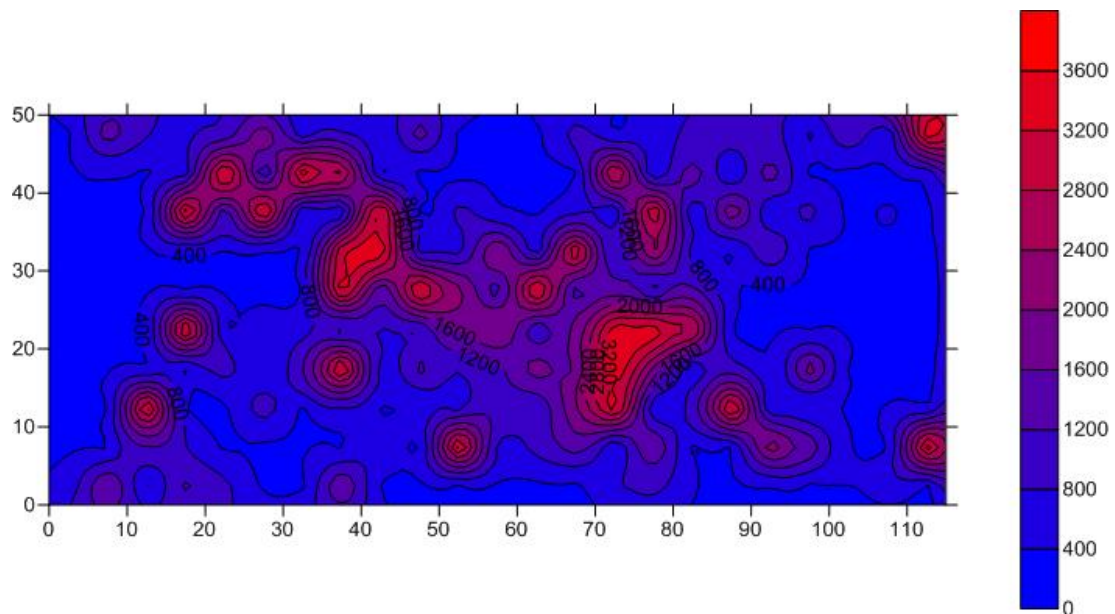


Fig. 7.60: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 5 cm.

- Passo di discretizzazione 10 cm:

Tabella 7.52 – Parametri iniziali e finali relativi all’elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

Numero di pixel	60
Numero di percorsi	529
Numero di punti di trasmissione-ricezione	46
Numero massimo di iterazioni	2000
Criterio di convergenza (ε)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	1638
ε risultante	0

Tabella 7.53 – Velocità soniche derivanti dall’elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

762	640	1098	3208	1619	340	3500	340	340	2682	1527	699
340	1691	3500	3500	340	903	991	1317	3500	3500	3500	340
340	340	340	2179	918	1003	1171	1024	1411	340	340	3500
340	340	3500	1576	1533	895	1016	2684	3500	2667	1117	340
483	572	1340	3095	340	340	1592	3457	1162	985	1038	1066

La mappa delle velocità risultante ha suffragato quella che si era ipotizzata essere la reale morfologia interna del pannello in seguito all’esecuzione della prova di compressione diagonale: la porzione posta in corrispondenza della grossa fessurazione è infatti risultata essere caratterizzata da velocità inferiori rispetto a quelle delle zone adiacenti. Tuttavia, come nell’analisi eseguita con il vecchio software, è apparsa complicata la precisa definizione del completo profilo interno della sezione in quanto, l’utilizzo dei medesimi dati, ha generato lo stesso tipo di imprecisioni precedentemente descritti.

In relazione ai valori di velocità ottenuti e al discreto numero di iterazioni eseguite dall’algoritmo, è possibile ipotizzare che un passo di discretizzazione medio, abbinato ad un numero di acquisizioni molto elevato, favorisca la convergenza del metodo, dando origine a risultati accettabili.

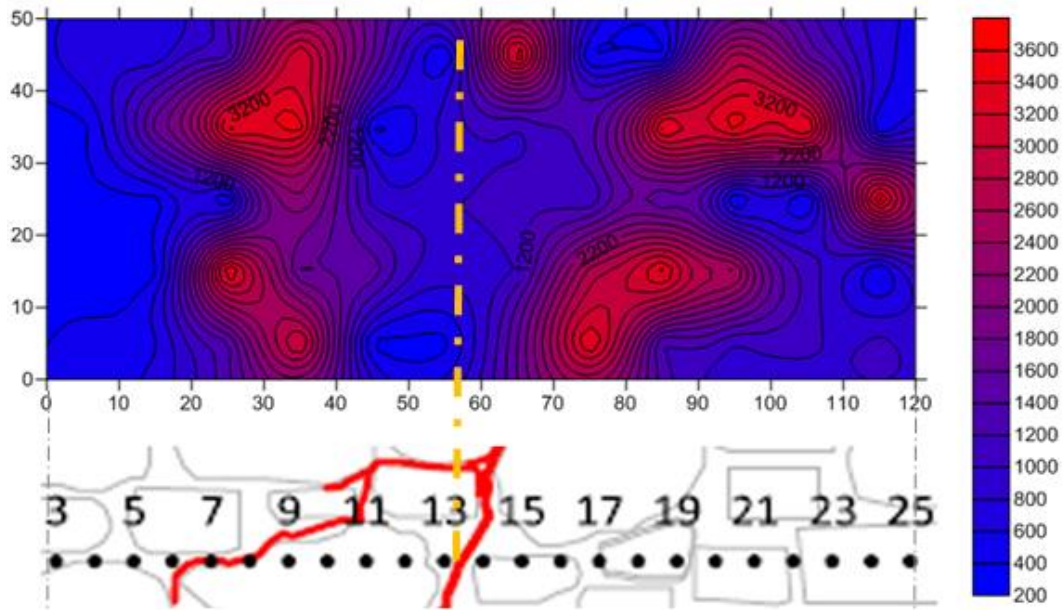


Fig. 7.61: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

- Passo di discretizzazione 12.5 cm:

Tabella 7.54 - Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

Numero di pixel	36
Numero di percorsi	529
Numero di punti di trasmissione-ricezione	46
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	624
ϵ risultante	0

Tabella 7.55 - Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

664	1310	2732	3500	2765	1508	3500	1385	1029
340	3422	3093	1283	817	1419	1645	340	340
340	340	1602	893	995	1143	3500	3500	340
791	2734	3500	340	3500	3500	2636	1532	1182

La mappa delle velocità risultante ha suffragato quella che si era ipotizzata essere la reale morfologia interna del pannello in seguito all'esecuzione della prova di compressione diagonale: la porzione posta in corrispondenza della grossa

fessurazione è infatti risultata essere caratterizzata da velocità inferiori rispetto a quelle delle zone adiacenti. Tuttavia, rispetto all'analisi eseguita con la maglia da 10 cm, la propagazione del danno è risultata meno evidente in quanto l'aumento delle dimensioni dei pixel, seppur minimo, ha causato un incremento e una omogeneizzazione delle velocità, a scapito di una maggiore precisione dell'immagine. In relazione alla distribuzione di velocità ottenuta è quindi possibile ipotizzare che un tale passo di discretizzazione, abbinato ad un numero di acquisizioni molto elevato, favorisca maggiormente la convergenza del metodo rispetto alla qualità dei risultati.

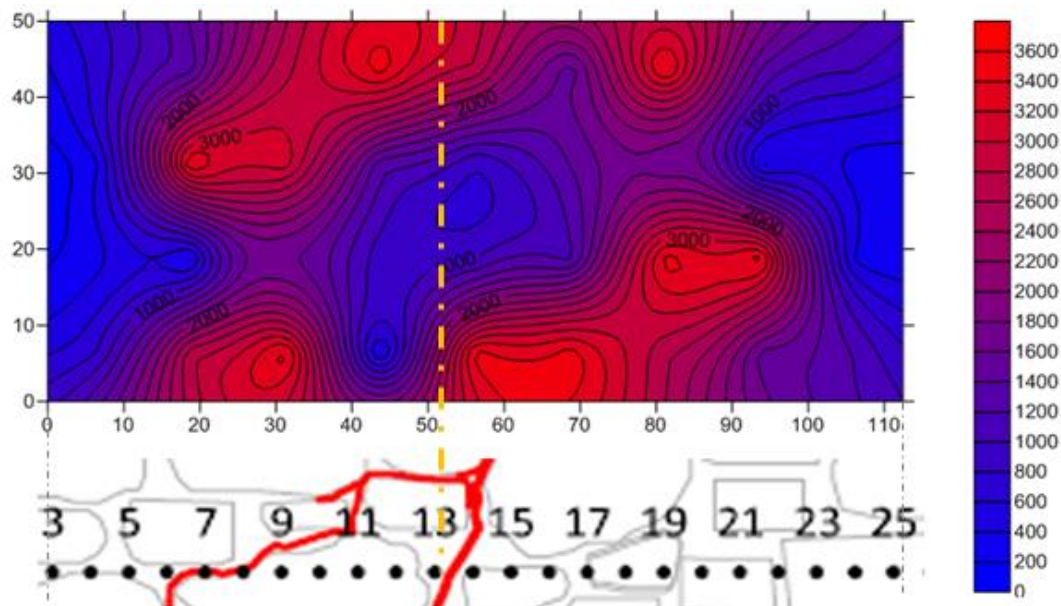


Fig. 7.62: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

- Passo di discretizzazione 17 cm:

Tabella 7.56 – Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

Numero di pixel	21
Numero di percorsi	529
Numero di punti di trasmissione-ricezione	46
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	456
ϵ risultante	0

Tabella 7.57 – Velocità soniche derivanti dall’elaborazione eseguita con passo di 17 cm.

839	2034	3500	2250	2025	3500	1280
340	3500	1202	726	1939	3500	340
985	2545	3500	2806	2083	1696	1352

La mappa delle velocità risultante ha solo parzialmente suffragato quella che si era ipotizzata essere la reale morfologia del pannello, infatti solo la porzione più interna della muratura posta in corrispondenza della grossa fessurazione è risultata essere caratterizzata da velocità inferiori in rapporto a quelle delle zone adiacenti. Rispetto all’analisi eseguita con la maglia da 12.5 cm, già meno precisa delle precedenti, la propagazione del danno è risultata ancora meno evidente in quanto il deciso aumento delle dimensioni dei pixel ha causato un incremento e una omogeneizzazione delle velocità, a scapito di una maggiore qualità dell’immagine. In relazione alla distribuzione di velocità ottenuta è quindi possibile ipotizzare che un tale passo di discretizzazione, abbinato ad un numero di acquisizioni molto elevato, sfavorisca la precisione dei risultati.

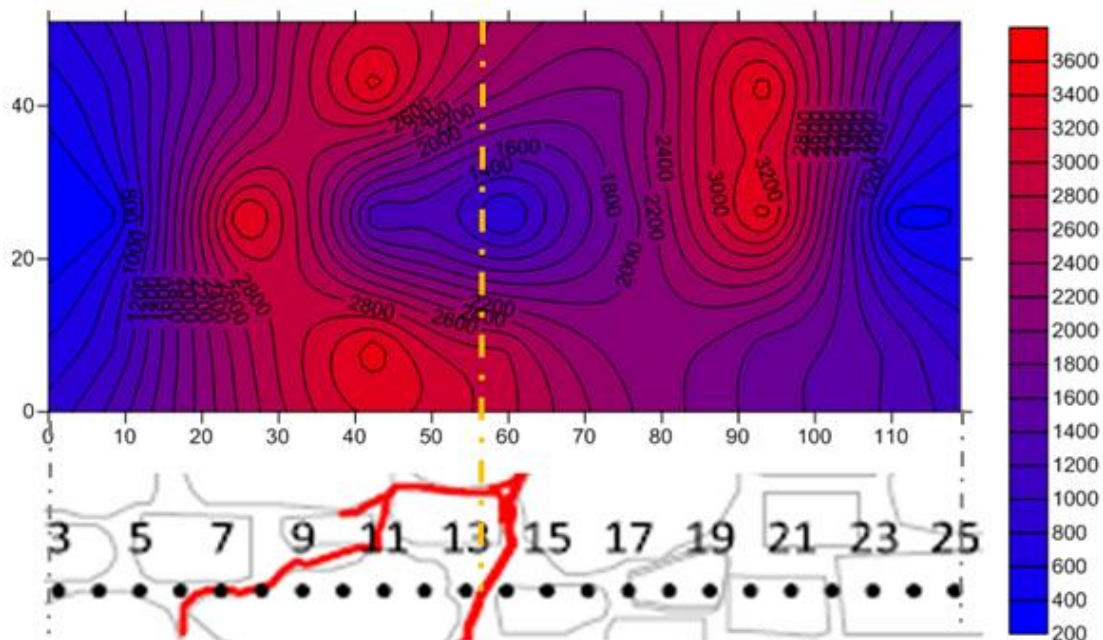


Fig. 7.63: Immagine tomografica derivante dall’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

7.4.2.3 CONFRONTO TRA I RISULTATI

In merito all'analisi del funzionamento dei software, è possibile affermare che entrambi gli algoritmi hanno funzionato correttamente in quanto le distribuzioni di velocità ottenute, seppur legate a parametri differenti, sono risultate concordi con le iniziali ipotesi relative allo stato di danno della muratura indagata.

In questa particolare sperimentazione risulta però più importante soffermarsi sul confronto tra i risultati derivanti da elaborazioni eseguite utilizzando mesh di discretizzazione di diverse dimensioni. Rispetto alle indagini trattate nei paragrafi precedenti, la principale discriminante che ha consentito di valutare l'influenza della maglia di elaborazione è stata il numero totale di segnali acquisiti. Come nella maggior parte dei problemi statistici infatti, l'incremento della quantità di misure ha consentito di ridurre notevolmente gli errori legati alle singole acquisizioni e di migliorare le prestazioni dell'algoritmo di elaborazione, permettendo quindi di sviluppare più approfonditamente lo studio degli effetti connessi alla dimensione dei pixel della mesh. In relazione a quest'ultimo, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Maglie di discretizzazione eccessivamente ridotte (<10 cm) sono sconsigliabili in quanto comportano gravi rallentamenti nella convergenza dell'algoritmo di risoluzione, con conseguente sviluppo di grossolani errori di calcolo;
- Maglie di elaborazione di medie dimensioni (10÷15 cm) garantiscono la restituzione di immagini tomografiche di buona qualità e sufficientemente precise da permettere la corretta analisi della morfologia interna delle sezioni;
- Mesh costituite da pixel di grandi dimensioni (15÷20 cm), solitamente molto utilizzate nelle elaborazioni tomografiche soniche, risultano essere discretamente utili ma meno adatte delle precedenti in quanto comportano una omogeneizzazione della distribuzione interna delle velocità.

7.5 PROVE TOMOGRAFICHE PER LA VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DEGLI STRUMENTI DI BATTITURA

Questa particolare campagna di indagine è stata utile sia per verificare ulteriormente la validità degli algoritmi di risoluzione che per testare l'influenza sul risultato finale dell'utilizzo di due differenti martelli strumentati.

I dati impiegati all'interno di questa prova sono stati acquisiti durante una breve campagna di indagine svolta su una piccola porzione di muratura conservata all'interno del Laboratorio di Costruzioni e Trasposti dell'Università di Padova e derivante da uno dei pannelli a tre paramenti utilizzati in precedenti sperimentazioni e iniettati con miscele consolidanti (vedi Paragrafi 4.11, 4.12 e 4.13).

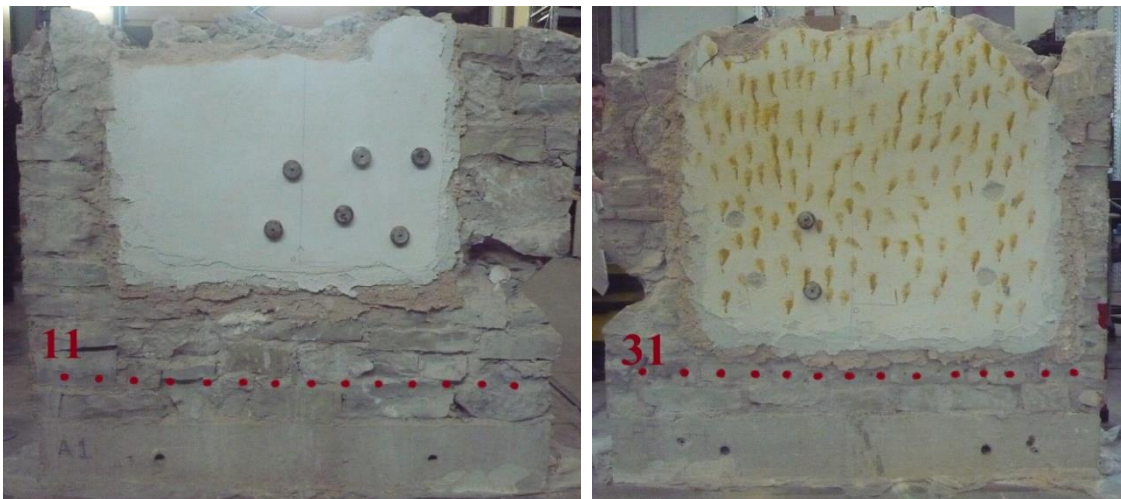


Fig. 7.64: Prospetti anteriore e posteriore del pannello indagato con disposizione dei punti di acquisizione.

Il campione, costituito da due paramenti esterni in conci di pietra sbozzati disposti a corsi suborizzontali e da un riempimento interno composto dal materiale di risulta della sbozzatura stessa, era caratterizzato dalla presenza di uno spesso strato di intonaco superficiale e dall'esistenza di un grosso taglio laterale derivante dall'esecuzione di una prova di compressione diagonale. Queste due peculiarità sono risultate determinanti nella scelta della sezione da testare in quanto, onde evitare l'acquisizione di misure insensate, è stato necessario disporre i punti di battuta-ricezione nell'unica fascia di muratura completamente libera, quella più vicina al cordolo di calcestruzzo inferiore.

7.5.1 ESECUZIONE DELLE PROVE

Le indagini soniche su schema tomografico sono state eseguite nei giorni 3 e 7 febbraio 2014 all'interno del Laboratorio di Costruzioni e Trasporti e, data la numerosità delle acquisizioni, hanno coinvolto una serie di operatori che, alternativamente, si sono occupati della gestione delle diverse fasi di acquisizione dei segnali. Nelle due giornate sono state realizzate due prove tomografiche complete, una utilizzando il martello strumentato o86D20 in dotazione al Laboratorio di Costruzioni e Trasporti e l'altra usufruendo del modello o86Co3 di proprietà dell'azienda Expin S.r.l.

Le prove, eseguite ad una quota di circa 35 cm dal piano del terreno, sono state realizzate collocando 36 punti di trasmissione-ricezione, con passo costante di 10 cm, lungo ognuna delle quattro facce dei pannelli. Nello specifico sono stati posizionati 14 punti di misurazione lungo i due lati più lunghi e 4 sui due lati minori. Tale disposizione ha consentito di acquisire una quantità di misure nettamente maggiore rispetto ai casi generalmente studiati (436) e di coprire in maniera uniforme l'intera area indagata.

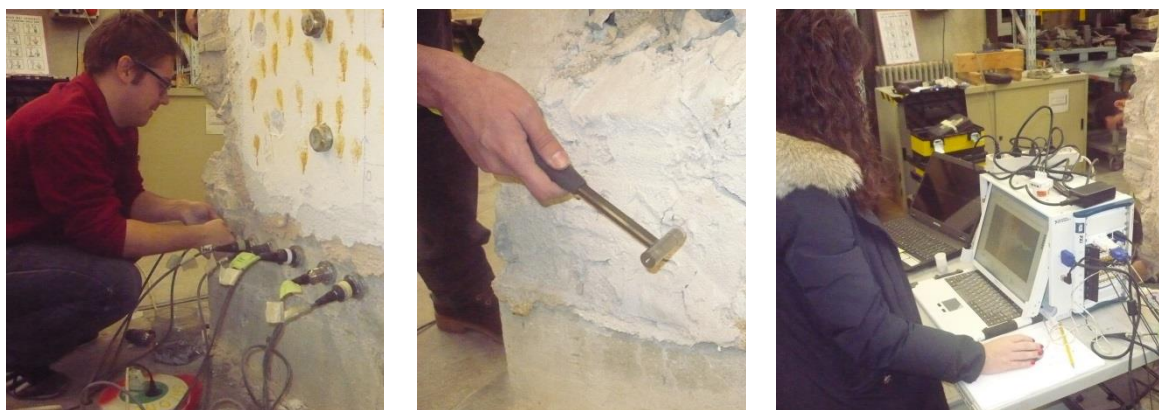


Fig. 7.65: Alcune fasi di esecuzione delle prove tomografiche.

7.5.2 ELABORAZIONE DEI DATI

Nella fase di elaborazione dei dati, le misurazioni relative ai punti disposti lungo i lati più corti del pannello sono state eliminate in quanto eccessivamente rumorose. Al fine di favorire il miglior confronto possibile tra i risultati derivanti

dall'acquisizione eseguita con i due diversi martelli strumentati, l'analisi è stata eseguita definendo tre differenti maglie di elaborazione:

1. Passo di discretizzazione di 10 cm, per un totale di 5 x 14 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 140 cm;
2. Passo di discretizzazione di 12.5 cm, per un totale di 4 x 11 pixel ed una copertura complessiva di 50 x 137.5 cm;
3. Passo di discretizzazione di 16.5 cm, per un totale di 3 x 9 pixel ed una copertura complessiva di 49.5 x 132 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione e suddivisi in relazione allo strumento utilizzato, i valori dei parametri risultanti al termine delle analisi tomografiche e le velocità dei pixel relative alle sei elaborazioni eseguite impostando i diversi passi di discretizzazione. Sulla base di queste e dei dati geometrici delle sezioni, il software Surfer ha consentito di ricostruire le diverse immagini tomografiche.

- Martello strumentato o86D20, passo di discretizzazione 10 cm:

Tabella 7.58 – Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

Numero di pixel	70
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	5000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	3082
ϵ risultante	0

Tabella 7.59 – Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

714	933	435	940	1333	703	1122	340	2353	959	1432	619	1219	729
2805	503	1493	1033	735	870	1222	648	1738	340	1940	340	401	340
914	340	1434	564	1520	422	1513	1387	943	826	1057	3500	340	410
357	1020	1218	340	1713	1116	818	340	695	2005	531	1369	513	340
340	453	3500	340	340	753	630	348	340	563	1066	541	1488	340

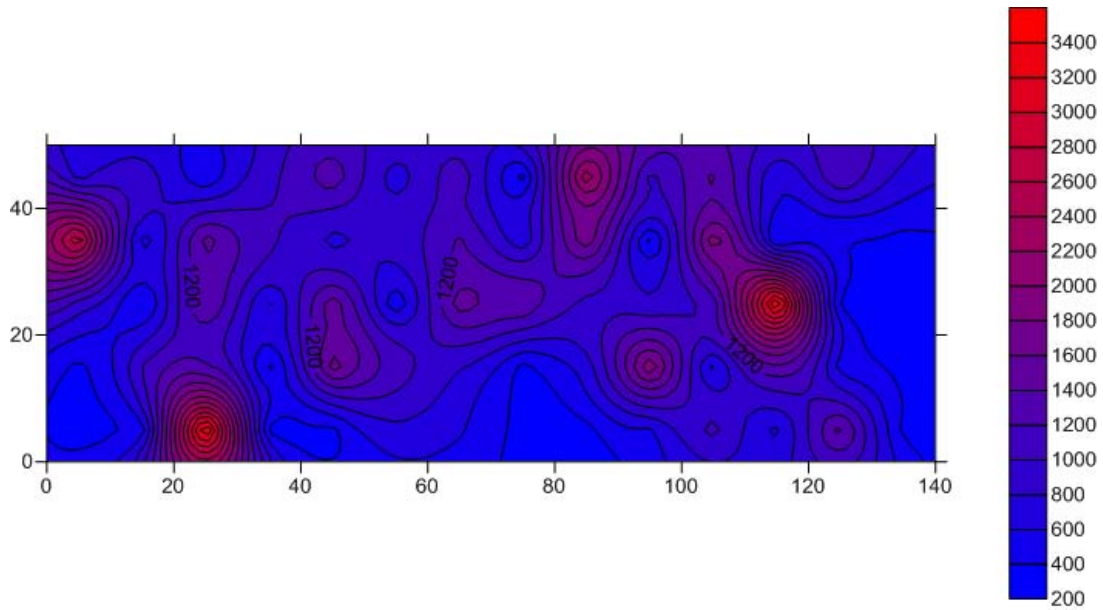


Fig. 7.66: Immagine tomografica derivante dall’elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

- Martello strumentato o86D2o, passo di discretizzazione 12.5 cm:

Tabella 7.6o – Parametri iniziali e finali relativi all’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

Numero di pixel	44
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	2000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	1679
ϵ risultante	0

Tabella 7.61 – Velocità sonore derivanti dall’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

685	590	888	794	567	2598	1233	1107	1653	1220	962
1197	544	589	554	785	674	1135	910	1242	555	1127
678	340	1207	1255	532	1946	670	804	608	340	340
340	1867	340	340	3500	716	340	1381	2598	1664	498

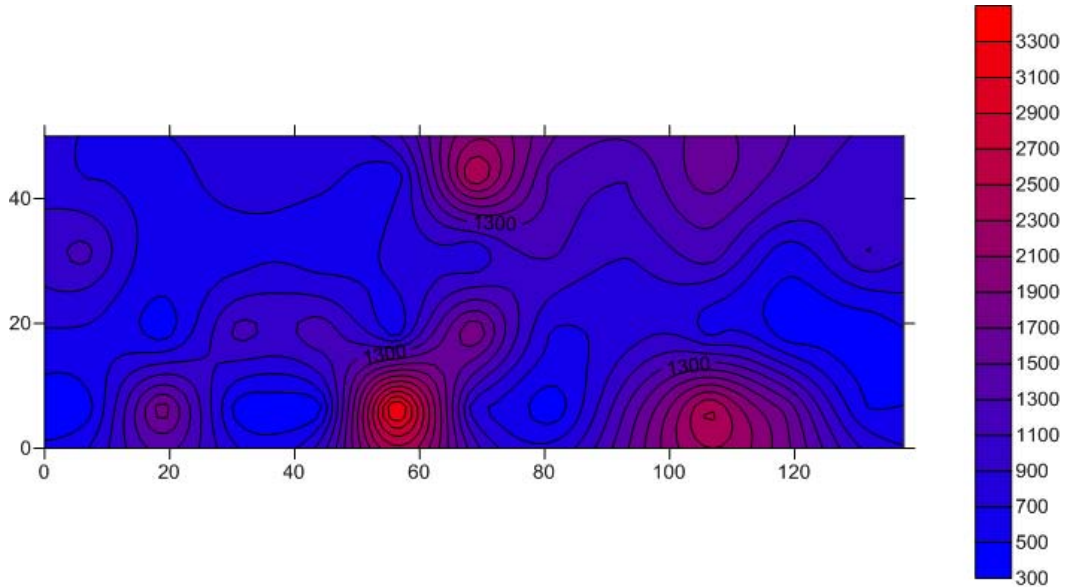


Fig. 7.67: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

- Martello strumentato o86D2o, passo di discretizzazione 16.5 cm:

Tabella 7.62 – Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

Numero di pixel	24
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	698
ϵ risultante	0

Tabella 7.63 – Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

721	681	1354	800	3500	2048	3500	1665
3500	2053	645	1699	1033	1000	809	2976
676	1793	340	452	869	724	789	696

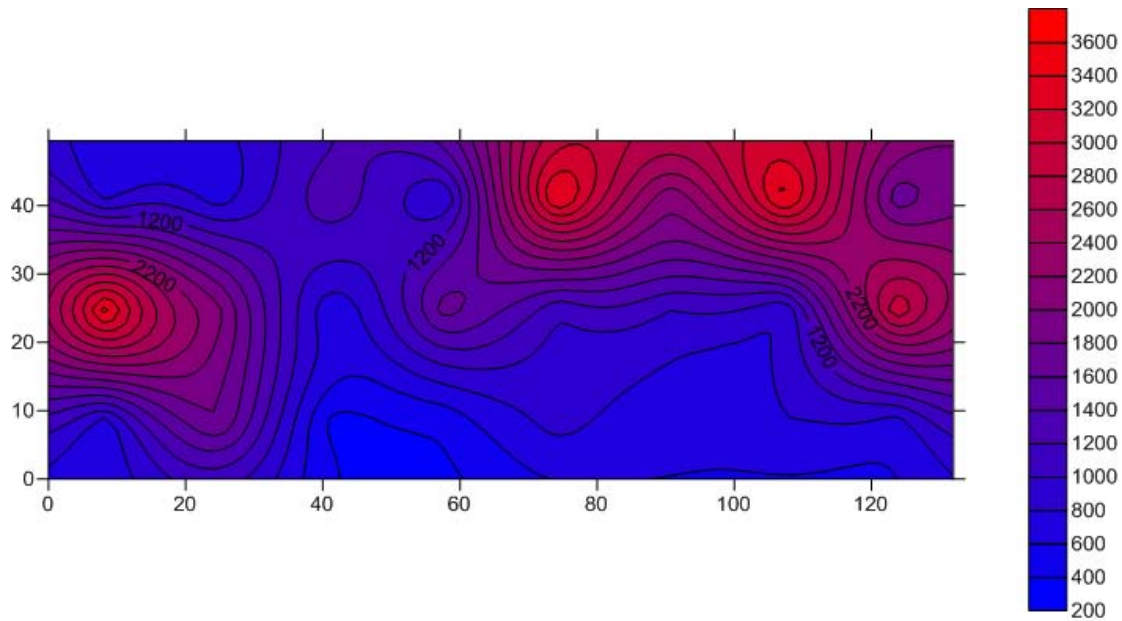


Fig. 7.68: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

Le tre immagini generate hanno evidenziato, in conformità con le reali condizioni della parete, la presenza di una struttura interna disomogenea e fortemente danneggiata.

Pur non considerando le porzioni caratterizzate da picchi estremi di velocità, probabilmente riconducibili alle modalità di calcolo dell'algoritmo di elaborazione o alla presenza di alcune singolarità, le tre tomografie non hanno consentito di delineare con precisione la morfologia della sezione, confermando i dubbi emersi nella fase di acquisizione in merito alla qualità dei segnali generati. Le uniche zone caratterizzate da distribuzioni confrontabili appaiono essere la fascia destra superiore, la porzione centrale del nucleo e la parte più prossima allo spigolo sinistro basso.

In ogni caso resta evidente l'influenza sul risultato finale di diversi fattori, dalla lunghezza effettivamente indagata alle dimensioni dei pixel utilizzati per la discretizzazione, dalla qualità dei segnali generati al passo di acquisizione scelto per campionare la sezione.

- Martello strumentato o86Co3, passo di discretizzazione 10 cm:

Tabella 7.64 – Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

Numero di pixel	70
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	5000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	3183
ϵ risultante	0

Tabella 7.65 – Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

340	949	909	691	874	531	785	2075	3500	581	2009	564	583	340
569	924	660	1212	633	1385	849	1010	825	3500	548	340	734	340
2060	1616	847	1010	1634	749	649	1352	844	727	2378	2179	340	347
708	1850	1402	3500	1031	1000	485	764	1260	3055	584	340	340	340
1133	340	1139	3500	1399	532	779	802	959	705	1881	504	340	443

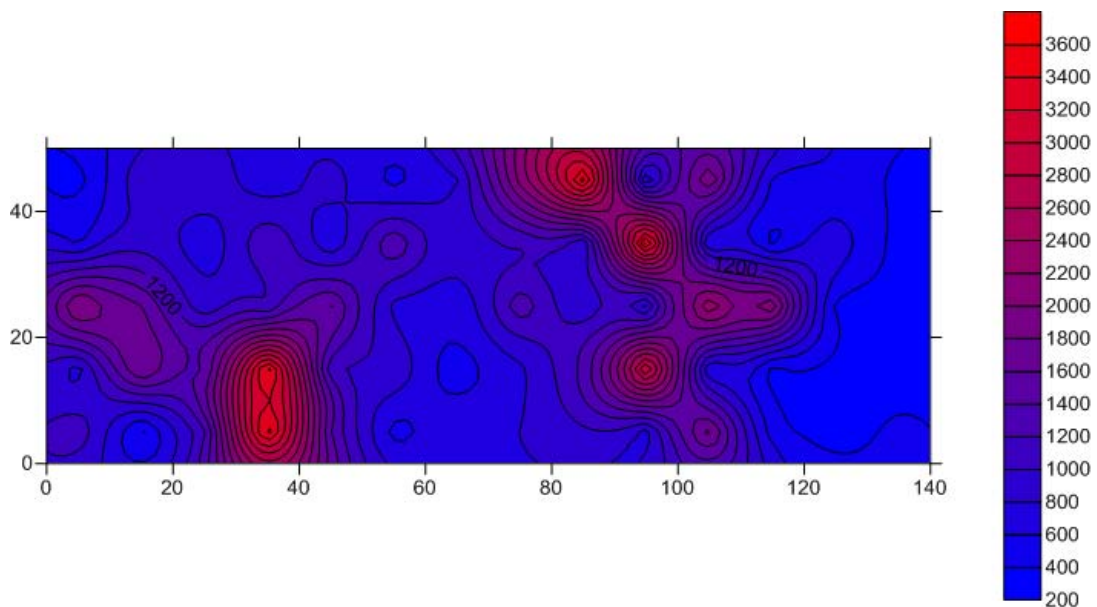


Fig. 7.69: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 10 cm.

- Martello strumentato o86Co3, passo di discretizzazione 12.5 cm:

Tabella 7.66 – Parametri iniziali e finali relativi all’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

Numero di pixel	44
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	961
ϵ risultante	0

Tabella 7.67 – Velocità soniche derivanti dall’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

340	2158	1078	827	1005	1340	3500	812	1874	765	340
2026	922	629	1313	593	1119	646	1113	799	3500	340
585	695	792	877	686	524	1676	772	1681	999	340
522	467	3500	2075	504	780	701	1090	874	1136	660

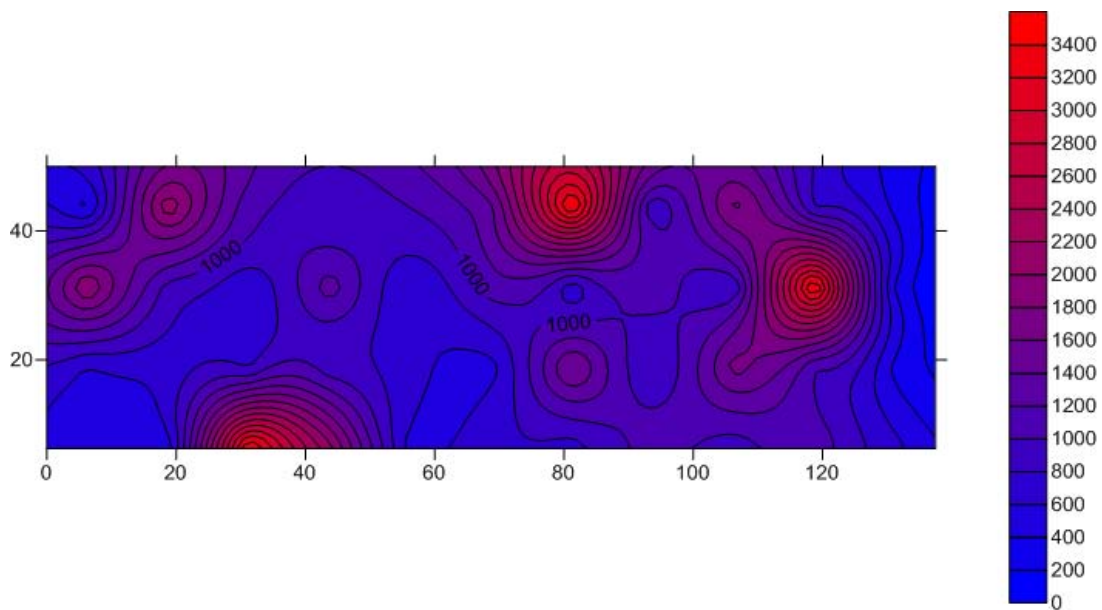


Fig. 7.70: Immagine tomografica derivante dall’elaborazione eseguita con passo di 12.5 cm.

- Martello strumentato o86Co3, passo di discretizzazione 16.5 cm:

Tabella 7.68 – Parametri iniziali e finali relativi all'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

Numero di pixel	24
Numero di percorsi	196
Numero di punti di trasmissione-ricezione	28
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	454
ϵ risultante	0

Tabella 7.69 – Velocità soniche derivanti dall'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

2034	969	745	810	2923	892	1653	535
3500	706	1415	725	735	845	782	1918
340	1994	1081	505	871	985	1300	1955

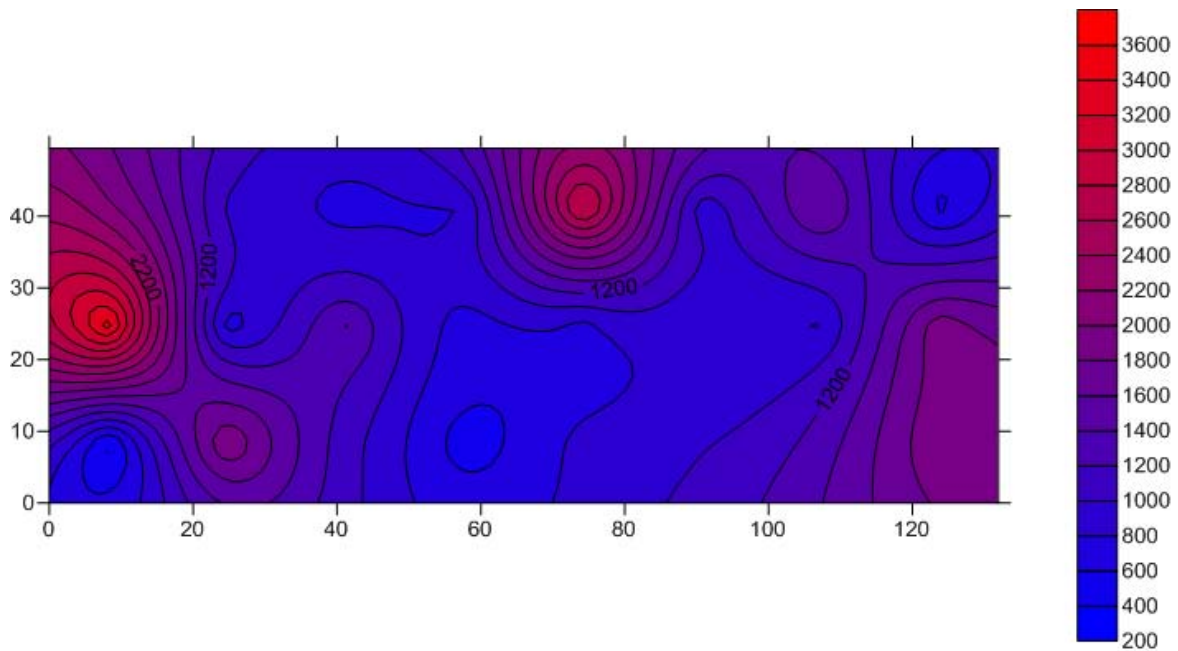


Fig. 7.71: Immagine tomografica derivante dall'elaborazione eseguita con passo di 16.5 cm.

Le tre immagini generate dai dati acquisiti con il martello o86Co3 hanno evidenziato, in conformità con le reali condizioni della parete, la presenza di una struttura interna disomogenea e fortemente danneggiata.

Rispetto alle analisi precedenti, tra loro differenti e complesse da interpretare, queste tre tomografie, opportunamente depurate dei valori riconducibili all'effetto delle singolarità o alle modalità di calcolo del software, hanno consentito di delineare con discreta precisione la morfologia della sezione, confermando la buona qualità dei segnali generati dal martello. Risulta infatti possibile individuare alcune zone di migliori caratteristiche strutturali in corrispondenza della porzione centrale destra della muratura e in prossimità del lato sinistro.

Queste elaborazioni dimostrano quindi quanto una buona campagna di acquisizione dei dati possa influire sulla qualità dei risultati finali.

7.5.3 ANALISI DEI RISULTATI

Come accennato precedentemente, ad un prima analisi è possibile affermare che entrambi gli strumenti funzionano correttamente in quanto le distribuzioni di velocità ottenute sono risultate concordi con le iniziali ipotesi relative allo stato di conservazione della muratura indagata. Tuttavia sono apparse evidenti le differenze presenti nelle varie immagini tomografiche a seguito della diversa qualità di acquisizione dei segnali sonici.

Nelle analisi derivanti dai dati generati con il martello strumentato o86D2o, l'eccessivo rumore presente ha avuto ripercussioni sulla fase di elaborazione in quanto ha vincolato i risultati ad alcuni parametri quali la dimensione della maglia di discretizzazione o la lunghezza della sezione indagata. Nel secondo caso invece, l'acquisizione di segnali puliti ha permesso di limitare l'influenza dei parametri di elaborazione sulla qualità delle tomografie, consentendo di ottenere informazioni più precise in merito alla reale morfologia interna della parete.

Vengono di seguito riportati i confronti tra gli andamenti delle velocità calcolati sulla base dei dati acquisiti con i due diversi martelli strumentati, suddivisi in relazione al passo di discretizzazione utilizzato in fase di analisi. In azzurro sono indicati i limiti degli intervalli relativi ai tre diversi livelli di qualità della muratura individuati da Berra M. et al. nel 1992 (vedi Paragrafo 3.2)

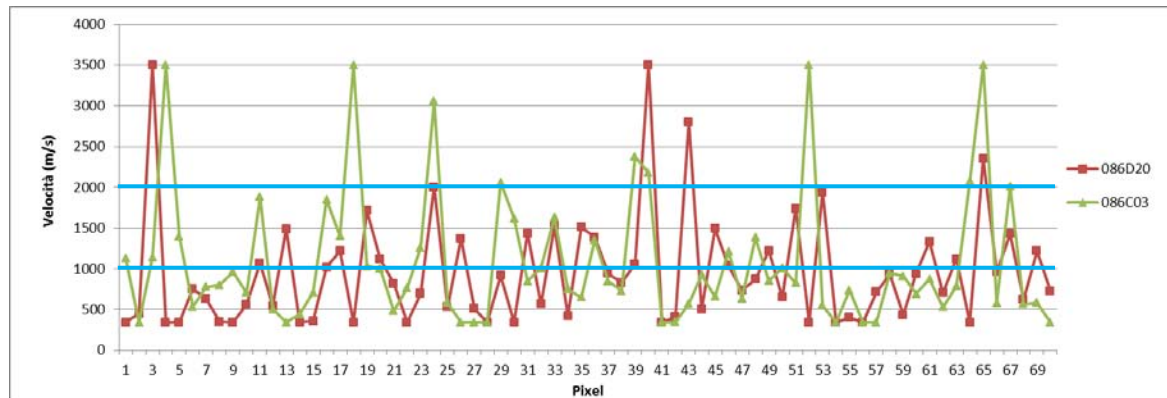


Fig. 7.72: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con maglie di elaborazione da 10 cm.

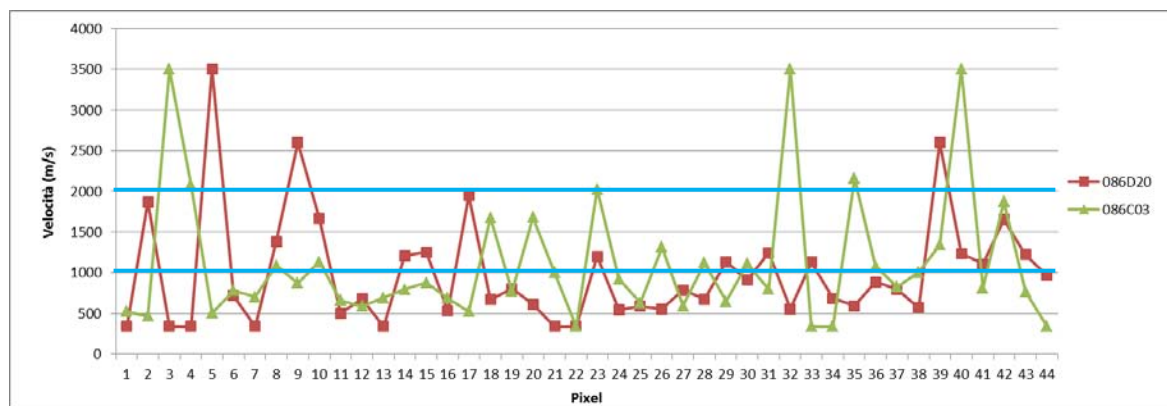


Fig. 7.73: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con maglie di elaborazione da 12.5 cm.

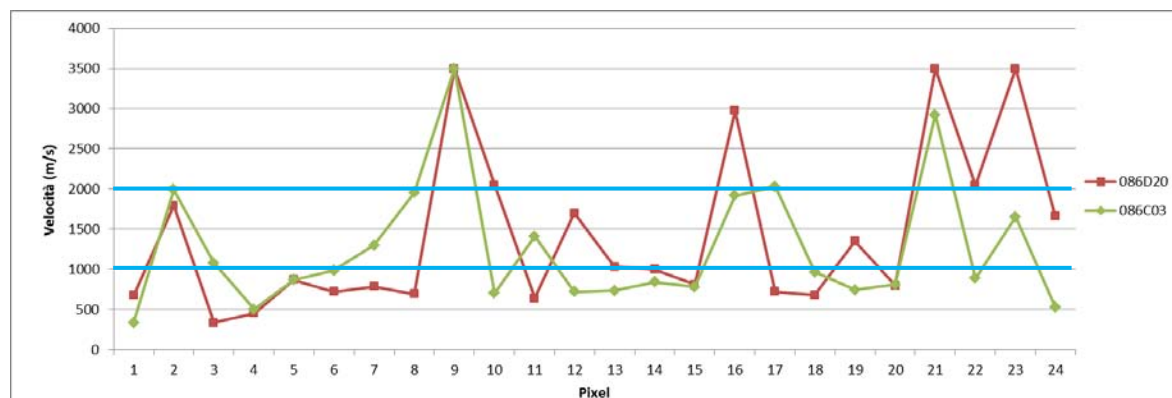


Fig. 7.74: Confronto tra gli andamenti delle velocità calcolate con maglie di elaborazione da 16.5 cm.

Dal confronto tra i tre differenti grafici appare evidente come, in conseguenza della riduzione del numero dei pixel utilizzati per la discretizzazione delle sezioni, aumenti l'influenza delle singolarità sulla distribuzione complessiva delle velocità interne.

7.6 PROVE TOMOGRAFICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL MUSEO ARCHEOLOGICO DI VERONA

I test tomografici per la caratterizzazione della qualità muraria di alcune pareti del Museo Archeologico di Verona vengono qui presentate in quanto rappresentano la prima campagna di indagine in sito effettuata senza l'utilizzo del software di elaborazione dell'ing. N. Monteforte.

Il vasto programma di prove eseguito a Verona è stato sviluppato all'interno del progetto di recupero e ristrutturazione del Museo Archeologico e dei complessi ad esso adiacenti: il Teatro Romano, Castel San Pietro e Palazzo Fontana. L'edificio, posto sulla riva sinistra del fiume Adige, nel quartiere Veronetta e raggiungibile attraverso Ponte Pietra, è situato all'interno della zona archeologica del Teatro Romano, di cui segue l'andamento su più livelli. Allestito fra il 1919 e il 1924, il Museo comprende la parte della collezione di Andrea Monga relativa ai reperti provenienti dagli scavi ottocenteschi del Teatro Romano e i materiali pertinenti alle civiltà classiche (greca, etrusca e romana) precedentemente situati nel Museo Civico di Palazzo Pompei.



Fig. 7.75: Museo Archeologico di Verona.

Il progetto di risanamento ha previsto l'esecuzione di una serie di interventi di consolidamento murario mediante iniezioni di diverse miscele consolidanti al fine di determinare l'efficacia di tali tecniche di rinforzo.

7.6.1 PIANO DELLE PROVE

Il piano di indagine, ha previsto l'esecuzione delle seguenti prove diagnostiche non distruttive:

- Quattro indagini soniche dirette e dodici tomografiche;
- Prove dinamiche sulle catene;
- Indagini georadar;
- Indagini termografiche.

Le maggiori complessità di esecuzione sono state riscontrate nelle prove effettuate sulle pareti affrescate della Chiesetta di San Gerolamo, una piccola cappella annessa alla struttura del Museo. Tutte le indagini sopracitate sono state predisposte in funzione di alcuni particolari obiettivi:

- Verifica dell'efficacia in situ di interventi di consolidamento tramite iniezioni con diverse tipologie di miscele;
- Studio della correlazione esistente tra prove tomografiche eseguite su una particolare sezione e altre indagini di carattere semi-distruttivo quali carotaggi e martinetti;
- Valutazione delle correlazioni esistenti tra differenti prove non distruttive per il rilievo di anomalie nei paramenti murari;
- Analisi, test e monitoraggio di alcuni innovativi strumenti nell'ambito del restauro.

Verranno nel seguito analizzati solamente i risultati derivanti dalle prove di indagine sonica tomografica eseguite sui pannelli 01, 02, 03 e 04, disposti ai livelli IV e V dell'edificio e caratterizzati rispettivamente da uno spessore di 30, 36, 37.5 e 61.5 cm.

7.6.2 ESECUZIONE DELLE PROVE

Le indagini soniche su schema tomografico realizzate sulle pareti del Museo Archeologico hanno coinvolto una serie di operatori che, alternativamente e in

diverse giornate, si sono occupati della gestione delle diverse fasi di acquisizione dei segnali. Le otto prove eseguite, quattro verticali ed altrettante orizzontali, sono state realizzate collocando 5 punti di trasmissione-ricezione con passo costante di 20 cm lungo ognuna delle due facce dei pannelli.



Fig. 7.76: Pannelli 01, 02, 03 e 04 sottoposti a indagine tomografia, facce A (sinistra) e B (destra).

7.6.3 ELABORAZIONE DEI DATI

Per l'analisi dei segnali sonici acquisiti durante le campagne di indagine sono state definite delle maglie di discretizzazione perfettamente coincidenti con gli spessori delle diverse murature testate. Nello specifico sono state impostate le seguenti griglie di elaborazione:

1. Tomografia 1 (TMo1): Passo di discretizzazione di 15 cm, per un totale di 2 x 6 pixel ed una copertura complessiva di 30 x 90 cm;
2. Tomografia 2 (TMo2): Passo di discretizzazione di 18 cm, per un totale di 2 x 5 pixel ed una copertura complessiva di 36 x 90 cm;
3. Tomografia 3 (TMo3): Passo di discretizzazione di 18.75 cm, per un totale di 2 x 5 pixel ed una copertura complessiva di 37.5 x 93.75 cm;
4. Tomografia 4 (TMo4): Passo di discretizzazione di 20.5 cm, per un totale di 3 x 5 pixel ed una copertura complessiva di 61.5 x 102.5 cm.

Nelle seguenti tabelle sono riportati, in successione, i valori dei parametri risultanti al termine delle analisi tomografiche e le velocità dei pixel relative alle otto elaborazioni eseguite impostando i diversi passi di discretizzazione. Sulla base di queste e dei dati geometrici delle sezioni, il software Surfer ha consentito di ricostruire le diverse immagini tomografiche. Nella sigla di identificazione delle prove, la lettera A indica le tomografie orizzontali e la lettera B quelle verticali.

- Tomografia TMo1A:

Tabella 7.70 – Parametri iniziali e finali relativi all'tomografia TMo1A elaborata con passo di 15 cm.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	797
ϵ risultante	0

Tabella 7.71 – Velocità soniche relative alla tomografia TM01A elaborata con passo di 15 cm.

1202	1003	411	3500	357	935
340	340	340	340	621	614

- Tomografia TM01B:

Tabella 7.72 – Parametri iniziali e finali relativi all’ tomografia TM01B elaborata con passo di 15 cm.

Numero di pixel	12
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	810
ϵ risultante	0

Tabella 7.73 – Velocità soniche relative alla tomografia TM01B elaborata con passo di 15 cm.

497	357	340	340	340	340
340	3500	424	340	1609	340

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare un graduale aumento delle velocità nel passaggio da un paramento murario a quello opposto (circa $400 \div 1000$ m/s). L’improvvisa variazione della consistenza osservabile nella parte centrale dell’immagine potrebbe invece essere ricondotta all’effetto di una singolarità o alla modalità di calcolo implementata nell’algoritmo di risoluzione.

Anche nell’immagine verticale è possibile osservare un andamento delle velocità molto simile al precedente, con un miglioramento delle caratteristiche interne della sezione in corrispondenza di una delle due facce della parete. Come nel caso orizzontale, l’improvvisa variazione della consistenza osservabile nella parte sinistra dell’immagine potrebbe invece essere ricondotta all’effetto di una singolarità o alla modalità di calcolo implementata nell’algoritmo di risoluzione.

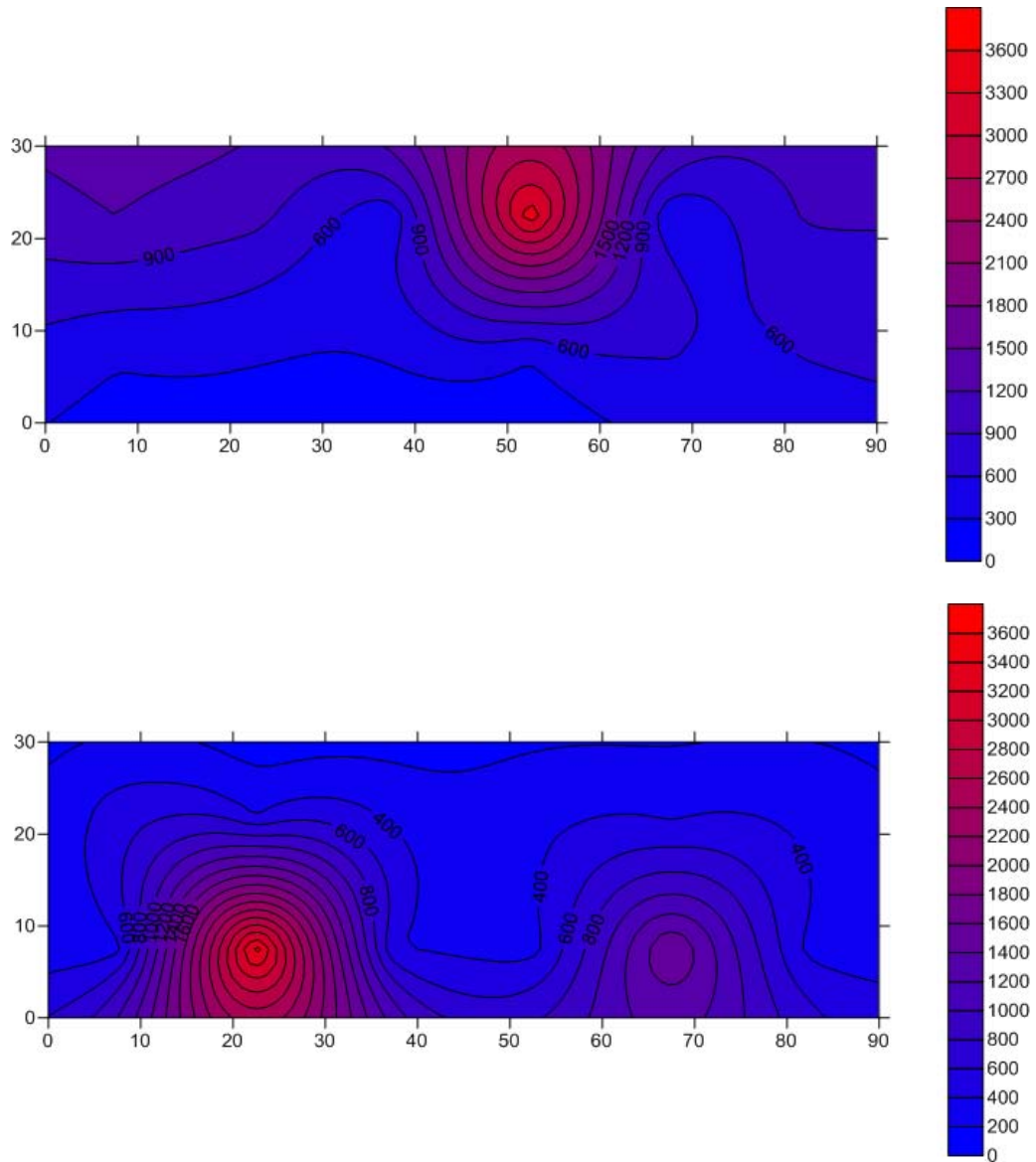


Fig. 7.77: Immagini tomografiche TMO1A (sopra) e TMO1B (sotto).

- Tomografia TMO2A:

Tabella 7.74 – Parametri iniziali e finali relativi all' tomografia TMO2A elaborata con passo di 18 cm.

Numero di pixel	10
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	378
ϵ risultante	0

Tabella 7.75 – Velocità soniche relative alla tomografia TMo2A elaborata con passo di 18 cm.

785	417	1648	747	340
997	1316	348	1459	409

- Tomografia TMo2B:

Tabella 7.76 – Parametri iniziali e finali relativi all’ tomografia TMo2B elaborata con passo di 18 cm.

Numero di pixel	10
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	397
ϵ risultante	0

Tabella 7.77 – Velocità soniche relative alla tomografia TMo2B elaborata con passo di 18 cm.

340	2101	355	951	714
340	340	2219	506	1399

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare una generalizzata omogeneità delle condizioni, con valori di velocità contenuti tra 500 e 1000 m/s. È comunque possibile individuare una zona di migliori caratteristiche meccaniche in corrispondenza della parte centrale della sezione.

Anche nell’immagine verticale è possibile osservare un andamento delle velocità molto simile al precedente, con un miglioramento delle caratteristiche interne della sezione in corrispondenza della porzione centrale della muratura. L’improvvisa variazione della consistenza osservabile in due dei pixel di discretizzazione potrebbe invece essere ricondotta all’effetto di una singolarità o alla modalità di calcolo implementata nell’algoritmo di risoluzione.

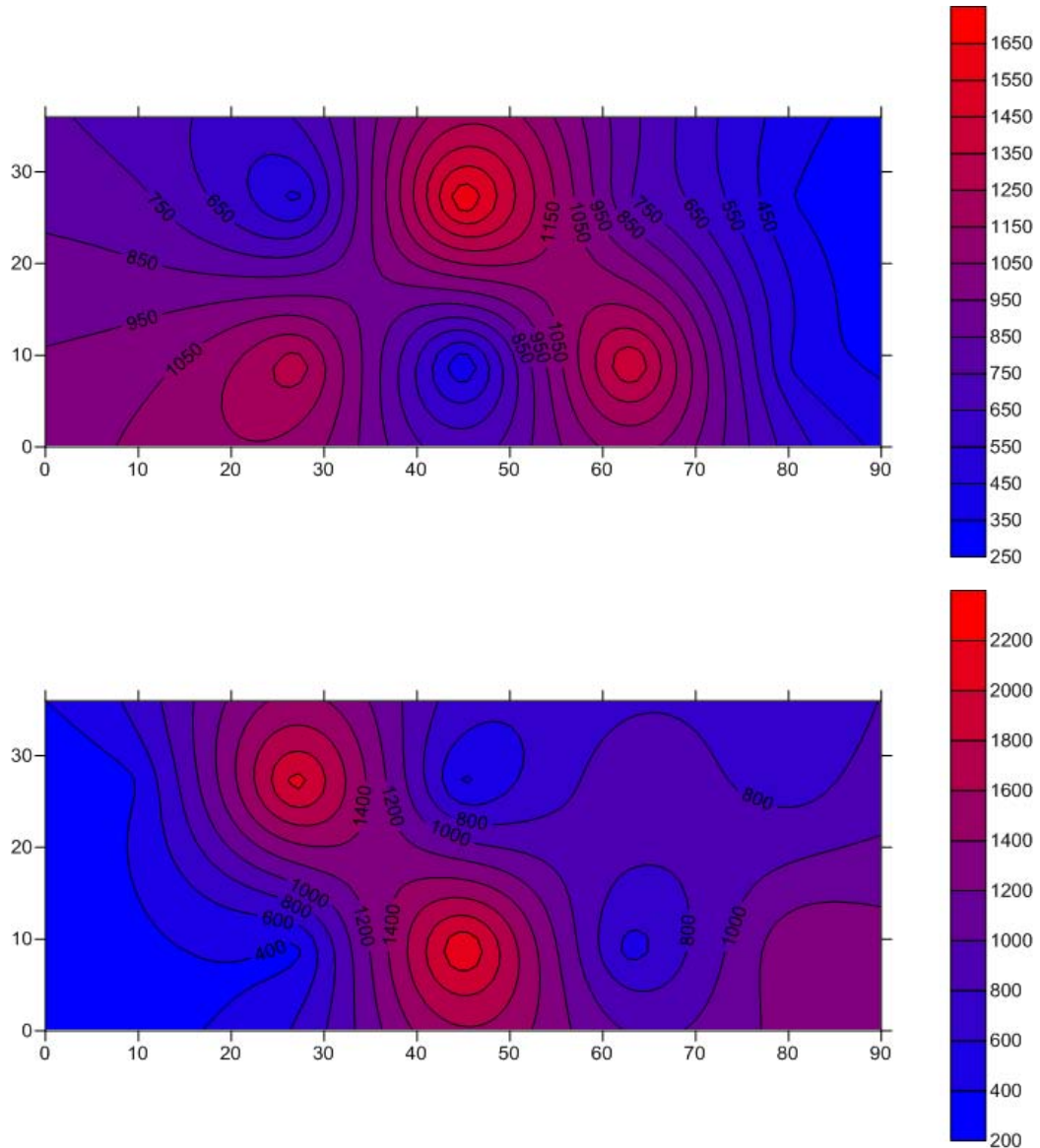


Fig. 7.78: Immagini tomografiche TMO2A (sopra) e TMO2B (sotto).

- Tomografia TMO3A:

Tabella 7.78 – Parametri relativi all’ tomografia TMO3A elaborata con passo di 18.75 cm.

Numero di pixel	10
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	388
ϵ risultante	0

Tabella 7.79 – Velocità soniche relative alla tomografia TMO3A elaborata con passo di 18.75 cm.

377	466	367	573	345
795	367	1262	458	1765

- Tomografia TMO3B:

Tabella 7.80 – Parametri relativi all’ tomografia TMO3B elaborata con passo di 18.75 cm.

Numero di pixel	10
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	336
ϵ risultante	0

Tabella 7.81 – Velocità soniche relative alla tomografia TMO3B elaborata con passo di 18.75 cm.

1480	367	554	706	340
340	2386	843	536	2105

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare una generalizzata omogeneità delle condizioni, con un contenuto aumento delle velocità nel passaggio da un paramento murario a quello opposto (circa $400 \div 1200$ m/s).

Anche nell’immagine verticale è possibile osservare un andamento delle velocità molto simile al precedente, con un lieve miglioramento delle caratteristiche interne della sezione in corrispondenza di una delle due facce della parete. L’improvvisa variazione della consistenza osservabile in due dei pixel di discretizzazione potrebbe invece essere ricondotta all’effetto di una singolarità o alla modalità di calcolo implementata nell’algoritmo di risoluzione.

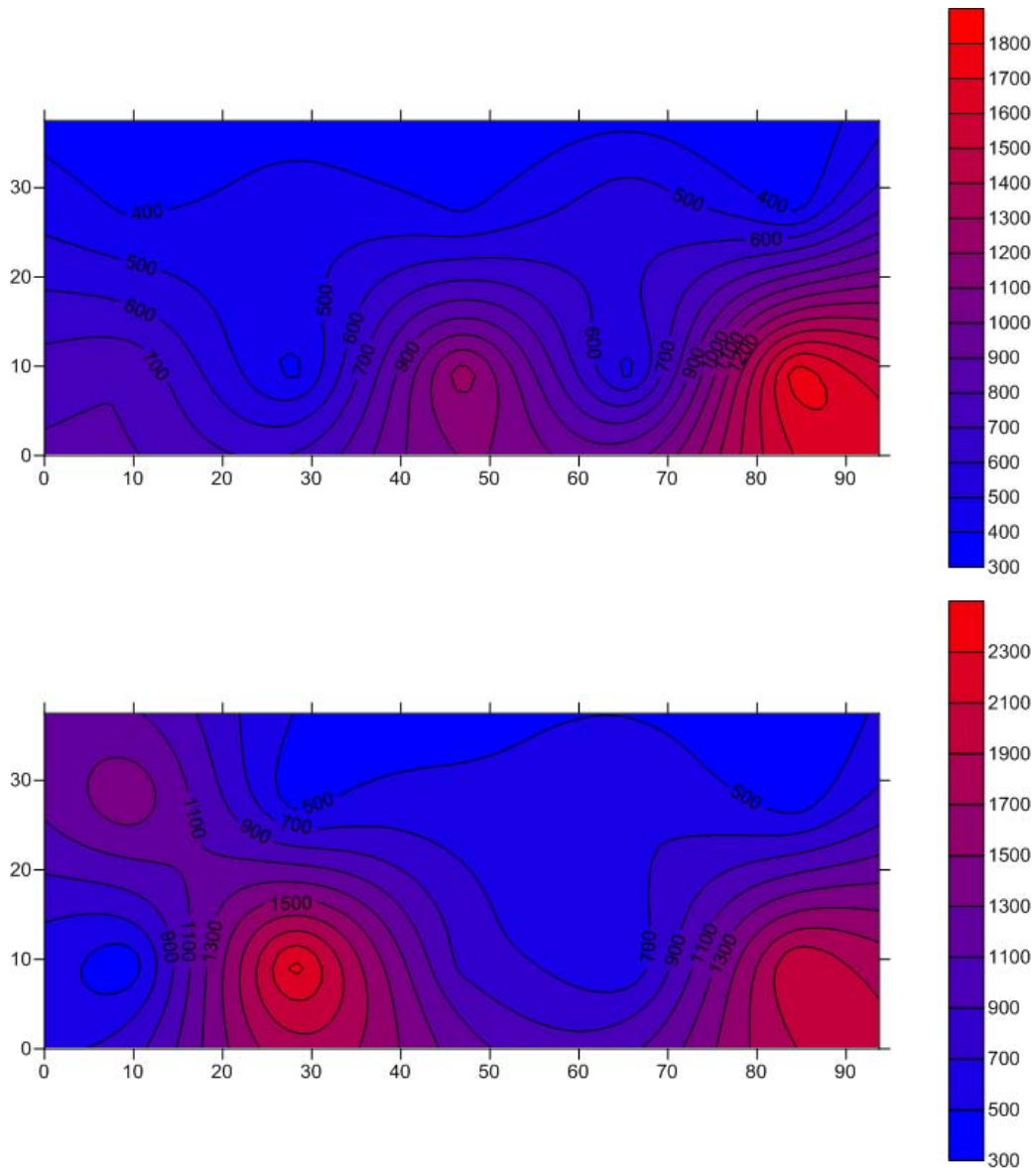


Fig. 7.79: Immagini tomografiche TM03A (sopra) e TM03B (sotto).

- Tomografia TM04A:

Tabella 7.82 – Parametri relativi all’ tomografia TM04A elaborata con passo di 20.5 cm.

Numero di pixel	15
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	1000
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	593
ϵ risultante	0

Tabella 7.83 – Velocità soniche relative alla tomografia TMo4A elaborata con passo di 20.5 cm.

357	592	3383	340	340
340	856	370	1641	340
340	1381	1525	345	340

- Tomografia TMo4B:

Tabella 7.84 – Parametri relativi all’ tomografia TMo4B elaborata con passo di 20.5 cm.

Numero di pixel	15
Numero di percorsi	25
Numero di punti di trasmissione-ricezione	10
Numero massimo di iterazioni	500
Criterio di convergenza (ϵ)	1×10^{-8}
Numero di iterazioni eseguite	469
ϵ risultante	0

Tabella 7.85 – Velocità soniche relative alla tomografia TMo4B elaborata con passo di 20.5 cm.

340	759	340	1226	340
1137	1237	581	779	447
340	479	807	387	340

Entrambe le immagini generate hanno evidenziato una distribuzione caratterizzata da valori di velocità riconducibili a murature di scarsa qualità e pessimo stato di conservazione (Berra et al., 1992). Nella tomografia orizzontale è possibile osservare una generalizzata omogeneità delle condizioni, con valori di velocità contenuti tra 400 e 1200 m/s. È comunque possibile individuare una zona di migliori caratteristiche meccaniche in corrispondenza della parte centrale della sezione. L’improvvisa variazione della consistenza osservabile in uno dei pixel di discretizzazione potrebbe invece essere ricondotta all’effetto di una singolarità o alla modalità di calcolo implementata nell’algoritmo di risoluzione.

Anche nell’immagine verticale è possibile osservare un andamento delle velocità molto simile al precedente, con un miglioramento delle caratteristiche interne della sezione in corrispondenza della porzione centrale della muratura.

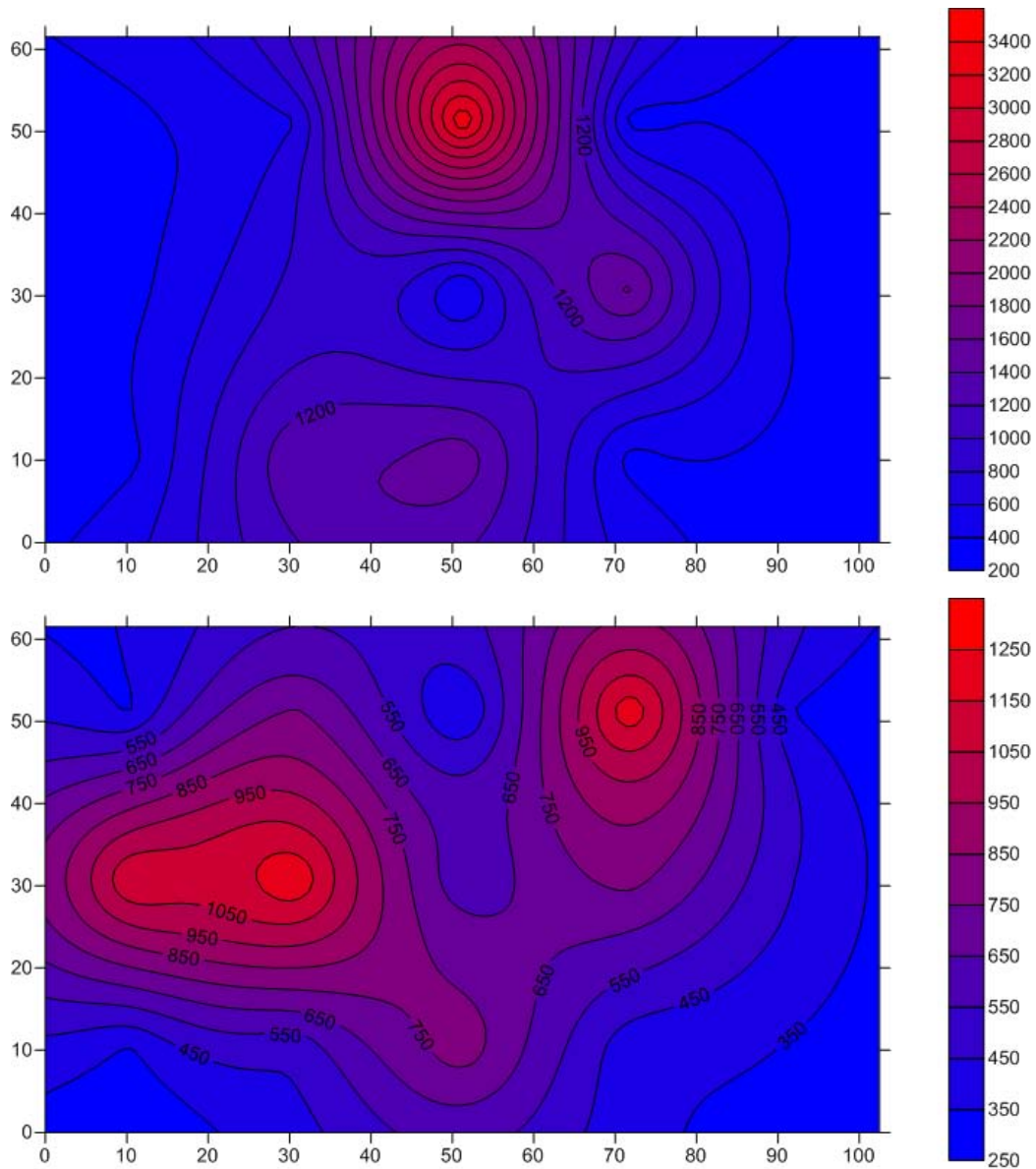


Fig. 7.79: Immagini tomografiche TM₀₃A (sopra) e TM₀₃B (sotto).

7.6.4 ANALISI DEI RISULTATI

Dall'analisi dei risultati relativi alle indagini tomografiche eseguite sui quattro pannelli murari del Museo Archeologico di Verona si evince che lo stato di danno interno è tale da richiedere la progettazione e l'esecuzione di opportuni interventi di recupero quali le iniezioni di miscele consolidanti. La realizzazione di nuovi test nella fase successiva a quella di rinforzo consentirà di valutare l'efficacia delle operazioni stesse e la qualità dei materiali utilizzati per metterle in pratica.

7.7 OSSERVAZIONI

L'esecuzione di ricerche sperimentali in sito e in laboratorio è stata indispensabile per valutare il livello di sviluppo del nuovo software di elaborazione dei dati sonici e per testarne l'effettivo funzionamento in condizioni reali o comunque molto prossime ad esse. Al termine delle diverse analisi realizzate è possibile formulare le seguenti considerazioni:

- Il software TomoGrafiaNew funziona correttamente e rappresenta un'interessante innovazione nel campo delle indagini tomografiche. La grafica user-friendly e la possibilità di visualizzazione e gestione di tutti i dati garantita dall'interfacciamento con altre applicazioni, lo rendono uno strumento di semplice ed immediato utilizzo per gli operatori;
- L'algoritmo di ricostruzione SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) garantisce la corretta risoluzione del problema tomografico, anche se permangono alcune incertezze legate ai risultati di talune sperimentazioni. È possibile ipotizzare che la presenza di certi errori nel calcolo delle velocità sia riconducibile alla scarsità di dati disponibili che, in contrasto con la metodologia iterativa, porta a forzare la convergenza dell'algoritmo;
- Pur tenendo presente i limiti fisici legati alla propagazione delle onde nei mezzi eterogenei, è apparsa evidente la relazione esistente tra la quantità di dati acquisiti e la dimensione minima dei pixel di discretizzazione. Campagne di indagine caratterizzate da un numero elevato di misurazioni hanno consentito di eseguire elaborazioni caratterizzate da maglie di dimensioni minori, favorendo la qualità finale delle immagini tomografiche. Al contrario, i tentativi di applicare griglie piccole a campioni poveri di dati si sono rivelati infruttuosi;
- L'utilizzo di pixel aventi forma rigorosamente quadrata non comporta particolari limitazioni nel caso di indagini eseguite su pannelli murari lineari, ma può rivelarsi problematico per la discretizzazione di sezioni testate lungo quattro lati;

- L'utilizzo dell'applicazione nelle campagne di indagine in cui le caratteristiche dei campioni indagati sono note a priori è una condizione indispensabile al fine di calibrare il software e di verificarne gli eventuali limiti.

L'elaborazione e la restituzione dei dati rappresentano solamente una porzione del più vasto problema tomografico. L'implementazione di un nuovo software di analisi dei segnali può contribuire al miglioramento dell'intera metodologia di indagine, ma il suo funzionamento rimane comunque vincolato alla qualità di esecuzione delle restanti fasi della prova. L'acquisizione di un numero insufficiente di dati così come la generazione di segnali eccessivamente rumorosi sono pratiche errate che possono provocare ripercussioni negative sul software, limitandone notevolmente l'utilità o rendendolo potenzialmente inutilizzabile.

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

L'oggetto di questa tesi è stata una delle metodologie di indagine non distruttiva maggiormente utilizzate nelle fasi di diagnosi della qualità muraria e di verifica dell'efficacia degli interventi di consolidamento: l'indagine sonica tomografica. Nello specifico il lavoro, sulla base dei risultati della tesi sviluppata dall'ing. N. Monteforte nel 1998 e di alcuni casi studio individuati in letteratura, è consistito nello sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonica nella diagnosi strutturale delle murature esistenti.

Lo studio è inserito in un più ampio progetto di ricerca il cui obiettivo consiste nella creazione di una procedura veloce ed automatizzata di acquisizione ed elaborazione dei dati sonici tomografici che consenta la rapida estrazione delle informazioni utili per formulare ipotesi sulla qualità della muratura indagata e sugli eventuali interventi di consolidamento necessari. Per tale motivo allo sviluppo vero e proprio del software di restituzione tomografica sono seguiti una necessaria revisione dei processi di acquisizione ed elaborazione dei segnali sonici ed una serie di sperimentazioni volte sia alla verifica dell'effettivo raggiungimento degli obiettivi stabiliti che all'individuazione di nuovi fronti di evoluzione della metodologia tomografica.

L'avvio di tale progetto si è reso necessario in seguito alla constatazione che allo stato attuale la metodologia tomografica, al di là degli evidenti limiti fisici legati alla propagazione delle onde soniche nei solidi, risente dell'esistenza di alcuni difetti quali l'eccessiva lunghezza dei tempi di esecuzione della prova o di

elaborazione dei dati che ne limitano notevolmente la diffusione nell'ambito dello studio non invasivo del costruito.

8.1 ANALISI DI PRECEDENTI SPERIMENTAZIONI

Lo studio e la catalogazione delle ricerche sperimentali eseguite in sito e in laboratorio è stato indispensabile per ricostruire l'attuale panorama delle conoscenze riguardanti sia l'oggetto delle indagini, ossia le murature storiche, che lo stato di evoluzione della metodologia tomografica sonica.

Nell'ambito delle metodologie di indagine non distruttive, l'analisi tomografica si è rivelata essere la più adatta a fornire informazioni affidabili e complete in merito alle condizioni morfologiche interne delle pareti. A causa di limiti intrinseci, questa tipologia di prova non permette di valutare quantitativamente i più interessanti parametri meccanici delle murature ma, tra tutte le metodologie non invasive, è quella che garantisce la miglior correlazione con i dati provenienti da test distruttivi, per antonomasia i più caratterizzanti dal punto di vista fisico-meccanico. Inoltre la prova risulta essere particolarmente utile per lo studio dell'efficacia degli interventi di consolidamento.

La metodologia tomografica applicata alle murature storiche trae i suoi fondamenti da discipline mediche e geofisiche. Purtroppo però il suo sviluppo nel campo ingegneristico pare essere ancora limitato e poco approfondito. Al di là dei principi teorici di funzionamento, restano infatti da definire specificatamente molteplici parametri e funzionalità il cui contributo potrebbe essere determinate per garantire l'evoluzione della prova (passo di acquisizione, numero di misurazioni, tipologia di ray tracing, soglie di velocità ecc.). Sia le operazioni pratiche di raccolta dei dati che gli algoritmi di risoluzione risentono di tale indeterminatezza e sono tuttora empirici o legati alle abitudini dei diversi operatori. Fortunatamente però, dal punto di vista dell'evoluzione tecnologica, questa metodologia è quella più suscettibile a nuovi sviluppi.

I molteplici studi in merito all'argomento hanno evidenziato le potenzialità di questo metodo di indagine ma ne hanno spesso tralasciato o trascurato i difetti. Oltre ai già citati limiti fisici legati alle modalità di propagazione delle onde soniche

e alla loro attenuazione, è importante tenere in considerazione le problematiche connesse all'applicazione pratica della prova. Gli eccessivi tempi di acquisizione ed elaborazione, uniti alla mancanza di prescrizioni normative tecnico-pratiche hanno contribuito a limitare notevolmente l'utilizzo della prova a favore di metodologie nettamente più rapide e meno dispendiose ma meno qualificanti dal punto di vista dei risultati.

8.2 DEFINIZIONE DELLE PROBLEMATICHE

L'analisi delle modalità operative di misurazione, gestione ed elaborazione dei segnali sonici è stata utile per individuare i numerosi fattori che, all'interno del processo di esecuzione della prova, possono avere un'influenza sulla qualità dei risultati finali. Nello specifico, al fine di favorire l'evoluzione della metodologia tomografica, sono stati individuati e analizzati i seguenti ambiti di studio:

- Modalità di acquisizione e definizione dei relativi parametri:
 - Tecniche di utilizzo degli strumenti di misura;
 - Numero e qualità dei segnali da acquisire;
 - Distanza massima tra i punti di trasmissione e ricezione delle onde.
 - Dimensione della griglia di acquisizione;
 - Modalità e distanza di disposizione dei punti di trasmissione-ricezione del segnale;
 - Definizione di una eventuale relazione tra la maglia di misurazione e la mesh di elaborazione dei dati;
- Software di acquisizione;
- Sezione e maglia di elaborazione:
 - Forma e dimensione della sezione e dei pixel di elaborazione e loro rapporto;
 - Relazione tra la disposizione dei punti di misura e la tipologia di mesh da utilizzare nell'analisi tomografica;
- Ray tracing;
- Algoritmi di risoluzione;

- Modalità e software di restituzione delle immagini tomografiche;
- Integrazione tra software.

Date la complessità e la numerosità dei parametri sopra descritti, all'interno di questo lavoro di tesi l'attenzione è stata incentrata principalmente sulla fase di elaborazione dei dati. L'analisi di tutti i fattori ha rappresentato comunque la base su cui impostare il lavoro e costituisce un indispensabile punto di partenza per le future strategie di innovazione della tecnica.

8.3 NUOVO SOFTWARE DI ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

Ai fini dello sviluppo di una nuova metodologia di analisi ed elaborazione dei dati sonici tomografici è stato necessario formulare una serie di ipotesi e imporre alcune condizioni che, seppur attentamente valutate e motivate, restano suscettibili a continue modifiche ed evoluzioni.

In virtù dei numerosi casi studio disponibili in letteratura, la maggioranza dei quali caratterizzati da sezioni di forma quadrata o rettangolare, si è deciso di tralasciare temporaneamente la gestione delle forme complesse al fine di favorire una più stabile implementazione degli algoritmi di risoluzione.

L'eccessiva complessità computazionale di sviluppo di un software per la gestione dei percorsi non rettilinei ha reso necessaria l'assunzione di ipotesi di propagazione lineare delle onde elastiche, nonostante questa rappresenti una grossolana approssimazione del reale comportamento dei segnali sonici all'interno dei mezzi eterogenei.

Il linguaggio di programmazione scelto per la scrittura del software, Python, si è rivelato adatto per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti. La licenza gratuita, le numerose documentazioni presenti in letteratura e la vasta disponibilità di moduli di programmazione (algoritmi precostituiti), hanno consentito lo sviluppo di un'applicabile automatica, portabile e di facile utilizzo. Inoltre questo paradigma potrebbe in futuro consentire la creazione di un software unico di gestione dell'intero processo sonico, dall'acquisizione dei segnali alla restituzione delle immagini tomografiche.

La Tecnica Iterativa di Ricostruzione Simultanea (SIRT) sembra rappresentare, allo stato attuale delle conoscenze e in relazione al rapporto tra qualità dei risultati e tempi di elaborazione, la migliore metodologia disponibile per la risoluzione dei problemi inversi coinvolgenti le matrici sparse (matrice di ray tracing) ed è quindi la tecnica più adatta per il calcolo della distribuzione delle velocità interne ai paramenti indagati.

8.4 VERIFICHE E SPERIMENTAZIONI

L'esecuzione di ricerche sperimentali in sito e in laboratorio è stata indispensabile per valutare il livello di sviluppo del nuovo software di elaborazione dei dati sonici e per testarne l'effettivo funzionamento in condizioni. In generale l'utilizzo dell'applicazione nelle campagne di indagine in cui le caratteristiche dei campioni indagati erano note a priori è stata una condizione indispensabile al fine di calibrare il software e di verificarne gli eventuali limiti.

Il programma TomoGrafiaNew ha funzionato correttamente e, grazie alla grafica user-friendly e alla possibilità di visualizzazione e gestione di tutti i dati garantita dall'interfacciamento con altre applicazioni, si è rivelato essere uno strumento di semplice ed immediato utilizzo per gli operatori.

Pur tenendo presente i limiti fisici legati alla propagazione delle onde nei mezzi eterogenei, è apparsa evidente la relazione esistente tra la quantità di dati acquisiti e la dimensione minima dei pixel di discretizzazione. Campagne di indagine caratterizzate da un numero elevato di misurazioni hanno consentito di eseguire elaborazioni caratterizzate da maglie di dimensioni minori, favorendo la qualità finale delle immagini tomografiche. Al contrario, i tentativi di applicare griglie piccole a campioni poveri di dati si sono rivelati infruttuosi.

L'utilizzo di pixel aventi forma rigorosamente quadrata non ha comportato particolari limitazioni nel caso di indagini eseguite su pannelli murari lineari, ma potrebbe rivelarsi problematico per la discretizzazione di sezioni testate lungo quattro lati.

L'elaborazione e la restituzione dei dati rappresentano comunque una porzione del più vasto problema tomografico. L'implementazione di un nuovo

software di analisi dei segnali può contribuire al miglioramento dell'intera metodologia di indagine, ma il suo funzionamento rimane comunque vincolato alla qualità di esecuzione delle restanti fasi della prova. L'acquisizione di un numero insufficiente di dati così come la generazione di segnali eccessivamente rumorosi sono pratiche errate che possono provocare ripercussioni negative sul software, limitandone notevolmente l'utilità o rendendolo potenzialmente inutilizzabile.

APPENDICE

SCHEDE TECNICHE DEGLI STRUMENTI DI ACQUISIZIONE

Nella presente appendice vengono riportate le schede tecniche relative agli strumenti di acquisizione attualmente utilizzati dagli operatori del Laboratorio di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova.

Le specifiche sono tratte dai documenti pubblicati in rete dalle aziende produttrici delle strumentazioni, National Instruments e PCB Piezotronics.

A. MARTELLO STRUMENTATO PCB PIEZOTRONICS MODELLO o86Co3



Model Number 086C03	ICP® IMPACT HAMMER		Revision: L ECN #: 32387
Performance Sensitivity(± 15 %) Measurement Range Resonant Frequency Non-Linearity Electrical Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Discharge Time Constant Physical Sensing Element Sealing Hammer Mass Head Diameter Tip Diameter Hammer Length Electrical Connection Position Extender Mass Weight Electrical Connector	ENGLISH 10 mV/lbf ± 500 lbf pk ≥ 22 kHz ≤ 1 % 20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 ohm 8 to 14 VDC ≥ 2000 sec Quartz Epoxy 0.34 lb 0.62 in 0.25 in 8.5 in Bottom of Handle 2.6 oz BNC Jack	SI 2.25 mV/N ± 2224 N pk ≥ 22 kHz ≤ 1 % 20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 ohm 8 to 14 VDC ≥ 2000 sec Quartz Epoxy 0.16 kg 1.57 cm 0.63 cm 21.6 cm Bottom of Handle 75 gm BNC Jack	OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used. T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4 TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4 NOTES: [1] Typical. [2] See PCB Declaration of Conformance PS068 for details. SUPPLIED ACCESSORIES: Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (2) Model 084A08 Extender - Steel, 0.6" Diameter (1) Model 084B03 Hard Tip- Hard (S.S) (1) Model 084B04 Hammer Tip- Medium (White Plastic) (1) Model 084C05 Hammer Tip- Soft (Black) (2) Model 084C11 Hammer Tip- Supersoft (Red) (2) Model 085A10 Vinyl Cover For Medium Tip (Blue) (2) Model HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)
 [2]		Entered: <i>EH</i> Engineer: <i>LOS</i> Sales: <i>JDM</i> Approved: <i>EB</i> Spec Number: Date: 2/24/10 Date: 2/8/09 Date: 2/17/10 Date: 2/17/10 15273	
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.		 VIBRATION DIVISION 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 Phone: 716-684-0001 Fax: 716-685-3886 E-Mail: vibration@pcb.com	

Fig. 9.1: Specifiche del martello strumentato Pcb Piezotronics modello o86Co3 (Pcb Piezotronics).

B. MARTELLO STRUMENTATO PCB PIEZOTRONICS MODELLO o86D2o


Model Number 086D20		IMPACT HAMMER, ICP®		Revision G ECN #: 32971											
<p>Performance Sensitivity (±15 %) Measurement Range Resonant Frequency Non-Linearity</p>															
		ENGLISH	SI												
		1 mV/lbf pk ±5000 lbf pk ≥12 kHz ≤1 %	0.23 mV/N ±22240 N pk ≥12 kHz ≤1 %												
<p>Electrical Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Discharge Time Constant</p>															
		20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 Ohm 8 to 14 VDC ≥1400 sec	20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 Ohm 8 to 14 VDC ≥1400 sec												
<p>Physical Sensing Element Sealing Hammer Mass Head Diameter Tip Diameter Hammer Length Electrical Connection Position Electrical Connector</p>															
		Quartz Hermetic 2.4 lb 2.0 in 2.0 in 14.5 in Bottom of Handle BNC Jack	Quartz Hermetic 1.1 Kg 5.1 cm 5.1 cm 37 cm Bottom of Handle BNC Jack												
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</i></p>															
<p>Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option may be used.) T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4 TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4 Output Bias Voltage 8.5 to 15 VDC 8.5 to 15 VDC</p>															
<p>Notes [1] Typical.</p>															
<p>Supplied Accessories 084A60 Tip - super soft plastic, gray (1) 084A61 Tip - soft plastic, brown (1) 084A62 Tip - medium plastic, red (1) 084A63 Tip - hard plastic, black (1) HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)</p>															
		<table border="1"> <tr> <td>Entered: LLH</td> <td>Engineer: BAM</td> <td>Sales: WDC</td> <td>Approved: LLH</td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 05/20/2010</td> <td>Date: 05/12/2010</td> <td>Date: 05/12/2010</td> <td>Date: 05/20/2010</td> <td>12923</td> </tr> </table>		Entered: LLH	Engineer: BAM	Sales: WDC	Approved: LLH	Spec Number:	Date: 05/20/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/20/2010	12923		
Entered: LLH	Engineer: BAM	Sales: WDC	Approved: LLH	Spec Number:											
Date: 05/20/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/20/2010	12923											
				<p>3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com</p>											

Fig. 9.2: Specifiche del martello strumentato Pcb Piezotronics modello o86D2o (Pcb Piezotronics).

C. MARTELLO STRUMENTATO PCB PIEZOTRONICS MODELLO o86D50


Model Number 086D50		IMPACT HAMMER, ICP®		Revision F ECN #: 32971										
Performance Sensitivity (±15 %) Measurement Range Resonant Frequency Non-Linearity	ENGLISH 1 mV/lbf ±5000 lbf pk ≥5 kHz ≤1 %	SI 0.23 mV/N ±22240 N pk ≥5 kHz ≤1 %		Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option may be used.) T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4 Output Bias Voltage 8.5 to 15 VDC 8.5 to 15 VDC										
Electrical Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Discharge Time Constant	20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 Ohm 8 to 14 VDC ≥2000 sec	20 to 30 VDC 2 to 20 mA <100 Ohm 8 to 14 VDC ≥2000 sec	[1] [1]	Notes [1] Typical.										
Physical Sensing Element Sealing Hammer Mass Head Diameter Tip Diameter Hammer Length Electrical Connection Position Electrical Connector	Quartz Hermetic 12.1 lb 3.0 in 3.0 in 35 in Bottom of Handle BNC Jack	Quartz Hermetic 5.5 Kg 7.6 cm 7.6 cm 89 cm Bottom of Handle BNC Jack		Supplied Accessories 084A31 Tip - soft plastic, brown (1) 084A32 Tip - hard plastic, red (1) HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)										
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.</i> In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>														
		<table border="1"> <tr> <td>Entered: LLH</td> <td>Engineer: BAM</td> <td>Sales: WDC</td> <td>Approved: LLH</td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 05/20/2010</td> <td>Date: 05/12/2010</td> <td>Date: 05/12/2010</td> <td>Date: 05/20/2010</td> <td>12993</td> </tr> </table>		Entered: LLH	Engineer: BAM	Sales: WDC	Approved: LLH	Spec Number:	Date: 05/20/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/20/2010	12993	
Entered: LLH	Engineer: BAM	Sales: WDC	Approved: LLH	Spec Number:										
Date: 05/20/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/12/2010	Date: 05/20/2010	12993										
				3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com										

Fig. 9.3: Specifiche del martello strumentato Pcb Piezotronics modello o86D50 (Pcb Piezotronics).

D. ACCELEROMETRO SISMICO PCB PIEZOTRONICS MODELLO 393B12

Model Number 393B12	Revision J ECN #: 25881	ACCELEROMETER, ICP®, SEISMIC	
Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option may be used.)			
Notes [1] Typical. [2] Zero-based, least-squares, straight line method. [3] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.			
Supplied Accessories 081B20 Mounting Stud, with shoulder (1/4-28 to 1/4-28) (1) 085A31 Protective Thermal Jacket (1) ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point), (1) ACS-4 Single axis, low frequency phase and amplitude response cal from 0.5 to 10 Hz (1) M081B20 Mounting Stud 1/4-28 to M6 X 0.75 (1)			
Performance Sensitivity (±10 %) Measurement Range Frequency Range (±5 %) Frequency Range (±10 %) Frequency Range (±3 dB) Resonant Frequency Phase Response (±5 °) Broadband Resolution (1 to 10000 Hz) Non-Linearity Transverse Sensitivity Environmental Overload Limit (Shock) Temperature Range Base Strain Sensitivity Electrical Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Discharge Time Constant Settling Time Spectral Noise (1 Hz) Spectral Noise (10 Hz) Spectral Noise (100 Hz) Spectral Noise (1 kHz) Electrical Isolation (Case)	ENGLISH 10000 mV/g 0.5 g pk 0.15 to 1000 Hz 0.10 to 2000 Hz 0.05 to 4000 Hz ≥10 kHz 1 to 1000 Hz 0.000008 g rms ≤1 % ≤7.0 % ±5000 g pk -50 to +180 °F ≤0.0005 g/µe 18 to 30 VDC 2 to 20 mA <1500 Ohm 8 to 12 VDC ≥3.5 sec <60 sec 1.30 µg/√Hz 0.32 µg/√Hz 0.13 µg/√Hz 0.10 µg/√Hz ≥10 ⁸ Ohm Ceramic Shear Stainless Steel Hermetic 1 3/16 in x 2 3/16 in 7.4 oz 2-Pin MIL-C-5015 Top 1/4-28 Female 2 to 5 ft-lb 210 gm 2-Pin MIL-C-5015 Top 1/4-28 Female 2.7 to 6.8 Nm	SI 1019.4 mV/(m/s ²) 4.9 m/s ² -pk 0.15 to 1000 Hz 0.10 to 2000 Hz 0.05 to 4000 Hz ≥10 kHz 1 to 1000 Hz 0.000008 m/s ² rms ≤1 % ≤7.0 % ±49050 m/s ² -pk -45 to +82 °C ≤0.005 (m/s ²)/µe 18 to 30 VDC 2 to 20 mA <1500 Ohm 8 to 12 VDC ≥3.5 sec <60 sec 12.7 (µm/sec ²)/√Hz 3.1 (µm/sec ²)/√Hz 1.3 (µm/sec ²)/√Hz 1.0 (µm/sec ²)/√Hz ≥10 ⁸ Ohm Ceramic Shear Stainless Steel Hermetic 30.2 mm x 55.6 mm 210 gm 2-Pin MIL-C-5015 Top 1/4-28 Female 2.7 to 6.8 Nm	[1] [2] [1]
		Entered: GLB Engineer: WDC Date: 02/23/2007	Sales: BAM Date: 02/23/2007
		Date: 02/23/2007	Spec Number: 393-2120-80
3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com			

Fig. 9.4: Specifiche dell'accelerometro sismico Pcb Piezotronics modello 393B12 (Pcb Piezotronics).

E. CHASSIS NATIONAL INSTRUMENTS NI PXI-1042Q

Tab. 9.1: Specifiche dello chassis modello NI PXI-1042Q (National Instruments).

Generali	
Prodotti	PXI-1042
Formato	PXI Piattaforma
Tipo di prodotto	Chassis
Tipo di bus PXI	PXI Hybrid Compatible
Codice Prodotto	778636-01
Sistema operativo/Target	Real-Time , Windows
Supporto LabVIEW RT	Si
Chassis	
Alimentazione	AC
Numero di slot	8
Numero di slot di periferica PXI	7
Numero di slot di periferica PXI Express	0
Numero di slot di periferica ibridi	0
Ampiezza di banda si sistema massima	132 MB/s
Compatibile con moduli 3U PXI e CompactPCI	Si
Opzione di montaggio su rack anteriore o posteriore	Si
Controller integrato	No
Monitoraggio tensione e controllo di inibizione potenza remoti	Si
Alimentazione totale disponibile	500 W
Intervallo di tensione di input	100 V - 240 V
Intervallo di tensione di input	50 Hz - 60 Hz
Alimentazione field-replaceable	Si
Livello automatico di pressione sonora della ventola	50.5 dBA
Potenza sonora automatica della ventola	58.8 dBA
Livello alto di pressione sonora della ventola	58.7 dBA
Potenza sonora alta della ventola	67.7 dBA
Selettore ventola Auto/High	Si
Numero di ventole	2
Capacità ventola e capacità di raffreddamento per slot	60 cfm

Specifiche fisiche	
Lunghezza	39.65 cm
Ampiezza	27.13 cm
Altezza	17.7 cm
Connettore I/O	Connettori BNC
Temperatura di funzionamento	0 °C
Temperatura di funzionamento	55 °C
Altitudine massima	2000 m

F. CONTROLLER EMBEDDED NATIONAL INSTRUMENTS NI PXI-8102

Tab. 9.2: Specifiche del controller embedded modello NI PXI-8102 (National Instruments).

Features		
CPU—NI PXI-8102	Intel® Dual-Core Celeron® T3100 (1.9 GHz dual core processor), 800 MHz FSB	
On-die L2 cache	1 MB	
DDR2 RAM, PC2 6400	1 GB Standard, 4 GB Maximum	
Hard Drive	80 GB Serial ATA, minimum	
Ethernet	10/100/1000 BaseTX	
Serial Ports (RS-232)	Yes (1)	
Parallel Port	Yes (1)	
Hi-Speed USB (2.0) Ports	Yes (2)	
PS/2 Keyboard/Mouse Connector	No	
PXI Trigger Bus Input/Output	Yes	
Installed Operating System	Windows Vista Business, Windows Vista Business downgraded to Windows XP Professional	
CPU—NI PXI-8101	Intel® Celeron® Processor 575 (2.00 GHz single core processor), 667 MHz FSB	
Electrical		
Voltage (V)	Current (Amps)	
	Typical	Maximum
+3.3 V	2.50 A	4.80 A
+5 V	4.00 A	7.80 A
+12 V	0.001 A	0.075 A
-12 V	0 A	0 A

Physical	
Board dimensions	2-slot 3U PXI module 4.0 cm × 13.0 cm × 21.6 cm (1.59 in. × 5.14 in. × 8.51 in.)
Slot requirements	One system slot plus one controller expansion slot
Compatibility	Fully compatible with PXI specification
Weight	0.645 kg (1.42 lb) typical
Environment	
Maximum altitude	2,000 m (at 25 °C ambient temperature)
Pollution Degree	2
Operating Environment	
Ambient temperature	5 to 50 °C (Tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2.)
Relative humidity	10% to 90%, noncondensing (Tested in accordance with IEC-60068-2-56.)
Storage Environment	
Ambient temperature	-40 to 65 °C (Tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2.)
Relative humidity	5% to 95%, noncondensing (Tested in accordance with IEC-60068-2-56.)
Shock and Vibration	
Operational shock	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (Tested in accordance with IEC-60068-2-27. Test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F.)
Random vibration	
Operating	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms} (with solid-state hard drive)
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (Tested in accordance with IEC-60068-2-64. Nonoperating test profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3.)

G. SISTEMA INTEGRATO NATIONAL INSTRUMENTS NI PMA-1115

AC/DC Adapter

AC adapter input.....	100 to 240 VAC, 47 to 63 Hz, 1.8 A maximum
AC adapter output.....	12 VDC, 5 A
Power switch	Left side of product

LCD

..CD input.....	12 VDC, 5 A
Type	TFT LCD touch screen
Auto-power switch	LCD goes into standby when no signal is present
Diagonal size.....	15 in. (38.11 cm)
Maximum resolution	1024 x 768
Display area	11.97 by 8.98 in. (30.41 by 22.81 cm)
Contrast ratio	500:1
Brightness	300 NITS
Frame rate	60 Hz (typical), 75 Hz (maximum)
Color	16.2 M colors
Viewing angle	160 deg up and down 160 deg right and left
Control system	Onscreen display
Connectivity.....	VGA

Keyboard and Mouse

Keyboard	105-key, English language
Mouse	Touchpad
Connectivity.....	USB

Mechanical

Overall dimensions	14.75 by 2.31 by 11 in. (37.47 by 5.87 by 27.94 cm) without mounting plate
Weight.....	5.0 kg (11 lb)
..CD monitor folding angle.....	Up to 80 deg

Environmental

Maximum altitude.....	2,000 m (800 mbar) (at 25 °C ambient)
Pollution degree.....	2
Operating location	Indoor use only
Ambient temperature range	0 to 50 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2; meets MIL-PRF-28800F Class 3 low-temperature limit)
Relative humidity range	10 to 90%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Storage Environment

Ambient temperature range	-20 to 60 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity range.....	10 to 90%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Shock and Vibration

Operational shock	10 g peak, half-sine, 11 ms pulse (tested in accordance with IEC-60068-2-27)
-------------------------	--

Random Vibration

Operating.....	5 to 500 Hz, 0.31 g _{rms}
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.46 g _{rms} (tested in accordance with IEC-60068-2-64; nonoperating test profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3)

Fig. 9.5: Specifiche del sistema integrato modello NI PMA-1115 (National Instruments).

H. SCHEDA DI ACQUISIZIONE NATIONAL INSTRUMENTS NI PCI-4472

Tab. 9.3: Specifiche della scheda di acquisizione modello NI PCI-4472 (National Instruments).

Generali	
Prodotti	PCI-4472
Famiglia di prodotti	Dynamic Signal Analyzers
Formato	PCI
Codice Prodotto	778663-01 , 778348-01
Sistema operativo/Target	Real-Time , Linux , Windows
Supporto LabVIEW RT	Si
Tipi di misura	Accelerometer , Tensione
Conformità ROHS	Si
Condizionamento di segnale	Corrente di eccitazione , Filtro anti-aliasing

Input Analogico	
Canali	0 , 8
Canali Single-Ended	8
Canali Differenziali	0
Risoluzione	24 bits
Frequenza di campionamento	102.4 kS/s
Massima tensione analogica in ingresso	10 V
Intervallo massimo di tensione	-10 V - 10 V
Sensibilità massima di intervallo di corrente	1.19 μ V
Intervallo minimo di tensione	-10 V - 10 V
Sensibilità minima di intervallo di tensione	1.19 μ V
Numero di intervalli	1
Campionamento simultaneo	Si
Memoria su scheda	1023 campionamenti
THD (Total Harmonic Distortion)	97 dB
Intervallo dinamico	111 dB
Corrente di eccitazione	4 mA
Output Analogico	
Canali	0
I/O digitale	
Canali bidirezionali	0
Canali Input-Only	0
Canali Output-Only	0
Counter/Timers	
Numero di Contatori/Timer	0
Specifiche fisiche	
Lunghezza	17.5 cm
Ampiezza	10.7 cm
Connettore I/O	SMB maschio
Temporizzazione/Trigger/Sincronizzazione	
Trigger	Digitale , Analogico
Bus di sincronizzazione (RTSI)	Si

I. SCHEDA DI ACQUISIZIONE NATIONAL INSTRUMENTS NI PCI-4472b

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels	
NI 4472 Series	8, simultaneously sampled
NI 4474 Series	4, simultaneously sampled
Input configuration	Unbalanced differential
Resolution	24 bits, nominal
Type of ADC	Delta-sigma
Oversampling, for sample rate (f_s):	
1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s	128 f_s
51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s	64 f_s
Sample rates (f_s)	1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s > 51.2$ kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq 51.2$ kS/s
Frequency accuracy	± 25 ppm
Input signal range	± 10 V peak
FIFO buffer size	1,024 samples
Data transfers	DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC)	± 3 mV, max
Gain (amplitude accuracy)	± 0.1 dB, max, $f_{in} = 1$ kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)	
Positive input	1 M Ω in parallel with 60 pF
Negative input (shield)	50 Ω in parallel with 0.02 μ F
Flatness (relative to 1 kHz)	± 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled
-3 dB bandwidth	0.4863 f_s
Input coupling	AC or DC, software-selectable
AC -3 dB cutoff frequency	
NI 4472, NI 4474	3.4 Hz
NI 4472B	0.5 Hz
Overvoltage protection	
Positive input	± 42.4 V
Positive inputs protected	CH<0..7>
Negative input (shield)	Not protected, rated at ± 2.5 V
Common-mode rejection ratio (CMRR)	
$f_{in} < 1$ kHz	>60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband)	DC (0 Hz) to 0.4535 f_s
Stop band	0.5465 f_s
Alias rejection	110 dB
Spurious-free dynamic range	130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s
118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s THD, $f_{in} = 1$ kHz	
0 dBFS input	<-90 dB
20 dBFS input	<-100 dB
60 dBFS input	<-80 dB
IMD	<-100 dB (CCIF 14 kHz + 15 kHz)
Crosstalk ¹ (channel separation), $f_{in} = 0$ to 51.2 kHz	
Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7	
Shorted input	<-90 dB
1 k Ω load	<-80 dB
Other channel combinations	
Shorted input	<-100 dB
1 k Ω load	<-90 dB
Phase linearity	< ± 0.5 deg
Interchannel phase mismatch	< f_n (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 deg
Interchannel gain mismatch	± 0.1 dB
Filter delay through ADC	38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level	5.000 V ± 2.5 mV
Temperature coefficient	± 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Long-term stability	± 20 ppm/ $\sqrt{1,000}$ h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)	
Current	4 mA, $\pm 5\%$
Compliance	24 V
Output impedance	>250 k Ω at 1 kHz
Current noise	<500 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Triggers

Analog Trigger

Source	CH<0..7>
Level	-10 to +10 V, full scale, programmable
Slope	Positive or negative (software-selectable)
Resolution	24 bits, nominal
Hysteresis	Programmable

Digital Trigger

Compatibility	5 V TTL/CMOS
Response	Rising or falling edge
Pulse width	10 ns, minimum
Bus Interface	
Type	Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC	
PXI	400 mA, maximum
+5 VDC	
PCI	2.6 A, maximum
PXI	2.2 A, maximum
+12 VDC	120 mA, maximum
-12 VDC	120 mA, maximum

Physical

Dimensions (not including connectors)	
PCI	17.5 by 10.7 cm (6.9 by 4.2 in.)
PXI	16.0 by 9.9 cm (6.3 by 3.9 in.)
	(1 slot)
Analog I/O connectors	SMB male
Digital trigger connector	SMB male

Maximum Working Voltage

Maximum working voltage refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.

Channel-to-earth	10 V, installation category I
Channel-to-channel	10 V, installation category I

Environmental

Operating temperature	0 to 50 $^{\circ}$ C
Storage temperature	-20 to 70 $^{\circ}$ C
Relative humidity	10 to 90%, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution degree (indoor use only)	2

Fig. 9.6: Specifiche della scheda di acquisizione modello NI PCA-4472b (National Instruments).

BIBLIOGRAFIA

Abbaneo S., Berra M., Binda L. (1996), *"Pulse velocity test to qualify existing masonry walls: usefulness of waveform analyses"*. Proc. 3rd Conference: Nondestructive evaluation of civil structures and materials; Boulder, Colorado, September 1996; pp. 81-95.

Aerojet General Corporation (1967), *"Investigation on sonic testing of masonry walls"*. Final Report to the Dept. of General Services of Architecture and Construction, State of California, 1967.

Amodio R. (1999), *"Indagine e valutazioni strutturali per il recupero dei Tezoni di terra dell'Arsenale di Venezia"*, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 1999-2000.

Baronio G., Binda L. (1988), *"I risultati delle analisi chimiche sulle malte, La Chiesa di San Procolo in Verona"*, Ed. La Grafica, pp. 175-180, 1988. (Ref. 65)

Baronio G., Binda L. (1991), *"Experimental approach to a procedure for the investigation of historic mortars"*. 9th Int. Brick/Block Masonry Conf., Berlino, vol. 3, pp. 1397-1405, 1991. (Ref. 96)

Benedetti&Partners (2010), *"Indagine conoscitiva, studio della vulnerabilità sismica e progettazione esecutiva degli interventi di riparazione dei danni conseguenti al sisma nella Regione Abruzzo del giorno 6 aprile 2009 in un edificio parzialmente inagibile (Esito tipo e) di proprietà privata sito in Via San Matteo 2/Corso Sallustio, L'Aquila -Loc. Pizzoli"*

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.

Biasiolo, M. (2000), “*Analisi strutturale sulla torre di piazza in Vicenza*”, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2000-2001.

Binda L., Mirabella Roberti G., Abbaneo S. (1994), “*The diagnosis research project, Earthquake Spectra*”, Vol. 10, n.1, 1994, pp. 151-170. (Ref. 120)

Binda L., Modena C., Baronio G., Anzani A, (1998), “*Tecniche di indagine e di consolidamento per le murature in pietra in Ambiente Costruito*”, aprile-giugno 1998

Binda L., Saisi A., Tiraboschi C. (2001a), “*Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures*”, Proceedings of the 8th International Conference and Exhibition, Structural Faults & Repair, (NDT&E International, vol. 34, Issue 2, March 2001, pp. 123-138.

Binda L., Saisi A., Tongini Folli R., Zanzi L. (2001b), “*Boroscopy, Flat Jacks and NDT as complementary tools*”, RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures, 12-14 November 2001, Mantova, Italy, pp. 279-286.

Binda L., Saisi A. (2001c), “*Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*”, Le mura di Lucca: dal restauro alla manutenzione programmata, Atti del Convegno, Lucca, 17-19 maggio 2001 a cura di Maria Adriana Giusti, Alinea Editrice 2005.

Binda L., Saisi A. (2001d), “*Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches*”, Historical Constructions, PB Lourenço & P. Proca (Eds), University of Minho, Guimarães, pp. 29-46

Binda L., Saisi A., Zanzi L. (2003), “*Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo' l’Arena (Italy)*”, NDT&E International, vol. 36 (2003) pp. 215–227.

Binda L., Cantini L., Cardani G., Saisi A., Tiraboschi C. (2007a), *“Use of flat-jack and sonic tests for the qualification of Historic masonry”*, The 10th North American Masonry Conference, St. Louis, Missouri, USA.

Bresolato F., Pasin N. (2008), *“Indagini sperimentali con prove soniche su murature in pietra consolidate mediante iniezioni. Verifica dell'iniettabilità della muratura e controllo dell'efficacia dell'intervento di iniezione”*, Tesi di laurea, Rel. Valluzzi M.R., Università degli Studi di Padova, 2007-2008.

Cantini L., Felicetti R., Zanzi L., Munda S., Meana M., Binda L. (2012), *“Sonic tomography applied to historic masonry structures: Validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes”*, 14th International Conference Structural Faults & Repair, 3rd-5th July 2012, Edinburgh, Scotland.

Cappello E., (2011), *“Applicazione di prove sperimentali distruttive in sito per il raggiungimento del livello di conoscenza LC3”*, Tesi di laurea, Rel. Da Porto F., Università degli Studi di Padova, 2010-2011.

Colonna A. (1998), *“Consolidamento dei muri di sponda dei canali di Venezia. Tecniche di intervento e controllo in sito”*. Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università di Padova, 1998-1999.

Da Porto F. (1999), *“Indagini sperimentali sull'efficacia di tecniche di consolidamento di murature storiche in pietra”*, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 1999-2000.

Da Porto F., Modena C., Valluzzi M.R., Binda L., Saisi A. (2001). *“Experimental Tests on Irregular Masonry”*, ONESITEFORMASONRY Project, On site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Deliverable 9.2.

Da Porto F., Valluzzi M.R., Modena C. (2003), *“Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings”*, Proceedings

BB 85-CD, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, September 16-19, 2003 in Berlin, Germany.

Dalla Benetta M. (2012), *“Qualificazione di murature storiche: Procedure sperimentali in sito e calibrazione in laboratorio”*, Tesi di Dottorato, Superv. Modena C., Co-tut. Da Porto F., Università degli Studi di Padova.

Emolo A. (2011), *“Corso di metodi diretti e inversi”*, Università degli studi di Napoli, 2011

Epperson G.S., Abrams D.P. (1989), *“Non destructive evaluation of masonry buildings”*, Advanced Construction Technology Center, Doc. N. 89-26-03, Urbana Illinois, October 1989.

Fontanini F. (2011), *“Tomografia sismica per indagini archeologiche ad alta risoluzione”*, Tesi di laurea, Relatore prof. Pipan M, Università degli studi di Trieste, 2010-2011.

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.

Jurina L. (2007), *“La caratterizzazione meccanica delle murature. Parte prima: prove penetrometriche. Parte seconda: martinetti piatti. Parte terza: prove dinamiche”*, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale.

Lenzi G., Ludwig N., Rosina E., Saisi A., Binda L. (1997), *“Analisi di tessiture murarie mediante termografia e georadar”*, V Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO, Orvieto, pp. 142-146, 1997. (Ref. 190)

Levorato C. (2001), *“Analisi del comportamento statico della facciata della Chiesa di S. Maria del Carmine in Padova”*, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2001-2002.

Loeffelstiel E. D. (2005), *“Metodologie non distruttive per la diagnosi delle strutture murarie: applicazione di prove soniche e confronto con procedure di maggiore*

invasività". Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2004-2005.

McCann M., Forde M. C. (2001), "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures". NDT & E International, Volume 34, Issue 2, March 2001, pp. 71-84.

Meana M.F. (2012). "Applicazioni di tomografie acustiche per lo studio del costruito storico e la progettazione degli interventi conservativi", Tesi di laurea, Relatore Prof. Ing. Felicetti R., Politecnico di Milano, 2011-2012

Modena C., Bettio C. (1994), "Experimental characterisation and modelling of injected and jacketed stone masonry walls". Italian French symposium on strengthening and repair of structures in seismic area, Nizza, 1994.

Modena C. (1997), "Criteria for cautious repair of historic buildings, evaluation and strengthening of existing masonry structures", L. Binda & C. Modena Ed., RILEM, pp 25-42.

Modena C., (2000a), "Interpretazione dei risultati ottenuti dalle prove in sito nell'ambito delle tre convenzioni con gli istituti di ricerca di Firenze e Milano e modellazione del comportamento strutturale dei componenti rinforzati", Relazione finale, Convenzione di ricerca tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università degli Studi di Padova.

Modena C., Pineschi F. e Valluzzi M. R. (2000b), "Valutazione della vulnerabilità sismica di alcune classi di strutture esistenti. Sviluppo e valutazione di metodi di rinforzo", CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Roma.

Modena C. (Responsabile) (2009), "Indagini diagnostiche su tipologie murarie", linea di ricerca n. 1, Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura, Reluis, Marzo 2009.

Mondin S. (2003), "Uso di metodi non distruttivi per la valutazione del comportamento strutturale di edifici storici. Applicazione all'Altes Museum di

Berlino”, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2003-2004.

Monteforte N. (1998), “*Applicazione della tomografia sonica nei problemi di diagnosi strutturale*”, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 1997-1998.

Oliosio R. (2003), “*Uso di metodi non distruttivi per la valutazione del comportamento strutturale di edifici storici. Applicazione a Palazzo Bottagisio a Verona*”, Tesi di laurea, Rel. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2003-2004.

ONSITEFORMASONRY (2004), “*On-site investigation techniques for structural evaluation of historic masonry buildings*”, 2004.

Riva G., Bettio C., Modena C. (1997), “*The use of sonic wave technique for estimating the efficiency of masonry consolidation by injection*”, Proc. 11th International Brick/Block Masonry Conference, Shanghai, China, October 1997, pp. 28-39.

Rossi P.P. (1990), “*Analisi delle condizioni statiche delle strutture murarie. Indagini conoscitive e monitoraggio*”, Collana di ingegneria strutturale - No 9.

Rossi P.P. (1995), “*Analisi delle condizioni statiche della basilica di San Marco in Venezia*”, Convegno per il IX centenario della Dedicazione della Basilica di S.Marco, Venezia, maggio 1995.

Santunione S., Secchiero N. (2011), “*Indagini sperimentali con prove di compressione e compressione e taglio per la valutazione dell'efficacia di interventi di iniezione su muratura in pietra a più paramenti*”, Tesi di laurea, Rel. Da Porto F., Università degli Studi di Padova, 2010-2011.

Schuller M. (2003), “*Nondestructive Testing and Damage Assessment of Masonry Structures*”, Invited paper for the Journal of Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 5, No. 4, John Wiley & Sons, 2003.

Scodeller M. (2005), “*Indagini soniche per la diagnosi di strutture murarie a torre*”, Tesi di laurea, Rel. M.R. Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2005-2006.

Semenzato D. (2004), “*Indagini strutturali e verifica della vulnerabilità sismica della Chiesa di S. Maria Assunta a Reggio Emilia*”, Tesi di laurea, Rel. M.R. Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2004-2005.

Valle S., Zanzi L., Binda L., Saisi A., Lenzi G. (1998), “*Tomography for NDT applied to masonry structures: Sonic and/or EM methods*” In “*Arch bridges*”, A. Sinopoli Editor, Balkema, Rotterdam, pp. 243-252.

Valluzzi M.R., Da Porto F., Modena C. (2004), “*Behaviour and modelling of strengthened three-leaf stone masonry walls*”, Materials and Structures, RILEM 2004.

Valluzzi M.R., Mazzon N., Munari M., Casarin F., Modena C. (2009), “*Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions*”, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.

Zanchetta G. (2013), “*Valutazione dell'affidabilità di prove di indagine sperimentale a diverso grado di invasività su muratura in pietra a tre paramenti*”, Tesi di laurea, Rel. Valluzzi M.R., Università degli Studi di Padova, 2012-2013.

Zanzi L., Lualdi M., Saisi A. (2001), “*Sonic and radar tomography on masonry structure*”, RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of masonry Structures, 12-14 November 2001, Mantova Italy.

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

ASTM E 519-02: *“Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”*.

ASTM C597-09: *“Standard test method for pulse velocity through concrete”*.

ASTM C 1196-04: *“Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using the flat-jack method”*.

ASTM C 1197-04: *“Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flat-jack method”*.

Circolare M.II.TT. 02/02/2009 n.617: *“Istruzioni per l'applicazione delle nuove “Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14/01/2008”*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Suppl. Ord. n.27 alla G.U. n.47/2009.

DELIVERABLE D11.1.: *“Technical guidelines for an appropriate use of the suggested equipment”*, ONSITEFORMASONRY, Project n° EVK4-2001- 00091, Contract n° EVK4-CT-2001-00060, August 2004.

D.M.II.TT. 14/01/2008: *“Norme Tecniche per le Costruzioni”*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. 04/02/2008 n.29.

D.I. 23/05/2005: *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni”*, Decreto Interministeriale, G.U./2006.

DPCM 12/10/2007: *“Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale”*, Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, G.U. n.24/2007.

DPCM 09/02/2011: *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”*, Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, G.U. n.47/2011.

EN 14579:2005: *“Metodi di prova per pietre naturali: determinazione della velocità di propagazione del suono”*.

NORMAL 22/86: *“Misura in laboratorio e in sito della velocità apparente (o virtuale) di propagazione del suono (onde longitudinali) nei materiali porosi da costruzione”*.

RILEM TC 76-LUM: *“Tests for masonry materials and structures - LUM C3 Cyclic shear test for masonry panels designed to resist seismic forces”*.

RILEM TC 127-MS: *“MS.D.1 Measurement of mechanical pulse velocity for masonry”*, published in *Materials and Structures*, Vol. 29, October 1996, pp. 463-466.

RILEM TC 177-MDT: *“Masonry durability and on-site testing' – LUM D.4: In-situ stress tests based on the flat jack”*.

RILEM TC 177-MDT: *“Masonry durability and on-site testing' – LUM D.5: In-situ stress - strain behavior tests based on the flat jack”*.

UNI EN 1052-1:2001: *“Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione “*.

UNI EN 12504-2:2001: *“Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico”*.