ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DISTART - Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio

> Tesi di laurea in Calcolo Automatico delle Strutture LS

ESPERIENZA PRESSO IL CANTIERE DI STUDIO E DI INDAGINI DIAGNOSTICHE DELLA GHIRLANDINA DI MODENA: APPLICAZIONE DI PROVE SONICHE

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Francesco Ubertini

CORRELATORI:

Dr. Arch. Camilla Colla Arch. Rossella Cadignani Chiar.mo Prof. Ing. Giovanni Pascale

> Anno Accademico 2008/2009 Sessione III

CANDIDATO: Valentino Santoro



Laboratorio Resistenza Materiali

www.larm.ing.unibo.it

Ai miei nonni, Giuseppe e Caterina.

"Bisogna fare la propria vita, come si fa un'opera d'arte. Bisogna che l'uomo d'intelletto sia opera di lui. La superiorità è tutta qui." (Gabriele D'Annunzio)

Indice

Introduzione	1
1. Peculiarità e problematiche della Ghirlandina	3
1.1 Cronologia costruttiva e maestranze intervenute nell'edificazione della t	orre
e del Duomo	4
1.2 Il terreno di fondazione e il rinvenimento dell'antica Via Emilia	7
1.3 Le fasi costruttive	. 10
1.3.1 Prima fase	14
1.3.2 Seconda fase	. 15
1.3.3 Terza e quarta fase	16
1.4 L'interazione terreno-struttura e il problema dei cedimenti differenziali	17
1.5 Fenomeni di dissesto, lesioni strutturali e degrado dei materiali	21
2. L'indagine conoscitiva degli edifici storici	25
2.1 Il percorso della conoscenza del manufatto	26
2.2 Applicabilità di prove non distruttive o minimamente distruttive	31
3. Prove non distruttive sulla muratura	34
3.1 Metodi di indagine basati sulla propagazione delle onde	34
3.1.1 Indagini soniche	37
3.1.2 Tomografia sonica	39
3.1.3 Il sistema impact-echo	40
3.1.4 Termografia	42
3.1.5 Georadar	43
3.2 Cases history nell'ambito dell'applicazione delle prove soniche	44
3.2.1. Il caso della Cattedrale di Noto	44
3.2.2 Prove soniche in edifici strategici siti nella Provincia di Imperia.	Un
approccio di tipo statistico	47
4. Prove soniche alla Ghirlandina: acquisizione ed analisi dati	55

4.1 Descrizione della procedura applicativa	55
4.2 Tempi di volo e calcolo delle velocità di propagazione del segnale	58
4.2.1 Piano interrato, -2,79m	58
4.2.2 Piano terra, 0,00m	75
4.2.3 Piano uno, 3,44m	110
4.2.4 Piano due, 9,62m	140
4.2.5 Piano tre, 23,00m	183
4.2.6 Piano quattro, 30,00m	227
4.2.7 Stanza dei torresani, 35,42m	248
4.2.8 Stanza delle campane, 42,57m	257
4.2.9 Cuspide, livello zero, 49,36m	271
4.2.10 Cuspide, livello uno, 57,12m	285
4.2.11 Cuspide, livello due, 62,00m	292
4.2.12 Cuspide, livello tre, 66,00m	306
4.2.13 Cuspide, livelli quattro e cinque, 75,90m	313
4.3 Documentazione fotografica delle operazioni di cantiere	326
5. Elaborazioni dei dati di velocità soniche	332
5.1 Visualizzazione dei valori delle velocità medie	340
5.2 Frequenze massime e lunghezza d'onda minime dei segnali	355
5.3 Analisi statistica delle velocità	367
Conclusioni	378
Bibliografia	382

Introduzione

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 strutturale. Tuttavia, nel caso specifico del patrimonio culturale tutelato, data la sua rilevanza e la necessità della conservazione fisica del bene, la raccolta dei dati riguardanti l'originaria tecnica costruttiva, i materiali impiegati e le modifiche intercorse nel tempo dovute ai fenomeni di danneggiamento, causati in vario modo dal degrado dei materiali o dagli eventi naturali, rappresenta un aspetto particolarmente critico. Infatti, a fronte della necessità di raccogliere una mole di informazioni significativa rispetto al problema specifico che deve essere esaminato, non è possibile sottovalutare l'impatto, sia in termini di costi, sia a livello di danno strutturale, che può comportare l'indagine diretta del bene.

La recente Direttiva per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, la quale fa riferimento alle norme tecniche per le costruzioni, riconosce in questo contesto l'importanza delle indagini diagnostiche quale parte integrante del processo di valutazione di strutture esistenti. Fra le varie tecniche diagnostiche applicabili in sito alle murature, quelle non distruttive, come ad esempio le prove soniche, assumono un ruolo crescente, seppure esse consentano di ottenere, rispetto ai metodi distruttivi, informazioni di carattere qualitativo e di natura puntuale.

Il presente elaborato documenta l'esperienza personale vissuta presso il prestigioso cantiere di idagini diagnostiche della Ghirlandina di Modena, nel corso della quale sono state applicate le prove soniche ai fini della caratterizzazione della muratura. Il lavoro affrontato rientra nell'ambito di un più ampio programma di studi e di indagini sperimentali non distruttive finalizzate alla raccolta di dati riguardanti le caratteristiche della muratura, in vista della valutazione del comportamento statico e dinamico della torre. I risultati preliminari ottenuti attraverso l'applicazione delle prove soniche sono mostrati nel seguito.

Nel capitolo 1 vengono ripercorse, attraverso quasi tre secoli, le fasi costruttive che hanno intersessato la Ghirlandina, facendo anche riferimento alle maestranze in esse coinvolte. Dopo aver trattato, successivamente, gli aspetti riguardanti il sistema terreno-fondazione, i cui cedimenti differenziali sembrano aver afflitto la struttura sin dalle sue prime fasi costruttive, vengono presentate le problematiche che in vario modo interessano la torre.

Nel capitolo 2 viene descritto il percorso multiscala e interdesciplinare proposto dalla Direttiva dedicata al patrimonio culturale, il quale conduce, nell'ambito del monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici tutelati, all'acquisizione della conoscenza del manufatto. Ponendo l'attenzione sulla fase diagnostica del percorso di conoscenza, viene offerta una breve panoramica sulle comuni problematiche di indagine e sui relativi metodi, non distruttivi o minimamente distruttivi, applicabili.

Nel capitolo 3 vengono presentati i principi di alcune tecniche non distruttive basate sulla propagazione delle onde, ponendo l'attenzione sulla tecnica sonica. Essa viene trattata anche attraverso la recensione di due casi di studio, ad uno dei quali si è fatto successivamente riferimento ai fini di una possibile trattazione statistica dei dati acquisiti presso la Ghirlandina.

Nel capitolo 4, dopo aver descritto le fasi di progettazione delle acquisizioni e le procedure operative messe in atto nel corso della campagna di prove soniche alla Ghirlandina, sono mostrati i risultati preliminari dell'analisi dei dati in termini di tempo di volo, tempo di contatto del martello, velocità di propagazione, frequenza massima e lunghezza d'onda minima del segnale. Non sono state invece valutate le caratteristiche di attenuazione del segnale. I risultati vengono suddivisi per quota, per singola posizione di prova e per metodo di trasmissione del segnale sonico. Il capitolo 5 contiene, infine, le successive elaborazioni dei dati.

1. Peculiarità e problematiche della Ghirlandina

La Ghirlandina rappresenta, insieme al Duomo, una delle più significative realtà del Romanico medievale e dell'epoca dei Comuni. Il valore storico ed artistico del complesso monumentale è stato riconosciuto attraverso la dichiarazione di Patrimonio dell'Umanità, arrivata nel 1997 con l'istituzione del sito Unesco "Modena. Cattedrale, Torre Civica e Piazza Grande" (Fig. 1.1).

Tale riconoscimento ha comportato l'assunzione di precisi impegni da parte delle istituzioni, le quali, al fine di garantire la manutenzione e la conservazione fisica della Ghirlandina, hanno promosso studi e ricerche scientifiche attraverso l'istituzione di un Comitato formato da esperti delle diverse discipline coinvolte.



Fig. 1.1 – Complesso monumentale del Duomo e della Ghirlandina (*Piccinini, 2009*).

Sulla base dei risultati delle prime ricerche già completate (*Cadignani, 2009*), è stato progettato il restauro della torre ed è in corso il primo stralcio dei lavori, secondo una articolazione che segue l'erogazione dei finanziamenti. Altre attività di ricerca sono tutt'ora in corso, in particolare si stanno completando le indagini

per la valutazione del comportamento statico e dinamico della Ghirlandina (*Cadignani, 2009*). La valutazione del comportamento strutturale è possibile solo attraverso la conoscenze della storia costruttiva, che nel complesso copre un periodo di circa tre secoli, e dunque dei materiali impiegati nelle diverse fasi costruttive e delle tecniche che possono essere state impiegate dalle maestranze intervenute nel cantiere della Ghirlandina e del Duomo, le cui vicende sono storicamente intrecciate. Un interesse particolare deve essere posto nei confronti delle problematiche che in vario modo interessano la torre e che verosimilmente possono avere origine dalle caratteristiche del sistema terreno-fondazione, il quale attraverso l'innesco di cedimenti differenziali è responsabile dell'evidente fuori piombo in direzione sud-ovest.

1.1 Cronologia costruttiva e maestranze intervenute nell'edificazione della torre e del Duomo

La torre Ghirlandina è parte del contesto monumentale che si affaccia sulla Piazza Grande di Modena, nel centro del tracciato medievale della città, lungo l'asse dell'antica Via Emilia.

Il complesso, costituito dalla torre e dalla cattedrale, fu edificato per volere della comunità modenese tra il 1099 ed il 1319. La prima data è riconducibile alla fondazione del Duomo e viene ricordata attraverso una lapide collocata sulla sua facciata, mentre alla seconda data viene attribuita la conclusione dei lavori della torre (*Piccinini, 2009*).

La Ghirlandina è alta più di novanta metri ed è costituita da un fusto a sei piani di forma quadrata e lato di circa 10 m, sormontato da un tamburo ottagonale e da una cuspide (Fig. 1.2). Secondo una tipologia assai ricorrente nelle torri romaniche, il basamento è costituito da una massa compatta e nei piani superiori è possibile trovare delle aperture monofore che danno luce al vano interno del fusto e delle bifore e trifore negli ultimi due piani della parte quadrata. La torre è cinta nella parte superiore ottagonale da due balaustre marmoree, nelle quali risiede probabilmente l'origine del nome del monumento.



Fig. 1.2 – Sezioni verticali della torre Ghirlandina (Giandebiaggi et al., 2009).

Tanto per i materiali impiegati, muratura di mattoni rivestita all'esterno da materiale lapideo, quanto per i criteri costruttivi, la torre sembra svilupparsi in perfetta armonia con il progetto del Duomo (*Piccinini, 2009*).

La Ghirlandina ha svolto a partire dalle sue origini la funzione di torre campanaria del Duomo, ma anche di torre civica essendo documentata fino alla seconda metà dell'Ottocento la presenza stabile, al quinto piano, dei "torresani", custodi e campanari che vegliavano sulla città dando i segnali per l'apertura e la chiusura delle porte o suonando le campane per scandire le ore ed allertare la città in caso di pericolo.

Dal punto di vista storico, la Ghirlandina ha con la cattedrale uno strettissimo rapporto e introdurre le vicende che hanno interessato quest'ultima, risulta sensibilmente interessante per ripercorrere la cronologia costruttiva della torre sottolineando anche quali sono state le maestranze e le relative influenze tecniche e stilistiche intervenute nel contesto monumentale (*Dieghi, 2009*).

La storia della costruzione della cattedrale modenese può essere riassunta nelle tre date riportate dalle epigrafi collocate rispettivamente sulla facciata, sull'abside maggiore e sul fianco sud. La prima epigrafe fissa al 6 giugno 1099 la posa della prima pietra; la seconda ricorda la traslazione delle reliquie del santo patrono Geminiano nella cattedrale, avvenuta il 30 maggio 1106; la terza celebra la solenne consacrazione della cattedrale, in data 12 luglio 1184 (*Piccinini, 2009*).

Intorno alle prime due date ruotano le presenze sul cantiere del Duomo dello scultore Wiligelmo e dell'architetto Lanfranco, probabilmente entrambi originari della diocesi di Como. Il periodo è caratterizzato dal recupero dell'antico, come è dimostrato dall'utilizzo pressoché esclusivo di materiali di reimpiego ricavati in maniera considerevole attraverso lo scavo delle rovine dell'antica *Mutina* romana.

La terza data si può invece già inquadrare all'interno di un'epoca diversa, che vede all'opera i Campionesi, titolari di botteghe familiari attive con continuità nel cantiere per diverse generazioni. I maestri portarono a compimento l'opera già iniziata da Wiligelmo e Lanfranco e completarono la costruzione della Ghirlandina.

Nei primi cinque piani della torre, costruiti entro la fine del XIII secolo, sembrano essere stati attivi in tempi diversi tre cantieri. Il più antico vide la realizzazione del primo piano, completato il quale i lavori furono interrotti con lo scopo di concentrare tutti gli sforzi sul Duomo o forse perché già in quella prima fase il terreno di fondazione aveva cominciato a cedere in maniera preoccupante.

Ad una fase leggermente più avanzata sembra invece appartenere la realizzazione del secondo piano, mentre ai maestri Campionesi si può attribuire la realizzazione del terzo, quarto e quinto piano. È del 1244 un documento che attesta la presenza prolungata dei Campionesi nella Fabbrica del Duomo: si tratta del rinnovo di un contratto che aveva vincolato e vincolava nuovamente la famiglia di architetti e scultori ad una collaborazione qualificata e continua nel tempo nei lavori di costruzione dell'attuale complesso monumentale. Il patto originario si deve ad Anselmo da Campione, a cui viene tradizionalmente attribuita la realizzazione del pontile del Duomo, costruito attorno al 1184. Il rinnovo del contratto di cui sopra viene stipulato da Enrico da Campione, mentre al suo discendente Enrico è dovuta la conclusione dell'opera dei campionesi con la costruzione del pulpito della cattedrale nel 1322 (*Dieghi, 2009*).

Il documento sembra testimoniare quindi come tutte le opere realizzate all'interno del cantiere dalla seconda metà del XII al XIV secolo siano riferibili a maestranze legate a questa famiglia.

1.2 Il terreno di fondazione e il rinvenimento dell'antica Via Emilia

Nel 1899 la realizzazione di un sondaggio ai piedi della Ghirlandina mise alla luce il paramento delle fondazioni, la cui base fu intercettata a circa 5,4 m di profondità sotto il piano campagna di allora. Il paramento murario, realizzato in laterizi di reimpiego di epoca romana, si presentava regolare nella parte superiore ed irregolare in quella inferiore, ravvisando in questo senso la testimonianza secondo la quale la torre poteva essere stata innalzata sui resti di una costruzione più antica, probabilmente di età longobarda, utilizzata come base (Labate, 2009). Tra il 2007 ed il 2008 il Comitato scientifico per il restauro della Ghirlandina ha richiesto nuove indagini, realizzate attraverso una serie di carotaggi meccanici confidando nell'archeologia con lo scopo di ottenere una triplice chiave di lettura: riguardo all'evoluzione del tessuto urbanistico nell'area monumentale Duomo-Ghirlandina; alla determinazione del piano di calpestio al momento della costruzione dei due monumenti e dunque all'entità dell'assestamento e sprofondamento della Ghirlandina; alla lettura archeologica degli alzati con il tentativo di precisare le principali fasi costruttive della torre. La posizione dei carotaggi è indicata in figura 1.3.



Fig. 1.3 – Planimetria con ubicazione in rosso degli scavi (scavi A-F, sezioni 1-13) e in nero dei carotaggi (1-20) (*Labate, 2009*).

Attraverso le indagini e la successiva ricostruzione di un profilo stratigrafico dell'area di Piazza Grande sono stati individuati resti di età romana a partire da circa 6-6,5 m di profondità dal piano campagna. Complessivamente il deposito archeologico di età romana varia da uno spessore di circa 1,5 m, a sud di Piazza Grande, a circa 4 m in prossimità delle absidi del Duomo; in corrispondenza della Ghirlandina lo spessore è di circa 1,6 m. Il minor spessore in corrispondenza della torre, rispetto a quello rilevato in prossimità del Duomo, sarebbe un aspetto riconducibile alla presenza dell'antica Via Emilia, la quale, a differenza delle aree prospicienti, può non essere stata oggetto di rialzamenti di terreno legati ad attività dell'uomo, quali demolizioni e riporti, nel corso dell'età romana (*Labate, 2009*).

Sedimenti alluvionali ricoprono i resti romani, pareggiando le irregolarità sottostanti e colmando la depressione in corrispondenza della Ghirlandina; essi

offrono un nuovo piano di calpestio ad una profondità compresa tra 1,7 e 2 m rispetto a quello attuale.

A partire da tale piano sono poi documentabili resti dell'insediamento medioevale, che raggiungono in alcuni punti dell'area monumentale l'attuale piano di calpestio.

I lavori di restauro del Duomo eseguiti tra il 1913 ed il 1919 e gli scavi più recenti realizzati in via Lanfranco (la quale costeggia il Duomo) hanno messo alla luce alcuni resti strutturali riconducibili ai muri di fondazione di una cattedrale altomedioevale, in asse con quella attuale, ed il lacerto di un muro con andamento curvilineo pertinente forse ad un battistero staccato dalla cattedrale.

In particolare il muro curvilineo riferito al battistero presenta la risega di fondazione a circa 1 m di profondità, quota da riferire al piano di calpestio esterno dell'antica cattedrale.

Gli scavi di via Lanfranco hanno anche evidenziato la presenza di un altro tratto di muro di fondazione in laterizi di reimpiego di età romana, la cui risega è di una dozzina di centimetri superiore a quella del muro curvilineo. Questa struttura è da ricondurre ad un tratto perimetrale della cattedrale i cui resti sono stati rinvenuti nel 1913. Con la demolizione della vecchia cattedrale il piano di calpestio venne innalzato di circa 80 cm fino a raggiungere la quota attuale, 34 m slm. A partire da questa quota iniziarono quindi i lavori per l'edificazione del Duomo e della Ghirlandina, le cui fondazioni raggiungono rispettivamente le quote -1,5 m e -3,6 m (*Labate, 2009*).

L'aspetto assai importante è che, al momento della costruzione della Ghirlandina, lo scavo di fondazione raggiunse i depositi alluvionali senza intercettare però i depositi archeologici di età romana, presenti a quote molto inferiori. Inoltre, la torre fu edificata al di sopra di una serie di massicciate dell'antica Via Emilia. Quanto detto esclude quindi la possibilità che la Ghirlandina sia stata costruita su un edificio di età romana. Un sondaggio effettuato in corrispondenza del muro di fondazione della torre ha inoltre escluso l'ipotesi avanzata in seguito agli scavi del 1899 secondo la quale la torre possa essere stata edificata al di sopra di una costruzione di età longobarda. Il sondaggio ha infatti evidenziato che la fondazione è tutta riconducibile ad un'unica fase costruttiva (*Labate, 2009*).

1.3 Le fasi costruttive

Il tema delle fasi costruttive che hanno interessato la Ghirlandina ha suscitato un vasto dibattito critico, con tesi discordanti in merito alla cronologia realizzativa dei primi cinque piani della parte quadrata dell'edificio. Un riscontro in fonti antiche non è possibile poiché la documentazione archivistica esistente fino al 1200 è andata perduta (*Dieghi, 2009*). Tale vuoto implica pertanto la necessità di ricercare una chiave di lettura cronologica nello stile degli elementi costruttivi e nei materiali impiegati.

Gli studiosi restano concordi nell'affermare che la costruzione della Ghirlandina ebbe inizio contemporaneamente all'edificazione della cattedrale, tra il 1099 ed il 1106, periodo nel quale lavorarono ai due cantieri le medesime maestranze legate inizialmente alla figura dell'architetto Lanfranco. Per i due edifici è evidente l'utilizzo degli stessi materiali, i già citati mattoni di reimpiego, recuperati in gran parte negli scavi delle rovine dell'antica Mutina romana, oltre a materiale lapideo di rivestimento.

L'interpretazione della data graffita riportata su un bassorilievo, murato nel lato est della Ghirlandina sotto la cornice del primo piano, rinvenuto da un canonico della prima metà dell'Ottocento, costituisce l'origine di idee discordanti in merito alla cronologia della conclusione dei primi lavori e delle successive fasi costruttive della torre (*Dieghi, 2009*). Si riportano di seguito dei cenni ad alcune delle ipotesi diversamente avanzate da parte dei critici, ai quali segue la proposta di Labate basata sugli studi di carattere archeologico oggetto del precedente paragrafo.

Concordano nell'attribuire all'iscrizione graffita la data del 1159 Maestri¹ e Venturi², entrambi impegnati nell'analisi delle caratteristiche storico-artistiche degli elementi costruttivi e decorativi della torre.

Il 1179 appare invece la data più probabile secondo De Francovich³, anno entro cui secondo lo studioso si compie l'innalzamento della torre fino al penultimo piano quadrato e vengono realizzati, probabilmente da maestranze seguaci ai

¹ Vincenzo Maestri, 1830-1892, architetto.

² Adolfo Venturi, 1856-1941, storico dell'arte.

³ Géza De Francovich, storico dell'arte.

campionesi, i due capitelli posti internamente al quinto piano della torre, raffiguranti David e la danza e i Giudici.

Secondo Quintavalle⁴, l'iscrizione graffita non sarebbe riferibile di per sé alla torre, che intorno agli anni 1169-1179 non sarebbe stata ancora completata, ma alla canonica o a qualche altro edificio relativo alla torre.

Quintavalle avanza le sue ipotesi in merito alla cronologia delle prime fasi costruttive sulla base del confronto fra gli elementi stilistici, le altimetrie e le proporzioni del fusto della Ghirlandina e quelle della zona absidale della cattedrale.



Fig. 1.4 – Ipotesi delle fasi costruttive secondo Quintavalle (Montorsi, 1976).

Secondo lo studioso, il progetto iniziale doveva prevedere la costruzione dei primi quattro piani della torre, il primo eretto entro il 1106, gli altri databili entro il 1130. La differenziazione fra i quattro piani ed il quinto risiederebbe nella mancanza in quest'ultimo delle lesene, oltre al fatto che i capitelli delle trifore

⁴ Carlo Arturo Quintavalle, 1936, storico dell'arte.

sembrerebbero appartenere ad un periodo diverso rispetto a quello a cui sarebbero riconducibili i capitelli delle bifore sottostanti. Nella sua ricostruzione, Quintavalle sostiene inoltre che il quinto piano sia stato aggiunto dai Campionesi intorno al 1160-1170 e che il sesto, all'epoca dotato di torrette angolari, sia stato invece costruito entro il 1217 (Fig. 1.4). Lo studioso deduce l'esistenza del sesto piano già in quella data attraverso un documento che riporta nel 1217 la cronaca di un fulmine che avrebbe colpito uno dei torreselli angolari.

Salvini⁵ afferma, diversamente, che la costruzione nel suo complesso sarebbe stata totalmente campionese e che a Lanfranco sia attribuibile la scelta del luogo in cui collocare la torre e gettare le fondamenta, motivando tale argomentazione con l'unicità di stile che caratterizza, lungo lo sviluppo della torre, i primi cinque piani. Egli colloca l'edificazione della Ghirlandina tra il 1160 ed il 1179. Nel 1261 la torre sarebbe stata poi sopraelevata al sesto piano, munito di torrette angolari (Fig. 1.5)



⁵ Roberto Salvini, 1912-1985, storico dell'arte e critico dell'arte

Montorsi⁶ accetta come veritiera l'ipotesi secondo la quale l'iscrizione graffita presente nel lato est della torre riporti l'anno 1169. Sostiene che nel 1106 la torre arrivasse al quarto piano e avesse una copertura a quattro spioventi di coppi, mentre riconduce al 1169 la costruzione del quinto piano, caratterizzato da una copertura a guglia piramidale o conica e dalla presenza di edicolette minori agli angoli della parte quadrata. Nel 1261 sarebbero stati edificati il sesto piano, anch'esso di forma quadrata, ed un ulteriore piano a forma di prisma a base ottagonale con copertura a cuspide ed edicolette periferiche. Nel frattempo all'interno della costruzione sarebbero stati realizzati i pilastri angolari di consolidamento e le scale (Fig. 1.6)



Fig. 1.6 – Ipotesi delle fasi costruttive secondo Montorsi (Montorsi, 1976).

La lettura archeologica degli alzati, resa possibile dalle indagini richieste dal Comitato scientifico per il restauro ed effettuate nel periodo fra il 2007 ed il 2008,

⁶ William Montorsi, 1922-2002, storico dell'arte.

ha offerto un nuovo approccio alla comprensione delle diverse fasi costruttive che hanno interessato la torre. Lo studio recente ha permesso di affermare che la costruzione della Ghirlandina è avvenuta secondo le quattro fasi descritte nel seguito (*Labate, 2009*) e indicate in figura 1.7.



Fig. 1.7 – Schema delle fasi costruttive della Ghirlandina (Labate, 2009).

1.3.1 Prima fase

Alla prima fase costruttiva sono da riferire le fondazioni e la base del fusto, corrispondente alle prime file di conci lapidei subito al di sopra della prima

cornice. Si tratta di un'altezza complessiva di circa 13 m comprese le fondazioni, affini come tecnica costruttiva a quelle del Duomo.

La fase è caratterizzata dall'uso prevalente di laterizi di reimpiego di età romana uniti da malta. Il paramento interno ed i quattro pilastri in muratura che contengono la scala, sono realizzati quasi esclusivamente con mattoni romani sesquipedali rifiniti a martellina, allo stesso modo dei laterizi utilizzati nella costruzione delle absidi del Duomo. Con i medesimi materiali è realizzata la copertura a volta della scala. Il paramento esterno della torre è costituito da conci lapidei, essenzialmente pietra di Aurisina e pietra di Vicenza, disposti secondo una tessitura irregolare.

Sui prospetti è possibile notare la presenza di buche pontaie, disposte su sei o sette file secondo uno schema apparentemente diverso da quello che è possibile osservare nella porzione della struttura riconducibile alla successiva fase costruttiva.

L'analisi visiva degli elementi decorativi dell'esterno di questa prima parte della costruzione mostra archetti intersecati in corrispondenza della prima cornice, motivo scultoreo introdotto a Modena da Lanfranco. I motivi decorativi presenti in corrispondenza degli angoli della suddetta cornice sono invece di scuola wiligelmica.

La causa determinante della sospensione dei lavori in seguito al completamento della base del fusto non è conosciuta, tuttavia appare plausibile l'ipotesi secondo la quale la torre cominciasse a manifestare segni preoccupanti di assestamento legati a cedimenti del terreno.

1.3.2 Seconda fase

Alla seconda fase è riconducibile la costruzione del fusto e della prima loggia fino alla quinta cornice. La struttura viene innalzata di 32 m, i quali vanno a sommarsi ai 13 della fase precedente.

Anche in questa fase vengono usati principalmente laterizi di reimpiego di età romana, molti dei quali contrassegnati da rigature generate dall'uso della sega, molto evidenti sui mattoni utilizzati negli archetti che sormontano le scale, negli angoli degli stipiti, in alcune facciate dei pilastri che salgono lungo il fusto, nelle

arcate che sorreggono la scala e nei mattoni che compongono il contorno delle bifore e trifore.

In corrispondenza della prima loggia sono invece utilizzati sia laterizi di reimpiego di epoca romana sia mattoni medievali di uso primario il cui modulo, 27,5 x 14 x 5,9 cm, è prossimo a quello dei mattoni medievali utilizzati nella costruzione del paramento interno dei muri perimetrali del Duomo.

Sono presenti laterizi di reimpiego, lavorati a martellina o segati, anche nelle pareti della scala a chiocciola che collega la prima loggia alla seconda.

La muratura esterna del fusto e della prima loggia è rivestita con conci lapidei di reimpiego tessuti in maniera regolare, la cui petrografia è data principalmente dalla pietra di Aurisina, dal Rosso Ammonico ed in misura minore dalla tracheite e dalla pietra di Vicenza.

Le buche pontaie dei prospetti esterni sono disposte secondo cinque file ben allineate fino all'altezza della quinta cornice. Anche le pareti interne del fusto presentano una tessitura ordinata di buche pontaie, le cui file coincidono con quelle dell'esterno.

Nella porzione della torre realizzata nel corso della seconda fase costruttiva è evidente come siano presenti stili ed elementi differenti da quelli del periodo lanfranchiano-wiligelmico, riconducibili a maestranze campionesi. È possibile osservare infatti nelle realizzazioni una cultura provenzale e ben differenziata dai motivi decorativi propri della scuola emiliana.

Gli elementi scultorei che contraddistinguono questa fase sono individuabili nella seconda e quarta cornice, come pure nei capitelli della prima loggia i cui nessi stilistici e materiali impiegati ricordano il pontile campionese del Duomo realizzato attorno al 1184, data alla quale è possibile pensare di attribuire la conclusione della seconda fase costruttiva.

1.3.3 Terza e quarta fase

La terza fase costruttiva, databile al 1261, è da riferire alla costruzione della seconda loggia, il cui paramento esterno utilizza come pietra di rivestimento l'ammonitico veronese; la facciata non presenta buche pontaie. L'interno della loggia è intonacato e non è possibile verificare il tipo di mattone utilizzato.

La quarta fase costruttiva, del 1319, vede il completamento della torre Ghirlandina attraverso la guglia. La struttura muraria utilizza un nuovo tipo di mattone, caratterizzato da un modulo leggermente più piccolo rispetto a quello impiegato nella prima loggia e nel Duomo, e le cui misure sono 27,5 x 12,5 x 4,7 cm. L'esterno utilizza lo stesso materiale impiegato nel paramento della precedente fase costruttiva.

1.4 L'interazione terreno-struttura e il problema dei cedimenti differenziali

La Ghirlandina è caratterizzata da una pendenza non omogenea lungo la sua altezza, essendo dimostrabili varie correzioni apportate, nella verticalità dell'asse, dalle maestranze intervenute nell'edificazione della struttura. Questo dimostra il fatto che la torre abbia cominciato ad inclinarsi sotto il suo peso già durante le diverse fasi costruttive. Le circostanze che hanno determinato la pendenza della Ghirlandina, ma che allo stesso modo ne hanno garantito la sopravvivenza nel corso dei secoli, risiedono nel meccanismo dell'interazione fra il terreno e la struttura. L'interazione è influenzata in generale dalla resistenza e dalla rigidezza del terreno di fondazione. Nel caso specifico la resistenza meccanica ha permesso al terreno al di sotto della struttura di superare efficacemente momenti di criticità probabilmente innescati dalla prossimità fra la capacità portante del sistema fondazione-terreno ed il carico unitario trasmesso al terreno attraverso il peso della struttura ad ogni nuova fase costruttiva. Gli incrementi di sollecitazione prodotti dalla costruzione della torre e le interruzioni dei lavori verificatesi a causa di qualche vicissitudine, hanno permesso al terreno di fondazione di consolidarsi e al contempo di migliorare le proprie caratteristiche meccaniche in funzione della sollecitazione da sostenere. La rigidezza del terreno ha inoltre permesso alla Ghirlandina di conservare la stabilità dell'equilibrio nei confronti delle azioni che possono essere intervenute nel perturbare la sua configurazione, raggiunta attraverso il consolidamento del terreno di fondazione.

Con lo scopo di chiarire gli aspetti legati all'interazione fra il terreno e la struttura e valutare nello specifico lo stato del terreno di fondazione, il Comitato Scientifico per il restauro della torre ha commissionato delle indagini geotecniche, per lo studio delle quali è stato fatto riferimento al quadro delle conoscenze storiche già consolidate, relative alla struttura di fondazione della Ghirlandina, le quali vengono di seguito accennate.

Gli scavi effettuati alla fine dell'ottocento in corrispondenza dell'angolo nord-est della torre rilevarono che il paramento lapideo della torre proseguiva fino a -1,36 m, profondità alla quale si osservava la presenza di una banchina marmorea sporgente circa 50 cm dal muro. Alla banchina seguiva la muratura laterizia di fondazione fino alla profondità di 5,45 m.

Le ricerche effettuate avanzarono la possibilità che il terreno al di sotto della muratura di fondazione non fosse stato consolidato attraverso palificazioni o altri interventi. La posizione di due dei carotaggi effettuati nel 2007 è riportata in figura 1.8 (*Lancellotta, 2009*).



Fig. 1.8 - Posizione dei carotaggi G4 e G5 (Lancellotta, 2009).

Il sondaggio G4 è stato realizzato alla distanza di 1,65 m dal paramento della torre, secondo un'inclinazione di 45°. Esso ha intercettato, alla profondità di 1,48 m al di sotto dell'attuale piano campagna, la banchina che gira intorno alla torre. Ha inoltre permesso di appurare che la fondazione è interamente cava e che la muratura che la compone presenta uno spessore di 3 m.

Il sondaggio è stato spinto fino a 8,48 m dal piano campagna, profondità entro la quale non sono state riscontrate tracce di palificazioni. La successione stratigrafica in corrispondenza dell'asse della torre mostra inoltre, come già riportato nel paragrafo relativo alla descrizione del terreno fondale, la presenza di riporti antropici medievali nell'intervallo compreso fra i 3,96 e i 5,79 m di profondità, seguiti da depositi di alluvioni medievali fino a 6,57 m. Ad una profondità compresa fra 6,57 e 7,42 m sono stati ritrovati riporti antropici romani ed il basolato della Via Emilia.

L'assenza di palificazioni mostrerebbe una scarsa attenzione delle maestranze dell'epoca verso la necessità di consolidare il terreno di fondazione in vista della costruzione della Ghirlandina. Probabilmente degli interventi specifici non sono stati applicati perché non si prevedeva inizialmente che la torre avesse potuto raggiungere le dimensioni e lo sviluppo in altezza che possiamo oggi apprezzare. Tuttavia se le indagini qui descritte hanno permesso di stimare, per la struttura muraria di fondazione, uno spessore relativamente consistente, il dubbio in merito a quali potessero essere le dimensioni della torre, secondo il progetto iniziale, rimane non del tutto chiarito. Quello che è possibile notare dalla figura 1.8 è che la muratura di fondazione, a prescindere dal suo spessore, non presenta un allargamento ragionevole rispetto alle dimensioni in pianta del fusto della torre. Se si tiene conto, poi, della profondità di interramento del sistema di fondazione allora è ragionevole pensare che la struttura ripartisca il proprio peso, attraverso la fondazione, su un'area di dimensioni limitate producendo quindi uno stato tensionale elevato e mal sfruttando la capacità resistente del terreno, il quale seppure abbia superato nel tempo degli stati critici, come già riportato all'inizio del paragrafo, evitando il collasso, non ha permesso di escludere l'innesco di cedimenti differenziali.

Dal punto di vista geotecnico aver ritrovato la Via Emilia sotto alla Ghirlandina è particolarmente significativo se i dati attuali sulla profondità del rinvenimento sono confrontati con la profondità della stessa via romana in condizioni di campo

libero. L'analisi delle profondità permette infatti di determinare una stima attendibile del cedimento all'origine dei movimenti della torre e dunque della sua pendenza.

Con lo scopo di raggiungere tale obiettivo sono state prestabilite le posizioni di altri due sondaggi, denominati G1 e G5, i quali hanno condotto ai medesimi risultati. Nella nuova posizione di carotaggio, configurata a partire da una distanza di 4,50 m dal paramento della torre e secondo una inclinazione di 30° rispetto alla verticale, si è potuto intercettare il basolato dell'antica via per ben due volte, una alla profondità di 5,45 m e a ridosso della fondazione, l'altra alla profondità di 6,75 m e al di sotto della fondazione stessa.

Sulla base dei sondaggi effettuati e delle conoscenze storiche sono state dunque formulate due ipotesi in merito alla stima del cedimento del terreno di fondazione della Ghirlandina. Accettando come veritiera l'idea, avanzata in seguito ai sondaggi di fine ottocento, secondo cui la profondità del basolato della Via Emilia alla data di costruzione della torre doveva essere di 4,90 m e assumendo come piano di riferimento quello corrispondente alla banchina marmorea, come detto prima intercettata a 1,36 m sotto il piano campagna, si avrebbe una differenza fra le due profondità di 3,54 m (4,90 – 1.36 m).

La stessa operazione, effettuata nella configurazione attuale porterebbe invece ad una differenza fra le due profondità di 5,27 m (6,75 - 1,48 m). Dunque il cedimento subito dalla parete nord della torre risulterebbe pari a 1,73 m (5,27 - 3,54 m). La differenza di 25 cm fra la profondità attuale della banchina marmorea, 1,73 m, e quella riconducibile invece all'epoca di costruzione della torre, 1,48 m, sarebbe imputabile al cedimento manifestatosi durante la realizzazione della fondazione, il cui piano di appoggio originario si troverebbe a 3,90 m dal piano campagna attuale.

L'analisi sopra riportata corrisponde a un limite inferiore del cedimento della torre, in quanto la profondità della Via Emilia rilevata attraverso i saggi della fine dell'ottocento è certamente influenzata dall'interazione con la torre e non può essere considerata in condizioni di campo libero.

Se in alternativa si fa riferimento ai risultati di un ulteriore sondaggio, denominato E2, che collocano la Via Emilia alla profondità di 4,80 m dall'attuale piano campagna, si dedurrebbero un cedimento della parete nord della torre pari 1,95 m (6,75 - 4,80 m) e un cedimento della parete sud di circa 2,19 m. Il cedimento

verificatosi durante la fase di realizzazione della fondazione risulterebbe pari a 47 cm e il piano di posa si collocherebbe a 3,70 m dall'attuale piano campagna. Risulta inoltre interessante osservare come un sondaggio eseguito a una distanza di 3 m dall'abside sud della cattedrale e con un'inclinazione di 45°, denominato S5, colloca la fondazione del Duomo a una profondità di 3,68 m: al riguardo la seconda ipotesi indicherebbe lo stesso piano di fondazione per le absidi e la torre.

1.5 Fenomeni di dissesto, lesioni strutturali e degrado dei materiali

La geometria della Ghirlandina non è riconducibile a quella di un solido semplice e rettilineo, in quanto la torre è il risultato di successive correzioni della verticalità apportate durante le fasi costruttive descritte. Le complesse vicende costruttive si rispecchiano nelle diverse inclinazioni della torre lungo il suo sviluppo in altezza e una quantificazione univoca del dissesto che interessa la struttura non è pertanto possibile. L'analisi delle inclinazioni è stata condotta sulla base del rilievo fotogrammetrico e topografico svolto nel 2006 (*Blasi et al., 2009*).

La torre mostra un diverso andamento dell'inclinazione nelle due direzioni principali di pendenza, il sud (verso il Duomo) e l'ovest. I vari piani della torre presentano infatti una inclinazione sostanzialmente omogenea in direzione ovest, mentre in direzione sud mostrano un andamento disomogeneo (Fig. 1.9), tipico delle costruzioni che subiscono cedimenti già nel corso dell'edificazione ed in cui ciascun nuovo piano viene realizzato a piombo su una struttura già inclinata. Da questo si evince che l'inclinazione verso sud abbia cominciato a manifestarsi già a partire dalle prime fasi costruttive, forse in ragione dell'azione considerevole esercitata dal peso del Duomo sul terreno di fondazione, mentre l'inclinazione verso ovest si è sviluppata dopo il completamento della torre (*Blasi et al., 2009*).

I rilievi mostrano due variazioni significative nell'inclinazione in direzione sud, una tra il secondo ed il terzo piano e una fra il quinto ed il sesto, mentre nel terzo, quarto e quinto piano l'inclinazione è quasi costante. Questo è dovuto probabilmente al verificarsi di lunghe interruzioni del processo costruttivo, durante ciascuna delle quali la torre ha continuato ad essere interessata dai cedimenti. La mappatura delle pietre (*Lugli et al., 2009*) mostra altresì una netta discontinuità nei materiali impiegati ai livelli di cui sopra.



Fig. 1.9 – Fotopiani dei prospetti (Giandebiagi et al., 2009).

A partire dalla costruzione del sesto piano, l'aumento dell'inclinazione verso sud si è quasi interrotto, probabilmente a causa di un effetto stabilizzante innescato dalla costruzione, nel 1338, di arconi di collegamento con il Duomo (*Blasi et al., 2009*). Tali elementi strutturali, realizzati in realtà per una esigenza di tipo funzionale rappresentata dalla costruzione di uno spazio sopraelevato adibito a sagrestia, dovrebbero aver svolto un ruolo statico fondamentale, permettendo sostanzialmente di rallentare il processo di avvicinamento reciproco della Ghirlandina e del Duomo e di ostacolare lo sprofondamento del lato sud della torre.

In direzione ovest, invece, l'inclinazione ha continuato a manifestare i maggiori incrementi, sembra in ragione anche delle modifiche apportate, alla fine dell'Ottocento, a edifici contigui alla torre e delle demolizioni di strutture che precedentemente svolgevano un ruolo di contrasto nei confronti dei movimenti in tale direzione.

Nel 1901 furono eseguiti i primi rilievi della geometria esterna della parte prismatica della torre, cioè fino al sesto piano; si riuscì a stabilire una pendenza in direzione sud-ovest pari al 2,16 %, e uno strapiombo pari a 1,05 m rispetto a un'altezza di 48,80 m. Il confronto con i dati attuali mostra come lo strapiombo dell'asse al sesto piano sia aumentato, in un secolo, di 13 cm, dato di poco superiore all'incremento medio al secolo dalla data di costruzione a oggi, a dimostrazione che i cedimenti della torre non siano rallentati, come generalmente accade dopo una fase iniziale più accentuata (*Blasi et al., 2009*).

Le lesioni presenti in alcuni elementi strutturali (Fig. 1.10a) sono fra le conseguenze patologiche del dissesto della torre, oltre ad essere in alcuni casi attribuibili alla presenza di elementi costruttivi spingenti come le scale rampanti del fusto, la volta che copre la cella campanaria e la guglia piramidale (Blasi et al., 2009). Tuttavia appare frequente come la muratura di pesanti strutture storiche, come la Ghirlandina, mostri tipici fenomeni di deterioramento quali fessure sottili, a volte molto diffuse, o distacco locale del paramento più esterno in corrispondenza di zone caratterizzate da forti concentrazioni dello stato tensionale. Spesso i danneggiamenti non sono attribuibili a cause quali eventi sismici, incrementi istantanei dei carichi esterni, o ancora degrado chimico-fisico dei materiali di base, ma all'effetto prevalente dei carichi morti rispetto al fattore tempo (Binda et al., 2001). La particolare attenzione che deve destare la presenza delle lesioni, unitamente ai movimenti del terreno nei quali la Ghirlandina sembra essere ancora coinvolta, nasce dal fatto che, in presenza di elevati stati di sollecitazione su una muratura poco resistente, uno stato di danno già esistente può condurre lentamente la struttura ad un collasso parziale o totale, seppur a lungo termine. Questo è quanto si è verificato, ad esempio, nel caso della Torre Civica di Pavia, crollata improvvisamente nel 1989 senza apparenti segni premonitori e senza alcuna causa legata direttamente ad un evento naturale, quale il sisma (Binda et al., 1992).

Un altro problema che interessa la Ghirlandina, anche se non di natura strutturale, ma che è comunque utile accennare brevemente, è costituito dai fenomeni di degrado (1.10b) che colpiscono in vario modo i diversi materiali del paramento lapideo esterno e che causano la perdita del rilievo delle sculture, la disgregazione, l'esfoliazione e dunque il distacco di alcuni frammenti.



Fig. 1.10 – a) Fratturazione di un concio lungo una lesione (*Lugli et al. 2009*);
b) degrado in un concio di Rosso Ammonitico (*Baldan et al., 2009*);

2. L'indagine conoscitiva degli edifici storici

La conservazione degli edifici storici, usualmente caratterizzati da complessità nei volumi, in ragione dell'evoluzione della struttura in fasi costruttive differenti, è spesso il frutto di ispezioni e indagini puntuali che hanno come obiettivo la formazione di un'accurata conoscenza nei confronti di tutti i dettagli che possono riguardare le parti strutturali e non (*Binda, 2005*).

Una metodologia di indagine può essere applicata ai fini della conoscenza della costruzione. Le operazioni possono in vario modo comprendere: indagini geognostiche; studi geometrici, topografici e fotogrammetrici; test di laboratorio su campioni rappresentativi dei materiali impiegati nella costruzione dell'edificio; prove non distruttive rivolte a individuare umidità, vuoti o strati multipli della muratura; prove leggermente distruttive. Tali operazioni possono essere affiancate da documentazione storica d'archivio e da un'attenta osservazione in sito che permettano, eventualmente, di cogliere maggiori informazioni in merito all'evoluzione storica dell'edificio (*Binda, 2005*).

La ricerca scientifica condotta sulla Ghirlandina di Modena è la dimostrazione di come sia possibile articolare una serie di studi pluridisciplinari, tuttora in corso, con l'obiettivo di definire il quadro delle conoscenze propedeutiche ai possibili interventi e alle scelte attuative nel contesto di un progetto per la conservazione del monumento. Le diverse attività, coordinate attraverso l'istituzione di un Comitato scientifico da parte dell'Amministrazione comunale, hanno permesso, infatti, di conoscere la storia e le caratteristiche della torre in vista di un corretto restauro, mirato alle effettive necessità.

Un approccio metodologico ritenuto interessante è quello suggerito dalla Direttiva del 12 ottobre 2007 "per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni". Il metodo, che fissa in maniera puntuale le fasi del percorso della conoscenza del costruito storico, è trattato nel successivo paragrafo.

Lo scopo del presente capitolo, è quello di mostrare come l'esperienza dell'applicazione delle prove soniche sulla Torre Civica di Modena e, in generale,

l'indagine della muratura storica attraverso i metodi non distruttivi possano essere inquadrate in un contesto assai ampio e complesso in cui il tema della conservazione di un edificio storico non può prescindere dalla conoscenza della sua evoluzione dall'origine allo stato odierno, della fabbrica e dei materiali impiegati, delle tecniche costruttive e della struttura portante.

2.1 Il percorso della conoscenza del manufatto

La conoscenza di un edificio storico può essere conseguita secondo diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche e delle indagini sperimentali. Lo studio delle caratteristiche della fabbrica è teso alla definizione di un modello che consenta sia un'interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale, sia l'analisi strutturale dalla quale è invece possibile ricavare informazioni di tipo quantitativo. In breve, secondo le attuali normative italiana ed europea, il grado di attendibilità del modello è strettamente legato alla quantità e alla qualità delle informazioni acquisite, che concorrono a definire dei livelli di conoscenza (LC), ad approfondimento crescente, dell'edificio in esame. Dal livello di conoscenza dipende l'assunzione di un adeguato fattore di confidenza (FC) da impiegare nelle analisi finalizzate alla valutazione dello stato attuale dell'edificio o degli eventuali interventi (*Alessandri et al., 2006*).

Secondo la Direttiva del 12 ottobre 2007 le indagini devono concentrarsi prevalentemente sull'individuazione della storia del manufatto, sulla geometria degli elementi strutturali, sulle tecniche costruttive e sui fenomeni di dissesto e di degrado.

Il primo passo nella conoscenza del manufatto consiste nell'identificazione dell'organismo e nella sua localizzazione sul territorio, al fine di individuare la sensibilità della costruzione nei riguardi dei possibili rischi, come ad esempio quello sismico. Devono essere analizzati il rapporto del manufatto con il suo intorno e la caratterizzazione dei rapporti spaziali e funzionali tra l'edificio ed eventuali manufatti contermini. In questa prima fase conoscitiva può essere utile sviluppare un rilievo schematico, di carattere preliminare, o degli eidotipi che documentino la consistenza di massima del manufatto e l'eventuale presenza di

elementi di particolare pregio, come apparati decorativi fissi o beni artistici mobili, che possano in un certo modo condizionare sia il livello di rischio cui la struttura è sottoposta, sia la progettazione dei possibili interventi diretti sul bene (*Dir. PCM 12/08/2007*).

Il rilevo geometrico dell'edificio, nel suo stato attuale, permette la conoscenza della geometria degli elementi strutturali e non strutturali. Il rilievo deve essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi. La descrizione stereometrica della struttura comporta l'individuazione delle sue caratteristiche plano-altimetriche e ad ogni quota deve essere rilevata la geometria di tutti gli elementi in muratura, delle volte, delle scale, dei solai e della copertura; è utile rilevare anche la presenza di eventuali nicchie o di aperture richiuse. Nel caso degli edifici storici è usuale incontrare delle difficoltà operative legate all'accessibilità di alcuni spazi, oppure all'eccessiva altezza degli elementi da misurare, come nel caso Ghirlandina. Tuttavia sono disponibili strumenti che consentono un rapido rilievo e una restituzione accurata anche nel caso di elementi complessi, così come tecniche di indagine specifiche per gli spazi non accessibili. Per il rilievo degli esterni della Ghirlandina è stato impiegato ad esempio un metodo indiretto, quale la fotogrammetria (Giandebiaggi et al., 2009). I risultati del rilievo geometrico sono rappresentati attraverso piante, alzati, sezioni e, se necessario, anche attraverso particolari costruttivi di dettaglio. L'obiettivo che deve essere raggiunto attraverso il rilievo è quello della completa identificazione dello schema resistente del bene, attraverso il quale quale sia possibile definire la geometria del modello necessario ai fini delle analisi di tipo strutturale (Dir. PCM 12/08/2007).

In questa fase deve essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, in modo tale da consentire di dedurre le cause delle problematiche strutturali e di avanzare ipotesi in merito alle loro possibili evoluzioni future (*Alfieri, 2009*). A tal proposito le lesioni devono essere classificate secondo la geometria (estensione, ampiezza) e il loro cinematismo (distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori dal piano). L'interpretazione delle lesioni e la comprensione dell'effettivo stato di danno della struttura condiziona la scelta del tipo di indagine da eseguire e la localizzazione di prove più dettagliate.

Il rilievo geometrico dell'edificio può essere utilmente coadiuvato dall'analisi storica degli eventi e degli interventi subiti, ai fini della corretta individuazione del sistema resistente del bene storico oggetto di studio. Nello specifico, è utile evidenziare la successione realizzativa delle diverse porzioni di fabbrica, in modo da individuare le zone di possibile discontinuità, le disomogeneità di materiale, sia in pianta che in alzato, e la natura degli eventuali interventi di consolidamento già subiti in passato dalla costruzione. Le informazioni in merito alle vicende costruttive dell'edificio completano, in particolare, la consapevolezza delle caratteristiche costruttive del bene e questo consente in seguito, facendo ricorso a caratteristiche desumibili dalla regola d'arte, di limitare quanto più possibile l'impatto delle indagini diagnostiche sugli elementi di fabbrica (*Dir. PCM 12/08/2007*). La storia dell'edificio potrebbe essere utilizzata anche come strumento di controllo e verifica della risposta strutturale a specifici eventi naturali: a tale scopo è necessario ripercorrere, attraverso la documentazione di archivio, gli eventi più significativi e traumatici subiti dalla struttura nel corso della sua storia, e i corrispondenti effetti indotti.

La fase successiva del percorso della conoscenza del bene storico consiste nel rilievo materico costruttivo, il quale permette di individuare definitivamente 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, ad esempio a causa della presenza di intonaci o affreschi, che può essere eseguita attraverso tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto (come termografia, georadar, tomografia sonica, ecc.) o attraverso ispezioni dirette debolmente distruttive (come endoscopia, scrostamento di intonaci o piccoli scassi). Un aspetto importante riguarda la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove sperimentali da eseguire. Ai fini di una corretta conoscenza esse dovrebbero essere adottate in maniera diffusa, ma in ragione del loro impatto e per motivazioni economiche, le prove devono essere impiegate solo se effettivamente utili ai fini della valutazione del progetto dell'intervento (*Dir. PCM 12/08/2007*).

Un'attenzione speciale deve essere riservata alla valutazione della qualità muraria e delle caratteristiche materiche e geometriche dei singoli componenti di cui la muratura è costituita. È noto, infatti, come la risposta strutturale di un edificio in muratura sia strettamente legata alla morfologia della muratura stessa e alle caratteristiche dei vincoli fra i vari elementi costruttivi (*Binda, 2005*).

La lettura dello schema strutturale di funzionamento della fabbrica muraria ha bisogno della conoscenza dei dettagli costruttivi. A tal proposito è interessante individuare la tipologia della muratura e le sue caratteristiche costruttive, ma anche l'eventuale presenza di elementi trasversali di collegamento fra i paramenti murari, la tessitura e l'ingranamento degli elementi costruttivi, la natura delle malte e il loro stato di conservazione.

Un'ispezione visiva preliminare permette di esprimere un giudizio puramente qualitativo in merito ai materiali costruttivi e al loro degrado. Tuttavia la modellazione del comportamento strutturale richiede informazioni di tipo quantitativo, con riferimento ai parametri meccanici di deformabilità e di resistenza dei materiali, e in particolare della muratura. Tecniche di indagine di tipo non distruttivo consentono, al riguardo, di valutare l'omogeneità dei parametri meccanici nelle diverse parti della costruzione, ma non forniscono stime di tipo quantitativo dei parametri stessi. Una correlazione fra il dato registrato attraverso una specifica tecnica non distruttiva e un parametro di tipo meccanico è usualmente difficile (*Binda, 2005*).

La misura diretta dei parametri meccanici della muratura deve essere allora condotta attraverso prove debolmente distruttive o distruttive, ma su porzioni limitate della struttura. Nello specifico la caratterizzazione meccanica degli elementi costituenti, come malta, mattoni o elementi lapidei, può essere eseguita in sito o su campioni di piccole dimensioni, prelevati e analizzati in laboratorio. Le caratteristiche meccaniche della muratura possono essere desunte dalle proprietà degli elementi costituenti solo nel caso di murature di mattoni o elementi naturali squadrati e a tessitura regolare; negli altri casi è invece necessario ricorrere a prove su pannelli con martinetti piatti, di compressione, di compressione diagonale, di compressione e taglio. Le tecniche sopra citate sono invasive e di tipo distruttivo per cui il loro impiego necessita di essere essere ben giustificato e motivato; per tali ragioni, tenendo conto dell'importanza storica dell'edificio che deve essere indagato, il numero di prove che è possibile eseguire è generalmente molto limitato per cui spesso la quantità dei dati acquisiti non consente una loro eventuale trattazione statistica (*Dir. PCM 12/08/2007*).

In alternativa l'identificazione delle caratteristiche meccaniche può essere desunta per analogia con murature simili, tenendo conto degli effetti negativi indotti dai fenomeni di degrado o di danno sulle caratteristiche della muratura indagata. Gli ultimi aspetti che concorrono a definire il quadro della conoscenza di un edificio storico sono la conoscenza del sottosuolo e delle strutture di fondazione. Nel caso di un bene culturale tutelato l'analisi del sistema terreno-fondazione non deve limitarsi allo stato attuale, ma è opportuno individuare le modifiche intervenute nel tempo, attribuibili sia a cause naturali sia antropiche, come ad esempio la realizzazione di scavi e di costruzioni adiacenti (*Dir. PCM 12/08/2007*).

Il controllo periodico della costruzione attraverso sistemi di monitoraggio consente di programmare la manutenzione del bene e di attuare in tempo eventuali interventi di riparazione, consentendo di perseguire una conservazione consapevole dettata dalla prevenzione.



Fig. 2.1 – Finalità dell'indagine sperimentale nell'analisi strutturale (*Binda et al., 2000*).

2.2 Applicabilità di prove non distruttive o minimamente distruttive

Come sottolineato all'interno del paragrafo precedente, la valutazione delle condizioni delle murature storiche, nell'ambito di un programma di conservazione e in vista della pianificazione di specifici interventi di restauro, richiede una conoscenza dettagliata sulle caratteristiche della struttura e sulle proprietà dei materiali. I metodi non distruttivi e quelli poco distruttivi possono fornire informazioni sulla presenza di irregolarità all'interno della struttura muraria. Tali irregolarità possono derivare dall'impiego, durante la costruzione, di elementi di montaggio come ancoraggi, chiodi o ganci; possono essere dovute a differenze di materiale e all'impiego, all'interno di uno stesso pannello murario, di mattoni, pietre e malta; infine possono derivare da vuoti, inclusioni, fessure, umidità o differenze di carico (*Maierhofer, 2008*).

La tabella 2.1 offre una panoramica dettagliata in merito alle comuni situazioni di indagine, raggruppate secondo classi, associando a ciascuna di esse le possibili tecniche non distruttive o minimamente distruttive. I metodi compresi fra le parentesi rappresentano quelli generalmente meno impiegati nel contesto della problematica specifica alla quale si fa riferimento.

Tab.	2.1	-	Aree	tematiche	di	applicazione	delle	prove	non	distruttive	0
leggermente distruttive (Maierhofer, 2008)											

Classificazione	Problema di indagine	Prove non distruttive o poco distruttive adeguate		
Indagine delle proprietà meccaniche	Determinazione della resistenza alla compressione	Flat-Jack singolo, resistenza alla perforazione, (metodi sonici)		
della muratura	Determinazione delle proprietà elastiche	Flat-Jack doppio, (metodi sonici)		
Controllo di qualità	Controllo delle iniezioni di mala/calce	Radar, metodi sonici, (ultrasuoni)		
Classificazione	Problema di indagine	Prove non distruttive o		
---------------------------	--	---	--	
Classificazione	i robella ul inuagine	poco distruttive adeguate		
	Spessore delle strutture accessibili solo da lato	Radar, ultrasuoni, impact-echo, metodi microsismici, endoscopia		
	Individuazione di distacchi	Termografia attiva, radar		
Proprietà morfologiche	Individuazione di strati multipli della muratura e del loro spessore	Radar, ultrasuoni, impact-echo, endoscopia		
	Individuazione di distacchi dello strato esterno	Radar, ultrasuoni, endoscopia		
	Individuazione di ancoraggi, chiodi, ganci, barre, ecc.	Radar, endoscopia, (ultrasuoni)		
	Indagine dell'omogeneità della muratura	Radar, ultrasuoni, metodi sonici, microsismici		
	Individiduazione di grossi vuoti	Radar, impact-echo, metodi sonici, ultrasuoni		
	Indagine di strutture murarie intonacate	Termografia attiva		
	Individuazione di fessure non visibili	Radar, ultrasuoni		
	Individuazione di aree ad elevato contenuto di umidità	Radar, termografia attiva, metodi geoelettrici		
Umidità	Determinazione quantitativa del contenuto di umidità	Radar, microwave borehole method, TDR		
Omuta	Localizzazione di umidità profonda	Microwave borehole method		
	Controllo della sigillatura	Radar, microwave borehole method, TDR		

Classificazione	Problema di indagine	Prove non distruttive o poco distruttive adeguate
Monitoraggio delle	Individuazione e documentazione delle fessure visibili	Ispezione visiva
Monitoraggio delle fessure	Quantificazione della profondità della fessura	(Ultrasuoni)
	Osservazione dell'espansione delle fessure	(Ultrasuoni), misuratore di espansione

Un'attenta progettazione della campagna di misure e la precisa consapevolezza del problema oggetto di studio sono elementi essenziali ai fini della buona riuscita dell'indagine sperimentale. Il metodo di prova specifico deve essere scelto, unitamente alle procedure per l'analisi dei dati, alla visualizzazione e all'interpretazione dei risultati, in ragione del problema di studio. È necessario pertanto definire nel dettaglio quali parametri devono essere determinati e quale accuratezza necessita di essere raggiunta. Oltre a questo l'operatore deve pensare in anticipo alle operazioni da compiere sulla base dei risultati che ci si può aspettare, prevedendo eventualmente la necessità di dover eseguire misure aggiuntive che possono ritenersi utili (*Maierhofer, 2008*).

Un aspetto interessante è offerto dalla possibilità di combinare metodi di prova differenti con l'obiettivo di accrescere l'attendibilità dei dati acquisiti attraverso ciascuna tecnica. In questa ottica è possibile scegliere un metodo che possa essere calibrato e validato da un altro metodo, assunto come riferimento; in alternativa è possibile adottare due metodi ben distinti, o impiegare due sensori diversi per uno stesso metodo, ottenendo informazioni complementari così come ridondanti (*Maierhofer, 2008*).

Allo stato attuale i metodi non distruttivi più diffusi nell'ambito della diagnosi delle strutture murarie sono quelli sonici, la termografia e il radar, i cui principi sono illustrati nel seguito.

3. Prove non distruttive sulla muratura

Fra le tecniche diagnostiche quelle non distruttive, rispetto alle tecniche classiche di laboratorio, presentano i notevoli vantaggi di essere non invasive, relativamente rapide e di offrire informazioni a carattere generale piuttosto che puntuale (*Concu, 2006*). È necessario precisare, tuttavia, che oltre ad offrire diverse potenzialità, le prove non distruttive presentano anche degli svantaggi legati alla disponibilità di poche correlazioni dirette fra i dati acquisiti, generalmente di tipo qualitativo, e i parametri quantitativi di comportamento strutturale.

Nel presente capitolo sono descritti i metodi non distruttivi maggiormente impiegati per le murature, ponendo l'accento sulle prove soniche (applicate durante l'esperienza vissuta presso la Ghirlandina di Modena) attraverso la proposta di due casi di studio reperiti dalla letteratura in materia. Il primo dimostra l'affidabilità delle prove soniche nella qualificazione delle struttura muraria attraverso la morfologia della sezione (comunque già nota a causa del collasso di alcuni elementi strutturali indagati) e nella valutazione degli effetti apportati alla muratura dall'applicazione di interventi di recupero. Il secondo dimostra invece le potenzialità nell'indagine della presenza, all'interno della muratura, di elementi passanti di collegamento ai fini della conoscenza dell'effettivo grado di ammorsamento fra i paramenti che compongono la parete muraria.

3.1 Metodi di indagine basati sulla propagazione delle onde

Nell'ambito della diagnostica non distruttiva rivestono notevole interesse i metodi basati sullo studio dei fenomeni legati alla propagazione di onde elastiche.

Essi consentono di correlare le proprietà fisiche dell'elemento strutturale e dei suoi materiali con l'integrità, la capacità portante, la geometria e le caratteristiche della sezione. Sono in grado di fornire una risposta qualitativa dell'elemento indagato e, in condizioni appropriate, possono fornire informazioni dettagliate sulla tessitura muraria o sull'omogeneità del cemento armato.

L'applicazione dei metodi basati sulla propagazione delle onde è particolarmente agevole nel caso dei cosiddetti mezzi trasparenti alle onde, come ad esempio pezzi metallici di dimensioni anche consistenti. Più complessa è invece l'indagine su materiali meno trasparenti alle onde poiché intrinsecamente disomogenei, come calcestruzzi, pietre naturali, legno, murature e malte (*Concu, 2006*).

Il segnale impiegato è generato attraverso una sorgente esterna (costituita ad esempio, nel caso di alcuni metodi acustici come le prove soniche, da un martello strumentato) ed è acquisito mediante un ricevitore dopo aver attraversato il mezzo secondo traiettorie opportunamente scelte. Dal punto in cui è generato, il segnale si propaga all'interno del mezzo secondo onde superficiali, longitudinali e trasversali. Le prime danno luogo a fronti d'onda circolari che tendono ad allargarsi radialmente sulla superficie, mentre le onde longitudinali e quelle trasversali, o di taglio, distribuiscono l'energia associata alla perturbazione secondo fronti d'onda semisferici, crescenti in funzione della distanza dalla sorgente. Le onde longitudinali presentano massima ampiezza nella direzione di impatto e viaggiano con energia e velocità maggiori rispetto a quelle che caratterizzano invece le onde di taglio. Per tale motivo, nell'applicazione dei metodi basati sulla propagazione e riflessione delle onde, è preferibile sfruttare onde di tipo longitudinale (*Pascale et al., 2006*).

La riflessione dell'onda all'interno della struttura indagata avviene in corrispondenza dell'interfaccia fra strati con sufficiente impedenza acustica in relazione alla lunghezza d'onda del segnale utilizzato. L'impedenza è la grandezza caratteristica del mezzo in cui l'onda si propaga, che descrive come il mezzo stesso si oppone al passaggio dell'onda. Questa proprietà dipende dalla densità ρ del materiale e dalla velocità del segnale C_p (*Pascale et al., 2006*) secondo l'equazione:

$$z = \rho \cdot C_{\rho}$$

La velocità del segnale è funzione della densità del materiale e delle sue proprietà meccaniche, in particolare del modulo di elasticità *E* (*Pascale et al., 2006*):

$$C_p = \sqrt{E/\rho}$$

mentre la lunghezza d'onda λ minima del segnale è inversamente proporzionale alla frequenza massima *f* (*Pascale et al., 2006*):

$$C_p = f \cdot \lambda$$

Dalla precedente espressione si deduce come, all'aumentare della frequenza del segnale, la lunghezza d'onda diminuisca a vantaggio di una migliore risoluzione dei dati acquisiti. La risoluzione della più piccola discontinuità riconoscibile dipende direttamente dalla lunghezza d'onda dominante del segnale impiegato, oltre che dalla dimensione e dalla geometria dell'elemento strutturale indagato (*Pascale et al., 2006*).

Dal contenuto in frequenza dell'onda dipende anche la profondità di penetrazione attraverso il materiale. Nel complesso le alte frequenze, o le piccole lunghezze d'onda, sono adatte a localizzare obiettivi piuttosto piccoli e superficiali e sono maggiormente soggette ad attenuazione per assorbimento e dispersione nel mezzo, essendo l'attenuazione tanto più grande quanto più alta è la frequenza del segnale. Questo, di fatto, limita lo spessore dell'elemento che può essere indagato. Al contrario le basse frequenze, o le grandi lunghezze d'onda, sono adatte ad attraversare spessori considerevoli di materiale.

Dall'analisi dei dati acquisiti attraverso l'impiego di un metodo basato sulla propagazione delle onde è possibile dedurre informazioni in merito al livello di omogeneità del materiale, alla sua qualità e al grado di deterioramento; è possibile individuare la presenza all'interno della struttura di anomalie quali vuoti, fessure o inclusioni; è possibile ricavare informazioni in merito ad alcune proprietà meccaniche o individuare zone caratterizzate da proprietà elasto-meccaniche differenti (*Concu, 2006*).

Le caratteristiche intrinseche del materiale indagato intervengono in maniera decisiva sui vari aspetti connessi all'impiego di un metodo rispetto a un altro, ad esempio nella scelta della strumentazione più adatta all'obiettivo da perseguire, nell'applicazione dei principi alla base della tecnica da applicare così come nei criteri secondo i quali devono essere interpretati i dati. Com'è già stato detto in

precedenza, un aspetto di primaria importanza è la scelta della frequenza del segnale in funzione del tipo indagine. Determinati materiali, infatti, per le loro caratteristiche di omogeneità, favoriscono l'utilizzo di un segnale operante nel campo delle frequenze ultrasoniche, tipicamente superiori ai 500 kHz, poiché offrono un'attenuazione del segnale trascurabile, fatto dovuto all'assenza di disomogeneità naturali, motivo per cui è possibile l'impiego di segnali a bassissima energia. La scarsa attenuazione del segnale consente tra l'altro di rilevare difetti anche molto piccoli (*Concu, 2006*).

I materiali propri del costruito storico e monumentale sono caratterizzati invece da un elevato livello di disomogeneità e le strutture possono presentare spessori anche elevati. All'eterogeneità intrinseca del mezzo indagato può sommarsi la presenza di anomalie varie, come ad esempio vuoti e inclusioni. In questi casi le proprietà del mezzo impongono l'utilizzo di emissioni a elevata energia e con un contenuto prevalente in bassa frequenza, tipico dei segnali sonici, con lo scopo di compensare i fenomeni di assorbimento da parte del mezzo e la conseguente perdita di direzionalità del segnale impiegato (*Concu, 2006*).

È evidente come tanto i segnali ultrasonici quanto quelli sonici consentano di rilevare la presenza di anomalie presenti all'interno della struttura, ma è tuttavia necessario tenere conto di quanto essi siano differentemente sensibili alle caratteristiche intrinseche del mezzo indagato e alle condizioni ambientali.

Tra i metodi basati sulla propagazione delle onde, le tecniche ultrasoniche e soniche operano convenzionalmente per trasmissione, o per singola riflessione del segnale. Al contrario l'impact-echo, altro metodo sonico, opera in riflessione multipla del segnale.

3.1.1 Indagini soniche

Le prove soniche consistono nel sollecitare una porzione di muratura utilizzando un martello strumentato con una cella di carico. Il martello colpisce, attraverso un breve impatto di tipo elastico, punti prestabiliti della superficie indagata generando delle onde elastiche che si propagano all'interno del mezzo con un contenuto in frequenza limitato ai 20 kHz. Il segnale è caratterizzato da una maggiore lunghezza d'onda rispetto a quello ultrasonico, quindi da una minore risoluzione, e favorisce maggiori profondità di penetrazione del materiale (*Concu,* 2006).

L'intensità dell'impulso generato e il suo contenuto in frequenza, dipendenti dalla rigidezza della punta del martello, dal diametro della massa d'impatto e dalla rigidezza della superficie dell'elemento indagato, sono rilevati attraverso un trasduttore di forza installato all'interno del martello, il quale ha lo scopo di convertire quantità meccaniche associate all'impatto in un segnale elettrico. La funzione d'impulso del martello può essere approssimata a una sinusoide la cui larghezza corrisponde al tempo di contatto tra la punta strumentata e la superficie. La propagazione dell'onda elastica all'interno dell'elemento strutturale è rilevata attraverso un accelerometro (Fig.3.1a). Per ogni percorso di misura viene dunque registrata, da una stazione di acquisizione dei dati (Fig. 3.1b), una coppia di forme d'onda: il segnale generato dal martello e il segnale ricevuto dopo la propagazione all'interno del materiale.



Fig. 3.1 – Prove soniche alla Ghirlandina di Modena: a) emissione e ricezione del segnale, b) stazione di acquisizione dei dati.

Le indagini soniche possono essere compiute secondo modalità diverse, le quali dipendono dalla posizione relativa fra il martello e il ricevitore sull'elemento: la trasmissione può essere diretta, superficiale o semidiretta (Fig. 3.2). Il metodo di trasmissione diretto, o per trasparenza, consiste nella scelta di punti di emissione e di ricezione del segnale sonico posti su due superfici opposte dell'elemento

strutturale indagato; sorgente e ricevitore sono posizionati sul medesimo asse, in modo che la direzione della trasmissione dell'impulso sia perpendicolare alle superfici stesse. Nel metodo di trasmissione superficiale, o indiretto, martello ed accelerometro sono posizionati sulla stessa superficie e si eseguono misure con punti di emissione e ricezione del segnale posti lungo una linea retta, verticale, orizzontale o diagonale. Infine nella trasmissione semidiretta i punti di emissione e ricezione del segnale appartengono a facce adiacenti, ma in acluni casi anche opposte, e si trovano alla medesima quota dal piano di calpestio (*Concu, 2006*).



Fig. 3.2 – Modalità di esecuzione delle prove soniche: a) diretta, b) superficiale, c) semidiretta.

L'analisi dei dati consiste nel calcolo della velocità di propagazione dell'onda, dopo aver misurato il tempo impiegato dall'impulso per coprire la distanza fra i punti di emissione e di ricezione. L'uso delle prove soniche nella valutazione delle strutture murarie ha come scopi: la qualificazione della muratura attraverso la morfologia della sezione e l'individuazione di vuoti, difetti, fessure e danneggiamenti; il controllo dell'efficacia di diverse tecniche di consolidamento della muratura, come le iniezioni, le quali possono cambiare le caratteristiche fisiche dei materiali (*Binda et al., 2000*).

3.1.2 Tomografia sonica

La tomografia sonica è una tecnica non distruttiva che utilizza, per l'acquisizione dei dati, la strumentazione tipica delle prove soniche. La sezione muraria d'interesse è attraversata da un denso ventaglio di percorsi, generato fissando per ciascuna stazione sorgente del segnale un certo numero di stazioni riceventi.

I valori dei tempi di volo lungo i percorsi scelti possono essere impiegati ai fini del computo della distribuzione bidimensionale della velocità sonica all'interno della sezione scelta, individuando in tal modo variazioni locali della velocità associabili a zone di debolezza e a difetti nella fabbrica muraria o, comunque, a specifiche caratteristiche fisico-meccaniche del materiale. La distribuzione delle velocità può essere visualizzata attraverso isolinee o mappe di colore rappresentative delle possibili condizioni in cui il materiale si trova (*McCann et al., 2001*).

Per ottenere una buona affidabilità dai dati sperimentali acquisiti, è necessario massimizzare l'ammontare delle misurazioni, assicurando che tutte le aree della sezione tomografica oggetto di studio siano adeguatamente coperte da percorsi (*McCann et al., 2001*).

I dati acquisiti dipendono sensibilmente dall'energia e dalla natura del colpo del martello che genera il segnale di input, dall'interpretazione da parte dell'operatore della forma dell'onda acquisita e dall'accoppiamento del trasduttore ricevente alla superficie muraria. L'accuratezza della ricostruzione delle velocità può essere aumentata pertanto prestando maggiore giudizio nel generare il segnale di input e pianificando con attenzione la posizione e il numero delle stazioni riceventi (*McCann et al., 2001*).

3.1.3 Il sistema impact-echo

L'impact-echo è un metodo sonico inizialmente sviluppato per la misurazione dello spessore e per la valutazione dell'integrità superficiale di elementi in calcestruzzo (*McCann et al., 2001*).

Il metodo si basa sulla propagazione e sulla riflessione multipla, all'interno della sezione dell'elemento indagato, di onde elastiche di compressione generate attraverso un breve impatto elasto-meccanico di un piccolo martello, costituito da una sferetta di acciaio, sulla superficie di prova (Fig. 3.3). Le onde sono caratterizzate da bassa frequenza, generalmente al di sotto di 50 kHz, e sono riflesse all'interno del materiale da eventuali difetti o dalle superfici esterne. Le

riflessioni multiple delle onde eccitano i modi locali di vibrare nella sezione dell'elemento indagato, producendo risonanze temporanee le cui frequenze dipendono dalla geometria dell'elemento e dalle caratteristiche del materiale. Il trasduttore ricevente è sempre adiacente al punto d'impatto e registra le riflessioni multiple, che possono anche essere definite echi (*McCann et al., 2001*).



Fig. 3.3 – Emissione e ricezione del segnale impact-echo (Gabrielli et al., 2009).

Ai fini dello studio del segnale registrato si applica il metodo di analisi dei dati nel dominio delle frequenze. La forma d'onda del segnale è trasformata nel suo spettro, riportante le frequenze componenti in funzione delle ampiezze, per mezzo della trasformata di Fourier. Le frequenze predominanti del segnale permettono di valutare lo spessore della sezione, la sua integrità, e rilevare la posizione, l'estensione e la profondità di discontinuità interne (*Pascale et al., 2006*).

L'equazione fondamentale del metodo Impact-echo fornisce la frequenza del segnale impiegato, indicata con f, in funzione della velocità di propagazione delle onde all'interno del materiale, C_p , e dello spessore dell'elemento indagato, indicato con T:

$$f = \frac{\beta \cdot C_p}{2 \cdot T}$$

All'interno dell'espressione compare il fattore di forma β il quale dipende dalla geometria dell'elemento oggetto di studio (*Gabrielli et al., 2009*).

La posizione dei picchi di frequenza, la loro ampiezza e forma sono parametri utili a valutare l'integrità strutturale. In particolare l'ampiezza dei picchi è influenzata dal contenuto in frequenza dell'onda; questo implica la necessità di selezionare in maniera adeguata la fonte dell'impatto (*Pascale et al., 2006*).

3.1.4 Termografia

La termografia è una tecnica non distruttiva impiegata da diversi anni su manufatti artistici e strutture monumentali. La tecnica ha il vantaggio di poter essere applicata a vaste superfici murarie senza alcun contatto diretto.

La tecnica termografica opera nel campo delle radiazioni infrarosse. Ogni materiale, infatti, emette energia in questo campo sottoforma di radiazioni elettromagnetiche. L'analisi sfrutta inoltre le proprietà dei materiali della conducibilità termica, cioè la capacità di trasmettere calore, e del calore specifico, cioè la capacità di trattenere calore. In breve, una muratura, composta per sua natura costruttiva da materiali diversi, se riscaldato vedrà i suoi componenti assumere temperature diverse in funzione delle due proprietà menzionate.

La termografia può essere applicata in maniera attiva o passiva. Nelle applicazioni di tipo passivo è analizzata la radiazione di una superficie durante un ciclo termico dovuto a fenomeni naturali, come l'insolazione e il successivo raffreddamento. Nelle applicazioni di tipo attivo, invece, le superfici sono riscaldate artificialmente (*Binda et al., 2000*). La radiazione termica è raccolta attraverso una camera sensibile alle radiazioni infrarosse. Il risultato è l'acquisizione di un'immagine termografica dell'oggetto indagato, visualizzabile attraverso scale cromatiche in cui a ogni tonalità corrisponde un certo intervallo di temperatura.

La termografia può essere impiegata con successo per indagare superfici murarie in cui la presenza di intonaco può nascondere eventuali difetti costruttivi. È particolarmente interessante anche nello studio di pareti affrescate, sulle quali non è possibile ricavare campioni o applicare tecniche che richiedono il contatto diretto con la superficie indagata. Altro caso di applicazione è l'individuazione di vuoti o cavità e di inclusioni di differenti materiali. Un'ulteriore interessante impiego della tecnica termografica consiste nell'individuazione, all'interno della struttura muraria, di aree interessate da un elevato contenuto di umidità; in queste situazioni la tecnica evidenzia le aree superficiali più fredde, dove si manifesta un'evaporazione continua (*Binda et al., 2000; Maierhofer, 2008*).

Nella diagnosi di antichi manufatti, spesso in assenza di un'adeguata irradiazione termica, la termografia offre maggiori potenzialità nell'analisi degli strati superficiali. Le difficoltà che si incontrano in un'indagine profonda sono dovute sostanzialmente alla scarsa penetrazione termica all'interno della struttura e alla presenza di discontinuità superficiali, che contribuiscono a distorcere e filtrare la propagazione del calore verso le zone profonde (*Binda et al., 2000*).

3.1.5 Georadar

Le indagini radar costituiscono una tecnica sperimentale relativamente nuova. Da un lato sembrano offrire interessanti potenzialità, ma dall'altro necessitano ancora di molto studio e ricerca (*Binda et al., 2000*). Le operazioni d'indagine per le quali sarebbe interessante impiegare la tecnica sono: la localizzazione di grossi vuoti e inclusioni di materiali differenti; la qualificazione dello stato di conservazione o di danno delle murature; il rilievo della presenza di umidità; il controllo dell'efficacia degli interventi attraverso la tecnica delle iniezioni; l'individuazione della morfologia delle sezioni di murature a più paramenti. (*Binda et al., 2000; Maierhofer, 2008*).

Il metodo georadar è basato sulla propagazione di brevi impulsi elettromagnetici, trasmesso all'interno dell'elemento indagato attraverso un'antenna dipolo. Gli impulsi sono riflessi in corrispondenza dell'interfaccia fra materiali caratterizzati da proprietà dielettriche differenti. Muovendo l'antenna lungo la superficie dell'elemento viene prodotto un radargramma, il quale esprime la posizione delle riflessioni del segnale in funzione del tempo. Misurando il tempo che intercorre fra l'emissione degli impulsi e la ricezione degli echi da parte dell'antenna, e conoscendo la velocità di propagazione del segnale nel mezzo, è possibile stimare la profondità degli ostacoli incontrati dal segnale (*Binda et al., 2000*). Tuttavia, nel caso specifico delle murature, indagando un mezzo altamente disomogeneo,

l'interpretazione del radargramma acquisito si riduce ad un processo di riconoscimento di anomalie eventualmente presenti nella tessitura muraria.

3.2 Cases history nell'ambito dell'applicazione delle prove soniche

3.2.1. Il caso della Cattedrale di Noto

In seguito al terremoto verificatosi in Sicilia il 13 dicembre 1990 la Chiesa Madre di San Nicolò, Cattedrale della città di Noto, subì alcuni danni strutturali. Subito dopo l'evento cominciarono a presentarsi delle fessure in corrispondenza della cupola della navata laterale destra e della fila destra di pilastri della navata centrale. Nel 1992 furono condotti dei lavori provvisori in vista del confinamento dei pilastri danneggiati, tuttavia non furono adottate specifiche misure al fine di riparare la struttura, probabilmente perché non era stata prevista, a lungo termine, l'ipotesi di un collasso, parziale o totale, al quale il danneggiamento subito dagli elementi strutturali avrebbe potuto lentamente portare.



Fig. 3.4 – a) Pilastrata destra della navata centrale; b) interno della Cattedrale dopo la rimozione delle rovine (*Binda et al., 2003*).

Il 13 marzo del 1996, dunque sei anni dopo l'evento sismico che aveva danneggiato la Cattedrale, si manifestò il crollo improvviso di parte della struttura probabilmente a causa del collasso della fila di pilastri già compromessa in precedenza. Furono interessate dai nuovi danni la volta e la copertura della navata centrale, una larga parte della cupola centrale e la cupola della navata destra; altri fenomeni di danneggiamento si manifestarono a livello locale in vari punti della struttura. In particolare i pilastri della fila sinistra della navata centrale mostravano fessurazione diffusa (*Binda et al., 2003*). Tale danno potrebbe essere ricondotto alla sostituzione, intorno alla metà del Novecento, dell'originaria copertura a falde della navata centrale con un pesante copertura piana in calcestruzzo rinforzato, il quale avrebbe contribuito a rendere tra loro solidali, durante il collasso, gli elementi strutturali della suddetta navata (*Binda et al., 2003*).

Sui resti della Cattedrale sono stati condotti degli studi, da parte del laboratorio del DIS del Politecnico di Milano e in collaborazione con progettisti ed esperti coinvolti nella successiva ricostruzione del monumento, attraverso indagini in sito e test di laboratorio. Lo scopo della ricerca è stato quello di verificare lo stato del danno dei materiali e degli elementi strutturali e valutare, in seconda battuta, la possibilità di conservazione e di rinforzo delle strutture in vista della ricostruzione della parte danneggiata della Cattedrale.

Ai fini della conoscenza della tecnica costruttiva e dei materiali impiegati, è stata compiuta la rimozione, strato dopo strato, delle componenti di alcuni dei pilastri andati incontro a collasso. In corrispondenza del nucleo degli elementi strutturali sono state rinvenute grosse pietre di fiume con interposti strati di malta spessi ma deboli e friabili. La fabbrica si completa con un paramento esterno costituito da blocchi regolari di calcarenite alla base del pilastro e da travertino (roccia caratterizzata da numerosi vuoti) nella parte alta. Tra il paramento esterno e l'anima non è presente alcuna connessione. Le murature sono state costruite secondo una tecnica simile a quella adottata per i pilastri.

Il fatto che il collasso degli elementi strutturali abbia messo a nudo le modalità costruttive e i materiali impiegati, consente di paragonare i resti della Cattedrale di Noto a un laboratorio a cielo aperto all'interno del quale è stato possibile tra l'altro valutare quali potessero essere le più adeguate tecniche di intervento. Fra i metodi non distruttivi adottati, infatti, le prove soniche hanno permesso di

verificare l'effetto delle iniezioni di malta sulle murature danneggiate, oltre che indagare sullo stato di danno degli elementi strutturali.

Sono state condotte prove soniche in modalità di trasmissione diretta, disponendo il martello strumentato e l'accelerometro in linea sulle facce opposte degli elementi murari indagati. In corrispondenza delle posizioni di prova sono state tracciate griglie a quote differenti, con lo scopo di valutare lo stato del danno e la variazione di materiale lungo lo sviluppo in altezza di pilastri e murature.

Nei pilastri appartenenti alla fila sinistra della navata centrale, sono stati ottenuti valori decrescenti della velocità sonica all'aumentare dell'altezza della posizione di prova, a dimostrazione dell'impiego di tipologie di rocce differenti. Bassi valori della velocità sono stati registrati sistematicamente in tutti i pilastri testati a partire da un'altezza compresa fra 1 m e 1,5 m. Questo, dimostra che la calcarenite è stata impiegata nella parte bassa fino all'altezza di circa 1 m, mentre il travertino si trova a un'altezza superiore.

Nel pilastro che mostra i più bassi valori della velocità sonica registrati lungo la pilastrata sinistra, sono presenti numerose fratture, alcune delle quali erano già state riempite di gesso e calce in un precedente restauro eseguito negli anni sessanta. In generale i valori più elevati delle velocità sono stati registrati in corrispondenza degli angoli dei pilastri, mentre la parte centrale della sezione mostra valori più bassi, a dimostrazione della realizzazione del nucleo con materiale disomogeneo e più debole (*Binda et al., 2001; Binda et al., 2003*).

Nel caso dei pilastri appartenenti alla fila destra della navata centrale è stato possibile registrare valori della velocità sonica nella sola parte bassa, fino alla quota di 75 cm, perché tale pilastrata è stata interessata da collasso. A dimostrazione del serio stato di danno i valori delle velocità sono più bassi di quelli della pilastrata simmetrica; i valori inferiori sono quelli registrati nel pilastro in corrispondenza del quale potrebbe essersi innescato il collasso.

Similmente a quanto registrato nel caso dei pilastri, le prove soniche effettuate sulle murature hanno mostrato che la velocità diminuisce lungo l'altezza; inoltre i dati ricavati nella parte bassa delle strutture murarie mostrano come le velocità soniche siano più alte rispetto a quelle invece ricavate per i pilastri.

Oltre che alla verifica dello stato di danno dei materiali e delle strutture, le prove soniche sono state applicate ai fini dello studio dell'applicabilità della tecnica delle iniezioni per il recupero degli elementi danneggiati, permettendo di ottimizzare così il design dell'intervento in funzione della morfologia dell'elemento strutturale, della disaggregazione e della sedimentazione delle componenti della sostanza iniettata. Le prove soniche sono state eseguite sia prima dell'iniezione sia 28 giorni dopo l'esecuzione dell'intervento, osservando in generale un incremento delle velocità soniche come conseguenza diretta dell'applicazione della tecnica (*Binda et al., 2003*).

3.2.2 Prove soniche in edifici strategici siti nella Provincia di Imperia. Un approccio di tipo statistico

Nell'ambito di una serie di indagini sperimentali non distruttive eseguite su alcuni edifici strategici, localizzati in massima parte nella provincia di Imperia, è stato dimostrato come sia possibile applicare le prove soniche al fine di individuare la presenza di diatoni all'interno delle murature lapidee delle costruzioni storiche, permettendo di conseguenza una corretta valutazione dei parametri meccanici propri della struttura muraria.

I diatoni sono elementi passanti disposti con la loro maggiore lunghezza in direzione perpendicolare al muro che, fungendo da connessione trasversale fra i diversi paramenti di cui possono essere costituite le murature storiche, rivestono un ruolo importante ai fini della resistenza della parete, tanto nei confronti delle azioni verticali quanto di quelle orizzontali agenti in direzione ortogonale rispetto al piano medio della struttura muraria. La presenza di connessioni trasversali fra i paramenti offre alle pareti la possibilità di manifestare caratteristiche di monoliticità tali da garantire una minore vulnerabilità dell'elemento strutturale nei confronti di azioni agenti fuori dal piano medio, come possono essere ad esempio quelle generate da un evento sismico, evitando di conseguenza eventuali meccanismi di collasso della muratura (*Brignola et al., 2006*).

L'OPCM 3 maggio 2005 n. 3431, in seno all'allegato 11.D, rileva come, alla presenza di elementi di connessione trasversale tra i paramenti, sia possibile adottare, nel caso di murature storiche, un coefficiente correttivo con lo scopo di amplificare i valori di riferimento forniti, all'interno dello stesso allegato, per la resistenza media a compressione f_m e la resistenza media al taglio τ_0 della muratura (*OPCM 3431, 2005*). Il coefficiente può garantire, alla presenza di

diatoni, un aumento del 50% dei suddetti parametri meccanici, tuttavia l'entità del beneficio offerto dalle connessioni trasversali varia secondo la tipologia muraria e i suoi dettagli costruttivi, come si evince dai valori del coefficiente stesso, estratti dall'Ordinanza, contenuti in tabella 3.1.

Tab. 3.1 – Coefficienti correttivi dei parametri meccanici da applicarsi in presenza di connessione trasversale tra i paramenti (*OPCM 3431, 2005*).

	Coefficiente		
l ipologia di muratura	correttivo		
Muratura in pietrame disordinata	1.5		
(ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5		
Muratura a conci sbozzati, con paramento di	1.5		
limitato spessore e nucleo interno	1,5		
Muratura in pietra a spacco e buona tessitura	1,3		
Muratura a conci di pietra tenera	1.5		
(tufo, calcrenite, ecc.)	1,5		
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2		
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,3		
Muratura in mattoni semipieni con malta			
cementizia (es: doppio UNI)	-		
Muratura in blocchi laterizi forati	_		
(perc. foratura < 45%)	-		
Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti	_		
verticali a secco (perc. foratura $< 45\%$)			
Muratura in blocchi di calcestruzzo	_		
(perc. foratura tra 45% e 65%)	-		
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	-		

Nonostante la corretta assunzione del coefficiente correttivo possa essere fondamentale ai fini delle verifiche di sicurezza delle strutture murarie, l'Ordinanza non codifica una metodologia specifica che consenta di valutare la connessione trasversale di una parete e di giustificare conseguentemente l'applicazione di tale coefficiente. Dunque è stata valutata la possibilità di applicare le prove soniche con l'obiettivo di determinare in maniera realistica il grado di ammorsamento tra i paramenti della muratura (*Brignola et al., 2006*).

Le prove soniche sono state eseguite su 25 pannelli murari individuati fra le tipologie proposte dall'Ordinanza. 16 pannelli sono associabili alla tipologia descritta come "muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno" e a essi è stata attribuita la sigla T1; 7 pannelli murari, individuabili attraverso la sigla T2, sono della tipologia "muratura in pietre a spacco con buona tessitura". Altri 2 pannelli sono invece del tipo "muratura in mattoni pieni e malta di calce".

Su ciascun pannello, di dimensioni 100 x 100 cm, è stato rimosso l'intonaco presente su entrambe le facce e si è impostata una griglia regolare, con maglia 20 x 20 cm, di punti di misura. Sono state eseguite sia prove dirette sia superficiali. Le prove soniche superficiali sono state eseguite secondo due metodologie diverse: la prima scegliendo punti di emissione e di ricezione del segnale allineati verticalmente, con l'obiettivo di giudicare la qualità dei giunti orizzontali di malta; la seconda assumendo un punto fisso di ricezione e battendo con l'emettitore sui punti della griglia allineati orizzontalmente al ricevitore, al fine di valutare, in funzione della variazione della velocità, la presenza di cavità e lo spessore dei paramenti murari. Le prove dirette sono state compiute scegliendo punti di emissione e di ricezione del segnale alli opposti del pannello murario, alla stessa altezza dal piano di calpestio e in maniera tale che la loro congiungente fosse perpendicolare alle superfici.

I valori di velocità sonica sono stati ricavati dai tempi di volo, nota la distanza fra il punto di battuta e quello di ricezione del segnale. I risultati ottenuti in termini di velocità sono stati presentati seguendo un approccio di tipo statistico, adottando la rappresentazione attraverso i boxplot (Fig. 3.5) e calcolando degli indici che consentono di ricavare informazioni qualitative in merito alla distribuzione dei dati, nella fattispecie costituiti dai valori delle velocità (*Brignola et al., 2006*). Il boxplot è un particolare tipo di grafico che permette di rappresentare in maniera schematica la posizione dei quartili e della mediana di una distribuzione di dati. In statistica i quartili ripartiscono una distribuzione in quattro parti di pari frequenze. Il primo quartile è il valore per cui la frequenza cumulata è pari al 25%. Il secondo quartile è proprio la mediana, cioè il valore per cui la frequenza cumulata è pari al 50%. Infine il terzo quartile è il valore di una distribuzione per cui la frequenza cumulata è il 75%. Gli estremi del boxplot sono il primo e il terzo quartile, e il rettangolo che lo rappresenta è attraversato da una riga rappresentante la mediana. Due tacche definiscono una regione di controllo ottenuta traslando i due estremi del box di una quantità pari alla distanza fra il primo e il terzo quartile ampliata di un fattore pari a 1,5. Nel caso in esame se i dati del campione sono tutti contenuti nella regione di controllo, le due tacche coincidono rispettivamente con i valori massimo e minimo delle velocità ottenuti durante le prove soniche. Se sono invece presenti valori esterni a tale regione, le tacche coincidono con i valori più grande e più piccolo contenuti all'interno dell'intervallo di controllo e i dati esterni a esso, comunemente indicati in statistica come outliner, sono rappresentati nel diagramma mediante puntini. Presentare i risultati attraverso il boxplot consente di visualizzare la forma della distribuzione delle velocità soniche, e i rispettivi valori massimo e minimo, in corrispondenza di ciascun pannello murario e in generale nel contesto dello spazio campionario rappresentativo di una specifica tipologia muraria (Brignola et al., 2006).



Fig. 3.5 – Boxplot per la tipologia T1; soglia di velocità relativa alla presenza di diatoni 2500 m/s; mediana delle 16 distribuzioni 1253 m/s (*Brignola et al.*,

^{2006).}

Le informazioni qualitative sulla forma della distribuzione possono essere dedotte, calcolando, per ogni insieme di dati, l'indice di asimmetria di Pearson γ_1 e l'indice di curtosi β_2 , le cui espressioni vengono di seguito riportate:

$$\gamma_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_n}{\sigma} \right)^3 \qquad \beta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_n}{\sigma} \right)^4$$

 X_n e σ rappresentano rispettivamente la media e la deviazione standard della distribuzione. L'indice di Pearson consente di rilevare se e quanto una distribuzione sia disposta simmetricamente attorno alla sua media, e di conseguenza se abbia una coda più lunga dell'altra. Per convenzione, se la coda più lunga è a sinistra della media, si parla di asimmetria negativa e si vuole che il valore dell'indice di asimmetria abbia segno negativo ($\gamma_1 < 0$). Nel caso opposto si parla di asimmetria positiva e si vuole che il valore dell'indice assuma segno positivo ($\gamma_1 > 0$). Una distribuzione simmetrica avrà invece indice di asimmetria nullo ($\gamma_1 = 0$). L'indice di curtosi consente invece di misurare la densità dei dati attorno alla propria media, dunque quanto una distribuzione sia piatta oppure appuntita. Esso è costruito con l'obiettivo di confrontare la distribuzione oggetto di studio con quella Gaussiana, la quale dunque è assunta come riferimento. Nel caso la distribuzione sia Gaussiana, l'indice di curtosi assume il valore pari a 3; se la distribuzione è molto piatta, risulta $\beta_2 < 3$ (distribuzione platicurtica), in caso contrario $\beta_2 > 3$ (distribuzione leptocurtica). I valori degli indici di Pearson e di curtosi concernenti ciascuno dei 16 pannelli murari della tipologia T1 e dei 7 pannelli della tipologia T2 sono riportati nelle tabelle 3.2 e 3.3.

Tab. 3.2 – Indice di Pearson γ_1 e indice di curtosi β_2 per la tipologia muraria T1 (*Brignola et al., 2006*).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
¥1	0,84	0,40	0,11	0,94	2,53	1,21	1,40	0,38
β_2	3,98	3,20	2,18	3,24	11,90	4,18	3,76	1,98
	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16

¥1	0,01	0,24	0,60	0,17	0,09	0,83	0,81	0,36
β_2	3,01	3,02	2,45	2,39	2,55	3,51	3,94	2,09

Tab. 3.3 – Indice di Pearson γ_1 e indice di curtosi β_2 per la tipologia muraria T2 (*Brignola et al., 2006*).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
<i>γ1</i>	-0,32	0,53	0,10	-0,53	-1,68	0,15	0,42
β_2	1,93	2,14	1,87	2,33	7,73	3,19	2,07

Informazioni significative sono proposte dall'analisi dell'indice di Pearson. Nel caso dei pannelli murari della tipologia T1 (muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno) appare efficace evidenziare come l'indice di Pearson sia sempre maggiore di zero; di conseguenza le distribuzioni delle velocità sono tutte asimmetriche positive e mostrano una coda destrosa riconducibile probabilmente alla presenza di anomalie associabili in prevalenza a elementi passanti nello spessore della muratura. La tipologia muraria è inoltre caratterizzata da una mediana generalmente bassa a causa della presenza del nucleo interno. I pannelli murari del tipo T2 (muratura in pietre a spacco con buona tessitura) presentano invece valori sia positivi sia negativi dell'indice di asimmetria; ciò potrebbe essere correlabile, secondo i casi, alla presenza di elementi passanti o di vuoti all'interno della struttura muraria (*Brignola et al., 2006*).

L'approccio di tipo statistico adottato nell'elaborazione dei dati potrebbe rappresentare l'input per lo studio di un nuovo metodo di indagine semplificato basato sulla definizione di un parametro quantitativo che permetta di correlare in un certo modo pareti in muratura appartenenti a edifici diversi, ma con caratteristiche costruttive analoghe; tra i vantaggi, sarebbe possibile evitare l'esecuzione sistematica di prove dirette. La metodologia adotterebbe dei range di velocità sonica caratteristici per ciascuna classe tipologica specificata all'interno dell'OPCM; la calibrazione dei range di velocità potrebbe essere compiuta assumendo come estremi di ciascun intervallo il primo e il terzo quartile, intesi come valori mediani calcolati su un campione di pannelli rappresentativo della tipologia muraria alla quale il range deve essere attribuito (*Brignola et al., 2006*).

Si riportano in tabella 3.4, a titolo di esempio, i parametri statistici calcolati dai valori mediani dei 16 pannelli T1.

Tab. 3.4 – Range di velocità soniche per la tipologia muraria T1 (*Brignola et al., 2006*).

Min (m/s)	1° Quartile (m/s)	Mediana (m/s)	3° Quartile (m/s)	Max (m/s)
340	993,5	1253	1574	1890

L'esiguo numero d'indagini effettuate sui pannelli T2 e, dunque, la scarsa rappresentatività del campione, non ha permesso di calibrare un opportuno range di velocità soniche per la tipologia muraria di riferimento.

Ai fini dell'individuazione degli elementi passanti è stato assunto un valore limite di riferimento della velocità sonica in funzione della tipologia di roccia di cui sono costituiti gli elementi caratterizzanti la struttura muraria dei pannelli, cioè arenarie compatte e scisti paleozoici. In ragione dei valori di riferimento caratteristici della velocità delle onde longitudinali di tali rocce, la velocità limite scelta è 2500 m/s. Dall'analisi dei boxplot che interessano i pannelli murari di tipo T1, si osserva che solo in corrispondenza dei pannelli P1, P5, P6, P7, P9, P10, P11, P15, P16 è possibile trovare un valore di velocità superiore al valore limite fissato, se si tiene conto anche dei valori puntuali rappresentati dagli outliner. Analizzando in parallelo l'indice di curtosi si osserva inoltre che, fra i pannelli murari sopra citati, quelli P1, P9, P10 e P16 presentano una distribuzione leptocurtica, dunque particolarmente addensata, attorno ad un valore mediano superiore rispetto a quello del range di riferimento (pari a 1253 m/s). Quest'aspetto potrebbe essere ricondotto, dal punto di vista costruttivo, a un buon ammorsamento fra i paramenti che costituiscono i pannelli murari, ma soprattutto, dato il leptocurtismo, a un ammorsamento medio diffuso. In tal caso sembrerebbe dunque lecito assumere un valore del coefficiente correttivo dei parametri di resistenza meccanica pari a 1,5, come suggerito all'interno della tabella 11.D.2 dell'OPCM; sarebbe opportuno invece, da un punto di vista cautelativo, assumere un coefficiente poco più basso per i restanti pannelli, in ragione di un inferiore grado di ammorsamento (Brignola et al., 2006).

I pannelli murari indicati come T2, per la tipologia costruttiva che li caratterizza, presentano generalmente una tessitura più accurata rispetto ai pannelli T1 e i valori delle velocità soniche dovrebbero essere mediamente prossimi al valore limite di 2500 m/s adottato, ma a causa dell'esiguità del campione non sono state avanzate opportune considerazioni (*Brignola et al., 2006*).

L'indagine sonica attraverso metodo diretto si è rivelata essere uno strumento adeguato all'individuazione di connessioni trasversali fra i paramenti che caratterizzano le murature lapidee delle costruzioni storiche. In questo senso l'indagine si dimostra come un supporto utile alla caratterizzazione di proprietà della muratura importanti ai fini della determinazione dei parametri meccanici.

L'analisi statistica dei valori delle velocità soniche, seppure sia stata condotta su un campione di pannelli murari relativamente limitato, ha permesso di proporre lo studio di una metodologia semplificata in grado di cogliere il livello di ammorsamento fra i paramenti ed eventualmente calibrare dei range per la velocità, caratteristici di ciascuna tipologia muraria proposta all'interno dell'OPCM 3431 del 2005. L'applicabilità di strumenti statistici risulterebbe particolarmente agevole nel caso in cui la mole dei dati acquisiti fosse importante, come si è verificato durante la campagna di prove soniche alla Ghirlandina.

4. Prove soniche alla Ghirlandina: acquisizione ed analisi dati

4.1 Descrizione della procedura applicativa

La conservazione della Ghirlandina ha posto problematiche di varia natura, alcune delle quali legate alla sicurezza nei confronti del sisma e, più in generale, alla valutazione del comportamento statico e dinamico della struttura. In questo contesto è stato avviato un programma di indagini sperimentali non distruttive finalizzato alla caratterizzazione della muratura. Lo scopo dell'applicazione delle prove soniche è quello di individuare, avendo coscienza delle fasi costruttive della torre e dei materiali impiegati, lotti omogenei della muratura in cui possano essere valutate le caratteristiche meccaniche necessarie ai fini delle analisi di tipo strutturale. La campagna di indagini soniche ha avuto inizio nel giugno del 2009 e si è articolata secondo nove giornate di lavoro, nel corso delle quali sono state realizzate prove in modalità superficiale, semidiretta e diretta lungo la quasi totalità dell'altezza della torre, fino alla quota di circa 76 metri dal piano campagna.

La procedura operativa ha visto condurre dapprima un'attenta ispezione visuale della morfologia del manufatto, per la quale ci si è serviti del supporto costituito dal ponteggio esterno e dalle scale interne alla torre, ai fini della mobilità, e della documentazione geometrica del rilievo della Ghirlandina. L'ispezione ha avuto come obiettivo l'individuazione delle possibili posizioni di prova in funzione dell'accessibilità degli spazi e delle strutture, della presenza di pareti intonacate o affrescate, di buche pontaie e di porte, finestre e feritoie utili al passaggio dei cavi della strumentazione per l'acquisizione dei dati in varie modalità di prova. Per ciascuno degli ambienti della torre, i quali sono stati idealmente individuati attraverso le sezioni orizzontali alle diverse quote, una volta stabilita la o le pareti di prova, la distribuzione delle stazioni di prova, l'ingombro totale ed il passo delle griglie dei punti di misura, a maglia quadrata o rettangolare, sono state riportate le griglie sulla superficie delle pareti.

Non immediata è risultata la scelta delle posizioni necessarie alla realizzazione di prove in trasmissione diretta fra l'interno e l'esterno della torre, o viceversa. In questi casi è stato necessario individuare delle posizioni di prova o, meglio, delle quote facilmente accessibili, in esterno, dai piani del ponteggio installato lungo l'altezza della Ghirlandina e, all'interno, dalla scala in muratura. È stato altresì indispensabile individuare tali posizioni in prossimità delle poche aperture che danno luce agli spazi interni o di buche pontaie, attraverso le quali è stato possibile far passare i cavi della strumentazione di prova.

Dopo aver marcato con precisione, attraverso gesso colorato, la posizione dei punti della griglia sulle pareti da indagare, per ciascuna delle posizioni di prova è stato tracciato un eidotipo (Fig. 4.1) utile a documentare la posizione, l'ingombro ed il passo della griglia. Questo garantirebbe in futuro di localizzare nuovamente le griglie impiegate durante la campagna di indagine qui descritta, di ripetere, eventualmente, le prove nelle medesime stazioni, o di compiere altri tipi di verifiche. Tutti gli schizzi disegnati in cantiere sono stati successivamente riportati in ambiente CAD.

La strumentazione di prova utilizzata è costituita da un martello strumentato e da un accelerometro, impiegati per l'emissione e la ricezione del segnale sonico. Non è stato possibile utilizzare materiale accoppiante, generalmente untuoso, fra la sonda ricevente e le superfici murarie a causa del valore storico del bene indagato. I due strumenti sono stati collegati attraverso delle matasse di cavi, schermati all'esterno, alla stazione di acquisizione dei dati, costituita da una scatola multicanale che funge da amplificatore e condizionatore del segnale, a sua volta collegata ad un PC dotato di scheda di acquisizione dedicata e di un appropriato software per la visualizzazione e per il salvataggio dei dati. Le operazioni di acquisizione dei dati sono state svolte contemporaneamente da tre operatori, addetti rispettivamente al martello, alla sonda ricevente e alla stazione di acquisizione dei dati. Le acquisizioni effettuate consistono nelle forme d'onda complete del martello e dell'accelerometro, registrate su due canali differenti.

La fase preliminare dell'analisi dei dati è consistita nella visualizzazione delle due forme d'onda attraverso il software ElaborSonic2Rev1, il quale ha permesso di misurare i tempi di volo, ossia i tempi impiegati dai segnali per coprire i singoli percorsi fra ogni stazione sorgente e ogni ricevitore. Attraverso gli schizzi precedentemente elaborati al CAD sono state misurate con precisione le lunghezze dei percorsi in questione. I tempi di volo e le distanze sono stati introdotti in fogli elettronici appositamente organizzati ai fini del calcolo delle velocità di propagazione del segnale, intesa come rapporto fra la distanza sorgente-ricevitore ed il tempo di transito. Successivamente sono stati misurati alcuni dei tempi di contatto fra la punta del martello e la superficie muraria, dai quali è stato possibile calcolare le frequenze massime e, note le velocità di propagazione, le lunghezze d'onda minime dei segnali. Questo calcolo è particolarmente interessante perché consente di stimare la risoluzione del segnale, che è generalmente compresa fra 1/3 e 1/2 della lunghezza d'onda. Non sono state invece valutate le caratteristiche di attenuazione del segnale nel passaggio attraverso il materiale.

Nei paragrafi successivi sono mostrati i risultati delle analisi dei dati descritte, organizzati secondo quote diverse della Ghirlandina.



Fig. 4.1 – Schizzo realizzato in cantiere in corrispondenza delle posizioni di prova NB e OB, sul pilastro alla quota +20,00m, dove sono stati acquisiti dati sia in trasmissione superficiale, sia diretta.

4.2 Tempi di volo e calcolo delle velocità di propagazione del segnale

4.2.1 Piano interrato, -2,79m



Fig. 4.2 – Pianta del piano interrato (quota -2,79m).



Fig. 4.3 – Foto del piano interrato in direzione Est.

4.2.1.1 Posizioni di prova NA, OA, pianta a quota -2,79m



Fig. 4.4 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NA e OA.



Fig. 4.5 – Foto delle posizioni di prova: a) NA; b) vista assonometrica con indicazione della parete OA.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in OA												
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)					
0	1 - 2	Н	60,0	652			920						
1	1 - 3	Н	120,0	616			1948						
2	1 - 4	V	60,0	446	354	2825	1345	0,48					
3	1 - 5	D	84,9	544	324	3086	1560	0,51					
4	1 - 6	D	134,2	700	320	3125	1917	0,61					
5	1 - 7	V	120,0	726			1653						
6	1 - 8	D	134,2	1296	574	1742	1035	0,59					
7	1 - 9	D	169,7	1226			1384						
8	4 - 5	Н	60,0	330			1818						
9	4 - 6	Н	120,0	630	428	2336	1905	0,82					
10	7 - 8	Н	60,0	290			2069						
11	7 - 9	Н	120,0	662			1813						
12	8 - 9	Н	60,0	322			1863						
13	5 - 6	Н	60,0	408			1471						
14	4 - 3	D	134,2	930			1443						
15	4 - 9	D	134,2	920			1458						
16	6 - 7	D	134,2	710			1890						
17	2 - 7	D	134,2	680			1973						
18	2 - 9	D	134,2	926			1449						
19	3 - 8	D	134,2	688			1950						
20	2 - 8	V	120,0	638			1881						
21	3 - 9	V	120,0	680			1765						
22	3 - 6	V	60,0	442			1357						
23	2 - 5	V	60,0	536	418	2392	1119	0,47					
							1624						

Tab. 4.1 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OA, -2,79m.

		PROV	E SEMII	DIRETTE	– Tx in C)A, Rx in	NA	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	147,1	650	398	2513	2264	0,90
1	1 - 2	H1	88,6	396			2237	
2	1 - 3	H1	35,4	178	486	2058	1987	0,97
3	2 - 1	H1	168,1	732			2296	
4	2 - 2	H1	120,2	542			2218	
5	2 - 3	H1	88,6	416			2130	
6	3 - 1	H1	205,1	944			2172	
7	3 - 2	H1	168,1	676			2486	
8	3 - 3	H1	147,1	724			2032	
9	4 - 4	H2	147,1	712			2067	
10	4 - 5	H2	88,6	440			2014	
11	4 - 6	H2	35,4	182	530	1887	1943	1,03
12	5 - 4	H2	168,1	668	288	3472	2516	0,72
13	5 - 5	H2	120,2	554			2170	
14	5 - 6	H2	88,6	414			2140	
15	6 - 4	H2	205,1	898			2284	
16	6 - 5	H2	168,1	770			2183	
17	6 - 6	H2	147,1	760	438	2283	1936	0,85
18	7 - 7	H3	147,1	658			2236	
19	7 - 8	H3	88,6	446			1987	
20	7 - 9	H3	35,4	178			1987	
21	8 - 7	H3	168,1	692			2429	
22	8 - 8	H3	120,2	470			2558	
23	8 - 9	H3	88,6	358			2475	
24	9 - 7	H3	205,1	964			2127	
25	9 - 8	H3	168,1	680			2472	
26	9 - 9	H3	147,1	590	322	3106	2494	0,80
				1			2216	

Tab. 4.2 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OA, -2,79m.



Fig. 4.6 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OA, -2,79m.



Fig. 4.7 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NA, -2,79m.

4.2.1.2 Posizioni di prova OB, SB, pianta a quota -2,79m



Fig. 4.8 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OB e SB.



Fig. 4.9 – Foto delle posizioni di prova: a) OB; b) SB.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SB, Rx in OB										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 7	H1	60,8	346	522	1916	1758	0,92			
1	2 - 7	H1	102,1	590	360	2778	1730	0,62			
2	3 - 8	H2	108,2	512			2113				
3	3 - 9	H2	60,8	300	372	2688	2028	0,75			
4	4 - 8	H2	135,7	976			1391				
5	4 - 9	H2	102,1	952	462	2165	1072	0,50			
6	5 - 10	H3	108,2	796			1359				
7	5 - 11	H3	60,8	270	414	2415	2253	0,93			
8	6 - 10	H3	135,7	892			1522				
9	6 - 11	H3	102,1	802	378	2646	1273	0,48			
							1650				

Tab. 4.3 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SB, -2,79m.



Fig. 4.10 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SB, -2,79m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in OB, Rx in SB										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	7 - 1	H1	60,8	280	872	1147	2173	1,89			
1	7 - 2	H1	102,1	834			1224				
2	8 - 3	H2	108,2	462	370	2703	2341	0,87			
3	8 - 4	H2	135,7	882			1539				
4	9 - 3	H2	60,8	410	1346	743	1484	2,00			
5	9 - 4	H2	102,1	1002	810	1235	1019	0,83			
6	10 - 5	H3	108,2	586	454	2203	1846	0,84			
7	10 - 6	H3	135,7	1290			1052				
8	11 - 5	H3	60,8	408			1491				
9	11 - 6	H3	102,1	834	636	1572	1224	0,78			
							1539				

Tab. 4.4 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OB, -2,79m.



Fig. 4.11 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, -2,79m.

		PR	OVE SUP	PERFICIA	ALI – Tx (e Rx in Sl	B	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	472	434	2304	1271	0,55
1	1 - 4	D	78,1	530	440	2273	1474	0,65
2	1 - 6	D	116,6	1170			997	
3	1 - 3	V	50,0	520	486	2058	962	0,47
4	1 - 5	V	100,0	1098			911	
5	3 - 4	Н	60,0	692	336	2976	867	0,29
6	5 - 6	Н	60,0	336	370	2703	1786	0,66
7	2 - 6	V	100,0	1006			994	
8	4 - 6	V	50,0	608			822	
9	3 - 5	V	50,0	312	340	2941	1603	0,54
10	5 - 4	D	78,1	1392			561	
11	3 - 2	D	78,1	924			845	
12	3 - 6	D	78,1	1042			750	
13	2 - 5	D	116,6	1602			728	
	-						1041	

Tab. 4.5 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SB, -2,79m.



Fig. 4.12 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SB, -2,79m.

4.2.1.3 Posizioni di prova SA, EA, pianta a quota -2,79m



Fig. 4.13 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SA e EA.



Fig. 4.14 – Foto delle posizioni di prova: a) SA; b) EA.
		PR	OVE SUP	PERFICIA	ALI – Tx e	e Rx in SA	A Contraction of the second se	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	50,0	358	488	2049	1397	0,68
1	1 - 3	Н	100,0	984			1016	
2	1 - 4	V	50,0	370			1351	
3	1 - 5	D	70,7	586			1207	
4	1 - 6	D	111,8	834			1341	
5	1 - 7	V	100,0	760			1316	
6	1 - 8	D	111,8	862			1297	
7	1 - 9	D	141,4	1112			1272	
8	2 - 3	Н	50,0	534	444	2252	936	0,42
9	4 - 5	Н	50,0	582	560	1786	859	0,48
10	4 - 6	Н	100,0	760			1316	
11	5 - 6	Н	50,0	426			1174	
12	7 - 8	Н	50,0	484			1033	
13	7 - 9	Н	100,0	834			1199	
14	8 - 9	Н	50,0	444			1126	
15	4 - 7	V	50,0	484			1033	
16	2 - 5	V	50,0	308	382	2618	1623	0,62
17	2 - 8	V	100,0	710			1408	
18	5 - 8	V	50,0	484			1033	
19	3 - 6	V	50,0	250	364	2747	2000	0,73
20	3 - 9	V	100,0	714			1401	
21	6 - 9	V	50,0	354	398	2513	1412	0,56
22	4 - 9	D	111,8	794			1408	
23	4 - 3	D	111,8	848			1318	
24	7 - 3	D	141,4	1064			1329	
25	7 - 6	D	111,8	844			1325	
26	8 - 3	D	111,8	858			1303	
				1			1275	

Tab. 4.6 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, -2,79m.

		PROV	'E SEMII	DIRETTE	2 – Tx in S	SA, Rx in	EA	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	125,8	652	708	1412	1929	1,37
1	1 - 2	H1	153,1	816			1876	
2	2 - 1	H1	82,6	504			1639	
3	2 - 2	H1	120,1	638			1883	
4	3 - 1	H1	53,2	272			1954	
5	3 - 2	H1	102,1	534			1912	
6	4 - 3	H2	125,8	854	468	2137	1473	0,69
7	4 - 4	H2	153,1	958			1598	
8	5 - 3	H2	82,6	524			1577	
9	5 - 4	H2	120,1	778			1544	
10	6 - 3	H2	53,2	192	362	2762	2769	1,00
11	7 - 5	H3	125,8	756			1664	
12	7 - 6	H3	153,1	1044			1466	
13	8 - 5	H3	82,6	468	338	2959	1765	0,60
14	8 - 6	H3	120,1	666			1803	
15	9 - 5	H3	53,2	366			1452	
16	9 - 6	H3	102,1	746	524	1908	1369	0,72
		<u>ı</u>		1			1746	

Tab. 4.7 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SA, -2,79m.



Fig. 4.15 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, -2,79m.



Fig. 4.16 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SA, -2,79m.





Fig. 4.17 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SC e EC.



a)



b)

Fig. 4.18 – Foto delle posizioni di prova: a) SC; b) EC.

		PROV	YE SEMII	DIRETTE	2 – Tx in I	EC, Rx in	SC	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	5 - 1	Н	173,5	778	368	2717	2230	0,82
1	6 - 1	Н	215,5	1334			1615	
2	5 - 2	Н	156,6	710			2206	
3	6 - 2	Н	200,9	1310	790	1266	1533	1,21
4	5 - 3	Н	140,6	662	374	2674	2124	0,79
5	6 - 3	Н	187,2	1320			1418	
6	5 - 4	Н	125,7	676			1859	
7	6 - 4	Н	174,9	1070	600	1667	1634	0,98
	•		1	1		1	1827	

Tab. 4.8 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EC, -2,79m.



Fig. 4.19 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EC, -2,79m.

		PROV	'E SEMII	DIRETTE	2 – Tx in S	SC, Rx in	EC	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 5	Н	173,5	798	374	2674	2174	0,81
1	1 - 6	Н	215,5	1064			2025	
2	2 - 5	Н	156,6	796			1968	
3	2 - 6	Н	200,9	948	450	2222	2119	0,95
4	3 - 5	Н	140,6	920			1528	
5	3 - 6	Н	187,2	1020			1836	
6	4 - 5	Н	125,7	672	486	2058	1870	0,91
7	4 - 6	Н	174,9	850			2057	
T.	-					-	1947	

Tab. 4.9 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SC, -2,79m.



Fig. 4.20 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SC, -2,79m.

4.2.2 Piano terra, 0,00m



Fig. 4.21 – Pianta del piano terra (quota 0,00m).



Fig. 4.22 – Foto del piano terra in direzione Ovest.

4.2.2.1 Posizioni di prova OA, SA, SBest, OCest, pianta a quota 0,00m



Fig. 4.23 – Restituzione grafica della posizione di prova OA: a) griglia 1; b) griglia 2.



a)



b)

Fig. 4.24 – Foto della posizione di prova OA: a) griglia 1; b) griglia 2.



Fig. 4.25 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.26 – Foto della posizione di prova SA.

4 5 6 15 20 20	7 1 27 J SBest	2 30 J 30 J	3	
213				

Fig. 4.27 – Restituzione grafica della posizione di prova SBest.



Fig. 4.28 – Foto della posizione di prova SBest.



Fig. 4.29 – Restituzione grafica della posizione di prova OCest.



Fig. 4.30 – Foto della posizione di prova OCest.

	PR	OVE	SUPERFI	ICIALI –	Tx e Rx i	n OA (gri	iglia 2)	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	10 - 11	Н	50,0	266	402	2488	1880	0,76
1	12 - 13	Н	50,0	274			1825	
2	10 - 13	D	70,7	376	464	2155	1881	0,87
3	12 - 11	D	70,7	384			1841	
4	10 - 14	V	120,0	770			1558	
5	11 - 15	V	120,0	858	406	2463	1399	0,57
6	10 - 15	D	130,0	890			1461	
7	11 - 14	D	130,0	756			1720	
	-		<u>.</u>				1695	

Tab. 4.10 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OA, 0,00m.

Tab. 4.11 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OA, 0,00m.

	PRO	VE SE	MIDIRE	TTE – Tx	in OA (g	riglia 2),	Rx in SA	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
2	10 - 4	H1	111,3	516	386	2591	2157	0,83
3	11 - 4	H1	62,4	316	468	2137	1973	0,92
4	10 - 5	H1	119,6	930	420	2381	1286	0,54
5	11 - 5	H1	76,2	452	386	2591	1686	0,65
6	10 - 6	H1	134,3	760	326	3067	1767	0,58
7	11 - 6	H1	97,6	572			1707	
8	12 - 7	H2	111,3	622			1790	
9	13 - 7	H2	62,4	362			1723	
10	12 - 8	H2	119,6	766			1562	
11	13 - 8	H2	76,2	442			1724	
12	12 - 9	H2	134,3	822			1633	
13	13 - 9	H2	97,6	640			1525	
							1711	



Fig. 4.31 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OA, 0,00m.



Fig. 4.32 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OA, 0,00m.

		PR	OVE SUP	ERFICIA	LI – Tx e	e Rx in SA	4	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	30,0	208	410	2439	1442	0,59
1	1 - 3	Н	60,0	426			1408	
2	4 - 3	D	78,1	420			1860	
3	5 - 3	D	58,3	394			1480	
4	6 - 3	V	50,0	366			1366	
5	7 - 3	D	116,6	780			1495	
6	8 - 3	D	104,4	488	354	2825	2139	0,76
7	9 - 3	V	100,0	708			1412	
8	1 - 5	D	58,3	442			1319	
9	2 - 5	V	50,0	352			1420	
10	3 - 5	D	58,3	300			1944	
11	4 - 5	Н	30,0	174			1724	
12	6 - 5	Н	30,0	164	480	2083	1829	0,88
13	7 - 5	D	58,3	396			1472	
14	8 - 5	V	50,0	230	452	2212	2174	0,98
15	9 - 5	D	58,3	394			1480	
				1			1623	

Tab. 4.12 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, 0,00m.

Tab. 4.13 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SBest, 0,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in SBest, Rx in SA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 9	Hinv	370,0	1670	358	2793	2216	0,79			
1	2 - 8	Hinv	356,0	1678	214	4673	2122	0,45			
2	3 - 7	Hinv	356,0	1720	264	3788	2070	0,55			
							2136				

	PROVE DIRETTE – Tx in SA, Rx in SBest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	7 - 3	Н	356,0	1760	266	3759	2023	0,54			
1	8 - 2	Н	356,0	1650	318	3145	2158	0,69			
2	9 - 1	Н	370,0	1474	246	4065	2510	0,62			
							2230				

Tab. 4.14 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 0,00m.

Tab. 4.15 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 0,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in SA, Rx in SBest										
N	Ty _ By	DIR	L (cm)	ΔΤ (us)	te (us)	fmax	v(m/s)	λmin			
1	1 - 1 -	DIR.		Δ1 (μs)	ις (μs)	(Hz)	v (111/5)	(m)			
0	10 - 7	Н	370,0	1388	364	2747	2666	0,97			
1	10 - 7	Н	370,0	1368			2705				
2	10 - 7	Н	370,0	1416			2613				
3	11 - 6	Н	356,0	1306	302	3311	2726	0,82			
4	11 - 6	Н	356,0	1304			2730				
5	11 - 6	Н	356,0	1352			2633				
6	11 - 6	Н	356,0	1352			2633				
	Valor	e medi	o delle ve	locità sulla	a distanza	11 – 6	2681				
7	12 - 5	Н	356,0	1502			2370				
8	12 - 5	Н	356,0	1548			2300				
	Valor	e medi	o delle vel	locità sulla	a distanza	12 – 5	2335				
9	13 - 4	Н	356,0	1902	2322	431	1872	4,35			
10	13 - 4	Н	356,0	1940	2256	443	1835	4,14			
11	13 - 4	Н	356,0	2050			1737				
	Valore medio delle velocità sulla distanza 13 - 4					13 - 4	1814				
12	10 - 7	Н	370,0	1388			2666				
13	10 - 7	Н	370,0	1444			2562				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
14	10 - 7	Н	370,0	1464			2527	
	Valor	e medi	o delle ve	locità sulla	a distanza	10 - 7	2623	
							2422	



Fig. 4.33 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 0,00m.



Fig. 4.34 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SA, SBest, 0,00m.

PROVE DIRETTE - Tx in OCest, Rx in OA										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax	v (m/s)	λmin		
						(пz)		(m)		
0	1 - 10	Н	455,0	4016	218	4587	1133	0,25		
1	1 - 10	Н	455,0	4042			1126			
2	1 - 10	Н	455,0	4018			1132			
	Valor	e medi	o delle ve	locità sulla	a distanza	1 - 10	1130			
3	2 - 9	Н	470,0	6266			750			
4	2 - 9	Н	470,0	6222	170	5882	755	0,13		
5	2 - 9	Н	470,0	6256			751			
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	2 - 9	752			
6	3 - 8	Н	455,0	2788			1632			
7	3 - 8	Н	455,0	2768			1644			
8	3 - 8	Н	455,0	2768	348	2874	1644	0,57		
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	3 - 8	1640			
9	4 - 7	Н	455,0	3108	300	3333	1464	0,44		
10	5 - 6	Н	455,0	2792			1630			
11	5 - 6	Н	455,0	2864			1589			
12	5 - 6	Н	455,0	2854			1594			
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	5 - 6	1604			
13	6 - 5	Н	455,0	2062	262	3817	2207	0,58		
14	6 - 5	Н	455,0	2098			2169			
15	6 - 5	Н	455,0	2062			2207			
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	6 - 5	2194			
16	7 - 4	Н	455,0	1782			2553			
17	7 - 4	Н	455,0	1806	214	4673	2519	0,54		
18	7 - 4	Н	455,0	1736		<u> </u>	2621			
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	.7-4	2565			
19	8 - 3	Н	455,0	2120			2146			
20	8 - 3	Н	455,0	2040			2230			

Tab. 4.16 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OCest, 0,00m.

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
21	8 - 3	Н	455,0	2170			2097	
	Valo	re med	2158					
22	10 - 1	Н	458,0	2192			2089	
23	10 - 1	Н	458,0	2190			2091	
24	10 - 1	Н	458,0	2192			2089	
	Valor	e medi	2090					
	-						1733	



Fig. 4.35 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 0,00m.

4.2.2.2 Posizioni di prova OB, SC, OAest, pianta a quota 0,00m



Fig. 4.36 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OB, SC.



Fig. 4.37 – Foto delle posizioni di prova OB, SC.



Fig. 4.38 – Restituzione grafica della posizione di prova OAest.



Fig. 4.39 – Foto della posizione di prova OAest.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in OB, Rx in SC										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 4	Н	105,7	550	588	1710	1922	1,13			
1	2 - 4	Н	76,1	394	558	1792	1932	1,08			
2	3 - 4	Н	65,6	1010	1288	776	650	0,84			
3	1 - 5	Н	135,1	680			1987				
4	2 - 5	Н	112,0	624			1794				
5	3 - 5	Н	104,3	536			1946				
	-		<u>.</u>				1705				

Tab. 4.17 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OB, 0,00m.

Tab. 4.18 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SC, 0,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SC, Rx in OB										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	4 - 1	Н	105,7	594	340	2941	1780	0,61			
1	4 - 2	Н	76,1	354	276	3623	2151	0,59			
2	4 - 3	Н	65,6	298			2202				
3	5 - 1	Н	135,1	680	298	3356	1987	0,59			
4	5 - 2	Н	112,0	532			2105				
5	5 - 3	Н	104,3	512			2037				
	-	÷	<u>.</u>			<u>.</u>	2043				

Tab. 4.19 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OAest, 0,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OAest, Rx in OB									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 3	Н	193,0	1230	226	4425	1569	0,35		
1	2 - 2	Н	193,0	1158	192	5208	1667	0,32		
2	3 - 1	Н	193,0	1254	234	4274	1539	0,36		
							1592			



Fig. 4.40 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, 0,00m.



Fig. 4.41 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SC, 0,00m.



Fig. 4.42 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OAest, 0,00m.



Fig. 4.43 – Restituzione grafica della posizione di prova NA.



Fig. 4.44 – Foto della posizione di prova NA.



Fig. 4.45 – Restituzione grafica della posizione di prova NB.



Fig. 4.46 – Foto della posizione di prova NB.



Fig. 4.47 – Restituzione grafica della posizione di prova OBest.



Fig. 4.48 – Foto della posizione di prova OBest.

		PRO	OVE SUP	ERFICIA	LI – Tx e	e Rx in N	Α	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	50,0	352			1420	
1	1 - 2	Н	50,0	532			940	
	Valore medio delle velocità sulla distanza 1 - 2						1180	
2	3 - 2	Н	50,0	336	406	2463	1488	0,60
3	9 - 2	D	111,8	860			1300	
4	8 - 2	V	100,0	706			1416	
5	4 - 2	D	70,7	486			1455	
6	7 - 2	D	111,8	758	432	2315	1475	0,64
7	1 - 9	D	141,4	1036			1365	
8	7 - 9	Н	100,0	686			1458	
9	8 - 9	Н	50,0	346			1445	
10	3 - 9	V	100,0	768	542	1845	1302	0,71
							1388	

Tab. 4.20 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NA, 0,00m.



Fig. 4.49 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NA, 0,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in NB, Rx in NA									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	12 - 10	Н	28,4	460	388	2577	618	0,24		
1	13 - 10	Н	9,4	456	566	1767	207	0,12		
2	12 - 11	Н	37,5	494			760			
3	13 - 11	Н	26,3	532			493			
	-		<u>.</u>			<u>.</u>	520			

Tab. 4.21 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NB, 0,00m.

Tab. 4.22 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OBest, 0,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OBest, Rx in NA									
Ν	Ty - Ry	DIR	L (cm)	AT (us)	te (us)	fmax	v (m/s)	λmin		
11		DIK.	L (em)	Δ1 (μ3)	τς (μ3)	(Hz)	v (m/s)	(m)		
0	1 - 3	Н	359,0	3154	240	4167	1138	0,27		
1	1 - 3	Н	359,0	3108			1155			
2	1 - 3	Н	359,0	2994			1199			
3	1 - 3	Н	359,0	3118			1151			
	Valor	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	1 – 3	1161			
4	2 - 2	Н	359,0	3204	248	4032	1120	0,28		
5	2 - 2	Н	359,0	3124			1149			
6	2 - 2	Н	359,0	3156			1138			
7	2 - 2	Н	359,0	3160			1136			
	Valor	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	2-2	1136			
8	3 - 1	Н	359,0	1934			1856			
9	3 - 1	Н	359,0	1926	188	5319	1864	0,35		
10	3 - 1	Н	359,0	1972	286	3497	1820	0,52		
11	3 - 1	Н	359,0	1980			1813			
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	i 3 - 1	1838			
							1378			



Fig. 4.50 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NB, 0,00m.



Fig. 4.51 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OBest, 0,00m.



Fig. 4.52 – Restituzione grafica della posizione di prova NC.



Fig. 4.53 – Foto della posizione di prova NC.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in NC											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	50,0	722			693					
1	1 - 3	Н	100,0	900			1111					
2	2 - 3	Н	50,0	300			1667					
3	1 - 5	DIR.	70,7	602			1175					
4	1 - 4	V	50,0	802			623					
5	1 - 6	-	Error	e nel segn	nel segnale del martello							
6	1 - 7	V	100,0	450	458	2183	2222	1,02				
7	1 - 8	D	111,8	616			1815					
8	1 - 9	D	141,4	922	544	1838	1534	0,83				
9	5 - 4	Н	50,0	670	710	1408	746	0,53				
10	6 - 4	Н	100,0	660			1515					
11	9 - 7	Н	100,0	616			1623					
12	8 - 7	Н	50,0	218	460	2174	2294	1,06				
13	2 - 5	V	50,0	550			909					
14	2 - 8	V	100,0	642	462	2165	1558	0,72				
15	3 - 6	V	50,0	346			1445					
16	3 - 9	V	100,0	506			1976					
17	3 - 7	D	141,4	898			1575					
18	2 - 7	D	111,8	834			1341					
19	2 - 8	V	100,0	1070	560	1786	935	0,52				
20	3 - 8	D	111,8	940			1189					
21	3 - 4	D	111,8	802			1394					
22	9 - 4	D	111,8	970			1153					
				1			1386					

Tab. 4.23 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NC, 0,00m.



Fig. 4.54 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OBest, 0,00m.

4.2.2.5 Posizioni di prova EA, SB, EBest, pianta a quota 0,00m



Fig. 4.55 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 4.56 – Foto della posizione di prova EA.



Fig. 4.57 – Restituzione grafica della posizione di prova SB.



Fig. 4.58 – Foto della posizione di prova SB.


Fig. 4.59 – Restituzione grafica della posizione di prova EBest.



Fig. 4.60 – Foto della posizione di prova EBest.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in EA											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	60,0	414	302	3311	1449	0,44				
1	1 - 3	Н	120,0	784			1531					
2	1 - 5	D	78,1	466			1676					
3	1 - 6	D	130,0	822			1582					
4	1 - 4	V	50,0	318			1572					
5	1 - 7	V	100,0	620			1613					
6	1 - 8	D	116,6	794	430	2326	1469	0,63				
7	1 - 9	D	156,2	1114			1402					
8	2 - 3	Н	60,0	466			1288					
9	4 - 5	Н	60,0	354			1695					
10	4 - 6	Н	120,0	818			1467					
11	5 - 6	Н	60,0	328	358	2793	1829	0,65				
12	7 - 8	Н	60,0	388			1546					
13	7 - 9	Н	120,0	774			1550					
14	8 - 9	Н	60,0	412			1456					
15	1 - 4	V	50,0	358	342	2924	1397	0,48				
16	1 - 7	V	100,0	788			1269					
17	2 - 5	V	50,0	316			1582					
18	2 - 8	V	100,0	616			1623					
19	4 - 7	V	50,0	252	396	2525	1984	0,79				
20	5 - 8	V	50,0	258			1938					
21	3 - 6	V	50,0	322			1553					
22	3 - 9	V	100,0	768			1302					
23	6 - 9	V	50,0	394			1269					
24	2 - 9	D	116,6	730	396	2525	1598	0,63				
25	2 - 7	D	116,6	746			1563					
26	3 - 7	D	156,2	1318	580	1724	1185	0,69				
27	3 - 8	D	116,6	782			1491					

Tab. 4.24 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EA, 0,00m.

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
28	3 - 4	D	130,0	928			1401	
							1527	

Tab. 4.25 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EA, 0,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EA, Rx in SB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	124,0	908	326	3067	1366	0,45				
1	1 - 2	H1	75,1	544			1381					
2	1 - 3	H1	30,0	198	492	2033	1513	0,74				
3	2 - 1	H1	152,1	1036			1468					
4	2 - 2	H1	112,5	746			1509					
5	2 - 3	H1	94,8	546	382	2618	1736	0,66				
6	3 - 1	H1	195,2	1178			1657					
7	3 - 2	H1	164,0	1102			1488					
8	3 - 3	H1	143,8	1122			1282					
9	4 - 4	H2	75,1	324			2318					
10	4 - 5	H2	30,0	162			1849					
11	5 - 4	H2	112,5	570	332	3012	1974	0,66				
12	5 - 5	H2	84,8	372	362	2762	2279	0,83				
13	6 - 4	H2	164,0	1190			1378					
14	6 - 5	H2	143,8	974			1476					
-	-	1645										

Tab. 4.26 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EA, 0,00m.

PROVE DIRETTE - Tx in EA, Rx in EBest									
N Tx - Rx DIR. L (cm) ΔT (μ s) tc (μ s) fmax (Hz) v (m/s)								λmin (m)	
0	1 - 3	H1	185,0	1564	320	3125	1183	0,38	

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
1	2 - 2	H1	185,0	1384	288	3472	1337	0,38
2	3 - 1	H1	185,0	1014			1824	
3	4 - 6	H2	185,0	1060			1745	
4	5 - 5	H2	185,0	1062			1742	
5	6 - 4	H2	185,0	874	268	3731	2117	0,57
6	7 - 9	H3	185,0	866	386	2591	2136	0,82
7	8 - 8	Н3	185,0	1182	316	3165	1565	0,49
8	9 - 7	H3	185,0	1070			1729	
9	10 - 10	H1	185,0	972			1903	
10	11 - 11	H1	185,0	1168			1584	
11	12 - 12	H1	185,0	1510	286	3497	1225	0,35
							1674	

Tab. 4.27 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EBest, 0,00m.

		PRO	VE DIRE	CTTE - TX	in EBest	, Rx in E	A	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	3 - 1	H1inv	185,0	1712	260	3846	1081	0,28
1	2 - 2	H1inv	185,0	1436	280	3571	1288	0,36
2	1 - 3	Hlinv	185,0	1026			1803	
3	6 - 4	H2inv	185,0	1074			1723	
4	5 - 5	H2inv	185,0	942			1964	
5	4 - 6	H2inv	185,0	954			1939	
6	9 - 7	H3inv	185,0	820	224	4464	2256	0,51
7	8 - 8	H3inv	185,0	1122			1649	
8	7 - 9	H3inv	185,0	876	266	3759	2112	0,56
9	10 - 10	H1inv	185,0	1044			1772	
10	11 - 11	H1inv	185,0	1202	202	4950	1539	0,31
11	12 - 12	H1inv	185,0	1258	176	5682	1471	0,26
	-	•		•			1716	



Fig. 4.61 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EA, 0,00m.



Fig. 4.62 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EA, 0,00m.



Fig. 4.63 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EA, EBest, 0,00m.

4.2.3 Piano uno, 3,44m



Fig. 4.64 – Pianta del piano uno (quota +3,44m).



Fig. 4.65 – a) Elaborazione dello schizzo della parete OB; b) Preparazione di alcune griglie di prova; c) Acquisizione dei dati.

4.2.3.1 Posizioni di prova OC, EA, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.66 – Restituzione grafica della posizione di prova OC.



Fig. 4.67 – Foto della posizione di prova OC.



Fig. 4.68 – Restituzione grafica della parete EA.



Fig. 4.69 – Foto della parete EA.

	PROVE DIRETTE – Tx in OC, Rx in EA										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	H1	87,5	450	358	2793	1944	0,70			
1	2 - 1	H1	87,5	422			2073				
2	3 - 4	H2	87,5	456	604	1656	1919	1,16			
3	3 - 4	H2	87,5	458	688	1453	1910	1,31			
4	3 - 4	H2	87,5	452	718	1393	1936	1,39			
	Valor	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	3-4	1922				
5	4 - 3	H2	87,5	416	298	3356	2103	0,63			
6	4 - 3	H2	87,5	406			2155				
	Valo	2129									
	8						2017				

Tab. 4.28 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 3,44m.



Fig. 4.70 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 3,44m.

4.2.3.2 Posizione di prova SB, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.71 – Restituzione grafica della posizione di prova SB.



Fig. 4.72 – Foto della posizione di prova SB.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SB											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	60,0	482	472	2119	1245	0,59				
1	1 - 3	V	60,0	532	464	2155	1128	0,52				
2	1 - 4	D	84,9	936	448	2232	907	0,41				
3	1 - 5	V	120,0	992			1210					
4	1 - 6	D	134,2	1406	440	2273	954	0,42				
5	2 - 6	D	120,0	1320			909					
6	3 - 4	Н	60,0	522			1149					
7	5 - 6	Н	60,0	506			1186					
8	5 - 2	D	134,2	1042			1288					
9	3 - 6	D	84,9	654			1297					
	•	•	L			L	1127					

Tab. 4.29 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SB, 3,44m.



Fig. 4.73 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SB, 3,44m.





Fig. 4.74 – Restituzione grafica della posizione di prova SC.



Fig. 4.75 – Foto della posizione di prova SC.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SC											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	60,0	354	368	2717	1695	0,62				
1	1 - 3	Н	120,0	818	428	2336	1467	0,63				
2	4 - 6	Н	120,0	552	312	3205	2174	0,68				
3	7 - 9	Н	120,0	716			1676					
4	1 - 4	V	60,0	346			1734					
5	1 - 7	V	120,0	732			1639					
6	2 - 8	V	120,0	1090	392	2551	1101	0,43				
7	3 - 9	V	120,0	1012	532	1880	1186	0,63				
8	1 - 9	D	169,7	1294			1312					
9	7 - 3	D	169,7	1302			1303					
	-			•		•	1529					

Tab. 4.30 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SC, 3,44m.



Fig. 4.76 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SC, 3,44m.

4.2.3.4 Posizioni di prova SA, NA, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.77 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.78 – Foto della posizione di prova SA.



Fig. 4.79 – Restituzione grafica della parete NA.



Fig. 4.80 – Foto della parete NA.

	PROVE DIRETTE – Tx in SA, Rx in NA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	64,0	624	702	1425	1026	0,72				
1	2 - 2	H1	64,0	1916	434	2304	334	0,14				
2	3 - 1	H1	64,0	1100			582					
3	4 - 6	H2	64,0	434			1475					
4	5 - 5	H2	64,0	1612	722	1385	397	0,29				
5	6 - 4	H2	64,0	1094			585					
6	7 - 9	H3	64,0	394	870	1149	1624	1,41				
7	8 - 8	H3	64,0	1344			476					
8	9 - 7	H3	64,0	668			958					
	•						829					

Tab. 4.31 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 3,44m.



Fig. 4.81 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SA, 3,44m.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SA												
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)					
0	1 - 3	Н	70,0	1410	990	1010	496	0,49					
1	1 - 6	D	86,0	1018	526	1901	845	0,44					
2	1 - 5	D	61,0	980			623						
3	1 - 9	D	122,1	1192	646	1548	1024	0,66					
4	1 - 8	D	105,9	1032	660	1515	1026	0,68					
5	1 - 7	V	100,0	722			1385						
6	1 - 4	V	50,0	424			1179						
7	4 - 7	V	50,0	344	596	1678	1453	0,87					
8	2 - 5	V	50,0	432			1157						
9	2 - 8	V	100,0	1412			708						
10	5 - 8	V	50,0	690			725						
11	3 - 9	V	100,0	798			1253						
12	6 - 9	V	50,0	326	632	1582	1534	0,97					
13	3 - 6	V	50,0	566			883						
14	4 - 6	Н	70,0	548			1277						
15	7 - 9	Н	100,0	750			1333						
16	7 - 3	D	122,1	1174			1040						
							1055						

Tab. 4.32 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, 3,44m.



Fig. 4.82 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 3,44m.

4.2.3.5 Posizioni di prova EB, NB, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.83 – Restituzione grafica delle posizioni di prova EB, NB.



Fig. 4.84 – Foto della posizione di prova: a) EB; b) NB.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in NB, Rx in EB											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	155,7	782	486	2058	1991	0,97				
1	1 - 2	H1	86,3	532			1622					
2	1 - 3	H1	21,2	174			1219					
3	2 - 1	H1	176,8	990			1786					
4	2 - 2	H1	120,2	704			1708					
5	2 - 3	H1	86,3	508	442	2262	1699	0,75				
6	3 - 1	H1	219,2	1142	392	2551	1919	0,75				
7	3 - 2	H1	176,8	1060			1668					
8	3 - 3	H1	155,7	886			1758					
9	5 - 4	H2	176,8	1760	462	2165	1004	0,46				
10	5 - 5	H2	120,2	792			1518					
11	5 - 6	H2	86,3	382	420	2381	2259	0,95				
12	6 - 4	H2	219,2	1672			1311					
13	6 - 5	H2	176,8	1008			1754					
14	6 - 6	H2	155,7	1048			1486					
15	7 - 7	H3	155,7	1270			1226					
16	7 - 8	H3	86,3	734	504	1984	1176	0,59				
17	7 - 9	H3	21,2	144			1473					
18	8 - 7	H3	176,8	1232			1435					
19	8 - 8	H3	120,2	812			1480					
20	8 - 9	H3	86,3	606			1424					
21	9 - 7	H3	219,2	1462			1499					
22	9 - 8	H3	176,8	1182			1496					
23	9 - 9	H3	155,7	948			1643					
<u>.</u>		I		1			1565					

Tab. 4.33 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NB, 3,44m.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in EB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 3	Н	70,0	606	1148	871	1155	1,33				
1	2 - 6	D	99,0	784	1040	962	1263	1,31				
2	2 - 5	V	70,0	712	892	1121	983	0,88				
3	2 - 1	Н	70,0	710	1126	888	986	1,11				
4	2 - 4	D	99,0	1232			803					
5	3 - 1	Н	140,0	1220			1148					
6	3 - 4	D	156,5	1946	820	1220	804	0,66				
7	3 - 7	D	198,0	1912			1036					
8	3 - 8	D	156,5	1422			1101					
9	3 - 9	V	140,0	1214			1153					
10	6 - 4	Н	140,0	1104	360	2778	1268	0,46				
11	9 - 7	Н	140,0	1192			1174					
12	7 - 1	V	140,0	1230			1138					
13	8 - 2	V	140,0	1292			1084					
14	9 - 3	V	140,0	1170			1197					
15	9 - 1	D	198,0	1850			1070					
16	6 - 9	V	70,0	642	490	2041	1090	0,53				
17	6 - 5	Н	70,0	602			1163					
			1	<u>I</u>	1		1090					

Tab. 4.34 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EB, 3,44m.



Fig. 4.85 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NB, 3,44m.



Fig. 4.86 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EB, 3,44m.



Fig. 4.87 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NC, OB.



Fig. 4.88 – Foto delle posizioni di prova: a) NC; b) OB.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in NC, Rx in OB										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	94,7	718	402	2488	1319	0,53			
1	1 - 2	H1	123,1	942	436	2294	1307	0,57			
2	1 - 3	H1	152,1	914			1664				
3	2 - 1	H1	89,3	460	386	2591	1941	0,75			
4	2 - 2	H1	119,0	1144	364	2747	1040	0,38			
5	2 - 3	H1	148,8	778	380	2632	1912	0,73			
6	3 - 4	H2	94,7	846			1120				
7	3 - 5	H2	123,1	1006			1223				
8	3 - 6	H2	152,1	976			1558				
9	4 - 4	H2	89,3	548	428	2336	1629	0,70			
10	4 - 5	H2	119,0	978			1216				
11	4 - 6	H2	148,8	1282			1160				
12	5 - 7	H3	94,7	692			1369				
13	5 - 8	H3	123,1	898			1371				
14	5 - 9	H3	152,1	946			1608				
15	6 - 7	H3	89,3	652			1369				
16	6 - 8	H3	119,0	792			1502				
17	6 - 9	H3	148,8	882			1687				
<u></u>	8		1			1	1444				

Tab. 4.35 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NC, 3,44m.

Tab. 4.36 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OB, 3,44m.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in OB										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 3	Н	60,0	410	512	1953	1463	0,75			
1	4 - 6	Н	60,0	414	624	1603	1449	0,90			
2	7 - 9	Н	60,0	440			1364				
3	1 - 7	V	100,0	972	658	1520	1029	0,68			

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
4	2 - 8	V	100,0	882	694	1441	1134	0,79
5	9 - 3	V	100,0	742			1348	
6	1 - 9	D	116,6	994			1173	
7	7 - 3	D	116,6	878			1328	
8	1 - 8	D	104,4	764			1366	
9	8 - 3	D	104,4	924			1130	
10	2 - 9	D	104,4	916			1140	
							1266	



Fig. 4.89 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NC, 3,44m.



Fig. 4.90 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OB, 3,44m.

4.2.3.7 Posizioni di prova EC, ED, OA, OD, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.91 – Restituzione grafica delle posizioni di prova EC, ED.



Fig. 4.92 – Foto delle posizioni di prova: a) EC; b) ED.



Fig. 4.93 – Restituzione grafica della parete OA.



Fig. 4.94 – Foto della parete OA.



Fig. 4.95 – Restituzione grafica della parete OD.



Fig. 4.96 – Foto della parete OD.

	PROVE DIRETTE – Tx in EC, Rx in OA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 3	H1	32,0	322	300	3333	994	0,30			
1	2 - 2	H1	32,0	462	406	2463	693	0,28			
2	3 - 1	H1	32,0	274	394	2538	1168	0,46			
3	4 - 5	H2	32,0	324			988				
4	5 - 4	H2	32,0	438	292	3425	731	0,21			
5	6 - 8	H3	32,0	258	322	3106	1240	0,40			
6	7 - 7	H3	32,0	344			930				
7	8 - 6	H3	32,0	536			597				
	-	÷	<u>.</u>		<u>.</u>		918				

Tab. 4.37 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EC, 3,44m.



Fig. 4.97 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EC, 3,44m.

	PROVE DIRETTE – Tx in ED, Rx in OD										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	H1	79,0	372	326	3067	2124	0,69			
1	2 - 1	H1	79,0	380	408	2451	2079	0,85			
2	3 - 4	H2	79,0	476	446	2242	1660	0,74			
3	4 - 3	H2	79,0	482			1639				
4	5 - 6	H3	79,0	472	382	2618	1674	0,64			
5	6 - 5	H3	79,0	428			1846				
	-		<u>.</u>	•	<u>.</u>		1837				

Tab. 4.38 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, ED, 3,44m.



Fig. 4.98 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, ED, 3,44m.

4.2.3.8 Posizioni di prova OFest, OE, pianta a quota 3,44m



Fig. 4.99 – Restituzione grafica della posizione di prova OFest.



Fig. 4.100 – Foto della posizione di prova OFest.



Fig. 4.101 – Restituzione grafica della posizione di prova OE.



Fig. 4.102 – Foto della posizione di prova OE.

		PRO	VE DIRE	ETTE – T	x in OFes	t, Rx in C)E	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
						(112)		(111)
0	1 - 2	H1	205,0	2406	506	1976	852	0,43
1	2 - 1	H1	190,0	2194	300	3333	866	0,26
2	3 - 4	H2	205,0	2482	340	2941	826	0,28
3	3 - 4	H2	205,0	2120			967	
	Valor	896						
4	4 - 3	H2	190,0	1968			965	
5	5 - 6	H3	205,0	1382	370	2703	1483	0,55
6	5 - 6	H3	205,0	1400			1464	
	Valor	re med	io delle ve	locità sull	a distanza	5-6	1474	
7	6 - 5	H3	190,0	2332			815	
8	6 - 5	H3	190,0	2354			807	
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	6 - 5	811	
	-						977	

Tab. 4.39 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OFest, 3,44m.

Tab. 4.40 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OE, 3,44m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OE, Rx in OFest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	H1inv	190,0	2502	284	3521	759	0,22			
1	1 - 2	H1inv	190,0	2432			781				
	Valo	770									
2	2 - 1	H1inv	205,0	2220	342	2924	923	0,32			
3	3 - 4	H2inv	190,0	2032			935				
4	3 - 4	H2inv	190,0	2082			913				
	Valo	924									
5	4 - 3	H2inv	205,0	1348	272	3676	1521	0,41			
6	5 - 6	H3inv	190,0	2022			940				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
7	6 - 5	H3inv	205,0	1388	258	3876	1477	0,38
							1092	



Fig. 4.103 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OFest, OE, 3,44m.
4.2.4 Piano due, 9,62m



Fig. 4.104 – Pianta del piano due (quota +9,62m).



Fig. 4.105 – Realizzazione di prove semidirette fra le pareti SB e OA.

4.2.4.1 Posizioni di prova NAest, NB, EF, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.106 – Restituzione grafica della posizione di prova NAest.



Fig. 4.107 – Foto della posizione di prova NAest.



Fig. 4.108 – Restituzione grafica della posizione di prova NB.



Fig.4.109 – Foto della posizione di prova NB.



Fig. 4.110 – Restituzione grafica della posizione di prova EF.



Fig. 4.111 – Foto della posizione di prova EF.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in NAest											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	80,0	814	286	3497	983	0,28				
1	1 - 3	V	80,0	366	286	3497	2186	0,63				
2	1 - 4	D	113,1	986			1147					
3	3 - 4	Н	80,0	988	390	2564	810	0,32				
4	2 - 4	V	80,0	194	328	3049	4124	1,35				
5	3 - 2	D	113,1	698			1621					
	-	•		•			1812					

Tab. 4.41 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NAest, 9,62m.



Fig. 4.112 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NAest, 9,62m.

	PROVE DIRETTE – Tx in NAest, Rx in NB											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	185,0	986	308	3247	1876	0,58				
1	2 - 1	H1	200,0	1610	304	3289	1242	0,38				
2	3 - 4	H2	185,0	1054	320	3125	1755	0,56				
3	4 - 3	H2	200,0	1440			1389					
4	4 - 3	H2	200,0	1462			1368					
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	4 - 3	1378					
	-						1563					

Tab. 4.42 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NAest, 9,62m.



Fig. 4.113 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NAest, 9,62m.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in NB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	80,0	426	430	2326	1878	0,81				
1	1 - 4	D	113,1	878	440	2273	1289	0,57				
2	1 - 3	V	80,0	554			1444					
3	2 - 3	D	113,1	938			1206					
4	3 - 4	Н	80,0	580	456	2193	1379	0,63				
5	2 - 4	V	80,0	422	320	3125	1896	0,61				
	-	•	•	•		•	1515					

Tab. 4.43 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NB, 9,62m.



Fig. 4.114 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NB, 9,62m.

		PROV	YE SEMII	DIRETTE	$\Sigma - Tx$ in Γ	NB, Rx in	EF	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	133,4	704	578	1730	1895	1,10
1	1 - 2	H1	104,1	658	672	1488	1582	1,06
2	1 - 3	H1	75,3	418			1801	
3	2 - 1	H1	178,6	840			2126	
4	2 - 2	H1	155,1	768			2019	
5	2 - 3	H1	134,2	700			1917	
6	3 - 4	H2	133,4	672			1986	
7	3 - 5	H2	104,1	658			1582	
8	3 - 6	H2	75,3	320	642	1558	2353	1,51
9	4 - 4	H2	178,6	770	596	1678	2319	1,38
10	4 - 5	H2	155,1	672			2307	
11	4 - 6	H2	134,2	662			2027	
	-	1993						

Tab. 4.44 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NB, 9,62m.



Fig. 4.115 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NB, 9,62m.

4.2.4.2 Posizioni di prova EA, SA, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.116 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 4.117 – Foto della posizione di prova EA.



Fig. 4.118 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.119 – Foto della posizione di prova SA.

		PRO	OVE SUP	PERFICIA	LI – Tx e	e Rx in E	A	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	2 - 1	Н	60,0	552	500	2000	1087	0,54
1	1 - 3	V	62,0	584			1062	
2	1 - 4	D	86,3	654	284	3521	1319	0,37
3	1 - 5	V	119,0	790	482	2075	1506	0,73
4	2 - 6	V	119,0	696	380	2632	1710	0,65
5	3 - 4	Н	60,0	342			1754	
6	5 - 6	Н	60,0	562			1068	
7	3 - 5	V	57,0	366			1557	
8	4 - 6	V	57,0	336			1696	
9	6 - 2	V	119,0	698			1705	
	•		1			1	1446	

Tab. 4.45 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EA, 9,62m.



Fig. 4.120 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EA, 9,62m.

		PROV	E SEMI	DIRETTE	2 – Tx in I	EA, Rx in	SA	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	69,3	496	440	2273	1398	0,62
1	1 - 2	H1	21,3	154			1384	
2	3 - 3	H2	69,3	586	400	2500	1183	0,47
3	3 - 4	H2	21,3	178	342	2924	1198	0,41
4	4 - 3	H2	98,4	770	360	2778	1277	0,46
5	4 - 4	H2	72,9	642			1136	
6	5 - 5	H3	69,3	404			1716	
7	5 - 6	H3	21,3	126	408	2451	1692	0,69
8	6 - 5	H3	98,4	696			1413	
9	6 - 6	H3	72,9	432			1688	
	-						1409	

Tab. 4.46 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EA, 9,62m.



Fig. 4.121 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EA, 9,62m.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 5	V	119,0	622	444	2252	1913	0,85				
1	2 - 6	V	119,0	838	408	2451	1420	0,58				
2	1 - 6	D	129,1	934	496	2016	1382	0,69				
3	2 - 5	D	129,1	958			1347					
4	2 - 3	D	79,7	510			1562					
5	1 - 4	D	79,7	516			1544					
	-		<u>.</u>	•	<u>.</u>		1528					

Tab. 4.47 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, 9,62m.



Fig. 4.122 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 9,62m.

4.2.4.3 Posizioni di prova OA, SB, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.123 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OA, SB.



Fig. 4.124 – Foto delle posizioni di prova: a) OA; b) SB.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	100,0	776	342	2924	1289	0,44				
1	1 - 4	D	141,4	1068	472	2119	1324	0,63				
2	1 - 3	V	100,0	888			1126					
3	3 - 4	Н	100,0	608	352	2841	1645	0,58				
4	3 - 2	D	141,4	1122			1260					
5	2 - 4	V	100,0	656	418	2392	1524	0,64				
	-	•		·			1361					

Tab. 4.48 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SB, 9,62m.



Fig. 4.125 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SB, 9,62m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SB, Rx in OA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	165,5	1378	424	2358	1201	0,51				
1	1 - 2	H1	70,7	644			1098					
2	2 - 1	H1	210,2	1564	286	3497	1344	0,38				
3	2 - 2	H1	147,7	1268			1164					
4	3 - 3	H2	165,5	1008	394	2538	1642	0,65				
5	3 - 4	H2	70,7	758	334	2994	933	0,31				
6	4 - 3	H2	210,2	1342	322	3106	1567	0,50				
7	4 - 4	H2	147,7	914			1615					
							1321					

Tab. 4.49 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SB, 9,62m.



Fig. 4.126 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SB, 9,62m.



Fig. 4.127 – Restituzione grafica delle posizioni di prova SC, EB.



Fig. 4.128 – Foto delle posizioni di prova: a) SC; b) EB.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in EB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 1	Н	100,0	1344	936	1068	744	0,70				
1	4 - 1	D	141,4	1002	518	1931	1411	0,73				
2	3 - 1	V	100,0	570	290	3448	1754	0,51				
3	3 - 4	Н	100,0	712			1404					
4	2 - 4	V	100,0	1058	504	1984	945	0,48				
5	2 - 3	D	141,4	1090			1297					
	-						1259					

Tab. 4.50 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EB, 9,62m.



Fig. 4.129 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EB, 9,62m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SC, Rx in EB											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	48,1	348	656	1524	1382	0,91				
1	2 - 1	H1	36,8	268	466	2146	1372	0,64				
2	1 - 2	H1	138,3	1710			808					
3	2 - 2	H1	134,7	1496	768	1302	901	0,69				
4	3 - 3	H2	48,1	274			1755					
5	4 - 3	H2	36,8	176	318	3145	2089	0,66				
6	3 - 4	H2	138,3	1320	278	3597	1047	0,29				
7	4 - 4	H2	134,7	620	304	3289	2173	0,66				
	-						1441					

Tab. 4.51 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SC, 9,62m.



Fig. 4.130 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SC, 9,62m.

4.2.4.5 Posizione di prova SD, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.131 – Restituzione grafica della posizione di prova SD.



Fig. 4.132 – Foto della posizione di prova SD.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in SD											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	Н	100,0	770	452	2212	1299	0,59				
1	1 - 4	D	119,3	892	574	1742	1337	0,77				
2	1 - 3	V	65,0	376	394	2538	1729	0,68				
3	3 - 4	Н	100,0	622	400	2500	1608	0,64				
4	2 - 4	V	65,0	434			1498					
5	2 - 3	D	119,3	714			1670					
	-		<u>.</u>	•			1523					

Tab. 4.52 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SD, 9,62m.



Fig. 4.133 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SD, 9,62m.

4.2.4.6 Posizioni di prova OC, OCest, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.134 – Restituzione grafica della posizione di prova OC.



Fig. 4.135 – Foto della posizione di prova OC.



Fig. 4.136 – Restituzione grafica della posizione di prova OCest.



Fig. 4.137 – Foto della posizione di prova OCest.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in OC										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 4	Н	60,0	340	310	3226	1765	0,55			
1	1 - 5	Н	80,0	550	366	2732	1455	0,53			
2	1 - 6	Н	100,0	640			1563				
3	1 - 7	Н	120,0	858			1399				
4	1 - 8	Н	140,0	1296	452	2212	1080	0,49			
5	1 - 9	Н	160,0	928			1724				
6	9 - 6	Н	60,0	284	302	3311	2113	0,64			
7	9 - 5	Н	80,0	378	410	2439	2116	0,87			
8	9 - 4	Н	100,0	556	290	3448	1799	0,52			
9	9 - 3	Н	120,0	644			1863				
10	9 - 2	Н	140,0	810			1728				
11	9 - 1	Н	160,0	826			1937				
							1712				

Tab. 4.53 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OC, 9,62m.

Tab. 4.54 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 9,62m.

PROVE DIRETTE – Tx in OC, Rx in OCest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 9	Н	190,0	1454			1307			
1	2 - 8	Н	190,0	1434	1370	730	1325	1,82		
2	3 - 7	Н	190,0	1742	1434	697	1091	1,56		
3	4 - 6	Н	190,0	1608	1316	760	1182	1,55		
4	5 - 5	Н	190,0	1534			1239			
5	6 - 4	Н	190,0	1568			1212			
6	7 - 3	Н	190,0	1402			1355			
7	8 - 2	Н	190,0	1362			1395			
8	9 - 1	Н	190,0	1440			1319			
							1269			



Fig. 4.138 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OC, 9,62m.



Fig. 4.139 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 9,62m.



Fig. 4.140 – Restituzione grafica della posizione di prova ND.



Fig. 4.141 – Restituzione grafica della posizione di prova NEest.



Fig. 4.142 – Foto delle posizioni di prova: a),b) ND; c) NEest.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in ND									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 3	Н	40,0	226	382	2618	1770	0,68		
1	1 - 4	Н	60,0	280	408	2451	2143	0,87		
2	1 - 5	Н	80,0	606			1320			
3	1 - 6	Н	100,0	638			1567			
4	1 - 7	Н	120,0	1050	794	1259	1143	0,91		
5	1 - 8	Н	140,0	774	478	2092	1809	0,86		
6	1 - 9	Н	160,0	988			1619			
7	1 - 10	Н	180,0	1634			1102			
8	5 - 8	Н	60,0	372			1613			
9	5 - 9	Н	80,0	468			1709			
10	5 - 10	Н	100,0	892	832	1202	1121	0,93		
	-						1538			

Tab. 4.55 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, ND, 9,62m.



Fig. 4.143 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, ND, 9,62m.

	PROVE DIRETTE – Tx in ND, Rx in NEest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 10	Н	221,0	1286	1336	749	1719	2,30			
1	2 - 9	Н	217,0	1222			1776				
2	3 - 8	Н	213,0	1260			1690				
3	4 - 7	Н	209,0	1196			1747				
4	5 - 6	Н	205,0	1116	1410	709	1837	2,59			
5	6 - 5	Н	201,0	972	1422	703	2068	2,94			
6	7 - 4	Н	197,0	1152			1710				
7	8 - 3	Н	186,0	1162	1282	780	1601	2,05			
8	9 - 2	Н	186,0	1140			1632				
9	10 - 1	Н	186,0	1050			1771				
-	-						1755				

Tab. 4.56 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, ND, 9,62m.



Fig. 4.144 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, ND, 9,62m.

4.2.4.8 Posizioni di prova ED, EEest, SF, pianta a quota 9,62m



Fig. 4.145 – Restituzione grafica della posizione di prova ED.



Fig. 4.146 – Foto della posizione di prova ED.



Fig. 4.147 – Restituzione grafica della posizione di prova EEest.



Fig. 4.148 – Foto della posizione di prova EEest.



Fig. 4.149 – Restituzione grafica della posizione di prova SF.



Fig. 4.150 – Foto della posizione di prova SF.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in ED									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 2	Н	50,0	332	420	2381	1506	0,63		
1	1 - 3	Н	100,0	472	384	2604	2119	0,81		
2	1 - 5	D	61,6	284	434	2304	2169	0,94		
3	1 - 6	D	106,3	682	404	2475	1558	0,63		
4	4 - 5	Н	50,0	290			1724			
5	4 - 6	Н	100,0	540			1852			
6	4 - 2	D	61,6	336			1834			
7	4 - 3	D	106,3	688			1545			
	-	÷	<u>.</u>			<u>.</u>	1788			

Tab. 4.57 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, ED, 9,62m.



Fig. 4.151 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, ED, 9,62m.

	PROVE DIRETTE – Tx in ED, Rx in EEest									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	3 - 1	H1	190,0	1392			1365			
1	2 - 2	H1	205,0	2344	1340	746	875	1,17		
2	1 - 3	H1	190,0	1314	1662	602	1446	2,40		
3	4 - 6	H2	190,0	1250	1172	853	1520	1,78		
4	5 - 5	H2	205,0	1468			1396			
5	6 - 4	H2	190,0	1398			1359			
6	6 - 4	H2	190,0	1258			1510			
7	6 - 4	H2	190,0	1264			1503			
	Valo	1458								
	-						1343			

Tab. 4.58 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, ED, 9,62m.



Fig. 4.152 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, ED, 9,62m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in ED, Rx in SF										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	2 - 1	H1	179,3	1222			1467				
1	2 - 2	H1	153,7	998			1540				
2	2 - 3	H1	130,1	838			1552				
3	3 - 1	H1	214,0	1488	488	2049	1438	0,70			
4	3 - 2	H1	191,8	1202	366	2732	1596	0,58			
5	3 - 3	H1	172,0	1192			1443				
6	5 - 4	H2	179,3	1236			1450				
7	5 - 5	H2	153,7	902	250	4000	1704	0,43			
8	5 - 6	H2	130,1	890			1461				
9	6 - 4	H2	214,0	1476			1450				
10	6 - 5	H2	191,8	1460	478	2092	1314	0,63			
11	6 - 6	H2	172,0	1166			1475				
	-	·					1491				

Tab. 4.59 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, ED, 9,62m.



Fig. 4.153 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, ED, 9,62m.



Fig. 4.154 – a) Restituzione grafica del pilastro al quale si riferiscono le posizioni di prova; b) indicazione, in sezione, dei punti utilizzati nelle prove superficiali e semidirette.


Fig. 4.155 – Foto delle posizioni di prova: a) NC; b) SE; c) OB; d) EC.

	PROVE SUPERFICIALI										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	I - II	Н	32,0	320	504	1984	1000	0,50			
1	III - IV	Н	32,0	316	596	1678	1013	0,60			
2	V - VI	Н	32,0	232	582	1718	1379	0,80			
3	VII - VIII	Н	32,0	236	364	2747	1356	0,49			
	-		<u>.</u>	•			1187				

Tab. 4.60 - Elaborazione delle velocità dalle prove sup., NC, EC, SE, OB, 9,62m.

Tab. 4.61 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidir., NC, EC, SE, 9,62m.

PROVE SEMIDIRETTE											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax	v (m/s)	λmin			
						(Hz)		(m)			
0	VI - III	Н	75,0	398	364	2747	1884	0,69			
1	VI - II	Н	88,0	606	394	2538	1452	0,57			
2	VI - VIII	Н	57,3	306	384	2604	1872	0,72			
3	V - VIII	Н	76,4	462			1654				
4	V - I	Н	88,0	614			1434				
5	IV - VI	Н	57,6	588	608	1645	979	0,60			
6	III - VI	Н	75,0	412			1820				
7	III - VII	Н	84,3	452			1865				
8	III - I	Н	61,8	434			1423				
9	II - VII	Н	83,6	732	658	1520	1141	0,75			
10	II - VI	Н	88,0	608	480	2083	1448	0,69			
11	II - IV	Н	65,8	356			1848				
12	I - IV	Н	82,2	702			1171				
13	I - V	Н	88,0	480			1834				
14	I - VII	Н	66,5	402			1654				
	-	•		•			1565				



Fig. 4.156 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NC, EC, SE, OB, 9,62m.



Fig. 4.157 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NC, EC, SE, 9,62m.

PROVE DIRETTE – Tx in SE, Rx in NC											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 36	Н	82,0	402	338	2959	2040	0,69			
1	2 - 35	Н	82,0	400	328	3049	2050	0,67			
2	4 - 33	Н	82,0	420			1952				
3	5 - 32	Н	82,0	422			1943				
4	6 - 31	Н	82,0	566			1449				
5	7 - 30	Н	82,0	540			1519				
6	8 - 29	Н	82,0	480			1708				
7	9 - 28	Н	82,0	446			1839				
8	10 - 27	Н	82,0	500			1640				
9	11 - 26	Н	82,0	498			1647				
10	12 - 25	Н	82,0	494	408	2451	1660	0,68			
11	13 - 24	Н	82,0	504	548	1825	1627	0,89			
12	14 - 23	Н	82,0	494			1660				
13	15 - 22	Н	82,0	504			1627				
14	16 - 21	Н	82,0	436			1881				
15	17 - 20	Н	82,0	506			1621				
16	18 - 19	Н	82,0	500			1640				
17	19 - 18	Н	82,0	514	384	2604	1595	0,61			
18	20 - 17	Н	82,0	506	502	1992	1621	0,81			
19	21 - 16	Н	82,0	496			1653				
20	22 - 15	Н	82,0	490			1673				
21	23 - 14	Н	82,0	502			1633				
22	24 - 13	Н	82,0	500			1640				
23	25 - 12	Н	82,0	508			1614				
24	26 - 11	Н	82,0	502			1633				
25	27 - 10	Н	82,0	424			1934				
26	28 - 9	Н	82,0	492			1667				
27	29 - 8	Н	82,0	516			1589				

Tab. 4.62 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SE, 9,62m.

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
28	30 - 7	Η	82,0	576			1424	
29	31 - 6	Н	82,0	586			1399	
30	32 - 5	Н	82,0	472			1737	
31	33 - 4	Н	82,0	448			1830	
32	34 - 3	Н	82,0	374	354	2825	2193	0,78
33	35 - 2	Н	82,0	364			2253	
34	36 - 1	Н	82,0	398	532	1880	2060	1,,10
							1733	

Tab. 4.63 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EC, 9,62m.

	PROVE DIRETTE – Tx in EC, Rx in OB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 38	Н	78,0	346	332	3012	2254	0,75				
1	2 - 37	Н	78,0	348	398	2513	2241	0,89				
2	3 - 36	Н	78,0	368	384	2604	2120	0,81				
3	4 - 35	Н	78,0	370			2108					
4	5 - 34	Н	78,0	542			1439					
5	6 - 33	Н	78,0	488			1598					
6	7 - 32	Н	78,0	486			1605					
7	8 - 31	Н	78,0	542			1439					
8	9 - 30	Н	78,0	440			1773					
9	10 - 29	Н	78,0	456			1711					
10	11 - 28	Н	78,0	442	356	2809	1765	0,63				
11	12 - 27	Н	78,0	442			1765					
12	13 - 26	Н	78,0	450			1733					
13	14 - 25	Н	78,0	476			1639					
14	15 - 24	Н	78,0	468			1667					
15	16 - 23	Н	78,0	478			1632					

N	Ty Dy	סוח	L (om)	AT (us)	to (us)	fmax	$\mathbf{v}(\mathbf{m}/\mathbf{s})$	λmin
14	1 X - KX	DIK.	L (CIII)	Δ1 (μs)	ις (με)	(Hz)	v (III/S)	(m)
16	17 - 22	Н	78,0	594	770	1299	1313	1,01
17	18 - 21	Н	78,0	406			1921	
18	19 - 20	Н	78,0	476	382	2618	1639	0,63
19	20 - 19	Н	78,0	454			1718	
20	21 - 18	Н	78,0	444			1757	
21	22 - 17	Н	78,0	418			1866	
22	23 - 16	Н	78,0	438			1781	
23	24 - 15	Н	78,0	354			2203	
24	25 - 14	Н	78,0	384			2031	
25	26 - 13	Н	78,0	422			1848	
26	27 - 12	Н	78,0	426			1831	
27	28 - 11	Н	78,0	454			1718	
28	29 - 10	Н	78,0	458	430	2326	1703	0,73
29	30 - 9	Н	78,0	408			1912	
30	31 - 8	Н	78,0	396			1970	
31	32 - 7	Н	78,0	412			1893	
32	33 - 6	Н	78,0	406			1921	
33	34 - 5	Н	78,0	394			1980	
34	35 - 4	Н	78,0	386	446	2242	2021	0,90
25	36 - 3	Н	78,0	378	296	3378	2063	0,61
36	37 - 2	Н	78,0	402			1940	
37	38 - 1	Н	78,0	370	266	3759	2108	0,56
	-	1832						



Fig. 4.158 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SE, 9,62m.



Fig. 4.159 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EC, 9,62m.

4.2.5 Piano tre, 23,00m



Fig. 4.160 – Pianta del piano due (quota +23,00m).



Fig. 4.161 – a) Preparazione di una griglia; b) emissione e ricezione del segnale sonico; c) acquisizione dati.



Fig. 4.162 – Restituzione grafica della posizione di prova OA.



Fig. 4.163 – Restituzione grafica della posizione di prova NA.



Fig. 4.164 – Foto delle posizioni di prova: a) OA; b) NA.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in OA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	Н	80,0	720	700	1429	1111	0,78				
1	4 - 6	Н	80,0	440			1818					
2	1 - 4	V	70,0	440			1591					
3	2 - 5	V	70,0	516	578	1730	1357	0,78				
4	3 - 6	V	70,0	370	306	3268	1892	0,58				
5	1 - 6	D	106,3	682			1559					
6	4 - 3	D	106,3	652			1630					
							1565					

Tab. 4.64 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OA, 23,00m.

Tab. 4.65 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OA, 23,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in OA, Rx in NA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	167,9	886			1895					
1	1 - 2	H1	129,4	714			1812					
2	1 - 3	H1	92,1	518			1777					
3	2 - 1	H1	187,7	950			1976					
4	2 - 2	H1	152,3	860	600	1667	1771	1,06				
5	2 - 3	H1	119,9	846	562	1779	1417	0,80				
6	3 - 1	H1	213,3	890	340	2941	2396	0,81				
7	3 - 2	H1	181,3	962			1885					
8	3 - 3	H1	153,2	898			1706					
9	4 - 4	H2	167,9	850			1975					
10	4 - 5	H2	129,4	636	280	3571	2034	0,57				
11	4 - 6	H2	92,1	450			2046					
12	5 - 4	H2	187,7	1060			1771					
13	5 - 5	H2	152,3	1100	448	2232	1385	0,62				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
14	5 - 6	H2	119,9	676	522	1916	1773	0,93
15	6 - 4	H2	213,3	1186			1798	
16	6 - 5	H2	181,3	1020			1778	
17	6 - 6	H2	153,2	862			1777	
							1832	



Fig. 4.165 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OA, 23,00m.



Fig. 4.166 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OA, 23,00m.

4.2.5.2 Posizioni di prova OC, OAest, pianta a quota 23,00m



Fig. 4.167 – Restituzione grafica della posizione di prova OC.



Fig. 4.168 – Foto della posizione di prova OC.



Fig. 4.169 – Restituzione grafica della posizione di prova OAest.



Fig. 4.170 – Foto della posizione di prova OAesr.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in OC											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 4	Н	60,0	368	424	2358	1630	0,69				
1	1 - 5	Н	80,0	590	420	2381	1356	0,57				
2	1 - 6	Н	100,0	612			1634					
3	6 - 3	Н	60,0	374			1604					
4	6 - 2	Н	80,0	484			1653					
5	6 - 1	Н	100,0	602			1661					
	-	•		·			1590					

Tab. 4.66 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OC, 23,00m.



Fig. 4.171 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OC, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OC, Rx in OAest											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	6 - 1	Н	174,0	1012	248	4032	1719	0,43				
1	5 - 2	Н	174,0	816	370	2703	2132	0,79				
2	4 - 3	Н	174,0	852			2042					
3	3 - 4	Н	174,0	864			2014					
4	2 - 5	Н	174,0	878	246	4065	1982	0,49				
5	1 - 6	Н	174,0	932			1867					
	-		<u>.</u>	•		<u>.</u>	1959					

Tab. 4.67 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 23,00m.



Fig. 4.172 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 23,00m.



Fig. 4.173 – Restituzione grafica del pilastro interessato dalle posizioni di prova.





c)

Fig. 4.174 – Foto delle posizioni di prova: a) NB; b) OB; c) EB.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in NB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 1	Н	50,0	386	378	2646	1295	0,49				
1	4 - 3	Н	50,0	272			1838					
2	6 - 5	Н	50,0	382			1309					
3	5 - 1	V	125,0	608	336	2976	2056	0,69				
4	3 - 1	V	65,0	360	280	3571	1806	0,51				
5	6 - 2	V	125,0	664			1883					
6	4 - 2	V	65,0	456			1425					
7	6 - 1	D	134,6	708			1902					
8	5 - 2	D	134,6	746			1805					
	-						1702					

Tab. 4.68 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NB, 23,00m.



Fig. 4.175 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NB, 23,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in OB, Rx in NB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	67,3	318	258	3876	2115	0,55				
1	2 - 1	H1	93,5	746	312	3205	1253	0,39				
2	3 - 3	H2	67,3	266			2529					
3	4 - 3	H2	93,5	600			1558					
4	5 - 5	H3	67,3	376	290	3448	1789	0,52				
5	6 - 5	H3	93,5	814			1148					
	-			•	<u>.</u>		1732					

Tab. 4.69 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OB, 23,00m.



Fig. 4.176 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OB, Rx in EB										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	Н	80,1	314	290	3448	2550	0,74			
1	2 - 1	Н	80,1	400	400	2500	2002	0,80			
							2276				

Tab. 4.70 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OB, 23,00m.

Tab. 4.71 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EB, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in EB, Rx in OB										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	Hinv	80,1	390	310	3226	2053	0,64			
1	2 - 1	Hinv	80,1	356	406	2463	2249	0,91			
							2151				



Fig. 4.177 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OB, EB, 23,00m.

4.2.5.4 Posizioni di prova NC, EA, pianta a quota 23,00m



Fig. 4.178 – Restituzione grafica della posizione di prova NC.



Fig. 4.179 – Foto della posizione di prova NC.



Fig. 4.180 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 4.181 – Foto della posizione di prova EA.

		PR	OVE SUF	PERFICIA	ALI – Tx	e Rx in N	С	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	452	384	2604	1327	0,51
1	1 - 3	Н	120,0	792			1515	
2	4 - 5	Н	60,0	368	602	1661	1630	0,98
3	4 - 6	Н	120,0	892	416	2404	1345	0,56
4	2 - 3	Н	60,0	384			1563	
5	5 - 6	Н	60,0	462			1299	
6	1 - 6	D	123,7	732	524	1908	1690	0,89
7	4 - 3	D	123,7	754			1640	
	-	•	<u>.</u>		<u>.</u>		1501	

Tab. 4.72 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NC, 23,00m.

Tab. 4.73 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NC, 23,00m.

		PROV	'E SEMII	DIRETTE	– Tx in N	NC, Rx in	EA	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	150,0	1466	464	2155	1023	0,47
1	1 - 2	H1	124,1	1036	362	2762	1197	0,43
2	2 - 1	H1	192,9	1556			1240	
3	2 - 2	H1	171,6	1496			1147	
4	3 - 1	H1	243,2	1808			1345	
5	3 - 2	H1	225,1	1698			1326	
6	4 - 3	H2	150,0	1246	350	2857	1204	0,42
7	4 - 4	H2	124,1	800	376	2660	1551	0,58
8	5 - 3	H2	192,9	1410			1368	
9	5 - 4	H2	171,6	1116			1537	
10	6 - 3	H2	243,2	1712			1421	
11	6 - 4	H2	225,1	1536			1466	
	-	•		•			1319	



Fig. 4.182 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NC, 23,00m.



Fig. 4.183 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NC, 23,00m.



Fig. 4.184 – Restituzione grafica della posizione di prova ND.



Fig. 4.185 – Restituzione grafica della posizione di prova NDest.







b)

Fig. 4.186 – Foto delle posizioni di prova: a) NDest; b) ND.

		PRO	OVE SUP	ERFICIA	LI – Tx e	e Rx in N	D	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	228	386	2591	2632	1,02
1	1 - 3	Н	120,0	514			2335	
2	2 - 3	Н	60,0	158	276	2623	3797	1,05
3	4 - 5	Н	60,0	280			2143	
4	4 - 6	Н	120,0	604			1987	
5	5 - 6	Н	60,0	386	376	2660	1554	0,58
6	7 - 8	Н	60,0	486	354	2825	1235	0,44
7	7 - 9	Н	120,0	1028	536	1866	1167	0,63
8	8 - 9	Н	60,0	342			1754	
9	1 - 7	V	68,0	460	522	1916	1478	0,77
10	2 - 8	V	68,0	362			1878	
11	3 - 9	V	68,0	310			2194	
12	1 - 9	D	137,9	664			2077	
13	7 - 3	D	137,9	842			1638	
	-			•			1991	

Tab. 4.74 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, ND, 23,00m.



Fig. 4.187 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, ND, 23,00m.

		PRO	VE DIRF	ETTE – T	x in ND, I	Rx in NDe	est	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 3	H1	178,0	848	236	4237	2099	0,50
1	2 - 2	H1	178,0	850	224	4464	2094	0,47
2	3 - 1	H1	178,0	688			2587	
3	4 - 6	H2	178,0	1194	402	2488	1491	0,60
4	5 - 5	H2	178,0	1178	306	3268	1511	0,46
5	6 - 4	H2	178,0	1092			1630	
6	7 - 9	H3	178,0	1114			1598	
7	8 - 8	H3	178,0	1162			1532	
8	9 - 7	H3	178,0	782			2276	
	•					1	1869	

Tab. 4.75 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, ND, 23,00m.



Fig. 4.188 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, ND, 23,00m.



Fig. 4.189 – Restituzione grafica del pilastro interessato dalle posizioni di prova.



a)

b)



c)

Fig. 4.190 – Foto delle posizioni di prova: a) NE; b) EC; c) SA.

		PR	OVE SUP	PERFICIA	ALI –TX (e Rx in E	С	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	50,0	306	388	2577	1634	0,63
1	4 - 3	Н	50,0	364	276	3623	1374	0,38
2	6 - 5	Н	50,0	310			1613	
3	6 - 1	D	124,5	738			1687	
4	2 - 5	D	124,5	626			1988	
5	1 - 4	D	75,8	546			1389	
6	1 - 5	V	114,0	640	264	3788	1781	0,47
7	2 - 6	V	114,0	680	324	3086	1676	0,54
	-						1643	

Tab. 4.76 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EC, 23,00m.



Fig. 4.191 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EC, 23,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in NE, Rx in EC											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	71,0	326	326	2762	2177	0,79				
1	2 - 1	H1	97,7	610	524	1908	1601	0,84				
2	3 - 3	H2	71,0	354			2005					
3	4 - 3	H2	97,7	690	362	2762	1416	0,51				
4	5 - 5	H3	71,0	316	434	2304	2246	0,97				
5	6 - 5	H3	97,7	606			1612					
	-		<u>.</u>		<u>.</u>		1843					

Tab. 4.77 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NE, 23,00m.



Fig. 4.192 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NE, 23,00m.

PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SA, Rx in EC										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
6	1 - 1	Н	71,5	492	282	3546	1452	0,41		
7	2 - 2	Н	67,1	586	334	2994	1145	0,38		
							1298			

Tab. 4.78 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SA, 23,00m.

Tab. 4.79 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EC, 23,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in EC, Rx in SA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
8	1 - 1	Hinv	71,5	336	334	2994	2127	0,71			
9	2 - 1	Hinv	94,9	610	512	1953	1556	0,80			
							1841				

Tab. 4.80 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NE, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in NE, Rx in SA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	Н	82,1	378	322	3106	2171	0,70			
1	2 - 1	Н	82,1	348	396	2525	2358	0,93			
							2265				

Tab. 4.81 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 23,00m.

PROVE DIRETTE – Tx in SA, Rx in NE								
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
2	1 - 2	Hinv	82,1	356	358	2793	2305	0,83
3	2 - 1	Hinv	82,1	352	378	2646	2332	0,88
							2318	



Fig. 4.193 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SA, EC, 23,00m.



Fig. 4.194 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NE, SA, 23,00m.

4.2.5.7 Posizioni di prova NF, NFest, pianta a quota 23,00m



Fig. 4.195 – Restituzione grafica della posizione di prova NF.



Fig. 4.196 – Restituzione grafica della posizione di prova NFest.


a)



b)



c)

Fig. 4.197 – Foto delle posizioni di prova: a) NF; b), c) NFest.

		PRC	OVE DIR	ETTE - T	x in NF, H	Rx in NFe	st	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 3	H1	193,8	1846	342	2924	1050	0,36
1	2 - 2	H1	214,0	3516	514	1946	609	0,31
2	3 - 1	H1	234,2	2006			1167	
3	4 - 9	H2	183,0	1142			1602	
4	5 - 8	H2	183,0	1076			1701	
5	6 - 7	H2	183,0	1198			1528	
6	7 - 6	H2	193,8	1356			1429	
7	8 - 5	H2	214,0	1534	378	2646	1395	0,53
8	9 - 4	H2	234,2	1670	384	2604	1402	0,54
	-	-	•				1320	

Tab. 4.82 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NF, 23,00m.



Fig. 4.198 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NF, 23,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NF, Rx in NFest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	7 - 4	H2	218,1	1440	280	3571	1515	0,42				
1	9 - 6	H2	254,7	2122	372	2688	1200	0,45				
2	8 - 7	H2	236,2	1712			1380					
3	6 - 9	H2	208,5	1410			1479					
4	4 - 7	H2	208,5	1550			1345					
5	5 - 6	H2	208,5	1046			1994					
6	6 - 5	H2	208,5	1434	380	2632	1454	0,55				
7	8 - 8	H2	261,3	2272	378	2646	1150	0,43				
8	9 - 7	H2	278,1	2296			1211					
9	4 - 6	H2	236,6	1488			1590					
<u> </u>			1	1			1432					

Tab. 4.83 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NF, 23,00m.



Fig. 4.199 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NF, 23,00m.

4.2.5.8 Posizioni di prova ED, SB, EDest, pianta a quota 23,00m



Fig. 4.200 – Restituzione grafica della posizione di prova ED.



Fig. 4.201 – Foto della posizione di prova ED.



Fig. 4.202 – Restituzione grafica della posizione di prova SB.



Fig. 4.203 – Foto della posizione di prova SB.



Fig. 4.204 – Restituzione grafica della posizione di prova EDest.



Fig. 4.205 – Foto della posizione di prova EDest.

	PROVE DIRETTE – Tx in ED, Rx in EDest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	182,0	1192	358	2793	1527	0,55				
1	2 - 2	H1	198,0	1320			1500					
2	3 - 1	H1	182,0	1142			1594					
3	4 - 6	H2	182,0	1188			1532					
4	5 - 5	H2	198,0	1682	420	2381	1177	0,49				
5	6 - 4	H2	182,0	1020			1784					
6	7 - 9	H3	182,0	1364			1334					
7	8 - 8	H3	198,0	1444			1371					
8	9 - 7	H3	182,0	880	296	3378	2068	0,61				

Tab. 4.84 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, ED, 23,00m.



Fig. 4.206 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, ED, 23,00m.

	Р	ROVE	E SEMID	IRETTE -	- Tx in El	D, Rx in I	EDest	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	H1	206,9	720			2873	
1	1 - 1	H1	218,0	1470	420	2381	1483	0,62
2	2 - 1	H1	191,6	1318			1454	
3	2 - 3	H1	191,6	1334			1437	
4	3 - 3	H1	218,0	1470			1483	
5	5 - 6	H2	191,6	1456	454	2203	1316	0,60
6	6 - 5	H2	206,9	1530			1352	
7	4 - 5	H2	206,9	1538			1345	
8	7 - 8	H3	206,9	1690	382	2618	1224	0,47
9	9 - 8	H3	206,9	1632			1268	
	•		L				1524	

Tab. 4.85 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, ED, 23,00m.



Fig. 4.207 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, ED, 23,00m.

		PROV	E SEMI	DIRETTE	2 – Tx in l	ED, Rx in	SB	
N	Ty _ By	DIR	L (cm)	ΔΤ (us)	te (us)	fmax	v (m/s)	λmin
1	1 x - N x	DIR.	L (CIII)	Δ1 (μs)	ις (με)	(Hz)	v (111/8)	(m)
0	4 - 1	H1	129,4	692	404	2475	1869	0,76
1	5 - 1	H1	161,2	1198	528	1894	1346	0,71
2	6 - 1	H1	206,1	1940			1062	
3	4 - 2	H1	90,5	568			1593	
4	5 - 2	H1	128,9	1014			1271	
5	6 - 2	H1	179,6	1510			1189	
6	7 - 3	H2	129,4	788			1642	
7	8 - 3	H2	161,2	1222			1319	
8	9 - 3	H2	206,1	1818			1133	
9	7 - 4	H2	90,5	394	312	3205	2297	0,72
10	8 - 4	H2	128,9	870	306	3268	1482	0,45
11	9 - 4	H2	179,6	1504			1194	
		1450						

Tab. 4.86 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, ED, 23,00m.



Fig. 4.208 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, ED, 23,00m.

4.2.5.9 Posizioni di prova NH, SC, OA(2), EE, pianta a quota 23,00m



Fig. 4.209 – Restituzione grafica del pilastro interessato dalle posizioni di prova.



c) Fig. 4.210 – Foto delle posizioni di prova: a) NH; b)SC; c) EE.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in EE, Rx in SC											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	71,4	280	366	2732	2550	0,93				
1	2 - 1	H1	97,0	616	414	2415	1574	0,65				
2	2 - 2	H1	69,9	374			1870					
3	3 - 3	H2	71,4	366			1951					
4	4 - 3	H2	97,0	596			1627					
5	4 - 4	H2	69,9	262	440	2273	2669	1,17				
6	5 - 5	H3	71,4	350			2040					
7	6 - 5	H3	97,0	668	492	2033	1452	0,71				
8	6 - 6	Н3	69,9	286			2445					
	-	2020										

Tab. 4.87 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EE, 23,00m.



Fig. 4.211 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EE, 23,00m.

		PR	OVE SUP	PERFICIA	ALI – Tx o	e Rx in S	С	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	53,0	374	418	2392	1417	0,59
1	1 - 3	V	50,0	324	414	2415	1543	0,64
2	1 - 4	D	72,9	612			1191	
3	1 - 5	V	100,0	516	466	2146	1938	0,90
4	1 - 6	D	113,2	710			1594	
5	3 - 4	Н	53,0	340			1559	
6	5 - 6	Н	53,0	266	376	2660	1992	0,75
7	5 - 2	D	113,2	688			1645	
8	6 - 2	V	100,0	628			1592	
9	4 - 2	V	50,0	280			1786	
<u></u>	•		1			1	1626	

Tab. 4.88 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SC, 23,00m.



Fig. 4.212 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SC, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in EE, Rx in OA(2)										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	Н	82,1	350	368	2717	2345	0,86			
1	2 - 1	Н	82,1	352	420	2381	2332	0,98			
							2338				

Tab. 4.89 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EE, 23,00m.

Tab. 4.90 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OA(2), 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in OA(2), Rx in EE										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
2	1 - 2	Hinv	82,1	342	422	2370	2400	1,01			
3	2 - 1	Hinv	82,1	348	340	2941	2358	0,80			
							2379				

Tab. 4.91 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SC, 23,00m.

	PROVE DIRETTE – Tx in SC, Rx in NH										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	4 - 1	Н	81,1	336	438	2283	2413	1,06			
1	6 - 2	Н	81,1	334	452	2212	2427	1,10			
							2420				



Fig. 4.213 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EE, OA(2), 23,00m.



Fig. 4.214 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SC, 23,00m.

4.2.6 Piano quattro, 30,00m



Fig. 4.215 – Pianta del piano quattro (quota +30,00m).



Fig. 4.216 – Realizzazione di prove superficiali sulla parete OD.



Fig. 4.217 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NG, OB.



Fig. 4.218 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OB, SD.



Fig. 4.219 – Foto delle posizioni di prova: a) NG; b) SD; c) OB; d) EF.

	PROVE SUPERFICIALI – Tx e Rx in NG											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	3 - 1	Н	50,0	298	452	2212	1678	0,76				
1	6 - 4	Н	50,0	348			1437					
2	9 - 7	Н	50,0	372			1344					
3	3 - 7	D	111,8	920			1215					
4	3 - 5	D	55,9	494	392	2551	1132	0,44				
5	3 - 4	D	70,7	512			1381					
6	3 - 8	D	103,1	784			1315					
7	2 - 8	V	100,0	738	422	2370	1355	0,57				
8	1 - 7	V	100,0	812			1232					
9	3 - 9	V	100,0	698			1433					
<u>.</u>	-		•	•			1352					

Tab. 4.92 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NG, 30,00m.



Fig. 4.220 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NG, 30,00m.

PROVE SEMIDIRETTE – Tx in OB, Rx in EF										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	2 - 1	Н	89,6	662	550	1818	1354	0,74		
1	3 - 1	Н	99,5	872	542	1845	1142	0,62		
							1248			

Tab. 4.93 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OB, 30,00m.



Fig. 4.221 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, 30,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OB EF, Rx in EF OB										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	Н	86,1	560	356	2809	1537	0,55			
6	1 - 1	Hinv	86,1	566	628	1592	1521	0,95			
	-						1529				

Tab. 4.94 - Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OB, EF, 30,00m.



Fig. 4.222 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OB, EF, 30,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE – Tx in SD, Rx in NG											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
2	1 - 4	H1	99,5	800			1244					
3	1 - 5	H1	89,6	616	444	2252	1455	0,65				
4	2 - 7	H2	99,5	906	378	2646	1099	0,42				
5	2 - 8	H2	89,6	630			1423					
		•					1305					

Tab. 4.95 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SD, 30,00m.



Fig. 4.223 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SD, 30,00m.

	PROVE DIRETTE -Tx in SD, Rx in NG											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 6	H1	86,1	386	374	2674	2230	0,83				
1	2 - 9	H2	86,1	434	310	3226	1983	0,61				
2	3 - 10	H3	86,1	538			1600					
	-						1938					

Tab. 4.96 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SD, 30,00m.

	PROVE DIRETTE -Tx in NG, Rx in SD										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
3	6 - 1	H1	86,1	430	382	2618	2002	0,76			
4	9 - 2	H2	86,1	490	432	2315	1757	0,76			
5	10 - 3	Н3	86,1	494	326	3067	1742	0,57			
							1833				

Tab. 4.97 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NG, 30,00m.



Fig. 4.224 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SD, NG, 30,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in OB, Rx in NG											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	75,4	496			1520					
1	1 - 2	H1	52,0	314			1656					

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔT (µs)	tc (µs)	fmax	v (m/s)	λmin
						(HZ)		(m)
2	2 - 1	H1	86,1	508			1694	
3	2 - 2	H1	66,6	348			1913	
4	3 - 1	H1	101,9	734	382	2618	1389	0,53
5	3 - 2	H1	86,1	400			2152	
6	4 - 4	H2	75,4	396	488	2049	1903	0,93
7	4 - 5	H2	52,0	282	448	2232	1844	0,83
8	5 - 4	H2	86,1	492			1750	
9	5 - 5	H2	66,6	402			1656	
10	6 - 4	H2	101,9	704	454	2203	1448	0,66
11	6 - 5	H2	86,1	584			1474	
12	7 - 7	Н3	75,4	448			1682	
	-	•					1698	



Fig. 4.225 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, 30,00m.

4.2.6.2 Posizioni di prova OD, OC, EG, NI, ODest, OCest, NIest, pianta a quota 30,00m



Fig. 4.226 – Restituzione grafica delle posizioni di prova OD, OC, NI.



c) Fig. 4.227 – Foto delle posizioni di prova: a) OD; b) OC; c) NI.



Fig. 4.228 – Restituzione grafica della posizione di prova EG.



Fig. 4.229 – Foto della posizione di prova EG.



NIest

Fig. 4.230 – Restituzione grafica delle posizioni di prova NIest, ODest, OCest.



Fig. 4.231 – Foto delle posizioni di prova: a)NIest; b) OCest; c), d)OCest.

239

		PR	OVE SUP	PERFICIA	LI - Tx e	Rx in Ol)	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	410	444	2252	1463	0,65
1	1 - 3	Н	120,0	862			1392	
2	1 - 4	V	60,0	374	346	2890	1604	0,56
3	1 - 5	D	78,1	532	378	2646	1468	0,55
4	1 - 6	D	130,0	896			1451	
5	1 - 7	V	100,0	866			1155	
6	1 - 8	D	130,0	958			1357	
7	1 - 9	D	156,2	1146			1363	
8	7 - 3	D	156,2	1078	406	2463	1449	0,59
9	4 - 6	Н	120,0	1060	402	2488	1132	0,46
10	7 - 9	Н	120,0	820			1463	
11	2 - 8	V	100,0	890	644	1553	1124	0,72
12	3 - 9	V	100,0	790			1266	
13	4 - 5	Н	60,0	350			1714	
14	2 - 3	Н	60,0	478			1255	
15	5 - 6	Н	60,0	436			1376	
	I	1		1			1377	

Tab. 4.99 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OD, 30,00m.

Tab. 4.100 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OD, 30,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OD, Rx in ODest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	166,0	1016	268	3731	1634	0,44				
1	2 - 2	H1	166,0	976	400	2500	1701	0,68				
2	3 - 1	H1	166,0	1068			1554					
3	4 - 6	H2	166,0	948	378	2646	1751	0,75				
4	5 - 5	H2	166,0	836	422	2370	1986	0,67				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
5	6 - 4	H2	166,0	1052	422	2370	1578	0,67
6	7 - 9	H3	166,0	1236	664	1506	1343	0,89
7	8 - 8	H3	166,0	1584	424	2358	1048	0,44
8	9 - 7	H3	166,0	1370			1212	
	-		<u>.</u>	<u>.</u>			1534	

Tab. 4.101 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 30,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OC, Rx in OCest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	179,0	1182	326	3067	1514	0,49				
1	3 - 1	H1	193,0	1042	240	4167	1852	0,44				
2	4 - 6	H2	179,0	1374	350	2857	1303	0,46				
3	5 - 5	H2	186,0	1316			1413					
4	6 - 4	H2	193,0	1310			1473					
	-						1511					

Tab. 4.102 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OD, 30,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in OD, Rx in ODest												
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)					
0	1 - 1	H1	204,8	1244	384	2604	1647	0,63					
1	1 - 2	H1	176,5	1670	508	1969	1057	0,54					
2	2 - 1	H1	176,5	1110			1590						
3	2 - 3	H1	176,5	1372			1287						
4	3 - 3	H1	204,8	1186	552	1812	1727	0,95					
5	3 - 2	H1	176,5	1264			1396						
6	4 - 4	H2	204,8	1528			1341						

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
7	4 - 5	H2	176,5	1690	426	2347	1044	0,44
8	5 - 4	H2	176,5	1080			1634	
9	5 - 6	H2	176,5	1516			1164	
10	6 - 6	H2	204,8	1610			1272	
11	6 - 5	H2	176,5	1240			1423	
	-			<u>.</u>			1382	

Tab. 4.103 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NI, 30,00m.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e RX in NI									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 2	Н	60,0	784	788	1269	765	0,6		
1	1 - 3	Н	120,0	1124			1068			
2	1 - 6	D	134,2	1196			1122			
3	1 - 5	D	84,9	602			1409			
4	1 - 4	V	60,0	484			1240			
5	1 - 7	V	120,0	1002	682	1466	1198	0,82		
6	1 - 8	D	134,2	1328			1010			
7	1 - 9	D	169,7	1900			893			
8	2 - 3	Н	60,0	378			1587			
9	4 - 5	Н	60,0	440			1364			
10	4 - 6	Н	120,0	618	476	2101	1942	0,92		
11	7 - 8	Н	60,0	264			2273			
12	7 - 9	Н	120,0	1034			1161			
13	7 - 3	D	169,7	1270	266	3759	1336	0,36		
14	8 - 2	V	120,0	1046			1147			
15	9 - 3	V	120,0	1246	468	2137	963	0,45		
							1280			

PROVE DIRETTE - Tx in NI, Rx in NIest									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)	
0	1 - 3	H1	165,0	1396	794	1259	1182	0,94	
1	2 - 2	H1	180,0	1518	430	2326	1186	0,51	
2	3 - 1	H1	165,0	1382			1194		
3	4 - 6	H2	165,0	922			1790		
4	5 - 5	H2	180,0	1892	832	1202	951	0,79	
5	6 - 4	H2	165,0	1270	658	1520	1299	0,85	
7	8 - 8	H3	180,0	1342			1341		
							1278		

Tab. 4.104 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NI, 30,00m.

Tab. 4.105 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NI, 30,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NI, Rx in EG										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	4 - 1	H1	106,1	534			1986				
1	4 - 2	H1	67,5	414			1631				
2	5 - 1	H1	139,6	1016			1374				
3	5 - 2	H1	109,8	848	472	2119	1294	0,61			
4	5 - 3	H1	88,4	634			1394				
5	6 - 1	H1	186,9	1306			1431				
6	6 - 2	H1	163,5	1168			1400				
7	6 - 3	H1	147,5	774			1905				
8	7 - 4	H2	106,1	386	390	2564	2747	1,07			
9	7 - 5	H2	67,5	466			1449				
10	8 - 4	H2	139,6	700			1994				
11	8 - 5	H2	109,8	538			2040				
12	8 - 6	H2	88,4	390			2266				

N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
13	9 - 4	H2	186,9	484	406	2463	3861	1,57
14	9 - 5	H2	163,5	1608	500	2000	1017	0,51
15	9 - 6	H2	147,5	1044			1412	
							1825	



Fig. 4.232 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OD, 30,00m.



Fig. 4.233 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OD, 30,00m.



Fig. 4.234 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 30,00m.



Fig. 4.235 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OD, 30,00m.



Fig. 4.236 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NI, 30,00m.



Fig. 4.237 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NI, 30,00m.



Fig. 4.238 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NI, 30,00m.
4.2.7 Stanza dei torresani, 35,42m



Fig. 4.239 – Pianta della stanza dei torresani (quota +35,42m).



Fig. 4.240 - Realizzazione di prove soniche in corrispondenza della parete OB.



4.2.7.1 Posizioni di prova OA, OB, OAest, OBest, pianta a quota 35,42m

Fig. 4.241 – Restituzione grafica delle posizioni di prova: a) OA; b) OB; c) OBest; d) OAest.



Fig. 4.242 – Foto delle posizioni di prova: a) OA; b) OB; c) OBest; d) OAest.

	PROVE DIRETTE - Tx in OA, Rx in OAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	48,0	342	634	1577	1404	0,89				
1	2 - 2	H1	48,0	172	628	1592	2791	1,75				
2	3 - 1	H1	48,0	218			2202					
3	4 - 6	H2	48,0	296	498	2008	1622	0,81				
4	5 - 5	H2	48,0	192			2500					
	-						2104					

Tab. 4.106 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OA, 35,42m.



Fig. 4.243 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OA, 35,42m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OB, Rx in OBest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	48,0	148	364	2747	3243	1,18				
1	2 - 2	H1	48,0	218	666	1502	2202	1,47				
2	3 - 1	H1	48,0	122			3934					
3	4 - 6	H2	48,0	214			2243					
4	5 - 5	H2	48,0	308	518	1931	1558	0,81				
5	6 - 4	H2	48,0	208			2308					
	•	•					2581					

Tab. 4.107 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OB, 35,42m.



Fig. 4.244 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OB, 35,42m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in OA, Rx in OAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	76,8	298	806	1241	2579	2,08				
1	1 - 3	H1	48,0	216			2222					
2	2 - 1	H1	76,8	230	744	1344	3341	2,49				
3	2 - 3	H1	76,8	346			2221					
4	3 - 3	H1	129,2	444			2911					
5	3 - 2	H1	76,8	468	532	1880	1642	0,87				
6	4 - 5	H2	76,8	510	542	1845	1507	0,82				
7	4 - 4	H2	129,2	490			2638					
8	5 - 4	H2	76,8	568			1353					
							2268					

Tab. 4.108 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OA, 35,42m.



Fig. 4.245 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OA, 35,42m.

	Р	ROVI	E SEMID	IRETTE ·	- Tx in Ol	B, Rx in C)Best	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 1	H1	129,2	546			2367	
1	1 - 2	H1	76,8	310	592	1689	2479	1,47
2	2 - 3	H1	76,8	256			3002	
3	2 - 1	H1	76,8	328			2343	
4	3 - 3	H1	129,2	444			2911	
5	3 - 2	H1	76,8	292			2632	
6	4 - 4	H2	129,2	570			2267	
7	4 - 5	H2	76,8	512	588	1701	1501	0,88
8	5 - 4	H2	76,8	494	440	2273	1555	0,68
9	5 - 6	H2	76,8	626			1227	
10	6 - 6	H2	129,2	372	476	2101	3474	1,65
11	6 - 5	H2	76,8	386			1991	
				•		•	2312	

Tab. 4.109 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OB, 35,42m.



Fig. 4.246 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OB, 35,42m.

		PRO	VE SUPE	ERFICIA	L I - Tx e l	Rx in OB	est	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	3 - 1	Н	120,0	286	348	2874	4196	1,46
1	3 - 2	Н	60,0	148			4054	
2	3 - 4	D	134,2	380	260	3846	3531	0,92
3	3 - 5	D	84,9	196			4329	
4	3 - 6	V	60,0	236			2542	
5	6 - 1	D	134,2	378			3549	
6	6 - 4	Н	120,0	270			4444	
7	6 - 5	Н	60,0	344	340	2941	1744	0,59
8	5 - 4	Н	60,0	140			4286	
9	2 - 1	Н	60,0	128			4688	
10	1 - 4	V	60,0	154			3896	
11	2 - 5	V	60,0	174	394	2538	3448	1,36
<u></u>			1	1		1	3726	

Tab. 4.110 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OBest, 35,42m.



Fig. 4.247 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OBest, 35,42m.

		PRO	VE SUPE	ERFICIAL	LI - Tx e l	Rx in OA	est	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	3 - 1	Н	120,0	490	282	3546	2449	0,69
1	3 - 2	Н	60,0	256			2344	
2	3 - 4	D	134,2	298			4502	
3	3 - 5	D	84,9	280			3030	
4	3 - 6	V	60,0	154			3896	
5	2 - 5	V	60,0	130	294	3401	4615	1,36
6	1 - 4	V	60,0	150			4000	
7	6 - 1	D	134,2	430	306	3268	3120	0,95
8	2 - 1	Н	60,0	184	232	4310	3261	0,76
9	5 - 4	Н	60,0	246			2439	
10	6 - 4	Н	120,0	372			3226	
11	6 - 5	Н	60,0	192			3125	

Tab. 4.111 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OAest, 35,42m.



Fig. 4.248 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OAest, 35,42m.

4.2.8 Stanza delle campane, 42,57m



Fig. 4.249 – Pianta della stanza delle campane (quota +42,57m).



Fig. 4.250 – Particolare della lesena d'angolo in direzione Nord-Ovest.



Fig. 4.251 – Restituzione grafica del pilastro interessato dalle posizioni di prova NA, SA, EA.







Fig. 4.252 – Foto del pilastro interessato dalle posizioni di prova: a) NA; b) SA; c)

		PR	OVE SUP	PERFICIA	ALI - Tx e	e Rx in EA	A	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	40,0	218			1835	
1	1 - 3	V	40,0	308	448	2232	1299	0,58
2	1 - 4	D	56,6	452	404	2475	1252	0,51
3	1 - 5	V	80,0	358	410	2439	2235	0,92
4	1 - 6	D	89,4	500			1789	
5	3 - 4	Н	40,0	192			2083	
6	6 - 5	Н	40,0	182			2198	
7	5 - 2	D	89,4	342			2615	
8	5 - 6	Н	40,0	210	356	2809	1905	0,68
9	2 - 6	V	80,0	398			2010	
10	4 - 6	V	40,0	162			2469	
11	2 - 4	V	40,0	160			2500	
12	3 - 5	V	40,0	266			1504	
	-						1976	

Tab. 4.112 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EA, 42,57m.

Tab. 4.113 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NA, 42,57m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NA, Rx in SA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	62,1	220	338	2959	2822	0,95				
1	1 - 1	H1	74,5	534			1395					
2	3 - 4	H2	62,1	354			1754					
3	4 - 3	H2	62,8	608	436	2294	1034	0,45				
4	5 - 6	Н3	62,1	310	488	2049	2003	0,98				
5	6 - 5	H3	62,8	524	600	1667	1198	0,72				
							1701					

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EA, Rx in NA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 2	H1	72,0	678	522	1916	1062	0,55			
1	3 - 4	H2	72,0	598	488	2049	1204	0,59			
2	5 - 6	H3	72,0	544	640	1563	1324	0,85			
							1197				

Tab. 4.114 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NA, 42,57m.

Tab. 4.115 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EA, 42,57m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EA, Rx in SA										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
3	2 - 1	H1	71,0	508	398	2513	1398	0,56			
4	4 - 3	H2	71,0	506	504	1984	1403	0,71			
5	6 - 5	Н3	71,0	430	498	2008	1651	0,82			
							1484				



Fig. 4.253 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EA, 42,57m.



Fig. 4.254 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NA, 42,57m.



Fig. 4.255 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EA, 42,57m.



Fig. 4.256 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EA, 42,57m.

4.2.8.2 Posizioni di prova NBest, EAest, NCest, OAest, SAest, pianta a quota 42,57m



Fig. 4.257 – Restituzione grafica della parete NBest e della lesena d'angolo interessata dalle posizioni di prova.



Fig. 4.258 – Foto delle posizioni di prova: a), b) parete NBest; c) lesena d'angolo.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in NBest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	3 - 1	Н	120,0	248	250	4000	4839	1,21				
1	3 - 2	Н	60,0	150	308	3247	4000	1,23				
2	3 - 4	D	134,2	490			2738					
3	3 - 5	D	84,9	264			3214					
4	3 - 6	V	60,0	186			3226					
5	3 - 7	D	169,7	700	230	4348	2424	0,56				
6	3 - 8	D	134,2	728	246	4065	1843	0,45				
7	3 - 9	V	120,0	398			3015					
8	9 - 1	D	169,7	514			3302					
9	6 - 4	Н	120,0	528			2273					
10	6 - 5	Н	60,0	264			2273					
11	9 - 7	Н	120,0	510			2353					
12	9 - 8	Н	60,0	294	296	3378	2041	0,60				
13	1 - 4	V	60,0	260	304	3289	2308	0,70				
14	1 - 7	V	120,0	348			3448					
15	1 - 5	D	84,9	250			3394					
16	1 - 8	D	134,2	528			2541					
	· _ · _ · _ · _ · _ · _ ·											

Tab. 4.116 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NBest, 42,57m.

Tab. 4.117 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NCest, 42,57m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NCest, Rx in SAest										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	2 - 1	H1	75,0	184	234	4274	4076	0,95			
1	4 - 2	H2	75,0	152	376	2660	4934	1,86			
2	6 - 3	H3	75,0	210	190	5263	3571	0,68			
-	-		<u>.</u>	•	<u>.</u>	<u>.</u>	4194				



Fig. 4.259 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NBest, 42,57m.



Fig. 4.260 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NCest, 42,57m.

	PROVE DIRETTE - Tx in EAest, Rx in OAest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	75,0	158	258	3876	4747	1,22			
1	2 - 3	H2	75,0	166	292	3425	4518	1,32			
2	3 - 5	Н3	75,0	170	366	2732	4412	1,61			
							4559				

Tab. 4.118 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EAest, 42,57m.



Fig. 4.261 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EAest, 42,57m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in OAest, Rx in NCest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	66,8	178			3753					
1	2 - 1	H1	94,1	190	326	3067	4950	1,61				
2	2 - 2	H1	66,8	194			3444					
3	3 - 3	H2	66,8	220			3036					
4	4 - 3	H2	94,1	364	322	3106	2585	0,83				
5	4 - 4	H2	66,8	194			3443					
6	5 - 5	H3	66,8	136	286	3497	4912	1,40				
7	6 - 5	H3	94,1	368	270	3704	2557	0,69				
8	6 - 6	H3	66,8	244			2738					
							3491					

Tab. 4.119 -	- Elaborazione	delle velocità	dalle prove ser	midirette, OAes	t, 42,57m.
--------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	------------



Fig. 4.262 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OAest, 42,57m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in OAest, Rx in EAest											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 1	H1	96,1	346	272	3676	2776	0,76				
1	4 - 2	H2	96,1	330	238	4202	2911	0,69				
2	6 - 3	H3	96,1	360	268	3731	2669	0,72				
	-		<u>.</u>	<u>.</u>			2785					

Tab. 4.120 - Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, OAest, 42,57m.

Tab. 4.121 - Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NCest, 42,57m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NCest, Rx in SAest										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	96,1	374	320	3125	2568	0,82			
1	3 - 2	H2	96,1	330	288	3472	2911	0,84			

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
2	5 - 3	H3	96,1	336	274	3650	2859	0,78
							2779	

Tab. 4.122 - Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EAest, 42,57m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EAest, Rx in SAest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	96,9	308	422	2370	3145	1,33			
1	2 - 2	H2	96,9	278	362	2762	3485	1,26			
2	3 - 3	H3	96,9	306	284	3521	3166	0,90			
							3265				



Fig. 4.263 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, OAest, 42,57m.



Fig. 4.264 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NCest, 42,57m.



Fig. 4.265 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EAest, 42,57m.

4.2.9 Cuspide, livello zero, 49,36m



Fig. 4.266 – Pianta del livello zero della cuspide (quota +49,36m).



Fig. 4.267 – Restituzione grafica dei particolari: a) 1; b) 2.

4.2.9.1 Posizioni di prova NA, NB, OA, OB, OC, SOA, pianta a quota 49,36m



Fig. 4.268 – Restituzione grafica delle posizioni di prova.



Fig. 2.269 – Foto delle posizioni di prova: a) NA, OA, NB, OB; b) OB, SOA.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in SOA										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	2 - 4	V	50,0	178	236	4237	2809	0,66			
1	2 - 6	V	100,0	368	220	4545	2717	0,60			
2	4 - 6	V	50,0	184	254	3937	2717	0,69			
							2748				

Tab. 4.123 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SOA, 49,36m.

Tab. 4.124 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, OB, 49,36m.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in OB											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	V	50,0	194	226	4425	2577	0,58				
1	1 - 3	V	100,0	372	232	4310	2688	0,62				
2	2 - 3	V	50,0	196	312	3205	2551	0,80				
	-		<u>.</u>			<u>.</u>	2606					

Tab. 4.125 – Elaborazione delle velocità dalle p	prove superficiali, OC, 49,36m.
--	---------------------------------

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in OC											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	3 - 1	Н	80,0	670			1194					
1	3 - 2	Н	40,0	350	892	1121	1143	1,02				
2	3 - 4	D	93,3	600	1022	978	1556	1,59				
3	3 - 5	D	64,0	464			1380					
4	3 - 6	V	50,0	378			1323					
5	3 - 7	D	128,1	942			1359					
6	3 - 8	D	107,7	884	658	1520	1218	0,80				
7	3 - 9	V	100,0	828	768	1302	1208	0,93				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
						(112)		()
8	9 - 1	D	128,1	864			1483	
9	2 - 1	Н	40,0	380			1053	
10	5 - 4	Н	40,0	396			1010	
11	6 - 4	Н	80,0	440			1818	
12	9 - 7	Н	80,0	540			1481	
13	9 - 8	Н	40,0	252	900	1111	1587	1,43
14	1 - 7	V	100,0	716			1397	
15	1 - 4	V	50,0	354			1412	
16	2 - 5	V	50,0	352			1420	
17	2 - 8	V	100,0	622	932	1073	1608	1,50
							1369	

Tab. 4.126 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NA, 49,36m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NA, Rx in OB										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	56,9	114	382	2618	4994	1,91			
1	2 - 2	H2	56,9	190	604	1656	2996	1,81			
2	3 - 3	H3	56,9	142	430	2326	4009	1,72			
							4000				

Tab. 4.127 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NA, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NA, Rx in SOA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	101,9	192	474	2110	5308	2,52				
1	2 - 4	H2	101,9	252	484	2066	4044	1,96				
2	3 - 6	Н3	101,9	210	474	2110	4853	2,30				
							4735					

	PROVE DIRETTE - Tx in NB, Rx in SOA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	61,7	162	248	4032	3810	0,94				
1	2 - 3	H2	61,7	160	738	1355	3858	2,85				
2	3 - 5	H3	61,7	162	282	3546	3810	1,07				
							3826					

Tab. 4.128 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NB, 49,36m.

Tab. 4.129 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OC, Rx in OA										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	3 - 1	H1	115,9	1728			671				
1	3 - 1	H1	115,9	1124	934	1071	1031	0,96			
2	3 - 1	H1	115,9	1074			1079				
	Valor	Valore medio delle velocità sulla distanza 3 – 1									
3	6 - 2	H2	115,9	1712			677				
4	6 - 2	H2	115,9	646	754	1326	1794	1,35			
5	6 - 2	H2	115,9	776			1493				
	Valor	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	6-2	1321				
6	9 - 3	H3	115,9	596	700	1429	1944	1,36			
	8	1	1	1		1	1048				

Tab. 4.130 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OC, Rx in OB											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
7	2 - 1	H1	140,8	1312			1073					
8	2 - 1	H1	140,8	1156	830	1205	1218	1,01				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
9	2 - 1	H1	140,8	1408			1000	
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	2 - 1	1097	
10	5 - 2	H2	140,8	584	874	1144	2411	2,11
11	5 - 2	H2	140,8	530			2657	
12	5 - 2	H2	140,8	550			2560	
	Valor	re med	io delle ve	locità sull	a distanza	5-2	2543	
13	8 - 3	Н3	140,8	1058	886	1129	1331	1,18
	-						1243	

Tab. 4.131 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, OC, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in OC, Rx in SOA											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
14	1 - 2	H1	143,0	1008	918	1089	1418	1,30				
15	4 - 4	H2	143,0	1064	628	1592	1344	0,84				
16	7 - 6	H3	143,0	986	792	1263	1450	1,15				
17	7 - 6	H3	143,0	912			1568					
	Valo	re med	io delle ve	elocità sull	a distanza	7 - 6	1509					
							1424					



Fig. 4.270 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SOA, 49,36m.



Fig. 4.271 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OB, 49,36m.



Fig. 4.272 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, OC, 49,36m.



Fig. 4.273 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NA, 49,36m.



Fig. 4.274 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NA, 49,36m.



Fig. 4.275 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NB, 49,36m.



Fig. 4.276 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 49,36m.



Fig. 4.277 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 49,36m.



Fig. 4.278 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, OC, 49,36m.

4.2.9.2 Posizioni di prova SOC, SOA, SOB, SEA, EA,NA, NB, NC, pianta a quota 49,36m



Fif. 4.279 – Restituzione grafica delle posizioni di prova.



Fig. 4.280 – Foto delle posizioni di prova EA, NC.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in SEAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 1	Н	40,0	210	272	3676	1905	0,52				
1	2 - 3	D	72,1	346	274	3650	2084	0,57				
2	2 - 4	V	60,0	274	234	4274	2190	0,51				
3	2 - 5	D	126,5	482			2624					
4	2 - 6	V	120,0	500			2400					
5	1 - 5	V	120,0	510			2353					
6	1 - 6	D	126,5	490			2582					
7	1 - 4	D	72,1	262			2752					
8	5 - 4	D	72,1	270			2671					
							2396					

Tab. 4.132 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SEAest, 49,36m.



Fig. 4.281 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SEAest, 49,36m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NBest, Rx in SOAest										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	109,8	286	246	4065	3838	0,94			
1	2 - 2	H2	109,8	266	298	3356	4128	1,23			
2	3 - 3	H3	109,8	266	296	3378	4128	1,22			
							4031				

Tab. 4.133 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NBest, 49,36m.



Fig. 4.282 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NBest, 49,36m.

Tab. 4.134 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NCest, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NCest, Rx in SOCest										
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	113,8	558	268	3731	2039	0,55			
1	2 - 2	H2	113,8	606	248	4032	1878	0,47			
2	3 - 3	H3	113,8	644	294	3401	1767	0,52			
	-			<u>.</u>			1895				



Fig. 4.283 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NCest, 49,36m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NAest, Rx in SEAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	56,1	112	266	3759	5008	1,33				
1	2 - 4	H2	56,1	116	254	3937	4835	1,23				
2	3 - 6	H3	56,1	110	230	4348	5100	1,17				
	-						4981					

Tab. 4.135 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NAest, 49,36m.



Fig. 4.284 - Velocità riscontrate dalle prove dirette, NAest, 49,36m.
	PROVE DIRETTE - Tx in EAest, Rx in SOBest										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
3	1 - 1	H1	56,1	146	226	4425	3842	0,87			
4	3 - 2	H2	56,1	136	390	2564	4125	1,61			
5	5 - 3	H3	56,1	150	382	2618	3740	1,43			
	-						3902				

Tab. 4.136 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EAest, 49,36m.



Fig. 4.285 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EAest, 49,36m.

4.2.10 Cuspide, livello uno, 57,12m



Fig. 4.286 – Pianta del livello uno della cuspide (quota +57,12m).



Fig. 4.287 – Preparazione della griglia di prova sulla parete SAest.

4.2.10.1 Posizioni di prova SA, SAest, pianta a quota 57,12m



Fig. 4.288 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.289 – Foto della posizione di prova SA.



Fig. 4.290 – Restituzione grafica della posizione di prova SAest.



Fig. 4.291 – Foto della posizione di prova SAest.

		PR	OVE SUI	PERFICIA	ALI - Tx e	e Rx in SA	4	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 3	Н	80,0	834			959	
1	2 - 3	Н	40,0	446			897	
2	4 - 6	Н	80,0	562	486	2058	1423	0,69
3	9 - 8	Н	40,0	506	740	1351	791	0,58
4	2 - 8	V	80,0	906	572	1748	883	0,51
5	3 - 9	V	80,0	500	414	2415	1600	0,66
6	2 - 9	D	89,4	894			1000	
7	3 - 8	D	89,4	868			1030	
8	6 - 8	D	56,6	740	928	1078	764	0,71
9	5 - 9	D	56,6	542	340	2941	1044	0,35
	-						1039	

Tab. 4.137 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 57,12m.



Fig. 4.292 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 57,12m.

		PRO	VE SUPI	ERFICIA	LI - Tx e	Rx in SA	est	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	3 - 1	Н	80,0	294	234	4274	2721	0,64
1	6 - 4	Н	80,0	220	216	4630	3636	0,79
2	9 - 7	Н	80,0	230			3478	
3	3 - 7	D	113,1	364			3108	
4	2 - 7	D	89,4	326			2744	
5	2 - 9	D	89,4	340	250	4000	2631	0,66
6	1 - 7	V	80,0	360	258	3876	2222	0,57
7	2 - 8	V	80,0	352			2273	
8	3 - 9	V	80,0	320	258	3876	2500	0,65
9	1 - 9	D	113,1	372	250	4000	3041	0,76
	-	•		•			2835	

Tab. 4.138 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SAest, 57,12m.



Fig. 4.293 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SAest, 57,12m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in SA, Rx in SAest											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 1	H1	85,9	538	362	2762	1596	0,58				
1	2 - 3	H1	85,9	586			1466					
2	3 - 3	H1	110,3	566			1949					
3	3 - 2	H1	85,9	424	412	2427	2025	0,83				
4	4 - 5	H2	85,9	518			1658					
5	4 - 4	H2	110,3	588			1877					
6	5 - 4	H2	85,9	446	352	2841	1926	0,68				
7	5 - 6	H2	85,9	470	344	2907	1827	0,63				
							1790					

Tab. 4.139 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SA, 57,12m.



Fig. 4.294 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SA, 57,12m.

	PROVE DIRETTE - Tx in SA, Rx in SAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	2 - 2	H1	76,0	532	438	2283	1429	0,63				
1	3 - 1	H1	76,0	468	420	2381	1624	0,68				
2	4 - 6	H2	76,0	564	384	2604	1348	0,52				
3	5 - 5	H2	76,0	388	406	2463	1959	0,80				
4	6 - 4	H2	76,0	518			1467					
5	9 - 7	H3	76,0	236			3220					
	-	•		•			1841					

Tab. 4.140 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SA, 57,12m.



Fig. 4.295 - Velocità riscontrate dalle prove dirette, SA, 57,12m.

4.2.11 Cuspide, livello due, 62,00m



Fig. 4.296 – Pianta del livello due della cuspide (quota +62,00m).



Fig. 4.297 – Emissione del segnale sonico in corrispondenza della parete EAest.

4.2.11.1 Posizioni di prova SA, SAest, pianta a quota 62,00m



Fig. 4.298 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.299 – Foto della posizione di prova SA.



Fig. 4.300 – Restituzione grafica della posizione di prova SAest.



Fig. 4.301 – Foto della posizione di prova SAest.

		PRO	VE SUPI	ERFICIA	LI - Tx e	Rx in SA	est	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	2 - 1	Н	60,0	170	236	4237	3529	0,83
1	2 - 3	D	84,9	224			3788	
2	2 - 4	V	60,0	178			3371	
3	2 - 5	D	134,2	524	296	3378	2560	0,76
4	2 - 6	V	120,0	260	364	2747	4615	1,68
5	6 - 1	D	134,2	422	210	4762	3179	0,67
6	4 - 3	Н	60,0	132			4545	
7	6 - 5	Н	60,0	206	294	3401	2913	0,86
8	1 - 5	V	120,0	470	284	3521	2553	0,73
9	1 - 3	V	60,0	220			2727	
10	4 - 6	V	60,0	160			3750	
	•					1	3412	

Tab. 4.141 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SAest, 62,00m.



Fig. 4.302 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SAest, 62,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in SAest, Rx in SA											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 1	H1	108,2	1056	330	3030	1024	0,34				
1	2 - 2	H1	108,2	948	336	4425	1141	0,26				
2	3 - 3	H2	108,2	934			1158					
3	4 - 4	H2	108,2	782	260	3846	1384	0,36				
4	5 - 5	Н3	108,2	486			2226					
5	6 - 6	Н3	108,2	454	244	4098	2383	0,58				
	-	•	<u>.</u>	<u>.</u>	<u>.</u>	<u>.</u>	1553					

Tab. 4.142 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SAest, 62,00m.



Fig. 4.303 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SAest, 62,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in SAest, Rx in SA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	90,0	758			1187					
1	2 - 1	H1	90,0	882	260	3846	1020	0,27				
2	3 - 4	H2	90,0	410			2195					
3	4 - 3	H2	90,0	432			2083					
4	5 - 6	H2	90,0	406	212	4717	2217	0,47				
5	6 - 5	H2	90,0	422			2133					
	-	·					1806					

Tab. 4.143 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SAest, 62,00m.



Fig. 4.304 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SAest, 62,00m.

		PR	OVE SUI	PERFICIA	ALI - Tx (e Rx in SA	4	
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	454	748	1337	1322	0,99
1	1 - 3	V	60,0	458	618	1618	1310	0,81
2	1 - 4	D	84,9	604	750	1333	1405	1,05
3	2 - 4	V	60,0	396			1515	
4	3 - 4	Н	60,0	584	428	2336	1027	0,44
5	3 - 5	V	60,0	426	454	2203	1408	0,64
6	3 - 6	D	84,9	958	456	2193	886	0,40
7	5 - 6	Н	60,0	548			1095	
8	2 - 6	V	120,0	944			1271	
9	1 - 6	D	134,2	1290			1040	
	•				1	1	1228	

Tab. 4.144 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, 62,00m.



Fig. 4.305 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 62,00m.

4.2.11.2 Posizioni di prova EA, EAest, pianta a quota 62,00m



Fig. 4.306 – Restituzione grafica della posizione di prova EA.



Fig. 4. 307 – Foto della posizione di prova EA.



Fig. 4.308 – Restituzione grafica della posizione di prova EAest.



Fig. 4.309 – Foto della posizione di prova EAest.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in EAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	3 - 2	Н	60,0	214			2804					
1	3 - 1	Н	120,0	380	188	5319	3158	0,59				
2	3 - 4	D	134,2	462			2904					
3	3 - 5	D	84,9	246	284	3521	3449	0,98				
4	3 - 6	V	60,0	256	210	4762	2344	0,49				
5	3 - 7	D	169,7	592			2867					
6	3 - 8	D	134,2	478			2807					
7	3 - 9	V	120,0	462			2597					
8	6 - 4	Н	120,0	352			3409					
9	6 - 5	Н	60,0	206			2913					
10	9 - 1	D	169,7	376	164	6098	4513	0,74				
11	9 - 8	Н	60,0	154			3896					
12	8 - 7	Н	60,0	266	256	3906	2256	0,58				
13	5 - 4	Н	60,0	202			2970					
14	1 - 4	V	60,0	200	238	4202	3000	0,71				
15	1 - 7	V	120,0	420			2857					
16	2 - 8	V	120,0	414			2899					
17	2 - 5	V	60,0	288			2083					
18	5 - 1	D	84,85	248			3421					
							3008					

Tab. 4.145 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EAest, 62,00m.

Tab. 4.146 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EAest, 62,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EAest, Rx in EA										
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)			
0	1 - 1	H1	150,0	858			1748				
1	1 - 2	H1	108,2	436	194	5155	2481	0,48			

N	Ty - Ry	DIR	L (cm)	ΔΤ (με)	te (us)	fmax	v (m/s)	λmin
11	1 A - IXA	D114		Δ1 (µs)	τς (μο)	(Hz)	, (117.3)	(m)
2	2 - 1	H1	108,2	716	228	4386	1511	0,34
3	2 - 3	H1	108,2	460			2352	
4	3 - 3	H1	150,0	932	280	3571	1609	0,45
5	3 - 2	H1	108,2	458			2362	
6	4 - 4	H2	150,0	622			2412	
7	4 - 5	H2	108,2	548			1974	
8	5 - 4	H2	108,2	476			2273	
9	5 - 6	H2	108,2	518			2089	
10	6 - 6	H2	150,0	874	342	2924	1716	0,59
11	6 - 5	H2	108,2	524	350	2857	2065	0,72
12	7 - 7	H3	150,0	628	274	3650	2389	0,65
13	7 - 8	H3	108,2	482			2245	
14	8 - 7	H3	108,2	492			2199	
15	8 - 9	H3	108,2	496			2181	
16	9 - 9	H3	150,0	624			2404	
							2118	

Tab. 4.147 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EAest, 62,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in EAest, Rx in EA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	90,0	386	178	5618	2332	0,42				
1	2 - 2	H1	90,0	362			2486					
2	3 - 1	H1	90,0	614	232	4310	1466	0,34				
3	4 - 6	H2	90,0	446	190	5263	2018	0,38				
4	5 - 5	H2	90,0	402			2239					
5	6 - 4	H2	90,0	420			2143					
6	9 - 7	Н3	90,0	370	240	4167	2432	0,58				

Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
7	8 - 8	H3	90,0	376			2394	
8	7 - 9	H3	90,0	406			2217	
							2192	

Tab. 4.148 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, EA, 62,00m.

		PR	OVE SUF	PERFICIA	ALI - Tx e	e Rx in EA	A	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	1 - 2	Н	60,0	240	402	2488	2500	1,01
1	1 - 3	Н	120,0	666			1802	
2	2 - 3	Н	60,0	374	464	2155	1604	0,74
3	4 - 5	Н	60,0	298			2013	
4	4 - 6	Н	120,0	674			1780	
5	5 - 6	Н	60,0	304	336	2976	1974	0,66
6	7 - 8	Н	60,0	274			2190	
7	7 - 9	Н	120,0	706			1700	
8	8 - 9	Н	60,0	306			1961	
9	1 - 9	D	169,7	1254			1353	
10	7 - 3	D	169,7	1150			1476	
	-	•					1850	



Fig. 4.310 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EAest, 62,00m.



Fig. 4.311 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EAest, 62,00m.



Fig. 4.312 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EAest, 62,00m.



Fig. 4.313 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EA, 62,00m.

4.2.12 Cuspide, livello tre, 66,00m



Fig. 4.314 – Pianta del livello tre della cuspide (quota +66,00m).



Fig. 4.315 – Stazione di acquisizione dei dati su un ponteggio esterno.

4.2.12.1 Posizioni di prova SA, SAest, pianta a quota 66,00m



Fig. 4.316 – Restituzione grafica della posizione di prova SA.



Fig. 4.317 – Foto della posizione di prova SA.



Fig. 4.318 – Restituzione grafica della posizione di prova SAest.



Fig. 4.319 – Foto della posizione di prova SAest.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in SAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	3 - 1	Н	120,0	416	192	5208	2885	0,55				
1	6 - 4	Н	120,0	380			3158					
2	9 - 7	Н	120,0	334	206	4854	3593	0,74				
3	1 - 7	V	120,0	410	172	5814	2927	0,50				
4	2 - 8	V	120,0	420	176	5682	2857	0,50				
5	3 - 9	V	120,0	434			2765					
6	9 - 4	D	134,2	368	180	5556	3646	0,66				
7	6 - 7	D	134,2	396			3388					
8	6 - 1	D	134,2	458	184	5435	2929	0,54				
9	3 - 4	D	134,2	396			3389					
	<u>.</u>	1	1	1		1	3154					

Tab. 4.149 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SAest, 66,00m.



Fig. 4.320 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SAest, 66,00m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in SAest, Rx in SA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	119,2	728			1637					
1	1 - 1	H1	158,1	914			1730					
2	2 - 3	H1	119,2	846	220	4545	1409	0,31				
3	2 - 1	H1	119,2	698	264	3788	1708	0,45				
4	4 - 5	H2	119,2	888			1342					
5	4 - 4	H2	158,1	972	288	3472	1627	0,47				
6	5 - 4	H2	119,2	930	198	5051	1282	0,25				
7	5 - 6	H2	119,2	876			1361					
8	7 - 8	H3	119,2	848	264	3788	1406	0,37				
9	7 - 7	H3	158,1	924			1711					
10	8 - 9	H3	119,2	716			1665					
11	8 - 7	H3	119,2	624	174	5747	1910	0,33				
							1566					

Tab. 4.150 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SAest, 66,00m.



Fig. 4.321 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, SAest, 66,00m.

	PROVE DIRETTE - Tx in SAest, Rx in SA											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	H1	103,0	688			1497					
1	2 - 2	H1	103,0	616	226	4425	1672	0,38				
2	3 - 1	H1	103,0	728	318	3145	1415	0,45				
3	4 - 6	H2	103,0	734	256	3906	1403	0,36				
4	5 - 5	H2	103,0	620	240	4167	1661	0,40				
5	6 - 4	H2	103,0	620			1661					
6	7 - 9	Н3	103,0	622			1656					
7	8 - 8	Н3	103,0	664	166	6024	1551	0,26				
8	9 - 7	Н3	103,0	720	190	5263	1431	0,27				
							1550					

Tab. 4.151 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SAest, 66,00m.



Fig. 4.322 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SAest, 66,00m.

		PR	OVE SUI	PERFICIA	ALI - Tx e	e Rx in SA	A	
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)
0	3 - 1	Н	120,0	842			1425	
1	3 - 2	Н	60,0	394	570	1754	1523	0,87
2	3 - 4	D	134,2	1328			1010	
3	3 - 5	D	84,9	1076	682	1466	789	0,54
4	3 - 6	V	60,0	1028	972	1029	584	0,57
5	3 - 8	D	134,2	1578			850	
6	9 - 3	V	120,0	1410	620	1613	851	0,53
7	9 - 1	D	169,7	1800	518	1931	943	0,49
8	6 - 4	Н	120,0	766			1567	
9	9 - 7	Н	120,0	900			1333	
10	9 - 8	Н	60,0	620	544	1838	968	0,53
11	6 - 5	Н	60,0	360			1667	
		·					1126	

Tab. 4.152 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SA, 66,00m.



Fig. 4.323 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SA, 66,00m.

4.2.13 Cuspide, livelli quattro e cinque, 75,90m



Fig. 4.324 – Pianta dei livelli quattro e cinque della cuspide (quota +75,90m).



Fig. 4.325 – Particolare delle posizioni di prova SEAest, EAest.

4.2.13.1 Posizioni di prova NA, NAest, livello quattro, pianta a quota 75,90m



Fig. 4.326 – Restituzione grafica della posizione di prova NA.



Fig. 4.327 – Foto della posizione di prova NA.



Fig. 4.328 – Restituzione grafica della posizione di prova NAest.



Fig. 4.329 – Foto della posizione di prova NAest.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in NAest											
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 3	Н	100,0	304	218	4587	3289	0,72				
1	1 - 2	Н	50,0	136			3676					
2	4 - 6	Н	100,0	340			2941					
3	7 - 9	Н	100,0	356	212	4717	2809	0,60				
4	1 - 7	V	100,0	306	280	3571	3268	0,92				
5	2 - 8	V	100,0	322			3106					
6	3 - 9	V	100,0	368	236	4237	2717	0,64				
7	1 - 9	D	141,4	408	204	4902	3466	0,71				
8	2 - 9	D	111,8	336			3327					
9	2 - 7	D	111,8	364	244	4098	3071	0,75				
10	3 - 7	D	141,4	446			3170					
P.	-					-	3167					

Tab. 4.153 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, NAest, 75,90m.



Fig. 4.330 - Velocità riscontrate dalle prove superficiali, NAest, 75,90m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in NAest, Rx in NA											
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)				
0	1 - 2	H1	79,3	352	206	4854	2252	0,46				
1	1 - 1	H1	117,4	368	230	4348	3190	0,73				
2	2 - 1	H1	79,3	326			2431					
3	3 - 3	H1	117,4	454			2586					
4	4 - 5	H2	79,3	426	240	4167	1861	0,45				
5	4 - 4	H2	117,4	408			2877					
6	5 - 4	H2	79,3	318			2492					
7	6 - 6	H2	117,4	334	210	4762	3515	0,74				
8	6 - 5	H2	79,3	394			2013					
9	7 - 8	Н3	79,3	326			2433					
10	7 - 7	H3	117,4	472			2487					
11	8 - 7	H3	79,3	352	302	3311	2253	0,68				
12	8 - 9	H3	79,3	312	230	4348	2542	0,58				
	8	1	1	1		1	2533					

Tab. 4.154 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, NAest, 75,90m.



Fig. 4.331 – Velocità riscontrate dalle prove semidirette, NAest, 75,90m.

	PROVE DIRETTE - Tx in NAest, Rx in NA												
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)					
0	1 - 3	H1	61,5	244	206	4854	2520	0,52					
1	2 - 2	H1	61,5	224			2746						
2	3 - 1	H1	61,5	200	236	4237	3075	0,73					
3	4 - 6	H2	61,5	228			2697						
4	5 - 5	H2	61,5	368	234	4274	1671	0,39					
5	6 - 4	H2	61,5	164	302	3311	3750	1,,13					
6	7 - 9	Н3	61,5	236	262	3817	2606	0,68					
7	8 - 8	Н3	61,5	270			2278						
8	9 - 7	Н3	61,5	246			2500						
	-	•		•			2649						

Tab. 4.155 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, NAest, 75,90m.



Fig. 4.332 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, NAest, 75,90m.

4.2.13.2 Posizioni di prova SAest, EAest, livello cinque, pianta a quota 75,90m



Fig. 4.333 – Restituzione grafica della posizione di prova SEAest, EAest.



Fig. 4.334 – Foto delle posizioni di prova: a) EAest; b) SEA est.
	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in EAest									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (μs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 13	V	120,0	210	206	4854	5714	1,18		
1	2 - 14	V	120,0	208			5769			
2	3 - 15	V	120,0	250	208	4808	4800	1,00		
3	4 - 16	V	120,0	232			5172			
4	5 - 17	V	120,0	204			5882			
5	6 - 18	V	120,0	246			4878			
6	11 - 17	V	60,0	150	236	4237	4000	0,94		
7	9 - 15	V	60,0	168			3571			
8	8 - 14	V	60,0	176	300	3333	3409	1,02		
9	7 - 13	V	60,0	116			5172			
	•						4837			

Tab. 4.156 – Elaborazione delle velocità dalle prove superfiiciali, EAest, 75,90m.

Tab. 4.157 – Elaborazione delle velocità dalle prove superficiali, SEAest, 75,90m.

	PROVE SUPERFICIALI - Tx e Rx in SEAest									
N	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	1 - 7	V	120,0	260	220	4545	4615	1,02		
1	2 - 8	V	120,0	246			4878			
2	3 - 9	V	120,0	248			4839			
3	4 - 7	V	60,0	166	196	5102	3614	0,71		
							4487			



Fig. 4.335 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, EAest, 75,90m.



Fig. 4.336 – Velocità riscontrate dalle prove superficiali, SEAest, 75,90m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in EAest, Rx in EAest e SEAest								
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)	
2	3 - 1	H1	68,1	194	242	4132	3510	0,85	
3	2 - 3	H1	33,0	52			6340		
4	1 - 2	H1	33,0	72			4583		
9	14 - 9	H3	33,0	62	202	4950	5323	1,08	
10	8 - 6	H2	33,0	66			5000		
11	9 - 4	H2	68,1	236			2886		
12	15 - 7	H3	68,1	278	240	4167	2450	0,59	
							4299		

Tab. 4.158 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, EAest, 75,90m.

Tab. 4.159 – Elaborazione delle velocità dalle prove semidirette, SEAest, 75,90m.

	PROVE SEMIDIRETTE - Tx in SEAest, Rx in EAest									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	Δ Τ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	4 - 9	H2	68,1	204	198	5051	3338	0,66		
1	7 - 15	H3	68,1	226			3013			
2	1 - 3	H1	68,1	218	250	4000	3124	0,78		
3	5 - 7	H2	33,0	64	232	4310	5156	1,20		
5	8 - 13	H3	33,0	64	260	3846	5156	1,34		
7	9 - 14	H3	33,0	178	174	5747	1854	0,32		
8	6 - 8	H2	33,0	58			5690			
							3904			

	PROVE DIRETTE - Tx in EAest, Rx in EAest e SEAest									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
0	6 - 4	H1	27,2	56	270	3704	4852	1,31		
1	2 - 2	H1	38,0	64	364	2747	5944	2,16		
5	12 - 10	H2	27,2	50	186	5376	5434	1,01		
6	18 - 16	Н3	27,2	50			5440			
7	8 - 5	H2	38,0	68	220	4545	5588	1,23		
8	14 - 8	H3	38,0	74			5135			
	-		<u>.</u>	•	<u>.</u>		5399			

Tab. 4.160 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, EAest, 75,90m.

Tab. 4.161 – Elaborazione delle velocità dalle prove dirette, SEAest, 75,90m.

	PROVE DIRETTE - Tx in SEAest, Rx in EAest									
Ν	Tx - Rx	DIR.	L (cm)	ΔΤ (μs)	tc (µs)	fmax (Hz)	v (m/s)	λmin (m)		
4	5 - 8	H2	38,0	78			4877			
6	8 - 14	H3	38,0	64			5938			
			5407							



Fig. 4.337 - Velocità riscontrate dalle prove semidirette, EAest, 75,90m.



Fig. 4.338 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, SEAest, 75,90m.



Fig. 4.339 – Velocità riscontrate dalle prove dirette, EAest, 75,90m.



Fig. 4.340 - Velocità riscontrate dalle prove dirette, SEAest, 75,90m.

4.3 Documentazione fotografica delle operazioni di cantiere

Le operazioni di cantiere finalizzate alla realizzazione delle prove soniche alla Ghirlandina, sono state supervisionate, dirette e fotografate dal Dr. Arch. Camilla Colla. Parte della documentazione fotografica prodotta viene di seguito riportata.



Fig. 4.341 – Addetti alle procedure applicative delle prove soniche.



Fig. 4.342 – Stazione di acquisizione dati, stanza della Secchia; quota 3,44m.



Fig. 4.343 – a) Prove superficiali sulla parete SB; b) prove superficiali sulla parete SC e realizzazione degli schizzi delle posizioni di prova NA e EA; quota 3,44m.



Fig. 4.344 – a) Prove superficiali e b) semidirette in corrispondenza delle posizioni di prova EA e SA; quota 9,62m.



Fig. 4.345 – Preparazione della strumentazione di prova, realizzazione di alcuni schizzi alla base del fusto della Ghirlandina; quota 9,62m.



Fig. 4.346 – Prove in trasmissione semidiretta fra le pareti SB e OA; quota 9,62.



Fig. 4.347 – a) Stazione di acquisizione dei dati; b) prove superficiali sulla parete EB; quota 9,62m.



Fig. 4.348 – Prove in trasmissione diretta fra le facce SE e NC del pilastro in direzione N-E alla base del fusto; quota 9,62m.



Fig. 4.349 – Prove semidirette fra le posizioni di prova NB e EF; quota 9,62m.



Fig. 4.350 – a), b) Preparazione della griglia in corrispondenza della posizione di prova NF; quota 23,00m.



Fig. 4.351 – a) Ispezione visuale all'esterno della stanza dei torresani, b) prove in trasmissione diretta fra le pareti OB e OBest; quota 35,42m.



Fig. 4.352 – Realizzazione dello schizzo della parete OBest.

5. Elaborazioni dei dati di velocità soniche

Il presente capitolo mostra i risultati dell'analisi dei dati acquisiti presso la Ghirlandina, proponendo un'interpretazione qualitativa delle velocità soniche, delle frequenze e delle lunghezze d'onda del segnale lungo l'altezza della torre. La fase successiva all'analisi dei dati è consistita nel calcolo delle medie dei valori delle velocità riscontrate, per ciascuna prova, in corrispondenza di ogni posizione di misura. I valori così ottenuti sono stati raccolti in forma tabellare a seconda della modalità di trasmissione del segnale: in tabella 5.1 sono riportate le velocità medie ottenute per le prove superficiali, nella 5.2 quelle ottenute per le prove semidirette e in tabella 5.3 le medie riscontrate dalle prove dirette. In ciascuna tabella le velocità sono state organizzate secondo le singole posizioni di prova, a loro volta raggruppate per quota. Accanto al nome della posizione di misura è indicata la presenza o meno dell'intonaco sulla superficie indagata. L'ultima colonna di ciascuna delle tre tabelle riporta la media per quota dei valori medi delle velocità soniche. I valori medi delle velocità sono stati plottati, in maniera distinta per le tre modalità di prova, in funzione della quota della torre (Fig. 5.2, 5.5 e 5.8). In legenda si è ritenuto opportuno adottare quattro colorazioni diverse in maniera tale da poter sempre distinguere le prove effettuate all'esterno da quelle invece condotte all'interno, e, in quest'ultimo caso, le misure su intonaco da quelle effettuate direttamente su muratura. La quarta colorazione rappresenta la serie delle velocità soniche medie per quota. Sui grafici sono state indicate, attraverso linee rosse, le quote delle fasi costruttive.

Sulla base di una prima osservazione qualitativa dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati, sono stati opportunamente calibrati sei intervalli di velocità soniche medie, ciascuno di ampiezza pari a 600 m/s, ad esclusione dell'ultimo relativo invece a tutte quelle velocità il cui valore è maggiore di 3500 m/s; ad ognuno degli intervalli è stato assegnato un diverso colore e alle velocità più basse corrisponde un colore freddo, mentre ai valori più alti è associato un colore caldo. In questo modo è stato possibile riportare, in corrispondenza di ciascuna posizione di prova, dei retini che permettano di visualizzare in maniera significativa i

risultatati ottenuti, rispettivamente per le prove superficiali, semidirette o dirette, sui prospetti esterni (Fig. 5.3, 5.6 e 5.9) e sulle sezioni interne (Fig. 5.4, 5.7 e 5.10).

Per la frequenza massima e la lunghezza d'onda minima del segnale sonico sono stati riportati rispettivamente, per ogni singola prova, il valore minimo, quello massimo e la media aritmetica del set completo di valori ottenuto (Tab. 5.4). Come nel caso delle velocità, in tabella è stata indicata l'eventuale presenza di intonaco sulla superficie della posizione di prova. Le medie per quota dei valori ottenuti sono stati riportati in una tabella distinta (Tab. 5.5).

I valori minimi, i valori massimi e le medie delle frequenze e delle lunghezze d'onda sono stati plottati in funzione della quota della torre (Fig. 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16); la legenda dei grafici, che ha determinato il modo di visualizzare i risultati, è stata scelta secondo criteri analoghi a quelli già descritti nel caso delle velocità.

Dai risultati ottenuti attraverso il calcolo dei valori medi, plottati nei grafici delle figure 5.2, 5.5 e 5.8, è possibile rilevare che le velocità variano da circa 1000 m/s fino a circa 4800 m/s nel caso di prove superficiali, da circa 500 m/s fino a 4300 m/s per le prove semidirette, mentre nel caso di prove in trasmissione diretta i valori sono compresi fra 800 m/s e poco più di 5400 m/s. Come si evince dai grafici, le velocità più alte sono state riscontrate, in generale, nel caso di prove effettuate sulla superficie del paramento lapideo esterno o in trasmissione, diretta o semidiretta, fra l'esterno e l'interno della torre. Alla quota di 3,44 m, all'interno della stanza della secchia sono state riscontrate velocità soniche medie relativamente basse in corrispondenza delle posizioni di prova interessate dalla presenza di intonaco. Questo è lecito in quanto la finitura ad intonaco ha un forte potere attenuante sul segnale sonico, con conseguenze dirette sulla qualità dei dati.

Confrontando le fig. 5.2, 5.5 e 5.8 è possibile notare come, fino alla quota di circa 35,00 m, dunque entro le prime due fasi costruttive, i valori medi delle velocità ottenuti rispettivamente da prove superficiali e semidirette siano distribuiti entro intervalli di ampiezza più piccola rispetto a quelli sui quali sono invece spalmate le velocità delle prove dirette. Quanto riscontrato è riconducibile al fatto che nella trasmissione diretta il segnale attraversa l'intero spessore murario e dunque il sacco interno il quale, essendo caratterizzato plausibilmente da intrinseca

eterogeneità o dalla presenza di vuoti, comporta in vario modo, a seconda della posizione di prova, l'assorbimento e la conseguente perdita di direzionalità del segnale.

Osservando invece le velocità medie per quota è possibile desumere che, lungo l'altezza della Ghirlandina, i valori sono, tanto per le prove superficiali, quanto per le prove semidirette, mediamente alti nella porzione della torre che va dalla stanza dei torresani, quota 35,42 m, fino alla quota alla quale, per questioni operative legate alla mobilità attraverso i ponteggi, è stato possibile condurre le acquisizioni, 75,90 m. Questa osservazione deve però necessariamente tenere conto del fatto che, lungo la parte terminale della torre, costituita dalla cuspide, per ragioni legate al recente completamento dei lavori di restauro della facciata interna della muratura al momento delle acquisizioni, la maggiore quantità dei dati si riferisce a prove effettuate in trasmissione fra l'esterno e l'interno. Alla quota di 66,00 m, in corrispondenza della posizione di prova SAest, è stata riscontrata, per le prove semidirette e dirette, una velocità media bassa (circa 1500 m/s) rispetto alle altre calcolate lungo la cuspide, se si tiene conto del fatto di aver operato, nel caso in esame, in trasmissione dall'esterno all'interno. Andando allora ad osservare, non i valori medi per quota, ma le singole velocità medie delle prove semidirette e dirette in corrispondenza delle due posizioni di prova EAest e SAest alla quota inferiore, 62,00 m, si nota come la parete a sud sia caratterizzata da valori bassi rispetto a quelli riscontrati invece nella parete a est, e in parte confrontabili con quelli della quota superiore dove è stata riscontrata la peculiarità. Assunto che le prove superficiali sulle pareti a sud mostrino, alle due quote, velocità medie comunque elevate, appare plausibile che i valori bassi associabili alla trasmissione fra l'esterno e l'interno della torre siano frutto del distacco del paramento lapideo esterno rispetto al restante corpo di fabbrica. Questo sembra giustificato se si tiene conto del fatto che, generalmente, il distacco del paramento esterno, più rigido rispetto ai materiali che compongono lo strato più interno della muratura, avvenga in presenza di tensioni particolarmente concentrate e localizzate e che la cuspide, dal punto di vista strutturale, costituisce un elemento spingente.

Dall'osservazione dei plot delle frequenze massime del segnale e in maniera particolare delle figure 5.12 e 5.13 nelle quali sono visualizzati i valori massimi e le medie aritmetiche, è possibile dedurre come i risultati tendano idealmente a

collocarsi secondo tre fasce, anche se non immediatamente distinguibili fra loro. Una prima fascia coinvolge frequenze più basse (da 700 a 2700 Hz circa) associabili la maggior parte a prove eseguite su pareti intonacate; una seconda fascia coinvolge, invece, frequenze intermedie (da 2700 a 3700 Hz circa) riconducibili a posizioni interne prive di intonaco; la terza ed ultima fascia è caratterizzata dalle frequenze più alte (da 3700 a 6100 Hz circa), associate quasi tutte a posizioni di prova esterne e in misura esigua a posizioni interne su superfici non intonacate. È necessario ribadire che questa suddivisione è del tutto ideale, per cui non avrebbe alcun senso fissare con precisione dei range di frequenza, ma questo non esclude la possibilità di trovare comunque la motivazione all'origine di quella che sembrerebbe mostrarsi come una tendenza non del tutto priva di senso. Noto che l'intonaco ed il paramento esterno siano caratterizzate da rigidezze molto diverse fra loro, la prima molto bassa e la seconda molto più alta, verosimilmente il tempo di contatto del martello su una superficie intonacata sarà più lungo che su pietra. Dunque, essendo le frequenze ricavabili attraverso l'inversione dei tempi di contatto fra il martello strumentato e la superficie della posizione di prova, la tendenza individuata appare del tutto lecita se si assume poi che i materiali superficiali del paramento interno determinino dei tempi di contatto intermedi. L'osservazione trova fondamento se si osservano i set completi dei tempi di contatto al capitolo precedente. Dal punto di vista quantitativo i valori minimi delle frequenze del segnale variano da 400 Hz a 4900 Hz circa; i valori massimi ottenuti variano da 800 Hz a 6100 Hz; le medie aritmetiche calcolate a partire dai set completi dei dati sono comprese circa fra 700 Hz e 5400 Hz.

L'importanza del calcolo delle frequenze è legata al fatto che dal contenuto in frequenza del segnale dipende la profondità di penetrazione attraverso la muratura. Essendo, infatti, le lunghezze d'onda valutabili dal rapporto fra la velocità del segnale e la frequenza, a frequenze alte corrispondono lunghezze d'onda piccole. I valori minimi delle lunghezze d'onda ottenuti variano da 0,12 m a 2,05 m; i valori massimi da 0,24 a 4,35 m; le medie aritmetiche da 0,18 a 2,57 m. Tuttavia, come è possibile osservare dalle figure 5.14, 5.15 e 5.16, valori molto elevati delle lunghezze d'onda rappresentano delle singolarità.

A partire dai set completi delle velocità soniche relative a ciascuna posizione di prova è stata condotta un'analisi statistica con lo scopo di avere informazioni in

merito alla forma della distribuzione di ogni singola prova. Sono stati calcolati, per le prove dirette, superficiali e semidirette, i primi tre quartili e l'indice di asimmetria. Nello specifico, il primo quartile rappresenta il valore al di sotto del quale, nella distribuzione delle velocità soniche, si trova il 25% dei dati; il terzo quartile è il valore al di sotto del quale si ha il 75% dei dati. Dunque l'intervallo che intercorre fra il primo e il terzo quartile contiene il 50% centrale della distribuzione delle velocità soniche calcolate per ciascuna prova. Il secondo quartile rappresenta invece la mediana della distribuzione. Gli indici statistici appena descritti sono stati rappresentati per via grafica attaverso boxplot, o meglio, attraverso dei rettangoli ai cui estremi si collocano il primo e il terzo quartile; la mediana taglia ciascun boxplot. Oltre ai quartili sono stati indicati il valore massimo e il valore minimo della velocità per la prova specfica. I boxplot sono riportati di seguito, rispettivamente per le prove dirette, superficiali e semidirette, nelle figure 5.17, 5.18 e 5.19.

Oltre ai quartili, per ciascuna distribuzione è stato calcolato l'indice di asimmetria. In generale, quanto più l'indice si avvicina allo zero, tanto più la distribuzione considerata è simmetrica. Un indice positivo è associabile ad una distribuzione asimmetrica positiva, caratterizzata da una coda destra pronunciata; viceversa un indice negativo determina una distribuzione asimmetrica negativa, la quale è caratterizzata da una coda sinistra allungata. I quartili e gli indici di asimmetria sono riportati nelle tabelle 5.6, 5.7 e 5.8 relative rispettivamene a prove dirette, superficiali e semidirette. All'interno delle due tabelle i risultati ottenuti sono organizzati per singola posizione di prova e per quota della torre.

Una prima informazione qualitativa che è possibile dedurre dagli indici di asimmetria e dalla forma dei boxplot è che sia le prove dirette, sia le prove superficiali e semidirette sono caratterizzate da distribuzione asimmetrica, tranne nei pochi casi in cui l'indice di asimmetria è prossimo allo zero (Tab. 5.6, 5.7, 5.8).

Dall'osservazione dei boxplot relativi a modalità di trasmissione diretta è possibile osservare come a partire dalla quota di 42,57 m alcune prove siano caratterizzate da una mediana particolarmente alta rispetto a quella delle altre distribuzioni. Le posizioni di prova e relativi boxplot ai quali si fa riferimento sono: NCest e EAest, boxplot 34 (mediana pari a 4465 m/s), quota 42,57 m; NA e NB, boxplot 35 (3951 m/s), quota 49,36 m; NAest, boxplot 37 (5008 m/s), quota



49,36 m; EAest, boxplot 38 (3842 m/s), quota 49,36 m; EAest, boxplot 45 (5437 m/s), quota 75,90 m.

Fig. 5.1 – Particolari raffiguranti le posizioni di prova a) NCest, EAest, quota 42,57 m; b) NA, NB, quota 49,36 m; c) NAest, EAest, quota 49,36 m; d) EAest, quota 75,90m (in blu sono indicate le direzioni delle prove dirette e in magenta quelle delle prove superficiali).

Come è possibile osservare nella figura 5.1, le direzioni lungo le quali sono state effettuate le prove dirette, interessano esclusivamente il paramento lapideo esterno e non attraversano invece lo spessore murario. Questo giustificherebbe dunque il fatto che la distribuzione statistica delle prove in questione presenti una mediana particolarmente elevata. Escludendo i valori associati a tali posizioni di prova, è infatti possibile calcolare per i secondi quartili un valore mediano pari a 1649 m/s. Per le distribuzioni che fanno riferimento a prove superficiali, il valore mediano è pari a 1539 m/s, dunque non è molto inferiore rispetto a quello delle prove dirette. Confrontando i due valori è possibile dedurre quindi che la muratura offre, con

riferimento a prove in trasmissione diretta, distribuzioni di velocità con mediana bassa. Questo può essere ricondotto alla presenza del sacco interno e, verosimilmente, quanto più ciascun boxplot è concentrato attorno alla mediana, tanto meno eterogeneo potrebbe essere considerato, localmente, il sacco interno. Viceversa dei boxplot molto ampi potrebbero essere associati o a una maggiore eterogeneità del nucleo interno o a numerosi vuoti nel materiale di riempimento. Per le prove superficiali, si riportano le osservazioni fatte in merito ai boxplot relativi a tre posizioni di prova (Fig. 5.1B) che si ritengono significative per una interpretazione qualitativa della forma della distribuzione delle velocità.







Fig. 5.1B – Foto delle posizioni di prova a) OA, quota -2,79 m; b) SA, quota 9,62 m; c) NG, quota 30,00 m.

La posizione di prova OA alla quota -2,79 m presenta disconnessione superficiale e la malta dei giunti risulta particolarmente erosa; il boxplot 1 relativo alle velocità soniche superficiali in corrispondenza di tale posizione di prova, mostra come la distribuzione centrale tenda ad essere ampia rispetto alla mediana. Le due posizioni di prova SA (quota 9,62 m) e NG (quota 30,00 m) presentano invece all'ispezione visuale caratteristiche superficiali migliori, in particolare i giunti di malta sono stati oggetto di ristilatura. Come si può osservare in figura 5.18, i boxplot relativi a tali posizioni di prova, rispettivamente indicatI dagli indici 17 e 32, hanno un'ampiezza molto più piccola rispetto a quello della posizione di misura precedente. Ragionevolmente, sarebbe possibile affermare che, nel caso delle prove superficiali, quanto più il boxplot tende a concentrarsi intorno al secondo quartile, tanto più la distribuzione delle velocità interessa un range piccolo: questo potrebbe essere correlato a buone qualità superficiali della muratura nella zona interessata dalla prova.

Tutti gli elaborati prodotti sono mostrati nei tre paragrafi successivi.

5.1 Visualizzazione dei valori delle velocità medie

Prove superficiali							
Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota			
Quota (iii)	i ui ette	Intonaco	, III (III/3)	(m/s)			
	OA	Ν	1624				
-2,79	SA	Ν	1275	1313			
	SB	Ν	1041				
	NA	S	1388				
	SA	Ν	1623				
0,00	OA	Ν	1695	1524			
	EA	Ν	1527				
	NC	S	1386				
	SA	S	1055				
	EB	S	1090				
3,44	OB	S	1266	1213			
	SC	Ν	1529				
	SB	Ν	1127				
	NAest	Ν	1812				
	NB	Ν	1515				
	EA	Ν	1446				
	SA	Ν	1528				
	SB	Ν	1361				
9,62	EB	Ν	1259	1515			
	SD	Ν	1523				
	NC,EC,SE,OB	N	1187				
	ED	N	1788				
	ND	N	1538				
	OC	Ν	1712				

Tab. 5.1 – Velocità medie ottenute dalle prove superficiali.

Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota
Quota (III)	Tarete	Intonaco	vm (m/s)	(m/s)
	OA	Ν	1565	
	OC	Ν	1590	
	NB	N	1702	
23,00	NC	Ν	1501	1660
	ND	Ν	1991	
	EC	Ν	1643	
	SC	N	1626	
	NG	Ν	1352	
30,00	NI	N	1280	1336
	OD	Ν	1377	
35 47	OBest	Ν	3726	2520
33,42	OAest	N	3334	5550
42 57	EA	S	1976	2426
42,57	NBest	Ν	2896	2450
	OC	S	1369	
10 36	OB	Ν	2606	2280
ту,50	SOA	N	2748	2200
	SEAest	N	2396	
57 12	SAest	Ν	2835	1037
57,12	SA	S	1039	1757
	SAest	Ν	3412	
62.00	SA	S	1228	2375
02,00	EAest	N	3008	2373
	EA	S	1850	
66.00	SAest	Ν	3154	2140
00,00	SA	S	1126	2140
	NAest	N	3167	
75,90	SEAest	N	4487	4164
	EAest	N	4837	



Fig. 5.2 – Velocità medie riscontrate dalle prove superficiali, con indicazione, in rosso, della quota delle fasi costruttive (Tab. 5.1).



Fig. 5.3 – Prospetti esterni, prove superficiali: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.1).



Fig. 5.4 – Sezioni interne, prove superficiali: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.1).

Prove semidirette								
Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota				
				(m/s)				
	NA	N	2216					
	SA	Ν	1746					
-2 79	SB	N	1650	1821				
-2,19	OB	N	1539	1021				
	EC	N	1827					
	SC	Ν	1947					
	NB	S	520					
	OA	N	1711					
0,00	EA	N	1645	1525				
	OB	S	1705	-				
	SC	S	2043	-				
2.44	NB	S	1565	1505				
3,44	NC	S	1444	_ 1303				
	EA	Ν	1409					
	SB	N	1321					
9.62	SC	N	1441	1537				
9,02	NC,EC,SE	N	1565	- 1557				
	NB	N	1993	_				
	ED	Ν	1491					
	OA	Ν	1832					
	OB	N	1732	-				
	NE	N	1843	-				
23.00	SA	N	1298	1664				
23,00	EC	N	1841	1004				
	ED	N	1524					
	ED	N	1450					
	NF	N	1432					

Tab. 5.2 – Velocità medie ottenute dalle prove semidirette.

Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota
				(m/s)
23,00	EE	N	2020	1664
	OB	N	1698	
	OB	N	1248	
30,00	SD	N	1305	1492
	OD	N	1382	-
	NI	N	1825	-
25.42	OA	S	2268	2200
35,42	OB	S	2312	2290
	EA	S	1197	
	EA	S	1484	
40.57	OAest	N	3491	2500
42,57	OAest	N	2785	2300
	NCest	N	2779	
	EAest	N	3265	-
10 36	NA	N	4000	4016
49,50	NBest	N	4031	4010
57,12	SA	S	1790	1790
62.00	SAest	N	1553	1926
02,00	EAest	N	2118	1850
66,00	SAest	N	1566	1566
	NAest	N	2533	
75,90	EAest	N	4299	3579
	SEAest	N	3904	



Fig. 5.5 – Velocità medie riscontrate dalle prove semidirette, con indicazione, in rosso, della quota delle fasi costruttive (Tab. 5.2)



Fig. 5.6 – Prospetti esterni, prove semidirette: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.2).



Fig. 5.7 – Sezioni interne, prove semidirette: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.2).

Prove dirette								
Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota (m/s)				
	SBest	N	2136					
	EA	N	1674					
	EBest	N	1716					
0.00	SA	N	2230	1860				
0,00	SA	N	2422	1800				
	OAest	N	1592					
	OBest	N	1378					
	OCest	N	1733					
	SA	S	829					
	OC	N	2017					
2 44	EC	N	918	1279				
3,44	OFest	N	977	12/8				
	OE	N	1092	-				
	ED	N	1837					
	NAest	N	1563					
	EC	N	1832					
0.62	SE	N	1733	1592				
9,02	ED	N	1343	1565				
	ND	N	1755					
	OC	N	1269					
	OC	N	1959					
	EB	N	2151					
	ND	N	1869					
23,00	NE	N	2265	2056				
	SA	N	2318]				
	ED	N	1543					
	NF	N	1320					

Tab. 5.3 – Velocità medie ottenute dalle prove dirette.

Quota (m)	Parete	Intonaco	vm (m/s)	vm per quota		
Quota (III)	Tarett	Intonaco	vm (m/s)	(m/s)		
	EE	N	2338			
23,00	OA(2)	Ν	2379	2056		
	SC	Ν	2420			
	OB	Ν	1529			
	SD	Ν	1938			
30.00	NG	Ν	1833	1604		
30,00	OD	Ν	1534	1004		
	OC	Ν	1511			
	NI	Ν	1278			
35 17	OA	S	2104	23/3		
33,42	OB	S	2581	2545		
	NA	S	1701			
42,57	NCest	N	4194	3485		
	EAest	Ν	4559			
	NA	Ν	4735			
	NB	Ν	3826			
	OC	S	1048			
10 36	OC	S	1243	2882		
49,50	OC	S	1424	2002		
	NAest	Ν	4981			
	EAest	Ν	3902			
	NCest	Ν	1895			
57,12	SA	S	1841	1841		
62 00	SAest	Ν	1806	1000		
02,00	EAest	N	2192	1777		
66,00	SAest	Ν	1550	1550		
	NAest	Ν	2649			
75,90	EAest	N	5399	4485		
	SEAest	N	5407			



Fig. 5.8 – Velocità medie riscontrate dalle prove dirette, con indicazione, in rosso, della quota delle fasi costruttive (Tab. 5.3).



Fig. 5.9 – Prospetti esterni, prove dirette: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.3).



Fig. 5.10 – Sezioni interne, prove dirette: visualizzazione dei risultati attraverso la calibrazione di intervalli di velocità sonica (Tab. 5.3).

5.2 Frequenze massime e lunghezza d'onda minime dei segnali

Quota (m)	Parete	Intonaco	Prova	fmax (Hz)			λmin (m)		
				min	max	media	min	max	media
-2,79	OA	N	sup	1742	3125	2585	0,48	0,82	0,58
			sdir	1887	3472	2553	0,72	1,03	0,88
	SB	N	sup	2058	2976	2542	0,29	0,66	0,53
			sdir	1916	2778	2435	0,48	0,93	0,70
	OB	N	sdir	743	2703	1600	0,78	2,00	1,20
	SA	N	sup	1786	2747	2327	0,42	0,73	0,58
			sdir	1412	2959	2236	0,60	1,37	0,87
	EC	N	sdir	1266	2717	2081	0,79	1,21	0,95
	SC	N	sdir	2222	2674	2318	0,81	0,95	0,89
0,00	OA	N	sup	2155	2488	2369	0,57	0,87	0,73
			sdir	2137	3067	2553	0,54	0,92	0,70
	SA	N	sup	2083	2825	2390	0,59	0,98	0,80
			dir	3145	4065	3656	0,54	0,69	0,61
			dir	431	3311	1733	0,82	4,35	2,57
	SBest	N	dir	2793	4673	3751	0,45	0,79	0,60
	OCest	N	dir	2874	5882	4194	0,13	0,58	0,42
	OB	S	sdir	776	1792	1423	0,84	1,13	1,02
	SC	S	sdir	2941	3623	3307	0,59	0,61	0,60
	OAest	N	dir	4274	4425	4636	0,32	0,36	0,34
	NA	S	sup	1845	2463	2208	0,60	0,71	0,65
	NB	S	sdir	1767	2577	2172	0,12	0,24	0,18
	OBest	Ν	sdir	3497	5319	4254	0,27	0,52	0,36
	NC	S	sup	1408	2183	1926	0,52	1,02	0,78
	EA	Ν	sup	1724	3311	2590	0,44	0,79	0,62
			sdir	2033	3067	2698	0,45	0,83	0,67
			dir	2591	3731	2681	0,35	0,82	0,53
	EBest	N	dir	3571	5682	4379	0,26	0,56	0,38

Tab. 5.4 – Frequenza massima e lunghezza d'onda minima: valori minimo, massimo e media aritmetica riscontrati per ciascuna prova.
Quota (m)	Parete	Intonaco	Prova	f	max (Hz	Z)	λmin (m)			
Quota (m)	1 arece	Intonaco	110va	min	max	media	min	max	media	
	OC	Ν	dir	1393	3356	2130	0,63	1,39	1,04	
	SB	N	sup	2119	2273	2195	0,41	0,59	0,48	
	SC	N	sup	1880	3205	2538	0,43	0,68	0,60	
	SA	S	sup	1091	1901	1539	0,44	0,97	0,69	
	SA	5	dir	1149	2304	1566	0,14	1,41	0,64	
	NB	S	sdir	1984	2551	2233	0,46	0,97	0,75	
3,44	EB	S	sup	871	2778	1411	0,46	1,33	0,90	
	NC	S	sdir	2294	2747	2515	0,38	0,75	0,61	
	OB	S	sup	1441	1953	1629	0,68	0,90	0,78	
	EC	N	dir	2463	3425	2973	0,21	0,46	0,33	
	ED	N	dir	2242	3067	2595	0,64	0,85	0,73	
	OFest	N	dir	1976	3333	2738	0,26	0,55	0,38	
	OE	N	dir	2924	3876	3499	0,22	0,41	0,33	
	NAest	N	sup	2564	3497	3151	0,28	1,35	0,64	
	INACSI	1	dir	3125	3289	3220	0,38	0,58	0,51	
	NR	N	sup	2193	3125	2479	0,57	0,81	0,65	
		14	sdir	1488	1730	1613	1,06	1,51	1,26	
	EA	N	sup	2000	3521	2557	0,37	0,73	0,57	
	EA	11	sdir	2273	2924	2451	0,41	0,69	0,53	
	SA	Ν	sup	2016	2451	2240	0,58	0,85	0,70	
	SB	Ν	sup	2119	2924	2569	0,44	0,64	0,57	
			sdir	2358	3497	2899	0,31	0,65	0,47	
9,62	EB	N	sup	1068	3448	2108	0,48	0,73	0,60	
	SC	Ν	sdir	1302	3597	2501	0,29	0,91	0,64	
	SD	Ν	sup	1742	2538	2248	0,59	0,77	0,67	
	OC	Ν	sup	2212	3448	2895	0,49	0,87	0,60	
			dir	697	760	729	1,55	1,82	1,64	
	ND	Ν	sup	1202	2618	1924	0,68	0,93	0,85	
		<u>,</u>	dir	703	780	735	2,05	2,94	2,47	
			sup	2304	2604	2441	0,63	0,94	0,75	
	ED) N	sdir	2049	4000	2718	0,43	0,70	0,58	
			dir	602	853	734	1,17	2,40	1,79	

Quota (m)	Parete	Intonaco	Prova	f	max (Hz	z)	λmin (m)			
Quota (m)	1 arete	Intonaco	110va	min	max	media	min	max	media	
	SE		dir	1825	3049	2448	0,61	1,10	0,78	
	EC	Ν	dir	1299	3759	2656	0,56	1,01	0,75	
9,62	NC,EC SE	Ν	sdir	1520	2747	2190	0,57	0,75	0,67	
	NC,EC SE,OB	Ν	sup	1678	2747	2032	0,49	0,80	0,60	
	04	N	sup	1429	3268	2142	0,58	0,78	0,71	
	O A	1	sdir	1667	3571	2351	0,57	1,06	0,80	
	00	N	sup	2358	2381	2370	0,57	0,69	0,63	
	OC	IN	dir	2703	4065	3600	0,43	0,79	0,57	
	NB	N	sup	2646	3571	3064	0,49	0,69	0,56	
	OP	N	sdir	3205	3876	3510	0,39	0,55	0,49	
	UD	IN	dir	2500	3448	2974	0,74	0,80	0,77	
	EB	N	dir	2463	3226	2844	0,64	0,91	0,77	
	NC	N	sup	1661	2604	2144	0,51	0,98	0,73	
		IN	sdir	2155	2857	2609	0,42	0,58	0,48	
	ND	N	sup	1866	3623	2580	0,44	1,05	0,75	
	ND		dir	2488	4464	3614	0,46	0,60	0,51	
23,00	FC	N	sup	2577	3788	3269	0,38	0,63	0,51	
	EU	IN	sdir	1953	2994	2474	0,71	0,80	0,75	
	NE	N	sdir	1908	2762	2434	0,51	0,97	0,78	
	INE	IN	dir	2525	3106	2815	0,70	0,93	0,82	
	54	N	sdir	2994	3546	3270	0,38	0,41	0,40	
	SA	IN	dir	2646	2793	2719	0,83	0,88	0,85	
	NE	N	sdir	2632	3571	2884	0,42	0,55	0,46	
	INF	IN	dir	1946	2924	2530	0,31	0,54	0,43	
			sdir	2203	2618	2400	0,47	0,62	0,56	
	ED	Ν	sdir	1894	3268	2711	0,45	0,76	0,66	
			dir	2381	3378	2851	0,49	0,61	0,55	
	БĿ	λī	sdir	2033	2732	2363	0,65	1,17	0,87	
	EE	IN	dir	2381	2717	2549	0,86	0,98	0,92	

Quota (m)	Parete	Intonaco	Prova	f	max (Hz	z)	λmin (m)			
Quota (m)	1 ai cic	Intonaco	11074	min	max	media	min	max	media	
	SC	N	sup	2146	2660	2403	0,59	0,90	0,72	
23,00	SC	1	dir	2212	2283	2248	1,06	1,10	1,08	
	OA(2)	N	dir	2358	2941	2655	0,80	1,01	0,91	
	NG	N	sup	2212	2551	2378	0,44	0,76	0,59	
	nu	14	dir	2315	3067	2667	0,57	0,76	0,70	
	OB	N	sdir	2049	2618	2275	0,53	0,93	0,74	
	UD	14	sdir	1818	1845	1832	0,62	0,74	0,68	
	OB,EF	N	dir	1592	2809	2201	0,55	0,95	0,75	
	SD	N	sdir	2252	2646	2449	0,42	0,65	0,53	
30.00	50	1	dir	2674	3226	2950	0,61	0,83	0,72	
50,00			sup	1553	2890	2382	0,46	0,72	0,59	
	OD	Ν	sdir	1812	2604	2183	0,44	0,95	0,64	
			dir	1506	3731	2519	0,44	0,89	0,65	
	OC	N	dir	2857	4167	3364	0,44	0,49	0,46	
	NI		sup	1269	3759	2146	0,36	0,92	0,63	
		Ν	sdir	2000	2564	2286	0,51	1,57	0,94	
			dir	1202	2326	1577	0,51	0,94	0,77	
		S	sdir	1241	1880	1577	0,82	2,49	1,56	
	UA	5	dir	1577	2008	1726	0,81	1,75	1,15	
35 42	OR	S	sdir	1689	2273	1941	0,68	1,65	1,17	
55,72	OD	5	dir	1502	2747	2060	0,81	1,47	1,15	
	OAest	N	sup	3268	4310	3631	0,69	1,36	0,94	
	OBest	N	sup	2538	3846	3050	0,59	1,46	1,08	
			sup	2232	2809	2489	0,51	0,92	0,67	
	EA	S	sdir	1563	2049	1842	0,55	0,85	0,66	
			sdir	1984	2513	2168	0,56	0,82	0,70	
	NA	S	dir	1667	2959	2242	0,45	0,98	0,78	
42,57	NBest	N	sup	3247	4348	3721	0,45	1,23	0,79	
	NCest	N	sdir	3125	3650	3416	0,78	0,84	0,81	
		11	dir	2660	4934	4194	0,68	1,86	1,16	
	EAest	N	sdir	2370	3521	2884	0,90	1,33	1,16	
			dir	2732	3876	3344	1,22	1,61	1,39	

Quota (m)	Parete	Intonaco	Prova	f	fmax (Hz)			λmin (m)			
Quota (m)	1 arcu	Intonaco	110va	min	max	media	min	max	media		
42 57	OAest	N	sdir	3067	3704	3343	0,69	1,61	1,14		
42,57	UACSI	18	sdir	3676	4202	3870	0,69	0,76	0,72		
	SOA	Ν	sup	3937	4545	4240	0,60	0,69	0,65		
	OB	N	sup	3205	4425	3980	0,58	0,80	0,67		
			sup	978	1520	1184	0,80	1,59	1,21		
	00	S	dir	1071	1429	1275	0,96	1,36	1,23		
	UC	3	dir	1129	1205	1159	1,01	2,11	1,43		
			dir	1089	1592	1315	0,84	1,30	1,10		
49,36	NA	N	sdir	1656	2618	2200	1,72	1,91	1,81		
	INA	IN	dir	2066	2110	2095	1,96	2,52	2,26		
	NB	N	dir	1355	4032	2978	0,94	2,85	1,62		
	SEAest	N	sup	3650	4274	3867	0,51	0,57	0,53		
	NBest	N	sdir	3356	4065	3600	0,94	1,23	1,13		
	NCest	N	dir	3401	4032	3722	0,47	0,55	0,51		
	NAest	N	dir	3759	4348	4015	1,17	1,33	1,24		
	EAest	N	dir	2564	4425	3202	0,87	1,61	1,30		
			sup	1078	2941	1932	0,35	0,71	0,58		
57 10	SA	S	sdir	2427	2907	2734	0,58	0,83	0,68		
57,12			dir	2283	2604	2433	0,52	0,80	0,66		
	SAest	N	sup	3876	4630	4109	0,57	0,79	0,68		
			sup	2747	4762	3675	0,67	1,68	0,92		
	SAest	Ν	sdir	3030	4425	3850	0,26	0,58	0,38		
			dir	3846	4717	4282	0,27	0,47	0,37		
62.00	SA	S	sup	1333	2336	1837	0,44	1,05	0,72		
02,00			sup	3521	6098	4635	0,49	0,98	0,68		
	EAest	Ν	sdir	2857	5155	3757	0,34	0,72	0,54		
			dir	4167	5618	4840	0,34	0,58	0,43		
	EA	S	sup	2155	2976	2540	0,66	1,01	0,80		
			sup	4854	5814	5425	0,50	0,74	0,58		
66.00	SAest	Ν	sdir	3472	5747	4399	0,25	0,47	0,36		
00,00			dir	3145	6024	4488	0,26	0,45	0,35		
	SA	S	sup	1029	1931	1605	0,49	0,87	0,59		

Quota (m)	Quota (m) Parete		Prova	fmax (Hz)			λmin (m)		
C ¹¹ ()		meenuee	110/4	min	max	media	min	max	media
			sup	3571	4902	4352	0,60	0,92	0,72
	NAest	Ν	sdir	3311	4854	4298	0,46	0,74	0,61
			dir	3311	4854	4099	0,39	1,13	0,73
	EAest	Ν	sup	3333	4854	4308	0,94	1,18	1,04
75,90			sdir	4132	4950	4416	0,59	1,08	0,85
			dir	2747	5376	4093	1,01	2,16	1,43
			sup	4545	5102	4824	0,71	1,02	0,86
1	SEAest	Ν	sdir	3846	5747	4591	0,32	1,34	0,86
			dir						
				medi	a (Hz)	2763	med	ia (m)	0,79

Tab. 5.5 – Medie per quota dei valori minimi, dei valori massimi e delle medie aritmetiche.

		Med	lie per quota					
Quota (m)		fmax (Hz)			λmin (m)			
Quota (III)	min	max	media	min	max	media		
-2,79	1670	2906	2297	0,60	1,08	0,80		
0,00	2336	3582	2940	0,47	0,93	0,70		
3,44	1833	2828	2274	0,41	0,87	0,64		
9,62	1754	2779	2241	0,65	1,06	0,84		
23,00	2283	3180	2728	0,57	0,80	0,68		
30,00	1937	2915	2372	0,49	0,86	0,67		
35,42	1969	2844	2331	0,73	1,70	1,18		
42,57	2575	3506	3047	0,68	1,16	0,91		
49,36	2373	3187	2774	0,96	1,46	1,19		
57,12	2416	3271	2802	0,51	0,78	0,65		
62,00	2957	4511	3677	0,43	0,88	0,61		
66,00	3125	4879	3979	0,38	0,63	0,47		
75,90	3600	5080	4373	0,63	1,20	0,89		



Fig. 5.11 – Frequenze massime del segnale, valori minimi riscontrati (Tab. 5.4).



Fig. 5.12 – Frequenze massime del segnale, valori massimi riscontrati (Tab. 5.4).



Fig. 5.13 – Frequenze massime del segnale, medie aritmetiche (Tab. 5.4).



Fig. 5.14 – Lunghezze d'onda minime del segnale, valori minimi (Tab. 5.4).



Fig. 5.15 – Lunghezze d'onda minime del segnale, valori massimi (Tab. 5.4).



Fig. 5.16 – Lunghezze d'onda minime del segnale, medie aritmetiche (Tab. 5.4).

5.3 Analisi statistica delle velocità

		Prov	e dirette			
	Davata	Interes		Quartili		Indice
Quota (m)	Parete	Intonaco	1°	2°	3°	asimm.
	SBest	Ν	2096	2122	2169	0,83
0,00	EA	N	1508	1735	1844	-0,17
	EBest	Ν	1522	1747	1945	-0,31
	SA	Ν	2194	2545	2658	-0,93
	OAest	Ν	1554	1569	1618	1,35
	OBest	Ν	1138	1153	1815	0,81
	OCest	N	1464	1644	2169	-0,40
	SA	S	476	585	1026	0,78
	OC	Ν	1928	1944	2088	0,55
3,44	EC	Ν	721	959	1037	-0,01
	OFest	Ν	826	866	967	1,43
	OE	Ν	880	929	1074	1,20
	ED	Ν	1663	1760	2021	0,58
	NAest	Ν	1368	1389	1755	0,52
	EC	Ν	1705	1806	1977	-0,07
9.62	SE	Ν	1624	1653	1860	0,86
9,02	ED	Ν	1363	1421	1505	-2,31
	ND	Ν	1695	1733	1775	1,60
	OC	Ν	1212	1307	1325	-0,65
	OC	Ν	1896	1998	2035	-0,84
	OB,EB	Ν	2040	2151	2324	1,07
23,00	ND	Ν	1532	1630	2099	0,71
	NE,SA	Ν	2272	2318	2338	-1,60
	ED	Ν	1371	1527	1594	0,86
	NF	Ν	1167	1402	1528	-1,27

Tab. 5.6 – Indici statistici delle velocità ottenute da prove dirette.

Prove dirette										
Quete (m)	Davata	Intonaco		Quartili		Indice				
Quota (III)	rarete	Intonaco	1°	2°	3°	asimm.				
	EE,OA(2) SC	Ν	2348	2379	2410	0,01				
30.00	NG,SD EF,OB	Ν	1584	1750	1988	0,59				
50,00	OD	N	1343	1578	1701	-0,31				
	OC	N	1413	1473	1514	1,40				
	NI	Ν	1184	1194	1320	1,33				
35 12	OA	S	1622	2202	2500	-0,14				
55,72	OB	S	2212	2275	3009	0,76				
	NA	S	1248	1575	1941	1,05				
42,57	Ncest EAest	Ν	4160	4465	4690	-0,81				
	NA,NB	Ν	3822	3951	4651	1,11				
	OC	S	1075	1381	1738	0,76				
49,36	NAest	Ν	4922	5008	5054	-0,87				
	EAest	Ν	3791	3842	3984	1,23				
	NCest	Ν	1822	1878	1959	0,55				
57,12	SA	S	1438	1546	1875	1,99				
62.00	SAest	Ν	1411	2108	2180	-0,98				
02,00	EAest	Ν	2143	2239	2394	-1,83				
66,00	SAest	Ν	1431	1551	1661	-0,17				
75 00	NAest	Ν	2500	2606	2746	0,38				
13,70	EAest	N	5210	5437	551	-0,08				

	Prove superficiali										
Quoto (m)	Damata	Intonaco		Quartili		Indice					
Quota (III)	rarete	Intonaco	1°	2°	3°	asimm.					
	OA	Ν	1428	1709	1893	-0,62					
-2,79	SA	Ν	1150	1316	1374	0,93					
	SB	Ν	828	936	1203	0,96					
	NA	S	1334	1420	1457	-2,40					
	SA	Ν	1418	1480	1837	0,93					
0,00	OA	Ν	1534	1772	1851	-0,60					
	EA	Ν	1402	1546	1598	0,57					
	NC	S	1122	1420	1611	0,21					
	SA	S	845	1040	1277	-0,24					
	EB	S	1044	1119	1161	-1,06					
3,44	OB	S	1137	1328	1365	-0,16					
	SC	Ν	1305	1553	1690	0,62					
	SB	Ν	998	1168	1236	-0,60					
	NAest	Ν	1024	1384	2045	1,67					
	NB	Ν	1311	1412	1769	0,66					
	EA	Ν	1145	1532	1703	-0,45					
	SA	Ν	1392	1482	1557	1,58					
	SB	Ν	1267	1306	1474	0,56					
9.62	EB	Ν	1033	1351	1410	-0,25					
,02	SD	Ν	1377	1553	1655	-0,29					
	NC,EC,SE, OB	Ν	1009	1184	1362	0,01					
	ED	Ν	1555	1779	1919	0,48					
	ND	Ν	1231	1613	1740	0,11					
	OC	Ν	1536	1747	1882	-0,63					

Tab. 5.7 – Indici statistici delle velocità ottenute da prove superficiali.

		Prove s	uperficial	i		
Quota (m)	Davata	Intonaco		Quartili		Indice
Quota (III)	rarete	Intonaco	1°	2°	3°	asimm.
	OA	Ν	1458	1591	1724	-0,64
23,00	OC	Ν	1611	1632	1648	-2,29
	NB	Ν	1425	1806	1883	-0,62
	NC	Ν	1341	1539	1633	-0,28
	ND	Ν	1575	1933	2181	1,51
	EC	Ν	1557	1655	1710	0,19
	SC	Ν	1547	1593	1751	-0,09
	NG	Ν	1252	1350	1420	0,84
30,00	NI	N	1053	1179	1375	1,37
	OD	Ν	1263	1384	1463	0,13
35 42	OBest	Ν	3510	3975	4297	-1,36
35,42	OAest	Ν	2885	3175	3922	0,42
12 57	EA	S	1789	2010	2235	-0,29
42,37	NBest	Ν	2308	2738	3302	0,97
	OC	S	1210	1388	1482	0,15
10 36	OB	Ν	2564	2577	2633	1,48
49,50	SOA	Ν	2717	2717	2763	1,73
	SEAest	Ν	2190	2400	2624	-0,48
57 12	SAest	Ν	2533	2732	3092	0,45
57,12	SA	S	886	980	1040	1,35
	SAest	Ν	2820	3371	3769	0,51
62 00	SA	S	1054	1291	1384	-0,34
02,00	EAest	Ν	2805	2904	3283	0,93
	EA	S	1652	1802	1994	0,44
66.00	SAest	Ν	2895	3044	3389	0,41
00,00	SA	S	851	989	1450	0,22

Prove superficiali								
Quota (m)	Parete	Intonaco		Indice				
Quota (III)	1 arcte		1°	2°	3°	asimm.		
	NAest	Ν	3006	3170	3308	0,08		
75,90	SEAest	Ν	4365	4727	4849	-1,78		
	EAest	N	4200	5025	5579	-0,54		

Tab. 5.8 – Indici statistici delle velocità ottenute da prove semidirette.

		Prove s	emidirett	e		
Quoto (m)	Darata	Intonaco		Quartili		Indice
Quota (III)	1 al ete	Intonaco	1°	2°	3 °	asimm.
-2 79	NA	Ν	2049	2183	2363	0,30
	SA	Ν	1544	1664	1883	1,99
	SB	Ν	1367	1626	1961	0,19
-2,19	OB	Ν	1224	1488	1769	0,71
	EC	Ν	1595	1747	2144	0,20
	SC	Ν	1861	1996	2073	-1,26
	NB	S	422	556	654	-0,81
	OA	Ν	1615	1715	1772	0,22
0,00	EA	Ν	1425	1509	1793	1,14
	OB	S	1826	1927	1943	-2,37
	SC	S	2000	2071	2139	-1,16
3 44	NB	S	1432	1509	1719	0,33
3,44	NC	S	1244	1370	1624	0,42
	EA	Ν	1218	1391	1619	0,39
	SB	Ν	1148	1273	1579	-0,01
9,62	SC	Ν	1011	1377	1838	0,30
	NC,EC,SE	Ν	1428	1654	1841	-0,61
	NB	Ν	1872	2002	2171	-0,20

Prove semidirette									
Quota (m)	Parete	Intonaco	Quartili			Indice			
			1°	2°	3°	asimm.			
9,62	ED	Ν	1448	1464	1543	0,62			
23,00	OA	Ν	1772	1788	1955	0,23			
	OB	Ν	1329	1673	2034	0,51			
	NC	Ν	1202	1336	1432	-0,19			
	NE	N	1604	1808	2134	0,02			
	SA,EC	N	1375	1504	1698	0,91			
	ED	Ν	1323	1394	1476	2,96			
	ED	Ν	1193	1333	1605	1,35			
	NF	N	1245	1417	1506	1,27			
	EE	Ν	1627	1951	2445	0,30			
30,00	OB	Ν	1461	1656	1797	0,05			
	SD	Ν	1208	1333	1431	-0,59			
	OD	Ν	1245	1368	1601	0,00			
	NI	Ν	1398	1540	2005	1,84			
35,42	OA	S	1642	2222	2638	0,07			
	OB	S	1882	2355	2701	-0,05			
42,57	EA	S	1234	1361	1402	0,24			
	OAest	Ν	2721	2974	3521	1,27			
	NCest EAest	Ν	2872	3028	3161	0,04			
49,36	NA	Ν	3503	4009	4502	-0,04			
	NBest	Ν	3983	4128	4128	-1,73			
57,12	SA	S	1643	1852	1932	-0,60			
62,00	SAest	Ν	1146	1271	2016	0,84			
	EAest	Ν	1974	2199	2362	-0,81			
66,00	SAest	N	1394	1632	1709	0,03			

Prove semidirette									
Quota (m)	Parete	Intonaco	Quartili			Asimm			
			1°	2°	3°	<i>1</i> (511111)			
75,90	NAest	Ν	2253	2487	2586	0,85			
	EAest	N	3198	4583	5161	0,03			
	SEAest	N	3069	3338	5156	-0,03			



Fig. 5.17 – Boxplot delle velocità ottenute dalle prove dirette (Tab. 5.6).



Fig. 5.18 – Boxplot delle velocità ottenute dalle prove superficiali (Tab. 5.7).



Fig. 5.19 – Boxplot delle velocità ottenute dalle prove semidirette (Tab. 5.8).



Fig. 5.20 – a) Prospetto ovest e boxplot di prove b) dir., c) sup.; d) semidir. Fasi costruttive Quote _____

Conclusioni

La costruzione della Ghirlandina ha rappresentato un episodio di lungo impegno costruttivo e questo è dimostrabile dal fatto che le sue quattro fasi costruttive coprirebbero, nel complesso, circa tre secoli. I periodi storici di completamento dei lavori, le sospensioni delle operazioni di cantiere, la tecnica e la regola d'arte con le quali le maestranze hanno contribuito alla realizzazione della torre e i materiali impiegati, potrebbero aver comportato proprietà meccaniche differenti nella muratura lungo lo sviluppo in altezza della struttura.

La massa della Ghirlandina è rilevante rispetto all'effettiva capacità portante del terreno di fondazione, il quale già dai primi lavori di costruzione ha manifestato cedimenti differenziali, documentabili dalla pendenza non omogenea della struttura lungo il suo sviluppo in altezza, la quale è a sua volta il frutto di correzioni diversamente apportate nella verticalità dell'asse dalle maestranze. Alle criticità riscontrabili nel meccanismo di interazione terreno-struttura hanno senza dubbio contribuito il modesto allargamento della base delle fondazioni rispetto alle dimensioni in pianta del fusto, che in ogni caso permette di ripartire male il peso della struttura in termini di tensioni scaricabili al suolo, e l'assenza di interventi di consolidamento del terreno in vista della costruzione della torre. Il lungo periodo di completamento dei lavori deve aver comunque permesso al terreno di migliorare le proprie caratteristiche meccaniche, senza però escludere l'innesco di movimenti e dunque il dissesto che è oggi possibile apprezzare.

Considerate le masse coinvolte rispetto all'altezza sulla quale esse sono distribuite, l'evento sismico rappresenterebbe lo scenario di carico più gravoso per la costruzione. In ragione del rischio sismico cui il bene potrebbe essere sottoposto e in vista della valutazione del suo comportamento strutturale è stato avviato un programma di indagini sperimentali non distruttive rivolte alla diagnosi delle murature. Come evidenziato all'interno della Dir. P.C.M. del 12/08/2007, ai fini della diagnosi strutturale e nell'ambito di un percorso multidisciplinare rivolto alla conoscenza del manufatto, è necessario attribuire maggiore rilevanza al ruolo

che i metodi non distruttivi possono avere ai fini della raccolta di dati qualitativi sullo stato dell'opera d'arte. Essi, infatti, rispetto ai metodi distruttivi consentono di garantire la conservazione fisica della muratura, aspetto di primissima importanza nel caso di beni culturali tutelati, come la Ghirlandina. Come è stato inoltre possibile appurare dalla Direttiva, così come dalla letteratura recensita ai fini della stesura del presente elaborato di tesi, nonostante le tecniche non distruttive presentino il notevole vantaggio appena esposto, è molto difficile determinare e successivamente applicare una correlazione diretta fra il dato acquisito, di natura qualitativa, e un qualche parametro di tipo meccanico, dunque quantitativo: in questo senso l'impedimento determinante è costituito dall'eterogeneità dei materiali che compongono la struttura muraria.

Dopo aver esposto i principi dei metodi non distruttivi comunemente impiegati nella diagnostica della muratura, la recensione dei casi di studio ha permesso di dimostrare l'affidabilità delle prove soniche nella qualificazione della struttura muraria attraverso la morfologia della sezione. È stato inoltre possibile appurare le potenzialità della tecnica sonica nell'indagine dell'effettivo grado di ammorsamento intrinseco di murature costituite da più paramenti, attraverso l'individuazione di elementi passanti di collegamento lungo lo spessore murario.

L'esperienza personale vissuta presso il cantiere di indagini diagnostiche della Ghirlandina mi ha permesso di apprendere un metodo di lavoro finalizzato alla manualità, all'operatività e alla costante attenzione richieste dalle comuni procedure applicative. Le operazioni di cantiere si sono svolte secondo una prima fase di progettazione delle acquisizioni, la quale ha interessato l'ispezione visuale del manufatto e la conseguente scelta, a ciascuna quota della torre, della distribuzione delle posizioni di prova e delle dimensioni di ingombro delle griglie dei punti di misura. La fase successiva è consistita nella preparazione delle griglie sulla superficie delle posizioni di prova scelte e nella realizzazione di eidotipi utili a documentare la posizione e l'ingombro di ciascuna griglia. La terza fase è consistita nell'acquisizione dei dati: le prove soniche sono state condotte in modalità superficiale, semidiretta e diretta.

Durante la progettazione delle acquisizioni, non sempre immediata è stata la scelta delle posizioni utili alla realizzazione di prove in trasmissione diretta fra l'interno e l'esterno della torre, a causa della necessità di individuare pareti contemporaneamente e facilmente accessibili sia all'interno, attraverso la scala in

muratura, sia all'esterno attraverso il ponteggio installato. Le stesse difficoltà operative hanno limitato il numero di prove che è stato possibile eseguire lungo la parte piramidale della Ghirlandina, dove tra l'altro erano stati da poco ultimati i lavori di restauro della facciata interna della parete. La recente rifacitura dell'intonaco all'interno della cuspide ha impedito dunque di battere più volte con il martello strumentato in corrispondenza dei punti di misura, per cui in questo caso è stato generato esclusivamente il segnale necessario alla realizzazione di prove soniche in modalità superficiale. Ai fini della trasmissione in modalità diretta o semidiretta si è deciso quindi di trasmettere dall'esterno e di ricevere il segnale in corrispondenza della superficie interna della cuspide.

L'analisi dei dati è consistita nel calcolo delle velocità di propagazione del segnale dai tempi di volo e dalle distanze dei percorsi. Sono stati calcolati alcuni dei tempi di contatto fra il martello strumentato e la superficie della specifica posizione di prova, dalla cui inversione sono state valutate le frequenze massime e le lunghezze d'onda del segnale sonico.

Le velocità medie di propagazione del segnale, valutate per ciascuna posizione di misura, sono state graficate in maniera distinta per le tre modalità di prova e in funzione della quota della Ghirlandina. È stato possibile appurare che le velocità medie variano da 1000 m/s fino a 4800 m/s nel caso di prove superficiali, da 500 m/s fino a 4300 m/s per le prove semidirette, mentre per le prove dirette i valori variano da 800 m/s a poco più di 5400 m/s. Le velocità più alte sono state riscontrate, in generale, in corrispondenza delle posizioni di prova sul paramento lapideo esterno. Dai valori delle velocità medie per quota, facendo riferimento in particolar modo alle prove superficiali e a quelle semidirette, è possibile osservare come essi siano più alti nella porzione della torre che va dalla stanza dei torresani (quota 35,42 m) fino alla quota di 75,90 m.

Per quanto riguarda le frequenze massime e le lunghezze d'onda minime del segnale, sono stati estrapolati per ciascuna parete e per ciascuna modalità di prova su di essa eseguita, i valori minimi e massimi e le medie aritmetiche dei set completi di dati. Dal punto di vista quantitativo i valori minimi delle frequenze massime variano da 400 Hz a 4900 Hz circa; i valori massimi ottenuti variano da 800 Hz a 6100 Hz; le medie aritmetiche sono comprese circa fra 700 Hz e 5400 Hz. In generale, le lunghezze d'onda si sono attestate entro valori accettabili

lasciando pensare a una buona risoluzione del segnale, mentre le misure elevate hanno rappresentato casi isolati.

I valori minimi delle lunghezze d'onda variano da 0,12 m a 2,05 m; i valori massimi da 0,24 a 4,35 m; le medie aritmetiche da 0,18 a 2,57 m.

È stata condotta un'analisi statistica con lo scopo di avere informazioni in merito alla forma della distribuzione delle velocità soniche. Sono stati calcolati, per le prove dirette, superficiali e semidirette, i primi tre quartili e l'indice di asimmetria. I quartili sono stati rappresentati per via grafica attaverso boxplot.

Una prima informazione qualitativa che è stato possibile dedurre dagli indici di asimmetria e dalla forma dei boxplot è che sia le prove dirette, sia le prove superficiali e semidirette sono caratterizzate da distribuzione asimmetrica, tranne nei pochi casi in cui l'indice di asimmetria è prossimo allo zero. Dall'analisi dei boxplot relativi alle prove dirette è stato possibile avanzare delle ipotesi in merito all'omogeneità del materiale di riempimento lungo lo spessore murario; non è stato possibile verificare la validità di tali ipotesi attraverso endoscopia e, nonostante siano stati effettuati alcuni carotaggi, questi hanno interessato uno strato superficiale della muratura. La forma della distribuzione delle velocità soniche superficiali ha permesso invece di avanzare delle ipotesi in merito alla qualità superficiale della muratura in alcune posizioni di prova ritenute significative.

I risultati ottenuti in termini di velocità sonica potranno essere impiegati in futuro ai fini dell'individuazione di lotti omogenei della muratura in cui possano essere valutate, dal punto di vista quantitativo, le caratteristiche meccaniche necessarie ai fini della valutazione del comportamento strutturale della Ghirlandina.

Bibliografia

• Alessandri S., Monti G., Goretti A., Sbaraglia L., Sforza G., 2006, "Metodi non distruttivi: livelli di conoscenza e fattori di confidenza", atti del *Convegno Nazionale Sperimentazione su Materiali e Strutture*, Venezia, 6-7 Dicembre 2006, Russo S., Siviero E. (a cura di), pp. 724-733.

• Alfieri S., 2009, "Quadro fessurativo", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 155-159.

• Baldan M., Biscontin G., 2009, "Valutazione dell'alterazione chimico-fisica delle superfici lapidee", in "La *torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 130-143.

• Binda L., 2005, "The importance of investigation for the diagnosis of historic buildings: application at different scales (centres and singles buildings)", atti del 5° convegno SAHC, Structural Analysis of Historical Constructions, Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, Modena C., Lourenço P.B. & Roca P. (Eds.), vol. 1, pp. 29-42.

• Binda L., Gatti G., Mangano G., Poggi C., Sacchi G., Sacchi Landriani G., 1992, "The collapse of the Civic Tower of Pavia: a survey of the materials and structure", *Masonry International*, vol. 6, n. 1, pp. 11-20.

• Binda L., Saisi A., 2001, "Non destructive testing applied to historic buildings: the case of some Sicilian Churches", atti del 3rd International Seminar SAHC, Structural Analysis of Historical Constructions, Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, Guimaraes, 7-9 November 2001, Lourenço P.B., Roca P. (Eds.), vol. 1, pp. 29-46.

• Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., 2000, "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries", *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 199-233.

• Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., 2001, "Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures", *NDT&E International*, vol. 34, pp. 123-138.

• Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., Valle S., Colla C, Forde M., 2003, "Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto", *Construction and Building Materials*, vol. 17, pp. 613-627.

• Binda L., Tiraboschi C., Baronio G., 2003, "On-site investigation on the remains of the Cathedral of Noto", *Construction and Building Materials*, vol. 17, pp. 543-555.

• Blasi C., Capra A., Coisson E., Lancellota R., 2009, "I dati del monitoraggio per la comprensione dei movimenti della torre Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 194-205.

Blasi C., Coisson E., 2009, "Fasi costruttive ed evoluzione dei fenomeni di dissesto", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 147-154.

• Brignola A., Curti E., Frumento S., Lagomarsino S., Podestà S., Riotto G., 2006, "Prove soniche su pannelli in muratura di edifici esistenti", atti del *Convegno Nazionale Sperimentazione su Materiali e Strutture*, Venezia, 6-7 Dicembre 2006, Russo S., Siviero E. (a cura di), pp. 183-192.

• Cadignani R. (a cura di), 2009, "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Luca Sossella Editore srl, Roma.

• Cadignani R., 2009, "Un progetto per la conservazione", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 28-39.

• Colla C., 2009, "Diagnosi di elementi strutturali lignei e murari mediante tomografia sonica: esempi applicativi per la valutazione dello stato di conservazione di beni storico-culturali", atti del *13*° *Congresso AIPnD, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio, Diagnostica,* Roma, 15-17 Ottobre 2009, AIPnD, 85-CD.

• Concu G., 2006, "Indagine sonica e ultrasonica: evoluzione nel tempo e sviluppi futuri", atti del *Convegno Nazionale Sperimentazione su Materiali e Strutture*, Venezia, 6-7 Dicembre 2006, Russo S., Siviero E. (a cura di), pp. 662-673.

• Dieghi C., 2009, "Fonti e studi per la storia della Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 48-65.

• Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 12 Ottobre 2007, "Per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 29 Gennaio 2008, n.24.

• Gabrielli E., Colla C., Pascale G., 2009, "Il metodo impact-echo per la valutazione dello stato di riempimento di guaine di post-compressione in strutture di calcestruzzo", atti del *13° Congresso AIPnD, Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio, Diagnostica*, Roma, 15-17 Ottobre 2009, AIPnD, 86-CD.

• Giandebiaggi P., Zerbi A., Capra A., 2009, "Il rilevamento della torre Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 78-87.

• Labate D., 2009, "Il contributo dell'archeologia alla lettura di un monumento", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 66-77.

• Lancellotta R., 2009, "Aspetti geotecnici nella conservazione della torre Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 178-193.

• Lugli S., Papazzoni C. A., Gavioli S., Melloni C., Rossetti G., Tintori S., Zanfrognini R., 2009, "Le pietre della torre Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 96-117.

Lugli S., Corradini L., Pedrazzi S., 2009, "Mappatura di fenomeni di degrado", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 118-129.

• Maierhofer C., 2008, "Combination of non-destructive testing methods for the assessment of masonry structures", atti del *1st Int. RILEM Symposium, SACoMaTiS 2008, On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures*, Varenna, 1-2 Settembre 2008, Binda L., di Prisco M. and Felicetti R. (Eds.), vol. 2, pp. 715-736.

• McCann D. M., Forde M. C., 2001, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures", *NDT&E International*, vol.34, pp.71-84.

• Montorsi W., 1976, "La torre della Ghirlandina Comacini e Campionesi a Modena", Aedes Muratoriana, Modena.

• OPCM 3431, 2005, Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 3 Maggio 2005 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 10 Maggio 2005, n.107.

• Pascale G., Colla C., 2006, "Diagnostica di elementi strutturali in calcestruzzo con metodi basati sulla propagazione delle onde", atti del *Convegno Nazionale Sperimentazione su Materiali e Strutture*, Venezia, 6-7 Dicembre 2006, Russo S., Siviero E. (a cura di), pp. 704-713.

• Piccinini F., 2009, "Note sul cantiere del Duomo e della Ghirlandina", in "*La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione*", Cadignani R. (a cura di), Luca Sossella Editore srl, Roma, pp. 42-47.

Ringraziamenti

Si ringraziano:

• il Prof. Francesco Ubertini e l'Arch. Camilla Colla per l'opportunità che mi è stata concessa di lavorare ad un progetto tanto prestigioso;

• l'Arch. Rossella Cadignani e il Geom. Franco Valli per la disponibilità mostrata nel corso dell'esperienza presso la Ghirlandina;

• Elena Gabrielli e Andrea Crinelli per il supporto durante le acquisizioni in sito e per l'analisi di una parte dei dati.

• Mia madre per il sogno che mi ha permesso di realizzare; i miei nonni, ai quali è dedicata la tesi, e tutta la mia famiglia; la mia Lina,che mi ha sempre incoraggiato a credere in me stesso e ad essere positivo; Giusy, Piero, Maria e Emilio; gli amici di una vita; Domenico; Mauri e Chiara; Enrico, Antonio e Pietro; Tommaso, secondo cui Matlab non è un'opinione. Vi sono grato perché senza di voi non sarei mai quello che conoscete.