

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
AMBIENTALE E DEI MATERIALI*

TESI DI LAUREA

in

Meccanica dei materiali innovativi LS

**DIAGNOSI NON DISTRUTTIVA
DEL PATRIMONIO STORICO-ARCHITETTONICO:
APPLICAZIONI IN LABORATORIO E IN SITO
PRESSO IL DUOMO DI MODENA E LA GHIRLANDINA**

Candidato:
Ercolani Francesco

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. **Giovanni Pascale**

Correlatori:
Chiar.mo Prof. Ing. **Francesco Ubertini**
Dr. Arch. **Camilla Colla**

Anno Accademico 2009/10

Sessione III



Laboratorio Resistenza Materiali

INDICE

Introduzione

1

1. L'UMIDITÀ NELLE MURATURE

4

1.1 L'acqua nelle murature	4
1.2 La risalita capillare dell'acqua nei solidi porosi	4
1.3 L'equilibrio igrometrico fondazione-muratura-ambiente	7
1.4 La risalita dell'acqua nelle murature dalla fondazione	10
1.5 Conseguenza dell'acqua nelle murature	11
1.5.1 Azioni chimiche	11
1.5.2 Azioni fisiche	13
1.5.3 Alterazioni biologiche	16
1.5.4 Corrosione degli inserti metallici	17

2. PROVA DI RISALITA CAPILLARE DI SALI SU MATTONI

18

2.1 Obiettivi	19
2.2 Preparazione della prova di risalita	19
2.2.1 Materiali utilizzati nella prova	19
2.2.2 Tracciatura dei mattoni	20
2.2.3 Caratteristiche dei mattoni	20
2.3 Svolgimento della 1° prova di risalita (ambiente non controllato)	21
2.4 Risultati della 1° prova di risalita	25
2.5 Svolgimento della 2° prova di risalita (in camera climatica)	28
2.6 Risultati della 2° prova di risalita	31
2.7 Osservazioni	34

3. PROVA DI RISALITA CAPILLARE DI SALI SU TRIPLETTA

	36
<hr/>	
3.1 Obiettivi	36
3.2 Preparazione della prova di risalita	36
<i>3.2.1 Materiali utilizzati nella prova</i>	36
<i>3.2.2 Caratteristiche dei mattoni e della malta</i>	38
<i>3.2.3 Descrizione e strumentazione della tripletta</i>	39
<i>3.2.4 Sensori di potenziale e temperatura</i>	39
<i>3.2.5 Tracciatura della tripletta</i>	40
3.3 Svolgimento della prova di risalita	40
3.4 Dati rilevati manualmente	41
3.4 Elaborazione dei dati	45
3.4 Dati rilevati dai sensori	51

4. PRINCIPI DI TERMOGRAFIA AGLI INFRAROSSI

	57
<hr/>	
4.1 Lo spettro elettromagnetico	57
4.2 Radiazione del corpo nero	57
4.3 Emettitori diversi dai corpi neri	61
4.4 Formula di misurazione della termocamera	63

5. MONITORAGGIO TRAMITE TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI DI RISALITA CAPILLARE D'UMIDITÀ IN PROVINO MURARIO FESSURATO

	66
<hr/>	
PRIMA PROVA	66
5.1 Obiettivi	66
5.2 Preparazione della 1° prova di capillarità	66

5.2.1 <i>Materiali utilizzati nella prova</i>	66
5.2.2 <i>Caratteristiche del muretto</i>	67
2.2.3 <i>Caratteristiche della strumentazione utilizzata</i>	72
5.3 Svolgimento della 1° prova risalita	82
5.4 Visualizzazione di termogrammi e fotografie	92
5.5 Interpretazione dei dati	98
5.6 Rilievo manuale della risalita al termine della prova	105
SECONDA PROVA	106
5.7 Obiettivi	106
5.8 Preparazione della 2° prova di capillarità	107
5.9 Strumentazione utilizzata	108
5.10 Svolgimento della 2° prova	109
5.11 Visualizzazione di termogrammi e fotografie	115
5.12 Rilievo manuale della risalita nel fronte del muretto	120
5.13 Interpretazione dei dati	122

6. IL DUOMO DI MODENA E LA TORRE GHIRLANDINA

126

6.1 Introduzione	126
6.2 Fasi costruttive della torre	128
6.3 I materiali da costruzione impiegati nella torre	131
6.4 I materiali da costruzione impiegati nel Duomo	133
6.1 Interazione Duomo – Ghirlandina	134

7. PRINCIPI DELLE PROVE SONICHE

136

7.1 I principi dei metodi sonici	136
7.2 Le tipologie di onde	137
7.3 Le tecniche di prova	139

7.4	Acquisizione dei dati in sito	141
7.5	Elaborazione dei dati	142
7.6	Tempi di volo e calcolo della velocità di propagazione	142
7.7	Tempo di contatto, frequenza e risoluzione	143
7.8	L'attenuazione del segnale	144
 8. APPLICAZIONE IN SITO: PROVE SONICHE PRESSO IL DUOMO DI MODENA		 146
<hr/>		
8.1	Ispezione visuale	146
8.2	Acquisizione dei dati in sito	146
8.3	Descrizione delle posizioni di prova	146
8.4	Fasi preparatorie all'indagine	147
8.5	Calcolo della risoluzione	149
8.6	Analisi e visualizzazione dei dati	150
	8.6.1 <i>Facciata, posizione 1</i>	150
	8.6.2 <i>Parete nord, posizione 2</i>	155
	8.6.3 <i>Pilastro di muratura, posizione 3</i>	163
	8.6.3.1 <i>Quota 45 cm</i>	165
	8.6.3.2 <i>Quota 142 cm</i>	176
	8.6.3.3 <i>Confronto tra le sezioni alle due quote</i>	187
	8.6.4 <i>Colonna di pietra, posizione 4</i>	194
8.7	Tabella riassuntiva delle velocità medie calcolate nel Duomo	198
 9. LA TECNICA TOMOGRAFICA SONICA		 200
<hr/>		
9.1	La tecnica tomografica	200
9.2	Inversione del tempo di volo	202
9.3	Inversione dell'ampiezza	204
<hr/>		

10. APPLICAZIONE IN SITO: TOMOGRAFIA SONICA PRESSO IL SITO UNESCO DI MODENA

	206
10.1 Tomografia sonica di pilastro del Duomo di Modena	206
10.2 Acquisizione dati in sito	206
10.3 Procedimento step-by-step per l'utilizzo del software	206
10.4 Disposizione dei percorsi di misura	210
10.5 Prove preliminari di inversione	210
<i>10.5.1 Prova 1: scelta della dimensione della griglia</i>	210
<i>10.5.2 Prova 2: influenza dello smoothing</i>	215
<i>10.5.3 Prova 3: scelta del numero di iterazioni</i>	220
10.6 Restituzione tomografica dei tempi di volo (sezione a quota 45 cm)	225
10.7 Restituzione tomografica delle attenuazioni (sezione a quota 45 cm)	227
10.8 Prove di inversione effettuate per la sezione a quota 142 cm	232
10.9 Restituzione tomografica dei tempi di volo (sezione a quota 142 cm)	236
10.10 Restituzione tomografica delle attenuazioni (sezione a quota 142 cm)	239
10.11 Tomografia sonica di un pilastro della Ghirlandina	243
10.12 Disposizione dei percorsi di misura	245
10.13 Risultati delle prove soniche in trasmissione diretta	245
10.14 Prove preliminari di inversione	250
<i>10.14.1 Creazione del file di input</i>	250
<i>10.14.2 Influenza dello smoothing</i>	255
<i>10.14.3 Scelta del numero di iterazioni</i>	258
10.15 Restituzione tomografica dei tempi di volo della sezione del pilastro	263

10.16 Restituzione tomografica delle attenuazioni della sezione del pilastro	265
--	-----

11. PRINCIPI DI GEORADAR

268

11.1 Il georadar	268
11.1 Cenni storici sul georadar	269
11.1 Funzionamento del georadar	269
11.1 Acquisizione dei dati	272
11.1 Interpretazione delle sezioni GPR	274

12. APPLICAZIONE IN SITO: PROVE GEORADAR PRESSO IL DUOMO DI MODENA

277

12.1 Descrizione delle posizioni di prova	277
12.2 Acquisizione dei dati in sito	278
12.3 Strumentazione utilizzata	278
12.3.1 <i>Antenna Palm 2.0 GHz</i>	278
12.3.2 <i>Antenna 3101A</i>	279
12.4 Fasi preparatorie all'indagine	280
12.5 Valutazione della costante dielettrica	282
12.6 Elaborazione dei radargrammi	283
12.7 Facciata, posizione 1	288
12.8 Parete nord, posizione 2	292
12.9 Pilastro di muratura, posizione 3	298
12.10 Colonna di pietra, posizione 4	304
12.11 Pavimento, posizione 5	309

CONCLUSIONI	313
<hr/>	
ALLEGATI	316
<hr/>	
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	320
<hr/>	

Introduzione

Il problema della sicurezza delle costruzioni esistenti è di fondamentale importanza in Italia, da un lato per l'elevata vulnerabilità, soprattutto rispetto alle azioni sismiche, dall'altro per il valore storico – architettonico – artistico – ambientale di gran parte del patrimonio edilizio esistente. A ciò si aggiunge la notevole varietà di tipologie e sub-tipologie strutturali dalle quali deriva una particolare complessità delle problematiche coinvolte ed una difficile standardizzazione dei metodi di verifica e di progetto e dell'uso delle numerose tecnologie di intervento tradizionali e moderne oggi disponibili (Circolare finalissima Capitolo 8 “Costruzioni esistenti”). 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. Le problematiche sono quelle comuni a tutti gli edifici esistenti, anche se nel caso del patrimonio culturale tutelato, data la sua rilevanza, è ancora più critica l'impossibilità di conoscere i dati caratterizzanti originariamente la fabbrica, le modifiche intercorse nel tempo dovute ai fenomeni di danneggiamento derivanti dalle trasformazioni antropiche, dall'invecchiamento dei materiali e dagli eventi calamitosi; inoltre, l'esecuzione di una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva sulla fabbrica stessa (Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, Capitolo 4).

Per questo motivo è ormai molto diffuso il ricorso a prove non distruttive (PnD), ovvero quel complesso di esami, prove e rilievi condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame. In questa tesi si analizzeranno e si applicheranno a casi di studio diverse tipologie di prove non distruttive con l'intento di capire se i risultati forniti da esse sono attendibili e di valutare in che ambito ogni tecnica permette di ottenere le valutazioni più accurate. Infatti un aspetto rilevante per l'analisi di un edificio esistente è la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove da effettuare. Per una corretta conoscenza esse dovrebbero essere adottate in modo diffuso, ma per il loro

eventuale impatto e per motivazioni economiche, esse andranno impiegate solo se ben motivate, ovvero se utili nella valutazione e nel progetto dell'intervento. Al fine di limitare al massimo l'impatto di queste indagini è fondamentale la conoscenza della costruzione in muratura oggetto della verifica e questa può essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, dell'analisi storica e delle indagini sperimentali. Il grado di attendibilità del modello sarà infatti strettamente legato al livello di approfondimento ed ai dati disponibili. Per questo vengono introdotti diversi livelli di conoscenza, ad approfondimento crescente, al quale saranno legati fattori di confidenza da utilizzare nell'analisi finalizzata sia alla valutazione dello stato attuale sia a seguito degli eventuali interventi. A seconda del Livello di Conoscenza conseguito, ovvero Conoscenza Limitata (LC1), Conoscenza Adeguata (LC2) e Conoscenza Accurata (LC3) viene definito un Fattore di Confidenza (FC), che assume valori pari a 1.35, 1.20, 1.00 e che riduce i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente che, a loro volta, saranno ulteriormente ridotti dai coefficienti parziali di sicurezza. Appare dunque evidente l'importanza di risalire ad un Livello di Conoscenza elevato poiché ciò ha pesanti ripercussioni sugli eventuali interventi strutturali sia dal punto di vista della quantità di operazioni da svolgere che da quello economico (Bozza di Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le Costruzioni, Appendice C8A).

Le prove non distruttive che sono state studiate in questa tesi sono il monitoraggio termografico, le prove soniche, la tecnica tomografica sonica e l'indagine tramite georadar. Ogni capitolo di applicazione in sito o in laboratorio è sempre preceduto da un capitolo nel quale sono spiegati i principi fondamentali della tecnica applicata. I primi cinque capitoli riguardano un problema molto diffuso nelle murature, cioè la risalita capillare di umidità o di soluzione salina all'interno delle stesse. Spiegati i principi alla base della risalita capillare in un mezzo poroso e della tecnica termografica, sono state illustrate le tre prove svolte in laboratorio: una prova di risalita (di umidità e di salamoia) su laterizi, una prova di risalita di salamoia su tripletta muraria monitorata da sensori e una prova di risalita di umidità su muretto fessurato monitorata tramite termografia ad infrarossi. Nei

capitoli 6 e 7 sono stati illustrati i principi fondamentali delle prove soniche ed è stata presentata un'analisi approfondita di diverse aree del Duomo di Modena in particolare due pareti esterne, un pilastro di muratura e una colonna di pietra. Nelle stesse posizioni sono state effettuate anche prove tramite georadar (Capitoli 11 e 12) per trovare analogie con le prove soniche o aggiungere informazioni che non erano state colte dalle prove soniche. Nei capitoli 9 e 10 sono stati spiegati i principi della tomografia sonica (tecnica di inversione dei tempi di volo e tecnica di inversione delle ampiezze dei segnali), sono stati illustrati i procedimenti di elaborazione delle mappe di velocità e sono state riportate e commentate le mappe ottenute relativamente ad un pilastro di muratura del Duomo di Modena (sezioni a due quote diverse) e ad un pilastro interno di muratura della torre Ghirlandina di Modena.

1. IL RUOLO DELL'UMIDITÀ NEL DEGRADO DELLE MURATURE

L'acqua nelle murature

L'acqua, come tutti i composti chimici, è caratterizzata da una serie di proprietà fisiche, quali la tensione di vapore, la temperatura di solidificazione, quella di ebollizione, ecc. I valori di queste proprietà possono cambiare in modo significativo se l'acqua, anziché essere contenuta in un comune recipiente di proporzioni relativamente grandi, viene a trovarsi all'interno di piccole cavità quali possono essere i pori presenti nei materiali da costruzione delle murature. La conseguenza più appariscente di questa variazione delle proprietà fisiche, nel passare da un comune recipiente ad un contenitore costituito da un solido poroso che presenta un sistema di pori di piccole dimensioni, è la risalita capillare dell'acqua all'interno del solido, quale può essere considerata la muratura. La ragione di questa variazione nelle proprietà dell'acqua risiede nel fatto che le sue molecole, quando esse si trovano all'interno di un sistema di pori di piccole dimensioni o tra due superfici di un solido molto vicine tra loro, risentono fortemente dell'attrazione esercitata dalle superfici del solido.

La risalita capillare dell'acqua nei solidi porosi

Un solido nei confronti di un liquido può presentare due diversi tipi di comportamento: esso può essere liofilo (affine al liquido) o liofobo (nemico del liquido); nel caso in cui il liquido sia in particolare l'acqua i due termini diventano rispettivamente idrofilo o idrofobo. Se si considera una superficie piana di solido come un mattone, o una malta o una pietra, a contatto con una goccia di un liquido come l'acqua, per il quale mostra un comportamento di liofilia, cioè in tal caso di idrofilia, l'angolo di contatto θ risulterà minore di 90° , in quanto la goccia d'acqua, per la sua affinità con il solido, tenderà a "schiacciarsi" sulla superficie per estendere al massimo il contatto con il solido (Fig. 1.1A). Se invece dell'acqua, il solido è posto in contatto con il mercurio, per il quale mostra un

comportamento di liofobia, l'angolo di contatto θ risulterà maggiore di 90° , in quanto la goccia di mercurio tende ad assumere una forma pressochè sferica per minimizzare il contatto con la superficie del solido (Fig. 1.1B).

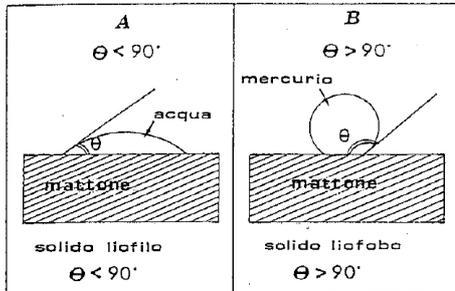


Fig. 1.1: Comportamento di un solido (per es. un mattone) nei confronti dell'acqua (A) e del mercurio (B).

Vale la pena subito di precisare che il comportamento idrofilo di un liquido può trasformarsi in idrofobo se la superficie del solido viene trattata con uno strato di prodotti che presenta una repulsione per l'acqua (Fig. 1.2); i silani, gli stearati, i grassi, ecc. sono tipici prodotti da impiegare per rendere idrorepellente la superficie di un solido che di per sé sarebbe idrofilo: in tal caso l'angolo di contatto θ , minore di 90° per una superficie di un solido idrofilo (Fig. 1.2A), diventa maggiore di 90° per la superficie dello stesso solido rivestita con una pellicola di prodotto idrorepellente (Fig. 1.2B). Una conseguenza della diversa affinità di un solido per un liquido, e viceversa, consiste nel fenomeno della risalita capillare.

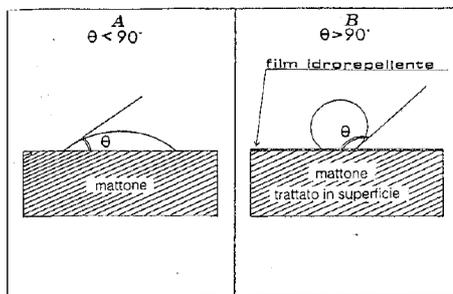


Fig. 1.2: Comportamento di un solido (ad es. un mattone) nei confronti dell'acqua prima (A) e dopo (B) l'applicazione di un film di prodotto idrorepellente.

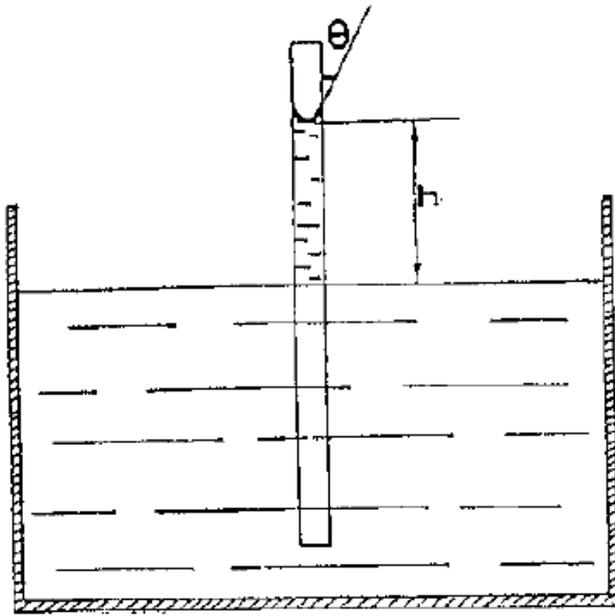


Fig. 1.3: Fenomeno della risalita capillare.

Un liquido, che mostri affinità per le pareti interne di un tubo immerso in una vaschetta contenente il liquido stesso, risale spontaneamente all'interno del tubo. È come se esso fosse spinto da una pressione (P) così calcolabile mediante l'equazione di Washburn:

$$P = \left(\frac{2\sigma}{r_c} \right) \cdot \cos \vartheta$$

dove σ è la tensione superficiale del liquido, r_c è il raggio del tubo capillare e θ è l'angolo di contatto. Se θ è minore di 90° , il $\cos \theta$ è maggiore di zero e la pressione P risulta positiva: è come se la pressione capillare spingesse "spontaneamente" il liquido all'interno del tubo dal basso verso l'alto. La pressione P che fa risalire il liquido all'interno del tubo è tanto maggiore quanto minore è r_c (cioè quanto più piccola è la dimensione del tubo) e quanto minore è θ (cioè quanto maggiore è l'affinità del liquido per la superficie interna del tubo). La risalita del liquido all'interno del tubo avviene, finché raggiunta un'altezza h, si stabilisce un equilibrio tra la pressione capillare (P) e la pressione idrostatica:

$$m \cdot g \cdot h = \left(\frac{2\sigma}{r_c} \right) \cdot \cos \vartheta$$

dove $(m \cdot g \cdot h)$ è la pressione idrostatica, con m la massa volumica del liquido e g l'accelerazione di gravità. Nel caso di liquidi, come il mercurio, per il quale un solido non presenta affinità, θ risulta maggiore di 90° e pertanto $\cos \theta$ risulta negativo. Ne deriva che anche il valore di P risulta negativo: ciò significa in pratica, che il mercurio non risalirà "spontaneamente" all'interno del tubo, ma sarà necessario applicare una pressione P sul mercurio per vincere la repulsione del mercurio nei confronti delle superfici interne del tubo (liofobia): la pressione da applicare sarà in tal caso tanto maggiore quanto minore è il raggio del capillare e questo principio viene sfruttato per calcolare il raggio di un poro attraverso la misura P che occorre per forzare il mercurio in un solido poroso (porosimetro a mercurio).

L'equilibrio igrometrico fondazione - muratura - ambiente

In teoria la massima risalita (h) di acqua per capillarità è ricavabile invertendo l'equazione precedente che in questa forma è nota come legge di Jurin:

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \vartheta}{r_c \cdot m \cdot g}$$

dove m , la massa volumica dell'acqua, è 1000 Kg/m^3 , g vale 9.81 m/s^2 , e σ è la tensione superficiale ed è uguale a $72 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$. Per $\theta = 0$, cioè assumendo la massima affinità possibile tra acqua e materiale poroso (mattoni, pietra, malta), si ottiene l'equazione:

$$h = \frac{14,7 \cdot 10^{-6}}{r_c}$$

Ciò significa che in un materiale poroso costituito solo da pori con raggio capillare r_c di $1 \mu\text{m}$ (cioè $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$), l'altezza di risalita dell'umidità dovrebbe arrivare al massimo a circa 15 m :

$$h = \frac{14,7 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-6}} = 14,7 \text{ m}$$

La porosità capillare di molti materiali che costituiscono le murature presenta una distribuzione dimensionale dei pori compresi tra 0.1 e 1 μm (Figura 1.4), e pertanto per risalita capillare l'acqua dovrebbe raggiungere un'altezza nella muratura di oltre 15 m. In particolare in una muratura a mattoni, considerando teoricamente questo materiale come l'unico presente nella struttura, si dovrebbero registrare risalite di acqua per capillarità fino a 15 m se si ipotizza una porosità costituita da pori aventi raggio 1 μm . In effetti, anche in murature costantemente insistenti su un sottofondo bagnato difficilmente si registrano risalite capillari oltre i 2-3 m. La ragione di questa discrepanza tra teoria e realtà (cioè 14-15 m contro 2-3 m) sta nel fatto che accanto al fenomeno della risalita capillare, coesiste quello dell'evaporazione. Inoltre la risalita capillare richiede del tempo: inizialmente essa procede con una velocità lineare di circa 2 cm/ora, successivamente la cinetica di risalita è molto più lenta.

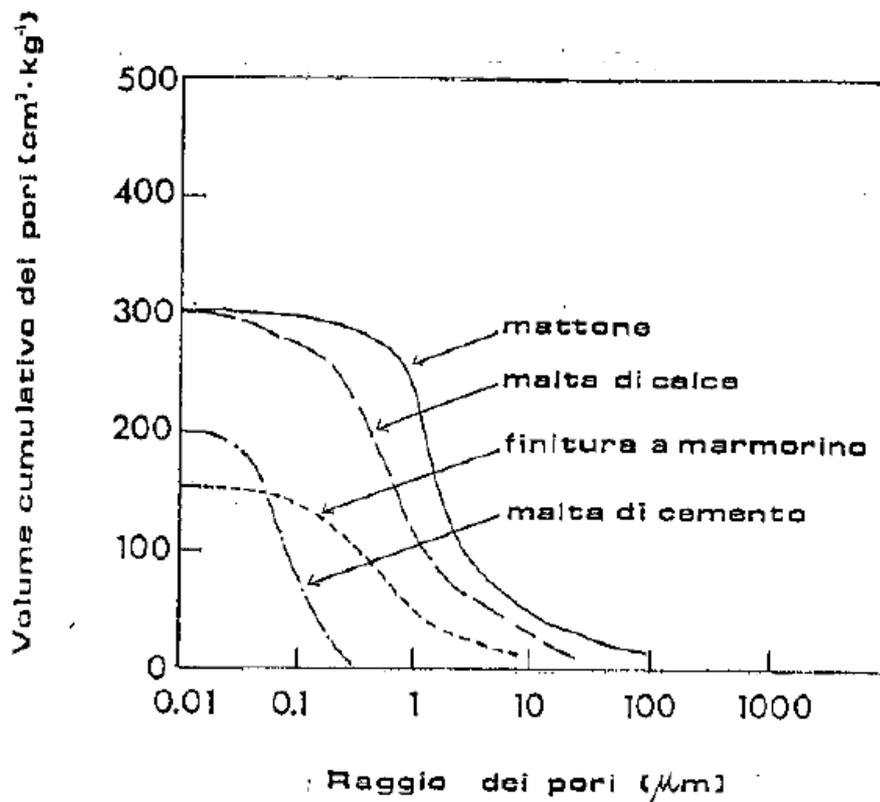


Fig. 1.4: Tipiche distribuzioni dimensionali dei pori per alcuni materiali da costruzione nelle murature.

L'evaporazione dell'acqua, attraverso la parete esposta all'aria, influenza il contenuto residuo di umidità risalita per capillarità nella muratura. La figura 1.5 illustra quale è un tipico diagramma altezza - umidità in una muratura in cui coesistono la risalita capillare della fondazione e l'evaporazione dell'acqua dalla parete. Si osserva che il contenuto di acqua può raggiungere valori del 20-30% nelle zone basse della muratura fino a circa 1 m. Per altezze superiori, l'evaporazione dell'acqua annulla in gran parte l'alimentazione dell'acqua per risalita capillare e si registra una diminuzione brusca dal 15-20% fino a circa il 5% nella fascia di muratura tra 1 e 2 m di altezza. Per altezze della muratura superiori a 2-3 m, il valore dell'umidità residua (a sull'ascissa della figura 1.5) non è tanto dovuta alla risalita capillare, quanto invece alla condensazione capillare ed il valore di a (circa 2-3%) dipenderà ovviamente dall'UR ambientale e dalla dimensione dei pori.

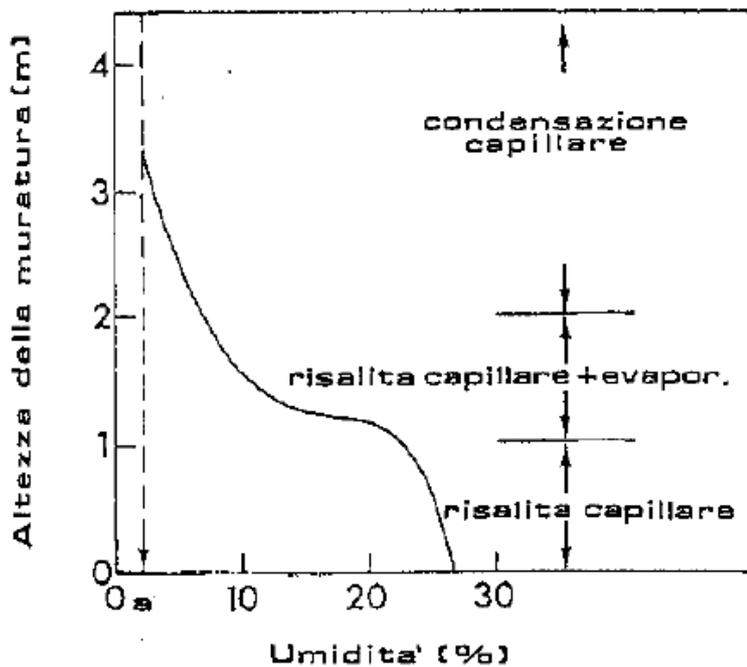


Fig. 1.5: Umidità della muratura in funzione della sua altezza.

Ovviamente la forma precisa della curva illustrata in figura 1.5 nei vari casi specifici dipenderà dal tipo di muratura, dalla costanza o meno di alimentazione di

acqua dalla fondazione e dalle particolari condizioni microclimatiche (vento, UR, temperatura, insolazione) che potranno favorire o meno l'evaporazione dell'acqua. Per quanto concerne l'umidità nella muratura a parità di altezza, essa varierà solo leggermente in funzione dello spessore della muratura e tenderà ad essere leggermente inferiore verso la parete da dove avviene l'evaporazione (figura 1.6).

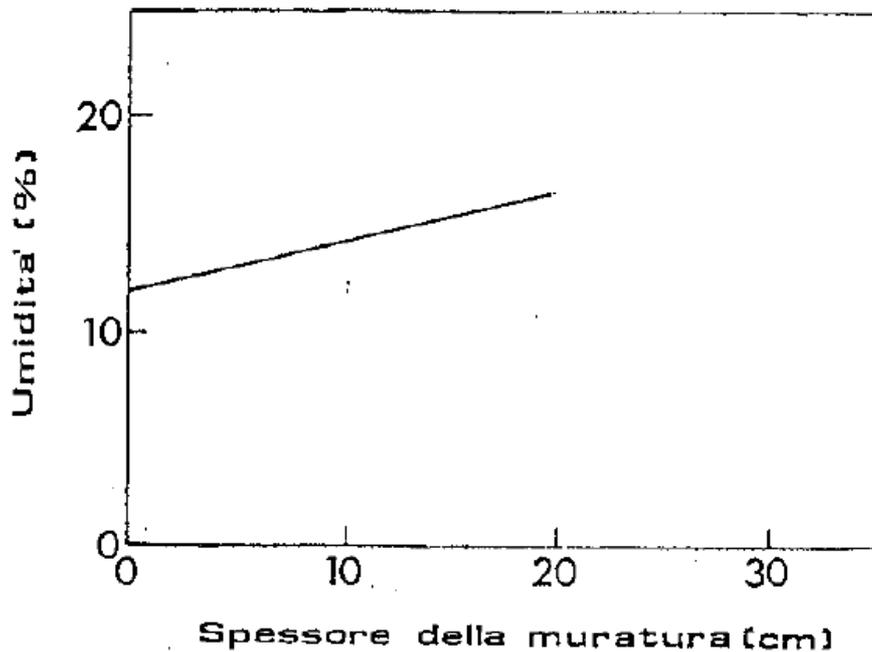


Fig. 1.6: Umidità in funzione dello spessore della muratura ad una determinata altezza.

La risalita dell'acqua nelle murature dalla fondazione

La risalita capillare "spontanea" da parte dell'acqua all'interno di un materiale poroso (idrofilo) è ciò che avviene nelle murature quando queste insistono su una fondazione umida. È evidente, almeno in teoria, che la risalita capillare porterà l'umidità ad altezze tanto maggiori quanto minore è la dimensione dei pori presenti all'interno dei materiali. In realtà, data la grande eterogeneità dei materiali che compongono la muratura (mattoni, pietre, malta di allettamento, ecc.) la risalita avverrà in modo non uniforme per la distribuzione dimensionale

dei pori diversa da materiale a materiale, ed in minor misura per il diverso angolo di contatto (θ), che può variare con i materiali. In effetti la risalita capillare non raggiungerà mai i valori teorici previsti dalle equazioni precedenti in quanto una parte dell'acqua che risale può evaporare, a meno che la muratura non sia rivestita da entrambi i lati (esterno ed interno) da un rivestimento superficiale impermeabile. Nel caso in cui il rivestimento impermeabile sia presente solo nel lato esterno della muratura, la risalita capillare sarà maggiore su questo lato, e minore sul lato interno per effetto dell'evaporazione. Infine, se la muratura non presenta rivestimenti su entrambi i lati, l'evaporazione dell'acqua non consentirà di raggiungere lo stato stazionario di regime (massima risalita capillare: 14-15 m) e l'umidità sarà presente soltanto nella parte più bassa (1-2 m) della muratura.

Conseguenze dell'acqua nelle murature

In presenza di umidità si possono produrre fenomeni di degrado dei materiali della muratura in seguito ad interazioni di tipo chimico causati sia da una azione diretta dell'acqua, sia dai sali in esso disciolti. Altre volte l'azione degradante è di tipo fisico ed è generata da tensioni che si producono in seguito a fenomeni di cristallizzazione all'interno dei pori. L'acqua può, inoltre, favorire lo sviluppo di agenti biologici sulla superficie della muratura oppure la corrosione di eventuali inserti metallici. Anche se questi fenomeni vengono di seguito analizzati singolarmente, importante ricordare che spesso si svolgono in concomitanza oppure si alternano determinando un'azione lenta ma progressiva nel tempo.

Azioni chimiche

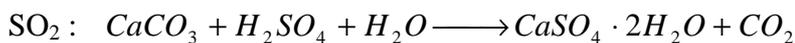
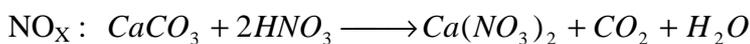
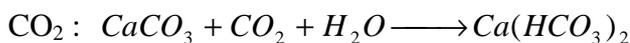
L'umidità può favorire lo sviluppo di reazioni chimiche che alterano la composizione dei costituenti dei materiali della muratura oppure determinano la formazione di nuovi composti all'interno dei loro pori. Ad esempio, l'acqua stessa può portare alla dissoluzione di fasi con elevata solubilità e al loro dilavamento, come nel caso delle malte di calce aerea o del gesso. Le azioni chimiche più importanti, tuttavia, sono legate ai sali disciolti nell'acqua assorbita dalla muratura.

1.Attacco solfatico

Un fenomeno importante è la reazione tra solfati e i materiali cementizi. Le malte di natura cementizia, infatti, in condizioni umide e in presenza di solfati possono subire gli stessi processi di degrado del calcestruzzo. La formazione di gesso per reazione con la calce libera presente nella malta, ma soprattutto la produzione di ettringite e, in casi particolari, di thaumasite, può portare alla fessurazione o alla disgregazione della malta. L'azione dei solfati è mitigata in malte con legante cementizio e aggiunte di tipo pozzolanico, soprattutto se il contenuto di calce residuo è modesto. L'attacco solfatico può derivare anche dall'impiego di gesso su supporti cementizi; ad esempio intonaci di gesso su pareti di calcestruzzo o con malte cementizie possono, in ambienti umidi, portare alla formazione di ettringite e, a bassa temperatura, anche di thaumasite.

2.Attacco atmosferico su pietre e malte

L'umidità può consentire l'attacco da parte degli inquinanti atmosferici che, sciogliendosi in acqua tendono a formare soluzioni acide. Un caso frequente è prodotto dall'acqua sulle pietre, soprattutto di natura calcarea, e sugli intonaci. L'acqua della pioggia, sciogliendo gli inquinanti presenti nell'atmosfera assume un pH acido (in genere fra 6 e 6.5) che può portare alla trasformazione dei composti che costituiscono questi materiali in altri di maggiore solubilità. Ad esempio, nel caso del carbonato di calcio che costituisce le rocce calcaree o le malte di calce, i gas presenti nell'atmosfera possono determinare le seguenti trasformazioni (scritte in forma semplificata):



In tutti i casi si formano composti di elevata solubilità (che possono essere facilmente dilavati dall'acqua stessa) oppure di scarsa coesione (che possono essere allontanati dall'azione dell'acqua o del vento).

Il gesso prodotto dalla reazione, nei periodi di asciugamento può precipitare sulla superficie e inglobare le particelle sottili presenti nell'atmosfera, in particolare le particelle di natura carboniosa prodotte dai processi di combustione. In questo caso si formano delle patine scure di spessore e porosità variabile, comunemente chiamate croste nere. Nelle zone interessate dall'azione dilavante della pioggia queste patine sono rimosse e appare il colore originale della pietra, rendendo ancora più evidente la presenza della patina nelle zone più riparate. Le croste nere si producono sulla superficie della pietra e sotto si trova la pietra originale con delle cavità; le croste non aderiscono al substrato e quindi non sono protettive, ma semplicemente nascondono il degrado che può continuare al di sotto. Le pietre di natura silicea hanno un'elevata resistenza agli agenti atmosferici; tuttavia, in alcuni casi possono subire l'attacco di soluzioni acide, ad esempio:



I mattoni, in genere, non vengono aggrediti in modo significativo dagli agenti atmosferici, in quanto sono costituiti prevalentemente da quarzo, oltre che da silicati che presentano una discreta resistenza anche in condizioni debolmente acide.

Azioni fisiche

L'umidità può degradare una muratura anche in assenza di reazioni chimiche. Ad esempio, l'assorbimento di acqua in un materiale poroso in genere provoca un'espansione che può portare a degrado nella zona superficiale, soprattutto se la muratura subisce cicli di asciutto-bagnato. Anche le variazioni di temperatura possono generare tensioni interne che possono portare alla fessurazione degli intonaci o delle murature. L'azione fisica più frequente e pericolosa, però, è legata a fenomeni di cristallizzazione. La formazione di cristalli all'interno dei pori, infatti, può produrre tensioni molto elevate, in seguito alle quali si possono generare fessurazioni, distacchi di frammenti oppure la disgregazione dei materiali delle murature.

1. Cristallizzazione dei sali solubili

Un fenomeno importante è la cristallizzazione dei sali disciolti nell'acqua. I sali possono essere introdotti nella muratura dall'acqua stessa, ad esempio se questa risale dal terreno, essere contenuti nei materiali da costruzione, ad esempio, i solfati sono spesso presenti nei laterizi o derivano dai prodotti a base di gesso, formarsi per reazione con gli inquinanti atmosferici oppure essere creati da attività metaboliche di microorganismi. I sali più diffusi nelle murature sono i carbonati, i solfati, i cloruri e i nitrati. In alcuni casi, dei sali possono essere introdotti nella muratura anche in seguito a restauri o operazioni di pulizia errate. Lungo il suo percorso di risalita, l'acqua trasporta questi sali e li deposita sotto forma di efflorescenze sulla superficie da cui evapora. Nel caso in cui l'evaporazione dell'acqua sia veloce, può avvenire ancora prima di raggiungere la superficie esterna. Il deposito dei sali trascinati dall'acqua liquida può quindi avvenire all'interno della muratura provocando la formazione di cristalli nelle zone di passaggio dalla zona umida a quella asciutta. Si ha così la formazione di subflorescenze nella muratura. La cristallizzazione dei sali nei pori può esercitare delle pressioni molto elevate che superano la resistenza a trazione dei laterizi e delle malte.

Le condizioni di cristallizzazione e il conseguente degrado dipendono da un numero molto elevato di parametri legati al materiale poroso, ai sali presenti e alle condizioni ambientali. Il raggiungimento delle condizioni di sovrassaturazione, ad esempio, è funzione del tipo di sale, della velocità di evaporazione dell'acqua e di quella di apporto della soluzione. La pressione che si instaura all'interno dei pori dipende anche dalle loro dimensioni. Se una soluzione salina è a contatto con l'atmosfera, il sale precipita formando dei cristalli quando l'umidità relativa scende al di sotto di un valore di equilibrio che dipende dalla natura del sale e dalla temperatura. La cristallizzazione dei sali può quindi ripetersi ciclicamente nel tempo se variano le condizioni di umidità. La formazione dei cristalli non è di per sé sufficiente per giustificare l'azione distruttiva dei sali, ma è necessario che si formi una pressione tra il cristallo e la superficie del poro che lo vincola. A tale scopo è necessario che ci sia un velo liquido della soluzione soprassatura, altrimenti il cristallo viene a contatto diretto con la superficie del poro e

interrompe la sua crescita. In genere, l'azione repulsiva tra la superficie del cristallo e quella del poro è sufficiente per trattener un film liquido dello spessore di alcuni nm. L'accrescimento del cristallo in queste condizioni confinate esercita una pressione sul liquido che dipende dalla velocità di accrescimento del cristallo. Quando il cristallo, è circondato dalla soluzione, la forza esercitata sui pori del suo raggio di curvatura; in queste condizioni si raggiungono sforzi significativi (dell'ordine dei MPa) solo nei pori di dimensione dell'ordine dei nm. La maggiore pressione si genera quando un cristallo di grandi dimensioni è costretto ad accrescersi in un poro di piccole dimensioni. Se il film liquido che circonda il cristallo viene interrotto durante l'asciugamento, la soluzione resta intrappolata tra la superficie del poro e del cristallo. Poiché la solubilità del sale aumenta all'aumentare della pressione esercitata dal cristallo in crescita, si possono raggiungere condizioni in cui il sale non può più cristallizzare. La soluzione soprassatura, in questo caso, può esercitare una pressione elevata anche sui pori di dimensioni maggiori. E' possibile dimostrare che si possono raggiungere pressioni dell'ordine delle decine di MPa. La morfologia dei cristalli dipende dalle condizioni in cui si formano. Quando vengono prodotti all'interno di un velo liquido tendono ad assumere forme colonnari o aghiformi, in quanto gli ioni vengono aggiunti solo alla base del cristallo che si accresce dalla superficie. I cristalli colonnari, quando si accrescono tra le pareti di un fessura possono esercitare delle forze che determinano l'ulteriore avanzamento della fessura.

2. Gelo disgelo

Anche la cristallizzazione dell'acqua, ovvero il suo congelamento, può produrre effetti analoghi a quelli della cristallizzazione dei Sali. L'alternanza di cicli gelo-disgelo può quindi produrre una progressiva fessurazione e, successivamente, la disgregazione delle malte, dei laterizi e delle pietre. Il fenomeno, legato al maggiore volume specifico del ghiaccio rispetto all'acqua liquida, avviene con meccanismi analoghi a quelli del calcestruzzo; per altro i vari materiali che costituiscono la muratura possono avere diversa struttura porosa e quindi un comportamento diverso al gelo-disgelo. Poiché il degrado può avvenire solo al di

sopra di un certo grado di saturazione dei pori, gli effetti del gelo-disgelo sono maggiori nei pori che tendono a saturarsi d'acqua e quindi nei pori con raggio di dimensioni dell'ordine di grandezza del μm che sono più suscettibili all'assorbimento capillare. Nei pori di dimensioni minori, oltre ad essere più lento l'apporto d'acqua il congelamento avviene a temperature inferiori. I pori di maggiore dimensione, invece, tendono a trattenere meno acqua ed, inoltre, anche se l'acqua congela al loro interno le loro dimensioni sono tali da limitare gli sforzi indotti sul materiale. Come per le strutture in cls, il degrado da gelo-disgelo nelle murature inizia dalla superficie, in quanto le zone più interne si raffreddano solo in un secondo tempo e, quindi, si raggiungono più difficilmente le temperature necessarie per il congelamento dell'acqua all'interno dei pori; la presenza di sali solubili tende a ridurre ulteriormente la temperatura di congelamento.

Alterazioni biologiche

Sulle superfici umide degli intonaci e delle pietre si possono insediare degli agenti biologici. In genere si assiste alla formazione di alghe, funghi o licheni. Le alghe, a differenza dei funghi, sono organismi in grado di sfruttare le fotosintesi per convertire in nutrimento le sostanze inorganiche. Si sviluppano in ambiente umido, in zone non esposte al sole, e formano una patina sulla superficie del materiale, che inizialmente ha una colorazione verdastra e poi tende progressivamente al bruno e al nero. Sebbene alterino l'aspetto estetico del paramento, le alghe in genere non provocano un'azione disgregante dell'intonaco. I licheni derivano da un'azione combinata delle alghe con i funghi (le prime forniscono il nutrimento per i secondi) e sono in grado di sopravvivere anche in condizioni asciutte. I licheni possono attaccare gli strati più superficiali dei materiali da costruzione, per una profondità di diversi mm, a causa delle soluzioni acide prodotte dal loro metabolismo, alla quale si aggiunge l'azione meccanica dovuta al loro accrescimento. Meno pericolosi dei licheni sono i muschi che si sviluppano su depositi terrosi prodotti sulla superficie dei materiali, senza interagire significativamente con questi ultimi e quindi possono essere facilmente asportati senza danneggiare il materiale; peraltro la presenza di muschio è indice

di condizioni di elevata umidità. Una particolare manifestazione biologica sono le muffe che si creano, in genere, su pareti umide all'interno di locali poco areati, alterando l'aspetto estetico delle pareti e creando problemi igienici. Anche il degrado prodotto dall'accrescimento delle piante e dalle loro radici può essere fatto rientrare tra il degrado biologico. In questo caso comunque l'azione è di tipo meccanico.

Corrosione degli inserti metallici

Spesso nelle murature sono inseriti degli elementi metallici di rinforzo (chiavi, catene, perni, ecc.) oppure altri componenti metallici (ad esempio, tubazioni). I metalli inglobati nelle murature umide sono a contatto con la soluzione liquida presente nei loro pori e, di conseguenza, possono corrodarsi.

2. PROVA DI RISALITA SU MATTONI

Sono qui descritte due prove di assorbimento su due coppie di laterizi svolte presso il laboratorio LISG del DICAM.

Per le prove di assorbimento capillare si fa riferimento alle norme:

- UNI 1925 2000 :“Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità”,
- UNI 1015 2004 :”Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità della malta indurita”
- UNI 13755 2008 :”Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure”
- UNI 15801 2010-10-18 :“Conservation of cultural property - Test methods – Determination of water absorption by capillarity”,

Le suddette norme non sono state seguite in ogni loro dettaglio, ma sono state utili per quanto riguarda le modalità di svolgimento dell’esperimento come ad esempio l’indicazione di mantenere il livello di acqua o salamoia costanti durante la prova oppure quella di disegnare una linea graduata sui quattro lati del campione.

I mattoni pieni utilizzati sono di tipo ISO di dimensioni 12×25×5,5 cm e ognuno di essi è stato pesato prima dell’utilizzo. Sono stati scelti 4 mattoni apparentemente in buone condizioni, ma durante l’allestimento dell’esperimento ci si è accorti della presenza di alcune piccole fessure che comunque non hanno inficiato il risultato della prova.

La prova sulla prima coppia è stata seguita in un ambiente con temperatura e umidità non controllate (ma costantemente monitorate attraverso termoigrometro) in data 5/10/2010.

La prova sulla seconda coppia è stata invece eseguita in camera climatica in data 7/10/2010.

Tabella 2.1: Data e orario d'inizio prove

	Data	Ora inizio	Ora fine
Prova in ambiente non controllato	5/10/2010	15:15	17:45 (matt.0)
			19:00 (matt.1)
Prova in camera climatica	7/10/2010	13:10	14:40 (matt.0)
			16:40 (matt.1)

Obiettivi

Si vogliono confrontare i tempi di risalita capillare in un mattone a contatto con acqua ed un mattone a contatto con una soluzione salina satura.

Ci si aspetta che l'acqua abbia una velocità di risalita più elevata.

Preparazione della prova di risalita

Materiali utilizzati nella prova

- Vaschette: utilizzate per collocare ciascun mattone e contenere l'acqua o la soluzione salina
- Bambagia: posta sotto il mattone già imbibita in uno strato di spessore omogeneo, garantisce un assorbimento costante e omogeneo
- Bottiglia da 1,5 l contenente acqua
- Bottiglia da 1,5 l contenente salamoia (soluzione satura di solfato di sodio), preparata interpolando i valori della tabella (2.2) che mette in relazione temperatura della salamoia e grammi di solfato di sodio (in 100 g di soluzione) che consentono di ottenere una soluzione satura. La temperatura media dell'aria del primo ambiente di prova è di 24 °C, quindi con una proporzione è stato possibile calcolare i grammi di solfato di sodio da sciogliere in 1,5 l d'acqua: $(24g \div 80g = x \div 1500g) \rightarrow 450g$ dove 24 sono i grammi di Na₂SO₄ che portano a saturazione 100g di soluzione ad una temperatura di 24 °C.

Tabella 2.2: Solubilità del solfato sodico in acqua a diverse temperature

Temp.salamoia °C	g di Na ₂ SO ₄ in 100 g di soluzione
0°	4,5
10°	8,25
20°	16,1
30°	28,9
32,4°	32,2
40°	32,5
50°	31,8
100°	29,8

- Sostegno per bottiglia (utilizzato solo per la prova svolta in camera climatica): tiene la bottiglia con la soluzione con il collo verso il basso a contatto con il liquido contenuto nella bacinella per mantenere costante il livello d'acqua nella vaschetta.

Tracciatura dei mattoni

Sulle 4 facce dei mattoni con un pennarello indelebile è stata disegnata in mezz'ora una scala graduate di 0,5 cm per leggere rapidamente le altezze di risalita capillare del mattone e permettere anche dalle foto scattate ad intervalli regolari durante tutto il corso della prova di avere un riscontro visivo immediato sulle altezze. I lati dei mattoni sono stati classificati con la dicitura A,B,C,D in senso antiorario iniziando dal lato lungo non rugoso ed è stato applicato un post-it per identificarli.

Caratteristiche dei mattoni

I mattoni sono di tipo pieno di dimensioni 12×25×5,5 cm ed hanno le seguenti caratteristiche:

1. peso specifico: 17750 Kg/m³ (da scheda tecnica)

2. Prova di risalita capillare su mattoni

2. modulo elastico: 3840 N/mm^2 (da letteratura, non verificato sperimentalmente)
3. coefficiente di Poisson: 0.2 (da letteratura, non verificato sperimentalmente)
4. fattore di resistenza alla diffusione del vapor d'acqua: 8 (da scheda tecnica)
5. resistenza a compressione: $58,3 \text{ N/mm}^2$ (da prove sperimentali)

I mattoni sono stati pesati prima e dopo le prove (Tab. 2.3).

Tabella 2.3: Misura dell'acqua trattenuta e sua percentuale.

	Ambiente	T_{air} media (°C)	RH_{air} media (%)	Mattoncino	Peso iniziale (g)	Peso finale (g)	Peso trattenuto (g)	% soluz.
1°	Non climatizzato	24,5	62,5	0	2850	3333,7	483,7	17
				1	2850	3390,4	540,4	19
2°	Camera climatica	20	63	0	2862,5	3297,5	435	15
				1	2851,4	3349,6	498,2	17,5

Svolgimento della 1° prova (ambiente non controllato)



Fig.2.1: Prova 1: Fase di aggiunta di H₂O e salamoia nella vaschetta

2. Prova di risalita capillare su mattoni

In un ambiente con $T_{\text{air}} \approx 24,5^{\circ}\text{C}$ e $RH_{\text{air}} \approx 62,5\%$ i 2 mattoni sono stati catalogati come mattone (0) e mattone (1) e collocati in due distinte vaschette. Il mattone (0) è stato posto in una vaschetta contenente bambagia imbevuta d'acqua, invece il mattone (1) in un'altra vaschetta con bambagia imbevuta della stessa quantità di soluzione satura di solfato di sodio. Questa operazione è avvenuta nello stesso istante per i due provini.

A intervalli di tempo regolari si eseguivano queste operazioni:

- i mattoni venivano fotografati su tutti e quattro i lati,
- i valori di risalita sui quattro lati venivano riportati in una tabella,
- si misuravano temperatura e umidità dell'aria con il termoigrometro digitale manuale e la temperatura superficiale dei provini,
- con un termoigrometro analogico si monitorava in continuo la temperatura e l'umidità dell'aria.

Quando la bambagia iniziava ad asciugarsi veniva aggiunta acqua o soluzione con un bicchiere e precisamente questa operazione è stata fatta a:

- 25 min e 105 min dall'inizio della prova per il mattone (0),
- 25 min, 105 min e 165 min (1/2 bicchiere) dall'inizio della prova per il mattone (1).

La prova si è conclusa quando la superficie di tutte le facce del mattone, inclusa quella superiore, sono risultate totalmente bagnate. Ciò è avvenuto per il mattone (0) dopo 2h 30', per il mattone (1) dopo 3h 45' (Tabella 2.4).

Tabella 2.4: Differenza di tempo di assorbimento tra i 2 mattoni nella 1° prova e sua percentuale

Prova	Mattone	Ora inizio prova	Ora fine prova	Durata prova (min)	Differenza di tempo	Differenza %
1	0	15:15	17:45	150	75	34
	1	15:15	19:00	225		

2. Prova di risalita capillare su mattoni

Durante lo svolgimento dell'esperimento si è notato che la risalita non è stata uniforme sulle facce e che dopo le prime fasi dell'esperimento, l'evaporazione superficiale ha lasciato depositi salini sul mattone (1).

Al termine della prova si è provveduto a pesare tutti i componenti impiegati per determinare la quantità d'acqua o di soluzione salina assorbita da ciascun mattone, a meno dell'evaporazione avvenuta.

Di seguito sono riportate una serie di foto che illustrano le fasi di avanzamento della 1° prova.



Fig.2.2: Prova 1: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio dopo 5 min dall'inizio dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.

2. Prova di risalita capillare su mattoni



Fig.2.3: Prova 1: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio dopo 1h 30' dall'inizio dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.



Fig.2.4: Prova 1: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio al termine dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.

2. Prova di risalita capillare su mattoni



Fig.2.5: Prova 1: Risalita capillare nella sommità del laterizio al termine dell'esperimento per il mattone (0) a destra e per il mattone (1) a sinistra.

Risultati della 1° prova di risalita

Tabella 2.6: Prova 1, mattone (0): valori di risalita, temperatura e umidità

Tempo (min)	Lato A (mm)	Lato B (mm)	Lato C (mm)	Lato D (mm)	Media (mm)	Str. manuale digitale		Str. manuale analogico		T _{cont} (°C)	
						T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	Brick	H2O
0	0	0	0	0	0	24,4	65,1	24,3	58	25,4	24,9
5	0	14	10	0	6						
10	0	17	10	0	6,75						
15	0	20	10	0	7,5						
25	0	25	15	10	12,5						
30	0	26	17	14	14,25	24,7	60,8	24,3	58	25,2	25,6
45	0	35	20	22	19,25						
60	8	40	22	28	24,5			24	58		
75	14	44	25	33	29	24,6	64,9			25	25,7
90	20	45	30	40	33,75			24,3	59		
105	30	50	35	44	39,75						
120	35	55	40	50	45			24	58		
135	43	55	50	55	50,75					24,8	24,7
150	55	55	55	55	55			24	58		

2. Prova di risalita capillare su mattoni

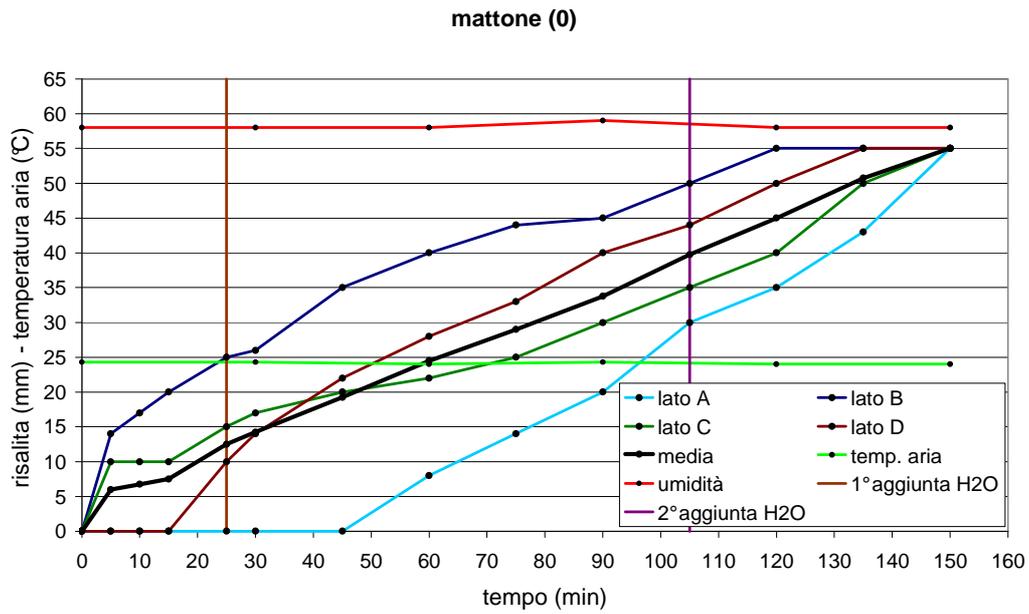


Fig. 2.11: Prova 1,matrone (0):Risalita capillare dell'acqua

Tabella 2.7: Prova 1,matrone (1): valori di risalita, temperatura e umidità

Tempo (min)	Lato A (mm)	Lato B (mm)	Lato C (mm)	Lato D (mm)	Media (mm)	Str.manuale digitale		Str.manuale analogico		T _{cont} (°C)	
						T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	Brick	Sal.
0	0	0	0	0	0	24,4	65,1	24,3	58		26,4
5	0	10	14	0	6						25
15	5	11	15	0	7,75	24,8	58,8				25
25	8	15	17	10	12,5						
30	12	15	20	11	14,5			24,3	58	25,1	27,2
45	17	22	25	20	21						
60	20	25	29	22	24			24	58		
75	21	29	32	24	26,5	24,6	64,9			25	25,1
90	22	30	33	25	27,5			24,3	59		
105	25	34	34	30	30,75						
120	30	36	40	35	35,25			24	58		
135	34	41	45	37	39,25					24,8	24,5
150	36	44	48	40	42			24	58		
165	37	46	50	42	43,75						
180	40	50	50	45	46,25			23,5	59		
195	42	52	55	47	49						
210	45	55	55	50	51,25			23,5	58		
225	47	55	55	55	53						
240	55	55	55	55	55			23,2	57		

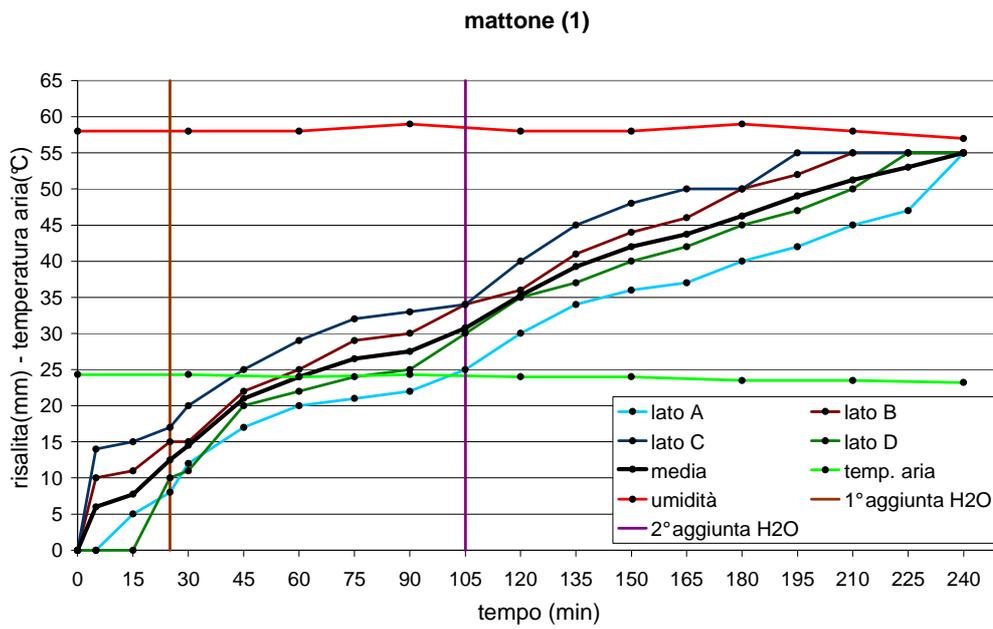


Fig. 2.12: Prova 1, mattono (1): Risalita capillare della salamoia

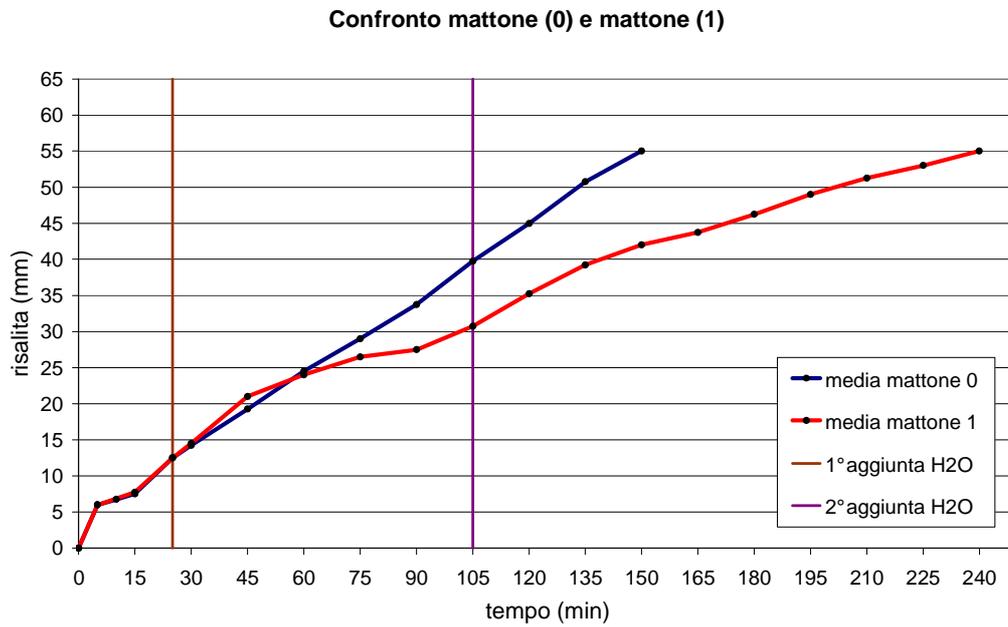


Fig. 2.13: Prova 1: Confronto dei valori di risalita media dell'acqua e della salamoia

Svolgimento della 2° prova (camera climatica)



Fig. 2.6: Prova 2: Fase di misura della temperatura di contatto del mattone (1)

La seconda prova è stata svolta con modalità simili alla prima prova ma in camera climatica e con la differenza che l'acqua e la soluzione non sono state aggiunte con dei bicchieri.

Il livello dell'acqua o della soluzione nella vaschetta è stato mantenuto costante tramite una bottiglia capovolta retta da un sostegno.

La prova si è conclusa quando la superficie di tutte le facce del mattone, inclusa quella superiore, sono risultate totalmente bagnate.

Ciò è avvenuto per il mattone (0) dopo 1h 30', per il mattone (1) dopo 3h 30'.

Tabella 2.5: Differenza di tempo di assorbimento tra i 2 mattoni nella 2° prova e sua percentuale

Prova	Mattone	Ora inizio prova	Ora fine prova	Durata prova(min)	Differenza di tempo	Differenza %
2	0	13:10	14:40	90	120	57
	1	13:10	16:40	210		

2. Prova di risalita capillare su mattoni

Durante lo svolgimento dell'esperimento si è notato che la risalita non è stata uniforme sulle facce e che dopo le prime fasi dell'esperimento, l'evaporazione superficiale ha lasciato depositi salini sul mattone.

Di seguito sono riportate una serie di foto che illustrano le fasi di avanzamento della 2° prova.

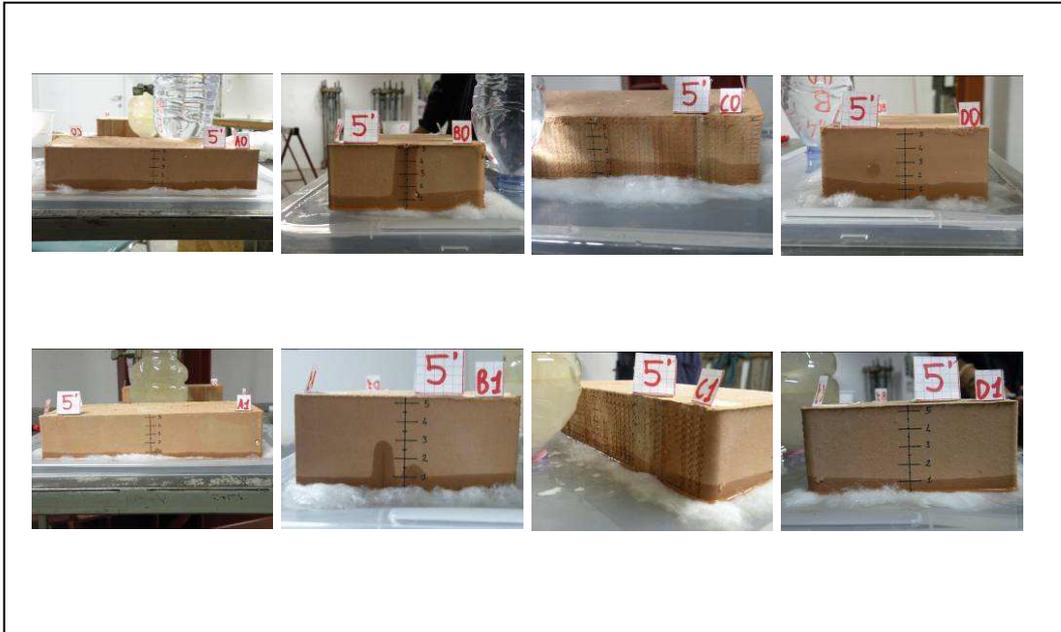


Fig. 2.7: Prova 2: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio dopo 5 min dall'inizio dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.

2. Prova di risalita capillare su mattoni



Fig. 2.8: Prova 2: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio dopo 1h dall'inizio dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.



Fig. 2.9: Prova 2: Risalita capillare sulle 4 facce del laterizio al termine dell'esperimento per il mattone (0) sopra e per il mattone (1) sotto.

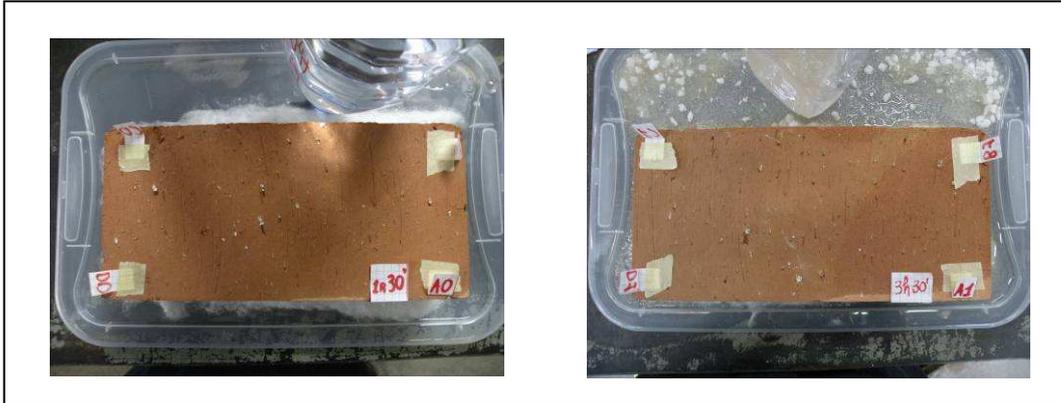


Fig. 2.10: Prova 2: Risalita capillare nella sommità del laterizio al termine dell'esperimento per il mattone (0) a destra e per il mattone (1) a sinistra.

Risultati della 2° prova di risalita

Tabella 2.8: Prova 2, mattone (0): valori di risalita, temperatura e umidità

Tempo (min)	Lato A (mm)	Lato B (mm)	Lato C (mm)	Lato D (mm)	Media (mm)	Str.manuale digitale		Str.fisso digitale		T _{cont} (°C)
						T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	Brick
0	0	0	0	0	0	16,7	60,1	20	63	
5	14	15	20	15	16			20	63	
15	19	29	29	20	24,25			20	63	
30	25	38	39	30	33			20	63	
60	35	55	50	40	45			20	63	21,3
90	55	55	55	55	55			20	63	21,3

2. Prova di risalita capillare su mattoni

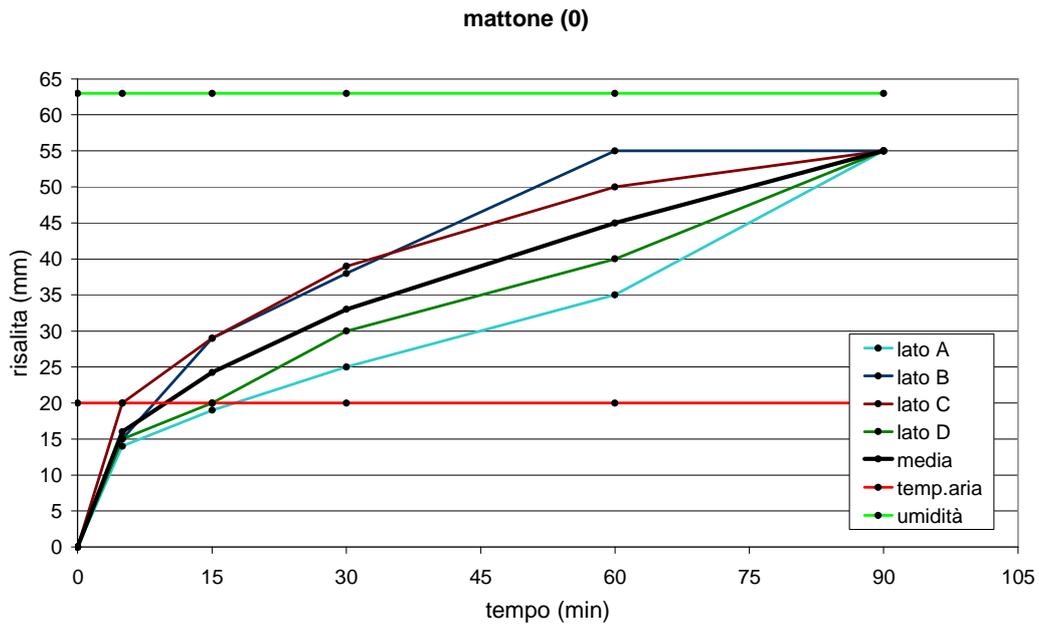


Fig. 2.14: Prova 2, mattonne (0): Risalita capillare dell'acqua

Tabella 2.9: Prova 2, mattonne (1): valori di risalita, temperatura e umidità

Tempo (min)	Lato A (mm)	Lato B (mm)	Lato C (mm)	Lato D (mm)	Media (mm)	Str. manuale digitale		Str. fisso digitale		T _{cont} (°C)
						T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	T _{air} (°C)	RH _{air} (%)	Brick
0	0	0	0	0	0	19,7	60,1	20	63	
5	10	15	15	10	12,5			20	63	
15	14	20	20	15	17,25			20	63	
30	19	25	26	20	22,5			20	63	
60	25	32	35	27	29,75			20	63	20,9
90	32	42	44	35	38,25			20	63	
120	37	47	50	40	43,5			20	63	
150	42	55	55	46	49,5			20	63	
180	47	55	55	55	53			20	63	22,6
210	55	55	55	55	55			20	63	

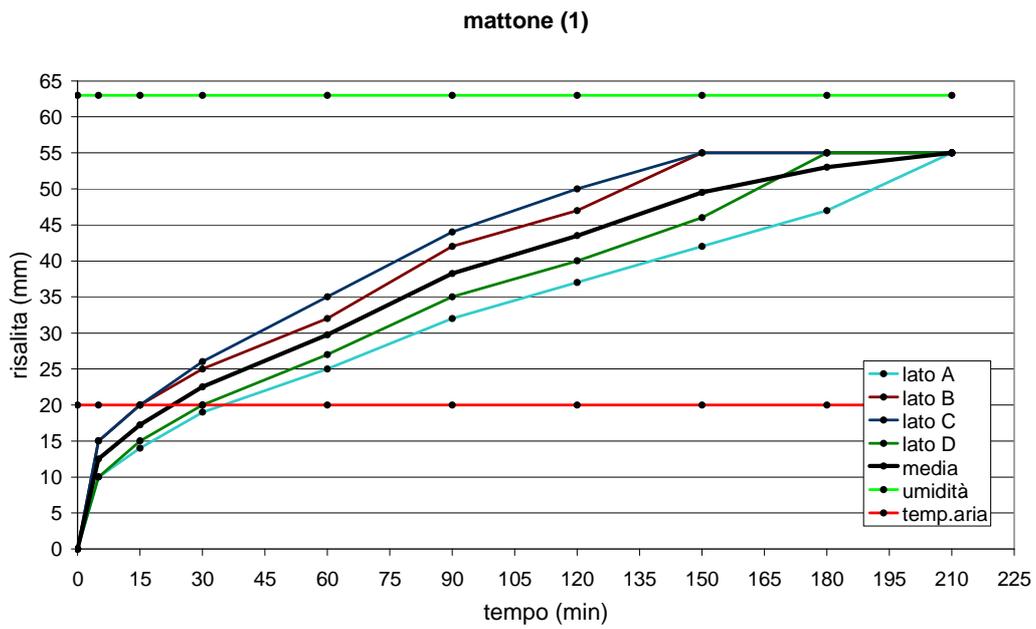


Fig. 2.15: Prova 2, mattono (1): Risalita capillare della salamoia

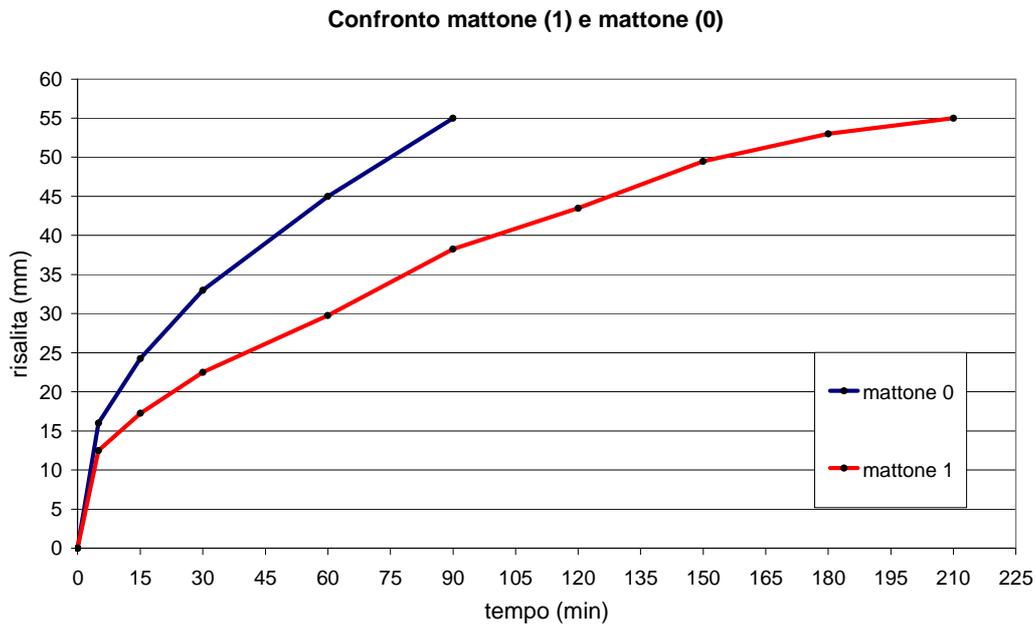


Fig. 2.16: Prova 2: Confronto dei valori di risalita media dell'acqua e della salamoia

Osservazioni

Come ci si aspettava nei mattoni a contatto con acqua la risalita media è avvenuta in tempi più brevi. Nei primi minuti di prova la risalita media dei mattoni a contatto con acqua o salamoia ha più o meno lo stesso andamento, poi la risalita nei mattoni a contatto con acqua diventa più rapida. Confrontando le curve di risalita media della prima e della seconda prova si nota che quelle relative alla prova 1 (Fig. 2.13) hanno un andamento irregolare, mentre quelle relative alla prova 2 (Fig. 2.16) hanno un andamento più dolce e graduale. Il differente andamento delle curve dipende dal fatto che per la seconda prova si è utilizzato il sistema delle bottiglie capovolte per rendere costante il livello del liquido nella vaschetta. Nei mattoni a contatto con salamoia la risalita è stata più graduale e si è notato il progressivo formarsi di cristalli di sale sulla superficie del mattone (Fig. 2.17). Anche la salamoia nelle vaschette ha cristallizzato, soprattutto nella vaschetta del mattone (1) della prova 2, formando dei grani di sale di notevole dimensione (Fig. 2.18).

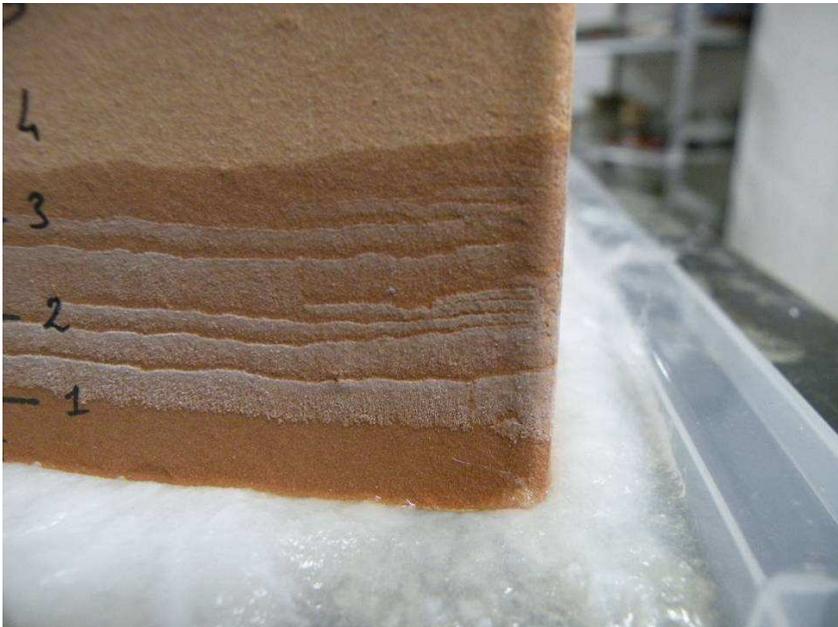


Fig. 2.17: Prova 2, mattone (1):Formazione di cristalli di sale stratificati nel mattone



Fig. 2.18: Prova 2, mattone (1):Formazione di cristalli di sale nella vaschetta

3. PROVA DI RISALITA DI SALI SU TRIPLETTA MURARIA

E' qui descritta una prova di risalita capillare di salamoia su una tripletta muraria, cioè una colonna formata da tre laterizi legati da malta. La prova è stata svolta presso il laboratorio LISG del DICAM tra l'8 e il 15 ottobre 2010.

Per le prove di risalita capillare si fa riferimento alle norme:

- UNI 1925 2000: "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità",
- UNI 1015 2004: "Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità della malta indurita",
- UNI 13755 2008: "Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure",
- UNI 15801 2010-10-18: "Conservation of cultural property - Test methods – Determination of water absorption by capillarity".

Le suddette norme non sono state seguite in ogni loro dettaglio, ma sono state utili per quanto riguarda le modalità di svolgimento dell'esperimento come ad esempio l'indicazione di mantenere il livello di acqua o salamoia costanti durante la prova oppure quella di disegnare una linea graduata sui quattro lati del campione. Nella tripletta sono stati installati dei sensori che controllano temperatura e potenziale elettrico. La prova è stata eseguita in un ambiente con temperatura e umidità non controllate ma costantemente monitorate attraverso termo igrometro.

Obiettivi

Si vogliono confrontare i dati acquisiti dall'ispezione visuale e dai rilievi manuali con i dati registrati dai sensori per capire in che modo e con che tempi i sensori reagiscono al contatto con la soluzione salina che risale all'interno della tripletta.

Preparazione della prova di risalita

Materiali utilizzati nella prova

- Vaschetta: utilizzata per collocare la tripletta e contenere la soluzione salina,
- bambagia: posta sotto il mattone, già imbibita, in uno strato di spessore omogeneo, garantisce un assorbimento costante e omogeneo,
- telo in nylon: posto sopra al provino e alla vaschetta impedisce l'evaporazione della soluzione (Fig. 3.1),
- bottiglia da 1,5 l contenente salamoia di cloruro di sodio allo 0,1% in peso,
- sostegno per bottiglia: tiene la bottiglia con la soluzione con il collo verso il basso a contatto con il liquido contenuto nella vaschetta per mantenere costante il livello di soluzione (Fig. 3.2),
- otto sensori collegati a 2 nodi (Fig. 3.3) che trasmettono le informazioni tramite wireless al computer.



Fig. 3.1: Tripletta coperta con il telo di nylon.



Fig. 3.2: Bottiglia aperta capovolta per mantenere il livello d'acqua costante.



Fig. 3.3: Nodi ai quali sono collegati i sensori.

Caratteristiche dei mattoni e della malta

I mattoni pieni utilizzati sono di tipo ISO di dimensioni 12×25×5,5 cm, mentre la malta utilizzata è malta di calce idraulica naturale. Le caratteristiche dei mattoni sono già state presentate nel Cap. 2.

Le caratteristiche della malta sono:

1. granulometria (UNI EN 1015-1): da 0 a 4 mm (da scheda tecnica)
2. acqua d'impasto: ca. 0.16 l/Kg (da scheda tecnica)
3. peso specifico (UNI EN 1015-1): 1800 Kg/m³ (da scheda tecnica)
4. modulo elastico: 981 N/mm² (da letteratura, non verificato sperimentalmente)
5. coefficiente di Poisson: 0.2 (da letteratura, non verificato sperimentalmente)
6. resistenza a compressione (UNI EN 1015-1): Classe CS III (3.5 – 7.5 N/mm²) (da scheda tecnica) ; 3,7 N/ mm² (da prove sperimentali)
7. fattore di resistenza alla diffusione del vapor d'acqua (UNI 9233): 12 (da scheda tecnica)

Descrizione e strumentazione della tripletta

Sono stati utilizzati tre mattoni in buone condizioni e sono stati uniti tramite allettamenti di malta.

Dopo la maturazione del provino sono stati effettuati col trapano dei fori di diametro 6 mm per inserire i sensori e precisamente 2 sensori di temperatura e 6 sensori di potenziale (Fig. 3.4).

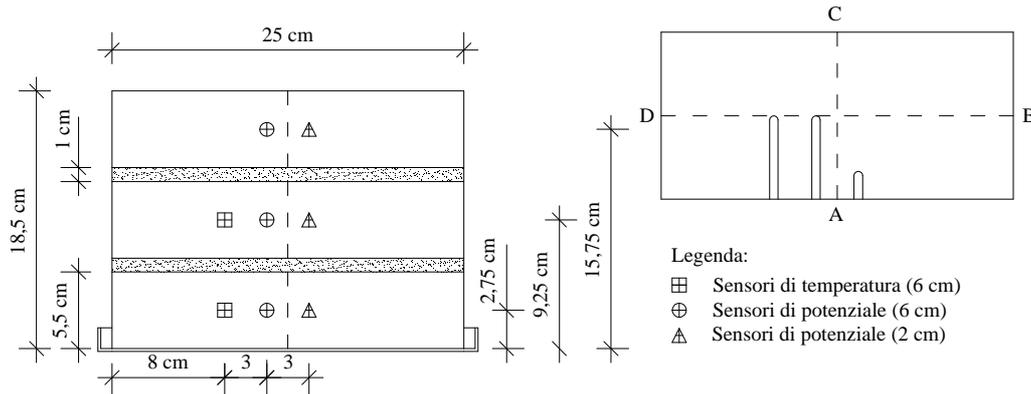


Fig. 3.4: Vista frontale del provino con posizione dei sensori.

Sensori di potenziale e temperatura

Inseriti nei fori, i sensori sono stati sigillati con colla a caldo. La colla a caldo, oltre alla funzione di fissaggio dei sensori, ha lo scopo di evitare lo scambio d'aria tra l'esterno e l'interno del mattone. In caso entrasse dell'aria esterna nel foro sede del sensore, si potrebbe alterare il valore captato dallo stesso; la colla a caldo garantisce un adeguato isolamento. I sensori sono stati collegati a 2 nodi che raccolgono le informazioni e le inviano al computer tramite una connessione wireless. I dati raccolti dal computer vengono inviati attraverso Internet in automatico ad un server dell'Università di Stoccarda, dove vengono rielaborati e resi disponibili come risorsa in rete.

I sensori di potenziale sono stati inseriti a due diverse profondità (2 e 6 cm) per consentire un monitoraggio superficiale ed uno profondo. I sensori di temperatura sono stati posti a 6 cm di profondità. I numeri identificativi dei sensori utilizzati nella prova non sono gli stessi dei canali con cui vengono registrati i dati (Tab. 3.1).

Tabella 3.1: Numerazione dei sensori e dei canali di acquisizione nella prova su tripletta.

Tipo di sensore	Posizione (cm)		Numero identificativo	Numero corrispondente nel grafico
	Altezza	Profondità		
temperatura	2.75	6	4	C1
temperatura	9.25	6	5	C2
potenziale	2.75	6	18	1
potenziale	2.75	2	19	2
potenziale	9.25	6	20	3
potenziale	9.25	2	21	4
potenziale	15.75	6	22	5
potenziale	15.75	2	23	6

I sensori di potenziale 4,5,18,19,20,21 sono stati collegati alle ore 10:00 del 08/10/2010, invece i sensori 22 e 23, che si trovano ad una quota più alta, alle ore 11:30 dello stesso giorno.

Tracciatura della tripletta

Sulla mezzeria verticale del fronte della tripletta è stata disegnata con un pennarello indelebile una scala in cm per leggere rapidamente le altezze di risalita capillare e permettere anche dalle foto scattate ad intervalli regolari durante la prova di avere un riscontro visivo immediato di tale altezza. Le facce della tripletta sono state nominate con la dicitura A,B,C,D in senso antiorario iniziando dal lato lungo non rugoso.

Svolgimento della prova

In un ambiente con $T_{\text{air}} \approx 24,5^{\circ}\text{C}$ e $RH_{\text{air}} \approx 62,5\%$ la tripletta è stata collocata in una vaschetta con bambagia. La bambagia è stata imbevuta della soluzione di cloruro di sodio prima della posa della tripletta, successivamente è stata aperta la

bottiglia che, appoggiata capovolta, è servita a garantire un livello di soluzione costante nella vaschetta. A coprire la tripletta è stato messo un telo di nylon che chiuso attorno ai lati della vaschetta serviva per evitare un'eccessiva evaporazione della soluzione.

A intervalli di tempo regolari si eseguivano queste operazioni:

- la tripletta veniva fotografata su tutte e quattro le facce,
- venivano letti i valori di risalita tramite la scala graduata nel lato A e con l'ausilio di un metro negli altri lati e venivano riportati in una tabella (Tab. 3.3),
- si misuravano temperatura e umidità dell'aria con il termoigrometro digitale manuale (Tab. 3.4),
- con un termoigrometro analogico si monitorava in continuo la temperatura e l'umidità dell'aria (Tab. 3.4),
- si misurava temperatura superficiale dei mattoni e temperatura della soluzione tramite termoigrometro digitale (Tab. 3.5).

La prova si è conclusa quando la superficie di tutte le facce della tripletta, inclusa quella superiore, sono risultate totalmente bagnate. Ciò è avvenuto dopo 7 giorni e 1 ora dall'inizio della prova (Tab. 3.2).

Tabella 3.2: Durata della prova di risalita di salamoia su tripletta.

Provino	Inizio prova	Fine prova	Durata prova
Tripletta	08/10/2010 ore 10:00	15/10/2010 ore 11:00	7gg, 1h 169 h (10140 min)

Dati rilevati manualmente

Tabella 3.3: Valori di risalita nei 4 lati della tripletta e loro media.

Tempo (min)	Lato A (mm)	Lato B (mm)	Lato C (mm)	Lato D (mm)	Media (mm)
0	0	0	0	0	0
15	21	21	21	21	21
25	26	26	26	26	26

3. Prova di risalita su tripletta

30	30	30	30	30	30
45	35	30	35	38	34.5
60	40	30	35	40	36.25
75	45	30	35	50	40
90	47	45	47	50	47.25
105	52	45	52	52	50.25
130	58	45	53	58	53.5
150	64	50	57	65	59
165	65	55	65	65	62.5
195	67	56	67	67	64.25
210	68	57	67	67	64.75
240	70	60	70	72	68
255	70	70	70	73	70.75
4260	135	110	135	150	132.5
4320	137	120	137	154	137
4380	137	125	137	165	141
4440	140	125	137	165	141.75
4500	140	125	137	165	141.75
4560	140	125	137	165	141.75
4620	140	125	137	165	141.75
4680	140	125	137	165	141.75
5760	142	125	150	168	146.25
5820	142	125	150	168	146.25
5880	142	125	150	170	146.75
5940	142	125	150	170	146.75
6000	142	125	150	170	146.75
6060	142	125	150	170	146.75
6120	142	125	155	170	148
7140	145	140	155	172	153
7200	145	140	155	172	153
7260	146	140	155	172	153.25
7320	146	140	155	172	153.25
10020	155	175	185	170	171.25
10110	155	175	185	170	171.25

Tabella 3.4: Valori di temperatura e umidità dell'aria rilevati dal termoigrometro digitale manuale e da quello analogico.

Tempo (min)	T air (dig.) (C°)	RH (dig.) (%)	T air (anal.) (C°)	RH (anal.) (%)
0	22,6	60		
15			21,8	60,5
25				
30				

3. Prova di risalita su tripletta

45			21,9	61
60				
75			22	60,5
90				
105	22,8	55,6	21	62
120				
130			22,8	57
150				
165	24,1	54,6	23	57
180				
195			23,5	56
210				
240			23	56,5
255				
270			23	56,5
660			21,5	55
1020			21	55
1380			27	45
1740			22	47
2100			20	53
2820			21	55
3180			20,5	54
3540			20	56
3900			19,5	57
4260	19	51	23	52,5
4320	19	47,5	21	52
4380	20,8	49	20,5	52,5
4440	20,1	46,9	20,8	52,5
4500			20	54
4560	20,3	48,1	20,5	54
4620	20	49,2	20,5	54
4680	20,4	48,5	20	54
5760	19,9	52,8	23,5	52
5820	24,5	46,3	23,5	52
5880	25	43,4	23	52,5
5940	25,7	42,1	22,5	53
6000	22,1	52,3	22,5	53
6060	22,2	48,7	22	53,5
6120	22	49,9	21,5	54

3. Prova di risalita su tripletta

7140			20	58
7200			20,5	57
7260	19,8	56	20	58
7320			20	60
7680			20	59
8040			19,5	60
8400			21	60
8760			21	57
9120			20	58,5
9480			20	58,5
9840			20	57
10020			21	59
10110	20,5	52,2	20	55

Tabella 3.5: Temperature di contatto dei mattoni della tripletta e della soluzione valutate con il termoigrometro digitale manuale

Tempo (min)	T contatto mattone1 (°C)	T contatto mattone2 (°C)	T contatto mattone3 (°C)	T contatto soluzione (°C)
0				
15	23			
25				
30				
45				
60				
75				
90				
105	23.3	23.3	23.3	22.2
130				
150				
165	23.5	23.5	23.6	
195				
210				
240				
255				
4260	18.9	18.9	18.9	18.4
4320				
4380				
4440				
4500				
4560				
4620				

4680				
5760				
5820				
5880				
5940				
6000	21.4	21.4	21.5	21.5
6060				
6120				
7140				
7200				
7260	20.5	20.4	20.4	
7320				
10020				
10110				

Elaborazione dei dati

Durante lo svolgimento dell'esperimento si è notato che la risalita non è stata uniforme sulle facce e che nei giunti è stata più lenta rispetto ai mattoni. Nei giunti la risalita è stata più lenta perché la velocità di risalita capillare dipende dalla porosità del materiale: maggiore è il diametro dei fori, minore è la velocità di risalita. Il telo in nylon, se lasciato chiuso per molte ore, raccoglieva condensa al suo interno, sintomo di un'abbondante evaporazione, ma l'utilizzo della bottiglia capovolta è riuscito a garantire sempre un costante livello di liquido nella vaschetta. Le foto illustrano bene le fasi di avanzamento della prova (Fig. 3.5-3.10).



Fig. 3.5: Risalita capillare sulle 4 facce dopo 15 min dall'inizio dell'esperimento.

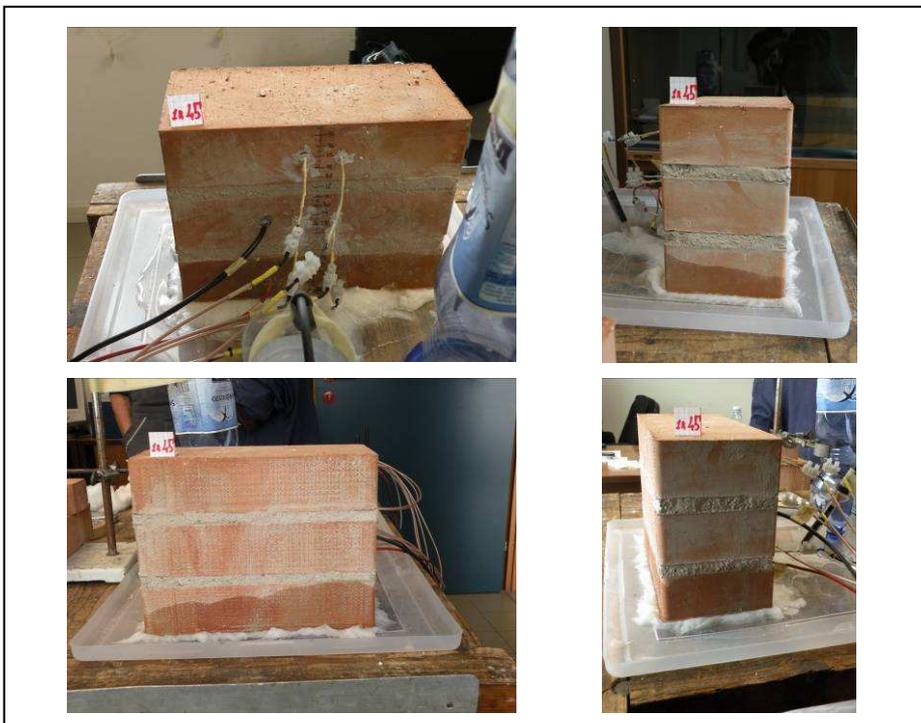


Fig. 3.6: Risalita capillare sulle 4 facce dopo 1h 45' dall'inizio dell'esperimento.



Fig. 3.7: Risalita capillare sulle 4 facce dopo 100h dall'inizio dell'esperimento.



Fig. 3.8: Risalita capillare sulle 4 facce dopo 122h dall'inizio dell'esperimento.



Fig. 3.9: Risalita capillare sulle 4 facce dopo 167h dall'inizio dell'esperimento.



Fig. 3.10: Faccia superiore dopo 167 h dall'inizio dell'esperimento.

3. Prova di risalita su tripletta

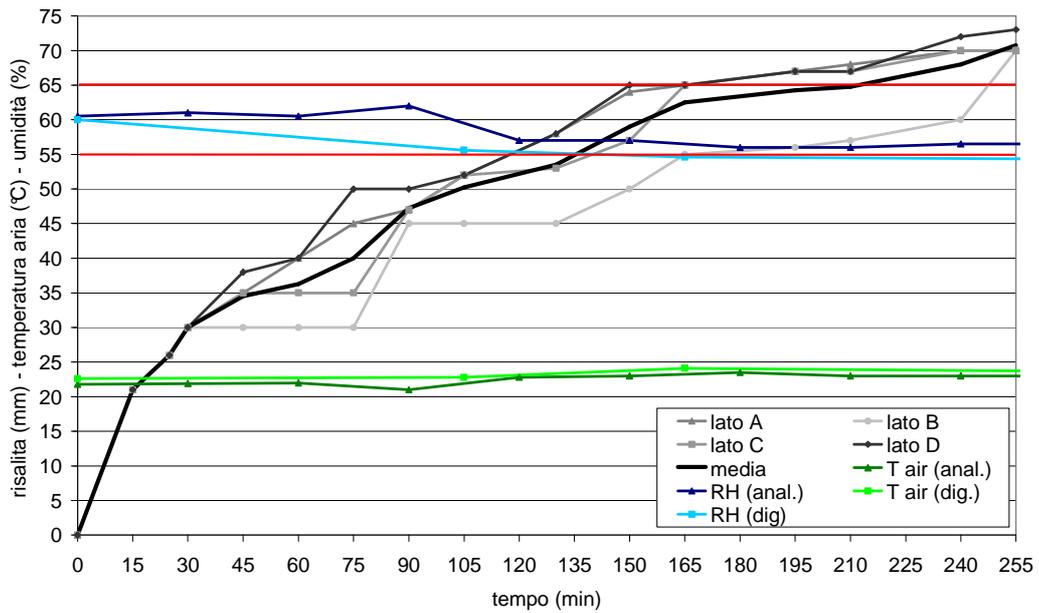


Fig. 3.11: Risalita capillare della salamoia nella tripletta nelle prime 4 h e 15'.

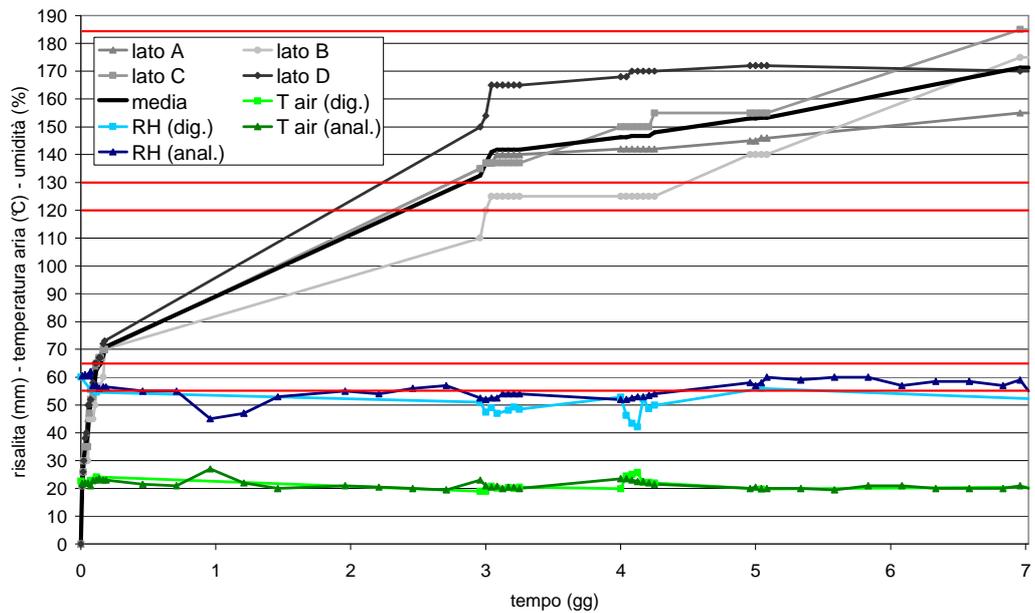


Fig. 3.12: Risalita capillare della salamoia nella tripletta e valori ambientali rilevati per tutta la durata della prova.

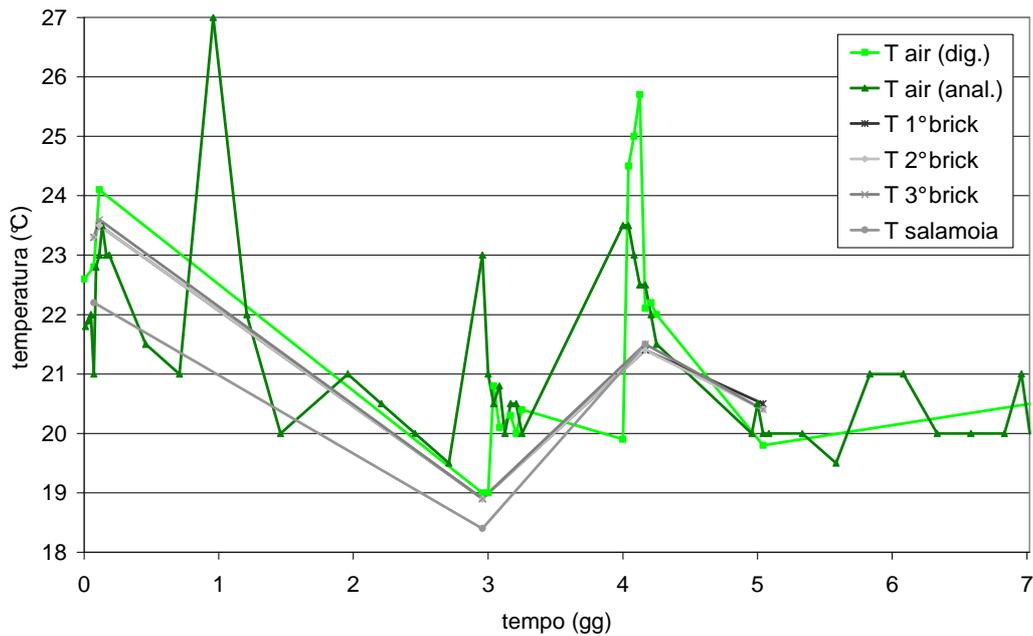


Fig. 3.13: Temperature di contatto dei tre mattoni e della salamoia.

In tabella 3.6 sono riportati i tempi in cui i sensori posti alle diverse quote vengono in contatto con la salamoia che risale attraverso la tripletta.

Tabella 3.6: Tempi in cui i sensori di potenziale e di temperatura vengono in contatto con la salamoia.

	Tempo di contatto (min)	Tempo di contatto
Sensori a quota 2.75	30 (limite 1)	08/10/2010 10:30 (30 min)
Sensori a quota 9.25	tra 255 e 4260 (limite 2)	Tra 08/10/2010 14:55 e 11/10/2010 9:30
Sensori a quota 15.75	10020 (limite 3)	15/10/2010 9:30 (10050 min)

L'andamento della temperatura dei mattoni e della salamoia segue quello della temperatura ambientale, ma le variazioni sono più graduali in quanto è necessario del tempo perché si adattino alle condizioni dell'ambiente (Fig. 3.13).

Tra le temperature di contatto dei mattoni misurate in diversi momenti di prova non c'è differenza; l'evaporazione della salamoia non comporta un grande raffreddamento superficiale del mattone.

Dati rilevati dai sensori

Accedendo alle risorse in rete rese disponibili presso l'indirizzo 129.69.59.4/intern/myadmin è possibile esportare i dati di temperatura e potenziale elettrico in formato Excel.

Nei fogli Excel sono riportati in riga nell'ordine i seguenti dati:

- numero identificativo,
- data e ora di acquisizione,
- valore di voltaggio rilevato.

I dati vengono acquisiti dal sistema ogni 3 minuti sia per i valori di potenziale che per i valori di temperatura dall'inizio della prova fino al 9 ottobre alle ore 12:00, poi vengono acquisiti ogni 10 min. I sensori sono rimasti collegati alla tripletta fino all' 1 novembre.

Con questi dati è stato possibile elaborare grafici di potenziale e di temperatura che hanno in ascissa il tempo in giorni e in ordinata i valori di potenziale e temperatura (Fig. 3.15-3.21). Con linee verticali sono stati indicati i tempi in cui si presume la soluzione venga in contatto con i sensori. Per definire il limite 2 sono state inserite due rette di colore grigio scuro e non una singola linea, perché non si sa con precisione il tempo del contatto sensore-salamoia. Le due rette indicano l'intervallo di tempo in cui dovrebbe essere avvenuto il contatto. Sono state segnate con rette di colore rosso nei grafici le interfacce tra mattone e malta.

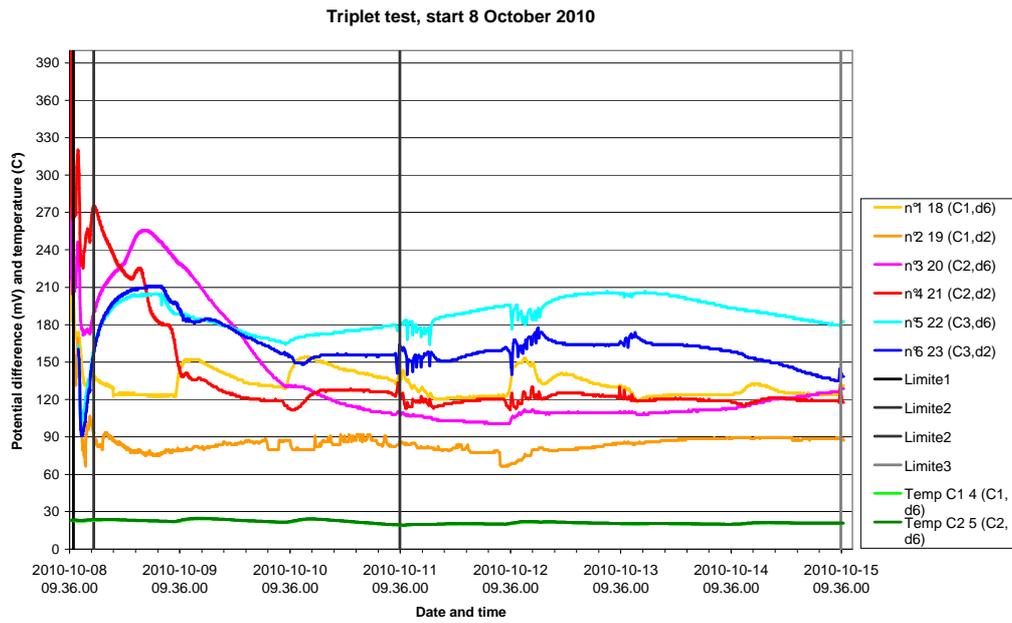


Fig. 3.14: Valori di potenziale rilevati dai sensori dal 08/10/2010 al 15/10/2010.

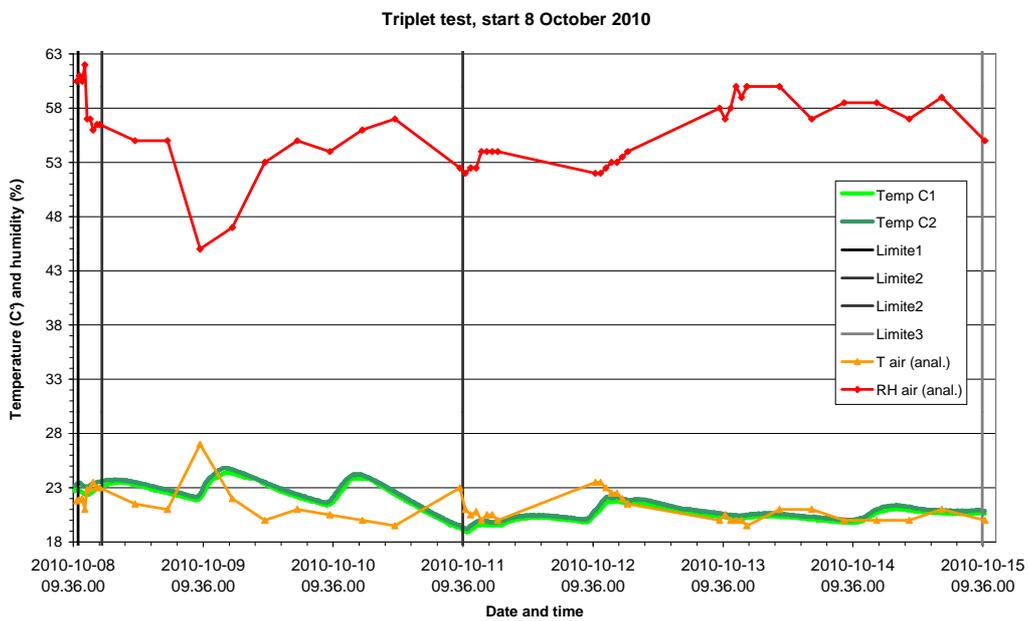


Fig. 3.15: Valori di temperatura rilevati all'interno del 1° e del 2° mattone dai sensori dal 08/10/2010 al 15/10/2010.

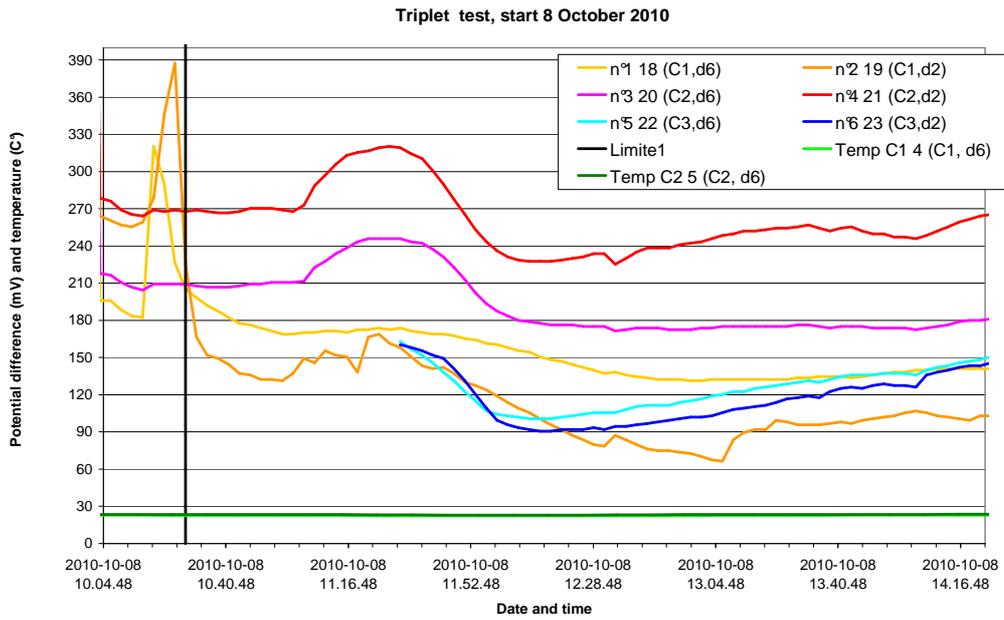


Fig. 3.16: Valori di potenziale rilevati dai sensori dal 08/10/2010 al 9/10/2010.

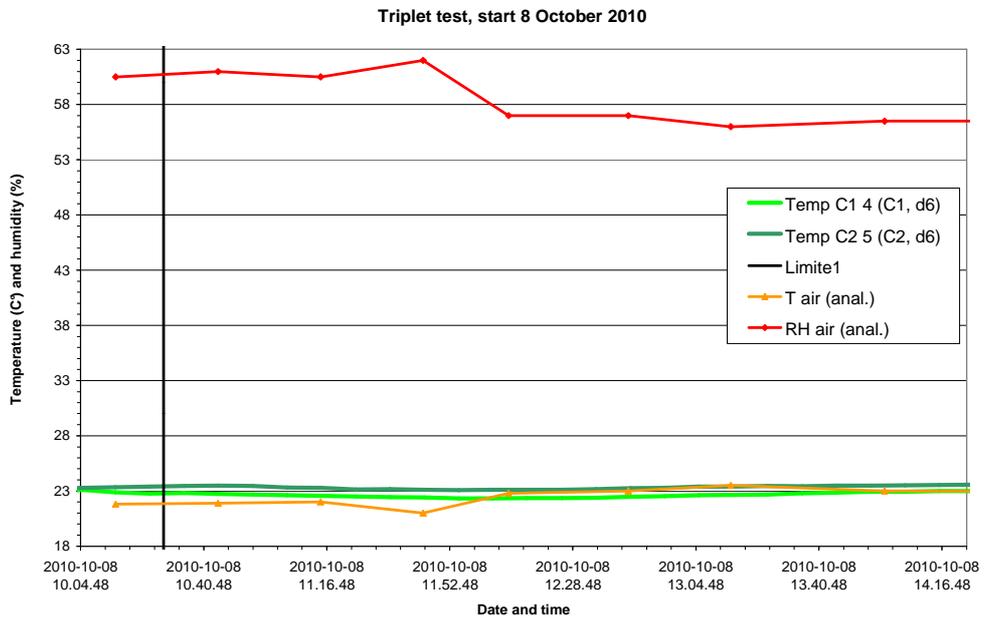


Fig. 3.17: Valori di temperatura rilevati all'interno del 1° e del 2° mattone dai sensori dal 08/10/2010 al 9/10/2010.

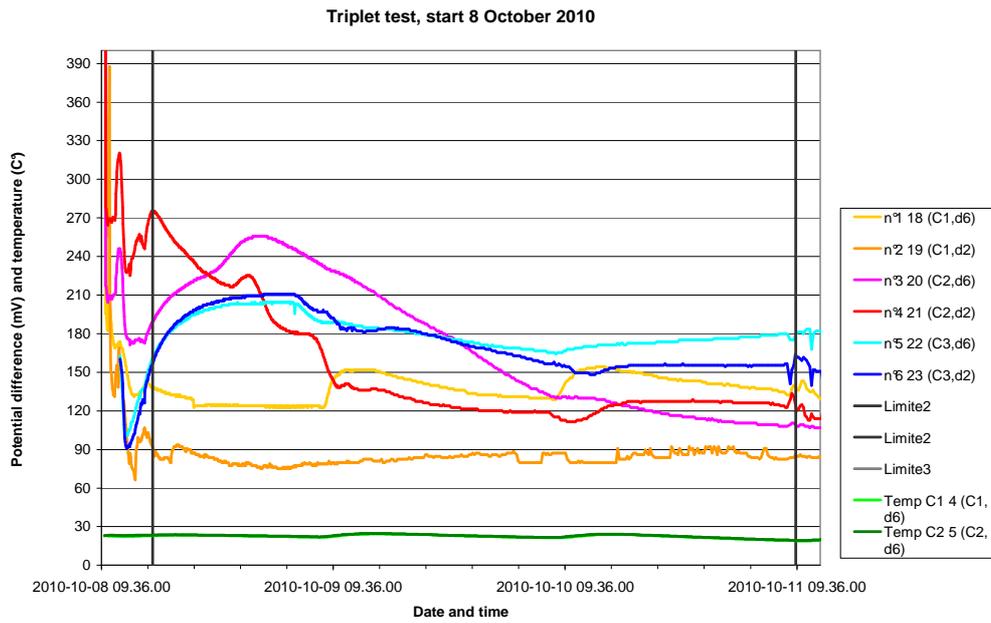


Fig. 3.18: Valori di potenziale rilevati dai sensori dal 8/10/2010 alle ore 09:36 al 11/10/2010 alle ore 09:36.

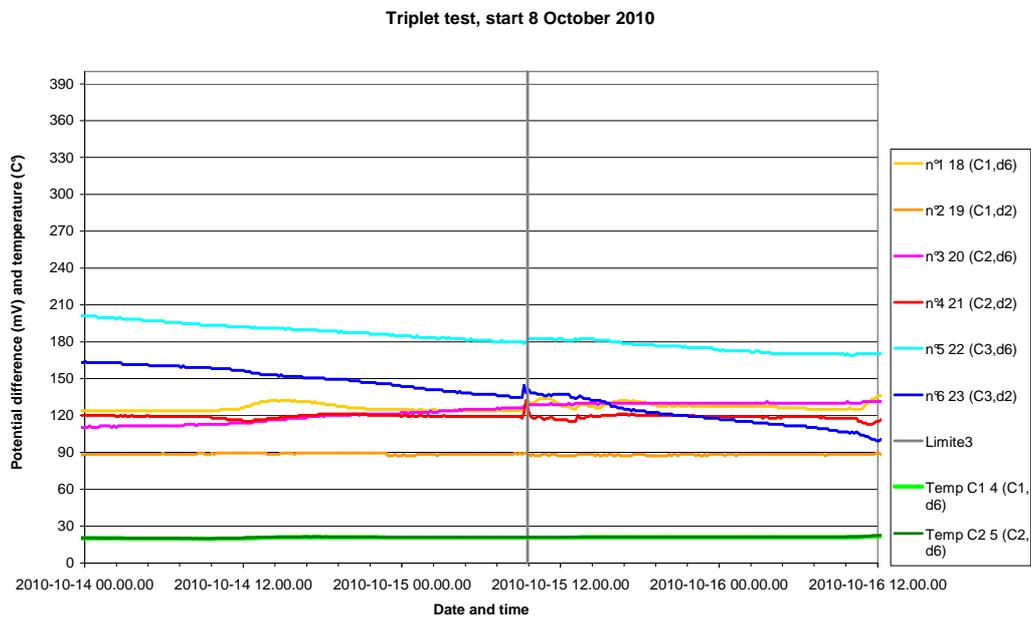


Fig. 3.19: Valori di potenziale rilevati dai sensori dal 14/10/2010 alle ore 00:00 al 16/10/2010 alle ore 12:00.

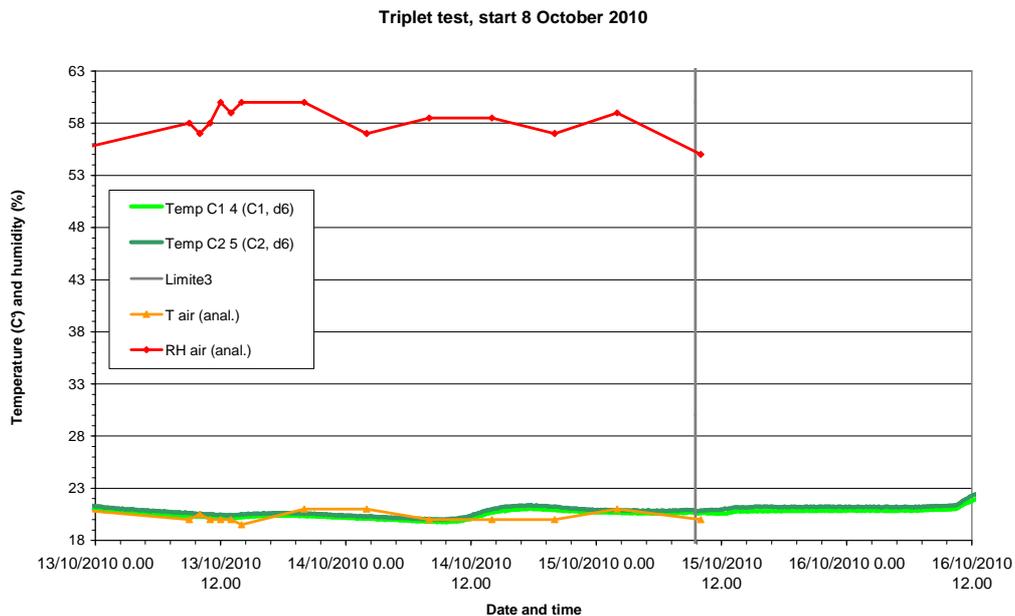


Fig. 3.20: Valori di temperatura rilevati dai sensori dal 14/10/2010 alle ore 00:00 al 16/10/2010 alle ore 12:00.

I due sensori di temperatura rilevano temperature diverse, ma con lo stesso andamento; essendo collocati ad altezze diverse sul provino dovrebbero variare in modo differente quando il primo sensore (C1 a quota 2,75 cm) viene raggiunto dalla soluzione in risalita che evapora raffreddando la superficie. Come abbiamo già notato però, l'evaporazione non porta un grande raffreddamento della superficie del mattone e i sensori sono forse troppo interni al mattone e quindi non riescono a cogliere il raffreddamento superficiale se pur minimo (Fig. 3.15, 3.17 e 3.20).

Invece per quanto riguarda i sensori di potenziale si può notare che quando la soluzione raggiunge la prima quota di controllo (2,75 cm) i sensori N°1 e N°2 (Fig. 3.16) hanno un picco e poi iniziano a calare percependo la variazione di potenziale. Non è possibile stabilire con certezza quando avvenga il contatto della soluzione con il secondo punto di controllo, però si può notare come il sensore N°3 e N°4 nell'intervallo di tempo nel quale si presuma sia avvenuto il contatto

salamoia-sensori, decrescano con una velocità maggiore rispetto agli altri (Fig. 3.18)

Anche quando la soluzione raggiunge il punto di controllo più alto (15,75 cm) le curve che descrivono l'andamento del valore del potenziale rilevato dai sensori N°5 e N°6 tendono a calare (Fig. 3.19).

Integrando nello stesso grafico i valori registrati dai sensori di potenziale e quelli della risalita capillare media e del lato A si può notare come la soluzione abbassi il potenziale elettrico (Fig. 3.21).

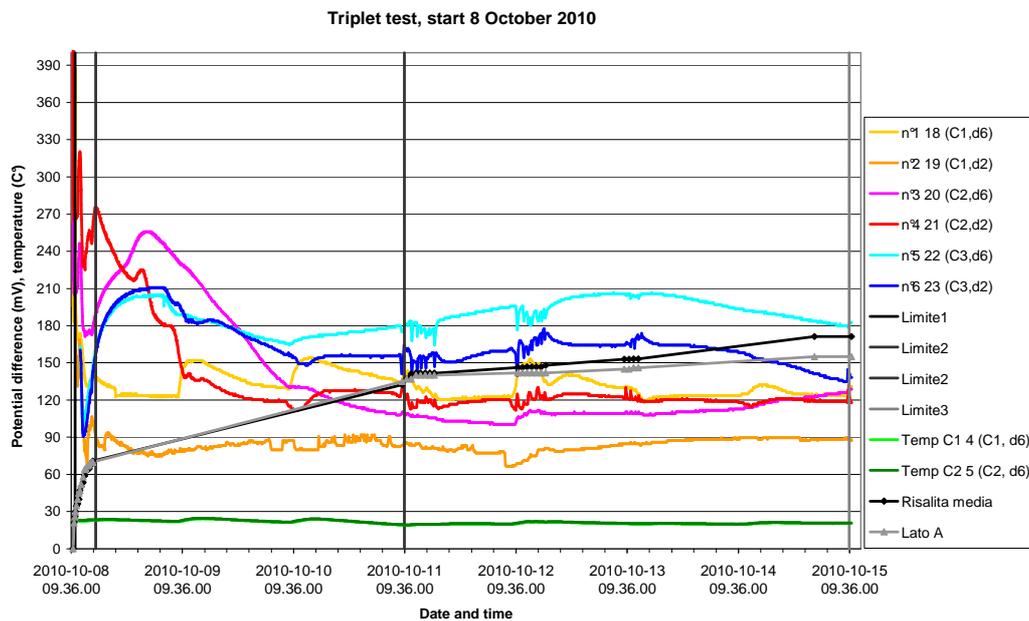


Fig. 3.21: Valori di potenziale rilevati dai sensori dal 08/10/2010 al 15/10/2010 confrontati con i valori di risalita capillare media e del lato A.

4. PRINCIPI DI TERMOGRAFIA AGLI INFRAROSSI

Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è suddiviso in un certo numero di regioni classificate in base alla lunghezza d'onda e denominate bande, distinte a seconda dei metodi utilizzati per emettere e rilevare le radiazioni. Non esiste nessuna differenza sostanziale tra le radiazioni presenti nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico: sono governate tutte dalle stesse leggi e le sole differenze sono quelle determinate dalle diverse lunghezze d'onda.

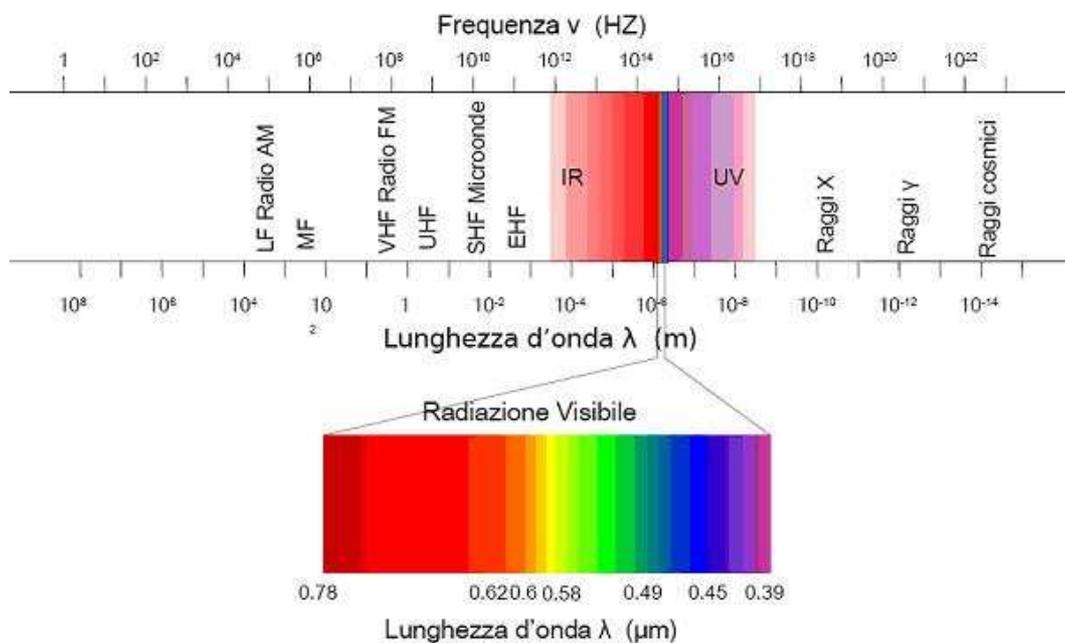


Fig. 4.1: Spettro elettromagnetico (Associazione Lucana di Astronomia, A.L.A.).

La termografia utilizza la banda spettrale dell'infrarosso. Il confine delle onde corte è situato al limite della percezione visiva, nella parte rossa dello spettro. Il confine delle onde lunghe si fonde con la lunghezza d'onda delle microonde radio, nell'intervallo delle onde millimetriche.

Radiazione del corpo nero

Per corpo nero si intende un oggetto che assorbe tutte le radiazioni che lo colpiscono ad una lunghezza d'onda qualsiasi. L'utilizzo dell'apparente termine improprio "nero" riferito ad un oggetto che emette radiazioni è spiegato dalla legge di Kirchhoff, la quale afferma che un corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni ad una lunghezza d'onda qualsiasi è ugualmente in grado di emettere radiazioni. La costruzione della sorgente di un corpo nero è, in linea di massima, molto semplice. Le caratteristiche delle radiazioni dell'apertura di una cavità isoterma costituita da un materiale opaco assorbente, rappresentano quasi esattamente le proprietà di un corpo nero. Se la cavità isoterma viene riscaldata adeguatamente questa diventa ciò che si definisce un "radiatore a cavità", che può essere utilizzato in laboratorio come sorgente di radiazione negli standard di riferimento della temperatura per la calibrazione di strumenti termografici.

Se la temperatura della radiazione del corpo nero aumenta raggiungendo un valore superiore a 525 °C, la sorgente comincia a divenire visibile in modo da non apparire più nera all'occhio umano.

Si prendano ora in considerazione tre espressioni che descrivono la radiazione emessa da un corpo nero:

- **Legge di Planck:**

la seguente formula descrive la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} [\text{Watt}/m^2, \mu m]$$

dove:

$W_{\lambda b}$ = emittanza energetica spettrale del corpo nero alla lunghezza d'onda λ ;

c = velocità della luce;

h = costante di Planck;

k = costante di Boltzmann;

T = temperatura assoluta di un corpo nero;

λ = lunghezza d'onda.

La formula di Planck, se rappresentata graficamente per le diverse temperature genera una famiglia di curve.

Seguendo una qualsiasi curva di Planck, l'emittanza spettrale è zero per $\lambda = 0$, successivamente aumenta rapidamente fino a raggiungere il massimo in corrispondenza di λ_{\max} e, dopo averla raggiunta si avvicina nuovamente a zero per lunghezze d'onda elevate.

Maggiore è la temperatura, minore è la lunghezza d'onda alla quale si raggiunge il massimo.

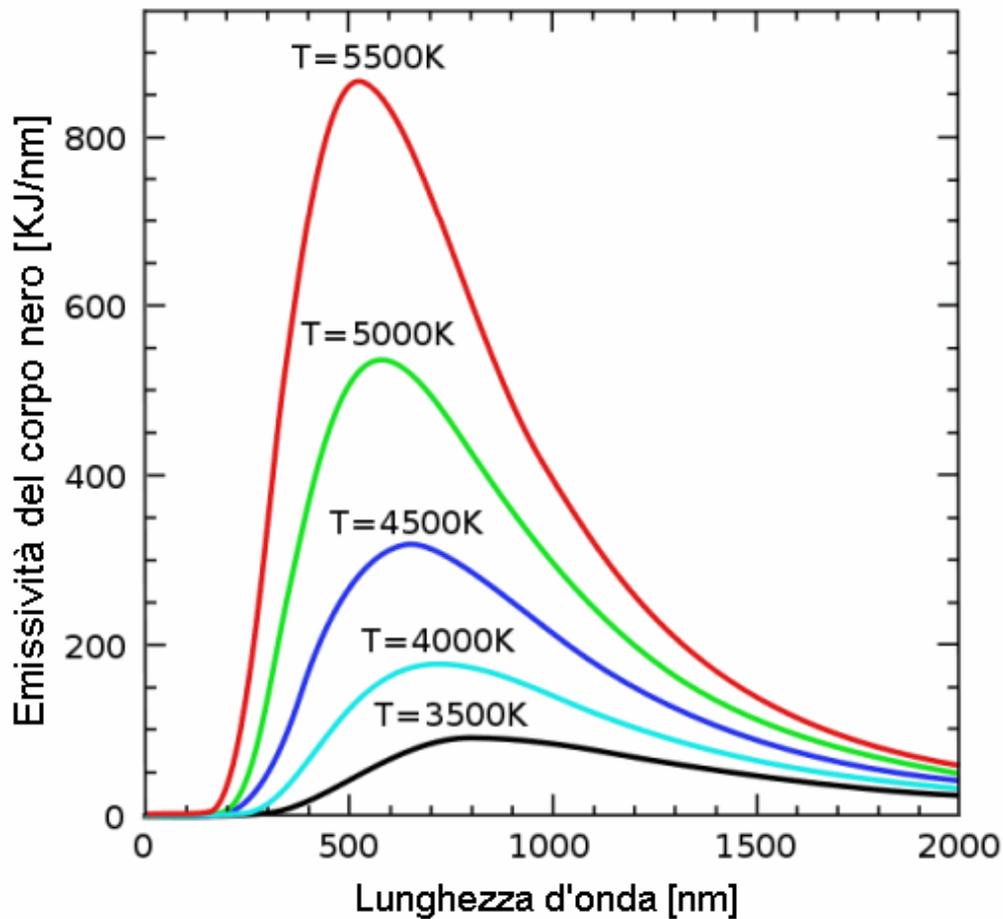


Fig. 4.2: Emittanza energetica spettrale di un corpo nero (Dalcorso - fistec).

- **Legge di spostamento di Wien:**

differenziandosi dalla formula di Planck relativamente a λ , e trovando il max

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu m]$$

La formula di Wien rappresenta matematicamente l'osservazione comune in base alla quale i colori variano dal rosso all'arancione o al giallo con l'aumentare della temperatura di un radiatore termico.

Nel grafico sottostante la linea tratteggiata rappresenta il punto di massima emittanza spettrale per ogni valore di temperatura, il settore giallo la zona del visibile.

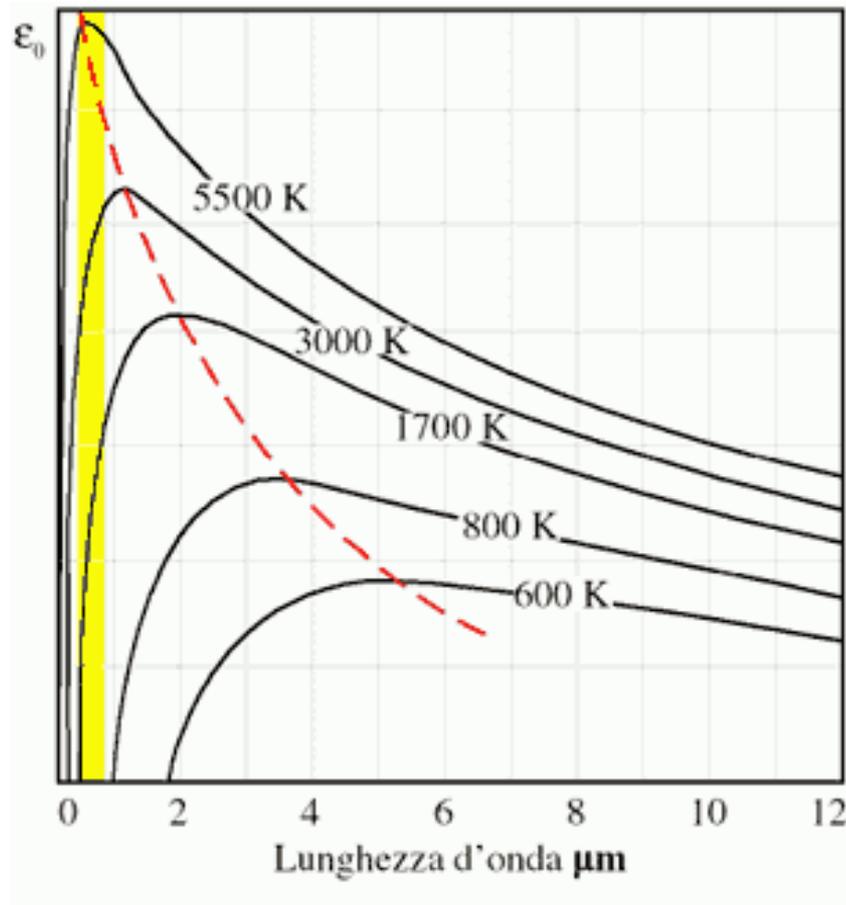


Fig. 4.3: Curve di Planck rappresentate graficamente su scale semilogaritmiche da 600 °K a 5500 °K (Dalcorsio - fistec).

- **Legge di Stefan – Boltzmann:**

integrando la formula di Planck da $\lambda = 0$ a $\lambda = \infty$, è possibile ottenere l'emittanza radiante totale (W_b) di un corpo nero:

$$W_b = \sigma T^4 [\text{Watt}/\text{m}^2]$$

La formula di Stefan – Boltzmann afferma che la quantità totale di energia emessa da un corpo nero è proporzionale alla temperatura assoluta elevata alla quarta potenza.

Emettitori diversi dai corpi neri

Su una regione di lunghezza d'onda estesa gli oggetti reali non rispettano quasi mai le leggi sopra illustrate, anche se tali oggetti in taluni intervalli spettrali potrebbero comportarsi come un corpo nero.

Si possono verificare tre processi che impediscono ad un oggetto reale di comportarsi come un corpo nero:

1. una frazione della radiazione incidente α può essere assorbita,
2. una frazione ρ può essere riflessa,
3. una frazione τ può essere trasmessa.

Poiché tali fattori dipendono dalla lunghezza d'onda l'indice λ viene utilizzato per stabilire la dipendenza spettrale delle loro definizioni. La somma di questi tre fattori va sempre aggiunta al totale a qualsiasi lunghezza d'onda in modo da ottenere la seguente relazione:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Un altro fattore denominato “emissività” è necessario per descrivere la frazione ε dell'emittanza radiante di un corpo nero prodotta da un oggetto ad una data temperatura.

Si ottiene quindi la definizione seguente:

ε_λ = rapporto tra il flusso energetico spettrale emesso da un oggetto e quello emesso da un corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda, cioè:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

In generale esistono tre tipi di sorgenti di radiazione distinti in base alle modalità in cui l'emittanza spettrale di ciascuno varia con il variare della lunghezza d'onda:

- corpo nero: $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$,
- corpo grigio: $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{costante inferiore a } 1$,

- radiatore selettivo per cui ε varia in base alla lunghezza d'onda.

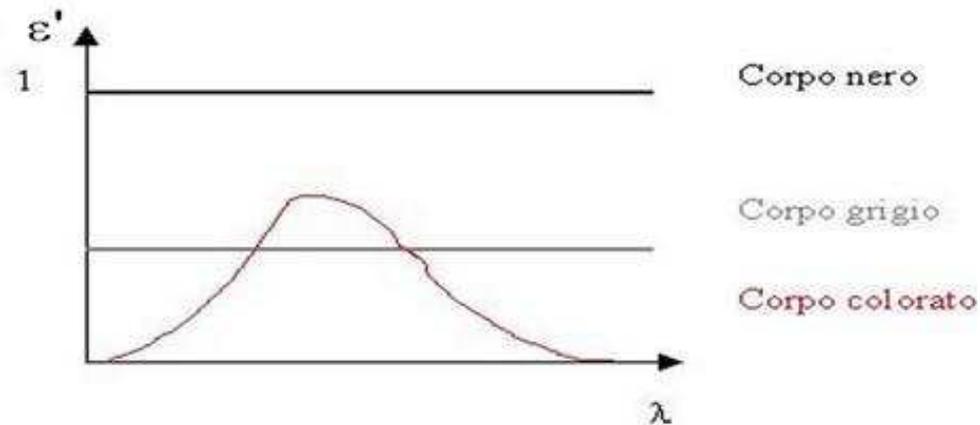


Fig. 4.4: Emissività spettrale di tre tipi di radiatori (RAMSETE - dispense).

Per i materiali opachi $\tau_\lambda = 0$, quindi la relazione precedente si semplifica in:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

In base alla legge di Kirchhoff, per qualsiasi materiale, l'emissività e l'assorbimento spettrali di un corpo sono uguali per qualsiasi temperatura e lunghezza d'onda specificate. In formula:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Da questo si ottiene per un materiale opaco:

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Per i materiali particolarmente lucidi $\varepsilon_\lambda \rightarrow 0$ in modo che per un materiale perfettamente riflettente (ad esempio uno specchio) si avrà:

$$\rho_\lambda = 1$$

Per il radiatore di un corpo grigio la formula di Stefan – Boltzmann diventa:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 [\text{Watt}/\text{m}^2]$$

La formula dimostra che il potere emissivo totale di un corpo grigio è identico a quello di un corpo nero alla stessa temperatura ridotta in proporzione al valore di ε del corpo grigio.

Formula di misurazione della termocamera

Quando è in azione, la termocamera riceve radiazioni anche da sorgenti diverse dall'oggetto sott'osservazione. Le radiazioni provengono inoltre dall'area circostante l'oggetto, riflesse tramite la superficie dell'oggetto stesso. Queste radiazioni vengono attenuate, in qualche misura, dall'atmosfera nel percorso di misurazione. A queste deve aggiungersi un terzo tipo di radiazione proveniente dall'atmosfera stessa. La descrizione della situazione di misurazione, come illustrata in figura 5, è sufficientemente fedele alle condizioni reali.

È possibile che siano stati trascurati alcuni elementi, come la dispersione di luce solare nell'atmosfera o le radiazioni vaganti provenienti da sorgenti di radiazione intensa, esterne al campo del visivo. Tali interferenze sono difficili da quantificare e comunque sono di solito talmente piccole da poter essere trascurate. Qualora non fossero così trascurabili, la configurazione della misurazione sarebbe probabilmente tale da causare rischi di interferenze, quantomeno all'occhio di un operatore esperto. È quindi responsabilità dell'operatore modificare la situazione di misurazione per evitare interferenze. In base a quanto detto, è possibile utilizzare la figura 4.5 per ottenere una formula per il calcolo della temperatura di un oggetto in base al segnale di uscita della termocamera calibrata.

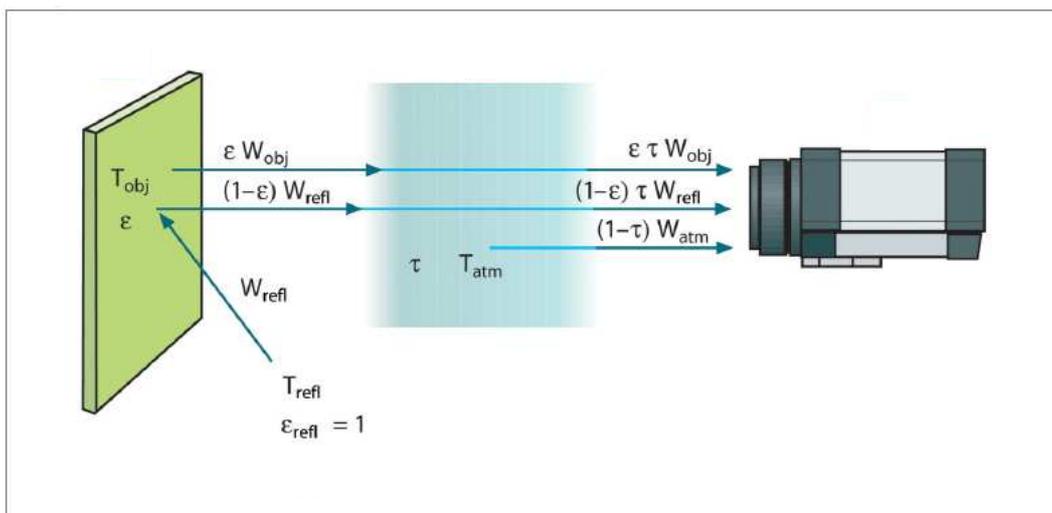


Fig. 4.5: Rappresentazione schematica della situazione di misurazione termografica generale (User manual – FLIR – Flir 600 series).

Si supponga che l'energia irradiata W dalle sorgente di un corpo nero di temperatura T_{source} su distanze corte generi un segnale di uscita della termocamera U_{source} , proporzionale all'energia in entrata. È quindi possibile scrivere:

$$U_{source} = CW(T_{source})$$

dove C è una costante.

Se la sorgente è un corpo grigio con emittanza ϵ , la radiazione ricevuta sarà di conseguenza ϵW_{source} .

È ora possibile scrivere i tre termini dell'energia irradiata ricevuta:

1. Emissione dall'oggetto = $\epsilon\tau W_{obj}$, dove ϵ è l'emittanza dell'oggetto e τ è la trasmittanza dell'atmosfera,
2. Emissione riflessa dalle sorgenti ambiente = $(1-\epsilon)\tau W_{refl}$, dove $(1-\epsilon)$ è la riflettanza dell'oggetto,
3. Emissione dall'atmosfera = $(1-\tau)W_{atm}$, dove $(1-\tau)$ è l'emittanza dell'atmosfera.

È ora possibile scrivere l'energia irradiata totale ricevuta:

$$W_{tot} = \epsilon\tau W_{obj} + (1-\epsilon)\tau W_{refl} + (1-\tau)W_{atm}$$

Moltiplicando ciascun termine per la costante C e sostituendo i prodotti CW con il valore U corrispondente, si ricava:

$$U_{tot} = \epsilon\tau U_{obj} + (1-\epsilon)\tau U_{refl} + (1-\tau)U_{atm}$$

Risolvendo l'equazione per U_{obj} si ottiene:

$$U_{obj} = \frac{1}{\epsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\epsilon}{\epsilon} U_{refl} - \frac{1-\tau}{\epsilon\tau} U_{atm}$$

Questa formula di misurazione generale è quella utilizzata dalle termocamere a infrarossi.

L'operatore deve fornire una serie di parametri per il calcolo:

- L'emittanza dell'oggetto ϵ ,
- L'umidità relativa,
- La distanza dell'oggetto (D_{obj}),

- La temperatura (effettiva) dell'area circostante l'oggetto o la temperatura ambientale riflessa T_{refl} ,
- La temperatura dell'atmosfera T_{atm} .

A volte tale compito può risultare oneroso per l'operatore poiché in genere non è facile ricavare i valori precisi dell'emittanza e della trasmittanza atmosferica per il caso specifico.

5. MONITORAGGIO TRAMITE TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI DI RISALITA CAPILLARE D'UMIDITÀ IN PROVINO MURARIO FESSURATO

PRIMA PROVA

La 1° prova di risalita di umidità, che ha avuto inizio in data 28/10/2010 alle ore 10:00 ed è stata interrotta dopo 29 giorni e 23 ore, è stata effettuata presso il laboratorio LISG su un muretto la cui base è stata posizionata all'interno di una vasca contenente acqua allo scopo di monitorarne la risalita tramite termografia ad infrarossi. Il muretto avendo subito nel febbraio 2010 una prova meccanica risulta visibilmente fessurato nel lato sinistro, se guardato frontalmente.

Obiettivi

Si vuole valutare la risalita capillare d'acqua nel muretto fessurato per cogliere se ci siano differenze di risalita tra la zona di muretto integro e la zona fessurata. La termografia ad infrarossi permette di avere una visione più netta del livello di risalita dell'acqua nella muratura, in quanto l'acqua ha già una temperatura minore della muratura e poi anche l'evaporazione contribuisce al raffreddamento della superficie.

Preparazione della prova di capillarità

1. Materiali utilizzati nella prova

- Vasca: costruita con assi di legno e rivestita con un telo impermeabile serve a contenere l'acqua che bagna la base inferiore del muretto, con un battente di circa 1 cm,
- Bottiglie di plastica trasparente da 1,5 l contenenti acqua per rabboccare la vasca,
- Sostegni per bottiglia: sostengono le bottiglie con l'acqua verticali e con il collo verso il basso a contatto con il pelo del liquido nella vasca per mantenere costante il livello del battente d'acqua.

2. Caratteristiche del muretto

Il muretto è stato costruito con mattoni pieni di dimensioni $12 \times 25 \times 5,5$ cm e con giunti di malta di calce idraulica naturale disposti su 20 file (Fig. 5.1). Su di esso era stata effettuata una prova di compressione diagonale grazie a gli appoggi su due piastre angolari alla base (una a destra e una a sinistra) e caricandolo sulla piastra posta nella mezzeria della sommità.

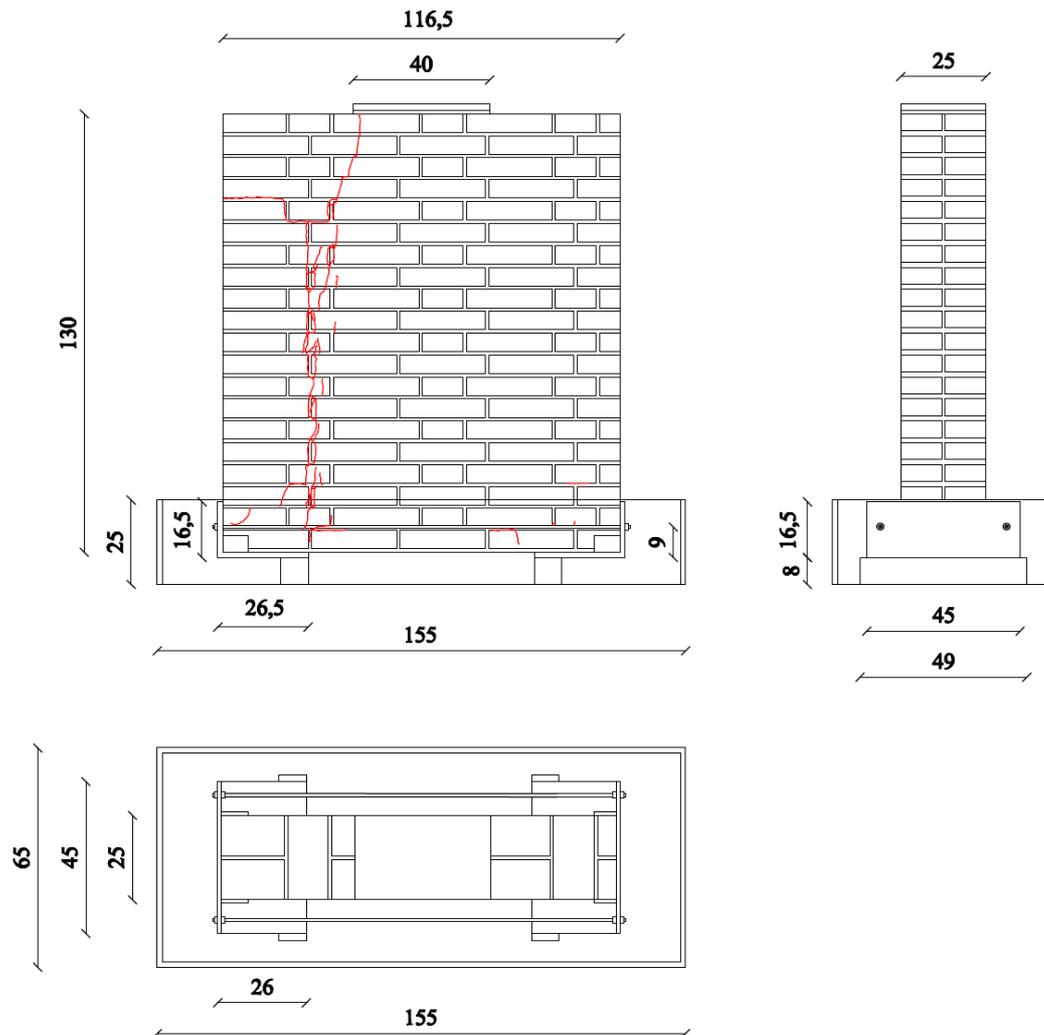


Fig. 5.1: Vista dall'alto, prospetto e vista laterale del muretto con orditura muraria, dimensioni e quadro fessurativo.

Le piastre d'acciaio sono rimaste collegate al muretto e sono quindi presenti anche nella prova di risalita. Il quadro fessurativo generato durante la prova di carico

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

attraversa il muretto per tutta la sua altezza allargandosi man mano che ci si avvicina alla sommità (Fig. 5.2). La fessura è poco aperta alla base del muretto, ciò potrebbe aumentare la velocità di risalita capillare dell'acqua. La fessura si allarga salendo verso la sommità del muretto fino a raggiungere il mezzo centimetro circa, rallentando probabilmente l'assorbimento dell'acqua.

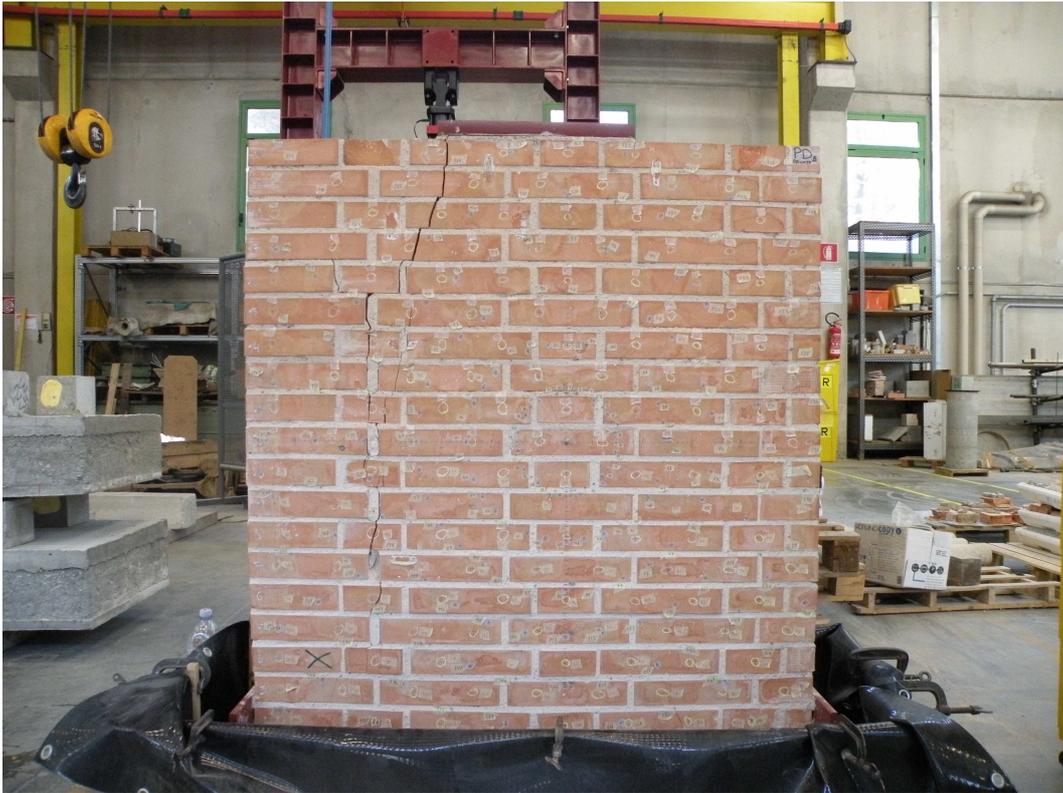


Fig. 5.2: Muretto preparato nella vasca con fessura diagonale che lo attraversa per tutta l'altezza

Per riprodurre lo stato fessurativo e di danneggiamento presente sul muretto PDB sono stati fatti tre rilievi parziali del prospetto con carta da lucido:

1. rilievo della metà sinistra del fronte del muretto con carta da lucido di dimensioni $58,5 \times 130$ cm (Fig. 5.3),
2. rilievo della parte in basso a destra del fronte del muretto con foglio di carta da lucido A3 ($29,7 \times 42$ cm) (Fig. 5.4).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

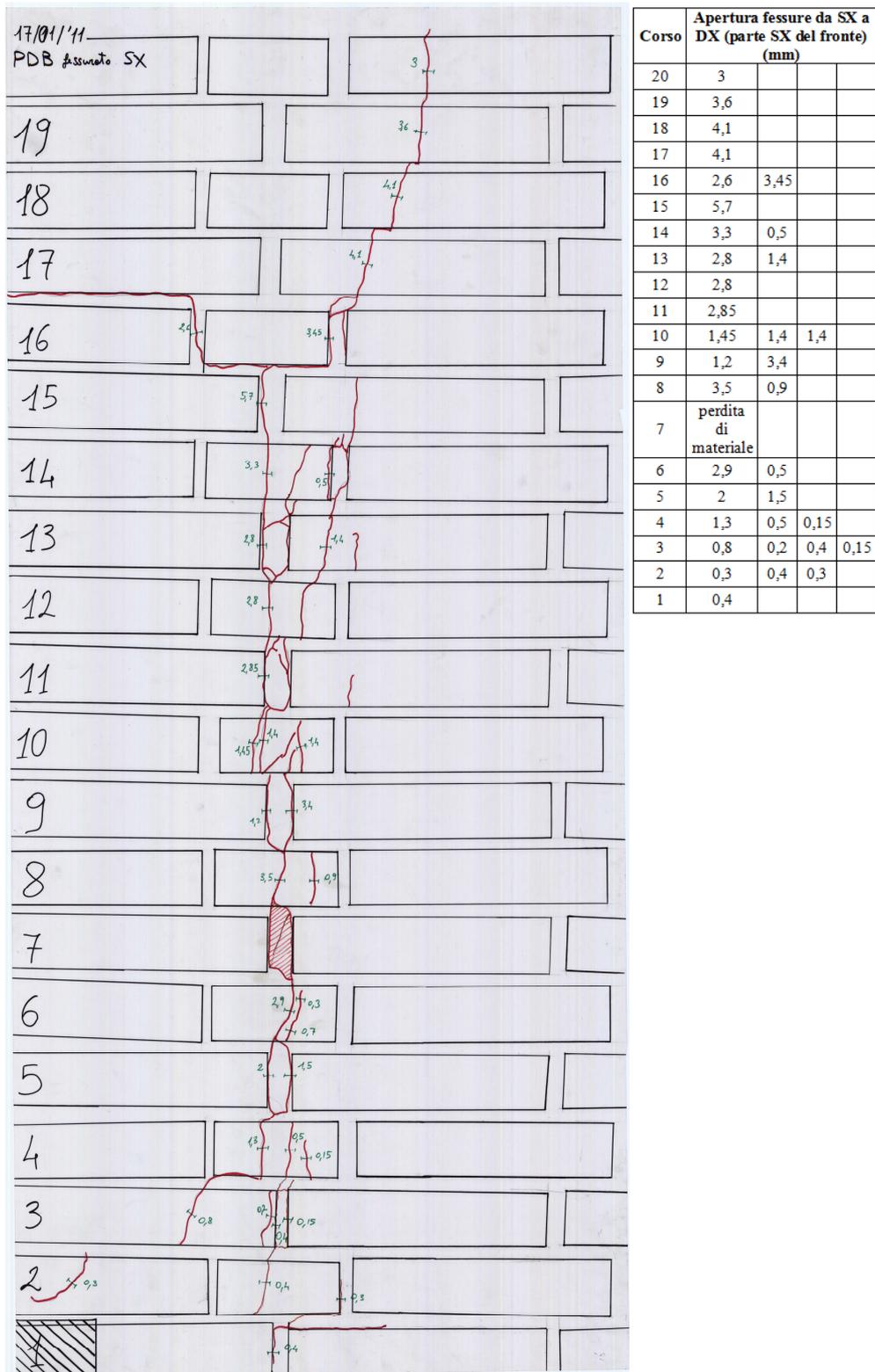


Fig. 5.3: Rilievo della metà sinistra del fronte del muretto PDB con indicazione dell'apertura delle fessure.

- rilievo della parte in basso a destra del retro del muretto con foglio di carta da lucido A3 (29,7×42 cm) (Fig. 5.5).

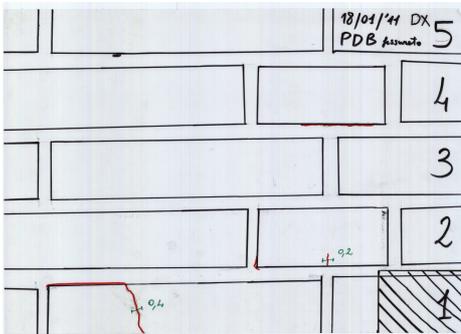


Fig. 5.4: Rilievo della parte in basso a destra del fronte del muretto PDB con apertura delle fessure.

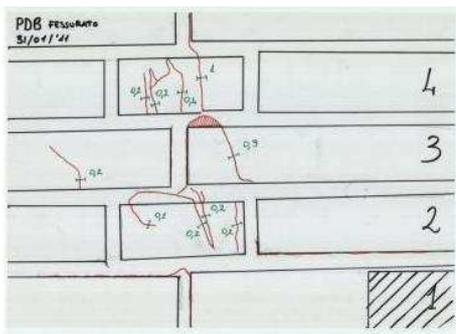


Fig. 5.5: Rilievo della parte in basso a destra del retro del muretto PDB con apertura delle fessure.

I mattoni sono stati indicati in nero, il quadro fessurativo in rosso, le zone dove il materiale è stato espulso con una campitura rossa e il valore di apertura delle principali fessure in verde. Per rilevare l'apertura delle fessure più piccole si è utilizzato un monocolo Specwell con scala 0 - 5 mm (Fig. 5.6); per le più aperte è stato sufficiente utilizzare un calibro digitale di precisione (Oberk della LTF) con scala 0 - 150 mm (Fig. 5.7).



Fig. 5.6: Specwell prismatic monocular



Fig. 5.7: Calibro Oberk LTF

Per riuscire a vedere meglio le fessure presenti sul muretto si è utilizzata la tecnica di illuminazione a luce radente che consiste nell'utilizzo di un fascio di luce quasi tangente alla superficie facilmente ottenibile con un faretto (Fig. 5.8).



Fig. 5.8: Tecnica di illuminazione a luce radente applicata al muretto PDB.

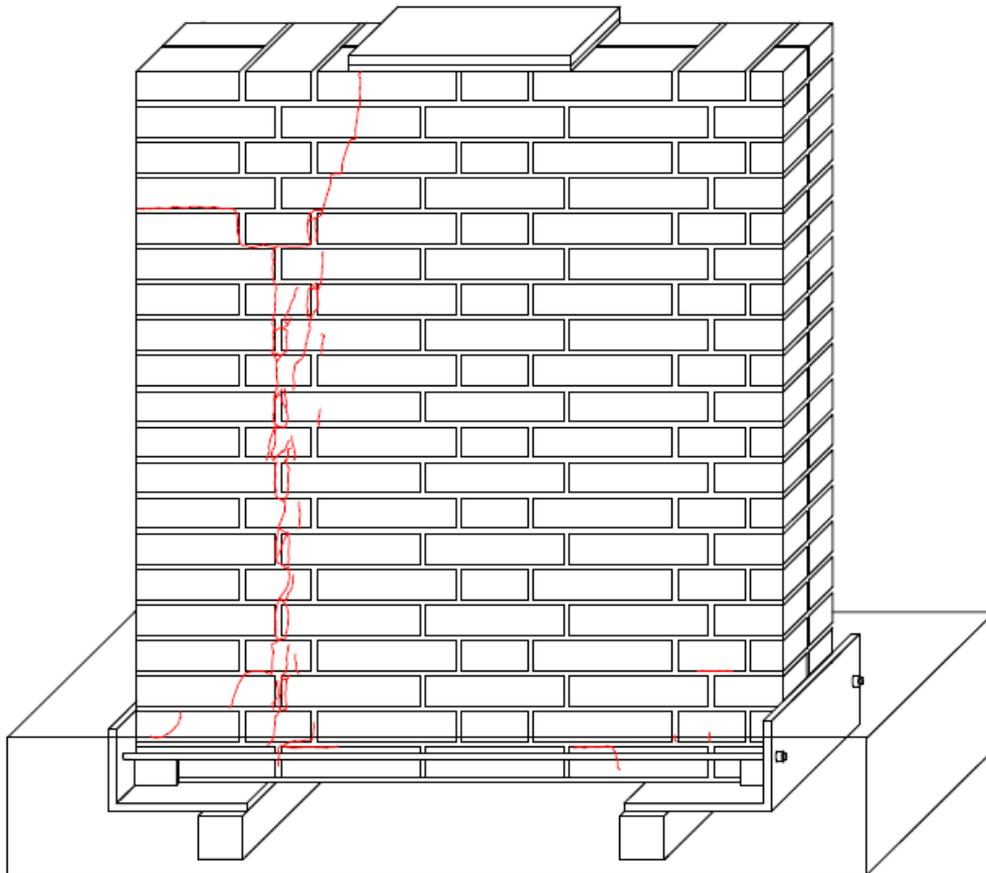


Fig. 5.9: Schema assonometrico con riproduzione dello stato fessurativo del muretto.

3.Caratteristiche della strumentazione utilizzata

3.1.Termocamere ad infrarossi

Il monitoraggio ad infrarossi ha impiegato 2 modelli diversi di termocamera. La prima termocamera utilizzata è una FLIR B250 (Fig. 5.10), dove la B indica la serie Building in quanto questo strumento ha un intervallo di temperatura adatto ai campi tipici dell'ambito delle costruzioni. Successivamente, dal giorno 08/11/2010 alle ore 14:00, alla FLIR B250 è stata affiancata la termocamera P620 sempre della FLIR (Fig. 5.11) che ha caratteristiche tecniche e risoluzione migliori (Tabella 5.3 e 5.4). La differenza più importante tra le due termocamere sta nella risoluzione che è 240×180 pixels per la FLIR B250 contro 640×480

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

pixels della P620; con la P620 si ottengono dei termogrammi di qualità e precisione maggiore. Anche l'ampio display da 1024×600 pixels e la messa a fuoco manuale della P620 permettono di lavorare in condizioni migliori rispetto alla B250. La termocamera B250 ha il solo vantaggio di essere più maneggevole, più leggera e di minor ingombro. Fino al giorno 10/11/2010 alle ore 9:30 sono state fatte acquisizioni con entrambe le termocamere per vedere le differenze tra i termogrammi forniti dai due strumenti, poi si è proseguito fino al termine della prova solo con la termocamera P620. Prima dell'inizio della prova sono stati impostati i parametri delle due termocamere (Tabella 5.1 e 5.2).

Tabella 5.1: Parametri della termocamera B 250 impostati prima dell'inizio della 1° prova.

PARAMETRI		VALORE
Emissività		1.00
Temp. di riferimento		20.0 °C
Distanza di acquisizione		1 m
Umidità relativa ambiente di prova		50 %
Temp. atmosferica ambiente di prova		20.0 °C
Immagine	tavolozza	ferro
	fusione	disattivata
	campo	da -20 °C a 120 °C

Tabella 5.2: Parametri della termocamera P 620 impostati prima dell'inizio della 1° prova.

PARAMETRI		VALORE
Emissività		1.00

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Temp. di riferimento		20.0 °C
Distanza di acquisizione		1 m
Umidità relativa ambiente di prova		50 %
Temp. atmosferica ambiente di prova		20.0 °C
Immagine	tavolozza	ferro
	fusione	disattivata
	campo	da -40 °C a 120 °C



Fig. 5.10: Termocamera FLIR B250 vista posteriormente (a sinistra) e da davanti (a destra) (manuale FLIR).



Fig. 5.11: Termocamera FLIR P620 (manuale FLIR).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

I termogrammi sono stati acquisiti da 2 posizioni: quelli più ravvicinati inquadrano i dieci corsi murari inferiori del provino (settore indicato in rosso in Fig. 5.12), mentre quelli acquisiti dalla posizione più lontana inquadrano l'intero fronte del provino (settore indicato in blu in Fig. 5.12).

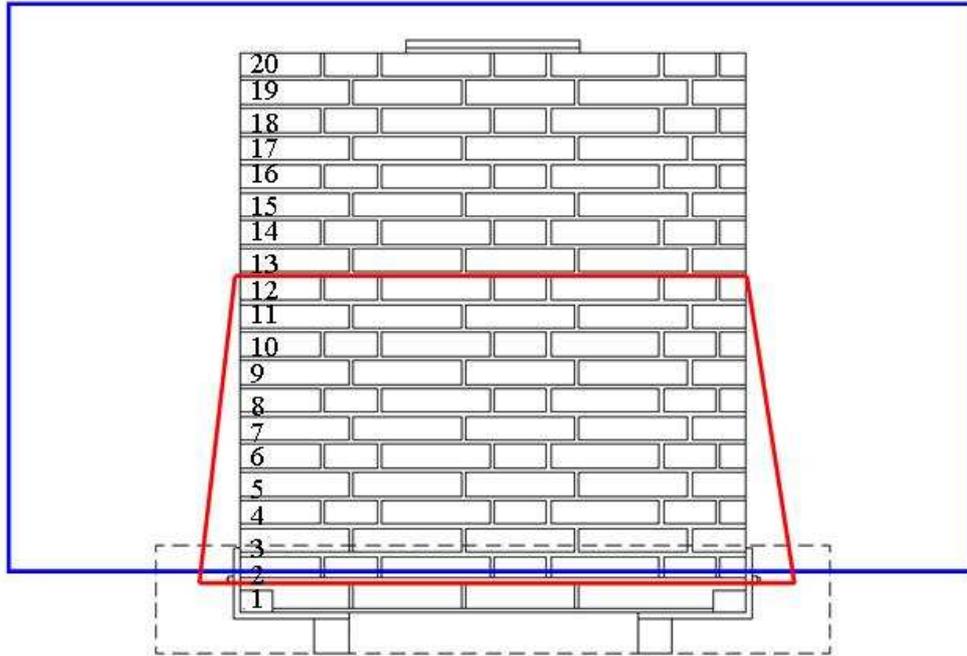


Fig. 5.12: Inquadrature termografiche del muretto PDB dalle due diverse posizioni.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Tabella 5.3: Specifiche tecniche della termocamera FLIR B250 (manuale FLIR).

Caratteristiche Immagine	
Campo visivo (FOV) / distanza minima di messa a fuoco	25° x 19°/0,4 m
Campo spettrale	7,5 - 13 µm
Risoluzione spaziale (IFOV)	2,18 mrad per FLIR B250 - 1,36 mrad per FLIR B335, FLIR B365, FLIR B425
Frequenza di immagine	9 Hz o 30 Hz
Messa a fuoco	Automatica o manuale
Focal Plane Array (FPA)	Microbolometro non raffreddato
Presentazione dell'immagine	
Display	Touch screen incorporato, LCD a colori da 3,5", 320 x 240 pixels
Modalità immagine	Immagine IR, immagine visiva, FLIR Picture-in-Picture, galleria immagini
Misurazione	
Accuratezza	±2°C o 2% della lettura
Analisi della misurazione	
Puntatore	5
Area	5 riquadri con max./min./media
Isoterma	Rilevamento temperatura alta/bassa/intervallo
Allarme umidità	1 allarme umidità incluso allarme punto di rugiada
Allarme isolamento	1 allarme isolamento
Punto caldo/freddo automatico	Marcatori con puntatori caldi o freddi automatici entro l'area
Correzione dell'emissività	Variabile tra 0,1 e 1,0 o selezionata dall'elenco dei materiali
Correzioni della misurazione	Temperatura riflessa, trasmissione delle ottiche e trasmissione atmosferica
Correzione ottiche/finestre esterne	Automatica, basata sui valori di trasmittanza e temperatura delle ottiche/finestre IR
Impostazioni	
Tavolozze colori	Bianco e nero, Bianco e nero inv, Iron, Rain (RainHC e Bluered: FLIR B250, B365 e FLIR B425)
Comandi di setup	Adattamento geografico di unità, lingua, formati data e ora; spegnimento automatico, intensità display
Memorizzazione delle immagini	
Tipo	Scheda di memoria SD
Formato	JPEG standard, 14 bit inclusi dati di misurazione
Modalità	Immagini IR/visive, memorizzazione contemporanea di immagini IR e visive
Annotazioni sulle immagini	
Annotazioni di testo	Creazione di annotazioni di testo utilizzando una lista predefinita o scrivendo direttamente su touch screen tramite tastiera
MeterLink	Collegamento con pinza amperometrica Extech EX845 o misuratore di umidità M0297 tramite Bluetooth
Fotocamera	
Fotocamera digitale integrata	3,1 Megapixels (2048 × 1536 pixels) e due illuminatori a LED
Puntatore laser	
Laser	Laser a diodo AlGaInP, Classe 2
Allineamento laser	La posizione viene visualizzata automaticamente sull'immagine IR
Streaming video	
Streaming di filmati IR radiometrici	Interamente dinamico su PC tramite USB
Streaming di filmati termici non radiometrici	MPEG-4 su PC tramite USB
Sistema di alimentazione	
Batteria	Batteria agli ioni di litio ricaricabile, sostituibile sul posto
Autonomia della batteria	4 ore
Sistema di ricarica	Integrato nella termocamera, adattatore CA, caricabatteria a due vani o 12 V da un veicolo
Gestione energetica	Spegnimento automatico (selezionabile dall'utente)
Funzionamento con alimentazione CA	Adattatore CA, 100 - 240 V CA, 50/60 Hz
Tensione adattatore	Uscita 12 V alla termocamera
Specifiche ambientali	
Intervallo temperatura di funzionamento	Da -15 °C a +50 °C
Intervallo temperatura di stoccaggio	Da -40 °C a +70 °C
Umidità (funzionamento e stoccaggio)	IEC 68-2-30/24 h 95% di umidità relativa tra +25 °C e +40 °C
Urti	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibrazioni	2 g (IEC 60068-2-6)
Isolamento	IP 54 (IEC 60529)
Interfacce	
USB-A	Collegamento di un dispositivo USB esterno (copia su chiavetta)
USB Mini-B	Trasferimento dati da e a PC/streaming MPEG-4
Video composito	PAL o NTSC
Caratteristiche fisiche	
Peso termocamera, incl. batteria	0,88 kg
Dimensioni della termocamera (L × P × A)	106 × 201 × 125 mm
Dimensioni di spedizione	180 × 500 × 360 mm
Peso di spedizione	5,6 kg

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Tabella 5.4: Specifiche termocamera P620 (manuale FLIR).

Caratteristiche Immagine	
Risoluzione IR	640 x 480 pixels
Campo spettrale	7,5 - 13 μ m
Frequenza di immagine	30 Hz
Messa a fuoco	Automatica o manuale
Focal Plane Array (FPA)	Microbolometro non raffreddato
Presentazione dell'immagine	
Display	Ampio display LCD a colori da 5,6", 1024 x 600 pixels
Mirino	LCD regolabile incorporato, 800 x 600 pixels
Regolazioni automatiche dell'immagine	Continua/manuale; lineare o basata su istogramma
Regolazioni manuali dell'immagine	Livello/campo/max./min.
Modalità immagine	Immagine IR, immagine visiva, galleria immagini, FLIR Thermal Fusion, FLIR Picture-in-Picture
Riferimento immagine	Riferimenti immagini istantanee a video
Misurazione	
Intervallo di temperatura	Da -40 °C a +120 °C (opzionale fino a +2000 °C)
Analisi della misurazione	
Isoterma - sopra, sotto, intervallo	2
Differenza di temperatura	Differenza di temperatura tra funzioni di misurazione o una temperatura di riferimento
Punto caldo/freddo automatico	Valore temp. max./min. e la loro posizione all'interno delle aree rettangolari, circolari o su una linea
Allarme umidità	1 allarme umidità incluso allarme punto di rugiada
Allarme isolamento	1 allarme isolamento
Allarme funzione di misurazione	Allarmi sonori/visivi (sopra/sotto) su qualsiasi funzione di misurazione selezionata
Temperatura di riferimento	impostata manualmente o acquisita da una delle funzioni di misurazione
Correzione dell'emissività	Variabile tra 0,01 e 1,0 o selezionata dall'elenco dei materiali
Correzione della temperatura apparente riflessa	Automatica, basata sulla temperatura riflessa in ingresso
Correzione ottiche/finestre esterne	Automatica, basata sui valori di trasmittanza e temperatura delle ottiche/finestre IR
Impostazioni	
Comandi di setup	Adattamento geografico di unità, lingua, formati data e ora; spegnimento automatico, intensità display
Pulsanti programmabili	2
Memorizzazione delle immagini	
Tipo	Scheda di memoria SD
Formato	JPEG standard, 14 bit inclusi dati di misurazione
Modalità	Immagini IR/visive, memorizzazione contemporanea di immagini IR e visive, associazione automatica dell'immagine visiva all'immagine IR corrispondente
Salvataggio immagine periodica	Ogni 10 secondi fino a 24 ore
Funzione Panorama	Per creare immagini panoramiche
Commenti sulle immagini	
Commenti vocali di immagini	60 secondi memorizzati insieme all'immagine (tramite Bluetooth®)
Annotazioni di testo	Testo predefinito o testo libero da PDA (tramite IrDA) memorizzato insieme all'immagine
Marcatore immagine	4 su immagine visiva o IR
Fotocamera digitale	
Fotocamera digitale incorporata	3,2 Megapixel, messa a fuoco automatica con illuminatore incorporato
Puntatore laser	
Laser	Diode laser semiconduttore AlGaInP, Classe 2
Streaming video	
Streaming di filmati termici non radiometrici	MPEG-4 su PC tramite USB o WLAN (opzionale)
Sistema di alimentazione	
Autonomia batteria	Batteria agli ioni di litio ricaricabile, sostituibile sul posto
Autonomia della batteria	3 ore
Sistema di ricarica	Integrato nella termocamera, adattatore CA, caricabatteria a due vani o 12 V da un veicolo
Gestione energetica	Spegnimento automatico e modalità riposo (selezionabile dall'utente)
Funzionamento con alimentazione CA	Adattatore CA, 100 - 240 V CA, 50/60 Hz
Tensione adattatore	Uscita 12 V CC
Specifiche ambientali	
Intervallo temperatura di funzionamento	Da -15 °C a +50 °C
Intervallo temperatura di stoccaggio	Da -40 °C a +70 °C
Umidità (funzionamento e stoccaggio)	IEC 68-2-30/24 h 95% di umidità relativa tra +25 °C e +40 °C
Urti	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibrazioni	2 g (IEC 60068-2-6)
Isolamento	IP 54 (IEC 60529)
Interfacce	
USB-A	Collegamento di un dispositivo USB esterno (copia su chiavetta)
USB Mini-B	Trasferimento dati da e a PC/streaming MPEG-4
Video composito	PAL o NTSC
IrDA	Per l'invio di file di commento testuali dal PDA alla termocamera, trasferimento wireless del testo
WLAN	Opzionale
Collegamento cuffie	Si
Caratteristiche fisiche	
Peso termocamera, incl. batteria	1,8 kg
Dimensioni della termocamera (L x P x A)	299 x 144 x 147 mm
Dimensioni di spedizione	520 x 400 x 200 mm
Peso di spedizione	8,2 kg

3.2.Termoigrometro digitale

Il termoigrometro digitale che è stato utilizzato per rilevare umidità e temperatura per tutta la durata della prova di risalita è l' HD 9216 della DELTAOHM (Fig.5.13). È uno strumento portatile di dimensioni molto contenute dotato di sonde intercambiabili per misurare temperatura e umidità dell'aria, temperatura superficiale a contatto (Fig. 5.14 e Tab. 5.5). L'elemento sensibile all'umidità è un condensatore il cui dielettrico è formato da un polimero igroscopico. La temperatura viene rilevata da una termoresistenza al platino Pt100 (100 Ω a 0°C). Sia il sensore di umidità relativa che di temperatura sono piatti, hanno un alto rapporto superficie/volume, ciò permette una buona velocità di risposta.



Fig. 5.13: Termoigrometro digitale Deltaohm HD9216 con sonde.

COD.	Campo di misura Work range Domaine de fonction. Arbeitsbereich Campo de trabajo	T ^{**} sec.	IEC 751/1983 BS 1904/1984 DIN 43760/1980	DIMENSIONI - DIMENSIONS - DIMENSIONS - ABMESSUNGEN - DIMENSIONES	IMPIEGO USE UTILISATION GEBRAUCH EMPLEO
TP 9A	-70°C...+400°C	3,5"	CLASS A	150 Ø 2.7	
HD 9216S	-10°C...+70°C	% RH 5%...98%	Sonda per aria contenitore plastico - Air probe, plastic container - Sonde pour air ou gaz, conteneur plastique - Luftfühler mit Plastikgehäuse - Sonda de aire, funda de plástico	175 Ø 26	

Fig. 5.14: Caratteristiche delle sonde utilizzate per monitorare i parametri della prova di risalita (manuale Deltaohm HD9216).

Tabella 5.5: Caratteristiche tecniche del termoigrometro HD 9216 (manuale Deltaohm HD9216).

CARATTERISTICHE TECNICHE
- Display LCD a 3 ½ digit, altezza 8 mm.
- Campo di misura umidità: 5%...98% U.R., nel campo di misura di temperatura -10°C...+70°C.
- Risoluzione: 0,1 U.R.
- * Precisione in umidità strumento completo di sonda HD 9216S nel campo: 5%...90% U.R.: ±2,5% U.R. 90%...98% U.R.: +4% -2% U.R.
- ** Tempo di risposta: U.R. dal 45% al 90% al 63,3% del valore finale 2 secondi.
- Coefficiente di temperatura della sonda di umidità nel campo 0=40°C: ±0,05% U.R./°C.
- Campo di lavoro del sensore di temperatura della sonda HD 9216S: -10°C...+70°C (14°F 158°F).
- Precisione in temperatura: ±0,1°C più errore di linearizzazione (0,04°C) ±1 digit.
- Risoluzione: 0,1°C o 0,1°F.
- Tempo di risposta: 30 secondi al 63,3% del valore finale (aria in movimento velocità 1 m/secondo).
- Campo di misura in temperatura con le sonde della serie TP 9...: da -50°C a +200°C, da -60°F a +300°F.
- Precisione: la precisione strumento più sonde è data dalla somma dell'errore dello strumento più l'errore della sonda scelta (a seconda se quest'ultima è di classe A, 1/3 DIN, varia la precisione globale). Precisione solo strumento con temperatura ambiente da +18°C a +25°C per il campo di misura -50...+200°C: ±0,1°C ±0,1% della lettura ±1 digit.
- Influenza della temperatura ambiente nel campo da -5°C a 18°C e da +25°C a +50°C: max ±0,04°C/°C.
- Temperatura lavoro strumento: -5°C...+50°C.
- Temperatura magazzino: -20°C...+60°C.
- Umidità relativa: 0=90% U.R.
- Numero di conversioni al secondo: 2,5.
- Alimentazione: batteria 9V, IEC 6LF22, durata batteria zinco/carbone 100 ore circa.
- Indicazione di batteria scarica.
- Connettore strumento: connettore circolare a 8 poli maschio DIN 45326.
- Contenitore: ABS Bayer NOVODUR colore grigio 7553CF.
- Dimensione: strumento 42x185x23 mm peso 130 grammi. Kit 260x140x30 - peso 400 grammi.

3.3.Termoigrografo

Lo strumento utilizzato è un MT 1500 della SIAP+MICROS che registra in continuo contemporaneamente la temperatura e l'umidità dell'aria su zone parallele dello stesso foglio di carta diagrammabile (Fig. 5.15 e tabella 5.6). L'elemento sensibile alla temperatura è una lamina bimetallica ad anello, mentre quello sensibile all'umidità è costituito da un fasci di capelli la cui lunghezza

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

varia in funzione dell'umidità relativa. Le variazioni dei due elementi vengono trasmesse da un sistema di leve alle penne scriventi.

Tabella 5.6: Caratteristiche tecniche del termoigrografo MT 1500 (manuale SIAP+MICROS MT 1500).

Caratteristiche Tecniche	
Campo di misura	Temperatura / Temperature : 60 °C o 90 °C Rapporto / Ratio : 1,5 mm: 1 °C o 1 mm:1 °C
	Umidità / Humidity : 0÷100% su scala di 82,5 mm / on an 82,5 mm scale
Precisione	Temperatura / Temperature : ± 1% su tutta la scala / on full scale Umidità / Humidity : ± 3% su tutta la scala / on full scale
Passo	Giornaliero / Daily (30h) : 9,5 mm/h Settimanale / Weekly (180h) : 1,6 mm/h Mensile / Monthly (31gg) : 8,9 mm/g
Dimensioni	Tamburo / Drum : ø93 x 188 mm Diagramma / Chart : 323 x 185 mm Ingombro max / Max dimensions : 375 x 290 x 230 mm
Peso	4,750 kg



Fig. 5.15: Termoigrografo SIAP+MICROS modello MT 1500.

3.4.Fotocamera digitale

La fotocamera utilizzata per documentare la prova è una Nikon Coolpix P80 (Fig. 5.16), compatta ma con uno zoom ottico molto buono. Ha una risoluzione da 10,1 megapixel e con un monitor LCD da 2,7 pollici con grandangolo (Tabella 5.7).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato



Fig. 5.16: Fotocamera Nikon Coolpix P80.

Tabella 5.7: Caratteristiche tecniche fotocamera NIKON Coolpix P80 (manuale NIKON Coolpix P80).

Dimensioni [l*h*s][mm]	110 x 79 x 78
Peso [g]	365
Design	Bridge
Tipo sensore	Ccd da 1/2,33 pollici
Tipo batteria	Litio
Megapixel	10,7
Risoluzione massima [pixel]	10.70 milioni
Risoluzione reale [megapixel]	10.2
Altre risoluzioni [pixel]	3648 x 2736 (10m), 3264 x 2448 (8m), 2592 x 1944 (5m), 2048 x 1536 (3m), 1600 x 1200 (2m), 1280 x 960 (1m), 1024 x 768 (pc), 640 x 480 (tv), 3648 x 2432 (3:2), 3584 x 2016 (16:9), 2736 x 2736 (1:1)
Video	Si
Connessione pc	Usb 2.0
Mirino	Si
Apertura	F/2.8-4.5
Stabilizzatore di immagine	Si
Obiettivo	
Zoom ottico	18x
Zoom ottico (fasce filtro)	Da 10x in su
Zoom digitale	4x
Minima distanza macro [cm]	1
Zoom ottico (35mm equivalente) [mm]	4,7-84,2
Flash	
Flash interno	Si
Supporto flash esterno	Si
Display	
Tipo display	Lcd tft
Dimensione display [pollici]	2,7
Risoluzione display [pixel]	230.000
Memoria	
Tipo memoria	Secure digital
Memoria inclusa [mb]	50

4.Svolgimento della 1° prova di risalita

Per riempire la vasca, che in pianta ha dimensioni interne 65×155 cm, sono stati utilizzati tre secchi con una capienza di 14 litri. Si voleva raggiungere nella vasca un livello iniziale d'acqua di circa un centimetro sopra le piastre d'acciaio della base del muretto e per far ciò sono stati utilizzati 67,5 litri d'acqua ovvero sono stati svuotati 4 secchi completamente ed uno in parte. La prova è iniziata non appena il livello dell'acqua ha raggiunto la base del provino. Per mantenere costante il livello dell'acqua sopra le piastre per tutta la durata della prova è stata aggiunta acqua periodicamente (Tabella 5.8). In nero sono indicati i quantitativi d'acqua aggiunti istantaneamente nella vasca, mentre in rosso i quantitativi dalle bottiglie aperte e capovolte dalle quali l'acqua usciva gradualmente (Fig. 5.17).

Tabella 5.8: Quantità e tempi di aggiunta dell'acqua nella vasca.

Tempo (gg e h)	Tempo dall'inizio della prova			H ₂ O (litri)
	min	h	gg e h	
28/10/2010 10:00	0	0	0	67,5
28/10/2010 17:00	420	7	0gg e 7h	1,5
29/10/2010 14:00	1680	28	1gg e 4h	5 + 2,9
2/11/2010 8:00	7080	118	4gg e 22h	1,5 + 1,5
2/11/2010 16:00	7560	126	5gg e 6h	1,5
5/11/2010 15:00	11820	197	8gg e 5h	3
9/11/2010 10:00	18780	313	13gg e 1h	3
9/11/2010 12:00	18900	315	13gg e 3h	2,5
11/11/2010 17:00	22020	367	15gg e 7h	2,5
15/11/2010 10:00	27360	456	19gg	3
18/11/2010 13:00	31860	531	22gg e 3h	2,5
18/11/2010 17:00	32100	535	22gg e 7h	1,5
19/11/2010 14:00	33360	556	23gg e 4h	2,5
22/11/2010 9:00	37380	623	25gg e 23h	1,5
25/11/2010 9:00	41700	695	28gg e 23h	1,5
Tot.				104,9 (67,5+37,4)



Fig. 5.17: Bottiglie aperte e capovolte poste nel retro della vasca utilizzate per mantenere costante il livello d'acqua.

Ad intervalli di tempo regolari si eseguivano le seguenti operazioni:

- venivano acquisiti 2 termogrammi e 2 fotografie del fronte del muretto dalle posizioni generali del muretto e di dettaglio sulla parte inferiore del provino (Fig. 5.20 - 5.23),
- i valori di risalita di umidità venivano misurati con un metro in mezzera, sulla fessura (fronte e retro del muretto) e sulle facce laterali del provino (Fig. 5.18) e venivano riportati in una tabella di appunti (Fig. 5.19),
- si misuravano temperatura e umidità dell'aria con il termoigrometro digitale manuale,
- si monitoravano temperatura e umidità dell'aria con un termoigrografo posto in sommità al muretto (cfr. allegati 1, 2 e 3),
- si misurava la temperatura di contatto del mattone posto al centro del fronte del muretto e dell'acqua della vasca con il termoigrometro digitale manuale.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

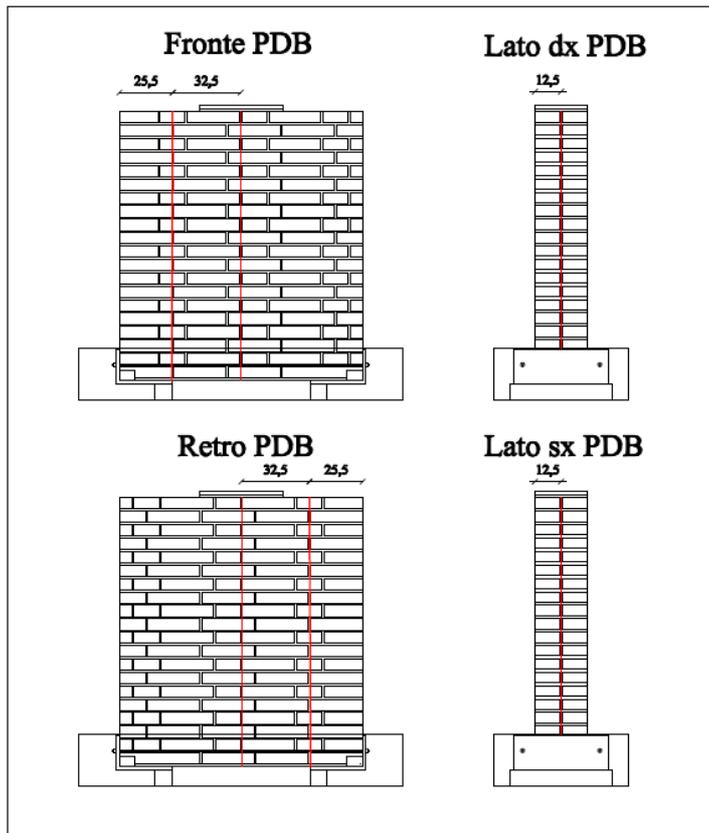


Fig. 5.18: Sezioni di controllo del valore di risalita capillare sul muretto PDB.

Muretto PDB
Fessurato
OCA 9,55

$T_{amb} = 16,3^{\circ}\text{C}$ $UR_{calc} = 44\%$ $23/10/10$
 $T_{int} = 17,7^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 18,3^{\circ}\text{C}$ $1^{\circ}\text{sp. eq. dati}$

RISALITA CAPILLARE D'ACQUA DAL BASSO

MANUTI TRASCORRI	RISALITA FESSURA RETRO	RISALITA FESSURA R	TEMPERATURA	UMIDITA'
00	4 cm	5 cm	$T_{int} = 15,3^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 14,1^{\circ}\text{C}$ QUANTITA' = 18,2°C	44%
15'	6 cm	5,5	NOTE: AL RASO ACQUA NEL RETRO	
30'	6	4,5		
45'	6	5		X X X X
1 h	6,5	6	$T_{amb} = 18,1^{\circ}\text{C}$ $T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 17,5^{\circ}\text{C}$	44% X X X X
1 h 30'	6,7	7,2		X X X X
2 h	7	7,2	$T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 16,1^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 18,2^{\circ}\text{C}$	47,8% X X X X
3 h	7,2	6,2	$T_{int} = 18,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 17,2^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,1^{\circ}\text{C}$	48,8% X X X X
4 h	7,8	6,5	$T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 18,9^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,2^{\circ}\text{C}$	46,5% X X X X
5 h	7,8	6,5	$T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 17,2^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,2^{\circ}\text{C}$	47,2% X X X X
6 h	7,8	6,5	$T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 17,2^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,2^{\circ}\text{C}$	47,2% X X X X
7 h	7,8	6,5	$T_{int} = 17,1^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 17,2^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,5^{\circ}\text{C}$	43,8% X X X X
22 h	7,8	7,5	$T_{int} = 17,8^{\circ}\text{C}$ $T_{ext} = 16,7^{\circ}\text{C}$ $T_{amb} = 17,5^{\circ}\text{C}$	47,2% X X X X

Fig. 5.19: Foglio di campagna relativo ai primi dati della prova di risalita capillare sul muretto.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

La termocamera fissata al treppiedi è stata appoggiata sopra tre bancali perché l'estensione massima del treppiedi non permetteva di inquadrare il muretto nella sua interezza e quindi per avere una visuale più ampia si è dovuto salire in altezza. Per ripetere i rilievi con precisione sempre dalle medesime distanze sono stati segnati tutti i riferimenti delle posizioni degli strumenti: con un pennarello indelebile sono state tracciate le impronte dei treppiedi e dei bancali sul pavimento, così come gli angoli di inclinazione dei supporti della macchina fotografica e della termocamera sul treppiedi.

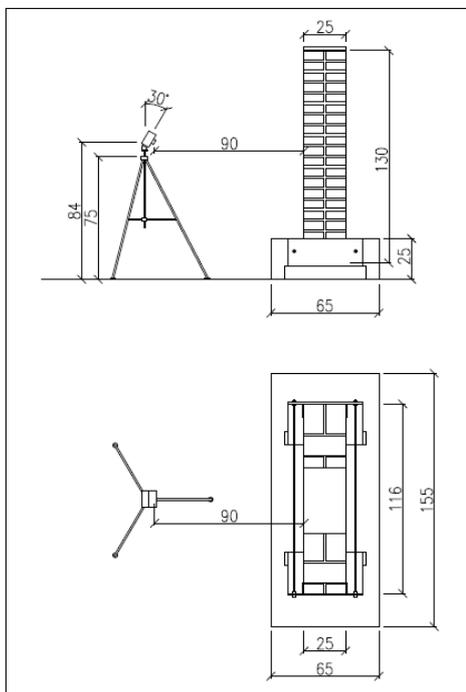


Fig. 5.20: Posizione ravvicinata della fotocamera, inquadra la base del muretto fino al corso 12, vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

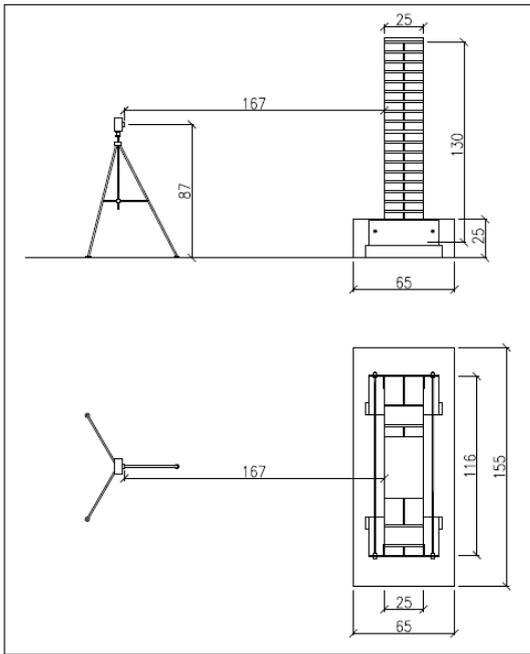


Fig. 5.21: Posizione più distante della fotocamera, inquadra il muretto completamente, vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

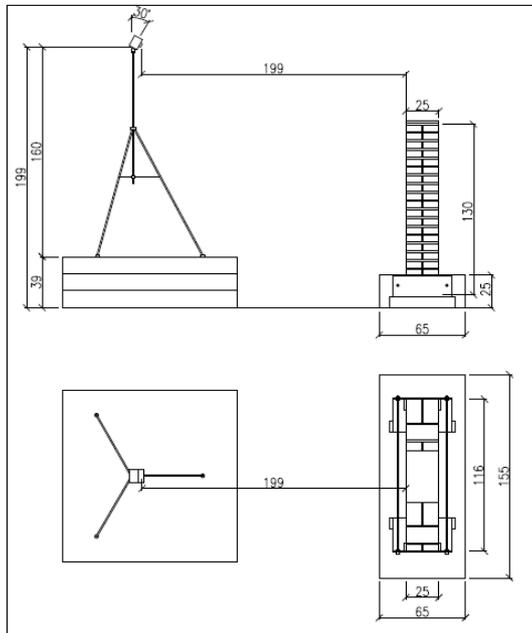


Fig. 5.22: Posizione ravvicinata della termo camera, inquadra la base del muretto fino al corso 12, vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

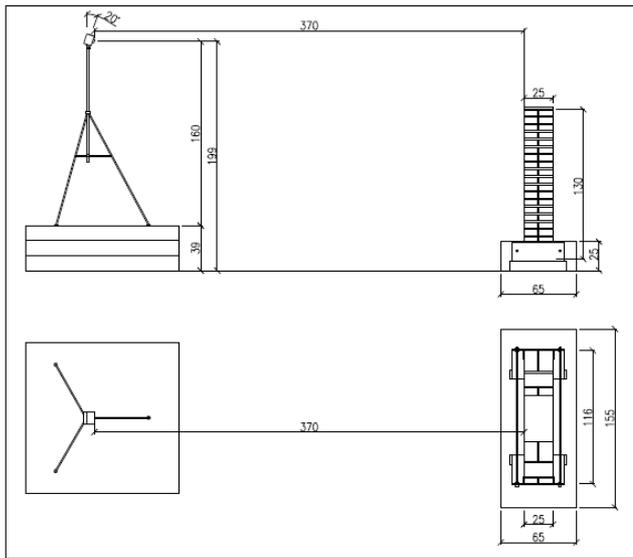


Fig. 5.23: Posizione più distante della termo camera, inquadra il muretto completamente, vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

All'inizio della prova i lati del muretto non erano monitorati perché nella parte inferiore erano coperti dalle piastre angolari. Dopo 7 giorni e 3 ore si è pensato di tenere sotto controllo anche la risalita nei due lati che era ormai visibile avendo raggiunto un livello maggiore dell'altezza delle due piastre.

Durante lo svolgimento della prova la cospicua evaporazione ha portato alla cristallizzazione dei sali sulla superficie del muretto anche se non è stata utilizzata una soluzione salina per effettuare la prova, ma semplicemente acqua del rubinetto. Sono stati acquisiti dei termogrammi di particolare sui depositi che mostrano una temperatura dei sali maggiore rispetto alla zona circostante (Fig. 5.24).

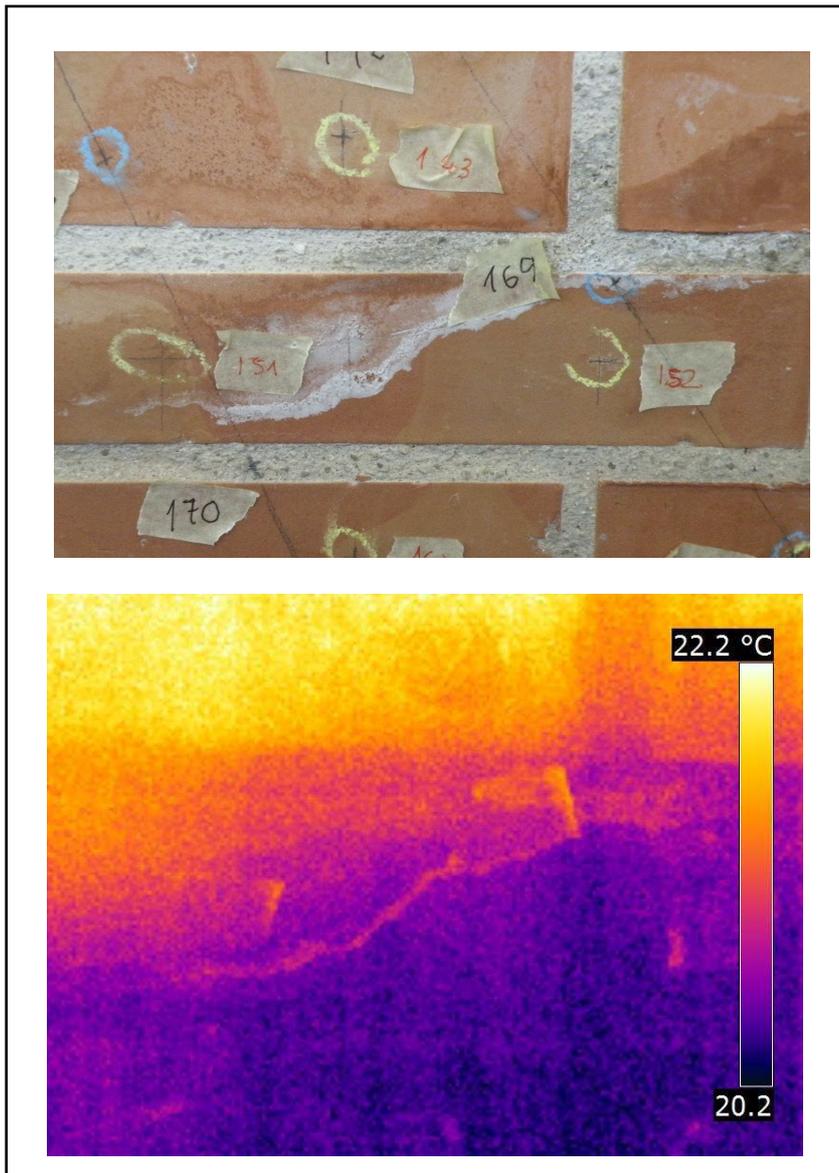


Fig. 5.24: Fotografia e termogramma dei sali cristallizzati in seguito all'evaporazione

I valori dell'altezza di risalita letti con l'aiuto di un righello nelle 6 zone di controllo sono stati inseriti in una tabella Excel ed è stata calcolata la media dei valori letti sulla fessura e sulla mezzeria nel fronte e nel retro del muretto (Tabella 5.9).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Tabella 5.9: Valori di risalita e media della risalita sulla fessura e in mezzeria

Tempo dall'inizio (gg)	Tempo (min)	Fess. fronte (mm)	Mezz. fronte (mm)	Fess. retro (mm)	Mezz. retro (mm)	Faccia DX (mm)	Faccia SX (mm)	Media fess. (mm)	Media mezz. (mm)
28/10/2010 10.00	0	0	0	0	0			0	0
28/10/2010 10.05	5	40	30	40	30			40	30
28/10/2010 10.15	15	60	40	65	35			62,5	37,5
28/10/2010 10.30	30	60	45	70	40			65	42,5
28/10/2010 10.45	45	60	50	70	45			65	47,5
28/10/2010 11.00	60	65	60	72	47			68,5	53,5
28/10/2010 11.30	90	67	60	72	52			69,5	56
28/10/2010 12.00	120	70	60	72	57			71	58,5
28/10/2010 13.00	180	72	62	72	57			72	59,5
28/10/2010 14.00	240	78	65	95	57			86,5	61
28/10/2010 15.00	300	78	65	97	57			87,5	61
28/10/2010 16.00	360	78	65	100	57			89	61
28/10/2010 17.00	420	78	65	113	57			95,5	61
29/10/2010 8.00	1320	78	75	122	125			100	100
29/10/2010 9.00	1380	78	75	123	125			100,5	100
29/10/2010 10.00	1440	78	75	123	125			100,5	100
29/10/2010 11.00	1500	78	75	123	125			100,5	100
29/10/2010 12.00	1560	78	75	123	125			100,5	100
29/10/2010 14.00	1680	78	75	125	125			101,5	100
02/11/2010 8.00	7080	197	142	224	165			210,5	153,5
02/11/2010 10.00	7200	197	142	227	165			212	153,5
02/11/2010 12.00	7320	197	142	230	165			213,5	153,5
02/11/2010 14.00	7440	197	142	230	165			213,5	153,5
02/11/2010 16.00	7560	197	142	230	165			213,5	153,5
03/11/2010	8580	205	142	250	165			227,5	153,5

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

9.00									
03/11/2010									
11.00	8700	205	142	250	165			227,5	153,5
03/11/2010									
13.00	8820	205	142	250	165			227,5	153,5
03/11/2010									
15.00	8940	205	142	250	165			227,5	153,5
04/11/2010									
9.00	10020	210	142	257	165			233,5	153,5
04/11/2010									
11.00	10140	210	142	260	165			235	153,5
04/11/2010									
13.00	10260	215	142	260	165	168	165	237,5	153,5
04/11/2010									
15.00	10380	217	142	260	170	183	165	238,5	156
04/11/2010									
17.00	10500	217	142	260	170	183	165	238,5	156
05/11/2010									
9.00	11460	218	150	275	170	200	165	246,5	160
05/11/2010									
11.00	11580	218	150	275	170	200	165	246,5	160
05/11/2010									
13.00	11700	218	150	275	170	205	165	246,5	160
05/11/2010									
15.00	11820	218	150	275	170	205	165	246,5	160
08/11/2010									
8.00	17160	218	167	275	205	240	205	246,5	186
08/11/2010									
10.00	17280	218	167	275	210	243	205	246,5	188,5
08/11/2010									
12.00	17400	218	167	275	210	245	210	246,5	188,5
08/11/2010									
14.00	17520	218	170	285	210	245	210	251,5	190
08/11/2010									
16.00	17700	218	170	285	210	245	210	251,5	190
09/11/2010									
8.00	18660	218	175	290	215	250	210	254	195
09/11/2010									
10.00	18780	218	175	290	215	250	210	254	195
09/11/2010									
12.00	18900	218	175	290	215	250	210	254	195
09/11/2010									
14.00	19020	218	175	290	215	250	210	254	195
09/11/2010									
16.00	19140	218	178	295	215	250	210	256,5	196,5
10/11/2010									
8.00	20040	218	180	295	215	260	217	256,5	197,5
10/11/2010									
10.00	20160	218	180	295	215	260	217	256,5	197,5
10/11/2010									
12.00	20280	218	180	295	215	260	217	256,5	197,5
10/11/2010									
14.00	20400	218	180	295	215	260	217	256,5	197,5
10/11/2010									
16.00	20520	218	180	295	215	260	217	256,5	197,5

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

11/11/2010										
9.00	21540	218	185	300	215	269	225	259	200	
11/11/2010										
11.00	21660	218	185	304	215	269	225	261	200	
11/11/2010										
13.00	21780	218	185	304	215	269	225	261	200	
11/11/2010										
15.00	21900	218	185	304	215	269	225	261	200	
11/11/2010										
17.00	22020	220	190	304	215	269	225	262	202,5	
12/11/2010										
8.00	22920	225	200	313	220	270	235	269	210	
12/11/2010										
10.00	23040	225	200	313	220	270	235	269	210	
12/11/2010										
12.00	23160	225	200	313	220	270	235	269	210	
12/11/2010										
14.00	23280	225	205	318	220	270	235	271,5	212,5	
15/11/2010										
8.00	27240	225	225	330	250	290	255	277,5	237,5	
15/11/2010										
10.00	27360	225	225	330	250	290	255	277,5	237,5	
15/11/2010										
12.00	27480	225	225	330	250	290	255	277,5	237,5	
15/11/2010										
14.00	27600	225	225	330	250	290	255	277,5	237,5	
16/11/2010										
9.00	28740	225	233	345	257	293	260	285	245	
16/11/2010										
13.00	28980	225	233	345	257	295	265	285	245	
16/11/2010										
17.00	29220	225	235	345	257	295	265	285	246	
17/11/2010										
8.00	30120	235	240	345	257	305	275	290	248,5	
17/11/2010										
14.00	30480	235	240	345	257	310	275	290	248,5	
18/11/2010										
9.00	31620	235	240	345	257	315	280	290	248,5	
18/11/2010										
13.00	31860	235	240	345	257	315	280	290	248,5	
18/11/2010										
17.00	32100	245	250	345	260	315	285	295	255	
19/11/2010										
9.00	33060	245	250	345	260	315	285	295	255	
19/11/2010										
14.00	33360	245	260	345	260	315	285	295	260	
22/11/2010										
9.00	37380	245	265	345	260	315	285	295	262,5	
22/11/2010										
15.00	37740	250	265	345	260	315	285	297,5	262,5	
23/11/2010										
9.00	38820	250	265	345	260	315	285	297,5	262,5	
24/11/2010										
9.00	40260	255	265	345	260	315	285	300	262,5	
25/11/2010										
	41700	255	265	345	260	315	285	300	262,5	

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

9.00										
26/11/2010										
9.00	43140	255	265	345	260	315	290	300	262,5	

La prova è stata ritenuta conclusa quando la curva che descrive l'andamento della risalita dell'acqua all'interno del muretto è diventata asintotica. Ciò è avvenuto dopo 29 giorni e 23 ore dall'inizio della prova (Tabella 5.10) quando la risalita aveva raggiunto già il 6° corso murario.

Tabella 5.10: Durata della prova di risalita capillare.

Provino	Inizio prova	Fine prova	Durata prova
Muretto PDB fessurato	28/10/2010 ore 10:00	26/11/2010 ore 9:00	29 gg e 23 h (43140 min)

Visualizzazione di termogrammi e fotografie

A occhio nudo la risalita nel muretto non è di facile lettura perché ci possono essere sui laterizi macchie di colore più scuro che non identificano necessariamente il livello raggiunto dall'acqua. Invece analizzando i termogrammi si riesce a distinguere chiaramente la muratura bagnata da quella non ancora raggiunta dall'acqua. I termogrammi possono essere visualizzati con diverse scale cromatiche (tavolozze) tra cui le più utilizzate sono "Grey" in scala di grigi e "Iron" in scala multicolore. La tavolozza "Grey" è forse più precisa e permette di cogliere anche le variazioni di temperatura più piccole, ma con la tavolozza "Iron" è possibile una lettura più facile e immediata del termogramma. Di seguito sono riportati una serie di termogrammi in falsi colori utilizzando la tavolozza "Iron" con le relative fotografie che colgono i momenti più significativi della prova. I termogrammi sono stati acquisiti per tutta la durata della prova e quindi si aveva a disposizione una mole di dati molto importante. Le variazioni tra un termogramma e il successivo in ordine di tempo sono poco evidenti, quindi si è cercato di scegliere il termogramma di miglior qualità che poteva rappresentare lo stato del muretto in un arco di tempo nel quale l'andamento della risalita capillare era simile. Quattro dei sette termogrammi riportati nel seguito si riferiscono alla

prima settimana di prova in quanto lo stato della risalita capillare cambia più velocemente all'inizio per poi stabilizzarsi con il passare del tempo.

Elaborazione dei termogrammi

Per ogni termogramma con l'utilizzo del software FLIR QuickReport, fornito dalla casa produttrice delle termocamere, sono stati cambiati i parametri (emissività, temperatura ambiente, umidità ambiente, distanza tra termocamera e oggetto, ecc...) che al momento dell'acquisizione erano impostati su valori di default. Cambiando i parametri la differenza sui termogrammi è quasi impercettibile, perché effettivamente i parametri di default non si allontanavano molto da quelli reali (Tabella 5.11). Con lo stesso programma è stato possibile modificare la scala di temperatura, cercando il valore massimo e minimo che rendevano il termogramma il più leggibile possibile. Dove possibile si è cercato di utilizzare la stessa scala per il termogramma acquisito dalla posizione ravvicinata e per quello acquisito dalla posizione lontana allo stesso istante di tempo.

Tabella 5.11: Confronto tra il valore reale ed il valore di default dei parametri della termocamera.

PARAMETRI	Valore di default	Valore reale (medio)
Emissività	1.00	0.95
Temp. di riferimento	20.0 °C	20.0 °C
Distanza di acquisizione	1 m	3 m
Umidità relativa ambiente di prova	50 %	47.8 %
Temp. atmosferica ambiente di prova	20.0 °C	21.3 %

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

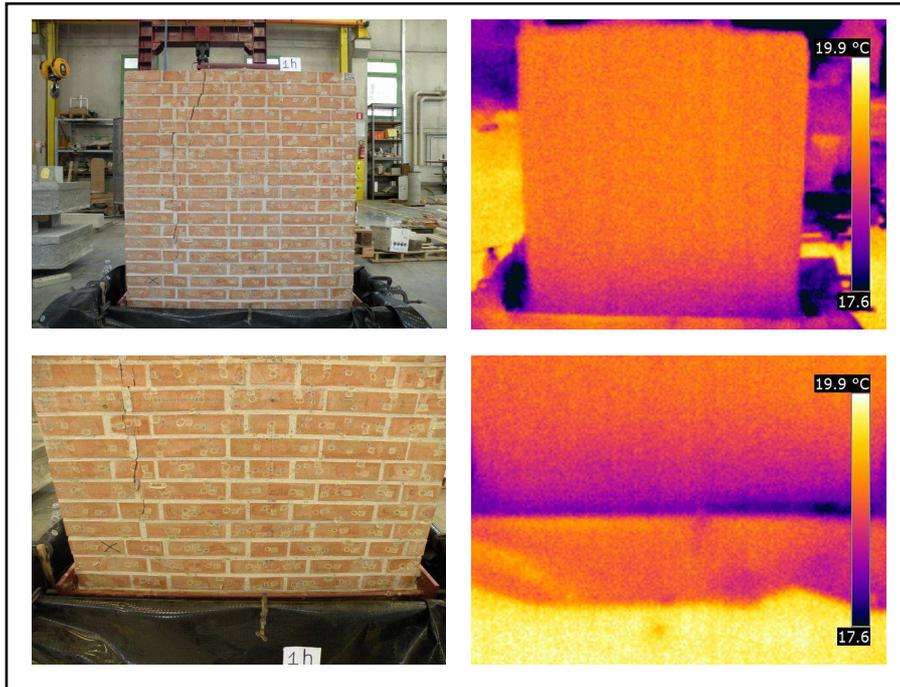


Fig. 5.25: Fotografie e termogrammi elaborati a 1 h dall'inizio della prova (FLIR B250).

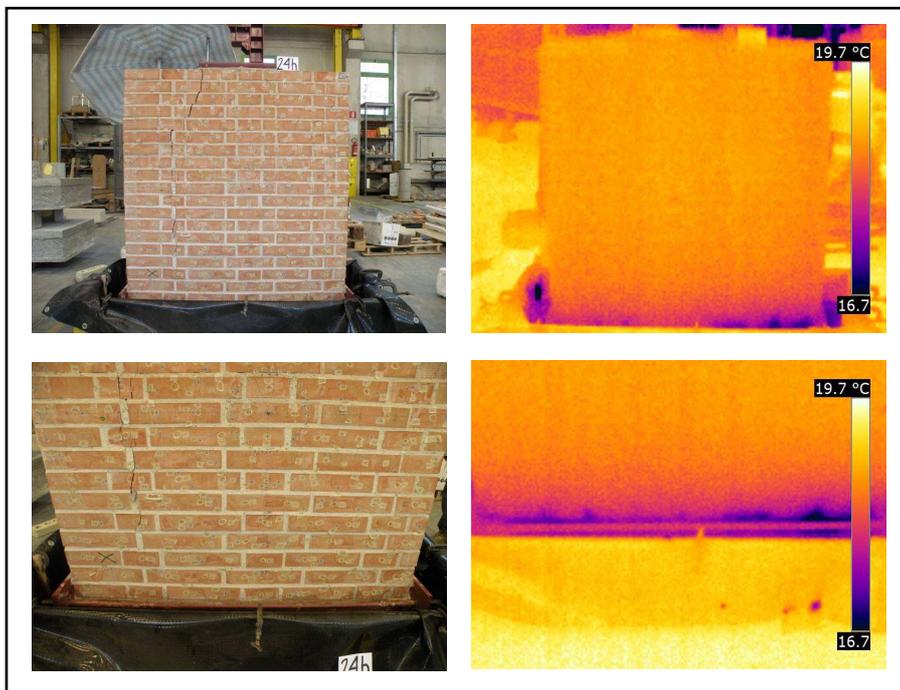


Fig. 5.26: Fotografie e termogrammi elaborati a 24 h dall'inizio della prova (FLIR B250).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

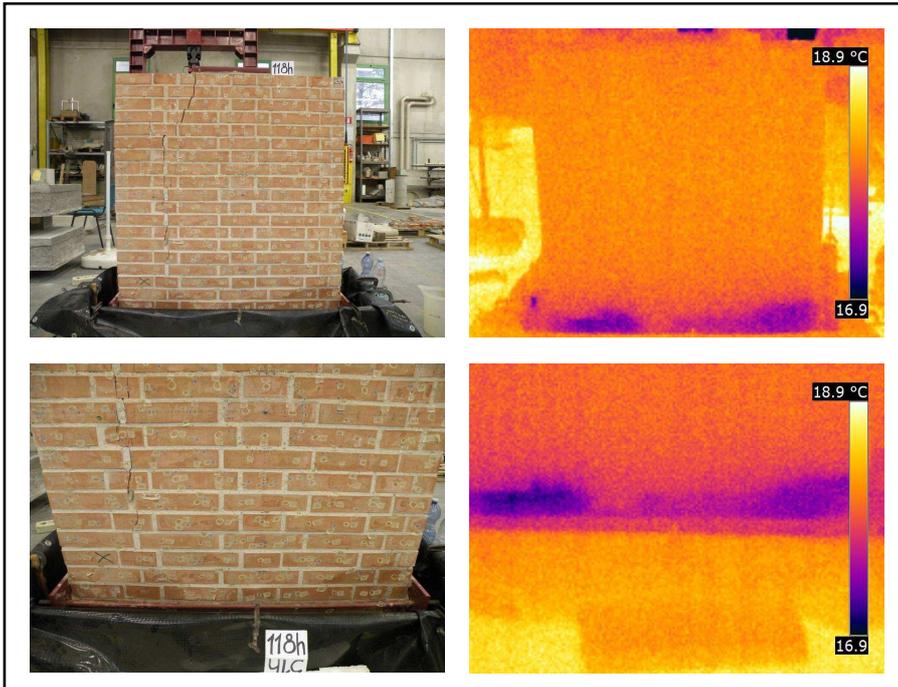


Fig. 5.27: Fotografie e termogrammi elaborati a 118 h (4gg e 22h) dall'inizio della prova (FLIR B250).

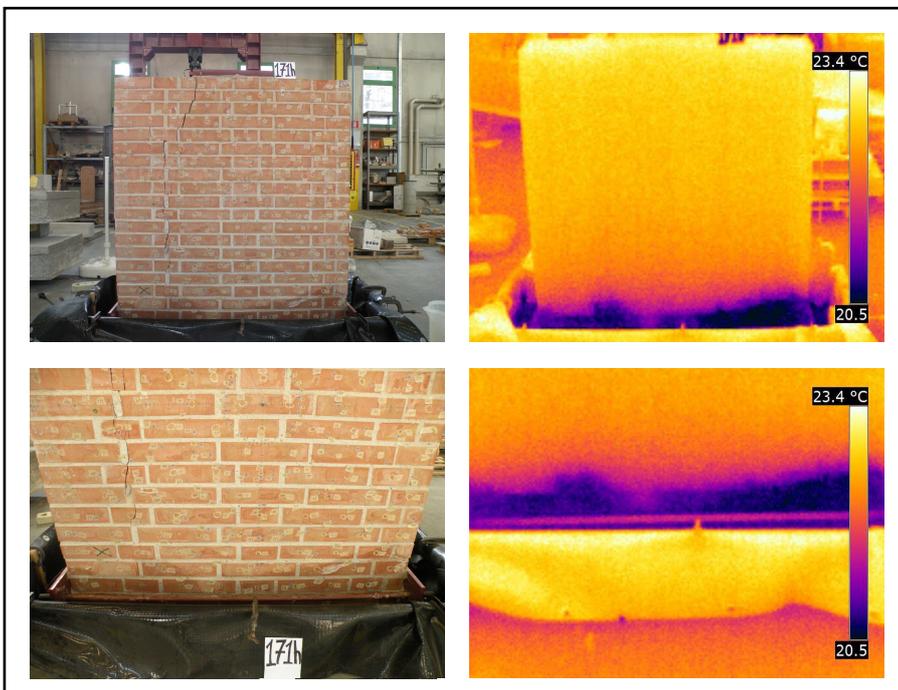


Fig. 5.28: Fotografie e termogrammi elaborati a 171 h (7gg e 3h) dall'inizio della prova (FLIR B250).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

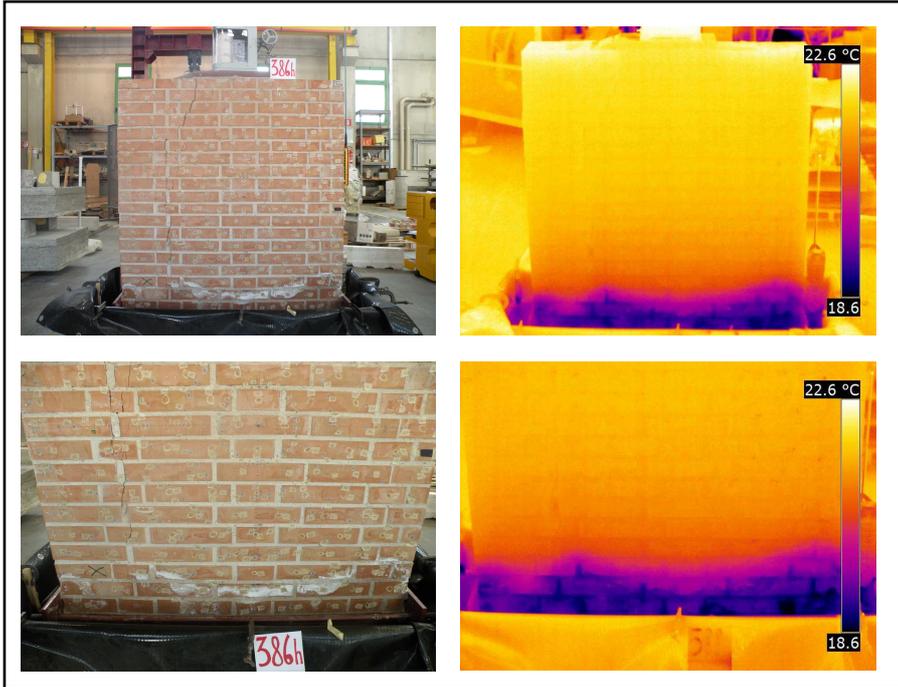


Fig. 5.29: Fotografie e termogrammi elaborati a 386 h (16gg e 2h) dall'inizio della prova (FLIR P620).

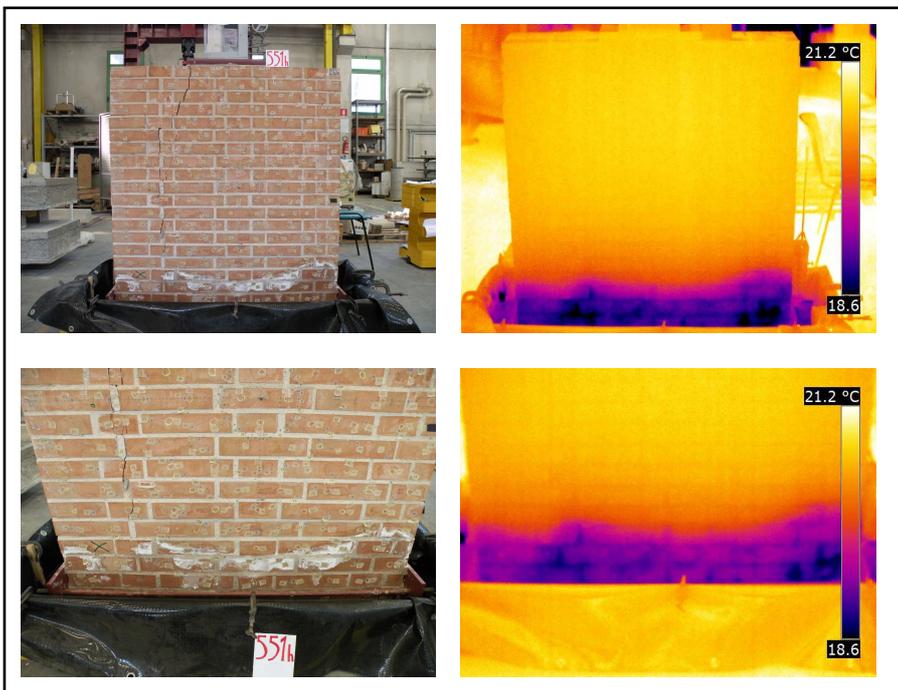


Fig. 5.30: Fotografie e termogrammi elaborati a 551 h (22gg e 23h) dall'inizio della prova (FLIR P620).

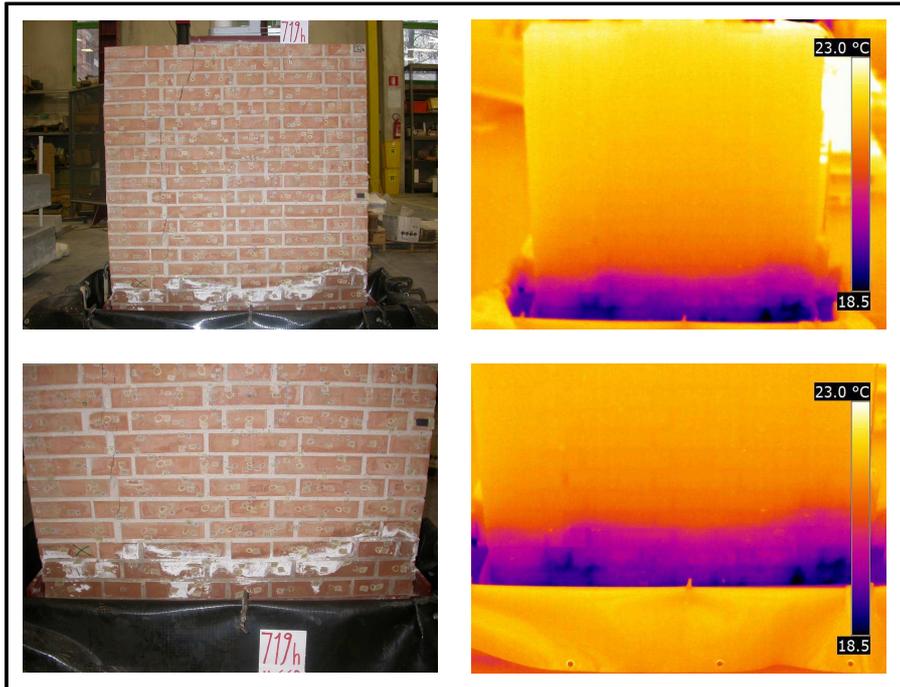


Fig. 5.31: Fotografie e termogrammi elaborati alla fine della prova dopo 29gg e 23h (FLIR P620).

La fessura è visibile solo nella zona sinistra del muretto, però dato che il muretto ha subito una prova di rottura con carico centrato, le tensioni massime si sono sicuramente distribuite simmetricamente nella zona destra e nella zona sinistra. Analizzando l'andamento della risalita capillare si nota infatti che questa è pressoché simmetrica a destra e a sinistra (Fig. 5.31) e ciò conferma che anche nella zona destra dove non sono visibili macrofessure sono presenti delle lesioni interne o delle microfessure.

Tramite il software QuickReport con la funzione “puntatore” è possibile leggere il valore di temperatura in un punto sul termogramma, quindi spostando il puntatore è stato possibile valutare la temperatura superficiale nel mattone centrale (esempio in Fig. 5.32). La temperatura in quel mattone era stata monitorata periodicamente per tutta la durata della prova anche con il termoigrometro digitale. Confrontando i valori di temperatura forniti dai due strumenti è possibile valutare l'accuratezza della misura effettuata con la termocamera (Tabella 5.12).

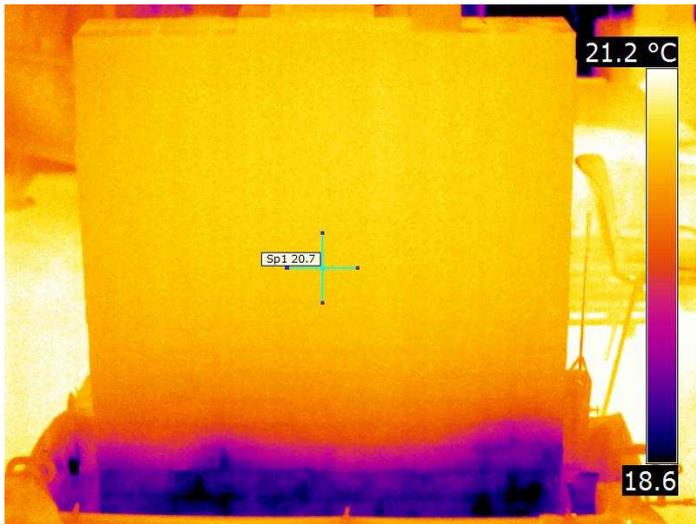


Fig. 5.32: Esempio di termogramma elaborato a 551 h dall'inizio della prova con puntatore che indica il valore di temperatura.

Tabella 5.12: Differenza tra la temperatura rilevata con il puntatore sul termogramma e quella rilevata dal termoigrometro sul mattone centrale del muretto.

Tempo (h)	T. puntatore (°C)	T. termoigrometro (°C)	Differenza in valore assoluto (°C)
1	18,9	17,5	1,4
24	18,8	18	0,8
118	18,1	18,5	0,4
171	22,6	22,9	0,3
386	21,7	22,1	0,4
551	20,7	21	0,3
719	21,8	22,1	0,3

Entrambe le termocamere riportano tra le caratteristiche, descritte nelle rispettive schede tecniche, un errore massimo nella misurazione di circa 2 °C, ma l'errore solitamente ha valori inferiori (Tab. 5.12).

Interpretazione dei dati

Con Excel è stato creato un grafico tempo–altezza di risalita, nel quale sono state inserite anche le curve relative alla temperatura dell'aria, dei mattoni e dell'acqua

e all'umidità relativa dell'ambiente (Fig. 5.35). Con delle linee rosse orizzontali sono indicate le altezze delle interfacce mattone-giunto di malta per ogni corso raggiunto dall'acqua. Da questo grafico si può notare che nelle diverse posizioni i valori dell'altezza di risalita sono differenti, ma l'andamento è simile. Infatti la risalita è sempre più lenta all'avanzare del tempo fino ad arrivare a stabilizzarsi tendendo all'asintoto orizzontale.

La risalita maggiore si ha in prossimità della fessura sul retro del muretto, mentre nella fessura sul fronte dopo una rapida crescita iniziale la risalita si è quasi arrestata ed è risultata la più bassa al termine della prova. Come noto (cfr. Cap.1) la risalita capillare avviene con velocità inversamente proporzionale al diametro del condotto, quindi più piccolo è il diametro, maggiore sarà la velocità di risalita. Questo fatto può spiegare la rapida crescita del livello dell'acqua in prossimità delle fessure ed anche l'arresto della risalita nella fessura del fronte quando il diametro della stessa è diventato troppo grande.

Si riportano altri tre grafici: uno mostra le curve delle temperature e dell'umidità in una scala adeguatamente ridotta (Fig. 5.36), gli altri due sono uno zoom del grafico con le curve di risalita relativi rispettivamente ai primi 2 giorni (Fig. 5.34) e alle prime 7 ore di prova (Fig. 5.33). Questi due grafici non contengono informazioni aggiuntive rispetto al primo, ma permettono una visualizzazione migliore delle curve che erano sovrapposte o troppo schiacciate. Dal grafico che riporta le curve delle temperature si può vedere che quando la temperatura dell'aria varia, la temperatura del muretto tende a raggiungerne lo stesso valore in poco tempo, mentre quella dell'acqua rimane più stabile attorno allo stesso valore indipendentemente dai cambiamenti. Infatti caratteristica dell'acqua è quella di cedere o assorbire calore molto lentamente.

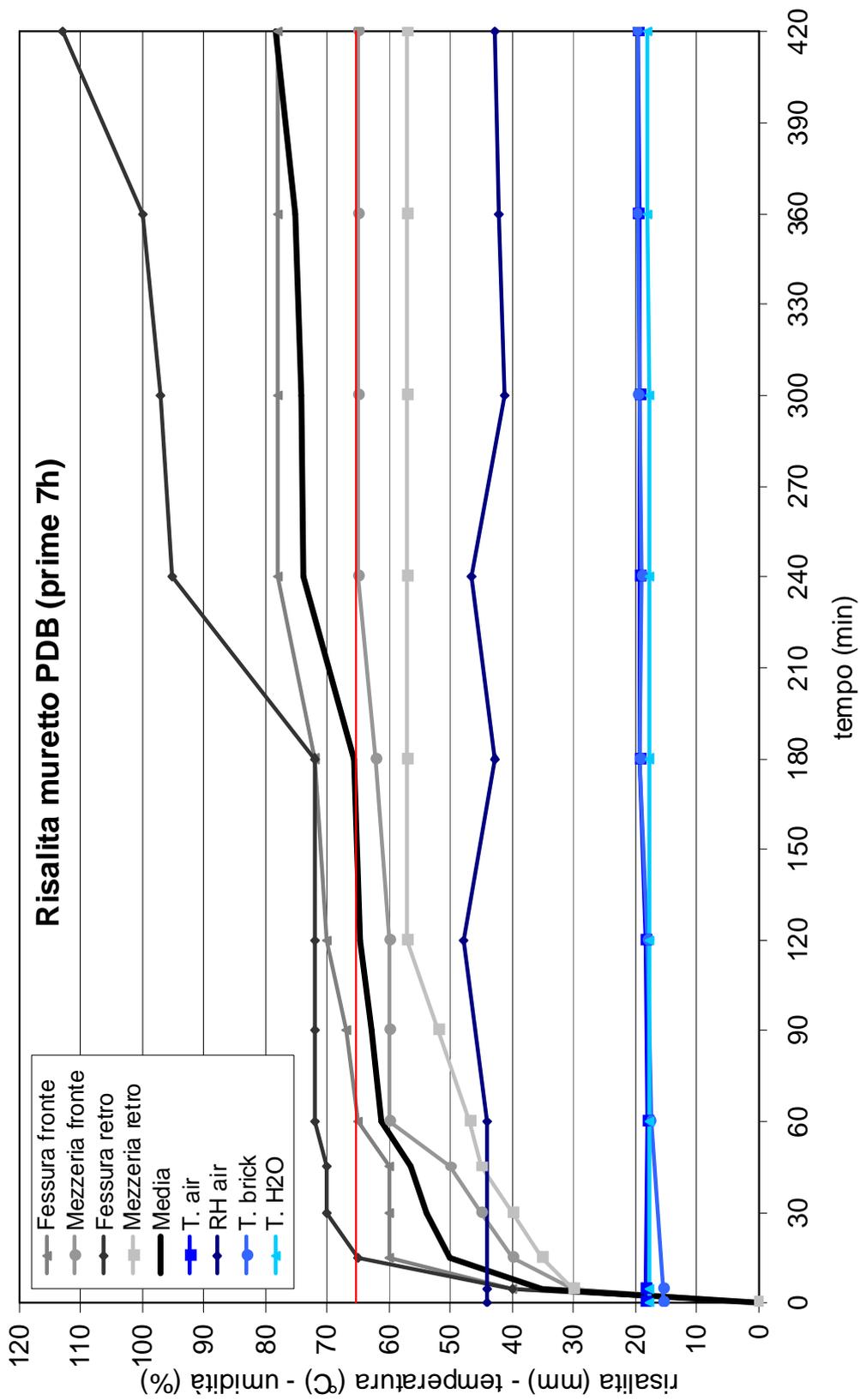


Fig. 5.33: Muretto PDB: risalita dell'acqua per capillarità nelle prime 7 h di prova.

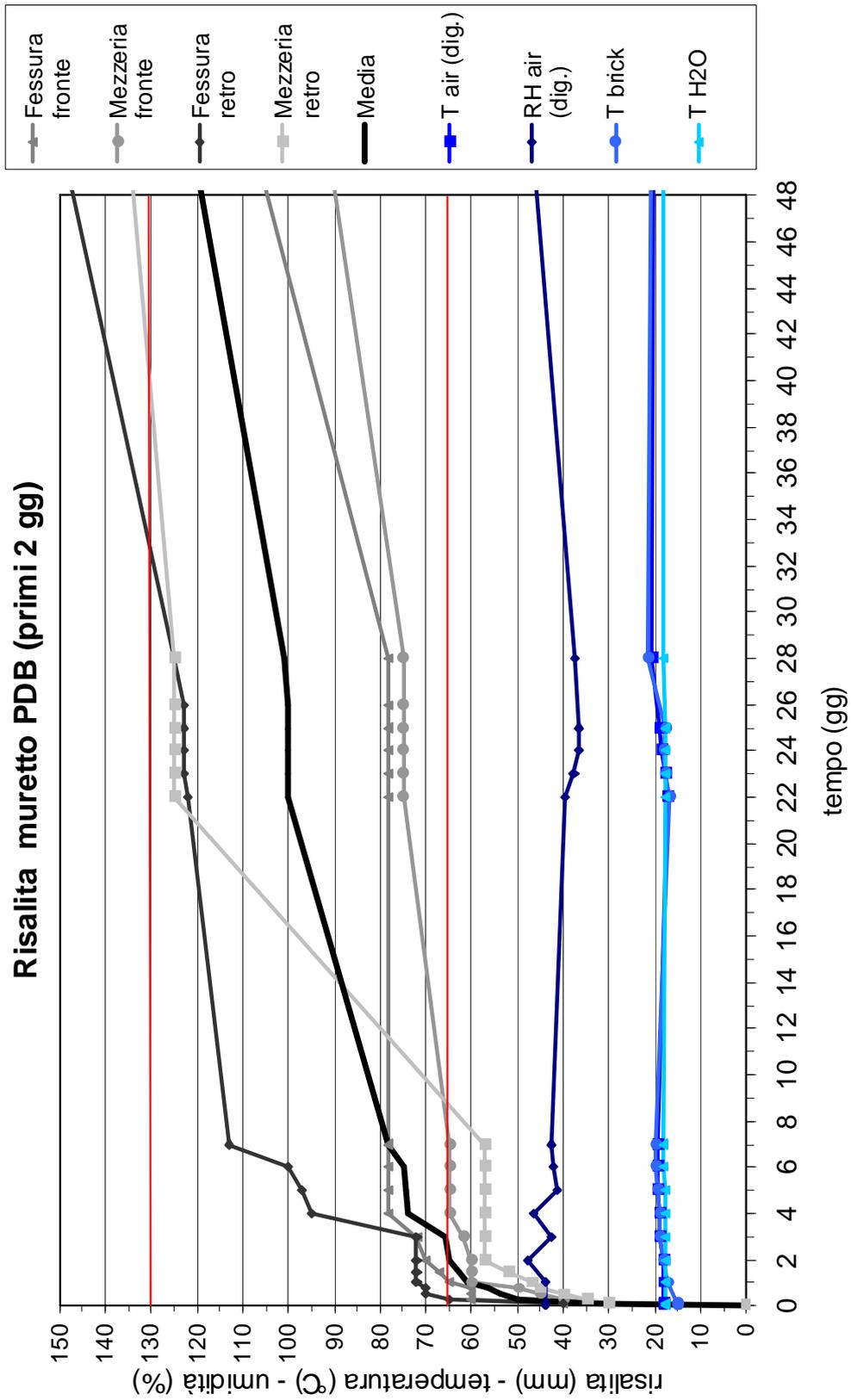


Fig. 5.34: Muretto PDB: risalita dell'acqua per capillarità nei primi 2 gg di prova.

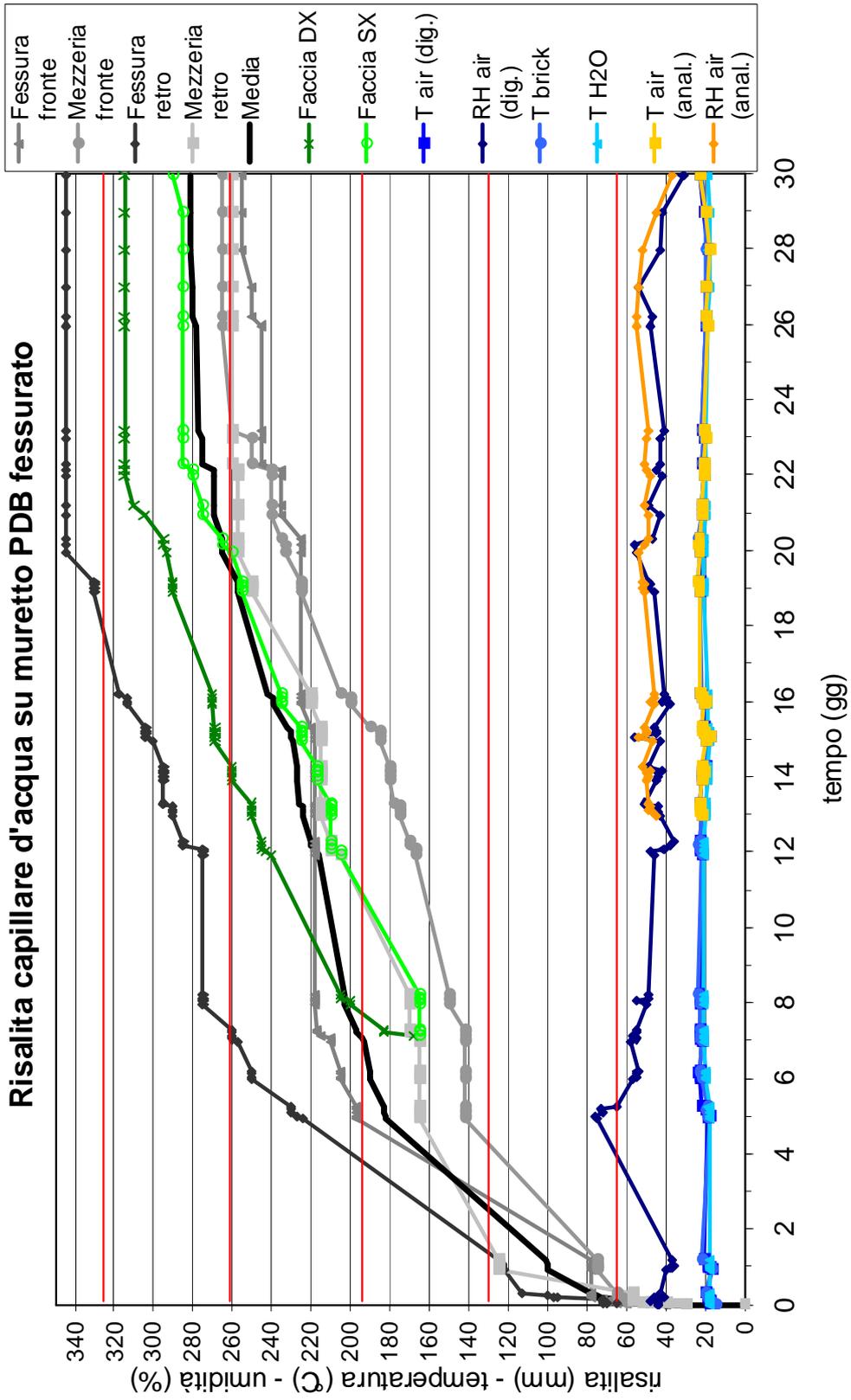


Fig. 5.35: Muretto PDB: risalita dell'acqua per capillarità.

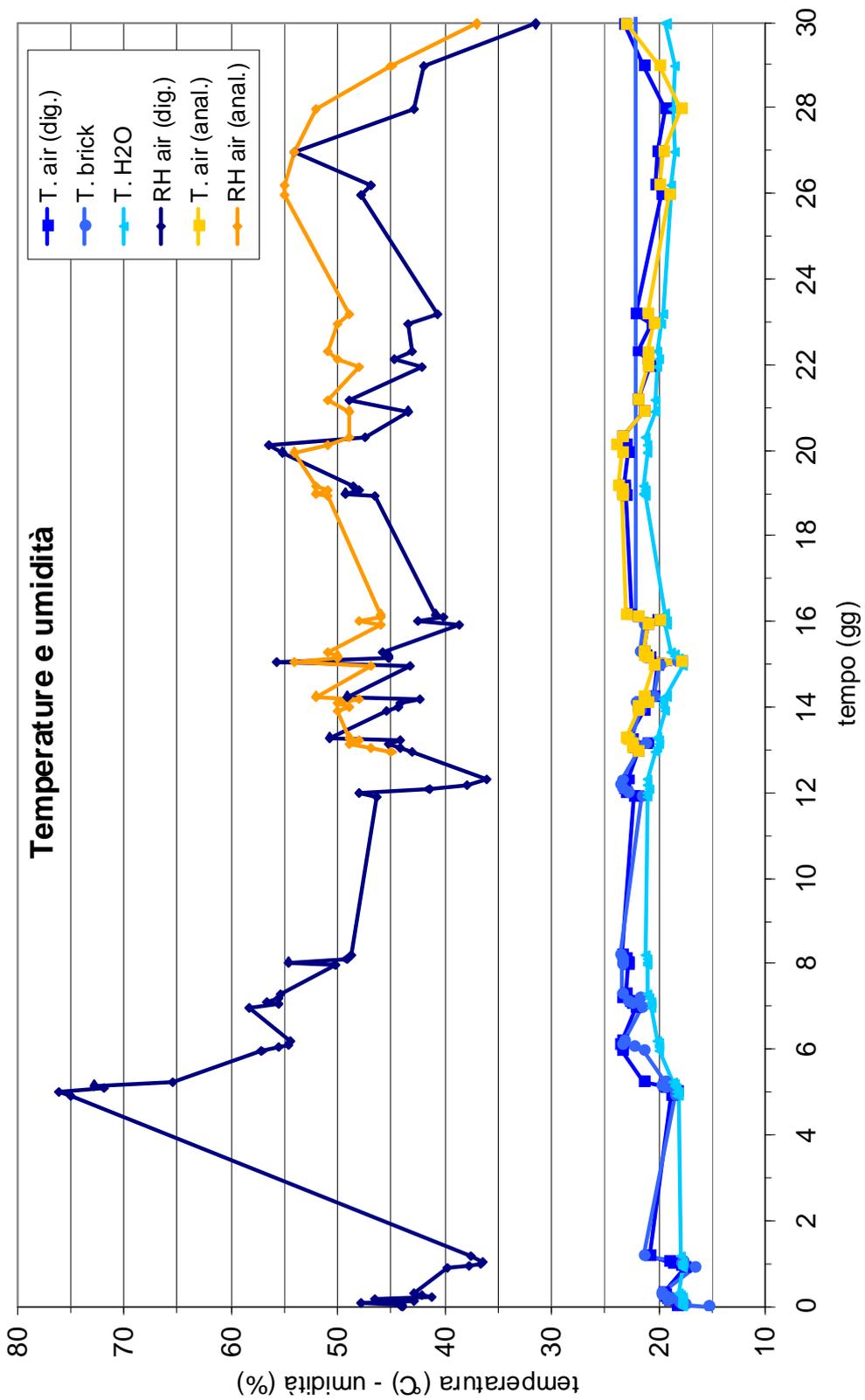


Fig. 5.36: Muretto PDB: andamento delle temperature e dell'umidità.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

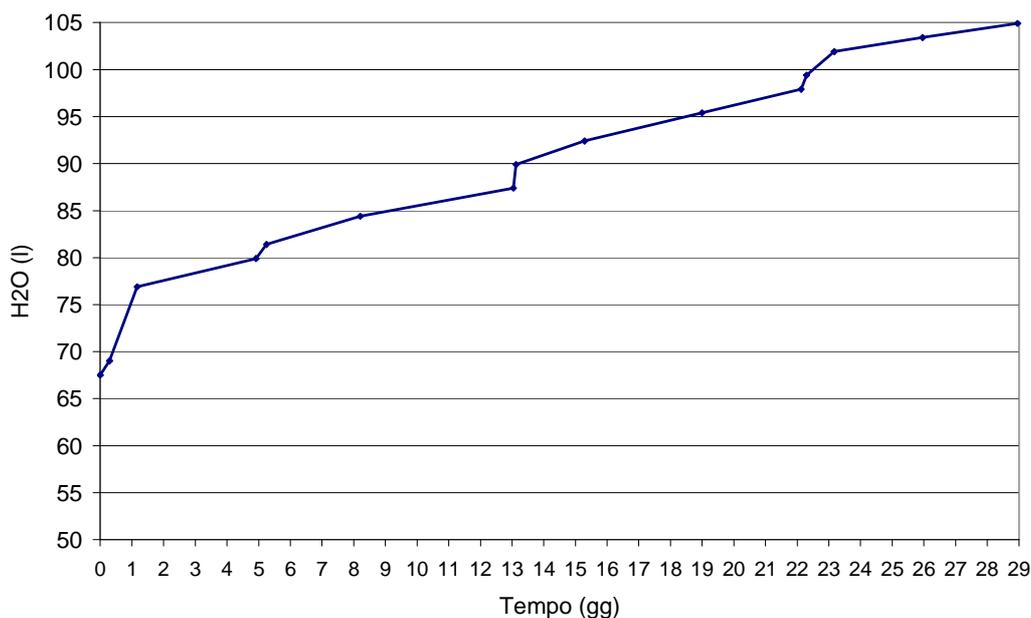


Fig. 5.37: Quantità d'acqua aggiunta nella vasca durante tutto il corso della prova.

Tabella 5.13: Valori porosimetrici dei laterizi e della malta utilizzati nella costruzione del muretto PDB.

Campione	Raggio medio dei pori (μm)	Porosità aperta (%)	densità geometrica (g/cm^3)
laterizio 1 -interno	0,365	32,59	1,78
laterizio 1 -sup. corta	0,359	33,98	2,06
laterizio 1 -sup. lunga	0,357	33,77	1,93
laterizio 2 -interno	0,377	32,58	1,75
laterizio 2 -sup. corta	0,408	30,30	1,79
laterizio 2 -sup. lunga	0,377	34,31	1,87
laterizio 3 -interno	0,474	32,96	1,65
laterizio 3 -sup. corta	0,474	32,45	1,81
laterizio 3 -sup. lunga	0,408	34,98	1,86
Media	0,40	33,10	1,83
malta	0,648	27,07	2,04

Il volume totale di muretto che ha assorbito acqua è 81550 cm^3 e la porosità percentuale media tra mattoni e malta è circa del 30%, quindi si può stimare che l'acqua presente nei pori del muretto al termine della prova sia pari a 26093 cm^3 ,

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

che equivalgono a 26 litri. La quantità d'acqua aggiunta nella vasca durante tutto il corso della prova è stata di 37,4 litri (Fig. 5.37), perciò si può supporre che gran parte dell'acqua sia stata assorbita e i restanti 11,4 litri siano evaporati (Tab. 5.14).

Tabella 5.14: Acqua evaporata e acqua assorbita dal muretto.

H ₂ O totale (l)		
104,9		
H ₂ O iniziale (l)	H ₂ O risalita (l)	
67,5	37,4	
	H ₂ O capillare (l)	H ₂ O evaporata (l)
	26	11,4
	69,5 (%)	30,5 (%)

Rilievo manuale della risalita al termine della 1° prova

Al termine della prova due fogli di carta da lucido sono stati attaccati con nastro adesivo alla base del fronte del muretto per effettuare un rilievo del livello di risalita d'acqua. Con pennarelli di diverso colore sono stati ricalcati anche i mattoni e lo stato fessurativo (Fig. 5.38 - 5.40).

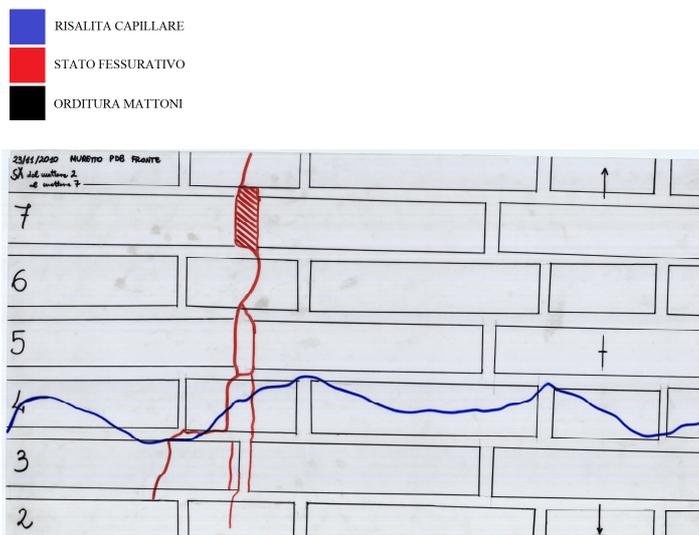


Fig. 5.38: Fronte muretto PDB: rilievo della parte sinistra del muretto.

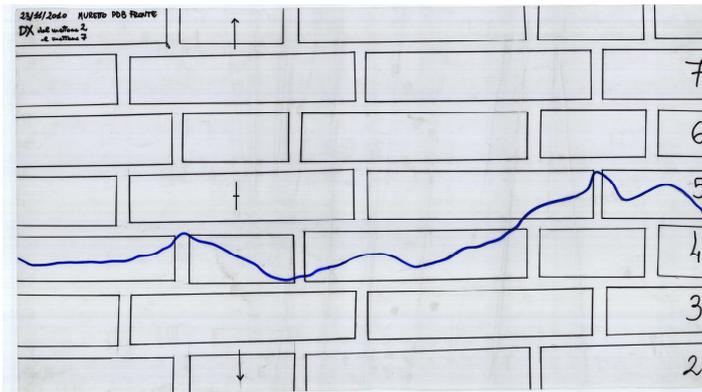


Fig. 5.39: Fronte muretto PDB: rilievo della parte destra del muretto.

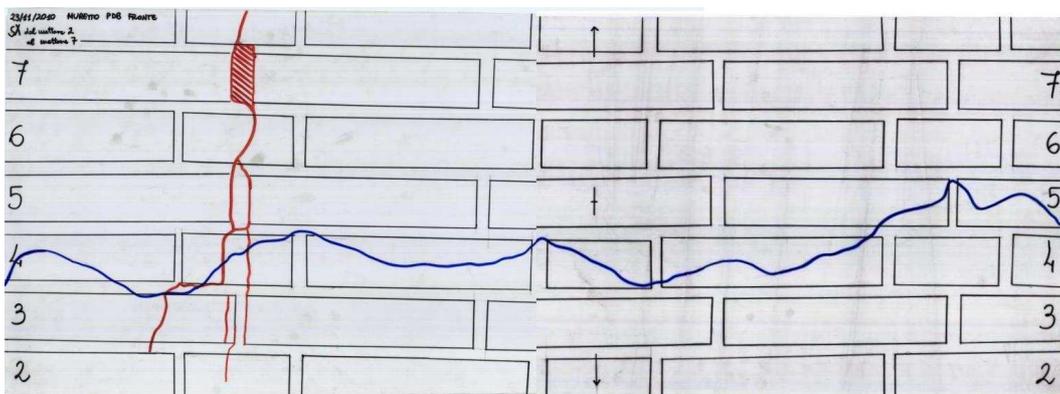


Fig. 5.40: Fronte muretto PDB: rilievo del livello di risalita capillare d'acqua dopo 30 giorni (sovrapposizione delle due parti).

SECONDA PROVA

Sul muretto PDB è stata effettuata una seconda prova di risalita capillare d'umidità in data 18/01/2011 con inizio alle ore 10:35 e durata di quasi 2gg. La prima prova ha avuto una durata molto lunga, nella seconda invece si è voluto monitorare solo il periodo iniziale di risalita nel quale si hanno i maggiori cambiamenti. Le modalità di prova sono simili, ma in questa seconda si è cercato di ottimizzare lo svolgimento e il monitoraggio.

Obiettivi

La prova ha inteso acquisire ulteriori informazioni relative alla prima fase del processo di risalita capillare e valutare il livello di risalita in particolare nel lato

destro del muretto, il quale non era stato sufficientemente monitorato nella prima prova quando infatti non si era ancora a conoscenza del quadro microfessurativo nella parte destra del muretto PDB e quindi non erano stati letti periodicamente i valori di risalita capillare.

Preparazione della 2° prova di capillarità

Il muretto presentava ancora la cristallizzazione dei sali dovuta all'evaporazione durante la prima prova e perciò la superficie è stata pulita con una spazzola di saggina per una prima sgrossatura e successivamente con un panno umido.

I materiali utilizzati sono gli stessi della prima prova, ma la vasca che contiene l'acqua è stata modificata. Un impedimento per il monitoraggio della parte bassa del muretto con la termocamera era stato infatti il bordo della vasca che, pur impiegando inquadrature molto angolate della strumentazione, copriva il primo e parte del secondo corso durante le riprese. Si è pensato di abbassare il bordo della vasca davanti al fronte del muretto sostituendo l'asse di legno presente con una di dimensioni inferiori (con altezza di 11 cm invece che 25 cm) (Fig. 5.41).

Per mantenere la temperatura costante e per evitare un'eccessiva evaporazione, l'aerotermostato dell'impianto di condizionamento del laboratorio, posto sopra il muretto è stato spento ed è rimasto inattivo per tutta la durata di prova.



Fig. 5.41: Vasca con sponda alta (a sinistra) e con sponda bassa (a destra).

Strumentazione utilizzata

Per il monitoraggio è stata utilizzata la stessa strumentazione della prima prova (cfr. 5.3) e le termocamere a disposizione (FLIR B250 e FLIR P620) sono state impiegate contemporaneamente. Questa volta però i parametri caratteristici delle termocamere sono stati impostati con i valori reali dell'ambiente di prova (Tabelle 5.15 e 5.16).

Tabella 5.15: Parametri della termocamera FLIR B250 impostati prima dell'inizio della 2° prova.

PARAMETRI		VALORE
Emissività		1.00
Temp. di riferimento		20.0 °C
Distanza di acquisizione		0,9 m
Umidità relativa ambiente di prova		29 %
Temp. atmosferica ambiente di prova		20.2 °C
Immagine	tavolozza	ferro
	fusione	disattivata
	campo	da -20 °C a 120 °C

Tabella 5.16: Parametri della termocamera FLIR P620 impostati prima dell'inizio della 2° prova.

PARAMETRI		VALORE
Emissività		1.00
Temp. di riferimento		20.0 °C
Distanza di acquisizione		2,9 m

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Umidità relativa ambiente di prova		29 %
Temp. atmosferica ambiente di prova		20.2 °C
Immagine	tavolozza	ferro
	fusione	disattivata
	campo	da -40 °C a 120 °C

Svolgimento della 2° prova

La vasca è stata riempita fino a circa un centimetro sopra le piastre d'acciaio della base del muretto come nella 1° prova e il livello è stato mantenuto costante fino al termine della prova.

Ad intervalli di tempo regolari si eseguivano le seguenti operazioni:

- venivano acquisiti 2 termogrammi di particolare con la termocamera B250 da circa 90 cm di distanza dal muretto, in asse con la fessura nella zona SX e con il danneggiamento nella zona DX (Fig. 5.44 e 5.45),
- veniva acquisito un termogramma con la FLIR P620 che inquadrava con vista frontale i 14 corsi inferiori del muretto per tutta la loro larghezza (Fig. 5.46),
- veniva scattata una fotografia che inquadrava per tutta la sua larghezza la parte inferiore del muretto (Fig. 5.47),
- venivano scattate fotografie dei dettagli più significativi,
- i valori di risalita di umidità venivano misurati nelle 5 zone di controllo prestabilite (Fig. 5.42) e venivano riportati in una tabella di appunti,
- si misuravano temperatura e umidità dell'aria con il termoigrometro digitale manuale (Tabella 5.18),
- si monitoravano temperatura e umidità dell'aria con un termoigrografo posto in sommità al muretto (cfr. allegato 4) (Tabella 5.18),
- si misurava con il termoigrometro digitale manuale la temperatura di contatto del mattone posto al centro del fronte del muretto e dell'acqua della vasca (Tabella 5.18).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

Per ripetere i rilievi con precisione, sempre dalla medesima distanza, sono stati segnati tutti i riferimenti delle posizioni degli strumenti: con un pennarello indelebile sono state tracciate sul pavimento le impronte dei treppiedi e dei cubetti di calcestruzzo (utilizzati come appoggio per la FLIR B250) sul pavimento.

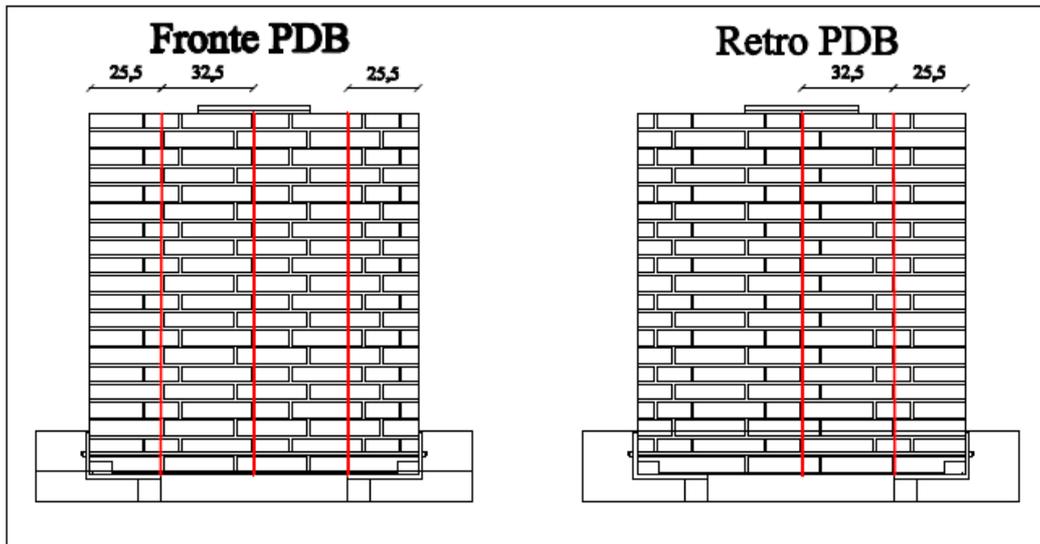


Fig. 5.42: Sezioni verticali di controllo del valore di risalita sul muretto PDB.

I termogrammi sono stati acquisiti da 3 posizioni: 2 più ravvicinate inquadrano per intero i quattro corsi murari inferiori del provino (settori indicati in rosso in Fig. 5.43), mentre quella più lontana inquadra il fronte del provino fino al corso 12 per intero (settoro indicato in blu in Fig. 5.43).

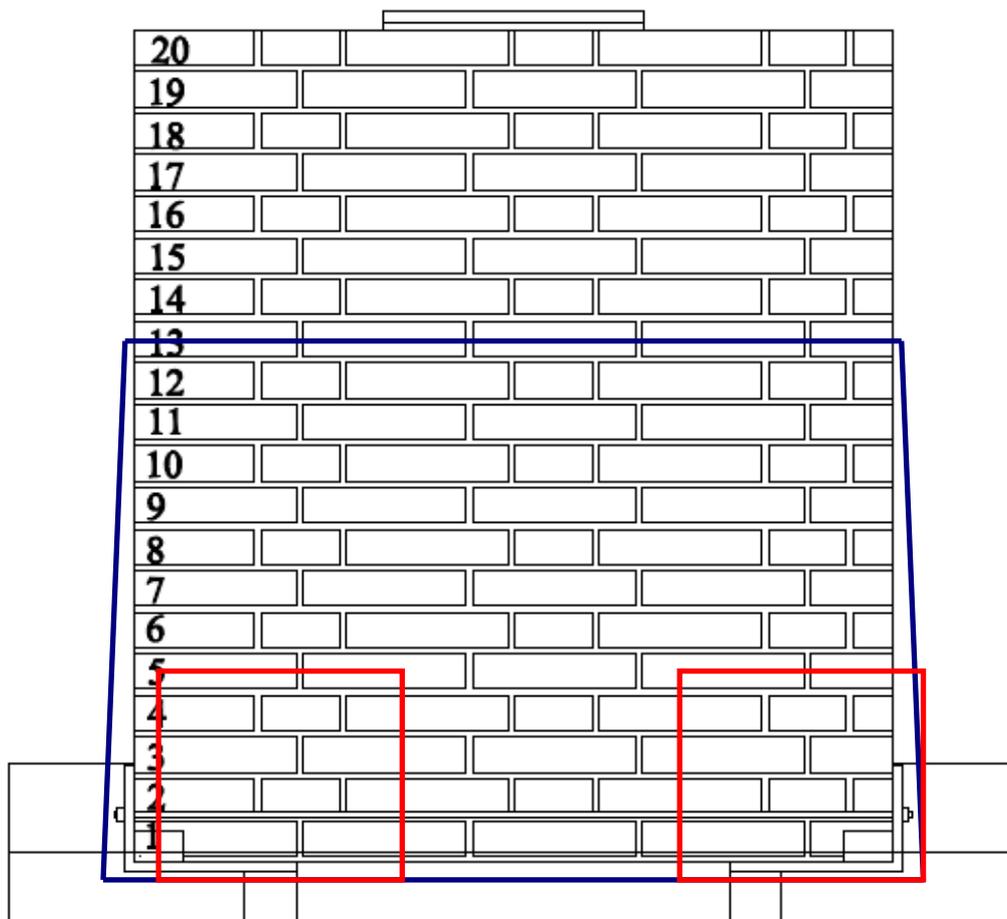


Fig. 5.43: Inquadrature termografiche del muretto PDB dalle due diverse posizioni.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

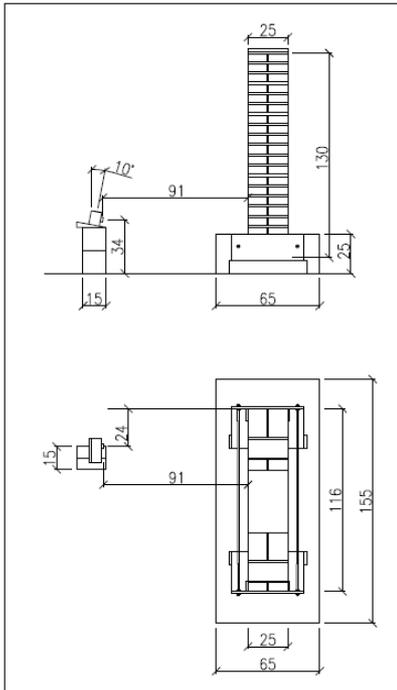


Fig. 5.44: Posizione nella zona sinistra della termocamera B250: vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

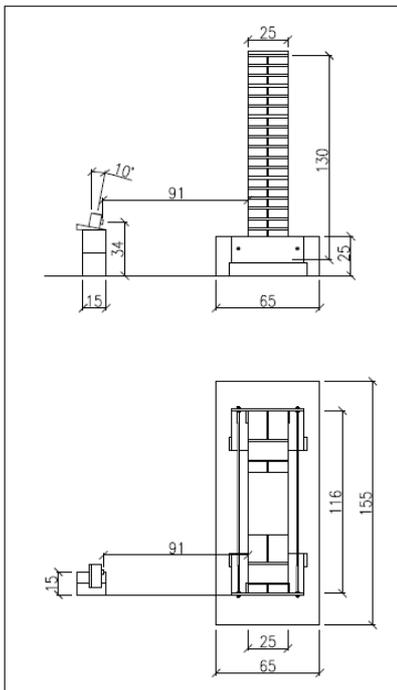


Fig. 5.45: Posizione nella zona destra della termocamera B250: vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

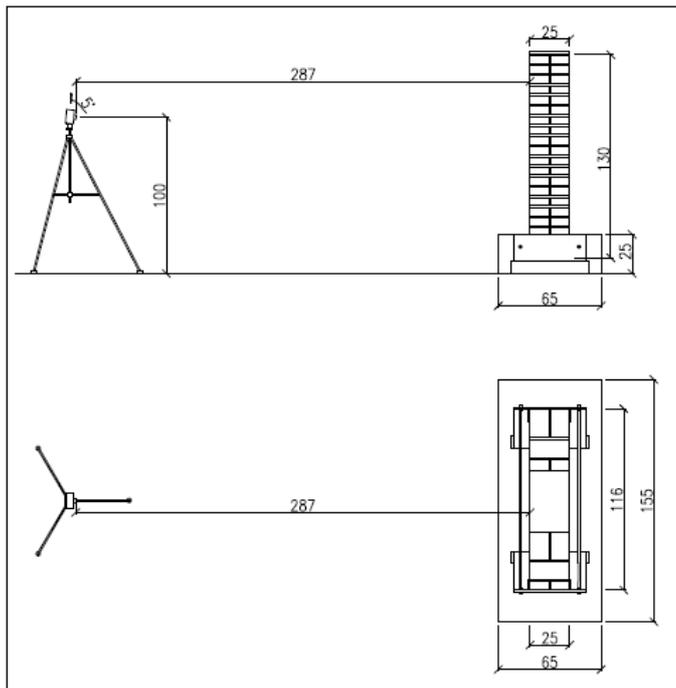


Fig. 5.46: Posizione della termo camera P620: inquadra il muretto completamente: vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

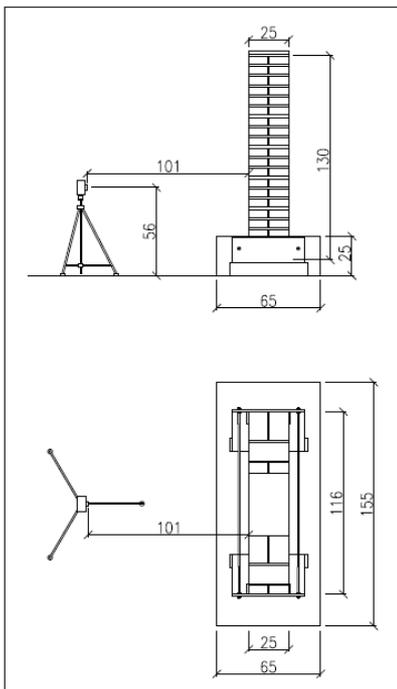


Fig. 5.47: Posizione della fotocamera: inquadra il muretto fino al corso 14: vista laterale (sopra) e vista in pianta (sotto).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

I valori dell'altezza di risalita misurati nelle 5 zone di controllo con l'aiuto di un righello sono stati riportati in una tabella Excel ed è stata calcolata la media dei valori letti sulla fessura e sulla mezzeria del fronte e del retro del muretto (Tabella 5.17).

Tabella 5.17: Valori di risalita nelle zone di controllo e media della risalita sulla fessura e in mezzeria.

Tempo in gg	Tempo (min)	Fess. sx fronte (mm)	Mezz. fronte (mm)	Fess. dx fronte (mm)	Fess. retro (mm)	Mezz. retro (mm)	Media fess. sx (mm)	Media mezz. (mm)
18/01/2011 10.35	0	0	0	0	0	0	0	0
18/01/2011 10.40	5	55	22	22	18	20	36,5	21
18/01/2011 10.45	10	55	29	26	30	29	42,5	29
18/01/2011 10.55	20	60	35	31	37	33	48,5	34
18/01/2011 11.05	30	66	38	45	40	40	53	39
18/01/2011 11.20	45	67	42	50	40	40	53,5	41
18/01/2011 11.35	60	70	45	50	45	45	57,5	45
18/01/2011 12.05	90	70	54	53	50	50	60	52
18/01/2011 12.35	120	72	70	73	65	53	68,5	61,5
18/01/2011 13.35	180	72	70	73	75	65	73,5	67,5
18/01/2011 16.35	360	75	75	75	75	75	75	75
19/01/2011 9.35	1380	75	80	75	120	85	97,5	82,5
19/01/2011 13.35	1620	75	80	75	120	85	97,5	82,5
20/01/2011 9.35	2820	80	80	80	140	100	110	90

Tabella 5.18: Valori di temperatura e umidità durante la 2° prova.

Tempo in gg	Tempo (min)	T air (°C)	T H ₂ O (°C)	T brick (°C)	RH (%)	T air (anal.) (°C)	RH (%) (anal.)	NOTE
18/01/2011 10.35	0	19,9	16,5	19,9	38,1	20	35	
18/01/2011 10.40	5	19,9	17,6		31			
18/01/2011 10.45	10							
18/01/2011 10.55	20					19	35	
18/01/2011 11.05	30	19,5	17,6		32			
18/01/2011 11.20	45	20	17,6		31			
18/01/2011 11.35	60	20	17,6	19,9	30,8	20,5	35	
18/01/2011 12.05	90	20,2	17,7		31	20,5	34	

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

18/01/2011 12.35	120	18,3	17,7	18,4	33,5	18,8	34	portone lasciato aperto
18/01/2011 13.35	180					20,5	35	
18/01/2011 16.35	360	20,5	18,3	18,3	34	20,5	37	
19/01/2011 9.35	1380	20,1	19,5	19,5	30,5	19	36	
19/01/2011 13.35	1620	20,8	18,2	19,8	28,2	20,5	34	
20/01/2011 9.35	2820	20,2	18,4	20,4	33,8	20	37	

Una volta monitorato il comportamento della risalita nei primi corsi la prova si è ritenuta conclusa. Ciò è avvenuto dopo 1 giorno e 23 ore dall'inizio della prova (Tabella 5.19) quando la risalita aveva raggiunto la base del 2° corso di mattoni (il 3° corso sulla destra del fronte).

Tabella 5.19: Durata della prova di risalita capillare.

Provino	Inizio prova	Fine prova	Durata prova
Muretto PDB fessurato	18/01/2011 ore 10:35	20/01/2011 ore 9:35	1 gg e 23 h (47 h, 2820 min)

Visualizzazione di termogrammi e fotografie

Per visualizzare in maniera ottimale il livello effettivo di risalita sono stati affiancati alle foto dello svolgimento della prova i relativi termogrammi opportunamente elaborati tramite il software FLIR QuickReport. In questa seconda prova i parametri della termocamera erano già stati impostati con i valori reali prima delle acquisizioni ad eccezione dell'emissività. Quindi in fase di rielaborazione è stato sufficiente modificare il valore dell'emissività da 1 (valore di default) a 0,95 (valore approssimato per le murature ottenuto da studi sui raggi IR condotto dalla FLIR) e ottimizzare la scala della temperatura modificando il valore minimo e massimo per avere un contrasto migliore nell'immagine. Con l'aiuto dei termogrammi si riescono ad individuare chiaramente le zone in cui la risalita capillare è avvenuta più rapidamente ovvero in prossimità delle fessure presenti nel primo corso di mattoni e nei giunti di malta (Fig. 5.48-5.54).

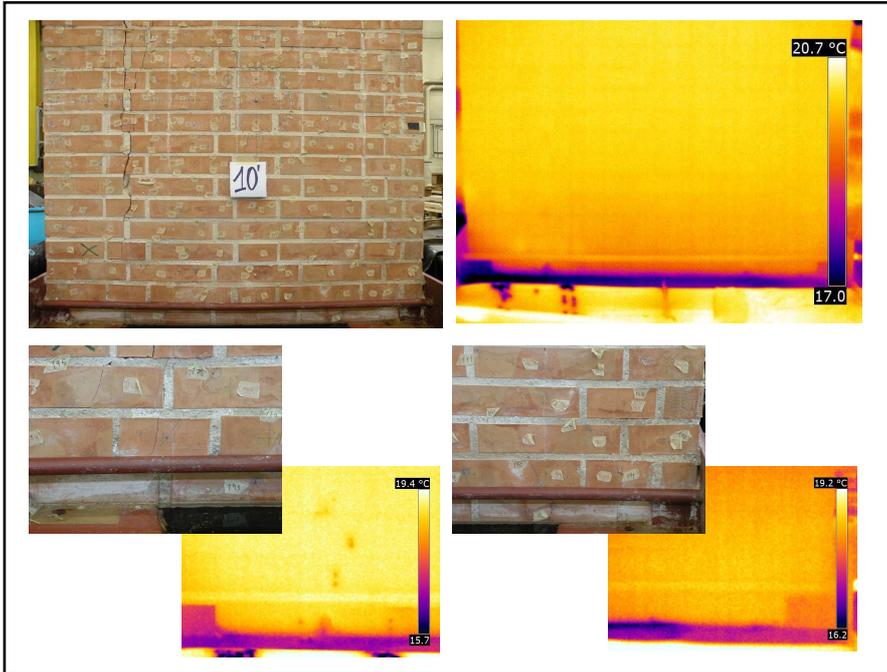


Fig. 5.48: Fotografie e termogrammi elaborati a 10 min dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

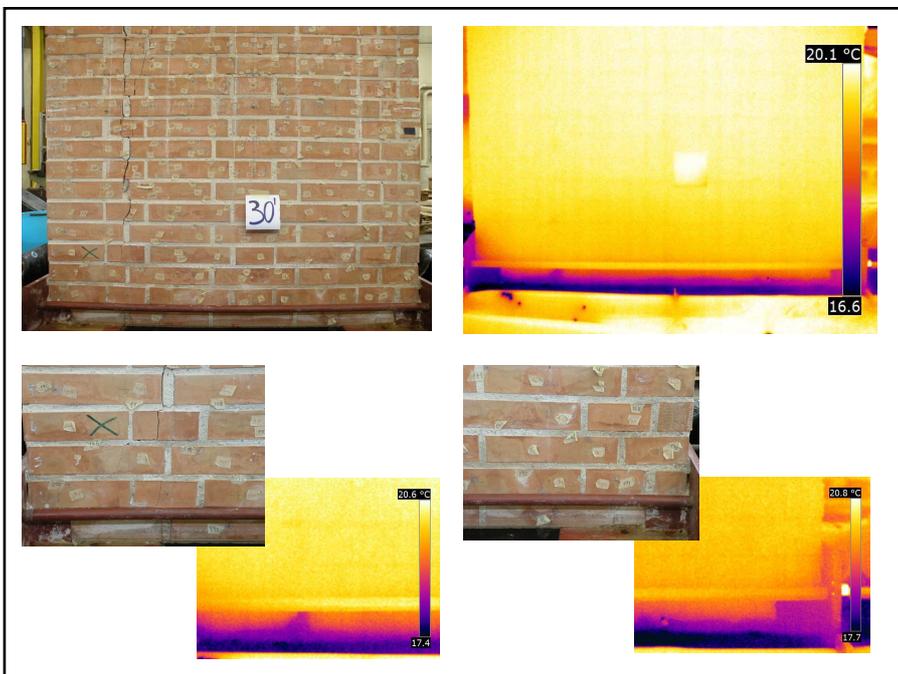


Fig. 5.49: Fotografie e termogrammi elaborati a 30 min dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

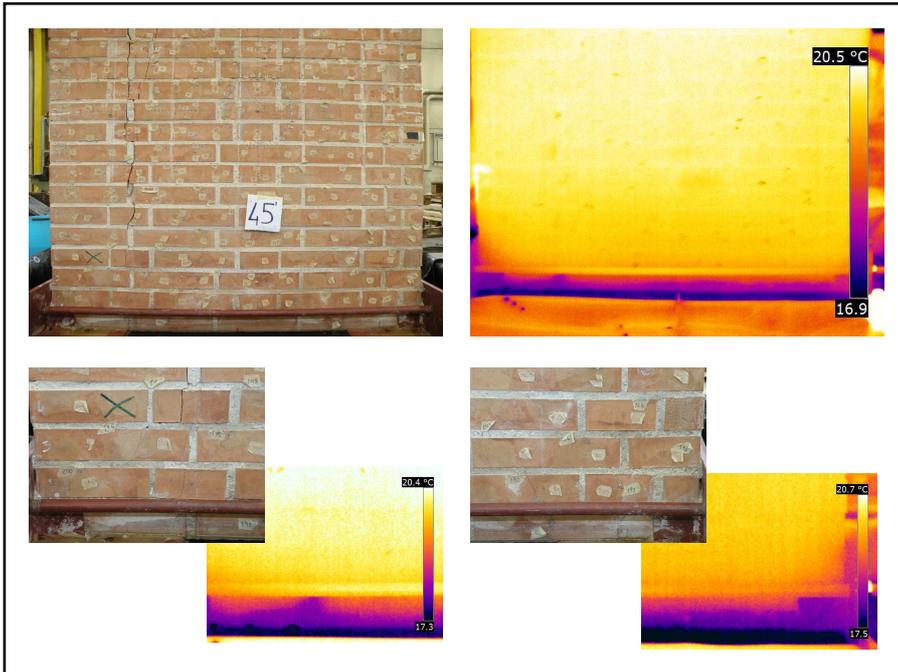


Fig. 5.50: Fotografie e termogrammi elaborati a 45 min dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

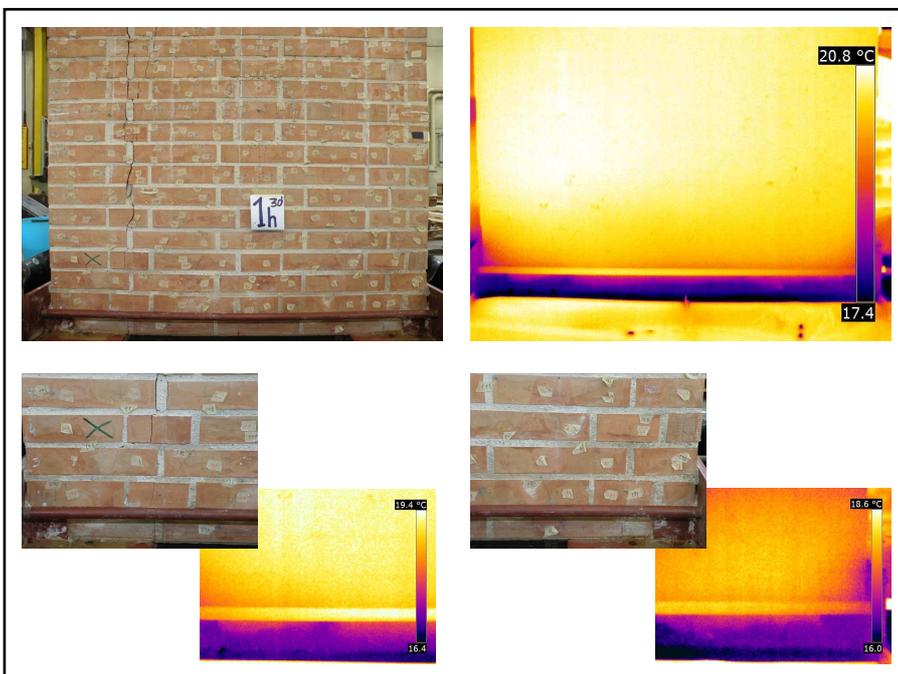


Fig. 5.51: Fotografie e termogrammi elaborati a 1h e 30 min dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

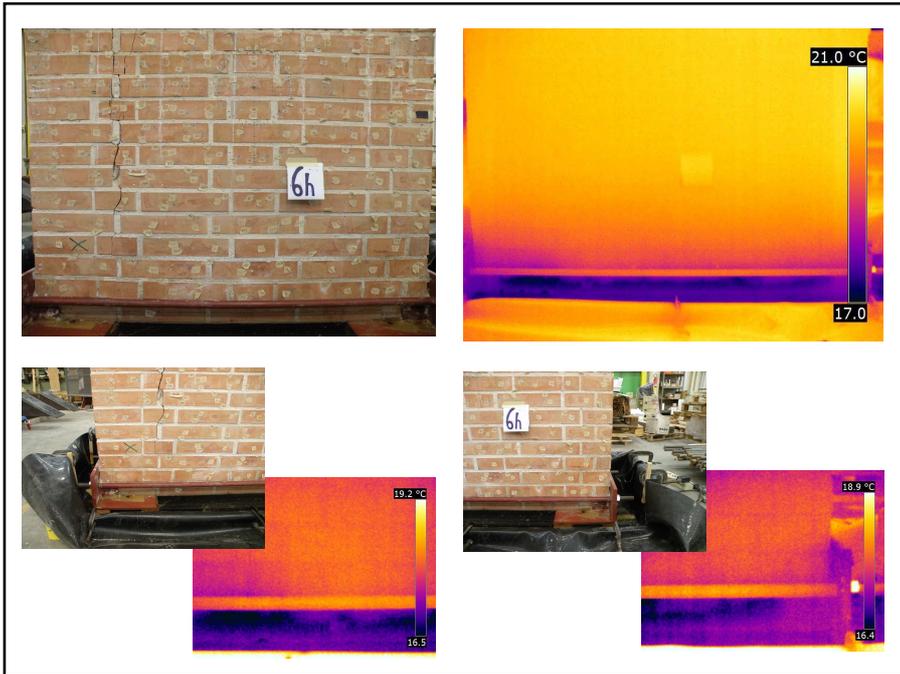


Fig. 5.52: Fotografie e termogrammi elaborati a 6h dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

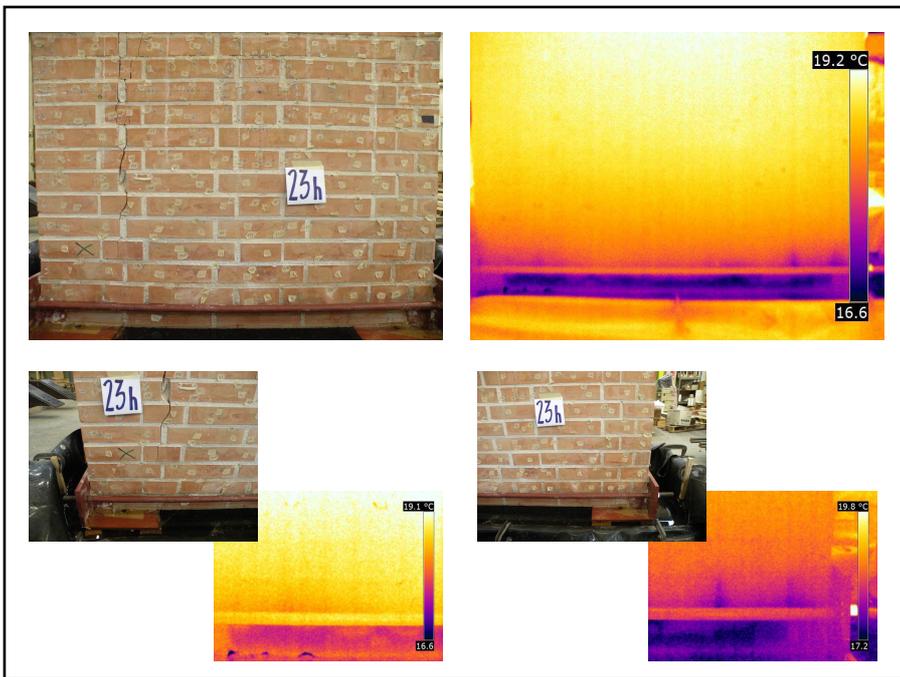


Fig. 5.53: Fotografie e termogrammi elaborati a 23h dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

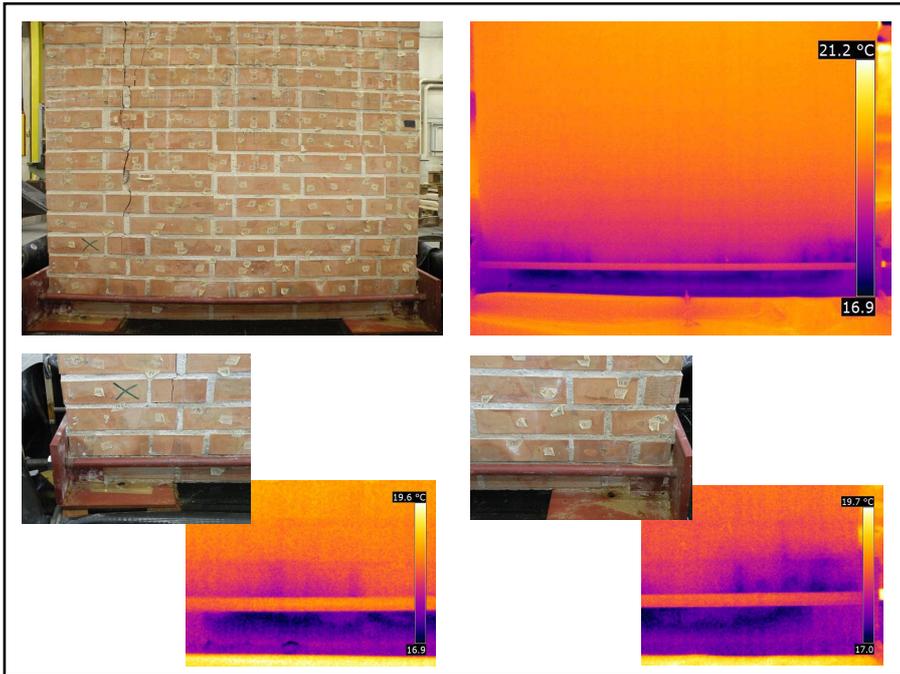


Fig. 5.54: Fotografie e termogrammi elaborati a 47h dall'inizio della prova (dettagli con FLIR B250, totale con FLIR P620).

Dopo 2h dall'inizio della prova la temperatura dell'ambiente di prova ha subito un abbassamento ed infatti il termogramma acquisito subito dopo quel momento presenta valori di temperatura più disomogenei tra i diversi materiali presenti nell'inquadratura. I giunti di malta ad esempio risultano molto più visibili, ciò significa che i mattoni tendono a raffreddarsi prima rispetto alla malta (Fig. 5.55).

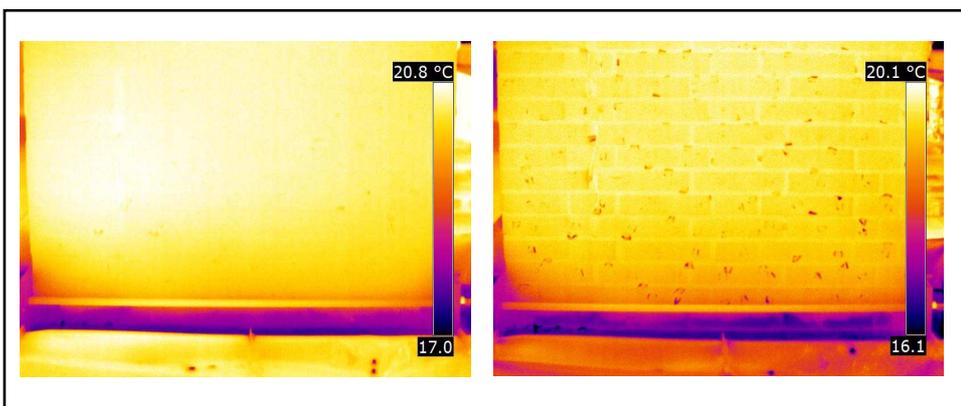


Fig. 5.55: Confronto tra il termogramma acquisito prima e dopo il calo di temperatura.

Rilievo manuale del livello di risalita nel fronte del muretto

Ad istanti di tempo diversi veniva attaccata alla parte bassa del fronte del muretto un foglio di carta da lucido che copriva il muretto per tutta la sua larghezza e arrivava fino al 4° corso (116,5×26 cm). Con pennarelli di colori diversi e diversi spessori delle punte veniva ricalcato sul lucido il livello di risalita capillare aiutandosi con un faretto per avere una migliore visione (Fig. 5.56).

Si è osservato che nel primo corso di mattoni i due punti dove la risalita è avvenuta più velocemente sono un corso di malta (zona sinistra) e una fessura (zona destra). Dal rilievo si può inoltre notare che la risalita, raggiunto il primo corso di malta, si stabilizza in tutto il muretto ad eccezione della parte destra dove è presente microfessurazione (Fig. 5.57).



Fig. 5.56: Fase del rilievo su carta da lucido del livello di risalita capillare dopo 2 ore dall'inizio della prova presso il laboratorio LISG.

5. Monitoraggio ad infrarossi di risalita capillare in provino fessurato

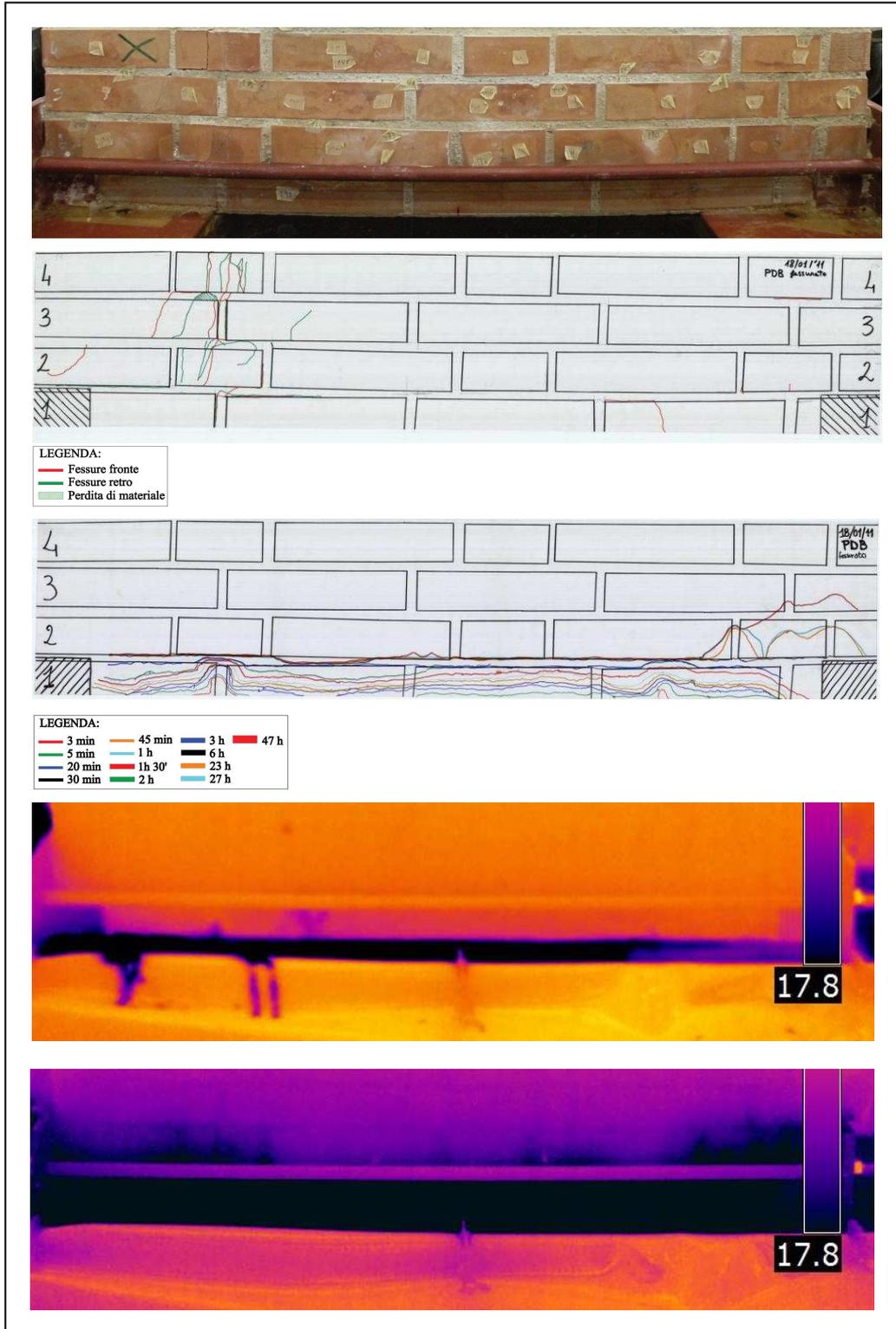


Fig. 5.57: Rilievo della risalita sul fronte del muretto a diversi istanti di tempo e confronto con termogrammi acquisiti a 5 min e a 47 ore dall'inizio della prova e ultima foto.

Interpretazione dei dati

Con Excel è stato creato un grafico tempo–altezza di risalita, nel quale sono state inserite anche le curve relative alla temperatura dell'aria, dei mattoni e dell'acqua e all'umidità relativa dell'ambiente (Fig. 5.59). Con delle linee rosse orizzontali è indicata l'altezza dell'interfaccia mattone–giunto di malta per ogni corso raggiunto dall'acqua. Di seguito sono riportati altri due grafici: uno mostra le curve delle temperature e dell'umidità con una scala adeguatamente ridotta (Fig. 5.60), l'altro è uno zoom del grafico con le curve di risalita relativo alle prime 3 ore di prova (Fig. 5.58). Inizialmente la risalita maggiore si ha in prossimità della fessura sul fronte a sinistra, poi invece è la risalita nella stessa fessura sul retro del muretto ad avere la crescita maggiore. La temperatura e l'umidità subiscono una variazione significativa a 2 ore dall'inizio della prova e a 27 ore.

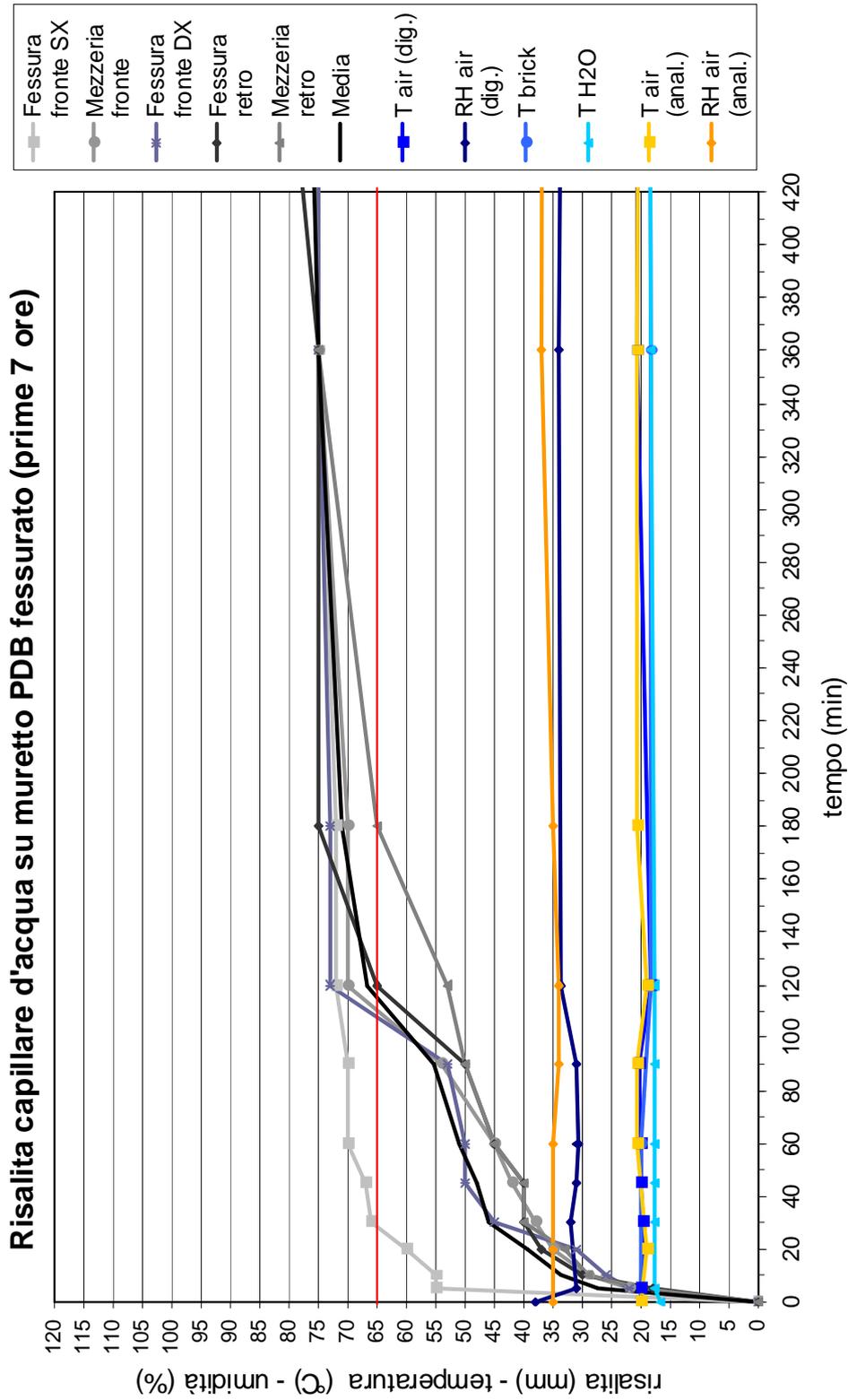


Fig. 5.58: Muretto PDB: risalita dell'acqua per capillarità nelle prime 7 ore della 2° prova.

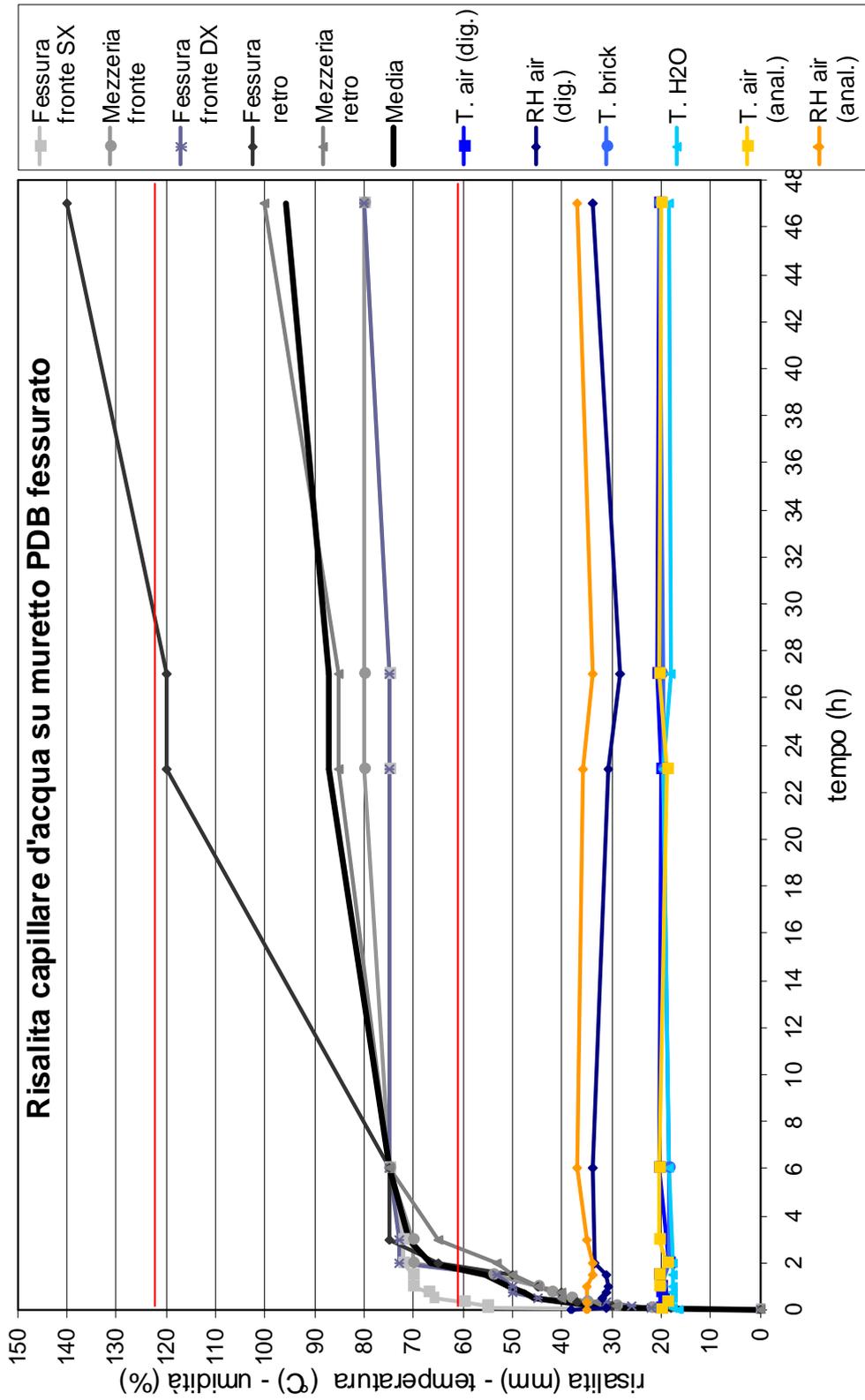


Fig. 5.59: Muretto PDB: risalita dell'acqua per capillarità durante la 2° prova.

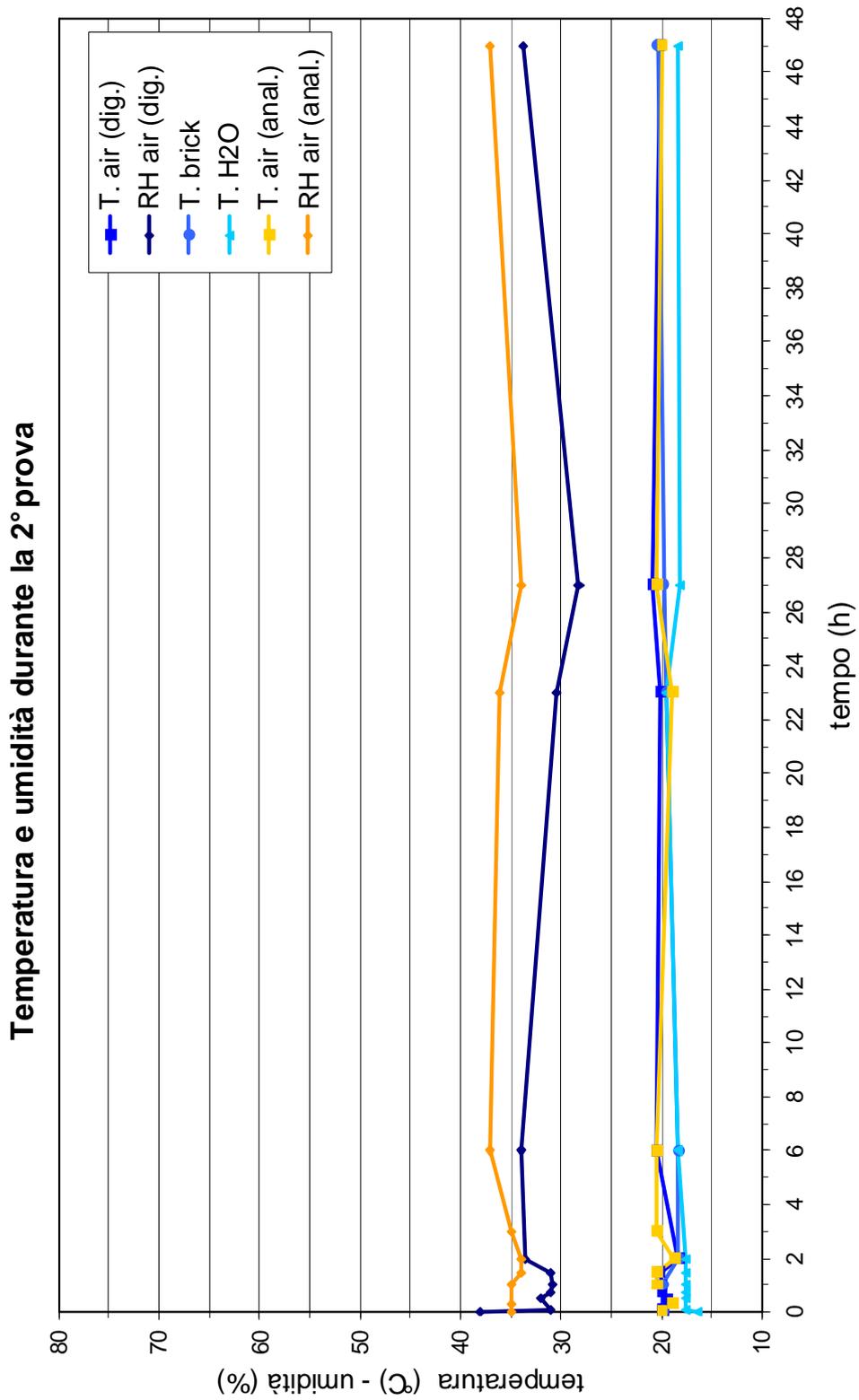


Fig. 5.60: Muretto PDB: andamento delle temperature e dell'umidità durante la 2° prova di risalita.

6.IL DUOMO DI MODENA E LA TORRE GHIRLANDINA

Introduzione

Il complesso monumentale costituito dalla Cattedrale e dalla Torre civica, detta Ghirlandina si affaccia sull'area della Piazza Grande ed è collocato lungo l'asse dell'antica Via Emilia, al centro del tracciato medievale della città. L'esistenza della piazza è documentata a partire dalla prima metà del Duecento, ma l'ubicazione delle porte del Duomo consente di farne risalire l'origine almeno alla seconda metà del secolo XII. Lo spazio della piazza è delimitato dal Palazzo comunale, di origine medievale ma ricostruito a partire dal Cinquecento, dal Palazzo arcivescovile e dal fianco meridionale della cattedrale, con l'imponente Porta Regia, databile intorno al 1180; unico inserto moderno è l'edificio bancario costruito negli anni '70 del Novecento dopo l'abbattimento dell'ottocentesco Palazzo di Giustizia, sorto a sua volta sull'area dell'antica sede della magistratura comunale dei "Giudici delle Vettovaglie".

Vissuto nel IV secolo e contemporaneo di sant'Ambrogio, il vescovo Geminiano è considerato il vero fondatore della Chiesa modenese. L'attuale complesso monumentale costituito dalla cattedrale e dalla torre, omogeneo per materiali e criteri costruttivi, fu edificato per volere della comunità modenese tra il 1099, data di fondazione del Duomo ricordata da una lapide collocata sulla facciata, e il 1319, anno in cui si conclusero i lavori della Ghirlandina.

Il Duomo è una basilica orientata liturgicamente, a tre navate chiuse da absidi semicircolari e provvista di cripta. Il suo impianto generale, privo di transetto e con lo spazio interno ripartito da grandi colonne, sembra ispirato alle basiliche ravennati; i prospetti esterni sono unificati da una scansione di grandi arcate percorse da una loggetta pensile su colonnine e rivelano uno straordinario equilibrio compositivo. Tutto l'edificio appare costruito con una non comune attenzione progettuale e costruttiva: lo dimostrano l'utilizzo del modulo geometrico di Vitruvio nella determinazione degli spazi e alcune brillanti soluzioni architettoniche, come il raccordo tra le absidiole e l'abside maggiore,

ma anche diversi particolari costruttivi, legati alla perizia delle maestranze di cantiere, quali il taglio e la lavorazione accurati delle pietre utilizzate per il rivestimento esterno o i sapienti effetti decorativi del laterizio all'interno. Sulla facciata della cattedrale, l'eleganza della scansione architettonica cede tuttavia il passo al prepotente manifestarsi della scultura che articola e movimentata gli elementi architettonici e arricchisce i portali, culminando nei celeberrimi rilievi con Storie della Genesi. La Ghirlandina, così chiamata per via della balaustra che corona la sommità della lanterna, è una torre di circa novanta metri, a sei piani sormontati da un tamburo ottagonale e da un'alta cuspide. La costruzione, in mattoni interamente rivestiti di materiali lapidei, si sviluppa in armonia con il progetto del Duomo. Secondo una tipologia ricorrente nelle torri romaniche, alla massa compatta del basamento corrispondono, nei piani superiori, aperture che danno luce al vano interno, monofore al terzo piano, bifore e trifore negli ultimi due piani della parte quadrata. La torre ha svolto fin dalle origini, non soltanto la funzione di torre campanaria del Duomo ma anche di torre civica: dalla sua sommità infatti i custodi, detti "torresani", scandivano con il suono delle campane i tempi della vita cittadina, come l'apertura e la chiusura delle porte urbane, e davano l'allarme in caso di pericolo. Tutta la vicenda storica 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 fissa al 6 giugno 1099 la posa della prima pietra e ricorda con ammirazione la figura dello scultore Wiligelmo (*Inter sculptores, quanto sis dignus onore, claret scultura nunc Wiligelme tua*); la seconda ricorda la traslazione delle reliquie del santo patrono Geminiano dalla vecchia alla nuova cattedrale, avvenuta il 30 maggio 1106, e celebra l'architetto Lanfranco, "famoso per ingegno, preparato e competente (*doctus*) direttore dei lavori", il cui ruolo di protagonista è evidenziato anche dalle miniature della *Relatio de innovatione ecclesiae Sancti Geminiani*, eccezionale testimonianza documentaria in cui sono narrate le vicende della costruzione, che si conserva presso l'Archivio Capitolare del Duomo; la terza celebra, in data 12 luglio 1184, la solenne consacrazione della cattedrale modenese da parte del papa Lucio III.

Fasi costruttive della torre Ghirlandina

I Fase:

A questa prima fase sono da riferire le fondazioni e la base della Ghirlandina fino all'inizio del fusto, che corrisponde alle prime file di conci lapidei subito al di sopra della prima cornice. Complessivamente si tratta di un'altezza di circa 13 metri a cui si devono aggiungere le fondazioni, affini come tecnica costruttiva a quelle del Duomo. Questa prima fase è caratterizzata dall'utilizzo prevalente di frammenti di laterizi di reimpiego di età romana uniti da malta, che costituiscono la componente principale della muratura. Il paramento interno e i quattro pilastri in muratura che contengono la scala, sono realizzati quasi esclusivamente con mattoni romani sesquipedali rifiniti a martellina nella stessa maniera dei laterizi di reimpiego utilizzati nella costruzione delle absidi del Duomo. Con gli stessi materiali è realizzata la copertura a volta della scala che gira attorno alle pareti.

La muratura esterna della torre è rivestita con conci lapidei, anche questi di reimpiego (essenzialmente pietra d'Istria e pietra di Vicenza). I conci hanno una tessitura irregolare anche in corrispondenza delle buche puntaie, disposte su sei o sette file con uno schema diverso da quello documentato nella fase successiva (fig.1). Questa prima fase, anche in considerazione degli elementi scultorei di scuola wiligelmica presenti negli angoli della torre in corrispondenza della prima cornice, è da mettere in correlazione al cantiere lanfranchiano-wiligelmico. I motivi per cui furono sospesi i lavori di costruzione della torre non sono conosciuti, l'ipotesi, suggerita da Renato Lancelotta, che furono interrotti a causa dei cedimenti del terreno e dell'assestamento della torre, pare plausibile.

II Fase

A questa fase è riconducibile la costruzione del fusto e della prima loggia fino alla quinta cornice, per un'altezza di circa 32 m. Anche questa fase è contraddistinta principalmente dall'utilizzo di 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 e dei

pilastrini, nelle arcate che sorreggono la scala in muratura, nonché nei mattoni che disegnano il contorno delle bifore e delle trifore. Nella prima loggia sono invece utilizzati sia laterizi di reimpiego di età romana sia mattoni medievali di uso primario con un modulo, 27,5 x 14 x 5,9 cm, molto vicino a quello documentato nei mattoni medievali utilizzati nella costruzione del paramento interno dei muri perimetrali del Duomo con modulo 27,5 x 13,5 x 5,7 cm. Anche le pareti della scala a chiocciola che collega la prima loggia alla seconda sono realizzate con laterizi di reimpiego di età romana modellati a martellina o segati. Le pareti interne del fusto hanno inoltre un'ordinata tessitura di buche puntaie disposte su file corrispondenti a quelle esterne.

La muratura esterna del fusto e della prima loggia è rivestita con conci lapidei di reimpiego (principalmente pietra d'Istria e in misura molto minore trachite e pietra di Vicenza). I conci che hanno una tessitura molto regolare e le buche puntaie disposte su cinque file ben allineate fino all'altezza della quinta cornice mostrano un piano di lavoro unitario di questa seconda fase di cantiere. Altro elemento distintivo di questa seconda fase è l'apparato scultoreo, presente all'altezza della seconda e della quarta cornice, attribuito a maestranze campionesi, come pure quella dei capitelli presenti nella prima loggia, la cui datazione è riconducibile per nessi stilistici e paleografici al momento della realizzazione, attorno al 1184, del pontile campionesi all'interno del Duomo. Un altro indizio è inoltre offerto da un graffito tracciato su una pietra di reimpiego murata nel paramento esterno della Ghirlandina, all'altezza della seconda cornice, che riporta la data 1169 con riferimento alla costruzione del terzo piano della torre. La datazione della seconda fase è pertanto ascrivibile a un periodo compreso tra il 1169 e il 1184.

III Fase

A questa fase è da riferire la costruzione della seconda loggia il cui paramento esterno è realizzato con l'utilizzo, come pietra di rivestimento, dell'Ammonitico veronese e non sono avvertibili le buche puntaie. L'interno, intonacato non offre la possibilità di verificare il tipo di mattone utilizzato, tuttavia le fonti documentarie forniscono come data di costruzione il 1261.

IV Fase

Anche per la costruzione di quest'ultima fase, che completa con la guglia la costruzione della torre, viene utilizzato come rivestimento lo stesso materiale della fase precedente, mentre per l'apparecchiatura muraria si utilizza un nuovo tipo di mattone con un modulo, 27,5 x 12,5 x 4,7 cm, leggermente più piccolo di quello, come sopra accennato, utilizzato nel Duomo e nella prima loggia. Anche per questa fase la data di costruzione al 1319 è fornita dalle fonti documentarie.

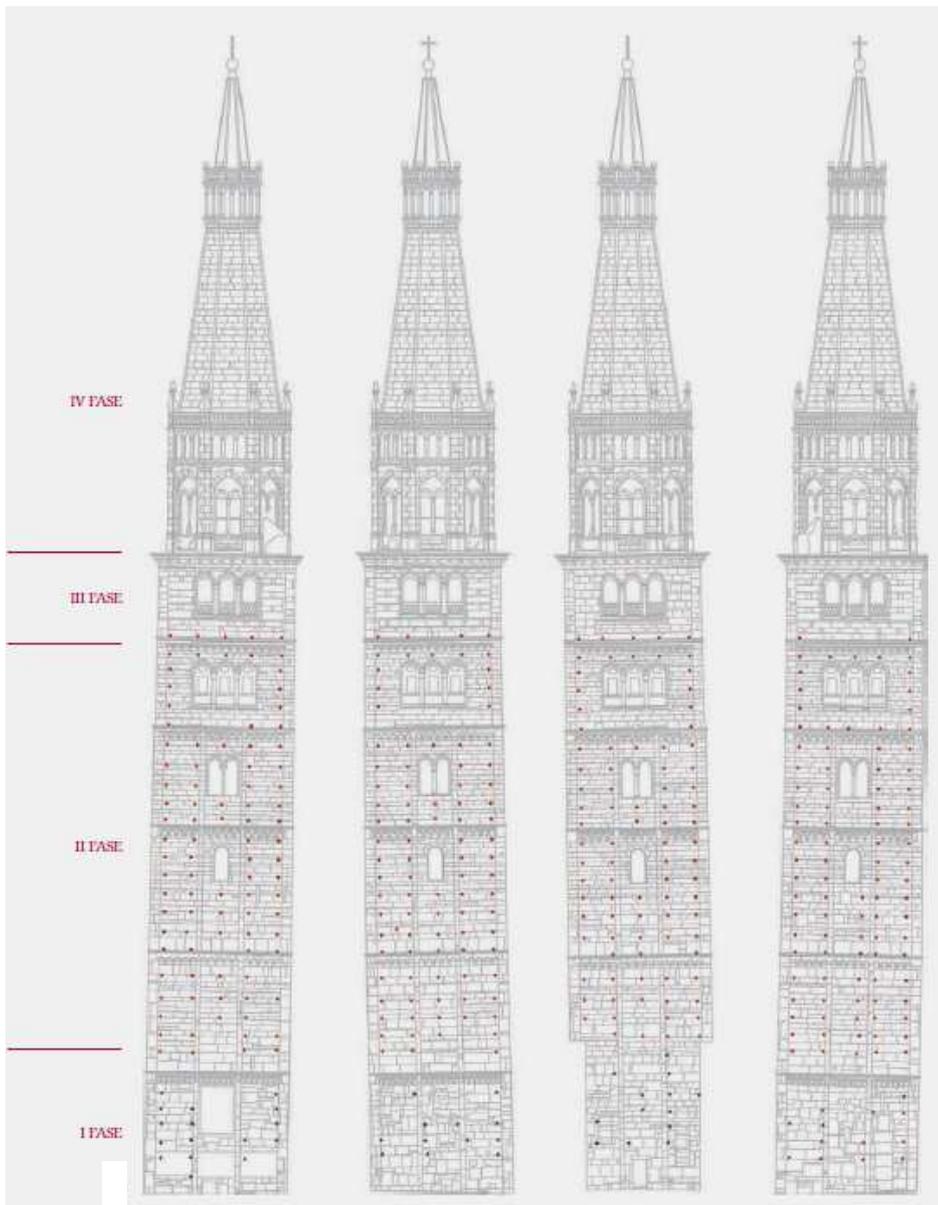


Fig. 6.1: Fasi costruttive della torre Ghirlandina.

I materiali da costruzione impiegati nella torre

Il paramento murario della torre è costituito da circa 10.000 conci di dimensioni variabili. Nella torre sono stati identificati sedici tipi di rocce diverse rappresentate da numerose varietà, di seguito elencate in ordine di abbondanza: Rosso Ammonitico e Scaglia rossa dal Veronese, pietra di Aurisina (Aurisina fiorita e granitello) dal Triestino, pietra di Vicenza dai colli Berici, trachite dai colli Euganei e, in quantità nettamente inferiore, pietra d'Istria, marmi (da Carrara, dall'isola di Marmara in Turchia e dalle Alpi), arenaria appenninica (tre tipi diversi) e, posti in opera durante i restauri del secolo scorso, bronsetto, pietra di Chiampo e travertino (fig. 6.2).

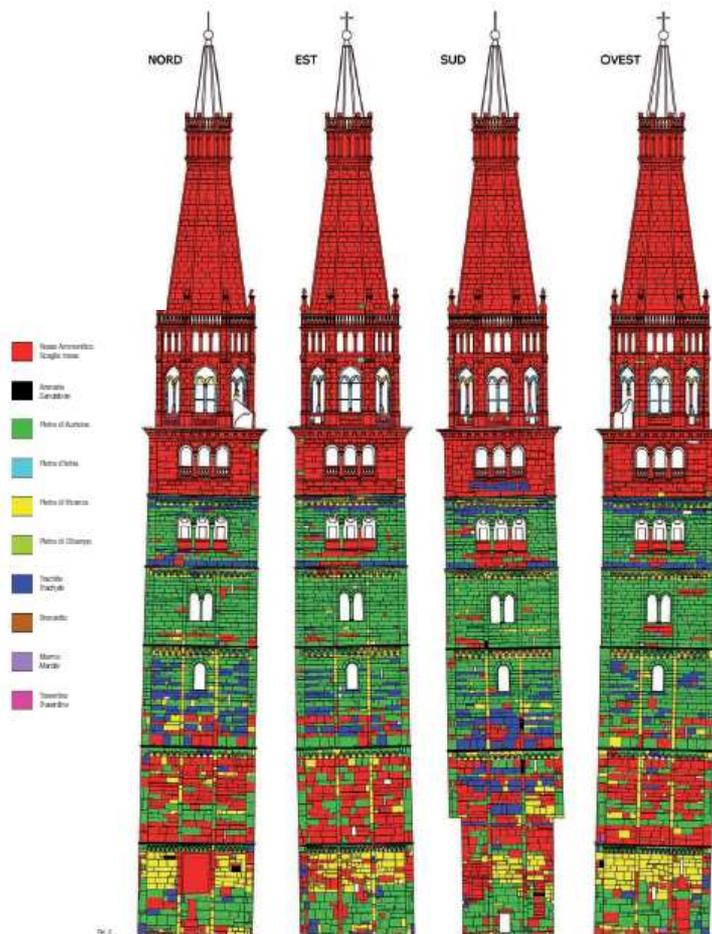


Fig. 6.2: Mappa delle diverse litologie identificate sul paramento della Ghirlandina.

I numerosi litotipi che costituiscono il paramento della torre non presentano una distribuzione omogenea, ma ogni piano è caratterizzato dalla prevalenza di rocce diverse in conci di varie dimensioni. Tali caratteristiche suggeriscono che la maggior parte dei blocchi provenga da spoliazioni di antichi edifici. Solo le parti sommitali, a partire dal sesto piano, sono state rivestite utilizzando un unico tipo di roccia, il Rosso Ammonitico veronese in lastre di nuova cavatura.

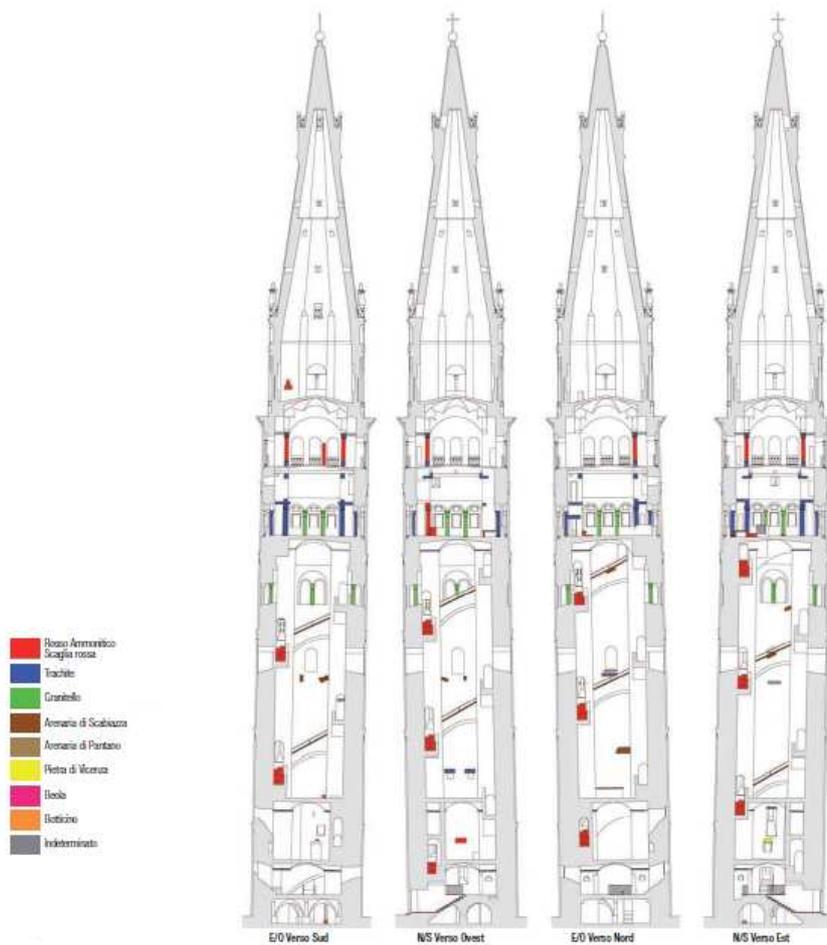


Fig. 6.3: Mappa delle pietre naturali all'interno della Ghirlandina.

Lastre e blocchi di pietre naturali si trovano anche all'interno della torre, principalmente negli architravi e nelle soglie delle porte e delle finestre (trachite e pietra di Aurisina varietà granitello), costituiscono la maggior parte dei gradini della scala interna (Rosso Ammonitico e, solo fino alla sala della Secchia, arenaria

e trachite) e dei corrimano delle balaustre (arenaria). In pietra sono anche le colonne e i capitelli della stanza dei torresani (in trachite e granitello), e della sala delle campane (Rosso Ammonitico), le cornici della sala della Secchia (dove prevale la trachite) e le mensole degli impalcati che raggiungono le finestre (arenaria) (Fig. 6.3).

I materiali da costruzioni impiegati nel Duomo

Sembra che la Ghirlandina, anche se cresciuta con qualche ritardo rispetto al Duomo, abbia tuttavia mantenuto a lungo fedeltà agli stessi materiali, specialmente al laterizio. Resta significativo il concordante combinarsi tra pietra (all'esterno) e mattone (all'interno), che nel Duomo, grazie alla più complessa gamma di moduli architettonici, diventa una delle più esplicite connotazioni inventive dell'architetto Lanfranco, rivelando fattori di strategia operativa e insieme alti esiti formali. Lo si vede già nella cripta, nell'assortimento tra colonnato in granitello (anche qui con una sostituzione in ammonitico veronese, tipicamente campionesse) e muri e sostegni d'ambito in mattone, e poi nel congegno ben più articolato dei sostegni alternati tra pilastri complessi laterizi e colonne in pietra dell'interno, per arrivare al confronto, nella partitura esterna in pietra, con lo scultore Wiligelmo nel programma scultoreo della facciata. Per quanto riguarda la muratura si suppone che nel Duomo sia stata utilizzata la tecnica "a sacco" molto diffusa nella costruzione romanica (Fig. 6.4).

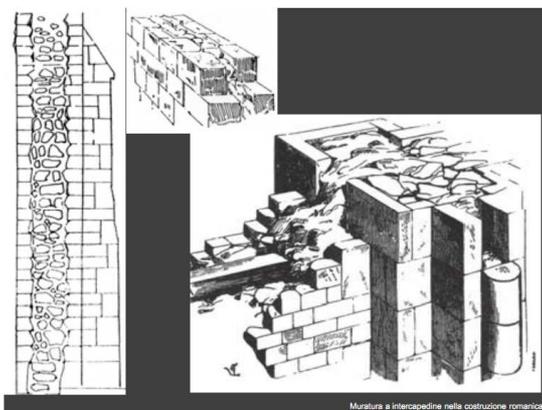


Fig. 6.4: Muratura a intercapedine nella costruzione romanica.

Interazione Duomo – Ghirlandina

Chiunque si fermasse in prossimità dell'abside del Duomo, con lo sguardo rivolto in direzione ovest, verso la facciata della cattedrale, noterebbe l'evidente convergenza dei profili verticali meridionale della torre e settentrionale del Duomo (Fig. 6.5). Sebbene questa anomalia sia evidente a occhio nudo, più difficile risulta comprendere motivazioni, origini e cause di questo fenomeno e vari sono gli elementi che vi hanno influito: dai processi costruttivi paralleli dei due edifici, ai cambiamenti che questi hanno subito nell'arco della storia, dalle influenze reciproche a livello fondale alle variazioni altimetriche dovute a fenomeni geologici (subsidenza).

Gli archi di collegamento tra torre e Duomo che vediamo oggi sono in realtà un rifacimento risalente ai primi anni del Novecento di strutture realizzate a partire dal 1338. La presenza di questi archi a partire dalla metà del XIV secolo si deve probabilmente a una duplice necessità, statica e funzionale; infatti tra le due strutture venne creato uno spazio sopraelevato dedicato sia a sacrestia sia a passaggio diretto verso la torre ad uso esclusivo del clero. Questo percorso aveva accesso diretto dalla zona presbiterale, sopraelevata rispetto alla navata. La ricostruzione del sistema storico di accessi è stato possibile durante i lavori di fine Ottocento per l'isolamento della parete settentrionale del Duomo, una volta esaminati i ritrovamenti avvenuti sulla parete esterna della cattedrale compresa tra i due archi. Abbattute finalmente le volte e tolti i muri su cui poggiavano, si sono scoperte antiche pitture a fresco, che insieme a quelle levate nel 1882 coprivano la parete del Duomo a poca altezza da terra, terminanti tutte in alto ad una stessa linea indicante che lì eravi un piano, corrispondente appunto alla soglia della porta più bassa.

L'ing. Tosi direttore dei restauri, durante la demolizione degli archi tra torre e Duomo, verificò il mancato ammorsamento delle murature con quelle del Duomo, e questo venne interpretato come un segno dell'inefficacia del collegamento e dell'inutilità dello stesso. In realtà la storia dell'inclinazione della torre mostra chiaramente l'efficacia degli arconi. In realtà la commissione di tecnici creata per la valutazione della possibilità di ripristinare gli archi, anche di fronte allo stato

avanzato delle lesioni, che mostravano un movimento progressivo della torre verso il Duomo, decise saggiamente di ricostruirli. Questi archi hanno così ripreso nuovamente il loro ruolo attivo nella statica del complesso Torre-Duomo. In particolare quello di rallentare il processo di avvicinamento reciproco dei due edifici e di realizzare una connessione che certamente ostacola lo sprofondamento del lato sud della torre. Il rilievo fotogrammetrico della torre, eseguito nel 2006, che ha consentito la misurazione delle pendenze, è servito per un confronto con i risultati ottenuti dallo studio della pendenza di inizi '900 eseguito dall'ing. prof. Francesco Cavani dell'Ateneo di Bologna. Il risultato del confronto evidenzia in maniera significativa che l'incremento delle inclinazioni verso il Duomo è modesto, mentre sono particolarmente accentuati i movimenti in direzione ovest, dove la torre è libera, dall'inizio del Novecento. Gli effetti sul Duomo di questo movimento progressivo sono stati rilevati nei prospetti interni settentrionali della cattedrale. Si possono vedere infatti delle lesioni nelle posizioni in cui gli archi si appoggiano al Duomo. In conclusione si può affermare che esiste una chiara e importante relazione di reciprocità tra torre e Duomo e che da tale reciprocità non è possibile prescindere. In particolare lo sprofondamento di circa due metri della base della torre costituisce il motore principale dei dissesti dell'intera area e di quelli della cattedrale.



Fig. 6.5: Vista sud-est del Duomo e della Ghirlandina.

7. PRINCIPI DELLE PROVE SONICHE

Tecniche diagnostiche non distruttive di tipo indiretto, come le prove soniche, consentono di valutare l'omogeneità dei parametri meccanici nelle diverse parti della costruzione, ma non forniscono stime quantitative attendibili dei loro valori, in quanto essi vengono desunti dalla misura di altre grandezze (ad esempio, la velocità di propagazione delle onde di volume). La misura dei parametri meccanici della muratura, in particolare di quelli di resistenza, non può essere eseguita se non attraverso prove distruttive, anche se su porzioni limitate (Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'O.P.C.M. 3274/2003). Nell'ingegneria civile, una lunga sperimentazione è stata condotta su queste tecniche; in particolare, sulle murature, è iniziata negli anni '60. Dal punto di vista qualitativo, i risultati delle prove soniche possono essere valutati per verificare l'omogeneità di un elemento strutturale, analizzare qualsiasi mutamento delle proprietà dei materiali a causa di fenomeni di degrado, esaminare i difetti in elementi strutturali (cavità, fessurazioni, strati superficiali danneggiati), stimare l'ordine di grandezza della resistenza dei materiali utilizzati, della densità e del modulo elastico. Il grande limite di questa tecnica, applicata alle murature, è la variabilità dei valori che si ottengono; la muratura storica essendo molto disomogenea e discontinua, rende il confronto tra differenti tipologie di murature poco attendibile (Binda et al., 2003).

I Principi dei metodi sonici

Tra i metodi di investigazione non distruttiva (NDT), le prove soniche sono le più utilizzate. La tecnica di indagineonica si basa sulla generazione di onde elastiche di compressione, nell'ambito di frequenze soniche (2-20 KHz), in un punto della struttura, prodotte da un breve impatto elasto-meccanico sulla superficie. Un martello strumentato è la fonte dell'onda acustica che si genera dall'impatto della massa battente sulla superficie di prova (Colla et al., 2007). L'elaborazione dei dati consiste nella misura del tempo e nel calcolo della velocità di attraversamento

dell'impulso dato nella muratura. Le indagini soniche sono utilizzate nelle diagnosi della muratura per:

- qualificare la morfologia della sezione, individuando la presenza di vuoti, difetti o lesioni;
- controllare le caratteristiche della muratura dopo interventi di consolidamento (iniezioni di malte e resine), verificando i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali.

Alcune relazioni legano la velocità di propagazione delle onde elastiche, attraverso un mezzo materiale, alle proprietà elastiche del mezzo stesso: infatti, la velocità di propagazione delle onde elastiche in un mezzo è direttamente correlabile alla densità ρ ed al modulo elastico dinamico E_d del mezzo stesso. La muratura presenta dei comportamenti caratteristici, rispetto alle indagini soniche: all'aumentare del livello di danneggiamento e quindi della presenza di fessure e vuoti, la velocità sonica diminuisce (Binda et al., 2003).

Le tipologie di onde

La teoria della propagazione delle onde in mezzi solidi si fonda su tre ipotesi: il materiale è omogeneo, isotropo ed ha un comportamento elastico-lineare. Un'onda può essere definita come una perturbazione che si propaga grazie alle proprietà del materiale in cui ha origine, inoltre, un'onda corrisponde sempre ad uno spostamento di energia senza spostamento reale di materia. All'interno di mezzi solidi si possono propagare due tipologie di onde: onde di volume ed onde di superficie. Possono essere così descritte:

- onde P (o primarie, o di compressione): sono onde di volume longitudinali che trasmettono alle particelle materiali, un movimento nella stessa direzione di propagazione dell'onda (come le onde sonore); hanno una velocità di propagazione tra i 3 e gli 8 Km/s e comportano una variazione di volume, infatti il mezzo è sottoposto a dilatazioni e compressioni (Fig. 7.1);

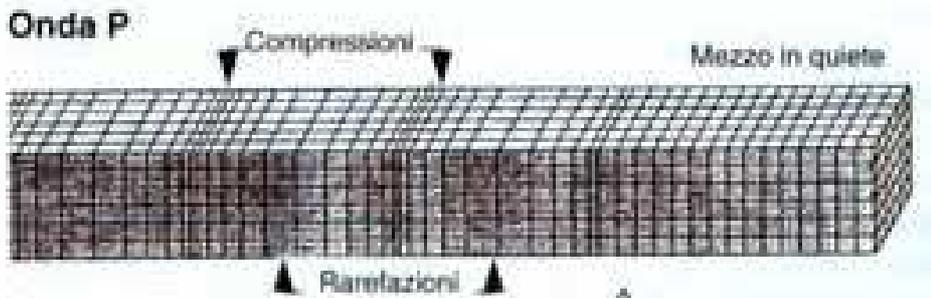


Fig. 7.1: Andamento delle onde P.

- onde S (o secondarie, o di taglio): sono onde di volume trasversali che trasmettono alle particelle materiali, un movimento ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda; sono più lente delle onde P e raggiungono una velocità di 2-5 Km/s; questo tipo di onda è fortemente attenuata nei mezzi poco rigidi fino a scomparire totalmente nei mezzi fluidi (Fig. 7.2);



Fig. 7.2: Andamento delle onde S.

- onde R (di Rayleigh): sono onde di superficie, quando si propagano in un mezzo omogeneo non presentano dispersione e la loro velocità è generalmente pari a 0,92 volte la velocità delle onde S. Si propagano sulla superficie, in corrispondenza dell'interfaccia mezzo solido-aria e la loro ampiezza si smorza velocemente con l'aumentare della profondità (Fig. 7.3).

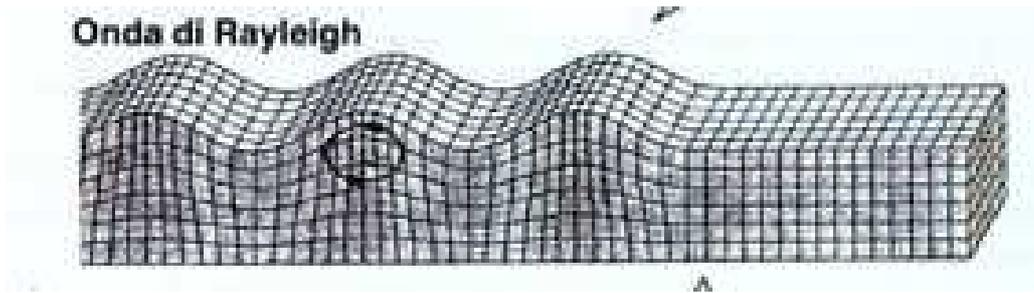


Fig. 7.3: Andamento delle onde di Rayleigh.

Le onde di compressione, per la loro maggiore velocità rispetto a quelle di taglio e per la loro maggiore energia nella direzione d'impatto, sono quelle generalmente sfruttate nelle prove soniche (Kramer, 1996).

Tecniche di prova

Le prove soniche possono essere eseguite per trasmissione secondo tre procedure:

- per trasmissione diretta: il trasmettitore e il ricevitore sono posti su facce opposte dell'elemento da testare, alla stessa quota; in questo modo l'onda generata compie, teoricamente, un percorso ortogonale al piano di prova e di ricezione. Tale procedura è possibile se le facce dell'elemento da studiare sono entrambe accessibili e se si è a conoscenza della distanza che divide le sonde (spessore della sezione) (Fig. 7.4);

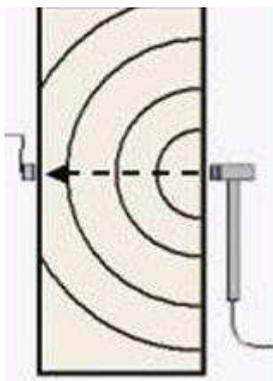


Fig. 7.4: Prova in trasmissione diretta.

- per trasmissione semi-diretta: la sonda trasmittente e la sonda ricevente sono posizionate su facce opposte della sezione da indagare, ma a quote diverse, oppure su lati ortogonali tra loro. I segnali che attraversano il materiale risultano, quindi, teoricamente rettilinei, ma inclinati rispetto al piano orizzontale o rispetto al piano verticale. Con questa tecnica si possono acquistare anche dati di tomografia, mantenendo le sonde su uno stesso piano e creando ventagli di acquisizione (Fig. 7.5);

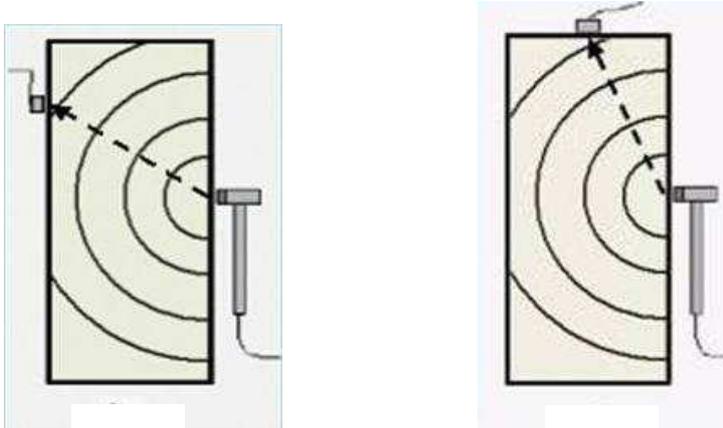


Fig. 7.5: Prova in trasmissione semidiretta

- per trasmissione superficiale: trasmettitore e ricevitore sono posizionati su uno stesso lato, ad una certa distanza. I percorsi dei segnali possono essere verticali, orizzontali o diagonali (Fig. 7.6).

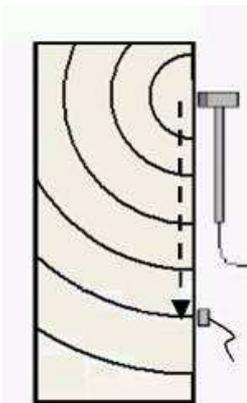


Fig. 7.6: Prova per trasmissione superficiale

Acquisizione dei dati in sito

La strumentazione utilizzata consiste di un generatore di onde elastiche di tipo impulsivo, cioè un martelletto strumentato, e di un ricevitore, cioè un accelerometro. Martello e accelerometro sono collegati ad una centralina di amplificazione che a sua volta è collegata ad una scheda di acquisizione di un computer grazie al quale è possibile controllare i segnali trasmessi e ricevuti in tempo reale e salvare i dati qualora siano ritenuti di sufficiente qualità (Fig. 7.7). Scelti i punti della griglia sui quali posizionare trasmettitore o ricevitore, si procede con la battuta del martello, l'analisi visuale dell'onda generata e di quella ricevuta e il salvataggio della relativa coppia di file. Intanto negli appunti si prende nota di eventuali anomalie osservate o udite, come può essere ad esempio un suono sordo al colpo del martello, e della corrispondenza tra il nome del file e le posizioni del trasmettitore e del ricevitore nella griglia. Per effettuare al meglio le prove il numero minimo di operatori coinvolti è tre, poiché uno utilizza il martello, un altro regge il ricevitore e un terzo controlla e acquisisce i dati al computer.

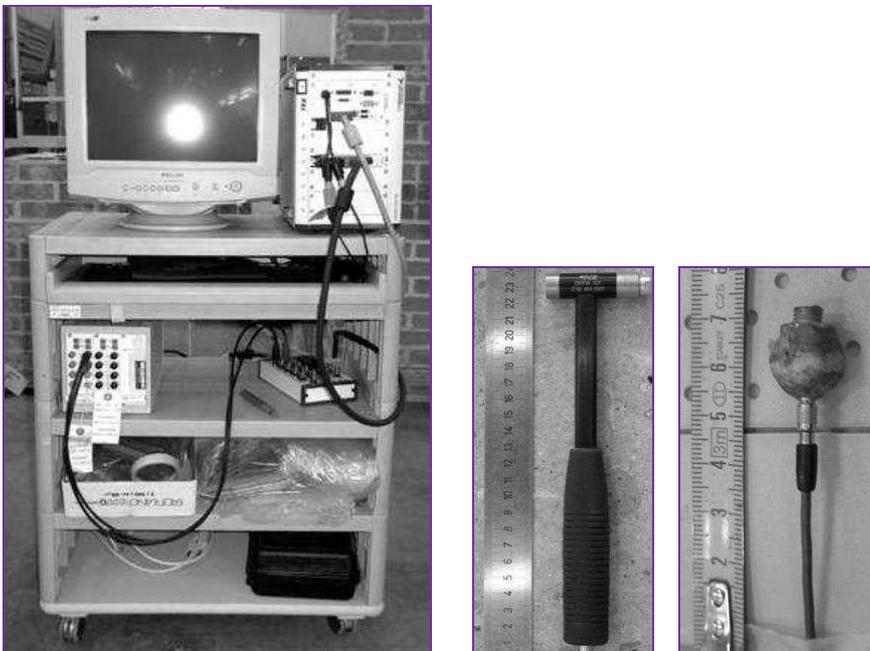


Fig. 7.7: Postazione per acquisizione dati, martelletto strumentato e sonda ricevente.

Elaborazione dei dati

I dati acquisiti in sito vengono richiamati e rielaborati utilizzando un programma in ambiente LABVIEW, grazie al quale si possono visualizzare le coppie di forme d'onda del martello e dell'accelerometro. Le onde sono visualizzate nello stesso grafico tempo–ampiezza con due colori diversi ad indicare l'onda del trasmettitore (in blu) e l'onda del ricevitore (in rosso). Con due cursori è possibile spostarsi sul grafico e posizionarsi nei punti desiderati.

Tempo di volo e calcolo della velocità di propagazione

Il tempo di volo è il tempo che trascorre tra l'istante in cui il martello inizia a percuotere la superficie e l'istante in cui il ricevitore registra l'arrivo del primo fronte d'onda del segnale. È possibile calcolare il tempo di volo semplicemente posizionando opportunamente i due cursori uno sull'onda generata dal martello e uno sull'onda captata dalla sonda e misurandone la differenza temporale (Fig. 7.8).

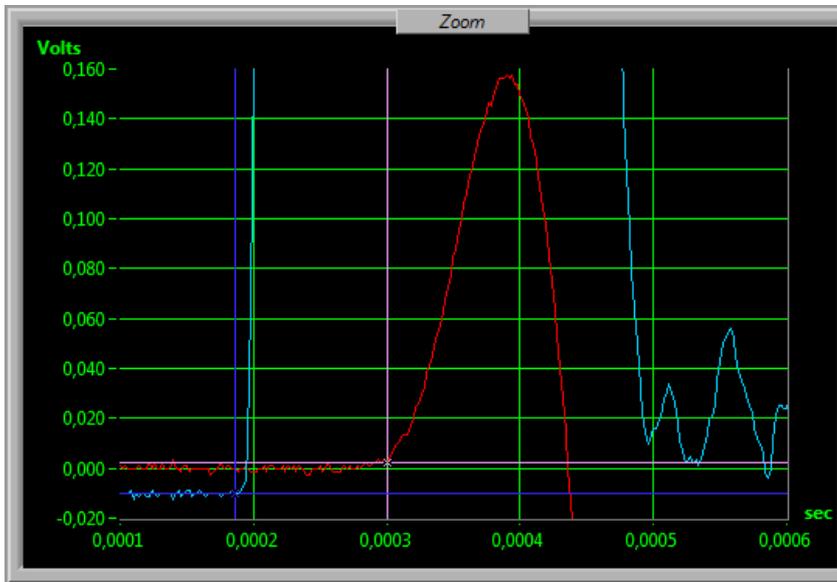


Fig. 7.8: Esempio di calcolo del tempo di volo del segnale da una coppia di forme d'onda.

Misurato il tempo di volo, conoscendo la distanza geometrica tra il trasmettitore e il ricevitore è possibile calcolare la velocità di propagazione dell'onda all'interno del materiale attraverso la seguente relazione:

$$v = \frac{L}{T_v} [m/s]$$

dove L è la lunghezza del percorso del segnale in metri e T_v il tempo di volo in secondi. La velocità calcolata in questo modo è una velocità apparente perché la lunghezza considerata nel calcolo è quella di un percorso supposto rettilineo, mentre in realtà il percorso del segnale ha un andamento che varia a seconda della struttura e della composizione del materiale che incontra.

Tempo di contatto, frequenza e risoluzione

Il tempo di contatto è il tempo che passa tra il momento in cui il martello strumentato colpisce il materiale e il momento in cui il martello rimbalza dalla superficie di battuta. Anche per calcolare il tempo di contatto si visualizza la forma d'onda e si posiziona un cursore all'inizio ed uno alla fine dell'onda in blu generata dal martello (Fig. 7.9).

Dal tempo di contatto si può calcolare la frequenza massima dell'onda in quello specifico punto, tramite la relazione:

$$f_{\max} = \frac{1}{T_c} [Hz]$$

Note velocità dell'onda e frequenza si può calcolare la lunghezza d'onda minima in quel punto:

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{f_{\max}} [m]$$

La risoluzione della prova, in termini di profondità minima e di dimensione minima del difetto riconoscibile, è legata alla lunghezza d'onda e per murature storiche si considera solitamente:

$$R = \frac{\lambda}{3} \div \frac{\lambda}{2}$$

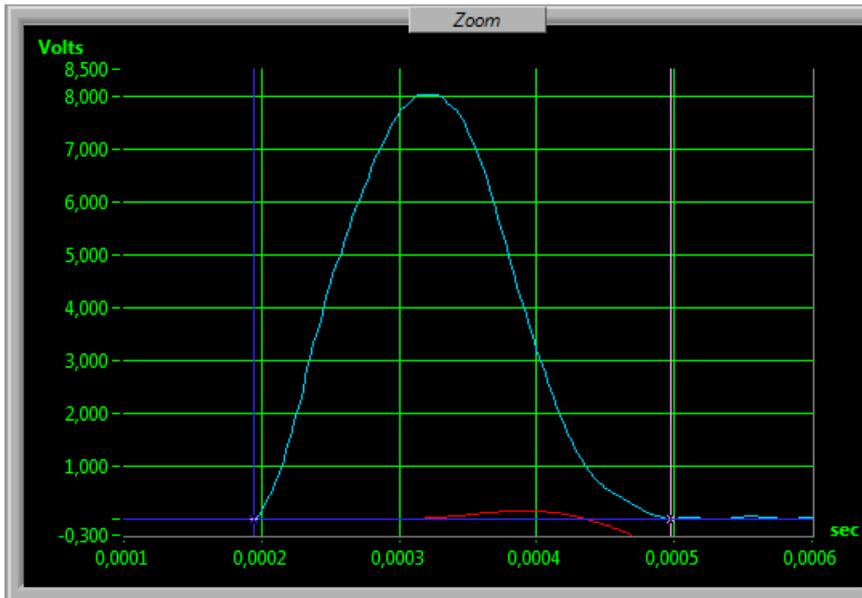


Fig. 7.9: Esempio di calcolo del tempo di contatto del segnale dalla forma d'onda del martello.

Attenuazione del segnale

Le onde che si propagano all'interno di un solido si attenuano allontanandosi dalla sorgente, poiché l'energia immessa si distribuisce su superfici sempre più ampie: si parla allora di attenuazione geometrica. Esiste, però, un altro tipo di attenuazione del segnale detta attenuazione strutturale, che è fortemente legata alla natura del materiale attraversato, il quale disperde energia sotto forma di calore, per effetto delle deformazioni anelastiche ed attenua il segnale in seguito a ripetute riflessioni dell'onda, quando questa incontra discontinuità nella materia. Elevate velocità di propagazione e basse attenuazioni si riscontrano, di solito, in materiali omogenei ad alta densità, mentre, passando a solidi porosi ed eterogenei, si evidenziano basse velocità e forti attenuazioni. L'attenuazione del segnale può essere così calcolata:

$$A(dB) = 20 \log_{10} \frac{P_0}{P}$$

dove P_0 è la pressione acustica della superficie di contatto e P è la pressione acustica ad una certa distanza (Sansalone e Street, 1997). Il calcolo

dell'attenuazione può essere svolto tramite l'equazione precedente dove A_0 è l'ampiezza massima del segnale trasmesso e A è l'ampiezza massima del segnale ricevuto, entrambi espressi in Volt. Il rapporto tra A e A_0 è chiamato ampiezza ed è facilmente calcolabile utilizzando la rappresentazione grafica delle forme d'onda, fornita dal programma di elaborazione in ambiente LabView (Fig. 7.10). Le ampiezza massime delle due onde sono state lette sulle figure, dove il segnale del martello è indicato con colore blu e quello dell'accelerometro è di colore rosso. L'ampiezza del martello è leggibile direttamente in alto a sinistra, mentre l'ampiezza del ricevitore va determinata con più attenzione: il primo picco registrato di solito non viene considerato, poiché può derivare dal disturbo di fondo, si considerano, quindi, i successivi picchi, positivo e negativo. I valori, massimo e minimo, dell'ampiezza del ricevitore, vengono poi sottratti per calcolare il valore di ampiezza effettivo.

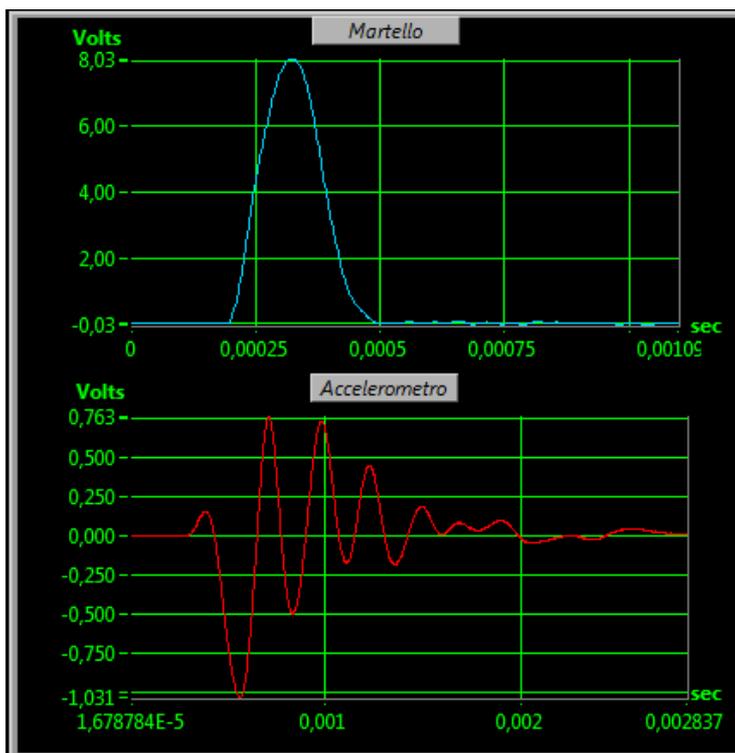


Fig. 7.10: Ampiezza del segnale trasmesso (in blu) e del segnale ricevuto (in rosso).

8. APPLICAZIONE IN SITO: PROVE SONICHE PRESSO IL DUOMO DI MODENA

Le prove soniche effettuate al Duomo di Modena in data 29/06/2010 fanno parte di uno studio preliminare in previsione di una eventuale campagna di prove più approfondita, infatti le zone analizzate sono circoscritte ad una porzione d'area limitata dell'edificio.

Ispezione visuale

Le posizioni di prova sono state scelte dopo un'accurata ispezione visuale della struttura e delle parti che la compongono. Per la scelta si è tenuto conto:

- della logistica: era necessario trovare una posizione agevole nella quale si potevano far passare i fili degli strumenti; infatti nel caso di prove dirette ricevitore e trasmettitore devono essere su facce opposte dell'elemento sotto indagine;
- della qualità della superficie di prova: la superficie materica deve essere il più liscia possibile per permettere una migliore aderenza degli strumenti di prova ai conci e quindi ottenere un segnale meno disturbato e più facilmente interpretabile.

Acquisizione dei dati in sito

Per l'acquisizione dei dati in sito è stata utilizzata la strumentazione descritta al Cap.8 con le modalità anch'esse trattate nel precedente capitolo.

Descrizione delle posizioni di prova

Sono state scelte 4 posizioni (Fig. 8.1):

- posizione 1: porzione di parete di facciata (Fig. 8.4),
- posizione 2: porzione di parete laterale orientata a nord (Fig. 8.2),

- posizione 3: primo pilastro di muratura sul lato sinistro della navata centrale entrando dall'ingresso principale (Fig. 8.3),
- posizione 4: prima colonna di pietra sul lato sinistro della navata centrale entrando dall'ingresso principale.

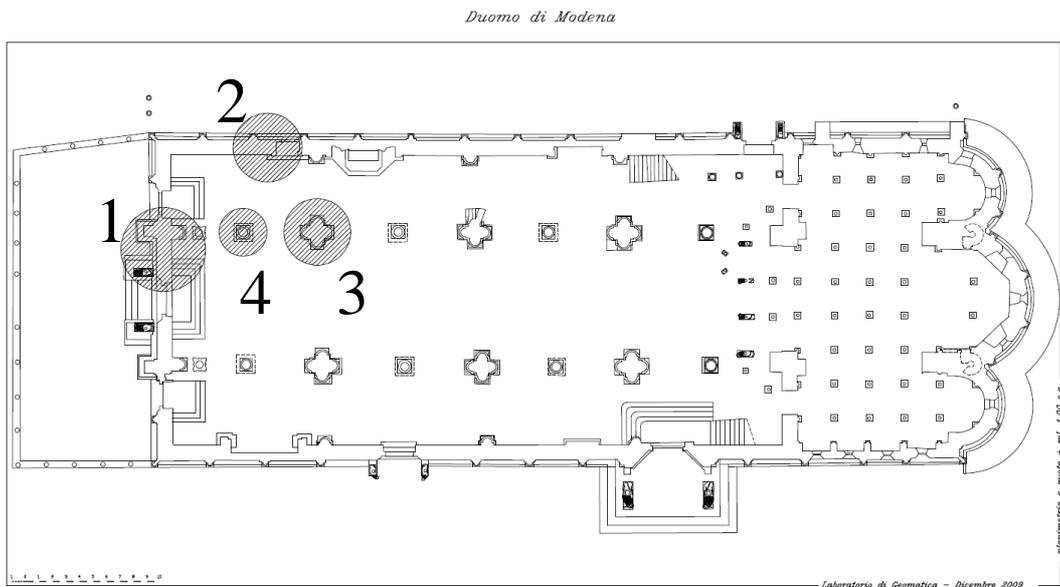


Fig. 8.1: Pianta del Duomo con indicazioni delle posizioni di prova soniche (aggiornamento da tavole Prof. Capra)

Fasi preparatorie all'indagine

Individuate le posizioni di misura che rispecchiavano caratteristiche ricercate sono stati stabiliti il passo e i punti delle griglie di prova che dovevano adattarsi per dimensioni agli spazi concessi dagli elementi architettonici e di decoro, ma che dovevano essere anche correttamente allineate per permettere la trasmissione delle onde lungo percorsi e distanze note. Infatti, preso ad esempio il caso delle prove dirette un punto della griglia della parete esterna deve avere il suo corrispondente perfettamente allineato ed alla stessa quota nella griglia della parete interna.

Le stazioni delle griglie sono state segnate con un gessetto per cercare di sporcare il meno possibile e non danneggiare la superficie che non è stata trattata in alcun modo.

Ultimate le griglie per ogni posizione sono state effettuate le seguenti operazioni:

- documentazione fotografica accurata,
- eidotipo (disegno proporzionato a mano libera) della porzione di parete e della griglia segnata,
- annotazione negli appunti di ogni difetto o particolarità della zona da investigare e dello stato della superficie.

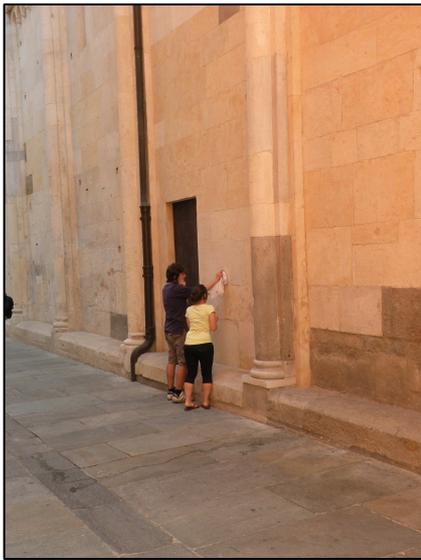


Fig. 8.2 e 8.3: Fotografie delle acquisizioni nella parete Nord (a destra) e nel pilastro di muratura (a sinistra)



Fig. 8.4: Fotografia dell'acquisizione nell'interno della facciata.

Calcolo della risoluzione

Tramite le relazioni presentate al capitolo 7 è possibile stimare la risoluzione e dunque la minima lunghezza dei percorsi utili e la minima dimensione dei difetti individuabili. Il tempo di contatto e le lunghezze d'onda minime non sono stati calcolati su tutti i file acquisiti, ma solo su alcuni presi a campione dalle prove di trasmissione diretta (Tabella 8.1).

Tabella 8.1: tempi di contatto, lunghezze d'onda minime e risoluzione di punti presi a campione.

Nome file	Tx	t_c (microsec)	f_{max} (Hz)	V (m/s)	λ_{min} (cm)	R = 1/3 - 1/2 λ_{min}	
BINDIRFACCIATA0	6	306	3268	1633	50	17	25
BINDIRFACCIATA8	1	192	5208	1058	20	7	10
BINDIRFACCIATA12	5	232	4310	1022	24	8	12
Media posiz. 1		243	4262	1238	31	10	16
BINDIRPANORD0	17	234	4274	2063	48	16	24
BINDIRPANORD2	20	216	4630	1768	38	13	19
BINDIRPANORD3	21	246	4065	1628	40	13	20
Media posiz. 2		232	4323	1820	42	14	21
BINDIRPILMURAT0	1	294	3401	781	23	8	11
BINDIRPILMURAT13	17	240	4167	1564	38	13	19
BINDIRPILMURAT18	9	264	3788	2011	53	18	27
Media posiz. 3 a 45 cm		266	3785	1452	38	13	19
BINDIRPILMURAT_BIS0	1'	296	3378	894	26	9	13
BINDIRPILMURAT_BIS13	11'	248	4032	1057	26	9	13
BINDIRPILMURAT_BIS14	9'	336	2976	1556	52	17	26
Media posiz. 3 a 142 cm		293	3462	1169	35	12	17
BINDIRPILPIETBIS0	N	258	3876	4667	120	40	60
BINDIRPILPIETBIS3	O	324	3086	4605	149	50	75
BINDIRPILPIETBIS6	E	384	2604	3804	146	49	73
Media posiz. 4 a 70 cm		322	3189	4359	139	46	69
BINDIRPILPIET0	N	236	4237	5227	123	41	62
BINDIRPILPIET3	O	262	3817	5227	137	46	68
BINDIRPILPIET6	E	196	5102	5308	104	35	52
Media posiz. 4 a 140 cm		231	4385	5254	121	40	61
BINDIRPILPIETTER0	N	176	5682	4821	85	28	42
BINDIRPILPIETTER3	O	244	4098	5034	123	41	61

BINDIRPILPIETTER6	E	282	3546	4116	116	39	58
Media posiz. 4 a 260 cm		234	4442	4657	108	36	54

Analisi e visualizzazione dei dati

Tutti i dati sono stati ordinati in tabelle, nelle quali oltre alle velocità di ogni percorso sono state calcolate le velocità medie per ogni gruppo di prove. Sono stati creati anche dei grafici in Excel di tre tipologie diverse:

- diagramma distanza – velocità,
- diagramma tempo – distanza,
- istogramma delle velocità.

Il diagramma tempo – distanza è servito per le prove superficiali per controllare che i punti fossero posizionati circa nella diagonale del grafico, in quanto ci si aspetta che il tempo di volo aumenti proporzionalmente all'aumentare della distanza. I percorsi con caratteristiche simili, come ad esempio la lunghezza, la quota o l'inclinazione, sono stati raggruppati in una stessa serie per permettere una visualizzazione più chiara e comprensibile. Gli istogrammi delle velocità sono stati elaborati solo per il pilastro di muratura, sul quale è stata effettuata un'analisi più approfondita. Gli istogrammi sono stati affiancati ai disegni del pilastro ed allineati così da far coincidere la velocità letta sul diagramma all'effettiva posizione che ha nel pilastro.

Facciata, posizione 1

Sulla parete di facciata, sono state segnate una griglia in interno e, alle corrispondenti posizioni, una griglia in esterno, di dimensioni 0,5×1 m (b×h) composta di 2 colonne di 3 stazioni ciascuna (Fig. 8.5 e 8.6). Tra l'esterno e l'interno sono state effettuate prove di trasmissione diretta con trasmettitore posto sulla parete esterna (Tab. 8.2), mentre sulla superficie all'interno sono state effettuate prove per trasmissione superficiale con percorsi orizzontali, verticali e diagonali (Tab. 8.3).

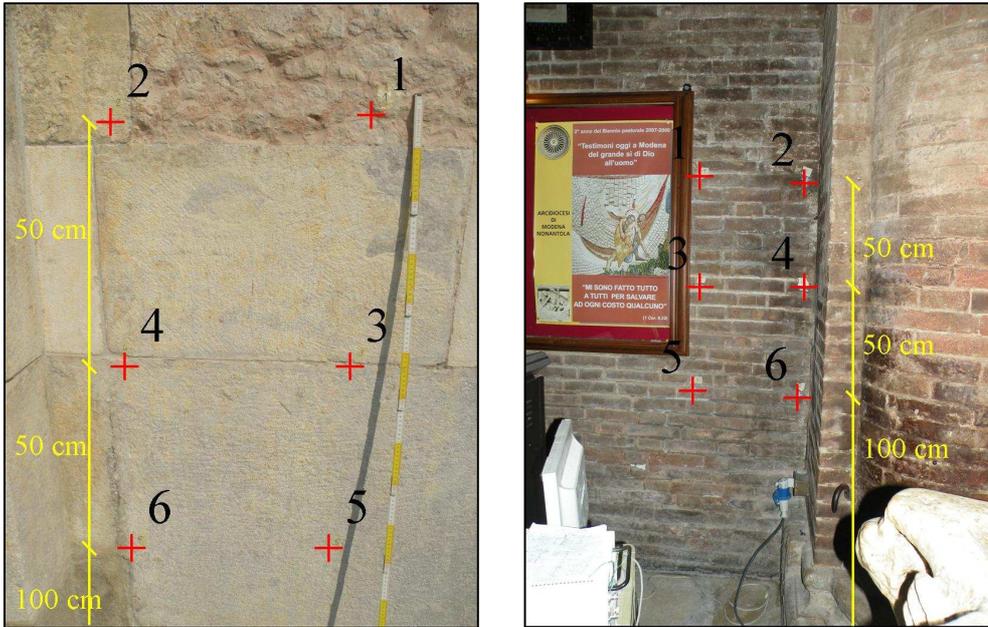
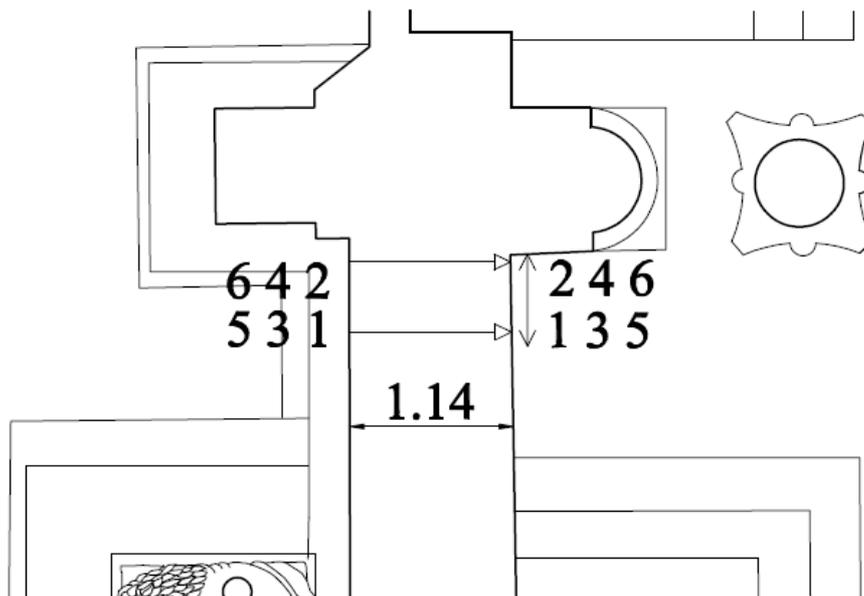


Fig. 8.5 e 8.6: Esterno (a destra) ed interno (a sinistra) della parete di facciata con griglie di prova.



—> **Prove dirette**
 <—> **Prove superficiali**

Fig. 8.7: Dettaglio della facciata: pianta con direzioni di prova tra esterno e interno.

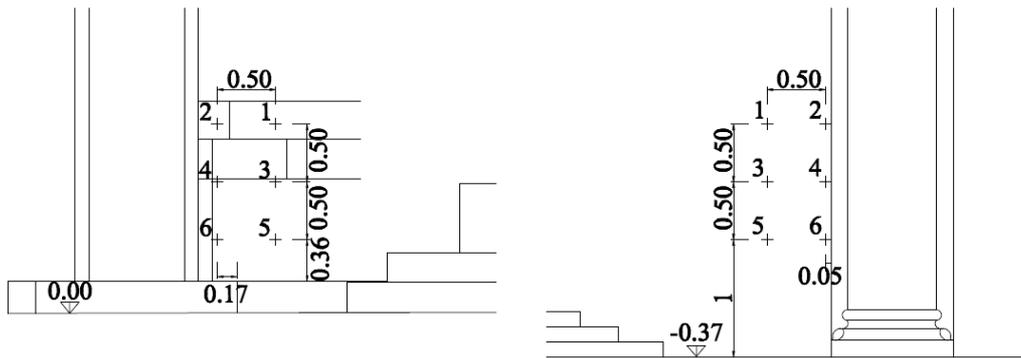


Fig. 8.8: Griglia di prova in esterno alla facciata (a sinistra) e in interno (a destra).

Tabella 8.2: Posizione 1, dati dalle prove in trasmissione diretta.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	Velocità media (m/s)
BinDirFacciata0	6	6	692	113	1633	
BinDirFacciata1	6	6	656	113	1723	1678
BinDirFacciata2	4	4	612	113	1846	
BinDirFacciata3	4	4	820	113	1378	1612
BinDirFacciata4	3	3	686	113	1647	
BinDirFacciata5	3	3	712	113	1587	1617
BinDirFacciata6	2	2	770	113	1468	
BinDirFacciata7	2	2	750	113	1507	1487
BinDirFacciata8	1	1	1144	113	988	
BinDirFacciata9	1	1	1310	113	863	
BinDirFacciata10	1	1	1330	113	850	900
BinDirFacciata11	5	5	1088	113	1039	
BinDirFacciata12	5	5	1106	113	1022	1030
					V_m tot	1350

Tabella 8.3: Posizione 1, dati dalle prove in trasmissione superficiale sul lato interno della parete (muratura di laterizio).

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinSupFacciataInt0	1	5	524	100	1908
BinSupFacciataInt1	2	6	680	100	1471
BinSupFacciataInt2	2	4	324	50	1543
BinSupFacciataInt3	1	3	326	50	1534
BinSupFacciataInt4	3	5	308	50	1623
BinSupFacciataInt5	4	6	292	50	1712
BinSupFacciataInt6	2	1	260	50	1923
BinSupFacciataInt7	4	3	290	50	1724
BinSupFacciataInt8	6	5	252	50	1984
BinSupFacciataInt9	2	5	554	112	2022
BinSupFacciataInt10	4	5	418	71	1699
BinSupFacciataInt11	6	3	430	71	1651
BinSupFacciataInt12	6	1	564	112	1986
				V_m tot	1752

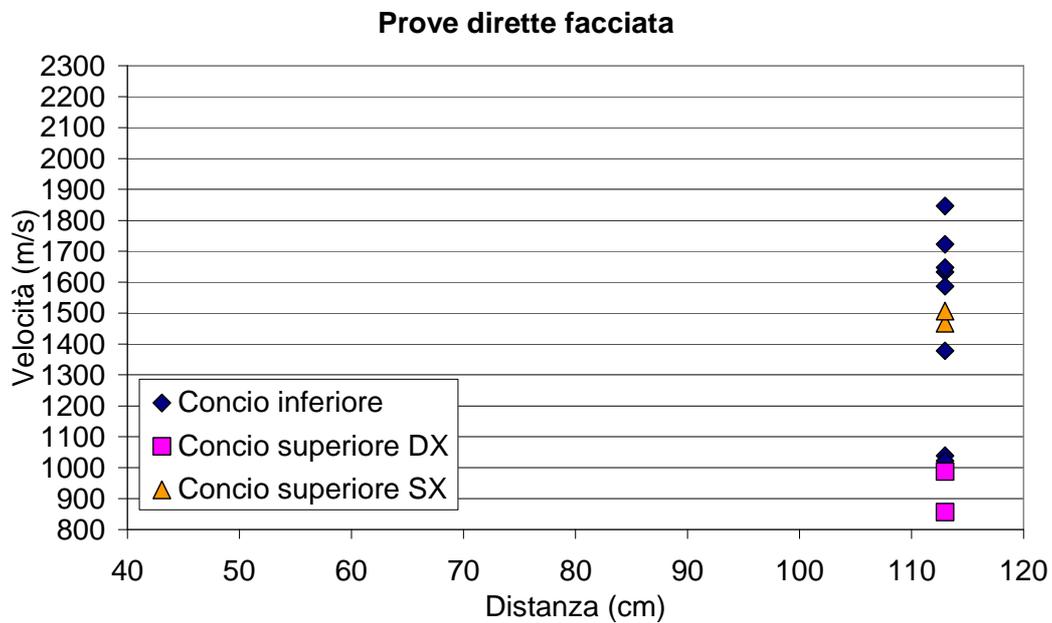


Fig. 8.9: Grafico distanza – velocità delle prove dirette tra esterno ed interno della parete di facciata.

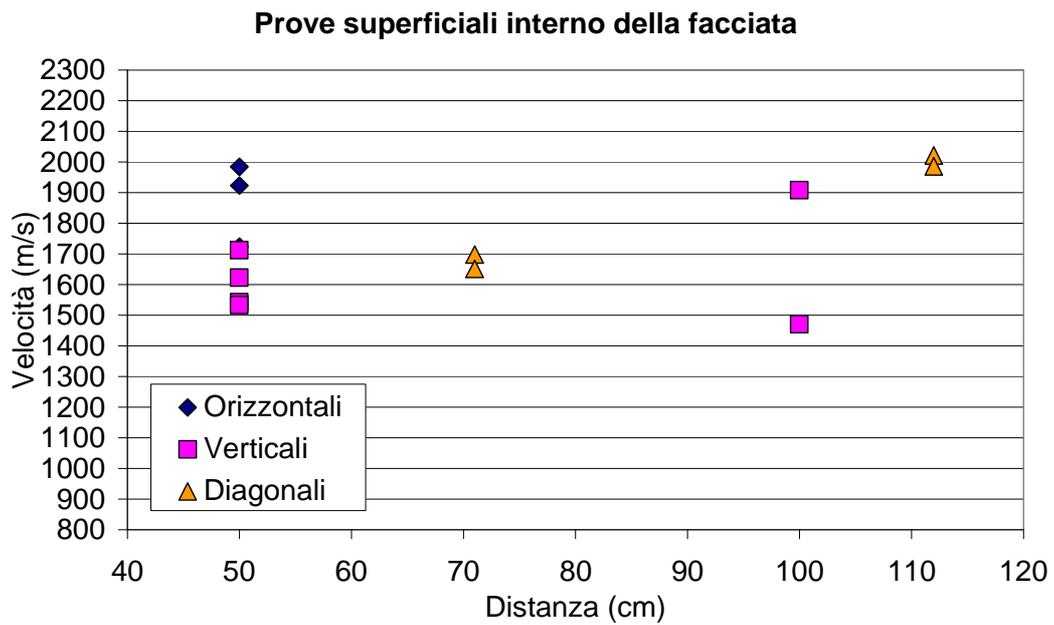


Fig. 8.10: Grafico distanza – velocità delle prove superficiali all'interno della parete di facciata.

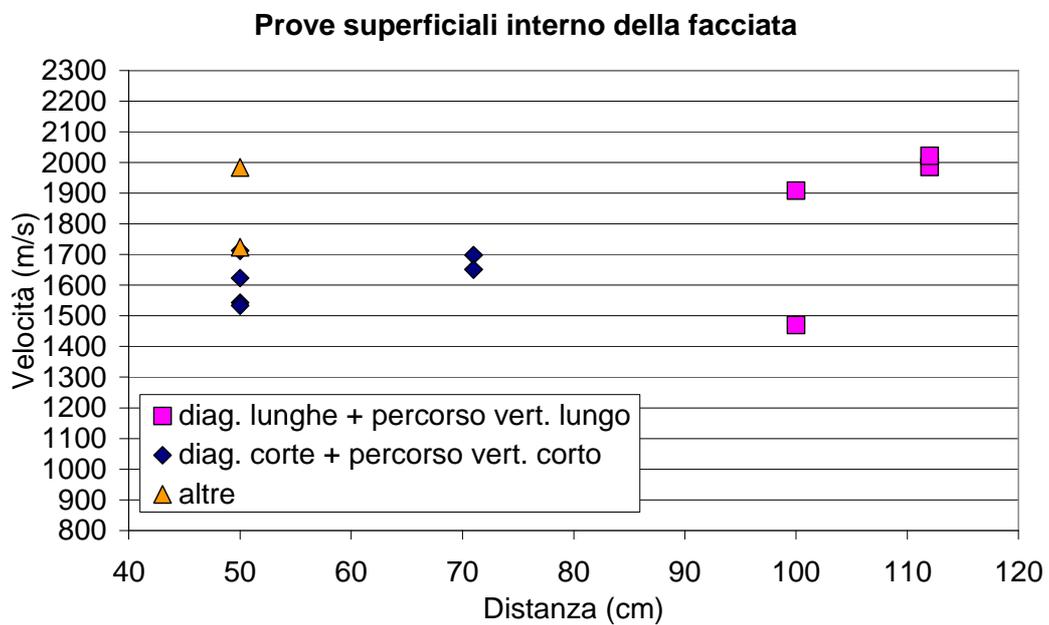


Fig. 8.11: Grafico distanza – velocità delle prove superficiali all'interno della parete di facciata.

Parete Nord, posizione 2

Sono state preparate con delle griglie la superficie interna e la superficie esterna della parete laterale rivolta a nord e la parete che si trova tra le due porte. La griglia della parete esterna ha dimensioni $1,2 \times 1$ m ($b \times h$), mentre quella della parete interna ha dimensioni $0,8 \times 1$ m ($b \times h$). Le due griglie hanno dimensioni diverse perché non è stato possibile segnare nella parete interna tutti i punti corrispondenti alla griglia esterna. Tra l'esterno e l'interno sono state effettuate prove di trasmissione diretta con trasmettitore sulla superficie esterna; tra la parete interna, la parete esterna e la parete tra le porte, prove di trasmissione semidiretta con ricevitore sulla superficie tra le due porte; sul paramento interno prove di trasmissione superficiale con percorsi orizzontali, verticali e diagonali.

In trasmissione diretta sono state acquisite solo le 4 posizioni inferiori, perché in tutte le altre il rumore di fondo superava il segnale ricevuto. Anche per l'acquisizione in trasmissione semidiretta si sono trovate alcune difficoltà e per avere dei dati di sufficiente qualità le prove nelle prime 11 posizioni sono state ripetute più volte.

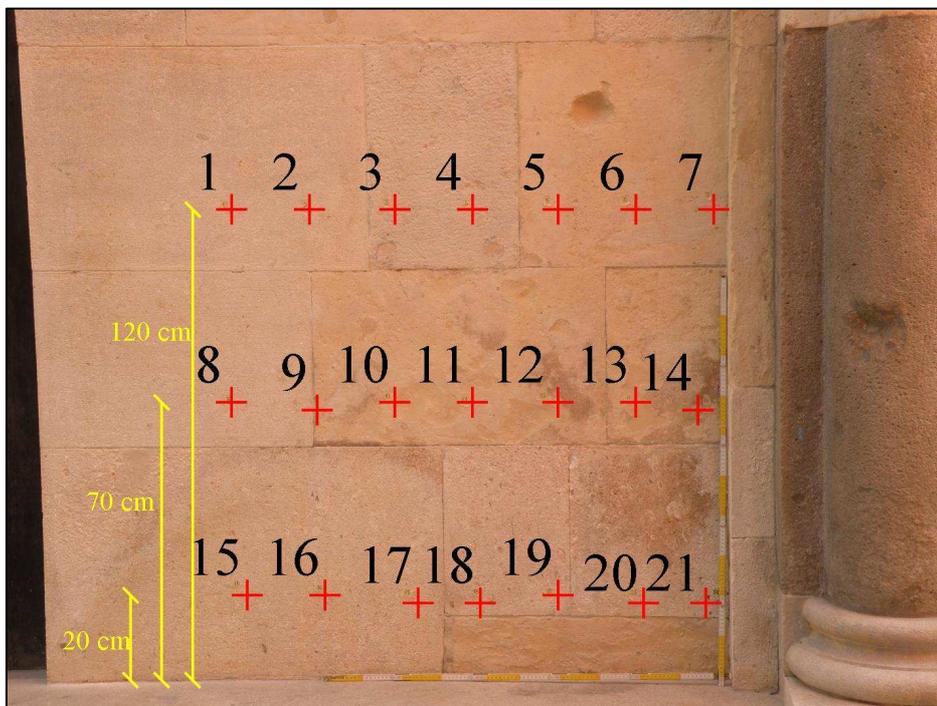


Fig. 8.12: Esterno della parete Nord con griglia di prova.

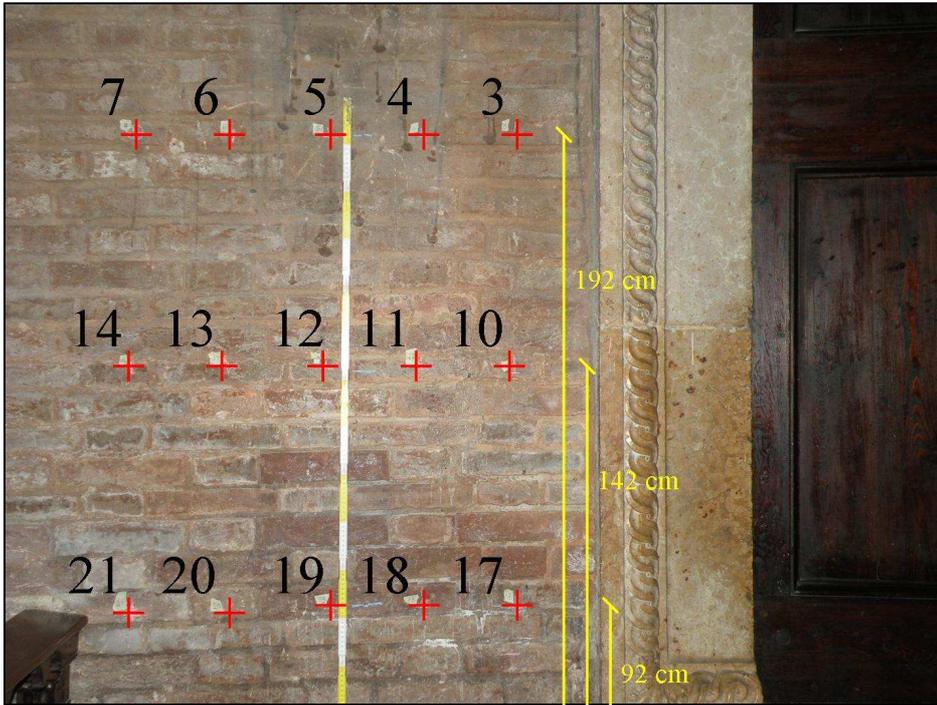


Fig. 8.13: Interno della parete Nord con griglia di prova.

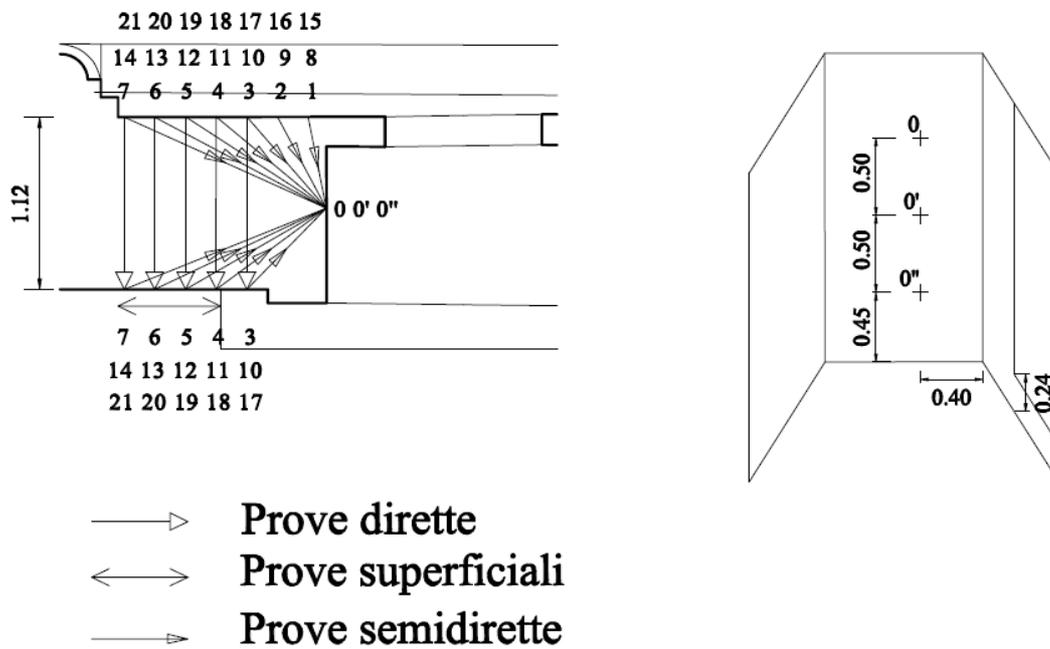


Fig. 8.14: Parete nord, pianta con griglie di prova e assonometria parete ortogonale.

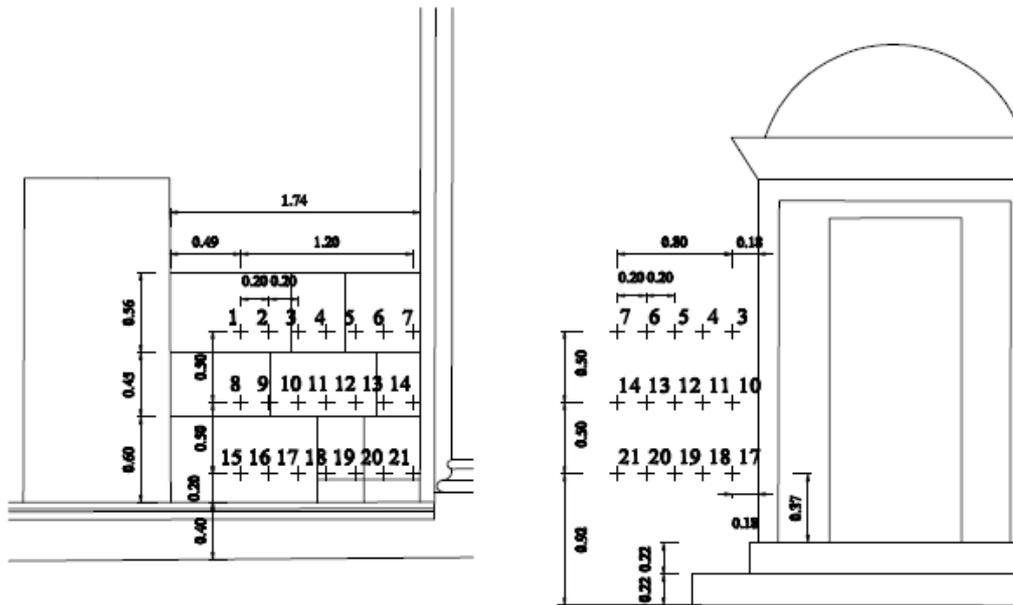


Fig. 8.15: Parete nord, prospetti esterno e interno con griglie di prova.

Tabella 8.4: Posizione 2, dati dalle prove in trasmissione diretta.

Nome file	Tx Est.	Rx Int.	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinDirPaNord0	17	17	538	111	2063
BinDirPaNord1	18	18	558	111	1989
BinDirPaNord2	20	20	628	111	1768
BinDirPaNord3	21	21	682	111	1628
				V _m tot	1862

Tabella 8.5: Posizione 2, dati dalle prove in trasmissione semidiretta.

Nome file	Tx Int.	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinSemiDirPaNord_Int0	3	0	604	73	1209
BinSemiDirPaNord_Int1	4	0	700	88	1257
BinSemiDirPaNord_Int2	5	0	670	105	1567
BinSemiDirPaNord_Int3	6	0	792	122	1540
BinSemiDirPaNord_Int4	7	0	934	140	1499

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinSemiDirPaNord_Int5	10	0'	456	73	1601
BinSemiDirPaNord_Int6	11	0'	632	88	1392
BinSemiDirPaNord_Int7	12	0'	784	105	1339
BinSemiDirPaNord_Int8	13	0'	734	122	1662
BinSemiDirPaNord_Int9	14	0'	866	140	1617
BinSemiDirPaNord_Int10	17	0''	464	73	1573
BinSemiDirPaNord_Int11	18	0''	510	88	1725
BinSemiDirPaNord_Int12	19	0''	644	105	1630
BinSemiDirPaNord_Int13	20	0''	638	122	1912
BinSemiDirPaNord_Int14	21	0'''	742	140	1887
Tx est.				V _{media}	1560
BinSemiDirPaNord_ok0	1	0	470	61	1298
BinSemiDirPaNord_ok1	2	0	746	68	912
BinSemiDirPaNord_ok2	3	0	726	79	1088
BinSemiDirPaNord_ok3	4	0	1012	94	929
BinSemiDirPaNord_ok4	5	0	1176	110	935
BinSemiDirPaNord_ok5	6	0	1400	127	907
BinSemiDirPaNord_ok6	7	0	1538	145	943
BinSemiDirPaNord_ok7	8	0'	314	61	1943
BinSemiDirPaNord_ok8	9	0'	390	68	1744
BinSemiDirPaNord_ok9	10	0'	554	79	1426
BinSemiDirPaNord_ok10	11	0'	618	94	1521
BinSemiDirPaNord_ok11	12	0'	680	110	1618
BinSemiDirPaNord_ok12	13	0'	848	127	1498
BinSemiDirPaNord_ok13	14	0'	1048	145	1384
BinSemiDirPaNord_ok14	15	0''	312	61	1955
BinSemiDirPaNord_ok15	16	0''	372	68	1828
BinSemiDirPaNord_ok16	17	0''	366	79	2158
BinSemiDirPaNord_ok17	18	0''	438	94	2146
BinSemiDirPaNord_ok18	19	0''	584	110	1884
BinSemiDirPaNord_ok19	20	0''	612	127	2075
BinSemiDirPaNord_ok20	21	0''	724	145	2003
				V _{media}	1533
				V _{m tot}	1545

Tabella 8.6: Posizione 2, dati dalle prove in trasmissione superficiale sul paramento interno di laterizio.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
-----------	----	----	---------------	-------------------------	----------------

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

			(microsec)		
BinSupPaNordInt0	3	7	622	80	1286
BinSupPaNordInt1	4	7	388	60	1546
BinSupPaNordInt2	7	3	572	80	1399
BinSupPaNordInt3	14	10	554	80	1444
BinSupPaNordInt4	13	10	406	60	1478
BinSupPaNordInt5	10	14	620	80	1290
BinSupPaNordInt6	11	14	364	60	1648
BinSupPaNordInt7	17	21	676	80	1183
BinSupPaNordInt8	18	21	404	60	1485
BinSupPaNordInt9	21	18	390	60	1538
BinSupPaNordInt10	21	17	556	80	1439
BinSupPaNordInt11	3	10	456	50	1096
BinSupPaNordInt12	3	17	892	100	1121
BinSupPaNordInt13	4	11	470	50	1064
BinSupPaNordInt14	4	18	746	100	1340
BinSupPaNordInt15	5	12	368	50	1359
BinSupPaNordInt16	5	19	700	100	1429
BinSupPaNordInt17	6	13	362	50	1381
BinSupPaNordInt18	6	20	650	100	1538
BinSupPaNordInt19	7	14	340	50	1471
BinSupPaNordInt20	7	21	744	100	1344
BinSupPaNordInt21	4	13	480	64	1333
BinSupPaNordInt22	4	21	892	117	1312
BinSupPaNordInt23	7	12	478	64	1339
BinSupPaNordInt24	7	10	796	94	1181
BinSupPaNordInt25	7	17	776	128	1649
BinSupPaNordInt26	7	19	820	108	1317
				V _m tot	1371

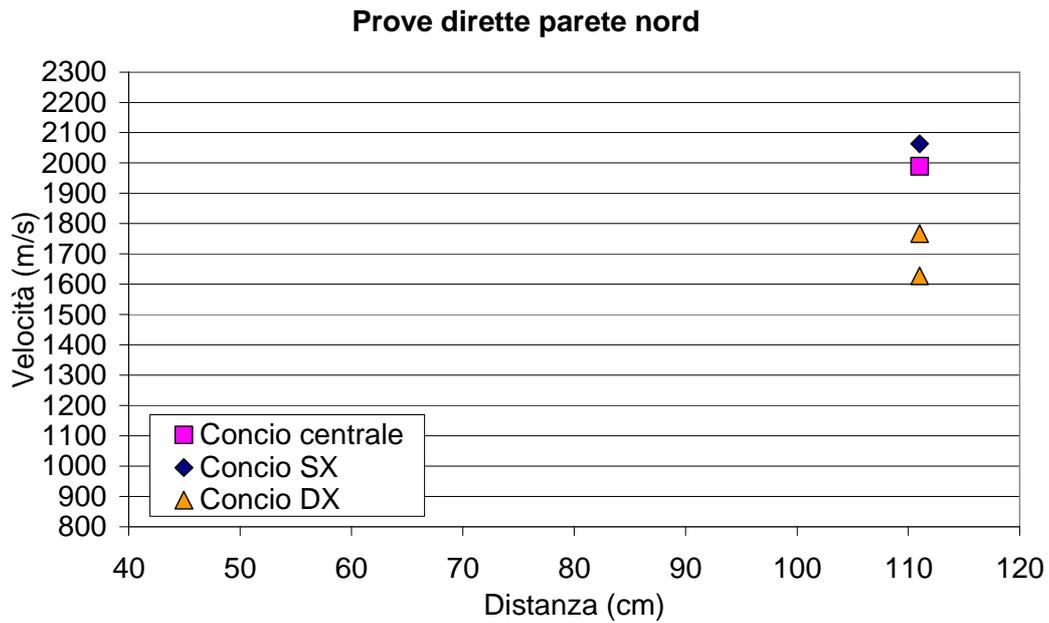


Fig. 8.16: Grafico distanza – velocità dalle prove dirette tra interno ed esterno della parete Nord.

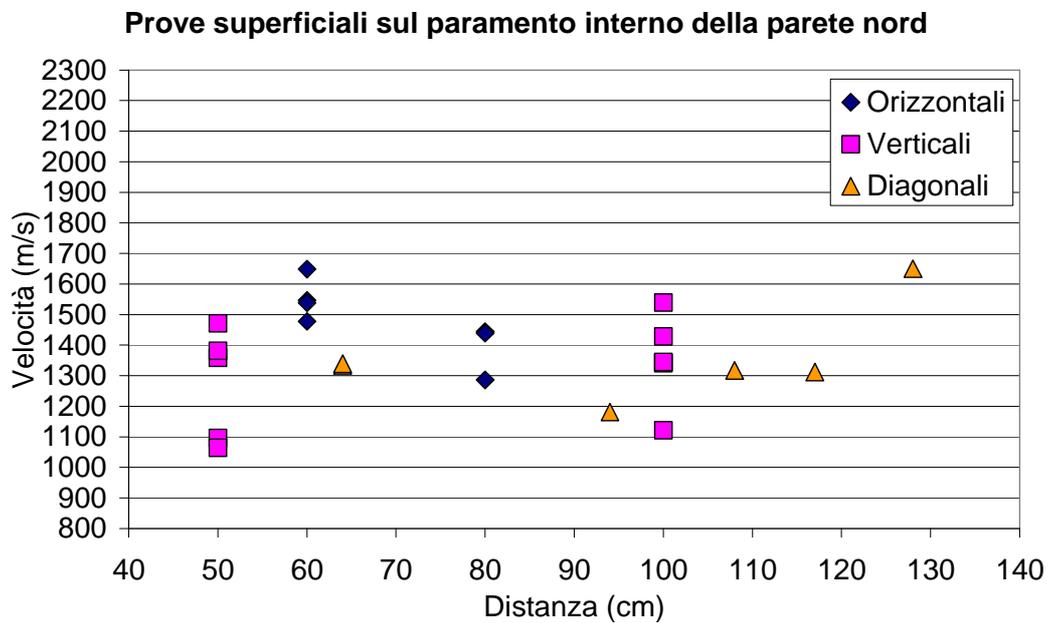


Fig. 8.17: Grafico distanza – velocità dalle prove superficiali all'interno della parete Nord.

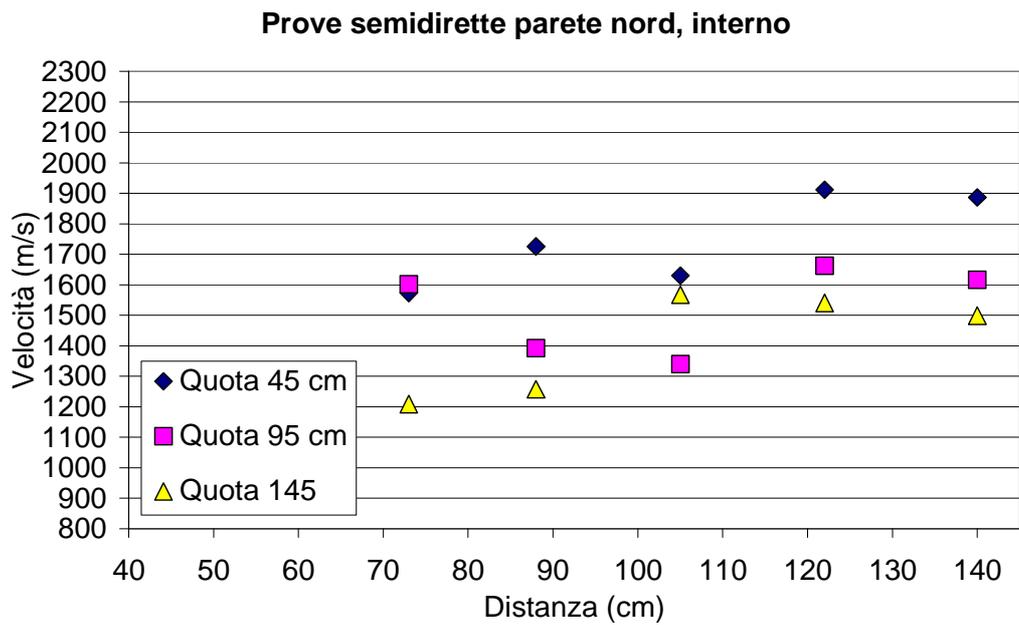


Fig. 8.18: Posizione 2, grafico distanza – velocità dalle prove semidirette con trasmettitore nella parete interna.

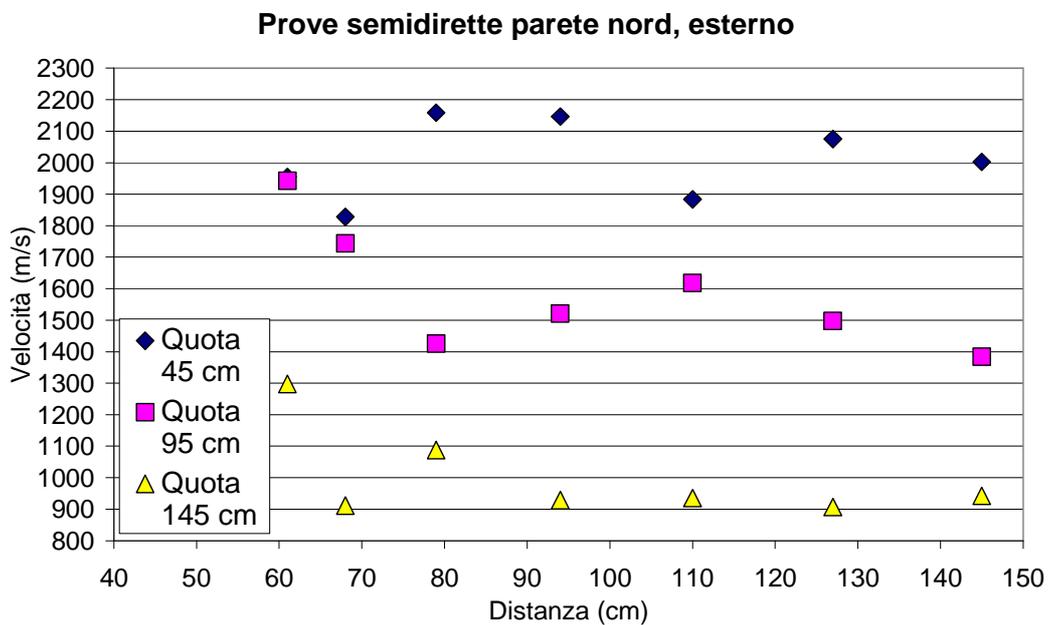


Fig. 8.19: Posizione 2, grafico distanza – velocità dalle prove semidirette con trasmettitore nella parete esterna.

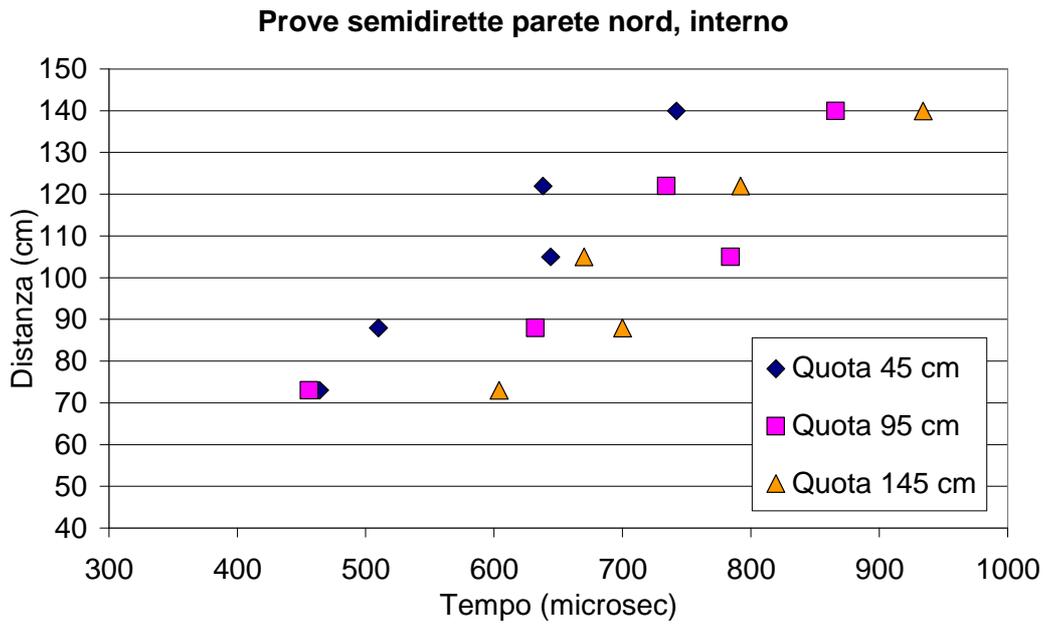


Fig. 8.20: Posizione 2, grafico tempo – distanza dalle prove semidirette con trasmettitore nella parete interna

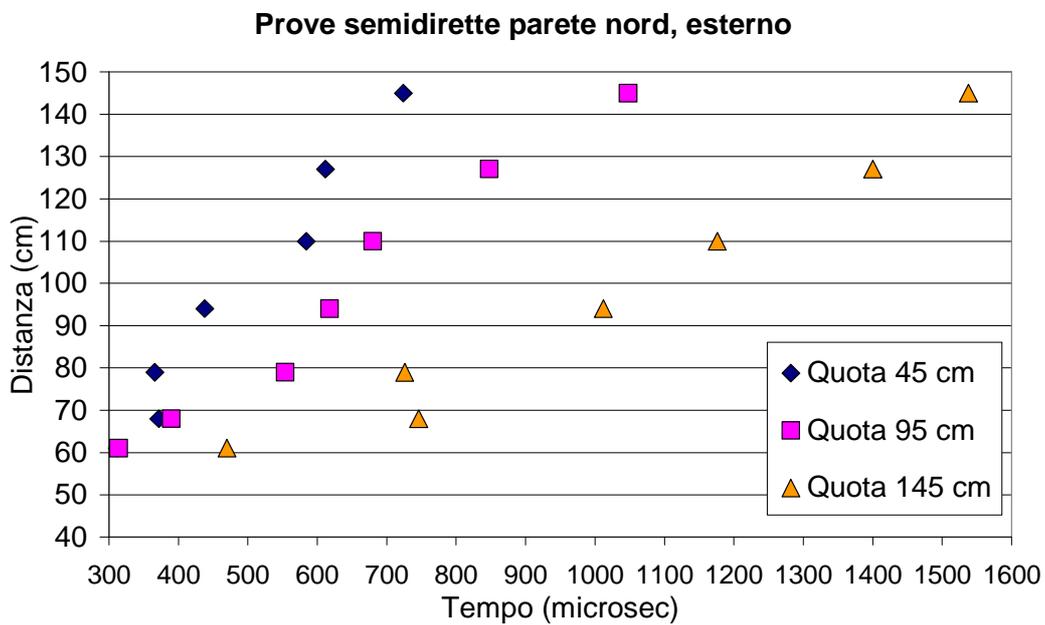


Fig. 8.21: Posizione 2, grafico tempo – distanza dalle prove semidirette con trasmettitore nella parete esterna

Pilastro in muratura, posizione 3

Il primo pilastro in muratura sulla sinistra entrando dall'ingresso principale è stato studiato con prove soniche a 2 quote differenti:

- a 102 cm dal pavimento,
- a 199 cm dal pavimento.

Sul pilastro sono state effettuate prove in trasmissione diretta, prove in trasmissione semidiretta a ventaglio e prove in trasmissione semidiretta passanti per il centro, per un totale di 95 misure per la quota bassa e 107 per la quota più alta. Su questo elemento è stata svolta un'analisi più approfondita per valutare se ci siano differenze tra le caratteristiche del paramento esterno e del nucleo della sezione del pilastro e se il pilastro sia stato costruito con le stesse caratteristiche a quote diverse. Alle due quote sono state utilizzate griglie di misura simili, ma ad alcune stazioni non è stata possibile l'acquisizione in parte per problemi logistici ed in parte per problemi di trasmissione delle onde.

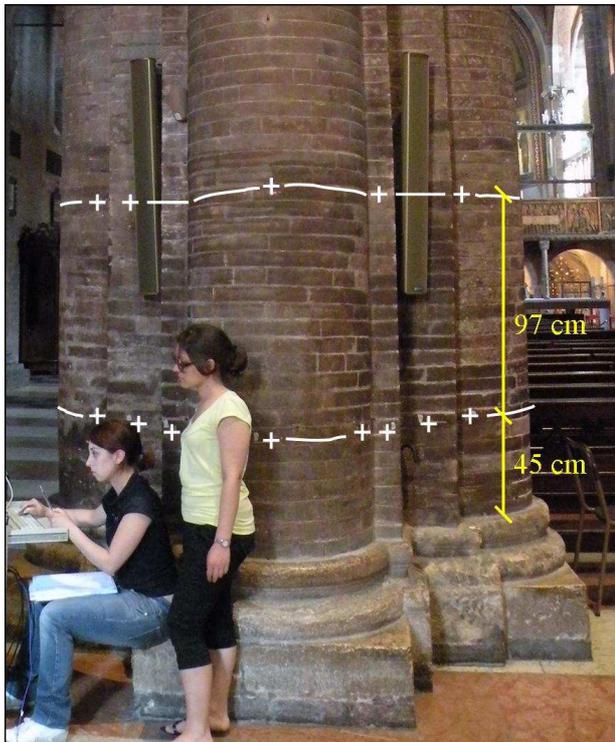


Fig. 8.22: Pilastro di muratura, vista da Ovest con griglia di prova alle 2 diverse quote.

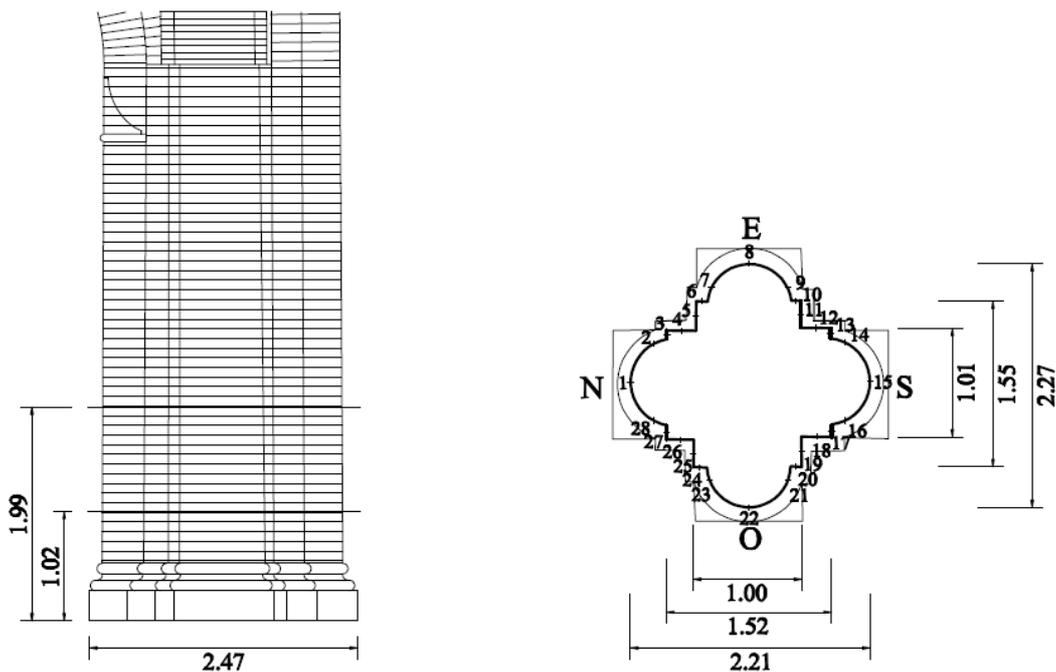


Fig. 8.23: Prospetto ovest e pianta del pilastro in muratura con posizioni di prova

Per i percorsi più corti delle prove in trasmissione semidiretta ovvero i percorsi più esterni del ventaglio di misure con origine nelle stazioni poste ai quattro punti cardinali, sono state calcolate anche le lunghezze d'onda minime per valutare se i valori di velocità ottenuti fossero significativi. Le lunghezze d'onda calcolate sono state confrontate con le lunghezze dei percorsi ed essendo dello stesso valore in tutti i casi analizzati i risultati sono stati ritenuti accettabili, in quanto la risoluzione è solitamente stimata $1/3$ o $1/2$ della lunghezza d'onda.

Tabella 8.7: Posizione 3, prove semidirette, calcolo della lunghezza d'onda minima e della risoluzione per i percorsi più corti (esterni).

Nome file	Tx	Rx	t_c (μ s)	f_{max} (Hz)	L (cm)	V (m/s)	λ_{min} (cm)	R_{max}	R_{min}
BinDirPilMurat19	1	28	638	1567	42	1355	86	29	43
BinDirPilMurat26	8	7	390	2564	41	2356	92	31	46
BinDirPilMurat46	8	9	392	2551	42	2561	100	33	50
BinDirPilMurat47	15	16	342	2924	43	3209	110	37	55
BinDirPilMurat65	15	14	322	3106	43	4135	133	44	67

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilMurat83	22	23	398	2513	44	2157	86	29	43
BinDirPilMurat84	22	21	332	3012	43	3909	130	43	65
Media quota 45 cm			402	2488	42,5	2811	105	35	52
BinDirPilMurat_bis15	15'	14'	212	4717	42	1736	37	12	18
BinDirPilMurat_bis34	15'	16'	226	4425	43	1473	33	11	17
BinDirPilMurat_bis35	22'	23'	298	3356	44	1864	56	19	28
BinDirPilMurat_bis42	22'	21'	424	2358	43	1629	69	23	35
BinDirPilMurat_bis65	1'	2'	262	3817	41	1424	37	12	19
BinDirPilMurat_bis66	1'	28'	306	3268	42	1765	54	18	27
BinDirPilMurat_bis92	8'	7'	344	2907	41	1385	48	16	24
BinDirPilMurat_bis93	8'	9'	346	2890	42	1667	58	19	29
Media quota 142 cm			313	3195	42	1750	55	18	28

Quota 45 cm

Tabella 8.8: Posizione 3, quota 45 cm, dati dalle prove per trasmissione diretta.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	Velocità media (m/s)
BinDirPilMurat0	1	15	2816	220	781	
BinDirPilMurat1	1	15	2784	220	790	
BinDirPilMurat2	1	15	2798	220	786	786
BinDirPilMurat5	15	1	2310	220	952	
BinDirPilMurat6	15	1	1738	220	1266	1109
BinDirPilMurat3	8	22	1578	227	1439	
BinDirPilMurat4	8	22	1536	227	1478	1458
BinDirPilMurat73	22	8	1464	227	1551	
BinDirPilMurat7	2	28	536	72	1343	
BinDirPilMurat8	4	26	726	101	1391	
BinDirPilMurat9	6	24	956	155	1621	
BinDirPilMurat10	10	20	930	154	1656	
BinDirPilMurat11	12	18	572	101	1766	
BinDirPilMurat12	14	16	382	73	1911	
BinDirPilMurat13	17	27	972	152	1564	
BinDirPilMurat14	19	25	500	99	1980	
BinDirPilMurat15	21	23	294	72	2449	
BinDirPilMurat16	13	3	978	151	1544	
BinDirPilMurat17	11	5	520	96	1846	

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilMurat18	9	7	348	70	2011
					1506

Tabella 8.9: Posizione 3, quota 45 cm, dati dalle prove per trasmissione semidiretta a ventaglio.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinDirPilMurat19	1	28	310	42	1355
BinDirPilMurat20	1	26	438	71	1621
BinDirPilMurat21	1	24	818	102	1247
BinDirPilMurat22	1	22	986	160	1623
BinDirPilMurat23	1	21	1298	172	1325
BinDirPilMurat24	1	20	1354	172	1270
BinDirPilMurat25	1	18	1668	179	1073
BinDirPilMurat26	8	7	174	41	2356
BinDirPilMurat27	8	5	300	69	2300
BinDirPilMurat28	8	3	498	100	2008
BinDirPilMurat29	8	1	1064	155	1457
BinDirPilMurat30	8	28	1346	171	1270
BinDirPilMurat31	8	27	1614	175	1084
BinDirPilMurat32	8	26	1276	176	1379
BinDirPilMurat33	8	25	1472	184	1250
BinDirPilMurat34	8	24	1394	195	1399
BinDirPilMurat35	8	23	1534	205	1336
BinDirPilMurat36	8	21	1710	205	1199
BinDirPilMurat37	8	20	1244	194	1559
BinDirPilMurat38	8	19	1494	182	1218
BinDirPilMurat39	8	18	1198	173	1444
BinDirPilMurat40	8	17	1118	173	1547
BinDirPilMurat41	8	16	1144	171	1495
BinDirPilMurat42	8	15	760	156	2053
BinDirPilMurat43	8	14	586	115	1962
BinDirPilMurat44	8	13	420	99	2357
BinDirPilMurat45	8	11	270	67	2481
BinDirPilMurat46	8	9	164	42	2561
BinDirPilMurat47	15	16	134	43	3209
BinDirPilMurat48	15	18	282	72	2553
BinDirPilMurat49	15	20	470	105	2234

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilMurat50	15	22	718	162	2256
BinDirPilMurat51	15	23	1004	174	1733
BinDirPilMurat52	15	24	1224	176	1438
BinDirPilMurat53	15	25	1170	176	1504
BinDirPilMurat54	15	26	1450	183	1262
BinDirPilMurat55	15	27	1396	194	1390
BinDirPilMurat56	15	2	1684	203	1205
BinDirPilMurat57	15	3	1244	192	1543
BinDirPilMurat58	15	4	1550	180	1161
BinDirPilMurat59	15	5	1140	171	1500
BinDirPilMurat60	15	6	1108	172	1552
BinDirPilMurat61	15	7	1088	170	1563
BinDirPilMurat62	15	8	808	156	1931
BinDirPilMurat63	15	10	592	101	1706
BinDirPilMurat64	15	12	296	71	2399
BinDirPilMurat65	15	14	104	43	4135
BinDirPilMurat66	22	15	726	162	2231
BinDirPilMurat67	22	14	890	177	1989
BinDirPilMurat68	22	13	938	179	1908
BinDirPilMurat69	22	12	996	177	1777
BinDirPilMurat70	22	11	1324	186	1405
BinDirPilMurat71	22	10	1166	197	1690
BinDirPilMurat72	22	9	1422	208	1463
BinDirPilMurat74	22	7	1596	208	1303
BinDirPilMurat75	22	6	1230	197	1602
BinDirPilMurat76	22	5	1616	185	1145
BinDirPilMurat77	22	4	1282	176	1373
BinDirPilMurat78	22	3	1546	178	1151
BinDirPilMurat79	22	2	1366	176	1288
BinDirPilMurat80	22	1	930	160	1720
BinDirPilMurat81	22	27	462	103	2229
BinDirPilMurat82	22	25	190	72	3789
BinDirPilMurat83	22	23	204	44	2157
BinDirPilMurat84	22	21	110	43	3909
BinDirPilMurat85	22	19	264	71	2689
BinDirPilMurat86	22	17	438	104	2374
					1802

Tabella 8.10: Posizione 3, quota 45 cm, dati dalle prove per trasmissione semidiretta con percorsi passanti per il centro della sezione

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	V _m (m/s)
BinDirPilMurat_bis96	25	11	1236	163	1319	
BinDirPilMurat_bis97	25	12	1232	162	1315	
BinDirPilMurat_bis98	26	11	1316	161	1223	
BinDirPilMurat_bis99	26	12	1374	162	1179	1259
BinDirPilMurat_bis100	18	4	1242	159	1280	
BinDirPilMurat_bis101	18	5	1292	158	1223	
BinDirPilMurat_bis102	19	4	1348	158	1172	
BinDirPilMurat_bis103	19	5	1348	159	1180	1214
BinDirPilMurat_bis104	11	25	1534	163	1063	
BinDirPilMurat_bis105	11	26	1326	161	1214	
BinDirPilMurat_bis106	12	25	1146	162	1414	
BinDirPilMurat_bis107	12	26	1328	162	1220	1229
BinDirPilMurat_bis108	4	18	1392	159	1142	
BinDirPilMurat_bis109	4	19	1228	158	1287	
BinDirPilMurat_bis110	5	18	1204	158	1312	
BinDirPilMurat_bis111	5	19	1350	159	1178	1230
					1233	

I valori ottenuti sono stati visualizzati con istogrammi che indicano le velocità di ogni percorso indagato.

Nelle prove per trasmissione diretta lungo i percorsi passanti per il centro sono state effettuate anche le prove invertendo le posizioni di trasmettitore e ricevitore (Fig. 8.24 e 8.25). I valori di velocità sono stati indicati negli stessi istogrammi con colore rosso ed etichetta “inversa”.

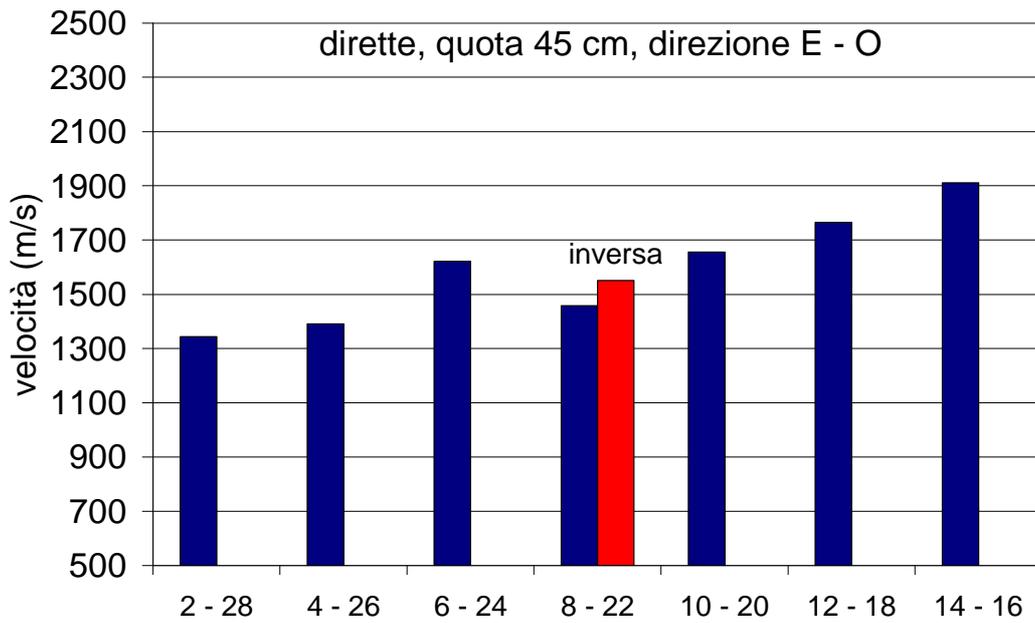


Fig. 8.24: Posizione 3, percorsi diretti, quota 45 cm, velocità di propagazione delle onde in direzione E-O.

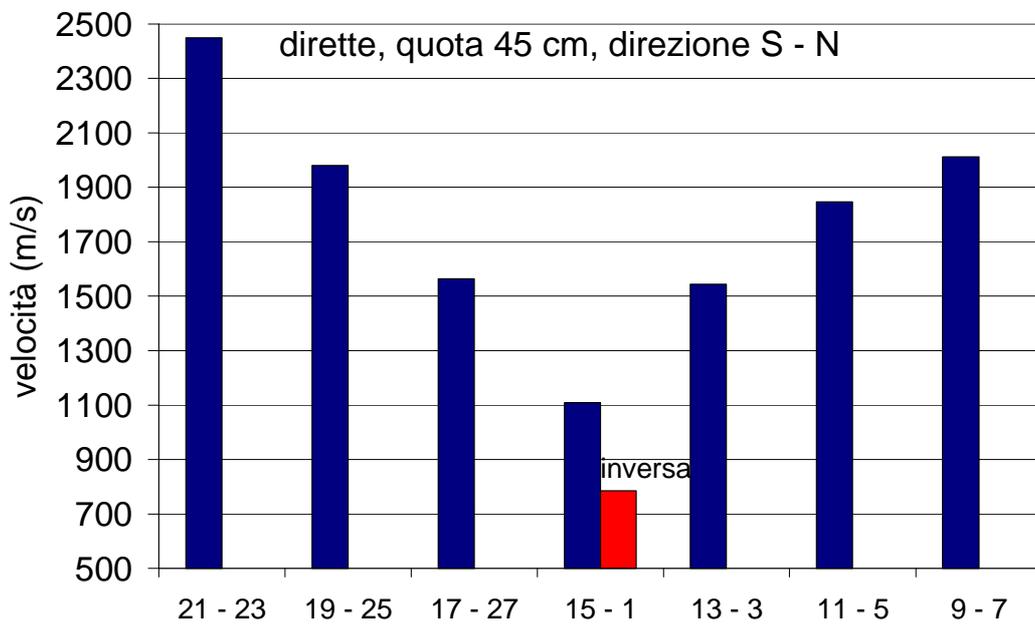


Fig. 8.25: Posizione 3, percorsi diretti, quota 45 cm, velocità di propagazione delle onde in direzione S-N.

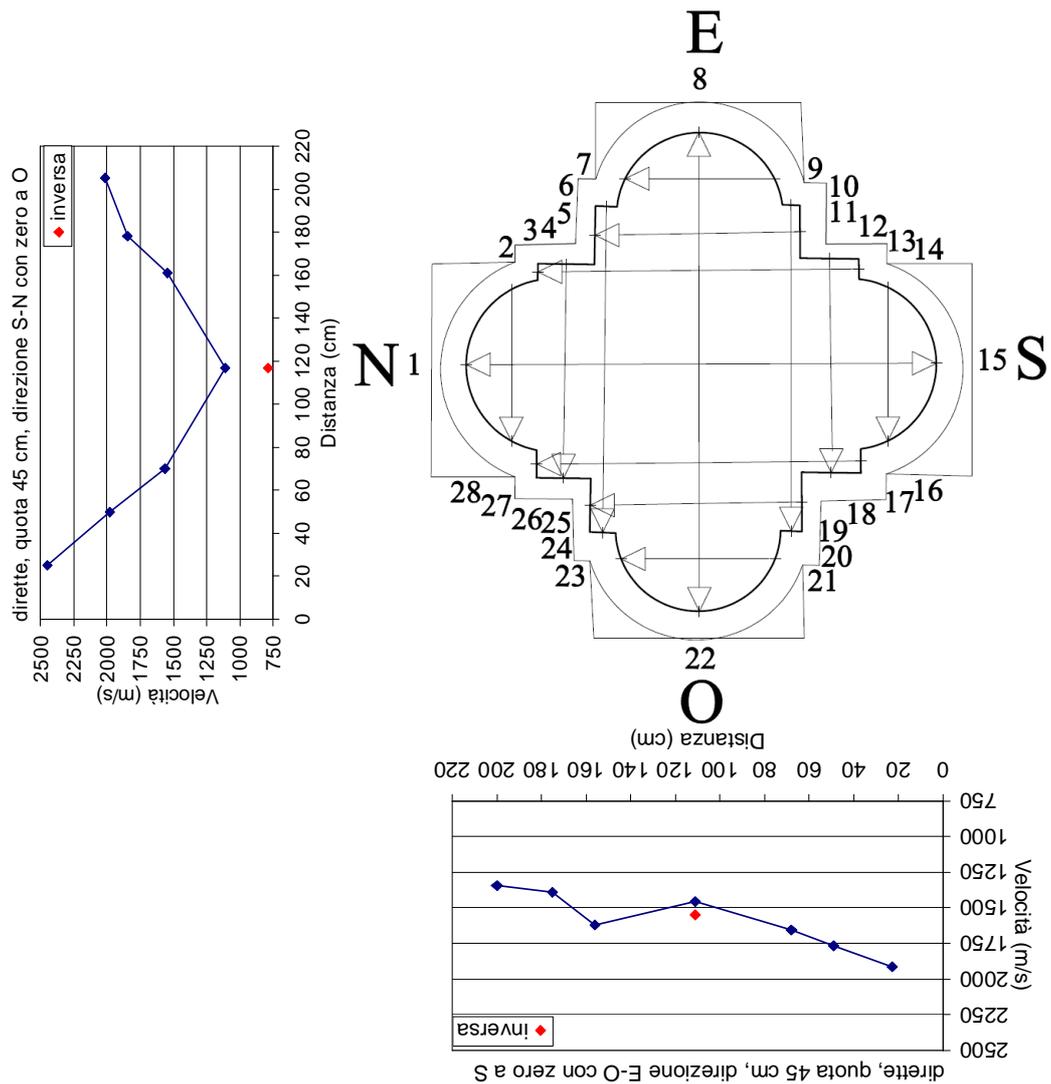


Fig. 8.26: Posizione 3, percorsi diretti, quota 45 cm, velocità di propagazione delle onde nella sezione del pilastro.

Per le prove di trasmissione semidirette con origine a nord è stato acquisito solo il semi-ventaglio verso ovest perché nelle altre zone il segnale non era di qualità sufficiente (Fig. 8.27-8.30). I valori di velocità sono stati poi normalizzati dividendoli per la lunghezza del percorso di misura (Fig. 8.31-8.34).

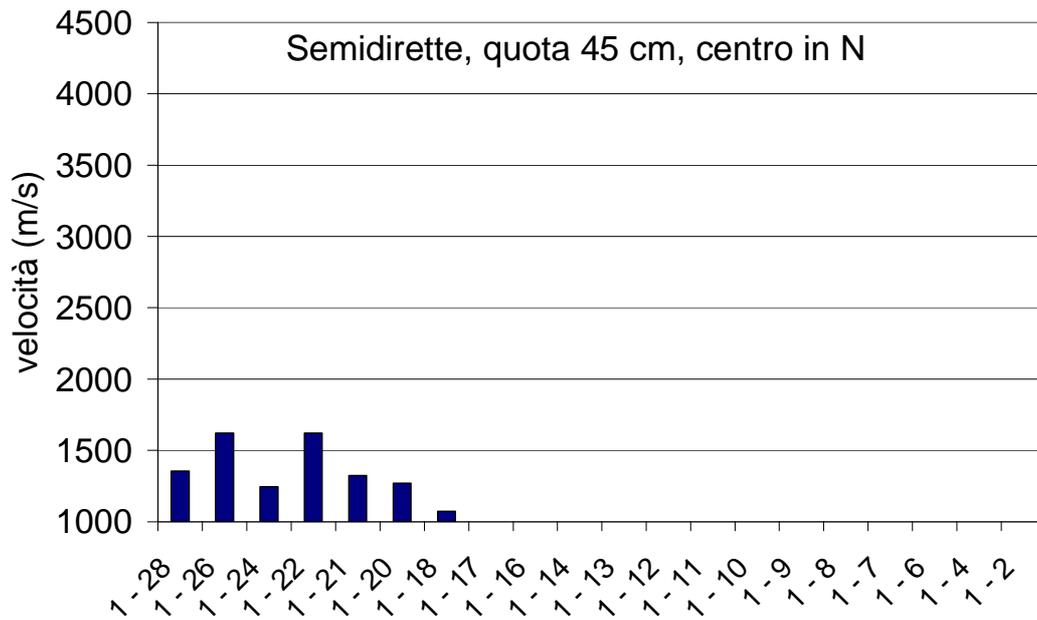


Fig. 8.27: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in N.

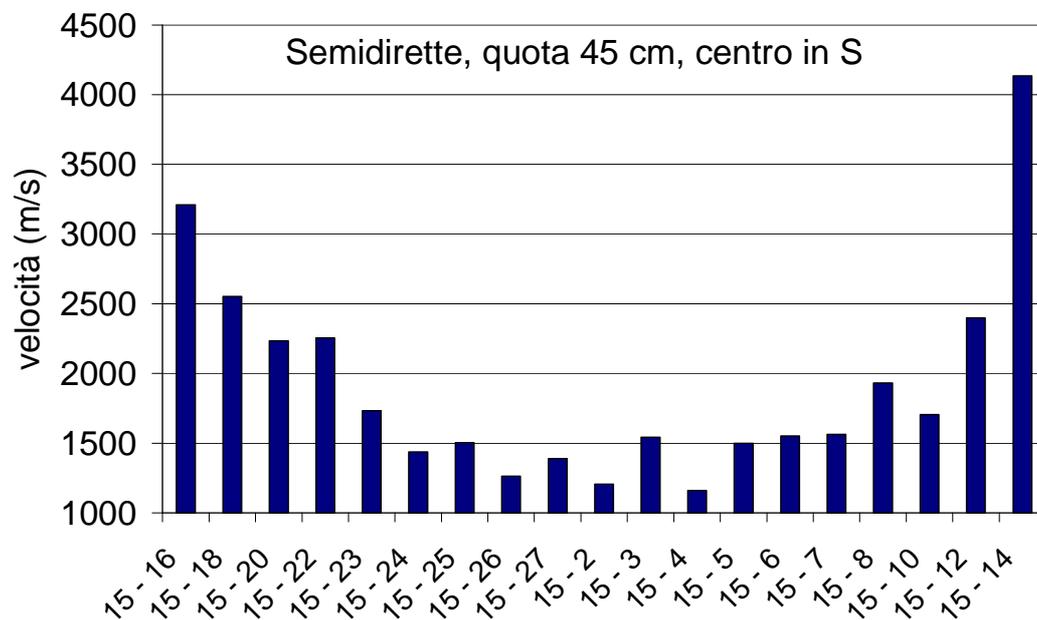


Fig. 8.28: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in S.

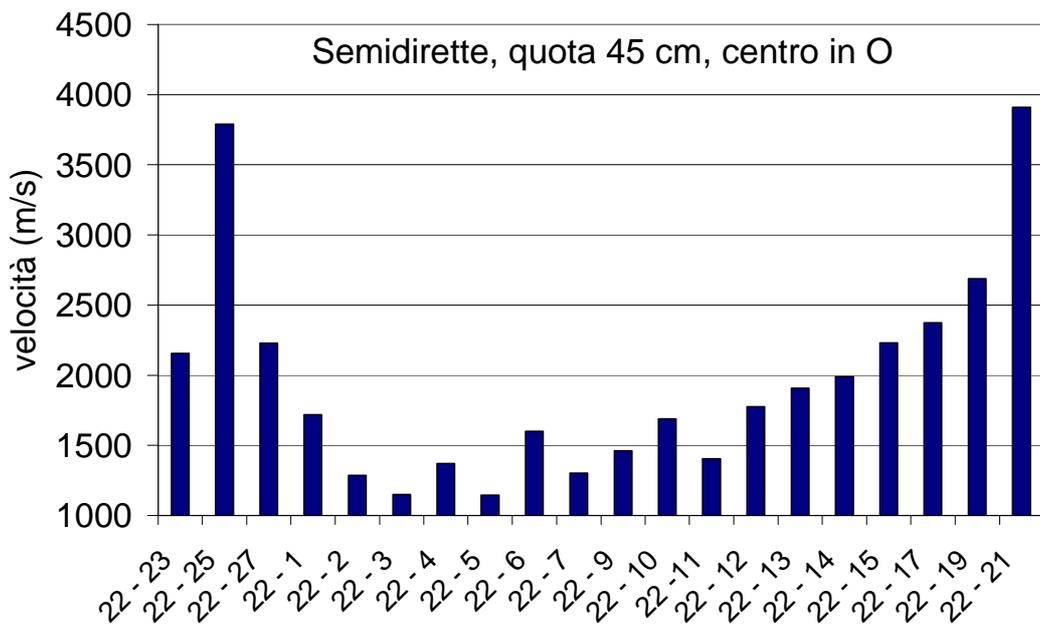


Fig. 8.29: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in O.

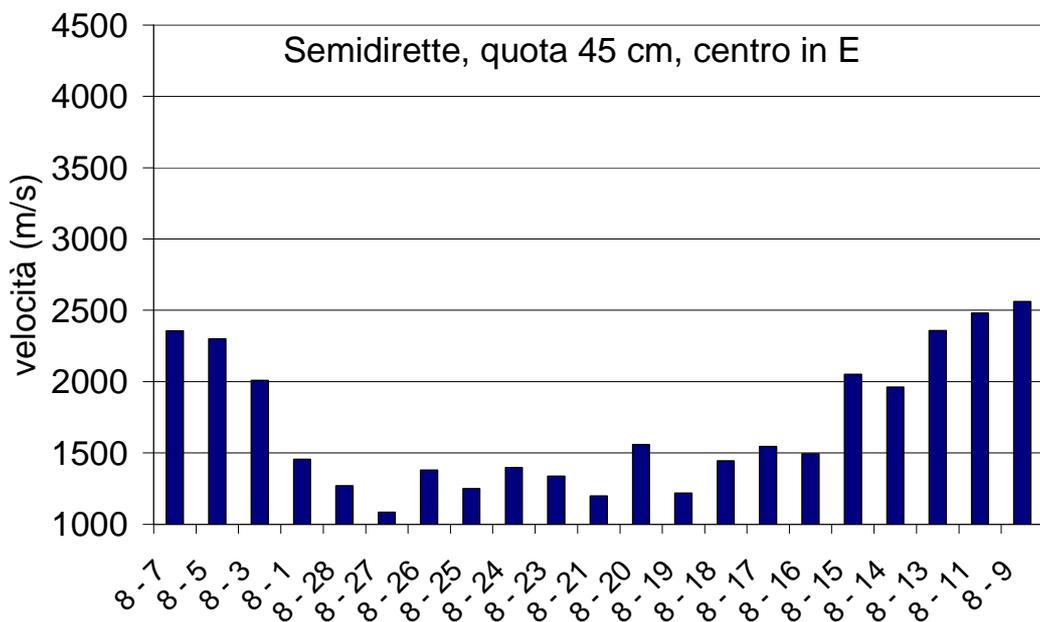


Fig. 8.30: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in E.

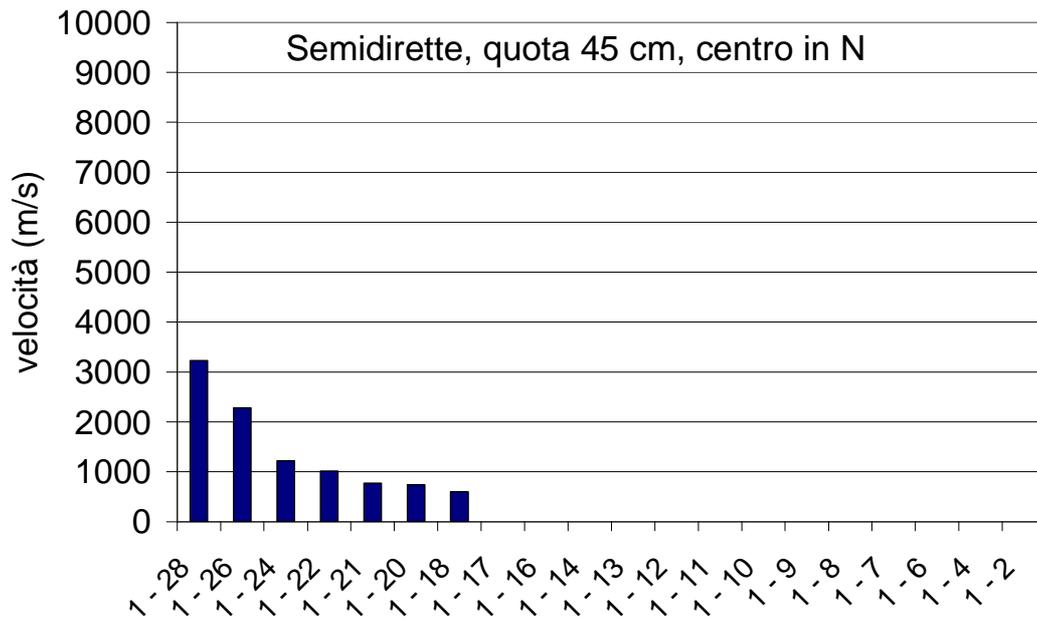


Fig. 8.31: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in N.

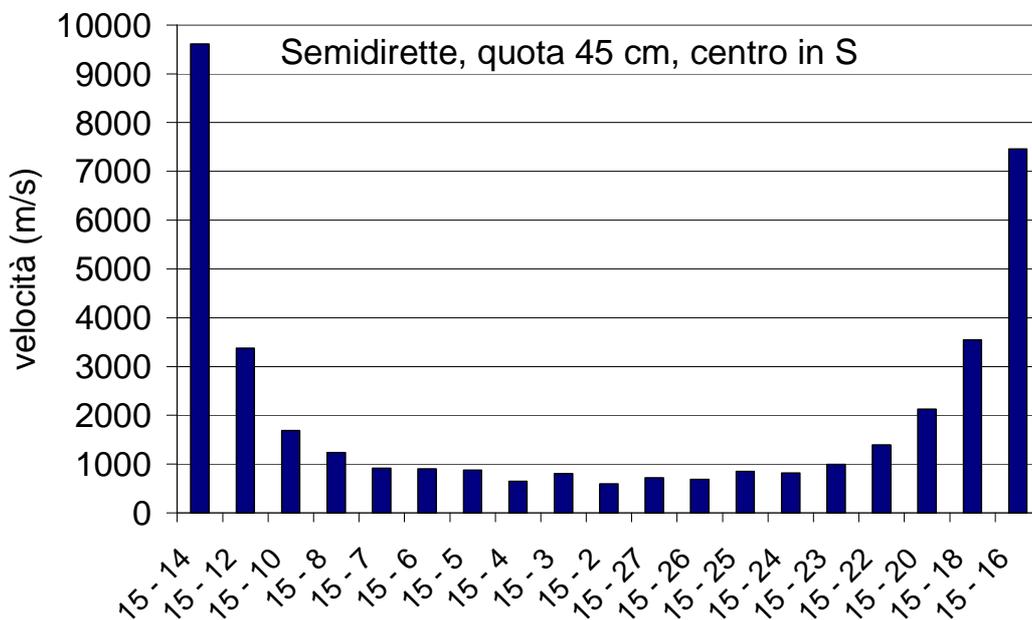


Fig. 8.32: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in S.

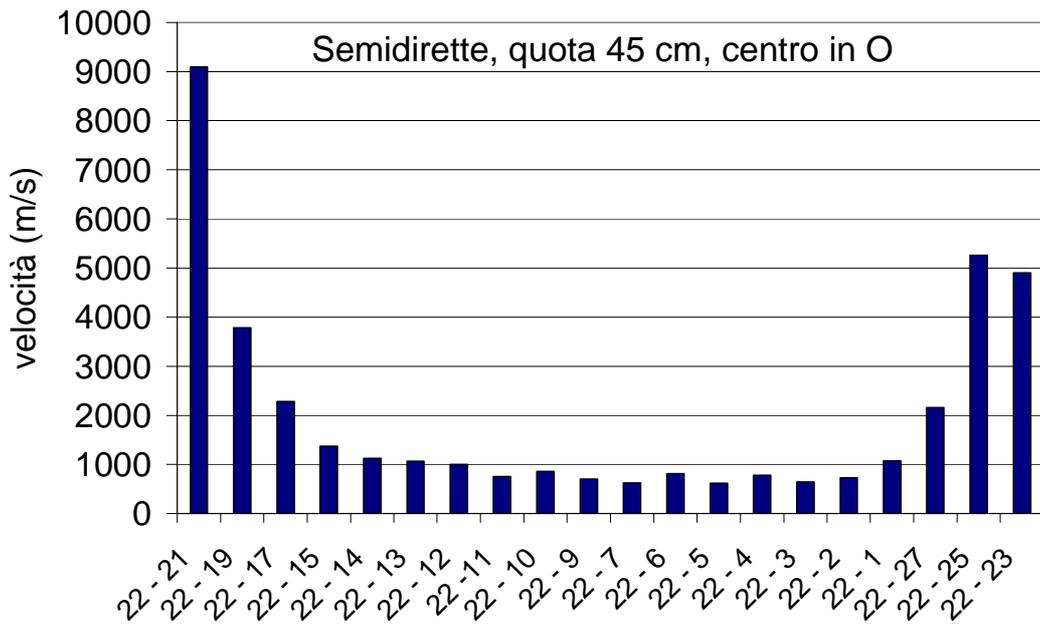


Fig. 8.33: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in O.

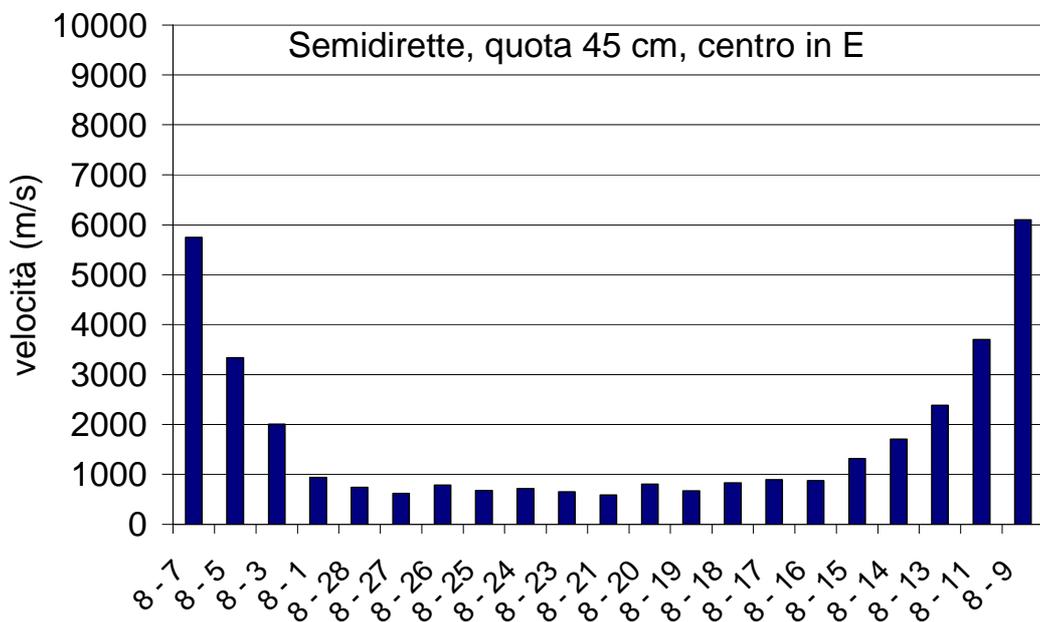


Fig. 8.34: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 45 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in E.

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

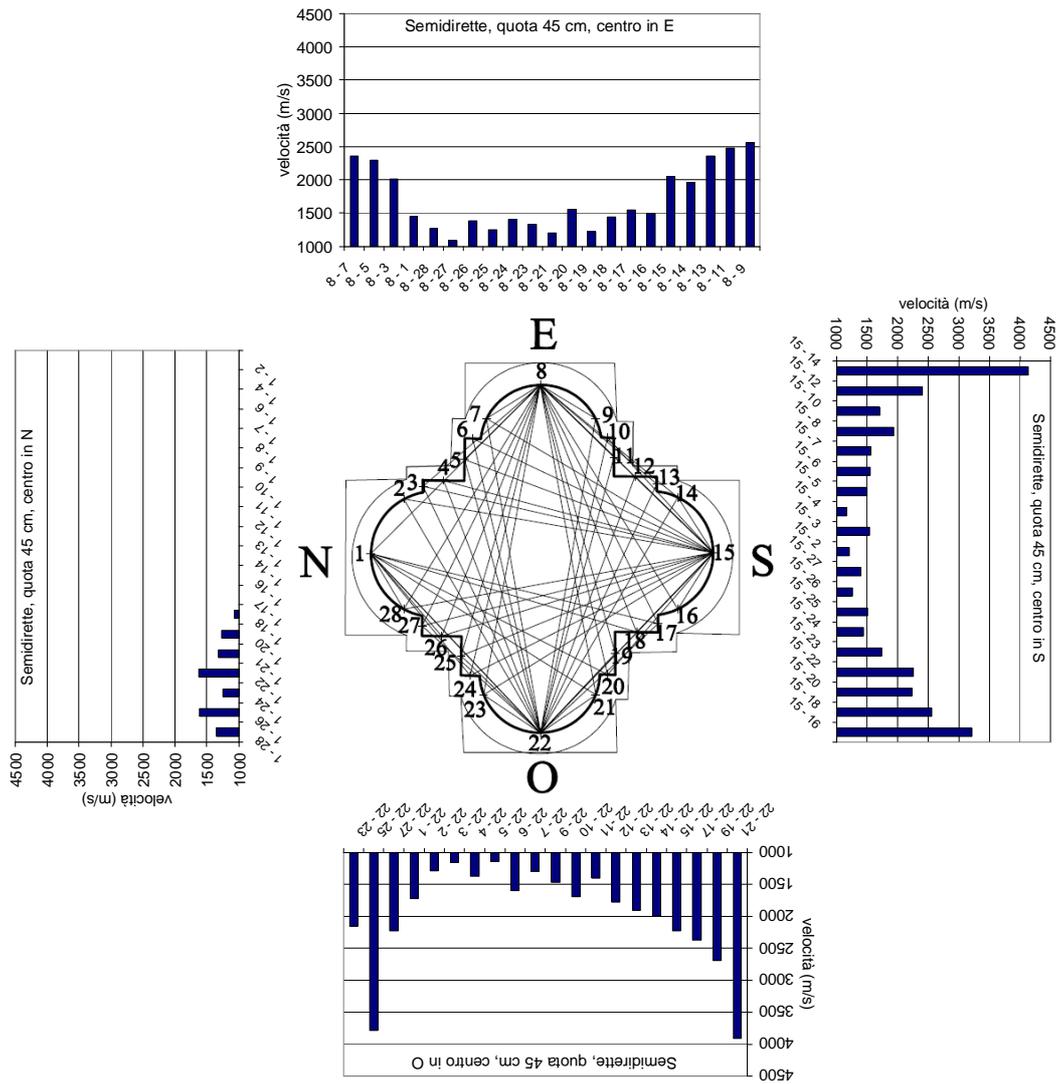


Fig. 8.35: Posizione 3, quota 45 cm, velocità di propagazione lungo i percorsi semidiretti distribuiti a ventaglio.

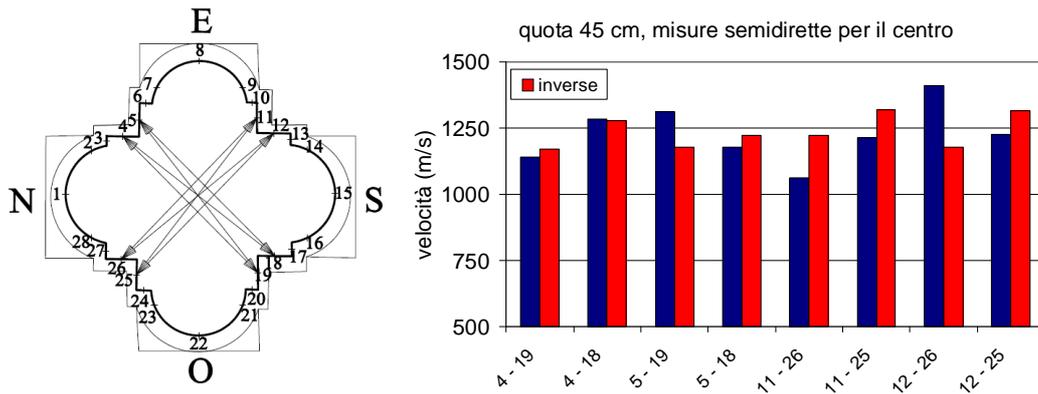


Fig. 8.36: Posizione 3, quota 45 cm, velocità di propagazione lungo i percorsi semidiretti passanti per il centro della sezione del pilastro.

Quota 142 cm

Tabella 8.11: Posizione 3, quota 142 cm, dati dalle prove per trasmissione diretta.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinDirPilMurat_bis0	1'	15'	2462	220	894
BinDirPilMurat_bis1	8'	22'	2382	227	953
BinDirPilMurat_bis2	15'	1'	2528	220	870
BinDirPilMurat_bis3	2'	28'	570	72	1263
BinDirPilMurat_bis4	4'	26'	1220	101	828
BinDirPilMurat_bis5	6'	24'	1628	155	952
BinDirPilMurat_bis6	10'	20'	1738	154	886
BinDirPilMurat_bis7	12'	18'	710	101	1423
BinDirPilMurat_bis8	14'	16'	530	73	1377
BinDirPilMurat_bis9	21'	23'	380	72	1895
BinDirPilMurat_bis10	19'	25'	536	99	1847
BinDirPilMurat_bis11	17'	27'	1266	152	1201
BinDirPilMurat_bis12	13'	3'	1254	151	1204
BinDirPilMurat_bis13	11	5	908	96	1057
BinDirPilMurat_bis14	9	7	450	70	1556
					1214

Tabella 8.12: Posizione 3, quota 142 cm, dati dalle prove per trasmissione semidiretta a ventaglio.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinDirPilMurat_bis15	15'	14'	242	42	1736
BinDirPilMurat_bis16	15'	12'	356	70	1966
BinDirPilMurat_bis17	15'	10'	688	101	1468
BinDirPilMurat_bis18	15'	8'	1256	156	1242
BinDirPilMurat_bis19	15'	7'	1480	170	1149
BinDirPilMurat_bis20	15'	6'	1946	172	884
BinDirPilMurat_bis21	15'	5'	1894	171	903
BinDirPilMurat_bis22	15'	4'	2498	180	721
BinDirPilMurat_bis23	15'	3'	2138	192	898
BinDirPilMurat_bis24	15'	2'	2602	203	780
BinDirPilMurat_bis25	15'	28'	2282	203	890
BinDirPilMurat_bis26	15'	27'	1762	194	1101
BinDirPilMurat_bis27	15'	26'	2108	183	868
BinDirPilMurat_bis28	15'	25'	1592	176	1106
BinDirPilMurat_bis29	15'	24'	1698	176	1037
BinDirPilMurat_bis30	15'	23'	1746	175	1002
BinDirPilMurat_bis31	15'	22'	1310	162	1237
BinDirPilMurat_bis32	15'	20'	828	105	1268
BinDirPilMurat_bis33	15'	18'	420	71	1690
BinDirPilMurat_bis34	15'	16'	292	43	1473
BinDirPilMurat_bis35	22'	23'	236	44	1864
BinDirPilMurat_bis36	22'	25'	286	72	2517
BinDirPilMurat_bis37	22'	27'	662	103	1556
BinDirPilMurat_bis38	22'	1'	1512	160	1058
BinDirPilMurat_bis39	22'	2'	1764	176	998
BinDirPilMurat_bis40	22'	3'	2374	178	750
BinDirPilMurat_bis41	22'	4'	1978	176	890
BinDirPilMurat_bis42	22'	21'	264	43	1629
BinDirPilMurat_bis43	22'	19'	330	71	2152
BinDirPilMurat_bis44	22'	17'	582	104	1787
BinDirPilMurat_bis45	22'	15'	1272	162	1274
BinDirPilMurat_bis46	22'	5'	2218	185	834
BinDirPilMurat_bis47	22'	6'	2126	197	927
BinDirPilMurat_bis48	22'	7'	2330	208	893

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilMurat_bis49	22'	9'	2346	208	887
BinDirPilMurat_bis50	22'	10'	2200	197	895
BinDirPilMurat_bis51	22'	11'	2114	186	880
BinDirPilMurat_bis52	22'	12'	1580	177	1120
BinDirPilMurat_bis53	22'	13'	1724	179	1038
BinDirPilMurat_bis54	22'	14'	1418	177	1248
BinDirPilMurat_bis55	1'	14'	2454	201	819
BinDirPilMurat_bis56	1'	13'	2224	190	854
BinDirPilMurat_bis57	1'	12'	2264	178	786
BinDirPilMurat_bis58	1'	11'	2054	169	823
BinDirPilMurat_bis59	1'	10'	2034	170	836
BinDirPilMurat_bis60	1'	9'	1962	170	866
BinDirPilMurat_bis61	1'	8'	1766	155	878
BinDirPilMurat_bis62	1'	7'	1210	115	950
BinDirPilMurat_bis63	1'	6'	1102	98	889
BinDirPilMurat_bis64	1'	4'	626	67	1070
BinDirPilMurat_bis65	1'	2'	288	41	1424
BinDirPilMurat_bis66	1'	28'	238	42	1765
BinDirPilMurat_bis67	1'	26'	492	71	1443
BinDirPilMurat_bis68	1'	24'	872	102	1170
BinDirPilMurat_bis69	1'	22'	1346	160	1189
BinDirPilMurat_bis70	1'	21'	1770	172	972
BinDirPilMurat_bis71	1'	20'	2010	172	856
BinDirPilMurat_bis72	1'	19'	1944	170	874
BinDirPilMurat_bis73	1'	18'	1992	179	899
BinDirPilMurat_bis74	1'	17'	2018	191	946
BinDirPilMurat_bis75	1'	16'	1696	201	1185
BinDirPilMurat_bis76	8'	15'	1412	156	1105
BinDirPilMurat_bis77	8'	16'	2118	171	807
BinDirPilMurat_bis78	8'	17'	1918	173	902
BinDirPilMurat_bis79	8'	18'	2034	173	851
BinDirPilMurat_bis80	8'	19'	2328	182	782
BinDirPilMurat_bis81	8'	20'	2042	194	950
BinDirPilMurat_bis82	8'	21'	2434	205	842
BinDirPilMurat_bis83	8'	23'	2302	205	891
BinDirPilMurat_bis84	8'	24'	1816	195	1074
BinDirPilMurat_bis85	8'	25'	2240	184	821
BinDirPilMurat_bis86	8'	26'	1638	176	1074
BinDirPilMurat_bis87	8'	27'	1680	175	1042
BinDirPilMurat_bis88	8'	28'	1714	171	998

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilMurat_bis89	8'	1'	1744	155	889
BinDirPilMurat_bis90	8'	3'	858	100	1166
BinDirPilMurat_bis91	8'	5'	448	69	1540
BinDirPilMurat_bis92	8'	7'	296	41	1385
BinDirPilMurat_bis93	8'	9'	252	42	1667
BinDirPilMurat_bis94	8'	11'	402	67	1667
BinDirPilMurat_bis95	8'	13'	742	99	1334
					1134

Tabella 8.13: Posizione 3, quota 142 cm, dati dalle prove per trasmissione semidiretta con percorsi passanti per il centro della sezione.

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)
BinDirPilMurat_bis112	4'	18'	1910	159	832
BinDirPilMurat_bis113	4'	19'	1986	158	796
BinDirPilMurat_bis114	5'	18'	1924	158	821
BinDirPilMurat_bis115	5'	19'	1992	159	798
BinDirPilMurat_bis116	11'	25'	2610	163	625
BinDirPilMurat_bis117	11'	26'	1976	161	815
BinDirPilMurat_bis118	12'	25'	1978	162	819
BinDirPilMurat_bis119	12'	26'	2256	163	723
BinDirPilMurat_bis120	18'	4'	2000	159	795
BinDirPilMurat_bis121	18'	5'	1742	158	907
BinDirPilMurat_bis122	19'	4'	2072	158	763
BinDirPilMurat_bis123	19'	5'	1810	159	878
BinDirPilMurat_bis124	25'	11'	2548	163	640
BinDirPilMurat_bis125	25'	12'	1816	162	892
BinDirPilMurat_bis126	26'	11'	1808	161	890
BinDirPilMurat_bis127	26'	12'	1952	162	830
					801

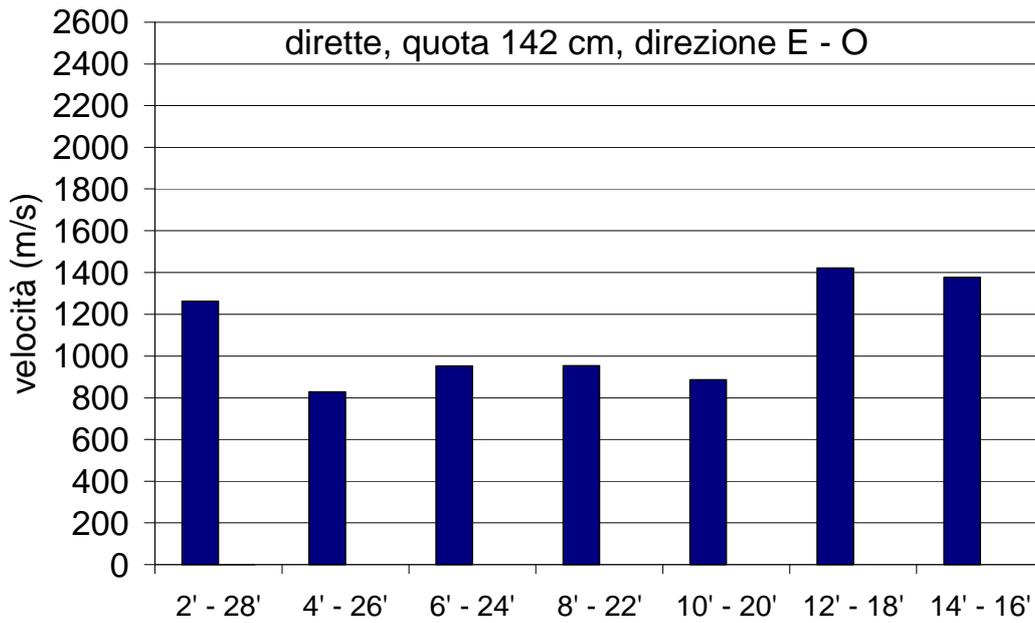


Fig. 8.37: Posizione 3, percorsi diretti, quota 142 cm, velocità di propagazione delle onde in direzione E-O.

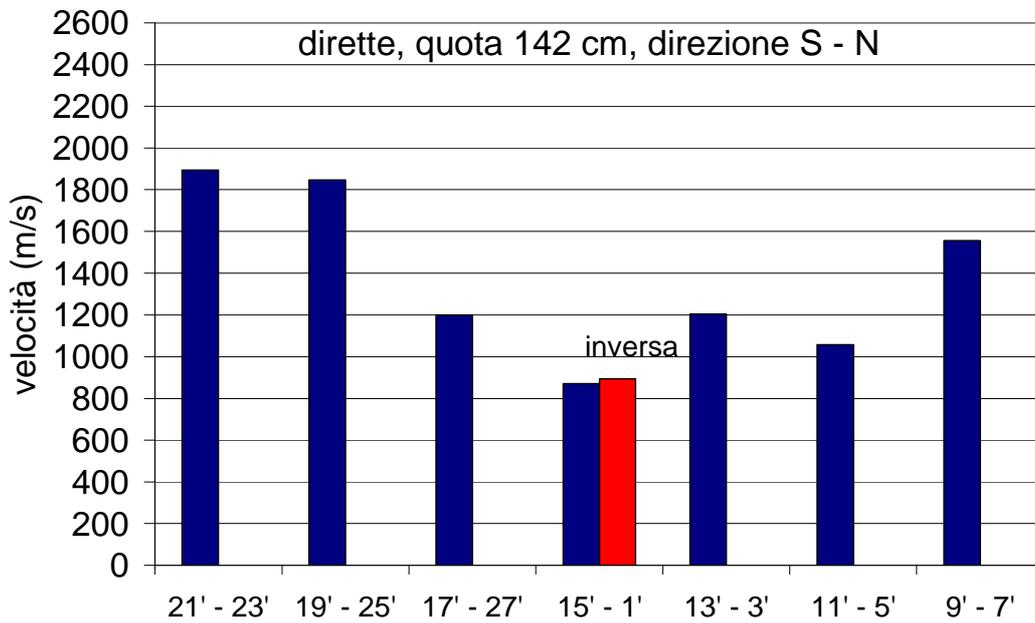


Fig. 8.38: Posizione 3, percorsi diretti, quota 142 cm, velocità di propagazione delle onde in direzione S-N.

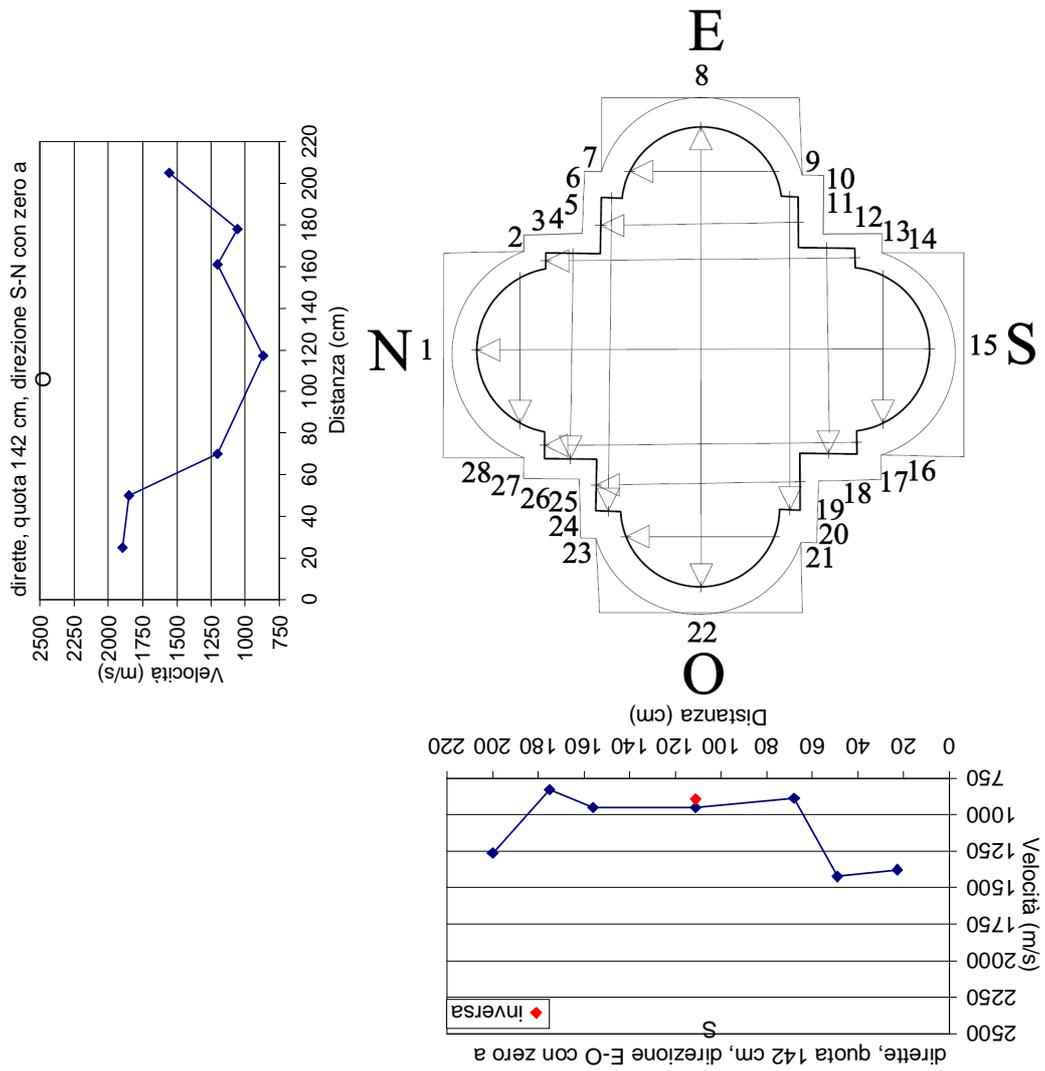


Fig. 8.39: Posizione 3, percorsi diretti, quota 142 cm, velocità di propagazione delle onde nella sezione del pilastro.

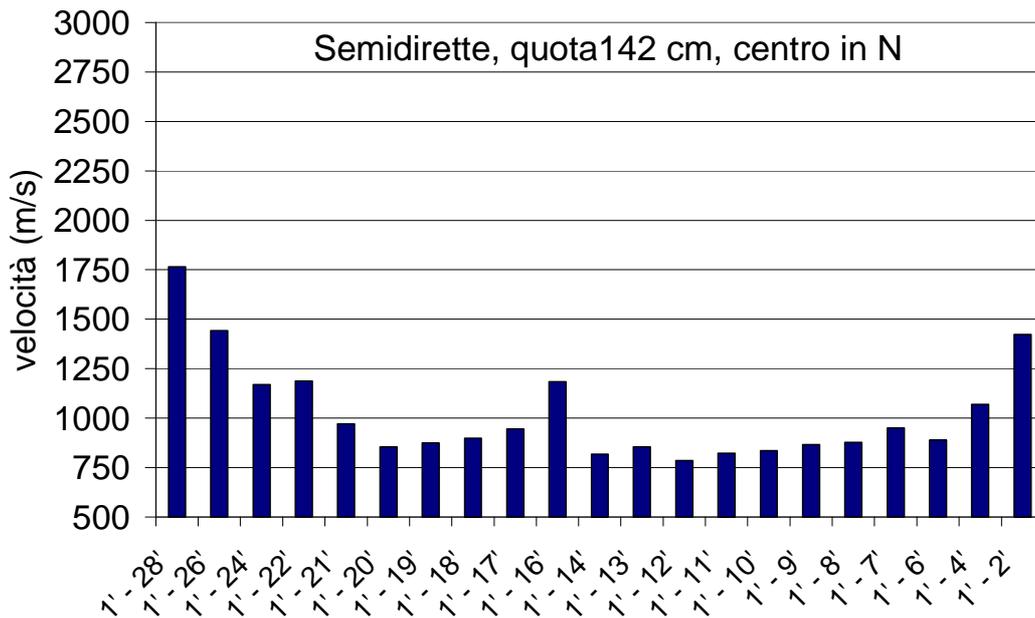


Fig. 8.40: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in N.

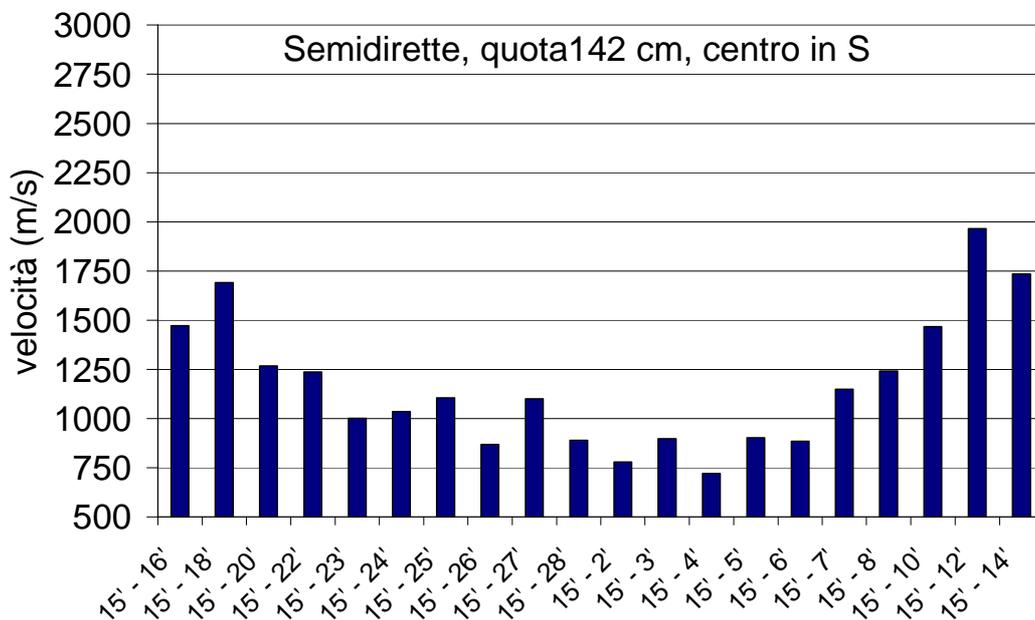


Fig. 8.41: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in S.

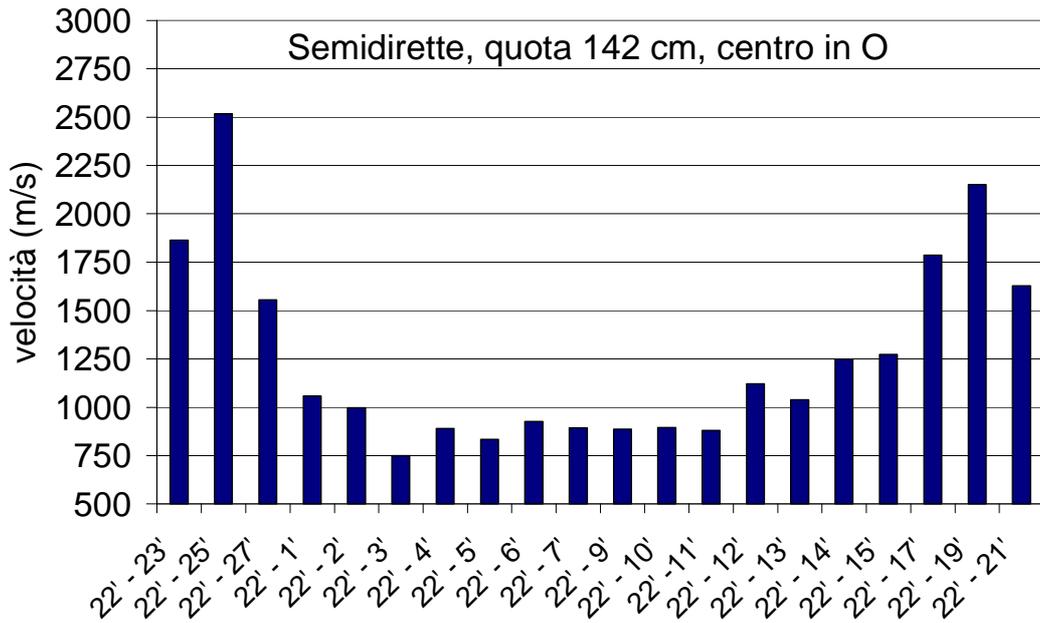


Fig. 8.42: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in O.

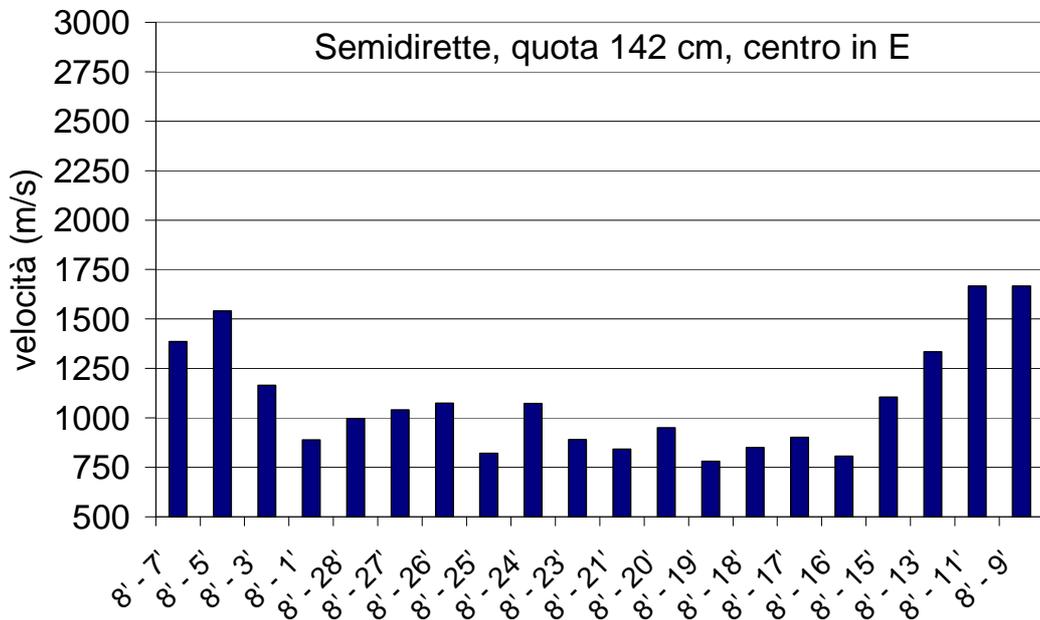


Fig. 8.43: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione del ventaglio con centro in E.

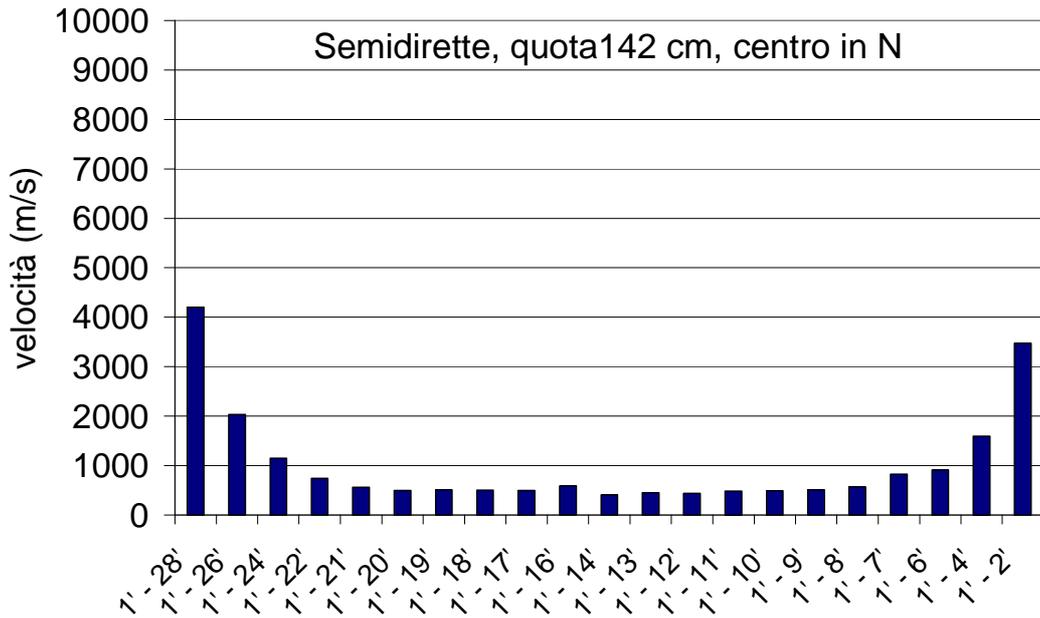


Fig. 8.44: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in N.

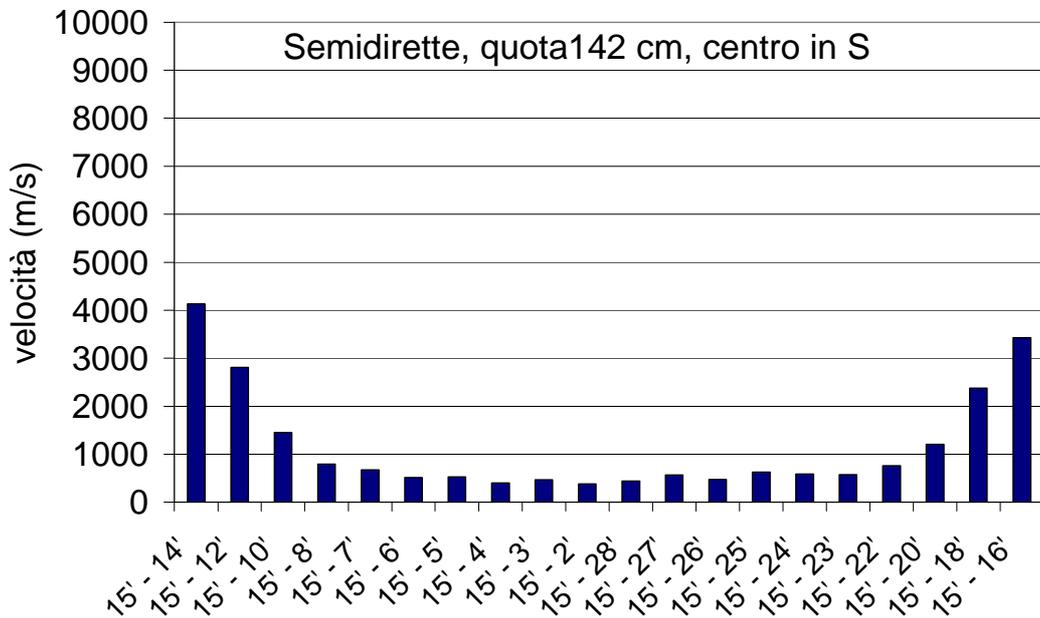


Fig. 8.45: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in S.

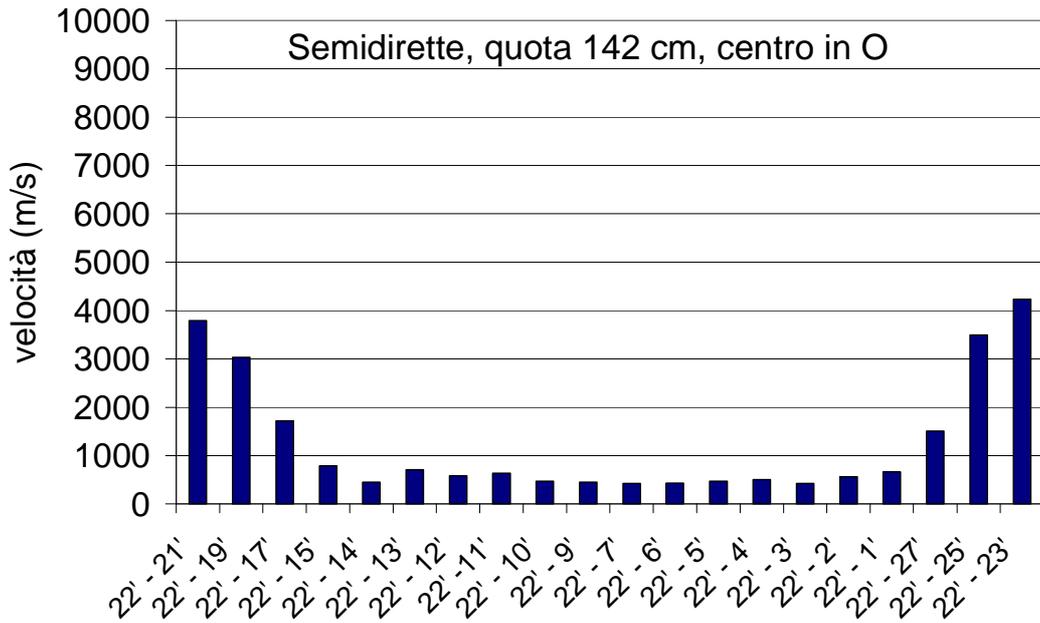


Fig. 8.46: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in O.

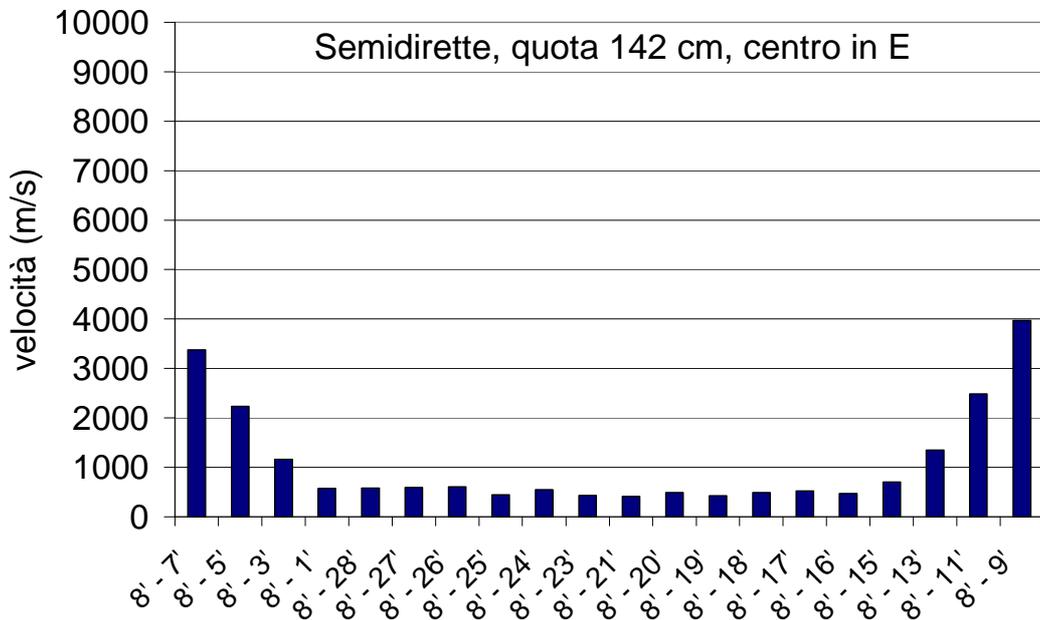


Fig. 8.47: Posizione 3, percorsi semidiretti, quota 142 cm, velocità di propagazione normalizzata del ventaglio con centro in E.

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

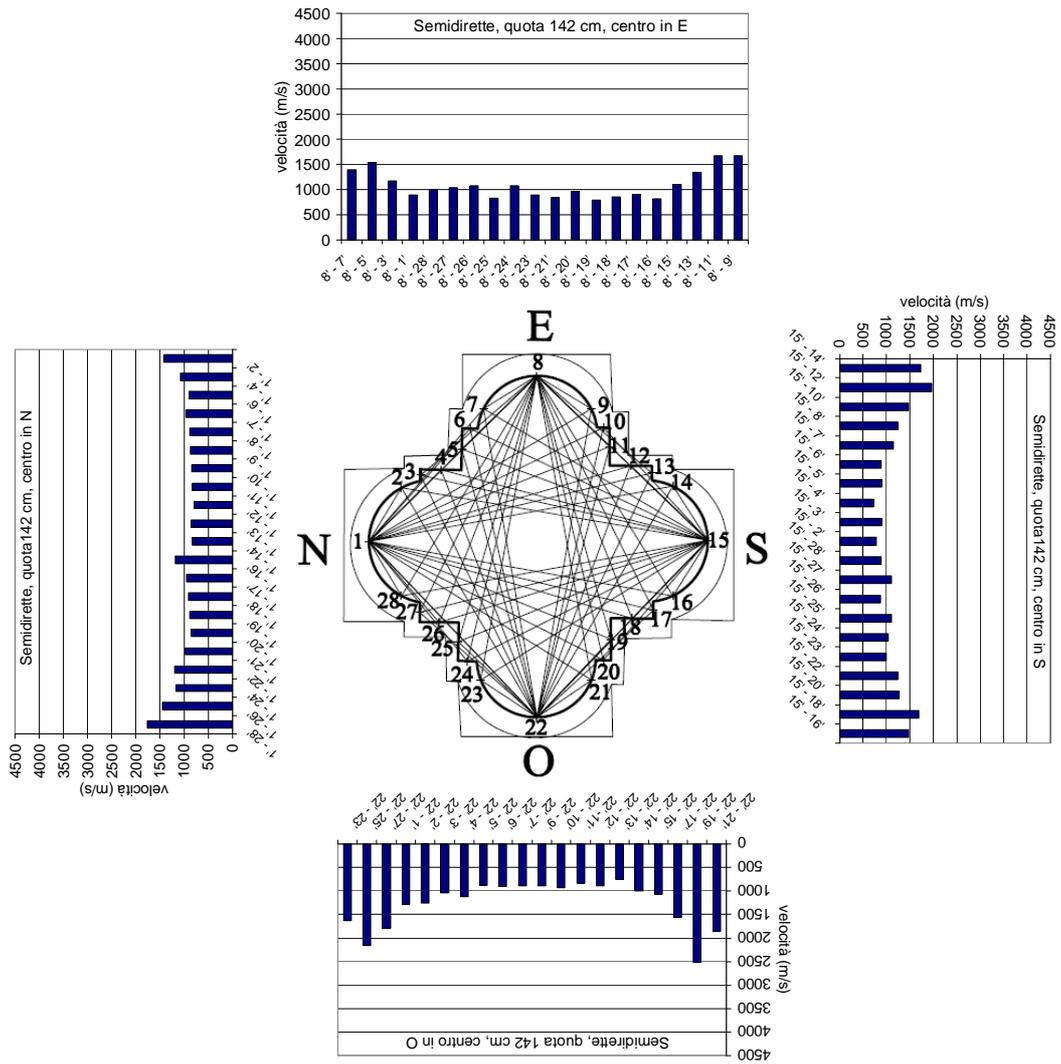


Fig. 8.48: Posizione 3, quota 142 cm, velocità di propagazione lungo i percorsi semidiretti distribuiti a ventaglio.

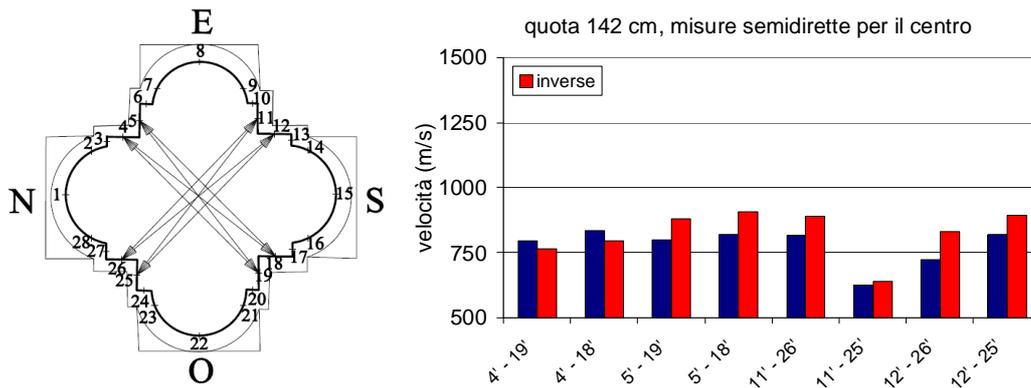


Fig. 8.49: Posizione 3, quota 142 cm, velocità di propagazione lungo i percorsi semidiretti passanti per il centro della sezione del pilastro.

Confronto tra le sezioni alle due quote

Dagli istogrammi precedenti è possibile vedere come le velocità dei percorsi più esterni alla sezione del pilastro, ad entrambe le quote, sono decisamente più alte di quelle dei percorsi che passano per il nucleo centrale del pilastro. Ciò significa che la muratura esterna del pilastro ha delle caratteristiche meccaniche superiori alla muratura del nucleo. Andando verso i percorsi interni la diminuzione della velocità è graduale e non è possibile individuare con precisione l'interfaccia tra la zona con caratteristiche migliori e quella con caratteristiche peggiori. Questo perché i percorsi intermedi attraversano sia paramento murario esterno che muratura interna ed i valori delle velocità misurate sono una media su tutta la lunghezza del percorso. Negli istogrammi successivi sono messe a confronto le velocità rilevate dalle prove dirette a quota 45 cm e a quota 142 cm divise tra percorsi S-N e percorsi E-O. Gli andamenti delle velocità sono simili per le due quote, ma a quota 142 cm le velocità sono inferiori. Le caratteristiche meccaniche del pilastro sono quindi peggiori ad altezza maggiore, ma essendo state testate solo due quote non è possibile capire con precisione la quota alla quale le caratteristiche cambiano. Questa variazione di caratteristiche meccaniche può essere dovuta all'impiego di materiali leggermente diversi o all'utilizzo di una diversa tecnologia costruttiva, in quanto il pilastro nella sua altezza può essere stato costruito in momenti di tempo ravvicinati, ma comunque differenti.

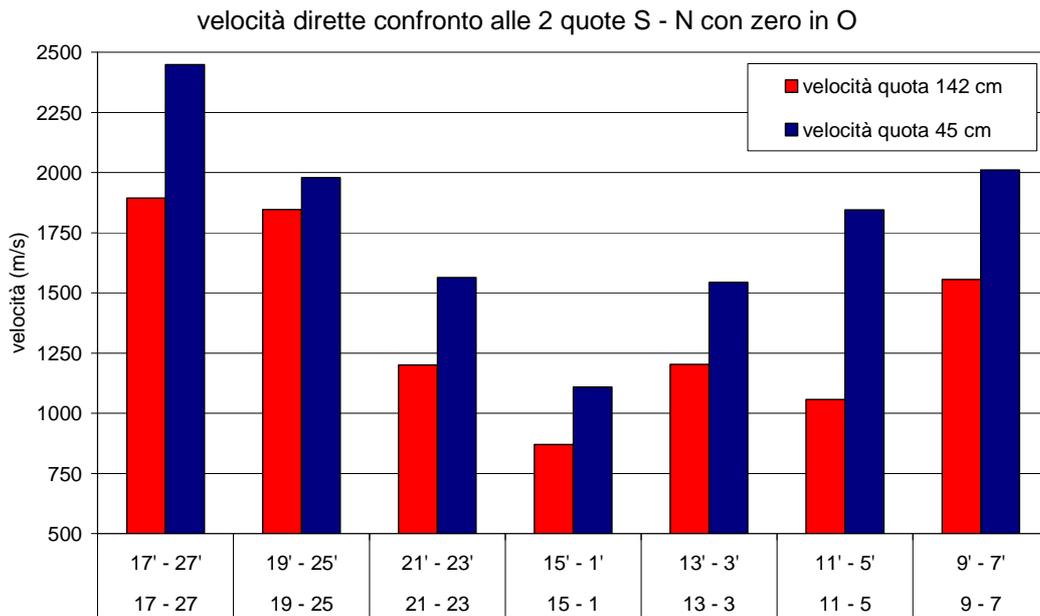


Fig. 8.50: Pilastro, percorsi S-N, confronto delle velocità dalle prove in trasmissione diretta.

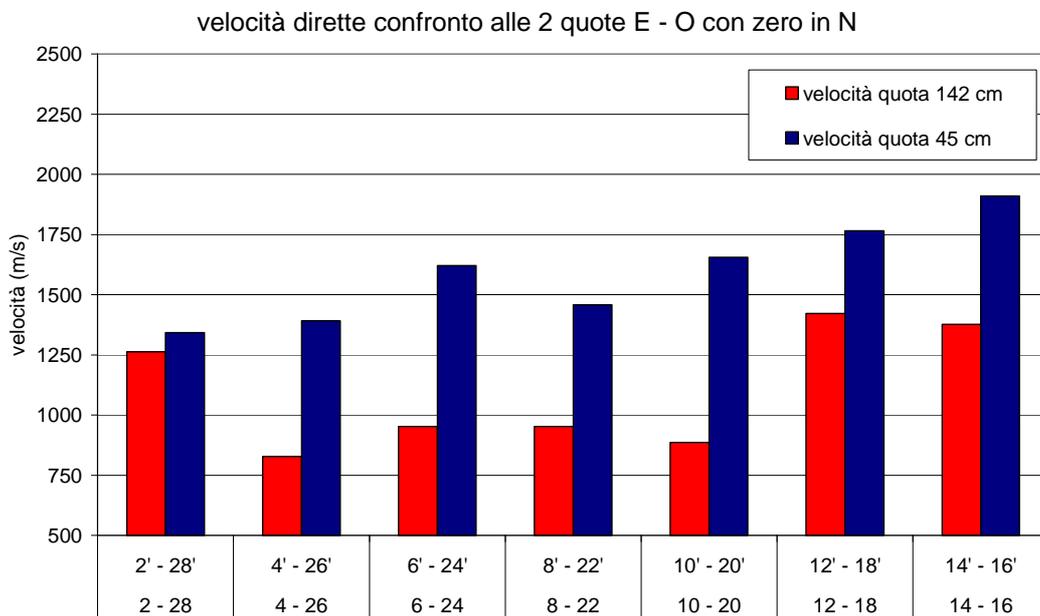


Fig. 8.51: Pilastro, percorsi E-O, confronto delle velocità dalle prove in trasmissione diretta.

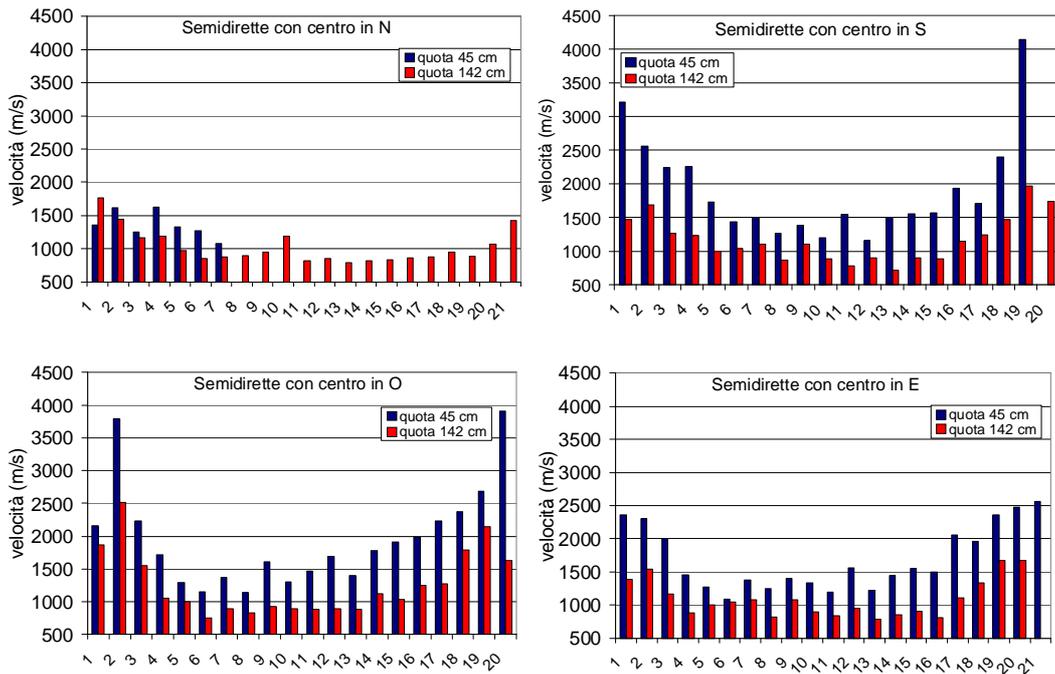


Fig. 8.52: Pilastro, confronto delle velocità dalle prove in trasmissione semidiretta.

Anche confrontando le velocità di propagazione calcolate dalle prove in trasmissione semidiretta si nota che a quota 142 cm si hanno valori decisamente minori, ma l'andamento decrescente e poi crescente è del tutto simile alle due quote. Sono di seguito riportati anche i diagrammi distanza-velocità realizzati in un'analisi preliminare dei dati (Fig. 8.53 e 8.54). Si può notare che le velocità generalmente decrescono con l'aumentare della lunghezza del percorso di misura in modo analogo per ogni serie (le serie raggruppano elementi con caratteristiche simili).

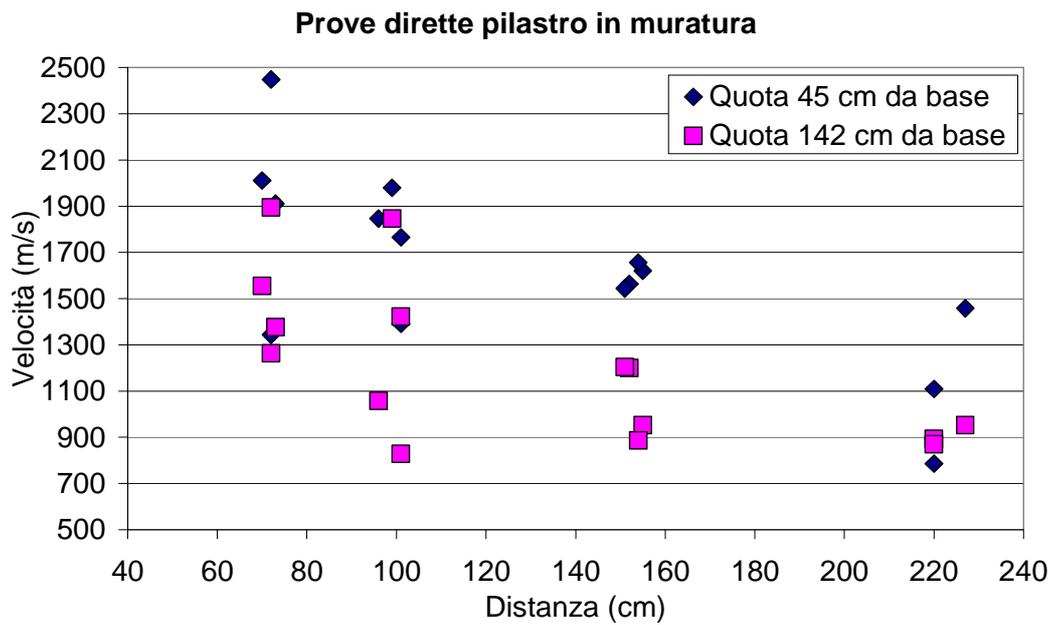
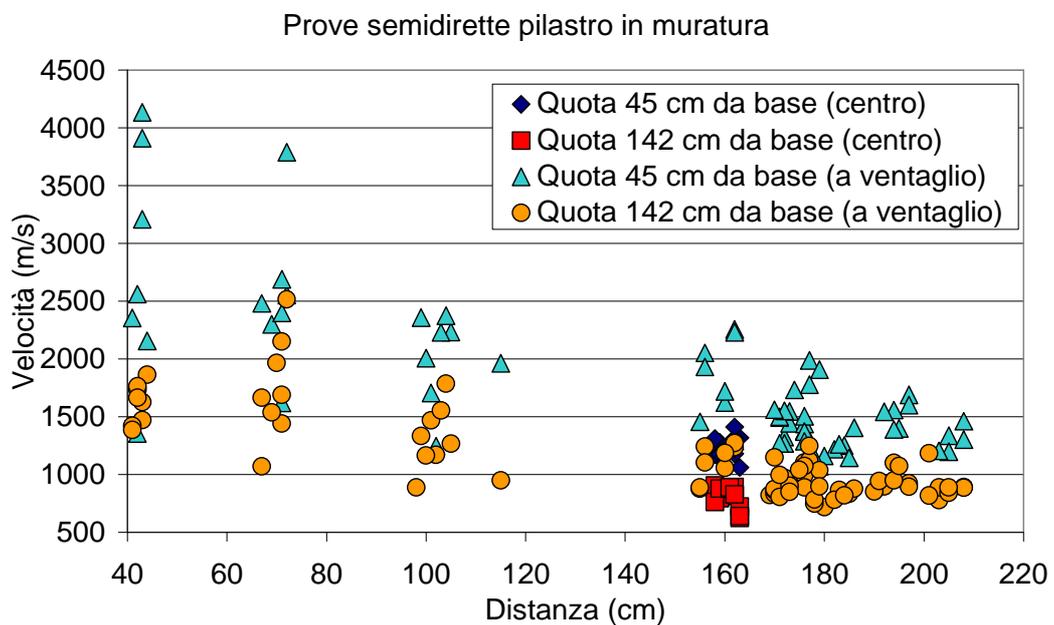


Fig. 8.53: Pilastro, prove in trasmissione diretta alle due quote: confronto delle velocità plottate contro la distanza



È stata riportata la media delle velocità dei diversi gruppi di percorsi e ne è stato calcolato il coefficiente di variazione (Tab. 8.14). Il coefficiente di variazione è un indice di dispersione dei valori che stima la precisione di una misura ed è definito, per un dato campione, come il rapporto tra la sua deviazione standard (σ) ed il valore assoluto della sua media aritmetica (μ):

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|}$$

La deviazione standard (σ) è un indice che misura la dispersione dei dati intorno al valore atteso ed è valutato come:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

dove \bar{x} è la media aritmetica:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Per le prove dirette si può notare che le velocità medie sono maggiori nei percorsi S – N ad entrambe le quote, così come il coefficiente di variazione (Tab. 8.14), mentre per le prove semidirette si nota che le velocità maggiore si registrano nei percorsi con centro in Ovest, ma anche i coefficienti di variazione maggiori.

In base ai loro percorsi le misure delle prove semidirette sono state suddivise in esterne, indicate in rosso, e in interne, indicate in blu (Fig. 8.55).

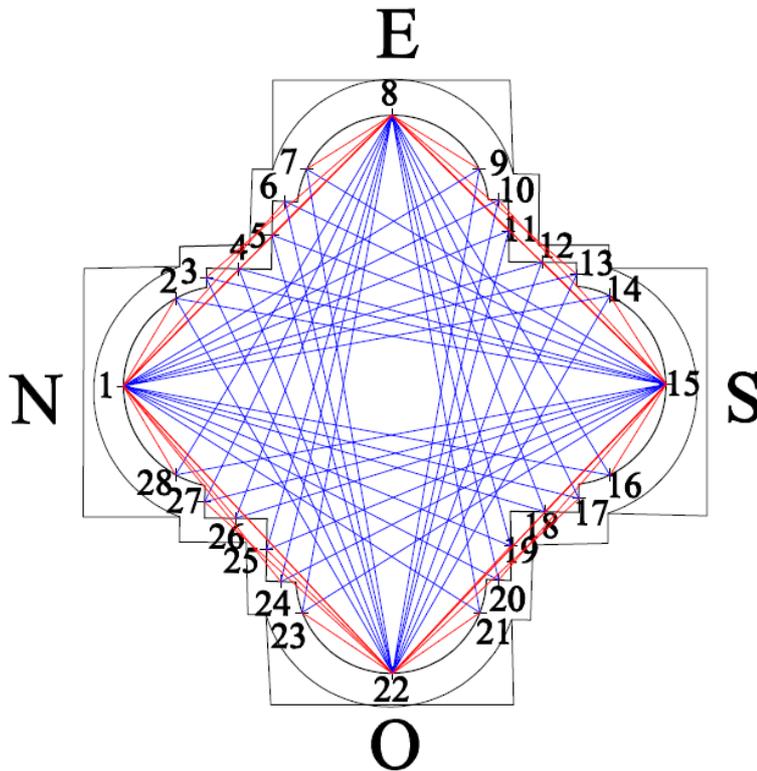


Fig. 8.55: Posizione 3, suddivisione tra percorsi esterni (in rosso) ed interni (in blu) delle prove semidirette.

Tabella 8.14: Pilastro di muratura, prove dirette, velocità medie e coefficiente di variazione percentuale.

Quota 45 cm	vel. media (m/s)	dev. standard	coeff. di variazione %
S - N	1705	460	26.97
E - O	1587	180	11.32
Quota 142 cm			
S - N	1315	378	28.75
E - O	1097	230	20.97

Tabella 8.15: Pilastro di muratura, prove semidirette, velocità medie e coefficiente di variazione.

Quota 45 cm		vel. media (m/s)	dev. standard	coeff. di variazione %
centro in S	esterne	2553	729	28.55
	interne	1441	165	11.44
centro in O	esterne	2638	743	28.18
	interne	1508	272	18.02
centro in N	esterne	1461	165	11.29
	interne	1223	108	8.85
centro in E	esterne	2171	321	14.80
	interne	1348	142	10.56
centrali		1233	82	6.68

Quota 142 cm		vel. media (m/s)	dev. standard	coeff. di variazione %
centro in S	esterne	1510	250	16.55
	interne	945	128	13.58
centro in O	esterne	1730	436	25.20
	interne	947	129	13.66
centro in N	esterne	1198	281	23.43
	interne	893	101	11.36
centro in E	esterne	1344	261	19.42
	interne	919	101	11.00
centrali		801	80	9.92

Colonna di pietra, posizione 4

La prima colonna di pietra sulla sinistra entrando dall'ingresso principale è stata provata con quattro stazioni di misura orientate come i punti cardinali, a 3 quote differenti dal basamento della colonna:

- a 70 cm,
- a 140 cm,
- a 260 cm.

Sulla colonna sono state effettuate solo prove in trasmissione diretta nelle 2 direzioni principali nord – sud e est – ovest e i percorsi inversi, per ogni quota.

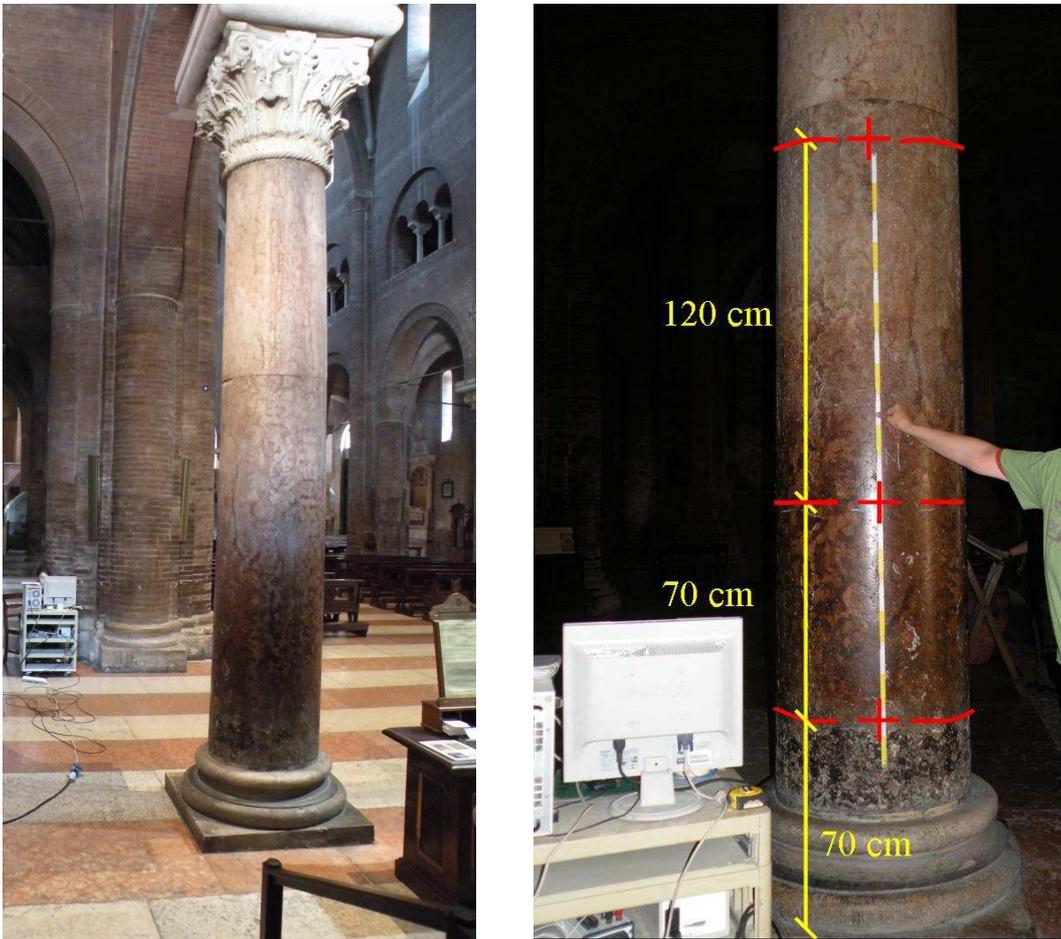


Fig. 8.56: Posizione 4, colonna di pietra, provata a tre diverse quote, vista da Nord

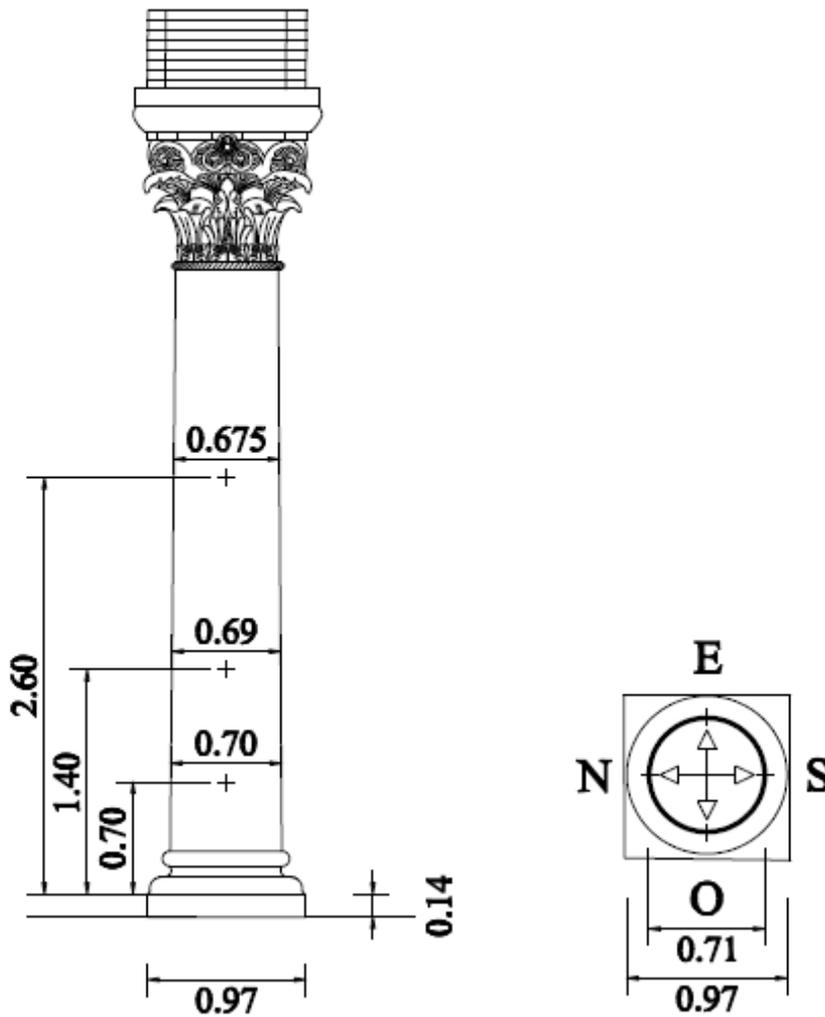


Fig. 8.57: Posizione 4, prospetto e pianta della colonna in pietra con posizioni di prova.

Tabella 8.16: Posizione 4, quota 70 cm, dati dalle prove per trasmissione diretta

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Tempo di volo medio (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	Velocità medie (m/s)
BinDirPilPietbis0	N	S	150		70	4667	
BinDirPilPietbis1	N	S	146	148	70	4795	4731
BinDirPilPietbis2	O	E	152		70	4605	

8. Prove soniche presso il Duomo di Modena

BinDirPilPietbis3	O	E	152	152	70	4605	4605	
BinDirPilPietbis4	S	N	240		70	2917		
BinDirPilPietbis5	S	N	168	204	70	4167	3542	
BinDirPilPietbis6	E	O	184		70	3804		
BinDirPilPietbis7	E	O	136	160	70	5147	4476	
							4338	

Tabella 8.17: Posizione 4, quota 140 cm, dati dalle prove per trasmissione diretta

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Tempo di volo medio (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	Velocità medie (m/s)	
BinDirPilPiet0	N	S	132		69	5227		
BinDirPilPiet1	N	S	138	135	69	5000	5114	
BinDirPilPiet2	O	E	134		69	5149		
BinDirPilPiet3	O	E	132	133	69	5227	5188	
BinDirPilPiet4	S	N	134		69	5149		
BinDirPilPiet5	S	N	136	135	69	5074	5111	
BinDirPilPiet6	E	O	130		69	5308		
BinDirPilPiet7	E	O	128	129	69	5391	5349	
							5191	

Tabella 8.18: Posizione 4, quota 260 cm, dati dalle prove per trasmissione diretta

Nome file	Tx	Rx	Tempo di volo (microsec)	Tempo di volo medio (microsec)	Lunghezza percorso (cm)	Velocità (m/s)	Velocità medie (m/s)	
BinDirPilPietter0	N	S	140		67.5	4821		
BinDirPilPietter1	N	S	140	140	67.5	4821	4821	
BinDirPilPietter2	O	E	132		67.5	5114		
BinDirPilPietter3	O	E	134	133	67.5	5037	5075	
BinDirPilPietter4	S	N	180		67.5	3750		
BinDirPilPietter5	S	N	152	166	67.5	4441	4095	
BinDirPilPietter6	E	O	164		67.5	4116		
BinDirPilPietter7	E	O	144	154	67.5	4688	4402	
							4598	

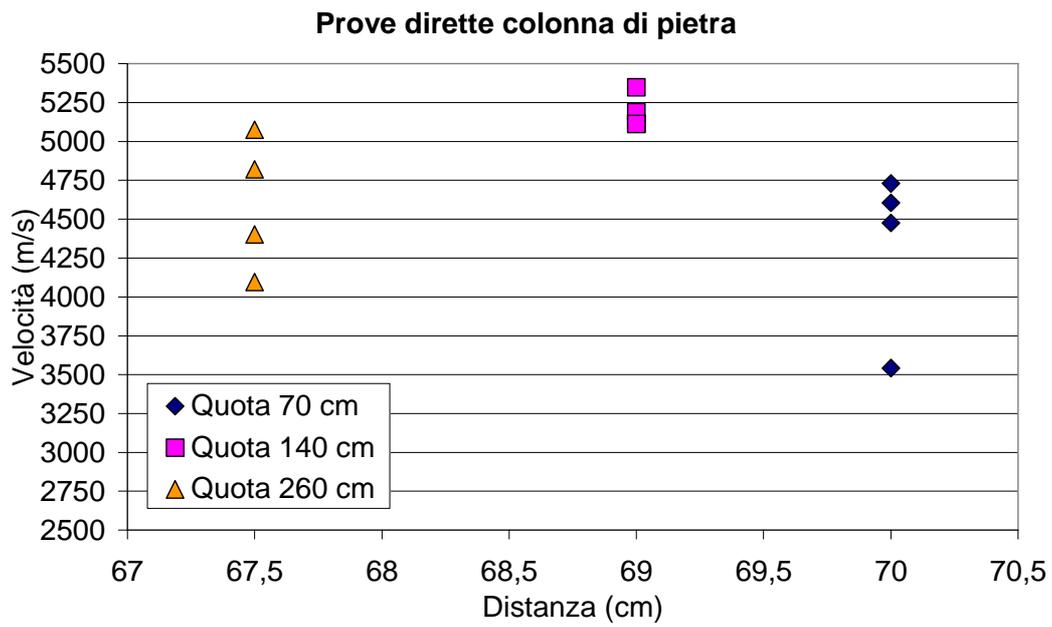


Fig. 8.58: Colonna in pietra, grafico distanza – velocità dalle prove dirette.

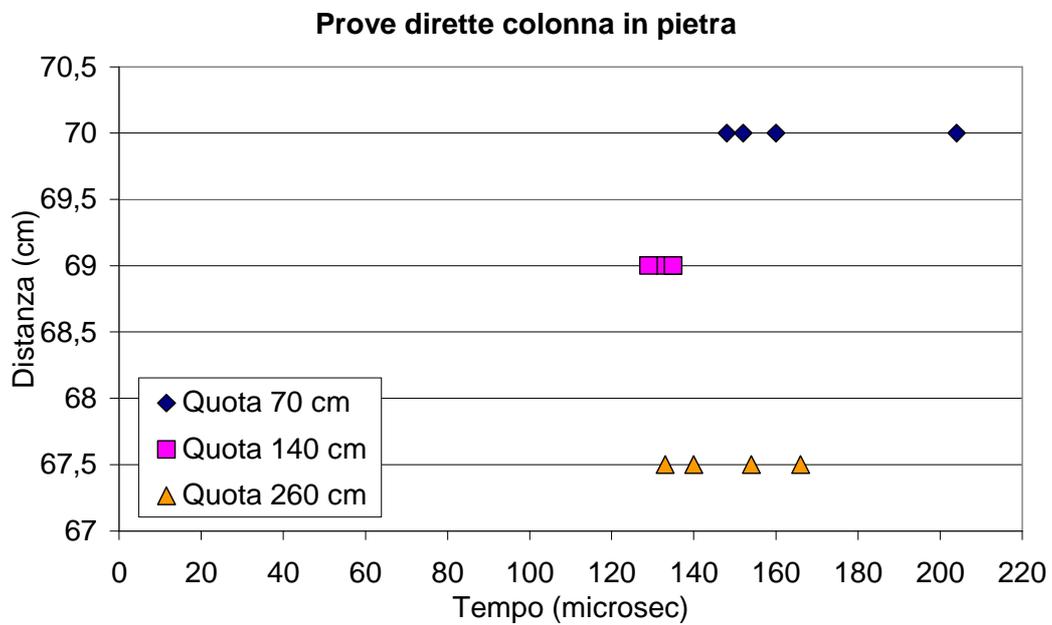


Fig. 8.58: Colonna in pietra, grafico tempo – distanza dalle prove dirette.

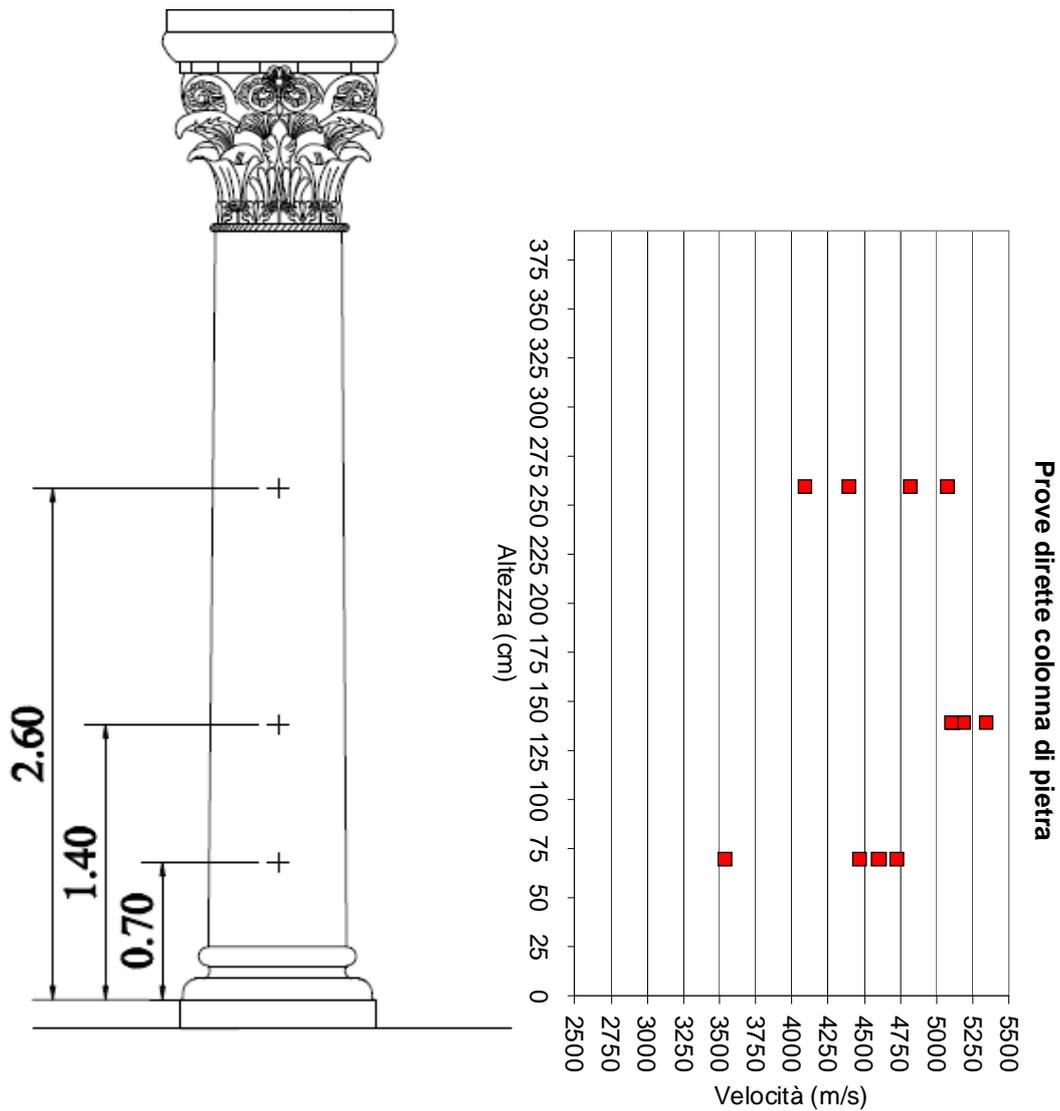


Fig. 8.59: Colonna in pietra, grafico distanza – velocità dalle prove dirette

Tabella riassuntiva delle velocità medie calcolate nel Duomo

Le velocità soniche medie calcolate in ogni posizione di prova sono state riportate suddivise per le diverse tipologie di trasmissione dell'onda (Tabella 8.19).

Tabella 8.19: velocità medie delle 4 zone di prova nel Duomo.

Posizioni	V_m dirette	V_m semidirette	V_m superficiali su paramento laterizio
Parete Nord	1862	1545	1371
Facciata	1350		1752
Pilastro in muratura	1381	1363	
Colonna di pietra	4709		
V_m	2324	1454	1562

9. PRINCIPI DELLA TECNICA TOMOGRAFICA

La tecnica tomografica

La parola tomografia deriva dal greco ed è composta dalle due parole: "tomos" (fetta) e "gràphos" (rappresentazione). La tomografia permette la ricostruzione di un oggetto tridimensionale misurando l'energia passante attraverso di esso. Questa energia viene generata sul perimetro esterno dell'oggetto tramite l'ausilio di diverse tecniche. Le basi teoriche della tomografia furono definite da Radon nel 1917 (Radon, 1917), che dimostrò che un oggetto può essere ricostruito perfettamente attraverso uno set completo di proiezioni. La tomografia iniziò però appena a trovare le sue applicazioni pratiche con l'avvento dei personal computer, all'inizio nel campo dell'astronomia per poi diffondersi con enorme successo nella medicina. Più recentemente la tomografia ha trovato il suo impiego anche nella geofisica e nel campo dell'ingegneria civile. La tomografia è una tecnica che studia il passaggio di onde di diversa natura attraverso l'elemento da analizzare (tomografia in trasmissione). Il concetto fondamentale della tomografia come già accennato è quello delle proiezioni. Per ottenere le proiezioni il materiale viene esplorato con una fitta rete di percorsi di misura variamente inclinati ed incrociati. Lungo questi percorsi di misura vengono fatte passare delle onde energetiche che interagiscono con il materiale e vengono misurate dopo essere passate attraverso di esso. Variazioni spaziali all'interno dell'elemento, come ad esempio la presenza di vuoti, risultano visibili sotto forma di variazioni nel segnale ricevuto. In altre parole il segnale ricevuto fornisce una proiezione delle proprietà interne del oggetto. Trasmettitori e ricevitori devono essere posizionati in modo da coprire l'area di indagine con molta uniformità. Ci sono diverse forme di energia che risultano diversamente sensibili a diverse proprietà fisiche del materiale da investigare. Così ad esempio le onde elettromagnetiche sono fortemente influenzate dalle proprietà elettriche e magnetiche di un materiale, e vengono per questo usate per determinare queste proprietà. Le onde sismiche invece forniscono indicazioni sulle proprietà elastiche di un materiale. Nella tomografia con l'ausilio

di onde sismiche vengono misurati due parametri del segnale in base ai quali si distinguono due tecniche differenti:

1. Inversione del tempo di volo (Travel time inversion): viene misurato il tempo di volo del segnale passante attraverso il materiale fra emettitore e ricevitore. Note le coordinate delle stazioni trasmettenti e riceventi e quindi nota la lunghezza del percorso, la tecnica tomografica consente la ricostruzione di una mappa di velocità all'interno dell'area investigata.
2. Inversione dell'ampiezza (Amplitude inversion): in questo caso viene misurata l'attenuazione del segnale fra stazione trasmittente e ricevente. Quindi nota la lunghezza del percorso l'inversione tomografica consente la ricostruzione di una mappa di attenuazioni all'interno della superficie da investigare.

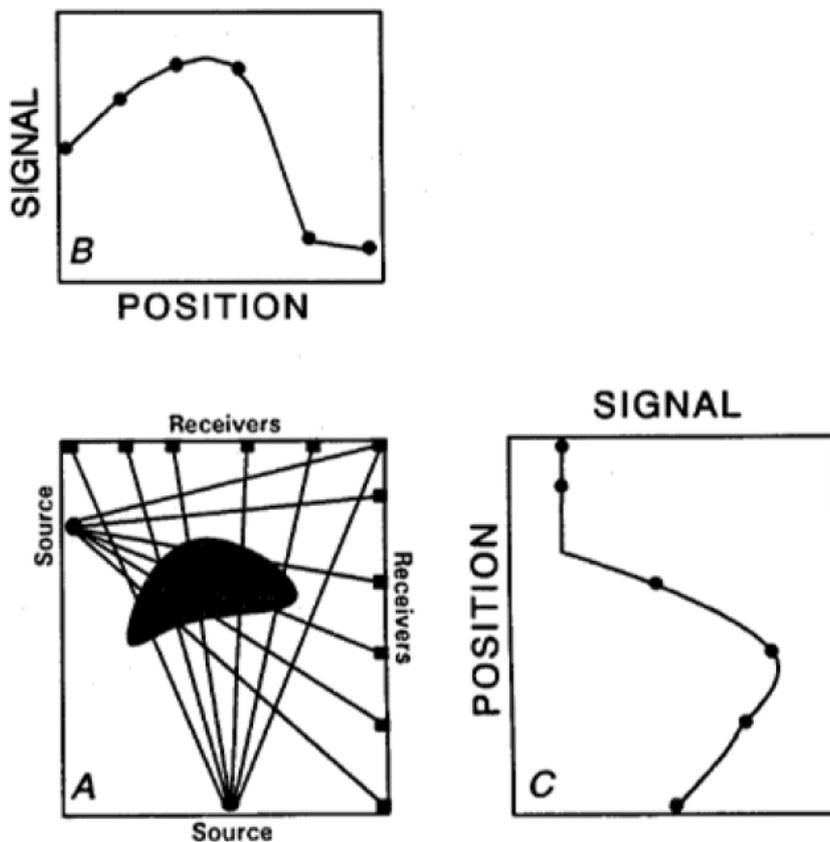


Fig. 9.1: La tomografia permette la ricostruzione esatta di un oggetto tridimensionale (M. J. Jackson).

Inversione del tempo di volo

Note le posizioni di ricevitore ed emettitore risulta possibile calcolare il tempo di volo del segnale mediante la seguente relazione:

$$t = \int_R^S \frac{1}{v} dl = \int_R^S p dl$$

dove S sta per source (stazione trasmittente) ed R per receiver (stazione ricevente). t invece sta ad indicare il tempo di volo fra S ed R e v la velocità media lungo l'intero percorso. La formula rappresenta un'integrale di linea della lentezza p fra S ed R. Ci sono due metodi che consentono di ricostruire la distribuzione delle lentezze da un set di integrali di linea. Il primo metodo è basato sulla trasformata di Fourier il secondo su di una tecnica di espansione in serie. Qui di seguito verrà spiegata solo la seconda metodologia. Per prima cosa si procede ad una suddivisione in pixel della funzione continua p(x,z). A ciascun pixel viene assegnata una lentezza iniziale p_j. L'integrale corrispondente al tempo di volo t_i fra R ed S si trasforma quindi in una sommatoria:

$$t_i = \sum_{j=1}^M p_j d_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

dove d_{ij} indica la distanza percorsa dal raggio i all'interno del pixel j e p_j indica la lentezza corrispondente al pixel j. Considerando l'intero set di raggi l'equazione di sopra può venire riscritta in forma matriciale come segue:

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}\mathbf{P}$$

dove **T** e **P** sono dei vettori colonna di lunghezza N ed M rispettivamente e **D** è una matrice di N righe ed M colonne. Se i percorsi vengono approssimati come percorsi "straight" i coefficienti di **D** sono determinabili mediante semplici considerazioni geometriche. Se i percorsi invece vengono assimilati a percorsi curvi la determinazione dei coefficienti risulta essere più complessa. A questo punto ci sarebbe necessità di invertire la matrice **D** in modo da ottenere i valori del vettore **P** in funzione dei tempi di volo **T**:

$$\mathbf{P} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{T}$$

In questo caso però può capitare che la matrice non sia invertibile per diversi motivi. In genere quindi viene usata una soluzione approssimata del problema conosciuta come "back - projection". In questo caso viene usata la trasposta della matrice normalizzata \mathbf{D} :

$$\mathbf{P} = \mathbf{D}^{*T} \mathbf{T}$$

La matrice \mathbf{D}^{*T} si ottiene dividendo ogni riga della matrice \mathbf{D} , corrispondente ad un certo percorso i , con il quadrato della lunghezza del percorso fra R_i ed S_i come segue:

$$p_j = \sum_{i=1}^N \frac{D_{ij} T_i}{D_i^2} (j = 1, 2, \dots, N)$$

Ancora migliore della metodologia presentata risulta in questo caso però essere la soluzione ai minimi quadrati:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{T}$$

Anche questo approccio però può risultare non attuabile se la matrice $(\mathbf{D}^T \mathbf{D})$ è singolare. Questo ha portato all'applicazione smorzata dei minimi quadrati:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{T}$$

dove λ è il parametro di smorzamento ed \mathbf{I} la matrice identità. Dato il costo computazionale elevato di questi metodi ad essi si affacciano delle alternative più efficienti date dai metodi iterativi. Nel processo iterativo il modello di partenza viene man mano modificato fino a convergere ad una soluzione. Come primo passo viene specificato un modello iniziale:

$$\mathbf{T}' = \mathbf{D} \mathbf{P}'$$

I tempi di volo \mathbf{T}' iniziali vengono sottratti dai tempi di volo misurati \mathbf{T} in modo da ottenere il vettore dei residui:

$$\mathbf{dT} = \mathbf{T} - \mathbf{T}'$$

Il passo chiave della procedura consiste quindi nell'applicare la seguente formula:

$$\mathbf{dP}' = \mathbf{D}^{*T} \mathbf{dT}$$

dove \mathbf{D}^{*T} è la matrice definita in precedenza. A questo punto il modello viene aggiornato come segue:

$$\mathbf{P}'' = \mathbf{P}' + \mathbf{dP}'$$

Il processo viene ripetuto fino alla convergenza al risultato voluto.

Inversione dell'ampiezza

La seguente descrizione dell'attenuazione si riferisce alle onde radio, ma le stesse osservazioni possono essere in generale applicate anche alle onde sismiche. Con GeoTom CG è importante usare solo l'elaborazione straight-ray per l'inversione dell'ampiezza. Per un'onda radio con ampiezza iniziale A_0 , con diffusione sferica in un materiale omogeneo, l'ampiezza ad una distanza r dalla sorgente vale:

$$A = A_0 r^{-1} \sin(\vartheta_T) \exp(-\alpha r)$$

Dove ϑ_T è l'angolo che riguarda l'asse di trasmissione dell'antenna e α è il coefficiente di attenuazione. Utilizzando il logaritmo naturale e riordinando si ottiene:

$$-\ln(A / A_0) + \ln(\sin(\vartheta_T)) - \ln(r) = \alpha r$$

Per un materiale non omogeneo dove α varia a seconda della posizione, la quantità a sinistra è uguale all'integrale di linea dell'attenuazione lungo il percorso dei raggi dalla sorgente al ricevitore:

$$-\ln(A / A_0) + \ln(\sin(\vartheta_T)) - \ln(r) = \int_S^R \alpha(r) dr$$

Tuttavia due ulteriori aggiustamenti sono richiesti prima che i dati possano essere invertiti. Primo, l'antenna ricevente ha una sensibilità che dipende dall'angolo come quella della radiazione dall'antenna trasmittente. Secondo, i dati dell'ampiezza devono essere espressi in Decibel:

$$A(dB) = 20 \log_{10} \frac{A}{A_R}$$

dove A_R è l'ampiezza di riferimento.

Perciò si può riscrivere la formula precedente come:

$$\begin{aligned} & -0,115[20 \log(A / A_R) + 20 \log(A_R / A_0) - \\ & - 20 \log(\sin(\vartheta_T)) - 20 \log(\sin(\vartheta_R)) + 20 \log(r)] = \\ & = \int_S^R \alpha(r) dr \end{aligned}$$

Il primo termine a sinistra nelle parentesi quadre rappresenta i dati misurati. Gli altri termini sono fattori di correzione, rispettivamente: indice di riferimento e ampiezze della sorgente, dipendenza angolare della radiazione e diffusione

sferica. Il termine 0.115 nasce dalla conversione da logaritmo naturale a logaritmo in base 10. Per ogni percorso i termini a sinistra dell'equazione possono essere calcolati e usati come input per i comuni software di inversione tomografica.

10. APPLICAZIONE IN SITO: TOMOGRAFIA SONICA PRESSO IL SITO UNESCO DI MODENA

Tomografia sonica di un pilastro del Duomo di Modena

La tecnica tomografica è stata applicata alla posizione 3, ovvero al primo pilastro in muratura sulla sinistra entrando dall'ingresso principale del Duomo (cfr. cap.8 fig. 8.1). Si è scelto di approfondire lo studio sul pilastro perché di particolare interesse e perché si avevano a disposizione un gran numero di dati sonici. Di seguito verranno descritti il procedimento di inversione tomografica tramite il software GeoTomCG e tutte le prove effettuate per raffinare il modello.

Acquisizione dati in sito

La procedura di acquisizione dati è simile a quella adottata per le prove soniche in quanto è necessario come input per l'inversione tomografica il tempo di volo su ciascun percorso o la corrispondente attenuazione del segnale. Per calcolare il tempo di volo si ha bisogno delle forme d'onda del trasmettitore e del ricevitore e si procede nel modo che è stato illustrato nel capitolo 7 relativo alle prove soniche.

Procedimento step-by-step per l'utilizzo del software

Per le inversioni è stato utilizzato il software GeoTomCG versione 5.5, Jan 2008, che esegue le inversioni con la tecnica di ricostruzione iterativa simultanea (S.I.R.T.) (cfr. Cap.9).

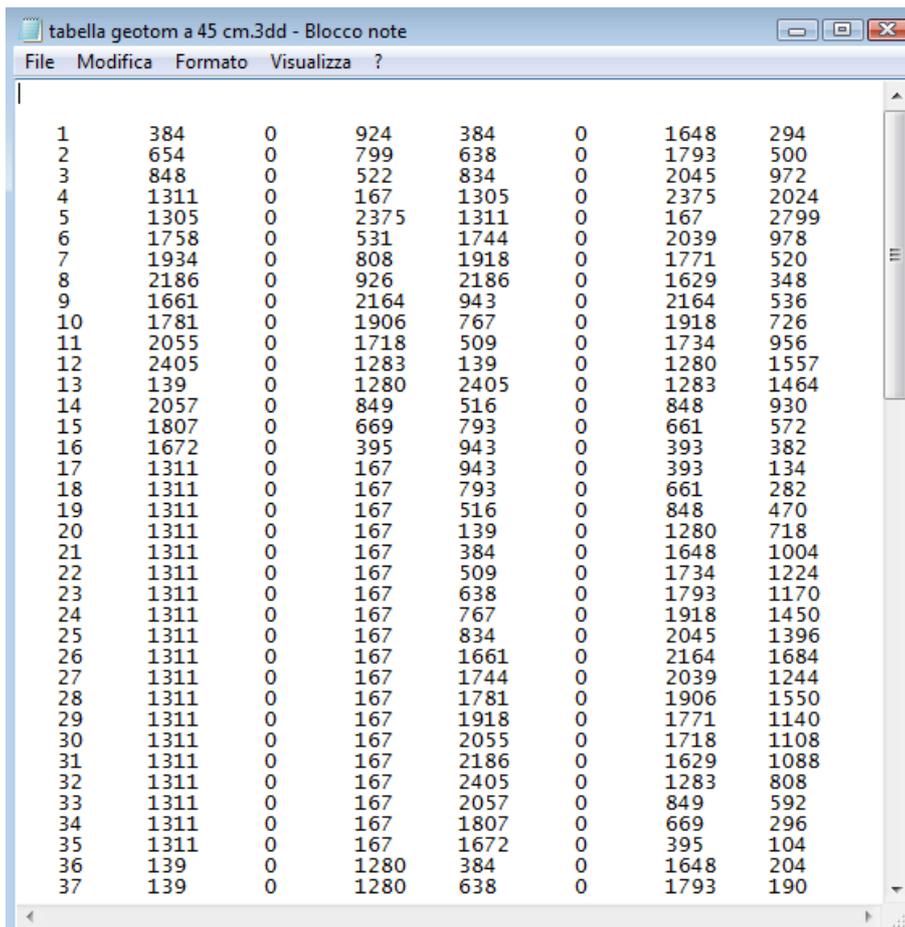
1) Ai fini della ricostruzione della mappa di velocità soniche dai tempi di volo calcolati, per prima cosa bisogna preparare il file di input nel formato richiesto dal programma (Fig. 10.1).

Il file può essere prodotto con Excel creando una tabella con otto colonne indicanti nell'ordine:

- numerazione progressiva dei percorsi,
- coordinate x,y,z della stazione sorgente in mm,

- coordinate x,y,z del ricevitore in mm,
- tempo di volo del percorso in μs .

Prima di creare il file bisogna scegliere un opportuno sistema di riferimento e nel nostro caso è stato scelto come piano della sezione orizzontale x-z, e y come asse dell'altezza del piano di riferimento (utile specialmente in caso di analisi 3D) (Fig. 10.2).



1	384	0	924	384	0	1648	294
2	654	0	799	638	0	1793	500
3	848	0	522	834	0	2045	972
4	1311	0	167	1305	0	2375	2024
5	1305	0	2375	1311	0	167	2799
6	1758	0	531	1744	0	2039	978
7	1934	0	808	1918	0	1771	520
8	2186	0	926	2186	0	1629	348
9	1661	0	2164	943	0	2164	536
10	1781	0	1906	767	0	1918	726
11	2055	0	1718	509	0	1734	956
12	2405	0	1283	139	0	1280	1557
13	139	0	1280	2405	0	1283	1464
14	2057	0	849	516	0	848	930
15	1807	0	669	793	0	661	572
16	1672	0	395	943	0	393	382
17	1311	0	167	943	0	393	134
18	1311	0	167	793	0	661	282
19	1311	0	167	516	0	848	470
20	1311	0	167	139	0	1280	718
21	1311	0	167	384	0	1648	1004
22	1311	0	167	509	0	1734	1224
23	1311	0	167	638	0	1793	1170
24	1311	0	167	767	0	1918	1450
25	1311	0	167	834	0	2045	1396
26	1311	0	167	1661	0	2164	1684
27	1311	0	167	1744	0	2039	1244
28	1311	0	167	1781	0	1906	1550
29	1311	0	167	1918	0	1771	1140
30	1311	0	167	2055	0	1718	1108
31	1311	0	167	2186	0	1629	1088
32	1311	0	167	2405	0	1283	808
33	1311	0	167	2057	0	849	592
34	1311	0	167	1807	0	669	296
35	1311	0	167	1672	0	395	104
36	139	0	1280	384	0	1648	204
37	139	0	1280	638	0	1793	190

Fig. 10.1: Esempio di file di input nel formato richiesto dal programma tomografico

Essendo uno studio in 2D la colonna y della sorgente e del ricevitore presenta tutti zeri, ma è stata comunque inserita nel caso che in uno studio successivo si volesse passare ad un'analisi in 3D sostituendo agli zeri della terza e della sesta colonna del file di input le effettive coordinate.

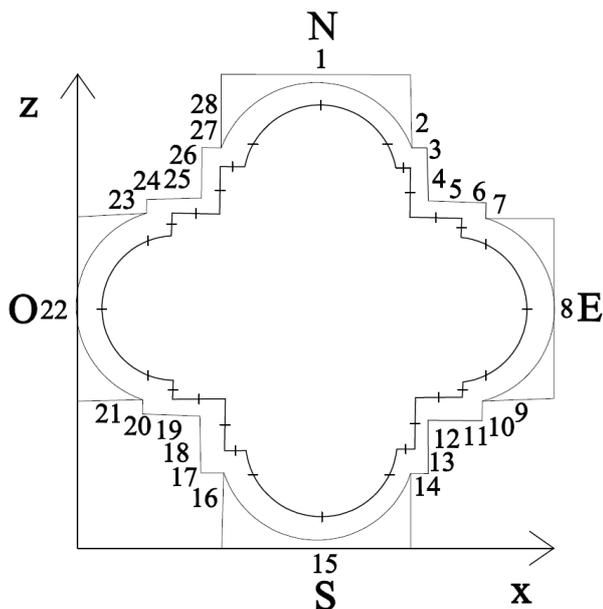


Fig. 10.2 : Sistema di riferimento utilizzato per la creazione del file di input.

Il file Excel va salvato come “testo formattato delimitato da spazio”, aperto con l’applicazione Blocco Note per cancellare la riga superiore di intestazione e poi salvato con estensione *.3dd.

2) Si avvia il software GeoTomCG e si apre il file appena creato da Data/ Open data file.

3) Ora bisogna creare il modello di velocità da Model/ Generate model. Si apre una finestra tramite la quale si impostano il numero di pixel per ogni direzione x e z ed il valore di “uniform velocity” che può essere lasciato di default. Una volta generato, il modello va salvato con estensione *.3dm.

4) Il modello salvato va poi aperto da Model/ Open model.

5) Da Options/ inversion parameters è possibile impostare i parametri d’inversione indicando il numero di iterazioni straight o bending che si vogliono far effettuare al programma ed il valore minimo e massimo delle velocità in gioco. Le interazioni straight-ray si basano sulla propagazione rettilinea dei raggi trasmessi, mentre le bending-ray sulla propagazione curvilinea. Le prime sono leggere da elaborare, le seconde sono pesanti, ma più accurate. Per quanto riguarda la velocità si assume solitamente come valore minimo 0,3 Km/s e come

valore massimo il valore massimo di velocità misurato dai dati acquisiti in sito (che in questa sezione del pilastro è pari a 4135 m/s, cfr. tab.8.9, cap.8) approssimato alla centinaia superiore. In questa finestra c'è la possibilità di modificare anche altri parametri i più importanti tra i quali sono:

- **Smoothing:** consente di aggiornare la velocità di ogni punto facendo una media pesata della stessa e contribuendo a fornire una mappa di velocità più realistica, dove le variazioni di velocità tra i pixel sono gradualmente. Lo smoothing può essere impostato in tutte le direzioni o solo in direzione orizzontale, assumendo valori tra 0,01 e 0,04 per non forzare troppo il risultato.
- **Damping:** questo valore regolarizza la soluzione, tenendo in considerazione gli errori che si propagano nel calcolo delle velocità medie nelle iterazioni e migliorando il residuo minimo. Si può partire con un valore iniziale di 0,01, aumentandolo gradualmente, ma stando attenti a non forzare la soluzione.

6) Da Raypaths/ Save raypaths è possibile salvare con l'estensione *.ray i percorsi dei raggi per richiamarli in seguito.

7) A questo punto si può far girare il programma con Run/ Run standard inversion.

Verrà chiesto di salvare 2 file: il primo contiene le informazioni relative al calcolo delle velocità (*.3dm), il secondo contiene il valore dei residui RSM (*.rsd).

8) Il modello di velocità prodotto può essere visualizzato da Model/ Display model cliccando su Show slice.

Verrà così visualizzata la mappa a colori delle velocità con a fianco la legenda. Per sovrapporre alla mappa i percorsi dei raggi si deve aprire il file relativo ai raggi salvato in precedenza da Raypaths/ Read raypaths.

9) Da Residuals/ Open residuals file si può aprire con Blocco Note il file dei residui salvato in precedenza. Utilizzando questi dati con Excel si può creare un grafico che permette di valutare l'andamento dei residui al crescere delle iterazioni.

Disposizione dei percorsi di misura

Per le inversioni sono stati inseriti i tempi di volo di tutti i percorsi utilizzati nelle prove soniche per il pilastro in muratura sia delle prove dirette che delle prove semidirette (cfr. Cap. 8, Tab. 8.8 – 8.10). I percorsi delle semidirette sono dei ventagli con centro nei quattro punti cardinali; il ventaglio con centro in Nord per problemi tecnici durante l'acquisizione presenta solo la parte sinistra (Fig. 10.3).

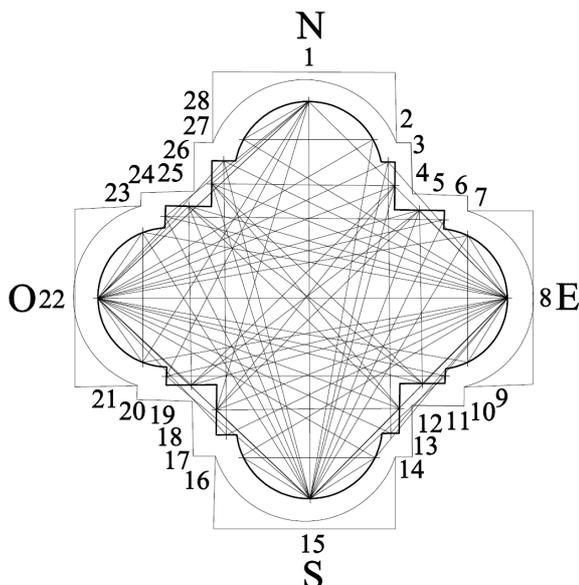


Fig. 10.3: Totale dei percorsi ideali utilizzati per le inversioni dei tempi di volo.

Prove preliminari di inversione

Prova 1: scelta della dimensione della griglia

Per scegliere il numero ottimale di pixel sono state plottate 3 mappe differenti sottoposte a 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending. Le dimensioni scelte sono le seguenti:

- 18×18 pixels, con lato del pixel di circa 12,5 cm,
- 26×26 pixels, con lato del pixel di circa 8,6 cm,
- 34×34 pixel, con lato del pixel di circa 6,6 cm.

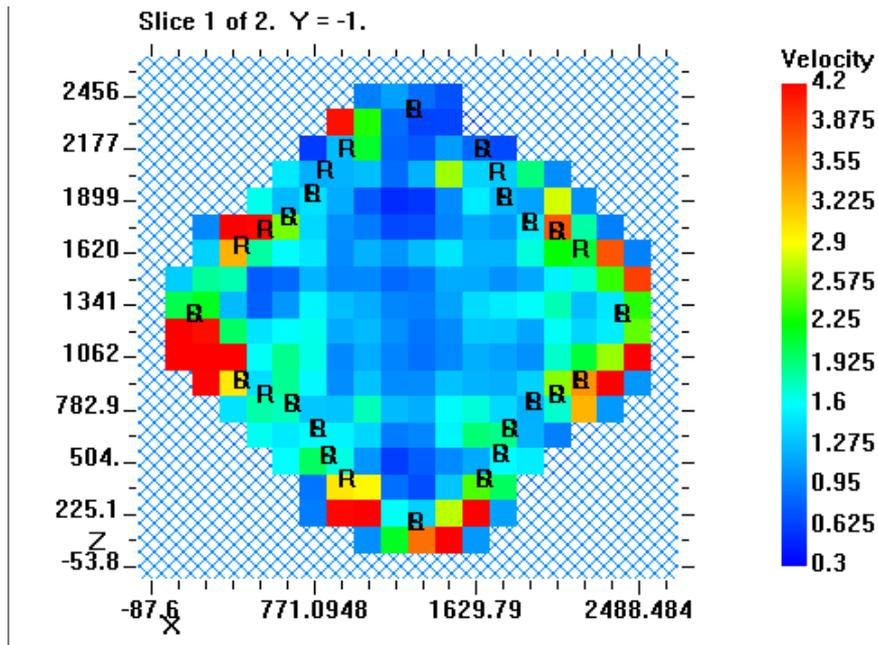


Fig. 10.4: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con griglia da 18×18 pixels con lato 12,5 cm, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

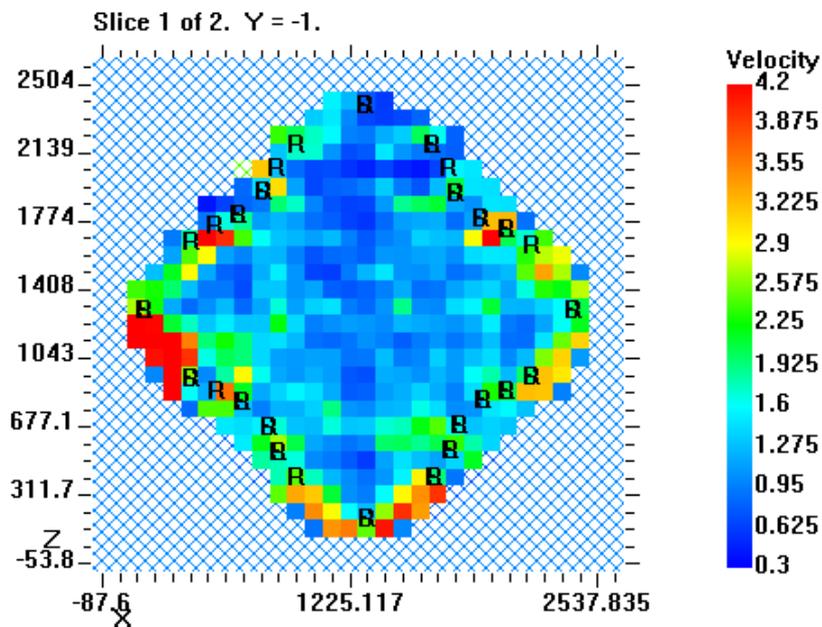


Fig. 10.5: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con griglia da 26×26 pixels con lato 8,3 cm, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

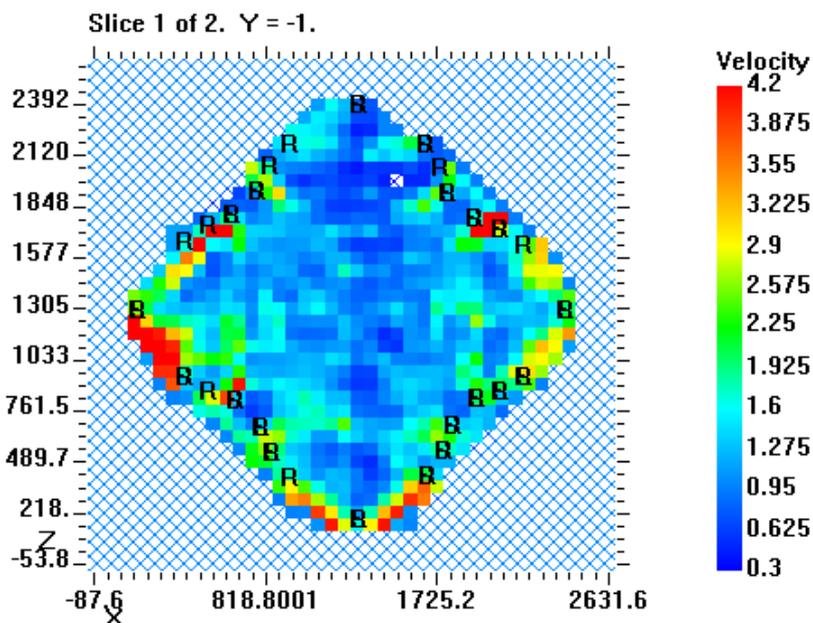


Fig. 10.6: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con griglia da 34×34 pixels con lato 6,4 cm, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

La griglia che fornisce i risultati migliori è quella 34×34 pixels con lato di circa 6,6 cm, perché le altre risultano poco accurate. Solitamente come valore di riferimento per la risoluzione della prova tomografica viene utilizzato $1/10$ della lunghezza d'onda, ma questo non è un valore vincolante. In questa sezione del pilastro la lunghezza d'onda media è 70 cm, quindi la risoluzione risulterebbe essere 7 cm (Tab. 10.1). La griglia 34×34 pixels di lato 6,6 cm si avvicina molto alla misura stimata della risoluzione.

Tabella 10.1: Valori di lunghezza d'onda dei segnali trasmessi attraverso il pilastro.

Nome file	Tx	Rx	T_c (μ s)	Lungh. percorso (cm)	V (m/s)	f_{\max} (KHz)	λ_{\min} (cm)
BinDirPilMurat19	1	28	638	42	1355	1,58	86
BinDirPilMurat47	15	16	342	43	3209	2,92	110
BinDirPilMurat84	22	21	332	43	3909	3,01	130
BinDirPilMurat0	1	15	292	220	781	3,42	22
BinDirPilMurat7	2	28	368	72	1343	2,72	49

BinDirPilMurat11	12	18	262	101	1766	3,82	46
BinDirPilMurat35	8	23	310	205	1336	3,23	41
BinDirPilMurat43	8	14	402	115	1962	2,49	78
BinDirPilMurat50	15	22	304	162	2256	3,29	68
Media						2,94	70

Dal confronto tra i grafici dei residui dopo 15 iterazioni straight e 10 bending e la tabella riassuntiva dei valori minimi per le tre differenti dimensioni delle griglie si nota che la griglia 34×34 pixels, cioè quella con dimensione dei pixels più piccola ha un residuo minimo minore rispetto alle altre ed è quindi una conferma che sia la più adatta per le inversioni dei tempi di volo (Fig. 10.7-10.9 e Tab. 10.2).

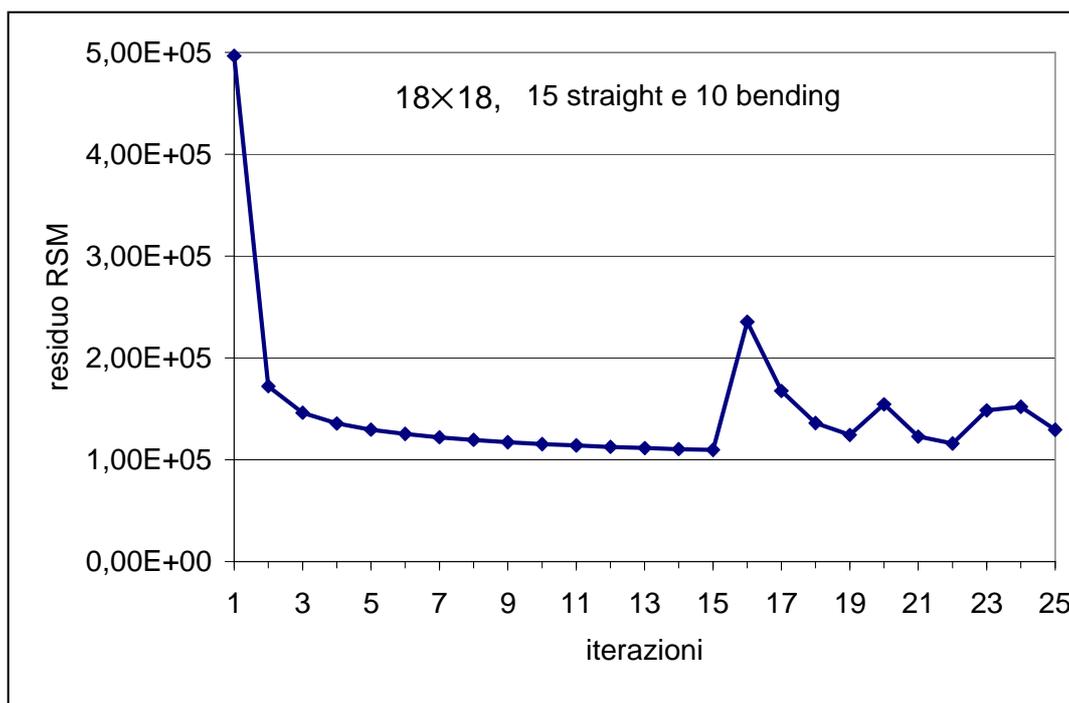


Fig. 10.7: Sezione a 45 cm, andamento dei residui ottenuto con griglia da 18×18 pixels dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

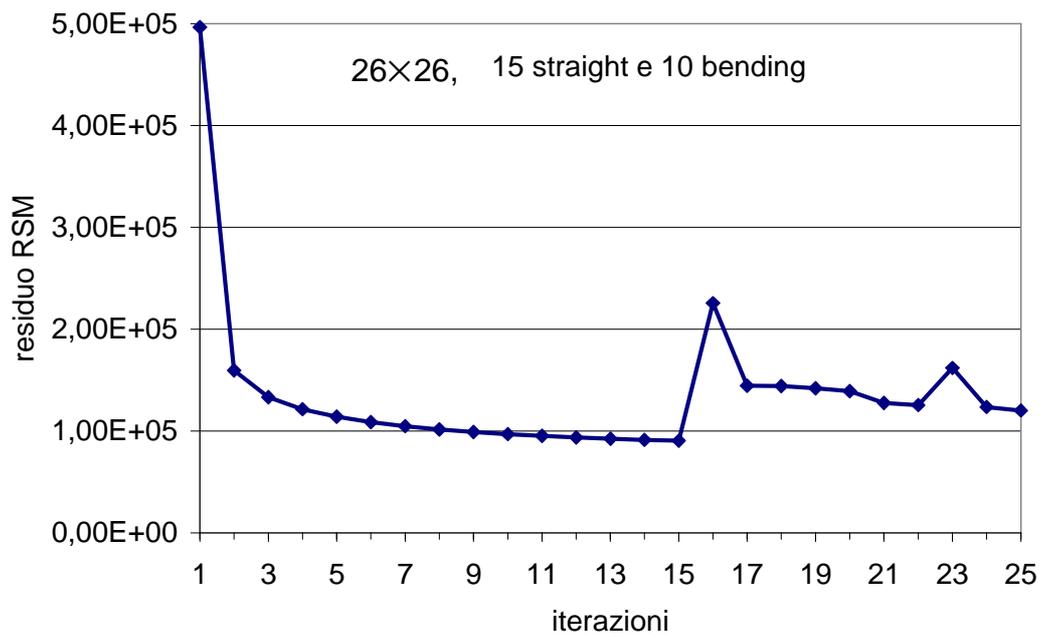


Fig. 10.8: Sezione a 45 cm, andamento dei residui ottenuto con griglia da 26×26 pixels dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

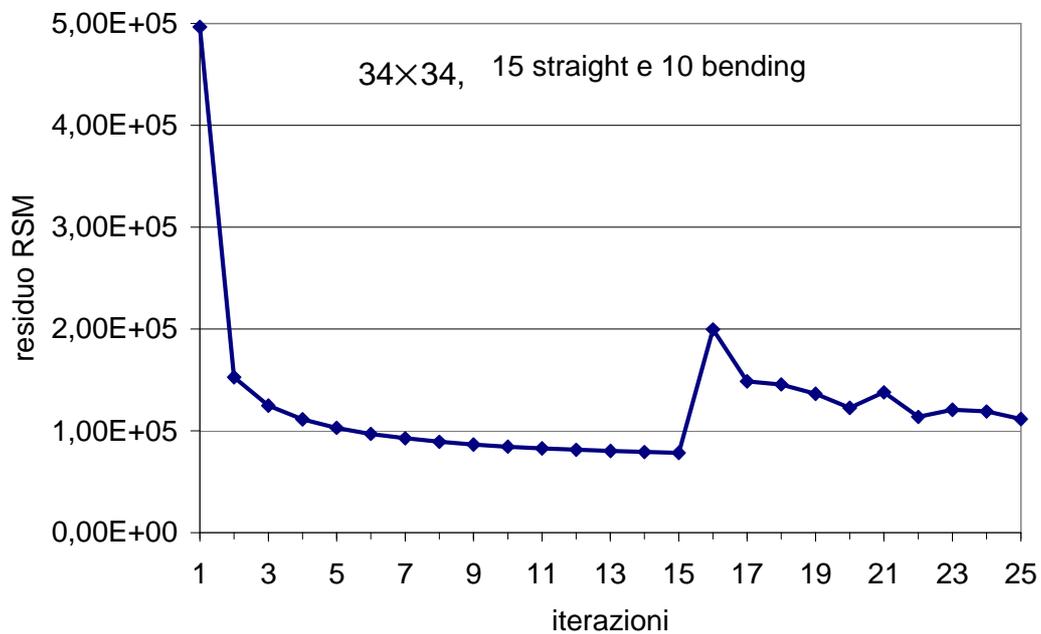


Fig. 10.9: Sezione a 45 cm, andamento dei residui ottenuto con griglia da 34×34 pixels dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

Tabella 10.2: Residui minimi dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

Griglia di pixels	Residuo minimo (dopo iter. straight)	Residuo minimo (dopo iter. bending)
18×18	1,10 E+05	1,29 E+05
26×26	9,03 E+04	1,20 E+05
34×34	7,82 E+04	1,12 E+05

Prova 2: influenza dello smoothing

Lo smoothing serve per rendere più gradualmente le variazioni di velocità tra i pixels vicini. Questo parametro è stato impostato su quattro valori crescenti: 0, 0,01, 0,02 e 0,03 per la griglia 34×34 (Fig. 10.10-10.13). Non è stato possibile impostare lo smoothing oltre il valore 0,03, perché se applicato in tutte le direzioni forniva un valore negativo che non permetteva al programma di girare.

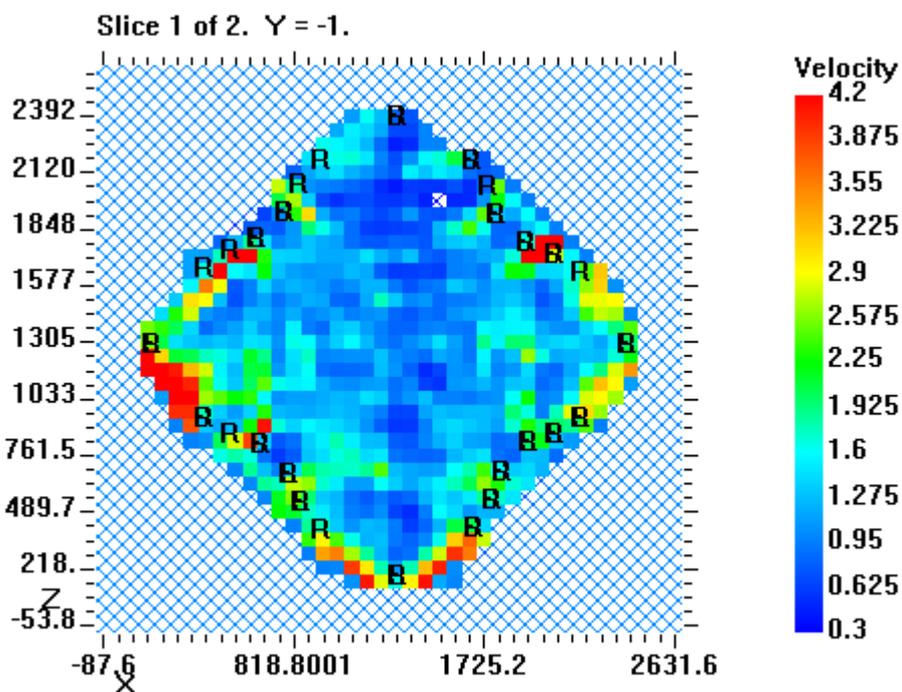


Fig. 10.10: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con smoothing nullo sulla griglia 34×34, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

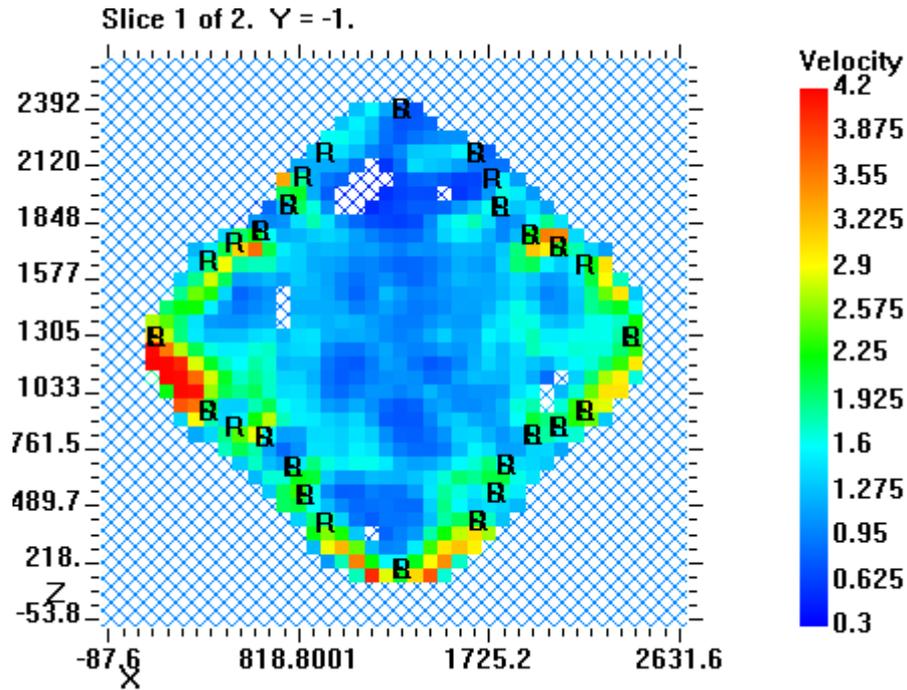


Fig. 10.11: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con smoothing 0,01 sulla griglia 34×34, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

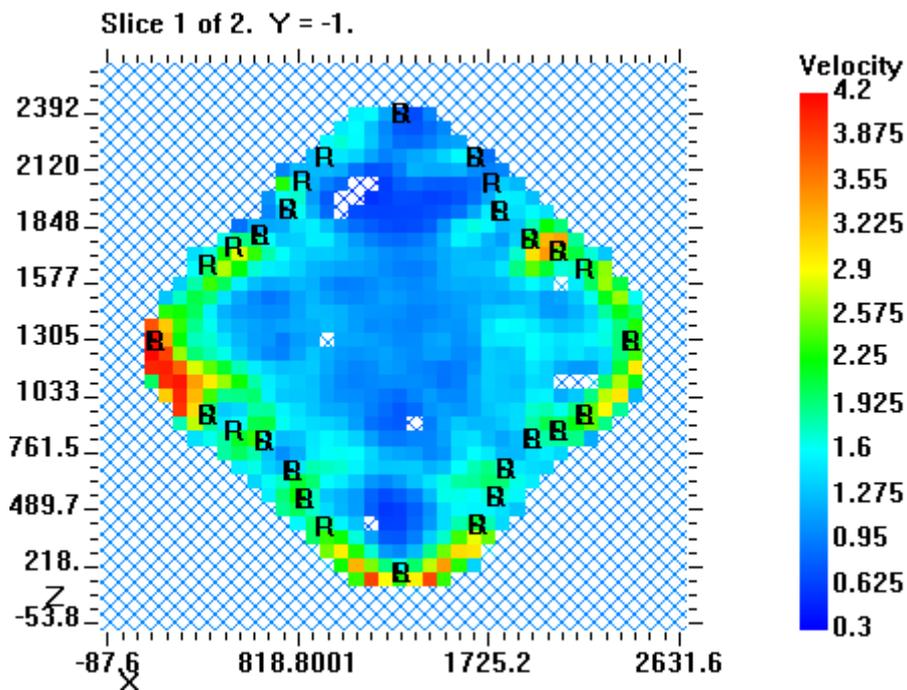


Fig. 10.12: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con smoothing 0,02 sulla griglia 34×34, 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

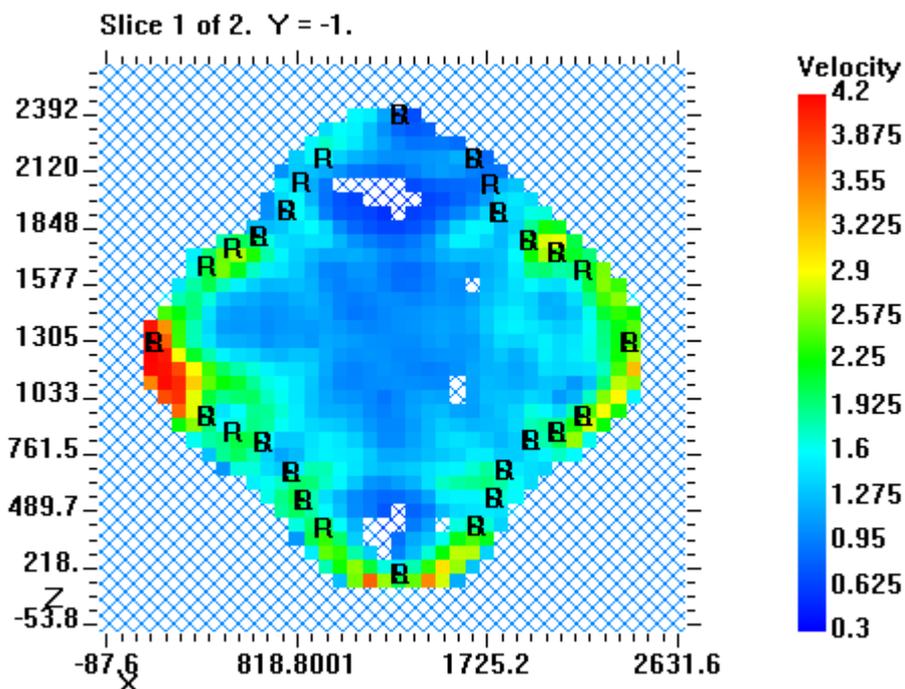


Fig. 10.13: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con smoothing 0,03 sulla griglia 34×34 , 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

Osservando le immagini prodotte si può notare che un valore di smoothing di 0,02 fornisce già un buon risultato senza forzare troppo la soluzione. Con smoothing 0,03 l'immagine risulta ancora più omogenea, però ci sono troppi pixels che non accolgono i raggi di proiezione. I grafici dei residui minimi confermano che lo smoothing non influisce significativamente sul residuo minimo (Fig. 10.14-10.17 e Tab. 10.3).

Tabella 10.3: Residui minimi dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

Smoothing	Residuo minimo (dopo iter. straight)	Residuo minimo (dopo iter. bending)
0	1,10 E+05	1,12 E+05
0,01	9,03 E+04	1,26 E+05
0,02	7,82 E+04	1,18 E+05
0,03	9,88 E+04	1,41 E+05

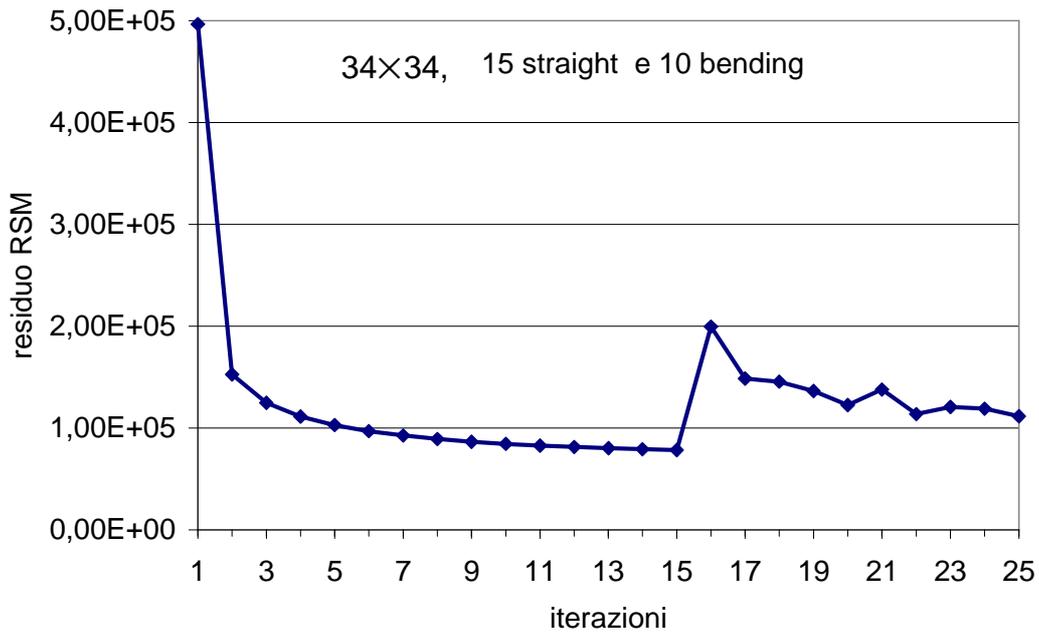


Fig. 10.14: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia da 34×34 pixels e smoothing nullo dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

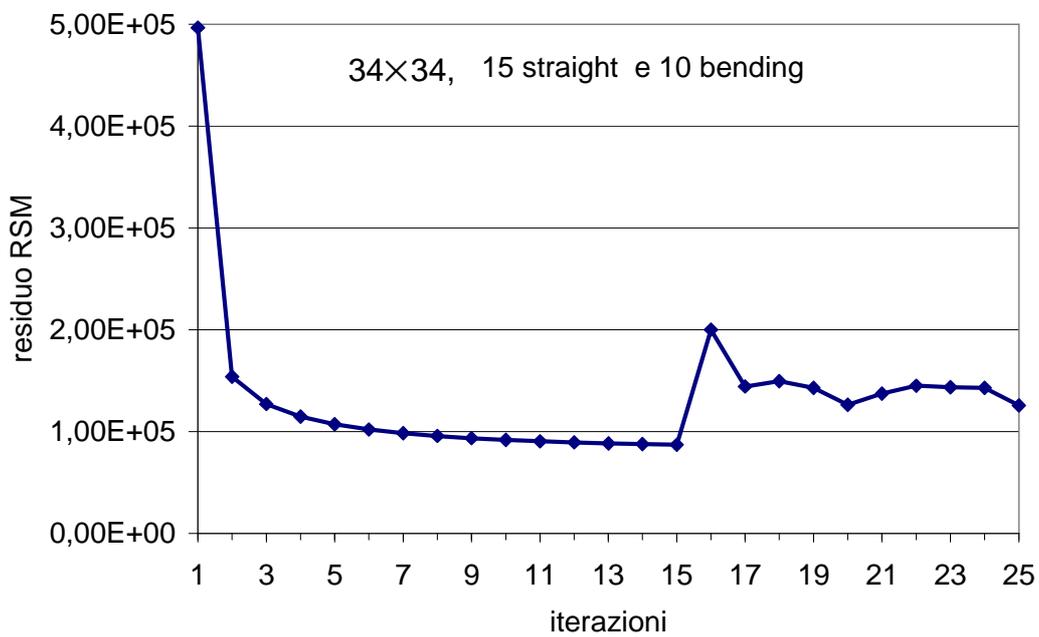


Fig. 10.15: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia da 34×34 pixels e smoothing 0,01 dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

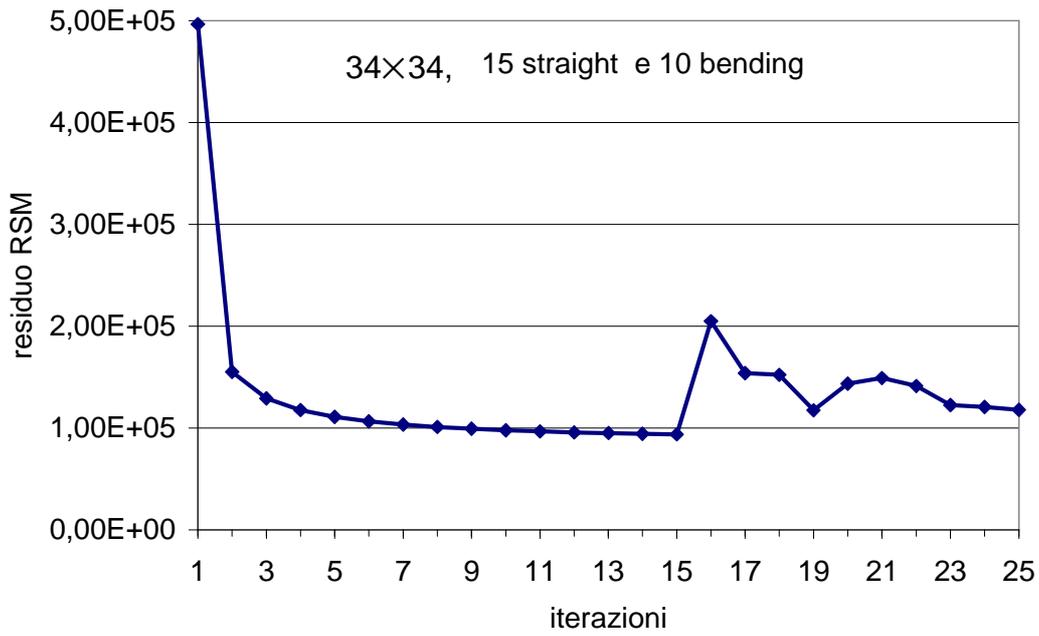


Fig. 10.16: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia da 34×34 pixels e smoothing 0,02 dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

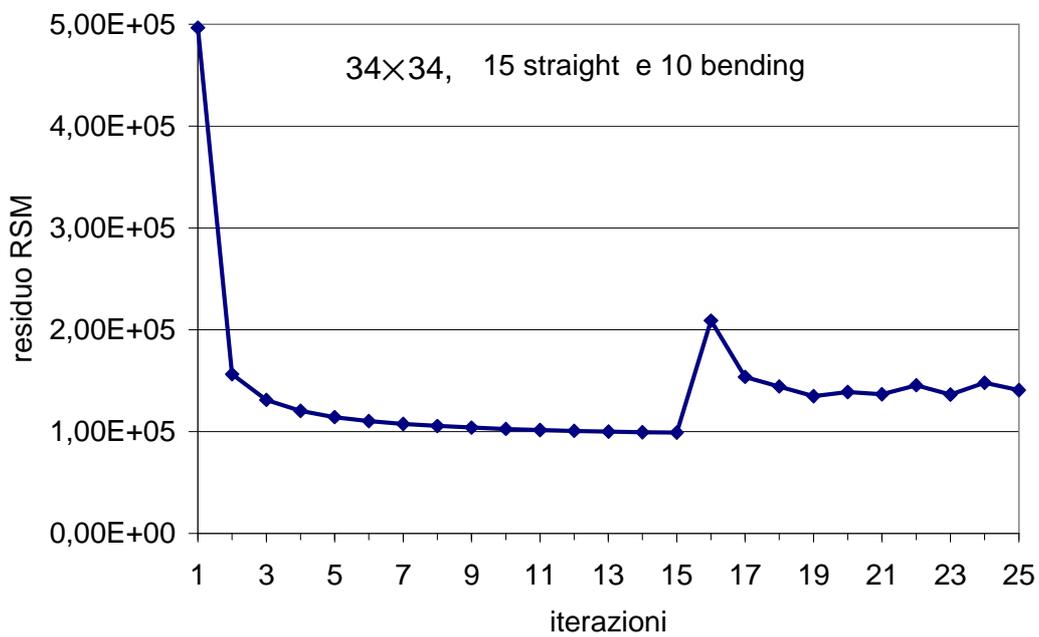


Fig. 10.17: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia da 34×34 pixels e smoothing 0,03 dopo 15 iterazioni straight e 10 bending.

Prova 3: scelta del numero di iterazioni

Sul modello iniziale con griglia 34×34 sono state condotte quattro analisi con un numero di iterazioni diverse:

- 15 straight e 10 bending,
- 5 straight e 30 bending,
- 5 straight e 50 bending,
- 5 straight e 33 bending.

Sono stati plottati i grafici dei residui per le quattro analisi per capire quale era il numero di iterazioni che dava il minore residuo minimo. La prima analisi (Fig. 10.18) ci mostra che troppe iterazioni straight sono superflue e che le iterazioni bending non sono ancora sufficienti per abbattere il residuo minimo. Quindi le straight sono state diminuite a 5, in quanto servono solo per alleggerire la computazione delle bending, mentre le bending sono state aumentate a 30 (Fig. 10.19). Da questo secondo grafico si nota che aumentando ancora le iterazioni bending il residuo minimo potrebbe diminuire ancora. Allora, mantenendo le straight a 5, sono state aumentate le bending fino a 50 iterazioni e si è visto che raggiunto il minimo dopo circa 38 iterazioni totali il residuo torna a salire (Fig. 10.20).

Tabella 10.3: Residui minimi con griglia 40×40 dopo diverse combinazioni di iterazioni.

N° di iterazioni	Residuo minimo
15 straight e 10 bending	1,12 E+05
5 straight e 30 bending	1,12 E+05
5 straight e 50 bending	1,30 E+05
5 straight e 33 bending	1,09 E+05

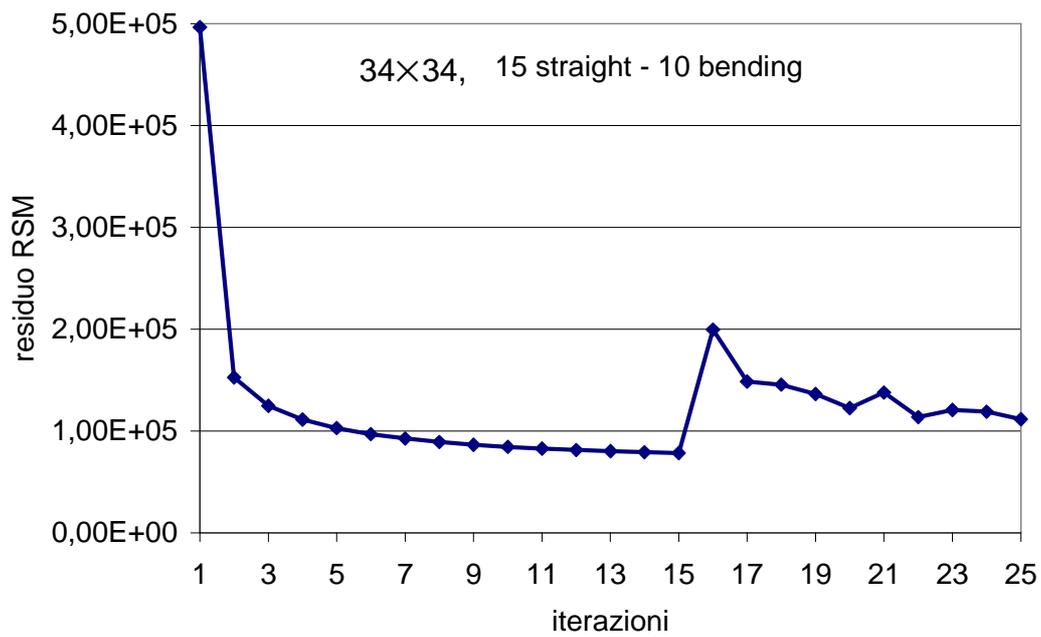


Fig. 10.18: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 15 iterazioni straight e 10 bending.

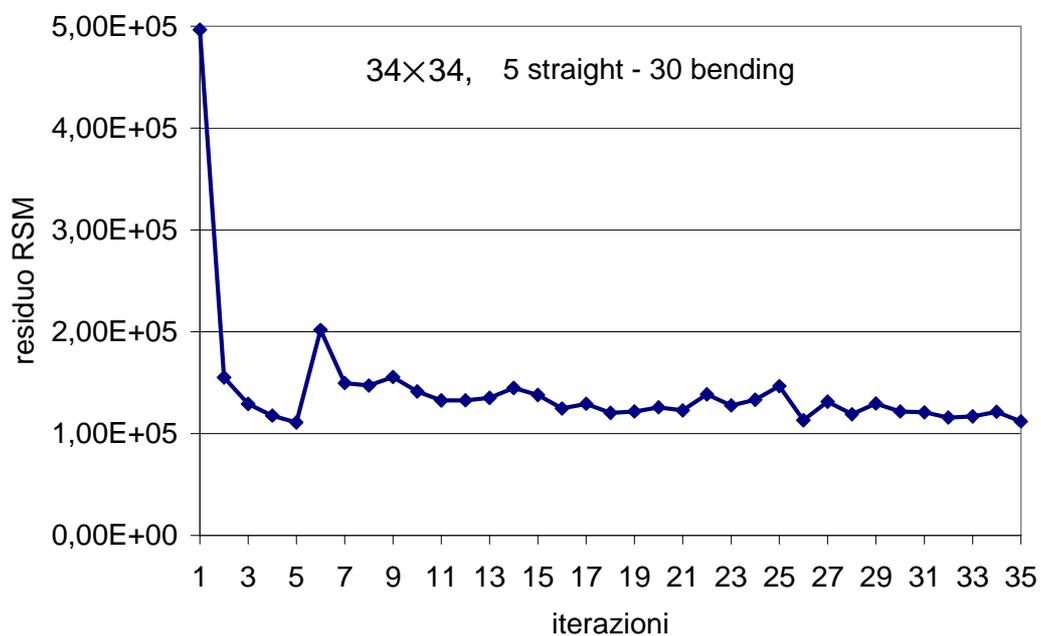


Fig. 10.19: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 30 bending.

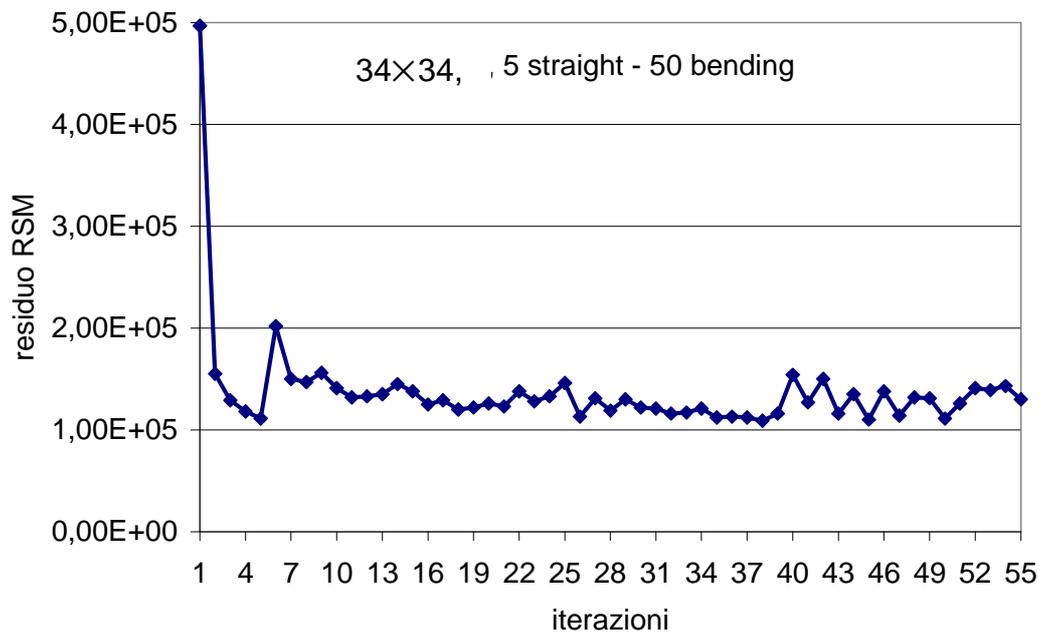


Fig. 10.20: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 50 bending.

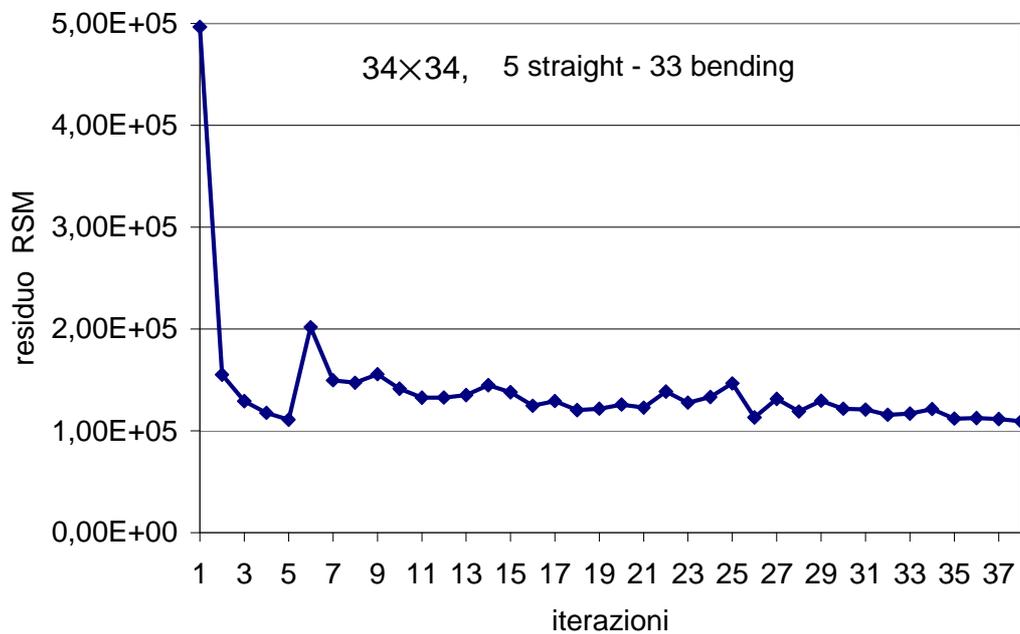


Fig. 10.21: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 33 bending.

Quindi il numero di iterazioni che fornisce la soluzione migliore sembrerebbe essere 5 iterazioni straight e 33 bending (Fig. 10.21), che rende il residuo minimo pari a $1,09E+05$ (Tab. 10.3). Dal punto di vista del confronto tra le mappature ottenute, si nota che le velocità sono distribuite più o meno allo stesso modo, cambiano solo le zone dove i pixel non accolgono i raggi di proiezione (Fig. 10.22-10.25). La mappatura con 5 iterazioni straight e 33 bending minimizza il residuo e fornisce un modello appropriato.

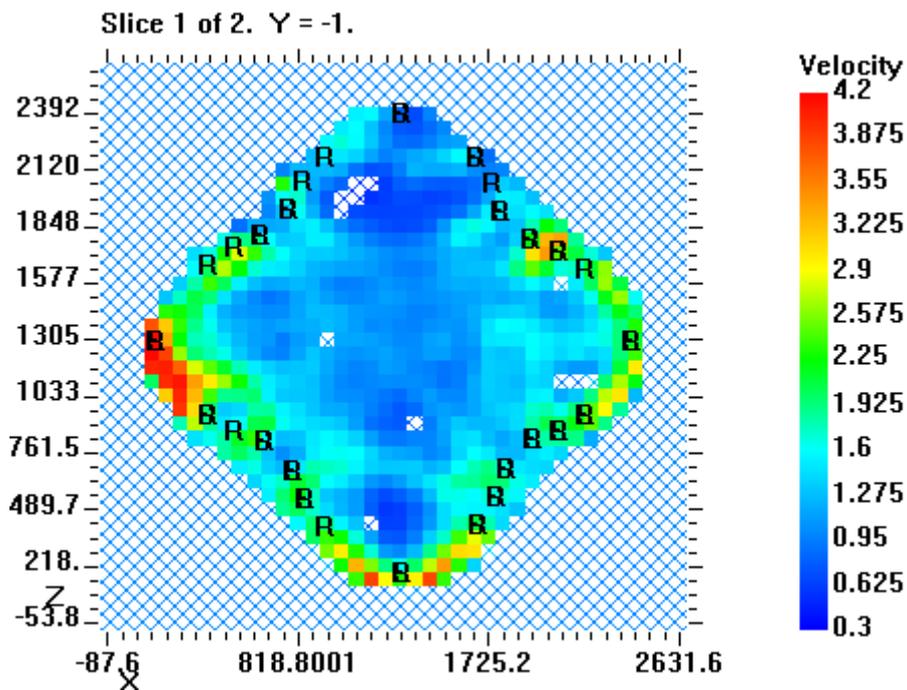


Fig. 10.22: Sezione a 45 cm, velocity model ottenuto con smoothing 0,02 sulla griglia 34×34 , 15 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

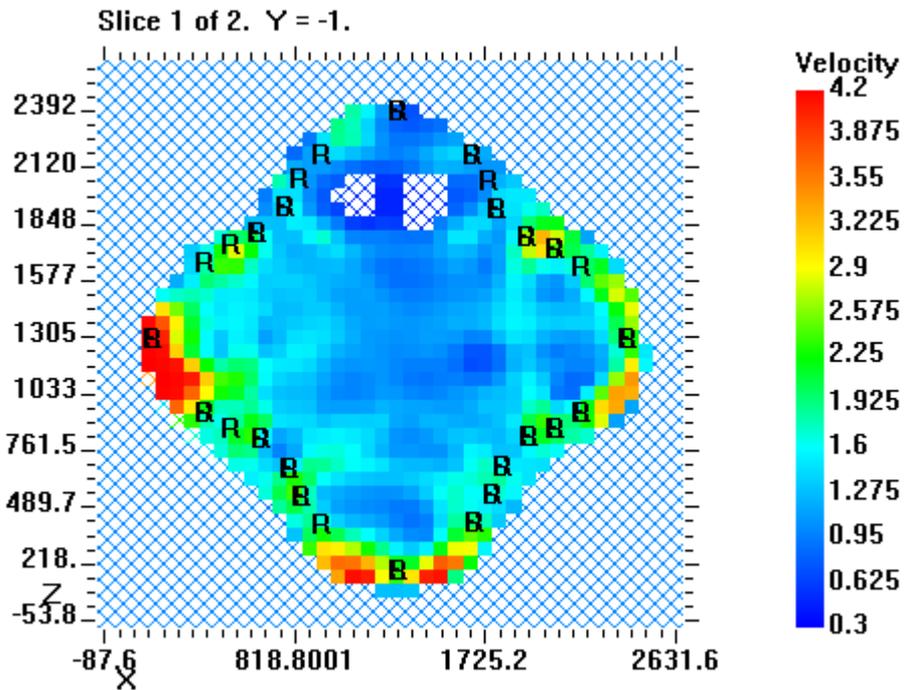


Fig. 10.23: Sezione a 45 cm, velocity model con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 iterazioni straight e 30 bending.

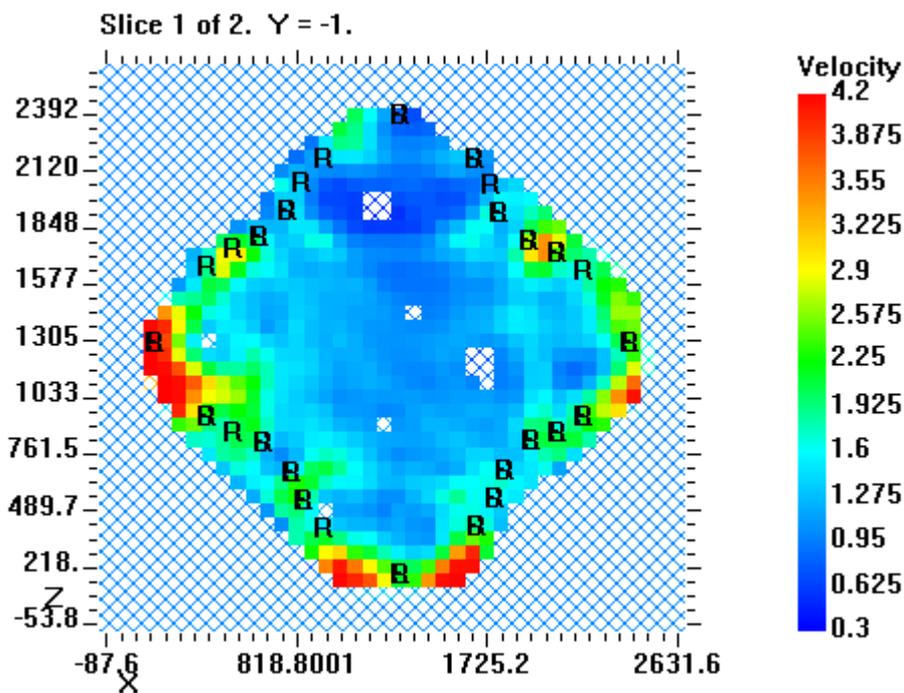


Fig. 10.24: Sezione a 45 cm, velocity model con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 iterazioni straight e 50 bending.

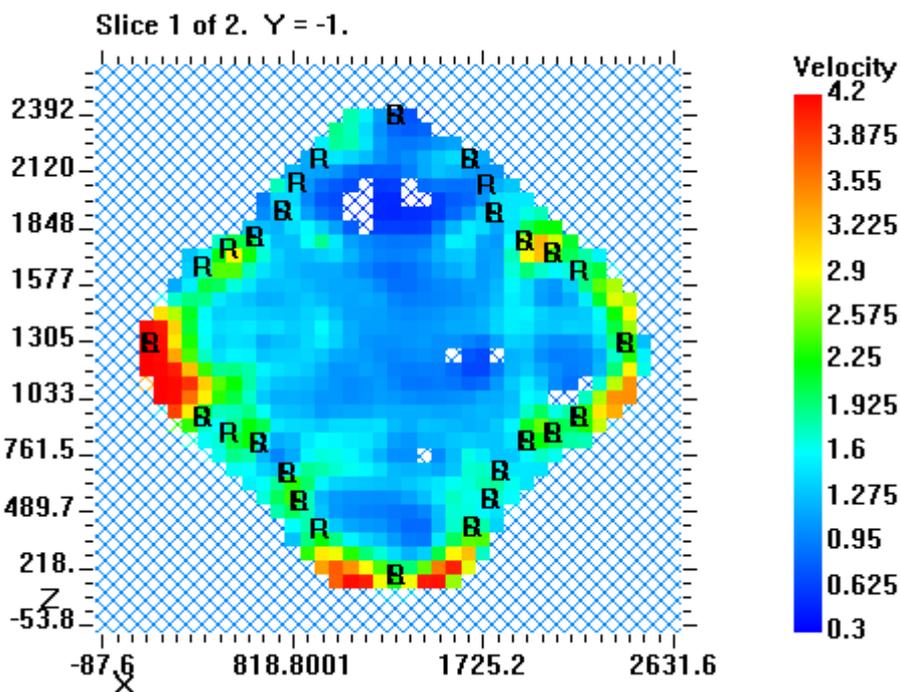


Fig. 10.25: Sezione a quota 45 cm: velocity model definitivo con griglia 34×34, smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 33 bending-ray iterations.

Restituzione tomografica dei tempi di volo (sezione a quota 45 cm)

Dalle prove di inversione effettuate è stato prodotto un modello finale per la sezione a quota 45 cm, in cui si riconoscono le zone più esterne in rosso con le velocità maggiori e il nucleo interno in blu con le velocità minori (Fig. 10.26). La zona Nord risulta differente dalle altre tre presentando velocità molto basse anche nella parte più esterna. Le velocità ottenute con l'inversione variano da circa 600 m/s a circa 4200 m/s. Le velocità ottenute dai tempi di volo invece hanno come valore minimo 786 m/s, come valore max 4135 m/s e come media 1513 m/s (cfr. Tab.8.8). Sulla mappa delle velocità è riportato anche il Raypaths, ovvero l'andamento dei raggi (Fig. 10.28). Il residuo minimo raggiunto ha valore 1,09 E+05 (Fig. 10.27).

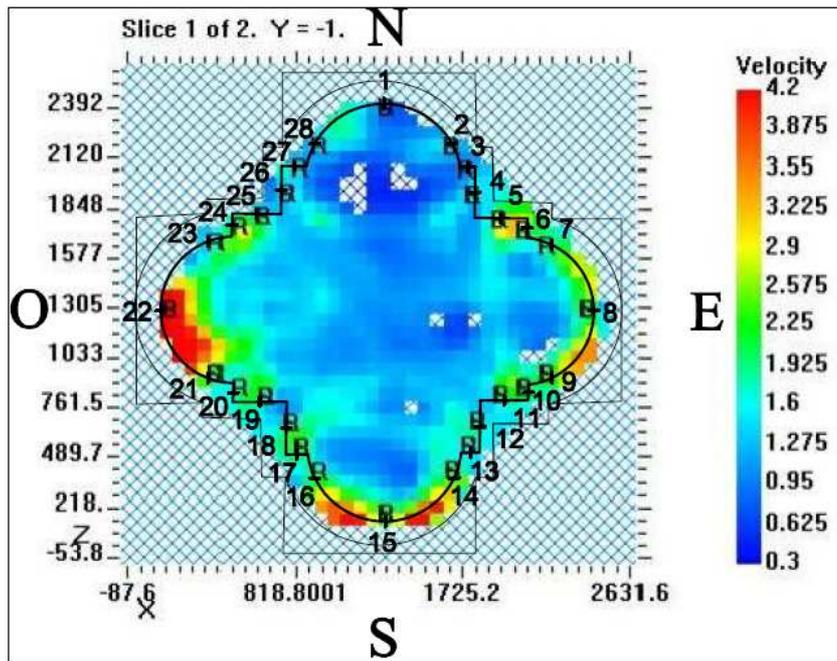


Fig. 10.26: Sezione a quota 45 cm: velocity model definitivo con griglia 34×34, smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 33 bending-ray iterations sovrapposto alla sezione del pilastro.

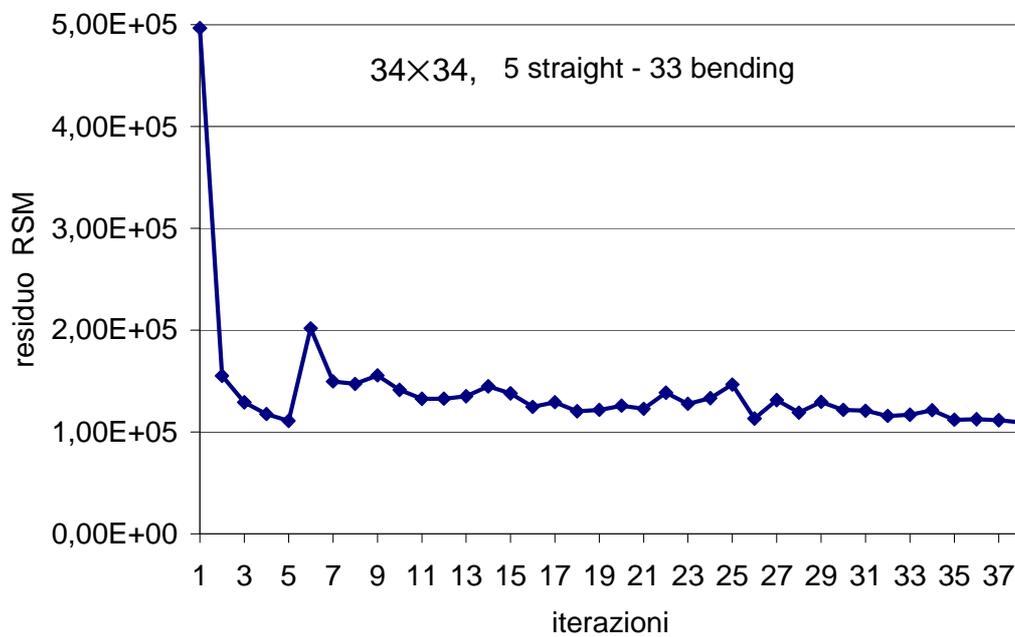


Fig. 10.27: Sezione a 45 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 33 bending.

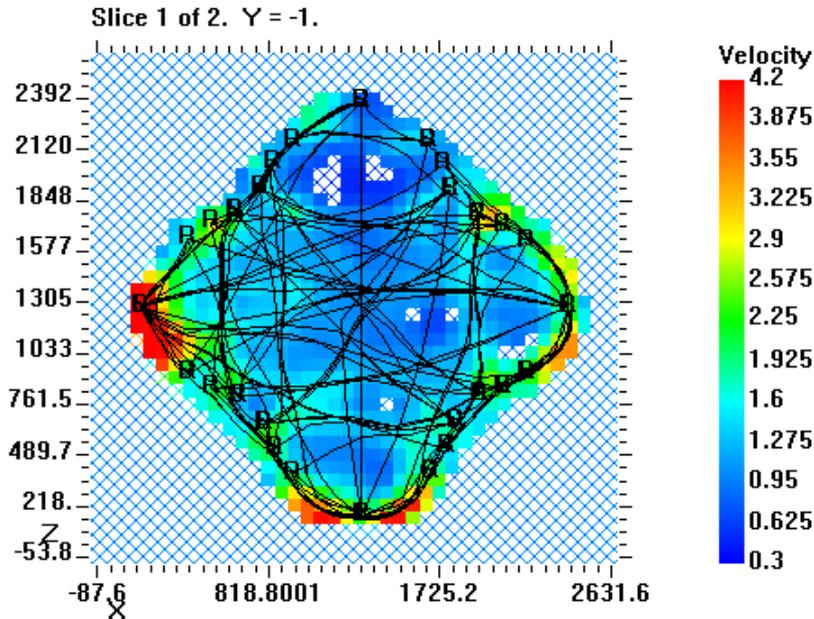


Fig. 10.28: Sezione a quota 45 cm: velocity model definitivo con raypaths con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 33 bending-ray iterations.

Restituzione tomografica delle attenuazioni della sezione a quota 45 cm

Dalle forme d'onda dei file acquisiti con le prove soniche è stato possibile calcolare anche l'ampiezza e l'attenuazione (espressa in decibel) per ogni coppia di onde (cfr Cap.7) tramite le seguenti formule:

$$\text{Ampiezza} = \frac{A_{\max} Rx}{A_{\max} Tx}$$

dove $A_{\max} Rx$ è l'ampiezza massima del segnale ricevuto (calcolato come differenza tra il secondo e il terzo picco dell'onda) e $A_{\max} Tx$ è l'ampiezza massima del segnale trasmesso,

$$A(dB) = 20 \log_{10} \frac{A_0}{A}$$

dove $A_0 = A_{\max} Tx$ e $A = A_{\max} Rx$.

In fase di rielaborazione dei dati non si è tenuto conto nel calcolo delle attenuazioni dell'amplificazione del segnale ricevuto.

Tabella 10.4: Ampiezze e attenuazione per le prove dirette della sezione a quota 45 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat0	10,00	0,020	0,031	0,011	0,0011	59,17
BinDirPilMurat1	9,98	0,025	0,040	0,015	0,0015	56,46
BinDirPilMurat2	9,99	0,025	0,045	0,020	0,0020	53,97
BinDirPilMurat3	9,98	0,023	0,017	0,006	0,0006	64,42
BinDirPilMurat4	9,99	0,018	0,015	0,003	0,0003	70,45
BinDirPilMurat5	9,98	0,073	0,072	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat6	9,98	0,077	0,071	0,006	0,0006	64,42
BinDirPilMurat7	10,03	0,091	0,104	0,013	0,0013	57,75
BinDirPilMurat8	10,00	0,087	0,112	0,025	0,0025	52,04
BinDirPilMurat9	9,98	0,033	0,022	0,011	0,0011	59,15
BinDirPilMurat10	10,04	0,014	0,030	0,016	0,0016	55,95
BinDirPilMurat11	9,99	0,082	0,031	0,051	0,0051	45,84
BinDirPilMurat12	10,01	0,260	0,045	0,215	0,0215	33,36
BinDirPilMurat13	10,00	0,036	0,031	0,005	0,0005	66,02
BinDirPilMurat14	10,00	0,164	0,052	0,112	0,0112	39,02
BinDirPilMurat15	9,99	0,076	0,075	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat16	9,98	0,028	0,036	0,008	0,0008	61,92
BinDirPilMurat17	10,00	0,135	0,017	0,118	0,0118	38,56
BinDirPilMurat18	9,99	0,253	0,352	0,099	0,0099	40,08

Tabella 10.5: Ampiezze e attenuazione per le prove semidirette della sezione a quota 45 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat19	9,98	0,520	0,364	0,156	0,0156	36,12
BinDirPilMurat20	9,98	0,114	0,089	0,025	0,0025	52,02
BinDirPilMurat21	9,99	0,019	0,022	0,003	0,0003	70,45
BinDirPilMurat22	9,99	0,013	0,012	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat23	9,99	0,028	0,022	0,006	0,0006	64,43
BinDirPilMurat24	10,00	0,009	0,012	0,003	0,0003	70,46
BinDirPilMurat25	9,99	0,003	0,010	0,007	0,0007	63,09
BinDirPilMurat26	10,02	0,178	0,450	0,272	0,0271	31,33
BinDirPilMurat27	10,02	0,108	0,357	0,249	0,0249	32,09

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

BinDirPilMurat28	9,98	0,015	0,012	0,003	0,0003	70,44
BinDirPilMurat29	9,97	0,050	0,032	0,018	0,0018	54,87
BinDirPilMurat30	9,99	0,003	0,014	0,011	0,0011	59,16
BinDirPilMurat31	9,99	0,015	0,018	0,003	0,0003	70,45
BinDirPilMurat32	10,02	0,022	0,025	0,003	0,0003	70,47
BinDirPilMurat33	9,99	0,020	0,015	0,005	0,0005	66,01
BinDirPilMurat34	9,98	0,011	0,016	0,005	0,0005	66,00
BinDirPilMurat35	9,98	0,014	0,013	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat36	10,01	0,014	0,010	0,004	0,0004	67,97
BinDirPilMurat37	9,99	0,019	0,020	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat38	9,98	0,028	0,026	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat39	9,98	0,018	0,025	0,007	0,0007	63,08
BinDirPilMurat40	9,99	0,008	0,009	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat41	9,97	0,020	0,034	0,014	0,0014	57,05
BinDirPilMurat42	9,98	0,054	0,049	0,005	0,0005	66,00
BinDirPilMurat43	9,98	0,073	0,039	0,034	0,0034	49,35
BinDirPilMurat44	9,95	0,036	0,018	0,018	0,0018	54,85
BinDirPilMurat45	9,97	0,236	0,274	0,038	0,0038	48,38
BinDirPilMurat46	9,98	0,233	0,457	0,224	0,0224	32,98
BinDirPilMurat47	9,96	0,279	0,799	0,520	0,0522	25,65
BinDirPilMurat48	9,97	0,469	0,419	0,050	0,0050	45,99
BinDirPilMurat49	9,98	0,067	0,042	0,025	0,0025	52,02
BinDirPilMurat50	9,98	0,062	0,052	0,010	0,0010	59,98
BinDirPilMurat51	9,99	0,051	0,052	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat52	9,99	0,017	0,007	0,010	0,0010	59,99
BinDirPilMurat53	9,99	0,009	0,003	0,006	0,0006	64,43
BinDirPilMurat54	9,98	0,014	0,012	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat55	9,98	0,008	0,005	0,003	0,0003	70,44
BinDirPilMurat56	9,98	0,015	0,011	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat57	9,98	0,006	0,008	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat58	9,98	0,013	0,014	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat59	9,98	0,012	0,007	0,005	0,0005	66,00
BinDirPilMurat60	9,98	0,008	0,001	0,007	0,0007	63,08
BinDirPilMurat61	9,98	0,025	0,050	0,025	0,0025	52,02
BinDirPilMurat62	9,98	0,048	0,050	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat63	9,98	0,063	0,021	0,042	0,0042	47,52
BinDirPilMurat64	9,99	0,301	0,331	0,030	0,0030	50,45
BinDirPilMurat65	9,99	1,018	1,052	0,034	0,0034	49,36
BinDirPilMurat66	9,98	0,057	0,063	0,006	0,0006	64,42

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

BinDirPilMurat67	9,99	0,026	0,043	0,017	0,0017	55,38
BinDirPilMurat68	9,99	0,063	0,043	0,020	0,0020	53,97
BinDirPilMurat69	9,99	0,012	0,011	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat70	9,99	0,026	0,027	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat71	9,98	0,017	0,012	0,005	0,0005	66,00
BinDirPilMurat72	9,99	0,001	0,009	0,008	0,0008	61,93
BinDirPilMurat73	9,99	0,036	0,058	0,022	0,0022	53,14
BinDirPilMurat74	9,99	0,027	0,008	0,019	0,0019	54,42
BinDirPilMurat75	9,98	0,006	0,010	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat76	9,99	0,021	0,016	0,005	0,0005	66,01
BinDirPilMurat77	9,99	0,009	0,011	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat78	10,01	0,030	0,028	0,002	0,0002	73,99
BinDirPilMurat79	9,99	0,010	0,016	0,006	0,0006	64,43
BinDirPilMurat80	9,98	0,035	0,039	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat81	9,98	0,017	0,007	0,010	0,0010	59,98
BinDirPilMurat82	9,98	0,366	0,280	0,086	0,0086	41,29
BinDirPilMurat83	9,98	0,703	0,331	0,372	0,0373	28,57
BinDirPilMurat84	9,97	1,085	0,949	0,136	0,0136	37,30
BinDirPilMurat85	9,95	0,195	0,173	0,022	0,0022	53,11
BinDirPilMurat86	9,96	0,059	0,076	0,017	0,0017	55,36

Tabella 10.6: Ampiezze e attenuazione per le prove passanti per il centro della sezione a quota 45 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat_bis96	9,98	0,010	0,009	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat_bis97	9,94	0,026	0,018	0,008	0,0008	61,89
BinDirPilMurat_bis98	9,95	0,020	0,012	0,008	0,0008	61,89
BinDirPilMurat_bis99	9,96	0,003	0,007	0,004	0,0004	67,92
BinDirPilMurat_bis100	10,00	0,011	0,008	0,003	0,0003	70,46
BinDirPilMurat_bis101	9,99	0,020	0,016	0,004	0,0004	67,95
BinDirPilMurat_bis102	9,99	0,018	0,010	0,008	0,0008	61,93
BinDirPilMurat_bis103	9,99	0,018	0,010	0,008	0,0008	61,93
BinDirPilMurat_bis104	10,00	0,007	0,014	0,007	0,0007	63,10
BinDirPilMurat_bis105	10,00	0,009	0,012	0,003	0,0003	70,46
BinDirPilMurat_bis106	10,00	0,033	0,019	0,014	0,0014	57,08
BinDirPilMurat_bis107	10,00	0,002	0,008	0,006	0,0006	64,44
BinDirPilMurat_bis108	9,99	0,006	0,012	0,006	0,0006	64,43

BinDirPilMurat_bis109	9,99	0,021	0,014	0,007	0,0007	63,09
BinDirPilMurat_bis110	10,00	0,018	0,019	0,001	0,0001	80,00
BinDirPilMurat_bis111	10,00	0,022	0,011	0,011	0,0011	59,17

Tramite il software GeoTom CG è possibile ottenere la distribuzione dell'attenuazione inserendo un corretto file di input in cui compaiono oltre ai tempi di volo i valori dell'attenuazione. Le prime 8 colonne del file di input sono le stesse già preparate per l'inversione dei tempi di volo alle quali si aggiunge un'ulteriore colonna con il valore dell'attenuazione calcolata come descritto in precedenza. La tabella Excel salvata come "testo formattato (delimitato da spazio)" deve essere rinominata con estensione .tam. Avviato il programma GeoTom CG, si clicca su Data/ Combined Real Amplitude e si sceglie il file di input preparato. Poi si procede nello stesso modo indicato per quanto riguarda l'inversione dei tempi di volo, con l'unica accortezza di utilizzare solo iterazioni straight per questa inversione. Si ottiene una mappa che rappresenta l'attenuazione espressa come $1/\alpha$ dove α è il coefficiente di attenuazione. Ci si aspetta che l'attenuazione sia maggiore dove la velocità ha i valori più bassi (Fig.10.29).

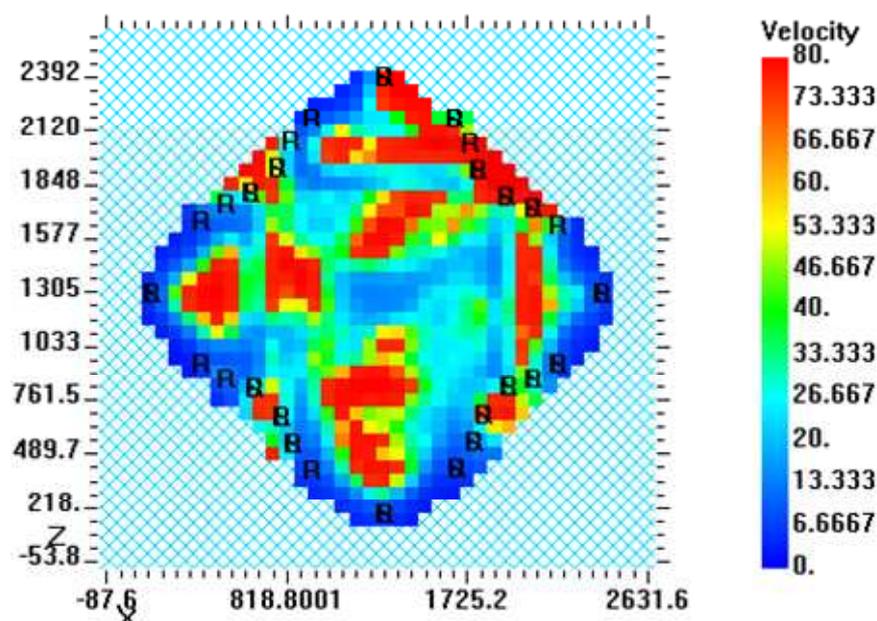


Fig. 10.29: Sezione a quota 45 cm: mappa dell'attenuazione con griglia 34×34, smoothing 0,02, 20 straight-ray iterations.

Prove effettuate per la sezione a quota 142 cm

I percorsi utilizzati per l'inversione tomografica in questa sezione erano completi, incluso il ventaglio acquisito con centro in Nord (cfr. Cap. 8, Tab. 8.11 – 8.13 e Fig.10.30). La velocità massima calcolata dai tempi di volo è pari a 2517 m/s, dunque si è considerato un intervallo di velocità da 300 a 2600 m/s.

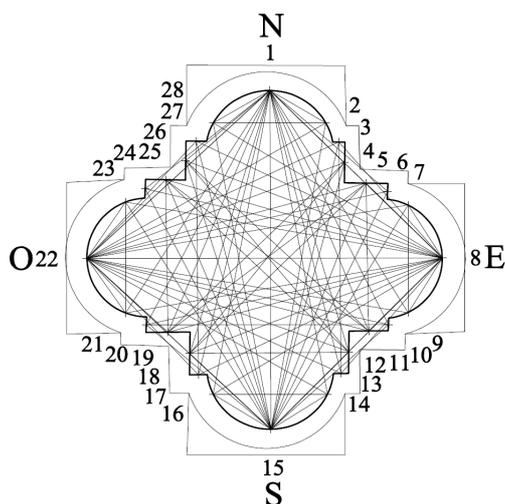


Fig. 10.30: Totale dei percorsi ideali utilizzati per le inversioni dei tempi di volo.

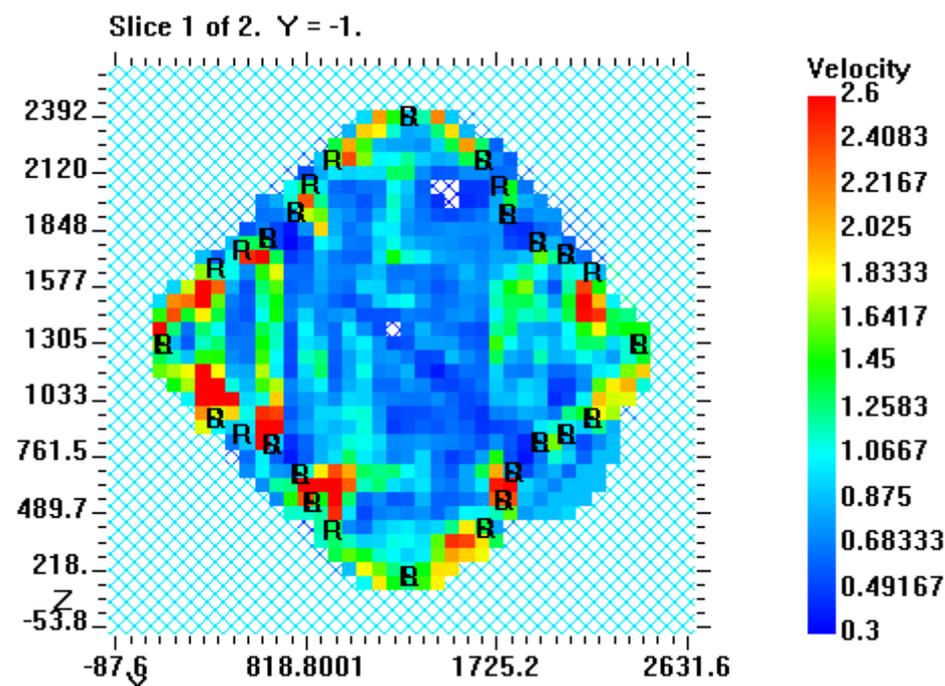


Fig. 10.31: Sezione a quota 142 cm: velocity model con griglia 34×34, smoothing nullo, 15 straight-ray iterations e 10 bending-ray iterations.

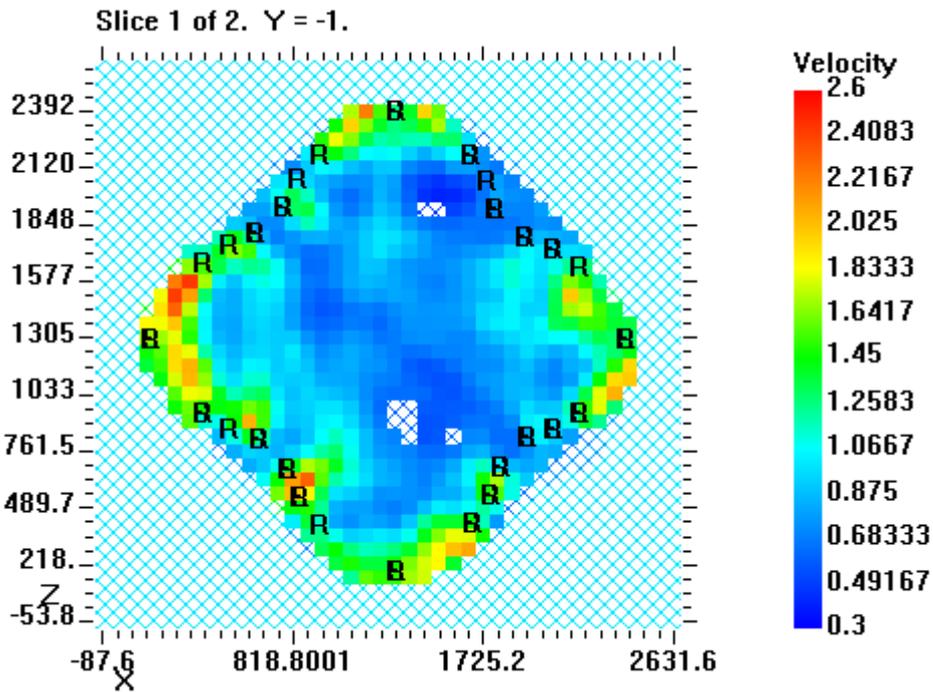


Fig. 10.32: Sezione a quota 142 cm: velocity model con griglia 34×34, smoothing 0,02, 15 straight-ray iterations e 10 bending-ray iterations.

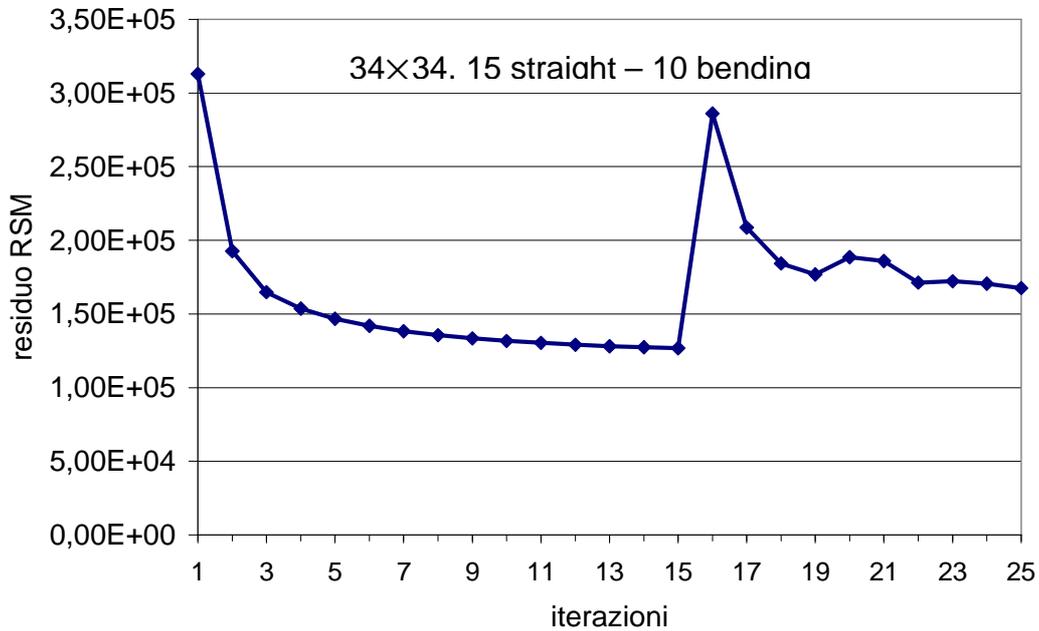


Fig. 10.33: Sezione a 142 cm, andamento dei residui con griglia 34×34, 15 iterazioni straight e 10 bending.

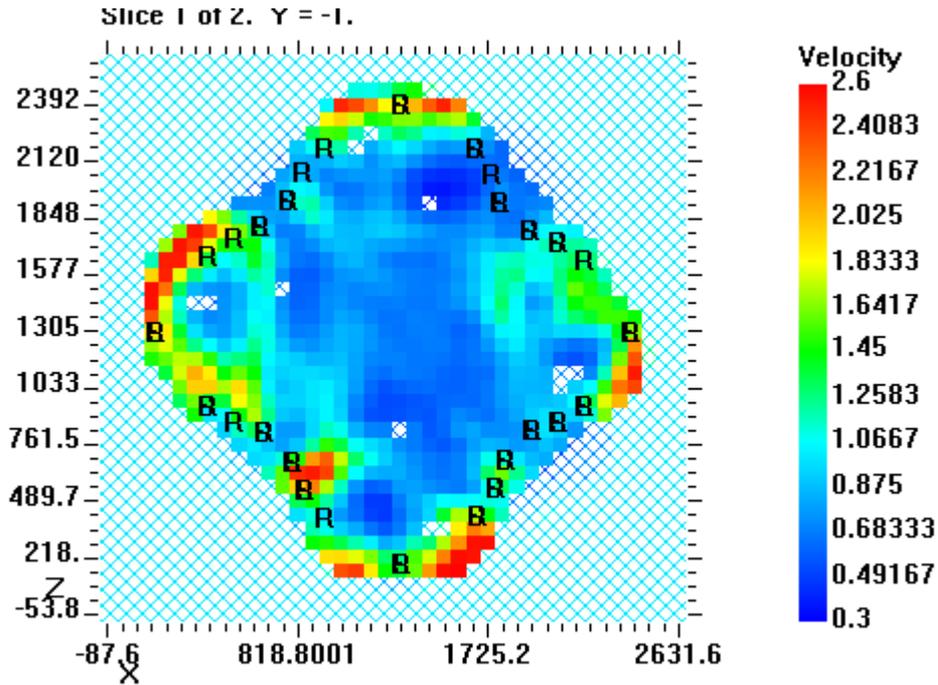


Fig. 10.34: Sezione a quota 142 cm: velocity model con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 50 bending-ray iterations.

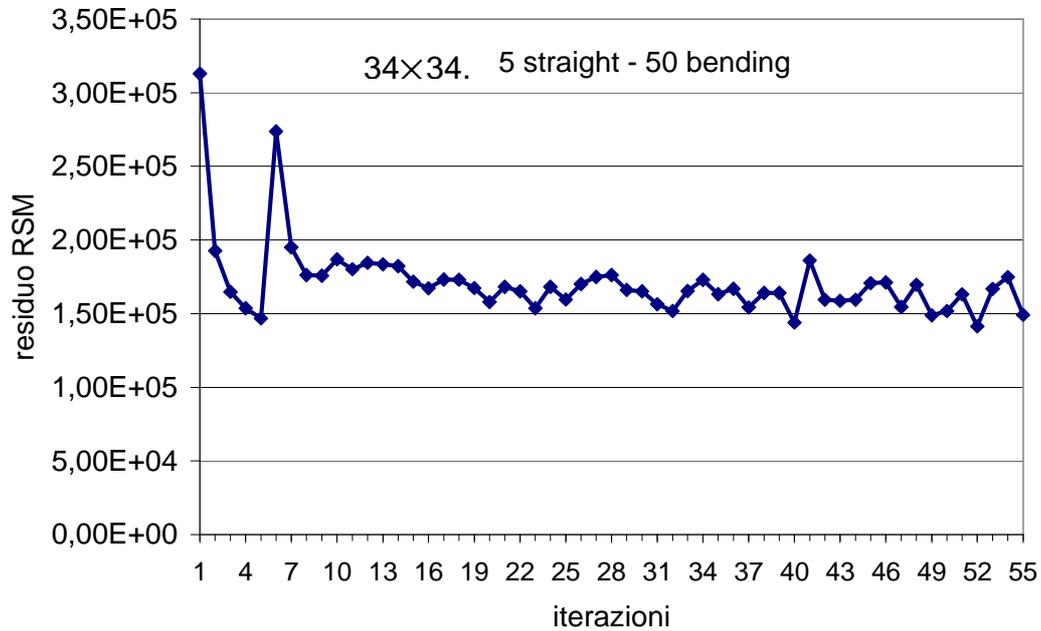


Fig. 10.35: Sezione a 142 cm, andamento dei residui con griglia 34×34 , 5 iterazioni straight e 50 bending.

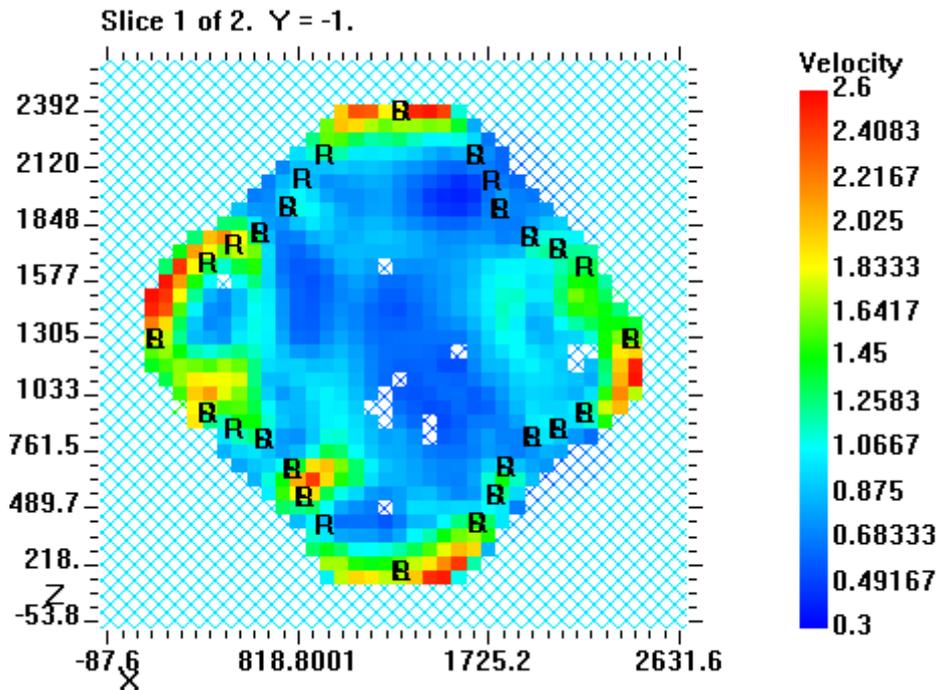


Fig. 10.36: Sezione a quota 142 cm: velocity model con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 35 bending-ray iterations.

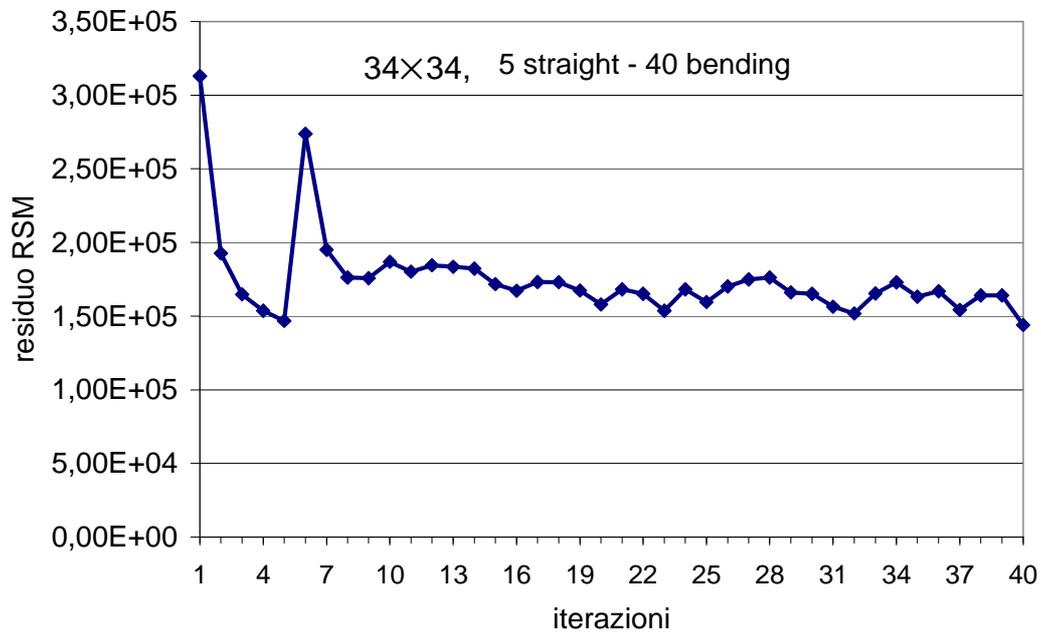


Fig. 10.37: Sezione a 142 cm, andamento dei residui con griglia 34×34 , 5 iterazioni straight e 35 bending.

Tabella 10.7: Residui minimi con griglia 34×34 dopo diverse combinazioni di iterazioni.

N° di iterazioni	Residuo minimo
15 straight e 10 bending	1,68 E+05
5 straight e 50 bending	1,49 E+05
5 straight e 35 bending	1,44 E+05

Il numero di iterazioni che fornisce il residuo minimo in questo caso è 5 iterazioni straight e 35 bending (Tabella 10.7).

Restituzione tomografica dei tempi di volo (sezione a quota 142 cm)

Per confrontare le velocità e quindi le caratteristiche delle due sezioni in modo immediato, è stata cambiata la scala delle velocità, utilizzando la stessa del caso della sezione a quota 45 cm (300 – 4200 m/s). Le velocità ottenute con la nuova inversione variano ora da circa 450 m/s a circa 3300 m/s. Le velocità ottenute dai tempi di volo invece hanno come valore minimo 625 m/s, come valore max 2517 m/s e come media 1049 m/s.

La sezione a quota 142 cm ha una differenza meno marcata di velocità tra l'esterno ed il nucleo rispetto alla sezione a quota 45 cm e in generale ha velocità più basse su tutta la sezione e quindi caratteristiche meccaniche peggiori (Fig. 10.41).

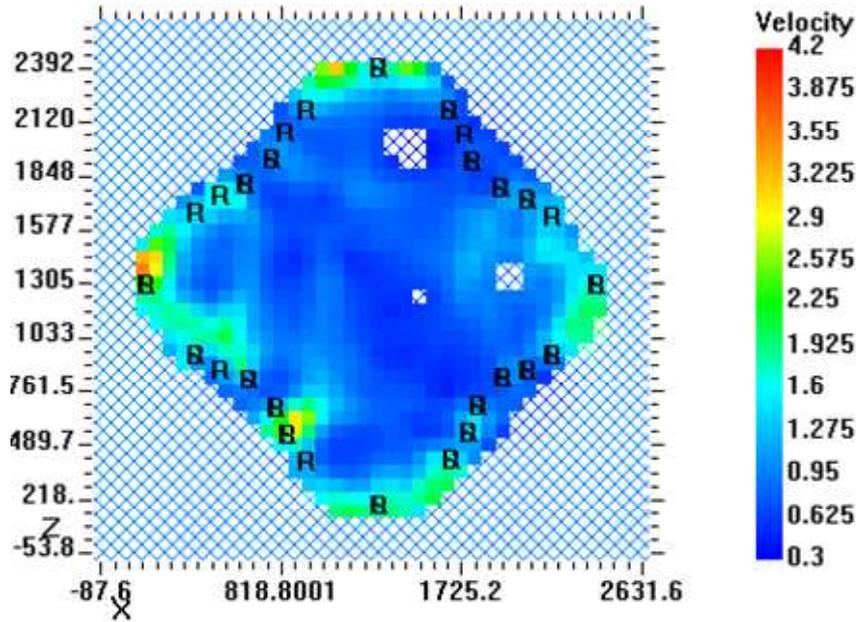


Fig. 10.38: Sezione a quota 142 cm: velocity model con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 35 bending-ray iterations con massimo della scala delle velocità 4200 m/s.

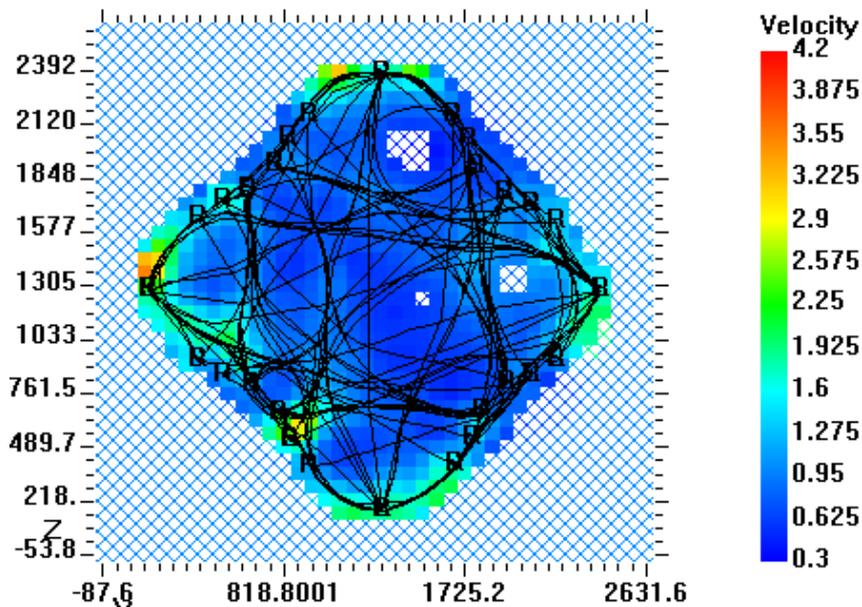


Fig. 10.39: Sezione a quota 142 cm: velocity model con raypaths con griglia 34×34 , smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 35 bending-ray iterations.

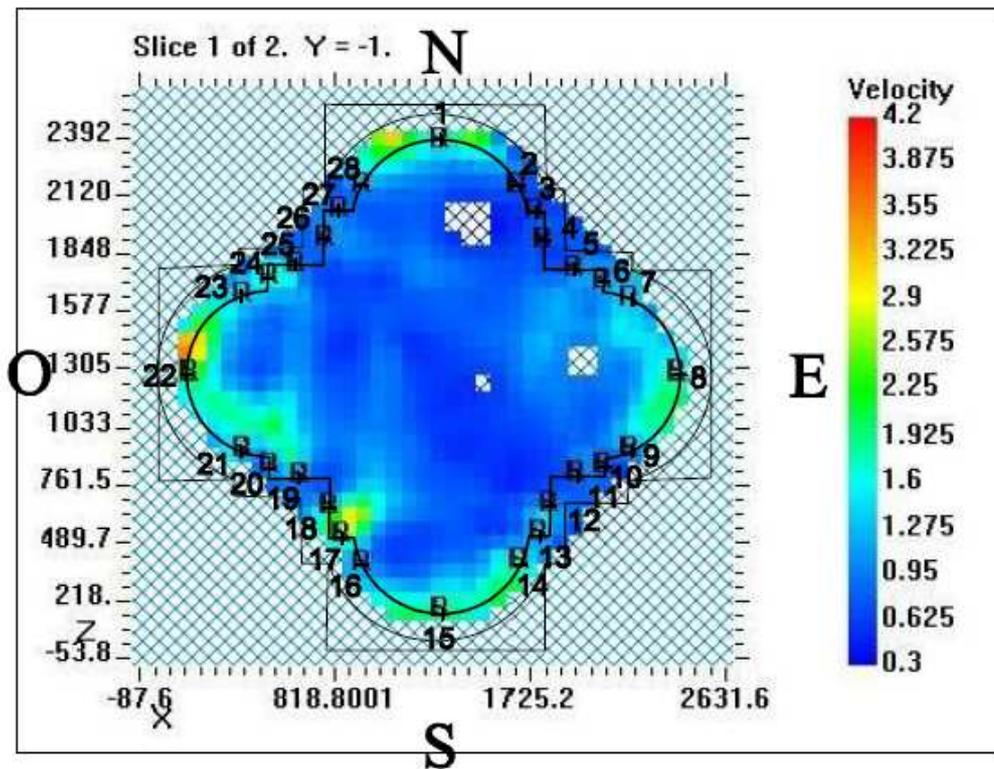


Fig. 10.40: Sezione a quota 142 cm: velocity model definitivo con griglia 34×34, smoothing 0,02, 5 straight-ray iterations e 35 bending-ray iterations sovrapposto alla sezione del pilastro.

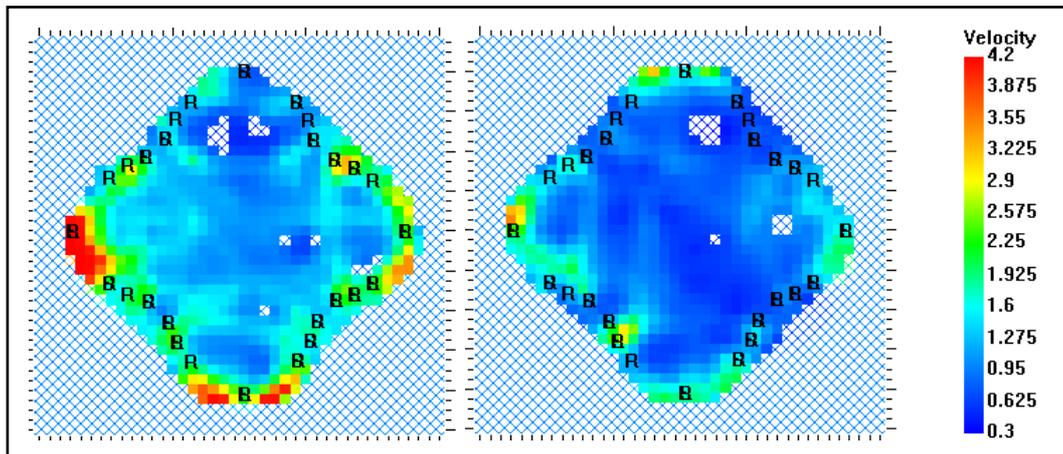


Fig. 10.41: Confronto tra il velocity model della sezione a quota 45 (a sinistra) cm con quello a quota 142 cm (a destra).

Restituzione tomografica delle attenuazioni della sezione a quota 142 cm

Tabella 10.8: Ampiezze e attenuazione per le prove dirette della sezione a quota 142 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat_bis0	10,05	0,031	0,026	0,005	0,0005	66,06
BinDirPilMurat_bis1	10,01	0,026	0,022	0,004	0,0004	67,97
BinDirPilMurat_bis2	9,95	0,023	0,021	0,002	0,0002	73,94
BinDirPilMurat_bis3	9,99	0,187	0,011	0,176	0,0176	35,08
BinDirPilMurat_bis4	9,98	0,039	0,035	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat_bis5	10,00	0,017	0,025	0,008	0,0008	61,94
BinDirPilMurat_bis6	9,99	0,014	0,012	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis7	10,06	0,054	0,095	0,041	0,0041	47,80
BinDirPilMurat_bis8	10,01	0,363	0,368	0,005	0,0005	66,03
BinDirPilMurat_bis9	10,00	0,232	0,036	0,196	0,0196	34,15
BinDirPilMurat_bis10	9,99	0,028	0,040	0,012	0,0012	58,41
BinDirPilMurat_bis11	10,00	0,019	0,025	0,006	0,0006	64,44
BinDirPilMurat_bis12	9,97	0,036	0,022	0,014	0,0014	57,05
BinDirPilMurat_bis13	10,01	0,072	0,105	0,033	0,0033	49,64
BinDirPilMurat_bis14	9,99	0,438	0,439	0,001	0,0001	79,99

Tabella 10.9: Ampiezze e attenuazione per le prove semidirette della sezione a quota 142 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat_bis15	10,12	0,396	0,736	0,340	0,0336	29,47
BinDirPilMurat_bis16	9,99	0,014	0,061	0,047	0,0047	46,55
BinDirPilMurat_bis17	10,03	0,016	0,020	0,004	0,0004	67,98
BinDirPilMurat_bis18	9,99	0,010	0,012	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis19	9,97	0,031	0,025	0,006	0,0006	64,41
BinDirPilMurat_bis20	9,97	0,025	0,019	0,006	0,0006	64,41
BinDirPilMurat_bis21	10,02	0,021	0,036	0,015	0,0015	56,50
BinDirPilMurat_bis22	10,02	0,010	0,007	0,003	0,0003	70,47

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

BinDirPilMurat_bis23	10,01	0,027	0,032	0,005	0,0005	66,03
BinDirPilMurat_bis24	10,02	0,032	0,040	0,008	0,0008	61,96
BinDirPilMurat_bis25	11,19	0,021	0,027	0,006	0,0005	65,41
BinDirPilMurat_bis26	10,48	0,026	0,024	0,002	0,0002	74,39
BinDirPilMurat_bis27	10,08	0,039	0,020	0,019	0,0019	54,49
BinDirPilMurat_bis28	9,99	0,028	0,048	0,020	0,0020	53,97
BinDirPilMurat_bis29	9,98	0,040	0,022	0,018	0,0018	54,88
BinDirPilMurat_bis30	9,98	0,017	0,021	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat_bis31	9,98	0,013	0,012	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat_bis32	9,99	0,018	0,020	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis33	10,00	0,130	0,279	0,149	0,0149	36,54
BinDirPilMurat_bis34	9,99	0,323	0,809	0,486	0,0486	26,26
BinDirPilMurat_bis35	10,02	1,165	0,667	0,498	0,0497	26,07
BinDirPilMurat_bis36	10,00	0,180	0,161	0,019	0,0019	54,42
BinDirPilMurat_bis37	9,99	0,024	0,016	0,008	0,0008	61,93
BinDirPilMurat_bis38	9,98	0,010	0,018	0,008	0,0008	61,92
BinDirPilMurat_bis39	9,99	0,007	0,025	0,018	0,0018	54,89
BinDirPilMurat_bis40	10,04	0,010	0,015	0,005	0,0005	66,06
BinDirPilMurat_bis41	9,98	0,016	0,012	0,004	0,0004	67,94
BinDirPilMurat_bis42	9,97	0,166	0,420	0,254	0,0255	31,88
BinDirPilMurat_bis43	9,97	0,131	0,254	0,123	0,0123	38,18
BinDirPilMurat_bis44	9,98	0,043	0,040	0,003	0,0003	70,44
BinDirPilMurat_bis45	9,99	0,013	0,015	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis46	9,90	0,006	0,009	0,003	0,0003	70,37
BinDirPilMurat_bis47	9,90	0,023	0,022	0,001	0,0001	79,91
BinDirPilMurat_bis48	9,95	0,014	0,022	0,008	0,0008	61,89
BinDirPilMurat_bis49	9,98	0,013	0,021	0,008	0,0008	61,92
BinDirPilMurat_bis50	9,99	0,019	0,018	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat_bis51	10,00	0,009	0,008	0,001	0,0001	80,00
BinDirPilMurat_bis52	10,01	0,029	0,001	0,028	0,0028	51,07
BinDirPilMurat_bis53	10,01	0,010	0,016	0,006	0,0006	64,45
BinDirPilMurat_bis54	9,99	0,013	0,021	0,008	0,0008	61,93
BinDirPilMurat_bis55	9,99	0,007	0,008	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat_bis56	9,98	0,008	0,010	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat_bis57	10,11	0,006	0,010	0,004	0,0004	68,05
BinDirPilMurat_bis58	10,05	0,016	0,001	0,015	0,0015	56,52
BinDirPilMurat_bis59	9,92	0,009	0,013	0,004	0,0004	67,89
BinDirPilMurat_bis60	9,97	0,010	0,017	0,007	0,0007	63,07
BinDirPilMurat_bis61	9,99	0,020	0,024	0,004	0,0004	67,95

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

BinDirPilMurat_bis62	9,96	0,022	0,023	0,001	0,0001	79,97
BinDirPilMurat_bis63	9,98	0,009	0,029	0,020	0,0020	53,96
BinDirPilMurat_bis64	9,99	0,007	0,022	0,015	0,0015	56,47
BinDirPilMurat_bis65	9,99	0,678	0,837	0,159	0,0159	35,96
BinDirPilMurat_bis66	9,99	1,296	1,243	0,053	0,0053	45,51
BinDirPilMurat_bis67	9,99	0,091	0,085	0,006	0,0006	64,43
BinDirPilMurat_bis68	9,99	0,069	0,051	0,018	0,0018	54,89
BinDirPilMurat_bis69	9,99	0,013	0,011	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis70	13,10	0,008	0,010	0,002	0,0002	76,32
BinDirPilMurat_bis71	11,24	0,021	0,016	0,005	0,0004	67,04
BinDirPilMurat_bis72	10,47	0,009	0,019	0,010	0,0010	60,40
BinDirPilMurat_bis73	10,07	0,019	0,015	0,004	0,0004	68,02
BinDirPilMurat_bis74	9,97	0,027	0,021	0,006	0,0006	64,41
BinDirPilMurat_bis75	10,01	0,016	0,017	0,001	0,0001	80,01
BinDirPilMurat_bis76	9,97	0,007	0,009	0,002	0,0002	73,95
BinDirPilMurat_bis77	10,03	0,014	0,019	0,005	0,0005	66,05
BinDirPilMurat_bis78	10,00	0,020	0,015	0,005	0,0005	66,02
BinDirPilMurat_bis79	9,98	0,018	0,023	0,005	0,0005	66,00
BinDirPilMurat_bis80	9,98	0,008	0,010	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat_bis81	9,98	0,020	0,022	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat_bis82	9,98	0,010	0,012	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat_bis83	9,98	0,012	0,011	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat_bis84	9,99	0,023	0,035	0,012	0,0012	58,41
BinDirPilMurat_bis85	9,98	0,029	0,013	0,016	0,0016	55,90
BinDirPilMurat_bis86	9,98	0,042	0,043	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat_bis87	9,98	0,019	0,027	0,008	0,0008	61,92
BinDirPilMurat_bis88	9,98	0,011	0,020	0,009	0,0009	60,90
BinDirPilMurat_bis89	9,98	0,024	0,022	0,002	0,0002	73,96
BinDirPilMurat_bis90	9,93	0,049	0,078	0,029	0,0029	50,69
BinDirPilMurat_bis91	9,85	0,163	0,374	0,211	0,0214	33,38
BinDirPilMurat_bis92	9,84	2,020	1,933	0,087	0,0088	41,07
BinDirPilMurat_bis93	9,95	0,334	0,487	0,153	0,0154	36,26
BinDirPilMurat_bis94	9,95	0,094	0,070	0,024	0,0024	52,35
BinDirPilMurat_bis95	9,96	0,038	0,071	0,033	0,0033	49,59

Tabella 10.10: Ampiezze e attenuazione per le prove passanti per il centro della sezione a quota 142 cm.

Nome File	A_{\max} Tx (A_0)	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx (A)	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BinDirPilMurat_bis112	10,00	0,011	0,010	0,001	0,0001	80,00
BinDirPilMurat_bis113	9,99	0,013	0,015	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis114	9,98	0,012	0,009	0,003	0,0003	70,44
BinDirPilMurat_bis115	9,98	0,016	0,015	0,001	0,0001	79,98
BinDirPilMurat_bis116	9,99	0,011	0,010	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat_bis117	10,00	0,009	0,011	0,002	0,0002	73,98
BinDirPilMurat_bis118	9,99	0,019	0,014	0,005	0,0005	66,01
BinDirPilMurat_bis119	9,97	0,016	0,015	0,001	0,0001	79,97
BinDirPilMurat_bis120	9,99	0,007	0,009	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis121	9,99	0,004	0,003	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat_bis122	9,99	0,006	0,003	0,003	0,0003	70,45
BinDirPilMurat_bis123	9,99	0,008	0,006	0,002	0,0002	73,97
BinDirPilMurat_bis124	10,01	0,007	0,011	0,004	0,0004	67,97
BinDirPilMurat_bis125	10,00	0,022	0,020	0,002	0,0002	73,98
BinDirPilMurat_bis126	9,99	0,027	0,028	0,001	0,0001	79,99
BinDirPilMurat_bis127	9,99	0,013	0,014	0,001	0,0001	79,99

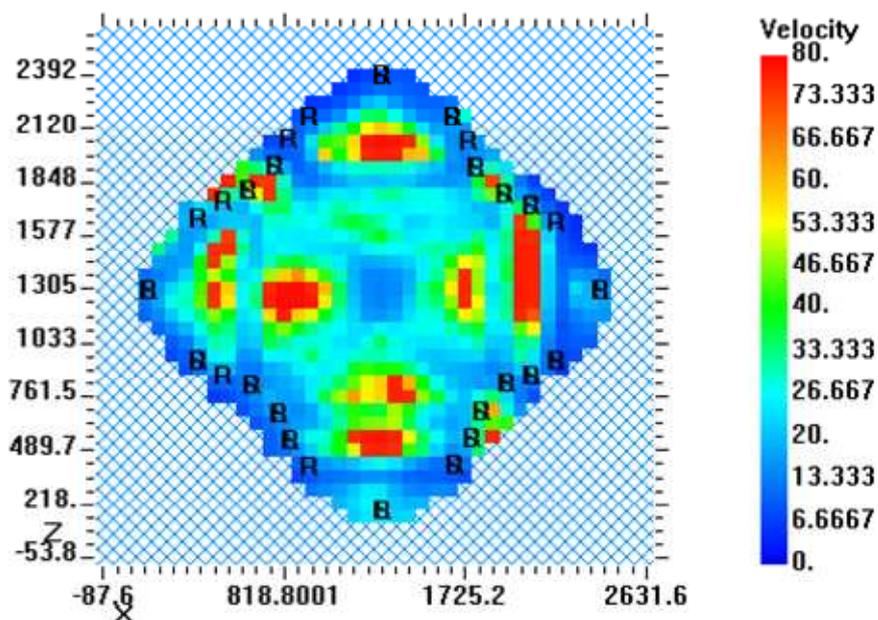


Fig. 10.42: Sezione a quota 142 cm: mappa dell'attenuazione con griglia 34×34, smoothing 0,02, 20 straight-ray iterations.

Tomografia sonica di un pilastro della Ghirlandina

La tomografia sonica è stata applicata anche ad un pilastro interno in muratura della Ghirlandina di Modena, sul quale erano già state eseguite prove soniche. Il pilastro in questione, di sezione quasi quadrata 78×82 cm, è quello nell'angolo N-E del fusto della torre, e la sezione tomografica considerata è posta circa a quota 1,6 m dal pavimento della base del fusto (Fig. 10.43). Per l'analisi tomografica sono stati utilizzati solo i dati relativi alle prove in trasmissione diretta che erano sufficienti per creare una buona griglia. Le sorgenti erano poste nel lato EC in 38 punti distanti 2 cm l'uno dall'altro e nel lato NC in 36 punti, sempre distanti 2 cm.



Fig. 10.43: Pilastro interno in muratura nell'angolo N-E del fusto della torre a quota 9,62 m.

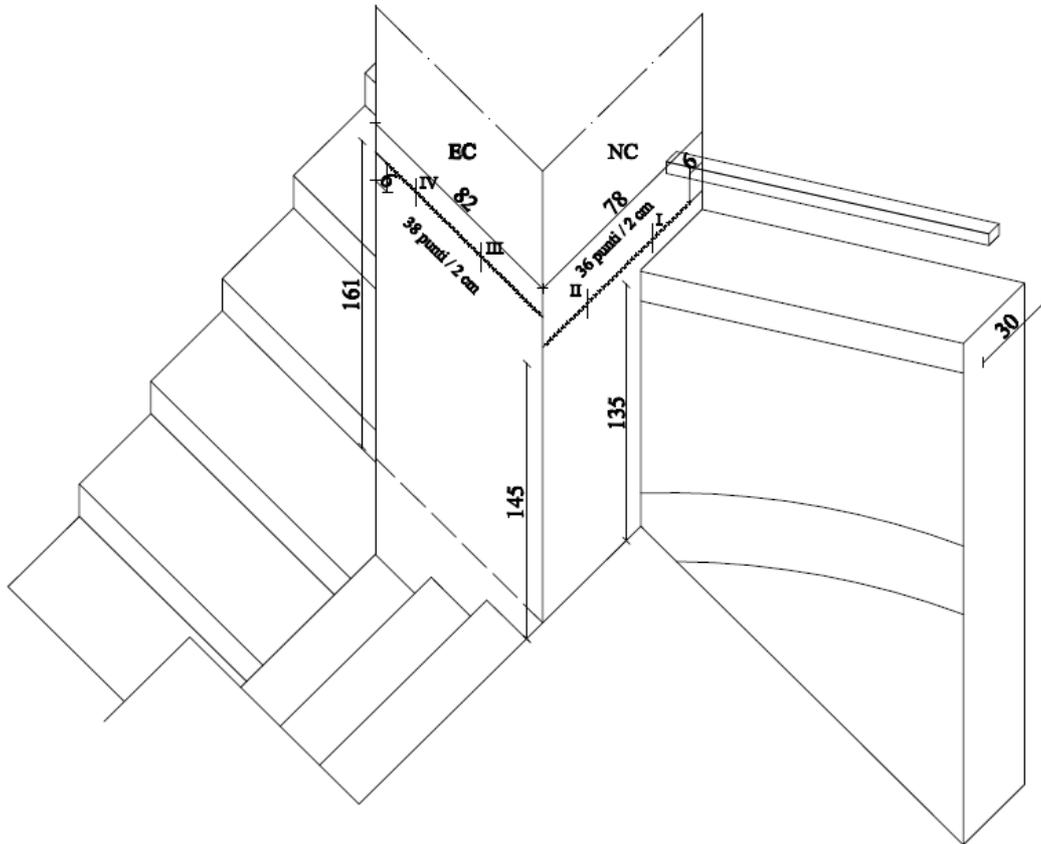


Fig. 10.44: Assonometria del pilastro nell'angolo N-E del fusto della torre e disposizione delle stazioni trasmettenti.

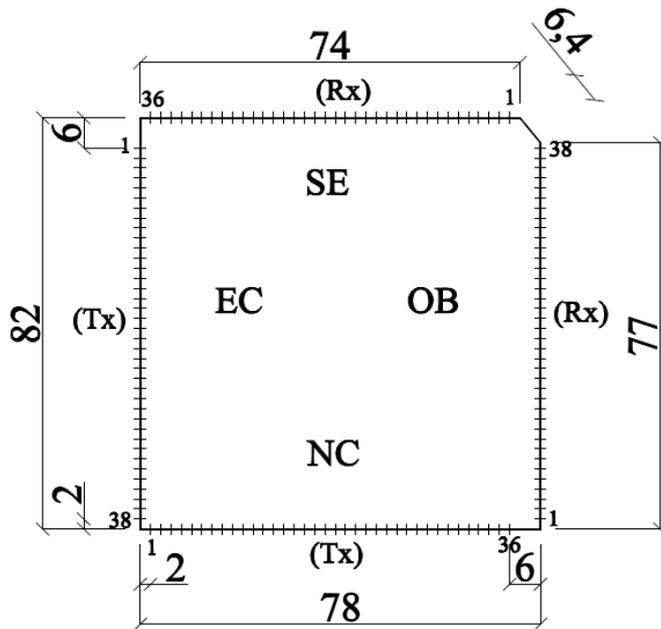


Fig. 10.45: Sezione del pilastro e disposizione delle stazioni.

Disposizione dei percorsi di misura

La griglia che si è venuta a creare ha una maglia regolare molto fitta, ad eccezione dei lati dove sono posti i ricevitori (Fig. 10.46). Ciò è dovuto alla geometria del pilastro che presenta un angolo smussato tra il lato SE ed il lato OB. L'ultima posizione di prova risulta quindi lontana 6 cm dallo spigolo invece che 2 cm.

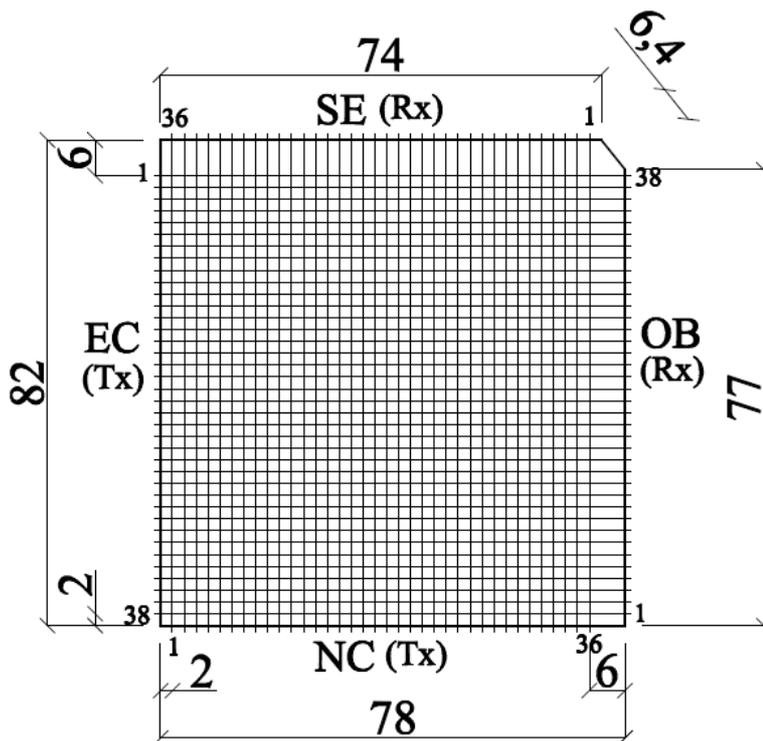


Fig. 10.46: Sezione orizzontale del pilastro con griglia dei percorsi ideali di prova.

Risultati prove soniche in trasmissione diretta

Con i dati dei tempi di volo elaborati dalle prove soniche (cfr. “Esperienza presso il cantiere di studio e di indagini diagnostiche della Ghirlandina di Modena: applicazione di prove soniche” di Valentino Santoro e relazione dei lavori UNIBO - Comune Modena) sono stati prodotti degli istogrammi delle velocità in trasmissione diretta che sono stati allineati alla sezione del pilastro per dare corrispondenza geometrica tra le posizioni di misura sulla sezione e i valori di velocità calcolati (Fig. 10.49). L'istogramma NC-SE presenta velocità maggiori

nella parte esterna del pilastro, poi compare una zona con velocità basse ed infine un nucleo centrale con velocità inferiori rispetto alla parte esterna. Lungo la direzione EC-OB si ha un andamento delle velocità simile. Le velocità massime raggiunte sono le stesse nelle due direzioni, nell'ordine di 2250 m/s, mentre le velocità minime valgono 1399 m/s in direzione NC-SE e 1313 m/s in direzione EC-OB. La velocità media in direzione NC-SE vale 1733 m/s, mentre in direzione EC-OB vale 1832 m/s.

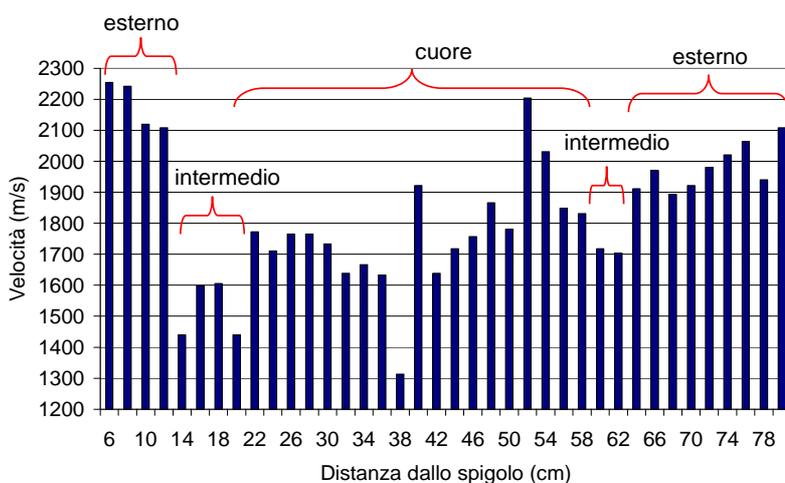


Fig. 10.47: Suddivisione in aree del diagramma delle velocità dalle prove soniche in trasmissione diretta in direzione EC-OB.

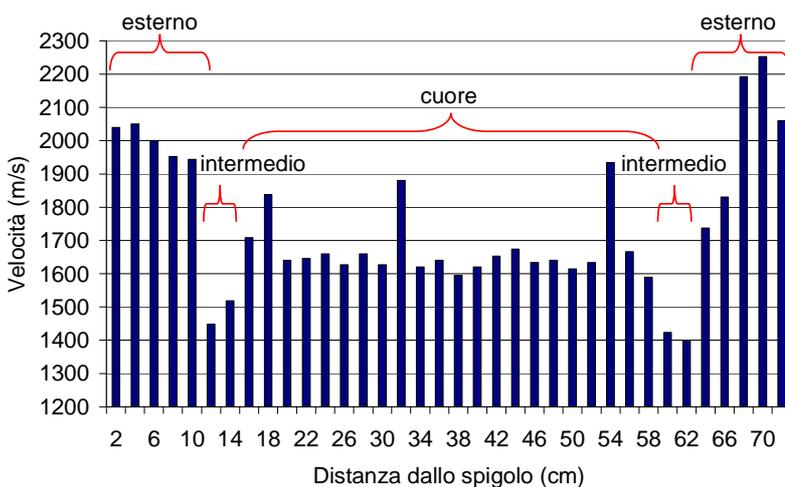


Fig. 10.48: Suddivisione in aree del diagramma delle velocità dalle prove soniche in trasmissione diretta in direzione NC-SE.

Tabella 10.11: Velocità medie ottenute in zone diverse della sezione.

Direzione	Vm esterno (m/s)	Vm cuore (m/s)	Vm zona intermedia (m/s)	Vm (m/s)
NC-SE	2005	1673	1447	1832
EC-OB	2107	1768	1615	1733
media	2056	1720	1531	1782

Tabella 10.12: Tempi di volo e velocità in direzione NC-SE.

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

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

30 - 7	82	576	1424			
31 - 6	82	586	1399			
32 - 5	82	472	1737			
33 - 4	82	448	1830			
34 - 3	82	374	2193	354	2825	0,78
35 - 2	82	364	2253			
36 - 1	82	398	2060	532	1880	1,10
	Media	479	1733	409	2448	0,78

Tabella 10.13: Tempi di volo e velocità in direzione EC–OB.

PROVE DIRETTE						
Tx - Rx	L (cm)	ΔT (μs)	v (m/s)	t_c (μs)	f_{max} (KHz)	λ (m)
1 - 38	78	346	2254	332	3012	0,75
2 - 37	78	348	2241	398	2513	0,89
3 - 36	78	368	2120	384	2604	0,81
4 - 35	78	370	2108			
5 - 34	78	542	1439			
6 - 33	78	488	1598			
7 - 32	78	486	1605			
8 - 31	78	542	1439			
9 - 30	78	440	1773			
10 - 29	78	456	1711			
11 - 28	78	442	1765	356	2809	0,63
12 - 27	78	442	1765			
13 - 26	78	450	1733			
14 - 25	78	476	1639			
15 - 24	78	468	1667			
16 - 23	78	478	1632			
17 - 22	78	594	1313	770	1299	1,01
18 - 21	78	406	1921			
19 - 20	78	476	1639	382	2618	0,63
20 - 19	78	454	1718			
21 - 18	78	444	1757			
22 - 17	78	418	1866			
23 - 16	78	438	1781			
24 - 15	78	354	2203			
25 - 14	78	384	2031			
26 - 13	78	422	1848			

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

27 - 12	78	426	1831			
28 - 11	78	454	1718			
29 - 10	78	458	1703	430	2326	0,73
30 - 9	78	408	1912			
31 - 8	78	396	1970			
32 - 7	78	412	1893			
33 - 6	78	406	1921			
34 - 5	78	394	1980			
35 - 4	78	386	2021	446	2242	0,90
36 - 3	78	378	2063	296	3378	0,61
37 - 2	78	402	1940			
38 - 1	78	370	2108	266	3759	0,56
	Media	432	1832	422	2656	0,75

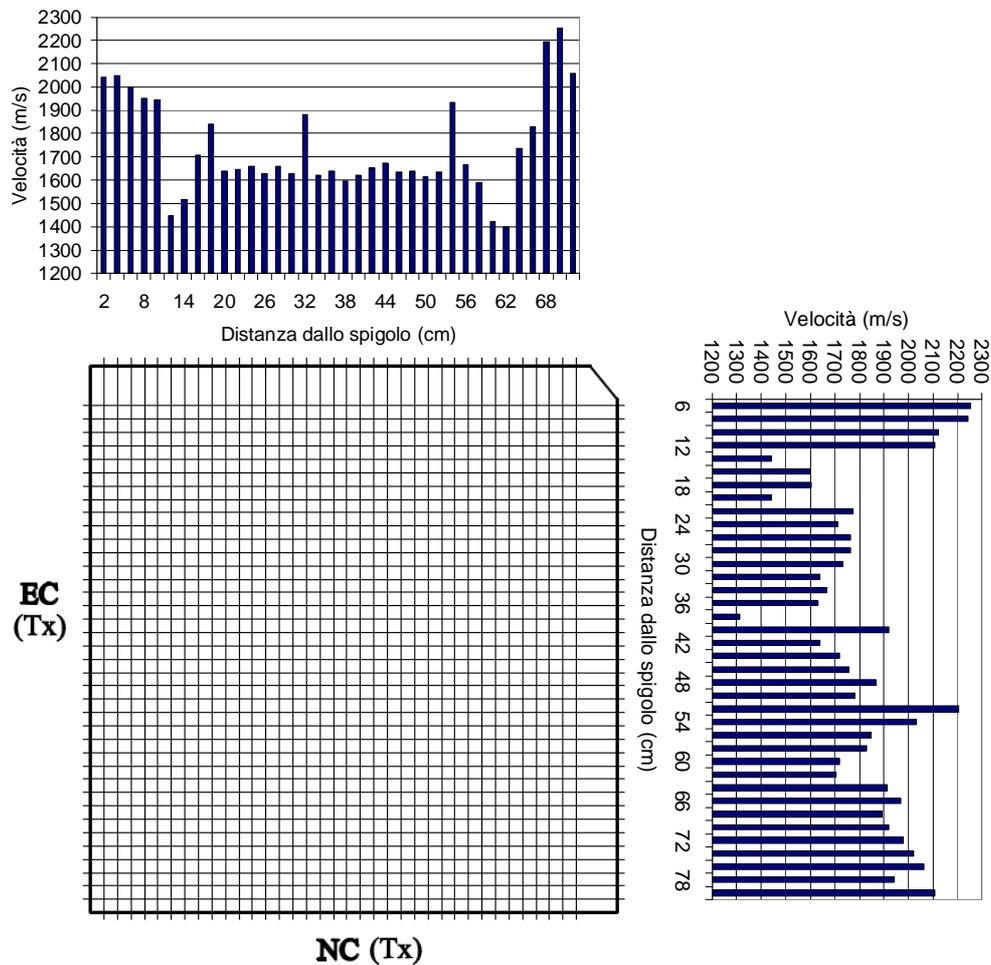


Fig. 10.49: Istogrammi delle velocità ottenute dalle prove dirette.

La muratura dove le velocità sono più alte è quella esterna e possiede caratteristiche meccaniche migliori del nucleo del pilastro; questa appare spessa circa 10 (Fig. 10.49).

Tabella 10.14: Deviazione standard e coefficiente di variazione percentuale.

direzione	V media (m/s)	dev. standard	coeff. di variazione (%)
NC-SE	1733	205	11,8
EC-OB	1832	220	12

Prove preliminari di inversione

Creazione del file di input

Prima di creare il file bisogna scegliere un opportuno sistema di riferimento e nel nostro caso è stato scelto come piano della sezione x-z e y come asse dell'altezza. Essendo uno studio in 2D la colonna y della sorgente e del ricevitore presenta tutti zeri, ma è stata comunque inserita nel caso che in uno studio successivo si volesse passare ad un'analisi in 3D. L'origine degli assi coincide con l'angolo opposto a quello smussato (Fig. 10.50).

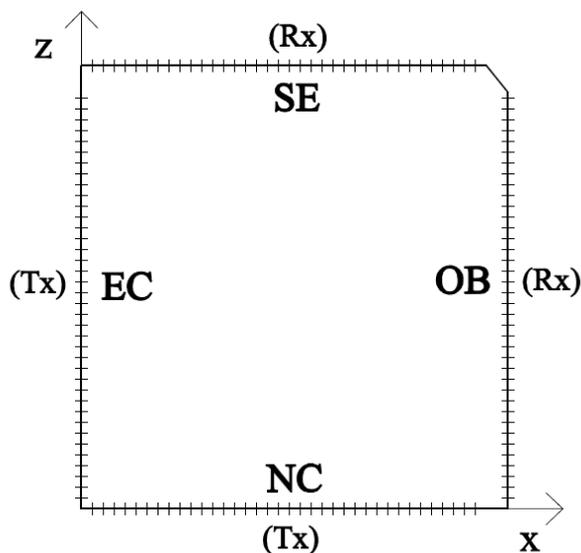


Fig. 10.50: Sistema di riferimento utilizzato per la creazione del file di input della tomografia.

La lunghezza d'onda media sulla sezione è 76,5 cm e se si considera come risoluzione in tomografia 1/10 della lunghezza d'onda si ottengono 7,65 cm. Si è provato però, in questo caso, ad utilizzare una griglia 34×34 pixels, di lato 2,35 cm. Per ricreare la geometria della sezione si è avuta la necessità di creare dei percorsi fittizi posti sul perimetro esterno che definissero i lati del pilastro. Si sono provate quattro opzioni differenti:

- 1) i percorsi esterni fittizi hanno velocità uguale alla velocità media in quella direzione (tempi di volo pari a 479 μ s in direzione NC–SE, 432 μ s in direzione SE–OB) e la sezione è quadrangolare (Fig. 10.51),
- 2) i percorsi esterni fittizi hanno velocità uguale alla velocità media in quella direzione e la sezione ha l'angolo in SE–OB smussato (Fig. 10.52),
- 3) non sono stati inseriti percorsi esterni fittizi e la sezione ha l'angolo in SE–OB smussato (Fig. 10.53),
- 4) i percorsi esterni fittizi hanno velocità uguale alla velocità dei percorsi vicini e la sezione ha l'angolo in SE–OB smussato (Fig. 10.54).

Tabella 10.15: Stazioni di misura e tempi di volo fittizi indicati nel file di input per i 3 diversi casi.

#	sorg x	sorg y	sorg z	ricev x	ricev y	ricev z	time	caso
1	0	0	0	780	0	0	432	1
2	780	0	0	780	0	820	479	
3	780	0	820	0	0	820	432	
4	0	0	820	0	0	0	479	
1	0	0	0	780	0	0	432	2
2	780	0	0	780	0	770	450	
3	730	0	820	0	0	820	432	
4	0	0	820	0	0	0	404	
5	780	0	770	730	0	820	37	
1	0	0	0	780	0	0	370	4
2	780	0	0	780	0	770	373	
3	730	0	820	0	0	820	324	
4	0	0	820	0	0	0	402	
5	780	0	770	730	0	820	31	

I valori massimo e minimo di velocità sono stati scelti pari a 2300 m/s (il valore max calcolato dalle prove è pari a 2254 m/s) e 1300 m/s (valore molto maggiore della velocità del suono in aria, pari a 300 m/s) perché si è voluto utilizzare un intervallo di velocità più appropriato: considerando un valore superiore di velocità minima si riesce a dar risalto anche alle variazioni di velocità più piccole, ottenendo una mappa meno omogenea. Solitamente per le inversioni tomografiche si utilizza come limite inferiore della scala il valore 300 m/s. Le prove sono state effettuate con smoothing nullo e sono state eseguite 10 iterazioni straight e 10 iterazioni bending.

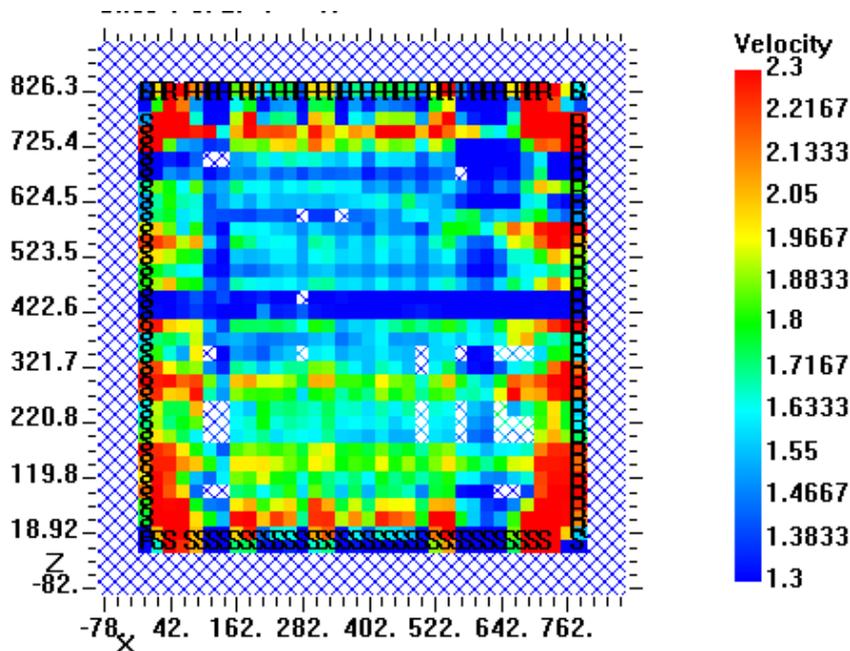


Fig. 10.51: Opzione 1, velocity model della sezione quadrangolare con la velocità dei percorsi fittizi uguale alla velocità media, ottenuto da 10 iterazioni straight e 10 bending con una griglia 34×34 pixels.

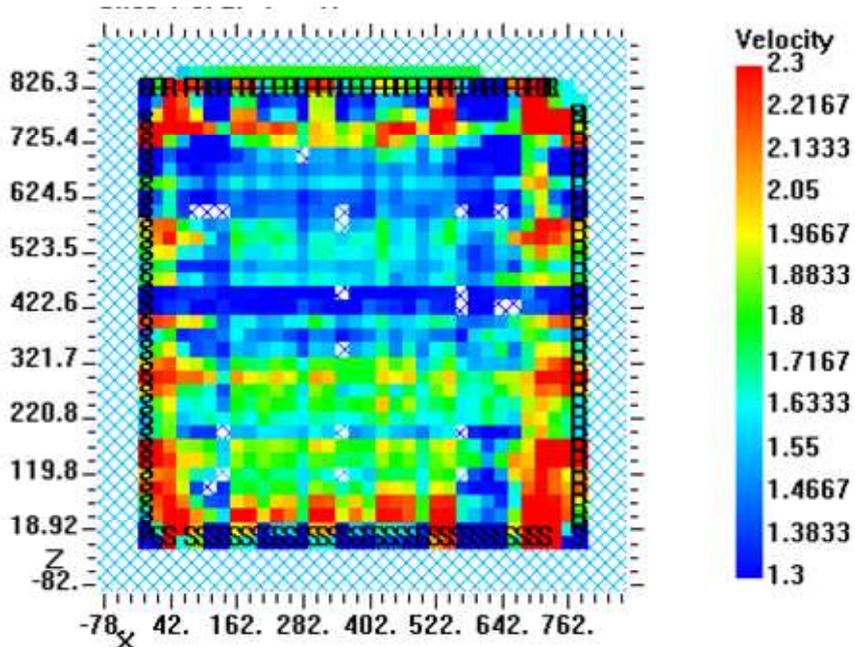


Fig. 10.52: Opzione 2, velocity model sezione con angolo smussato con la velocità dei percorsi fittizi uguale alla velocità media, ottenuto da 10 iterazioni straight e 10 bending con una griglia 34×34 pixels.

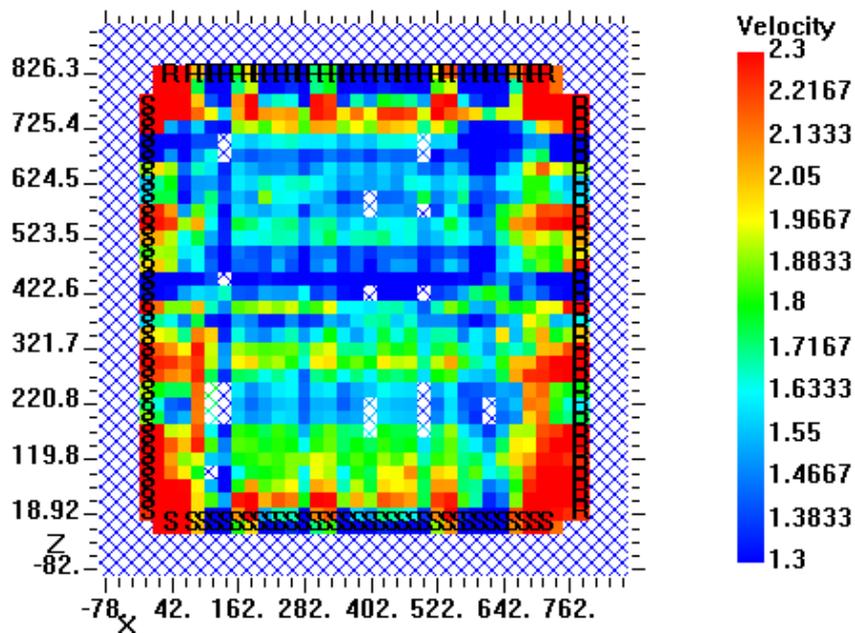


Fig. 10.53: Opzione 3, velocity model con angolo smussato senza percorsi fittizi, ottenuto da 10 iterazioni straight e 10 bending con una griglia 34×34 pixels.

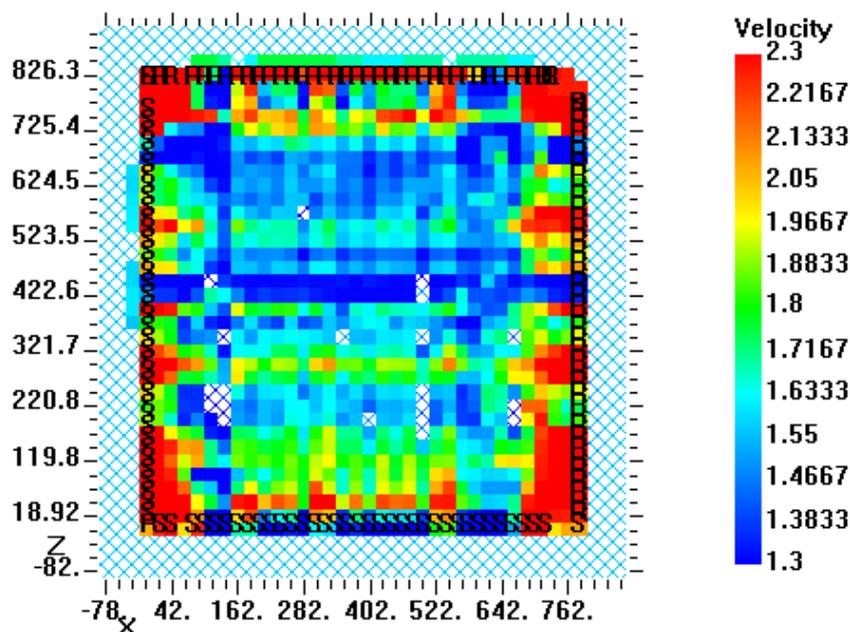


Fig. 10.54: Opzione 4, velocity model sezione con angolo smussato con la velocità dei percorsi fittizi uguale alla velocità del percorso vicino, ottenuto da 10 iterazioni straight e 10 bending con una griglia 34×34 pixels.

La prima mappa non rispecchia le caratteristiche geometriche del pilastro, perché trascura l'angolo smussato a SE-OB. La seconda rispetta le caratteristiche geometriche, ma avendo nei percorsi esterni delle velocità medie livella troppo il contrasto tra le velocità della parte esterna e di quella interna (alza le velocità basse ed abbatte quelle più alte rendendo più omogenea la mappa). Nella terza i percorsi esterni fittizi sono stati tolti e si è notato che tra la zona esterna e quella interna c'è una differenza di velocità maggiore rispetto a quella visibile nella seconda mappa. In questa mappa però la geometria del pilastro non è molto vicina alla realtà, non presentando nessun angolo. La quarta ed ultima mappa riesce invece a cogliere bene l'andamento delle velocità mantenendo la geometria effettiva dell'elemento (Fig. 10.54). Nel seguito verranno affinate le analisi soltanto sulla quarta mappa.

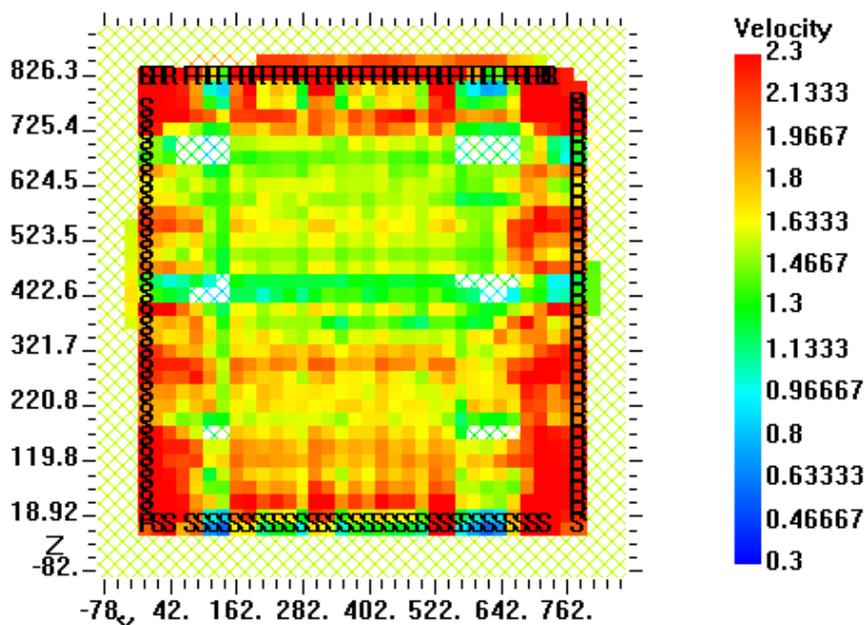


Fig. 10.55: Velocity model sezione con angolo smussato con la velocità dei percorsi fittizi uguale alla velocità del percorso vicino, ottenuto da 10 iterazioni straight e 10 bending con una griglia 34×34 pixels (scala tra 300 m/s e 2300 m/s).

Influenza dello smoothing

Lo smoothing serve per rendere più gradualmente le variazioni di velocità tra pixels vicini. Anche in questo caso è stato impostato su quattro valori crescenti: 0, 0,01, 0,02 e 0,03 considerando una griglia di 34×34 pixels. Non è stato possibile impostare lo Smoothing oltre il valore 0,03, perché se applicato in tutte le direzioni forniva un valore negativo che non permetteva al programma di girare. Lo smoothing come già mostrato non influisce molto sul residuo minimo; si è scelto quindi di usare smoothing 0,03, perché rende più omogeneo il modello.

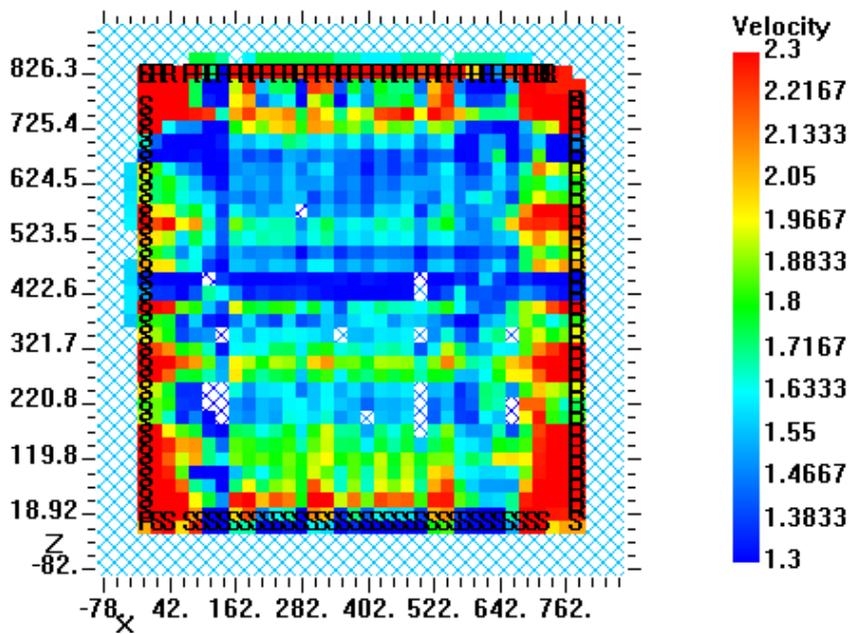


Fig. 10.56: Velocity model 34×34 pixels con smoothing nullo, 10 iterazioni straight e 10 bending.

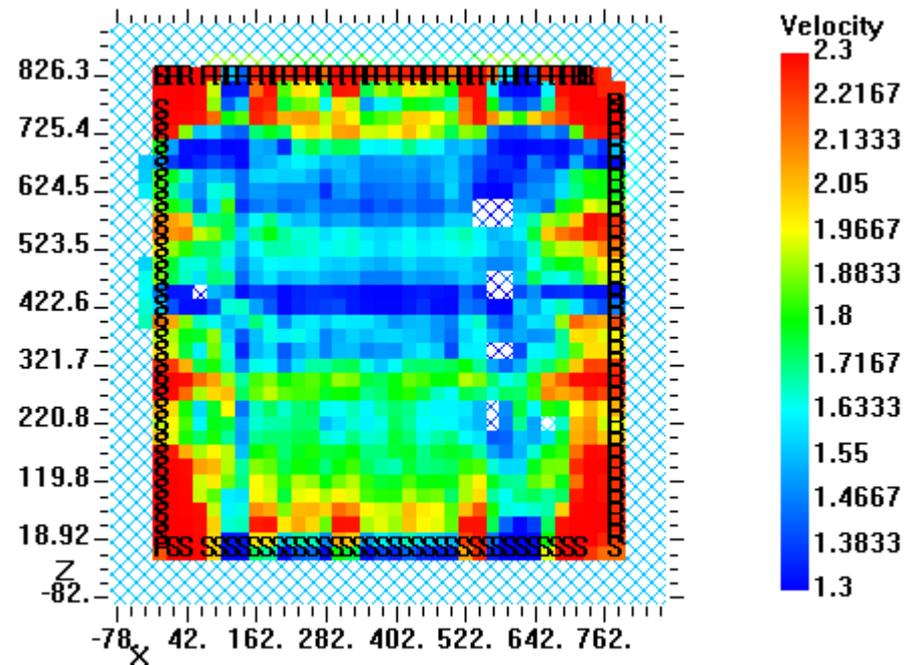


Fig. 10.57: Velocity model 34×34 pixels con smoothing 0,01, 10 iterazioni straight e 10 bending.

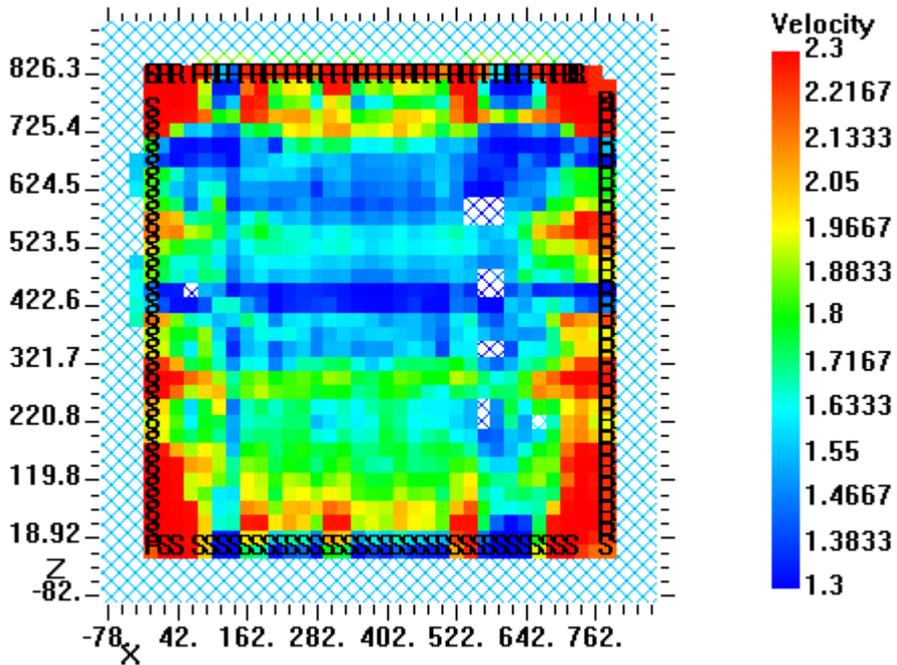


Fig. 10.58: Velocity model 34×34 pixels con smoothing 0,02, 10 iterazioni straight e 10 bending.

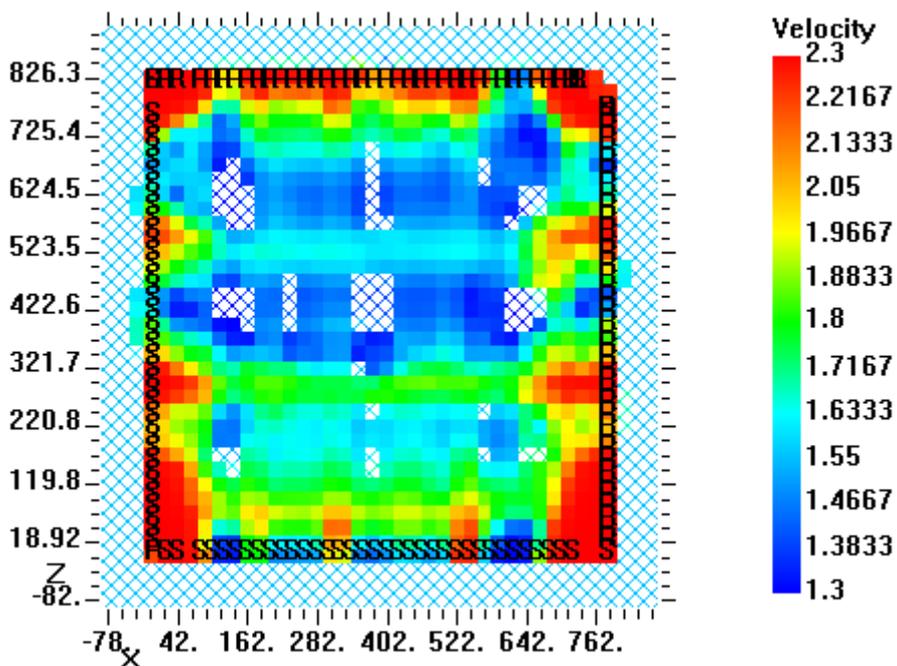


Fig. 10.59: Velocity model 34×34 pixels con smoothing 0,03, 10 iterazioni straight e 10 bending.

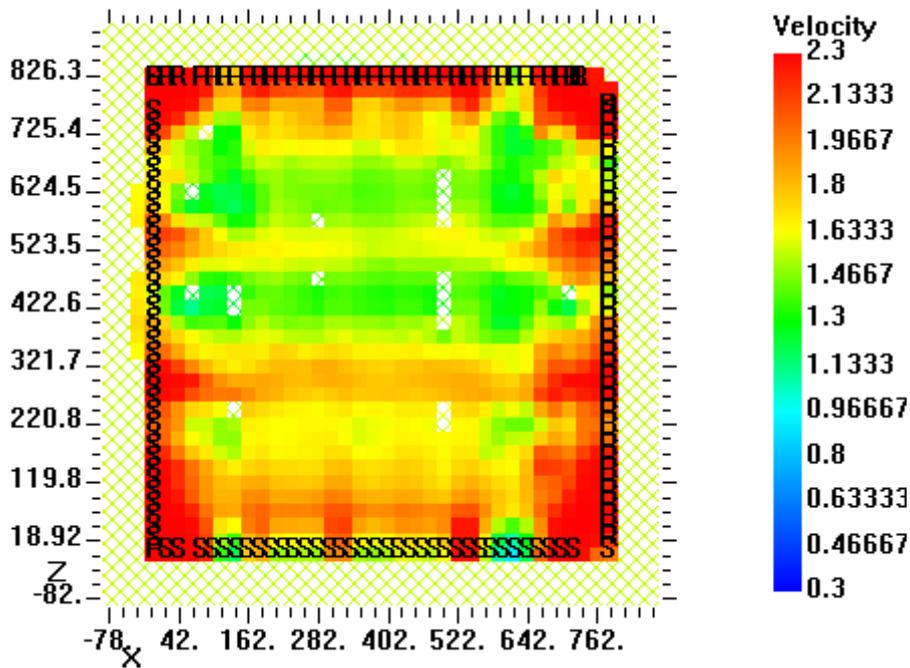


Fig. 10.60: Velocity model 34×34 pixels con smoothing 0,03, 10 iterazioni straight e 10 bending (scala tra 300 m/s e 2300 m/s).

Scelta del numero di iterazioni

Sul modello iniziale con griglia 34×34 pixels sono state condotte 3 analisi con un numero di iterazioni diverso:

- 10 straight e 10 bending (Fig. 10.61),
- 5 straight e 20 bending (Fig. 10.62),
- 5 straight e 17 bending (Fig. 10.63 e 10.64).

Sono stati plottati i grafici dei residui per le 3 analisi per capire quale combinazione di iterazioni fornisce il minore residuo. La prima analisi ci mostra che troppe iterazioni straight sono superflue e che le iterazioni bending non sono ancora sufficienti per abbattere il residuo minimo (Fig. 10.65). Quindi le straight sono state diminuite a 5, in quanto servono solo per alleggerire la computazione delle bending, mentre le bending sono state aumentate a 20 e si è visto che raggiunto il minimo il residuo torna a salire (Fig. 10.66). Quando l'intervallo delle velocità è lasciato più ampio, il residuo tende ad essere maggiore (Fig. 10.68).

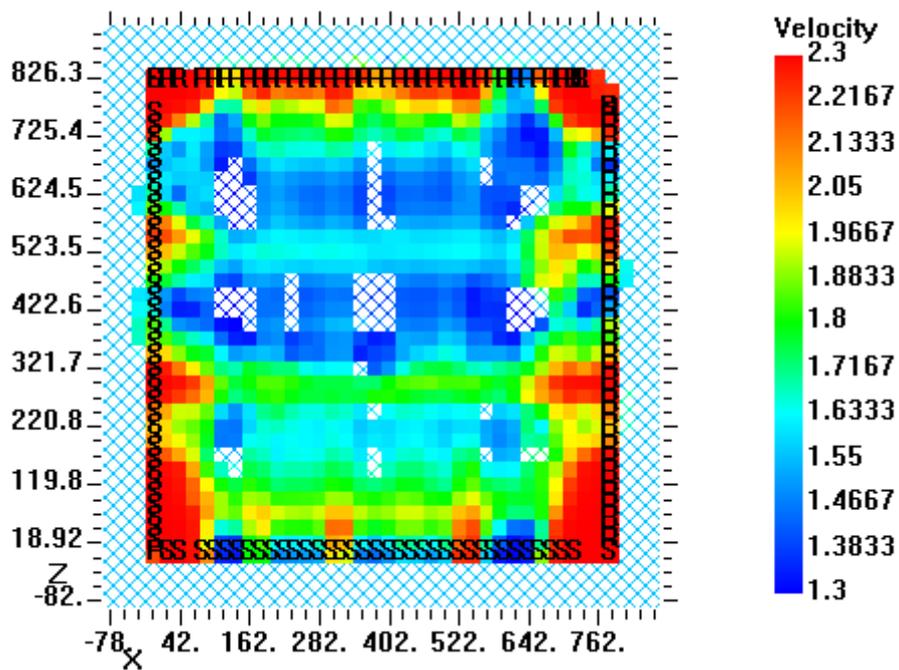


Fig. 10.61: Velocity model con griglia di 34×34 pixels con smoothing 0,03, 10 straight-ray iterations e 10 bending-ray iterations.

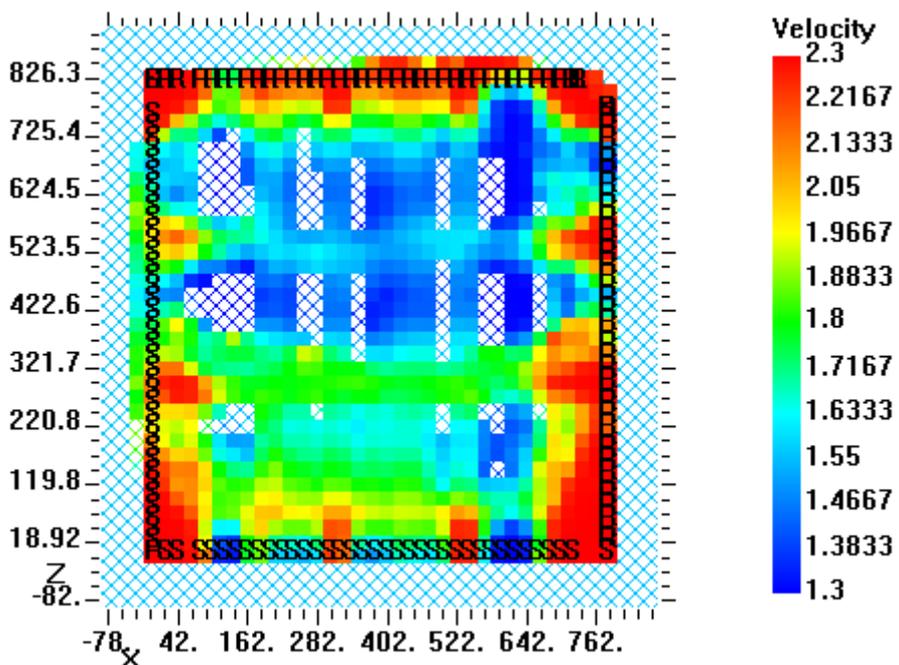


Fig. 10.62: Velocity model con griglia di 34×34 pixels, con 5 straight-ray iterations e 20 bending-ray iterations.

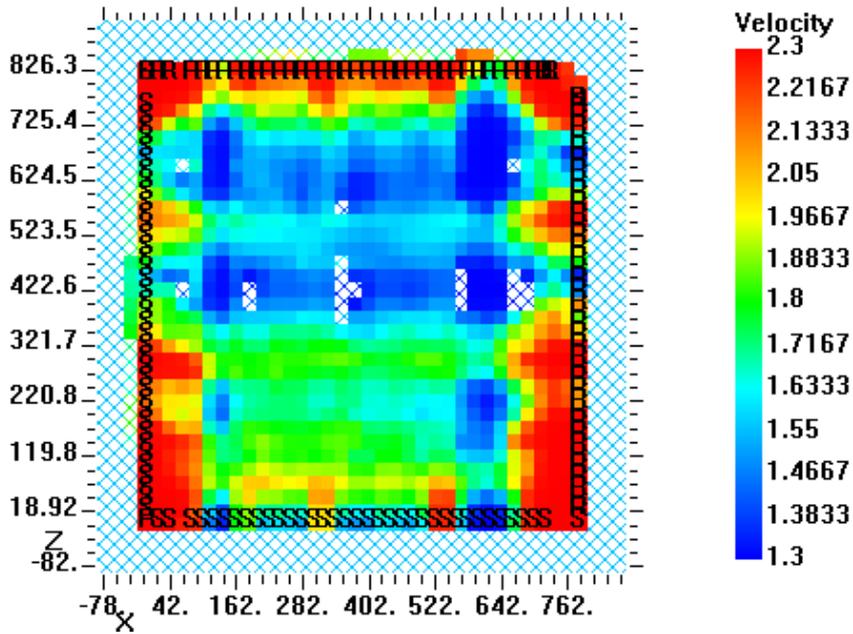


Fig. 10.63: Velocity model con griglia di 34×34 pixels, con 5 straight-ray iterations e 17 bending-ray iterations.

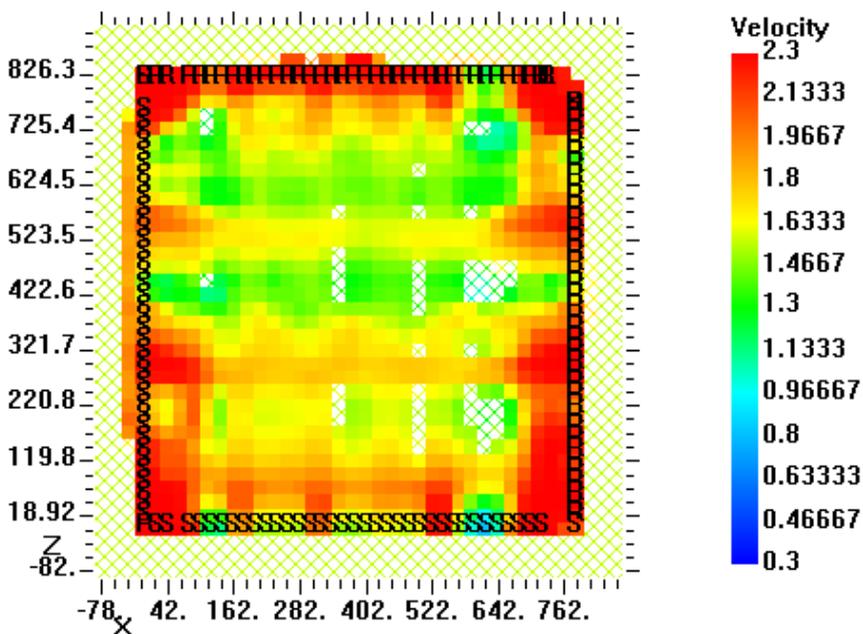


Fig. 10.64: Velocity model con griglia di 34×34 pixels, con 5 straight-ray iterations e 17 bending-ray iterations (scala tra 300 m/s e 2300 m/s).

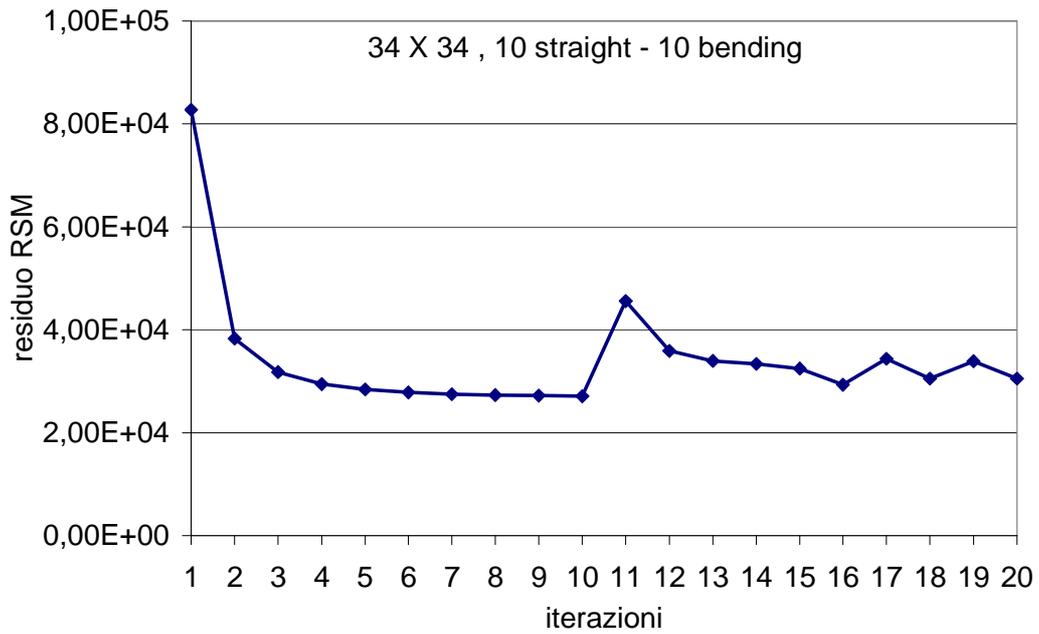


Fig. 10.65: Andamento dei residui con griglia di 34×34 pixels, 10 iterazioni straight e 10 bending.

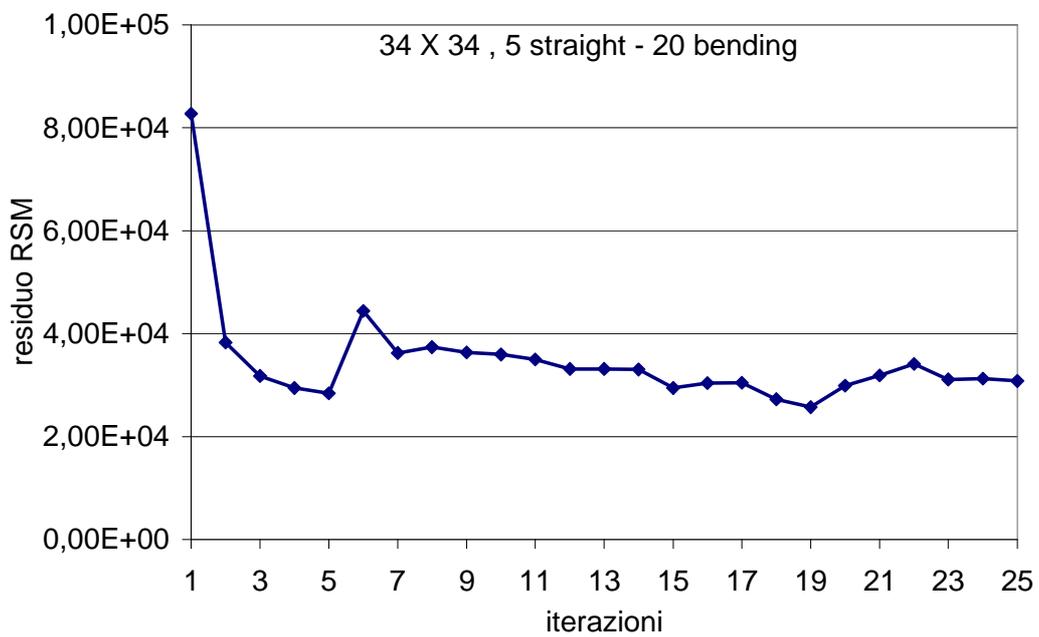


Fig. 10.66: Andamento dei residui con griglia di 34×34 pixels, 5 iterazioni straight e 20 bending.

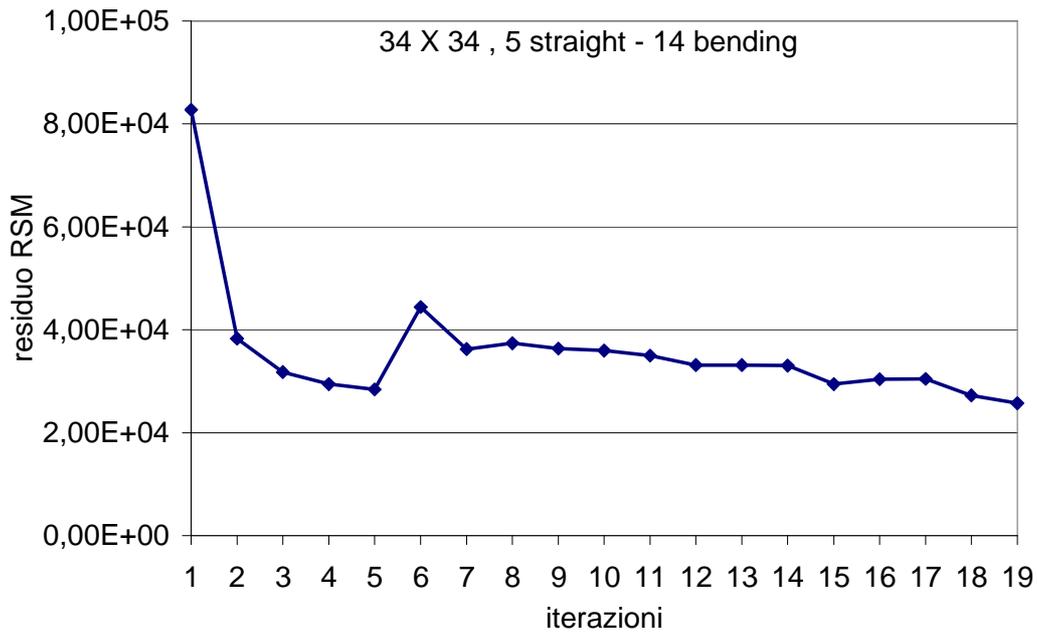


Fig. 10.67: Andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 17 bending.

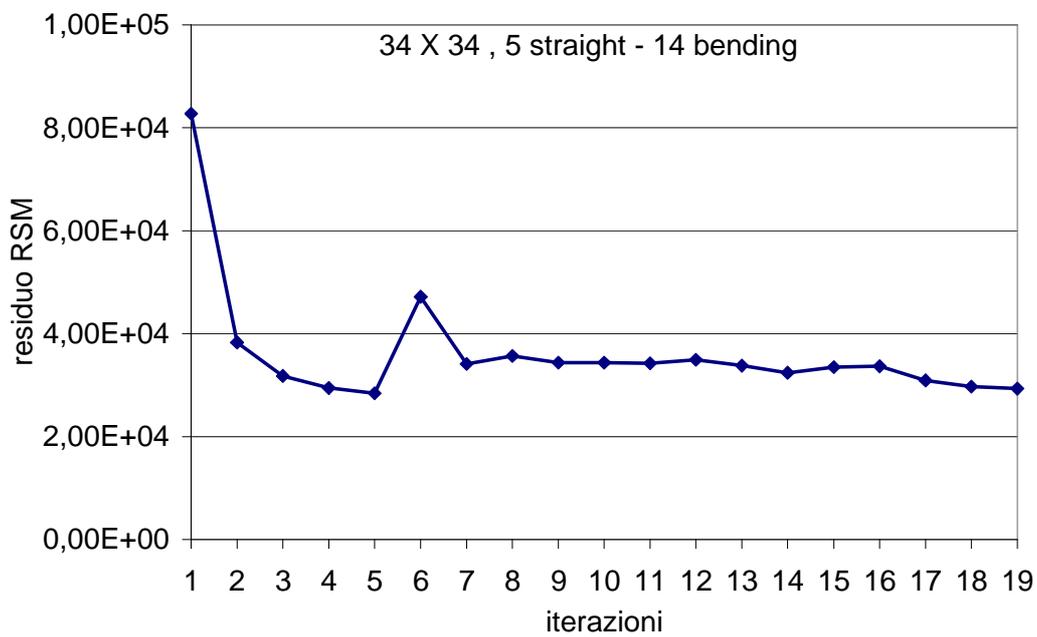


Fig. 10.68: Andamento dei residui con griglia 34×34, 5 iterazioni straight e 17 bending (scala tra 300 m/s e 2300 m/s).

Quindi il numero di iterazioni che fornisce la soluzione migliore è 5 straight e 17 bending, che rende il residuo minimo pari a $5,25E+04$ (Fig. 10.67).

Restituzione tomografica dei tempi di volo della sezione del pilastro

La muratura esterna presenta velocità più alte intorno ai 2300 m/s e quindi ha delle caratteristiche meccaniche migliori rispetto al nucleo interno. Anche il nucleo interno presenta però bande in azzurro chiaro nelle quali le caratteristiche meccaniche sono superiori. Gli elementi più resistenti sono gli angoli insieme a due zone simmetriche in ogni lato, nelle quali le velocità sono piuttosto elevate. Sulla mappa delle velocità è riportato anche il Raypaths, ovvero l'andamento dei raggi (Fig. 10.69).

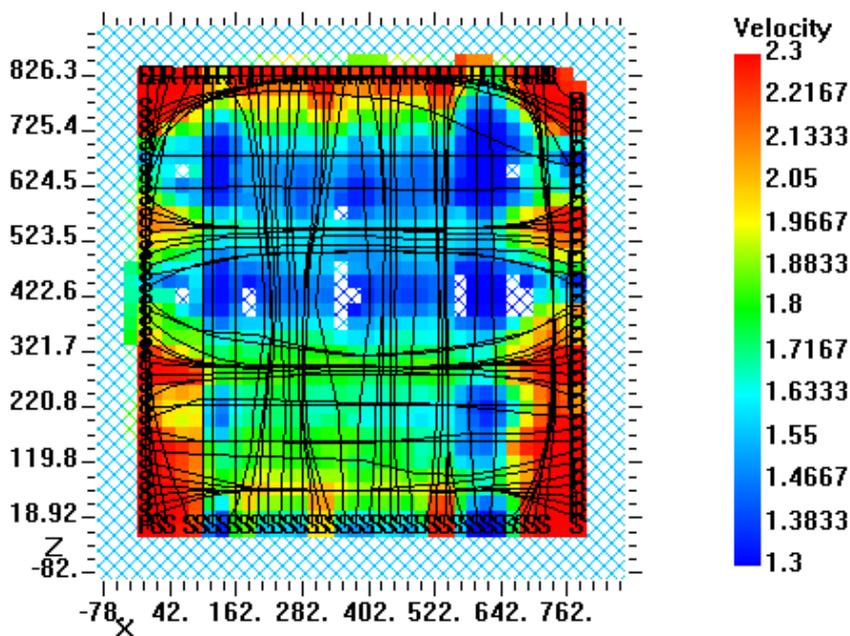


Fig. 10.69: Velocity model definitivo con raypaths con griglia 34×34 , smoothing 0,03, 5 straight-ray iterations e 17 bending-ray iterations.

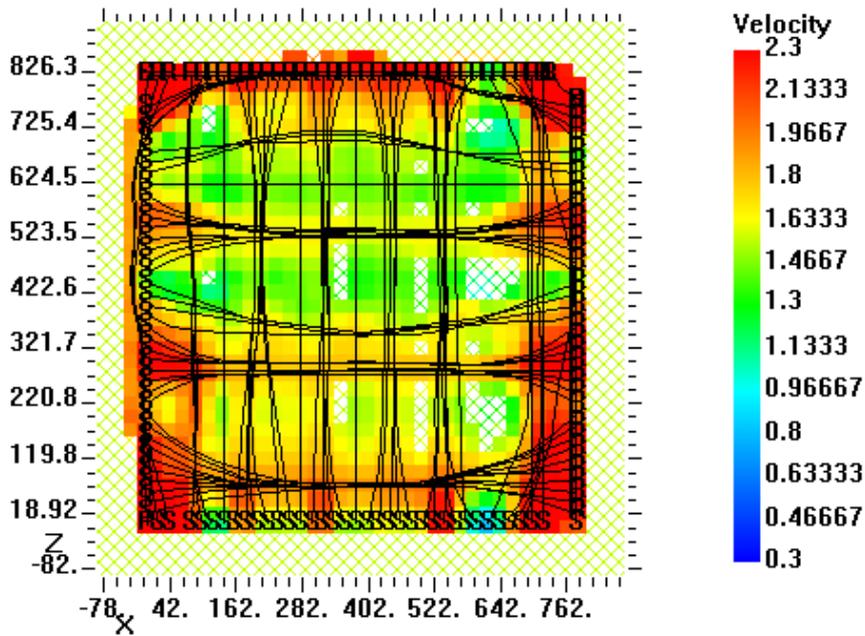


Fig. 10.70: Velocity model definitivo con raypaths con griglia 34×34, smoothing 0,03, 5 straight-ray iterations e 17 bending-ray iterations (scala tra 300 m/s e 2300 m/s).

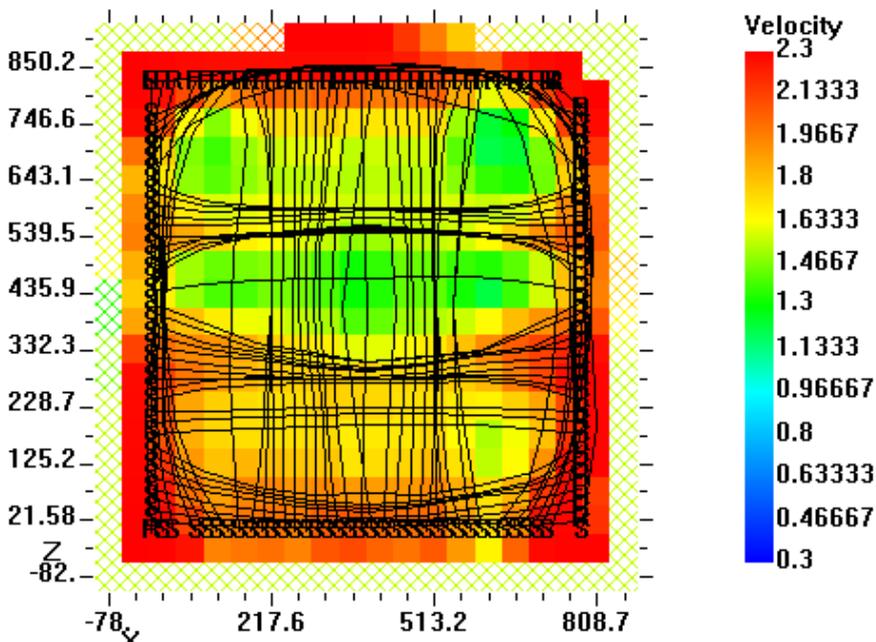


Fig. 10.71: Velocity model definitivo con raypaths con griglia 18×18 pixels (lato 4 cm), smoothing 0,03, 5 straight-ray iterations e 17 bending-ray iterations.

Restituzione tomografica delle attenuazioni della sezione del pilastro

Tabella 10.16: Ampiezze e attenuazione in direzione NC-SE.

Nome File	A_{\max} Tx	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BindirDUEPEC0	8	3,16	2,66	0,50	0,06	24,08
BindirDUEPEC1	9,99	2,35	2,28	0,07	0,01	43,09
BindirDUEPEC2	9,99	2,36	2,78	0,42	0,04	27,53
BindirDUEPEC3	9,28	1,48	2,06	0,58	0,06	24,08
BindirDUEPEC4	8,26	2,04	2,35	0,31	0,04	28,51
BindirDUEPEC5	9,98	2,38	2,93	0,55	0,06	25,18
BindirDUEPEC6	8,96	1,79	1,71	0,08	0,01	40,98
BindirDUEPEC7	8,44	1,16	1,57	0,41	0,05	26,27
BindirDUEPEC8	9,77	0,95	1,46	0,51	0,05	25,65
BindirDUEPEC9	9,99	0,5	1,04	0,54	0,05	25,34
BindirDUEPEC10	9,98	1,5	1,49	0,01	0,00	59,98
BindirDUEPEC11	9,98	1,45	1,33	0,12	0,01	38,40
BindirDUEPEC12	6,8	0,79	0,64	0,15	0,02	33,13
BindirDUEPEC13	8,69	1,21	1,12	0,09	0,01	39,70
BindirDUEPEC14	9,47	1,35	1,25	0,10	0,01	39,53
BindirDUEPEC15	9,96	1,77	1,58	0,19	0,02	34,39
BindirDUEPEC16	9,77	2,26	1,82	0,44	0,05	26,93
BindirDUEPEC17	9,99	2,83	2,28	0,55	0,06	25,18
BindirDUEPEC18	9,3	2,56	2,1	0,46	0,05	26,11
BindirDUEPEC19	9,99	3,81	2,77	1,04	0,10	19,65
BindirDUEPEC20	8,74	2,93	2,17	0,76	0,09	21,21
BindirDUEPEC21	9,01	1,42	1,28	0,14	0,02	36,17
BindirDUEPEC22	8,59	1,14	1,1	0,04	0,00	46,64
BindirDUEPEC23	9,98	1,16	1,05	0,11	0,01	39,15
BindirDUEPEC24	8,22	0,57	0,72	0,15	0,02	34,78
BindirDUEPEC25	9,63	0,9	1,14	0,24	0,02	32,07
BindirDUEPEC26	7,02	0,19	0,71	0,52	0,07	22,61
BindirDUEPEC27	7,13	0,23	0,81	0,58	0,08	21,79
BindirDUEPEC28	8,7	0,18	0,95	0,77	0,09	21,06
BindirDUEPEC29	9,84	0	0,87	0,87	0,09	21,07
BindirDUEPEC30	8,38	0,03	0,68	0,65	0,08	22,21
BindirDUEPEC31	4,91	0,33	0,72	0,39	0,08	22,00

10. Applicazione in sito della tecnica tomografica

BindirDUEPEC32	5,87	0,37	0,77	0,40	0,07	23,33
BindirDUEPEC33	9,99	1,26	1,66	0,40	0,04	27,95
BindirDUEPEC34	8,76	2,09	1,9	0,19	0,02	33,28
BindirDUEPEC35	9,94	2,47	2,3	0,17	0,02	35,34
BindirDUEPEC36	5,08	2,61	2,16	0,45	0,09	21,05
BindirDUEPEC37	9,25	4,73	3,72	1,01	0,11	19,24

Tabella 10.17: Ampiezze e attenuazione in direzione EC-OB.

Nome File	A_{\max} Tx	A_{\max} sup. Rx	A_{\max} inf. Rx	A_{\max} Rx	Ampiezza	Attenuazione (dB)
BindirDUEPSE0	7,03	0,92	0,66	0,26	0,04	28,64
BindirDUEPSE1	9,88	0,45	1,11	0,66	0,07	23,50
BindirDUEPSE2	9,98	1,32	1,09	0,23	0,02	32,75
BindirDUEPSE3	9,99	1,21	0,5	0,71	0,07	22,97
BindirDUEPSE4	5,57	0,37	0,66	0,29	0,05	25,67
BindirDUEPSE5	4,43	0,13	0,4	0,27	0,06	24,30
BindirDUEPSE6	8,59	0,57	0,92	0,35	0,04	27,80
BindirDUEPSE7	8,53	0,88	0,77	0,11	0,01	37,79
BindirDUEPSE8	7,79	0,49	0,44	0,05	0,01	43,85
BindirDUEPSE9	7,8	0,49	0,44	0,05	0,01	43,86
BindirDUEPSE10	8,87	0,41	0,68	0,27	0,03	30,33
BindirDUEPSE11	5,84	0,33	0,37	0,04	0,01	43,29
BindirDUEPSE12	6,2	0,51	0,49	0,02	0,00	49,83
BindirDUEPSE13	4,25	0,51	0,37	0,14	0,03	29,65
BindirDUEPSE14	9,04	1,22	0,91	0,31	0,03	29,30
BindirDUEPSE15	6,26	1,23	0,99	0,24	0,04	28,33
BindirDUEPSE16	8,28	1	0,99	0,01	0,00	58,36
BindirDUEPSE17	7,49	0,19	0,42	0,23	0,03	30,26
BindirDUEPSE18	5,25	0,337	0,333	0,00	0,00	62,36
BindirDUEPSE19	9,45	0,3	0,78	0,48	0,05	25,88
BindirDUEPSE20	6,6	0,99	0,65	0,34	0,05	25,76
BindirDUEPSE21	4,78	0,67	0,41	0,26	0,05	25,29
BindirDUEPSE22	6,65	1,3	0,67	0,63	0,09	20,47
BindirDUEPSE23	10	0,21	0,27	0,06	0,01	44,44
BindirDUEPSE24	7,09	1,73	1,31	0,42	0,06	24,55
BindirDUEPSE25	6,29	1,23	1,03	0,20	0,03	29,95
BindirDUEPSE26	7,59	1,01	0,93	0,08	0,01	39,54
BindirDUEPSE27	7,06	0,28	0,35	0,07	0,01	40,07
BindirDUEPSE28	5,79	0,76	0,57	0,19	0,03	29,68

BindirDUEPSE29	5,45	0,67	0,41	0,26	0,05	26,43
BindirDUEPSE30	6,54	0,71	1,1	0,39	0,06	24,49
BindirDUEPSE31	5,24	0,32	0,67	0,35	0,07	23,51
BindirDUEPSE32	9,8	0,36	1,15	0,79	0,08	21,87
BindirDUEPSE33	6,87	0,87	1,1	0,23	0,03	29,50
BindirDUEPSE34	7,5	1,11	1,4	0,29	0,04	28,25

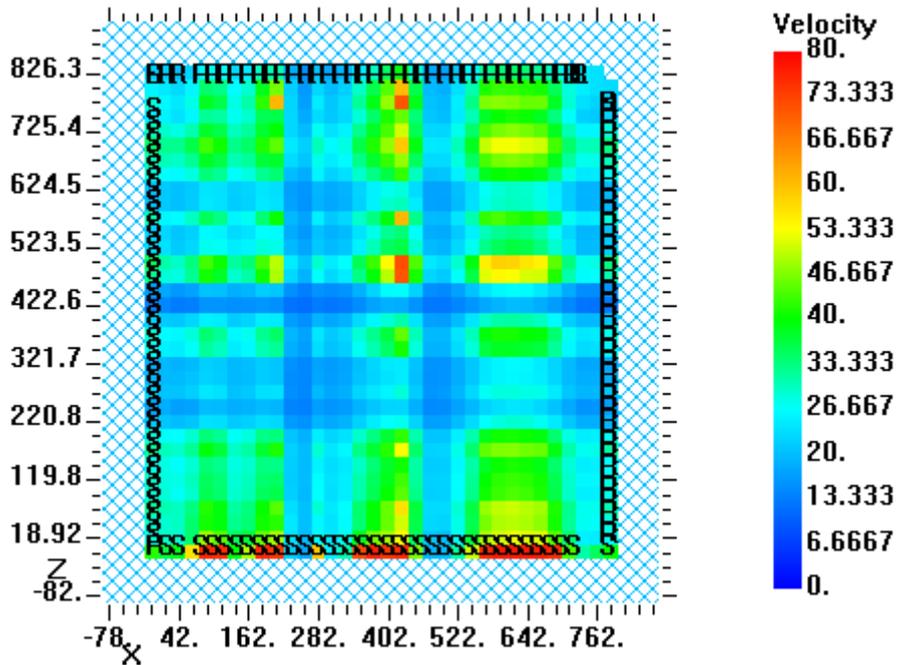


Fig. 10.72: Mappa dell'attenuazione con griglia 40×40, smoothing 0,03, 20 straight-ray iterations.

11. PRINCIPI DEL GEORADAR

Il georadar

Il termine georadar o G.P.R. (Ground Penetrating Radar), identifica una apparecchiatura radar dedicata all'indagine del sottosuolo, delle strutture e dei manufatti in genere. La parola radar deriva dalla denominazione inglese "radio detection and ranging" (radiatorilevamento e misura della distanza), adoperata universalmente per indicare le apparecchiature con le quali si effettuano, a mezzo di onde elettromagnetiche, rilevamenti della posizione di oggetti con tecnica analoga a quella del rilevamento ottico mediante fasci luminosi. Più precisamente, un radar emette un fascio di onde elettromagnetiche che viene diretto contro un bersaglio da rilevare e da questo viene riflesso; un ricevitore, collocato in prossimità del trasmettitore, raccoglie una piccola frazione dell'energia riflessa e fornisce le informazioni necessarie al rilevamento.

La distanza dell'oggetto da rilevare è data dall'intervallo di tempo che separa l'istante di emissione di un impulso dall'istante di ricezione dell'eco relativa. La posizione dell'oggetto da rilevare è individuata dalla distanza di questo dal trasmettitore e dalla direzione del fascio che lo raggiunge. Il GPR è un sistema di controllo diagnostico non invasivo che si basa sullo stesso principio dei radar convenzionali, ma con alcune differenze significative: in un radar convenzionale l'onda elettromagnetica irradiata si propaga attraverso l'aria, mentre nel radar per introspezione del suolo si propaga nel suolo o in altri materiali solidi; i radar convenzionali possono rivelare bersagli a distanza di molti chilometri, mentre il radar per introspezione del suolo opera generalmente a distanze di pochi metri; la risoluzione dei radar convenzionali è dell'ordine delle decine o centinaia di metri, mentre il radar per introspezione del suolo ha risoluzioni dell'ordine delle decine di centimetri. Il georadar è uno strumento versatile che consente di ottenere con alta precisione un profilo continuo del mezzo investigato, che sia terreno naturale, muratura o pavimentazione stradale, dal quale è possibile ottenere in tempi rapidi numerose informazioni. L'utilizzo di questa tecnologia consente infatti di rilevare

e localizzare la presenza nel mezzo investigato di oggetti, strutture sepolte, cavità o comunque di qualsiasi discontinuità presente.

Cenni storici sul georadar

Le prime applicazioni delle tecniche di indagine geofisica risalgono agli anni '30, con applicazioni nella ricerca archeologica, finalizzate a captare la profondità di un ghiacciaio. La tecnologia fu ampiamente trascurata fino agli anni '50, periodo dell'immediato dopoguerra. In questi anni si è verificato un rapido ed intenso sviluppo di tali tecniche, soprattutto con l'impiego delle tecnologie di derivazione bellica quali i metal detector, i sistemi di rilevazione elettromagnetici ed il radar. Negli ultimi anni, i notevoli progressi tecnologici dell'elettronica e dell'informatica hanno avuto applicazioni rivoluzionarie anche nel campo della prospezione geofisica applicata prima in campo geologico ed archeologico e successivamente in quello edile e civile. Ancora negli anni '50 e '60 le strumentazioni e le attrezzature utilizzate erano complesse, ingombranti e richiedevano lunghi tempi per l'acquisizione dei dati. Le apparecchiature moderne, tutte di limitate dimensioni, portatili e di facile impiego, sono dotate di gestione e controllo automatico delle operazioni di acquisizione dati e di memorie elettroniche capaci di creare un database dei valori registrati. Con semplici operazioni i dati rilevati vengono trasferiti direttamente al computer per l'elaborazione automatica e la restituzione grafica, sotto forma di carte o di grafici delle informazioni raccolte, in cui l'andamento, la morfologia delle curve, o di campionature di colori diversi, visualizzano i vari lineamenti strutturali sepolti.

Funzionamento del georadar

Il GPR ad impulso elettromagnetico è un sistema elettronico, complesso e tecnologicamente avanzato, in grado di indagare i terreni ed i materiali con notevole dettaglio, utilizzando la riflessione di onde elettromagnetiche. La generazione e la ricezione dei segnali a radiofrequenza (compresi di solito nel range 100 MHz – 1.5 GHz) è operata da una o più antenne che vengono fatte scorrere sul mezzo che si desidera indagare; i dati raccolti, opportunamente

elaborati, vengono memorizzati e visualizzati su una unità di controllo, la stessa che genera gli impulsi necessari al funzionamento delle antenne. Di seguito sono descritti i principi fisici di funzionamento del sistema.

La teoria di Maxwell afferma che un dipolo eccitato da un voltaggio ad alta frequenza genera un campo elettrico parallelo al dipolo. Le cariche elettriche in moto all'interno del campo elettrico generano un campo magnetico perpendicolare al dipolo stesso. Le proprietà elettriche del mezzo investigato esercitano una grande influenza sulla risposta del GPR, al contrario di quelle magnetiche che non presentano considerevoli variazioni da materiale a materiale. Esistono due tipologie di corrente elettrica: corrente di conduzione e corrente di spostamento. La corrente di conduzione è generata dal movimento di cariche attratte dal campo elettrico. La grandezza caratteristica che la contraddistingue è l'intensità di corrente J_c , correlata al campo elettrico dalla relazione lineare:

$$J_c = \sigma \cdot E$$

In cui E è il campo elettrico e σ è la conduttività, ovvero la capacità del materiale di condurre corrente elettrica.

La corrente di spostamento è dovuta alla distanza fra le cariche e risulta direttamente proporzionale al campo elettrico applicato tramite la costante dielettrica del mezzo ϵ secondo la relazione:

$$D = \epsilon \cdot E$$

In cui D è lo spostamento elettrico.

La costante dielettrica ϵ misura la capacità di un mezzo di immagazzinare una carica elettrica quando sottoposto ad un campo elettrico (tale capacità risulta influenzata dal contenuto in acqua). L'intensità di corrente di spostamento J_p è data da:

$$J_p = \frac{dD}{dt} = \epsilon \cdot \frac{dE}{dt}$$

La corrente che attraversa il mezzo durante una indagine con GPR è la somma della corrente di conduzione e della corrente di spostamento, ovvero:

$$J = J_c + J_p$$

Tale relazione, scritta nel dominio delle frequenze, diventa:

$$J = (\sigma + i\omega\varepsilon) \cdot E$$

In cui $\omega = 2\pi f$ con f frequenza di eccitazione .

Un'antenna, sollecitata da un impulso elettrico, genera un campo elettromagnetico che si propaga attraverso il mezzo, subendo un decadimento dell'ampiezza, che dipende dalla distanza coperta. L'equazione di Maxwell che esprime la propagazione del campo elettromagnetico, lungo una direzione z , in un mezzo omogeneo, può essere scritta come:

$$E = E_x e^{-\gamma z}$$

dove γ è chiamata costante di propagazione e si esprime come:

$$\gamma = \alpha + \beta \cdot i$$

con α fattore di attenuazione e β costante di fase, dipendenti dalla conduttività, dalla costante dielettrica e dalla permeabilità del mezzo attraversato.

Nel caso in cui si potesse ritenere nulla la σ del mezzo investigato, questo annullerebbe il fattore d'attenuazione, cosicché non si avrebbe decadimento d'energia con la profondità di investigazione. In generale questo non è ammissibile, ma è tuttavia auspicabile che la conduttività del mezzo sia sufficientemente bassa da determinare un fenomeno di assorbimento ad essa proporzionale. La velocità con la quale l'onda elettromagnetica attraversa il mezzo può essere espressa dalla formula:

$$V = \sqrt{1/\varepsilon\mu}$$

con $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, dove ε_0 è la costante dielettrica in aria e ε_r è la costante dielettrica relativa; $\mu = \mu_0 \mu_r$, dove μ_0 è la permeabilità magnetica in aria e μ_r è la permeabilità relativa.

Se si indica con C la velocità dell'onda in aria, essa sarà espressa come:

$$C = \sqrt{1/\varepsilon_0\mu_0}$$

e di conseguenza:

$$V = C / \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$$

Potendo in generale supporre che la permeabilità magnetica relativa sia circa uguale ad 1 qualunque sia il mezzo, allora la V sarà influenzata dalla sola costante

dielettrica relativa. Quando un'onda elettromagnetica incide la superficie di separazione fra due mezzi con differenti caratteristiche elettromagnetiche, essa viene in parte riflessa e in parte trasmessa. La quantità di energia riflessa e trasmessa dipende dai coefficienti R e T, che a loro volta sono legati alle impedenze magnetiche Z_1 e Z_2 dei 2 mezzi:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

L'impedenza elettromagnetica dipende dalla costante dielettrica, dalla permeabilità magnetica e dalla conduttività in base alla seguente relazione:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\varepsilon + \sigma}}$$

Ciò implica che, affinché si possa generare una riflessione, è necessario avere un contrasto di μ , ε o σ ; ma per quanto già affermato riguardo l'invariabilità di μ , saranno contrasti di ε o σ a determinare tale fenomeno.

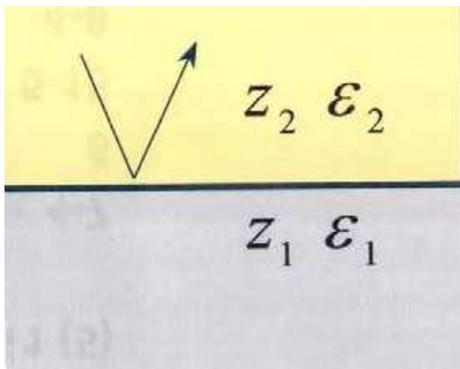


Fig. 11.1: Riflessione fra 2 mezzi per contrasto di impedenze (www.artemis-srl.it, Gennaio 2004).

Acquisizione dei dati

L'equipaggiamento utilizzato nei sistemi GPR è composto da un'antenna, che può contenere al suo interno sia trasmettente che ricevente, e da una unità di controllo con monitor (Fig. 11.2).

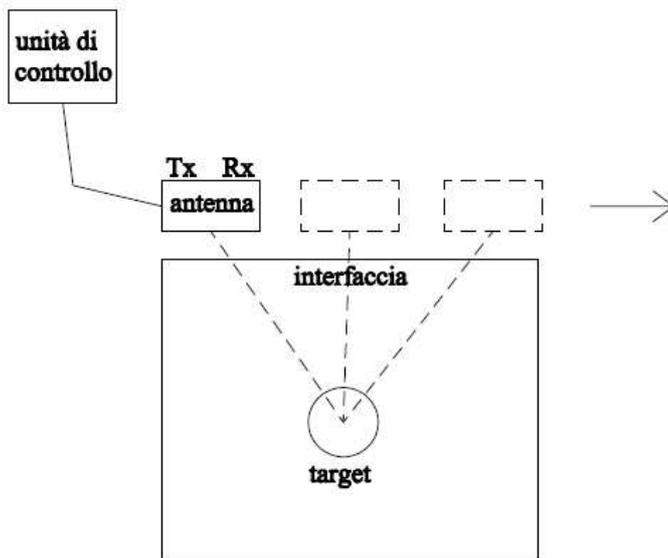


Fig. 11.2: Schema di funzionamento del georadar.

Il processo di funzionamento del georadar può essere riassunto nei seguenti punti:

1. l'unità di controllo genera un impulso trigger,
2. l'impulso viene trasmesso tramite il cavo all'elettronica trasmittente del trasduttore,
3. nel trasduttore ogni impulso trigger viene trasformato in un impulso bipolare e aumentato in ampiezza (il segnale elettrico diventa onda elettromagnetica),
4. l'impulso viene quindi trasferito in sottosuperficie attraverso l'antenna. Le dimensioni dell'antenna e le proprietà elettriche della sottosuperficie determinano la frequenza dell'energia propagata,
5. in sottosuperficie le riflessioni avvengono in corrispondenza di contrasti di proprietà dielettriche,
6. il ricevitore dell'antenna intercetta il segnale di ritorno e lo invia all'unità di controllo, dove viene processato e visualizzato.

I sistemi GPR commerciali sono progettati per produrre segnali a banda larga in maniera da poter essere utilizzati con antenne di frequenze differenti, assecondando così le necessità dell'utilizzatore. All'interno del ricevitore i dati raccolti vengono filtrati e campionati per la restituzione di un radargramma, il cui

tempo zero, non coinciderà con quello di emissione dell'impulso in quanto risulta necessario considerare il tempo di viaggio dell'onda elettromagnetica attraverso i cavi che collegano il GPR alle antenne.

La scelta dell'antenna è una fase fondamentale di una indagine georadar e si effettua considerando che, la frequenza dell'antenna deve tener conto delle caratteristiche meccaniche ed elettriche dei materiali, della risoluzione spaziale richiesta e della profondità da indagare. I sistemi GPR commerciali utilizzano solitamente antenne bipolari, costituite cioè da una trasmittente (TX) e una ricevente (RX), le cui dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda del segnale emesso. Nella configurazione monostatica trasmettitore e ricevitore sono inclusi all'interno della medesima struttura. Questa modalità utilizza per lo più antenne con frequenza medio-alta (400-1500 MHz).

Nella configurazione bistatica i due elementi sono separati e impiegano tendenzialmente basse frequenze. Le antenne non emettono segnale ad un'unica frequenza, bensì all'interno di un certo spettro (bandwidth), compreso fra $\frac{1}{2} f_c$ e $2 f_c$, con f_c frequenza centrale della banda, corrispondente ad un picco di intensità del segnale.

Ulteriore fattore da considerare nella scelta di una antenna è rappresentato dalla profondità di indagine. A causa della lunghezza del percorso dell'onda verso il target da individuare e dei fenomeni di assorbimento, l'energia di ritorno potrebbe essere più debole rispetto al rumore e quindi irrivelabile. Antenne ad alta frequenza (> 400 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali ma limitata profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti. Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, con una penalizzazione, tuttavia, in termini di risoluzione spaziale.

Interpretazione dei radargrammi

Una sezione GPR esprime l'intensità degli impulsi riflessi dal substrato in funzione del tempo di arrivo, misurato in ns, e della posizione sulla superficie lungo la quale è stata compiuta la linea di rilievo (Fig. 11.3).

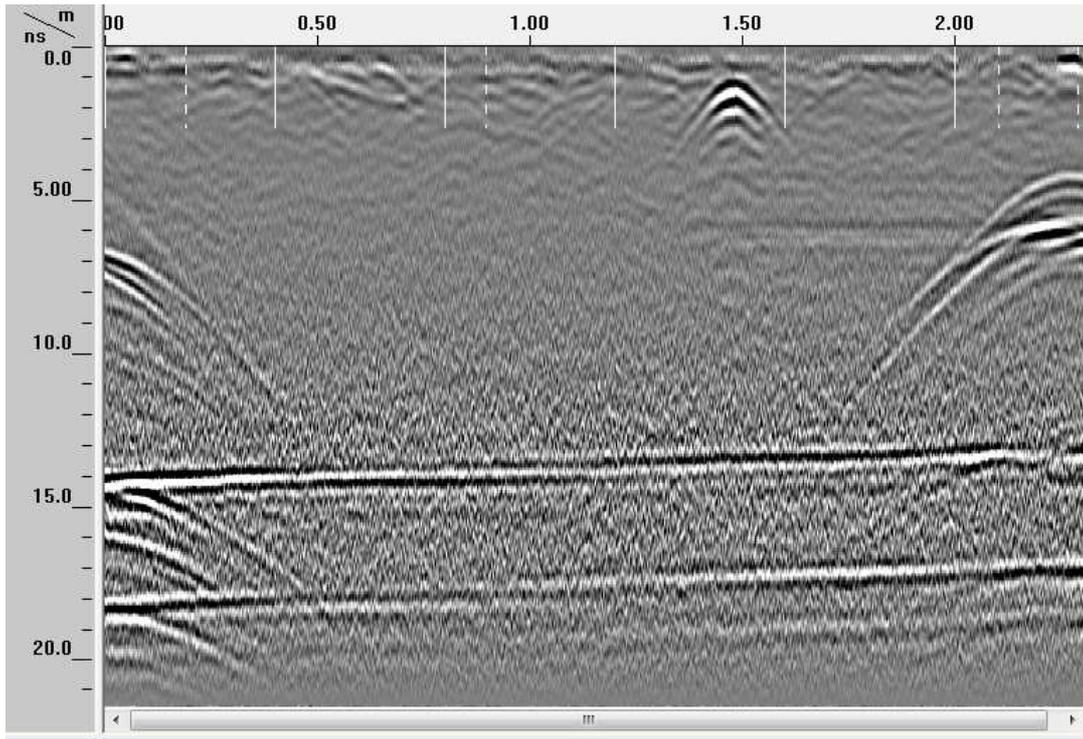


Fig. 11.3: Esempio di radargramma.

La sezione è di fatto il risultato della giustapposizione di molteplici cicli di trasmissione e ricezione degli impulsi radar; le diverse tonalità di colore (o di grigio) sono funzione dell'intensità della radiazione riflessa. Un'interpretazione delle forme risultanti dalle diverse colorazioni delle sezioni GPR è una operazione piuttosto complessa, che deve tenere conto sia delle diverse velocità di propagazione dei materiali attraversati, sia della geometria del lobo di emissione delle onde elettromagnetiche inviate nel terreno. Le antenne utilizzate da molti GPR sono direzionali, ovvero emettono secondo una direzione preferenziale. La geometria del lobo di emissione è assimilabile ad un tronco di cono, più o meno serrato, che si apre verso il basso. Di conseguenza, le radiazioni possono intercettare bersagli che non sono posti esattamente lungo la verticale; i loro riflessi giungeranno con maggiore ritardo (a fronte di un tragitto più lungo) e appariranno più profondi. Un esempio tipico di tale effetto è la forma ad iperbole mostrata in corrispondenza di

piccoli riflettori (ad esempio tubi attraversati trasversalmente, armature metalliche, ciottoli...), i cui rami ascendente e discendente sono i riflessi registrati prima e dopo il passaggio dell'antenna sulla verticale del bersaglio (Fig. 11.4). I corpi estesi lateralmente (oggetti di grandi dimensioni, stratificazioni, fratture...) risentono in maniera minore dell'effetto del cono di trasmissione e mostrano nei profili una forma più prossima a quella reale. E' dunque possibile, con una certa esperienza, fornire una interpretazione sufficientemente precisa delle anomalie radar individuate dalla sola osservazione delle sezioni. L'interpretazione di anomalie di forma complessa o la determinazione esatta delle profondità degli obiettivi richiedono un approccio diverso. In questi casi é utile ricorrere alla migrazione delle sezioni, un metodo di analisi normalmente utilizzato nella sismica a riflessione che, tenendo conto della velocità di propagazione delle onde nei diversi materiali incontrati e della geometria del lobo di emissione dell'antenna, permette di ricondurre le riflessioni alla loro effettiva posizione sulla sezione (www.georadar.it, Ottobre 2001).

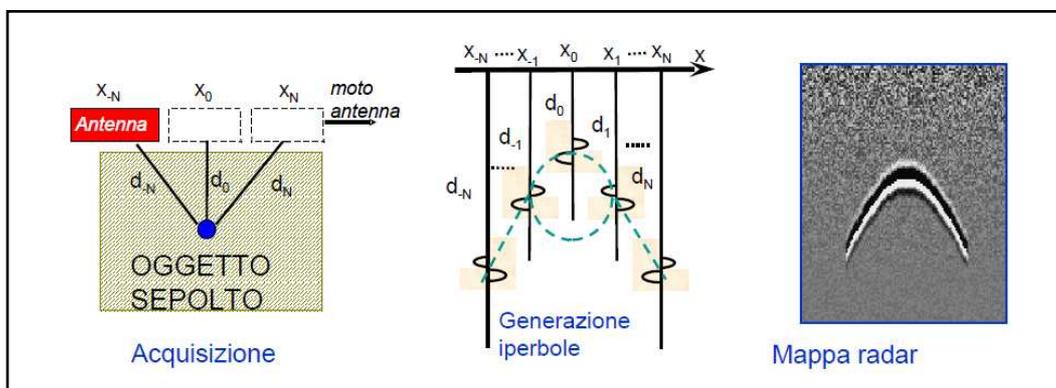


Fig. 11.4: Generazione dell'iperbole nella mappa radar (www.geoastier.com, Aprile 2009).

12. PROVE GEORADAR PRESSO IL DUOMO DI MODENA

Le prove Georadar sono state effettuate presso il Duomo di Modena in data 14/07/2010 nelle stesse aree di prova testate con le prove soniche e nel pavimento della chiesa.

Descrizione delle posizioni di prova

Sono state scelte 5 posizioni (Fig.12.1):

- posizione 1: porzione di parete di facciata (Fig. 12.4),
- posizione 2: porzione di parete laterale orientata a nord,
- posizione 3: primo pilastro di muratura sul lato sinistro della navata centrale entrando dall'ingresso principale,
- posizione 4: prima colonna di pietra sul lato sinistro della navata centrale entrando dall'ingresso principale (Fig. 12.6),
- posizione 5: pavimento della navata destra e della navata centrale (Fig. 12.5).

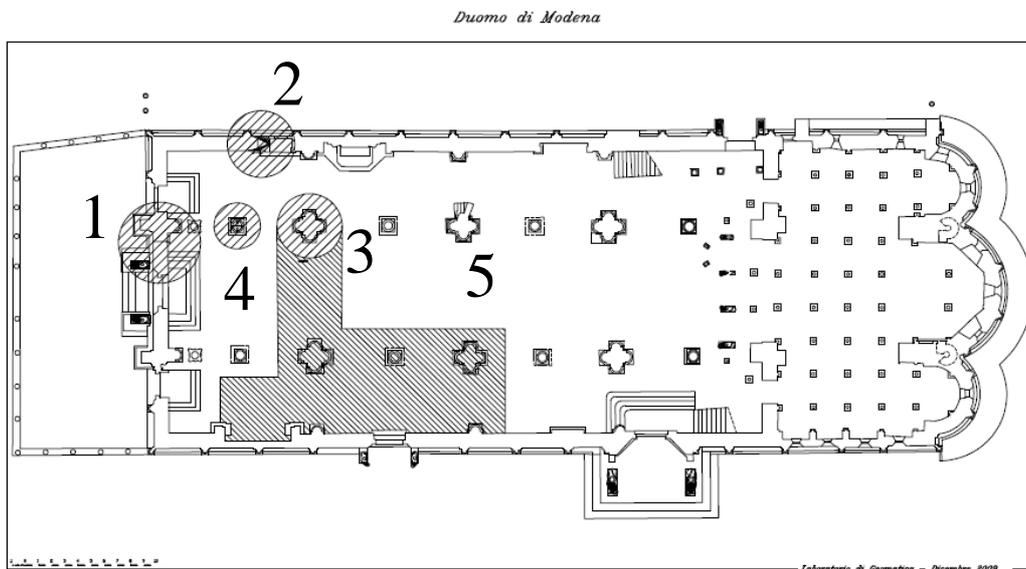


Fig.12.1: Pianta del Duomo con indicazioni delle posizioni di prova georadar (aggiornamento da tavole Prof. Capra)

Acquisizione dei dati in sito

Per l'acquisizione dei dati in sito sono state utilizzate due antenne differenti: una ad alta frequenza è servita per indagare le murature, l'altra a bassa frequenza per investigare il pavimento. L'antenna ad alta frequenza ha una risoluzione maggiore, ma il segnale si attenua dopo poche decine di centimetri, mentre l'antenna a bassa frequenza ha una risoluzione minore, ma permette di indagare il mezzo in maggior profondità. In ogni posizione di prova sono state effettuate strisciate orizzontali e strisciate verticali in modo da formare una griglia di controllo.

Strumentazione utilizzata

Antenna Palm 2.0 GHz (GSSI)

L'antenna ad alta frequenza utilizzata per le acquisizioni in sito è la Palm da 2.0 GHz della GSSI, robusta e ad alta risoluzione (sino a 8.000 campioni per traccia), dotata di cavo e survey wheel (odometro) incorporati (Fig.12.2). Ha dimensioni molto ridotte e permette di raggiungere anche zone difficilmente accessibili. Emittendo un segnale ad alta frequenza fornisce elevate risoluzioni spaziali ma limitate profondità di penetrazione, quindi è adatta per investigare spessori modesti o per fare indagini delle zone superficiali (Tab.12.1).



Fig.12.2: Antenna Palm GSSI (brochure GSSI).

Tab.12.1: Specifiche tecniche dell'antenna Palm GSSI (brochure GSSI).

Specifications
Center Frequency: 2000 MHz
Depth Range: 10-12 inches (25-35 cm)
Antenna Weight: 1.1 pounds (.49 kg)
Cable Weight: 2.1 pounds (.95 kg)
Model Number: 62000

Antenna 3101A (GSSI)

L'antenna a bassa frequenza utilizzata per le acquisizioni sul pavimento è l'antenna 3101A da 900 MHz della GSSI. È robusta, dotata di cavo e supporto per collegare la stampella, ma è sprovvista di survey wheel (odometro) (Fig.12.3). Ha dimensioni 33×18×8 cm e peso 2,3 Kg. È adatta per applicazioni che richiedono penetrazioni fino ad un metro di profondità.



Fig.12.3: Antenna 900 MHz GSSI (brochure GSSI).

Prima di iniziare i rilevamenti dall'unità di controllo sono stati impostati i parametri delle antenne (Tab. 12.2)

Tabella 12.2: Parametri impostati prima dell'inizio delle acquisizione per le due antenne.

Parametri	Palm 2.0 GHz		3101A 900 MHz	
	setup 1	setup 2	setup 1	setup 2
mode	distance	distance	time	time
samples	1024	1024	512	512
format (bit)	16	16	16	16
range (ns)	30	30	30	30
diel	10	10	12	12
rate	64	64		
scan/ unit	300	300	30	30
gain (point)	2 (18, 76)	3 (18, 60, 76)	2 (-4, 48)	2 (2, 60)
High pass (MHz)	1795	1795	225	225
Low pass (MHz)	7820	7820	2500	2500

Fasi preparatorie all'indagine

Individuate le posizioni di misura, per ogni area di prova sono state effettuate le seguenti operazioni:

- documentazione fotografica accurata,
- eidotipo (disegno proporzionato a mano libera) della porzione di parete e della posizioni di prova,
- annotazione negli appunti della posizione di acquisizione per ogni file (Fig.12.7),
- annotazione negli appunti di ogni difetto o particolarità della zona da investigare e dello stato della superficie (Fig.12.7).



Fig.12.4: Acquisizione radar sulla parete di facciata del Duomo.

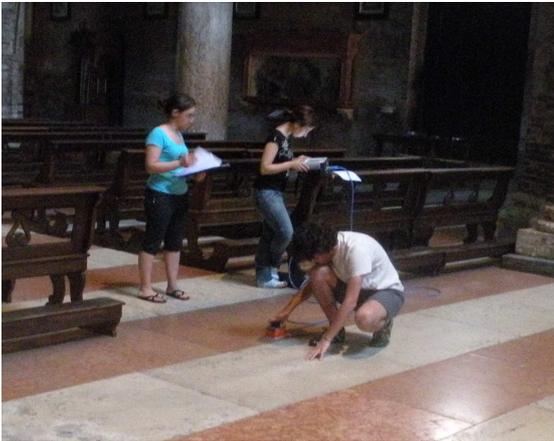


Fig.12.5: Acquisizione radar sul pavimento della navata centrale con antenna Palm 2GHz.



Fig.12.6: Acquisizione radar lungo una linea di rilievo orizzontale attorno alla colonna di pietra.

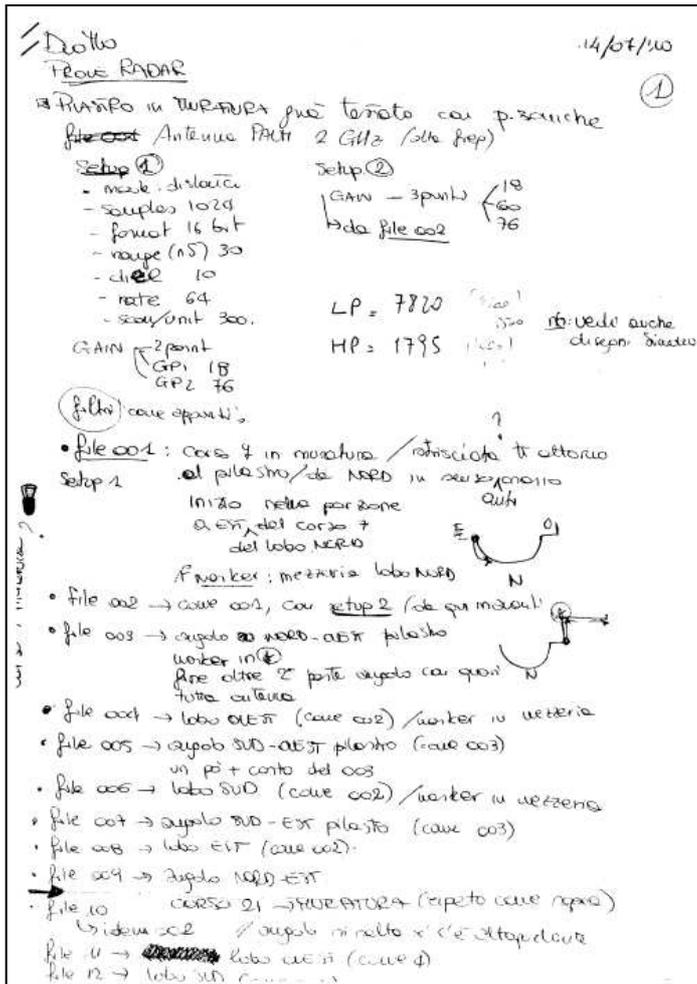


Fig.12.7: Esempio di foglio di campagna delle acquisizioni radar.

Valutazione della costante dielettrica

Nel Sistema Internazionale la costante dielettrica è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico; misura cioè la predisposizione di un materiale a trasmettere il campo. Tale grandezza è determinata dalla capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo, e quindi ridurre il campo elettrico totale nel materiale.

Come è stato spiegato al Cap.11 la velocità delle onde elettromagnetiche attraverso un mezzo può essere calcolata come:

$$V = C / \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

dove ϵ_r è la costante dielettrica relativa, μ_r è la permeabilità magnetica relativa e C è la velocità dell'onda in aria. Potendo in generale supporre che la permeabilità magnetica relativa sia circa uguale ad 1 qualunque sia il mezzo e invertendo la formula otterremo:

$$\epsilon_r = \left(\frac{C}{V}\right)^2$$

Se dal radargramma si riesce a vedere la riflessione della superficie posteriore del mezzo indagato e si conosce la misura dello spessore, allora è possibile calcolare la velocità dell'onda come relazione spazio/tempo. Nota questa velocità si può valutare la costante dielettrica del materiale indagato.

Elaborazione dei radargrammi

I radargrammi sono stati elaborati con l'utilizzo del software RADAN 6.6 della GSSI. Di seguito vengono descritte le funzioni principali del software in questione che permettono di rendere più chiaro e leggibile il file d'origine:

1. **Position/ Range:** permette di eliminare la parte iniziale dell'onda, tagliando gli scan alla base del primo picco di ampiezza (Fig.12.8). I primi due picchi di ampiezza (linea bianca e linea nera sul radargramma) indicano la riflessione superficiale, che è solitamente preceduta da un settore in grigio che si genera mentre l'onda attraversa il corpo dell'antenna prima di arrivare alla superficie da indagare. È appunto questo il settore che viene eliminato, perché non fornisce nessuna informazione utile ai fini dell'analisi.

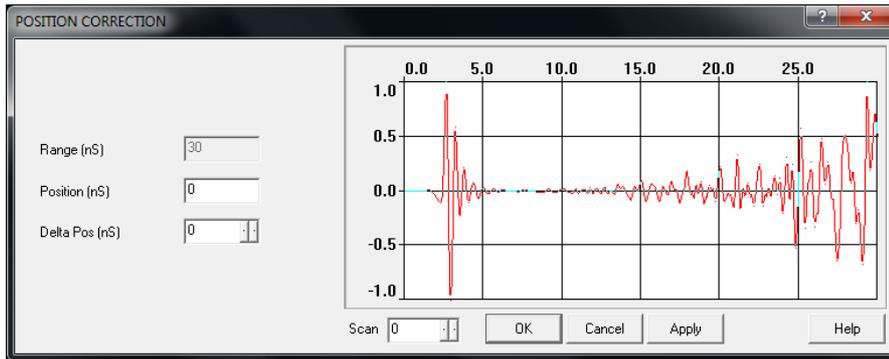


Fig.12.8: Finestra di dialogo Position/ Range su RADAN 6.6.

2. **Edit file header:** nel file header sono riportate tutte le informazioni relative al file che si sta analizzando al momento dell'acquisizione (Fig.12.9). Queste informazioni possono essere modificate anche in fase di rielaborazione. Da questa finestra è possibile riportare a zero la scala dell'asse y (Position ns) dopo aver tagliato gli scan con Position/ Range e inserire la costante dielettrica reale del materiale se nota (DielConstant). Inserendo la costante dielettrica reale del materiale è possibile visualizzare la scala dell'asse delle profondità (asse y) in metri (di default è espressa in tempo di riflessione del segnale, dunque in ns).

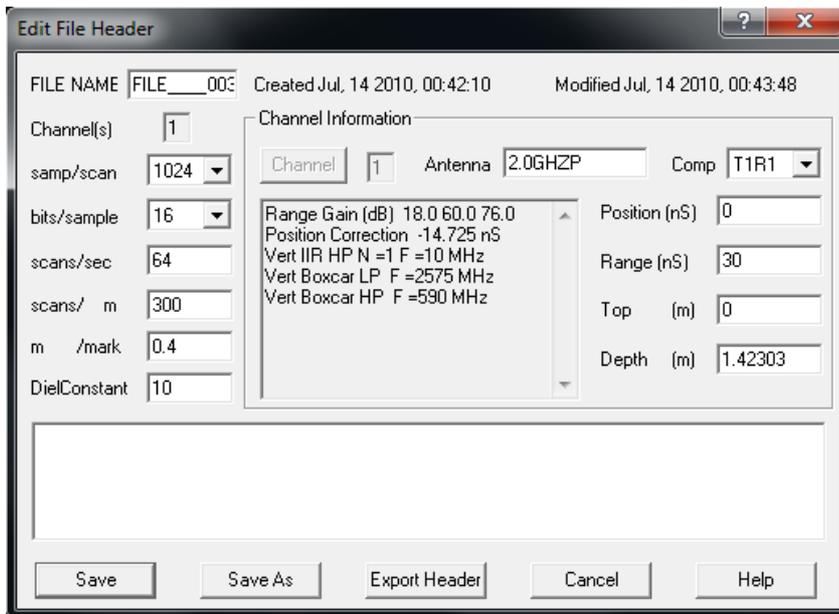


Fig.12.9: Esempio di file header.

3. **Select block:** si utilizza per selezionare la zona del radargramma che interessa analizzare. Dopo aver selezionato la zona bisogna accettare il blocco premendo il tasto destro del mouse e selezionando Accept block.
4. **FIR Filter/ Background removal:** permette di eliminare le linee bianche e nere (molto marcate sui radargrammi) relative ai picchi d'ampiezza dovuti alla riflessione superficiale, che potrebbero nascondere delle informazioni utili come ad esempio le iperboli generate dalla riflessione sui giunti di malta di una muratura. Questo filtro va però applicato con prudenza, perché se applicato in modo non consapevole potrebbe eliminare anche informazioni importanti oltre alle linee che indicano la riflessione superficiale (Fig.12.10 e 12.12).

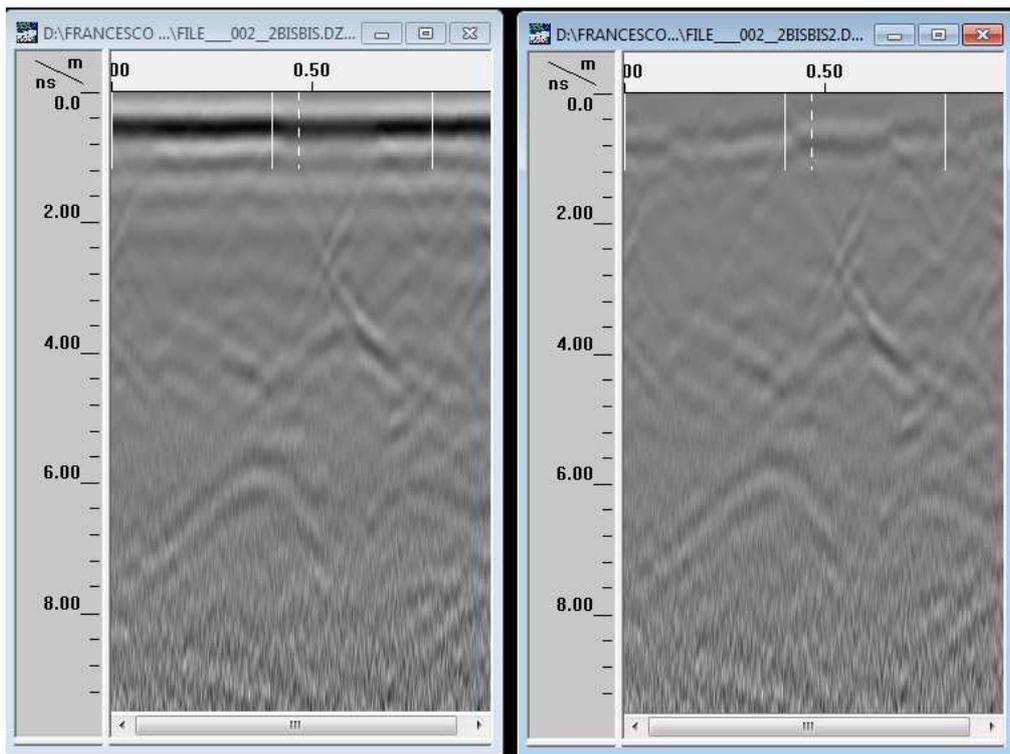


Fig.12.10: Esempio di radargramma prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'applicazione del background removal.

5. **FIR Filter/ High pass, Low pass:** serve per eliminare le code dello spettro delle frequenze che si può visualizzare da View/ O-scope/ Spectrum (Fig.12.11). Le case produttrici delle antenne forniscono i valori di High e Low pass nella scheda tecnica, ma questi possono essere anche impostati indipendentemente dai valori consigliati.

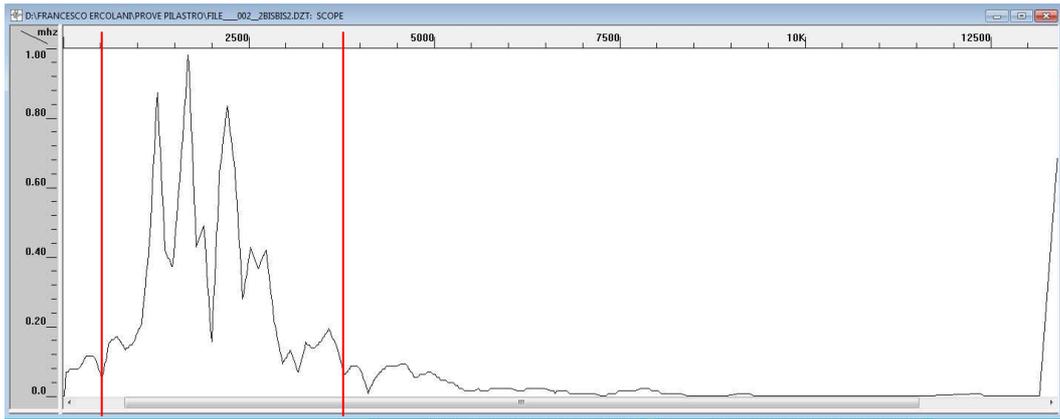


Fig.12.11: Esempio di spettro del segnale dell'antenna da 2 GHz.

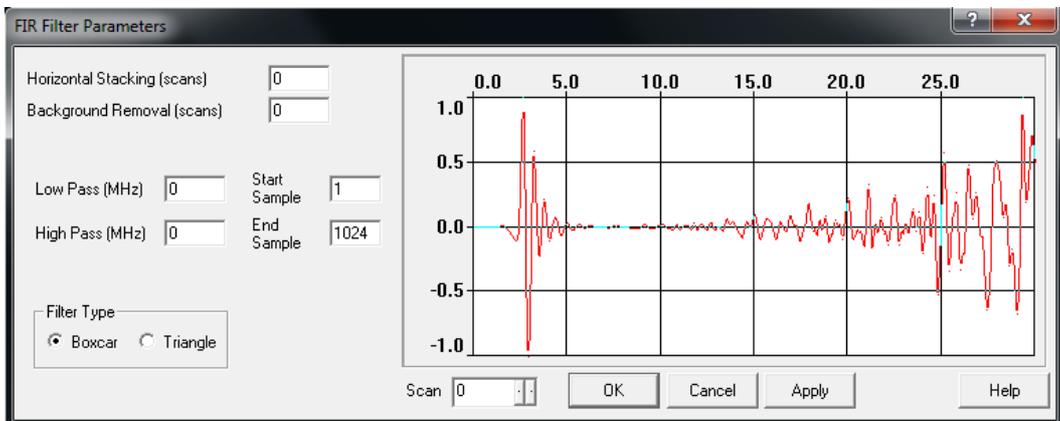


Fig.12.12: Finestra di dialogo FIR Filter su RADAN 6.6.

6. **Process/ Range gain:** permette di amplificare il segnale per dare più contrasto e risalto alle informazioni del radargramma (Fig.12.14). È possibile scegliere tra diversi tipi di guadagno (linear, exponential e automatic) e indicare in quanti punti suddividere l'intervallo. Solitamente si utilizza il guadagno lineare con al massimo due punti, per evitare di

alterare informazioni che potrebbero invece essere significative (Fig.12.13).

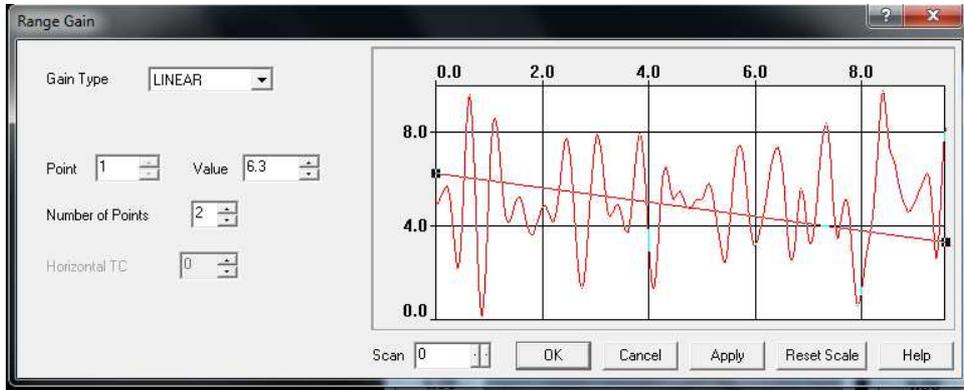


Fig.12.13: Finestra di dialogo Range gain su RADAN 6.6.

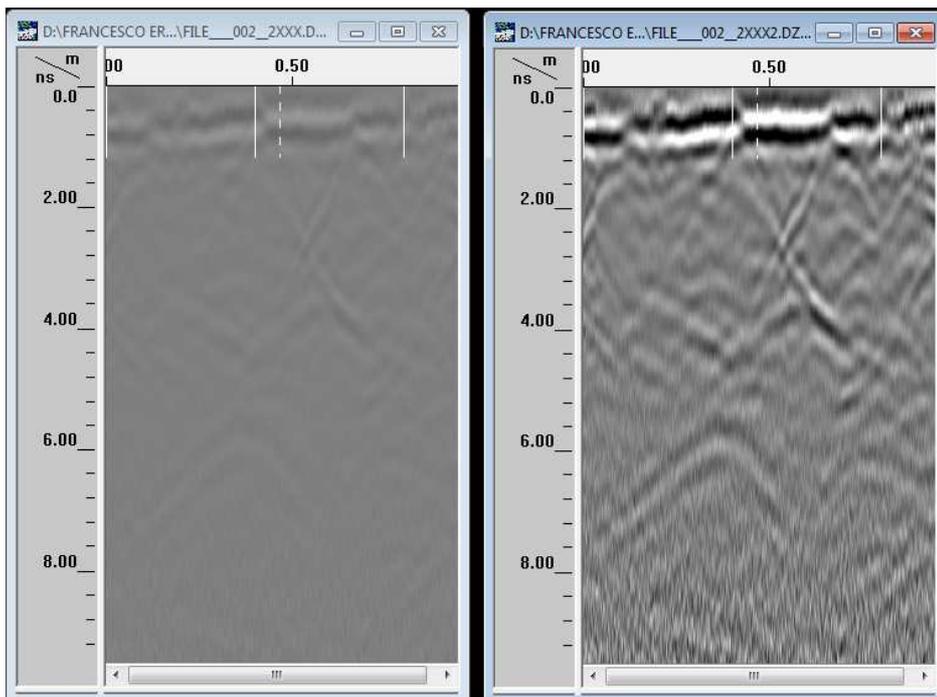


Fig.12.14: Esempio di radargramma prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'applicazione del Range gain.

In tutti i radargrammi elaborati i segmenti bianchi sulla scala orizzontale sono distanziati di 40 cm. Durante l'acquisizione dati possono essere aggiunti dei segni (mark) in posizioni d'interesse (segmenti verticali tratteggiati).

Facciata, posizione 1

Nella facciata sono state eseguite 2 strisciate verticali e 3 strisciate orizzontali sia nel paramento esterno che in quello interno per un totale di dieci acquisizioni. Da ricostruzioni storiche si sa che in questa zona della facciata spessa 116 cm doveva essere presente una scala che conduceva al matroneo. L'accesso alla scala è stato poi chiuso ricostruendo il muro; con le prove georadar si cercano anche informazioni che attestino questo fatto.

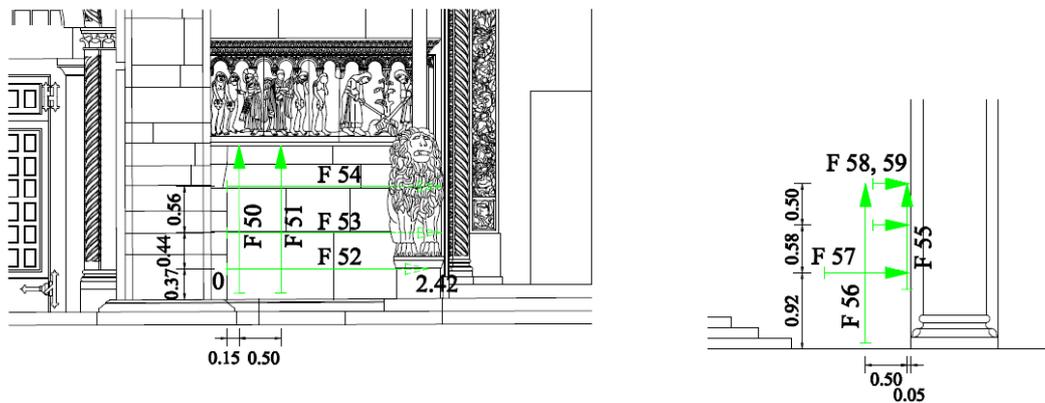


Fig. 12.15: Griglia di prova in esterno alla facciata (a sinistra) e in interno (a destra).

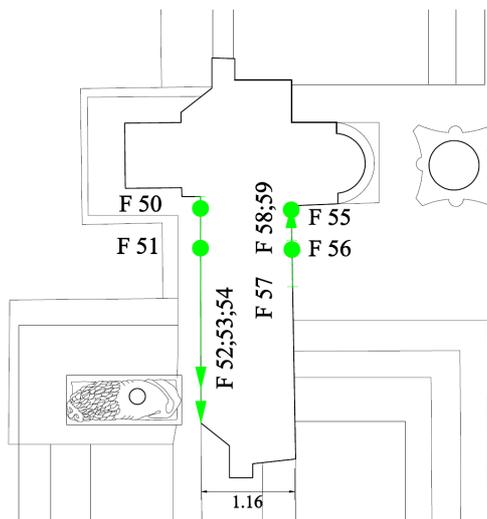


Fig. 12.16: Dettaglio della facciata, pianta con direzioni di prova orizzontali da sinistra e verticali dal basso.

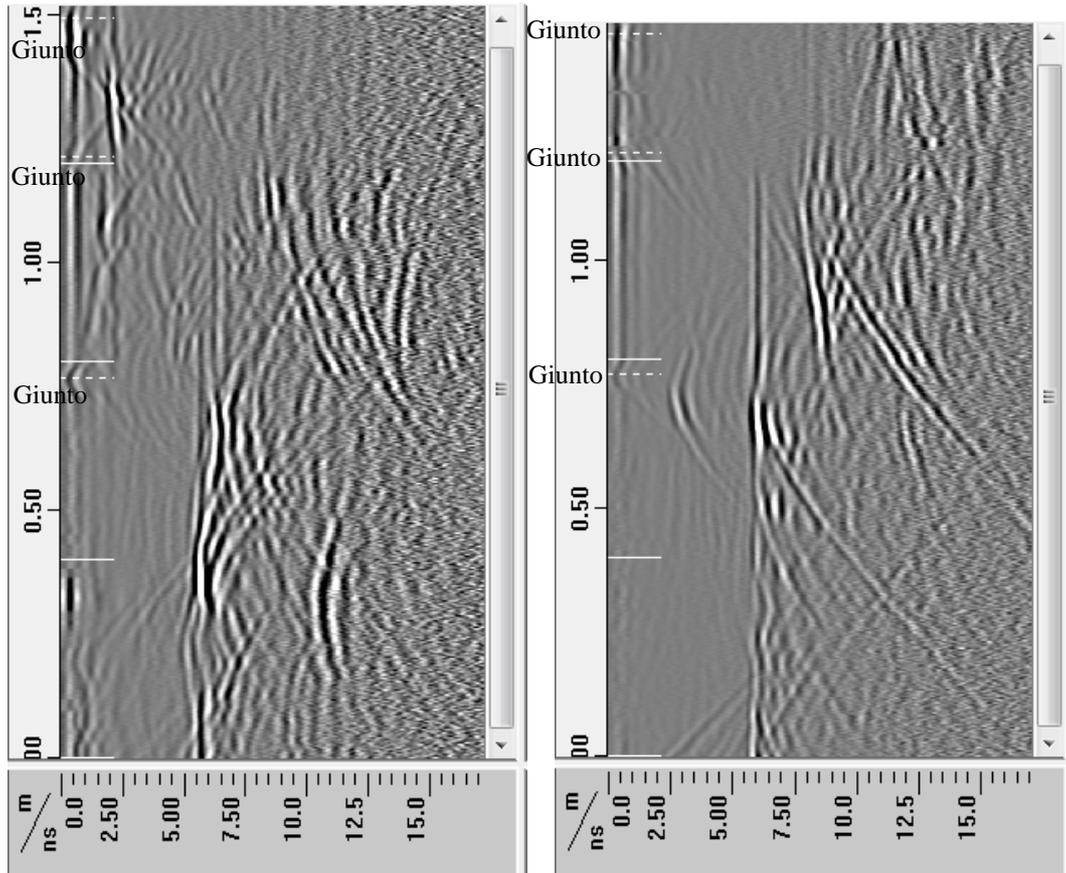


Fig. 12.17: Posizione 1, paramento esterno: radargramma F50, verticale dal basso a 15 cm dalla lesena (a sinistra) e F51, verticale dal basso a 65 cm dalla lesena (a destra).

I mark (linee tratteggiate nel radargramma) sono stati messi quando l'antenna si trovava sopra un giunto tra un concio e l'altro ed infatti si possono notare delle iperboli proprio in prossimità dei mark. È ben visibile anche la linea di riflessione del corso più interno di pietre, che però sembra più arretrata superato il terzo mark. Ciò potrebbe significare che la terza fila di pietre superficiali abbia uno spessore maggiore rispetto alle prime due file. Le altre iperboli visibili indicano le riflessioni degli spigoli dei conci lapidei (Fig. 12.17).

Anche dalle strisciate orizzontali è chiaramente visibile la riflessione del corso di pietre e le iperboli superficiali che indicano la riflessione dei giunti tra i conci (anche qui indicati con i mark) (Fig. 12.18).

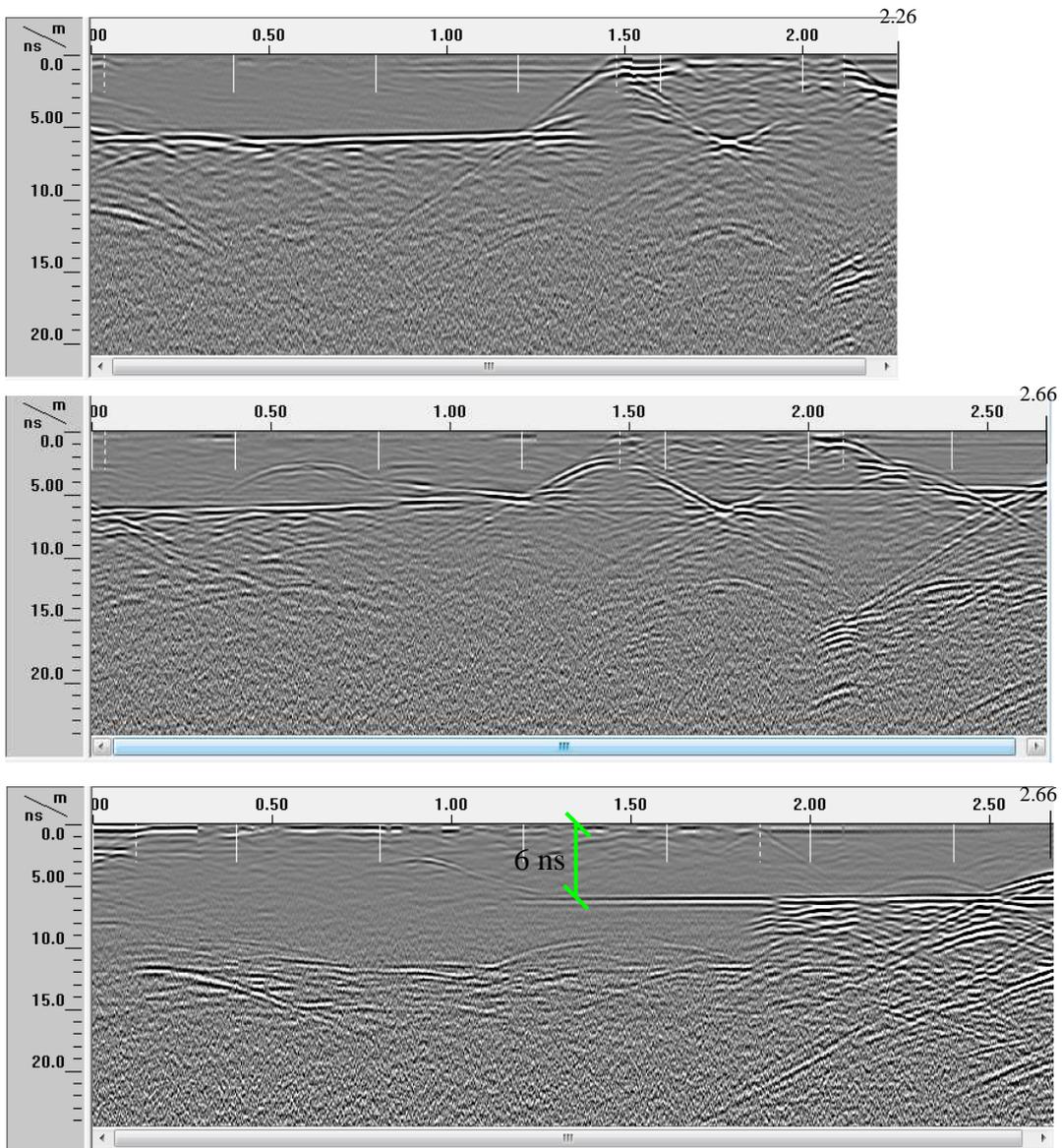


Fig. 12.18: Posizione 1, paramento esterno: radargramma F52, orizzontale a 37 cm sopra il gradino (in alto); F53, orizzontale a 81 cm sopra il gradino (al centro) e F54, orizzontale a 137 cm sopra il gradino (in basso).

Sui radargrammi analizzati è ben visibile una superficie di riflessione interna (linea orizzontale sul radargramma) che indica la riflessione del paramento esterno della muratura. Per valutare la costante dielettrica sono state fatte due ipotesi sullo spessore delle pietre di rivestimento, considerando prima 15 cm e poi 40 cm. Le costanti dielettriche così stimate valgono:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{C}{V} \right)^2 = \left(\frac{300000000}{\frac{0,15}{0,000000003}} \right)^2 = 36$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{C}{V} \right)^2 = \left(\frac{300000000}{\frac{0,40}{0,000000003}} \right)^2 = 5$$

Confrontando questi valori con quelli presenti in letteratura ci si accorge che la seconda ipotesi è quella più verosimile e che quindi le pietre del rivestimento esterno non sono lastre, ma blocchi.

I radargrammi acquisiti sul paramento interno non fornivano informazioni aggiuntive ed erano di qualità inferiore rispetto a quelli acquisiti in esterno perché la zona di lavoro era di dimensioni inferiori.

Parete nord, posizione 2

In questa area sono state acquisite 3 strisciate orizzontali e 3 verticali nel paramento esterno, 2 orizzontali e 2 verticali in quello interno. Anche questa zona è stata ricostruita recentemente dopo l'abbattimento di una piccola cappella.

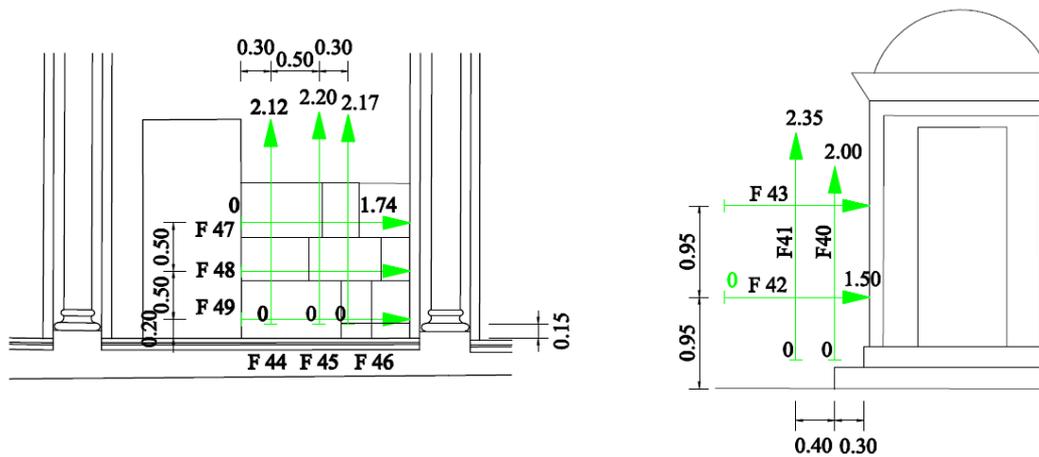


Fig.12.19: Parete nord, prospetti esterno e interno con linee e direzioni di prova.

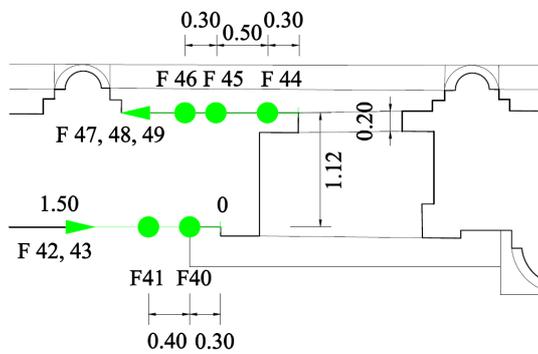


Fig.12.20: Parete nord, pianta con direzioni di prova orizzontali e verticali.



Fig. 12.21: Vista della parete nord dall'interno.

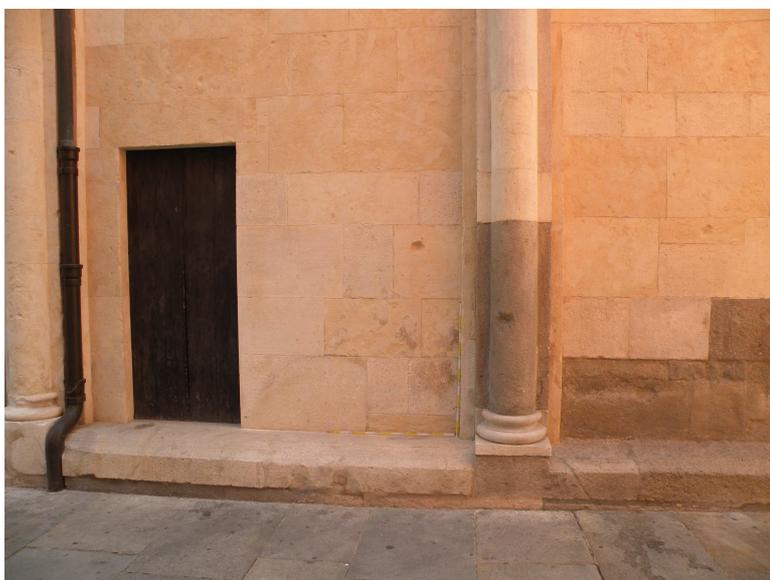


Fig. 12.22: Vista della parete nord dall'esterno.

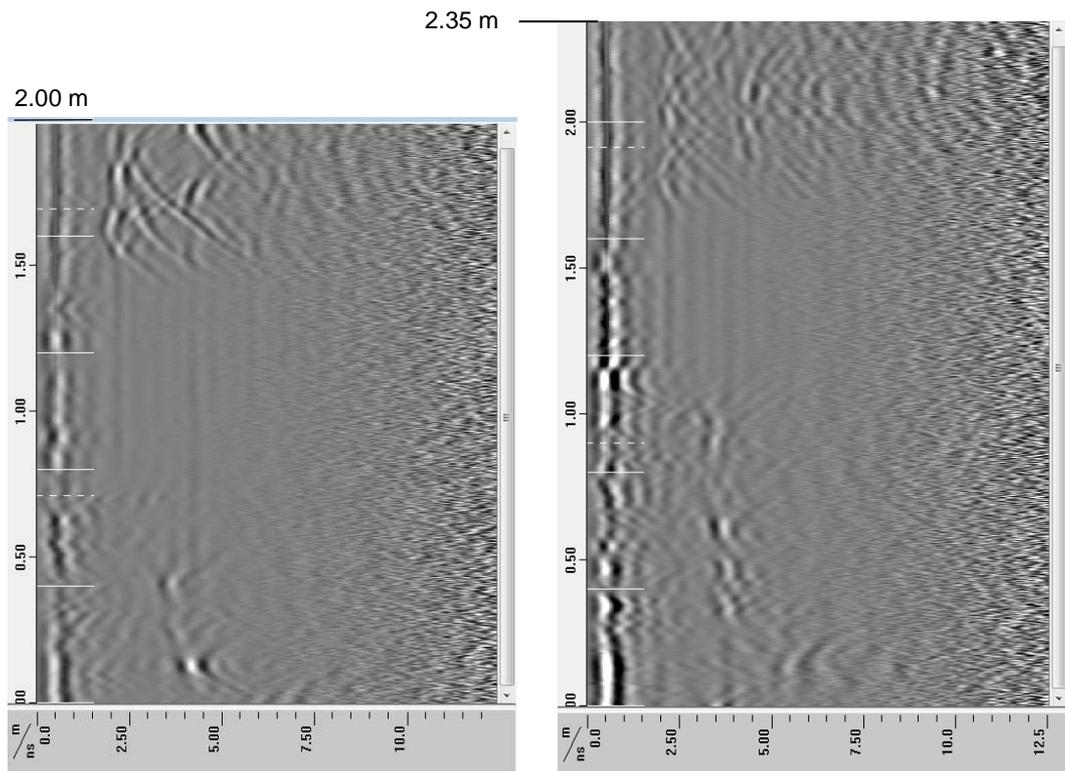


Fig. 12.23: Posizione 2, paramento interno: radargramma F40, verticale dal basso a 30 cm dal portale (a sinistra) e F41, verticale dal basso a 70 cm dal portale (a destra).

Sono molto chiare le iperboli di riflessione dei giunti di malta tra i mattoni superficiali e quelle degli spigoli o dei giunti della seconda fila interna di mattoni. Queste ultime sono però presenti solo nella parte alta e nella parte bassa del radargramma come se nella zona centrale non fossero presenti mattoni, ma un riempimento omogeneo (Fig.12.23).

Nelle strisciate orizzontali risultano evidenti le iperboli di riflessione dei giunti fino al terzo corso interno di mattoni. Si conferma anche che alla quota più alta (1,9 m da terra) il paramento esterno risulta leggermente meno spesso di quello a quota inferiore (1 m da terra) (Fig.12.24), come già visibile nei radargrammi verticali (Fig.12.23).

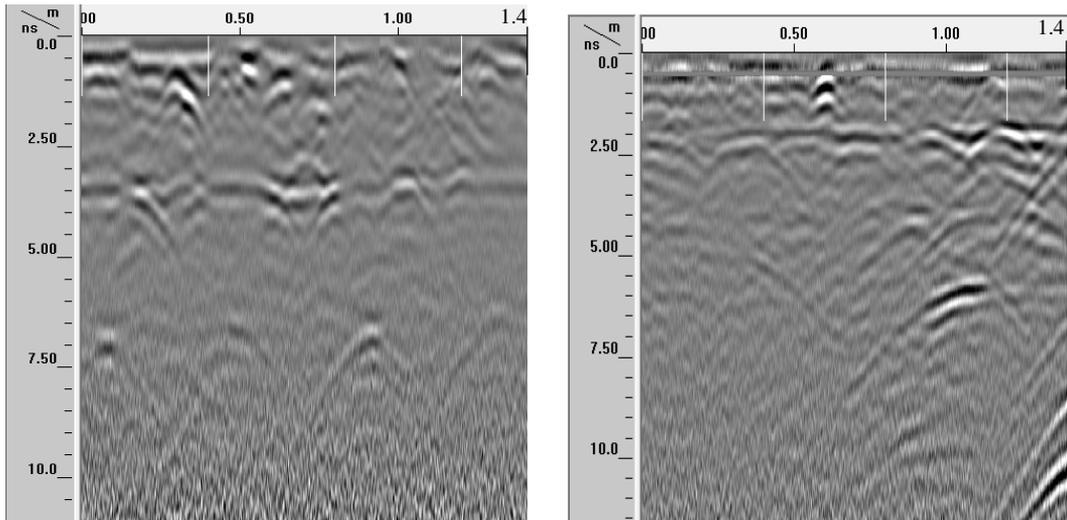


Fig. 12.24: Posizione 2, paramento interno: radargramma F42, orizzontale da Sx a Dx a 1 m da terra (a sinistra) e F43, orizzontale da Sx a Dx a 1,9 m da terra (a destra).

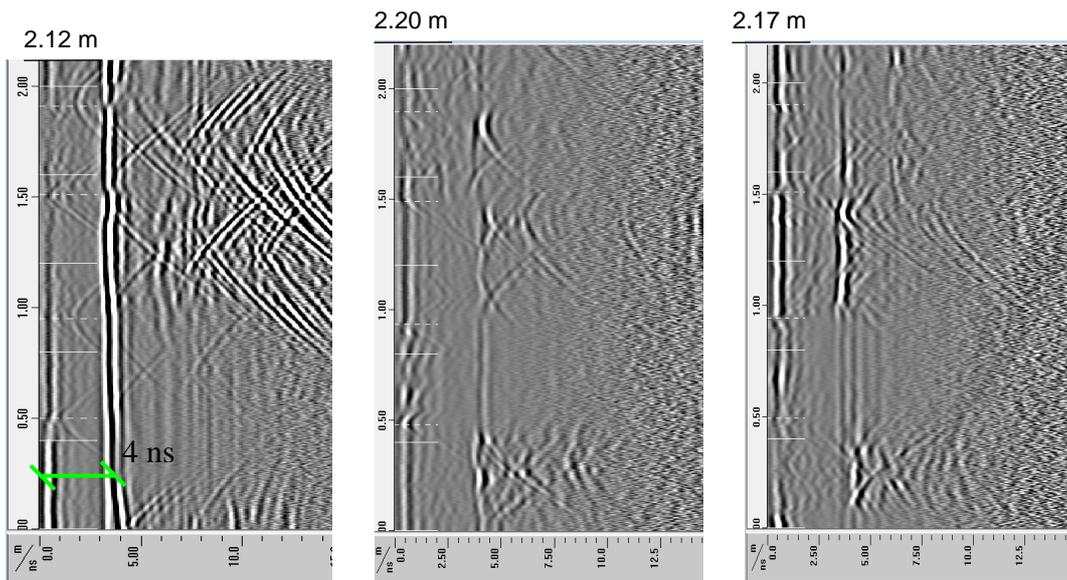


Fig. 12.25: Posizione 2, paramento esterno: radargramma F44, verticale dal basso a 30 cm dalla porta (a sinistra); F45, verticale dal basso a 80 cm dalla porta (al centro) e F46, verticale dal basso a 110 cm dalla porta (a destra).

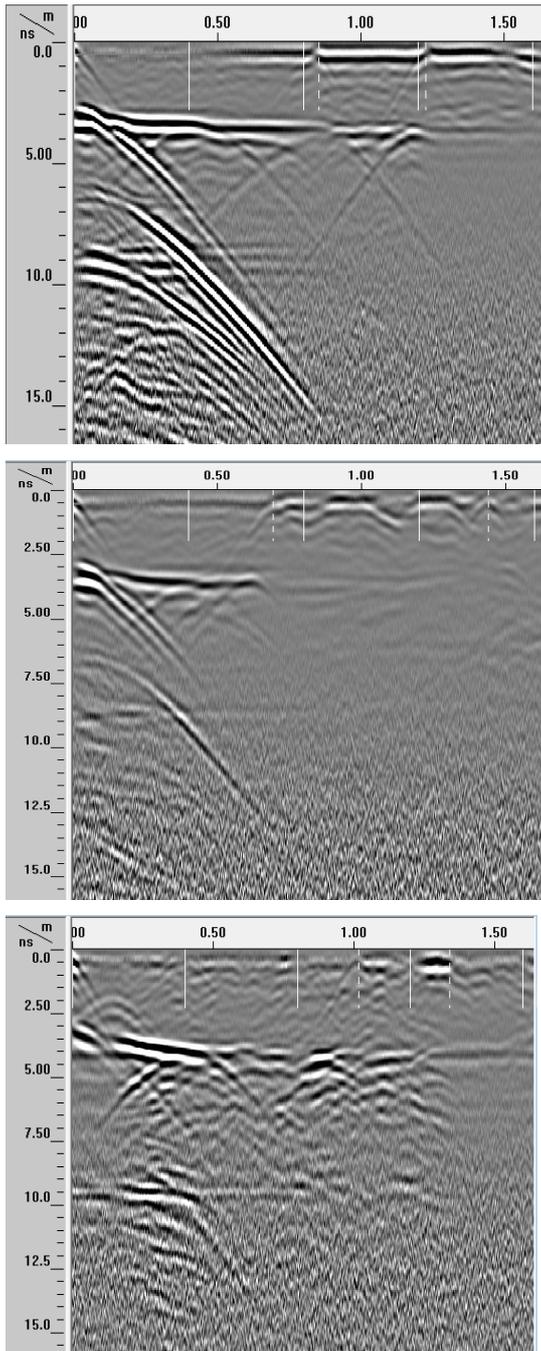


Fig. 12.26: Posizione 2, paramento esterno: radargramma F47, orizzontale da Sx a Dx a 120 cm dallo scalino (in alto); F48, orizzontale da Sx a Dx a 70 cm dallo scalino (al centro) e F49, orizzontale da Sx a Dx a 20 cm dallo scalino (in basso).

Nei radargrammi precedenti si notano un buon numero di iperboli sovrapposte che si pensa siano generate dagli spigoli dei conci lapidei esterni della muratura.

Infatti per creare un maggior ammorsamento tra malta e pietra l'elemento non aveva solitamente una pianta rettangolare, ma presentava il lato posteriore più corto (Fig.12.27).

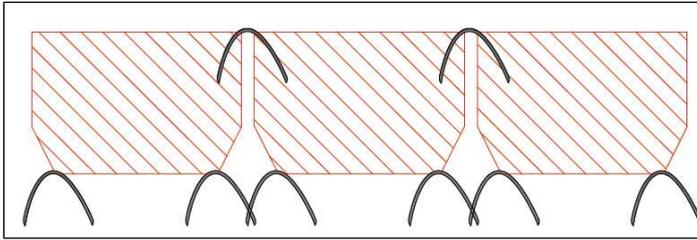


Fig.12.27: Iperboli generate dalla geometria dei concetti murari esterni (vista in pianta).

Sui radargrammi delle figure 12.25 e 12.26 è ben visibile una superficie di riflessione interna (linea verticale sul radargramma) che indica la riflessione del paramento esterno della muratura. Per valutare la costante dielettrica sono state fatte due ipotesi sullo spessore delle pietre di rivestimento, considerando prima 15 cm e poi 40 cm. Le costanti dielettriche così stimate valgono:

$$\epsilon_1 = \left(\frac{C}{V}\right)^2 = \left(\frac{300000000}{\frac{0,15}{0,000000002}}\right)^2 = 16$$

$$\epsilon_2 = \left(\frac{C}{V}\right)^2 = \left(\frac{300000000}{\frac{0,40}{0,000000002}}\right)^2 = 2,25$$

Confrontando questi valori con quelli presenti in letteratura ci si accorge che la prima ipotesi dà un valore piuttosto alto mentre la seconda un valore decisamente basso; quindi il paramento esterno potrebbe essere di uno spessore medio tra 15 e 40 cm.

Pilastro di muratura, posizione 3

Nel pilastro sono state acquisite strisciate orizzontali a 2 diverse quote ovvero al settimo ($h = 107$ cm) e al ventunesimo ($h = 212$ cm) corso di mattoni. Alla prima quota sono state eseguite 9 strisciate, alla seconda 6 strisciate. Sono state fatte acquisizioni anche in verticale in 3 punti dei lobi (in mezzeria ed alle due estremità) e in altre zone di interesse per un totale di 16 strisciate.

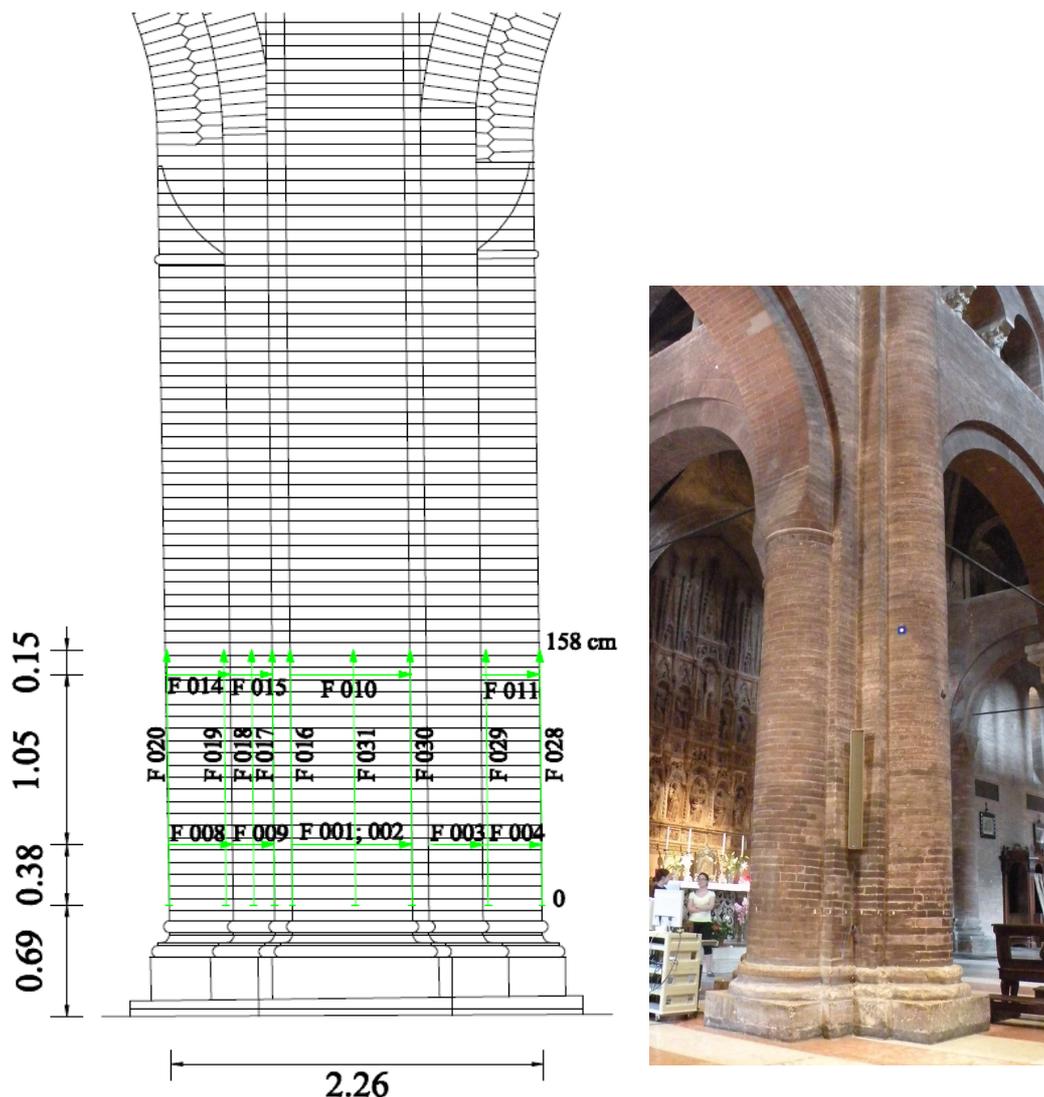


Fig.12.28 e 12.29: Prospetto nord del pilastro di muratura con posizioni di prova e foto del pilastro visto da sud-ovest.

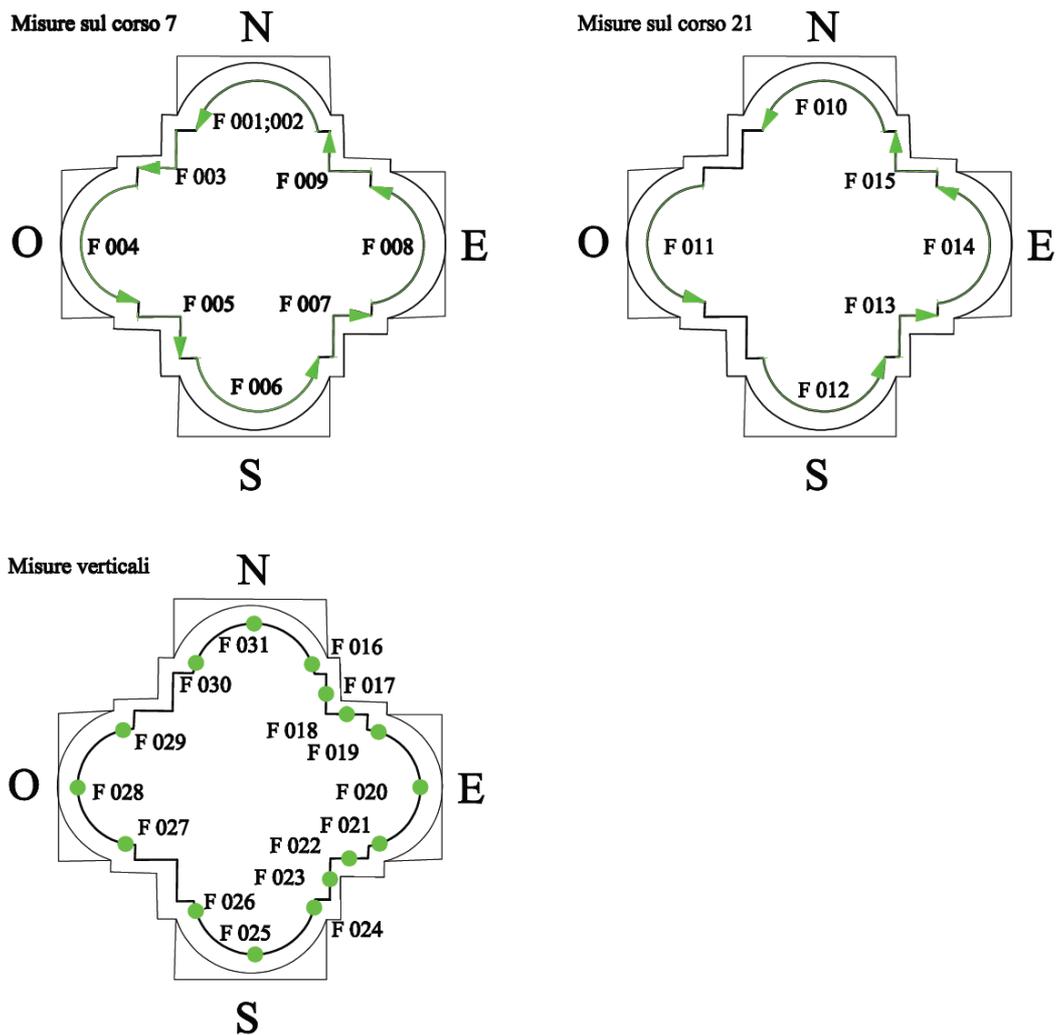


Fig.12.30: Sezioni del pilastro di muratura con posizioni di prova.

Sui radargrammi relativi ai lobi del corso 7 e del corso 21 sono molto evidenti le iperboli di riflessione dei giunti tra i mattoni sia superficiali che delle file più interne. Nei radargrammi del lobo ovest alle due quote è visibile una superficie di riflessione interna che potrebbe indicare la profondità del paramento esterno (Fig.12.31 e 12.32).

Al file F04 non è stato applicato il background removal perché altrimenti si eliminava anche la riflessione della superficie più interna (Fig.12.31).

12. Prove georadar presso il Duomo di Modena

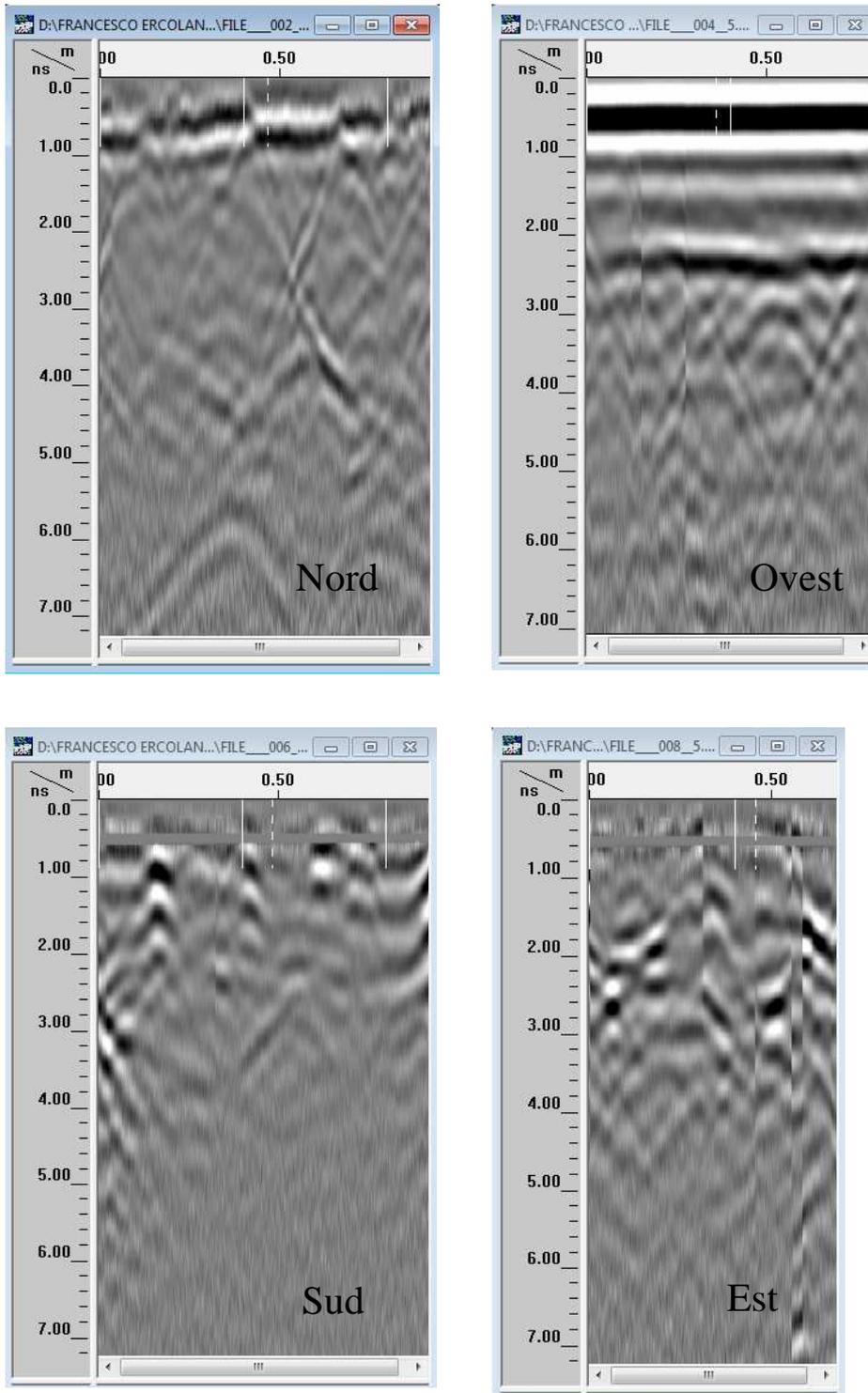


Fig. 12.31: Posizione 3, corso 7: radargramma F02, orizzontale da Sx a Dx lobo nord (in alto a Sx); F04, orizzontale da Sx a Dx lobo ovest (in alto a Dx); F06, orizzontale da Sx a Dx lobo sud (in basso a Sx) e F08 orizzontale da Sx a Dx lobo est (in basso a Dx).

12. Prove georadar presso il Duomo di Modena

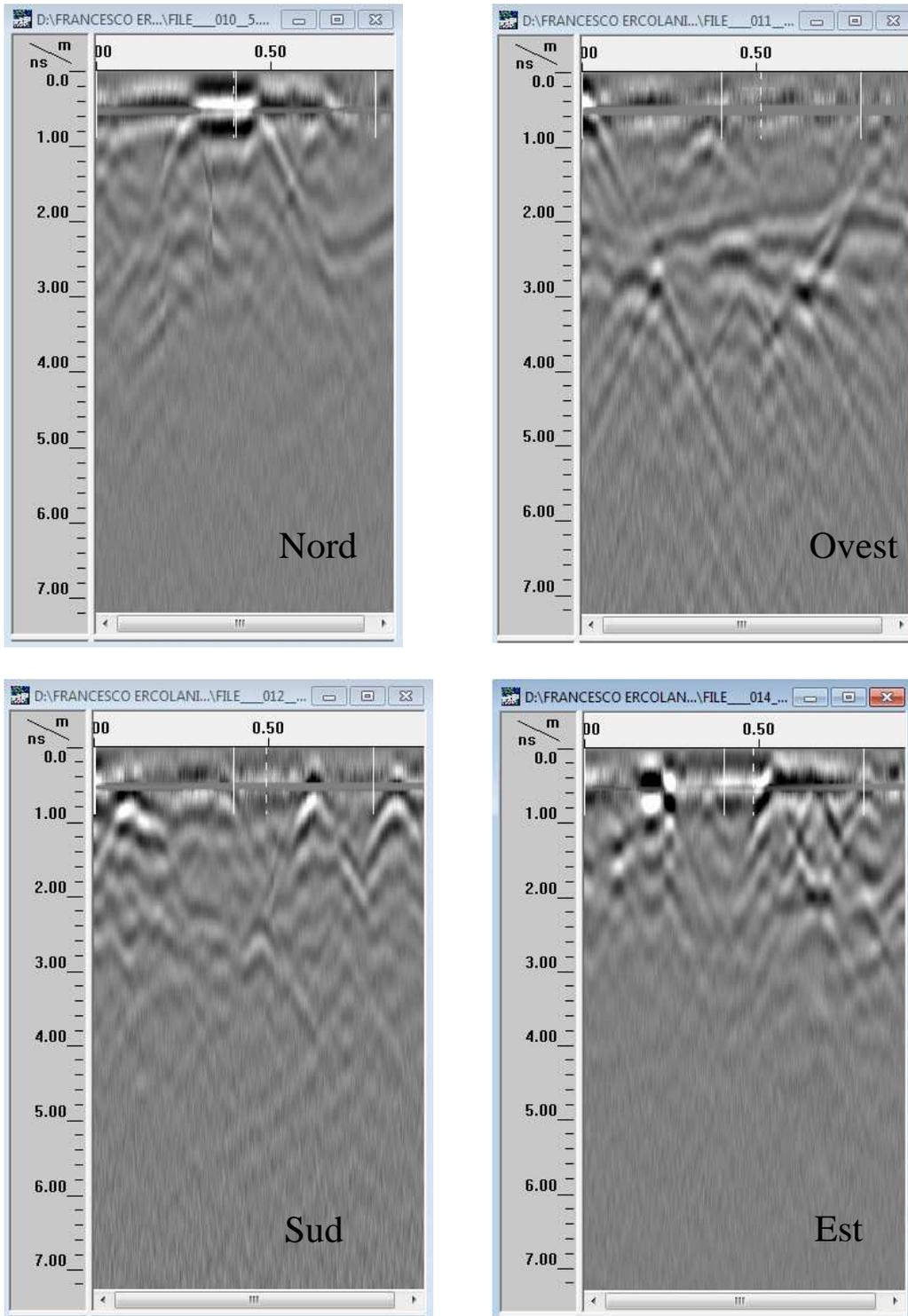
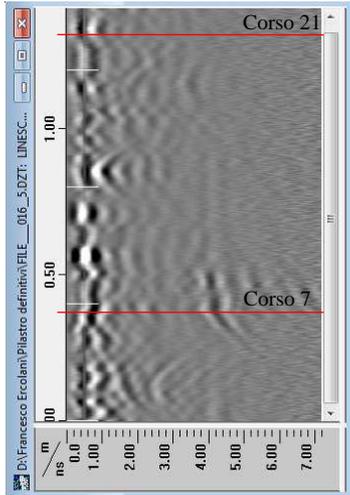
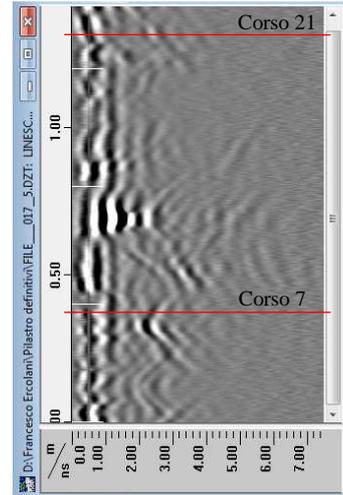


Fig. 12.32: Posizione 3, corso 21: radargramma F10, orizzontale da Sx a Dx lobo nord (in alto a Sx); F11, orizzontale da Sx a Dx lobo ovest (in alto a Dx); F12, orizzontale da Sx a Dx lobo sud (in basso a Sx) e F14 orizzontale da Sx a Dx lobo est (in basso a Dx).

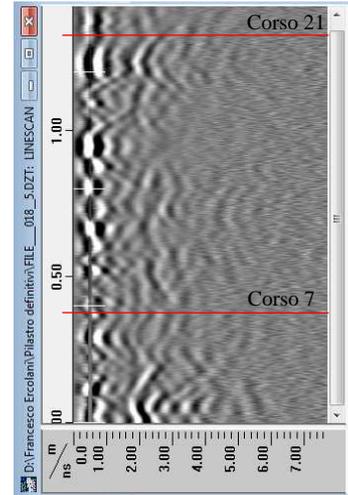
12. Prove georadar presso il Duomo di Modena



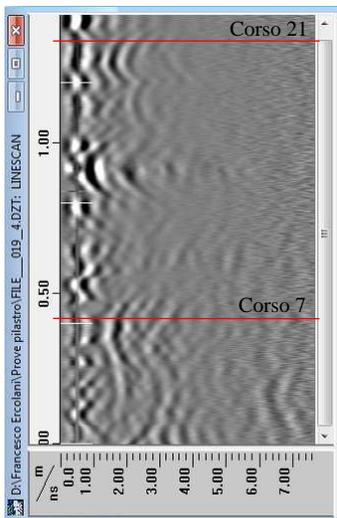
F16 – lobo N, verso E



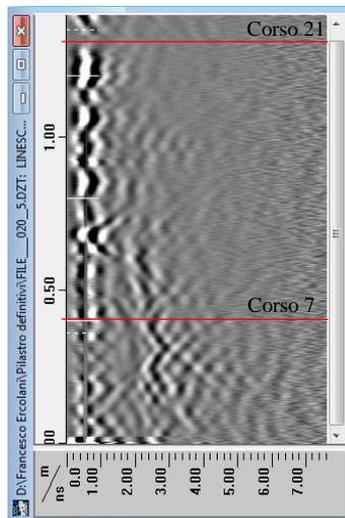
F17 – angolo N - E



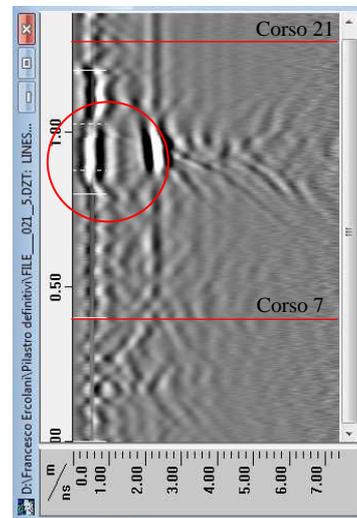
F18 – angolo E - N



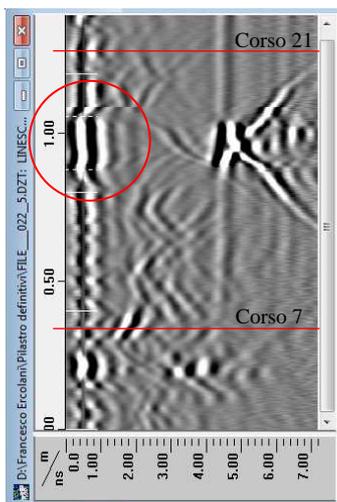
F19 – lobo E, verso N



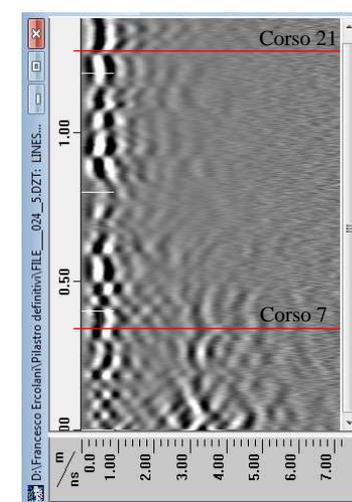
F20 – lobo E



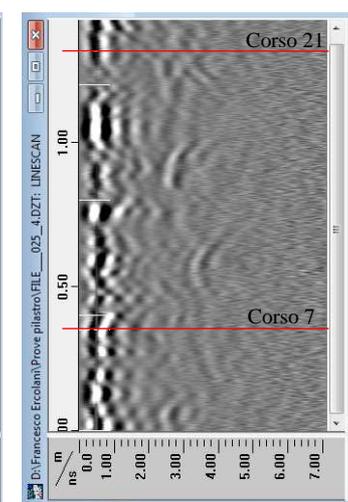
F21 – lobo E, verso S



F22 – angolo E - S



F24 – lobo S, verso E



F25 – lobo S

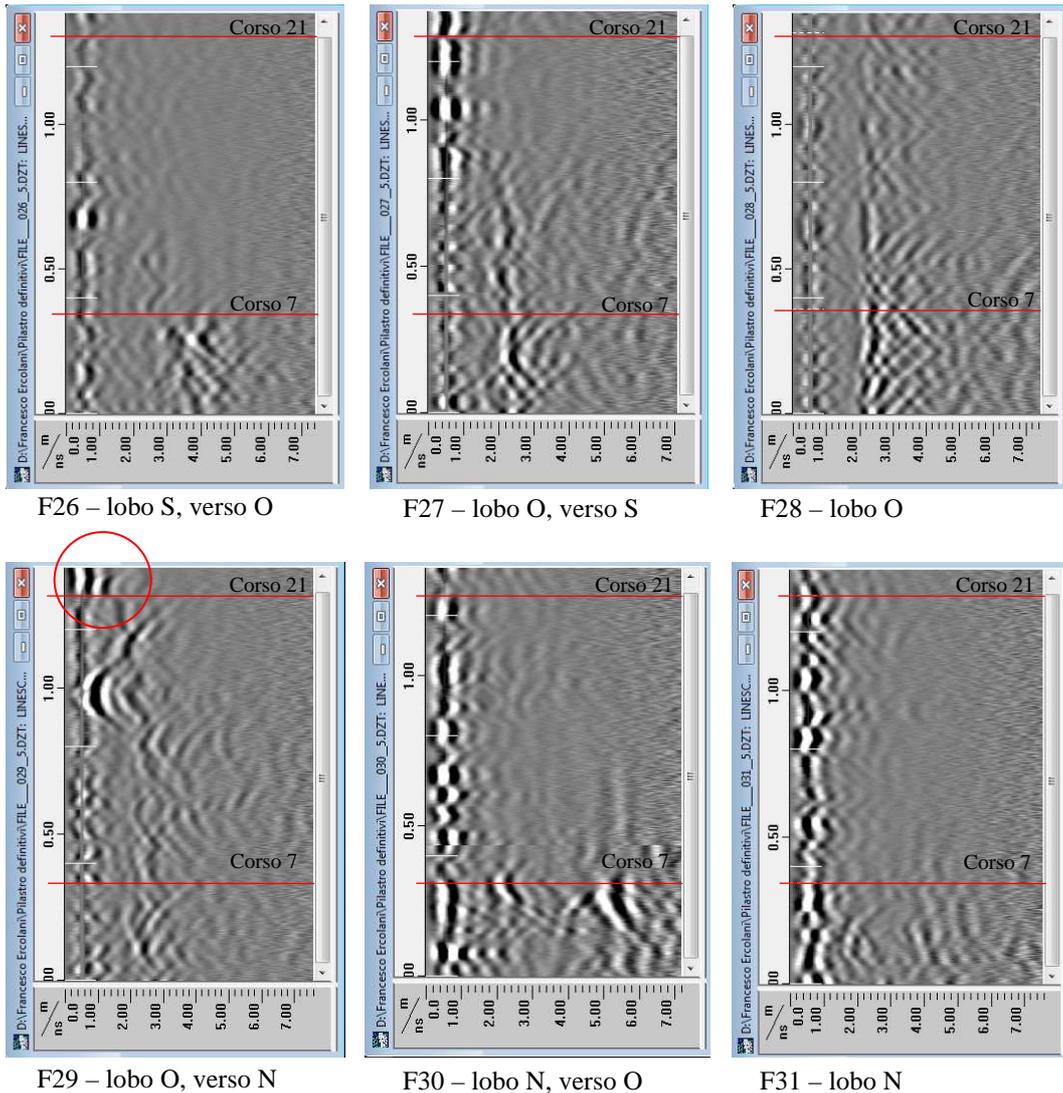


Fig. 12.33: Posizione 3: radargrammi verticali da F16 a F31 (cfr Fig.12.30).

Nel radargramma F29 è evidente la riflessione di un rappazzo che va dal corso 21 al corso 23. Nei radargrammi F21 e F22 è molto netta la riflessione di una pietra che prende il corso 14, 15 e 16. In alcune misure verticali le iperboli di riflessioni dei giunti e dei mattoni sono presenti solo nella parte bassa del radargramma come se dopo una certa quota all'interno del pilastro si abbandonò la muratura ad orditura regolare (Fig.12.33).

Colonna di pietra, posizione 4

Nella colonna sono state effettuate 4 acquisizioni orizzontali lungo tutta la circonferenza partendo da nord a quattro quote differenti (45, 70, 140 e 260 cm) e 4 acquisizioni verticali in prossimità dei quattro punti cardinali.

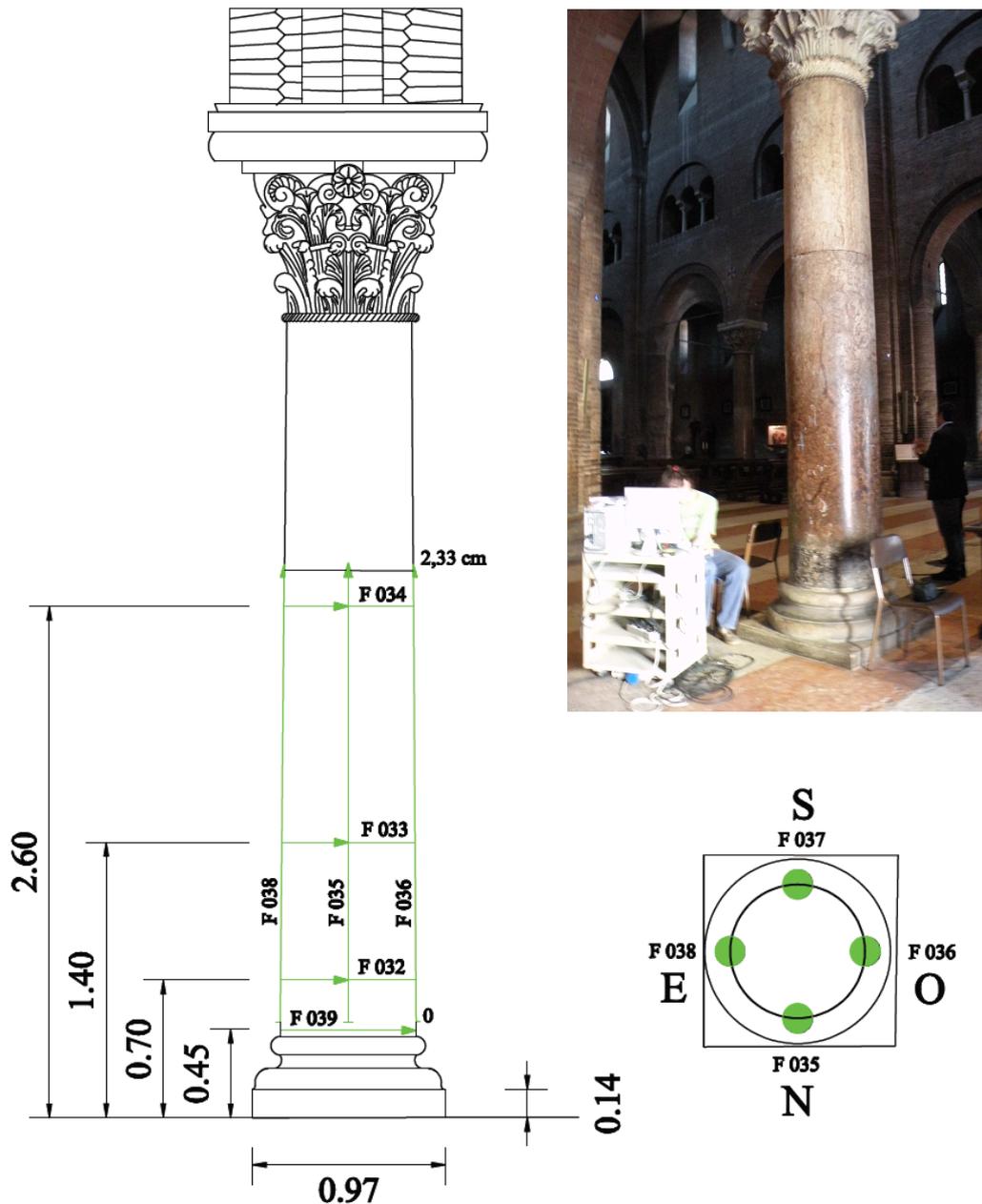


Fig. 12.34 e 12.35: Prospetto e pianta della colonna di pietra con posizioni di prova e foto della colonna vista da nord ovest.

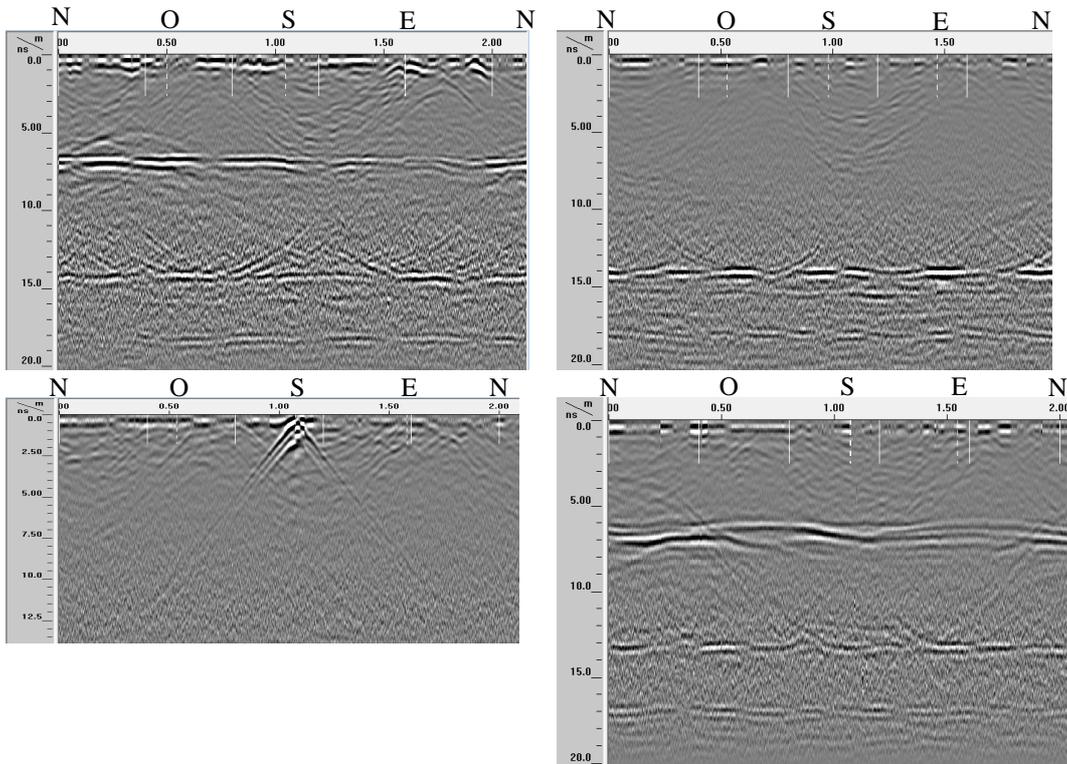


Fig. 12.36: Posizione 4: radargramma F39, orizzontale a 45 cm dal pavimento (in alto a Sx); F32, orizzontale a 70 cm dal pavimento (in alto a Dx); F33, orizzontale a 140 cm dal pavimento (in basso a Sx) e F34, orizzontale a 260 cm dal pavimento (in basso a Dx).

Dai radargrammi si colgono delle iperboli di riflessioni superficiali generate dagli ammanchi dovuti al danneggiamento del materiale. La colonna è formata da due rocchi che solitamente venivano collegati tramite un perno interno in ferro, la cui riflessione infatti risulta ben visibile sul radargramma F34. Anche nel radargramma F39 è visibile la riflessione di un perno di ferro che funge da collegamento tra il rocchio inferiore e la base della colonna. Nel radargramma F33 è presente un'iperbole molto marcata generata da un tassello di ferro visibile sulla superficie (Fig.12.36).

Dai radargrammi relativi alle strisciate verticali si vede che la superficie di riflessione del retro non è perfettamente parallela alla riflessione superficiale,

questo perché la colonna è rastremata. Nella parte bassa e nella parte alta dei radargrammi si nota il perno di collegamento, visibile anche dalle misure orizzontali, che assume in questa vista un andamento curvo (Fig.12.37).

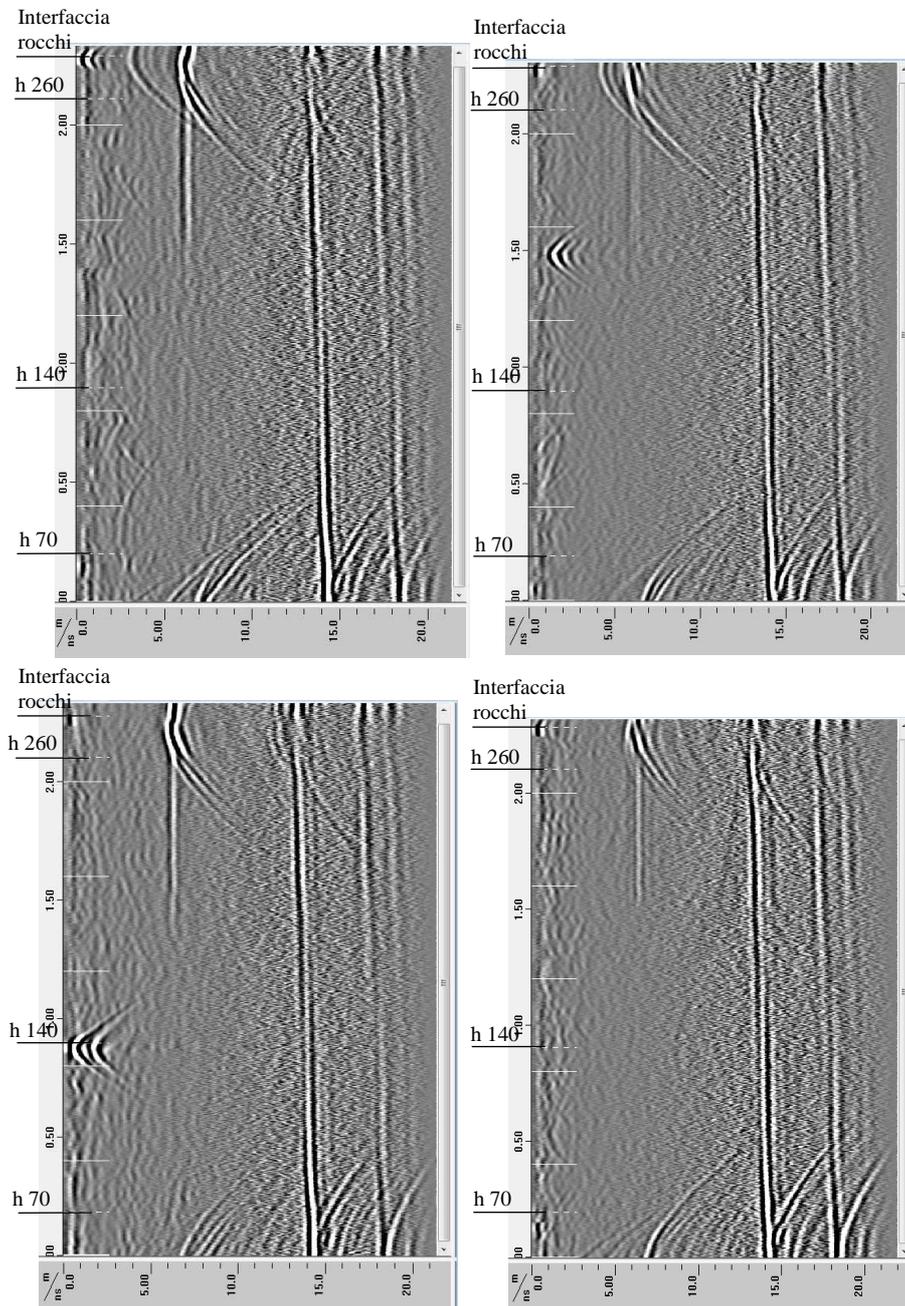


Fig. 12.37: Posizione 4: radargramma F35, verticale lato Nord (in alto a Sx); F36, verticale lato Ovest (in alto a Dx); F37, verticale lato Sud (in basso a Sx) e F38, verticale lato Est (in basso a Dx).

Per la colonna è stato possibile calcolare la costante dielettrica con precisione dal radargramma a quota 45 cm (Fig.12.30) in quanto la riflessione del retro è ben visibile:

$$\epsilon_c = \left(\frac{C}{V} \right)^2 = \left(\frac{300000000}{\frac{0,7}{0,000000007}} \right)^2 = 9$$

Di seguito sono riportati i radargrammi relativi alla colonna in pietra con la scala in metri anziché in nanosecondi ottenuta aggiungendo nel File Header la costante dielettrica reale del materiale appena calcolata (Fig.12.38 e 12.39).

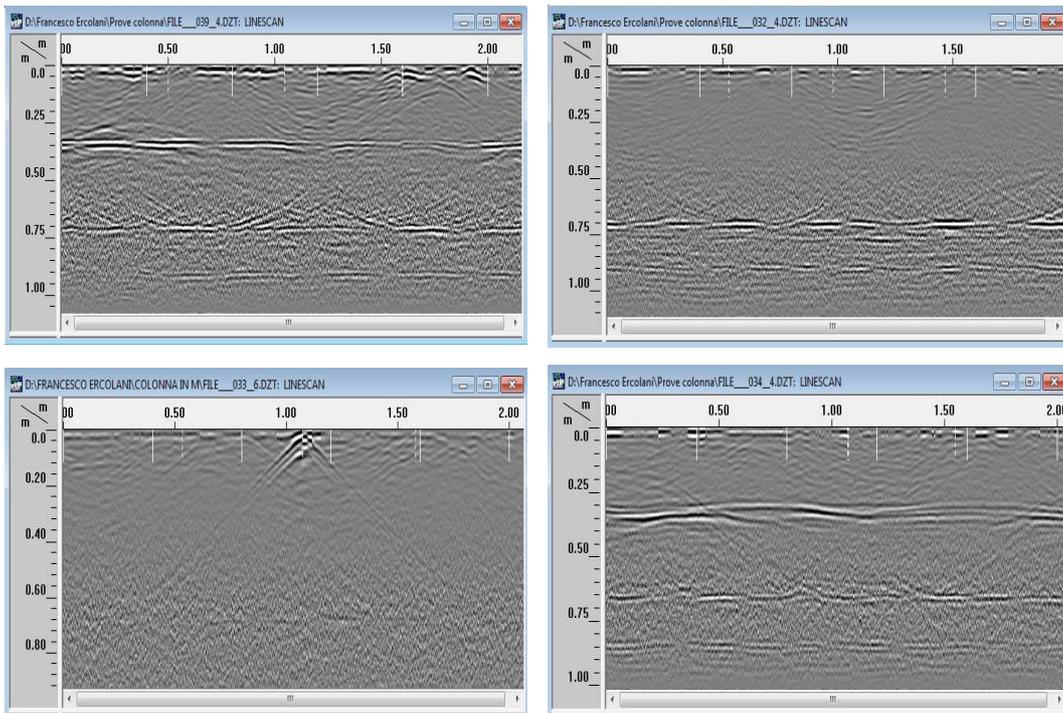


Fig. 12.38: Posizione 4: radargramma F39, orizzontale a 45 cm dal pavimento (in alto a Sx); F32, orizzontale a 70 cm dal pavimento (in alto a Dx); F33, orizzontale a 140 cm dal pavimento (in basso a Sx) e F34, orizzontale a 260 cm dal pavimento (in basso a Dx) con scala delle profondità in metri.

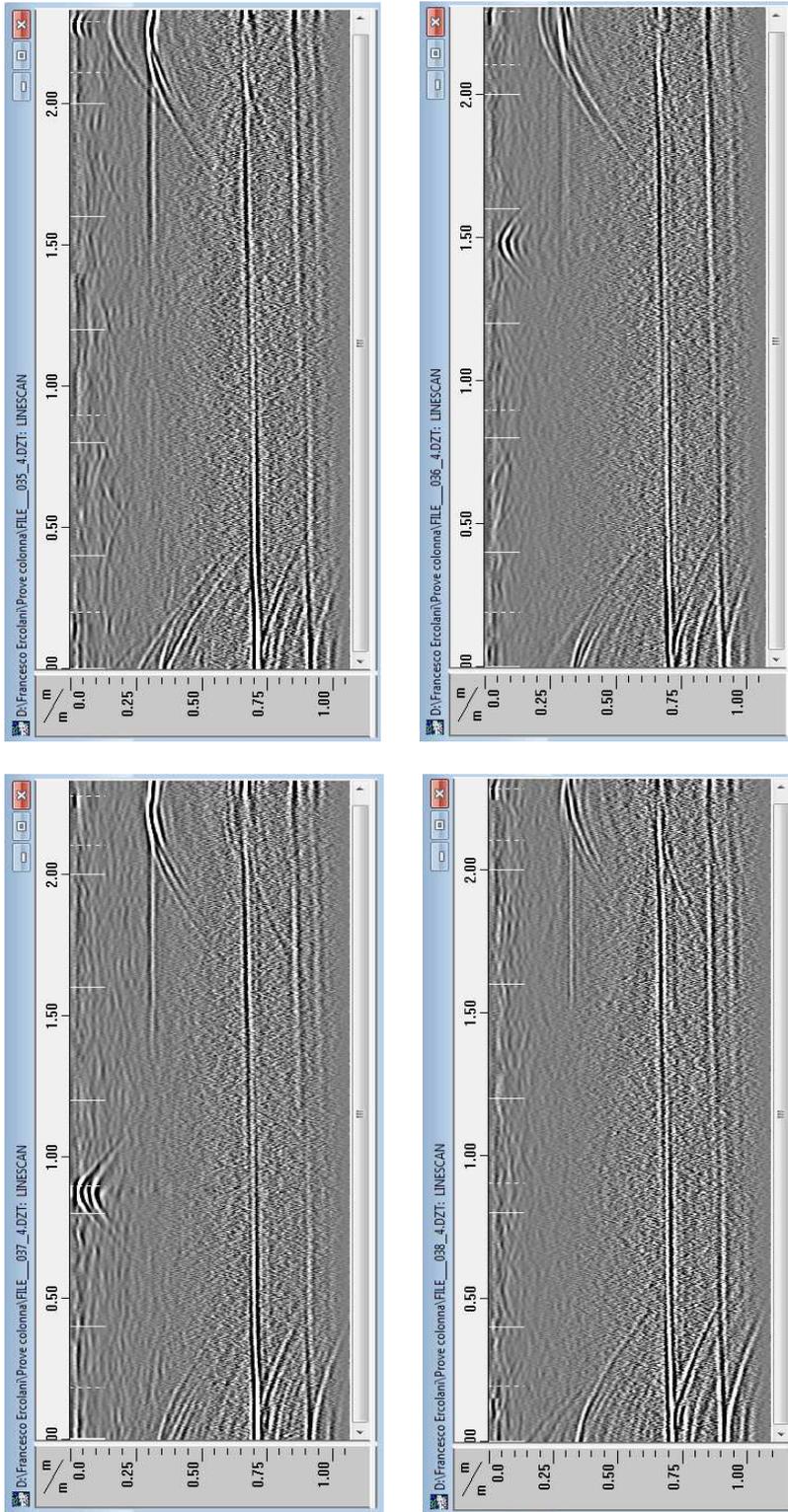
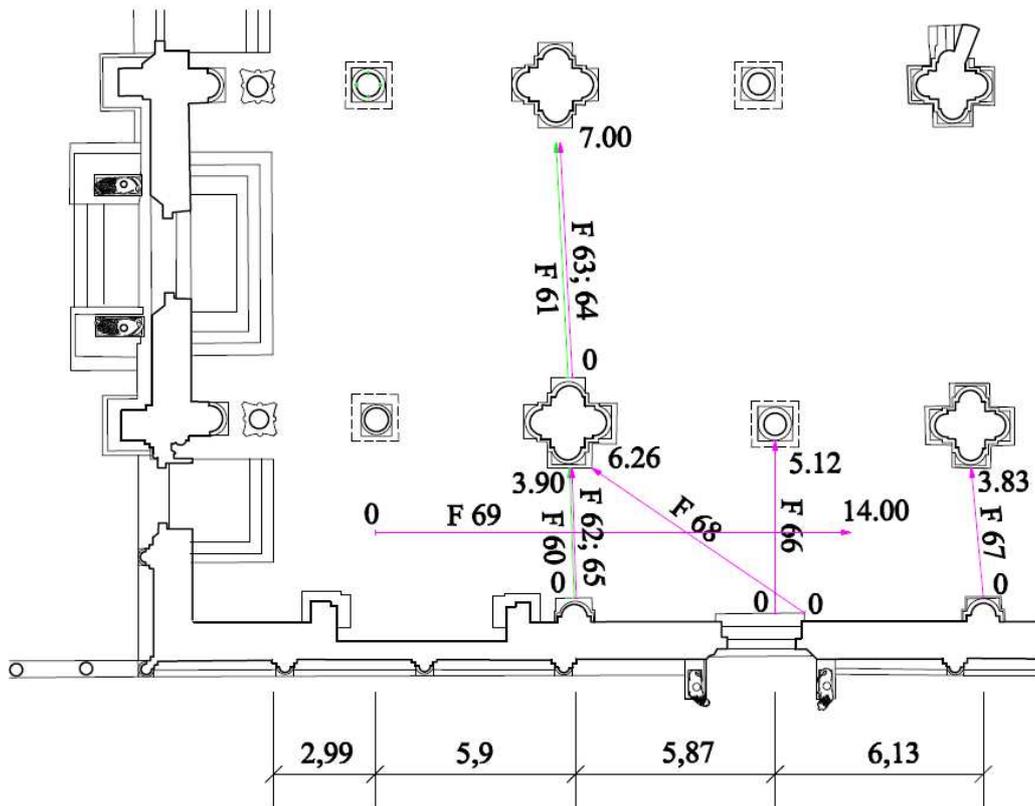


Fig. 12.39: Posizione 4: radargramma F35, verticale lato Nord (in alto a Sx); F36, verticale lato Ovest (in alto a Dx); F37, verticale lato Sud (in basso a Sx) e F38, verticale lato Est (in basso a Dx) con scala delle profondità in metri.

Pavimento, posizione 5

Nel pavimento della navata destra e della navata centrale sono state fatte delle acquisizioni di grande lunghezza per un totale di 10 file. Per indagare questa area sono state utilizzate due antenne con frequenza e quindi risoluzione differenti.



LEGENDA:

- Antenna Palm da 2.0 GHz
- Antenna 3101A da 900 MHz

Fig. 12.40: Settore della pianta del Duomo di Modena con posizioni di prova.

12. Prove georadar presso il Duomo di Modena

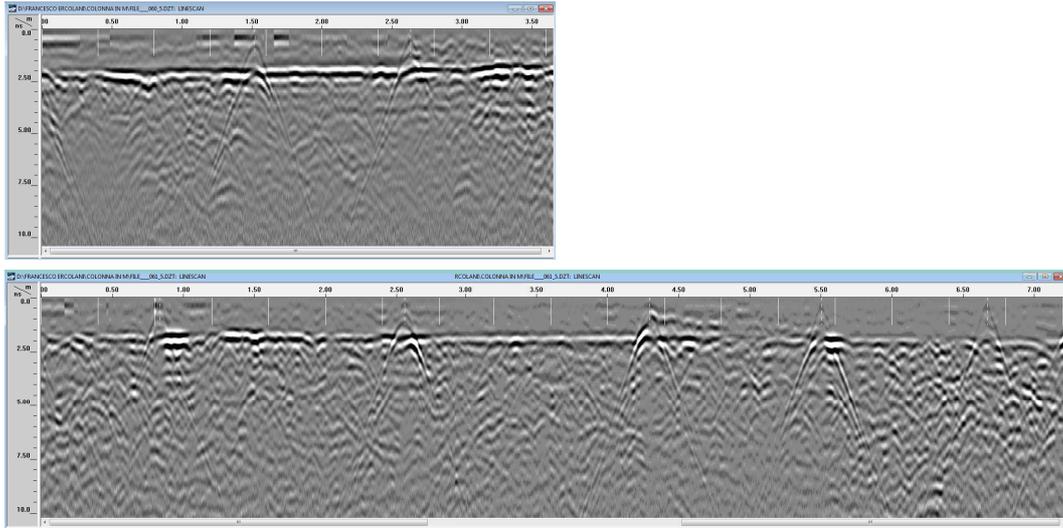


Fig.12.41: Posizione 5, antenna da 2 GHz: radargramma F60 (sopra) e F61 (sotto).

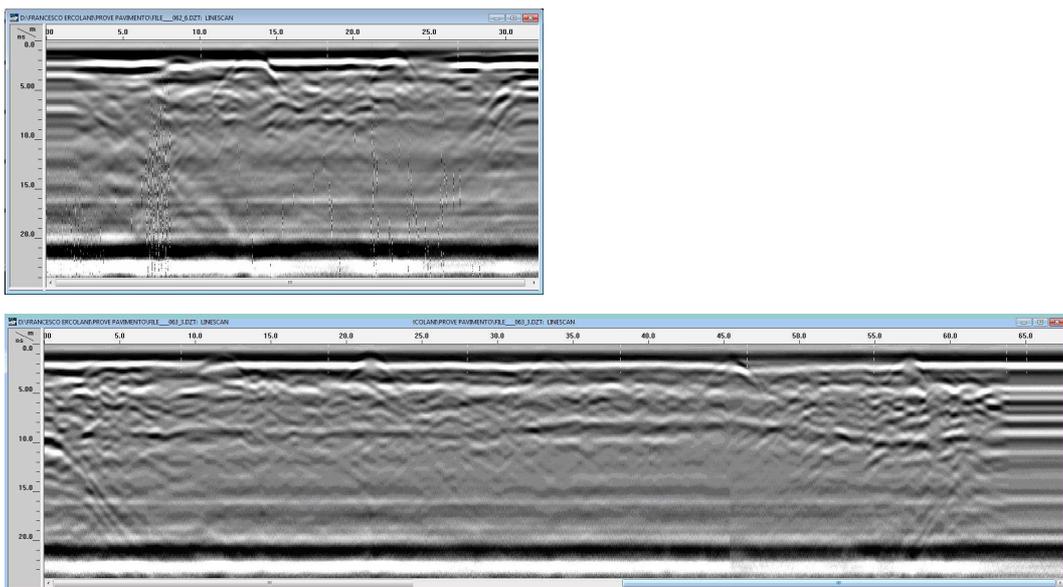


Fig.12.42: Posizione 5, antenna da 900 MHz: radargramma F62 (sopra) e F63 (sotto).

12. Prove georadar presso il Duomo di Modena

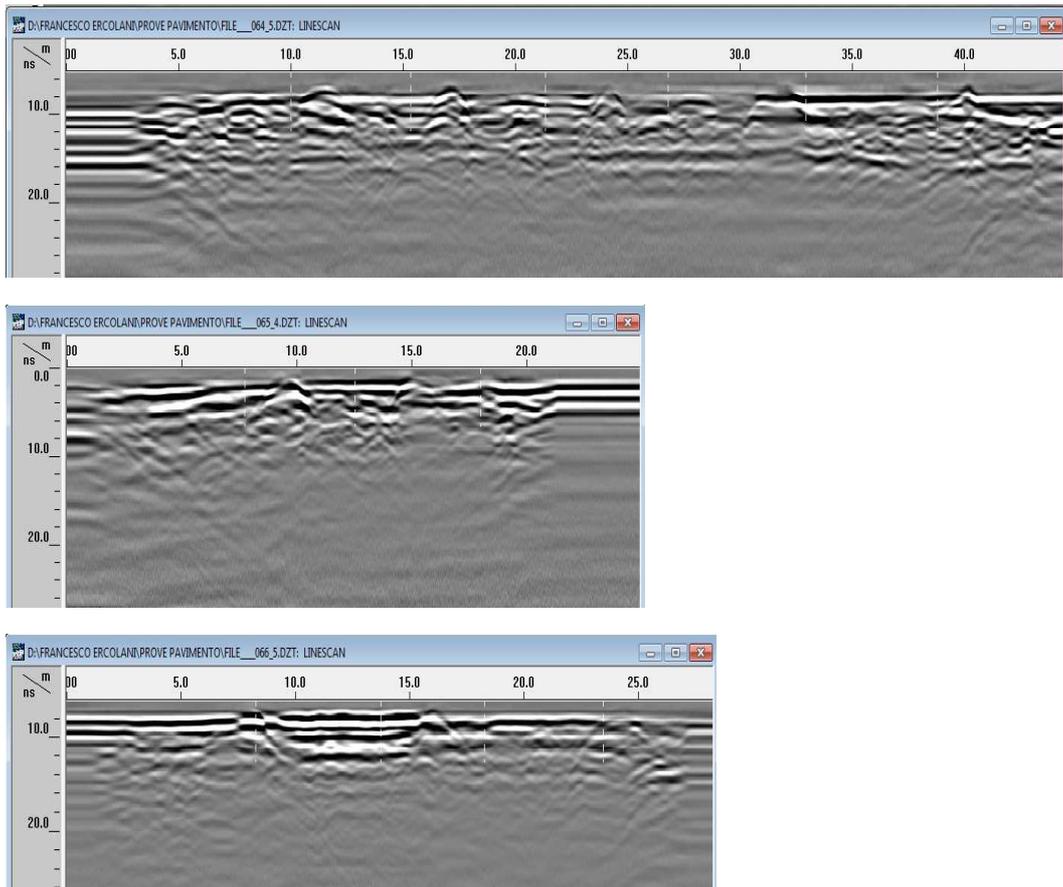


Fig.12.43: Posizione 5, antenna da 900 MHz: radargramma F64 (in alto); F65 (al centro) e F66 (in basso).

12. Prove georadar presso il Duomo di Modena

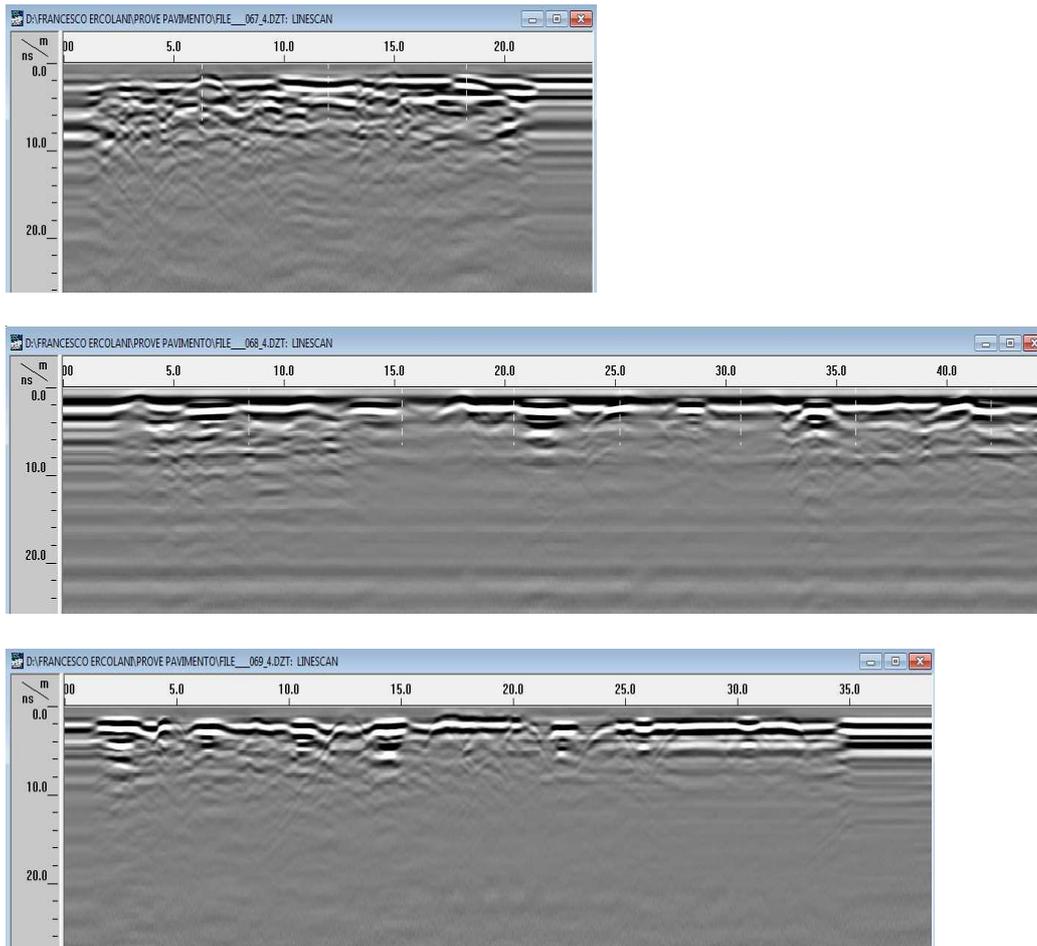


Fig. 12.44: Posizione 5, antenna da 900 MHz: radargramma F67 (in alto); F68 (al centro) e F69 (in basso).

CONCLUSIONI

Le diverse tecniche non distruttive analizzate in questo studio hanno prodotto dei buoni risultati, confermando quasi sempre le aspettative che si avevano quando si valutavano le zone e le condizioni di prova.

1. termografia a infrarossi: i termogrammi sono molto intuitivi e di facile interpretazione, così come il software di rielaborazione fornito con la termocamera, ma le informazioni ottenute non sono state sufficienti per comprendere il fenomeno indagato nella sua complessità ed è stato quindi necessario affiancarle con rilievi e misurazioni manuali che hanno comportato un grande dispendio di tempo. Infatti la termografia permette di vedere il livello di risalita d'umidità in modo molto preciso e rapido, ma per graficare l'andamento della risalita nell'arco di tempo d'indagine o la quantità d'acqua effettivamente assorbita dal muretto o evaporata è necessario leggere il livello di risalita visibile ad occhio nudo sul muretto con un metro. Dall'esperienza fatta in laboratorio si sono ottenute importanti informazioni sul fenomeno della risalita di umidità in presenza di muratura fessurata:
 - in presenza di fessure di apertura ridotta la risalita avviene più velocemente,
 - quando l'apertura delle fessure diventa troppo grande la risalita rallenta e tende ad arrestarsi,
 - nei giunti di malta la risalita avviene più lentamente,
 - nelle zone dove è presente micro danneggiamento (spesso non visibile ad occhio nudo) la risalita capillare avviene in modo molto rapido.
2. prove soniche: la rielaborazione dei dati è stata lunga e abbastanza complessa, ma le informazioni che si sono riuscite ad estrapolare sono state molte e hanno permesso un'analisi quantitativa (sono stati calcolati i valori della velocità di propagazione dell'onda in ogni percorso) molto

precisa del mezzo indagato. Con i dati rielaborati è stato possibile creare diverse tipologie di grafici che accostati alle relative sezioni geometriche dell'elemento forniscono una lettura molto chiara delle caratteristiche della sezione muraria indagata e delle caratteristiche del materiale. L'unico problema riscontrato è stato che la qualità dei file d'origine acquisiti in sito non era sempre soddisfacente a causa di disturbi del segnale. Dall'indagine in sito presso il Duomo di Modena è stato possibile valutare i seguenti aspetti delle murature storiche:

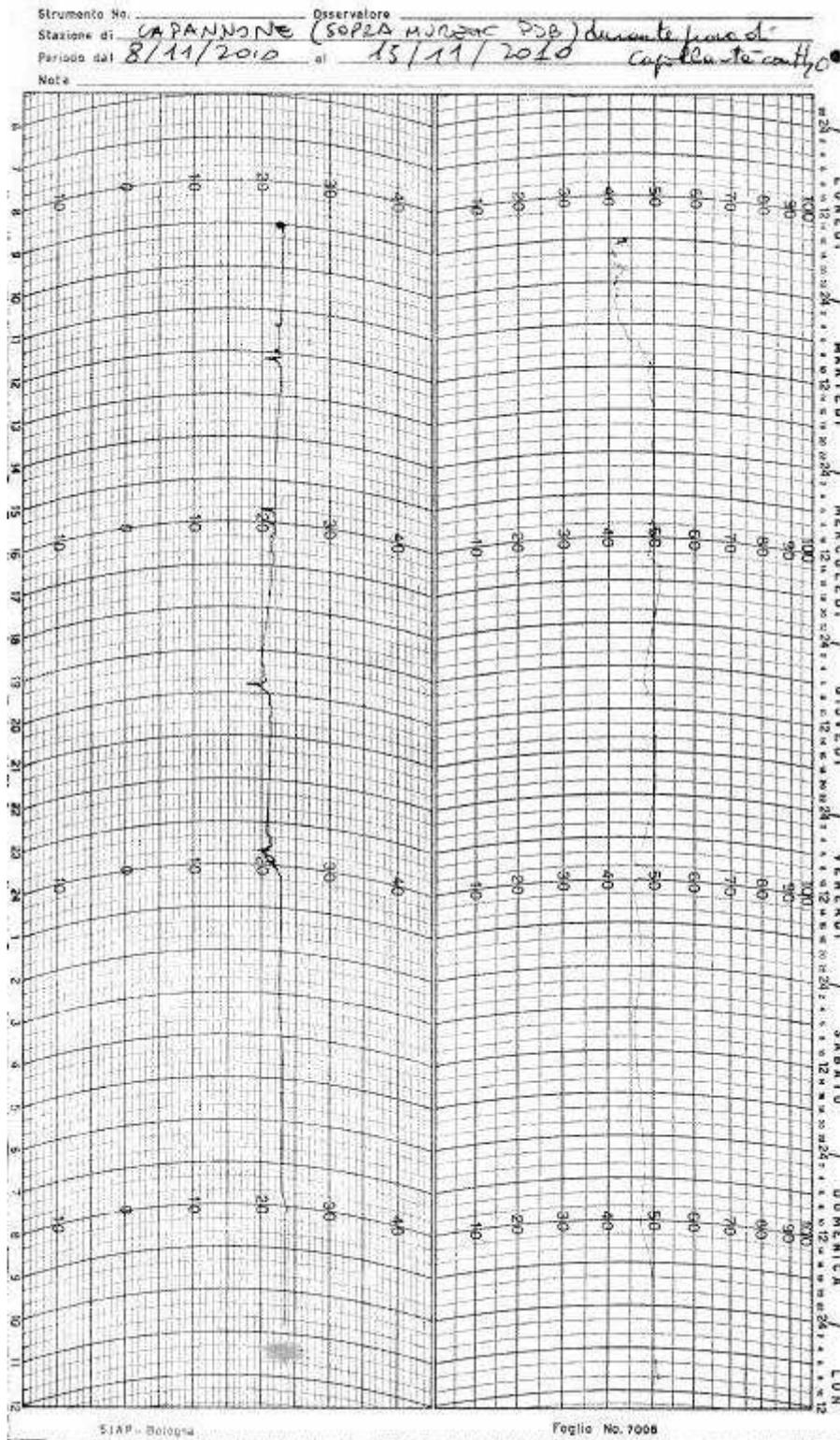
- i paramenti esterni hanno caratteristiche meccaniche migliori del riempimento interno (nella parte esterna le velocità di propagazione delle onde sono maggiori rispetto al nucleo). Ciò è dovuto alle modalità costruttive tipiche dell'epoca,
 - a diverse quote dello stesso elemento architettonico si possono trovare caratteristiche meccaniche molto diverse, anche se dall'esterno non si vedono differenze.
3. tomografia sonica: per riuscire a creare delle mappe di velocità o di attenuazione soddisfacenti sono necessari un gran numero di dati di origine, ma in questo studio il problema non si è posto perché la mole di dati era più che sufficiente derivando da una campagna di acquisizione in sito molto accurata. Le mappe di velocità ottenute sono apparse molto realistiche e di facile lettura, fornendo un'analisi qualitativa appropriata. La tomografia applicata ai due pilastri ha permesso di:
- visualizzare le differenze di velocità di propagazione tra il paramento esterno e il nucleo, evidenziando la zona con caratteristiche meccaniche migliori (esterna) e quella con caratteristiche peggiori (interna) in modo molto marcato,
 - confrontare in modo immediato le caratteristiche dell'elemento indagato a sezioni di quota differente,
 - valutare le zone in cui l'attenuazione è maggiore confermando che si trovano in corrispondenza delle zone dove la velocità è più bassa.

A livello quantitativo invece i valori di velocità di propagazione prodotti, essendo frutto di un'inversione, non si sono rivelati perfettamente identici a quelli reali.

4. georadar: i radargrammi elaborati hanno permesso di conoscere a fondo l'elemento investigato, perché erano di buona qualità e risoluzione. Sono venute alla luce interessanti informazioni sulla geometria interna della muratura ed è stato possibile stimare anche le costanti dielettriche dei materiali utilizzati. La costante dielettrica varia a seconda del materiale ed è stato importante riuscire a valutarla in elementi di muratura e in elementi in pietra per confrontarli con i valori presenti in letteratura. I radargrammi a prima vista possono sembrare poco intuitivi da leggere, ma in breve tempo si acquista la capacità di coglierne ogni sfumatura.

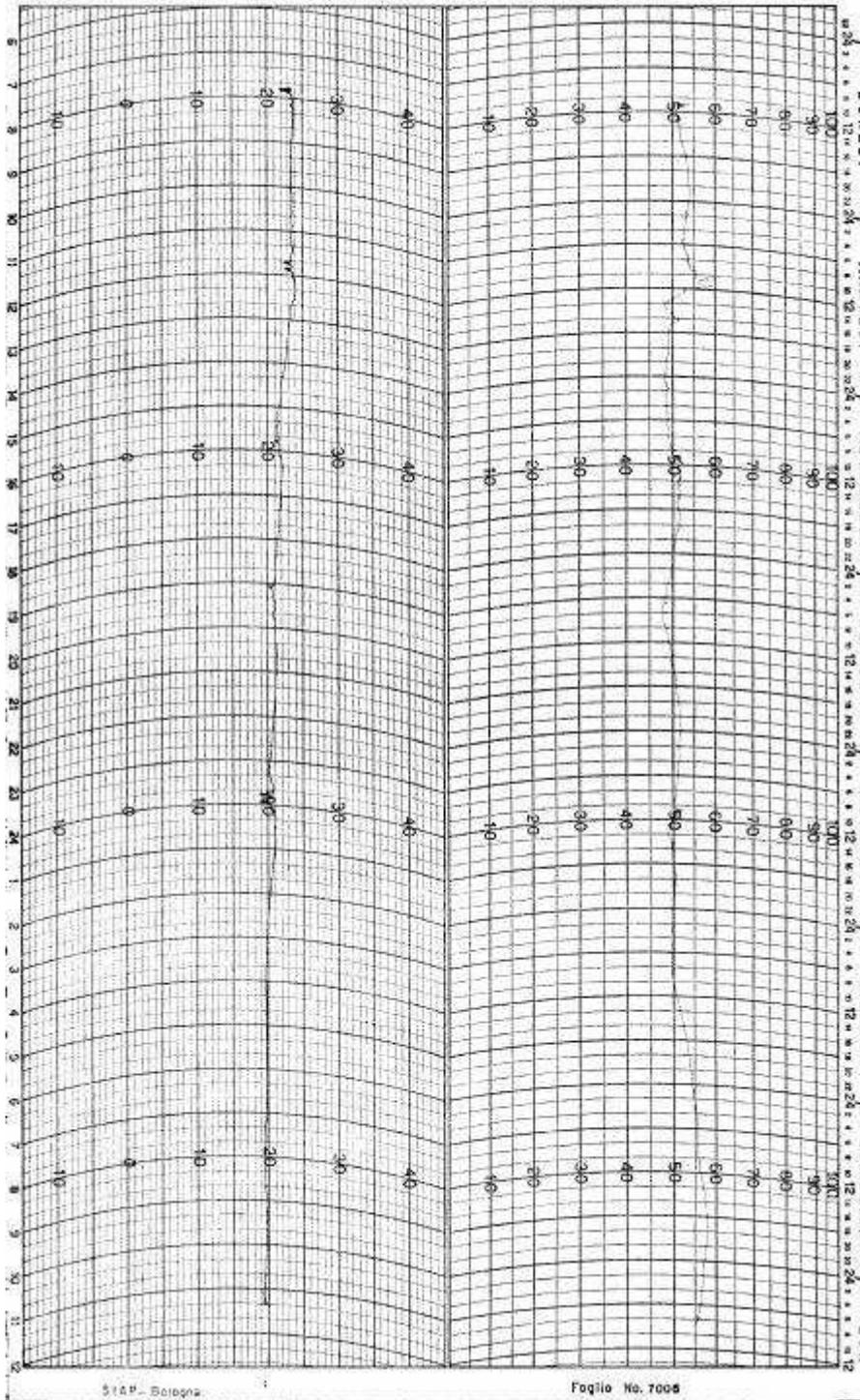
La forza delle prove non distruttive è quella di poter svolgere un'analisi incrociata su uno stesso elemento con tecniche diverse. Effettivamente, come nel caso dello studio del pilastro del Duomo e di quello della Ghirlandina, l'uso di più tecniche (soniche, tomografia e georadar) ha permesso una conoscenza molto approfondita, in quanto ogni tecnica serviva come conferma delle informazioni fornite dalle altre e comunque aggiungeva allo studio le proprie peculiarità (es. la tomografia ha confermato le velocità trovate dalle prove soniche e ha permesso inoltre di avere una mappa 2D di queste sulla sezione).

ALLEGATI



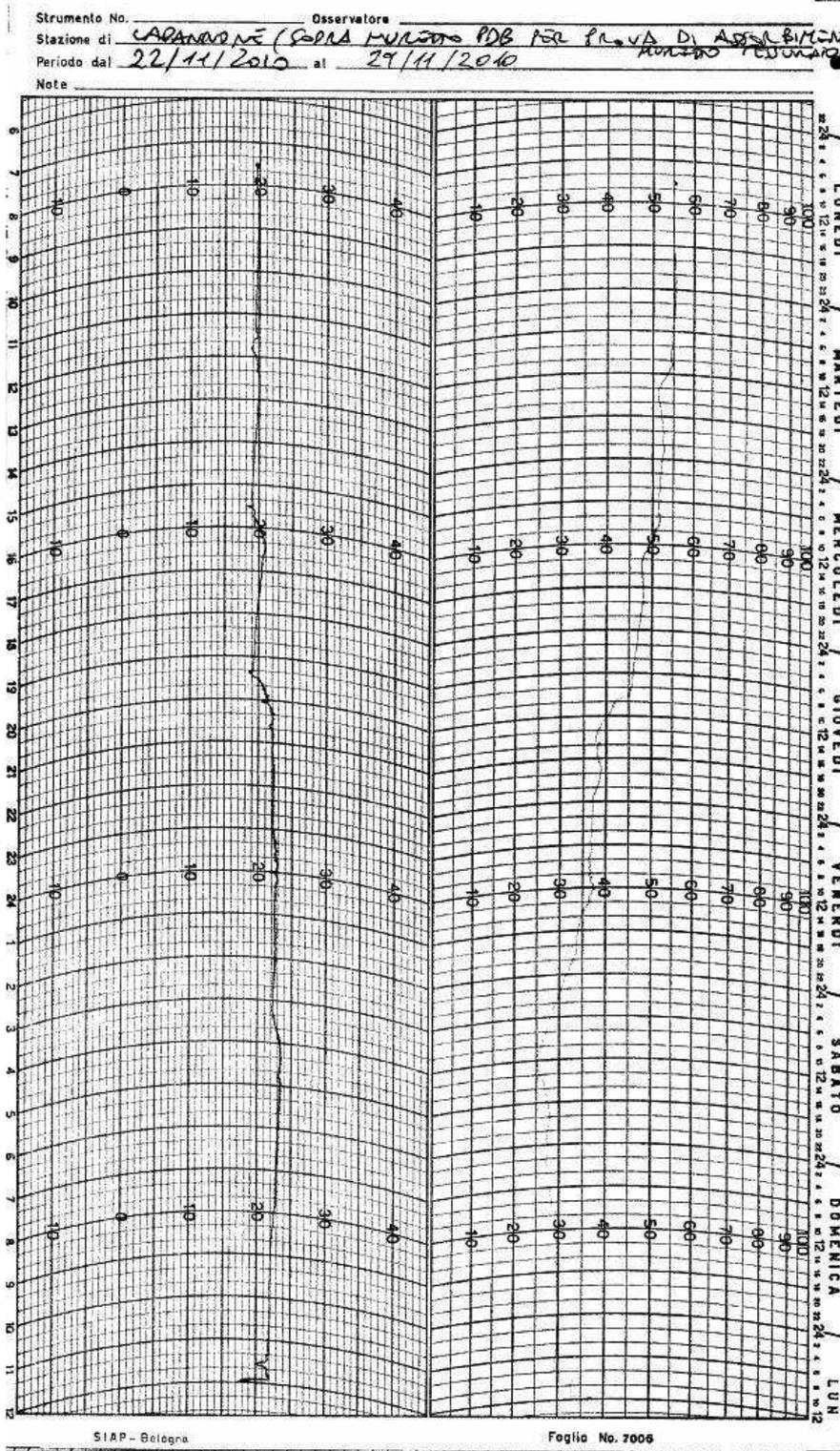
Strumento No. _____ Osservatore _____
 Stazione di CAPANNONE (SOPRA MUZZO POB x PROVA DI ASSOLGIMENTO)
 Periodo del 15/11/2010 al 22/11/2010 MURANO RESUMATO

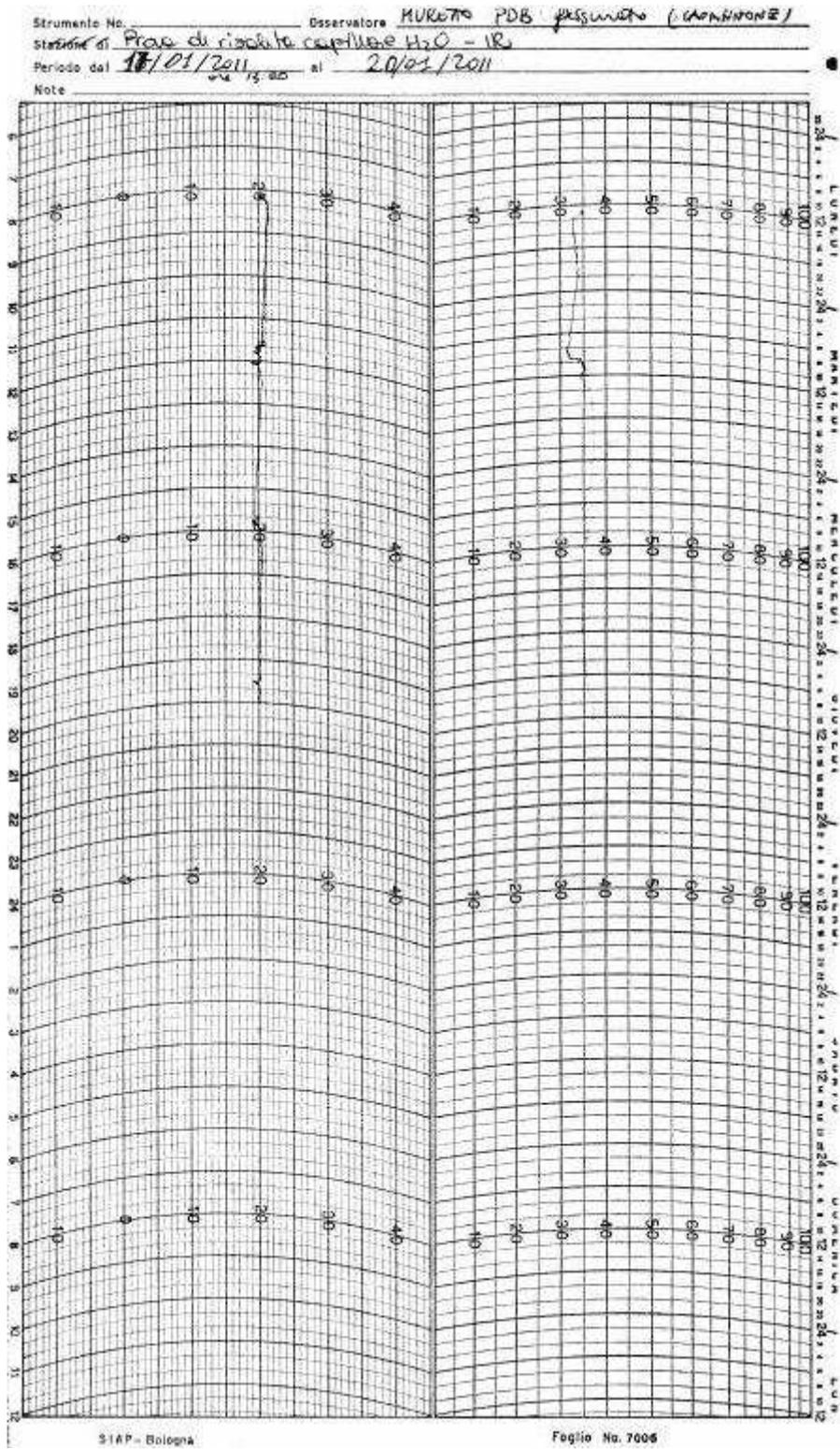
Note



514P - Bologna

Foglio No. 7006





RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. **“Esempi di applicazioni gpr (ground penetrating radar) su beni architettonici e grandi complessi di edilizia civile e industriale nel centro italia”**

D.Cassioli, D.Marchetti, F.Olini, O.Orlandi, R.Seri, S.Spina

Source: proc. of AIPnD - PnD Rome 2009 Oct 15-17

Parole chiave: Monitoraggio strutture civili, Ingegneria civile, Georadar.

2. **“Application of ndts to the diagnosis of historic structures”**

Luigia Binda & Antonella Saisi

Source: proc. of NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering
Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009

Parole chiave: Masonry, Pulse Sonic Test, GPR, thermovision, NDT

3. **“Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography”**

Astrid WENDRICH, Christiane TRELA, Martin KRAUSE, Christiane MAIERHOFER, Ute EFFNER, Jens WÖSTMANN

Source: proc. of ECNDT 2006 - Tu.3.2.5

4. **“Non-destructive investigation of complex historic masonry structures with impulse radar”**

Christiane Maierhofer, Jens Wöstmann, Christiane Hennen

Source: proc. of International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive
Testing in Civil Engineering 2003

5. **“Implementazione di procedure per tomografia acustica dell'attenuazione spettrale”**

G. Concu, B. De Nicolo, C. Piga, V. Popescu

Source: proc. of AIPnD - PnD Rome 2009 Oct 15-17

6. “Diagnose of timber and masonry structural elements via sonic tomography: application examples for the preservation assessment of cultural heritage”

C. Colla

Source: proc. of AIPnD - PnD Rome 2009 Oct 15-17

KEYWORDS: NDT, diagnosis, structural element, wood, masonry, sonic, tomography, preservation, cultural heritage.

7. “Controllare è necessario, il controllo termico è utile: introduzione alla termografia IR, potenzialità e limiti”

E. Grinzato

Source: AIPnD Journal, Settembre 2009

8. “Sull’intonaco e oltre: diagnostica non distruttiva per il monitoraggio del patrimonio storico-monumentale misura in situ dell’effusività termica”

E. Grinzato, P. Bison, M. Girotto, M. Volinia

Source: proc. of AIPnD - PnD Rome 2009 Oct 15-17

Key words: Termografia IR, Inerzia termica, Protocolli di prova, Monitoraggio strutture civili, CnD opere d’arte.

9. “Mortar deterioration of the masonry walls in historic buildings. A case history: Vanvitelli's Mole in Ancona”

Moriconi, Castellano, M.G.; Collepari, M.

Source: Materiaux et constructions, v 27, n 171, p 408-414, Aug-Sept 1994

10. “Irt monitoring in planned preservation of built cultural heritage”

E. Rosina, N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, S. Della Torre, V. Pracchi, G. Suardi

Source: proc. of 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT Aug 30 - Sep 3, 2004 - Montreal, Canada

11. “Diagnostica strutturale non-distruttiva di monumenti”

E. Grinzato, P.G. Bison, S. Martinett

Source: ITC Nov. 2004

12. “Gpr antenna medium coupling effects: experimental and 2d fddd modelling results”

A Shaari, S G Millard, J H Bungey

Source: proc. of International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003

13. “Il ruolo dell’umidità nel degrado dei materiali nelle murature”

Coppola e Collepari, 2000

14. “Ground Penetrating Radar Fundamentals”

Jeffrey J. Daniels, Novembre 2000

Source: proc. of U.S.EPA, Region V Nov. 25, 2000

15. “Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings”

M. Collepari

Source: MATERIALS AND STRUCTURES Volume 23, Number 2, 81-102,
DOI: 10.1007/BF02472568

16. “Recenti progressi nella tecnologia GPR e loro impatto sulle applicazioni per la diagnostica”

Luigi Zanzi, Maurizio Lualdi

Parole chiave: Ground Penetrating Radar (GPR), Diagnostic

Source: AIPnD Journal, Settembre 2009

17. “Diagnostica ad ultrasuoni per l’edilizia”

Pascale G., 2008

18. “Esperienza presso il cantiere di studio e di indagini diagnostiche della Ghirlandina di Modena: applicazione di prove soniche” tesi di Valentino Santoro

19. Circolare finalissima, Capitolo 8 “Costruzioni esistenti”

20. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale

21. Bozza di Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le Costruzioni, Appendice C8A

Normative:

UNI 1925 2000: “Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità”

UNI 1015 2004: ”Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità della malta indurita”

UNI 13755 2008: ”Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure”

UNI 15801 2010-10-18: “Conservation of cultural property - Test methods – Determination of water absorption by capillarity”