

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

*DIPARTIMENTO DICAM*

**TESI DI LAUREA**

*in*

**MATERIALI INNOVATIVI E RIABILITAZIONE STRUTTURALE LS**

**DIAGNOSI NON DISTRUTTIVA  
DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO:  
ESEMPI APPLICATIVI  
DI RADAR E TERMOGRAFIA ATTIVA**

**CANDIDATO:**  
Riccardo Polei

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof. Giovanni Pascale Guidotti Magnani

**CORRELATORE**  
Dr. Arch. Camilla Colla  
Ing. Elena Gabrielli

---

Anno Accademico 2010/11

Sessione III





# Indice

<b>Introduzione</b> .....	11
<b>Capitolo 1 LO STATO D'ARTE DELLA DIAGNOSTICA DELLE STRUTTURE MURARIE</b> .....	15
1.1 Il ruolo delle prove non distruttive .....	15
1.2 Le prove basate sulla propagazione delle onde elastiche all'interno del mezzo: metodo sonico ed impact-echo.....	16
1.3 Il Ground Penetrating Radar (GPR).....	18
1.4 Le indagini termografiche .....	20
<b>Capitolo 2 PRINCIPI DELLE TECNICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE</b> .....	22
2.1 Il metodo impact-echo.....	22
2.1.1 Finalità e sviluppo del metodo .....	22
2.1.2 Generazione del segnale e suo contenuto in frequenza.....	25
2.1.3 Le onde acustiche.....	27
2.1.4 Leggi di rifrazione e riflessione .....	30
2.1.5 Analisi in frequenza .....	32
2.2 Ground penetrating radar.....	34
2.2.1 Finalità e sviluppi del metodo.....	34
2.2.2 La generazione del segnale .....	35
2.2.3 Cenni teorici.....	38
2.2.4 Rappresentazione ed interpretazione dei risultati .....	45
2.3 Termografia.....	48
2.3.1 Finalità e sviluppo del metodo .....	48
2.3.2 La strumentazione .....	51
2.3.3 Acquisizione dati.....	52
2.3.4 Cenni della teoria della conduzione del calore .....	54

<b>Capitolo 3</b>	<b>IL CASO DI STUDIO: PALAZZO MALVEZZI</b>	<b>61</b>
3.1	Storia del palazzo	61
3.2	Le ristrutturazioni subite dal palazzo	62
3.3	Il sistema strutturale	64
3.4	Problemi dell'edificio	65
<b>Capitolo 4</b>	<b>SALA ROSSA: INDAGINE DI FESSURE TRAMITE PROVE SONICHE</b>	<b>67</b>
4.1	Scopo delle prove	67
4.2	Strumentazione utilizzata	67
4.2.1	La massa battente	68
4.2.2	Ricevitore di spostamenti	68
4.2.3	Unità di controllo	69
4.2.4	Centralina di condizionamento e amplificazione del segnale	69
4.2.5	Il software	69
4.2.6	Stima dalle frequenze e risoluzione del segnale	70
4.3	Posizioni di prova e preparazione del test	70
4.4	Procedura di acquisizione	79
4.5	Elaborazione e visualizzazione dei dati	83
4.6	Interpretazione dei risultati	90
4.7	Osservazioni e suggerimenti	92
<b>Capitolo 5</b>	<b>SALA ROSSA: INDAGINE DI FESSURE TRAMITE IMPACT-ECHO</b>	<b>93</b>
5.1	Scopo delle prove	93
5.2	Strumentazione utilizzata	93
5.2.1	La massa battente	94
5.2.2	Il ricevitore di spostamenti	94
5.2.3	Centralina di amplificazione e condizionamento del segnale	94
5.2.4	Il software	94
5.2.5	Frequenza generata tramite la strumentazione: confronto tra prova sonora ed IE	94
5.3	Posizioni di prova e preparazione del test	95
5.4	Procedure di acquisizione	98
5.5	Elaborazione e visualizzazione dei file	99
5.6	Interpretazione dei dati	104

5.7	Osservazioni e suggerimenti .....	105
<b>Capitolo 6</b>	<b>SALA ROSSA: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR.....</b>	<b>106</b>
6.1	Scopi delle prove .....	106
6.2	Strumentazione utilizzata nelle prove .....	107
6.3	Posizioni di prova, preparazione e procedure di acquisizione .....	110
6.4	Elaborazione dei dati .....	119
6.4.1	Surface position adjustment .....	120
6.4.2	Select Box .....	122
6.4.3	FIR filter: horizontal high pass (backgorund removal).....	123
6.4.4	Range gain.....	124
6.4.5	Frequenza centrale e massima.....	127
6.4.6	Distance Normalization.....	128
6.4.7	Riepilogo delle elaborazioni .....	130
6.5	Visualizzazione e interpretazione dei dati.....	130
6.6	Osservazioni e suggerimenti .....	144
<b>Capitolo 7</b>	<b>SALA OVALE: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR (antenna 900 MHz).....</b>	<b>145</b>
7.1	Scopi delle prove .....	145
7.2	Strumentazione utilizzata .....	146
7.3	Posizioni di prova, preparazione e procedure di acquisizione .....	146
7.4	Elaborazione e visualizzazione dei dati.....	152
7.4.1	Analisi 3D .....	153
7.4.1.1	Distance Normalization .....	153
7.4.1.2	3D Project file.....	155
7.4.1.3	Migration .....	158
7.5	Interpretazione dei dati .....	159
7.5.1	dati bidimensionali .....	159
7.5.2	Modello tridimensionale .....	167
7.6	Osservazioni e suggerimenti .....	169

<b>Capitolo 8</b>	<b>SALA OVALE: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR (antenna Palm 2GHz)</b> .....	171
8.1	Scopo delle prove .....	171
8.2	Strumentazione utilizzata .....	171
8.2.1	Antenna PALM .....	171
8.3	Posizioni di prova, preparazione e procedure si acquisizione.....	172
8.4	Elaborazione e visualizzazione dei dati.....	180
8.4.1	Elaborazioni bidimensionali .....	180
8.4.2	Elaborazioni tridimensionali .....	181
8.5	Interpretazione dei risultati.....	181
8.5.1	File bidimensionali.....	181
8.5.2	Volume 3D.....	192
8.6	Osservazioni e suggerimenti .....	195
<b>Capitolo 9</b>	<b>PIANO INTERRATO: INDAGINE DI UMIDITÀ IN MURATURE TRAMITE GPR RADAR</b> .....	196
9.1	Scopi delle prove .....	196
9.2	Strumentazione utilizzata .....	196
9.3	Posizioni di prova e preparazione del test.....	197
9.4	Procedura di acquisizione.....	206
9.5	Elaborazione e visualizzazione dei dati.....	210
9.6	Interpretazione dei dati .....	213
9.7	Osservazioni e suggerimenti .....	230
<b>Capitolo 10</b>	<b>SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO: INDAGINE GPR DI RISALITA CAPILLARE IN PROVINI MURARI</b> .....	231
10.1	Scopi delle prove .....	231
10.2	Strumentazione utilizzata.....	231
10.3	Descrizione dei muretti e preparazione della prova .....	232
10.4	Acquisizione dei dati in data 09/07/2010 .....	236
10.4.1	PNDA.....	236
10.4.2	PNDB .....	237

10.4.3	PNDF .....	238
10.5	Campagna del 16/07/2010 .....	240
10.5.1	PNDA.....	240
10.5.2	PNDC.....	241
10.5.3	PNDD.....	242
10.5.4	PNDE .....	246
10.5.5	PNDF .....	247
10.6	Campagna di acquisizione del 21/07/2010.....	250
10.6.1	PNDB.....	250
10.6.2	PNDD.....	252
10.6.3	PNDF .....	253
10.7	Campagna di acquisizione del 02/12/2010.....	254
10.7.1	PNDA.....	255
10.7.2	PNDB .....	256
10.7.3	PNDC.....	258
10.7.4	PNDD.....	259
10.7.5	PNDE .....	260
10.7.6	PNDF .....	262
10.8	Elaborazione e visualizzazione dei dati.....	263
10.8.1	Tempi, velocità e costanti dielettriche .....	264
10.8.2	Ampiezze e frequenze del segnale .....	265
10.8.3	Altezze di risalita .....	267
10.8.4	PNDA.....	269
10.8.5	PNDB .....	281
10.8.6	PNDC .....	293
10.9	Interpretazione dei risultati .....	300
10.9.1	PNDA.....	300
10.9.2	PNDB .....	302
10.9.3	PNDC.....	304
10.10	Osservazioni e suggerimenti.....	306

**Capitolo 11 SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO: INDAGINE GPR DI DIFETTI E PIETRE IN PROVINI MURARI.....** 308

11.1	Scopi delle prove .....	308
------	-------------------------	-----

11.2	Strumentazione utilizzata.....	308
11.3	Preparazione della prova.....	309
11.4	Elaborazione e visualizzazione dei dati.....	309
11.4.1	Modifica dei radargrammi .....	309
11.4.2	Valutazione della posizione e delle dimensioni dei difetti artificiali e delle inclusioni di pietre. ....	310
11.4.3	PNDA.....	311
11.4.4	PNDB.....	315
11.4.5	PNDC.....	320
11.4.6	PNDD.....	324
11.4.7	PNDE.....	329
11.4.8	PNDF.....	332
11.5	Interpretazione dei risultati.....	337
11.5.1	PNDA.....	337
11.5.2	PNDB.....	338
11.5.3	PNDC.....	339
11.5.4	PNDD.....	340
11.5.5	PNDE.....	341
11.5.6	PNDF.....	341
11.6	Osservazioni e suggerimenti.....	342

**Capitolo 12** SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO: INDAGINI DI VUOTI IN LATERIZI TRAMITE TERMOGRAFIA IR ATTIVA..... 344

12.1	Scopi delle prove.....	344
12.2	I laterizi utilizzati nella prova .....	344
12.3	Strumentazione utilizzata.....	345
12.3.1	Cella climatica.....	345
12.3.2	Centralina.....	346
12.3.3	Termocamera .....	347
12.4	Preparazione della prova.....	349
12.4.1	Preparazione dei laterizi.....	350
12.4.2	Geometria della prova.....	353
12.5	Procedura di acquisizione dei dati .....	356
12.6	Elaborazione e visualizzazione dei dati .....	360

12.6.1	Posizione generale.....	364
12.6.2	Posizioni ravvicinate .....	378
12.7	Interpretazione dei risultati .....	384
12.7.1	Posizione generale.....	386
12.7.2	Posizioni ravvicinate .....	391
12.8	Osservazioni e suggerimenti .....	396
<b>Conclusioni .....</b>		<b>397</b>
<b>Bibliografia .....</b>		<b>400</b>





# I INTRODUZIONE

---

La necessità di conservazione e recupero di murature, di qualsiasi interesse storico/architettonico, ha evidenziato la necessità di conoscere il più dettagliatamente possibile le caratteristiche strutturali delle opere interessate: un intervento risulterà tanto più efficace e adatto agli scopi prefissi quanto maggiore sarà la conoscenza dell'opera, della sua evoluzione, dei materiali utilizzati per la realizzazione, della tecnica costruttiva e della struttura portante.

Spesso è necessario eseguire interventi di adeguamento sismico di comuni edifici su cui poter intervenire più o meno indiscriminatamente, mentre, per opere di interesse storico è necessario ridurre al minimo l'invasività degli interventi: in tutti e due i casi, una buona riuscita dell'intervento dipende dalla conoscenza dell'organismo strutturale sul quale si deve operare. Come spesso accade, anche per opere di recente costruzione, risulta difficile poter recuperare i dati progettuali (disegni e calcoli) e spesso le tecniche e le tipologie utilizzate per le costruzioni si differenziavano da zona a zona, così come diversi erano i materiali da costruzione; risulta quindi evidente che per progettare una serie di interventi di recupero è necessario poter ottenere il maggior numero di informazioni al riguardo.

Diverse sono le esperienze maturate in questo campo in tutta Europa e queste hanno mostrato come non è sufficiente intervenire con tecniche innovative per adeguare agli standard attuali di sicurezza opere del passato: infatti, in molti casi, l'applicazione sbagliata di queste tecniche o gli interventi progettati in modo non adeguato non hanno svolto il loro compito e in alcuni casi hanno peggiorato la situazione esistente.

Dalle esperienze maturate è stato possibile osservare che anche le migliore tecniche di recupero non possono risultare efficaci senza un'adeguata conoscenza dello stato di degrado degli edifici, del loro assetto strutturale e delle possibili carenze. La diagnostica strutturale si vuole inserire proprio in questo livello potendo fornire ad un progettista tutte le informazioni necessarie per effettuare al meglio ed in maniera efficace gli interventi di recupero e restauro necessari. Oltre questi aspetti, le analisi diagnostiche possono essere utilizzate anche per verificare l'efficacia degli interventi effettuati.

Diversi sono gli aspetti che si possono analizzare in un'indagine di diagnostica ed in base alle esigenze e alle necessità del rilievo da effettuare sono varie le tecniche a disposizione, ognuna con le sue peculiarità e potenzialità.

Nella realizzazione di questa tesi sono state affrontate diverse problematiche che hanno previsto sia l'analisi di situazioni reali in cantiere, sia lo studio in laboratorio.

La prima parte del presente elaborato prevede lo studio delle attività svolte a Palazzo Malvezzi, attuale sede della Provincia di Bologna. L'edificio, di interesse storico, ha subito diverse trasformazioni durante la sua vita ed in alcuni casi, queste, eseguite con tecnologie e materiali inadatti, hanno provocato variazioni nell'assetto statico della struttura; inoltre, il palazzo, è soggetto a movimenti a livello di fondazione in quanto è presente una faglia di subsidenza che attraversa l'edificio. Tutte queste problematiche hanno creato movimenti differenziali alla struttura in elevazione che si sono evidenziati con crepe distribuite in tutto l'edificio.

Il primo aspetto analizzato (capitoli 4 e 5) è lo studio della profondità delle fessure presenti nel solaio della sala Rossa, sede dei comunicati stampa e delle conferenze della Provincia. Senza dubbio antiestetiche, le crepe presenti in una struttura, se sottovalutate, possono compromettere notevolmente le funzioni statiche dell'elemento in cui si sviluppano: la funzione di protezione fornita dal solaio o da qualsiasi altro elemento strutturale alle armature in questo immerse, viene meno, offrendo vie preferenziali a possibili situazioni di degrado, specialmente se in condizioni ambientali aggressive. È facile intuire, quindi, che un aspetto all'apparenza banale come quello delle fessure non può essere sottovalutato. L'analisi è stata condotta utilizzando prove soniche ed impact-echo, tecniche che sfruttano lo stesso principio, la propagazione delle onde elastiche nel mezzo, ma che si differenziano per procedure di prova e frequenze generate nel test. Nel primo caso, la presenza del martello strumentato consente di valutare anche la velocità di propagazione delle onde elastiche, fenomeno utilizzato per ottenere indicazioni sulla compattezza del mezzo, mentre nel secondo non è possibile ricavare queste informazioni in quanto la tecnica si basa solamente sullo studio in frequenza del segnale. L'utilizzo dell'impact-echo è stato necessario in quanto la ristilatura effettuata sulle fessure scelte per l'analisi, non ha permesso di ottenere risultati utili tramite prove soniche; infatti, le frequenze generate risultano troppo basse per poter apprezzare queste piccole discontinuità materiali.

La fase di studio successiva ha previsto l'analisi della conformazione dei solai. Nel capitolo 6, tale studio, viene condotto sul solaio della sala Rossa con lo scopo di individuarne la conformazione e la presenza di eventuali elementi di rinforzo inseriti durante le ristrutturazioni avvenute nel corso della vita del palazzo: precedenti indagini eseguite con endoscopia, infatti, hanno mostrato una camera d'aria ed elementi metallici posizionati al di sotto della volta a padiglione costituente il solaio stesso. Le indagini svolte in questa tesi, hanno previsto l'utilizzo della strumentazione radar GPR: con questa tecnica, basata sulla propagazione delle onde elettromagnetiche all'interno di un mezzo, è possibile variare rapidamente la profondità

d'ispezione ed il dettaglio ottenibile nelle analisi cambiando le antenne che trasmettono e ricevono il segnale, caratteristiche fondamentali in questo tipo di studio. I risultati ottenuti hanno confermato quanto emerso nelle precedenti indagini mostrando anche altri dettagli descritti nel capitolo.

Altro solaio oggetto d'indagine è quello della sala dell'Ovale (capitoli 7 e 8): costruito per dividere l'antica sala da ballo in due volumi, tale elemento è provvisto al suo centro di un caratteristico foro ovale, da cui ne deriva il nome. La forma del solaio lascia supporre la presenza di una particolare struttura di sostegno che le precedenti analisi condotte tramite endoscopia, non sono riuscite a cogliere pienamente. Anche in questo caso le indagini sono state eseguite tramite tecnica radar GPR, ma a differenza dei dati raccolti nella sala Rossa, in questo caso è stato possibile creare un modello tridimensionale del mezzo investigato; inoltre, lo studio è stato ripetuto utilizzando un'antenna ad elevata risoluzione che ha consentito di individuare dettagli in precedenza non visibili.

Un ulteriore studio condotto a palazzo Malvezzi riguarda l'analisi della risalita capillare all'interno degli elementi strutturali presenti nel piano interrato (capitolo 9): questo fenomeno, presente nella maggior parte delle opere civili, e causa di degrado delle stesse nelle zone colpite, viene indagato utilizzando il radar GPR. In questo caso, oltre che individuare i livelli di risalita osservabili nelle sezioni radar, viene eseguita anche un'analisi sulle velocità di propagazione del segnale e sulle caratteristiche dielettriche del mezzo, variabili in base al contenuto d'acqua. Lo scopo è quello di individuare i livelli massimi di risalita per poterli confrontare con successive analisi.

Nella fase successiva di questo elaborato vengono presentate le analisi svolte in laboratorio. Nella prima parte, capitolo 10, viene ancora esaminato il fenomeno della risalita capillare: volendo studiare in dettaglio questo problema, sono stati realizzati dei muretti in laterizio (a 2 o 3 teste) e per ognuno di essi sono state simulate diverse condizioni di risalita capillare con varie tipologie di sale disciolto in acqua (cloruro di sodio e solfato di sodio). Lo scopo è di valutare i livelli di risalita osservabili per diverse tipologie di sale e per diverse concentrazioni dello stesso. Ancora una volta è stata utilizzata la tecnica radar GPR che permette non solo di valutare tali livelli, ma anche la distribuzione dell'umidità all'interno dei provini, riuscendo a distinguere tra zone completamente sature e zone parzialmente umide. Nello studio è stata valutata anche l'influenza delle concentrazioni saline sulla propagazione del segnale elettromagnetico.

Un difetto delle tecniche di diagnostica è quello di essere strumenti qualitativi, ma non quantitativi: nel capitolo 11 viene affrontato questo problema cercando di valutare la precisione dei risultati ottenuti da indagini condotte con strumentazione radar GPR. Studiando gli stessi

provini analizzati nel capitolo precedente, la tecnica radar è stata utilizzata per individuare e posizionare i difetti (muretti a 3 teste) e le pietre (muretti a 2 teste) inserite in questi elementi: i risultati ottenuti nella prova sono stati confrontati, infine, con la reale geometria.

Nell'ultima parte (capitolo 12), viene esaminato il problema dell'individuazione dei vuoti all'interno di laterizi: per questo scopo sono state create artificialmente delle cavità di diversa forma e a diverse profondità all'interno di laterizi pieni che, dopo un trattamento in cella climatica per aumentarne la temperatura, sono stati sottoposti a riprese termografiche nella fase di raffreddamento. Lo scopo di queste prove è quello di valutare quale sia la massima differenza di temperatura superficiale causata dai diversi difetti e per quale intervallo di temperature questa si verifica.

# Capitolo 1

## LO STATO D'ARTE DELLA DIAGNOSTICA DELLE STRUTTURE MURARIE

---

### 1.1 Il ruolo delle prove non distruttive

Negli ultimi 50 anni, in tutta l'Europa è stato possibile assistere ad un crescente processo di recupero e restauro degli edifici in muratura; se in alcuni casi si trattava di semplici strutture lasciate in disuso, in altri casi il recupero è stato necessario per rendere funzionali edifici danneggiati da eventi sismici che in questo arco di tempo hanno colpito tutta l'area del Mediterraneo. Utilizzando tecniche tradizionali ed innovative si è cercato di migliorare le condizioni strutturali degli stabili interessati: una erronea applicazione delle tecniche più moderne provocata da una non perfetta conoscenza del metodo e non conoscendo con esattezza le condizioni di degrado degli elementi strutturali, non hanno permesso di realizzare interventi adeguati ai loro scopi. Infatti, la progettazione degli interventi da effettuare per il recupero degli edifici in muratura, non può prescindere da un'accurata conoscenza delle caratteristiche strutturali degli elementi oggetto di studio; solamente conoscendo in maniera accurata le caratteristiche strutturali degli edifici analizzati sarà possibile prevedere un programma di recupero ben progettato ed adeguato allo scopo.

A tale scopo molte tecniche di diagnostica strutturale sono state sviluppate nel corso degli anni: se il principio che si pone alla base è quello di conoscere le condizioni dei vari elementi sottoposti all'indagine, la tecnologia per ricavare tali informazioni può essere differente. Le tecniche che hanno visto un maggiore sviluppo della metodologia e hanno permesso di ricavare anche delle correlazioni con le caratteristiche meccaniche degli elementi sottoposti all'indagine, riguardano le prove che sfruttano la propagazione delle onde elastiche (a questa categoria appartengono le prove soniche ed ultrasoniche utilizzate anche nel presente lavoro) per le quali è possibile mettere in relazione la velocità del fronte d'onda con la costante elastica del mezzo.

Di più recente applicazione al campo edilizio-ingegneristico sono le tecniche basate sulla propagazione di onde elettromagnetiche: in particolare, la termografia e la tecnica radar stanno subendo un notevole sviluppo grazie alle potenzialità dei loro metodi. Per la prima tecnica, infatti, la possibilità di eseguire analisi senza il diretto contatto con la superficie da investigare ne ha permesso la sua applicazione ad un numero notevole di casi, mentre la seconda, seppur da tempo

impiegata in altri campi scientifici, ha trovato una sempre maggior applicazione nel campo dell'ingegneria civile grazie alla versatilità della strumentazione di poter ispezionare diversi spessori con diverse risoluzioni.

Come già detto, la sperimentazione tuttora eseguita in campo scientifico, non ha permesso di ricavare correlazioni dirette tra parametri di resistenza delle murature e quelli di prova ed è per questo motivo che le indagini non distruttive consentono di fornire solo indicazioni quantitative, ma non qualitative degli elementi ispezionati. Nonostante questa loro "difetto", il loro uso viene finalizzato:

- alla individuazioni di cavità o vuoti;
- all'individuazioni di inclusioni di differenti materiali;
- all'individuazione di anomalie strutturali;
- alla ricerca di barre si armatura;
- alla ricerca di umidità;
- al rilievo di impianti di ogni idrici, elettrici, etc., etc..

## **1.2 Le prove basate sulla propagazione delle onde elastiche all'interno del mezzo: metodo sonico ed impact-echo**

Le prove che si basano sulla propagazione delle onde elastiche all'interno del mezzo solido sono oramai largamente utilizzate nel campo dell'ingegneria civile come strumenti di analisi delle murature; in questo settore, la tecnica viene utilizzata per ricavare informazioni riguardo l'integrità materiale degli elementi analizzati e per ricavare alcuni indici strutturali (costante elastica) utili per una diagnosi del mezzo. Tuttavia, trattandosi di un materiale non omogeneo, gli studi condotti in ambito scientifico con queste tecniche, riguardano principalmente il calcestruzzo e successivamente, i risultati ottenuti vengono poi applicati anche alle murature. Basandosi sulle riflessioni che le onde elastiche subiscono quando incontrano una superficie di separazione tra due materiali dalle proprietà meccaniche differenti, risulta evidente che per la muratura il numero di tali riflessioni risulterà elevato rendendo difficoltosa la lettura dei dati.

Nel presente lavoro, le tecniche (sonica ed impact-echo) sono state utilizzate innanzitutto per valutare la profondità di fessure presenti nei solai di palazzi storici, e nel caso particolare di quelli della sala Rossa e della sala dell'Ovale del palazzo Malvezzi sito a Bologna in via Zamboni, sede degli uffici della Provincia, e successivamente per controllare le velocità di propagazione del segnale nei mezzi sottoposti alle prove.

Per quanto riguarda lo studio della profondità delle fessure, sono pochi i lavori reperibili in letteratura in quanto le prove impact-echo vengono eseguite principalmente per valutare gli spessori delle lastre in cemento armato, la presenza di difetti all'interno di lastre in cemento armato e le condizioni di riempimento delle guaine contenenti i trefoli di precompressione per le travi post-compresse. Considerando che questa tecnica si è sviluppata proprio per indagare gli spessori ed i difetti presenti all'interno di lastre in calcestruzzo e potendo contare su una semplice applicabilità in cantiere ed una facile lettura dei risultati di tale metodo, sono state realizzate normative che hanno consentito di standardizzare tali prove in questo campo [5].

Le principali applicazioni del metodo negli ultimi anni riguardano lo studio degli elementi in c.a.p.: la capacità di individuare difetti presenti all'interno del calcestruzzo e di valutare il non perfetto riempimento delle guaine di post-compressione, causa di corrosione dei trefoli e quindi di perdita di resistenza delle travi, hanno permesso a tale tecnica di diventare un ottimo strumento di analisi non distruttiva. Diverse sono le applicazioni eseguite in sito [33] ed in laboratorio [23, 26] ed in tutte le occasioni sono stati ottenuti dei buoni risultati per quanto riguarda la valutazione dell'integrità degli elementi c.a.p. post-compressi.

Le frequenze generate con questa tecnica risultano superiori di quelle prodotte da prove soniche e la loro applicazione ad elementi non omogenei come le murature può causare una scarsa profondità di indagine: infatti, velocità di propagazione e forma d'onda del segnale (frequenza e lunghezza dell'onda) sono tra loro legate e per una data velocità, all'aumentare della frequenza diminuisce la lunghezza d'onda e la sua risoluzione [11, 44]; inoltre, maggiore è la frequenza utilizzata, maggiore sarà l'attenuazione del segnale provocando una diminuzione di penetrazione dello stesso [42].

Lo studio della profondità delle fessure con l'utilizzo di questa tecnica è stato sviluppato su elementi in calcestruzzo [44]: nelle prove eseguite in questo studio, è stata verificata la validità della formula proposta applicandola a diverse tipologie di fessure analizzate (rettilinee, inclinate e curve). I risultati ottenuti hanno fornito una ottima approssimazione della lunghezza reale.

Le prove soniche, invece, vengono utilizzate principalmente per valutare le velocità di propagazione e l'attenuazione del segnale all'interno del mezzo sottoposto ad indagine e, tramite i risultati ottenuti, fornire indici sulla qualità del materiale (più o meno consistente) e sulle sue caratteristiche meccaniche (modulo elastico E): i dati ottenuti con questa tecnica, sono da ritenersi puramente qualitativi nonostante si possano ricavare parametri meccanici.

Le modalità di applicazione di questa tecnologia sono diverse e si distinguono tra loro per la possibilità di accedere o meno alle diverse facce dell'elemento ispezionato. La tomografia sonora, realizzabile quando tutte le facce sono libere (pilastro), consente di ottenere mappe dettagliate della velocità di trasmissione del segnale lungo una sezione dell'oggetto analizzato: gli studi condotti con

questo metodo [19, 10] hanno evidenziato potenzialità e lacune del metodo che risulta oneroso dal punto di vista del tempo necessario all'acquisizione dei dati (numerosità delle postazioni da effettuare) e della loro elaborazione, ma è in grado di fornire in dettaglio informazioni riguardo lo stato di salute della sezione ispezionata.

Non potendo accedere liberamente a tutte le superfici dell'oggetto da sottoporre ad analisi, la prova sonica può essere utilizzata in riflessione, tecnica che consente di valutare velocità di propagazione del segnale sulla superficie ispezionata: da queste analisi, è possibile ricavare informazioni riguardanti la presenza di fessure o di altri difetti [10]. Nelle comuni applicazioni della tecnica, gli schemi di rilievo sono rettangolari (suddivisi in maglie di dimensioni minori), mentre lo studio condotto su schemi circolari (con linee d'indagine radiali) consente di ottenere un numero maggiore di informazioni [19].

### **1.3 Il Ground Penetrating Radar (GPR)**

La tecnica d'indagine basata sulla propagazione delle onde elettromagnetiche è da tempo applicata a diversi settori scientifici, ma la sua applicazione al campo dell'ingegneria civile risulta recente e ancora in via di sviluppo. Inizialmente, i software disponibili fornivano risultati di difficile interpretazione che solamente operatori esperti potevano decifrare, ma il crescente numero di applicazioni di questa tecnica ha portato allo sviluppo di software in grado di fornire anche semplici risultati leggibili da operatori non esperti: la possibilità di realizzare immagini tridimensionali degli oggetti ispezionati ha dato un notevole contributo allo sviluppo della tecnica avvicinando il tecnico al fruitore dei risultati delle indagini eseguite tramite radar [35]. Le notevoli potenzialità della tecnica, hanno permesso di eseguire studi in diverse direzioni e ottenendo dei notevoli risultati: le applicazioni riguardano il monitoraggio di strutture viarie [33, 34], la ricerca di elementi nascosti all'interno di murature [11, 18] e rilievi di umidità superficiale e profonda [24, 36].

Nel campo delle indagini e controllo delle infrastrutture viarie, questa tecnica viene applicata con degli ottimi risultati [29]: la possibilità di eseguire le indagini senza la necessità di chiudere il tratto interessato e la rapidità di esecuzione delle prove ha permesso un rapido sviluppo e la standardizzazione del metodo per quanto riguarda la valutazione degli spessori della pavimentazione stradale [6].

La possibilità di variare facilmente la profondità di penetrazione e la risoluzione del segnale, ha permesso a questa tecnica di essere applicata con notevole successo anche alle indagini condotte su murature storiche [9, 11] in quanto le indagini radar possono offrire informazioni riguardo la conformazione e la conservazione degli strati interni degli organi murari. Sono molte, infatti, le applicazioni che si possono trovare nella letteratura scientifica in questo campo in quanto tramite al



tecnica radar è possibile anche valutare l'efficacia degli interventi di consolidamento effettuati sulle opere [11, 24].

La propagazione delle onde elettromagnetiche è influenzata dalle caratteristiche dielettriche del mezzo investigato quindi, per uno stesso materiale, la velocità del segnale può variare in base al contenuto di acqua o di sali presenti in esso e questo fenomeno viene sfruttato per valutare la presenza di umidità e di risalita capillare all'interno degli elementi strutturali. Le infiltrazioni d'acqua provocano gravi danni alle opere civili sia per quanto riguarda il loro stato di conservazione, sia per la stabilità statica delle opere e risulta evidente la necessità di monitorare tale fenomeni: in questo campo, la tecnica GPR si è dimostrata un valido strumento di diagnostica consentendo di valutare la presenza di umidità ed i livelli di risalita capillare permettendo in questo modo di valutare le condizioni reali e gli eventuali interventi da dover sostenere [36, 18, 40, 41, 24]. Sempre in questo campo, lo sviluppo della tecnologia radar è indirizzata alla ricerca di correlazioni tra quantità di sali presenti all'interno di elementi strutturali e attenuazione del segnale: anche in questo caso, le soluzioni saline alterano le caratteristiche dielettriche dei mezzi sottoposti ad indagine provocando una maggiore attenuazione del segnale. Tra i vari studi eseguiti in questo settore [24, 9, 31, 32] sono state realizzate anche delle raccomandazioni per il controllo del livello di umidità presente all'interno di murature costituite da elementi regolari [41]: in questo lavoro vengono fornite le indicazioni sulla strumentazione da utilizzare, sulle procedure da eseguire per la prova, sul tipo di analisi da effettuare con dati raccolti e il contenuto della relazione finale.

Già in studi precedenti [31, 32] era stata verificato il legame tra contenuto di umidità degli elementi murari e valore della parte reale della costante dielettrica del mezzo: nelle analisi condotte, viene studiata la relazione tra diversi contenuti di umidità in diversi materiali dimostrando che per ogni elemento analizzato è possibile ricavare una propria legge specifica. I risultati ottenuti mostrano un legame di tipo lineare: all'aumentare di un parametro si nota anche un aumento dell'altro. Le indicazioni ottenute con queste prove sono state utilizzate anche per indagini eseguite in situ per rilevare la quantità di umidità presente all'interno di organi murari: i valori della costante dielettrica ricavati lungo delle linee radar, sono stati utilizzati per realizzare dei profili verticali del contenuto di umidità e i valori così ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati tramite indagini gravimetriche lungo gli stessi profili. I risultati hanno mostrato che la tecnica radar è in grado di fornire informazioni riguardanti l'andamento ed il contenuto di umidità degli elementi ispezionati, ma non è in grado di cogliere singolarità evidenziate tramite analisi gravimetriche.

## 1.4 Le indagini termografiche

Con lo sviluppo della strumentazione e della tecnologia, la termografia trova un sempre maggiore spazio come metodo d'indagine non distruttiva da applicare al settore dell'ingegneria civile; la possibilità di investigare anche grandi superfici senza la necessità di contatto diretto con queste, rende tale tecnica adatta a diverse indagini sia in cantiere che in laboratorio.

Tra i principali studi effettuati in situ con questa tecnica si possono trovare le analisi eseguite per determinare la presenza ed i movimenti di umidità all'interno degli elementi strutturali, fenomeno che affligge la maggior parte delle strutture storiche e causa di rilevanti problemi di danneggiamento e degrado: l'evaporazione dell'umidità presente all'interno delle muratura provoca sulla superficie di tali elementi un abbassamento della temperatura che la termografia è in grado di valutare e rendere visibile tramite i termogrammi.

In questo campo, gli studi sono effettuati per rilevare la presenza di depositi d'acqua e monitorare le variazioni dei livelli di umidità provocati dalle escursioni di temperatura stagionali [12]: le analisi possono fornire ottime indicazioni sui punti critici e sugli eventuali interventi da effettuare e sono utilizzate per valutare la situazione attuale e tracciare mappe del sistema di drenaggio.

Altri studi sono stati condotti per valutare i movimenti di acqua all'interno di materiali porosi [4]: in questo caso, le analisi sono state eseguite sia per monitorare il livello di risalita capillare sia per valutare il danno e il grado di deterioramento subito dai materiali sottoposti ad indagine. La campagna di prove ha previsto indagini in laboratori ed in cantiere e in tutti i casi la termografia si è dimostrata un valido strumento di diagnostica.

Questa tecnica viene utilizzata anche per la ricerca di difetti (vuoti o inclusioni) presenti all'interno degli elementi strutturali [16] e per valutare le condizioni di aderenza tra supporto e rinforzo strutturale in fibra [17]: la presenza di aria imprigionata tra supporto e rivestimento (fibre, intonaco o altri materiali) crea una distribuzione non uniforme delle temperature superficiali osservabili in quanto si creano sacche che tendono a rilasciare calore più lentamente apparendo così come zone a maggior temperatura.

In tutti gli studi presentati finora, non viene utilizzata alcuna fonte esterna di calore, ma si sfruttano solamente i gradienti di temperatura provocati da un differente irraggiamento solare durante le diverse fasi del giorno; in questo caso la termografia viene definita passiva. In laboratorio, potendo operare in condizioni maggiormente controllate, è possibile eseguire prove di termografia attiva, utilizzando cioè fonti di calore in grado di alzare o abbassare bruscamente le temperature degli elementi da sottoporre ad indagine.

Potendo contare su condizioni al contorno definite e diminuendo notevolmente le fonti di disturbo, gli studi condotti in laboratorio sono finalizzati ad individuare con maggiore dettaglio la presenza di difformità: valutando la differente frequenza dell'onda infrarossa emessa dalla sorgente di calore e quella fornita come risposta dall'oggetto investigato, si possono individuare con notevole precisione le dimensioni, la forma e la profondità dei difetti ispezionati [2]. Lo scopo di questi studi è quello di poter fornire risultati quantitativi e non solo qualitativi.

Altri studi in laboratorio sono stati eseguiti per poter valutare a priori l'applicabilità della termografia a diversi casi [37, 38]: attraverso la conoscenza di due parametri adimensionali, che risultano essere funzione delle caratteristiche dei materiali in uso nel test, è possibile prevedere quale sarà il massimo contrasto visibile nei termogrammi valutando a priori l'efficacia di un'analisi condotta tramite questa tecnica ed evitando così campagne di acquisizione che risulterebbero insoddisfacenti per i risultati ottenuti con vantaggi in termini di tempo e denaro.

## Capitolo 2

# PRINCIPI DELLE TECNICHE NON DISTRUTTIVE UTILIZZATE

---

### 2.1 Il metodo impact-echo

#### 2.1.1 Finalità e sviluppo del metodo

Il metodo Impact-Echo è una tecnica di controllo e monitoraggio delle condizioni di integrità di elementi strutturali in calcestruzzo e muratura. Nato principalmente per indagare le cause di collasso di nuove costruzioni in c.a. durante le fasi di costruzione (anni '70-'80), il suo utilizzo si è poi esteso anche al monitoraggio di opere in muratura.

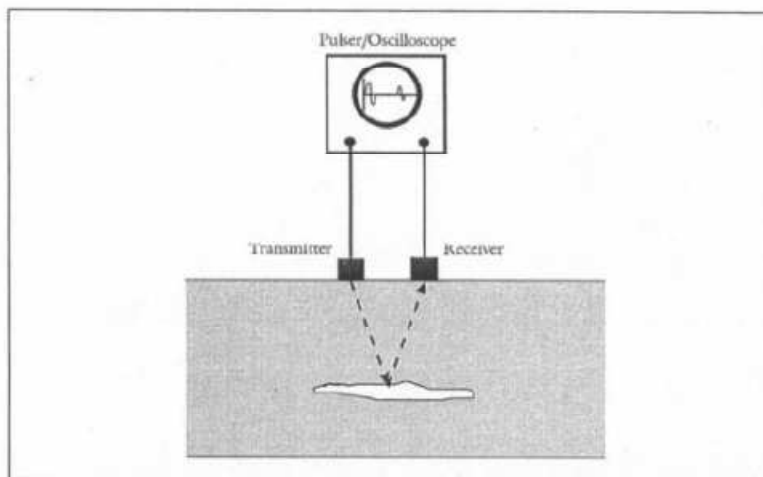
Il metodo nasce nei primi anni ottanta sotto la guida di Mary J. Sansalone e del Dr. Nicolas Carino al National Bureau of Standard (ora divenuto il National Institute of Standard and Technology) e continua il suo sviluppo presso la Cornell University. Il test permette di individuare la posizione dei difetti come fessure, vuoti interni, nidi di ghiaia in elementi di cemento semplice e armato e delaminazioni presenti all'interno di elementi strutturali. Altre applicazioni del metodo riguardano la determinazione della presenza dei vuoti all'interno delle guaine contenenti trefoli post-tesi di strutture precomprese, la misura dello spessore di lastre in calcestruzzo e il calcolo della profondità di fessure diversamente inclinate e visibili in superficie.

La semplicità della strumentazione e la rapidità di esecuzione della prova hanno permesso un rapido sviluppo del metodo che, se usato correttamente, offre ottimi risultati per l'indagine dei difetti presenti all'interno di edifici civili, gallerie, impalcati da ponte, pavimentazioni stradali e rende quindi tale metodo un ottimo mezzo di controllo per le opere già esistenti. Nonostante queste caratteristiche, l'Impact-Echo non sempre risulta essere idoneo come strumento di indagine: infatti, le tante variabili che entrano in gioco nell'analisi e la conoscenza della teoria alla base della strumentazione, richiedono all'operatore una buona conoscenza del metodo per poter interpretare i dati, specialmente nelle condizioni in cui ci si trova ad operare ordinariamente: se in laboratorio sono note le diverse condizioni al contorno e si conoscono già le caratteristiche dell'elemento oggetto di studio, ciò non accade in situ dove la lettura dei dati forniti può non risultare sempre chiara ed immediata.

L'Impact-Echo fa parte di quei metodi di diagnosi non distruttivi che si basano sul principio di propagazione delle onde acustiche all'interno di un mezzo solido. Le principali caratteristiche

derivano dalle analisi ultrasoniche già note da tempo ed impiegate per quei materiali più omogenei come acciaio e materie polimeriche. Infatti, i metodi sonici ed ultrasonici si basano sul principio di “ascoltare” il suono restituito da una superficie eccitata con la sola differenza delle frequenze scelte per mettere in moto il sistema; se mezzi omogenei permettono l’utilizzo di onde ad alta frequenza (ultrasuoni), mezzi più eterogenei e con diverse superfici di discontinuità necessitano di frequenze inferiori (onde soniche).

La strumentazione necessaria per eseguire la prova è costituita da una massa battente che eccita la superficie dell’elemento da sottoporre ad analisi, una sonda ricevente che può essere un trasduttore di spostamenti o un accelerometro e un oscilloscopio che visualizza il segnale. Le onde acustiche vengono generate tramite impatto di una sfera metallica sulla superficie dell’elemento da testare, si propagano all’interno del mezzo, e raggiungono la sonda ricevente posizionata vicino al punto d’impatto



*Figura 2.1 Rappresentazione schematica del metodo Impact-Echo (Sansalone e Street,1997)*

Nota la velocità di propagazione delle onde all’interno del mezzo e il tempo impiegato da questa per raggiungere la sonda ricevente (tempo di volo), si può ricavare attraverso l’uso di semplici formule lo spessore dello strato studiato. Se il segnale registrato durante l’analisi è in funzione del tempo (ampiezza del segnale rispetto il tempo), risulta più agevole per il metodo in questione analizzare i risultati nel dominio delle frequenze; tale operazione viene eseguita tramite trasformazione secondo Fourier del segnale sorgente. In questo modo ciò che viene analizzato non è la time-history (ampiezza-tempo) che richiederebbe competenze elevate, ma la funzione frequenze-tempo (spettro delle frequenze) che riproduce la scomposizione del segnale originale nella somma di tanti segnali periodici, caratterizzati da una frequenza caratteristica. Proprio questa caratteristica dell’Impact-Echo ha reso tale metodo uno strumento di rapida e semplice utilizzazione: infatti, dallo studio di

tale funzione è possibile individuare i picchi di frequenze associati allo spessore dell'elemento, alla presenza di fratture e di altri difetti.

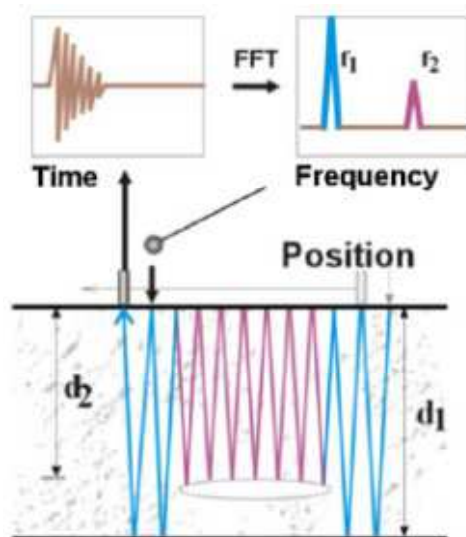


Figura 2.2 Rappresentazione del metodo Impact-Echo: trasformazione del segnale (J Nondestruct Eval 27, 2008)



Figura 2.3 Distinzione delle frequenze per diversi materiali (Appunti di lezione del prof. Pascale)

Come detto in precedenza il metodo deriva dalle analisi ultrasoniche, ma a differenza di queste le frequenze utilizzate nell'Impact-Echo non possono essere le stesse e la necessità di indagare un materiale non omogeneo come può essere il calcestruzzo hanno condotto alla necessità di dover utilizzare un set di frequenze più ampio che si sviluppa nello spettro delle onde sonore; utilizzando delle sfere in acciaio di opportune dimensioni, si possono raggiungere frequenze fino a circa 80kHz anche se normalmente le frequenze utilizzate sono inferiori a 50kHz, più spesso ai 20kHz. L'utilizzo di alte frequenze per un materiale non omogeneo comporterebbe un'impossibilità di

lettura dei risultati a causa delle innumerevoli rifrazioni e del conseguente smorzamento del segnale. Lo svantaggio di tutto ciò ricade sulla possibilità di individuare i difetti più piccoli, in quanto minori sono le frequenze utilizzate, minori sono i dettagli che si possono cogliere da un'analisi di questo tipo.

### 2.1.2 Generazione del segnale e suo contenuto in frequenza

L'applicazione di una forza sulla superficie di un solido produce una accelerazione ed una deformazione nel suo punto di applicazione; se la forza è tale da non instaurare fenomeni di plastificazione del materiale ed è applicata istantaneamente, allora si possono generare nel mezzo delle onde di pressione (onde acustiche) di diverso tipo.

Nel metodo Impact-Echo tali onde sono generate tramite l'utilizzo di piccole sfere in acciaio di diverso diametro (da 3 a 15 mm) che vengono fatte impattare con la superficie da analizzare. I parametri che caratterizzano l'impatto sono il diametro  $D$  della sfera utilizzata, il tempo di contatto  $t_c$  tra la superficie e la sfera e l'energia cinetica posseduta dalla massa battente al momento dell'impatto. La scelta di questi parametri deve essere molto accurata in quanto diverse saranno le caratteristiche delle onde generate e di conseguenza dei difetti riscontrabili; in particolare, il tempo di contatto determina il contenuto in frequenze e la lunghezza d'onda del segnale mentre il diametro della sfera caratterizza la frequenza massima ottenibile.

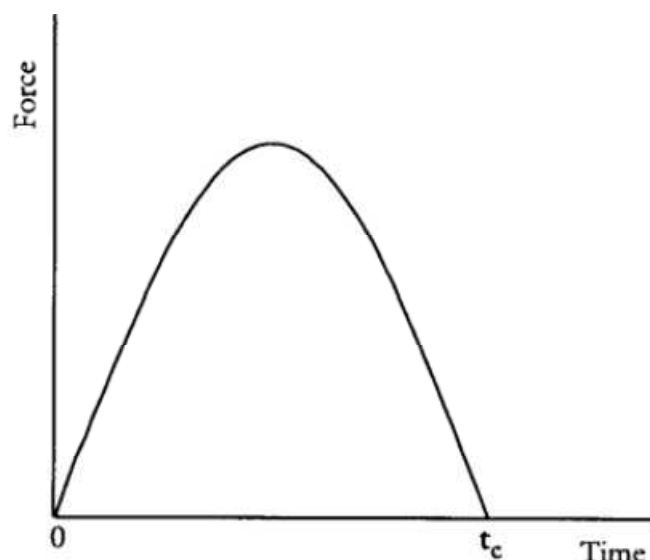


Figura 2.4 *Impatto elastico di una sfera metallica sulla superficie di un solido (Sansalone e Street, 1997)*

L'energia cinetica posseduta dalla sfera viene trasformata in energia elastica nel momento dell'impatto con la superficie. In linea teorica, se la sfera venisse lasciata cadere da una determinata altezza  $h$ , il tempo di contatto prenderebbe la forma

$$t_c = \frac{0.043 \cdot D}{h^2}$$

in cui è possibile notare la dipendenza di  $t_c$  dalla dimensione della sfera; nella pratica, però le sfere non vengono lasciate cadere liberamente da un'altezza  $h$ , ma sono attaccate ad un'asta metallica. In questo caso scompare la dipendenza da  $h$  e la formula diventa

$$t_c = 0.043 \cdot D$$

Tale valore risulta di notevole importanza, essendo legato al contenuto in frequenza del segnale; applicando la trasformazione di Fourier al primo picco della funzione forza-tempo registrata, si ottiene la distribuzione delle ampiezze e delle frequenze nelle onde generate dall'impatto.

È possibile osservare come l'energia varia in maniera significativa col contenuto in frequenze del segnale: all'aumentare di questo si ha una rapida perdita di energia ed è per tale motivo che nel metodo Impact-Echo viene definita la massima frequenza utilizzabile:

$$f_{max} = \frac{1.25}{t_c} = \frac{291}{D}$$

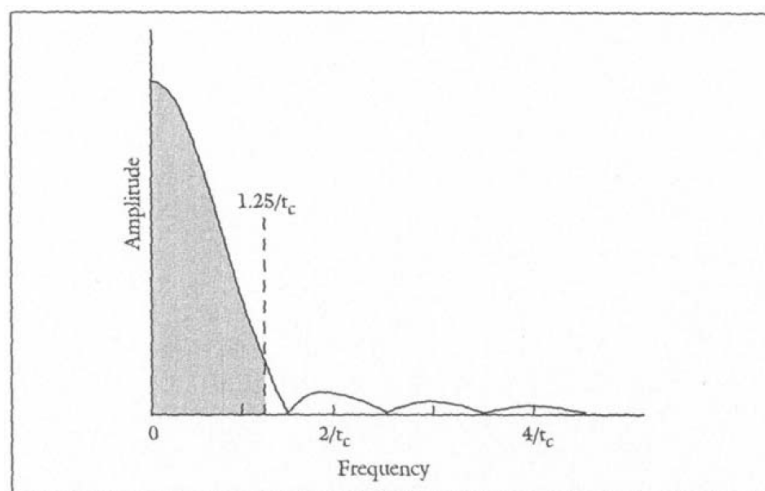


Figura 2.5 Spettro delle frequenze relativo alla funzione forza tempo (Sansalone e Street, 1997)

La relazione è di notevole importanza in quanto mostra il legame tra il tempo di contatto, e quindi del diametro, con la massima frequenza ottenibile per l'indagine. Utilizzando quindi sfere con diametri diversi si potranno ottenere intervalli diversi di frequenze utilizzabili: sfere di piccolo diametro generano segnali di basso contenuto energetico su un ampio spettro di frequenze potendo conferire al segnale una buona risoluzione nella ricerca dei difetti a discapito di una minore capacità di propagazione in profondità nel materiale dovuta a piccole lunghezze d'onda. Sfere dal diametro



maggiore, invece, avendo un tempo di contatto superiore, generano un segnale caratterizzato da onde di grande lunghezza e bassa frequenza: questa caratteristica consente di avere meno dispersione del segnale, ma allo stesso tempo conferisce una minore risoluzione. Risulta quindi importante la scelta del diametro in base al tipo di analisi che si deve eseguire: in mezzi non omogenei come calcestruzzi e materiali lapidei il segnale subirà notevoli perdite alle alte frequenze. Conoscendo le caratteristiche della strumentazione utilizzata e quelle del mezzo da esaminare si può risalire alla minima lunghezza d'onda generata ed alla massima risoluzione ottenibile: infatti, definendo  $c$  la velocità delle onde acustiche all'interno del mezzo ed  $f_{max}$  la massima frequenza utilizzabile, si possono calcolare la minima lunghezza d'onda  $\lambda_{min}$  e la risoluzione  $R$

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}}$$

$$R \approx \lambda_{min}/2$$

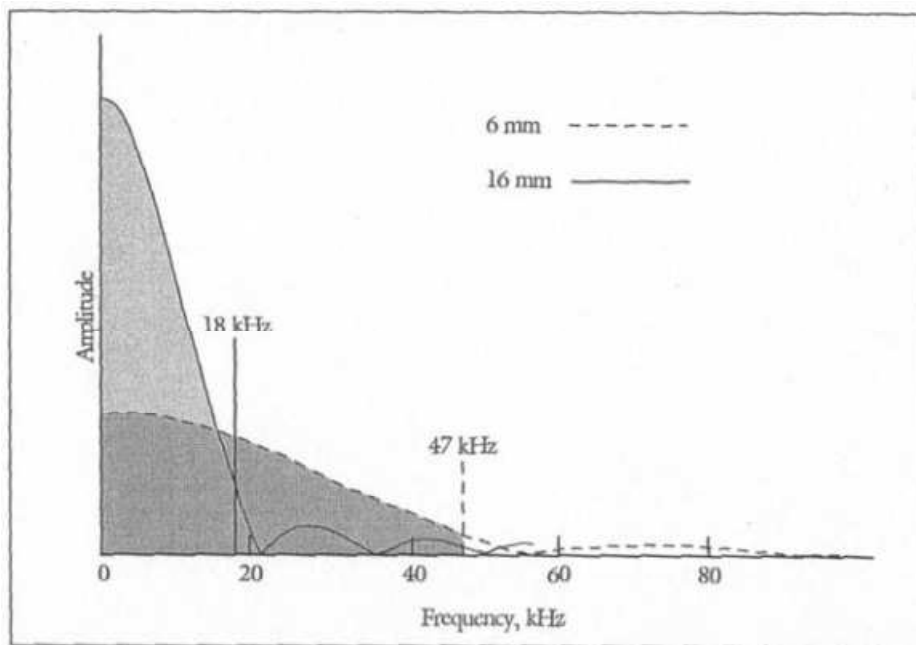


Figura 2.6 Confronto tra spettri delle frequenze ottenuti con sfere di diverso diametro (Sansalone e Street, 1997)

### 2.1.3 Le onde acustiche

Se un solido viene eccitato tramite una forzante impulsiva sulla sua superficie, in esso si generano delle onde elastiche di forma semisferica che si propagano al suo interno e delle onde circolari che si irradiano sulla superficie dell'elemento. Questi tipi di onde si propagano senza trasporto di materia, ma inducono nel materiale diversi stati di sollecitazione; in base alle loro caratteristiche, si possono distinguere tre classi distinte:

- onde P o primarie o di compressione;
- onde S o secondarie o di taglio;
- onde R o di superficie o di Rayleigh.

Le onde P inducono stati di sollecitazione assiali di compressione e trazione per tale motivo vengono definite onde di compressione. Tali perturbazioni si propagano su superfici semisferiche e le particelle colpite dal fronte oscillano ortogonalmente ad esso; sono le più veloci e sono le prime ad essere avvertite ed è per tale motivo che vengono anche chiamate onde primarie.

Le onde S sono onde di scorrimento e come le primarie si propagano su superfici sferiche, ma la loro velocità è inferiore. Inducono nel corpo stati tangenziali ed è per tale motivo che non si possono generare all'interno di liquidi. Al loro passaggio, le particelle investite oscillano parallelamente al fronte dell'onda.

Le onde R o di Rayleigh sono onde che si sviluppano sulla superficie a causa dell'interazione delle onde S con la superficie stessa e generano un movimento ellittico delle particelle colpite. La velocità di propagazione è leggermente inferiore rispetto le onde S

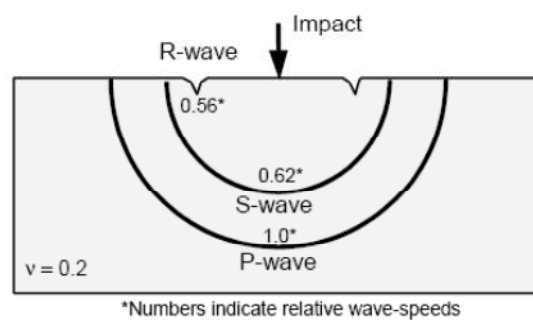


Figura 2.7 Propagazione dei fronti d'onda all'interno di un solido (N.J. Carino, 2001)

Se il mezzo in cui si propagano le onde è omogeneo, elastico e semi-illimitato, la velocità delle onde P è funzione delle costanti elastiche del materiale e la relazione tra queste è data da:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

dove E è il modulo elastico del materiale,  $\nu$  è il coefficiente di Poisson e  $\rho$  è la densità.

Anche la velocità delle onde S è data da una relazione tra le costanti elastiche del mezzo, ma in questo caso, visto il tipo di sollecitazione indotta, comparirà il modulo elastico tangenziale G

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

Mettendo in relazione le due espressioni si può notare come il loro rapporto sia funzione del coefficiente di Poisson e che per valori comuni di questo, la relazione sia minore di 1 e nel caso particolare di  $\nu = 0,2$  tipico per un calcestruzzo questo rapporto vale 0,62

$$\frac{C_s}{C_p} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}$$

Dal rapporto tra le velocità delle onde R ed S, invece, si può notare come il valore sia di poco inferiore all'unità sempre considerando un valore di  $\nu$  pari a 0,2; in questo caso, infatti si ottiene che la velocità delle onde R è pari al 92% di quelle S.

$$\frac{C_r}{C_s} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}$$

Il fenomeno di propagazione delle onde all'interno di un mezzo continuo risponde alle comuni leggi del moto ondulatorio la cui espressione fondamentale lega la velocità dell'onda  $C$ , la sua frequenza  $f$  e la sua lunghezza  $\lambda$ :

$$C = f \cdot \lambda$$

Tale equazione risulta essere fondamentale per poter progettare l'analisi da eseguire in quanto la frequenza generata dal segnale, e di conseguenza la lunghezza d'onda dello stesso, sono strettamente legate alle dimensioni del difetto rilevabile come visto: infatti, le onde di pressione sono in grado di superare discontinuità del materiale che abbiano una estensione minore di circa la metà della lunghezza d'onda mentre vengono riflesse se la dimensione è superiore.

Quindi, per poter individuare difetti di piccole dimensioni sarebbe necessario generare un segnale dall'alto contenuto in frequenze. Se questo procedimento risulta di semplice applicazione per un materiale omogeneo come l'acciaio, non lo è per quella categoria di materiali che presentano diverse superfici di discontinuità al loro interno: in questo caso, infatti, la presenza di micro fratture, di micro vuoti e di granuli causerebbe un'elevata dispersione delle alte frequenze del segnale ed è per tale motivo che diventa essenziale progettare a priori il range di frequenze da dover utilizzare nelle analisi in modo tale che i risultati ottenuti siano attendibili e utilizzabili.

Analizzando il contenuto energetico delle onde generate da un impatto puntiforme sulla superficie di un solido, si nota che le onde P hanno il loro picco di energia proprio sulla verticale del punto d'impatto mentre per le onde S il picco risulta inclinato di  $45^\circ$  rispetto le prime ed è proprio per la necessità di rilevare le riflessioni delle onde di compressione che nel metodo Impact-Echo la sonda ricevente viene posta vicino la sorgente; infatti, l'elevato contenuto energetico posseduto dalle primarie in questa posizione garantisce un certo numero di riflessioni mentre viene ridotto al minimo l'influenza delle secondarie che in questa posizione hanno un contenuto energetico basso.

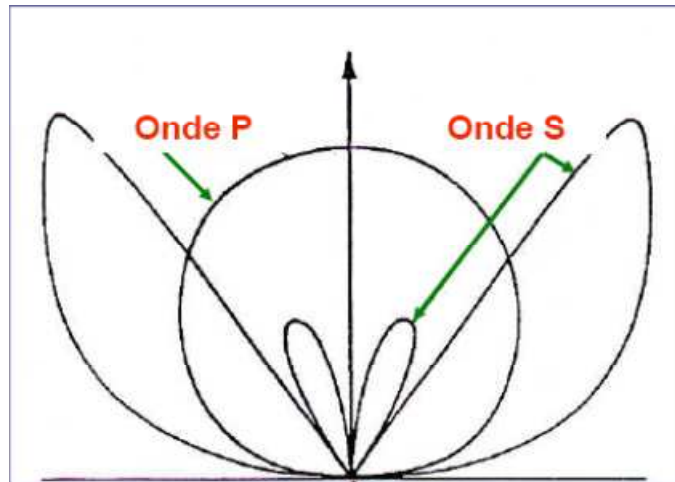


Figura 2.8 Contenuto energetico delle onde P ed S in diagramma polare

#### 2.1.4 Leggi di rifrazione e riflessione

Per introdurre i concetti di questo paragrafo è necessario innanzi tutto definire l'impedenza acustica  $Z$  come rapporto tra pressione sonora  $p$  e velocità di vibrazione delle particelle in un punto  $v_p$ :

$$Z = \frac{p}{v_p}$$

- Se la forzate del moto di propagazione delle onde acustiche è la pressione sonora, la forza resistente che si oppone a tale moto è l'impedenza. Tale concetto risulta di fondamentale importanza per poter descrivere il comportamento delle onde che incontrano un'interfaccia tra materiali diversi con impedenze diverse. Quando una perturbazione incontra una superficie di separazione, il segnale può subire diversi fenomeni: riflessione e/o trasmissione, cambiamento di direzione (rifrazione), attenuazione del segnale e diffrazione; tutti questi fenomeni provocano una variazione nell'ampiezza d'onda del segnale ed in base all'impedenza acustica dei materiali incontrati, prevarrà un fenomeno piuttosto di un altro. Definite  $Z_1$  e  $Z_2$  le impedenze dei due materiali a contatto ed  $r$  e  $t$  i coefficienti di riflessione e di rifrazione tramite le seguenti formule

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad ; \quad t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

dove  $p_i$ ,  $p_r$ ,  $p_t$  sono rispettivamente le pressioni acustiche dell'onda incidente, riflessa e trasmessa. Si potranno distinguere i seguenti casi:

-  $Z_2 > Z_1$

il primo coefficiente è maggiore di zero ed indica che l'onda riflessa è in fase con quella incidente mentre  $t$  risulta maggiore di uno: l'ampiezza del segnale trasmesso viene amplificata.

$$-Z_2 < Z_1$$

$r$  è minore di zero ed il coefficiente di trasmissione è minore di uno: l'onda riflessa è in contrapposizione di fase con quella incidente e l'ampiezza di quella trasmessa è attenuata.

Il primo caso descritto è rappresentativo di un'interfaccia malta-laterizio mentre il secondo è caratteristico di un accoppiamento laterizio-malta; basta pensare alla conformazione di un elemento murario per poter immediatamente immaginare il numero di riflessioni subite da un segnale a causa delle diverse superfici di separazioni presenti con conseguente sovrapposizione di segnali.

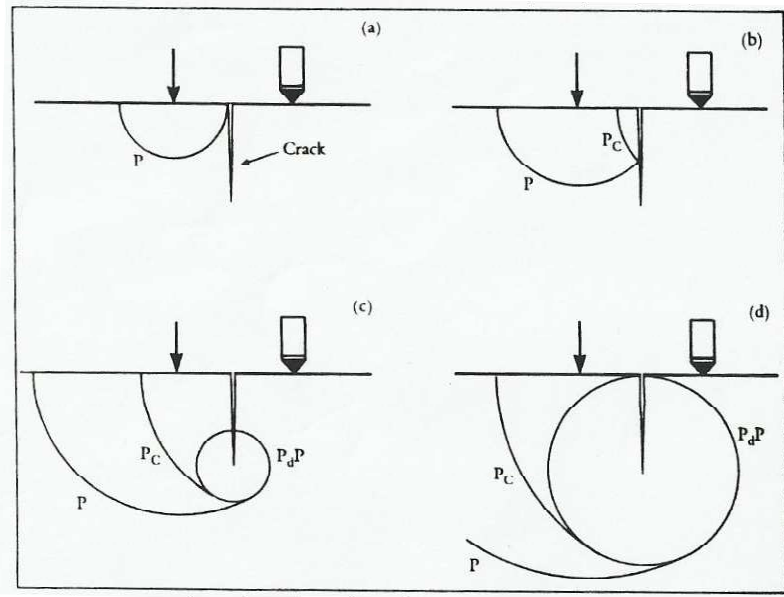


Figura 2.9 Propagazione delle Onde P in presenza di fessure: fenomeno della riflessione (b) e rifrazione (c, d). (Sansalone e Street, 1997)

Quanto detto presuppone che i materiali in cui si propagano le onde siano omogenei e privi di discontinuità, situazione di difficile realizzazione nella pratica per materiali lapidei: infatti, questi materiali, presentano al loro interno vuoti d'aria e fratture di dimensioni finite ed ogni volta che un segnale incontra una di queste, subirà anche una diffrazione all'estremità della fessura. Le onde generate da questo tipo di disturbo si propagano lungo fronti cilindrici centrati nel bordo della discontinuità dando vita a quelle che vengono definite  $P_dP$  (onde primarie difratte) come mostrato in Figura 2.9.

Sfruttando questo tipo di comportamento è possibile investigare la profondità di fessure presenti sulla superficie di muri e pavimentazioni senza dover intervenire in maniera invasiva.

### 2.1.5 Analisi in frequenza

Quanto descritto finora riguarda casi ideali è difficilmente applicabili alla situazioni reali; gli elementi strutturali indagati con questo metodo sono ben lontani da essere mezzi omogenei e dalle estensioni illimitate e presentano sia in superficie che all'interno un serie di imperfezioni che interferiscono in qualche modo con la propagazione del segnale provocandone oscillazioni di non facile lettura. Infatti, la ricerca della frequenza dominante all'interno della forma d'onda del segnale risulta essere difficile in quanto viene mascherata da quelle generate dalle imperfezioni già descritte.

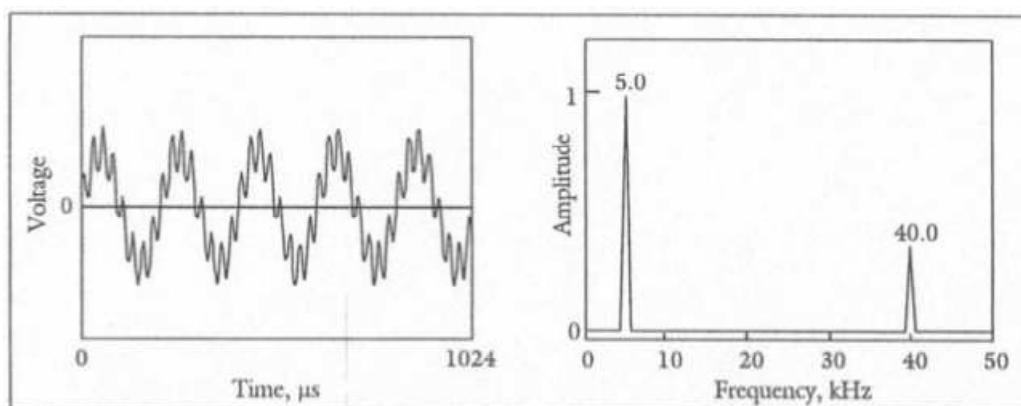


Figura 2.10 Rappresentazione di segnale costituito da due sinusoidi differenti. (Sansalone e Street, 1997)

Per questo motivo nel metodo Impact-Echo il segnale viene trasformato dal dominio nel tempo a quello delle frequenze dove è possibile individuare più facilmente picchi corrispondenti alle frequenze dominanti del segnale; tale trasformazione è eseguita tramite la trasformata di Fourier che consente di scomporre il segnale ondulatorio nella sommatoria di funzioni sinusoidali caratterizzate da ampiezze e frequenze diverse. In questo modo si ricava una funzione in cui sono riportate in ascissa le frequenze componenti il segnale ed in ordinata le relative ampiezze

Tale procedimento si può applicare ad un segnale generato da una prova Impact-Echo, ma in questo caso la scomposizione risulterà più laboriosa a causa della complessità dell'onda. Infatti, le onde generate da questa prova hanno caratteristiche differenti: alla periodicità delle onde primarie si sovrappone l'andamento di quelle superficiali non periodiche che interferiranno con le prime creando così uno spettro che copre un più largo intervallo delle frequenze.

Lo spettro generato sarà costituito da diversi picchi il più importante dei quali è quello corrispondente allo spessore dell'elemento investigato ed è per tale motivo che la corrispondente frequenza viene denominata frequenza di picco.

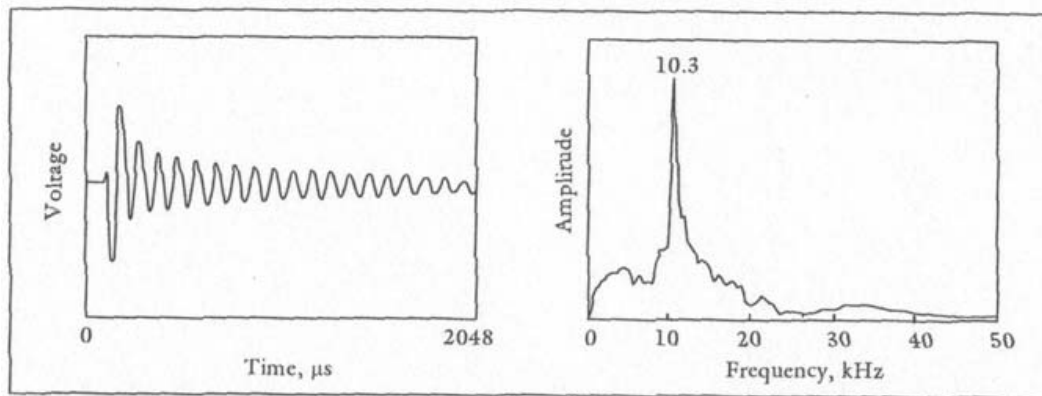


Figura 2.11 Segnale generato da una prova Impact-Echo e corrispondente spettro delle frequenze.  
(Sansalone e Street, 1997)

Nota o stimata la velocità  $c$  o  $v$  di propagazione delle onde nel mezzo e la frequenza di picco d'interesse tramite la relazione:

$$d = \frac{v}{2 \cdot f}$$

dove  $d$  è la profondità dell'interfaccia riflettente i fronti d'onda, si può ricavare lo spessore dell'elemento indagato (o della profondità di un difetto al suo interno).

Anche se le onde R non producono direttamente informazioni utili all'analisi dell'elemento strutturale, il loro spettro in frequenze risulta essere simile a quello generato dalle onde P; in questo modo, il segnale di maggiore interesse può essere mascherato totalmente o in parte da quello delle onde superficiali rendendo così illeggibili le informazioni ricavate dall'analisi.

## 2.2 Ground Penetrating Radar

### 2.2.1 Finalità e sviluppi del metodo

I primi studi riguardanti l'uso di onde elettromagnetiche per rilevare oggetti metallici sono da attribuire al tedesco Hülsmeier nel 1910, ma le prime pubblicazioni per individuare oggetti sepolti sono del 1916 da parte dei due studiosi tedeschi Leimbach e Löwy. Lo studio era finalizzato a trovare una relazione tra la conducibilità del mezzo e l'intensità del segnale trasmesso ipotizzando un comportamento filtrante da parte del terreno: delle antenne dipolo venivano seppellite all'interno di pozzi verticali per poter confrontare le diverse magnitudo dei segnali registrati ottenendo così una mappa rudimentale delle caratteristiche del terreno.

Se i primi lavori riguardavano l'utilizzo di onde continue, nel 1926 Hülsebek, utilizzando impulsi radar, notò che le variazioni del segnale emesso dalla sorgente subiscono delle variazioni ogni qualvolta questi incontrano materiali dalle diverse proprietà dielettriche; egli dimostrò, cioè, che la propagazione di un segnale elettromagnetico all'interno di un mezzo non è funzione della sola conduttività, ma dipende da tutte le caratteristiche dielettriche dei materiali incontrati.

Negli anni successivi la tecnica continua il suo sviluppo soprattutto in campo geologico come strumento per il rilevamento della calotta polare, ma è dalla prima metà degli anni '70 che si assiste ad un nuovo slancio nella ricerca: la possibilità di effettuare delle indagini radar in maniera remota ha consentito la sua applicazione nel rilevamento e controllo di vaste superfici rendendo tale tecnica idonea all'applicazione in campo spaziale e aeronautico.

La progressiva evoluzione della tecnologia ha consentito un sempre più ampio sviluppo del metodo in vari settori passando dall'ingegneria all'archeologia, dall'architettura alla geologia potendo rispondere alle diverse esigenze dei vari settori. Infatti, lo sviluppo tecnologico ha consentito di ovviare a tutte quelle carenze del metodo che non ne permettevano il progredire: la maggiore limitazione consisteva proprio nel grande numero di dati e radargrammi che si ottenevano quando venivano fatte campagne di misura su aree relativamente estese, e nella difficoltà in fase di acquisizione e analisi dei dati. In seguito allo sviluppo di tecnologie informatiche con sempre maggiore capacità

di memoria e velocità di calcolo, parallelamente allo sviluppo di più avanzate tecniche di programmazione ed elaborazione dei dati, oggi è possibile acquisire, analizzare e restituire in forma grafica grandi quantità di dati.



### 2.2.2 La generazione del segnale

La strumentazione radar è costituita da un generatore di segnale, da un'antenna trasmittente ed una ricevente e da un display; i sistemi più avanzati hanno una unità centrale che oltre a generare il segnale, facilita l'analisi del segnale sia in fase di acquisizione che in post-processione.

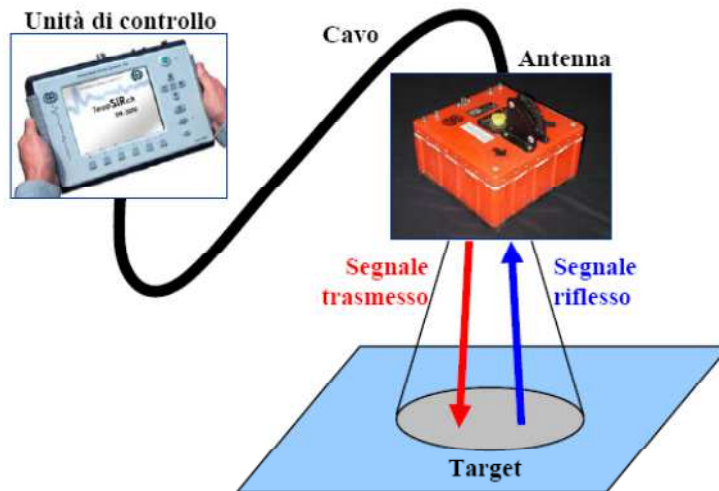


Figura 2.12 Strumentazione per prove georadar (.....)

L'unità centrale invia il segnale all'antenna trasmittente (Tx) la quale genera un treno di onde a radiofrequenza che si propaga all'interno del mezzo da indagare attraverso un ampio fascio. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è pari a  $0.3\text{m/ns}$  ed il tempo impiegato da queste per raggiungere l'antenna ricevente (Rx) una volta inviate da quella trasmittente è dell'ordine di qualche decina/centinaia di nanosecondi ( $\text{ns}=10^{-9}\text{s}$ ). Questo richiede l'utilizzo di strumentazione molto sensibile, in grado cioè di poter apprezzare in maniera precisa questa piccola differenza di tempo in modo tale da fornire dati accurati riguardo la posizione degli oggetti indagati. Nelle più comuni applicazioni il sistema fa uso di una sola antenna dotata di elemento trasmittente e ricevente affiancati; in questo modo alcune tecniche di rilevamento non possono essere utilizzate (tomografia), ma la tecnica non perde il suo valore.

La trasmittente genera un impulso di onde radio ad una frequenza determinata dalle caratteristiche costruttive dell'antenna in uso con una ripetizione tipica di 50000 volte al secondo, mentre la ricevente è settata per analizzare ad un tasso fisso, normalmente superiore ai 32 scans per secondo.

La frequenza del segnale generato è funzione delle caratteristiche costruttive dell'antenna utilizzata; generalmente le antenne sono progettate per lavorare nella banda di frequenze che va da 10 MHz a 2GHz. La scelta dell'antenna da utilizzare (e quindi dalla frequenza) non è casuale, ma deve essere ben studiata in base al tipo di indagine da eseguire: frequenze elevate consentono un'analisi

dettagliata a scapito della profondità raggiungibile, mentre a basse frequenze il fenomeno è esattamente l'opposto privilegiando la penetrazione del segnale alla risoluzione ottenibile.

Il segnale generato è un'onda di forma complessa e può essere visualizzato sul display dell'unità centrale e settato in base alle esperienze ed esigenze dell'operatore che ne modificherà la forma per fornire una più rapida e chiara lettura sia in fase di raccolta dati, sia in fase di rielaborazione.

E' necessario ricordare che l'onda e tutte le sue rifrazioni non sono costituite da un unico segnale, ma sono formate da diverse sovrapposizioni di esse.

Diverse sono le tecniche di acquisizione dei dati che si possono effettuare in base alla strumentazione disponibile: nel caso di antenne con trasmettitore e ricevitore accoppiati, è possibile eseguire analisi solamente in modalità eco monostatica (il segnale deve compiere un percorso in andata e ritorno rispetto al punto in cui è stato generato), mentre, nel caso si disponga di elementi separati, l'indagine può essere realizzata in trasparenza (tomografia) o in modalità eco bistatica (in questo caso è possibile muovere una o tutte e due le antenne). Le diverse tecniche vengono rappresentate in figura .2.

Utilizzando la modalità eco, il segnale emesso attraversa il mezzo da indagare finché non incontra una superficie di discontinuità tra materiali aventi proprietà dielettriche differenti; raggiunta tale interfaccia, parte del segnale attraverserà l'ostacolo proseguendo nel suo cammino, mentre una parte di esso verrà riflessa e captata dall'antenna ricevente.

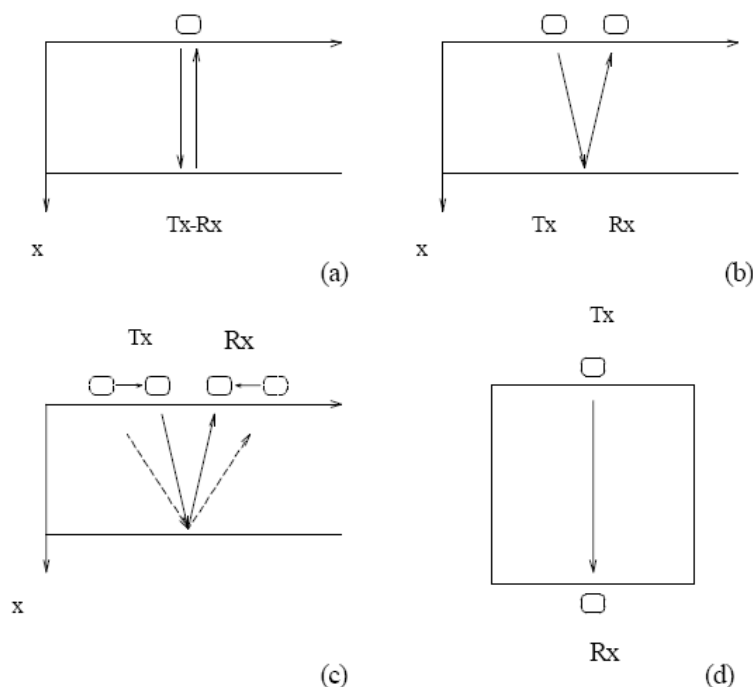


Figura 2.13 Disposizioni delle antenne: a) eco con antenna singola; b),c) eco con antenne separate; d)in trasparenza (L. Binda et al., 2000)

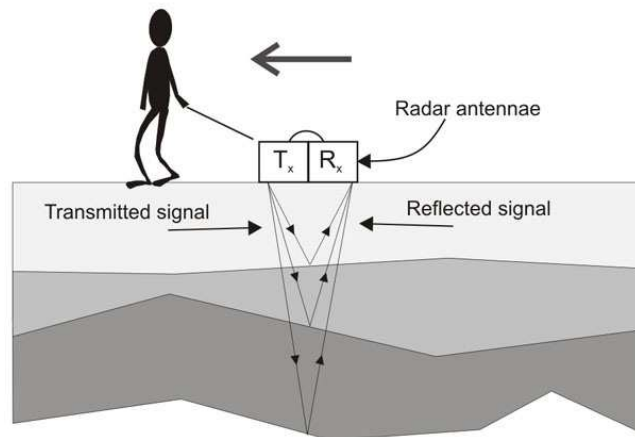


Figura 2.14 Schema di trasmissione del segnale in modalità di riflessione

Come detto, l'impulso generato è costituito da un treno di onde elettromagnetiche caratterizzato da un particolare contenuto in frequenze determinato dall'antenna utilizzata; quando il segnale incontra un oggetto dalle caratteristiche dielettriche differenti da quelle del mezzo in cui si è propagato, subirà una variazione nella sua forma presentando dei picchi in ampiezza tanto maggiori quanto sono differenti le proprietà dei materiali incontrati. Nella figura .4 viene riportato un singolo segnale (scan) dove si può notare un aumento d'ampiezza dovuto all'interferenza di un oggetto

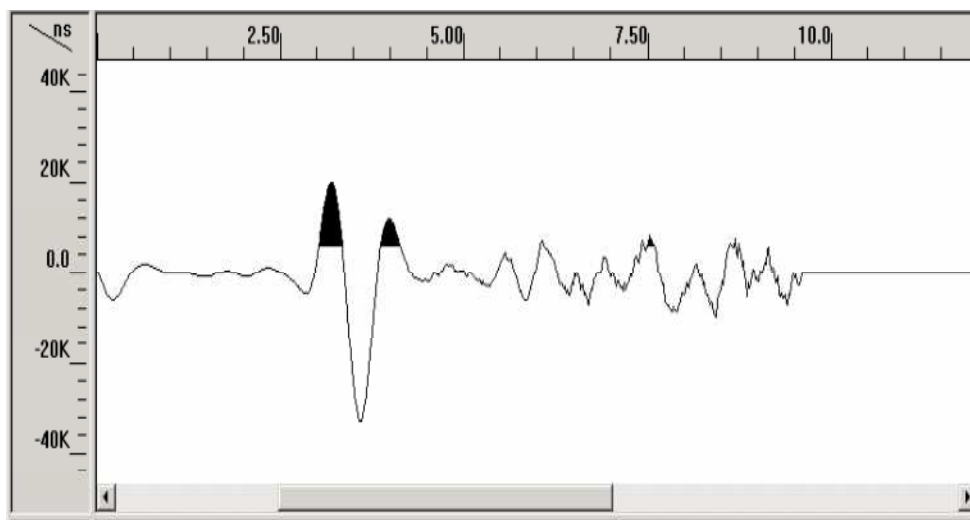


Figura 2.15 Rappresentazione di onda georadar (programma Radan 6.6)

Affiancando una successione di questi segnali si ottiene un radargramma: il risultato di una prospezione georadar è una sezione del campione indagato, nella quale viene individuato sull'asse orizzontale il percorso effettuato dall'antenna sulla superficie del mezzo, e sull'asse verticale il percorso coperto dal segnale trasmesso. Per una corretta interpretazione dei dati visualizzati si deve

tener conto che l'acquisizione del segnale di ritorno avviene in unità temporali (nanosecondi), e il tempo misurato è quello impiegato dall'onda per coprire due volte la distanza alla quale si trova il bersaglio, si tratta quindi di un tempo doppio, di andata e ritorno del segnale. Per maggiore chiarezza nella visualizzazione, il radargramma può essere impostato in unità metriche lungo l'asse verticale della profondità, attraverso la stima della costante dielettrica del mezzo. Anche il percorso dell'antenna viene visualizzato ordinariamente in unità temporali, e può essere convertito in unità metriche direttamente in fase di acquisizione, attraverso l'impiego di apposite apparecchiature che misurano la velocità di movimento dell'operatore, oppure successivamente, in fase di rielaborazione dei dati.

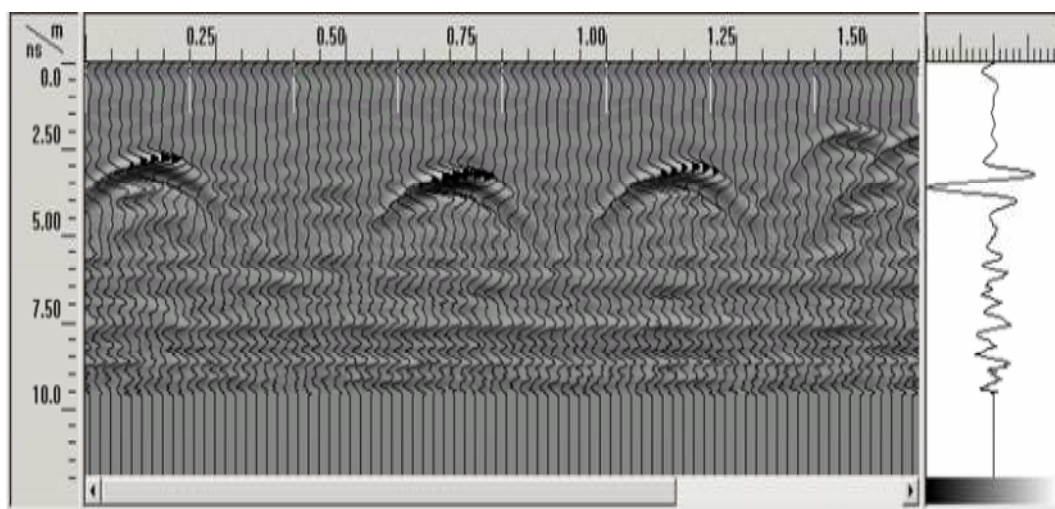


Figura 2.16 Radargramma e forma d'onda (.....)

### 2.2.3 Cenni teorici

La conduttività e la permittività del materiale sono le due caratteristiche che governano la propagazione delle onde all'interno del materiale. La conduttività elettrica ( $\sigma$ ) rappresenta la capacità del flusso elettrico di attraversare un mezzo ed il suo inverso è la resistività ( $\rho$ ):

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

dove  $\sigma$  = conduttività (1/ $\Omega$ m, S/m) e  $\rho$  = resistività ( $\Omega$ m).

Una forte influenza sull'applicabilità del metodo è data dalla conduttività: per i materiali caratterizzati da un elevato valore di questa ( $\sigma \geq 10^{-2}$  S/m), la tecnica risulta poco efficace in quanto il mezzo analizzato è fortemente riflettente. Esempi di materiali con queste caratteristiche sono i metalli e l'acqua marina.

Per la maggior parte dei materiali utilizzati nell'ingegneria civile, invece, il valore della conduttività risulta essere basso ( $\sigma \leq 10^{-7}$  S/m) consentendo una buona applicabilità del metodo.

Studi effettuati hanno dimostrato che i fattori principali che influenzano la conduttività di un materiale sono: la porosità, il livello di saturazione e la presenza di elementi conduttivi.

La permittività elettrica rappresenta la capacità di immagazzinare energia elettromagnetica di un materiale una volta che questo è attraversato da un'onda elettromagnetica.

Trattandosi di onde elettromagnetiche, le leggi che descrivono la loro propagazione sono di tipo complesso così come le due variabili sopra descritte:

$$\varepsilon = \varepsilon_{re} + j \cdot \varepsilon_{im}$$

$$\sigma = \sigma_{re} + j \cdot \sigma_{im}$$

dove il pedice *re* indica la parte reale mentre il pedice *im* quella immaginaria.

Nella pratica viene usata la permittività relativa o costante dielettrica del mezzo ed il suo valore è dato dal rapporto tra permittività elettrica del mezzo diviso la permittività elettrica nel vuoto ( $\varepsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$  F/m):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

La parte immaginaria della permittività elettrica indica l'assorbimento o la perdita di energia all'interno di materiali dielettrici, mentre la parte reale della permittività elettrica  $\varepsilon_{re}$  indica l'energia posseduta del materiale ad una determinata temperatura e frequenza; il valore di quest'ultima cresce al diminuire della frequenza.

Le proprietà elettromagnetiche di un materiale sono in stretta relazione con la sua composizione ed il suo contenuto d'acqua ed entrambe esercitano un ruolo di rilievo per quanto riguarda la velocità e l'attenuazione di propagazione delle onde radio all'interno di essi.

La velocità di propagazione delle onde radio in un materiale è data da:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \mu_r}{2} [(1 + P^2) + 1]}}$$

dove  $c$  è la velocità della luce nello spazio e vale 0,3 m/ns,  $\varepsilon_r$  è la costante dielettrica relativa del materiale,  $\mu_r$  è la relativa permeabilità magnetica (di valore 1 per materiali non magnetici) e  $P$  è il fattore di perdita e vale

$$P = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}$$

con  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ,  $f$  frequenza del segnale e  $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$

Tale equazioni risultano di non immediata applicabilità, ma nel caso di materiali aventi un basso valore di  $P$ , cosa che accade per i normali materiali da costruzione, si può semplificare notevolmente l'espressione che prende la seguente forma

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

che risulta di facile applicazione anche per stime della velocità in situ.

Altra legge di fondamentale importanza nell'analisi radar è quella usata per descrivere il fenomeno di attenuazione del segnale

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2}\right) \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \varepsilon^2}\right)} - 1 \right]}$$

che può essere utilizzata nella forma semplificata come inverso dello "skin depth" ( $\delta$ ) definito come la profondità alla quale il segnale ha perso una quantità di energia pari ad 1/e (circa il 37%)

$$\delta = \frac{5.31 \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}{\sigma} = \frac{1}{\alpha}$$

Tale valore non è da ritenere come la massima profondità raggiungibile dal segnale, ma piuttosto è indicativo per poter individuare in maniera preventiva quale sarà la profondità ispezionabile con un buon segnale in quanto, nella propagazione del segnale in profondità, sono diversi i fattori che bisogna prendere in considerazione come, ad esempio, la strumentazione utilizzata nell'indagine.

Come si può notare dalle equazioni riportate nella loro forma semplificata, la velocità di propagazione del segnale è funzione della costante dielettrica mentre l'attenuazione è legata anche alla conduttività del mezzo.

*Tabella .1 Caratteristiche dielettriche di alcuni materiali (R. C. Flint et al., 1999)*

Material	Dielectric constant $\varepsilon_r$	Conductivity $\sigma$ (mS m <sup>-1</sup> )	EM velocity m s <sup>-1</sup>	Skin depth $\delta$ (m)	Resistivity $\rho$ ( $\Omega$ m)
Air	1	0	$3.00 \times 10^8$	0	$\infty$
Metal (iron)	1	$10^8$	$3.00 \times 10^8$	$5.3200 \times 10^{-10}$	$10^{-3}$
Fresh water	81	1	$3.33 \times 10^7$	$4.7880 \times 10^{-1}$	$10^3$
Sea water	81	$4 \times 10^3$	$3.33 \times 10^7$	$1.970 \times 10^{-4}$	0.25
Dry sand	3	$10^{-4}$ -1	$1.73 \times 10^8$	$9.2145 \times 10^2$	$10^7$ - $10^3$
Saturated sand <sup>a</sup>	25	$10^{-1}$ - $10$	$6.00 \times 10^7$	2.6600	$10^4$ - $10^2$
Dry clay	3	1-10	$1.73 \times 10^8$	$9.2145 \times 10^{-2}$	$10^3$ - $10^2$
Saturated clay <sup>a</sup>	15	$10^2$ - $10^3$	$7.74 \times 10^7$	$2.0604 \times 10^{-3}$	10-1
Rock	4-10	$10$ - $10^{-2}$	$1.50 \times 10^8$	$1.0640 \times 10^{-2}$	$10^2$ - $10^3$
Dry granite	5	$10^{-3}$	$1.34 \times 10^8$	$1.1896 \times 10^4$	$10^8$
Wet granite	7	1	$1.13 \times 10^8$	$1.4075 \times 10^{-1}$	$10^3$
Limestone	4-8	0.5-2	$1.50 \times 10^8$	$2.1280 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^3$ - $5 \times 10^2$
Wet sandstone	6	0.4-1	$1.22 \times 10^8$	$3.2578 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^2$ - $1 \times 10^3$
Dry ordinary concrete	6	1	$1.22 \times 10^8$	$1.3031 \times 10^{-1}$	$10^{-3}$
Saturated ordinary concrete	12	20	$8.66 \times 10^7$	$9.2145 \times 10^{-3}$	50
Saturated microsilica concrete	12	2	$8.66 \times 10^7$	$9.2145 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^2$

Materiali dall'elevato valore di conduttività, come ad esempio metalli o materiali saturi, non sono adatti per applicazioni GPR in quanto la gran parte del segnale viene assorbita dal mezzo; di particolare rilievo, inoltre, è la frequenza utilizzata nelle indagini infatti, a parità di caratteristiche del materiale, si avrà una più forte attenuazione nell'uso di elevate frequenze.

La relazione tra velocità di propagazione e caratteristiche dielettriche del materiale è di fondamentale importanza nell'analisi GPR: il tempo impiegato dal treno di onde per coprire la stessa distanza all'interno di due mezzi dalle diverse proprietà dielettriche sarà diverso e tale differenza sarà tanto maggiore quanto più grandi saranno le differenze tra i materiali. Nella tabella .1 vengono riportate le principali caratteristiche di alcuni materiali.

E' da ricordare che i valori indicati in tabella sono puramente indicativi in quanto nella realtà tali valori possono essere ben diversi.

### 2.2.3.1 Velocità e profondità del segnale

Come già detto, la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica all'interno di un mezzo è funzione delle proprietà del materiale e il suo valore può variare tra un massimo di 0,3m/ns, che corrisponde alla velocità di diffusione nel vuoto (con buona approssimazione riconducibile all'aria), ad un minimo di circa 0,01m/ns tipici di acqua marina.

La legge che lega la velocità  $v$  alla distanza percorsa dal segnale  $d$  in una indagine condotta in modalità riflessione monostatica è

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

dove  $t$  rappresenta il tempo intercorso tra trasmissione e ricezione del segnale. Il prodotto al secondo membro viene diviso per 2 in quanto bisogna tenere presente che l'impulso deve percorrere una distanza doppia, cioè in andata e ritorno quando l'indagine viene condotta in modalità di riflessione.

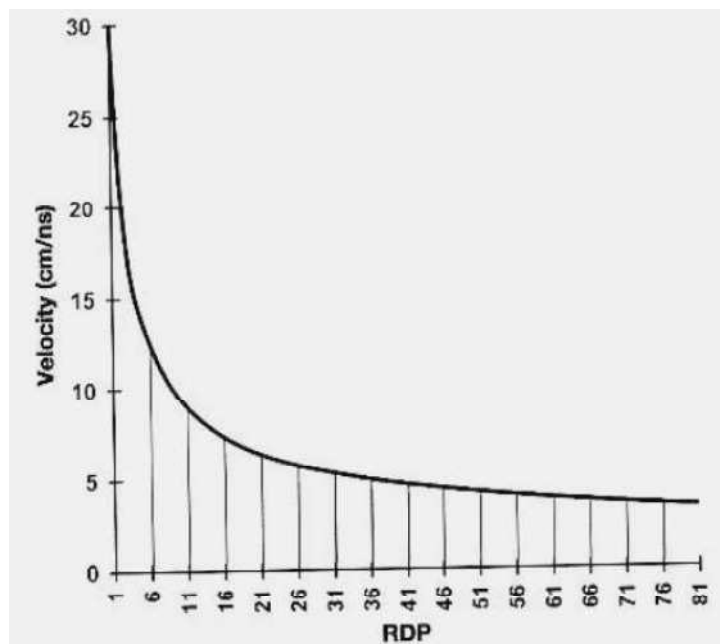
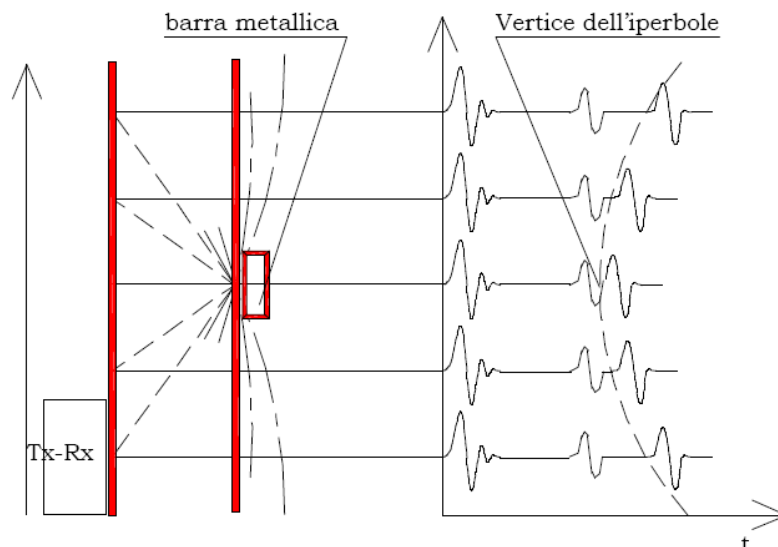


Figura 2.17 Andamento della velocità in funzione della permittività relativa  $\epsilon_r$  (Conyers L. B., 2004)

Ricordando che la velocità è legata alla costante dielettrica  $\epsilon_r$ , è possibile graficare la funzione che lega le due grandezze (Fig. 8).

da tale grafico si può notare che anche piccole variazioni nella scelta di  $\epsilon_r$  comportano una notevole differenza di velocità e conseguente diminuzione nelle distanze di propagazione calcolate. Nella grande maggioranza delle applicazioni pratiche non è possibile conoscere a priori il valore della costante dielettrica che risulta essere la variabile dal problema, ma questa deve essere valutata in situ se si vuole ottenere un'elevata precisione nelle misurazioni; per questo motivo, il metodo deve essere calibrato e la procedura consiste nel valutare il tempo impiegato dal segnale per percorrere una distanza nota e ricavare così il valore della permittività relativa. Nel caso si disponga di una sola antenna per la ricezione e la trasmissione del segnale, la procedura può essere realizzata ponendo un elemento molto riflettente, ad esempio una barra metallica, sulla superficie opposta rispetto quella su cui verrà fatta scorrere l'antenna; in questo modo, se il segnale è sufficientemente forte da raggiungere la parte opposta, si potrà individuare sul radargramma il riflesso generato dalla barra ed essendo nota la distanza percorsa, si potrà ricavare il valore di  $\epsilon_r$ .



*Figura 2.18 Calibrazione della prova con asta metallica (Binda et al., 2000)*

La profondità raggiungibile dal segnale è funzione delle perdite di energia subite dallo stesso durante il suo cammino; tali perdite di energia sono dovute a diversi fattori quali riflessione/trasmissione, trasformazione in calore per assorbimento, caratteristiche dielettriche ed elettriche del mezzo investito, diffusione geometrica e attenuazione. Il fenomeno di riflessione/trasmissione si verifica tutte le volte che il segnale incontra una superficie di separazione inoltre, tutte le volte che viene intercettato un oggetto dalle dimensioni paragonabili alla lunghezza



d'onda del segnale, si genera una dispersione casuale di questo (cluttering) con conseguente perdita di energia.

Le onde generate dalla trasmittente si diffondono nel mezzo attraverso un cono; questo causa una diminuzione di energia per unità di superficie con l'aumentare della profondità pari ad  $1/r^2$ , dove con  $r$  si è indicata la distanza percorsa dall'onda.

L'attenuazione è una delle cause fondamentali di perdita di energia del segnale ed è funzione sia delle caratteristiche del mezzo, sia della strumentazione utilizzata (in particolare la frequenza).

Diversi studi hanno dimostrato che le profondità raggiungibili con questa tecnica possono variare tra qualche decina di centimetri fino a diverse decine di metri.

### 2.2.3.2 Risoluzione

Un radargramma è l'immagine generata a seguito di una linea di rilievo condotta col georadar. La risoluzione del segnale viene distinta in verticale ed orizzontale

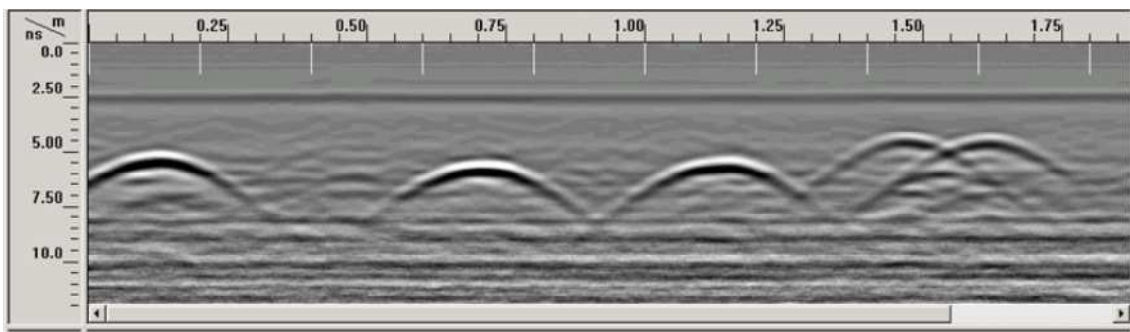


Figura 2.19 Radargramma

La risoluzione verticale rappresenta la distanza minima necessaria per poter distinguere due oggetti vicini ed è definita come lo spazio tra una riflessione e la successiva lungo la stessa traccia. Tale distanza è legata alla lunghezza d'onda del segnale ( $\lambda$ ) ed in condizioni ideali vale  $1/4 \lambda$ , ma per condizioni reali viene considerata pari ad  $1/2 \lambda$ . La lunghezza d'onda è legata alla velocità  $v$  e alla frequenza  $f$  tramite la seguente formula

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

La scelta dell'antenna in un'indagine georadar risulta essere un buon compromesso tra risoluzione e profondità: antenne ad elevata frequenza (dell'ordine del GHz) consentono di ottenere un'ottima risoluzione del segnale a scapito però della profondità investigabile. Generalmente si può pensare di utilizzare basse frequenze per ottenere buone prospezioni anche in materiali molto attenuanti, ma la necessità di individuare target ravvicinati comporta la necessità di frequenze elevate. Definita  $X$  la risoluzione verticale ed ipotizzando una velocità del segnale pari a  $0.1 \text{ m/ns}$  (velocità riscontrabile in

alcuni materiali da costruzione come il calcestruzzo) si possono ottenere le seguenti risoluzioni massime

- $X > 1.00$  m con antenna da 50 Mhz;
- $X > 0.50$  m con antenna da 100 MHz;
- $X > 0.20$  m con antenna da 250 MHz;
- $X > 0.10$  m con antenna da 500 MHz;
- $X > 0.06$  m con antenna da 800 MHz.

La risoluzione orizzontale o planimetrica è importante per poter distinguere più oggetti ravvicinati posti alla stessa profondità. Tale risoluzione aumenta nei mezzi caratterizzati da una elevata attenuazione del segnale.

### 2.2.3.3 Rilevabilità

Spesso confusa con la risoluzione, la rilevabilità, invece, esprime la possibilità di esaminare un oggetto con l'utilizzo di onde elettromagnetiche; è chiaro quindi che questa caratteristica risulta di fondamentale importanza in un'analisi GPR.

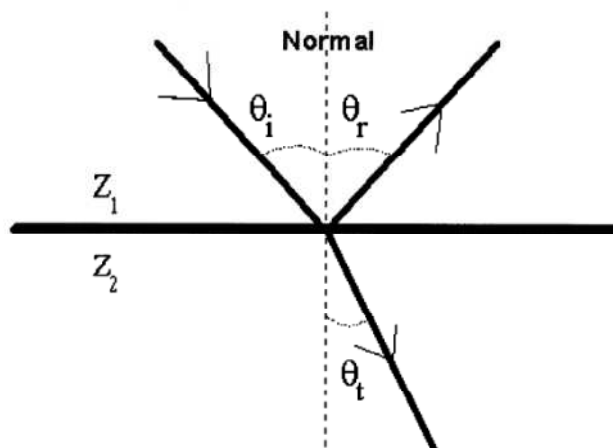


Figura 2.20 Riflessione e trasmissione delle onde elettromagnetiche (Colla C. et al., 1998)

Un oggetto è rilevabile quando produce una riflessione del segnale elettromagnetico inviato; come accade per la propagazione delle onde acustiche, il fenomeno di riflessione è legato alle variazioni di impedenza dei materiali incontrati che nel caso di onde elettromagnetiche è funzione della costante dielettriche.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}}$$

Anche in questo caso è possibile definire il coefficiente di riflessione  $R$  e quello di trasmissione  $T$ :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Il coefficiente di riflessione  $R$  indica la quantità di segnale che viene riflessa dalla superficie di separazione e varia tra i valori  $\pm 1$  mentre  $T$  rappresenta la quota trasmessa nel secondo mezzo.

In base al valore assunto dai due coefficienti, il segnale riflesso/trasmesso si troverà ad essere in fase o in contrapposizione di fase con quello incidente

-  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$

il coefficiente di riflessione è negativo e l'onda riflessa è in contrapposizione di fase con quella incidente: questa la situazione tipica dell'interfaccia aria-terreno o aria-elemento strutturale;

-  $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$

in questo caso  $R$  è positivo; il segnale incidente e quello riflesso risultano essere in fase. Questo è il caso tipico di interfaccia mezzo continuo-cavità

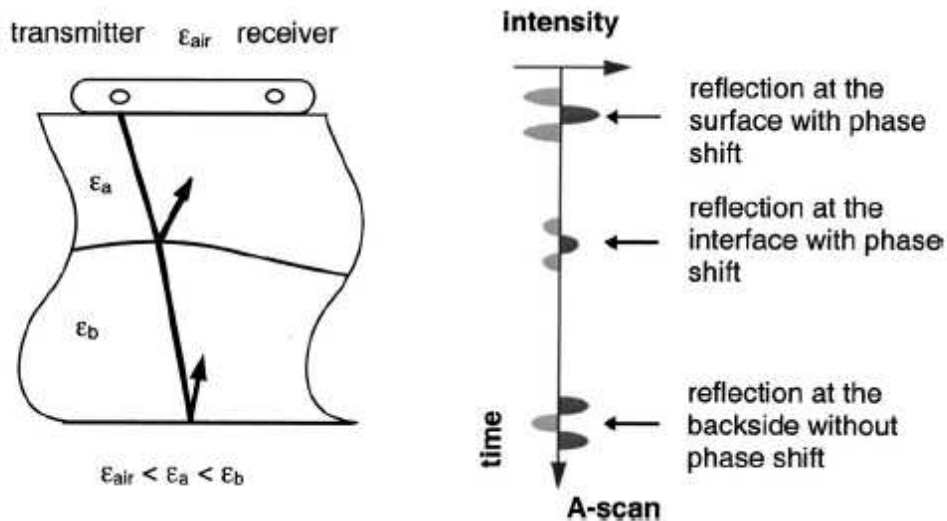


Figura 2.21 Principio di riflessione del segnale attraverso mezzi aventi proprietà dielettriche differenti (Daniels D.J., IET)

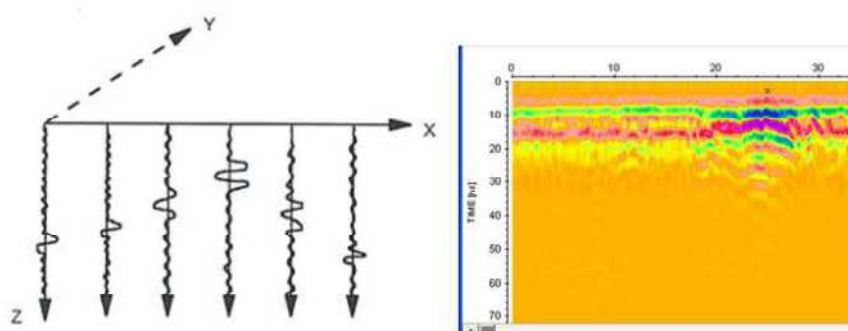
#### 2.2.4 Rappresentazione ed interpretazione dei risultati

Una sezione si effettua ripetendo il ciclo di trasmissione e ricezione del segnale innumerevoli volte spostando progressivamente l'antenna lungo una direzione prefissata. Si ottiene così un'immagine detta *radargramma*.

Il programma di elaborazione provvede ad accostare opportunamente i singoli segnali ricevuti. Nell'immagine così ottenuta, i segnali vengono rappresentati con varie tonalità di colore (o in scala di grigi) in funzione della loro intensità.

Due sono principalmente le tecniche operative utilizzate per ottenere un profilo: l'acquisizione nel dominio del tempo o quella nel dominio dello spazio. Esse differiscono tra loro per la modalità con cui viene effettuato il ciclo di ripetizione trasmissione-ricezione dell'impulso radar.

Nei profili in dominio di tempo, gli impulsi radar vengono emessi ad intervalli di tempo costanti. L'operatore deve in questo caso muovere l'antenna sulla superficie da investigare lungo una determinata direzione, mantenendo una velocità costante. Soltanto così, sarà possibile in fase di interpretazione, associare la posizione di un riflettore individuato sulla sezione GPR alla reale posizione nel terreno.



*Figura 2.22 Schema di una sezione ed output del programma di elaborazione (ground penetrating radar 2nd edition)*

Nelle sezioni GPR in dominio di spazio, l'intervallo tra gli impulsi è regolato in funzione della posizione. I georadar in grado di operare in dominio di spazio si avvalgono di un trasduttore di posizione, mediante il quale il sistema tiene conto dello spazio percorso dall'antenna. L'emissione degli impulsi radar viene effettuata ogni qualvolta il sistema rileva che l'antenna, spinta dall'operatore, ha percorso una determinata lunghezza. In questo modo l'operatore può spostare l'antenna più o meno velocemente, fermarsi e ripartire senza che ciò si ripercuota sull'accuratezza della sezione.

L'interpretazione delle forme risultanti dalle diverse colorazioni delle sezioni GPR è un'operazione piuttosto complessa che deve tener conto sia delle diverse velocità di propagazione dei diversi materiali attraversati, sia della geometria del cono d'indagine o cono d'emissione delle onde elettromagnetiche inviate nel terreno.

In questo modo il treno di onde radio può intercettare oggetti anche se non sono posti esattamente sulla sua verticale; questo fenomeno provoca la riflessione di segnali che potranno apparire più profondi a causa di una maggiore distanza percorsa.

Un esempio tipico di tale effetto è la forma ad *iperbole* mostrata in corrispondenza di piccoli riflettori (ad esempio tubi tagliati trasversalmente, ciottoli, cavità di piccolo diametro, cunicoli, ecc.), i cui rami discendenti e ascendenti sono i riflessi registrati prima e dopo il passaggio dell'antenna sulla verticale del bersaglio.

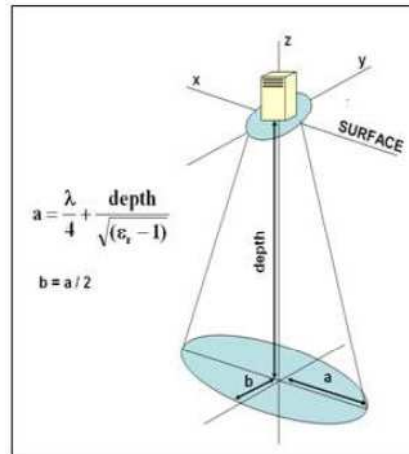


Figura 2.24 Cono generato ed impronta del segnale

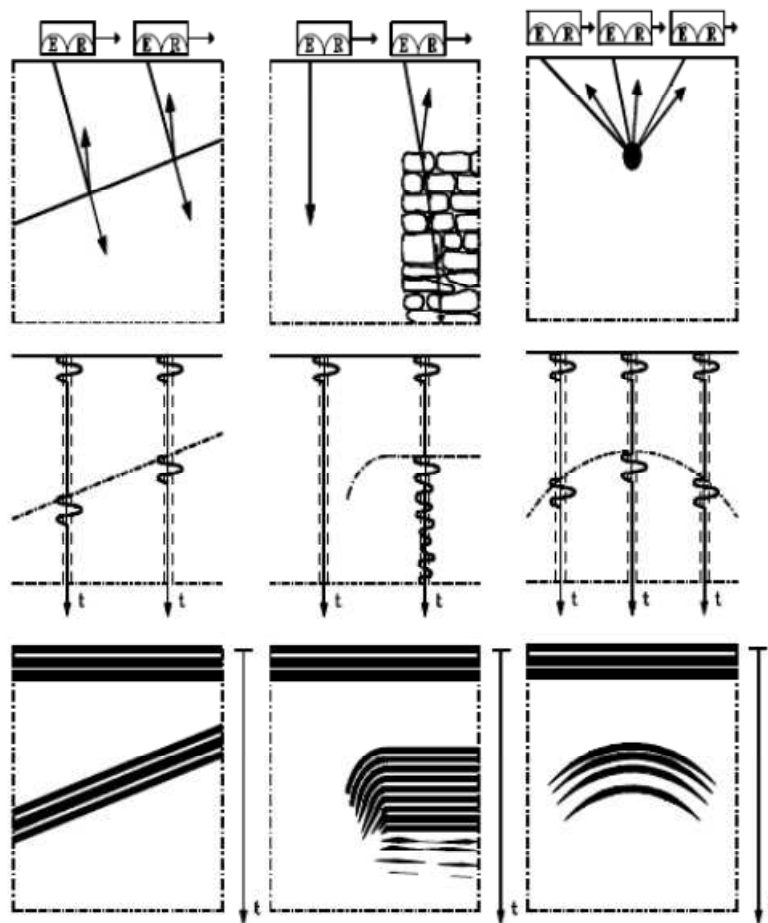


Figura 2.25 Rappresentazione di segnali di prove radar (Binda et al., 1998)

## 2.3 Termografia

### 2.3.1 Finalità e sviluppo del metodo

La termografia ad infrarosso è una tecnica non distruttiva di controllo e ispezione superficiale di una parte o della totalità di un oggetto senza compromettere la sua utilità futura. Se comparata con altre tecniche non distruttive, l'acquisizione dei dati risulta essere sicura, non invasiva e senza la necessità di contatto con l'elemento da sottoporre alla prova e consente l'analisi di vaste superfici in maniera veloce (da qualche frazione di secondo a qualche minuto in base alla configurazione della prova). Ogni oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazioni nel campo infrarosso; la radiazione infrarossa corrisponde alla banda di spettro elettromagnetico compresa tra 0,74 e 1000  $\mu\text{m}$ . Quindi un eccellente modo per misurare le variazioni termiche è quello di utilizzare un radiometro ad infrarossi, solitamente un macchina fotografica FPA (focal plane array) in grado di rilevare le radiazioni nel campo delle onde medie (da 3 a 5  $\mu\text{m}$ ) o lunghe (da 8 a 14  $\mu\text{m}$ ) della banda dell'infrarosso.

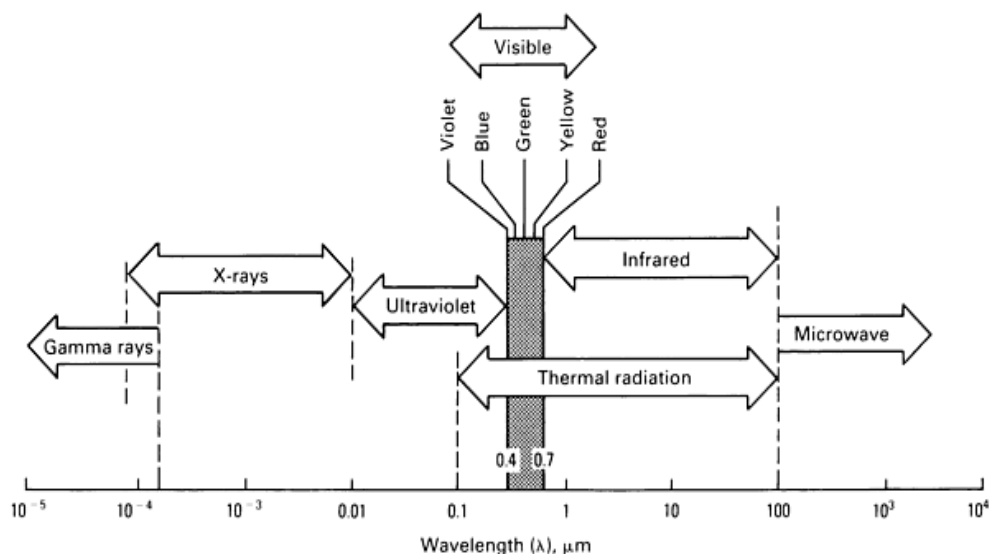


Figura 2.26 Spettro elettromagnetico

Due sono gli approcci possibili nella tecnica termografia:

-passiva, in cui l'analisi viene eseguita senza l'ausilio di fonti esterne di energia, ma le caratteristiche d'interesse si trovano naturalmente ad una temperatura maggiore od inferiore a quella dello sfondo.

-attiva, in cui è richiesta una fonte di energia per poter produrre un contrasto tra le caratteristiche d'interesse e lo sfondo.

Il metodo attivo è largamente utilizzato dato che spesso l'oggetto da investigare è in equilibrio con l'ambiente circostante. Diverse sono le fonti di energia utilizzabile per ottenere un contrasto termico tra le zone con difetti e le zone integre e possono essere suddivise in due classi:

- esterne, se l'energia distribuita sulla superficie si propaga all'interno fino ad incontrare un difetto;
- interne, se l'energia viene iniettata all'interno del campione solamente per stimolare il difetto.

Esempi tipici di eccitazioni esterne sono dati da dispositivi ottici come flash fotografici (per la simulazione di calore ad impulso) o lampade alogene o ad infrarosso (per il riscaldamento periodico), mentre l'eccitazione interna può essere realizzata mediante mezzi meccanici come un trasduttore sonico od ultrasonico.

I principali pregi di questa tecnica sono la rapidità e semplicità nella fase di acquisizione dati, la non invasività ed il non contatto con l'oggetto da sottoporre ad indagine; il principale difetto è dovuto al fatto che questa è una tecnica prevalentemente superficiale, che non permette cioè di indagare in profondità gli oggetti sottoposti ad analisi.

Ci sono una serie di diverse varianti tecniche non distruttive basate sull'uso dell'infrarosso, ognuna col suo nome e caratteristiche particolari. Dal momento che questo settore si è sviluppato principalmente sotto la direzione di singoli ricercatori, c'è ancora poca standardizzazione della terminologia.

Il concetto intuitivo della relazione tra temperatura di un oggetto e radiazione emessa è noto all'uomo da secoli ed è stato spesso usato nel passato dagli artigiani nel loro lavoro; basti pensare ai fabbri o ai soffiatori di vetro. L'idea di temperatura alta o bassa non deriva quindi solo da considerazioni climatiche di tutti i giorni, ma era già applicata a settori precursori della moderna industria. Le prime considerazioni qualitative sullo studio del calore sono dovute a Galileo verso la fine del 1500 il quale realizzò il primo termometro capillare per la misura della temperatura di un corpo per contatto, ma gli inizi della termografia sono attribuiti allo studioso Sir William Herschel, che nel 1800 stava eseguendo esperimenti per poter filtrare la luce solare; utilizzando un prisma per scomporre la luce nei suoi vari colori, misurò la temperatura di ogni colore con un termometro sensibile al quale aveva annerito il bulbo. Egli notò che facendo scorrere lentamente il termometro attraverso lo spettro dei colori, si poteva osservare un aumento costante della temperatura passando dal violetto al rosso, ma lo stupore maggiore fu quando constatò che la temperatura continuava ad aumentare anche al di fuori di tale regione, in una zona cioè ben oltre quella della luce rossa, alla quale diede il nome di calore oscuro. Questa è la regione dello spettro elettromagnetico definita infrarosso e riconosciuta come radiazione elettromagnetica che, se assorbita da un materiale, provoca un aumento di temperatura. Le osservazioni e le scoperte di Herschel possono essere così riassunte: dimostrò che misure quantitative sono possibili in questa nuova zona dello spettro

elettromagnetico tramite l'utilizzo del termometro a mercurio e fu il primo a notare che le leggi di rifrazione e riflessione che si applicano ai raggi visibili sono ancora valide.

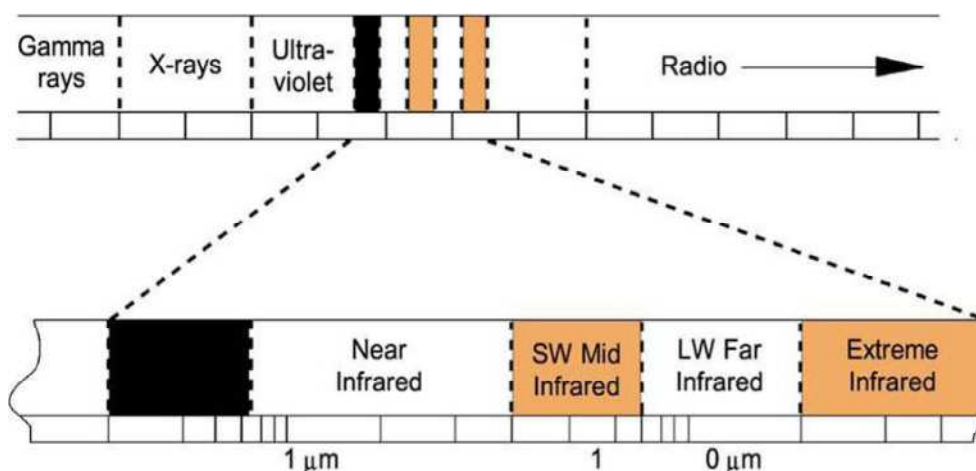


Figura 2.27 Spettro elettromagnetico: in evidenza la zona infrarossa (M.R. Clark et al., 2003)

Vent'anni dopo Seedback scoprì l'effetto termoelettrico che porta rapidamente all'invenzione della termocoppia di Nobili nel 1829; questo semplice dispositivo di contatto si basa sul presupposto che vi sia una forza elettromotrice o di tensione che si verifica quando due metalli diversi vengono a contatto e che cambia la risposta in modo prevedibile con una variazione di temperatura. Melloni presto raffinò la termocoppia in una termopila (una serie di termopile) e focalizzando la radiazione termica in modo tale che potesse rilevare una persona a trenta metri di distanza.

Tabella 2.3.1 Lunghezze d'onda per le diverse fasce

Sub-regioni	Lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )
Near infrared	0.75 – 3
Middle infrared	3 – 6
Far infrared	6 – 15
Extreme	15 – 100

Un simile dispositivo, chiamato bolometro, è stato inventato 40 anni dopo; invece di misurare una differenza di tensione, un bolometro misura una variazione di resistenza elettrica relativa alla temperatura. Nel 1840, Sir. John, figlio di Herschel, usando uno strumento chiamato evaporigrafo, produsse la prima immagine termica anche se ancora molto primitiva; tale immagine fu prodotta



sfruttando l'evaporazione differenziale di un sottile strato di olio. Nel 1880 Longley e Abbot utilizzarono un bolometro per rilevare una mucca oltre 400 metri di distanza. Nel 1900 Planck formulò la teoria della radiazione che chiarì i risultati degli esperimenti effettuati fino quel tempo: la lunghezza di massima radiazione,  $\lambda_m$ , è legata alla temperatura assoluta T dalla seguente relazione:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}$$

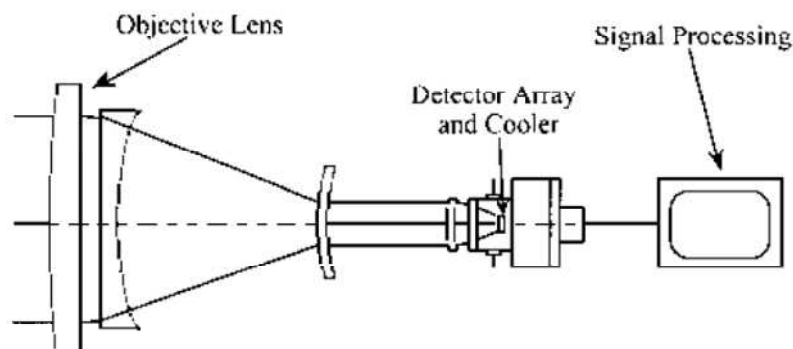
Negli anni seguenti i progressi tecnologici nel campo termico e degli infrarossi subirono una forte accelerazione: durante la prima guerra mondiale vengono sviluppati i primi rilevatori fotoconduttivi che sfruttano l'interazione diretta con i fotoni, mentre quelli precedenti risultavano sensibili alle variazioni di temperatura. La nuova applicazione ha permesso la costruzione di sensori più veloci e sensibili. Durante il secondo conflitto mondiale sono molti i brevetti depositati e le applicazioni includono i campi dei macchinari navali, avvistamento di iceberg, comunicazioni e guida delle torpedini; in questa fase dello sviluppo i tedeschi notarono che le prestazioni del sistema potevano essere incrementate raffreddando i rilevatori, tecnica oggi largamente impiegata. Le prime telecamere ad infrarosso entrano nel mercato negli anni '60 e utilizzavano tubi piroelettrici o un singolo sensore con un sistema rotante elettronico per produrre immagini lineari o bidimensionali, ma sono gli sviluppi della tecnologia avvenuti negli anni '80 che hanno consentito di creare sistemi basati su sensori Focal Plane Array (FPA) con elettronica associata (amplificatori e convertitori) che rendono superflua la necessità di lavorare con segnali di tipo analogico. La tecnologia dei circuiti ha consentito di ridurre dimensioni, rumore ed aumentare le prestazioni.

### **2.3.2 La strumentazione**

Il sempre maggiore interesse nella tecnica e la grande potenzialità del metodo hanno permesso un notevole sviluppo della strumentazione soprattutto negli ultimi anni consentendone una rapida diffusione anche in campo commerciale. Infatti, lo sviluppo di processori e software sempre più avanzati ha permesso l'acquisizione di un numero di dati prima inimmaginabile e ha consentito di produrre apparecchiature dal costo non eccessivo consentendo così la fruibilità su vasta scala.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati tre principali sistemi di produzione di immagini ad infrarosso: scanner o sistemi di scansione, vidicon piroelettrico (PEV) e focal plane array (FPA). Mentre tutti e tre i tipi sono ancora oggi in uso, la stragrande maggioranza delle vendite di nuove apparecchiature sono dei sistemi FPA. Tale sistema si basa sull'utilizzo di rilevatori termici elementari cioè costruiti di materiale in cui una o più caratteristiche fisiche sono legate alla temperatura cui si trova il corpo; la radiazione infrarossa incidente il rilevatore causa una

alterazione delle caratteristiche elettriche dell'elemento sensibile. Lo scopo della termo camera è quello di rilevare la radiazione ad infrarossi emessa dall'oggetto da ispezionare (comunemente chiamato target): la radiazione emessa dal target è messa a fuoco dall'ottica termicamente trasparente della termocamera e proiettata sul rilevatore che è sensibile alla radiazione invisibile di calore. La risposta del rilevatore produce un segnale, solitamente una variazione di tensione o resistenza che viene letta dall'elettronica del sistema e genera un'immagine su un display. Tramite questo processo apparentemente semplice, si è in grado di visualizzare un termogramma o un'immagine termica che corrisponde all'energia termica proveniente dalla superficie del bersaglio. La strumentazione consente di modificare diverse variabili del sistema come l'emissività del target, la temperatura dell'ambiente e la distanza dall'oggetto investigato per poter permettere una più accurata analisi dei dati sia in fase di acquisizione sia in fase di elaborazione dati.



*Figura 2.28 Schema di un sistema FPA  
(Peter J. Shull, 2001)*

### **2.3.3 Acquisizione dati**

La fase di acquisizione dati è di notevole semplicità e rapidità. Infatti, anche se la strumentazione utilizzata è di elevata tecnologia, la campagna d'indagine si riduce nel produrre immagini digitali dell'oggetto investigato.

Nelle applicazioni passive del metodo, un profilo anomalo di temperatura indica un potenziale problema, ed il termine chiave è la differenza di temperatura (rispetto ad un riferimento), spesso indicato come valore DT, o punto caldo. In generale la termografia passiva è qualitativa, poiché il suo fine è solo quello di evidenziare anomalie. Tuttavia alcune analisi possono fornire dati quantitativi se è disponibile un qualche modello matematico che metta in relazione le misure di temperatura superficiale (isoterme) con un evento o un comportamento specifico. Punto fondamentale di questa tecnica è l'assenza di una sorgente.

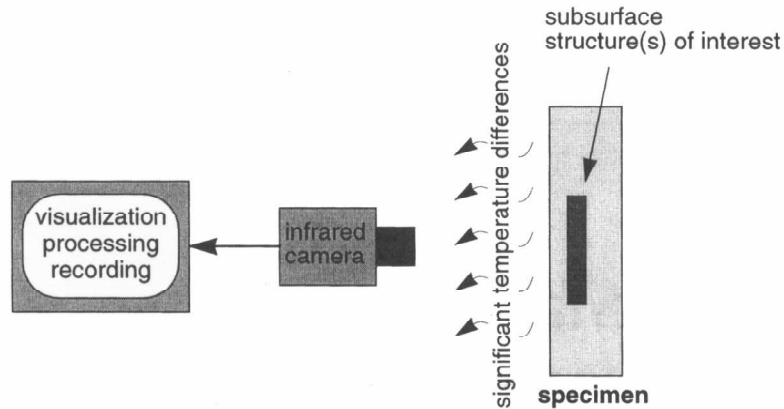


Figura 2.29 Schema di termografia passiva (Maldague X.P., 2001)

Nella termografia attiva, invece, l'utilizzo di una sorgente di energia consente di ottenere una significativa variazione di temperatura che permette l'individuazione di eventuali difetti presenti; per fare questo è possibile utilizzare diversi metodi di analisi dai quali è possibile ricavare anche dati quantitativi.

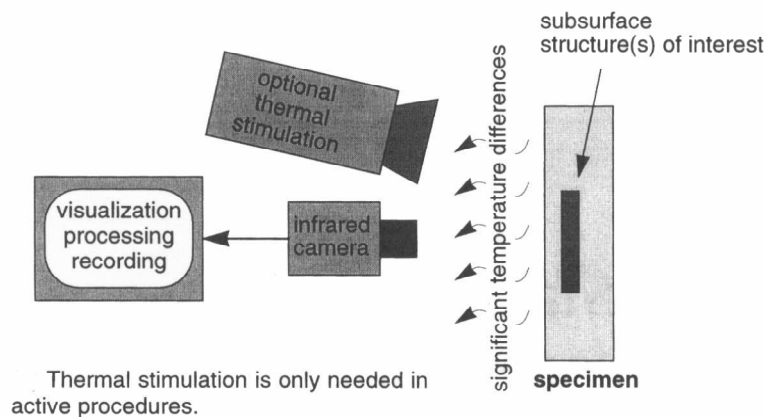


Figura 2.30 Schema di termografia attiva (Maldague X.P., 2001)

### 2.3.3.1 PULSED THERMOGRAPHY (PT)

Questa tecnica di stimolazione termica è una delle più comuni e consiste nel riscaldare brevemente il campione per poi registrare la curva di decadimento della temperatura. Nel metodo viene utilizzata una breve stimolazione (ad esempio un flash di una macchina fotografica) che può variare da pochi millisecondi nel caso di materiali altamente conduttivi come i metalli a qualche secondo per materiali poco conduttivi. La temperatura superficiale dell'oggetto sottoposto ad impulso varia rapidamente a causa di questo per la diffusione del fronte termico al disotto della superficie; la presenza di un difetto altera la diffusione del fronte generando una zona a temperatura differente

rispetto quella circostante. Le profondità investigabili con questo metodo non sono elevate, ma molti difetti come le fratture spesso iniziano a svilupparsi proprio in superficie

### **2.3.3.2 LOCK-IN TERMOGRAPHY (LT)**

In questo caso, la stimolazione termica del materiale è effettuata in maniera periodica con l'utilizzo di laser o lampade modulate (solitamente la modulazione è sinusoidale). Per questo metodo è necessario registrare la dipendenza del segnale in uscita (radiazione emessa) con quello in ingresso (riscaldamento modulato); con l'utilizzo di software è possibile risalire matematicamente all'ampiezza e alla fase della risposta termica del materiale sottoposto al test.

### **2.3.3.3 STEP HEATING (SH)**

Questa tecnica viene utilizzata principalmente per stimare lo spessore di rivestimenti, ispezionare il legame tra substrato e rivestimento o per studiare strutture composite. Nel metodo in questione la sollecitazione termica viene applicata per un periodo di tempo più lungo (impulso lungo).

### **2.3.3.4 VIBROTERMOGRAPHY (VT)**

A differenza dei metodi già citati, qui è necessario l'utilizzo di uno stimolatore meccanico, solitamente un trasduttore sonico, posto a contatto con l'elemento da testare. Le onde che si propagano all'interno del mezzo, una volta incontrato il difetto, perdono energia a causa di diversi fenomeni e ne trasformano parte di questa in calore (c'è una conversione di energia meccanica in energia termica).

## **2.3.4 Cenni della teoria della conduzione del calore**

La capacità termica  $C$  di un corpo descrive come la temperatura di questo varia se viene somministrato o sottratto calore

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

dove  $\Delta Q$  è il calore fornito al corpo e  $\Delta T$  la differenza di temperatura risultante. Una delle caratteristiche più importanti di un corpo è il calore specifico  $c$  definito come la capacità termica per unità di massa del materiale di cui il corpo è composto; l'unità di misura del calore specifico è J/Kg K. Il calore specifico consente di calcolare il cambiamento di calore  $\Delta Q$  (J/m<sup>3</sup>) di un corpo di massa  $m$  partendo dalla sua variazione di temperatura

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Per tutti i materiali il calore specifico è funzione della temperatura; è da notare come il valore di questa caratteristica del materiale varia al massimo di uno o due ordini di grandezza tra diversi materiali, mentre altre proprietà termiche possono variare anche per diversi ordini di grandezza.

### 2.3.4.1 CONDUCEBILITA' TERMICA

Quando parti differenti di un corpo si trovano a temperature diverse, il flusso di calore si propaga dalla parte più calda verso quella più fredda finché la distribuzione della temperatura non risulta essere uniforme: questo fenomeno è definito conduzione di calore. La legge della conduzione di Fourier (1822) formalizza tale concetto

$$q_x = -k \cdot A_x \cdot \frac{dT}{dx}$$

dove  $A_x$  è la superficie attraverso la quale si propaga il flusso di calore  $q_x$  per unità di superficie e  $k$  è la conducibilità termica espressa in W/mK.

Tabella 2.3.2 Valori caratteristici di conducibilità

Material	$k$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Material	$k$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
<b>Metals</b>		Asphalt	0.75
Silver (pure)	410	Asbestos-cement boards	0.7
Copper (pure)	385	Brick	0.3
Gold	320	Maple or oak	0.17
Aluminum (pure)	202	Asbestos, loosely packed	0.15
Silicon	150	Plaster	0.13
Nickel (pure)	93	Sawdust	0.059
Chromium	90	Cork	0.040
Iron (pure)	73	Glass wool	0.038
Germanium	60	<b>Liquids</b>	
Carbon steel, 1C	43	Mercury	8.7
Lead (pure)	35	Water	0.65
Chrome-nickel steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	Ammonia	0.540
<b>Nonmetal solids</b>		Lubricating oil, SAE 50	0.147
Diamond, type 2A	2300	Freon F-12, CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0.073
Diamond, type I	900	<b>Gases</b>	
Sapphire (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	46	Hydrogen	0.18
Quartz, parallel to axis	41.6	Helium	0.141
Magnesite	4.15	Air	0.026
Marble	2.08-2.94	Nitrogen	0.026
Sandstone	1.83	Water vapor (saturated)	0.0206
Limestone	1.5	Steam	0.018
Glass (Pyrex 7740)	1.0	Carbon dioxide	0.0146
Glass, window	0.78	Freon F-12	0.0097

Il segno meno della formula è dovuto al secondo principio della termodinamica per il quale il trasferimento di energia avviene nella direzione di diminuzione della temperatura. Nella tabella vengono riportati alcuni valori di conducibilità termica

Come si può osservare dalla tabella, materiali che hanno una elevata conducibilità elettrica (metalli) presentano anche una elevata conducibilità termica.

La conducibilità termica è funzione della temperatura, ma nei casi in cui la variazione sia piccola si può considerare un valore costante di  $k$ .

### 2.3.4.2 CONVEZIONE

In questo caso lo scambio di calore avviene tra una superficie ed un fluido; lo studio di tale fenomeno risulta complesso in quanto richiederebbe l'analisi dei movimenti di massa, della viscosità, della velocità e dei flussi del fluido, ma ai fini pratici è possibile utilizzare una formula del tutto simile alla precedente

$$q_c = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_f)$$

dove  $q_c$  è il calore scambiato per convezione,  $A_s$  è l'area della superficie su cui avviene lo scambio termico,  $T_s$  e  $T_f$  sono rispettivamente la temperatura della superficie e quella del fluido mentre  $h$  è il coefficiente di scambio convettivo medio.

### 2.3.4.3 LEGGI DI IRRADIAZIONE

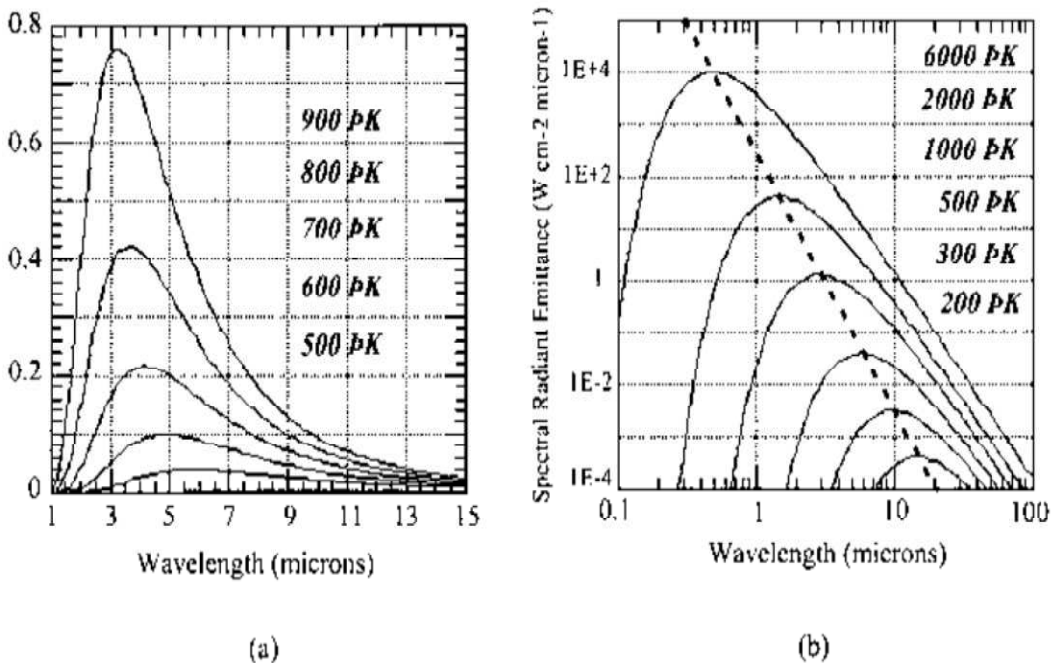


Figura 2.31 Spettro della radiazione emessa in funzione di diverse temperature (Peter J. Shull, 2001)

La legge di Max Planck descrive la distribuzione spettrale dell'emittanza data da un corpo ad una temperatura assoluta T

$$W_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{(c_2/\lambda \cdot T)} - 1}$$

dove  $c_1$  e  $c_2$  sono due costanti e valgono rispettivamente  $3.742 \times 10^4 \text{ e } 1.439 \times 10^4 \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^4$  e  $\lambda$  è la lunghezza d'onde

L'emittanza spettrale è funzione della lunghezza d'onda e viene qui riportato sia in scala lineare (grafico a) sia in scala logaritmica (b)

Come mostrato in figura la posizione del picco si sposta sulle lunghezze d'onda più corte con l'aumentare della temperatura; questo comportamento è descritto dalla legge di Wien

$$\lambda_m \cdot T = a$$

dove  $\lambda_m$  è la lunghezza d'onda massima dello spettro della radiazione emessa e a è una costante il cui valore è  $2897.8 \mu\text{m K}$ . A temperatura ambiente, 300K, la massima emissione si ha per un valore della lunghezza d'onda di  $10 \mu\text{m}$ .

Lo spettro finora descritto è valido solamente per quei corpi chiamati neri, che emettono tanta energia in forma di radiazione quanta ne assorbe dall'ambiente circostante alla stessa temperatura. La parte emittanza spettrale fornita da un qualsiasi materiale  $W'$  in rapporto a quella del corpo nero  $W_{BB}$  alla stessa temperatura viene definita emissività  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{W'(\lambda, T)}{W_{BB}(\lambda, T)}$$

Un materiale con una emissività minore di uno è definito corpo grigio. In tabella vengono riportati alcuni valori di emissività di diversi materiali.

I valori riportati in tabella sono da ritenere puramente indicativi.

L'emittanza radiante totale, cioè il flusso totale di radiazione, è data dalle legge di Stefan-Boltzman

$$W = \int \varepsilon \cdot W_{\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzman e vale  $5.67 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Quando una radiazione elettromagnetica colpisce la superficie di un corpo diversi fenomeni si possono verificare; la radiazione può essere riflessa (come l'immagine in uno specchio), assorbita (in questo caso si ha un aumento della temperatura) o trasmessa.

La relazione nota come conservazione dell'energia può essere scritta come

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

dove  $\alpha$  rappresenta la quota di energia assorbita,  $\rho$  la parte riflessa mentre  $\tau$  la parte trasmessa. La radiazione non è mai perfettamente riflessa, trasmessa o assorbita, ma avviene sempre una combinazione di questi fenomeni così, ispezionando una superficie, non solo la radiazione assorbita può essere vista, ma anche la parte trasmessa o riflessa che non danno informazioni sulla temperatura della superficie; quindi, lo scopo di un termografico è quello di distinguere la parte emessa dal corpo dalle altre componenti in modo tale da poter ottenere informazioni più chiare sulle condizioni della superficie ispezionata.

*Tabella 2.3.3 Emissività di diversi materiali*

Material	Emissivity	Temperature°C
Graphite	0.98	20
Skin, human	0.98	32
Lacquer, matte black	0.97	100
Water, distilled	0.96	20
Paint, oil based	0.94	100
Glass, polished plate	0.94	20
Paper, white bond	0.93	20
Brick, red common	0.93	20
Concrete	0.92	20
Sand	0.90	20
Wood, planed oak	0.90	20
Stainless steel, 18-8:		
oxidized at 800°C	0.09	60
buffed	0.05	20
Cast iron:		
oxidized	0.64	100
polished	0.21	40
Aluminum:		
sheet as received	0.09	100
polished sheet	0.05	100
Silver, polished	0.03	100
Gold, polished	0.02	100

Solamente alcuni materiali trasmettono in maniera efficace le radiazioni infrarosse e le lenti di una termocamera appartengono a questa categoria mentre l'atmosfera risulta essere abbastanza trasparente in almeno due bande di frequenza; nel resto dello spettro il vapore acqueo e l'anidride carbonica assorbono la maggior parte della radiazione termica.

Come si può notare dalla figura, la radiazione si trasmette abbastanza facilmente sia nella banda corta (3 – 5  $\mu\text{m}$ ) che in quella lunga (8 – 14  $\mu\text{m}$ ) dello spettro ed i sistemi basati sulla ricezione della radiazione infrarossa devono lavorare in una o entrambe di esse.



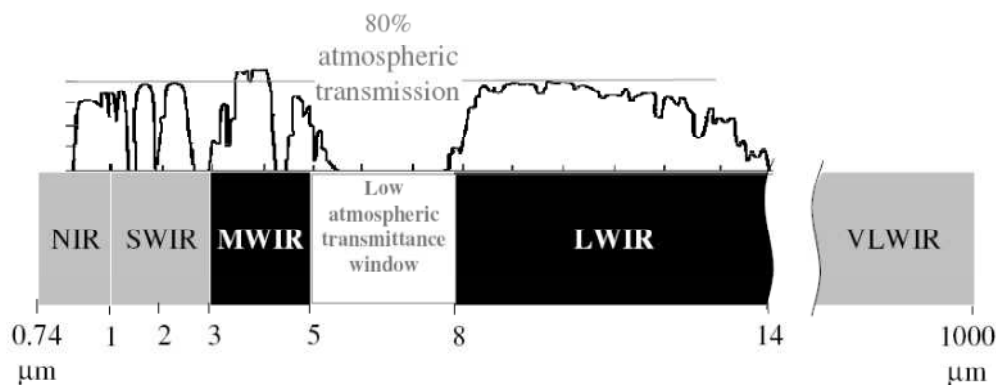


Figura 2.32 Bande di trasmissione infrarosso  
(Peter J. Shull, 2001)

La maggior parte dei materiali non è trasparente, ma è opaca alla radiazione infrarossa; questo semplifica notevolmente il problema di una visione termica in quanto viene eliminata una variabile precedentemente in gioco. Infatti, dall'equazione di conservazione dell'energia scompare il termine di trasmissione  $\tau$  e la formula si riduce a

$$\alpha + \rho = 1$$

Nel caso in cui  $\rho$  sia uguale ad uno, la superficie risulterebbe essere un perfetto riflettore; sebbene non esistono materiali con queste caratteristiche, la riflessione data da alcuni metalli lucidi si avvicina a questa caratteristica e si comportano come "specchi di calore". La legge di Kirchhoff afferma che in un corpo dalla superficie opaca, la maggior parte di energia radiante assorbita viene restituita ( $\alpha = \varepsilon$ ). Sostituendo tale condizione nella formula precedente, si trova che l'energia rilevata da una superficie opaca è sia riflessa che emessa

$$\varepsilon + \rho = 1$$

e solamente il primo termine  $\varepsilon$  risulta essere significativo nell'analisi; in altre parole, un efficiente riflettore è un pessimo emettitore e vice versa. Questa semplice relazione inversa tra riflessività ed emissività è alla base dell'interpretazione di tutto ciò che viene analizzato: oggetti fortemente emissivi rivelano informazioni accurate per quanto riguarda la loro temperatura mentre ciò non accade per tutti quei materiali fortemente riflettenti. Infatti, in alcune situazioni, per superfici molto riflettenti, la temperatura naturale viene nascosta dalla riflessione delle radiazioni del sottofondo e solo una piccola parte del segnale è data dall'emissività dell'oggetto.

Nel caso in cui  $\varepsilon = 1$  tutta l'energia viene assorbita e rilasciata; un tale oggetto, che esiste solo in teoria, viene definito corpo nero. La pelle umana con una emissività di 0.98, è quasi un perfetto corpo nero. Diversi fattori possono influenzare ciò che è l'emissività di un oggetto: oltre al tipo di

materiale, possono essere influenti anche le condizioni della superficie, la temperatura, la lunghezza d'onda e l'angolo di vista.

E' interessante notare che crepe e fori emettono una energia termica superiore rispetto alla superficie che li circonda. Per comprendere tale fenomeno basta pensare alla cavità oculare nella quale la maggior parte della luce che entra viene assorbita; quando ogni luce viene assorbita da una superficie definiamo quest'ultima nera. L'emissività di una cavità si avvicinerà al valore di 0.98 se la sua profondità sarà almeno sette volte la sua larghezza.

E' possibile considerare un'estensione della formula di Stefan-Boltzmann per poter prendere in considerazione anche gli effetti della riflessione nello studio dei corpi opachi

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 + [\sigma \cdot (1 - \varepsilon) \cdot T_{background}^4]$$

La parte dell'equazione dentro la parentesi quadrata rappresenta quella parte di energia che viene riflessa e risulta importante quando si utilizza un sistema di misurazione della temperatura per spiegare e caratterizzare l'influenza del riflesso della temperatura dello sfondo, basta pensare alle due situazioni di seguito descritte:

- quando l'oggetto studiato è molto riflettente, la temperatura della riflessione dello sfondo diventa importante;
- quando la temperatura dello sfondo è estremamente diversa da quella dell'oggetto investigato, l'influenza è più marcata.

Risulta evidente come delle misurazioni accurate sono possibili solo nel caso in cui si possa fare affidamento su valori elevati dell'emissività. Questa risulta essere una limitazione notevole e generalmente viene raccomandato di non effettuare misurazioni con valori inferiori a 0.5 (la maggior parte dei metalli lucidi) se non in ambienti estremamente controllati (laboratori). Tuttavia, attraverso un'ottima conoscenza della propagazione del calore all'interno di un solido e della propagazione delle radiazioni, la termografia come mezzo di indagine non distruttiva può essere considerata un eccellente metodo di analisi.

## Capitolo 3

### IL CASO DI STUDIO: PALAZZO MALVEZZI

---

#### 3.1 Storia del palazzo

Tra le famiglie maggiormente attive nella vita politica bolognese del XIII secolo, quella dei Malvezzi assume un ruolo di primo ordine; la loro influenza economica e politica si consolida nel XIV secolo con la signoria di Giovanni II Bentivoglio fino al 1488, anno nel quale la famiglia viene accusata di aver preso parte alle congiura contro questo casato. Messa al bando e spogliati da tutti i loro averi (decreto del 1490), i Malvezzi rientrano nella scena dopo la cacciata dei Bentivoglio ed il controllo della città da parte della chiesa nel 1506.

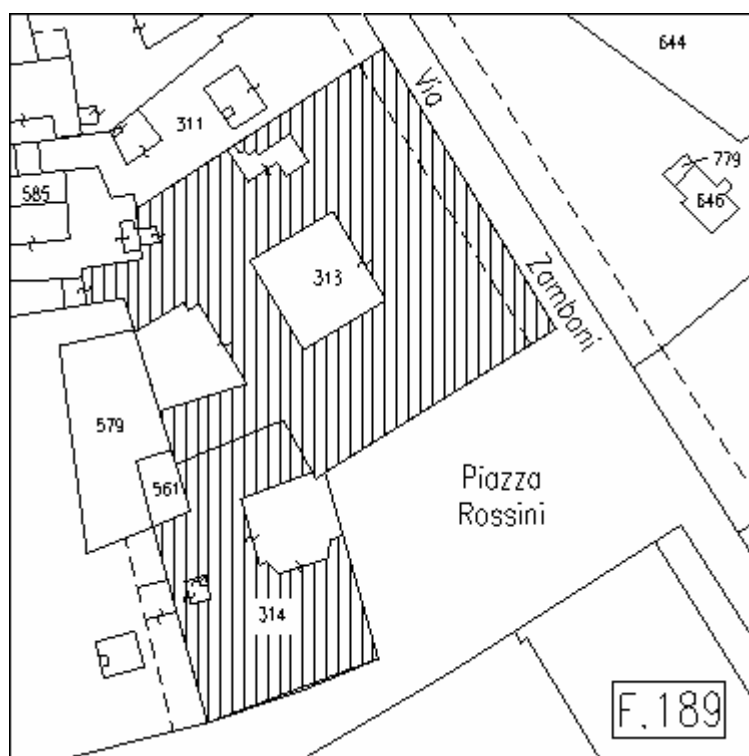
Sull'area dove sorge l'attuale Palazzo della Provincia esistevano fin dall'inizio del XV secolo alcune case spettanti al ramo più antico dei Malvezzi e non propriamente a quelli definiti "dal portico buio". In poco tempo le proprietà della famiglia occuparono tutta l'area tra via Zamboni, via Rossini e Via Benedetto XIV. Con il rifiorire delle loro fortune, i Malvezzi sentirono ben presto la necessità di dare un aspetto decoroso alla propria residenza; decisero di erigere sull'area delle case avite un nuovo e grande palazzo per rappresentare il loro risorto potere (Figura 3.1).



*Figura 3.1 Fotografia del palazzo Malvezzi sul lato di piazza Rossini (Arbizzani, 2001)*

Si pensa che la prima parte dei lavori riguardato solamente opere di fondazione in quanto fino alla seconda metà del XVI secolo non sono segnalate particolari opere; nel 1559, dopo aver acquisito dagli Agostiniani  $\frac{1}{4}$  della piazzetta in faccia alla chiesa S. Giacomo, è possibile procedere con la costruzione del palazzo. I lavori iniziano nel 1560 su commissione di Paola Malvezzi e vengono affidati a Bortolomeo Triachini, al quale vengono attribuite anche le opere del palazzo Vizzani in via S. Stefano e palazzo Poggi ed interviene anche nella realizzazione di palazzo Fantuzzi in via S. Vitale e, forse, del palazzo Bentivoglio.

La nuova costruzione divenne la dimora della famiglia mentre la vecchia palazzina Malvezzi venne adibita a stalle, magazzini, rimessa per carrozze e sede per la servitù (Figura 3.2). Dopo essere stata in possesso di diverse famiglie, prima tra le quali quella dei Lambertini che ne spostarono l'ingresso da piazza Rossini a via delle campane, tale edificio prende le sembianze attuali con la famiglia Scappi che innalza di piano il fabbricato.



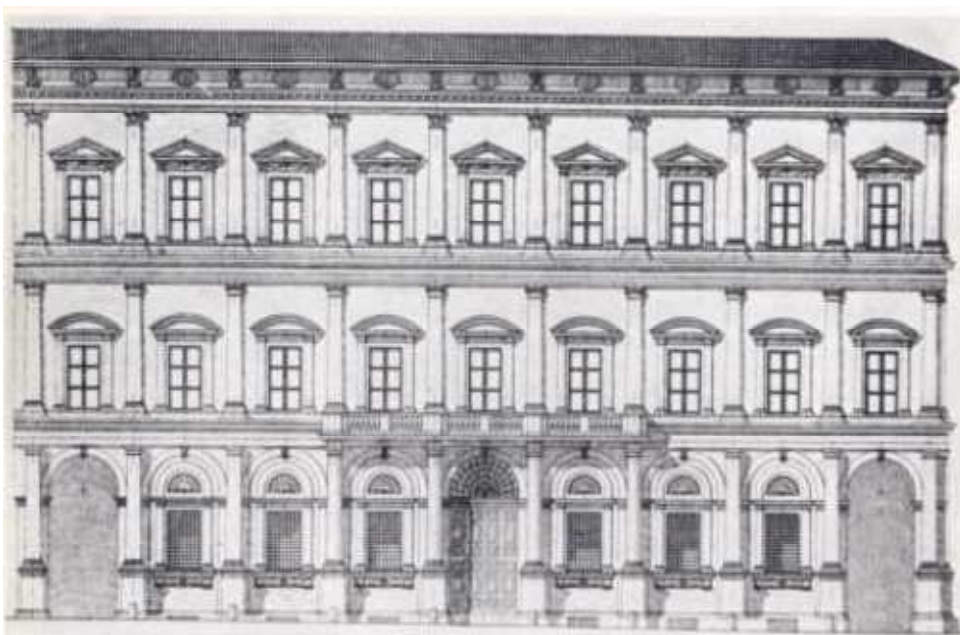
*Figura 3.2 Pianta catastale dei due edifici: la palazzina Lambertini (più in basso, n.314) e il palazzo Malvezzi (in alto, n.313).*

### **3.2 Le ristrutturazioni subite dal palazzo**

Nel corso della sua storia, il palazzo Malvezzi ha subito diversi interventi di ristrutturazione, la maggior parte dei quali di carattere architettonico e tra i più significativi va ricordata la creazione

del solaio con foro ovale nell'attuale sala del Consiglio della Provincia, in precedenza salone delle feste. Commissionata da Giovanni Malvezzi ed eseguita da Francesco Cocchi, la creazione del solaio aveva lo scopo di creare continuità tra i due ambienti fornendo l'idea di uno spazio che si moltiplica.

I maggiori interventi di tipo strutturale si verificano nei primi anni 30 del XX secolo con il passaggio della proprietà del palazzo alla Provincia: tra le varie opere era stata prevista l'apertura di una porta su piazza Rossini per consentire l'ingresso di automezzi che la stretta via Zamboni non permetteva. Tale intervento venne bloccato dalla Soprintendenza delle Belle Arti di Bologna che si dichiarò contraria e ne impedì l'esecuzione lasciando inalterato l'aspetto esterno dell'edificio.



*Figura 3.3 Disegno del progetto realizzato negli anni 30 per la realizzazione dell'apertura sul lato di piazza Rossini. (Arbizzani, 1925)*

I lavori di restauro eseguiti sotto la direzione dell'architetto Emilio Boselli non lasciarono però inalterato l'interno del fabbricato: i principali interventi riguardano la creazione di una nuova corte d'onore porticata e la chiusura del lato di fondo del cortile. Se il primo intervento è dettato da motivi estetico-funzionali e per la nuova destinazione d'uso del palazzo, il secondo tende a snaturare quelle che erano le intenzioni iniziali del progettista: la sensazione d'incompletezza data del precedente fondale del cortile (un semplice corpo di fabbrica con finta prospettiva a loggiati a pian terreno) viene ora a mancare per conferire un senso di pesantezza allo spazio.

Una ulteriore massiccio intervento di ristrutturazione è stato eseguito negli anni 60 dello stesso secolo ed ha previsto l'annessione della palazzina Lambertini al palazzo Malvezzi: lo scopo dell'intervento era quello di fornire ulteriore spazio alla struttura amministrativa della Provincia, ma

la realizzazione dello stesso causò alcuni problemi al vecchio edificio. Infatti, la scelta dei materiali, le soluzioni strutturali e di assetto risultarono non adatte alla situazione fisica e storica del manufatto. A partire dagli anni 90 è stato previsto un programma di rinnovamento e conservazione che coinvolgesse l'intero edificio per adeguarlo alle norme in vigore sull'igiene, sicurezza, sostenibilità ergonomica, prevenzione e protezione mantenendo operative le attività svolte all'interno dell'edificio. Il programma prevedeva innanzitutto il recupero ed il risanamento delle facciate, dei coperti, dei sotterranei e il rifacimento degli impianti tramite interventi intensivi ed estensivi permettendo alla struttura di raggiungere un livello di efficienza tale da poter essere mantenuto con interventi di manutenzione ordinari e straordinari programmati.

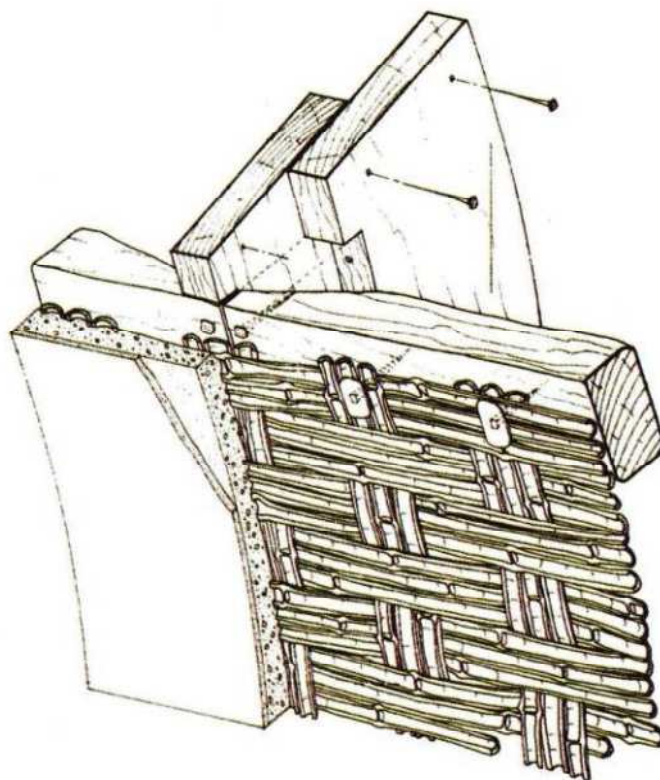
La necessità di informatizzazione dell'Ente ha consentito nel 1992 il recupero del piano interrato dell'edificio mentre dal '94-'96 sono stati effettuati interventi di tipo scientifico sulle facciate di via Zamboni e di piazza Rossini per fermare il degrado causato dagli agenti atmosferici.

### **3.3 Il sistema strutturale**

Il corpo principale di palazzo Malvezzi sede attuale della Provincia di Bologna è situato all'angolo tra via Zamboni e piazza Rossini e si presenta dalla forma circa rettangolare: la superficie coperta è di 1844 mq di cui 314 risultano adibiti a cortile (scoperti). La parte dell'edificio che si affaccia sulle due strade sopra citate si sviluppa per un numero complessivo di 5 piani di cui 4 fuori terra per un'altezza totale di 24m ed uno interrato. Nella parte Sud del fabbricato, tra il piano terra ed il primo piano e tra il primo ed il secondo piano sono stati disposti degli ammezzati.

In tutti i piani dell'edificio le coperture osservate si presentano a volta: nel piano interrato si possono osservare delle volte a crociera (in pietra) che si appoggiano su pilastri di dimensioni comprese tra 90 x 90 cm e 130 x 110 cm mentre il piano terra risulta essere per la maggior parte controsoffittato; nelle sale in cui non è presente questo elemento è possibile osservare delle volte a padiglione in muratura. L'ingresso al palazzo presenta una volta a botte mentre tutte le zone di disimpegno presentano delle volte a crociera così come il porticato esterno costituito da una serie di nove arcate.

Le volte del piano nobile, invece, risultano finte (Figura 3.4): infatti, ciò che rimane visibile all'intradosso è una falsa volta in arellato alla quale sono state poi incollate le decorazioni su carta. Questa tecnica, molto usata tra il XVI ed il XIX secolo, consentiva di realizzare delle volte molte leggere e di rapida esecuzione in quanto permetteva di sostituire la pietra con una stuoia in canne: l'orditura principale del solaio ligneo è costituito da capriate rovesce le quali venivano controsoffittate con arellato. In questo piano è situata anche la sala del Consiglio della Provincia con il caratteristico foro ovale (20,90 mq di sviluppo) presente nel solaio.



*Figura 3.4 Particolare di un elemento realizzato con la tecnica della volta finta: si nota la stuoia in canne agganciata al supporto e poi ricoperta con malta o altro materiale decorabile.*

Nel secondo piano, invece, tutti i solai sono costituiti da elementi lignei ed in questo piano è possibile accedere alla Sala dell'Ovale proprio in corrispondenza della sala del Consiglio della Provincia.

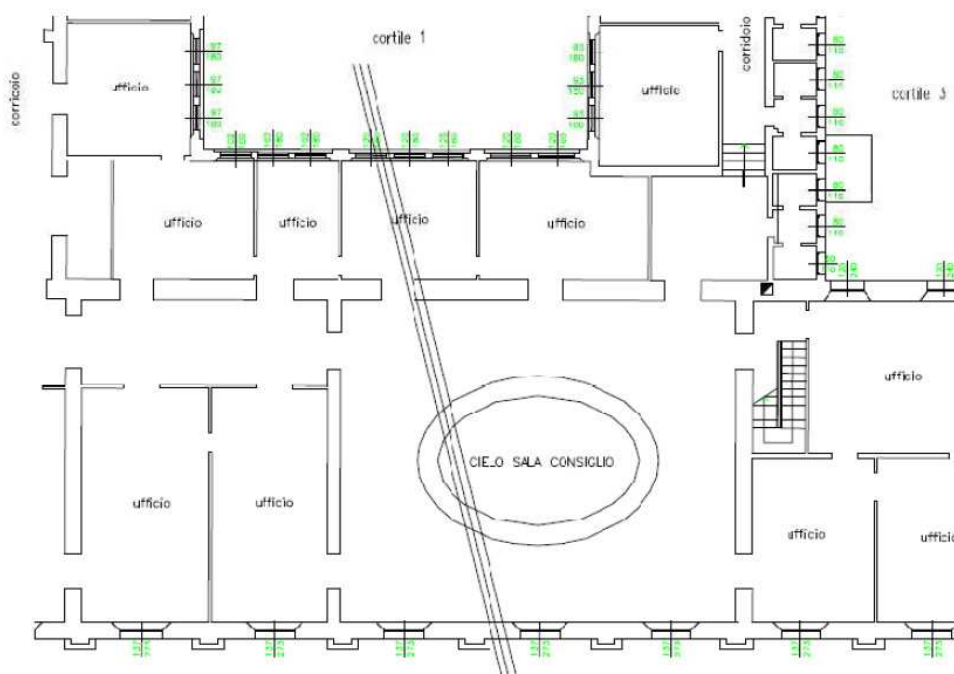
L'ossatura del palazzo è costituita da muratura portante di diverso spessore (il cui massimo è risulta essere pari a 90 cm) realizzata con mattoni e malta di calce. Gli elementi di fondazione sono costituiti da blocchi di pietra di gesso con inserti di selenite derivanti probabilmente dall'uso di muro romano che corrono lungo la linea tracciata da via Zamboni.

### **3.4 Problemi dell'edificio**

Come nella maggior parte degli edifici storici, l'analisi condotta in tempi recenti sul palazzo Malvezzi ha evidenziato diversi dissesti statici osservabili tramite le aperture di fessure e dissesti che interessano tutti gli organismi murari dell'edificio.

Nel caso in esame, questi fenomeni sono accentuati da cedimenti differenziali delle fondazioni provocati da una faglia di subsidenza che taglia trasversalmente l'edificio passando al di sotto della Sala Ovale (Figura 3.5). La capacità della muratura di assestarsi ai movimenti della struttura ricercando un nuovo assetto di equilibrio provoca in questa l'apertura di fessure sugli elementi strutturali quali soffitti, pareti, pavimenti. Ulteriore problemi strutturali sono stati creati durante le

diverse fasi di ristrutturazione subite dall'edificio creando sovraccarichi momentanei che hanno peggiorato la situazione esistente; in particolare, l'unione dell'edificio alla palazzina Lambertini ha causato non pochi problemi per quanto riguarda i dissesti differenziali delle due parti dell'edificio.



*Figura 3.5 Parte della pianta del palazzo Malvezzi: si può notare la posizione ipotizzata della faglia di subsidenza rappresentata dalle linee trasversali passanti sotto la Sala dell'Ovale.*

La nuova destinazione d'uso dell'edificio ha comportato un ulteriore carico aggiuntivo per gli elementi strutturali: i locali adibiti ad ufficio hanno creato situazioni di momentanei sovraffollamenti e alterazioni di temperatura ed umidità in tempi relativamente brevi che hanno contribuito sia al degrado strutturale che a quello architettonico dei vari elementi lignei presenti. In particolare, la conservazione delle pitture su carta incollata alle finte volte, risulta molto sensibile a tali variazioni: infatti le variazioni igrometriche creano alterazioni negli elementi di sostegno lignei che deformandosi possono degradare ulteriormente le decorazioni.

Anche le travi di legno della copertura presentano diverse problematiche causate dalla loro esposizione alle infiltrazioni d'acqua; in questo caso sono state riscontrati diversi elementi strutturali affetti da un notevole degrado.

Anche la presenza di traffico urbano ha causato problemi all'edificio: i fenomeni vibratorii provocato dal passaggio di mezzi ha contribuito senza dubbio ad accentuare i problemi strutturali già esistenti e ha accelerato il fenomeno di degrado delle pareti esterne. Fortunatamente, oggi, il traffico in questa zona è stato notevolmente ridotto consentendo un arresto dei fenomeni legati a questo fattore.



## Capitolo 4

# SALA ROSSA: INDAGINE DI FESSURE TRAMITE PROVE SONICHE

---

### 4.1 Scopo delle prove

In questo capitolo sono descritte le tecniche impiegate ed i risultati ottenuti nell'indagine delle fessure presenti nella pavimentazione del solaio della sala Rossa; lo scopo dello studio è quello di valutare la profondità delle fessure analizzate utilizzando la propagazione delle onde elastiche all'interno di un mezzo solido. Tra le varie tipologie di prova è stato scelto di utilizzare in questa fase dello studio la prova sonica i cui aspetti specifici e risultati verranno di seguito descritti.

La valutazione della profondità di una fessura può consentire di valutare la gravità della condizione statica di un solaio e conseguentemente di poter indicare quali sono le zone in cui dover intervenire e quali quelle in cui non sia presenti potenziali pericoli.

Nella sala Rossa di Palazzo Malvezzi, sita al primo piano nell'angolo N-E dell'edificio, sono state individuate quattro aree di studio distribuite su tutta la superficie per l'esecuzione delle prove soniche.



*Figura 4.1 Una crepa del solaio della sala Rossa: è possibile notare il materiale di riempimento nella crepa*

### 4.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione per prove soniche comprende l'utilizzo di una massa battente in grado di generare le onde elastiche strumentata con cella di carico che possa rilevare le onde generate

dall'impatto della massa con la superficie, una sonda di controllo che consente di effettuare le misurazioni del segnale dopo la trasmissione nel mezzo, una centralina di condizionamento e amplificazione del segnale ed un software che consenta la visualizzazione e l'elaborazione dei dati raccolti. Di seguito verranno indicate le principali caratteristiche degli strumenti utilizzati in questa prova.



*Figura 4.2 Strumentazione sonica: martello strumentato (a sinistra) ed accelerometro (a destra) utilizzate durante le prove soniche sulla pavimentazione della sala Rossa*

#### **4.2.1 La massa battente**

Nelle prove eseguite nella sala Rossa di Palazzo Malvezzi come massa battente è stato utilizzato il martello strumentato PCB 086 della PCB PIEZOTRONICS: esso è collegato tramite cavo coassiale all'unità centrale e tramite questo trasmette le informazioni necessarie per la prova. La massa del martello è pari a 0,10Kg mentre la punta scelta per queste indagini è in acciaio in quanto permette di ottenere delle frequenze maggiori rispetto alle altre punte più morbide fornite con la strumentazione. Il martello strumentato consente di poter valutare il momento d'impatto con la superficie e l'inizio della propagazione delle onde all'interno del solaio; questo istante è di fondamentale importanza nella prova sonica per poter calcolare il tempo di volo, parametro necessario per la valutazione delle frequenze e delle velocità in gioco.

#### **4.2.2 Ricevitore di spostamenti**

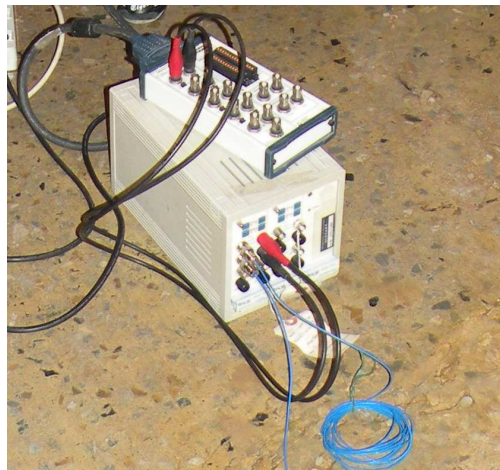
Nella prova sonica eseguita è stato utilizzato come ricevitore di spostamenti un accelerometro della PCB PIEZOTRONICS. L'accelerometro è in grado di rilevare le più piccole vibrazioni del solaio e trasformarle in un segnale elettrico che verrà elaborato dall'unità di controllo alla quale è collegato

tramite cavo coassiale. L'accelerometro registra la forma d'onda completa con la sua intensità nel tempo.

#### **4.2.3 Unità di controllo**

È la parte di tutto il sistema che acquisisce i dati e li salva su disco; ad esso vengono collegati tutti gli strumenti e le periferiche (mouse, tastiera e monitor) necessarie per eseguire la prova sonora. Il sistema utilizzato nelle prove è una piattaforma aperta di misura, controllo e test basato sullo standard PXI (PCI eXtension for Instruments) della National Instruments che consente l'analisi e la visualizzazione dei dati. La strumentazione per la prova viene collegata tramite la centralina di condizionamento e amplificazione del segnale all'unità di controllo.

#### **4.2.4 Centralina di condizionamento e amplificazione del segnale**



*Figura 4.3 Immagine delle centralina utilizzata nelle prove soniche della sala Rossa di Palazzo Malvezzi*

È la parte di strumentazione che consente l'amplificazione e la trasformazione del segnale da analogico a digitale ed è il ponte di passaggio tra strumentazione e unità di controllo. Nel caso in esame è stato necessario dover amplificare di dieci volte il segnale proveniente dall'accelerometro mentre non è stato necessario apportare modifiche a quello del martello.

#### **4.2.5 Il software**

I software utilizzati per queste indagini sono due: il primo è il AcqUSPXrev1 che lavora in ambiente LabView e ha la funzione di visualizzare i dati durante le fasi di preparazione (in cui si calibra la strumentazione) ed acquisizione della prova mentre il secondo è il ElaSonic2rev1 che è stato utilizzato per la elaborazione dei dati raccolti. La visualizzazione dei dati avviene tramite tre finestre e consiste nella rappresentazione distinta delle forme d'onda del martello e

dell'accelerometro mentre su una terza finestra è possibile analizzare contemporaneamente i due segnali per il calcolo dei tempi di volo.

#### 4.2.6 Stima dalle frequenze e risoluzione del segnale

Nella prova sonora, così come in tutte le prove che utilizzano la propagazione di onde, di fondamentale importanza diventano le frequenze utilizzate e le lunghezze d'onda che determinano le dimensioni minime rilevabili dei difetti; per il calcolo di tali grandezze, è necessario conoscere il tempo di contatto  $t_c$  della massa battente, il cui inverso fornirà la frequenza massima del segnale secondo la formula qui riportata

$$f_{max} \cong \frac{1}{t_c}.$$

Nelle fasi preliminari dello studio sono state effettuate delle prove per stimare il tempo di contatto medio martello-solaio. Questo è risultato pari a 306  $\mu s$  per i quali si è calcolata una frequenza massima di 3270 Hz; con l'utilizzo di questi dati ed ipotizzando una velocità del segnale ( $v$ ) di circa 4000 m/s, valore di tentativo corrispondente alla velocità di propagazione delle onde all'interno di elementi in calcestruzzo omogeneo, è stato possibile stimare la lunghezza d'onda minima del segnale e la sua risoluzione:

$$\lambda_{min} = \frac{v}{f_{max}} = 1,22 \text{ m} \leftarrow \begin{cases} v = 4000 \text{ m/s} \\ f_{max} = 3270 \text{ Hz} \end{cases};$$
$$R \cong \frac{\lambda}{4} \cong 0,30 \text{ m}.$$

Utilizzare un valore così elevato della velocità del segnale consente di ottenere valori di lunghezza d'onda e risoluzione cautelativi: infatti, la relazione tra velocità del segnale e risoluzione è inversamente proporzionale, così, lavorando con velocità reali inferiori di quella ipotizzata, si otterranno risoluzioni maggiori, si potranno evidenziare cioè maggiori dettagli del solaio investigato.

Il segnale generato con questa strumentazione ha un contenuto in frequenze non elevato ai fini della prova: infatti, la lunghezza d'onda e la risoluzione stimati sono abbastanza elevati per poter calcolare con precisione la profondità delle fessure presenti sul solaio della sala Rossa. Una risoluzione pari a 30 cm significa che il segnale può valutare tutti i difetti di dimensioni maggiori, ma che risulta insensibile per quelli che presentano una estensione minore.

### 4.3 Posizioni di prova e preparazione del test

La prima operazione da eseguire prima delle prove è l'analisi visiva del mezzo sottoposto ad indagine: nel caso di studio, l'ispezione è stata mirata alla ricerca delle fessure visivamente più

gravi, operazione di non facile attuazione in quanto il solaio della sala è stato sottoposto a restauro con conseguente ristilatura di tutte le fessure presenti.

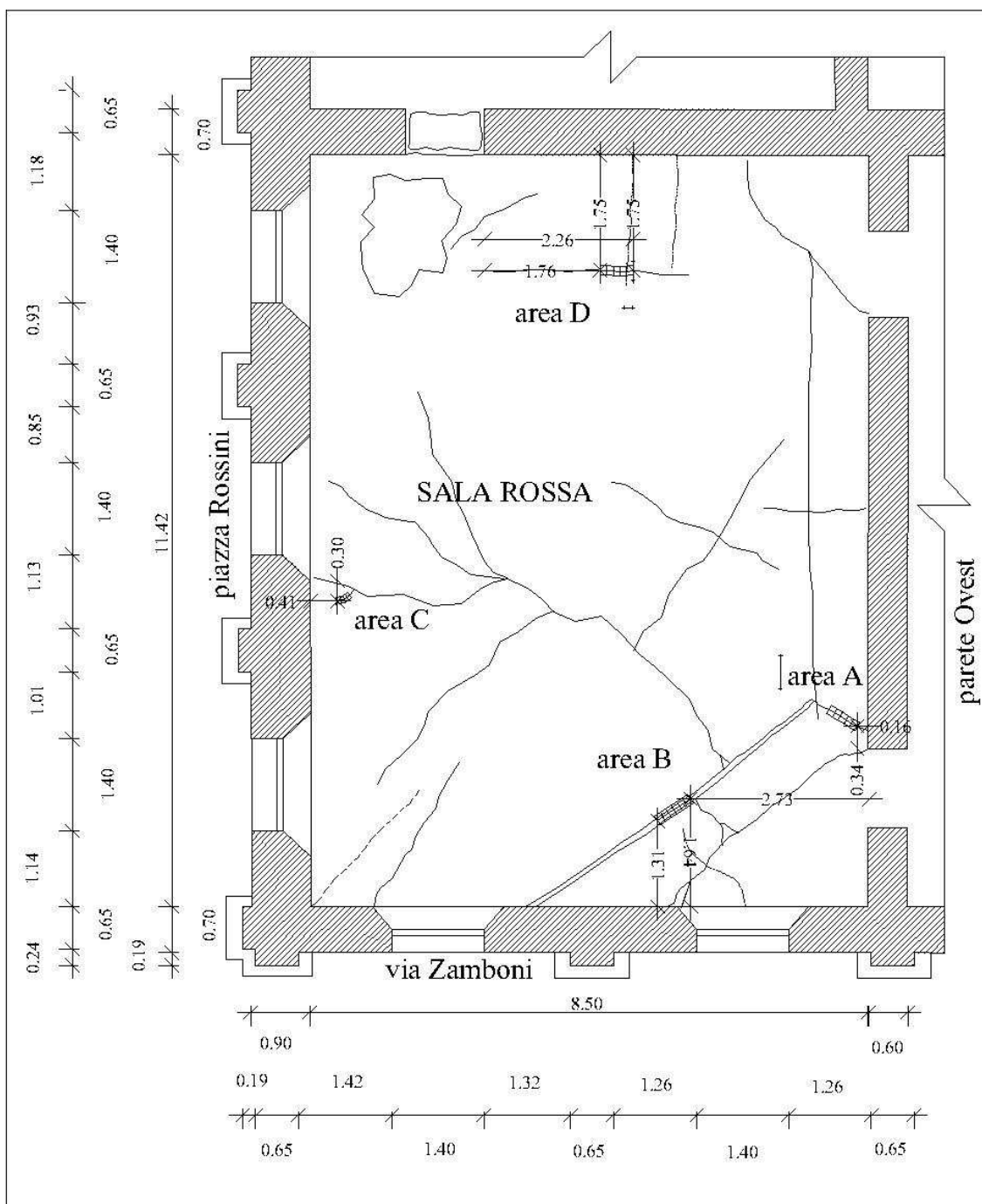


Figura 4.4 Pianta della sala Rossa: rappresentazione dello stato fessurativo del pavimento e postazioni di prova (modificato da Capobianchi, 2009).

Ai fini dello studio sono state selezionate quattro fessure (Figura 4.4): la scelta di queste è stata condizionata sia dalla presenza del mobilio presente nella stanza che rendeva di conseguenza scomodo l'accesso ad alcune aree, sia dalla significatività delle fessure stesse. Sono state scelte tre fessure più rilevanti come estensione ed apertura (aree A, B e D) mentre la quarta (area C) è stata

scelta in quanto, trovandosi al di sotto del mobilio, non è stata soggetta a ristilatura (così come quella dell'area A). Individuate le fessure da sottoporre ad analisi è stato necessario preparare le postazioni di prova: la tecnica utilizzata per individuare la profondità delle fessure necessita che l'accelerometro venga posizionato da un lato della fessura mentre le battute effettuate con il martello devono essere eseguite sul lato opposto della fessura stessa; le distanze accelerometro-fessure e punto di battuta del martello-fessura non sono arbitrarie, ma è necessario che la fessura sia posta esattamente a metà distanza tra i due strumenti e che la distanza tra questi ( $H_1+H_2$ ) sia di circa 10 cm (Sansalone e Streett, 1997)(Figura 4.5).

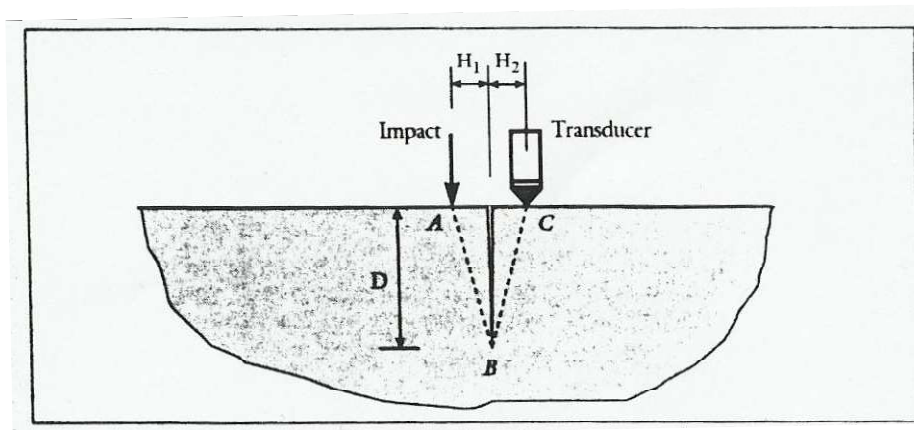


Figura 4.5 Schema della prova (Sansalone e Streett, 1997)

Con riferimento alla Figura 4.5, la distanza che l'onda P generata dall'impatto (A) deve percorrere per raggiungere la stazione di rilevamento (C) è uguale alla somma dei tratti AB e BC e considerando che tale distanza può essere scritta come il prodotto della velocità dell'onda ( $C_p$ ) moltiplicata per il tempo ( $\Delta t$ ) trascorso per coprire tale lunghezza, da considerazioni geometriche si ottiene una semplice relazione che esprime la profondità della fessura (D):

$$D = \sqrt{\frac{(C_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2}.$$

Ogni fessura esaminata è stata suddivisa in più coppie di punti dove eseguire il test in modo tale da ottenere dopo l'analisi dei dati una descrizione della profondità della fessura lungo il suo sviluppo longitudinale.

Per individuare i singoli punti in cui eseguire i test, sulla pavimentazione della sala Rossa è stato utilizzato del gesso in modo tale da non lasciare residui sul solaio storico al termine della prova: la prima operazione eseguita è stata quella di individuare per le singole fessure il numero di coppie di punti necessari per il test in base allo sviluppo della stessa e ad il passo utilizzato tra le coppie di punti. Segnando lungo la frattura il passo scelto, con l'ausilio di una squadra si è cercato di



posizionare i punti da analizzare ortogonalmente alla fessura segnandoli sulla pavimentazione con il gesso; per evitare che questi venissero persi accidentalmente durante le fasi di prova e per rendere la raccolta dati il più semplice possibile e visivamente più chiara, i punti sono stati marcati con un numero scritto su carta adesiva posta in corrispondenza dei punti stessi. A tutti i punti posti sullo stesso lato della fessura sono stati assegnati numeri semplici, mentre a quelli posizionati sul lato opposto sono stati assegnati gli stessi numeri, ma provvisti di apice fornendo così coppie di punti del tipo 1-1', 2-2', etc. (Figura 4.6)



Figura 4.6 Fasi di preparazione della prova: a sinistra posizionamento dei punti su cui effettuare le prove, a destra marcatura dei punti.

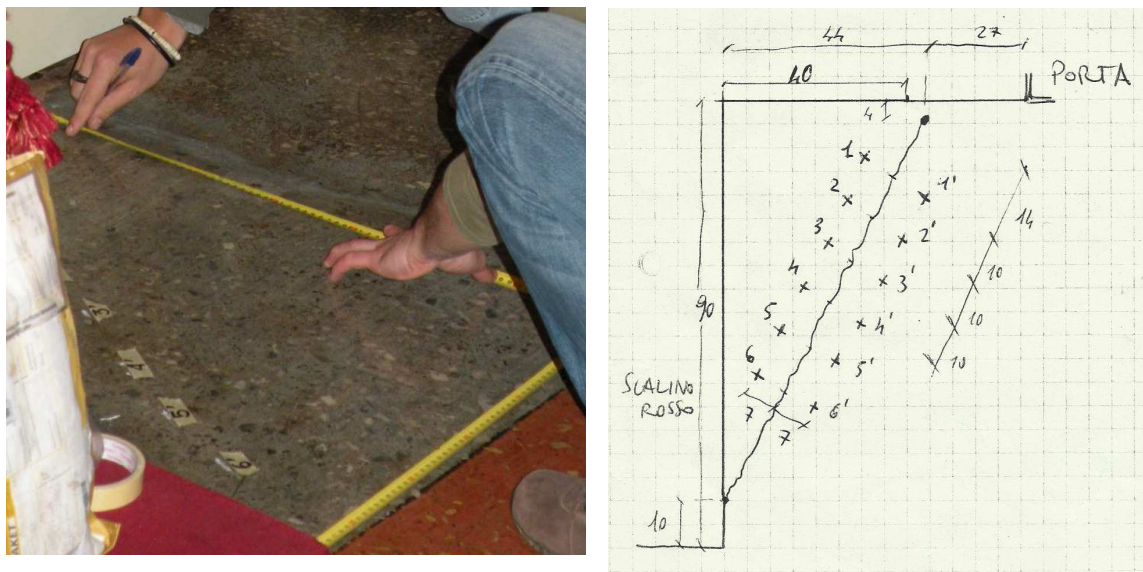


Figura 4.7 Fase di rilievo dell'area di studio A

Al termine della fase di preparazione delle singole aree si otterranno delle fessure su cui sono individuate dalle cinque alle sei coppie di punti.

Prima di iniziare la fase di raccolta dei dati è stato necessario rilevare le posizioni delle fessure sul pavimento rispetto alle pareti della sala e sono stati inoltre rilevati inizio e fine della zona d'indagine misurando la loro distanza da punti significativi individuati all'interno della sala Rossa (Figura 4.7).

Tutte le informazioni necessarie alla ricostruzione delle postazioni (numerazioni, punti significativi e le misure effettuate) sono state riportate in un quaderno di appunti.

Durante la preparazione dell'area B che presenta una fessura di notevole larghezza, è stato necessario individuare in principio il suo asse e riferire poi tutte le misure a questo (Figura 4.8).



*Figura 4.8 Immagine dell'Area B: si osserva la notevole larghezza della fessura ristilata e l'ipotetico asse di questa contrassegnato tramite linea in gesso.*

Terminata la fase di preparazione e rilevamento delle singole aree, le fessure appaiono come indicato in Figura 4.8.

Verrà ora riportata una sintetica descrizione della singole aree esaminate:

- area A

La fessura si presenta dall'andamento mediamente rettilineo con apertura media tra i punti individuati di 2,2mm (massimo in corrispondenza della coppia 1-1' e minimo in corrispondenza della 6-6' con apertura rispettivamente pari a 3,5mm e 1,4mm). È posizionata nei pressi di una delle due porte comunicanti con l'adiacente sala della Giunta e si sviluppa dalla parete interna (parete Ovest) fino all'incontro con uno degli estremi della fessura analizzata nell'area B. L'interasse tra le



coppie di punti è stato scelto pari a 10cm mentre la distanza tra i singoli punti e la fessura è di 7cm a cui corrisponde un interasse degli stessi pari al doppio, cioè 14cm. In questa zona è stato eseguito il primo test di valutazione della velocità di propagazione delle onde elastiche in un percorso privo di fessure: la distanza tra punto di trasmissione Tx (punto di battuta del martello strumentato) e quello di ricezione Rx (posizione dell'accelerometro) è stata scelta pari a 50cm. Il numero delle coppie di punti su cui è stata eseguita la prova è pari a sei.

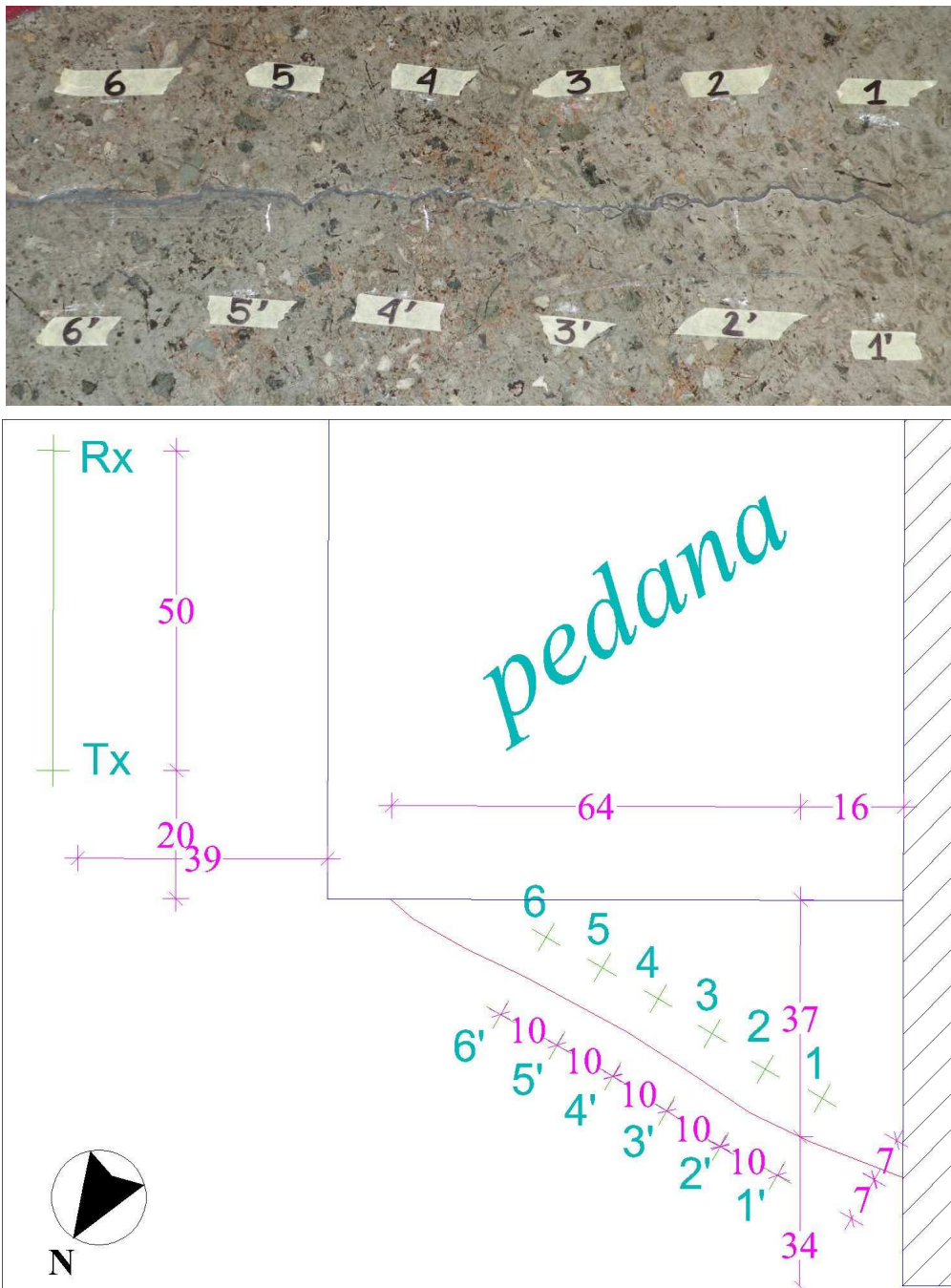
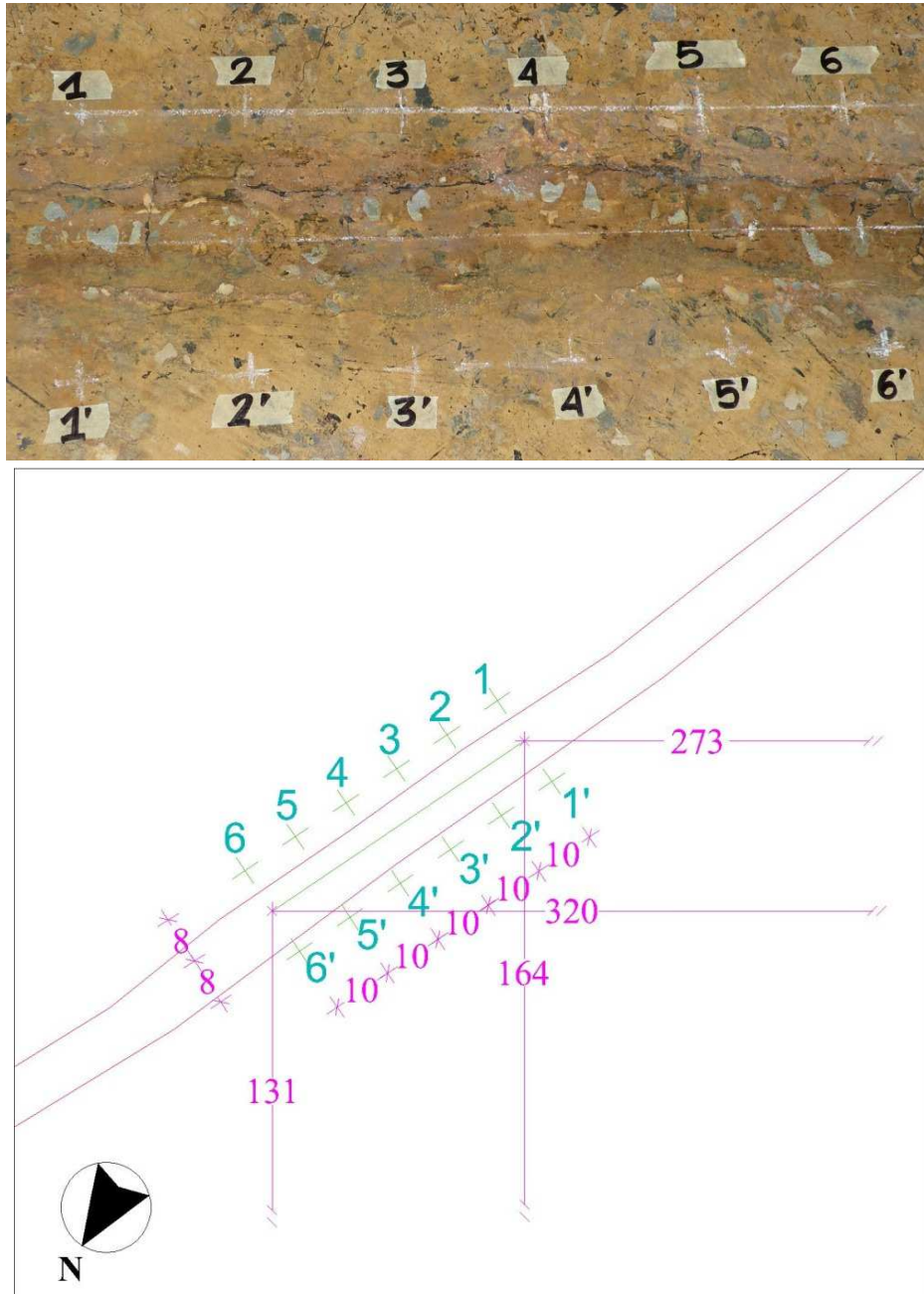


Figura 4.9 Area A di prova

- area B

La fessura presente in questa zona risulta tra le peggiori individuate nella stanza in quanto nella parte superficiale si osserva una ristilatura evidente di larghezza media pari a 6,7mm.



*Figura 4.10 Area B*

La fessura in esame si estende in diagonale con un vertice posto circa a metà della parete esterna parallela a via Zamboni per terminare in corrispondenza della fessura studiata nell'Area A. L'andamento risulta mediamente rettilineo e tra i punti selezionati per lo studio presenta una

larghezza media di 6,7mm il cui massimo è visibile in corrispondenza dei punti 4-4' (8,07mm) mentre il minimo è riscontrabile nella coppia 5-5' (6,08cm). L'interasse tra le coppie di punti è di 10mm mentre la distanza tra questi e la fessura è di 8cm per un interasse tra gli stessi pari al doppio (16cm); in questa area sono state selezionate sei coppie di punti per lo studio della profondità della fessura.

- area C

La fessura in esame è nascosta da una poltrona della sala ed è stato necessario quindi spostare di poco il mobilio per poter eseguire la prova.

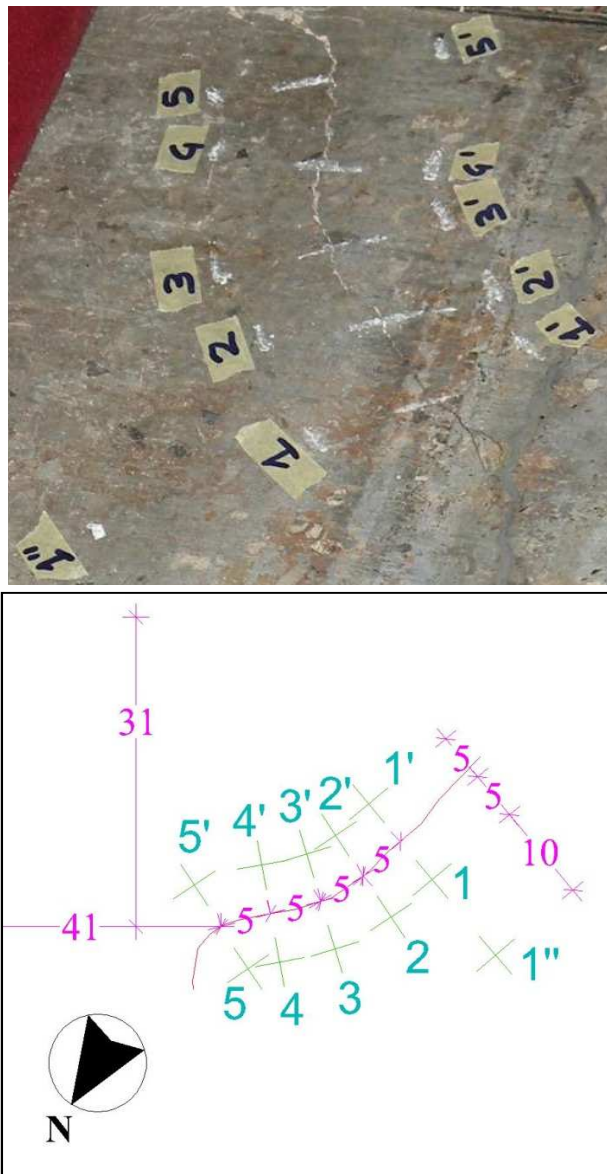


Figura 4.11 Area C

L'andamento risulta essere curvilineo e presenta un'apertura media tra i punti esaminati di 2,0mm il cui massimo si evidenzia in corrispondenza della coppia 2-2' (2,7mm) mentre il minimo si riscontra per la prima e per l'ultima coppia (2,0mm). Come detto, la fessura in esame risulta l'unica della sala non soggetta ad alcuna ristilatura. La fessura si colloca in prossimità della finestra centrale della parete Est corrispondente all'affaccio su piazza Rossini.

Oltre ai punti utilizzati per individuare la profondità della fessura, in questa zona è stata aggiunta un'ulteriore stazione (1''') posizionata lungo la direzione 1-1' ed al di sopra del punto 1 ad una distanza di 10 cm da questo per calcolare la velocità di propagazione del segnale in campo libero (privo di fessure).

- area D

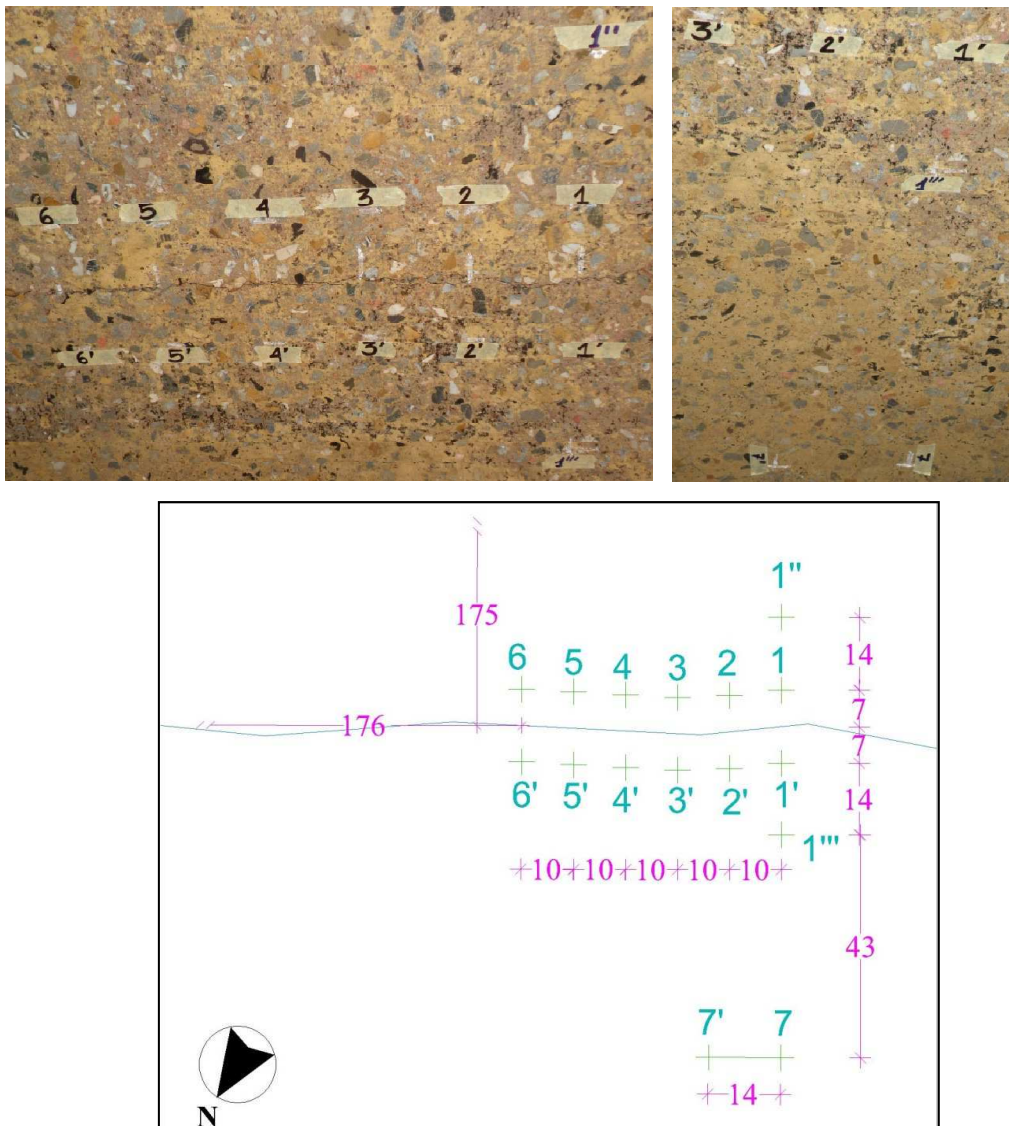


Figura 4.12 Area D: nell'immagine a sinistra si osservano le stazioni di prova, a destra la posizione delle stazioni ausiliari.



La fessura si presenta con andamento mediamente rettilineo, l'apertura media riscontrata tra i punti selezionati per la prova risulta essere pari a 1,3mm mentre il valore massimo (1,9mm) è stato misurato in prossimità delle ultime coppie di punti (5-5' e 6-6') ed il valore minimo (0,7mm) in corrispondenza della coppia 3-3'. L'interasse tra le coppie di punti è stato selezionato pari a 10cm mentre la distanza fessura-punti per la prova è di 7cm (a cui corrisponde un interasse tra i punti stessi di 14cm).

Anche in questa zona sono stati posizionati ulteriori punti per verificare la velocità del segnale in campo libero: una stazione denominata 1'' è stata posizionata sulla direttrice 1-1' al di sopra del punto 1 e ad una distanza da questo di 14cm, mentre una seconda stazione denominata 1''' è stata posizionata sulla stessa direttrice, ma al di sopra del punto 1' ad una distanza di 14cm da quest'ultimo. Un'ulteriore verifica della velocità del segnale è stata effettuata utilizzando una coppia di punti (7-7') posizionati lontano dalla fessura ad una distanza di 43cm dal punto 1''' verso l'interno della sala: l'interasse tra queste due stazioni è di 14cm.

#### **4.4 Procedura di acquisizione**

Prima di iniziare la fase di acquisizione dei dati è necessario procedere con il settaggio della strumentazione utilizzata. Innanzitutto è necessario controllare che la strumentazione comunichi con l'unità di controllo e che l'amplificazione del segnale sia adeguata: per il martello strumentato questa operazione si verifica facendo battere lo strumento sulla pavimentazione e verificando che la forma d'onda sia visibile nel monitor, mentre per l'accelerometro la verifica è soddisfatta nel momento in cui questo sia in grado di ricevere e graficare il segnale ricevuto (Figura 4.13).

In una prova sonica è inoltre necessario verificare la forma d'onda fornita dall'accoppiamento martello strumentato-superficie da investigare (in questo caso rappresentata dalla pavimentazione) in modo tale da poter scartare immediatamente delle battute effettuate col martello che possono essere affette da errori grossolani (errore d'impugnatura della strumentazione, scarsa energia nel colpo, etc.): per procedere con questa operazione sono stati eseguiti una serie di battute sulla pavimentazione controllando di volta in volta sullo schermo quale fosse il segnale generato sia nel valore del suo picco di energia (espresso in Volt), sia in quello del suo tempo di contatto (espresso in secondi).

Per l'accelerometro non sono necessarie particolari calibrazioni in quanto è necessario solamente che lo strumento sia in grado di ricevere e graficare l'onda ricevuta dal martello e che questa sia di ampiezza adeguata. Verificata la forma d'onda generata dall'accoppiamento, è stato possibile procedere con l'acquisizione dei dati.



*Figura 4.13 Esempio di visualizzazione delle forme d'onda: nella finestra in alto martello ed accelerometro, in basso uno zoom dei due segnali accoppiati.*

Come prima operazione è stata calcolata una ipotetica risoluzione del segnale utilizzando un valore della velocità del segnale pari a  $v = 4000\text{m/s}$ , valore eccessivo ma a favore di sicurezza in quanto fornisce risoluzioni peggiori come indicato al termine del paragrafo 4.2. Questa operazione è risultata utile per comprendere quali fossero le grandezze in gioco: frequenza massima del segnale circa  $3,2\text{KHz}$ ,  $\lambda_{\text{min}} \approx 1,2\text{m}$ ,  $R \approx 0,3 \div 0,4\text{m}$ .

Nella fase successiva è stata calcolata la velocità di propagazione reale del segnale nel percorso Tx-Rx dell'Area A battendo con il martello sulla postazione denominata Tx e posizionando l'accelerometro su quella Rx: conoscendo la distanza tra i due punti (0,50 metri) e conoscendo il tempo di volo (calcolato tramite il software e pari  $478,7 \times 10^{-6}$  secondi) è stato possibile ricavare la velocità del segnale tramite la formula:

$$v = s/t = \frac{0,50}{478,7} \cdot 10^6 = 1044 \frac{m}{s}.$$

Prima di procedere con l'acquisizione dei dati è stato necessario costruire sul quaderno degli appunti delle tabelle che indicassero per ogni coppia di punti esaminata quale fosse la posizione del martello strumentato e quale quella dell'accelerometro ed inoltre quale fosse il nome di salvataggio del file associato a questo percorso (Figura 4.14).

Oltre queste informazioni è stata riportata anche la lunghezza del percorso superficiale e delle eventuali note da segnalare per poter evidenziare eventuali anomalie. Queste operazioni sono state necessarie per poter consentire nelle fasi di elaborazione dei dati di risalire tramite il nome dei file salvati ai percorsi eseguiti: infatti, senza le tabelle, si sarebbero potuti analizzare i dati, ma sarebbe stato impossibile associarli ad uno specifico percorso rendendo inutile il lavoro. Dalla Figura 4.14 è possibile notare come ogni percorso sia stato eseguito in due direzioni, invertendo cioè la postazione di battuta del martello con quella dell'accelerometro e viceversa; in tal modo è stato possibile ottenere un numero maggiore di informazioni e verificare la presenza di eventuali anomalie presenti in un percorso.

NOME FILE	T <sub>x</sub>	R <sub>x</sub>	LUNGHEZZA PERCORSO	NOTE
S Rosse 1	1	1'	14 cm	AREA A
" 2	2	2'	14 cm	
" 3	3	3'	14 cm	
" 4	4	4'	14 cm	
" 5	5	5'	14 cm	
" 6	6	6'	14 cm	
S Rosse 7	1'	1	14 cm	da qui invertito il martello con l'acc.
" 8	2'	2	"	
" 9	3'	3	"	
" 10	4'	4	"	
" 11	5'	5	"	
" 12	6'	6	"	

Figura 4.14 Parte di una pagina di appunti per prova sonica

Terminata questa operazione è stato possibile iniziare l'acquisizione dei dati utili ai fini della prova. La prima fessura analizzata è stata quella situata nell'Area A; posizionando l'accelerometro nel punto 1' è stato necessario eseguire una serie di colpi col martello sul punto 1 fino ad ottenere un segnale adeguato: infatti, controllando manualmente la battuta del martello, è possibile che alcuni colpi siano troppo deboli oppure troppo forti provocando uno scarso segnale in ricezione confondibile con parte del rumore di fondo nel primo caso oppure tagliando il picco del segnale del

martello nel secondo. Un buon colpo per la strumentazione utilizzata consiste nello sviluppare una energia il più possibile vicino ai 10 Volt (valore di picco del martello) e nell'ottenere un tempo di contatto il più piccolo possibile (colpi elastici e fermi) in modo tale da eccitare un numero elevato di frequenze e quindi aumentare la risoluzione del segnale; trovata la combinazione giusta di energia liberata ed elasticità del colpo si procede con il salvataggio del file il cui nome è stato riportato nella tabella accanto al percorso rappresentato.

Per eseguire correttamente la prova è stato necessario l'impiego di tre operatori: il primo addetto all'utilizzo del martello strumentato, il secondo all'accelerometro ed il terzo all'unità centrale.



*Figura 4.15 Fase di acquisizione dei dati: procedendo da sinistra verso destra sono evidenziati gli operatori addetti rispettivamente all'unità centrale, all'accelerometro ed al martello*

Questa suddivisione è stata necessaria in quanto ogni più piccolo spostamento dell'accelerometro provoca la registrazione di un segnale che comporterebbe la lettura errata dei dati ed è quindi evidente che la stessa persona non può occuparsi anche del martello; l'operatore addetto al controllo dell'unità centrale non risulta essenziale ai fini della prova, ma è senza dubbio di notevole utilità



potendo fornire immediate indicazioni sulle forme d'onda registrate del martello e dell'accelerometro consentendo così di ridurre i tempi della campagna (Figura 4.15).

Terminata l'operazione per la prima coppia di punti è stato possibile passare alle successive coppie ripetendo le operazioni descritte fino a completare tutti i percorsi presenti nelle quattro aree.

#### 4.5 Elaborazione e visualizzazione dei dati

Nella fase di elaborazione e visualizzazione dei dati è stato utilizzato il software ElaSonic2rev1 descritto nel paragrafo 4.2.



Figura 4.16 Schermata del programma.

In questa fase dello studio non si presentano notevoli difficoltà in quanto l'analisi non prevede elaborazioni dei dati registrati durante le fasi di acquisizione del segnale, ma consiste piuttosto nell'individuare il dato principale ricavabile da una prova di tipo sonico e cioè il tempo di volo misurato come la differenza di tempo tra partenza dell'onda elastica (istante di battuta del martello strumentato) e suo arrivo in un determinato punto prestabilito (postazione dell'accelerometro); se nella teoria tale differenza di tempo risulta facilmente individuabile, nella pratica esistono piccole difficoltà che rendono questa operazione non banale.

Innanzitutto, è necessario caricare un file precedentemente salvato durante le fasi di acquisizione e visualizzarlo nella finestra di dialogo del software; questa schermata è un box in cui sono contenute separatamente le forme d'onda del martello e dell'accelerometro, mentre in un secondo box queste sono graficate insieme ed è proprio qui che si effettueranno le principali operazioni per il calcolo del tempo di volo (Figura 4.16). La prima operazione che deve essere eseguita è quella di ingrandire la zona d'interesse del grafico: modificando il valore degli estremi dell'asse del tempo (ascisse) e delle ampiezze (ordinate), è possibile zoommare la porzione che contiene gli istanti in cui le due curve si discostano dall'orizzontalità.

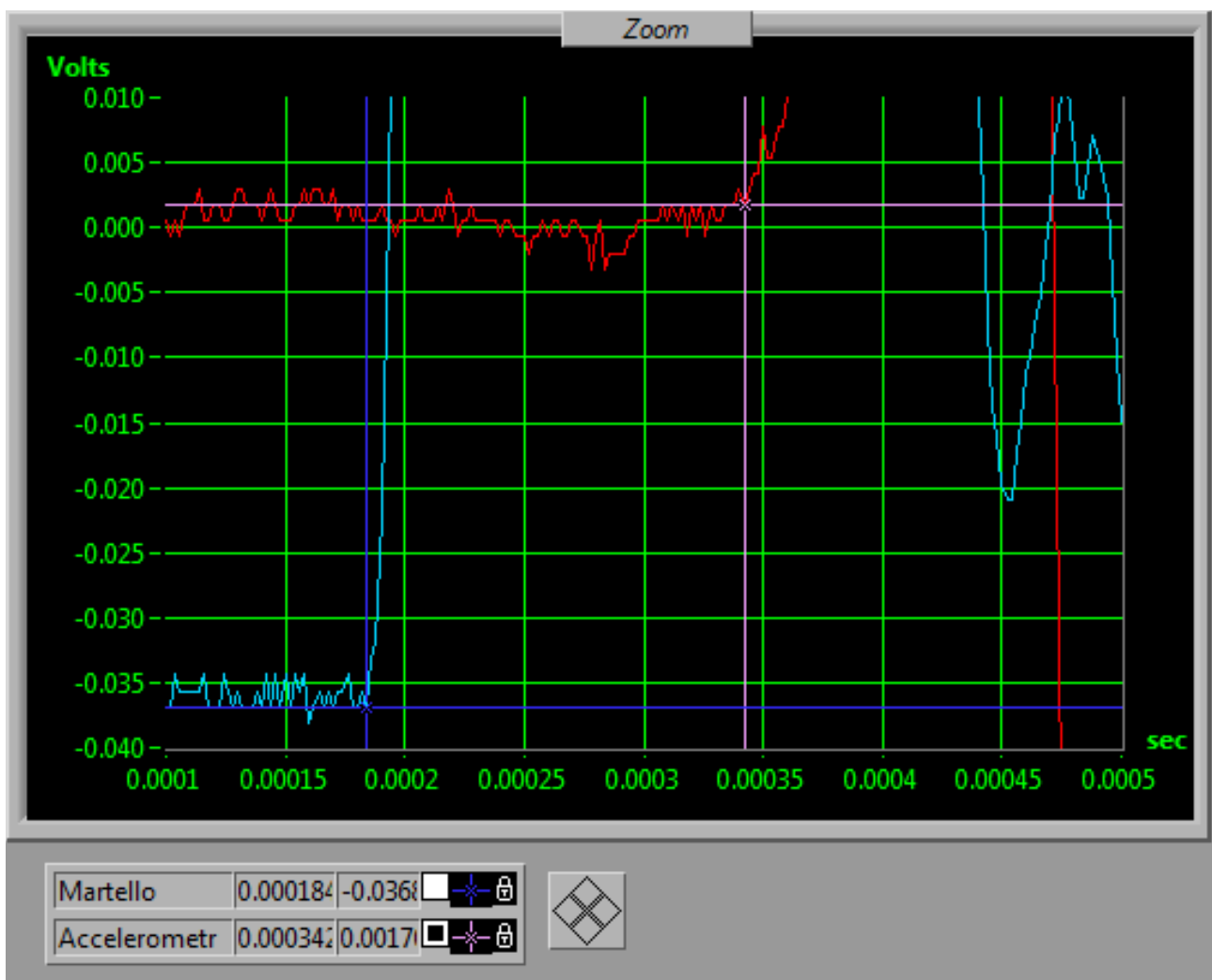


Figura 4.17 Ingrandimento dei segnali: istanti di partenza (a sinistra) e arrivo (a destra) del segnale.

Questa operazione è necessaria per poter individuare con esattezza il momento di partenza e arrivo del segnale in quanto questo non è privo di rumore di fondo che ne altera le caratteristiche; infatti, se in prima analisi le due curve possono sembrare continue e lineari, basta aumentare

l'ingrandimento per vedere che in realtà il loro andamento è piuttosto oscillatorio e che anche in assenza di segnale sono presenti delle piccole variazioni di voltaggio.

È evidente quindi la necessità di imporre una regola costante per tutte le letture, in modo tale da non compiere errori grossolani di valutazione; nel caso di studio si è considerato come inizio del segnale l'ultimo picco di valore opposto alla prima variazione nettamente crescente o decrescente del grafico. Stabilita questa regola è stato possibile procedere con il calcolo del tempo di volo spostando i cursori delle due curve nei punti suddetti; in questo modo il software calcola la differenza di tempo (espressa in microsecondi) in base alla posizione dei cursori ed il valore viene indicato nella casella apposita (Figura 4.17).

Noto il tempo impiegato dall'onda per percorrere la distanza punto di battuta-punto di ricezione ed essendo nota tale distanza è stato possibile calcolare la velocità di propagazione del segnale per ogni percorso

$$v = s/t.$$

Queste operazioni sono state eseguite per tutti i file registrati per le prove soniche effettuate nella sala Rossa di Palazzo Malvezzi ottenendo così una coppia di valori di velocità del segnale per ogni percorso di ogni singola area; i risultati ottenuti vengono riportati nelle tabelle seguenti.

### -AREA A

*Tabella 4.1 Valori di velocità, tempi e frequenze rilevati nell'area A*

File	Tx	Rx	Lungh. (m)	T cont. (µs)	Freq. (Hz)	T mart. (µs)	T acc. (µs)	T volo (µs)	Velocità (m/s)	Media (m/s)
SRossa0			0.5	220	4545	190	668	478	1046	1046
SRossa1	1	1'	0.14	248	4032	184	330	146	959	848
SRossa7	1'	1	0.14	246	4065	92	282	190	737	
SRossa2	2	2'	0.14	298	3356	194	292	98	1429	1510
SRossa8	2'	2	0.14	204	4902	188	258	88	1591	
SRossa3	3	3'	0.14	298	3356	188	308	120	1167	1187
SRossa9	3'	3	0.14	288	3472	180	296	116	1207	
SRossa4	4	4'	0.14	282	3546	182	314	130	1077	1199
SRossa10	4'	4	0.14	304	3289	188	280	106	1321	
SRossa5	5	5'	0.14	220	4545	174	262	88	1591	1629
SRossa11	5'	5	0.14	302	3311	190	274	84	1667	
SRossa6	6	6'	0.14	246	4065	184	292	108	1296	1309
SRossa12	6'	6	0.14	290	3448	186	292	106	1321	

Frequenza media (Hz)	3841	T volo medio (µs)	143	Velocità media (m/s)	1280
----------------------	------	-------------------	-----	----------------------	------

Il primo file (SRossa0) corrisponde al percorso Tx-Rx posizionato fuori dalla fessura ed utilizzato in prima fase per calcolare la velocità del segnale.

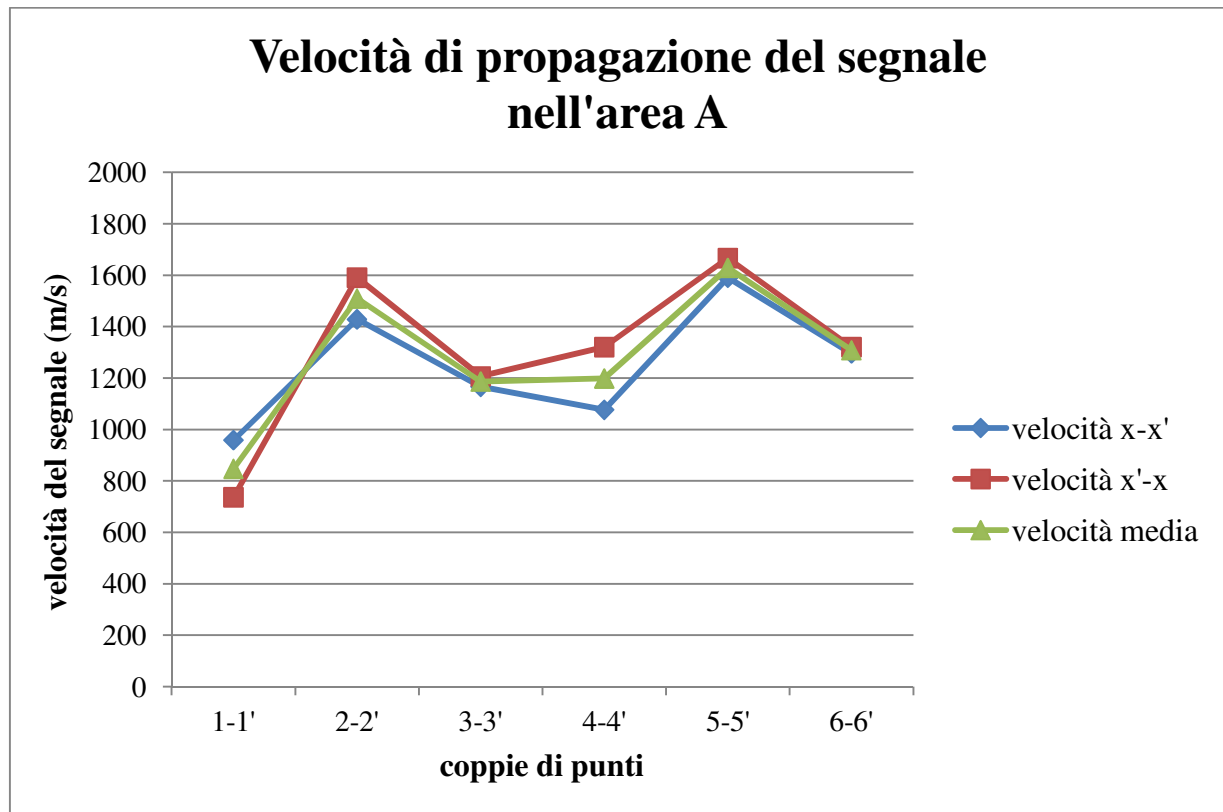


Figura 4. 18 Rappresentazione delle velocità del segnale ricavate nell'area di studio A

## -AREA B

Tabella 4.2 Valori di velocità, tempi e frequenze rilevati nell'Area B

File	Tx	Rx	Lungh. (m)	T cont. (µs)	Freq. (Hz)	T mart. (µs)	T acc. (µs)	T volo (µs)	Velocità (m/s)	Media (m/s)
SRossa13	1	1'	0.16	286	3497	180	298	118	1356	1368
SRossa19	1'	1	0.16	256	3906	176	292	116	1379	
SRossa14	2	2'	0.16	242	4132	190	314	124	1290	1233
SRossa20	2'	2	0.16	312	3205	184	320	136	1176	
SRossa15	3	3'	0.16	322	3106	182	346	164	976	1085
SRossa21	3'	3	0.16	296	3378	190	324	134	1194	
SRossa16	4	4'	0.16	548	1825	184	340	156	1026	1191
SRossa22	4'	4	0.16	292	3425	186	296	118	1356	
SRossa17	5	5'	0.16	498	2008	190	344	154	1039	928
SRossa23	5'	5	0.16	310	3226	186	382	196	816	
SRossa18	6	6'	0.16	300	3333	186	298	112	1429	1339
SRossa24	6'	6	0.16	332	3012	184	312	128	1250	

Frequenza media (Hz)	3171	T volo medio ( $\mu$ s)	138	Velocità media (m/s)	1191
----------------------	------	-------------------------	-----	----------------------	------

In quest'area non sono state eseguite prove per la verifica del segnale in campo libero (zona priva di fessure).

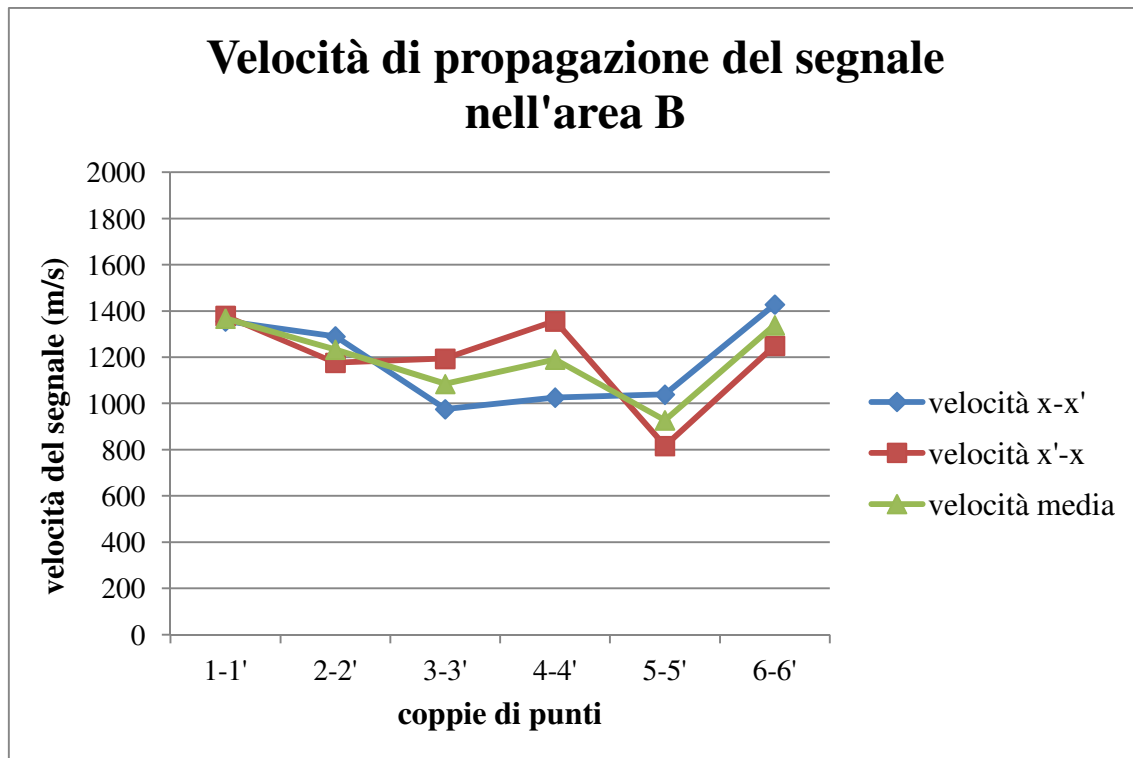


Figura 4.19 Grafico delle velocità calcolate nell'area B

### -AREA C

Tabella 4.3 Valori di velocità, tempi e frequenze rilevati nell'Area C

File	Tx	Rx	Lungh. (m)	T cont. ( $\mu$ s)	Freq. (Hz)	T mart. ( $\mu$ s)	T acc. ( $\mu$ s)	T volo ( $\mu$ s)	Velocità (m/s)	Media (m/s)
SRossa25	1	1'	0.1	250	4000	184	266	82	1220	1268
SRossa30	1'	1	0.1	242	4132	184	260	76	1316	
SRossa26	2	2'	0.1	352	2841	182	324	142	704	776
SRossa31	2'	2	0.1	282	3546	184	302	118	847	
SRossa27	3	3'	0.1	282	3546	172	432	260	385	480
SRossa32	3'	3	0.1	298	3356	186	360	174	575	
SRossa28	4	4'	0.1	270	3704	160	374	214	467	502
SRossa33	4'	4	0.1	402	2488	190	376	186	538	

SRossa29	5	5'	0.1	306	3268	164	338	174	575	625
SRossa34	5'	5	0.1	364	2747	174	322	148	676	
SRossa35	1	1''	0.1	400	2500	190	276	86	1163	1163

Frequenza media (Hz)	3284	T volo medio ( $\mu$ s)	157	Velocità media (m/s)	730
----------------------	------	-------------------------	-----	----------------------	-----

L'ultimo percorso (SRossa35) è stato utilizzato come verifica per calcolare la velocità del segnale fuori dalla fessura; questo valore è stato utilizzato per confrontare gli altri ottenuti a cavallo della crepa.

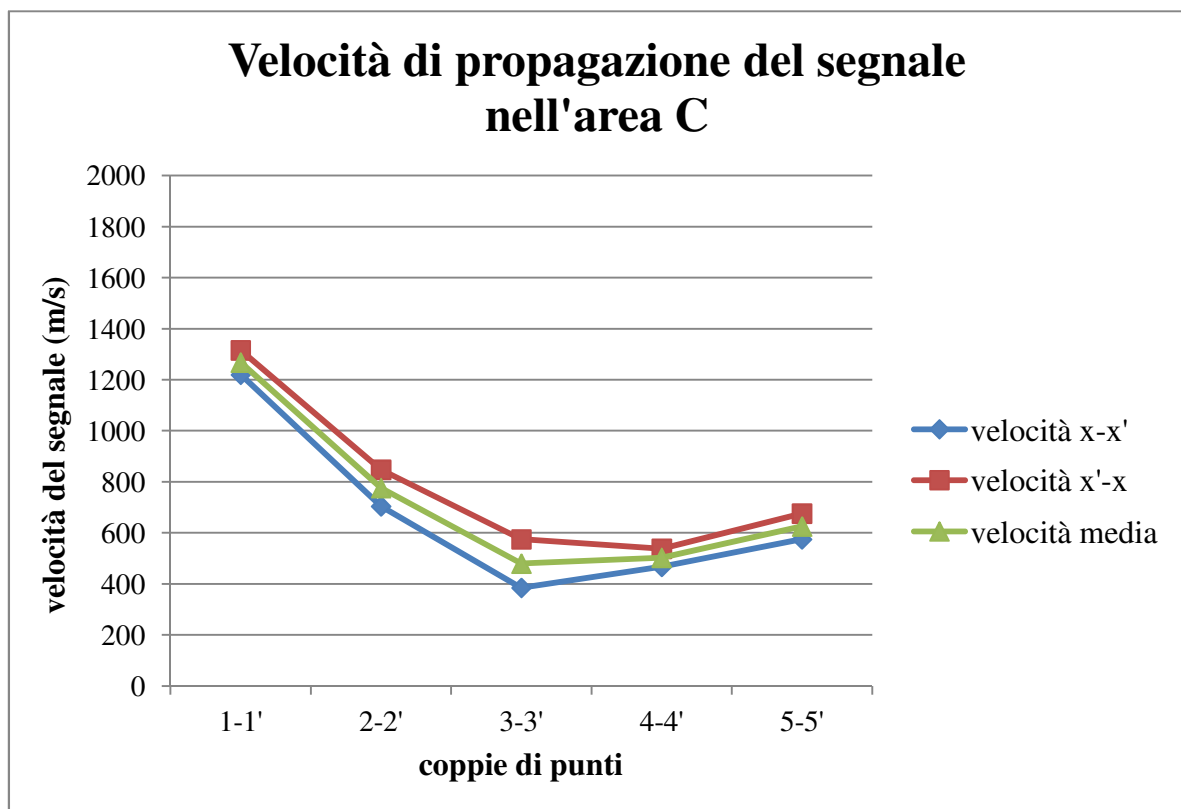


Figura 4. 20 Grafico delle velocità calcolate nell'area C

### -AREA D

Tabella 4.4 Valori di velocità, tempi e frequenze rilevati nell'Area D

File	Tx	Rx	Lungh. (m)	T cont. ( $\mu$ s)	Freq. (Hz)	T mart. ( $\mu$ s)	T acc. ( $\mu$ s)	T volo ( $\mu$ s)	Velocità (m/s)	Media (m/s)
SRossa36	1	1'	0.14	312	3205	140	270	130	1077	1053
SRossa42	1'	1	0.14	264	3788	174	310	136	1029	
SRossa37	2	2'	0.14	406	2463	182	308	126	1111	1111

SRossa43	2'	2	0.14	282	3546	186	312	126	1111	
SRossa38	3	3'	0.14	264	3788	180	296	116	1207	1264
SRossa44	3'	3	0.14	334	2994	184	290	106	1321	
SRossa39	4	4'	0.14	214	4673	182	282	100	1400	1386
SRossa45	4'	4	0.14	296	3378	166	268	102	1373	
SRossa40	5	5'	0.14	308	3247	192	264	76	1842	1818
SRossa46	5'	5	0.14	252	3968	180	278	78	1795	
SRossa41	6	6'	0.14	306	3268	188	310	122	1148	1247
SRossa47	6'	6	0.14	308	3247	188	292	104	1346	

SRossa48	1	1''	0.14	250	4000	178	303	122	1148
SRossa49	1'	1'''	0.14	238	4202	174	286	112	1250

Frequenza media (Hz)	3464	T volo medio ( $\mu$ s)	110	Velocità media (m/s)	1313
----------------------	------	-------------------------	-----	----------------------	------

Gli ultimi due file (SRossa48-49) sono stati utilizzati per verificare la velocità del segnale in quest'area.

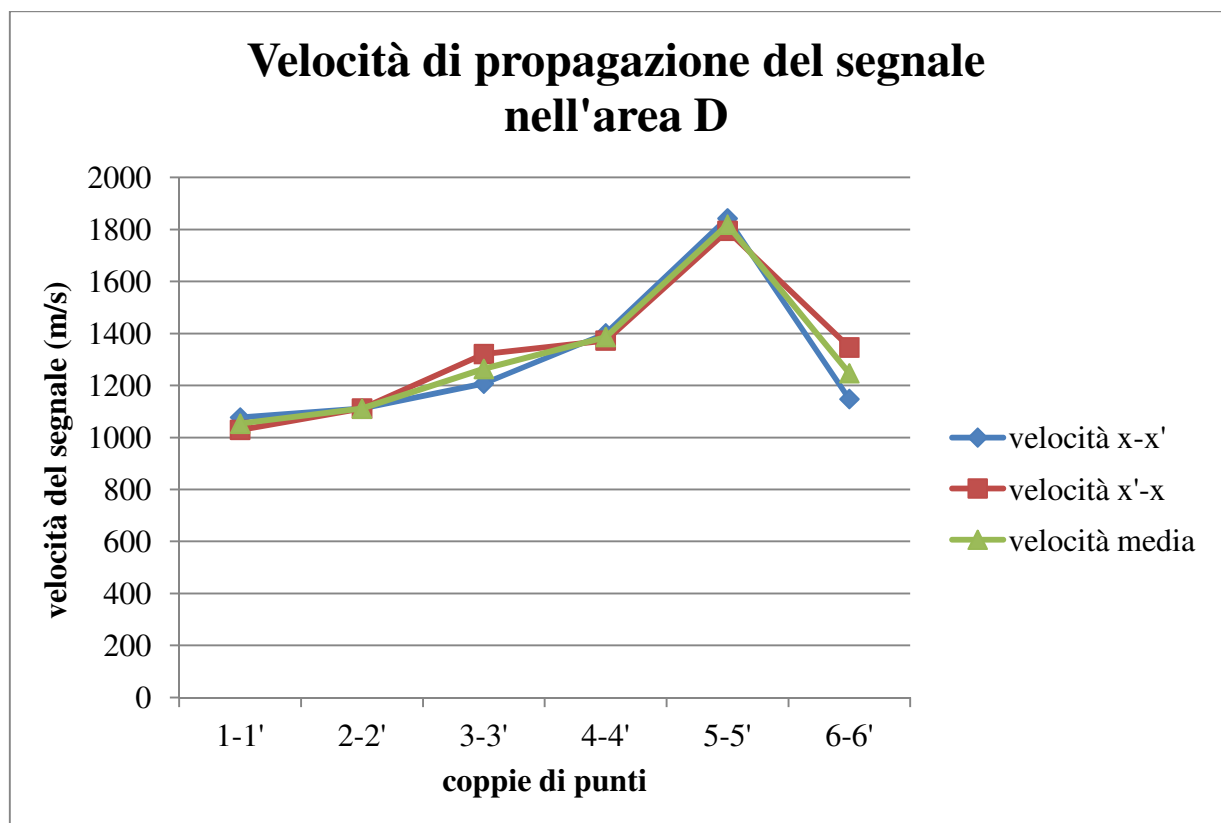


Figura 4. 21 Grafico delle velocità calcolate nell'area D

## 4.6 Interpretazione dei risultati

I dati raccolti con la prova sonica per l'indagine della profondità delle fessure si sono dimostrati inadatti a tale scopo già dalla fase di acquisizione dei dati. Infatti, verificando già in sito alcune velocità di propagazione del segnale sul solaio investigato, è stato evidenziato che alcuni percorsi effettuati a cavallo delle fessure presentavano velocità equiparabili se non superiori a quelle riscontrate in percorso libero; questo fenomeno si può spiegare pensando che il segnale passa indisturbato attraverso la fessura, cioè che le onde generate con questa strumentazioni risultano insensibili ai difetti presenti anzi, in alcuni casi, la ristilatura delle fessure ha provocato un miglioramento delle condizioni superficiali del solaio. L'elevato tempo di contatto martello-pavimentazione e conseguentemente lo scarso contenuto in frequenze del segnale, non sono in grado di generare onde adatte ai fini della prova: infatti, come calcolato in precedenza, la risoluzione del segnale risulta eccessivamente elevata (circa 30 cm).

Volendo in ogni caso procedere con il calcolo della profondità delle fessure attraverso la formula

$$D = \sqrt{\frac{(C_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2},$$

si otterranno valori negativi del radicale, indice che l'ipotenusa (AB) del triangolo (il tragitto percorso dal segnale) è inferiore al cateto (H) rappresentante la distanza tra fessura e postazione di prova (Figura 4.22).

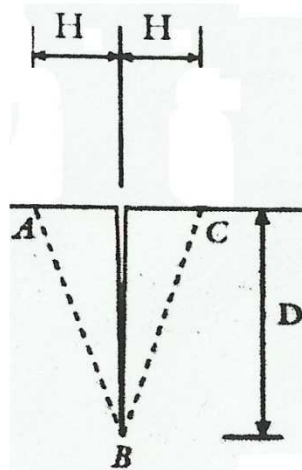


Figura 4.22 Schema della geometria della prova (Sansalone e Streett, 1997).

Studiando i risultati ottenuti nell'area C, invece, è possibile osservare come i tempi impiegati dal segnale per percorrere la distanza punto d'impatto-accelerometro (cioè il tragitto ABC della Figura 4.22) sono superiori rispetto a quello di riferimento mentre le velocità sono sensibilmente inferiori a



quelle di riferimento calcolate in questa zona. Solamente nei percorsi 1-1' e 1'-1 le velocità risultano superiori probabilmente a causa della ristilatura presente in questo tratto della fessura. Come detto nel paragrafo 4.3, questa fessura è l'unica a non essere trattata con ristilatura e di conseguenza il segnale generato con la strumentazione sonora è stato sufficiente per valutare la profondità. Come osservato nei dati raccolti, basta avvicinarsi alla zona in cui è stata trattata la fessura per compromettere la prova alterando le velocità di propagazione del segnale.

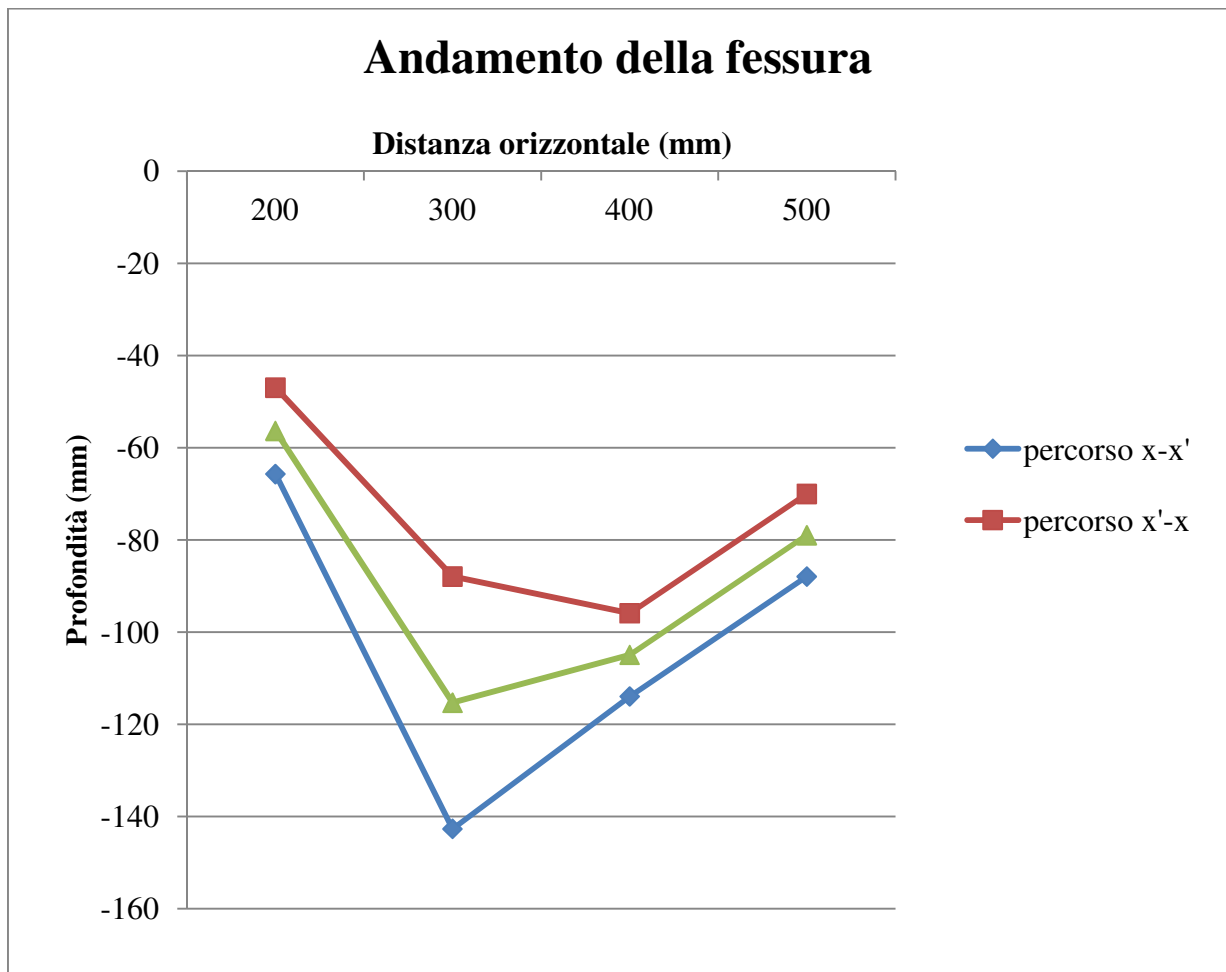


Figura 4.23 Andamento della profondità della fessura dell'area C

I valori della profondità ricavati nei due percorsi (X-X' e X'-X) differiscono tra loro di circa 2 cm tranne che nel terzo per il quale la differenza è di 5 cm (Tabella 4.5).

Tabella 4.5 Profondità calcolata nei vari percorsi effettuati nell'area C

Percorso	Profondità (mm)	Differenza (mm)	Profondità media (mm)
2-2'	-66	19	-56
2'-2	-47		

3-3'	-143	55	-115
3'-3	-88		
4-4'	-114	18	-105
4'-4	-96		
5-5'	-88	18	-79
5'-5	-70		

Questa variazione nei risultati può essere causata dalla conformazione della fessura in profondità: infatti, come mostrato anche in letteratura [Sansalone e Streett, 1997], se l'andamento della crepa non risulta verticale, ma è inclinato o curvilineo il calcolo può fornire risultati differenti a seconda della direzione d'indagine. Nel caso presentato, seppur i valori ottenuti siano differenti, si possono ricavare delle informazioni sull'andamento della profondità della fessura.

#### **4.7 Osservazioni e suggerimenti**

Lo studio della profondità delle fessure condotto sul solaio della sala Rossa non ha fornito in generale i risultati attesi: infatti, a causa del trattamento subito dalle crepe, il segnale generato con la strumentazione sonica non è stato in grado valutare la discontinuità materiale presente rendendo poco significativi i risultati ottenuti per la prova. Lo studio condotto sulla sola fessura non trattata (area C), invece, è stato in grado di fornire dati utilizzabili nel test: in questo caso, infatti, è stato possibile calcolare la profondità della fessura.

Per poter indagare in maniera più dettagliata la profondità delle fessure presenti in questa sala sarebbe necessario poter utilizzare della strumentazione in grado di generare un segnale dal contenuto in frequenza maggiore così da poter rilevare quelle discontinuità materiali che con la prova sonica non sono state colte; a tale scopo sarebbe indicato l'utilizzo della strumentazione impact-echo come descritto in letteratura e presentato nel capitolo successivo di questo lavoro.

La comodità della prova sonica nel fornire direttamente il valore del tempo di volo del segnale non può essere sfruttata in questo caso in quanto il tempo rilevato dalla strumentazione non è quello d'interesse ai fini della prova valutando nella maggior parte dei casi la velocità di propagazione superficiale del segnale.

## Capitolo 5

# SALA ROSSA: INDAGINE DI FESSURE TRAMITE IMPACT-ECHO

---

### 5.1 Scopo delle prove

Lo scopo di queste prove, eseguite in data 25 Novembre 2010, non differisce da quello descritto nel capitolo precedente e per questo motivo non verranno ripetute le considerazioni fatte in precedenza. La necessità di ripetere la prova con questa tecnologia è stata causata dalla mancanza di risultati utili ottenuti con il test sonico.

### 5.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione che è utilizzata in una prova impact-echo (IE) non differisce da quella delle prove soniche se non per la massa battente e per il software.

In questo caso, il martelletto risulta avere massa inferiore rispetto a quella utilizzata per le prove precedenti ed inoltre non è strumentato, fattore che causa l'utilizzo di un software differente per l'analisi.



*Figura 5.1 Strumentazione per la prova impact-echo: massa battente (a sinistra) e accelerometro (a destra).*

### **5.2.1 La massa battente**

Nelle prove impact-echo, dovendo diminuire il tempo di contatto per aumentare frequenze e risoluzione, è necessario utilizzare come massa battente delle sfere in acciaio di piccolo diametro e nello studio qui presentato è stata utilizzata la sfera con diametro pari a 5 mm. La battuta con questo strumento viene effettuata grazie l'ausilio di un'asticella in acciaio saldata alla sfera. Con l'utilizzo di questa tecnica non è possibile registrare con la strumentazione l'intensità della battuta, ma è possibile solamente valutare l'intensità del segnale nella stazione di arrivo. Non essendo strumentata, la massa battente non viene collegata all'unità centrale che non fornirà quindi informazioni su questo strumento.

### **5.2.2 Il ricevitore di spostamenti**

Anche se la letteratura consiglia di utilizzare un trasduttore di spostamenti per questo tipo di analisi (Sansalone e Streett, 1997) in quanto il metodo è stato sviluppato proprio con questo strumento, nel caso di studio in esame è stato utilizzato lo stesso accelerometro usato nelle prove soniche.

### **5.2.3 Centralina di amplificazione e condizionamento del segnale**

La sola differenza rispetto alla prova sonica riguarda i collegamenti con la strumentazione: come già anticipato, il solo collegamento da effettuare e controllare è quello dell'accelerometro. Vista la piccola forza impressa con la sfera in acciaio e conseguentemente alle deboli perturbazioni create, l'amplificazione del segnale ricevuto dall'accelerometro è stato selezionato pari a 100 x (una unità di grandezza maggiore rispetto quella utilizzata per la prova sonica).

### **5.2.4 Il software**

Nella prova impact-echo, risulta di fondamentale importanza la conoscenza delle frequenze generate dal colpo. Il software utilizzato è il ElaCamPXIrev3 per la piattaforma LabView della National Instruments ed è in grado di graficare sia la forma d'onda del segnale ricevuto, sia il suo spettro. Per lo studio della profondità delle fessure non risulta in ogni caso rilevante il contenuto in frequenze se non per poter valutare la risoluzione del segnale.

### **5.2.5 Frequenza generata tramite la strumentazione: confronto tra prova sonica ed IE**

Utilizzando una massa così piccola è stato ridotto il tempo di contatto, parametro che influenza notevolmente il contenuto in frequenza del segnale; analizzando a titolo esemplificativo il file SRossal registrato per questa prova nella sala Rossa, si può notare come già la sola frequenza di

picco (6689 Hz) risulti superiore a quelle registrate tramite le prove soniche (circa 4000 Hz) mentre il contenuto totale delle frequenze è nettamente superiore (16800 Hz) (Figura 5.2).

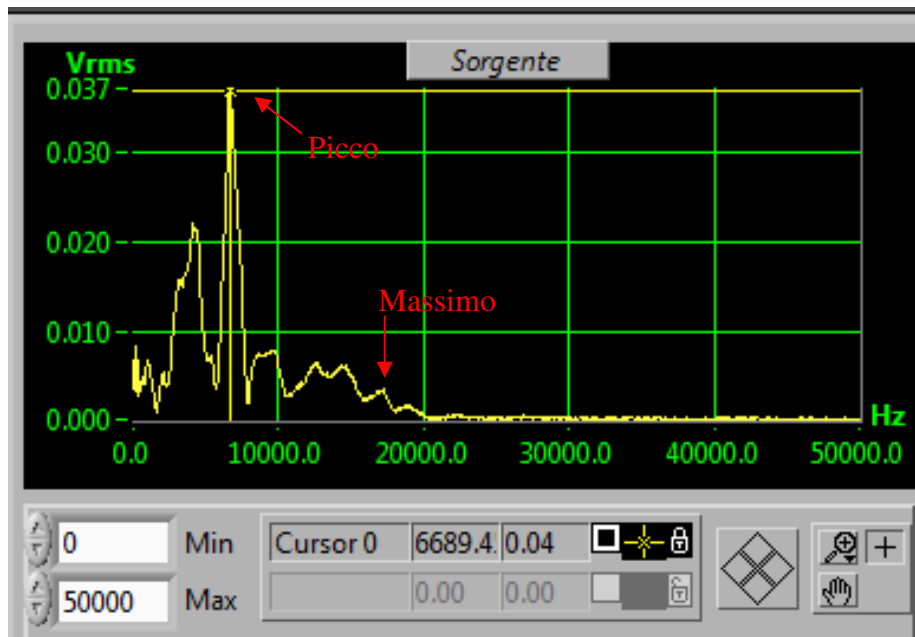


Figura 5.2 File SRossal, contenuto in frequenze del segnale: picco a 6689 Hz, massimo a 16800 Hz.

Con questo valore delle frequenze si ricavano i valori della lunghezza d'onda e della risoluzione una volta nota la velocità del segnale (ricavata questa dalle prove soniche effettuate in precedenza).

### 5.3 Posizioni di prova e preparazione del test

Le prove eseguite con la strumentazione impact-echo sono state effettuate su una singola fessura della sala Rossa; dopo una nuova analisi visiva delle fessure presenti è stata selezionata quella già analizzata con la prova sonica e corrispondente all'Area D. Come per le prove soniche, anche in questo caso è stato necessario procedere ad una suddivisione in parti della fessura lungo il suo sviluppo longitudinale in modo tale da ottenere una descrizione dell'andamento della profondità leggibile lungo la crepa stessa. Per visualizzare i punti sulla pavimentazione è stato utilizzato ancora una volta del gesso e della carta adesiva su cui scrivere il numero associato alla stazione; per eseguire la prova con questa tecnica sono state individuate sei coppie di punti (dalla 1-1' alla 6-6') posizionate ad un interasse di 10 cm l'una dall'altra mentre la distanza tra i singoli punti e la fessura è stata selezionata pari a 5 cm (a cui corrisponde una spaziatura punto-punto pari al doppio, cioè 10 cm) (Figura 5.3).

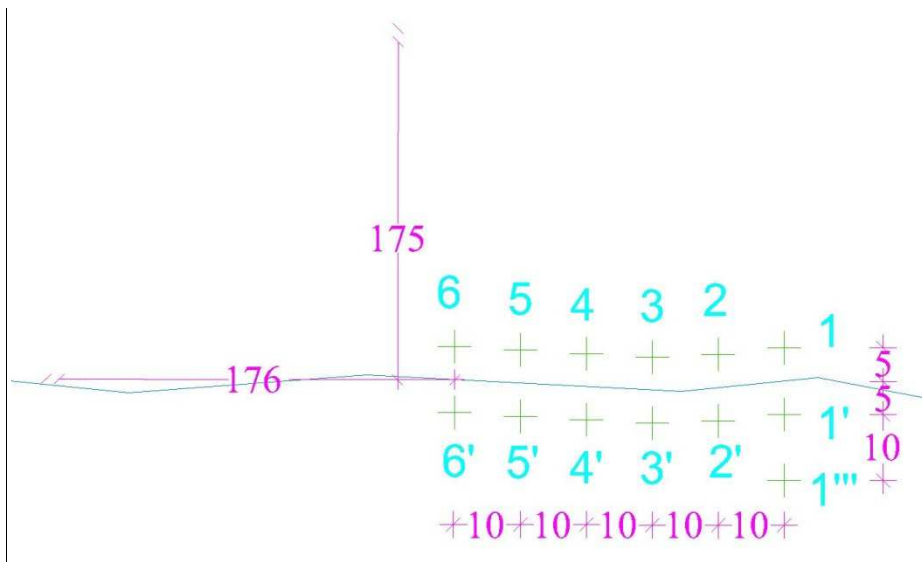


Figura 5.3 Descrizione della geometria della prova. Le due distanze maggiori sono riferite allo spigolo della porta d'ingresso della sala Rossa.

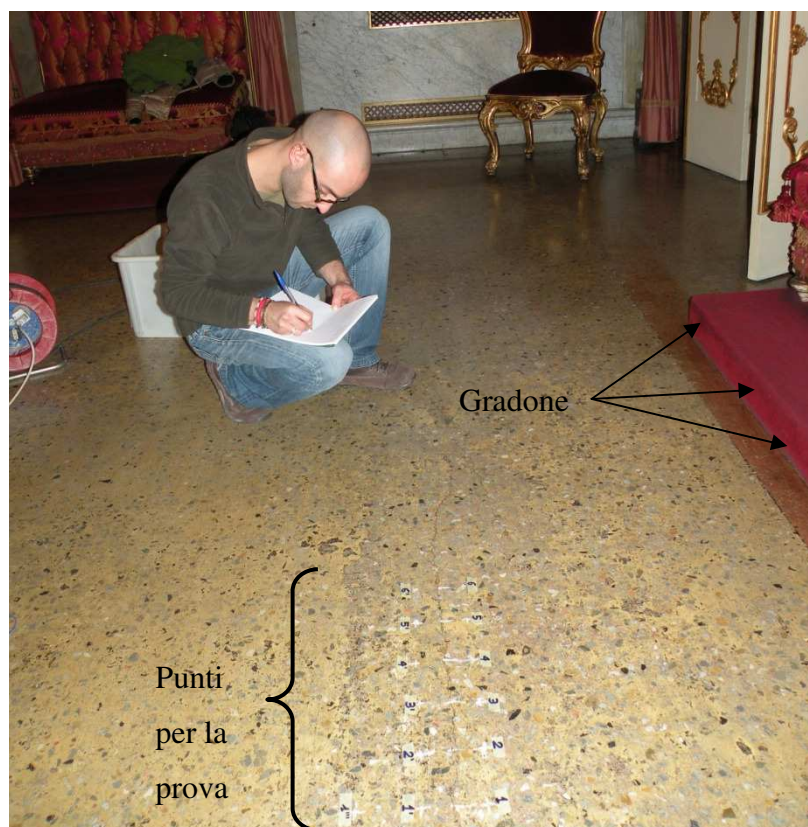


Figura 5.4 Istante di preparazione della prova impact-echo. Si nota il gradone rosso utilizzato come riferimento per il posizionamento delle postazioni di prova (visibili nella parte bassa).

In aggiunta a queste postazioni è stata inserito un ulteriore punto denominato 1''' per calcolare il parametro  $\Delta t$ , necessario per il calcolo della profondità della fessura: non conoscendo il tempo di volo del segnale ( $\Delta t$ ).

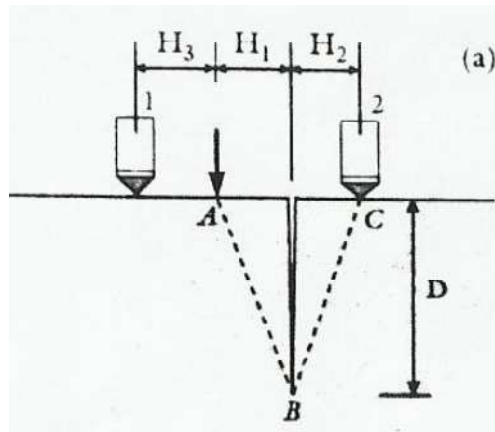


Figura 5.5 Schema della prova (Sansalone e Streett, 1997)

Infatti, il metodo richiederebbe l'utilizzo di due stazioni di ricezione per ogni punto di battuta, ma potendo disporre di un solo accelerometro non è stato possibile procedere come descritto nella letteratura: per eliminare il problema dovuto alla non conoscenza dell'istante d'inizio di propagazione del segnale ( $t_0$ ) è necessario conoscere il tempo di arrivo di questo anche in una seconda postazione (1'') in modo tale da poter eliminare tale indeterminazione secondo le seguenti formule:

$$t_1 - t_0 = \frac{H_3}{C_p} \quad ; \quad t_2 - t_0 = \Delta t$$

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{H_3}{C_p}$$

dove, con riferimento alla Figura 5.5,  $t_0$  è l'istante imprecisato di partenza del segnale,  $t_1$  e  $t_2$  i tempi di arrivo del segnale alle postazioni 1 e 2 (nel caso reale di studio corrispondenti ai punti 1 e 1''),  $C_p$  la velocità delle onde elastiche del mezzo in esame espressa in metri al secondo e  $H_3$  è la distanza punto di battuta-punto della seconda stazione ricevente. In questo modo è possibile esplicitare il tempo impiegato dall'onda per compiere la distanza punto di battuta-punto di ricezione (percorso A-B-C) e utilizzare i risultati ottenuti per calcolare la profondità delle fessure tramite la formula

$$D = \sqrt{\frac{(C_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2}$$

Con il termine  $H$  si considera la distanza tra fessura e punto di battuta o di ricezione in quanto è consentita una semplificazione nei calcoli avendo preso queste lunghezze uguali tra loro.

Prima di iniziare la fase di acquisizione dei dati è stato necessario riportare su un quaderno di appunti la geometria della fessura e delle postazioni su di essa individuate, la sua posizione



all'interno della stanza, la strumentazione utilizzata (ed amplificazione associata) e percorso di salvataggio dei file all'interno dell'unità di controllo; inoltre è stata disegnata una tabella contenente le principali informazioni della prova quali posizione della massa battente, posizione dell'accelerometro, lunghezza del percorso, eventuali note ed il nome del file salvato associato al percorso.

## 5.4 Procedure di acquisizione

In questa fase dello studio non è stato necessario effettuare alcuna calibrazione della strumentazione (ampiezza del segnale generato dall'impatto o ampiezza del segnale ricevuto dall'accelerometro) ed è stato quindi possibile procedere immediatamente con l'acquisizione dei dati.

A differenza della prova sonora, l'acquisizione dei dati consiste nel registrare la sola forma d'onda propagata nel materiale e rilevata tramite l'accelerometro alla stazione ricevente.

Questa operazione, per quanto semplice nella sua esecuzione, ha comportato alcune difficoltà causate dall'esiguo numero di operatori disponibili (due: il primo addetto all'uso dell'accelerometro e della massa battente ed il secondo addetto all'unità centrale) e per la scarsa energia generata dall'impatto sfera in acciaio-pavimento. Infatti, a causa della piccola massa, per poter generare un segnale abbastanza forte da essere registrato con l'accelerometro, è stato necessario imprimere una discreta forza al colpo sferrato; questa condizione ha provocato in alcuni casi anche piccoli spostamenti dell'accelerometro, compromettendo così la ricezione del segnale.

NOME FILE	$T_x$	$R_x$	LUNGHEZZA PERCORSO	NOTE
SROSSA 0	1	1'		
1	2	2'		
2	3	3'		
3	4	4'		
4	5	5'		
5	6	6'		
6	1'	1		
7	2'	2		
8	3'	3		
9	4'	4		
10	5'	5		
11	6'	6		

Figura 5.6 Parte di pagina di appunti della prova impact-echo.



Infatti, data l'elevata sensibilità dello strumento e della notevole amplificazione utilizzata in questa prova, anche il più piccolo spostamento ha provocato la comparsa di un segnale di disturbo che si sovrapponeva a quello in ricezione.

Iniziando dalla coppia di punti 1-1' e posizionando l'accelerometro in 1' sono stati eseguiti una serie di battute su 1 fino ad ottenere un segnale adatto all'analisi; questa procedura è stata ripetuta per tutte le coppie di punti selezionate invertendo anche la postazione di trasmissione Tx con quella di ricezione Rx (Figura 5.6).

Come nella prova sonora, anche in questo è stato necessario compilare una tabella che associasse il nome del file al percorso effettuato; in tal modo è stato possibile risalire in fase di analisi al percorso effettuato tramite il nome del file.

## 5.5 Elaborazione e visualizzazione dei file

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software ElaCamPXIrev3 che consente di visualizzare i file raccolti durante le prove in situ.



Figura 5.7 Schermata del software utilizzato nell'analisi impact-echo: visualizzazione delle forme d'onda (in alto), dello spettro (al centro) e dello zoom sul punto di arrivo del segnale (in basso).

In questa fase dello studio non è stata operata una vera elaborazione dei dati: al segnale originale non è stato applicato alcun filtro passa-alto o passa-basso per eliminare le frequenze di disturbo in quanto il solo dato utile ricavabile per questa prova è il tempo  $t_i$  di arrivo del segnale all'accelerometro che si ricava spostando il cursore nel punto indicato in Figura 5.7.

Dopo aver caricato il file dalla finestra di dialogo del software è necessario cliccare sul tasto Zoom T per poter procedere con le modifiche del segnale necessarie per la valutazione dei tempi; in questa finestra è possibile zoommare sulla porzione di segnale utile ai fini dello studio. Modificando i valori della scala dei tempi (ascisse) in cui è graficato il segnale è possibile ingrandirne la porzione dove l'onda presenta il suo distacco dall'orizzontalità (istante di arrivo del segnale); per valutare con esattezza tale istante è necessario zoommare notevolmente la zona selezionata in quanto la presenza del rumore di fondo presente in ogni segnale potrebbe falsare alcune letture. Come per la prova sonora è necessario stabilire una regola generale che indichi l'istante di arrivo del segnale: in questo caso è stato selezionato il primo valore al di fuori del range del rumore di fondo (Figura 5.8). Facendo scorrere il cursore lungo la curva fino al punto stabilito è possibile leggere nell'apposita finestra (Cursor della Figura 5.8) il valore del tempo associato a tale posizione e corrispondente al valore  $t_i$  ricercato; ripetendo questa operazione per tutti i file si sono ricavati i tempi cercati (Tabella 5.1).

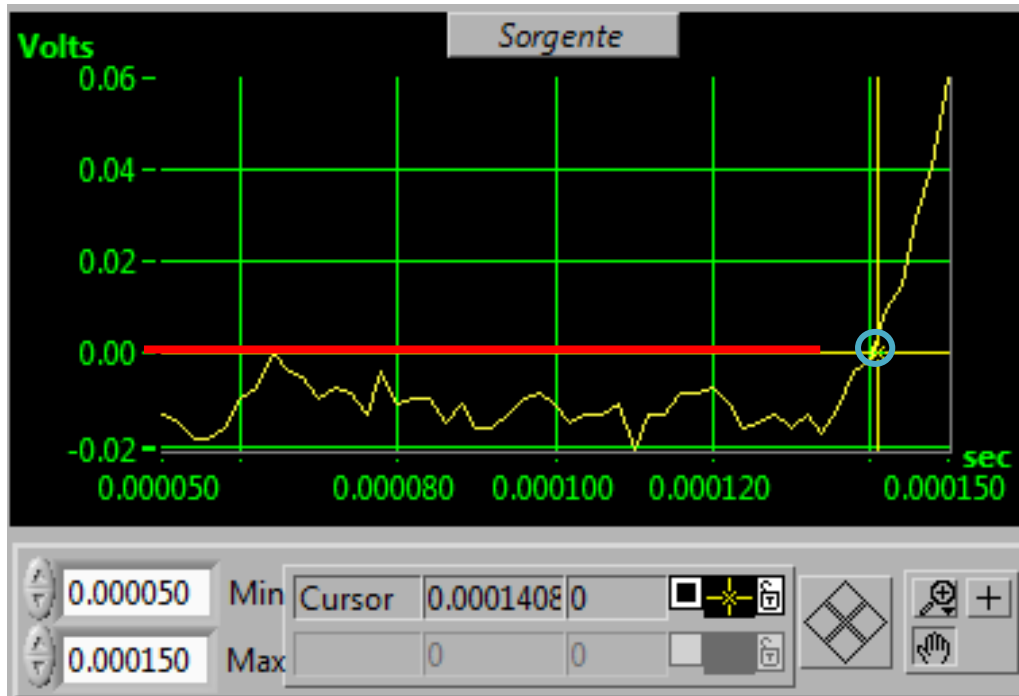


Figura 5.8 Ingrandimento della finestra "Sorgente" della Figura 5.7: visualizzazione dell'istante di arrivo del segnale (cursore all'interno del cerchi azzurro) e della zona di rumore di fondo (al di sotto della linea rossa).

Tabella 5.1 Tabella dei tempi di arrivo dei segnali ( $t_2$ ) e delle frequenze del segnale

Nome file	Tx	Rx	$t_2$ (sec)	Freq. Picco $f_p$ (Hz)	Lunghezza d'onda alla $f_p$ (m)	Freq. Max $f_m$ (Hz)	Lunghezza d'onda alla $f_m$ (m)
Srossa0	1	1'	0.000138	7193	0,150	14794	0,073
Srossa1	2	2'	0.000102	6690	0,166	17089	0,065
Srossa2	3	3'	0.000094	5175	0,233	22314	0,054
Srossa3	4	4'	0.000090	4345	0,322	17285	0,081
Srossa4	5	5'	0.000116	4492	0,410	11865	0,155
Srossa5	6	6'	0.000108	6685	0,172	17578	0,065
Srossa6	1'	1	0.000124	10253	0,100	24267	0,042
Srossa7	2'	2	0.000064	5712	0,195	14990	0,074
Srossa8	3'	3	0.000124	5712	0,231	17578	0,075
Srossa9	4'	4	0.000170	3613	0,380	9130	0,150
Srossa10	5'	5	0.000122	5078	0,353	11083	0,162
Srossa11	6'	6	0.000130	7959	0,169	14501	0,093

Eseguendo l'operazione descritta anche per il file Srossa12 associato al percorso di riferimento 1'-1''' è stato ricavato il valore del tempo  $t_1$  necessario per il calcolo del tempo di percorrenza del tragitto Tx-Rx da parte del segnale.

Tabella 5.2 Valore del tempo  $t_1$  di riferimento

Nome file	Tx	Rx	$t_1$ (sec)
Srossa12 (di rif.)	1'	1'''	0.00006

Con il software in dotazione è stato possibile anche valutare la frequenza di picco e quella massima generate dal segnale: cliccando sul tasto Zoom F si accede alla schermata che consente di visualizzare e modificare il grafico delle frequenze (Figura 5.2). Procedendo in maniera analoga all'analisi eseguita per il calcolo dei tempi, è stata selezionata la parte dello spettro con i dati d'interesse modificando il valore limite dell'asse delle ascisse e successivamente, per leggere il valore delle frequenze, è stato posizionato il cursore sull'ultimo picco rilevante e su quello massimo. I dati così rilevati sono stati utilizzati per calcolare la lunghezza d'onda e la risoluzione del segnale utilizzando le formule:

$$v = f \cdot \lambda \rightarrow \lambda = \frac{v}{f};$$

$$R = \frac{\lambda}{3};$$

come esempio viene riportato il calcolo della lunghezza d'onda e della risoluzione ricavati per il percorso 1-1' utilizzando il valore della frequenza di picco massima ( $\lambda_m$ ):

$$\lambda_m = \frac{v}{f_m} = \frac{1077}{14794} = 0,073m;$$

$$R_m = \frac{\lambda_m}{3} = \frac{0,073}{3} = 0,024m.$$

Le velocità utilizzate nei calcoli sono quelle derivanti dalle prove soniche (Tabella 5.4, seconda colonna): i punti di battuta e di ricezione del segnale utilizzati nelle due prove (soniche ed impact-echo) sono coincidenti (Figura 5.9), e questo ha permesso di ottenere per ogni percorso la sua reale velocità di propagazione. Le frequenze, invece, sono state ricavate con il software utilizzato per l'analisi dei dati impact-echo (Tabella 5.3).

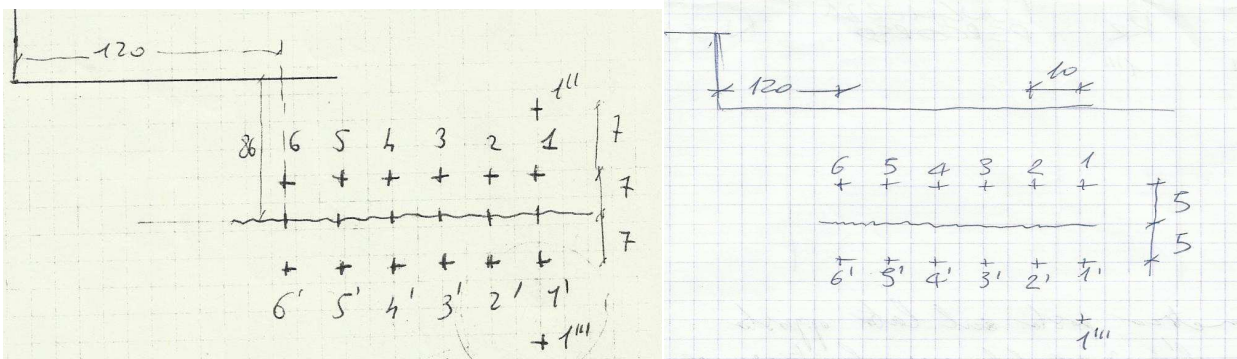


Figura 5.9 Pagine degli appunti delle due campagne di acquisizione: Area D della prova sonica (a sinistra) e impact-echo (a destra). I 120 cm sono stati misurati rispetto al gradone visibile in Figura 5.4)

Tabella 5.3 Valori medi delle frequenze, lunghezze d'onda e risoluzione del segnale

Freq. di picco media ( $f_p$ ) [Hz]	6076
L'unghezza d'onda alla $f_p$ [m]	0.190
Risoluzione alla $f_p$ [m]	0.063

Freq. Max media ( $f_m$ ) [Hz]	16040
L'unghezza d'onda alla $f_m$ [m]	0.072
Risoluzione alla $f_m$ [m]	0.024

Con l'utilizzo di questi dati è stato possibile procedere con il calcolo della profondità della fessura in esame: la prima operazione da eseguire è stata il calcolo dell'intervallo di tempo  $\Delta t$  secondo la formula già vista e qui riportata

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{H}{C_p},$$

per poi valutare la profondità della fessura con la formula

$$D = \sqrt{\frac{(C_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2}.$$

Non potendo calcolare direttamente con queste prove la velocità di propagazione del segnale, è stato necessario ricavare tale valore dai test sonici già effettuati in questa zona: ad ogni percorso, effettuato con la tecnica impact-echo, è stato possibile associare la propria velocità del segnale  $C_p$  in quanto le posizioni dei punti utilizzati per eseguire le due prove (soniche ed impact-echo) risultano coincidenti.

Così, il calcolo della profondità della fessura per il percorso 1-1' è stato valutato nel seguente modo:

$$\Delta t = (t_2 - t_1) + \frac{H}{C_p} = (0,000138 - 0,000060) + \frac{0,05}{1077} = 0,000164 \text{sec};$$

$$D = \sqrt{\frac{(C_p \cdot \Delta t)^2}{4} - H^2} = \sqrt{\frac{(1077 \cdot 0,000164)^2}{4} - 0,05^2} = 0,073 \text{m}.$$

Ripetendo questi passaggi per tutti i valori ricavati nella prova sono stati ottenuti i risultati riportati nella Tabella 5.4

*Tabella 5.4 Valori della profondità della fessura D. Le velocità sono quelle ottenute dalle prove soniche nelle stesse posizioni.*

<b>Percorso</b>	<b>Velocità <math>C_p</math> [m/s]</b>	<b>H [m]</b>	<b><math>\Delta t</math> [sec]</b>	<b>D [m]</b>	<b>D media [m]</b>
1-1'	1077	0.05	0.000164	0.073	0.066
	1029	0.05	0.000128	0.059	
2-2'	1111	0.05	0.000120	0.051	0.028
	1111	0.05	0.000116	0.005	
3-3'	1207	0.05	0.000142	0.053	0.069
	1321	0.05	0.000134	0.086	
4-4'	1400	0.05	0.000150	0.064	0.095
	1373	0.05	0.000090	0.125	
5-5'	1842	0.05	0.000150	0.121	0.122
	1795	0.05	0.000196	0.123	
6-6'	1148	0.05	0.000148	0.059	0.076
	1346	0.05	0.000156	0.093	

I dati ricavati con questa prova sono stati riportati in un grafico separando i risultati ottenuti nei due percorsi differenti, graficando cioè due andamenti ipotetici della fessura distinguendo i risultati ottenuti con i percorsi X-X' da quelli X'-X (Figura 5.10).

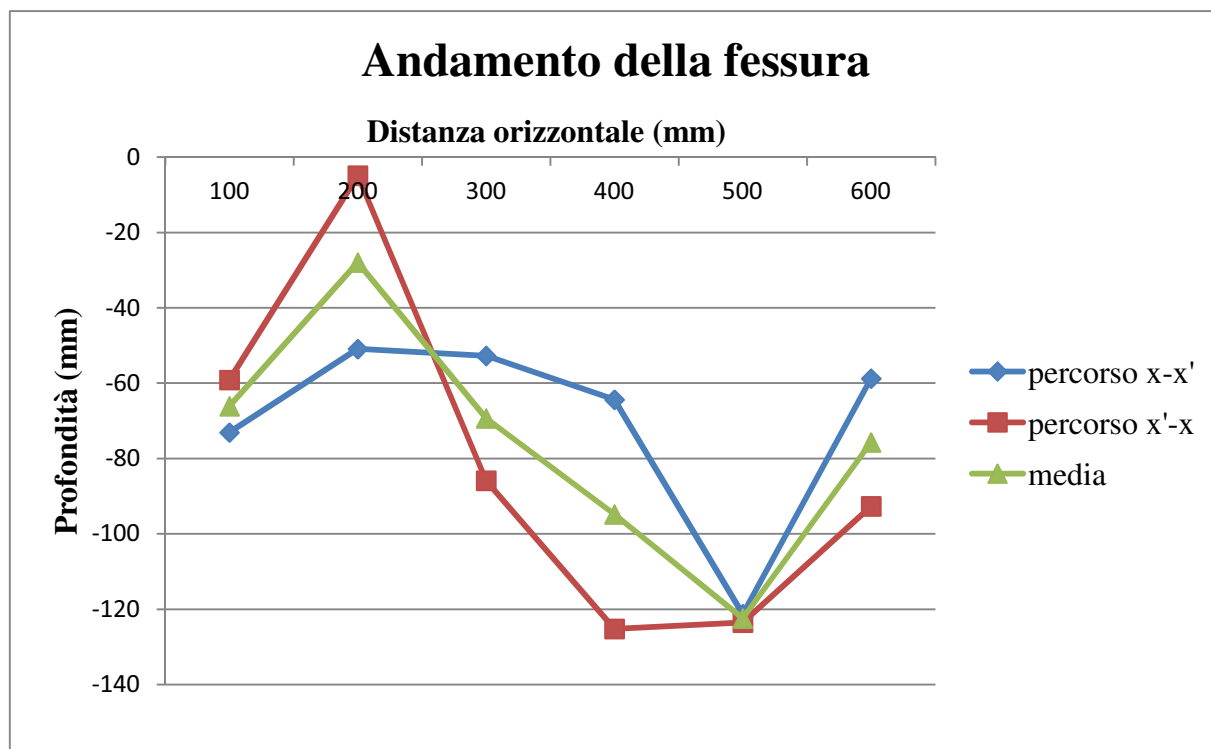


Figura 5.10 Andamento della fessura nei due percorsi differenti e valore medio ricavato.

## 5.6 Interpretazione dei dati

Nella letteratura (Sansalone e Streett, 1997), i dati ricavati con questo tipo di analisi dimostrano che la tecnica risulta efficiente e che i valori teorici ricavati con le formule rispecchiano la situazione reale in quanto ricavati in perfette condizioni di laboratorio: in cantiere, non potendo tenere sotto controllo tutte le variabili, possono verificarsi alcuni problemi che rendono non semplice la lettura dei risultati. Infatti, nel presente caso di studio, avendo operato su una pavimentazione storica, non potendo disporre di tutta la strumentazione necessaria e non potendo eseguire ulteriori verifiche e controlli dei risultati, i valori ottenuti presentano alcune oscillazioni.

Come si può notare dalla Tabella 5.4, nonostante le velocità del segnale siano molto simili nelle due direzioni di uno stesso percorso (ad es.: 1-1' e 1'-1) i valori delle profondità della fessura calcolati, invece, risultano spesso diversi ed in alcuni casi (vedi percorso 4-4') possono essere uno il doppio dell'altro.

La variazione dei risultati trova diverse spiegazioni: innanzitutto, è possibile che in alcuni punti i dati ricavati siano insufficienti. Non potendo misurare simultaneamente con due accelerometri i valori dei tempi  $t_1$  e  $t_2$ , è possibile che l'utilizzo del solo valore  $t_1$  calcolato nel tragitto 1'-1''' non sia adeguato per il calcolo della differenza di tempo  $\Delta t$  in tutti gli altri percorsi in quanto la sincronizzazione dell'unità di controllo potrebbe essere diversa da prova a prova.

Un'altra spiegazione per tale variazione potrebbe riscontrarsi indagando la forma della fessura in profondità: se la crepa ha un andamento inclinato o curvilineo, il calcolo della profondità con questo metodo può presentare variazioni a seconda di dove siano disposti gli strumenti rispetto la fessura stessa e tale variazione risulta tanto maggiore quanto più elevata è la sua inclinazione. In questi casi si potrebbero effettuare ulteriori test posizionando gli strumenti a diverse distanze dalla fessura e sfruttare l'analisi in frequenza del metodo impact-echo cercando di studiare la fessura come semplice difetto presente all'interno della soletta.

## 5.7 Osservazioni e suggerimenti

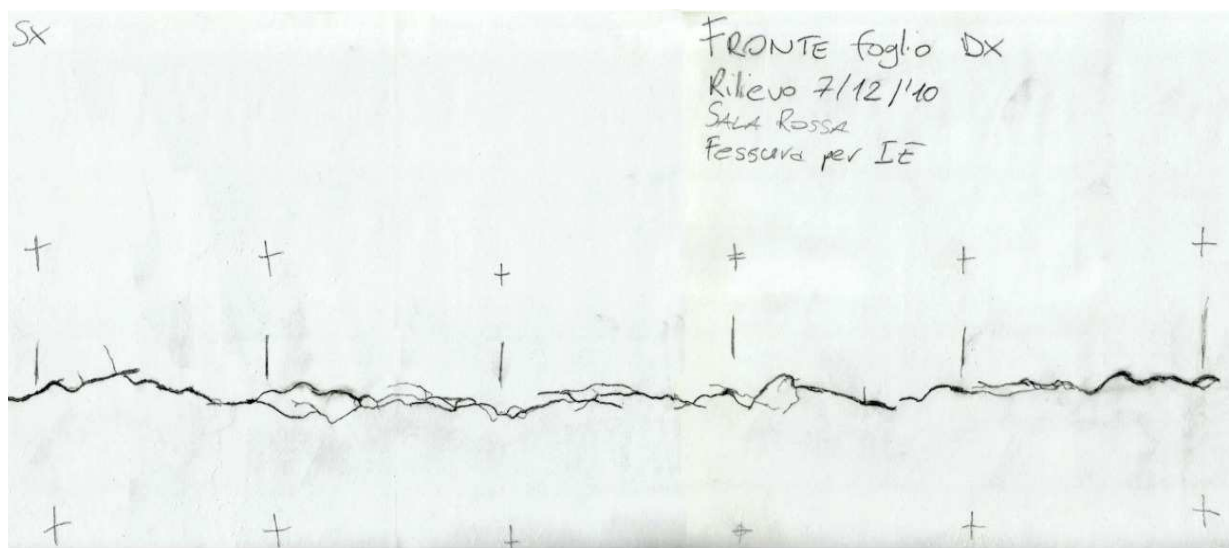


Figura 5.11 Rilievo della fessura studiata tramite la tecnica impact-echo.

È possibile che i dati ricavati in questa prova siano affetti da errore e le poche prove effettuate non consentono di ricavare elementi aggiuntivi per lo studio della fessura esaminata (Figura 5.11).

Eseguendo un numero maggiore di postazioni (poste anche su un unico lato della fessura) sarebbe possibile comprendere meglio la geometria della crepa e sarebbe possibile leggere i dati osservati con occhi più critico.

La migliore delle verifiche consisterebbe nel poter controllare la profondità della fessura tramite dei fori da eseguire nel solaio, ma, essendo questo storico, non è ovviamente possibile.



## Capitolo 6

# SALA ROSSA: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR

---

### 6.1 Scopi delle prove

Nel caso di studio in esame, la tecnica radar GPR è stata utilizzata per indagare la conformazione dei solai dell'edificio storico di Palazzo Malvezzi, sede della provincia di Bologna. Il solaio analizzato in questo capitolo è quello della Sala Rossa (Figura 6.1), sede di riunioni con la stampa. Lo studio condotto in data 24 Novembre 2010 è finalizzato ad individuare le caratteristiche strutturali di tale elemento. Non disponendo di dati derivanti da elaborati grafici redatti in fase di progettazione dell'edificio o dalle successive ristrutturazioni o da altre prove eseguite in situ, attraverso l'analisi radar si è cercato di ricostruire i principali aspetti geometrici e strutturali.



*Figura 6.1 Vista della sala Rossa verso Sud-Ovest (<http://www.provincia.bologna.it>)*

L'utilizzo del metodo, basato sulla propagazione delle onde elettromagnetiche, risulta essere di notevole adattabilità in problematiche di questo tipo in quanto una delle caratteristiche principali del metodo è quella di poter variare la profondità di penetrazione del segnale in modo tale da investigare sia gli strati superficiali con una buona risoluzione nella ricerca dei difetti, sia gli strati più profondi cambiando solo una parte della strumentazione di prova (antenne).

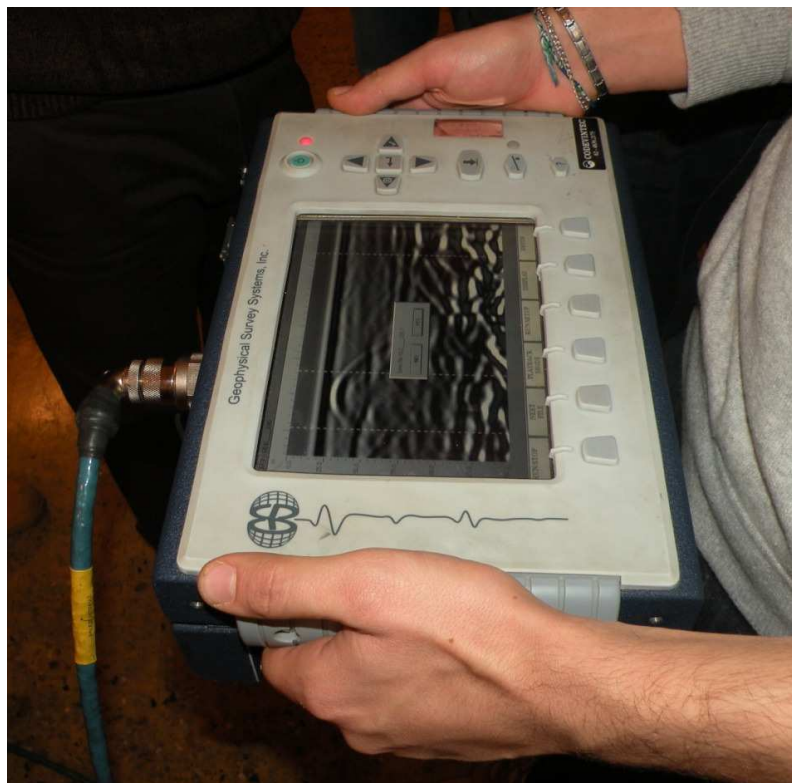


Nel caso in esame, nello studio del solaio della Sala Rossa sono state utilizzate due antenne differenti, una a maggior frequenza (900 MHz) dunque dalla non elevata capacità di penetrazione, ma con buona risoluzione per valutare le caratteristiche superficiali, l'altra (400 MHz) in grado di cogliere difetti con minore dettaglio, ma con un potere di penetrazione maggiore per valutare le caratteristiche morfologiche delle volte.

Le analisi con strumentazione radar sono state condotte anche per valutare possibili difetti o carenze strutturali degli elementi indagati. Il Palazzo Malvezzi, infatti, è soggetto a cedimenti differenziali delle fondazioni che comporta movimenti differenti per stessi elementi strutturali provocando così possibili situazioni degenerative se non monitorate e/o consolidate; volendo quindi preservare il più possibile edifici di tale valore è necessario poter comprenderne le caratteristiche tecniche e strutturali per intervenire con minore invasività e nel modo più appropriato. In questo campo la tecnica radar GPR si è dimostrata di notevole utilità.

## 6.2 Strumentazione utilizzata nelle prove

L'unità radar digitale di controllo utilizzata per l'analisi del solaio di questa sala è il SIR-3000 GSSI (Figura 6.2): tramite questo è possibile impostare tutti i parametri necessari ad elaborare il segnale elettromagnetico generato dallo strumento stesso in funzione delle antenne utilizzate (Figura 6.3).



*Figura 6.2 Unità radar digitale di controllo SIR-3000 GSSI*



**DIMENSIONI ANTENNA 400MHz**

<b>Altezza</b>	17	cm
<b>Larghezza</b>	30	cm
<b>Lunghezza</b>	30	cm



**DIMENSIONI ANTENNA 900MHz**

<b>Altezza</b>	9	cm
<b>Larghezza</b>	19	cm
<b>Lunghezza</b>	33	cm

*Figura 6.3 Antenne utilizzate nell'indagine della sala Rossa*

Nelle prove con antenna 400 MHz, non conoscendo a priori il valore della costante dielettrica degli elementi strutturali investigati, è stato scelto di settare tale parametro (Diel) pari a 9 mentre la finestra di ascolto del segnale (Range) è stata impostata a 30 ns consentendo di osservare fino ad una profondità di 15ns: considerando questi valori ed ipotizzando che questi rimangano costanti all'interno degli elementi indagati è possibile prevedere una profondità di indagine di 1,5m. Le antenne utilizzate in queste prove erano sprovviste di odometro per il controllo della distanza percorsa; per tale motivo nell'unità di controllo è stata scelta la modalità di acquisizione (Mode) Time che consente la registrazione continua del segnale nel tempo. I primi file registrati in questa sala (dal file 129 al file 145) sono stati eseguiti con antenna da 400MHz: inserendo la frequenza centrale dell'antenna in uso nell'unità digitale di controllo vengono automaticamente impostati i valori dei filtri IIR che permettono di eliminare le frequenze di disturbo: 2500MHz per il Low-Pass e 100MHz per High-Pass.

*Tabella 6.1 Riassunto dei principali parametri impostati per l'analisi del solaio della Sala Rossa con antenna da 400MHz.*

<b>PARAMETRI GPR</b>	
T Rate (KHz)	100
Mode	Time
Samples	512
Format (bits)	16
Range (ns)	30
Diel	9
Gain (dB)	-20

	34
Rate	64
Scan/unit	200
Offset (ns)	1.42
Surface (%)	0

Utilizzando l'antenna da 900MHz, invece, sono stati registrati i file dal n.°145 al n.°151 ed il valore attribuito automaticamente ai filtri è stato di 2500MHz per il Low-Pass e i 225MHz per l'High-Pass. Cambiando antenna, e quindi cambiando la frequenza e la forma d'onda del segnale, è stato necessario modificare il valore del Gain, quello del Range e lo scan/unit (Tabella 6.2)

*Tabella 6.2 Riassunto dei principali parametri impostati per l'analisi del solaio della Sala Rossa con antenna da 900MHz.*

<b>PARAMETRI GPR</b>	
T Rate (KHz)	100
Mode	Time
Samples	512
Format (bits)	16
Range (ns)	40
Diel	9
Gain (dB)	-3
	57
Rate	64
Scan/unit	100
Offset (ns)	1.42
Surface (%)	0

Avendo considerato per entrambe le antenne una costante dielettrica pari a 9 è stato possibile prima possibile stimare la velocità del segnale

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{0,3}{\sqrt{9}} = 0,1m/ns$$

poi, conoscendo la frequenza centrale degli strumenti, è stato possibile stimare la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e la risoluzione ottenibile (R) che nel caso di antenna da 400MHz sarebbe di

$$\lambda_{400} = \frac{v}{f} = \frac{0,1m/ns}{400MHz} = 0,25m \rightarrow R_{400} = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,25}{4} = 0,062m$$

mentre per l'antenna da 900MHz sarebbe pari a

$$\lambda_{900} = \frac{v}{f} = \frac{0,1m/ns}{900MHz} = 0,11m \rightarrow R_{900} = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,11}{4} = 0,027m.$$

### 6.3 Posizioni di prova, preparazione e procedure di acquisizione

Le posizioni di prova in questa sala Rossa non sono state definite a priori seguendo uno schema ben determinato, ma si è deciso di volta in volta la linea di rilievo da effettuare in base a ciò che veniva restituito nello schermo dell'unità di controllo.

Volendo studiare la conformazione della volta sottostante il solaio della sala e il profilo di quest'ultimo, si è deciso di eseguire delle linee tra loro ortogonali e parallele alle direttrici principali della stanza in modo tale che venissero rappresentate sezioni principali degli elementi strutturali.

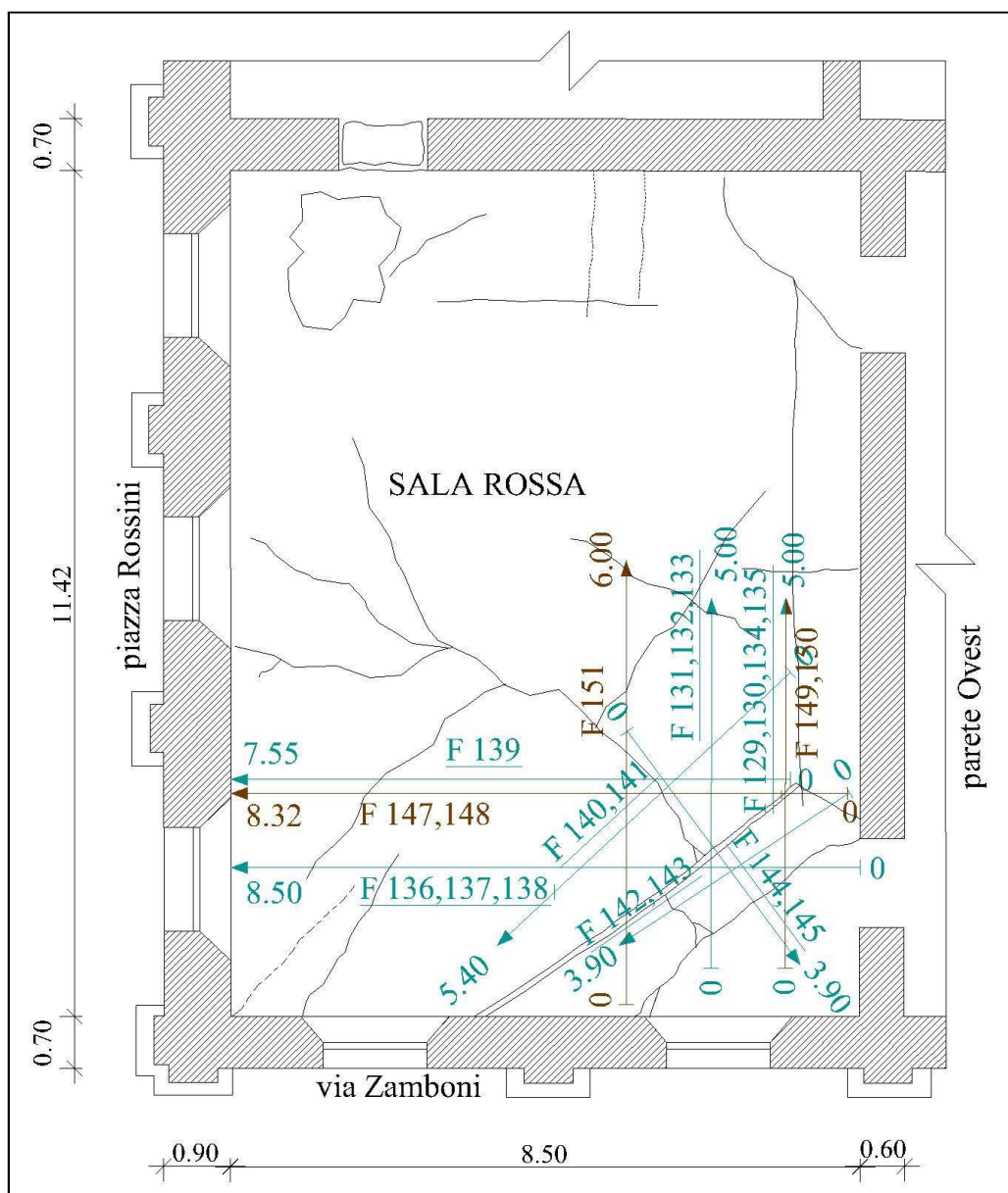


Figura 6.4 Pianta della sala Rossa del palazzo della Provincia di Bologna: le frecce blu rappresentano le linee eseguite con l'antenna da 400MHz, le frecce marroni quelle con antenna da 900MHz. Le altre linee indicano le fessure presenti (modificato da Capobianchi, 2009).

Per ottenere maggiori informazioni sull'andamento della geometria della volta, nell'angolo a nord-ovest è stata realizzata un'altra serie di linee di studio non più orientate come le precedenti, ma inclinate rispetto a queste di circa 45 gradi seppur mantenendo un andamento tra di esse circa ortogonale (Figura 6.4).

Per le linee radar eseguite in direzione Nord-Sud è stata preparata sulla pavimentazione una serie di riferimenti distanziometrici (linee disegnate con il gesso) posizionati ad un interasse di 50 cm (Figura 6.5 e Figura 6.6): inserendo i mark in corrispondenza di questi è stato possibile ottenere delle sezioni radar con una scala orizzontale delle distanze in cui le misure progressive sono indicate dai mark stessi (Figura 6.7). Questa operazione è stata utile per risalire alla posizione planimetrica delle riflessioni individuate nei radargrammi.

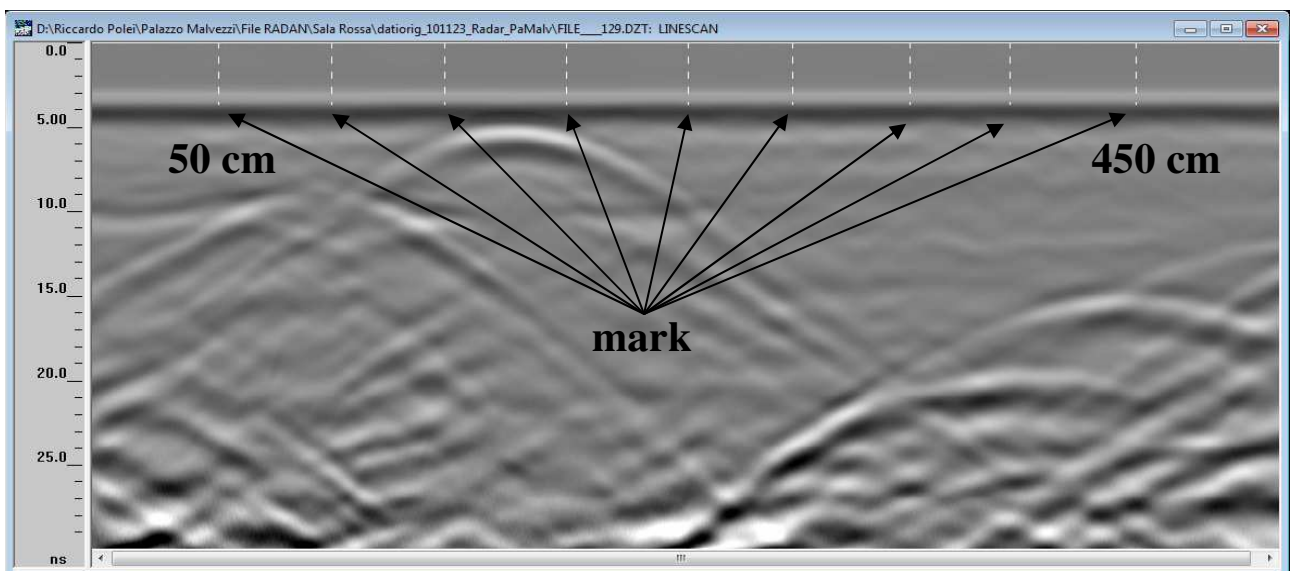


*Figura 6.5 Fase di preparazione dei riferimenti distanziometrici realizzati per le linee Nord-Sud (file 129-136 con antenna da 400MHz e file 149-151 con antenna 900MHz).*





*Figura 6.6 Fase di acquisizione della linea radar n. 149 eseguite in direzione Nord-Sud con antenna da 900 MHz: si notano i riferimenti distanziometrici disegnati con il gesso sulla pavimentazione della sala*

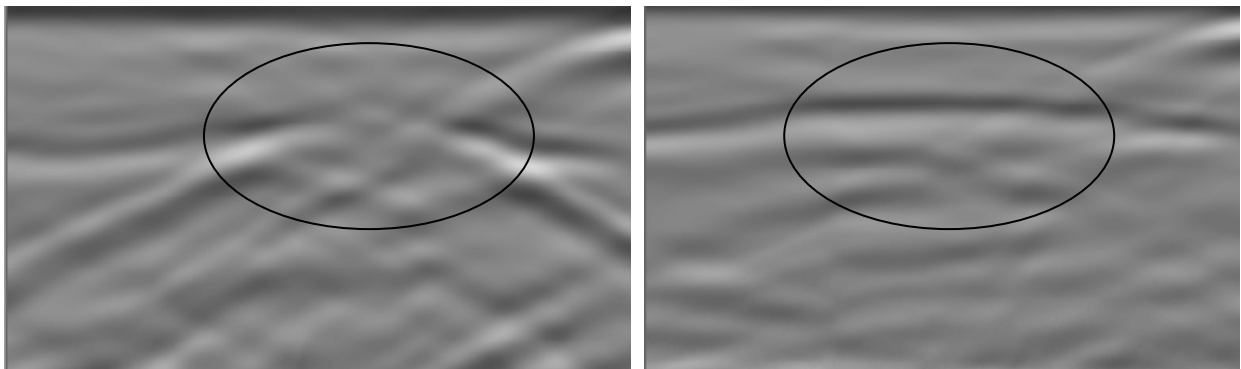


*Figura 6.7 File 129 acquisito con antenna da 400MHz: è possibile osservare la presenza dei mark inseriti ogni 50 cm*

In tutti gli altri file registrati in questa sala, l'uso dei mark è servito solamente per posizionare i difetti superficiali visibili (ad esempio crepe). Tutte le linee eseguite sono state ripetute almeno due volte facendo variare la polarizzazione delle antenne (Figura 6.8) per poter raccogliere il maggior numero di informazioni possibile; infatti, l'orientamento dei dipoli delle antenne influenza notevolmente la capacità di rilevare i difetti presenti all'interno dell'elemento sottoposto ad indagine (Figura 6.9).



*Figura 6.8* Differenti orientazioni dell'antenna da 900 MHz: polarizzazione verticale a sinistra ed orizzontale a destra.



*Figura 6.9* Particolare dei radargrammi 129 (a sinistra) e 130 (a destra) eseguiti sulla stessa linea, ma con differente polarizzazione: verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra). Si nota come lo stesso difetto venga rappresentato in modo diverso.

Di seguito verranno riportate le singole linee eseguite nella sala Rossa indicando per ogni linea di rilievo effettuata il nome del file e le sue principali caratteristiche; le prime ad essere descritte saranno quelle eseguite secondo le direzioni principali della sala (Ovest-Est e Sud-Nord) con l'antenna da 400MHz (), poi quelle registrate nell'angolo Nord-Ovest della sala con la stessa

antenna ed infine le linee condotte con antenna da 900MHz il cui impiego è stato più modesto (n.° di linee inferiore alla metà di quelle realizzate con antenna da 400 MHz)

- antenna **400MHz**: File 129 – 139

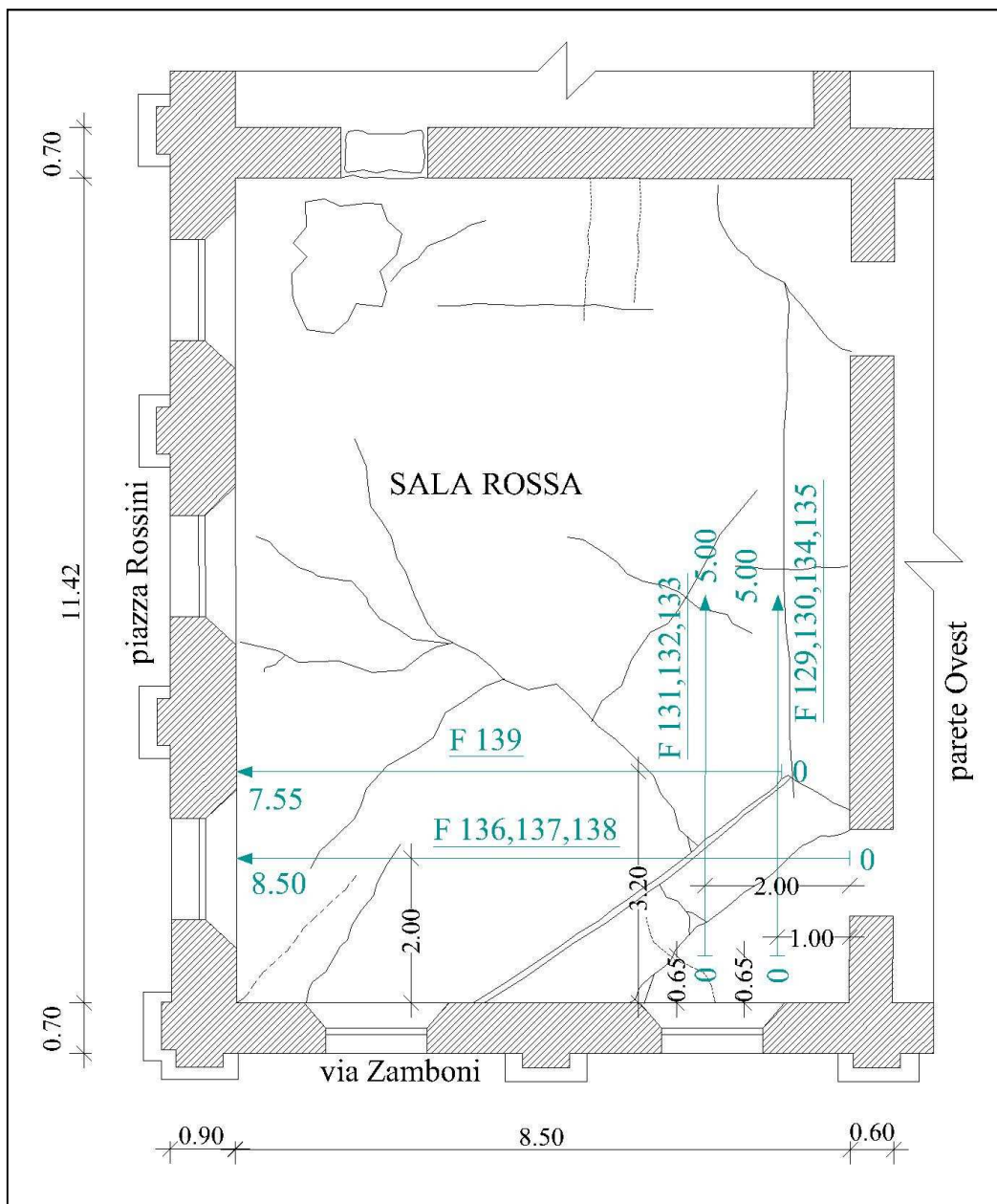


Figura 6.10 Linee radar eseguite con antenna da 400MHz lungo le direzioni principali della sala Rossa. La lunghezza percorsa dal centro antenna è indicata accanto alla punta della freccia.

Tabella 6.3 Principali caratteristiche delle sezioni radar 129-139 con antenna da 400 MHz

File	Polarizzazione	Note
129	Verticale	Mark ogni 50 cm
130	Orizzontale	Mark ogni 50 cm



131	Verticale	Mark ogni 50 cm
132	Orizzontale	Mark ogni 50 cm + mark doppi sulle crepe
133	Orizzontale	Mark solo su crepe
134	Verticale	Mark solo su crepe
135	Orizzontale	Mark solo su crepe
136	Orizzontale	Mark solo su crepe
137	Orizzontale	Mark solo su crepe. Modifica del “range” e del “gain”
138	Orizzontale	Mark solo su crepe. Modifica del “range” e del “gain”
139	Non indicata	Senza mark



*Figura 6.11 Fase di acquisizione della linea radar n.°130 eseguita con antenna da 400 MHz e polarizzazione orizzontale. L’inserimento dei mark viene effettuato dall’operatore che utilizza l’unità digitale di controllo.*

Tabella 6.4 Riassunto dei principali parametri impostati per l'analisi del solaio della Sala Rossa per il file 137, 138 e 139

PARAMETRI	F137	F138-139
T Rate (KHz)	100	100
Mode	Time	Time
Samples	512	512
Format (bits)	16	16
Range (ns)	45	60
Diel	9	9
Gain (dB)	-20	-18
	45	50
Rate	64	64
Scan/unit	200	200
Offset (ns)	1.42	1.42
Surface (%)	0	0

- antenna 400MHz: File 140 – 145



Figura 6.12 Fase di acquisizione del file n.°142 eseguita con antenna da 400 MHz e polarizzazione verticale: l'operazione di movimentazione dell'antenna ha richiesto particolare cautela in quanto la linea è sprovvista di riferimenti distanziometrici.

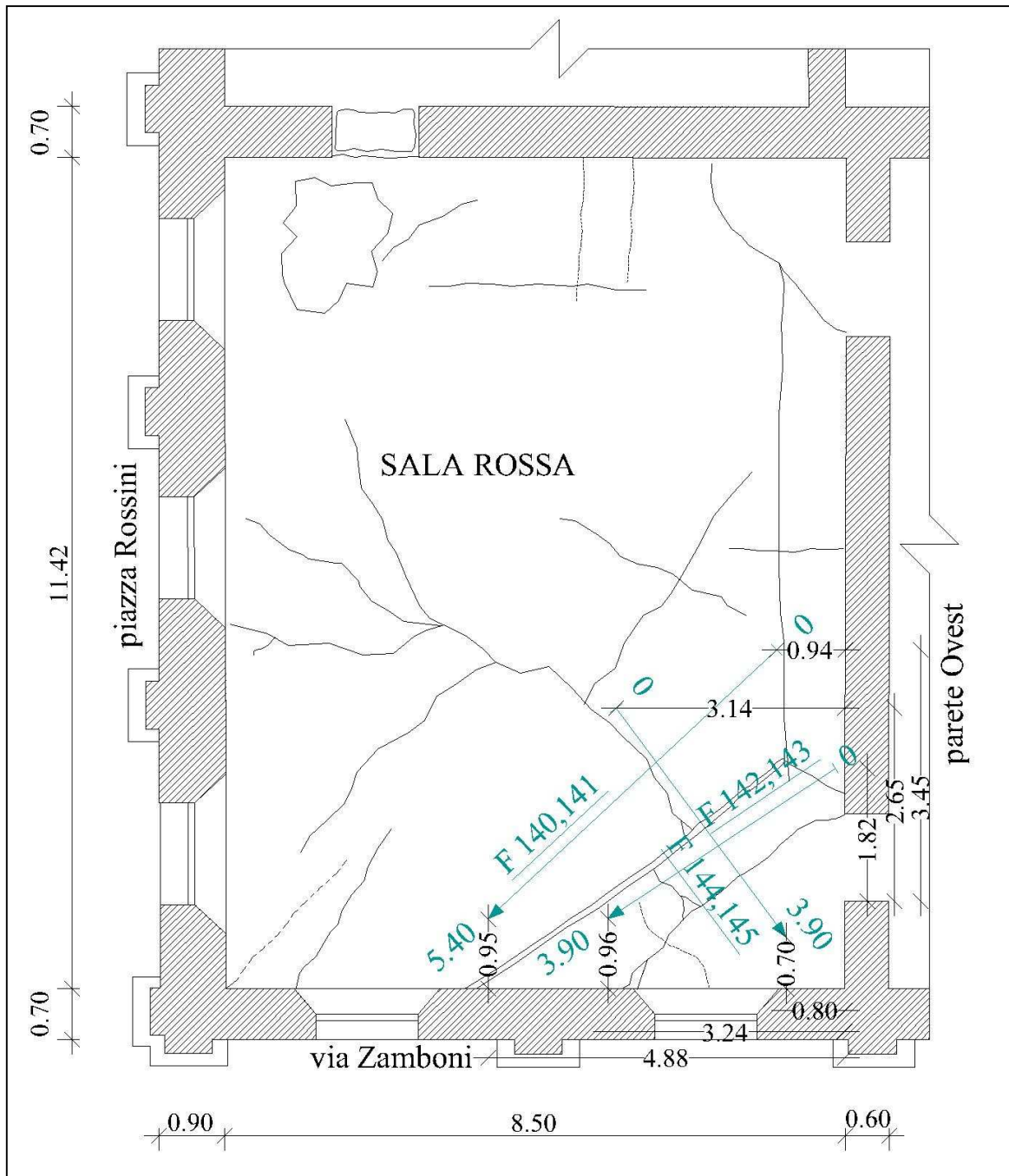


Figura 6.13 Linee radar eseguite con antenna da 400MHz nell'angolo Sud-Ovest della sala Rossa. La lunghezza percorsa dal centro antenna è indicata accanto alla punta della freccia.

Tabella 6.5 Principali caratteristiche delle sezioni radar 140-145

File	Polarizzazione	Note
140	Non indicata	Mark su crepe
141	Non indicata	Mark su crepe. Modifica del "range" e del "gain"
142	Verticale	Mark solo su crepe

143	Orizzontale	Senza mark
144	Verticale	Mark solo su crepe
145	Orizzontale	Mark solo su crepe

*Tabella 6.6 Riassunto dei principali parametri impostati per l'analisi del solaio della Sala Rossa per i file 141-145.*

<b>PARAMETRI GPR</b>	
T Rate (KHz)	100
Mode	Time
Samples	512
Format (bits)	16
Range (ns)	40
Diel	9
Gain (dB)	-20
	45
Rate	64
Scan/unit	200
Offset (ns)	1.42
Surface (%)	0

- antenna 900MHz: File 147 – 151

Le impostazioni dell'unità digitale di controllo sono quelle riportate nel paragrafo precedente in Tabella 6.2

*Tabella 6.7 Principali caratteristiche delle sezioni radar 147-151*

<b>File</b>	<b>Polarizzazione</b>	<b>Note</b>
147	Verticale	Mark solo su crepe
148	Orizzontale	Mark solo su crepe
149	Verticale	Mark ogni 50 cm + mark sulle crepe
150	orizzontale	Mark ogni 50 cm + mark sulle crepe
151	verticale	Mark ogni 50 cm + mark sulle crepe

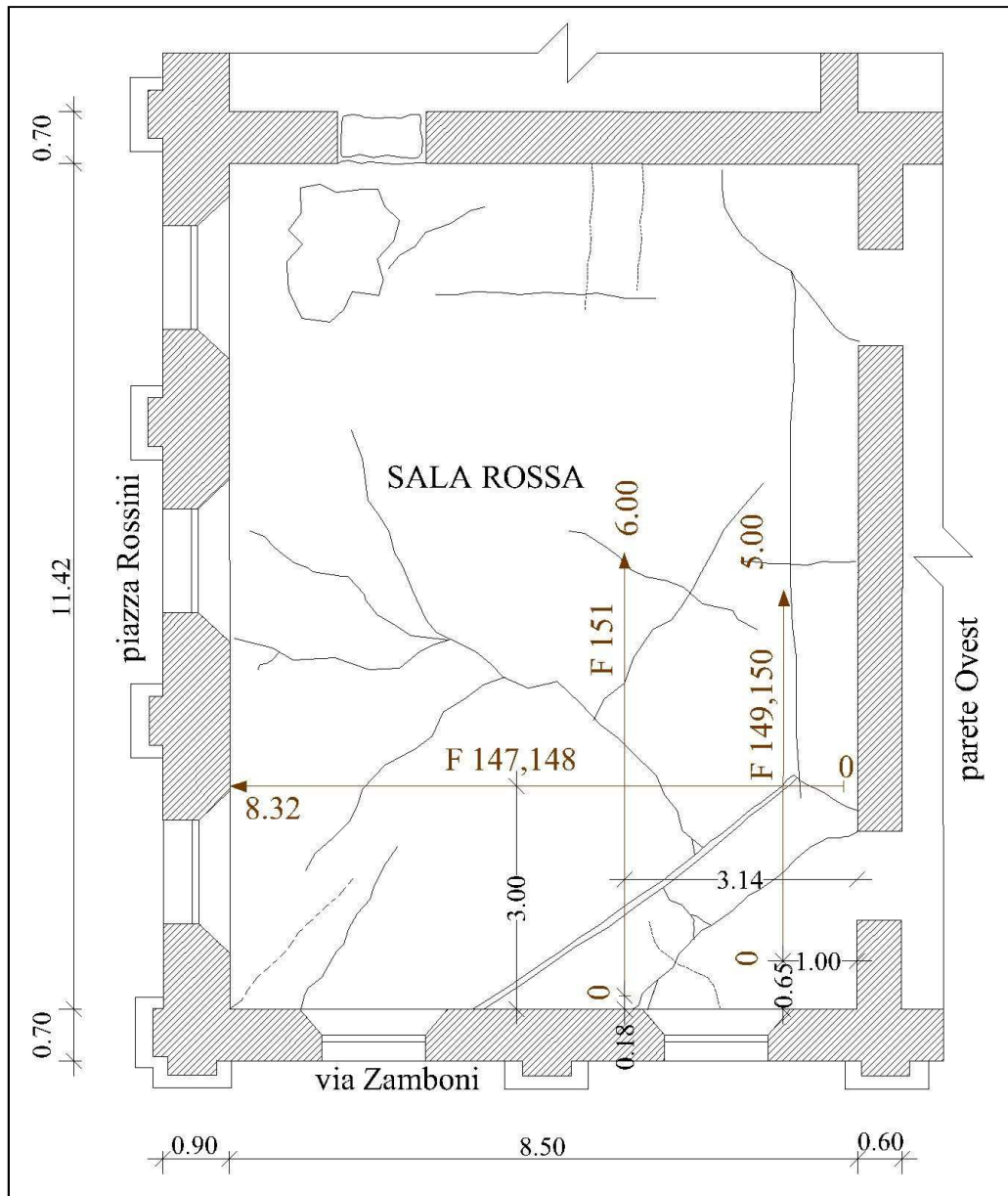


Figura 6.14 Linee radar eseguite con antenna da 900MHz nella sala Rossa. La lunghezza percorsa dal centro antenna è indicata accanto alla punta della freccia

## 6.4 Elaborazione dei dati

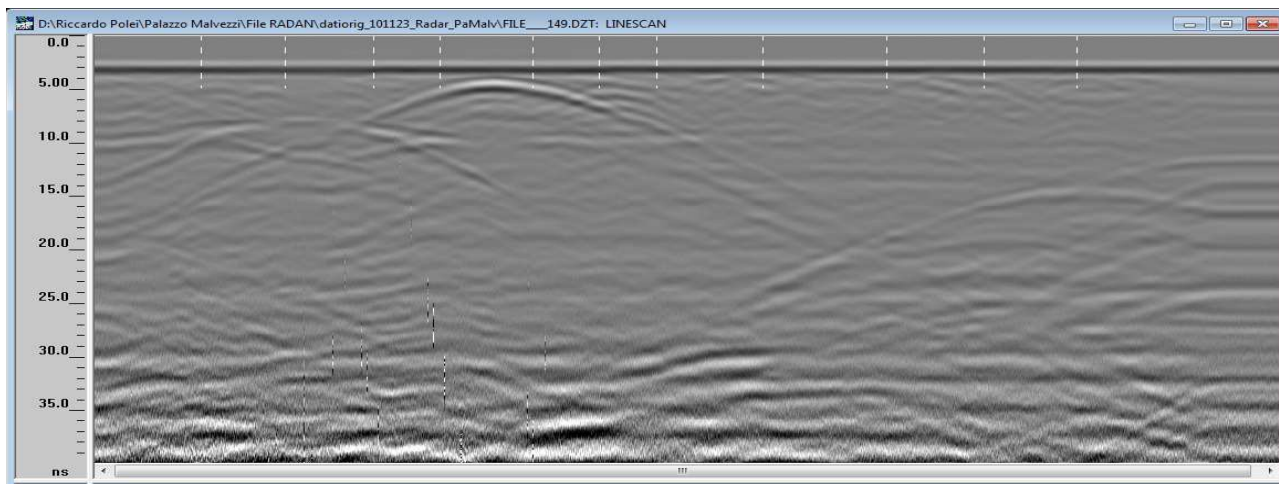
Terminata la raccolta dati è possibile procedere con l'elaborazione di questi tramite software GSSI dedicato Radan 6.6 per una loro più immediata comprensione e visualizzazione.

L'elaborazione dei dati effettuata in questo caso ha lo scopo di rendere più visibili le anomalie presenti e viene eseguita per poter individuare geometricamente e spazialmente le riflessioni registrate.

Nei paragrafi successivi verranno mostrati i singoli passaggi effettuati nella fase di elaborazione per il file numero 149 registrato con l'antenna da 900MHz (Figura 6.15).



Per tutti gli altri file è stata applicata la stessa procedura di elaborazione dei dati.



*Figura 6.15 File 149 originale acquisito con antenna da 900 MHz.*

#### **6.4.1 Surface position adjustment**

La prima operazione da eseguire in questo tipo di analisi è il Surface Position Adjustments che permette di portare la prima riflessione visibile (quella dovuta all'accoppiamento antenna-superficie da investigare) al tempo zero eliminando così la banda di radargramma in cui non sono presenti segnali: questa operazione risulta utile per individuare immediatamente la profondità delle riflessioni in quanto in questo modo sarà possibile leggere correttamente la loro posizione sulla scala verticale delle profondità.

Per eseguire tale operazione è necessario aprire la finestra di dialogo (Box) del software in cui appare in un diagramma ampiezza (asse Y)-tempo (asse X) la forma d'onda da analizzare: in questa schermata è necessario far scorrere il segnale lungo l'asse dei tempi fino a quando la prima oscillazione significativa sia in corrispondenza dell'origine degli assi del diagramma (Figura 6.16).

Questa funziona provoca uno slittamento verso l'alto di tutti gli scan, compresa la scala verticale che per l'effetto di trascinamento non inizierà più dal valore zero, ma comincerà dal valore Delta Pos (nS) indicato nella finestra di dialogo; per riposizionare l'origine della scala con l'origine degli assi è necessario modificare il valore Position nel Box Header e riportarlo a zero.

Il file, a termine di queste operazioni, risulterà traslato verso l'alto, presenterà una banda priva di segnale nella parte inferiore e la scala verticale risulterà ben posizionata (Figura 6.17).

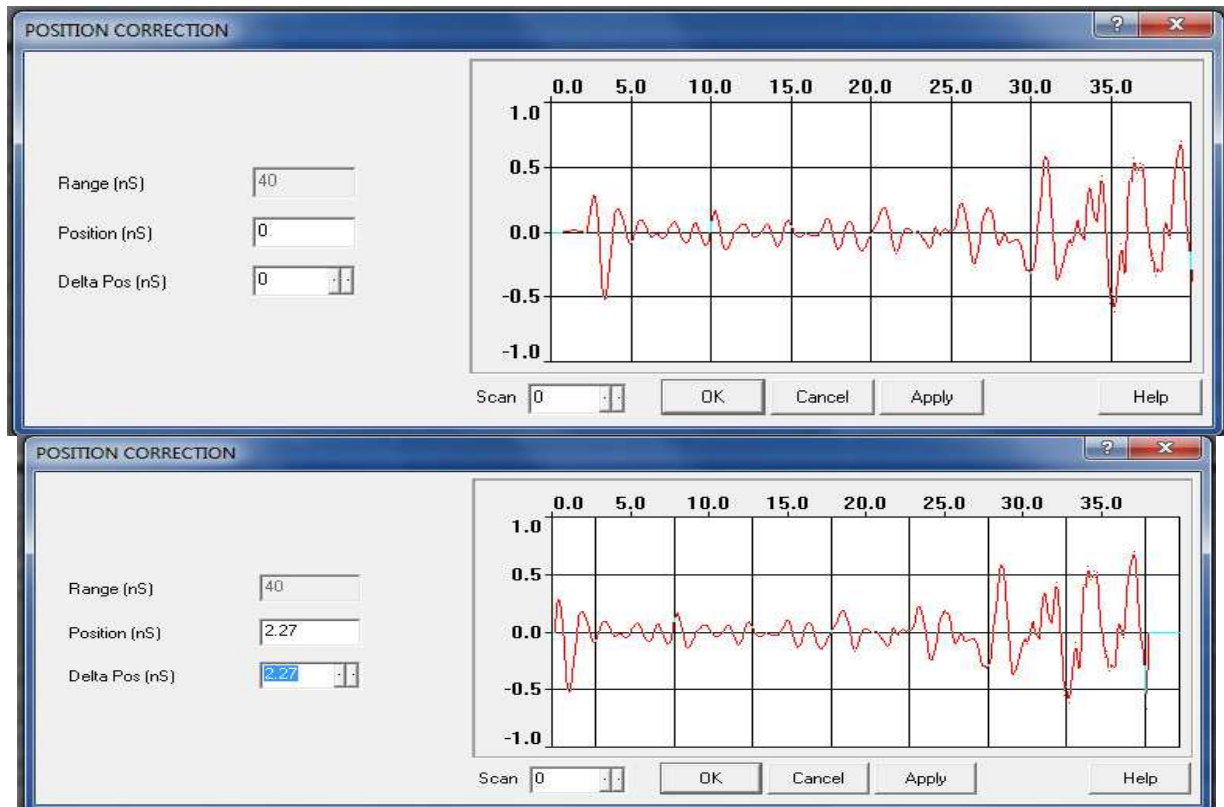


Figura 6.16 Prima fase di elaborazione dei radargrammi: correzione della posizione iniziale del segnale (Surface Position Adjustments)

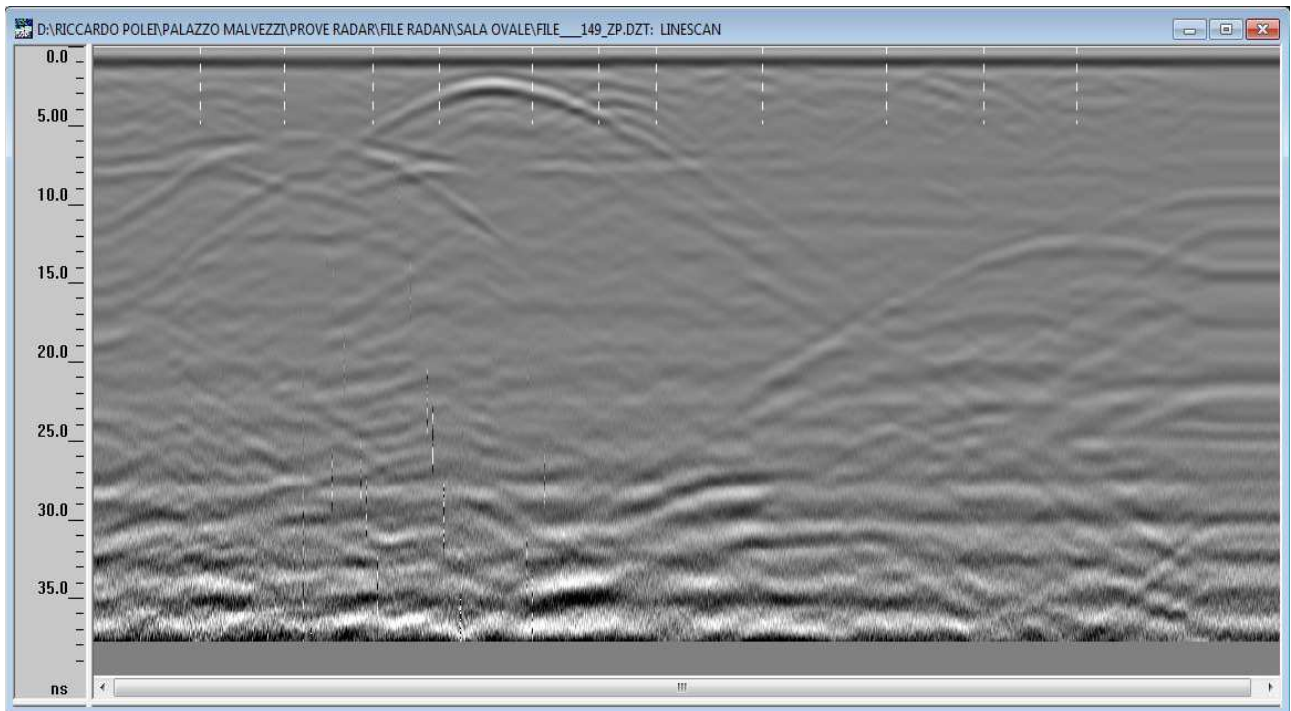


Figura 6.17 Il file 149 dopo la correzione del tempo zero.

## 6.4.2 Select Box

L'operazione successiva da compiere è quella di selezionare la parte di radargramma che deve essere studiata eliminando quelle non significative: tale operazione è eseguibile tramite la funzione Select Block. Lavorando come in questo caso con antenne prive della survey wheel è possibile che all'inizio ed alla fine di un radargramma siano presenti delle aree in cui il segnale è costituito da scan che non presentano alcuna variazione: tale fenomeno si verifica quando il sistema registra senza che l'antenna venga fatta scorrere sulla superficie da investigare analizzando così sempre la stessa posizione ed è evidente quindi che i dati in questo modo raccolti sono privi di valore e vanno dunque eliminati. La porzione di file da selezionare viene individuata tramite assegnazione di inizio e fine samples (asse verticale) ed inizio e fine scan (asse orizzontale) oppure procedendo per via grafica spostando i cursori che indicano i limiti della finestra di selezione (Figura 6.18). Tale funzione è stata applicata su tutti i file per poter rimuovere anche la loro parte terminale. Come per tutte le altre operazioni, anche questa deve essere resa operativa tramite il salvataggio del file.

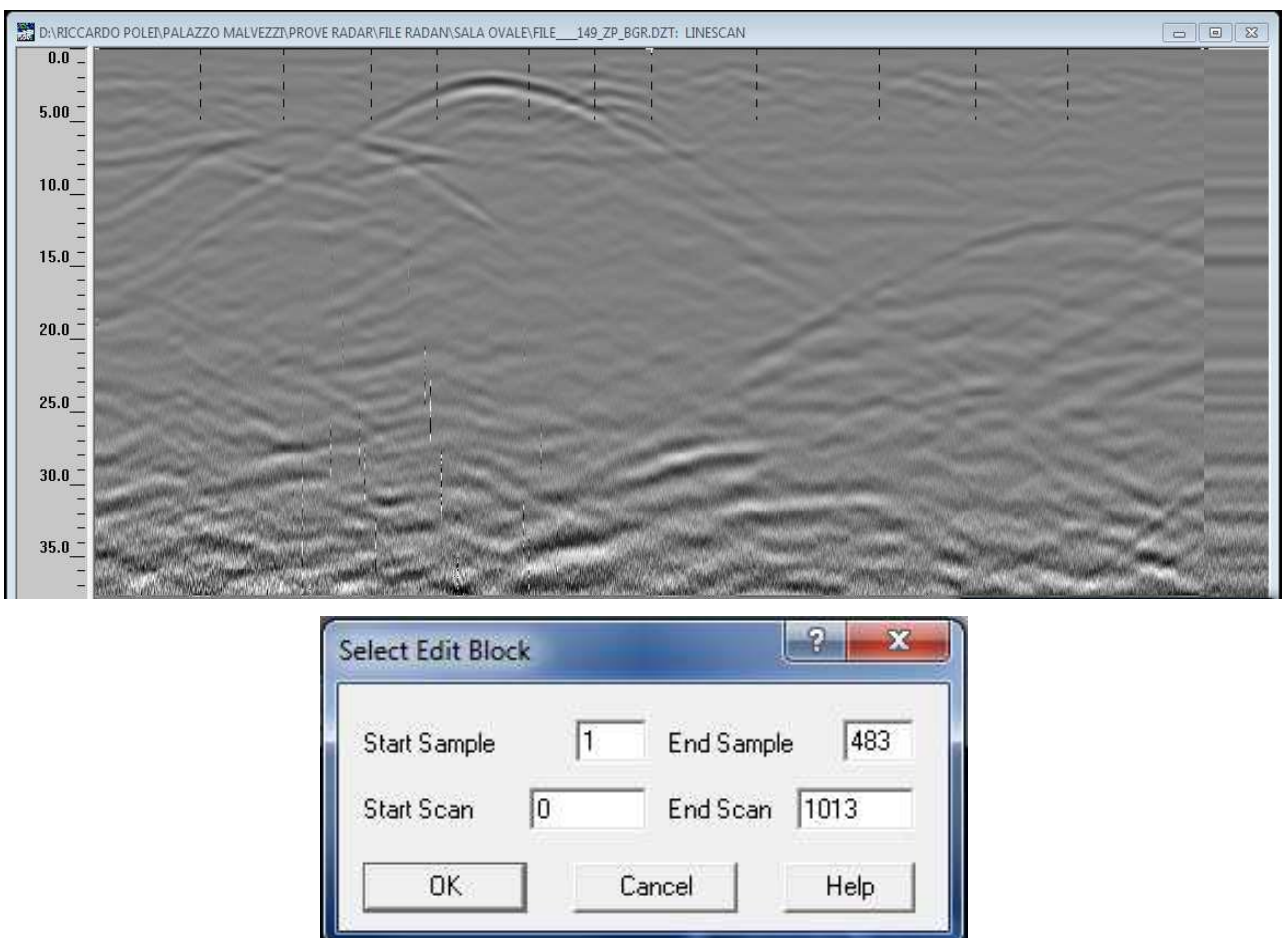


Figura 6.18 Assegnazione del blocco di selezione tramite Box (in basso) o per via grafica (in alto) dove si notano le linee limite.



### 6.4.3 FIR filter: horizontal high pass (background removal)

L'operazione di filtraggio nell'analisi dei dati radar consiste nel tagliare un certo range di frequenze del segnale registrato per togliere del radargramma i disturbi presenti.

L'applicazione dei filtri FIR, ed in particolare dell'Horizontal High Pass (Background Removal), consente di eliminare quei segnali che si presentano come riflessioni orizzontali continue, cioè costanti nel tempo come ad esempio la riflessione superficiale causata dall'accoppiamento antenna-superficie da indagare; questa riflessione, che risulta essere utile per l'analisi della velocità di propagazione del segnale all'interno del mezzo o per posizionare correttamente sull'asse verticale il radargramma (Surface Position Adjustments), può nascondere delle riflessioni minori, ma comunque d'interesse.

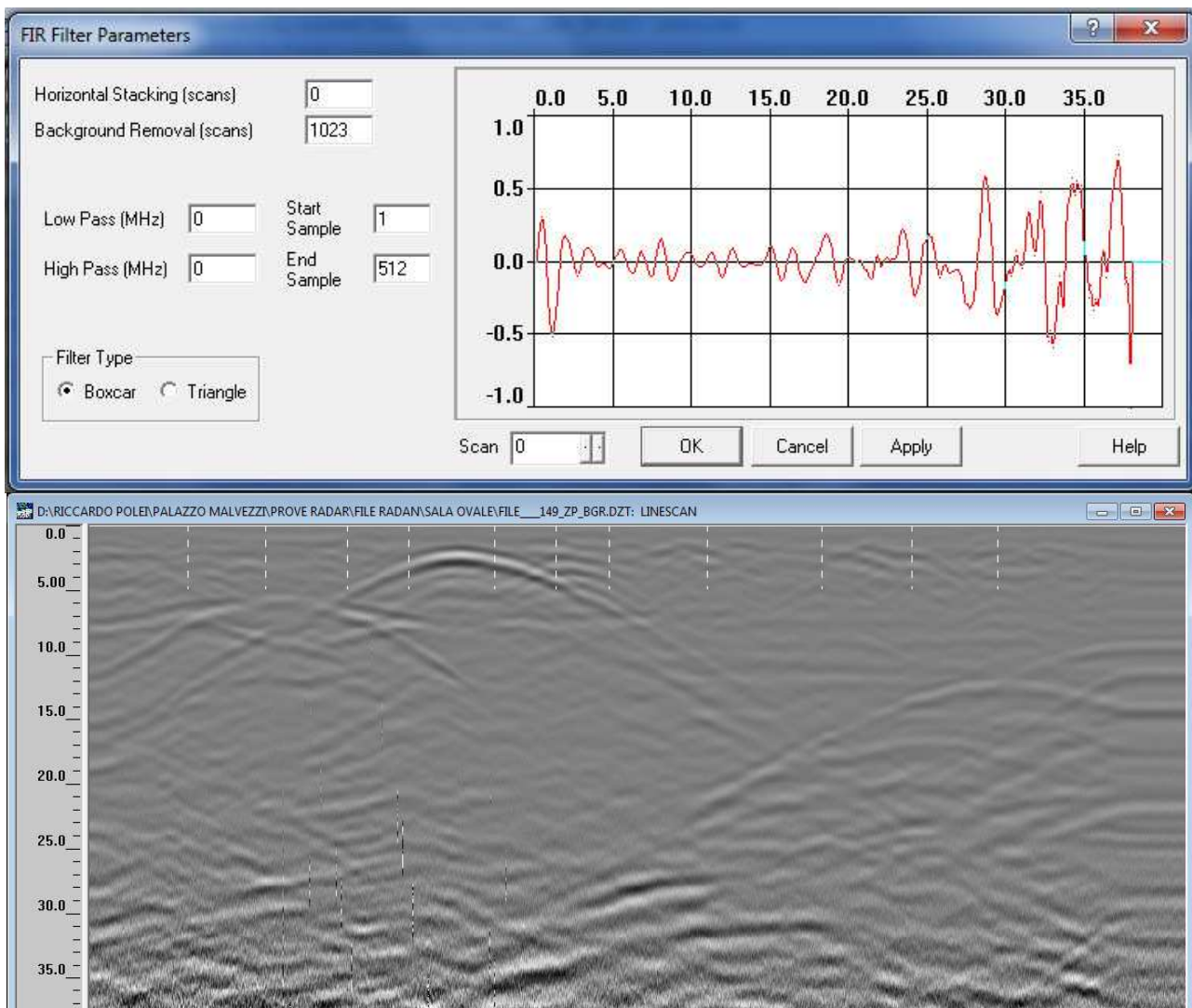


Figura 6.19 Box dei filtri FIR in alto ed effetto sul radargramma 149.

Questo filtro rientra nella categoria di quelli definiti passa alto in grado cioè di tagliare le frequenze al di sotto di una soglia prestabilita lasciando inalterate tutte le altre. Il filtro può essere applicato sull'intero file o su una parte di esso che viene definita tramite la scelta del numero di samples su cui agire: nella finestra di dialogo devono essere inseriti i valori di inizio e fine samples per definire l'area di interesse ed il numero di scan su cui il software deve calcolare la media da sottrarre al segnale originale (Figura 6.19). È possibile anche scegliere la modalità di intervento del filtro per quanto riguarda il calcolo della media del segnale che può essere pesata dando maggiore valore allo scan centrale.

In tutti i file analizzati, il filtro è stato applicato sull'intero file e per il numero di scan su cui calcolare la media è stato imposto il valore massimo in quanto il filtro agisce in maniera più evidente su tutti i segnali di lunghezza pari o superiore a quella impostata lasciando quasi inalterati quei segnali di estensione inferiore; in questo modo vengono eliminati dal radargramma solamente i disturbi effettivamente presenti mentre non vengono alterati i segnali di estensione minore di quella del filtro evitando in questo modo di eliminare riflessioni reali.

Inserito il valore opportuno bisogna procedere con il salvataggio del file.

#### **6.4.4 Range gain**

L'intensità di una riflessione presente nel radargramma dipende dalla quantità di energia posseduta e riflessa dal segnale; durante le fasi di acquisizione, le onde elettromagnetiche subiscono una forte attenuazione mentre attraversano un mezzo provocando una diminuzione di energia del segnale e conseguentemente anche delle sue riflessioni. Per contrastare questo fenomeno è possibile applicare un guadagno (in inglese gain) che consiste nell'amplificare le oscillazioni del treno d'onde in ricezione in modo tale da rendere più chiara la lettura delle riflessioni che altrimenti non sarebbero visibili.

Il software Randan 6.6 consente di applicare questa funzione in tre modalità differenti (automatica, esponenziale o lineare) che possono lasciare più o meno autonomia nell'elaborazione; nell'analisi dei file si è operato tramite la modalità lineare che consente di scegliere sia il numero di punti su cui applicare il guadagno sia il valore di questo per i singoli punti (nelle zone comprese tra due nodi il valore del gain è proporzionale linearmente a quello degli estremi del tratto interessato).

L'utilizzo di questa funzione consente di aumentare il segnale nelle zone di maggiore interesse e di attenuarlo in quelle prive di significato: aprendo il box del guadagno viene visualizzata la singola forma d'onda in un diagramma tempo (asse X)-ampiezza (asse Y) e la linea che indica la funzione guadagno che verrà applicata all'onda. Aumentando il numero di punti ed agendo su di essi tramite cursore del mouse o tramite il tasto Value presente nel Box si modifica l'onda originale fino ad

ottenere il risultato desiderato facendo attenzione a non tagliare alcuni picchi del segnale; non essendo sufficiente basarsi sull'analisi di una singola forma d'onda, è importante verificare gli effetti della modifica sull'intero file cliccando sul tasto apply o facendo scorrere il cursore sul radargramma mantenendo premuto il tasto sinistro del mouse: nel primo caso si vedranno gli effetti direttamente su tutto il radargramma, mentre nel secondo si potranno valutare gli effetti sulle singole forme d'onda (Figura 6.20). Se il primo metodo risulta più rapido, con il secondo si può ottenere una precisione maggiore in quanto si valutano gli effetti provocati su ogni singolo scan registrato.

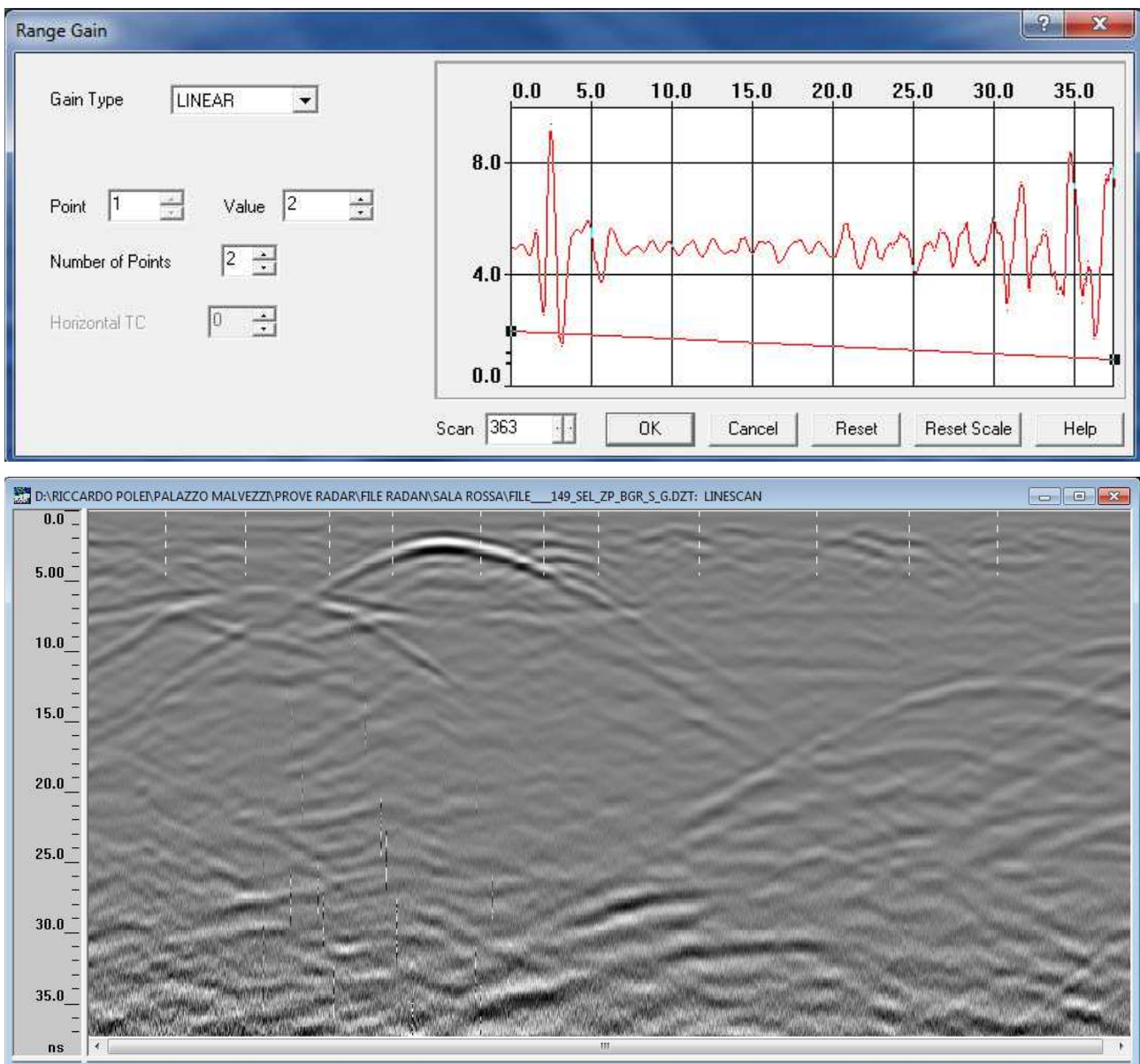
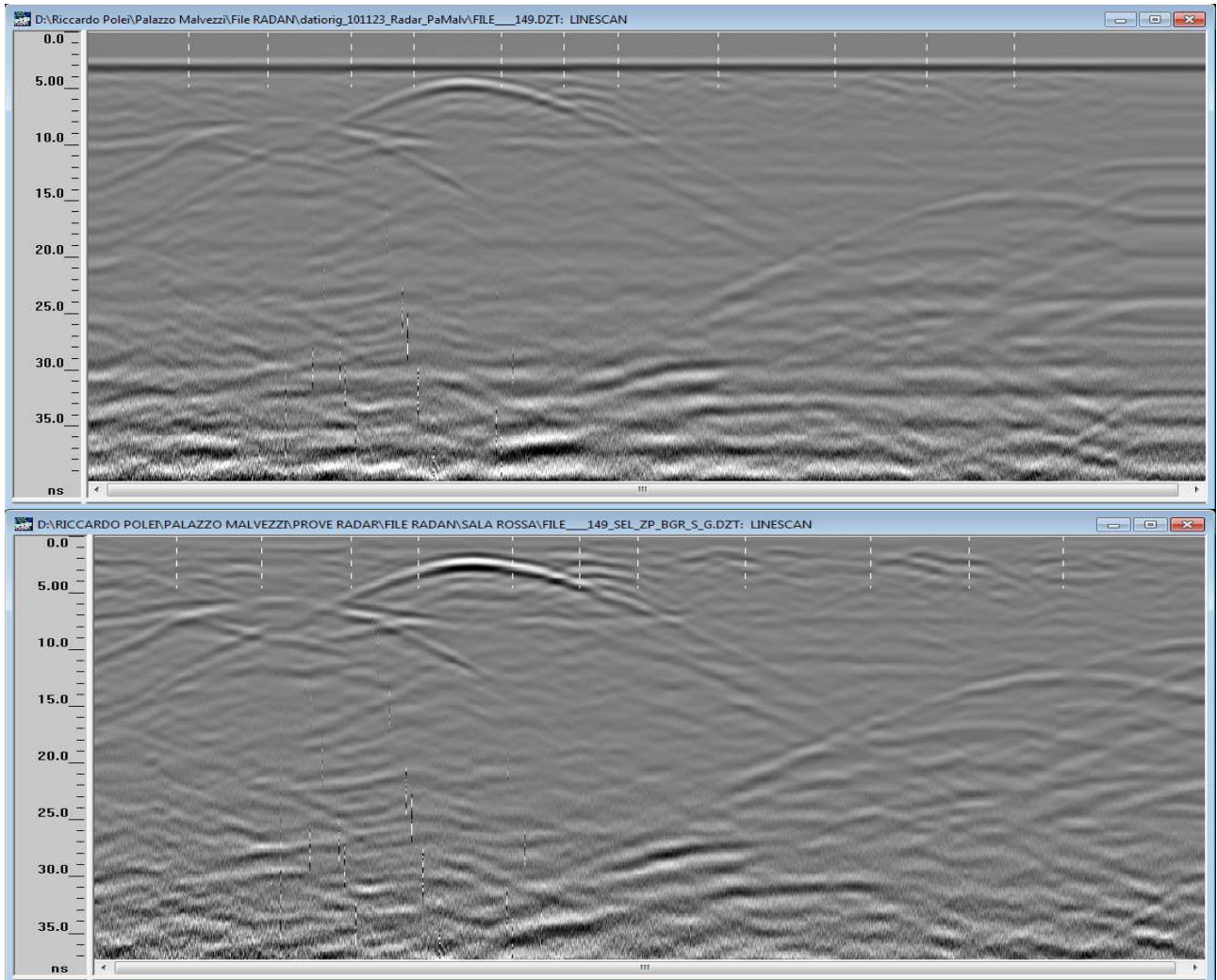


Figura 6.20 Applicazione del guadagno: in alto viene visualizzata la singola forma d'onda mentre in basso è visibile l'effetto sul radargramma 149.

È necessario prestare particolare attenzione nell'utilizzo di questo strumento in quanto è possibile che nel radargramma compaiano delle riflessioni spurie o irrilevanti, esaltate a causa di una eccessiva amplificazione, falsando così l'analisi.

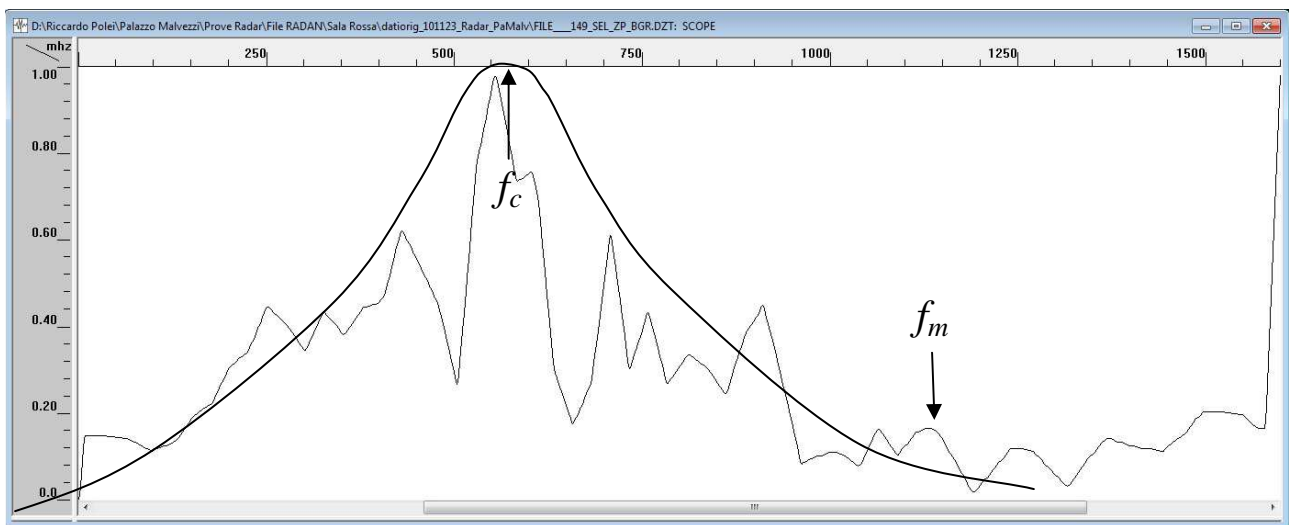


*Figura 6.21 Effetti dell'analisi eseguita su dati radar: radargramma originale in alto e modificato in basso*

Questa procedura tenta di rendere la visione di un radargramma semplice e veloce. Le modifiche apportate ad un file si possono così riassumere: traslazione verso l'alto di tutto il radargramma, eliminazione di parti prive d'interesse, pulizia del segnale e amplificazione di questo (Figura 6.21). Tutte le sezioni radar in questo modo modificate sono state raccolte in un unico file di testo dove si sono messi a confronto i radargrammi originali con quelli modificati e sono state descritte le riflessioni visualizzate indicandone posizione, profondità e principali caratteristiche; come risultato finale si è ottenuta una mappa in cui sono posizionate tutte le anomalie individuate.

### 6.4.5 Frequenza centrale e massima

Ogni antenna ha una sua specifica frequenza centrale che caratterizza la definizione del segnale ottenibile e la profondità di penetrazione di questo, ma lo spettro delle frequenze emesse risulta più ampio rispetto a questo. Nell'accoppiamento con il mezzo da investigare, i dati riguardanti le frequenze fornite dal produttore dello strumento possono variare (diminuendo il valore), ed è per tale motivo che per diversi radargrammi è stata calcolata la frequenza centrale e quella massima in modo tale da ottenere con esattezza i valori massimi di risoluzione ottenibile. Per procedere con questo calcolo è necessario aprire la finestra in cui si rappresenta la forma d'onda del segnale (O-Scope), trasformare questa in spettro delle frequenze tramite la funzione Transfer eseguibile con il tasto destro del mouse e valutare la frequenza centrale e massima del segnale; se l'individuazione di quest'ultima risulta semplice (basta portare il cursore sull'ultimo picco significativo dello spettro), per la valutazione della frequenza centrale bisogna immaginare un inviluppo gaussiano del segnale rappresentato ed individuare il centro di questo (Figura 6.22). Individuati questi due valori si è proceduto con il calcolo delle lunghezze d'onda del segnale e quindi della massima risoluzione ottenibile.



*Figura 6.22 Rappresentazione dello spettro delle frequenze per lo scan n.°825 del file 149 registrato con l'antenna da 900MHz: frequenza centrale ( $f_c$ ) ricavata tramite inviluppo dello spettro e frequenza massima ( $f_m$ ) individuata dall'ultimo picco significativo dello spettro.*

Per ricavare la risoluzione  $R$  è necessario conoscere la velocità di propagazione del segnale che, non potendo essere calcolare direttamente, è stata stimata tra i 9 e i 12 cm/ns. Nel caso in esame la frequenza centrale ( $f_c$ ) e massima ( $f_m$ ) ricavate sono rispettivamente pari a 569MHz e 1143MHz;



con questi valori, e considerando il valore sfavorevole tra quelli ipotizzati per la velocità (cioè quello più elevato che fornisce una risoluzione minore) è possibile calcolare:

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} = \frac{0,12m/ns}{569MHz} = 0,211m \rightarrow R_c = \frac{\lambda_c}{3} = 0,070m$$

$$\lambda_m = \frac{v}{f_m} = \frac{0,12m/ns}{1143MHz} = 0,104m \rightarrow R_c = \frac{\lambda_c}{3} = 0,035m.$$

### 6.4.6 Distance Normalization

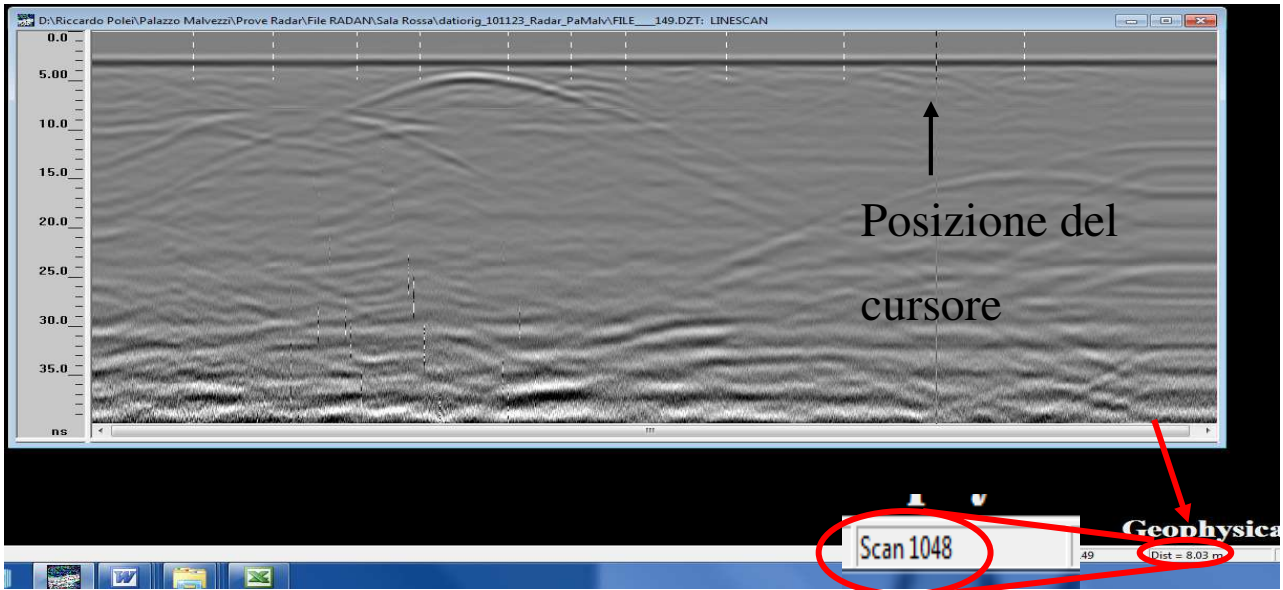


Figura 6.23 Distance Normalization per il file 149: valutazione dello scan in cui inserire il mark di fine file.

Marker Table File: D:\Riccardo Polei\Palazzo Malvezzi\Prove Radar\File RADAN\Sala Rossa\datorig\_101...

Edit

Scan	UserMark	DistMark	MarkName	X(m)	Y(m)	Z(m)	Profile
96	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
172	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
252	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
312	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
396	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
456	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
508	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
604	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
716	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
804	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0
888	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	UnNamed	0	0	0	0

\*

Figura 6.24 Box Marker Table: leggendo il numero di scan corrispondente ai mark posizionati a 1, 2, 3 e 4 m e calcolando la differenza tra le singole coppie è possibile ricavare il valore di scan/m

Alcune sezioni radar eseguite nella Sala Rossa (file 129, 130, 131, 132 con antenna da 400 MHz e file 149-151 con antenna da 900 MHz) sono state collezionate inserendo i mark ogni 50 cm; questa operazione ha permesso di utilizzare la funzione Distance Normalization che consente di scalare correttamente i radargrammi anche se registrati senza odometro; la funzione consente di posizionare con esattezza i mark inseriti durante l'acquisizione dei dati in corrispondenza della distanza realmente percorsa dall'antenna. Per sfruttare questa funzione è necessario che nel file analizzato siano presenti i mark di inizio e fine, altrimenti il software taglia automaticamente le porzioni di radargramma sprovviste di tali riferimenti.

La prima operazione eseguita è stata quella di inserire i mark estremi all'interno del radargramma in quanto tutti i file analizzati ne erano sprovvisti: per valutare la posizione in cui inserire i mark è necessario portare il cursore nei punti di inizio e fine file, leggere il valore dello scan corrispondente ed inserirlo nel Box Marker Table (Figura 6.23). Successivamente sono stati inseriti nel File Header i valori di scan/m e di m/mark, riportandoli anche nel Box Distance Normalization e spuntando la casella Apply to user mark. Il secondo parametro è stato stabilito già in fase di acquisizione dei dati ed il suo valore è di 0,5m/mark (cioè 50 cm tra i mark) mentre il primo è valutato di volta in volta attraverso il Box Marker table. Terminata questa operazione il software elaborerà i dati ed il risultato finale sarà quello di un radargramma la cui scala orizzontale delle distanze corrisponde esattamente alla distanza percorsa dal centro antenna (Figura 6.25).

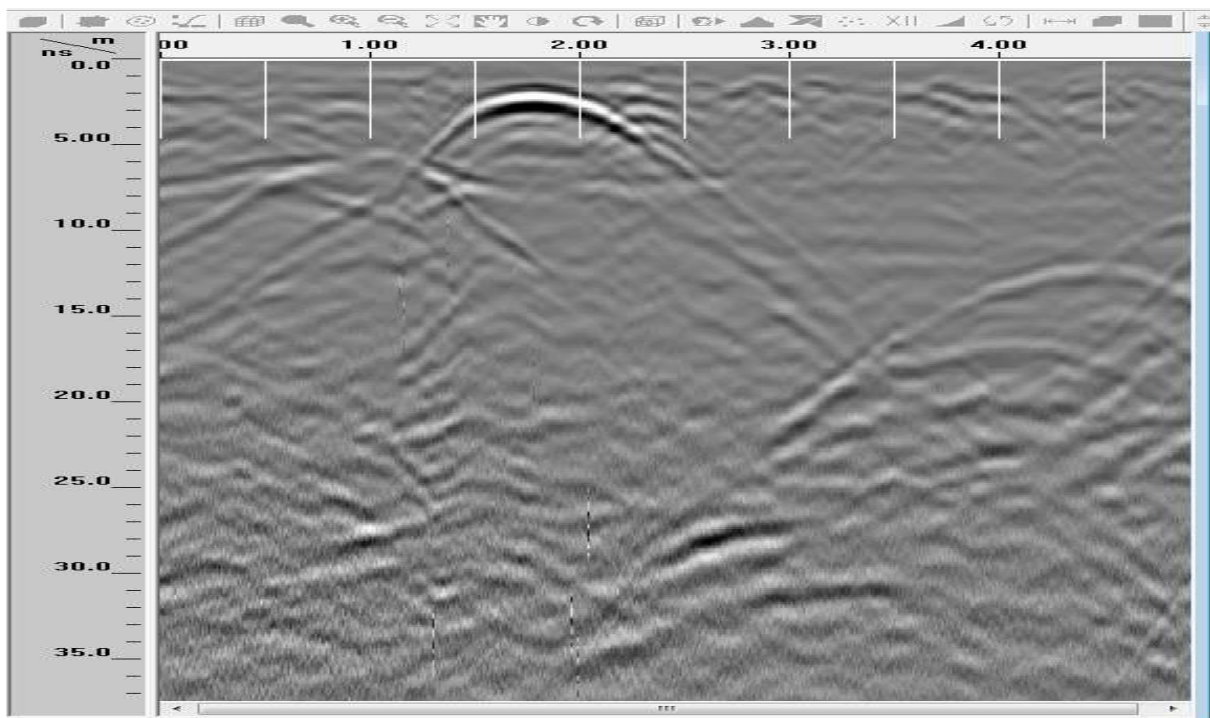


Figura 6.25 File 149 dopo aver eseguito la funzione Distance Normalization. Il radargramma risulta correttamente scalato lungo l'asse orizzontale: i mark sono posizionati ogni 50 cm.

#### 6.4.7 Riepilogo delle elaborazioni

Il procedimento di elaborazione descritto per il file 149 registrato con antenna da 900MHz è stato applicato anche a tutti gli altri file acquisiti in questa sala; per chiarezza vengono riepilogati le modifiche effettuate per ogni file (Tabella 6.8).

*Tabella 6.8 Riassunto dei valori attribuiti alle singole funzioni applicate ai file della sala Rossa*

File	Position adjustment (ns)	Background removal (scan)	Gain (lineare: max; min)
129-137	2,64	massimo	3,0; 1,0
138-139	2,81	massimo	2,0; 0,5
140-146	2,64	massimo	3,0; 0,5
147-151	2,27	massimo	2,0; 1,0

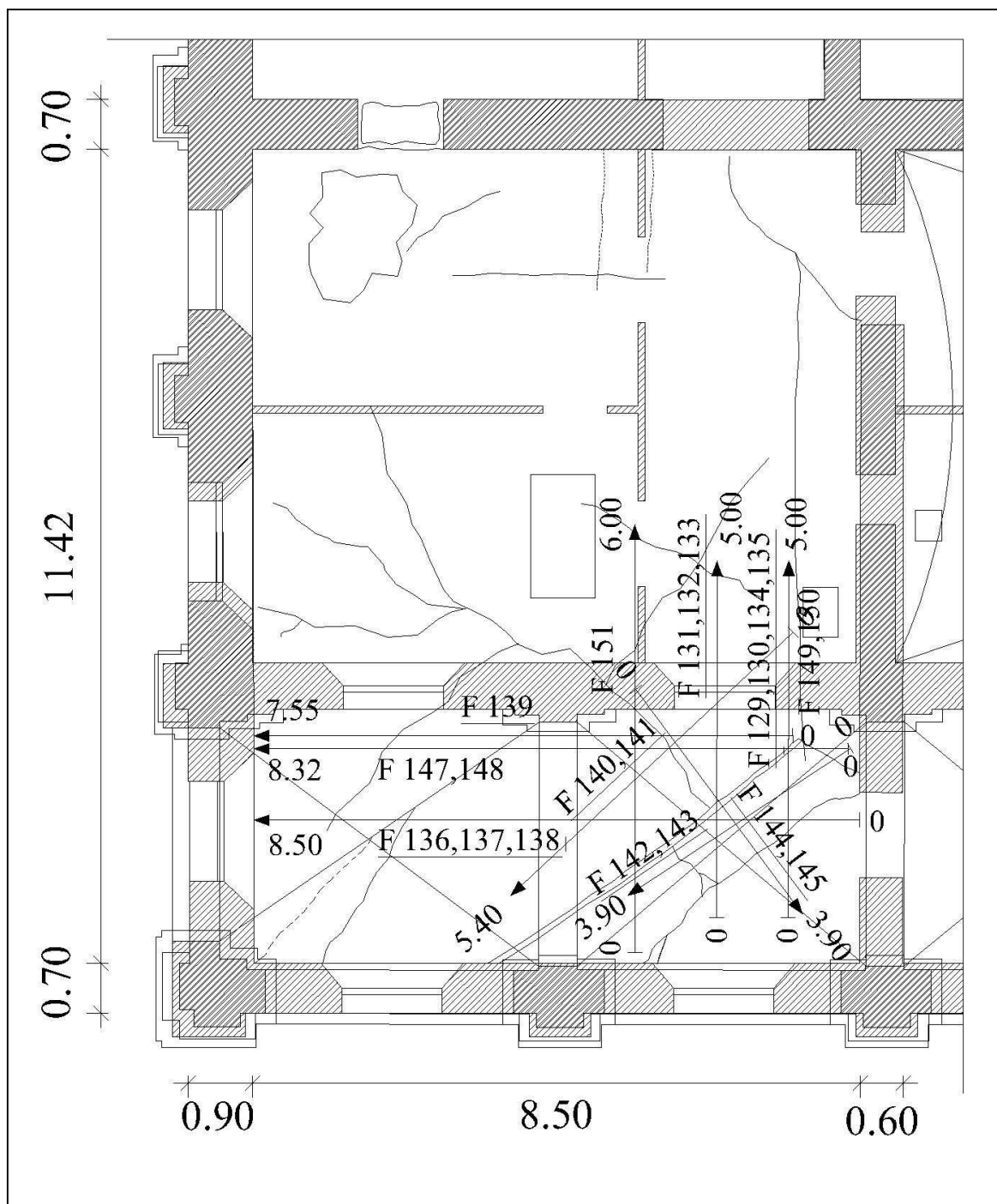
### 6.5 Visualizzazione e interpretazione dei dati

L'analisi e interpretazione dei dati radar può presentare diverse difficoltà ed è necessario quindi poter reperire il maggior numero possibile di informazioni riguardo gli elementi investigati sia dal loro punto di vista geometrico che da quello tecnologico-esecutivo dell'epoca di fabbricazione; infatti, in questo modo, sarà più semplice individuare i segnali presenti in un radargramma e descriverne le caratteristiche.

La prima fase di studio riguarda l'individuazione della posizione di prova: un radargramma rappresenta una sezione dell'oggetto investigato ed è quindi necessario dover conoscere con esattezza qual è la sezione rappresentata altrimenti sarà possibile individuare i segnali presenti all'interno del radargramma stesso specificandone la posizione e la forma, ma non sarà possibile dare una interpretazione di questi. Per la comprensione delle immagini è utile reperire fotografie o elaborati grafici degli oggetti investigati che possono dare buone indicazioni su ciò che appare in un radargramma consentendo in questo modo di evitare errori grossolani..

Per l'osservazione dei dati raccolti a palazzo Malvezzi sono stati utilizzati gli elaborati grafici delle piante e sezioni provenienti da (Capobianchi, 2009), immagini scaricate dal sito della Provincia e fotografie effettuate in-situ durante la fase di raccolta dei dati.



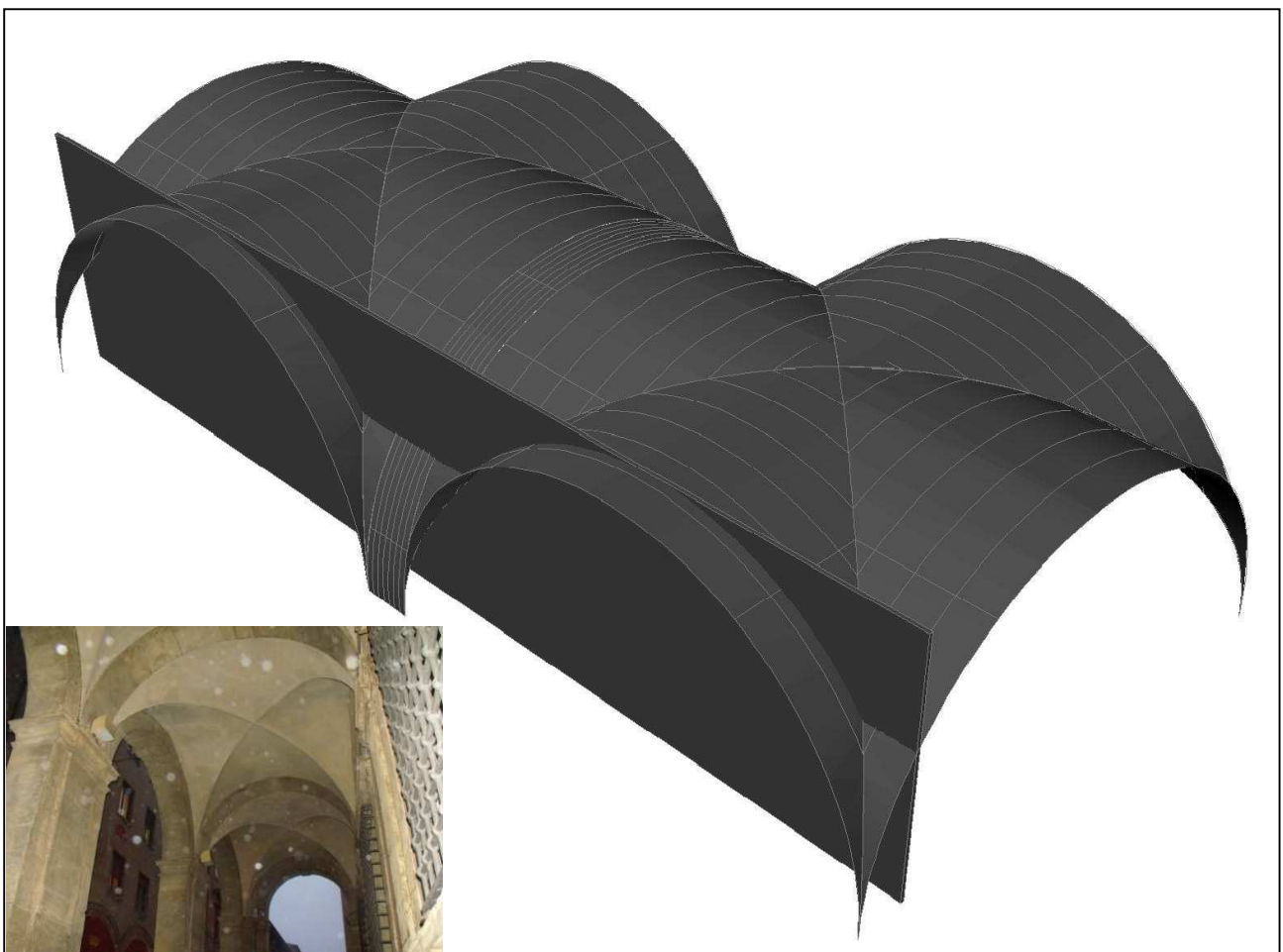


*Figura 6.26 Pianta della sala Rossa sovrapposta alla pianta del piano terra: l'immagine così composta è stata d'ausilio per lo studio delle sezioni radar.*

Come prima operazione per analizzare i dati raccolti ed elaborati di questa sala, è stato necessario sovrapporre le piante del piano terra e primo piano del palazzo in modo tale da individuare i punti di passaggio delle linee eseguite con il radar; in questo modo è stato possibile osservare che alcune sezioni sono state eseguite sul portico esterno ed altre a cavallo del portico e dell'interno dell'edificio. Questa operazione, che può risultare banale, è stata in grado di chiarire che alcune

linee eseguite non riguardano solamente l'andamento del solaio di questa sala, ma sono rappresentative anche delle volte a crociera del portico esterno (Figura 6.26).

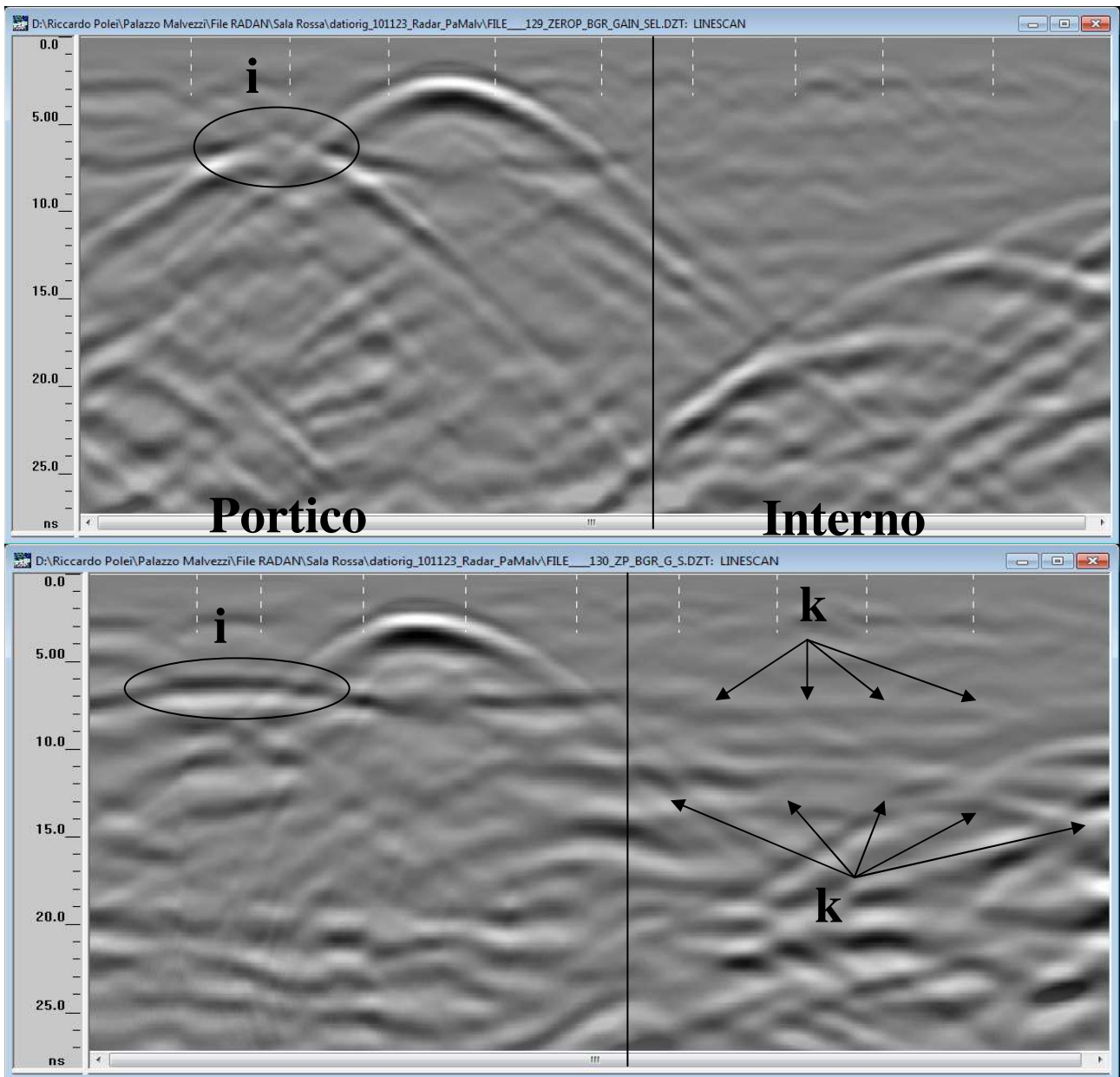
La maggior parte delle linee è stata effettuata sul portico esterno mentre solo una parte di queste arriva fino all'interno dell'edificio; per facilitare la lettura dei radargrammi è stato creato un disegno tridimensionale schematico della volta a crociera del portico e di quella interna all'edificio ed è stato posizionato su questo un piano rappresentante la sezione del radargramma eseguita. Facendo corrispondere di volta in volta il piano con la linea radar eseguita è stato possibile osservare tramite i disegni quello che poi sarebbe apparso nel radargramma aiutando la lettura di questo (Figura 6.27).



*Figura 6.27 Particolare schematico della volta a crociera del portico e del piano rappresentante la sezione radar: esempio di studio delle sezioni radar con l'ausilio del disegno.*

Durante l'analisi dei dati di questa sala è stato possibile constatare immediatamente come la scelta di registrare i file con due polarizzazioni differenti sia stata di notevole aiuto per individuare il maggior numero possibile di dettagli presenti all'interno delle strutture: infatti, già dalla lettura dei

radargrammi eseguiti sulla prima linea d'indagine (file 129, 130, 134 e 135), è stato osservato la presenza di riflessioni diverse a seconda della polarizzazione utilizzata (Figura 6.28).



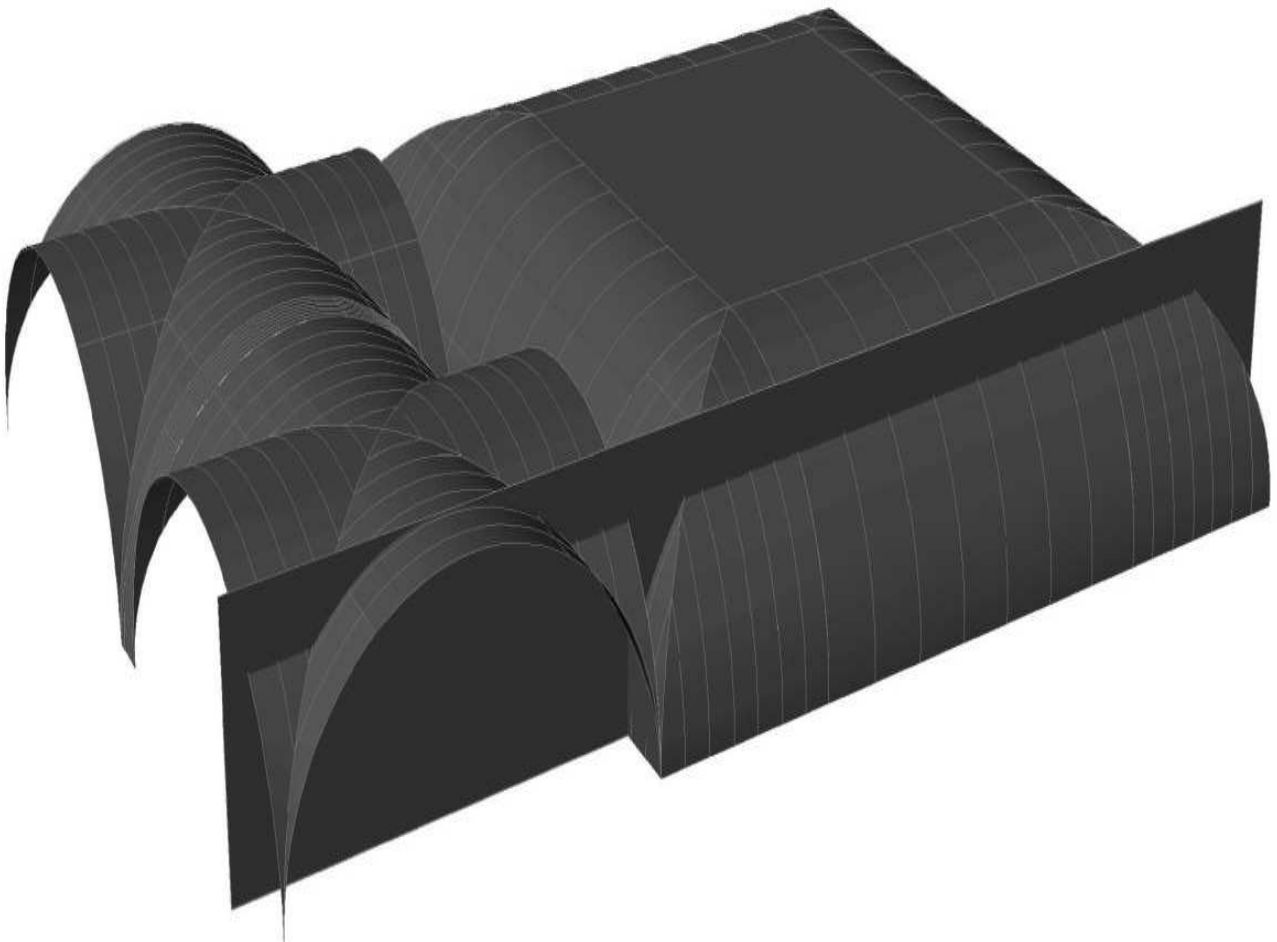
*Figura 6.28 Radargrammi n.°129 e 130 registrati con antenna 400 MHz lungo la stessa linea, ma con differenti polarizzazioni dell'antenna, verticale nel primo caso ed orizzontale nel secondo caso: si osservano le diverse riflessioni presenti nelle due sezioni radar.*

In Figura 6.28, i segnali più significativi risultano visibili con entrambe le polarizzazioni utilizzate mentre i dettagli risultano notevolmente diversi: infatti nella parte iniziale del primo radargramma è visibile l'andamento curvilineo dell'intradosso della volta del portico esterno (circa 6-7 ns) ed in corrispondenza del punto più alto di questa (area i) si può notare una forte riflessione provocata probabilmente da un oggetto metallico mentre nel secondo radargramma (con polarizzazione

dell'antenna ruotata di 90° rispetto al primo file) è ancora ben visibile l'andamento della volta esterna, ma è scomparsa la forte riflessione posizionata in corrispondenza della sommità di questa. Tale fenomeno è causato dalla posizione dell'oggetto da investigare rispetto all'orientamento e al percorso dell'antenna: infatti, se il riflettore è di piccole dimensioni (ad esempio un tubo di diametro non eccessivo) ed è disposto parallelamente alla linea d'indagine, il sistema GPR può non essere in grado di coglierlo.

Altre differenze si possono notare in tutto il radargramma: osservando la seconda metà dei file (Interno) si nota come nel primo caso sia ben visibile l'andamento della volta a padiglione interna mentre nel secondo siano presenti delle linee dall'andamento inclinato (k in Figura 6.28) che mascherano la parte sottostante.

Dall'analisi dei file registrati in questa sala è stato possibile osservare sia le caratteristiche delle volte del portico esterno sia la conformazione del solaio interno (Figura 6.29).



*Figura 6.29 Rappresentazione tridimensionale schematica del portico(nella parte sinistra dell'immagine) e della volta a padiglione interna (nella parte destra). L'ipotetica sezione radar è rappresentata dal piano visibile in figura.*

- Portico esterno

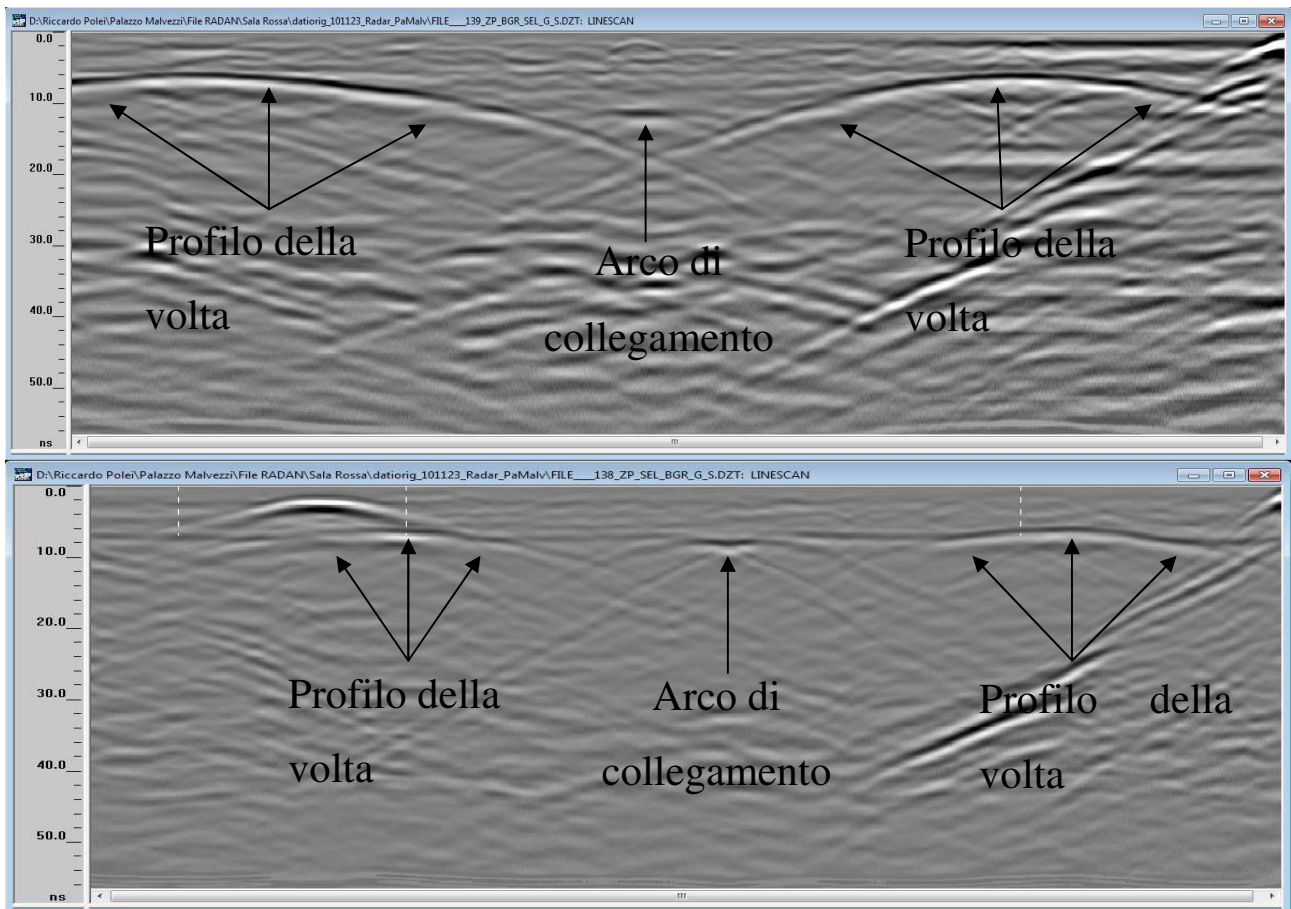


Figura 6.30 File 139 (in alto) e file 138 (in basso) registrati con antenna da 400MHz: è possibile notare la diversa rappresentazione delle volte del portico causata dalla diversa posizione della sezione radar.

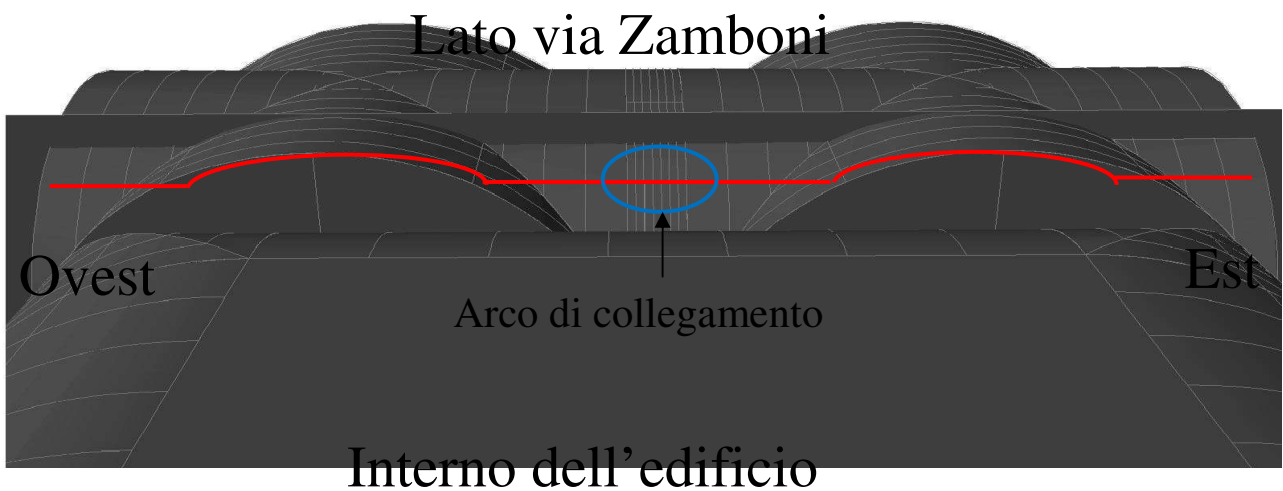
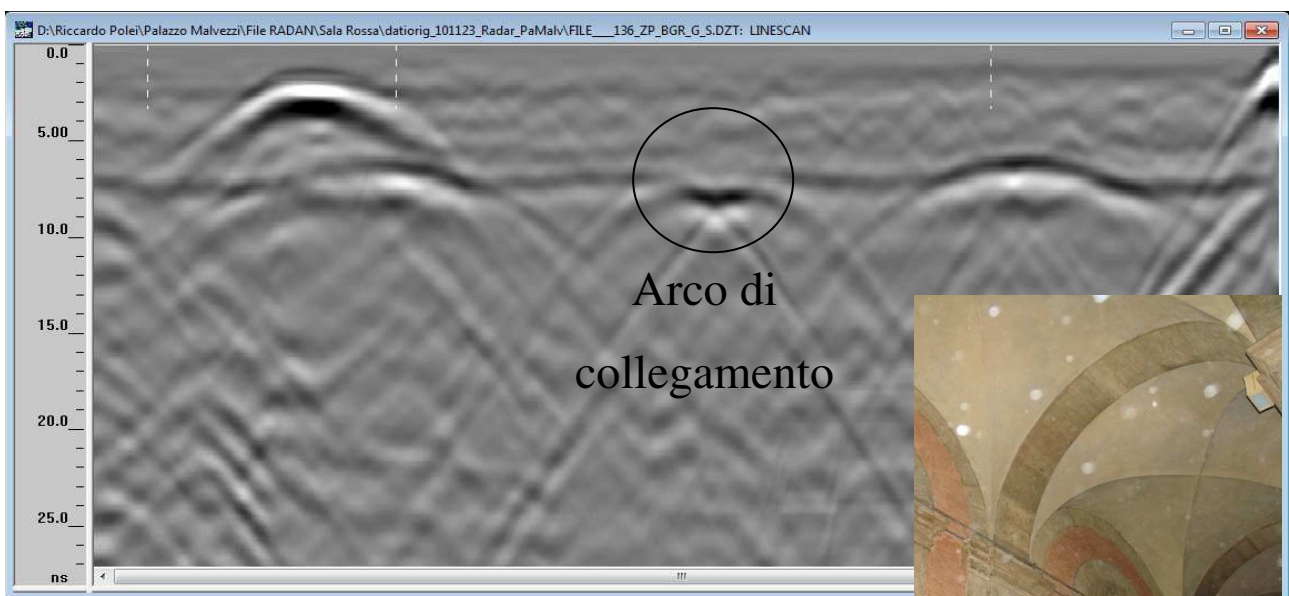


Figura 6.31 Immagine d'ausilio per la lettura dei file 136-138 eseguiti con antenna da 400MHz: dall'intersezione del piano (rappresentante la sezione radar) con la volta è possibile ricavare il profilo visibile nei corrispondenti file (linea rossa).



Tutte le sezioni radar eseguite in direzione Ovest-Est (file 136, 137, 138 e 139 eseguite con antenna 400 MHz e file 147 e 148 con antenna 900 MHz) sono situate al di sopra del portico esterno dell'edificio. Da questi file è possibile notare chiaramente l'andamento delle ultime due campate del portico che nei file 136-138 risulta meno visibile in quanto la sezione è stata eseguita circa in chiave alle volte del portico mentre per le altre sezioni è più evidente l'andamento curvilineo in quanto effettuate in una zona più eccentrica della volta (Figura 6.30). È possibile osservare anche una doppia riflessione provocata dall'arco di giunzione tra le volte delle due campate adiacenti (Figura 6.32).



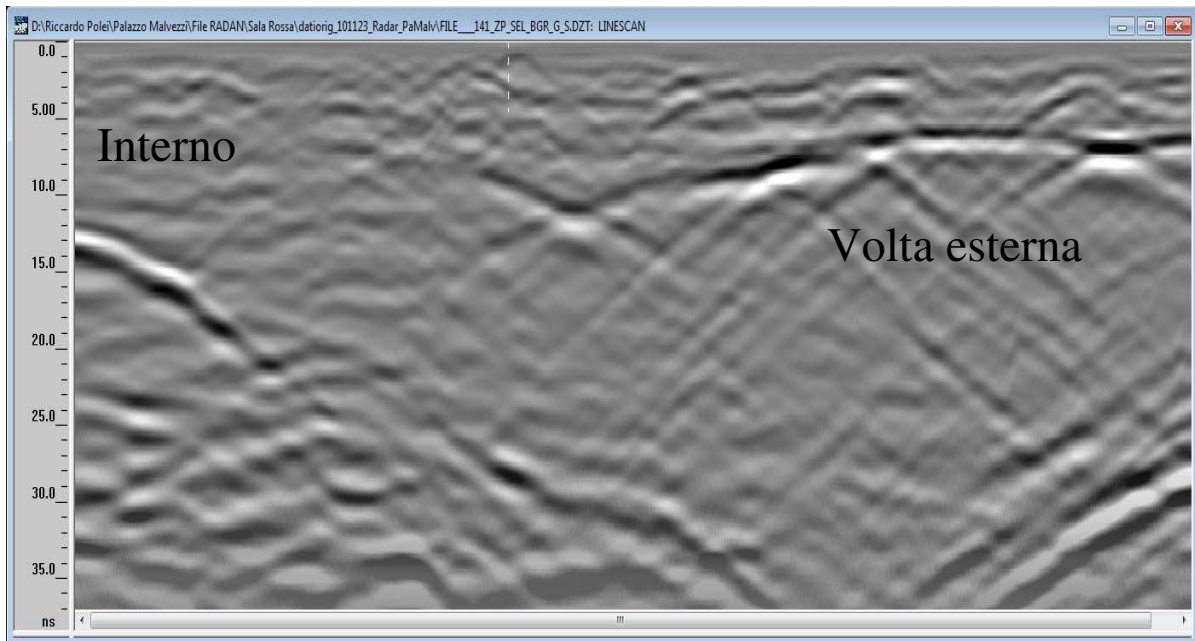
*Figura 6.32 File 136 con antenna da 400 MHz: la discontinuità tra le due volte a crociera viene segnalata nel radargramma come discontinuità geometrica. I mark sono in corrispondenza delle fessure.*

Nei file 136-138 è possibile osservare la presenza di una intensa riflessione posizionata circa in corrispondenza del centro della volta di destra e ad una profondità di 2ns: non visibile negli altri file registrati in questa direzione, tale riflessione si presenta anche nelle sezioni radar eseguite in direzione Nord-Sud (file 129-135 registrati con antenna da 400 MHz e file 149-151 con antenna da 900 MHz) e nei file diagonali 144 e 145 (antenna 400 MHz). Il posizionamento di queste riflessioni coincide con il passaggio delle linee in corrispondenza di una diagonale della volta Ovest: nei file diagonali 142 e 143 (antenna 400 MHz), eseguiti da Sud-Ovest a Nord-Est in corrispondenza di questa diagonale, si osserva che ciò che nei file precedenti veniva visualizzato come una riflessione puntuale ha ora uno sviluppo longitudinale lungo tutto il file (Figura 6.33).

Particolarmente interessanti risultano i file diagonali 140 e 141 (400 MHz) eseguiti ancora in direzione Sud-Ovest/Nord-Est sulla volta Ovest parallelamente, ma spostati rispetto ai file precedenti: in queste sezioni è possibile osservare parte della volta a padiglione interna presente ad inizio file e la volta a crociera del portico (Figura 6.34).

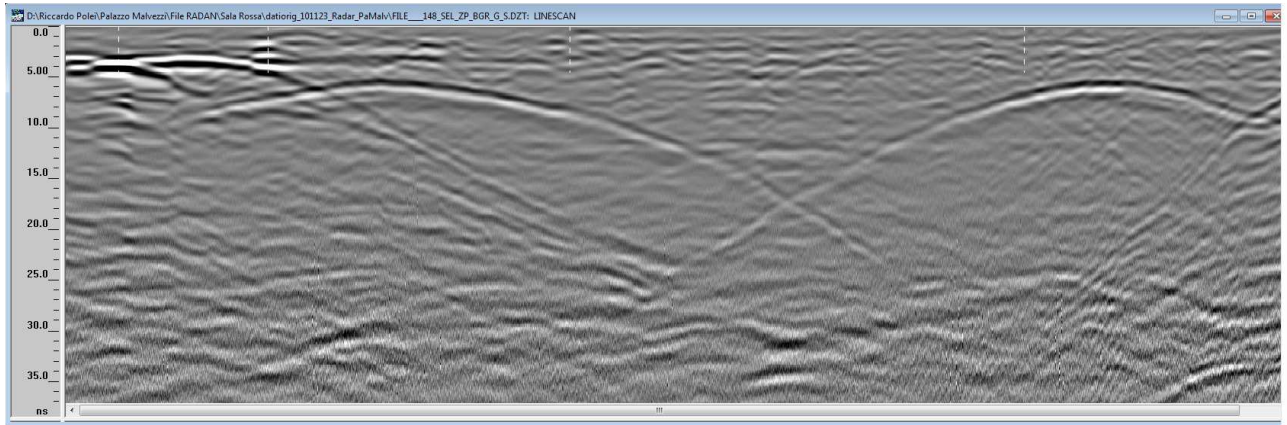


*Figura 6.33 File 142 registrato con antenna da 400 MHz: è possibile notare la presenza di una forte riflessione superficiale presente lungo tutto il file e parte della volta a crociera ad inizio file.*



*Figura 6.34 File 141 eseguito con antenna da 400 MHz: la volta esterna viene rappresentata come una sequenza di curve intersecate.*

La singola linea 147-148 eseguita in direzione Ovest-Est con l'antenna da 900MHz ha evidenziato gli intradossi delle due campate del portico; nella parte iniziale del file è ancora una volta osservabile la forte riflessione in corrispondenza della diagonale della volta Ovest, ma in questo caso si osservano due riflessioni affiancate.



*Figura 6.35 File 147 realizzato con antenna da 900 MHz: ad inizio file è possibile notare le riflessioni posizionate a 3 e a 2 ns di profondità.*

In tutti i file registrati non è stato possibile osservare la riflessione del pavimento presente al piano inferiore: l'altezza tra estradosso del solaio e piano di calpestio del piano inferiore è superiore ai 6,00 m (valore ricavato da elaborati grafici di Capobianchi, 2009) e ipotizzando una velocità del segnale di 0,3 m/ns (velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto), valore sicuramente eccessivo, ma che restituisce il tempo minimo necessario per osservare un oggetto a tale profondità, si avrà:

$$t = \frac{2 \cdot s}{v} = \frac{2 \cdot 6,00}{0,3} = 40ns.$$

Il tempo ricavato dal calcolo è il tempo impiegato dal segnale per compiere la distanza di 6,00m nel vuoto; considerando che all'interno del solaio la velocità è inferiore a 0,3 m/ns e che la distanza da coprire è superiore ai 6,00m, risulta evidente come il range impostato nell'unità digitale di controllo per la maggior parte dei file (max 40ns) non sia sufficiente. Nonostante per alcuni file (F138-139) sia stato impostato un valore del range di 60 ns (che per velocità di 0,3 m/ns corrisponde ad uno spazio percorso di 9,00 m) risulta in ogni caso impossibile osservare la riflessione proveniente dal piano inferiore.

#### - **Interno**

La volta interna risulta visibile solamente dai file eseguiti in direzione Nord-Sud ed in un singolo file condotto lungo una diagonale d'angolo (file 140 e 141) in quanto tutte le altre linee non attraversano il muro perimetrale del piano terra (Figura 6.26).



Il profilo della volta a padiglione interna risulta chiaramente visibile in tutti file Nord-Sud registrati con polarizzazione verticale delle antenne a circa 2,5-3 m dall'inizio dei file: dai file 129, 131 e 134 eseguiti con l'antenna da 400 MHz e dai file 149 registrato con quella da 900 MHz è possibile osservare la presenza di due riflessioni (A e B) lungo l'intradosso della volta (Figura 6.36).

La riflessione "A" potrebbe corrispondere ad un elemento metallico inserito come rinforzo della volta: infatti, la riflessione è proprio in corrispondenza della volta a padiglione ed è posizionata alla stessa profondità (12 ns) nei radargrammi adiacenti (corrispondenti alle linee 129-135), fattore che lascia presumere il posizionamento orizzontale di tale eventuale elemento tra le sezioni indicate.

La riflessione "B", invece si trova ad una profondità maggiore rispetto alla precedente (16,5 ns), posizionata ancora all'intradosso della volta (Figura 6.36).

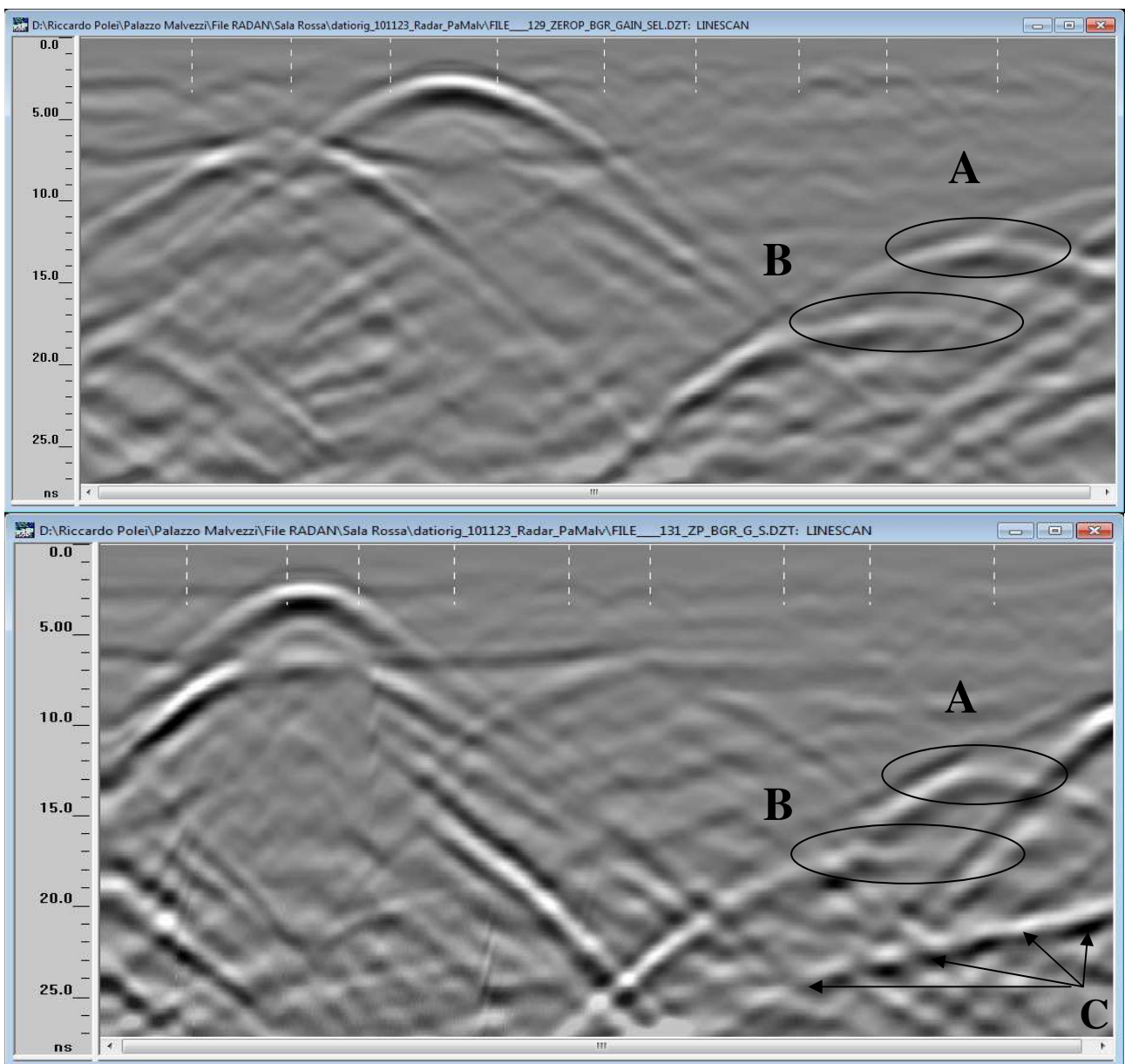
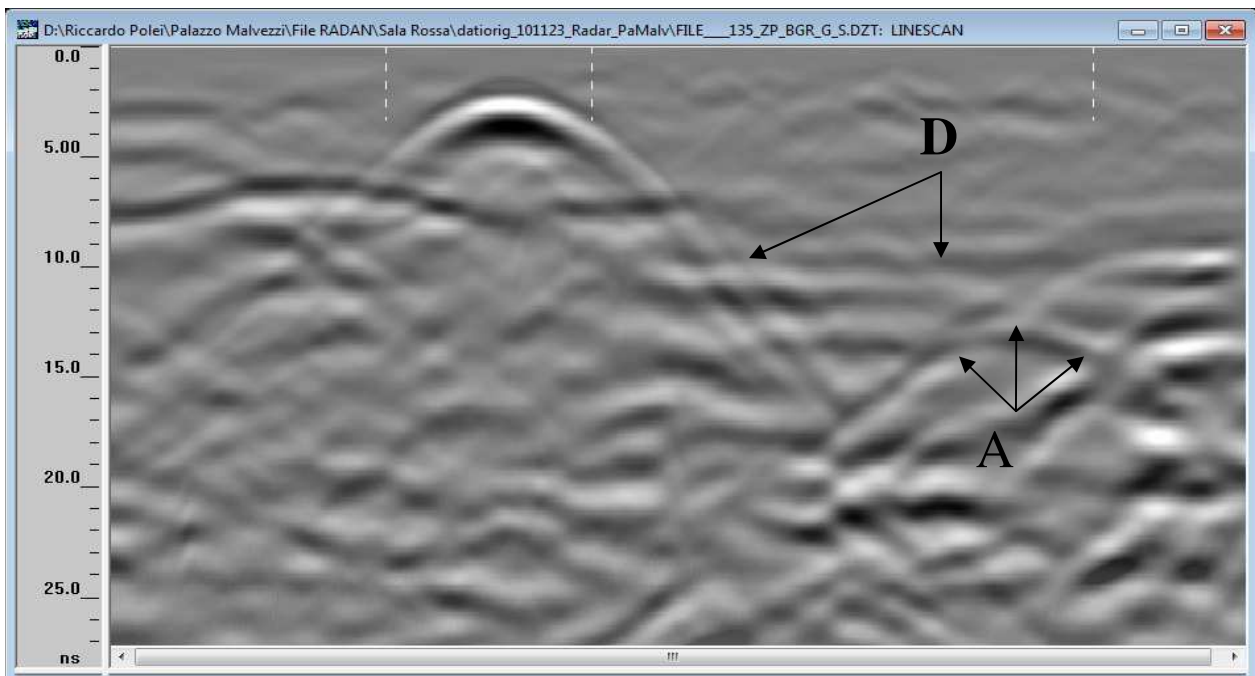


Figura 6.36 File 129 (sopra) e 131 (sotto), antenna da 400 MHz, polarizzazione verticale, radargrammi di due sezioni della volta interna: visione delle riflessioni "A" e "B".

In questi file, specialmente il n.°131, è possibile osservare anche una riflessione rettilinea presente al di sotto della volta interna (C in Figura 6.36): questo elemento dovrebbe corrispondere al controsoffitto presente sotto la volta. La visione inclinata è causata da un ritardo del segnale radar provocato dalla diversa velocità di penetrazione delle onde elettromagnetiche all'interno della volta: al di sotto di questa è presente aria ed il segnale risulta più veloce.

Osservando i radargrammi eseguiti lungo le stesse traiettorie, ma con polarizzazione invertita, è possibile notare particolari differenti: dai file corrispondenti alla prima linea (130 e 135 con antenna da 400 MHz e 150 con antenna da 900 MHz) è possibile notare la presenza di un piano inclinato che si sviluppa dalla parete esterna fino oltre la volta interna "appoggiandosi" sulla riflessione descritta precedentemente posizionata a 12 sn di profondità (riflessione A in Figura 6.36 e Figura 6.37).



*Figura 6.37 File 135, antenna 400 MHz, polarizzazione orizzontale: visione della riflessione rettilinea "D".*

Dal file n.150 si nota che questa struttura termina in corrispondenza di una riflessione curvilinea posizionata al di sotto della volta (Figura 6.38)

Osservando i file 132 e 133 è stato possibile notare, invece, la scomparsa delle riflessioni "A", "B" e "D", mentre è ancora visibile il profilo della volta a padiglione e quello del segnale "E". Confrontando le sezioni radar è possibile supporre che in corrispondenza delle linee più vicine alla parete Ovest vi sia la presenza di elementi strutturali di rinforzo della volta mentre questi siano assenti al di sotto della linea più interna.

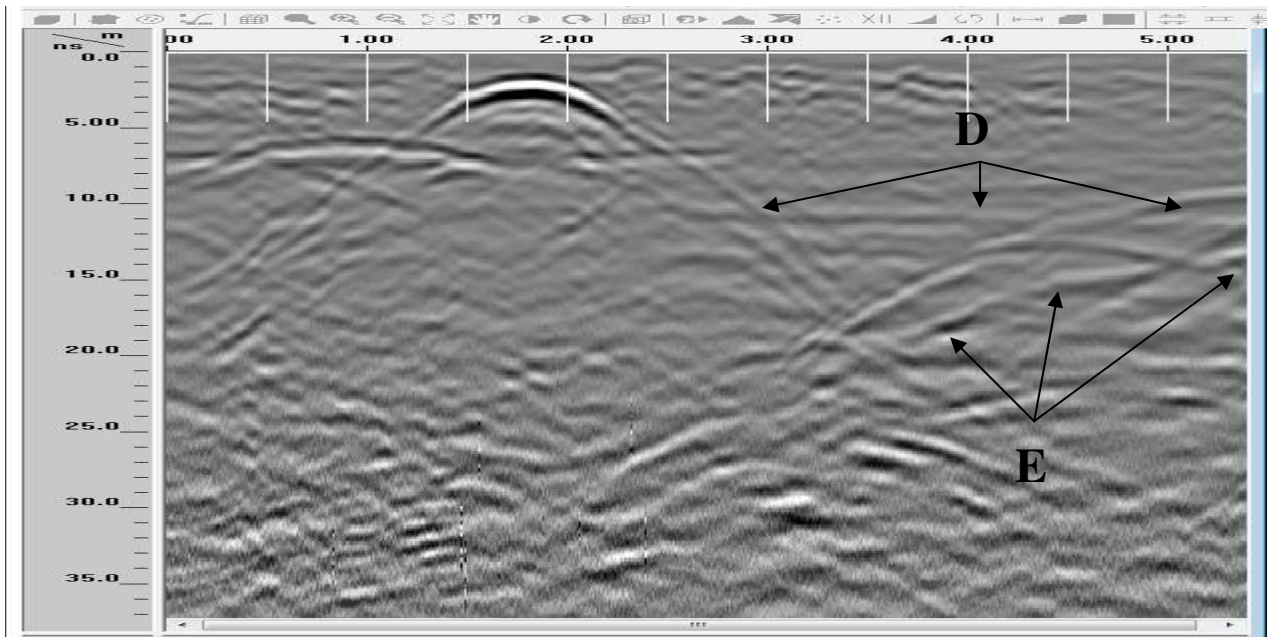


Figura 6.38 File 150, antenna 900 MHz, polarizzazione orizzontale: si nota la presenza del piano inclinato (D), del rinforzo “A”(non segnalato in figura), e della curva sotto la volta (E).

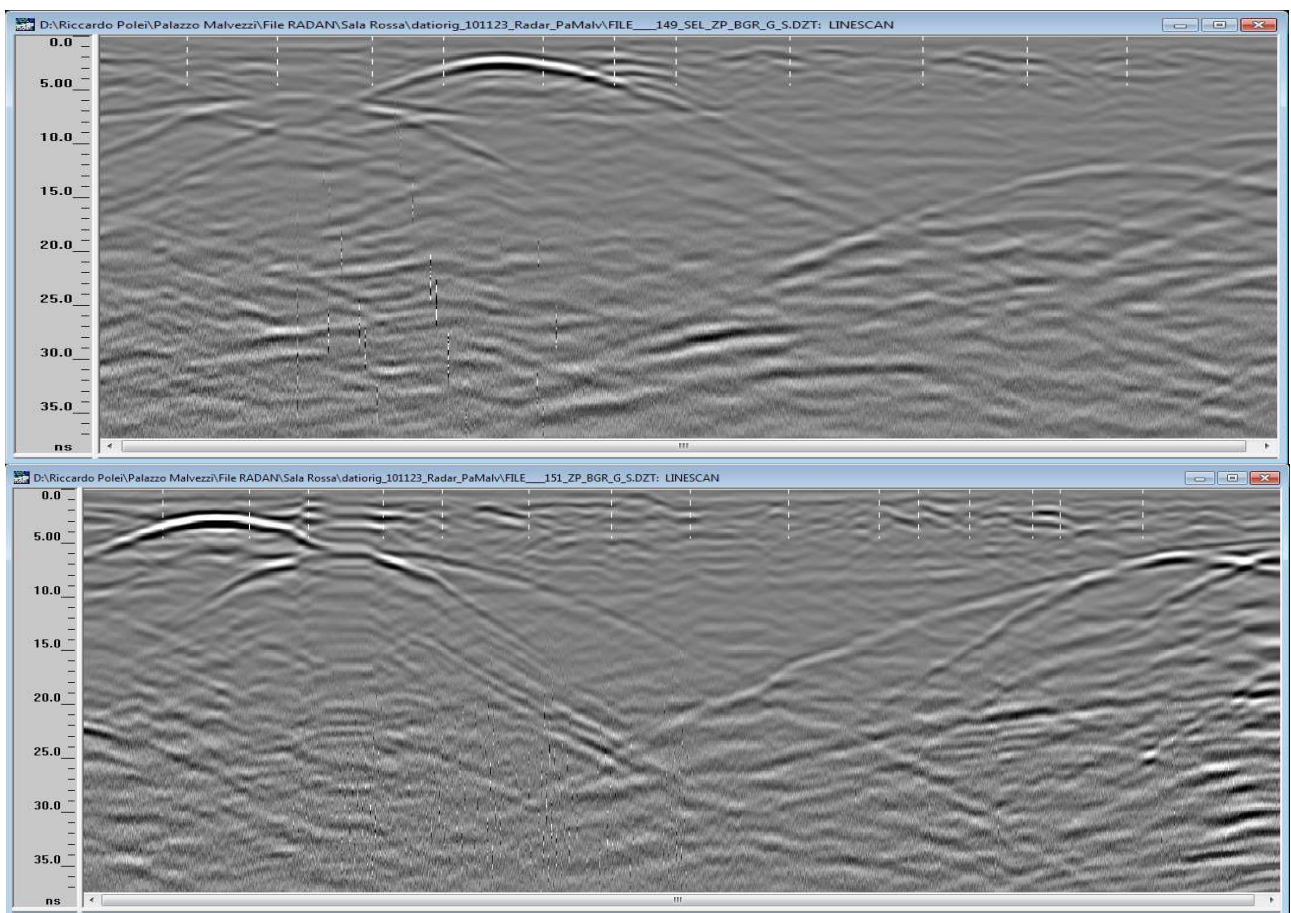
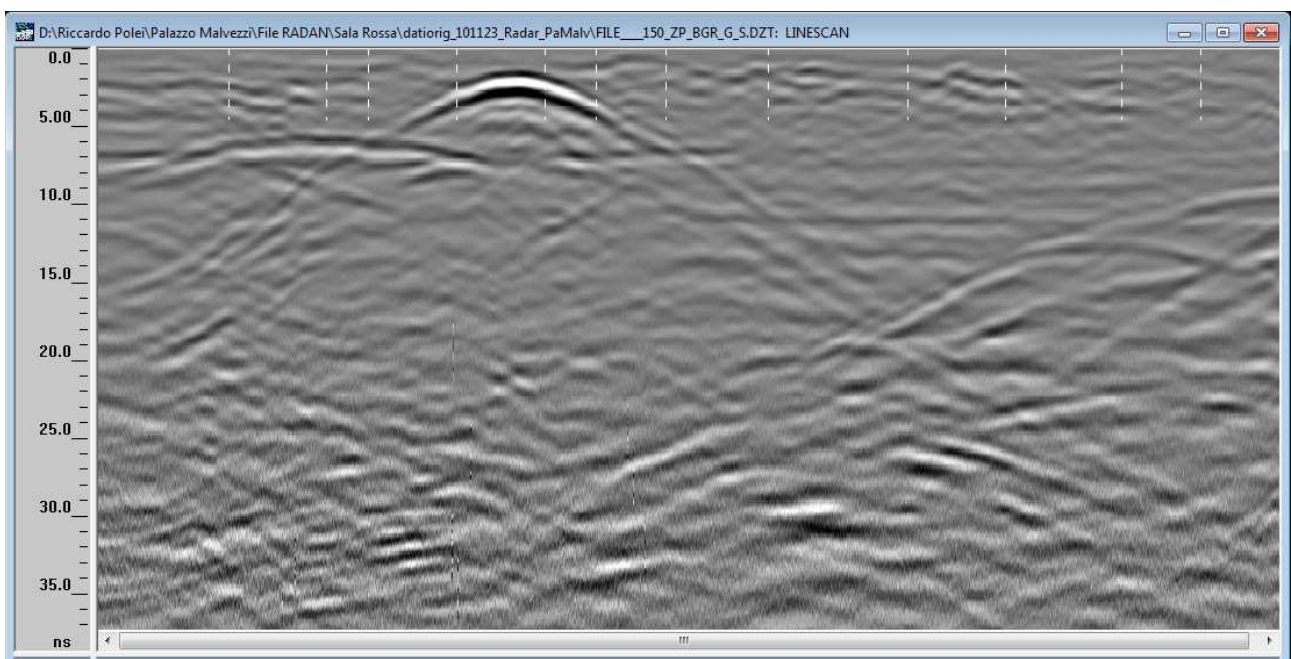
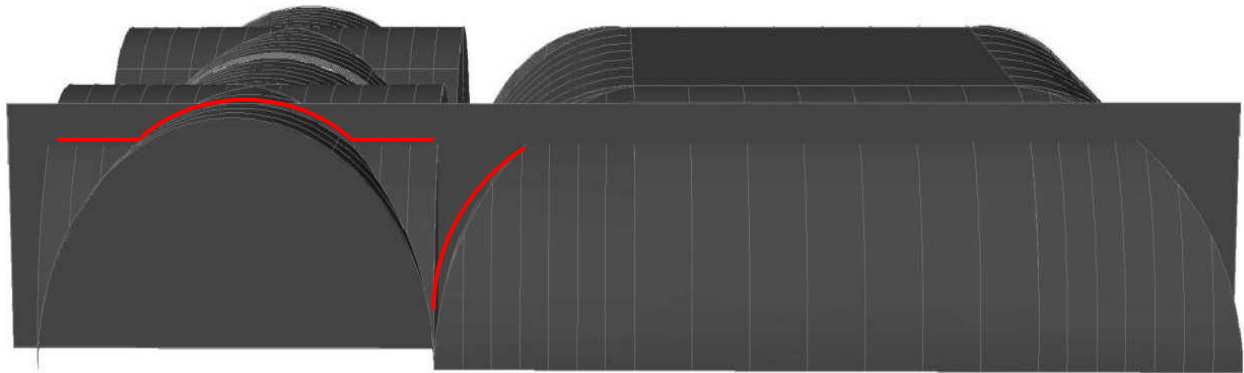


Figura 6.39 File 149 (sopra) e 151 (sotto) realizzati con antenna da 900 MHz: è possibile osservare la diversa profondità raggiunta dalla riflessione della volta a padiglione della sala. Nel file 151 si osservano due riflessioni in corrispondenza della volta.



Il punto più alto raggiunto dal profilo della volta visibile nei radargrammi è funzione della posizione della sezione osservata: spostandosi dall'esterno verso il centro della sala, lo spessore della volta tenderà a diminuire raggiungendo delle quote più superficiali nel radargramma. Questo fenomeno è chiaramente visibile osservando i radargrammi n.149 e 151 registrati con l'antenna da 900 MHz. Nel primo caso, infatti, la linea è lunga 5,0m ed posizionata ad 1,0 m dalla parete Ovest della sala e il profilo della volta a padiglione raggiunge la profondità minima di 9 ns mentre nel secondo caso la linea è lunga 6,0 m ed posizionata a 3,14 m dalla stessa parete e la riflessione della volta raggiunge la profondità di 4 ns (Figura 6.39).

Dal file n.°151 è inoltre possibile osservare la presenza di due riflessioni posizionate in corrispondenza della volta (la seconda, visibile solamente in parte, è presente anche nel file 149): la presenza di queste potrebbe indicare la presenza di ulteriori rinforzi disposti a sostegno della volta del solaio di questa sala.



*Figura 6.40 Esempio di utilizzo del disegno tridimensionale nell'interpretazione del file 150*

Al termine dell'osservazione dei dati, tutti i segnali individuati sono stati riportati nella pianta della sala (Figura 6.41): le linee colorate rappresentano la presenza di segnali curvilinei che si sviluppano per tutta la lunghezza della linea mentre la presenza di due linee colorate affiancate indica la presenza di curve la cui profondità varia tra quella indicata dai colori.

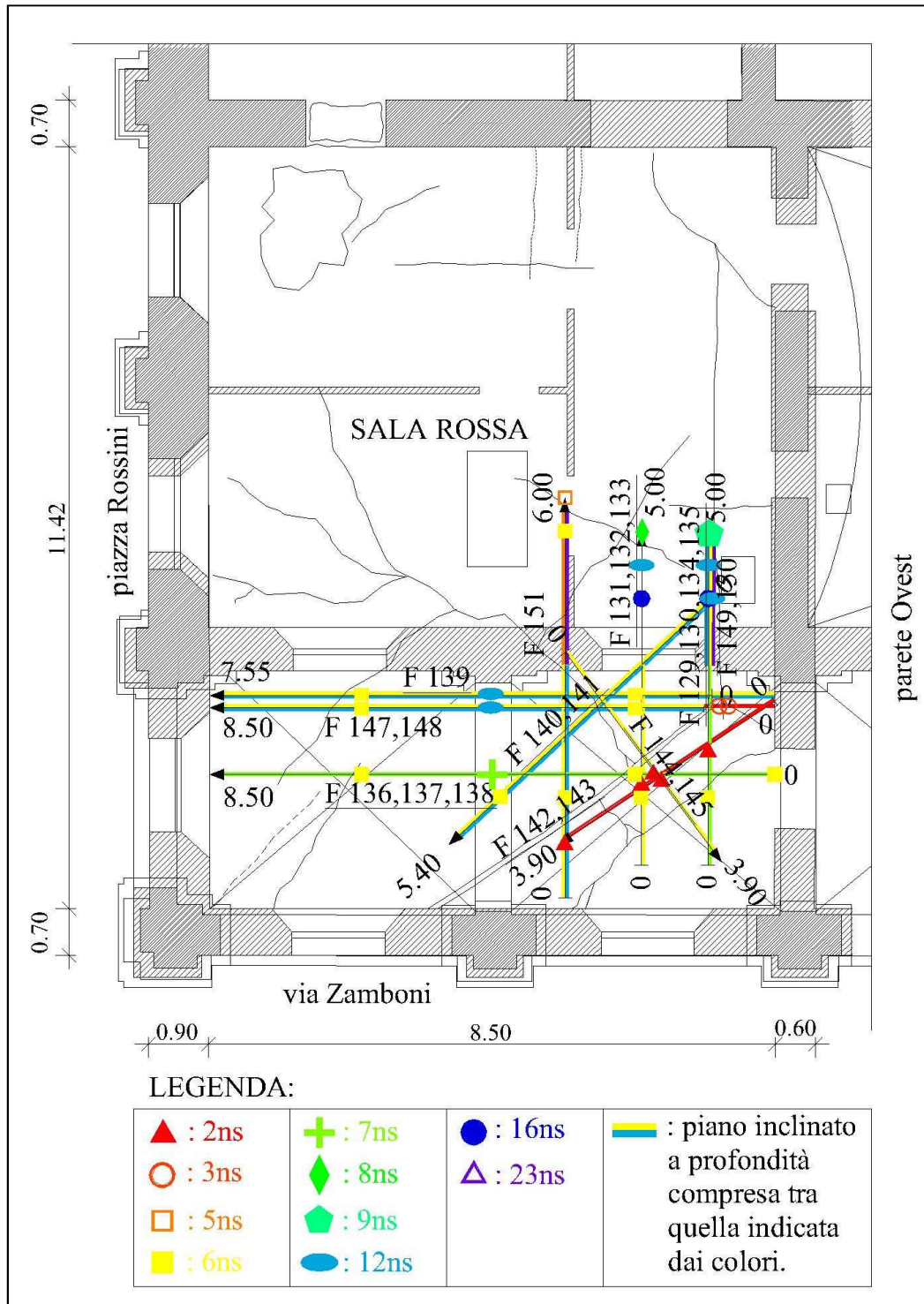



Figura 6.41 Riassunto dei segnali individuati dall'analisi dei file radar raccolti nella sala Rossa.

Ad esempio la linea  indica la presenza di un segnale curvilineo compreso tra i 6 ed i 12ns di profondità. I simboli presenti in figura rappresentano il culmine delle curve descritte o la presenza di singole iperboli.

## **6.6 Osservazioni e suggerimenti**

L'esperienza condotta nella sala Rossa ha mostrato come le frequenze utilizzate influiscano sulla risoluzione del segnale e sui dettagli osservabili: infatti, nei radargrammi registrati con l'antenna da 900 MHz, negli strati più superficiali del solaio si osservano un numero di riflessioni maggiori rispetto a quelli rilevati con l'antenna da 400MHz mentre gli altri segnali presenti sono del tutto simili; questo aspetto può significare in primo luogo che la dimensione delle strutture investigate sono abbastanza rilevanti, tali cioè da poter essere individuate anche con due risoluzioni diverse, ed in secondo luogo che all'interno degli elementi studiati vi siano delle camere d'aria dove il potere di penetrazione risulta simile per tutte e due le antenne.

Per indagare con maggiore precisione le strutture qui presenti sarebbe necessario procedere con delle indagini eseguite tramite griglia; vista la non eccessiva attenuazione del segnale si potrebbero utilizzare antenne a frequenza maggiore per ottenere più informazioni dagli strati superficiali del solaio.

## Capitolo 7

### SALA OVALE: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR (antenna 900 MHz)

---

#### 7.1 Scopi delle prove

Lo scopo delle prove presentate in questo capitolo non è differente da quello descritto in quello precedente, ma il solaio analizzato in questo caso è posto superiormente a quello della sala del Consiglio della Provincia di Bologna, caratterizzato da un foro ovale al suo centro; per questo motivo tale sala viene anche chiamata Sala dell'Ovale. Il particolare foro presente nel solaio lascia pensare all'esigenza di una particolare struttura di sostegno di questo, che sarà indagata in questo capitolo. L'indagine radar è stata condotta al fine di ottenere indicazioni più dettagliate su tali strutture che le indagini precedenti (endoscopia) non sono riuscite a cogliere pienamente. La campagna di prova è stata svolta il 23/11/2010.



Figura 7.1 Foro ovale nel solaio della Sala del Consiglio (<http://www.provincia.bologna.it>)

Per l'analisi della Sala dell'Ovale è stata utilizzata l'antenna 900 MHz con capacità di buona risoluzione e penetrazione in quanto la ricerca è stata condotta con la finalità di individuare con maggiore chiarezza possibile le caratteristiche strutturali di questo elemento spesso valutandone posizione e conformazione.



## 7.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata, sistema radar e antenna 900 MHz, per le indagini di questa sala non è differente da quella utilizzata per lo studio effettuato nella sala Rossa; per questo motivo si rimanda a tale capitolo la loro descrizione.

## 7.3 Posizioni di prova, preparazione e procedure di acquisizione

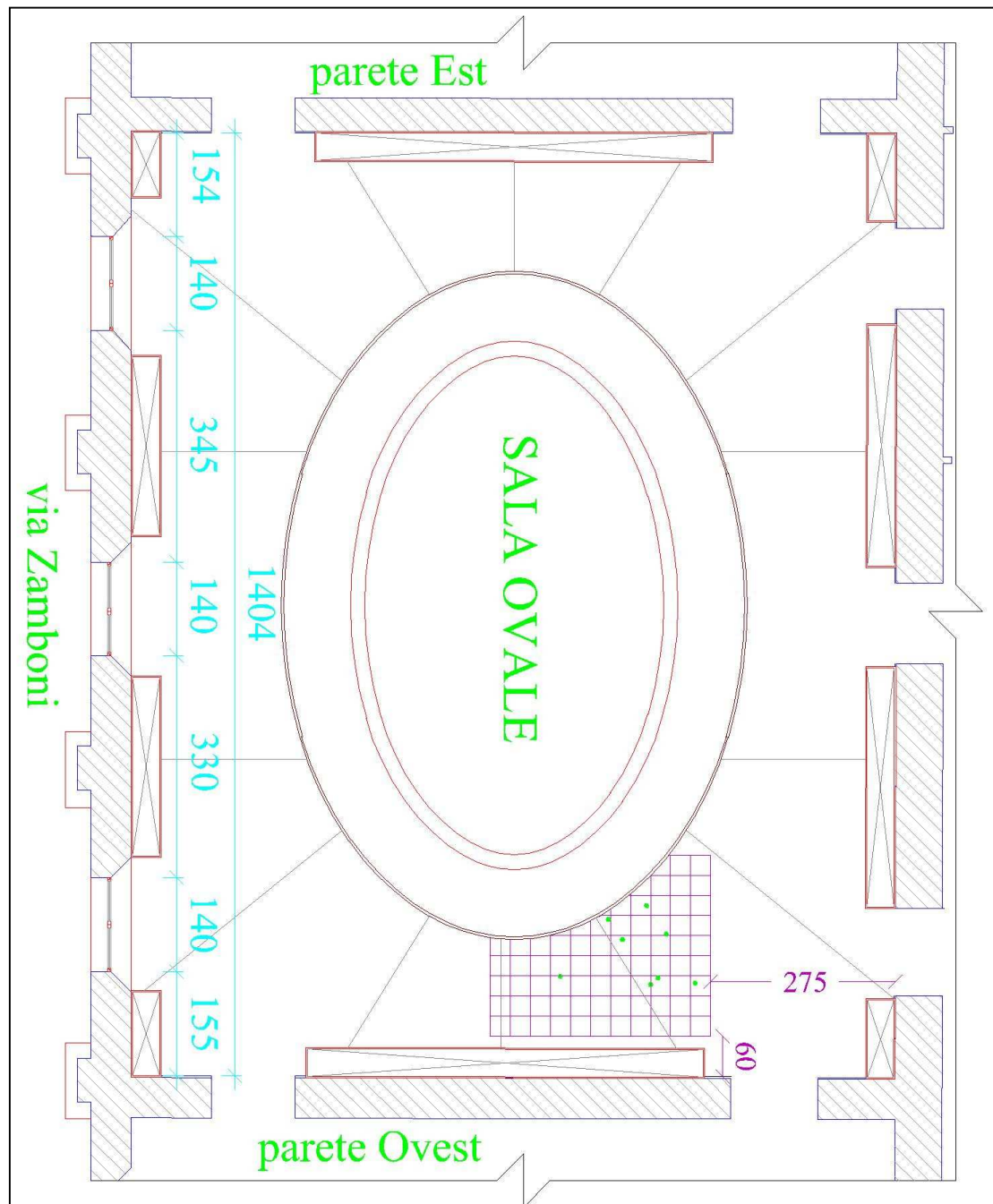
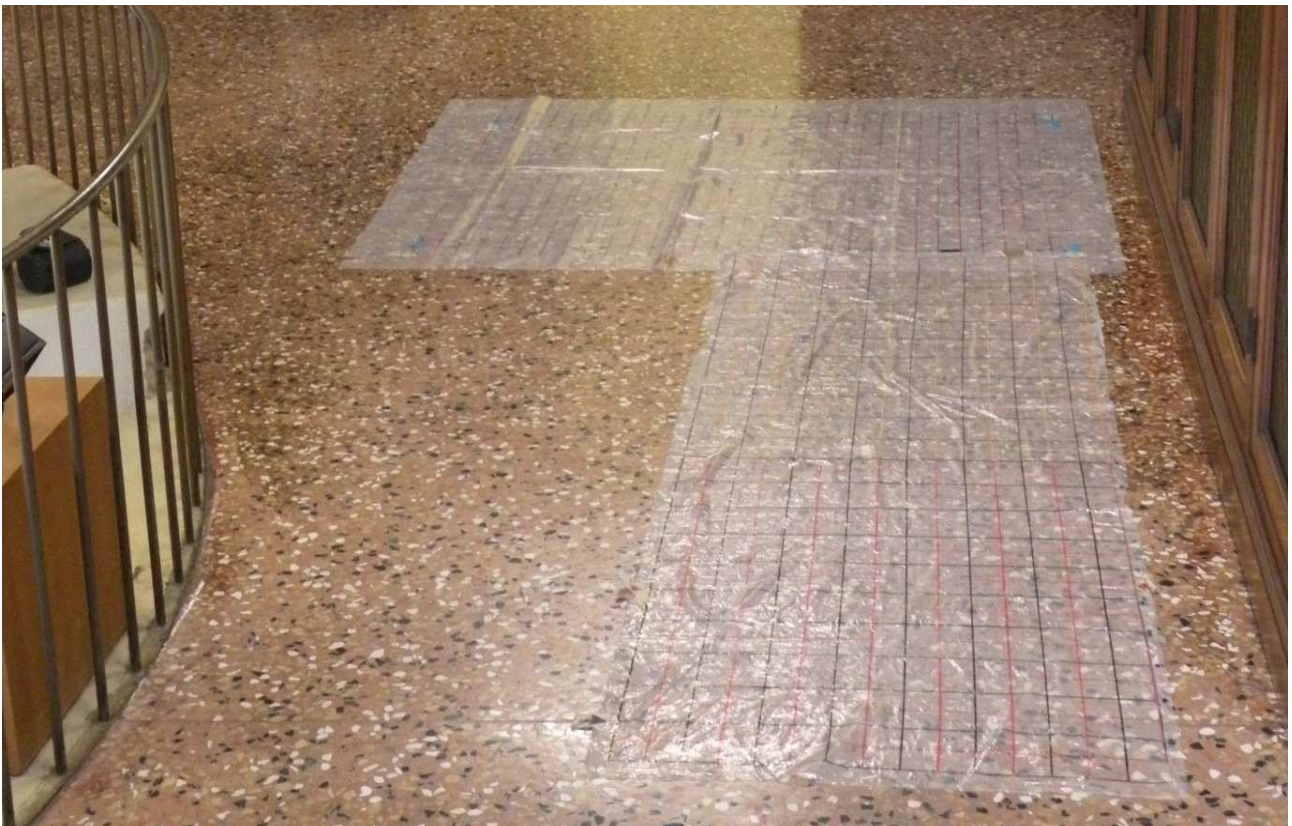


Figura 7.2 Disposizione della griglia d'indagine utilizzata per le prove con antenna da 900 MHz sul pavimento della sala dell'Ovale. I punti verdi rappresentano i fori di precedenti endoscopie.

La particolarità del solaio di questa sala ha richiesto un tipo di analisi differente rispetto quello eseguito nella sala Rossa infatti, in questo caso, le linee d'indagine sono state condotte secondo uno schema regolare: l'area analizzata ha una conformazione ad L e le due dimensioni principali misurano rispettivamente 3,3m e 2,7m.

L'area d'indagine è posta nella zona Sud-Ovest della sala (Figura 7.2) ed in prossimità dell'apertura ovale in quanto in questo settore erano già state condotte analisi endoscopiche che non erano riuscite ad individuare le caratteristiche del solaio.



*Figura 7.3 Griglia radar utilizzata nelle indagini del solaio della Sala dell'Ovale: si osservano i due teli disposti ad L che sono serviti come riferimento per la griglia eseguita che è di dimensioni maggiori.*

La griglia rappresentata in Figura 7.3 è stata utilizzata come riferimento per realizzarne una dalle dimensioni maggiori: infatti, il telo disposto in direzione Nord-Sud misura 210 x 75 cm mentre quello in direzione ortogonale misura 120 x 145 cm permettendo di realizzare una L di dimensioni 330 x 145 cm mentre le linee realizzate misurano 330 x 270 cm (Y – X). Per poter eseguire tutte le linee registrate è stato necessario percorrere delle traiettorie anche al di fuori dei due teli (Figura 7.4). Sui teli sono disegnate delle linee tra loro ortogonali.



*Figura 7.4 Istante di acquisizione dei dati: si nota il passaggio dell'antenna al di fuori dei teli per realizzare l'intera griglia di studio.*

I teli posizionati sulla pavimentazioni sono serviti inoltre al posizionamento dei mark: evidenziando le linee aventi passo di 30 cm è stato possibile inserire i mark in corrispondenza di queste consentendo di realizzare dei radargrammi con dei riferimenti distanziometrici; questa procedura è stata necessaria per poter realizzare un modello tridimensionale con i file raccolti.

Prima di procedere con l'acquisizione dei dati è stato necessario settare la strumentazione radar i cui valori principali sono raccolti in Tabella 7.1

*Tabella 7.1 Riepilogo delle impostazioni eseguite sull'unità di controllo per le analisi effettuate nella sala Ovale*

<b>PARAMETRI GPR</b>	
T Rate (KHz)	100
Mode	Time
Samples	1024
Format (bits)	16
Range (ns)	40
Diel	6
Gain (dB)	-12
	53
Rate	64
Scan/unit	200
Offset (ns)	-3.12
Surface (%)	0



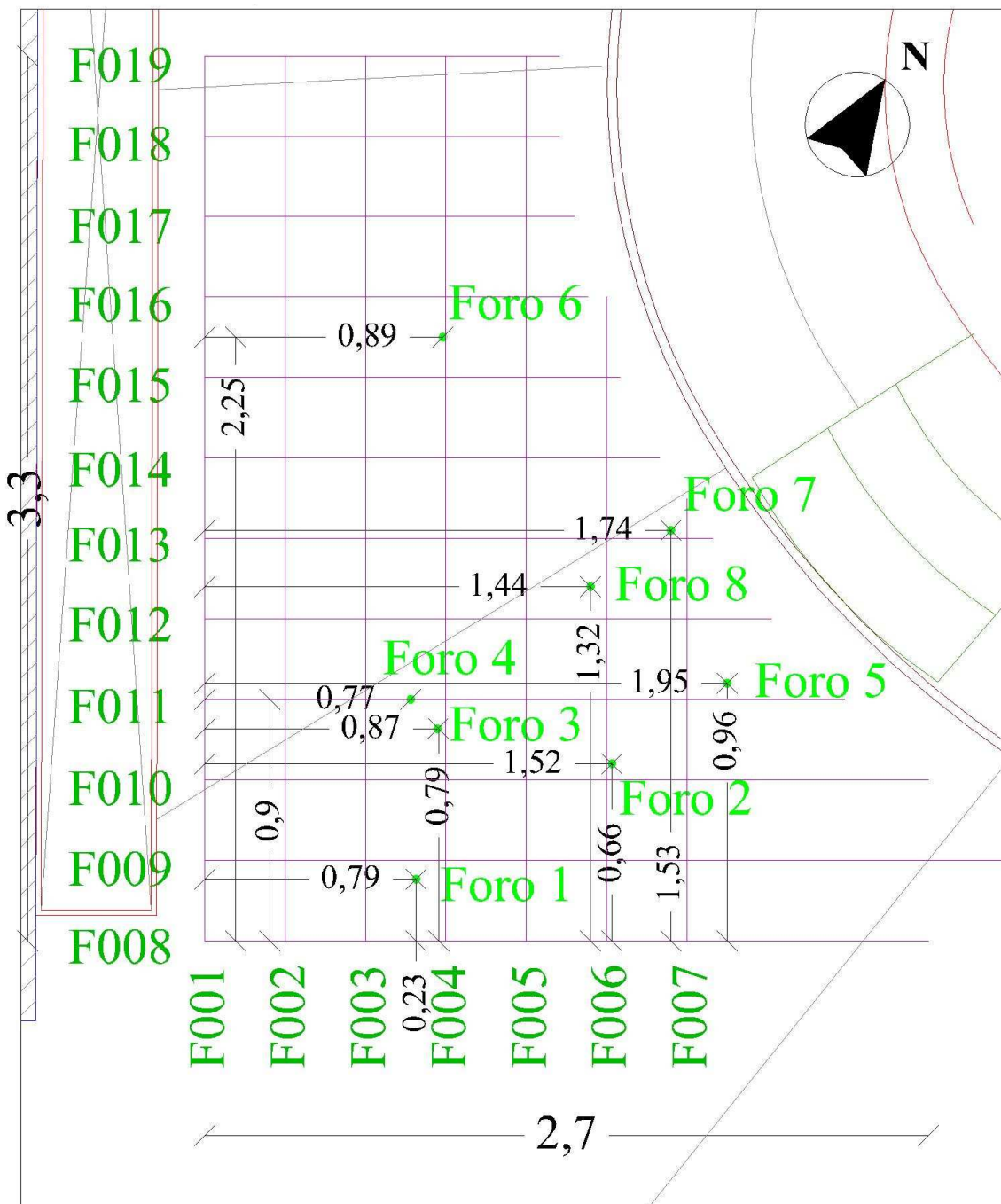


Figura 7.5 Dimensioni della griglia e posizione dei fori eseguiti per endoscopia

Prendendo come origine degli assi cartesiani l'estremo della griglia più vicino alla porta nell'angolo a Sud-Ovest e facendo corrispondere ai lati principali della maglia che corrono parallelamente alle pareti Sud e Ovest rispettivamente gli assi x ed y, le linee di rilievo sono percorse con direzione Ovest-Est per l'asse x e Sud-Nord quello y (Figura 7.5).

Le prime linee eseguite sono quelle disposte parallelamente alla parete Ovest; trascinando l'antenna lungo le direzioni stabilite, sono stati posizionati i Mark in corrispondenza delle linee della maglia

poste in direzione ortogonale a quelle percorse in modo tale da ottenere una suddivisione del fil con passo di 30cm.

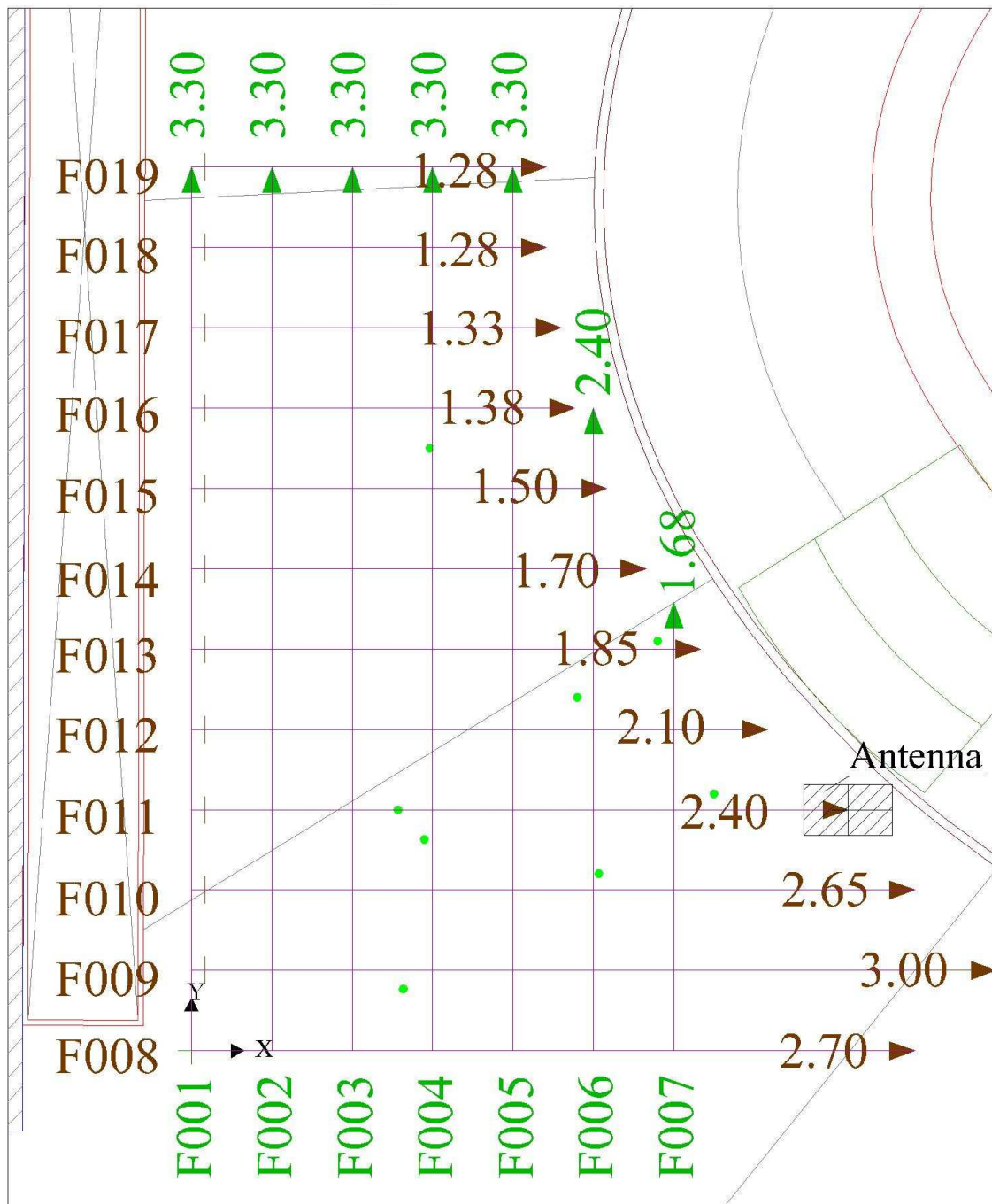


Figura 7.6 Lunghezze e nome dei file registrati nella prova radar GPR della sala Ovale di Palazzo Malvezzi

A causa dell'apertura presente nel solaio, i percorsi presentano degli sviluppi rettilinei decrescenti spostandosi verso il centro della stanza che vanno da un massimo di 3,3 m ad un minimo di 1,8 m; similmente nella direzione ortogonale dove lo sviluppo delle linee è compreso tra 2,7m e 1,28m

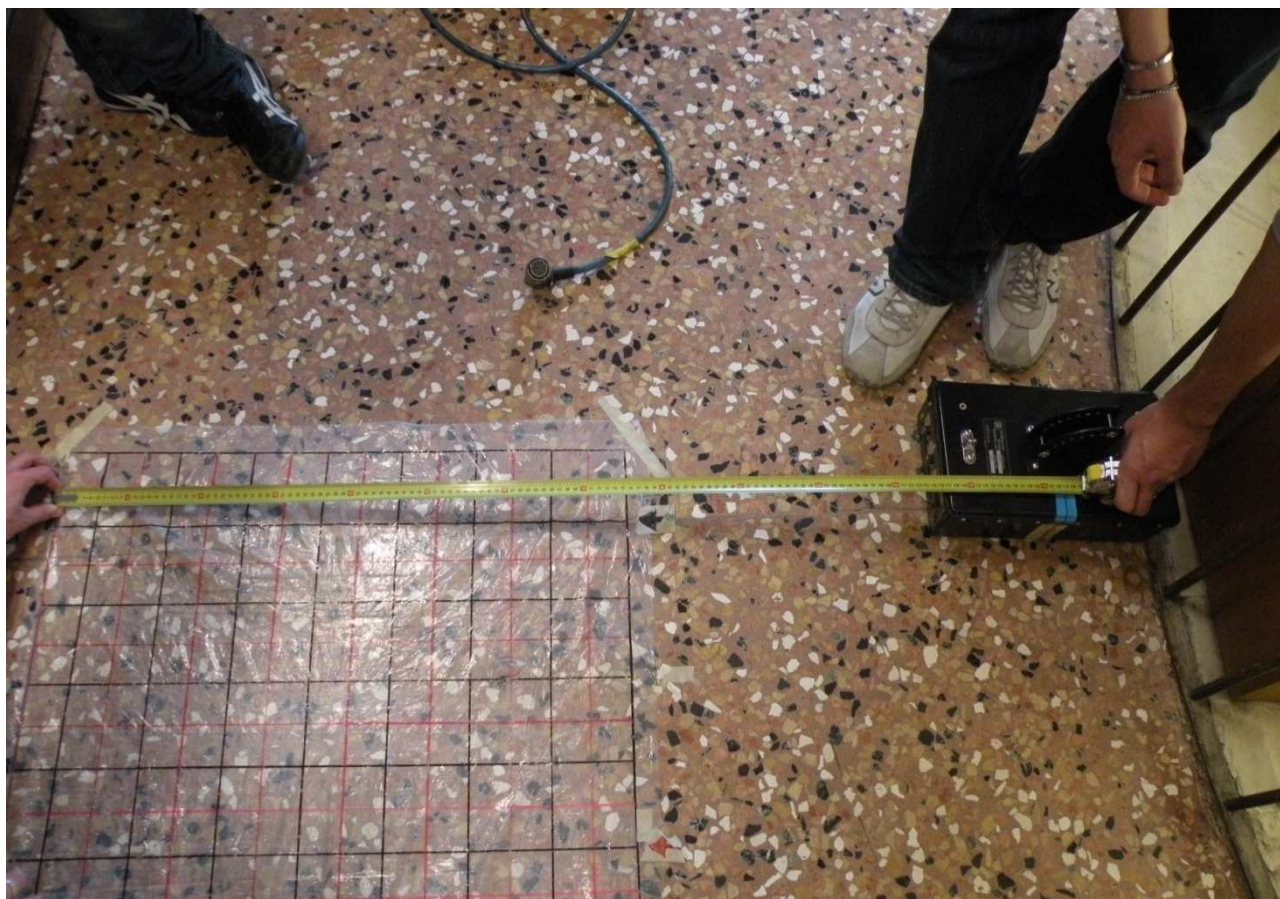
(Figura 7.6). Per i file 009-019 eseguiti in direzione Ovest-Est è stato necessario spostare il centro antenna a 0,05 m dal limite Ovest della griglia a causa del mobilio presente all'interno della sala che non ha consentito il corretto posizionamento dello strumento (Figura 7.7). Il file n.009 risulta più lungo delle linee 008 e 010: il giunto metallico presente nel solaio risulta essere posizionato al limite della linea 009 e per poterlo osservare nei radargrammi è stato necessario allungare il percorso di tale file (Figura 7.6).



*Figura 7.7 Punto di inizio di acquisizione del file 015: si osserva la presenza del mobile causa del non corretto posizionamento dell'antenna.*

Durante l'acquisizione dei dati, la polarizzazione dell'antenna è stata mantenuta verticale. Il numero totale dei file registrati in questa area è 19, sette in direzione Sud-Nord ed i restanti 12 nella direzione ortogonale. La lunghezza delle linee eseguite su questo solaio è calcolata in base alla lunghezza del percorso effettuato dal centro dell'antenna (Figura 7.8).





*Figura 7.8 Fase di rilevamento della lunghezza delle linee di rilievo radar*

#### **7.4 Elaborazione e visualizzazione dei dati**

L'elaborazione dei dati raccolti in questa sala ha previsto due differenti fasi di studio: nella prima fase è stata eseguita un'elaborazione dei singoli file bidimensionali, mentre nella seconda è stata eseguita la procedura per la creazione di un modello tridimensionale.

La prima fase non verrà descritta in quanto l'analisi è simile a quella effettuata per i file raccolti nella Sala Rossa e si rimanda a tale capitolo per la descrizione dei dettagli delle funzioni applicate mentre qui verranno riportati i valori a queste assegnati (Tabella 7.2).

Non avendo modificato i parametri di settaggio dell'unità digitale di controllo durante la fase di acquisizione dei dati, il valore attribuito alle singoli funzioni utilizzate nell'analisi bidimensionale è stato mantenuto costante per tutti i file.

La procedura eseguita per la creazione di un modello tridimensionale verrà invece descritta nel dettaglio indicando per ogni passo le funzioni utilizzate ed i valori a queste assegnati.



*Tabella 7.2 Riassunto dei valori attribuiti alle funzioni applicate ai file per la modifica bidimensionale*

File	Position Adjustment (ns)	Background removal (scan)	Gain (lineare 4 punti)
001-019	6.8	massimo	1.4; 3.5; 2.0; 1.0

Come per i file analizzati nella Sala Rossa, il valore massimo di scan attribuito al filtro FIR Background removal significa che questo viene applicato nella maniera più leggera possibile, eliminando cioè solamente quei segnali provocati da un disturbo.

#### **7.4.1 Analisi 3D**

Quando i dati sono raccolti secondo una griglia di linee parallele e ortogonali è possibile creare un modello tridimensionale dell'oggetto; questo requisito è di fondamentale importanza per operare le opportune interpolazioni nelle due direzioni d'indagine. Per ottenere dei buoni risultati è necessario che i dati vengano raccolti con l'ausilio di una survey wheel e che la maglia sia il più possibile regolare, ma in ogni caso il software permette adattamenti come nel caso di studio qui presentato.

##### **7.4.1.1 Distance Normalization**

Questa funzione, che rientra nella categoria delle modifiche 2D in quanto agisce su un singolo file bidimensionale, permette di scalare orizzontalmente i radargrammi raccolti senza l'ausilio di un odometro. La sua applicazione richiede che siano inseriti almeno due mark (quelli di inizio e fine file) e che vengano inseriti i parametri m/mark e scan/m ricavabili tramite software (il secondo) o tramite la geometria della griglia utilizzata nella raccolta dei dati (il primo).

Avendo inserito i mark ogni 30 cm, il valore attribuito al parametro m/mark è pari a 0,3 mentre il numero degli scan/metro deve essere valutato contando il numero di scan compreso in un metro di distanza, per procedere con questa operazione è necessario posizionare il cursore sopra gli scan corrispondenti a 0, 1, 2 e 3 m e leggere il rispettivo valore dello scan associato a questa posizione (Figura 7.9).

Calcolando la differenza tra i valori ricavati sul singolo metro (tra 0 e 1, tra 1 e 2, e tra 0 e 3) è possibile valutare tale parametro scegliendolo pari al minimo tra quelli calcolati. Inserendo questi parametri all'interno del file Header e del Box Distance Normalization è possibile far elaborare al software il radargramma per ottenerne uno ben scalato (Figura 7.10). Questa procedura elimina la parte di file al di fuori del primo e dell'ultimo mark presenti e può essere utilizzata al posto della funzione Select Box per tagliare le parti non significative del radargramma.

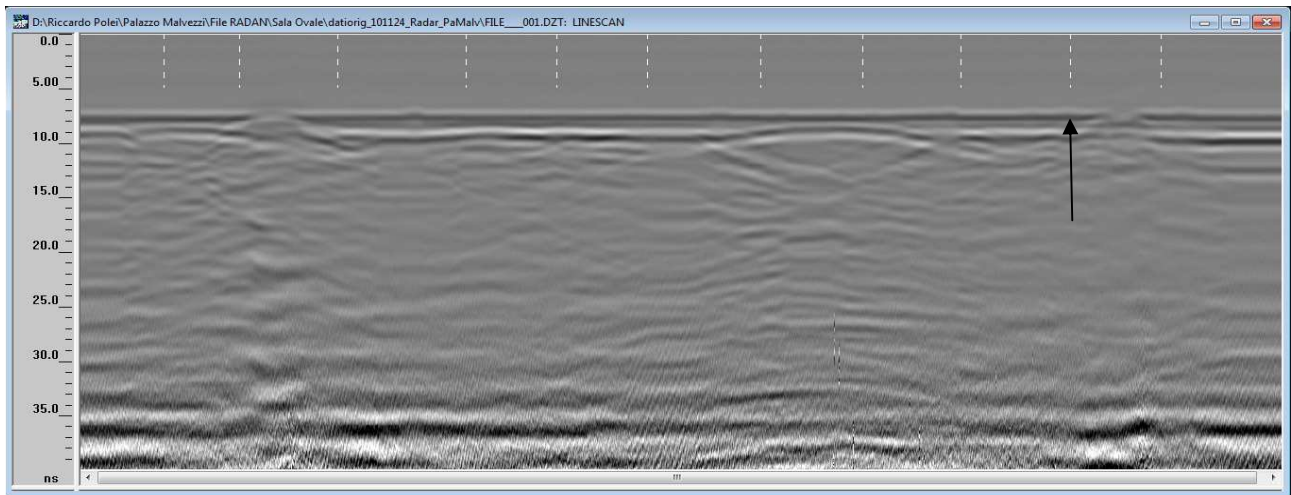


Figura 7.9 Valutazione del parametro scan/m per il File 001

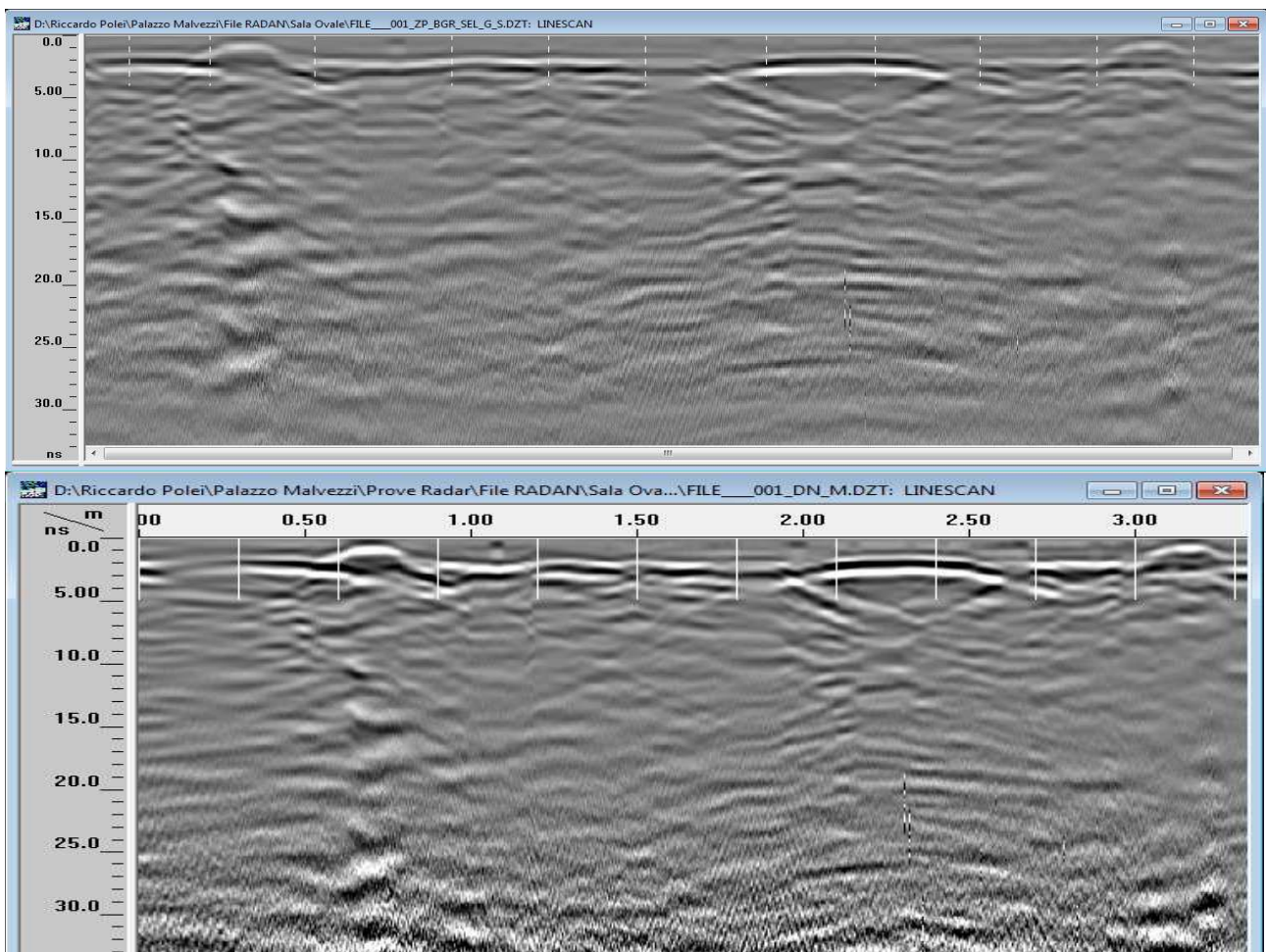


Figura 7.10 File 001: radargramma originale (in alto) e modificato tramite la funzione distance normalization (in basso).

Nel caso specifico, tutti i file raccolti per l'analisi di questo solaio sono sprovvisti di mark che indica il momento iniziale di trascinamento dell'antenna; questo ha creato problemi

nell'applicazione di questa funzione in quanto la posizione del mark iniziale è stata stimata solamente durante questa elaborazione. Questa procedura ha eliminato la parte dei radargrammi (quella posizionata al di fuori dell'ultimo mark) realizzando una griglia 3D leggermente più piccola rispetto a quella tracciata con il centro antenna.

*Tabella 7.3 Lunghezza delle linee radar: confronto tra distanza percorsa dal centro antenna e lunghezza del file utilizzato per il modello 3D.*

File	Lunghezza percorsa dal centro antenna	Lunghezza del file utilizzato per il modello 3D
001	> 3,30 m	3,30 m
002	> 3,30 m	3,30 m
003	> 3,30 m	3,30 m
004	> 3,30 m	3,30 m
005	> 3,30 m	3,30 m
006	> 2,40 m	2,40 m
007	> 1,50 m	1,50 m
008	> 2,70 m	2,70 m
009	> 3,00 m	3,00 m
010	> 2,40 m	2,40 m
011	> 2,10 m	2,10 m
012	> 2,10 m	2,10 m
013	> 1,80 m	1,80 m
014	> 1,50 m	1,50 m
015	1,50 m	1,50 m
016	> 1,20 m	1,20 m
017	> 1,20 m	1,20 m
018	> 1,20 m	1,20 m
019	> 1,20 m	1,20 m

#### **7.4.1.2 3D Project file**

Il sistema SIR-3000 consente in fase di acquisizione dati di registrare direttamente un unico file per tutta la griglia in esame per la creazione di un volume tridimensionale, ma nel momento in cui questo non viene realizzato al momento è necessario crearlo in seguito componendo i file delle singole linee e per procedere in questa maniera è necessario impostare tutti i dati della griglia.

Il primo passo da eseguire è quello di creare un file in cui sono contenute le informazioni riguardanti la geometria della griglia e i file associati alle singole linee; in questo modo il software è in grado di elaborare i dati per la creazione di un singolo file necessario per l'analisi 3D.

Creando un nuovo progetto 3D, viene richiesto tramite box di dialogo (3D Grid Option), di indicare le caratteristiche geometriche della griglia come la lunghezza massima delle linee, la distanza da queste coperta nella direzione ortogonale al loro sviluppo, la posizione dell'origine di riferimento, il numero di linee eseguite e l'orientazione delle linee d'indagine mentre l'interasse della griglia viene automaticamente calcolato utilizzando le informazioni riguardanti il numero totale di linee ed il loro ingombro trasversale. Questa operazione deve essere eseguita per tutte e due le direzioni d'indagine effettuate sulla griglia (Figura 7.11).

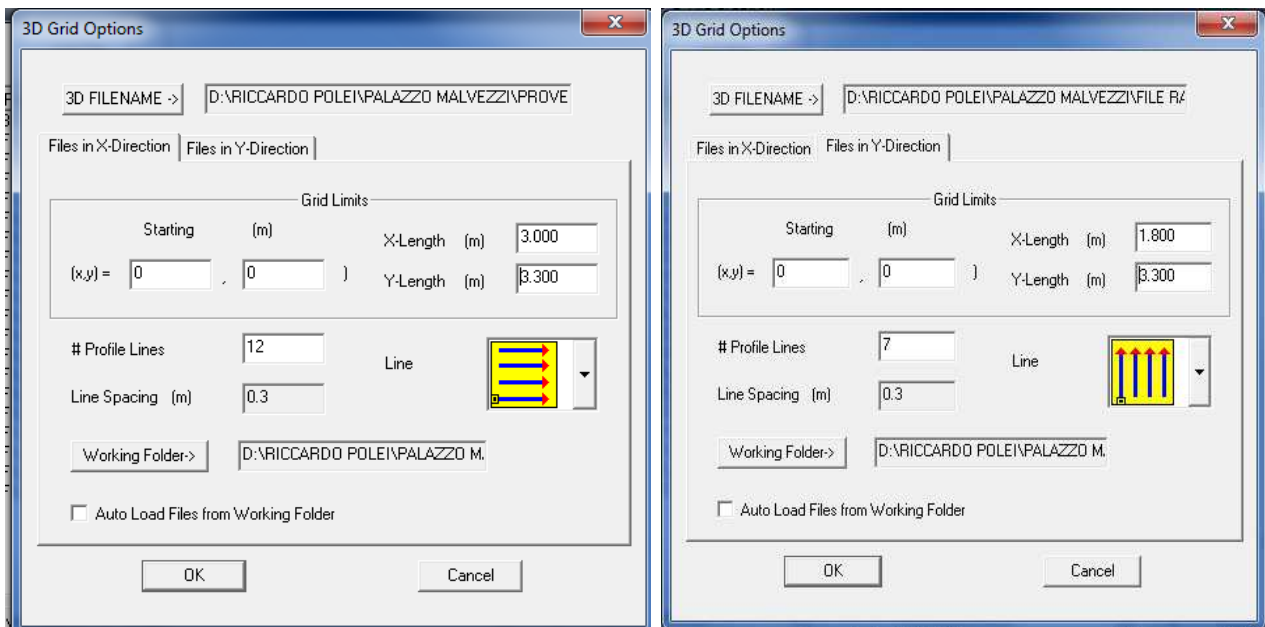


Figura 7.11 Box 3D Grid Option

Le linee eseguite sulla griglia della sala Ovale di Palazzo Malvezzi sono diverse nelle due direzioni principali per estensione, per ingombro laterale e per numero ed è stato necessario indicare queste variazioni in questo box: per la direzione X (Files in X-Direction corrispondenti alle linee condotte da Ovest verso Est) sono stati impostati i valori di 2,70 m come lunghezza massima (X-Length), 3,30 m come ingombro laterale (Y-Length) e 12 come numero totale di linee in questa direzione (# Profile Lines) mentre in automatico il software ha impostato come 0,30 m l'interlinea (Line Spacing), valore realmente utilizzato nella fase di acquisizione dei dati. Nella direzione ortogonale (Files in Y-Direction corrispondente alla direzione Sud-Nord) sono stati inseriti rispettivamente i

valori di 1,80 m, 3,30 m e 7; anche in questo caso è stato fornito automaticamente dal software il valore dell'interasse pari a 30 cm.

Terminata la preparazione della geometria è possibile procedere con l'associazione dei singoli file alle relative linee d'indagine: per procedere con questa operazione è necessario selezionare la linea a cui si vuole associare un file cliccando direttamente sulla linea stessa oppure utilizzando la finestra laterale del Box dove verranno posizionati tutti i file per la creazione della griglia. In questa fase il software consente di traslare l'origine della linea (Skip Distance), selezionare i punti di inizio e fine lettura del file esprimendo le distanze in metri (Start/End X/Y) ed è possibile visionare il file prima di associarlo alla linea. In ogni caso, tutte queste operazioni non sono univoche, è possibile cioè apportare modifiche al file contenente tutte le informazioni della griglia anche in un secondo momento.

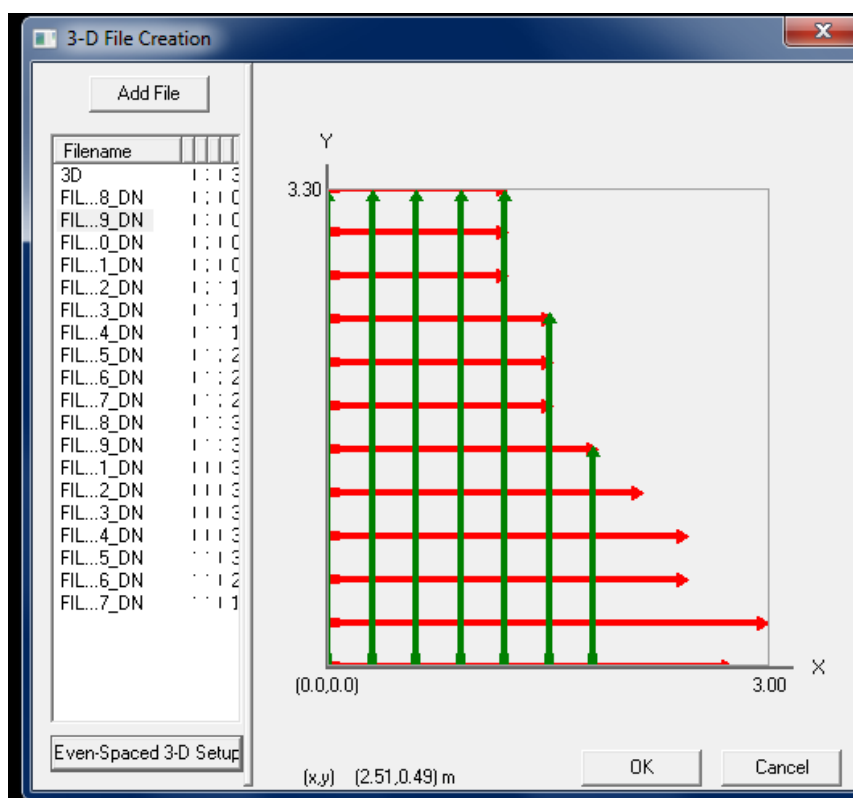


Figura 7.12 Griglia radar visualizzata con il software: associazione dei file alle linee di studio.

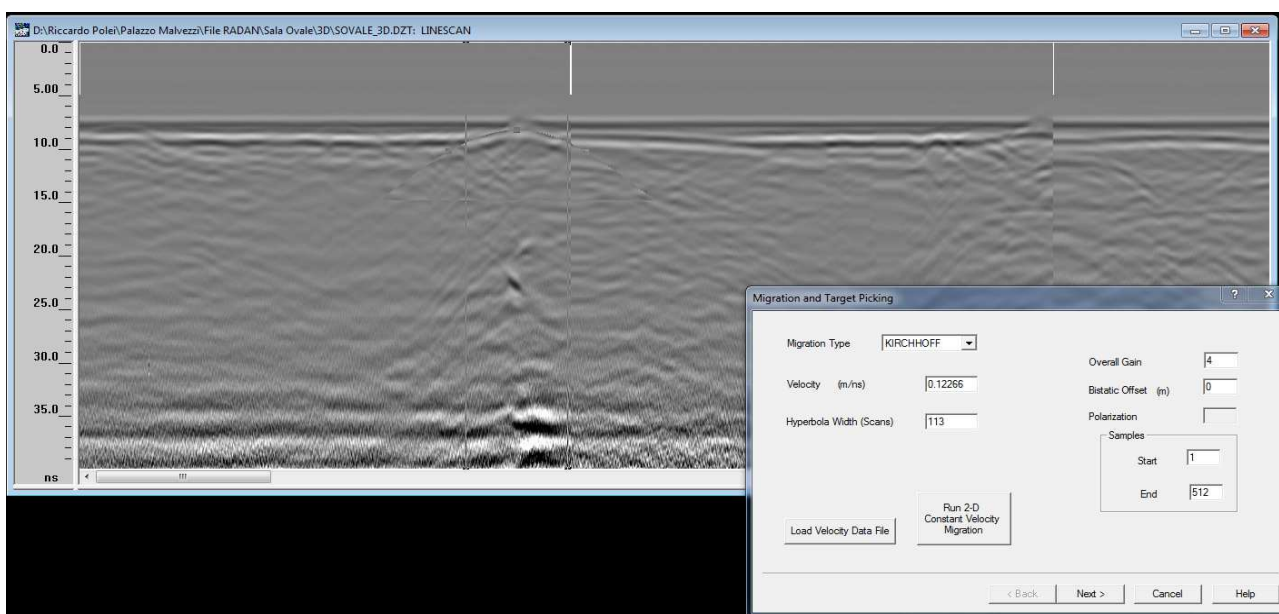
Nel caso di studio, per le linee in direzione Y (orientate secondo la direttrice Sud-Nord) non è stata apportata alcuna modifica ai vari file in quanto i punti di partenza risultano allineati con il limite inferiore della griglia, mentre per i file di estensione minore a quella massima il software provvede automaticamente ad accorciare le linee ad essi associate; invece, nelle linee registrate lungo la direzione X (orientate cioè da Ovest verso Est) è stato necessario modificare il punto di partenza di tutti i file spostandolo verso il centro della griglia di 5 cm a causa dell'arredamento presente nella

stanza che impediva il corretto posizionamento dell'antenna. In questo caso si è attribuito il valore di 0,05 al parametro Distance Skip. Solamente il primo file (008) in questa direzione non è stato modificato in quanto per questa linea si è potuto posizionare correttamente l'antenna.

Terminate queste operazioni preliminari, è possibile fare elaborare al software il file necessario alla composizione di un profilo tridimensionale cliccando sul tasto OK.

Come accade per l'analisi bidimensionale, anche l'elaborazione del file tridimensionale richiede l'applicazione di alcune delle funzioni descritte in precedenza in quanto per la creazione di quest'ultimo vengono utilizzati i file originali che necessitano di alcune modifiche per ottenere un buon risultato nella visione 3D. Vengono ora riportate le principali trasformazioni a cui viene sottoposto un file tridimensionale

### 7.4.1.3 Migration



*Figura 7.13 Strumento Migration: nella finestra a sinistra si osserva la procedura grafica di adattamento dell'iperbole fantasma mentre quella a destra raccoglie le principali informazioni.*

L'utilizzo di questa funzione risulta molto utile nell'analisi in quanto consente di eliminare o ridurre le diffrazioni iperboliche presenti nel segnale e fornisce una stima rapida della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche e della costante dielettrica del mezzo investigato. Ogni oggetto che produce una riflessione crea sotto di esso un cono d'ombra all'interno del quale si possono nascondere altri segnali coperti da quello più superficiale: la funzione migrazione produce un collasso delle iperboli e delle loro code consentendo la visione di eventuali segnali posizionati più in profondità. Questo strumento utilizza un'iperbole fantasma che deve essere adattata geometricamente ad un segnale reale presente nel radargramma: innanzitutto è necessario far



corrispondere i vertici delle due iperboli (quella reale e quella fantasma) per poi proseguire con l'aggiustamento della forma della seconda sulla prima e terminare individuando la larghezza massima del segnale. Tutte queste informazioni vengono inserite graficamente mentre in una seconda finestra compaiono le principali informazioni riguardanti questa funzione (Figura 7.13). Terminata questa operazione, il software elaborerà il segnale facendo collassare le iperboli in un unico punto.

## 7.5 Interpretazione dei dati

L'interpretazione dei dati raccolti in questa sala ha previsto due fasi di studio: la prima eseguita sui singoli file bidimensionali, la seconda sul modello tridimensionale realizzato.

Nel primo caso, avendo elaborato i dati tramite la funzione Distance Normalization, è stato possibile ricostruire la posizione esatta delle riflessioni individuate inserendo i risultati in un disegno, mentre nel secondo si è osservato la disposizione delle riflessioni nello spazio.

### 7.5.1 dati bidimensionali

I primi file analizzati sono quelli disposti secondo la direzione Sud-Nord; osservando questi radargrammi è stato possibile notare innanzitutto la riflessione superficiale provocata dai giunti metallici presenti nella pavimentazione della Sala dell'Ovale. Queste riflessioni sono facilmente distinguibili in quanto provocate da elementi metallici (quindi fortemente riflettenti) e posizionate superficialmente nei radargrammi (A in Figura 7.14).

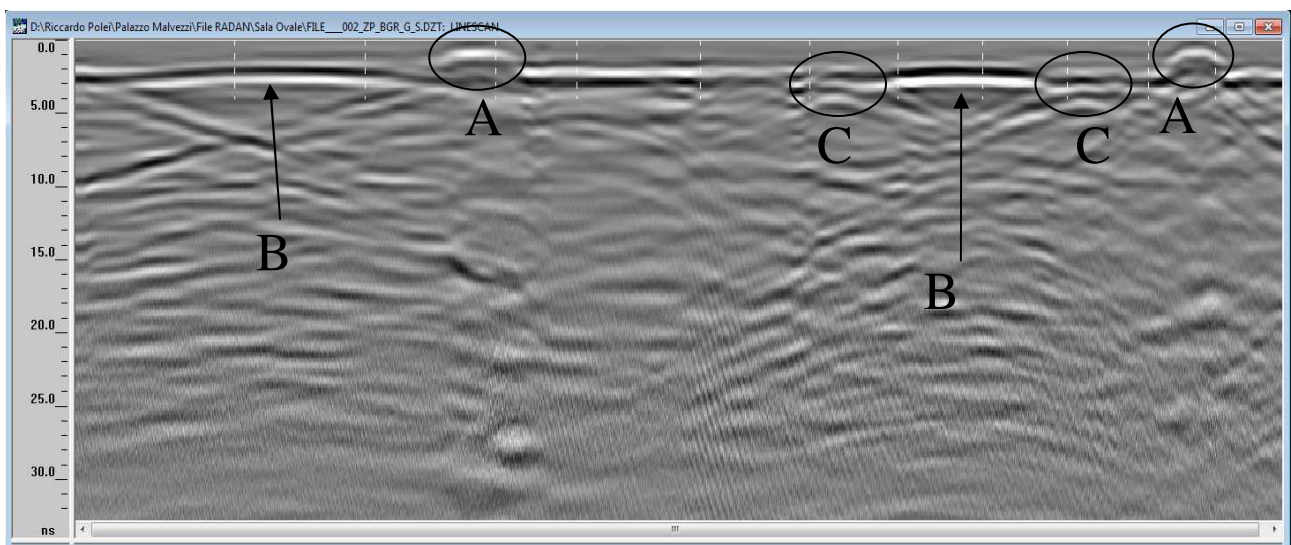


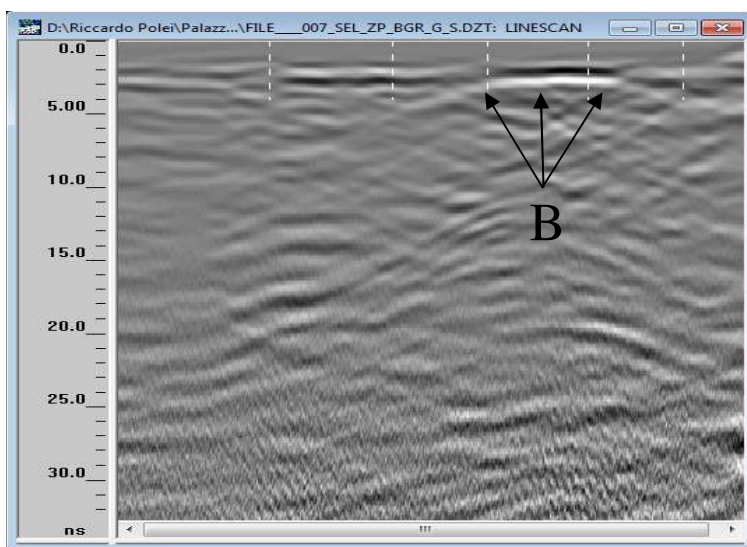
Figura 7.14 File 002, linea Sud-Nord: è possibile osservare le riflessioni superficiali (A), le due "voltine" a 2ns (B) e le iperboli a 3ns (C).



Leggermente più in basso, a circa 2 ns di profondità, sono state osservate diverse struttura a volta aventi estensioni diverse a seconda della loro posizione presentando uno sviluppo decrescente spostandosi dalla parete Ovest verso il centro della sala (B in Figura 7.14).

Al termine ed all'inizio di tali elementi è stato possibile osservare in alcuni casi la presenza di altre riflessioni posizionate al di sopra della parte terminale delle volte precedentemente descritte (C in Figura 7.14).

Queste riflessioni sono visibili per tutti i radargrammi realizzati in questa direzione con la sola differenza che nei file più corti (006 e 007) è possibile notare solamente la presenza di una volta mentre nelle altre sezioni radar ne sono visibili due.

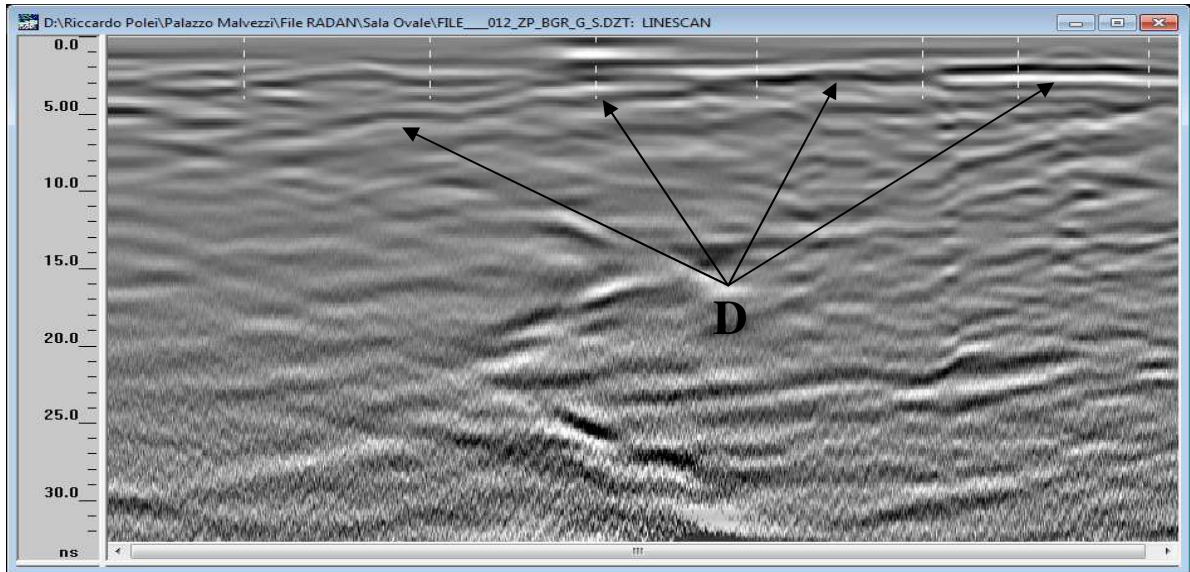


*Figura 7.15 File 007 sezione radar eseguita in direzione Sud-Nord: la linea, essendo più corta, presenta la visione di un solo elemento a volta (B).*

Osservando i radargrammi collezionati in questa direzione è risultato impossibile osservare la presenza dell'intradosso della volta.

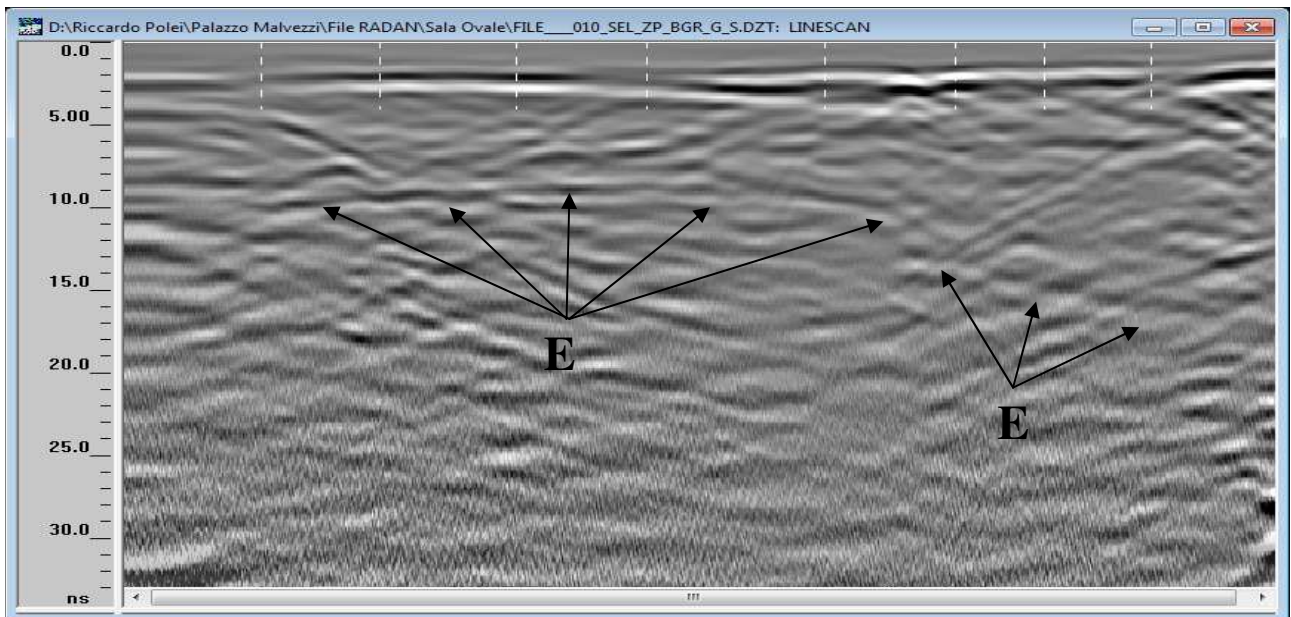
Dalla conformazione e dalla posizione di questi elementi è possibile presumere che il solaio della Sala dell'Ovale sia costituito da elementi portanti a volta (B in Figura 7.14) e che al termine di questi siano presenti degli elementi strutturali di rinforzo (C in Figura 7.14) su cui appoggiano gli elementi principali (B).

Analizzando i file eseguiti nella direzione opposta è stato possibile osservare ancora la presenza delle volte individuate nei file 001-007, dei sostegni posizionati accanto a queste e dei giunti metallici presenti nel pavimento; gli elementi visibili, tranne per i giunti metallici, sembrano avere uno sviluppo maggiore rispetto a quelli individuati nella direzione ortogonale. Questo sembra indicare che la sezione radar è eseguita trasversalmente rispetto gli elementi a volta precedentemente individuati (Figura 7.16).



*Figura 7.16 File 012: è possibile osservare lo sviluppo dell'elemento a volta (D). Il suo profilo risulta essere più allungato rispetto quelli individuati nei file salvati in direzione Ovest-Est.*

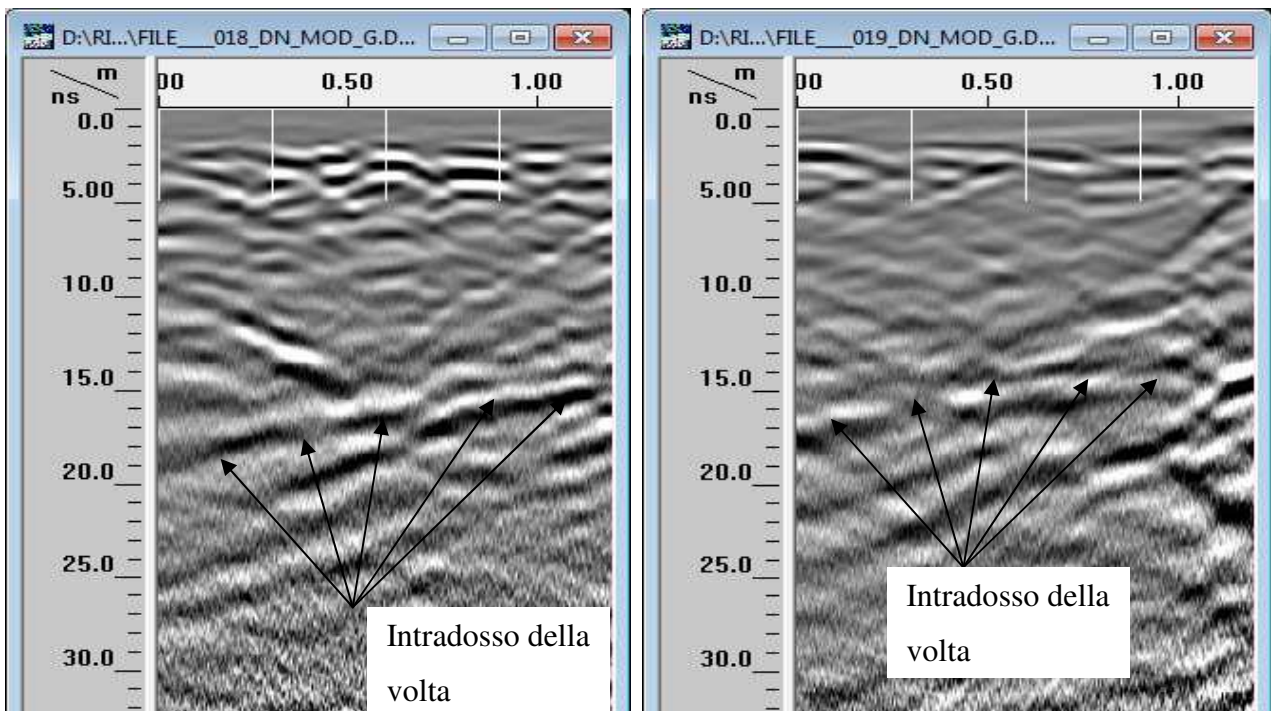
Dai file raccolti in questa direzione è possibile notare la presenza di segnali posti più in profondità rispetto a quelli superficiali già descritti ed il profilo di tali riflessioni tende a riprodurre quello delle volte superficiali. La posizione di questi piani all'interno del radargramma, risulta al di sotto delle volte superficiali, e presentano un andamento continuo posizionato a circa 10 ns di profondità mentre al di fuori di questi la loro posizione è spostata più in profondità (Figura 7.17).



*Figura 7.17 File 010: si osserva il profilo della riflessione posizionata al di sotto della volta superficiale (E).*

La diversa posizione del piano potrebbe essere spiegata pensando che al di sotto della volta è presente aria ed il segnale elettromagnetico risulta più veloce mentre terminata la volta, il segnale rallenta la sua velocità di propagazione incontrando un mezzo con proprietà dielettriche peggiori dell'aria e questo provoca uno slittamento del segnale verso il basso come mostrato in Figura 7.17. Questo fenomeno potrebbe indicare chiaramente il punto in cui termina la volta ed inizia la parte di riempimento del solaio.

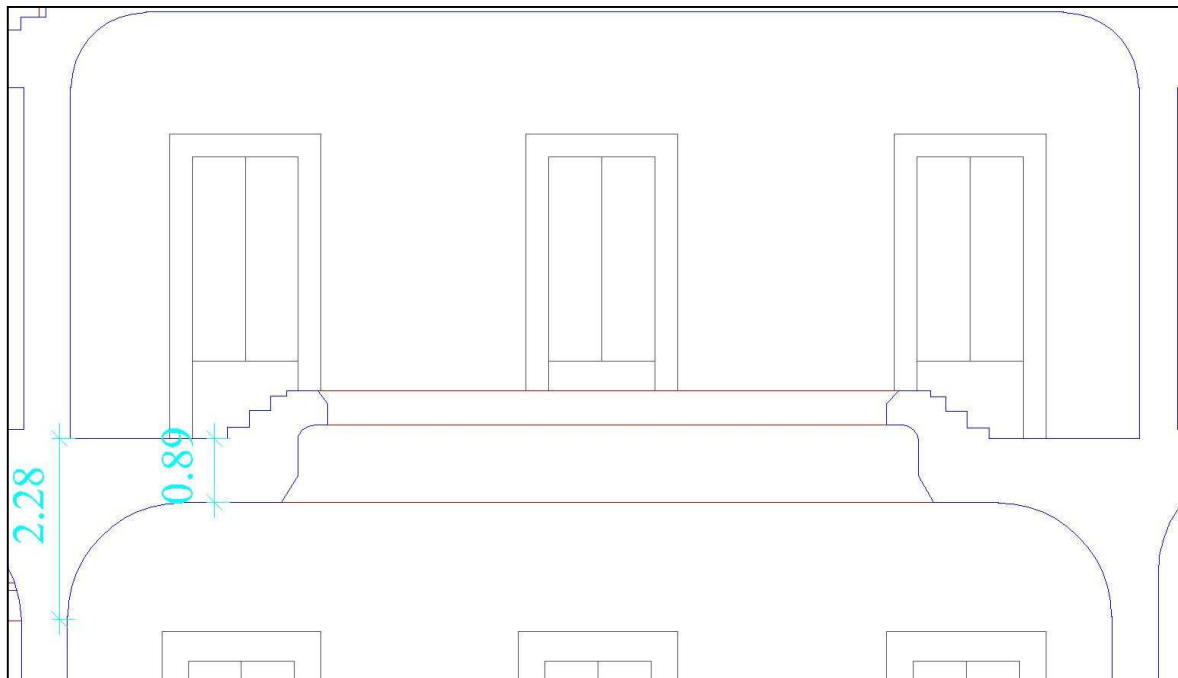
L'intradosso della volta non risulta chiaramente visibile nei file analizzati tranne che per i radargrammi n.°18 e19 realizzati nella parte centrale della Sala dell'Ovale; in queste sezioni, aumentando notevolmente il gain nelle zone d'interesse, è stato possibile osservare una curva che potrebbe rappresentare l'intradosso cercato (Figura 7.18).



*Figura 7.18 File 018 e 019: dall'analisi di questi radargrammi corrispondenti a due sezioni adiacenti è possibile notare la presenza di una curva compresa tra 14 e 19 ns di profondità.*

Nella sezione radar 018, quella realizzata più a Sud, la posizione di questa riflessione ad inizio radargramma è situata ad una profondità maggiore rispetto a quella del file 019: questo fenomeno è spiegabile pensando alla posizione delle sezioni radar. Il profilo della volta tende ad alzarsi spostandosi dalle pareti al centro della sala e conseguentemente la profondità dell'intradosso risulta ad una profondità via via minore.

Dagli elaborati grafici provenienti da Capobianchi, 2009 è possibile notare che lo spessore della volta varia tra 2,28 m in corrispondenza delle pareti perimetrali e 0,89 m in prossimità del foro ovale.



*Figura 7.19 Sezione del solaio della Sala dell'Ovale: spessore massimo e minimo della volta nella sezione Ovest-Est.*

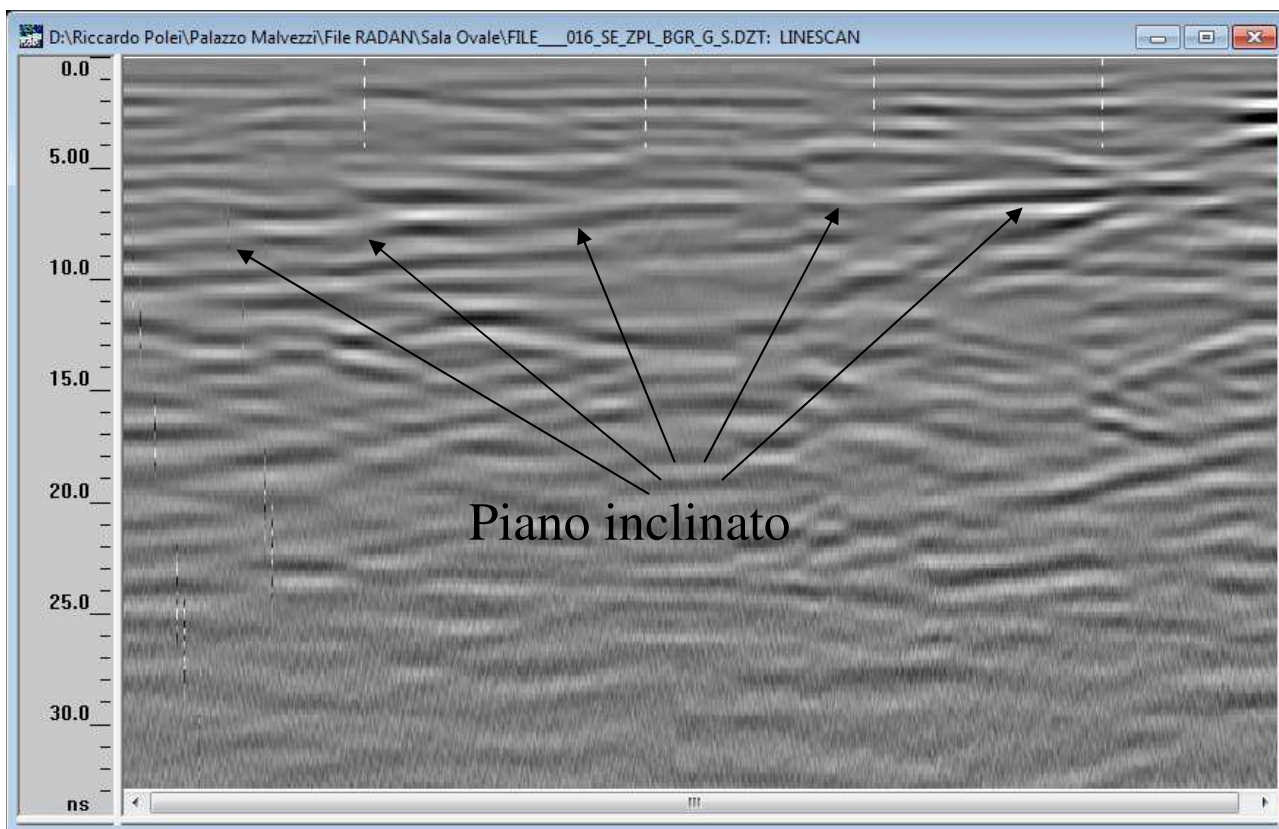
Come osservato nei radargrammi n.°018 e 019, la visione dell'intradosso della volta dovrebbe essere posizionata a 14 ns di profondità in prossimità del foro ovale e considerando che lo spessore della volta in questo punto è di circa 0,84 m, è stato possibile calcolare la velocità del segnale che in questo caso corrisponde a:

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 0,89}{14} = 0,127m/ns$$

valore di velocità plausibile per le condizioni ambientali in cui si trova il solaio (materiali secchi, situati in ambienti privi di umidità con valore della costante dielettrica tra 6 e 9).

L'analisi degli altri radargrammi ha evidenziato la presenza di piani inclinati situati a diverse profondità, ma la loro posizione risulta piuttosto isolata non essendo visibili nella altre sezioni radar; ad esempio, nel file 016 è possibile osservare un piano inclinato compreso tra 9 e 6 ns di profondità, ma risulta difficile indicare che tipo di struttura possa rappresentare in quanto questa riflessione qui nettamente visibile non è presente nelle sezioni radar adiacenti.





*Figura 7.20 Radargramma corrispondente alla linea 016: si osserva il piano inclinato compreso tra le profondità di 9 e 6 ns.*

La funzione Distance Normalization applicata ai file raccolti in questa sala ha consentito di realizzare una tavola della griglia radar con inserite le posizioni esatte delle riflessioni individuate; in questo elaborato grafico sono state inserite le volte osservate nella parte più alta dei radargrammi, i sostegni di queste ed i giunti metallici.

Utilizzando il software Radan 6.6 è stato possibile individuare con esattezza il punto iniziale e finale di queste riflessioni posizionando il cursore sul punto d'interesse: il software fornisce istantaneamente la posizione del cursore espressa in metri. Per le volte ed i sostegni individuati sono state indicate le posizioni del culmine, del punto iniziale e di quello finale del relativo segnale mentre per i giunti metallici a pavimento è stata indicata la posizione del culmine dell'iperbole corrispondente. Nella Tabella 7.4 vengono riportati i valori in questo modo individuati.

Tabella 7.4 Posizione dei giunti, volte e sostegni ricavate tramite software RADAN 6.6

nome file	Giunti			sostegno sx			1° Volta			sostegno dx			2° Volta			sostegno dx		
	1°	2°	3°	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a
001	0.69	3.14	*	*	*	0.96	0.37	0.06	0.96	*	*	1.91	2.31	1.95	2.73	2.71	*	*
002	0.84	3.19	*	*	*	0.85	0.39	0.03	0.85	*	*	1.85	2.32	1.98	2.64	2.73	*	*
003	1.03	3.21	*	*	*	0.96	0.55	0.13	0.96	x	x	1.99	2.33	2.07	2.62	2.61	*	*
004	1.24	3.27	*	*	*	1.08	0.7	0.28	1.08	x	x	2.46	2.46	2.17	2.66	2.75	*	*
005	1.35	3.23	*	0.45	*	1.18	0.83	0.55	1.18	x	x	2.09	2.45	2.21	2.71	2.86	*	*
006	1.71	*	*	0.72	*	1.28	1.04	0.74	1.28	*	*	2.19	*	2.32	*	*	*	*
007	*	*	*	*	*	1.42	1.15	0.85	1.42	*	*	*	*	*	*	*	*	*
008	2.43	*	*	*	*	2.65	2.43	2.08	2.65	*	*	*	2.57	2.22	2.84	*	*	*
009	2.64	*	*	*	*	0.9	0	0	0.9	*	*	*	*	*	*	*	*	*
010	*	*	*	*	*	1.41	0.78	0.14	1.41	*	*	*	*	*	*	*	*	*
011	0.4	*	*	0.89	*	1.88	1.45	0.88	1.88	*	*	*	*	*	*	*	*	*
012	0.91	*	*	*	*	2.13	1.84	1.52	2.13	*	*	*	*	*	*	*	*	*
013	1.36	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
014	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
015	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
016	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
017	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
018	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
019	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Le misure in tabella sono espresse in metri.

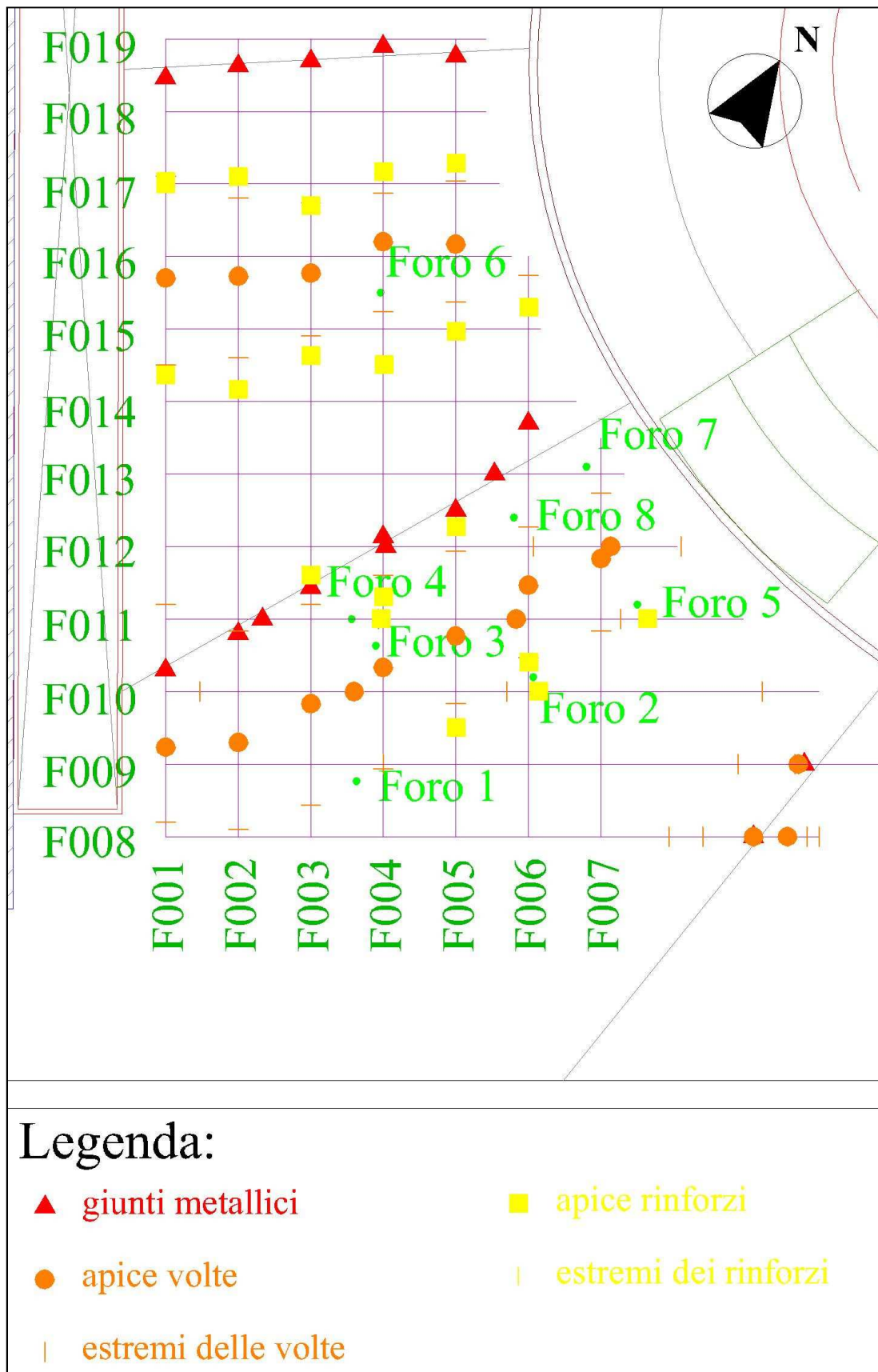


Figura 7.21 Riassunto delle riflessioni individuate nel solaio della sala dell'Ovale.



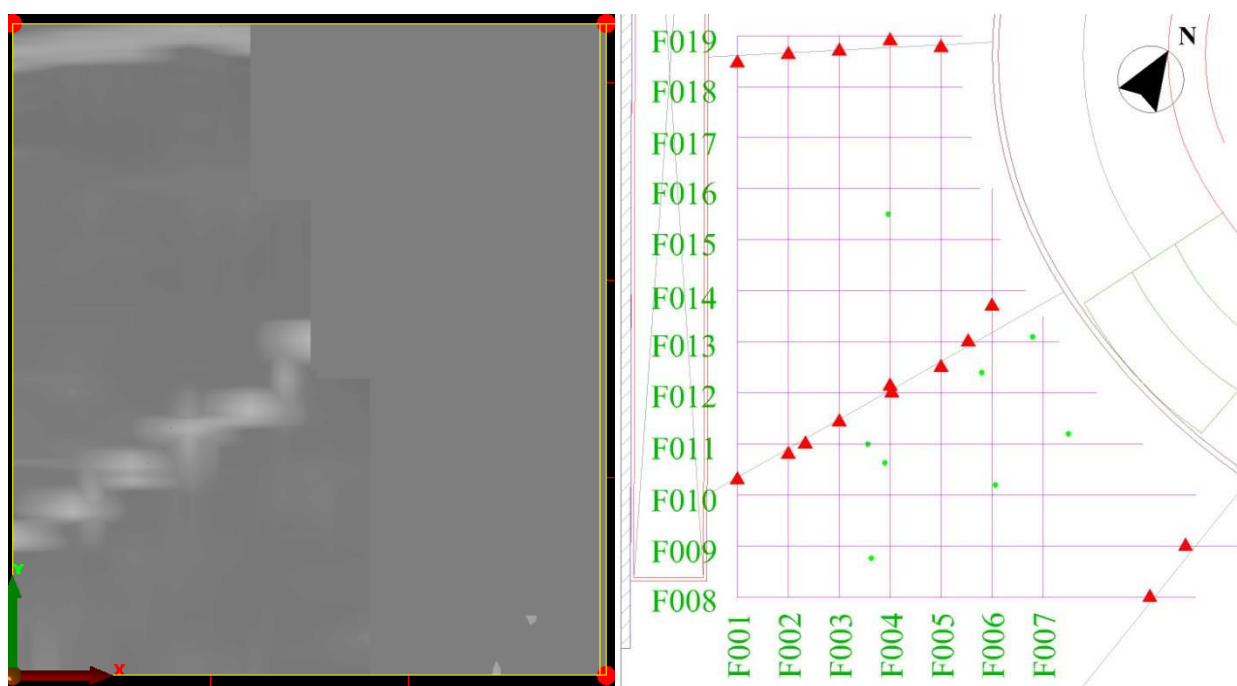
## 7.5.2 Modello tridimensionale

Il modello tridimensionale realizzato con i dati raccolti in questa sala ha permesso di osservare anche graficamente le riflessioni precedentemente rilevate nei file bidimensionali; nell'angolo Sud-Est del volume tridimensionale i dati non sono chiaramente visibili in quanto in questa zona non sono state eseguite le linee radar in direzione Sud-Nord che avrebbero consentito di elaborare correttamente i dati.

Nella parte superficiale del modello 3D è stato possibile osservare le riflessioni provocate dai giunti metallici a pavimento: il giunto posizionato nell'estremo Nord della griglia è visualizzato come un elemento continuo mentre il 2° elemento metallico è rappresentato come una serie di segnali tra loro intersecati (Figura 7.22). Tale differenza è provocata dalla diversa disposizione spaziale dei giunti metallici rispetto ai percorsi dell'antenna, circa ortogonale per il primo, diagonale per il secondo.

Nella zona Sud-Est, il giunto qui presente viene visualizzato solamente dalla presenza di due tracce separate tra loro.

Dalla Figura 7.21 e Figura 7.22 è chiara la corrispondenza delle riflessioni osservate.



*Figura 7.22 Sezione superficiale del volume tridimensionale ( $Z=0,06$  ns): si osservano le posizioni dei giunti metallici a pavimento.*

Analizzando le sezioni successive ed in particolare quella posizionata ad una profondità di 0,9 ns è stato possibile osservare la parziale scomparsa delle riflessioni provocate dai giunti metallici e la comparsa di quelle causate dagli elementi a volta presenti nel solaio (Figura 7.23).

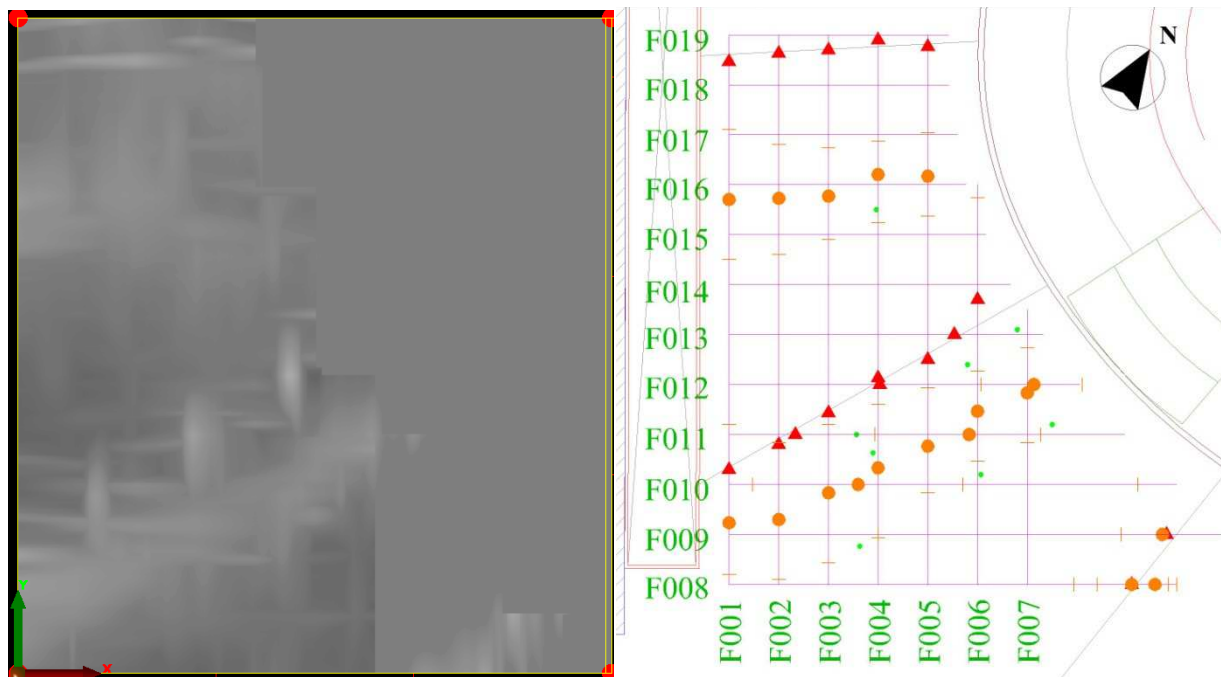


Figura 7.23 Modello 3D, sezione posizionata a 0,9 ns di profondità: si osservano ancora i giunti metallici. Sono inoltre presenti le riflessioni provocate dagli elementi a volta nel solaio.

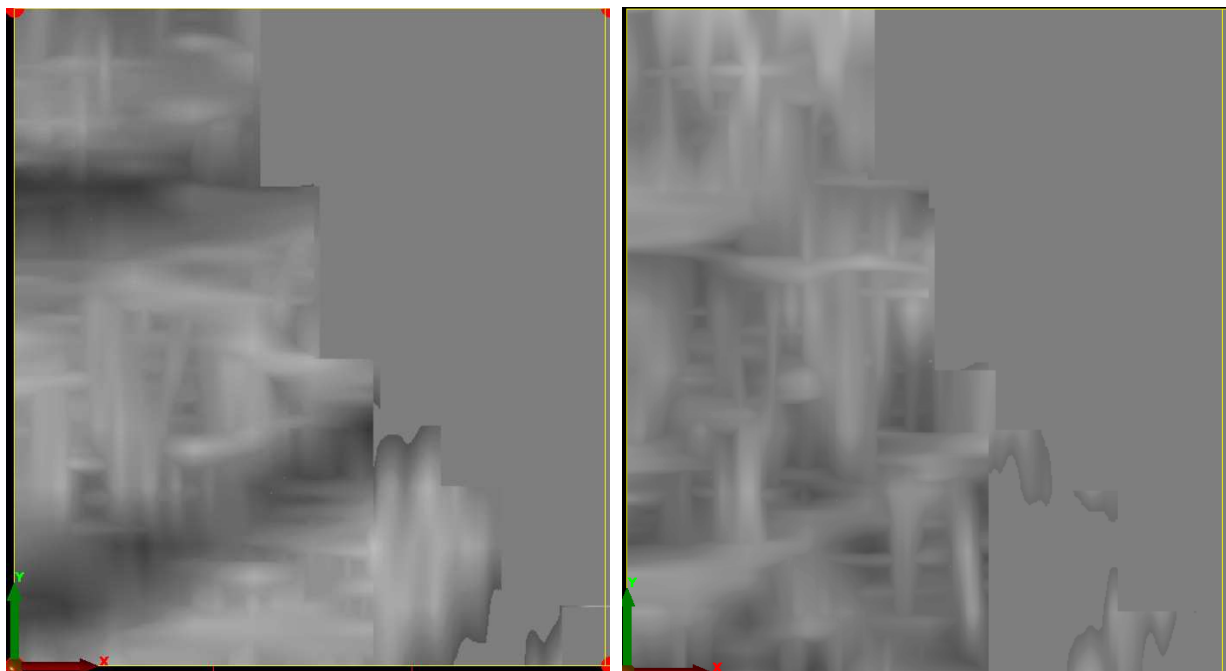
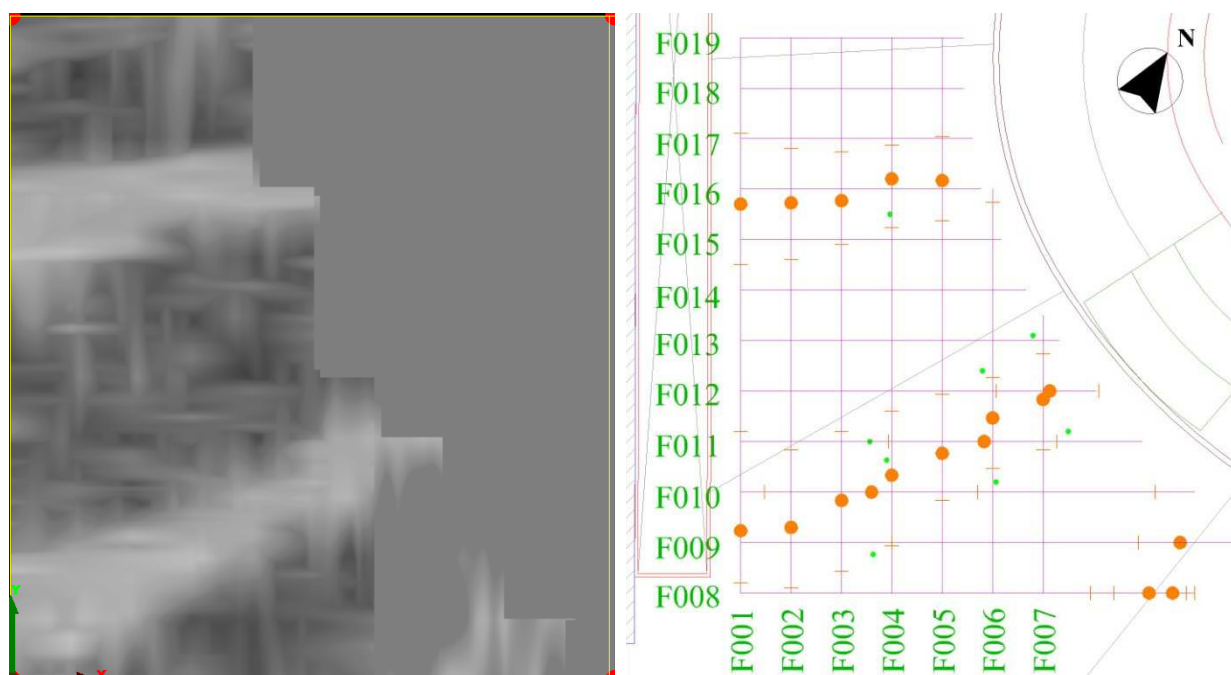


Figura 7.24 Sezioni successive ( $Z=1,3ns$  e  $Z=1,6ns$ ) del modello 3D: si nota come la riflessione delle volte sia meno netta nella sezione più profonda (a destra) rispetto a quella più superficiale (a sinistra).

Ancora una volta è possibile osservare la corrispondenza tra le riflessioni individuate nel volume tridimensionale e quelle inserite nella Figura 7.21.

Nelle sezioni successive è possibile notare una prima fase in cui le riflessioni delle volte tendono ad essere più evidenti perdendosi poi con altri segnali (Figura 7.24).

Dalla profondità di 1,7 ns è possibile tornare ad osservare con chiarezza la posizione delle volte di sostegno del solaio di questa sala mentre non è stato possibile notare le riflessioni posizionate al fianco delle volte stesse (i segnali individuati con la lettera “C” nell’analisi dei dati bidimensionali, Figura 7.14). Come già osservato nei file bidimensionali, anche dall’analisi del modello tridimensionale si nota che lo sviluppo trasversale degli elementi di sostegno del pavimento tende a diminuire spostandosi dalle pareti perimetrali verso il foro ovale (Figura 7.25).



*Figura 7.25 Sezione posizionata a 1,7 ns di profondità. Si osservano le volte disposte a raggiera e la loro conformazione, più larga verso l'esterno della sala, più stretta in corrispondenza del foro.*

## 7.6 Osservazioni e suggerimenti

Nella sala Ovale, l'utilizzo di una griglia si è dimostrato di notevole aiuto nell'individuazione dei segnali: infatti, potendo incrociare i dati provenienti da due direzioni ortogonali è possibile osservare e comprendere delle informazioni che in altra modalità sarebbero state trascurate o non compresi. L'utilizzo di una sola antenna non ha consentito una completa conoscenza del mezzo investigato, specialmente per gli strati più profondi che risultano leggibili solamente in alcuni casi, ma che nella maggioranza di questi non sono chiari.

Per approfondire la conoscenza sugli elementi strutturali presenti nel solaio di questa sala potrebbe essere utile ripercorrere le linee analizzate in questo lavoro utilizzando delle antenne a frequenza

minore, in modo tale da poter indagare con più chiarezza anche gli strati profondi oppure utilizzando antenne a frequenza maggiore per ottenere più informazioni riguardo i segnali superficiali già rilevati. Volendo studiare con maggiore precisione le strutture di sostegno di questa sala potrebbe essere indicato realizzare delle griglie radar con un maglia ancora minore rispetto a quella utilizzata in questa analisi: infatti, in alcune linee radar sono state individuate delle strutture non visibili in altri radargrammi (come indicato precedentemente per il file 016) e non è stato possibile quindi poter formulare ipotesi riguardo tali riflessioni.

## Capitolo 8

# SALA OVALE: INDAGINE DEL SOLAIO TRAMITE GPR RADAR (antenna Palm 2GHz)

---

### 8.1 Scopo delle prove

Lo scopo della prova non differisce da quello del capitolo precedente e si rimanda quindi a tale capitolo per la loro definizione.

### 8.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata in questa indagine è del tutto simile a quella utilizzata nel capitolo precedente tranne che per l'antenna utilizzata che risulta quella Palm 2 GHz.

#### 8.2.1 Antenna PALM

Questo tipo di antenna 2 GHz, a differenza di quelle descritte nel precedente capitolo, è dotata di *survey wheel* (odometro), strumento che consente di eseguire indagini più accurate: infatti, l'acquisizione dei dati avviene solamente se la ruota risulta essere in movimento consentendo così di ottenere dei radargrammi in cui la scala orizzontale delle distanze coincide con il percorso effettivo eseguito dall'antenna. Le indagini svolte con questa strumentazione consentono di individuare con esattezza la posizione delle riflessioni individuata sul radargramma generato.

La frequenza centrale di questa antenna ( $f_c=2000MHz$ ) risulta essere maggiore rispetto quelle utilizzate nelle precedenti indagini e permette quindi una migliore risoluzione e un livello di dettaglio superiore; ipotizzando una velocità del segnale di circa 0,1m/ns e ricordando la relazione che lega velocità, frequenza e lunghezza d'onda del segnale

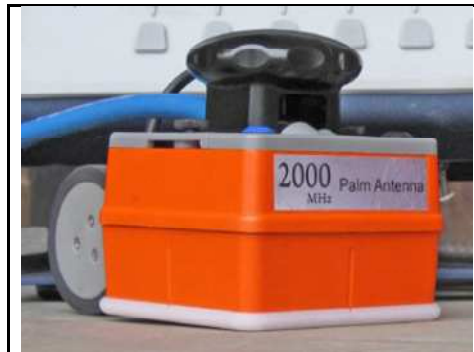
$$v = \lambda \cdot f \quad \lambda = v/f$$

è possibile stimare la lunghezza d'onda e la risoluzione del segnale emesso dall'antenna:

$$\lambda = \frac{0,1m/ns}{2000MHz} = 0,05m$$

$$R = \frac{\lambda}{3} = \frac{0,05}{3} = 0,017m.$$

Su questa antenna, un tasto consente di inserire i Mark nel radargramma, funzione che risulta molto utile durante le fasi di acquisizione dei dati.

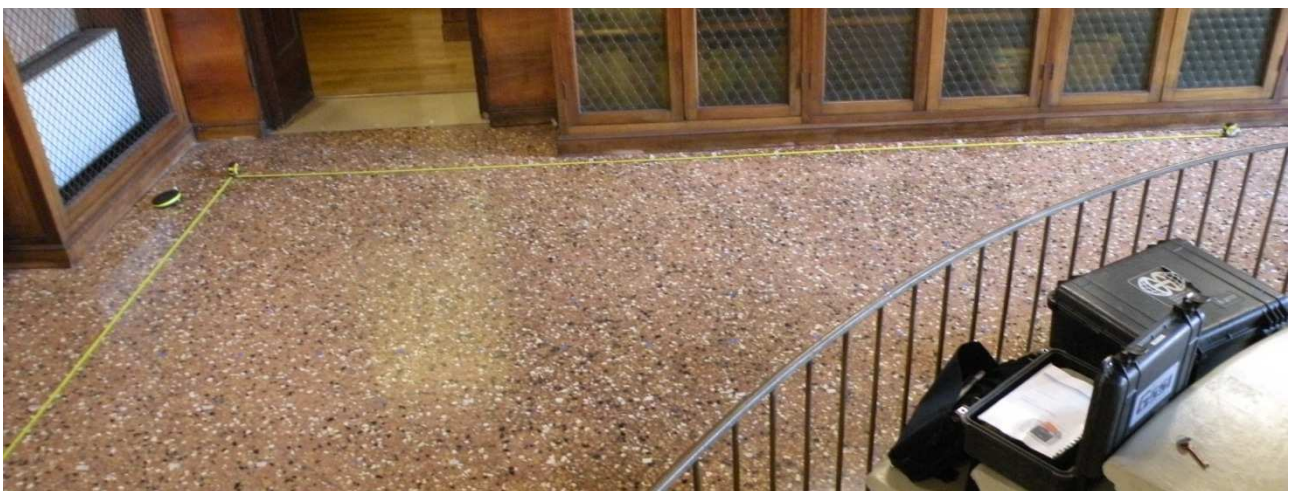


<b>DIMENSIONI ANTENNA</b>		
<b>Altezza</b>	104,5	mm
<b>Larghezza</b>	91,5	mm
<b>Lunghezza (con ruota)</b>	154,7	mm

*Figura 8.1 Immagine e dimensioni dell'antenna PALM  
(<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-PalmAntennaBrochure.pdf>)*

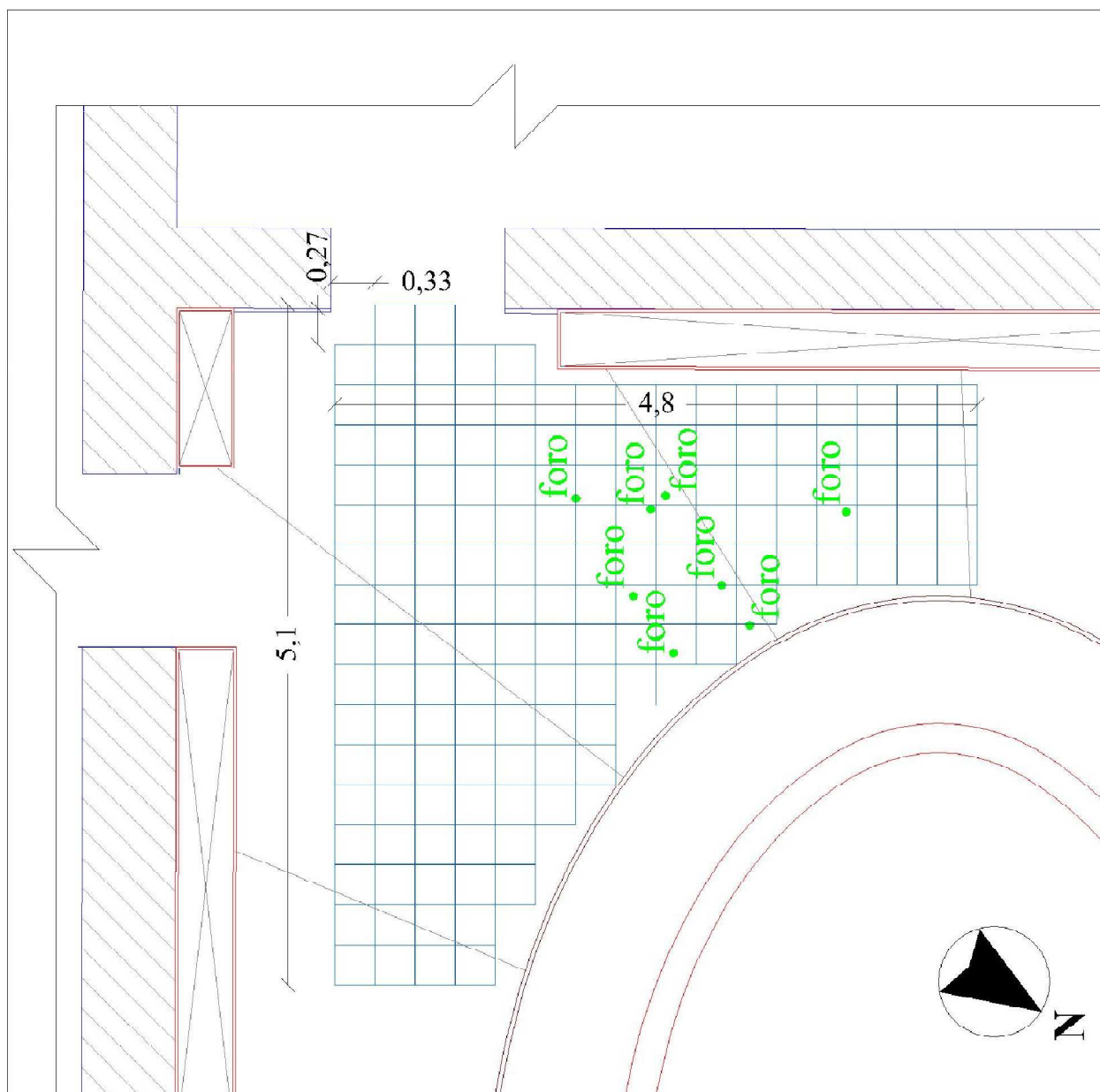
### **8.3 Posizioni di prova, preparazione e procedure si acquisizione**

Come nella precedente analisi eseguita con antenna 900 MHz, anche in questo caso con antenna 2 GHz è stata utilizzata una griglia per l'acquisizione dei dati; avendo a disposizione delle informazioni derivanti dalla precedente analisi, la nuova griglia è stata posizionata nella stessa zona della sala Ovale (settore Sud-Ovest della sala), ma la superficie d'indagine e il numero di linee eseguite è stato superiore (Figura 8.2 e Figura 8.3).



*Figura 8.2 Immagine dell'area d'indagine eseguita con antenna PALM.*

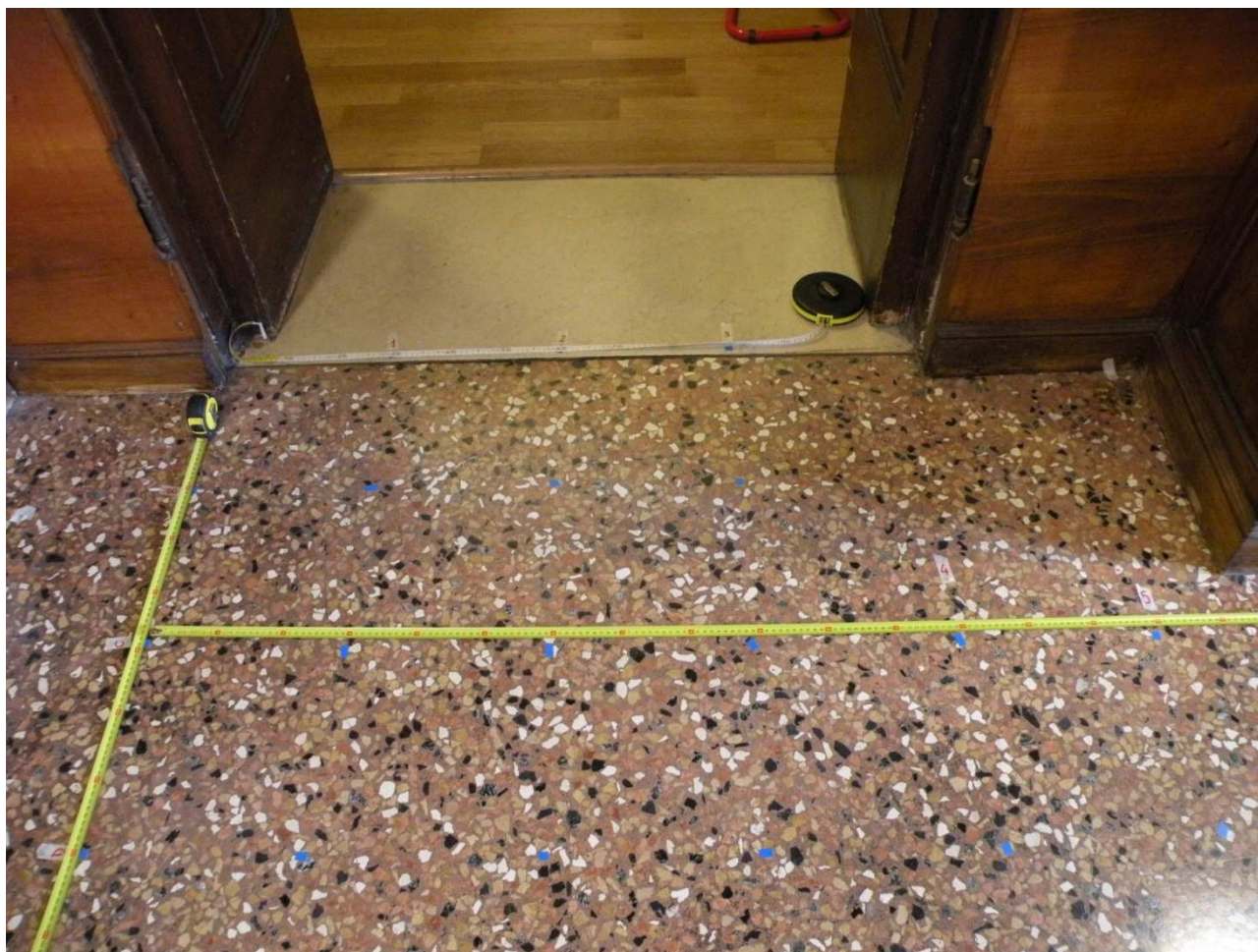




*Figura 8.3 Posizione della griglia all'interno della sala Ovale.*

Volendo indagare la conformazione della volta sottostante il pavimento della sala, l'origine di alcune linee è stato posizionato in corrispondenza della soglia della porta posizionata a Sud-Ovest, in modo tale da studiare anche l'innesto della volta sui muri portanti.

Le dimensioni massime delle linee d'indagine sono di 5,1 m per la direzione Ovest-Est e 4,8 m per la direzione Sud-Nord ed il passo tra le linee è stato ancora una volta pari a 30 cm. In questo caso, per la costruzione della griglia, non sono stati utilizzati i teli trasparenti come già accaduto per le precedenti prove, ma la maglia è stata costruita direttamente sul pavimento della sala: utilizzando il metro e del mastro adesivo colorato che risaltasse sulla pavimentazione, sono state segnate delle stazioni di controllo ogni 30 cm (Figura 8.4).



*Figura 8.4 Stazioni di controllo sulla pavimentazione della sala Ovale.*

Per facilitare la lettura della griglia anche durante le fasi di acquisizione dei dati sono stati attribuiti dei codici differenti per le linee Ovest-Est e per quelle ortogonali a queste: alle prime è stato attribuito un numero progressivo da 0 a 16 procedendo da Sud verso Nord, mentre alle seconde sono state attribuite delle lettere (da A a R procedendo da Ovest verso Est): in questo modo è possibile risalire alla direzione della linea conoscendone solamente il codice (Figura 8.5). L'origine degli assi di riferimento associati alla griglia è stato posizionato in corrispondenza del punto 0,A avendo considerato la linea 0 coincidente con l'asse X e la linea A con quello Y.

A causa del mobilio e del foro presente all'interno della sala, la griglia non è regolare e si presenta dalla conformazione ad L: le linee con maggiore estensione sono posizionate in prossimità delle pareti mentre avvicinandosi al centro della sala la loro lunghezza diminuisce a causa del foro. Le linee A e B in prossimità della porta sono eseguite principalmente per facilitare la realizzazione del modello tridimensionale: infatti, per una buona riuscita del modello, è necessario che la maglia sia il più regolare possibile anche se la forma globale della griglia può essere la più varia. Per questo motivo tutte le linee in direzione X terminano in corrispondenza di quelle Y e viceversa.

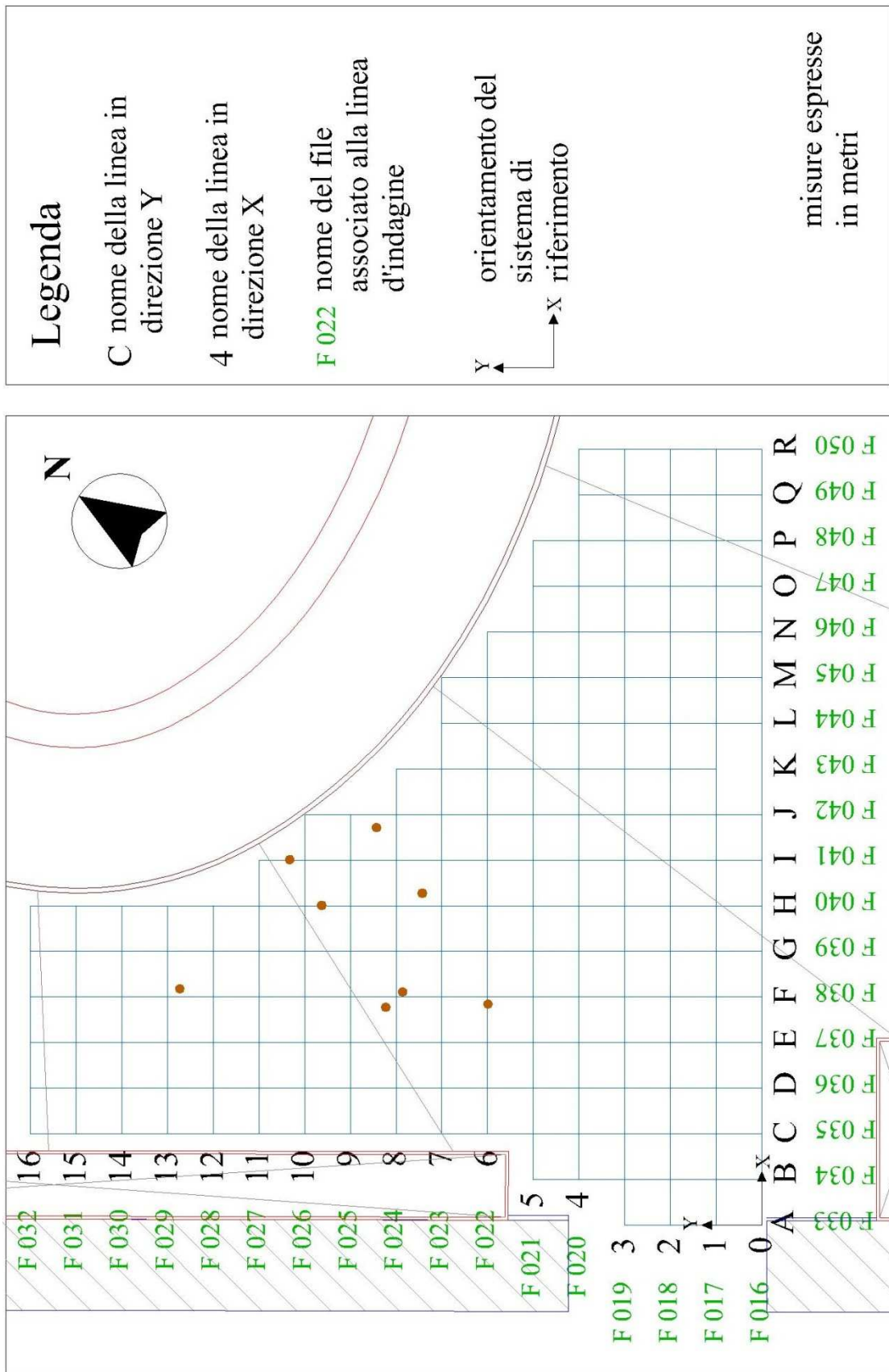


Figura 8.5 Disegno della griglia utilizzata nelle indagini: assegnazione dei codici.

Questa procedura ha facilitato notevolmente anche la misurazione del percorso eseguito dall'antenna: conoscendo il punto di partenza (il numero o la lettera) ed il punto di arrivo è stato facile ricostruire la geometria della griglia utilizzata nell'indagine. Per valutare la lunghezza del percorso I, ad esempio, è sufficiente conoscere il suo punto di partenza, 0, e quello di arrivo, 11; la lunghezza complessiva della linea sarà pari a  $11 \cdot 0,3 = 3,3m$ . In questo modo non è stato necessario misurare la lunghezza dei singoli percorsi, ma è bastato annotarne gli estremi per ricostruire il loro sviluppo (Tabella 8.1 e Tabella 8.2).

Questa operazione, che può risultare ridondante in quanto l'antenna dotata di *survey wheel* è in grado di fornire automaticamente la lunghezza del percorso da questa effettuato, è stata utile come strumento di verifica potendo confrontare la lunghezza dei file con quella della geometria.

*Tabella 8.1 Assegnazione dei codici e lunghezze per le linee eseguite in direzione X*

<b>file</b>	<b>codice</b>	<b>percorso</b>	<b>Lunghezza (m)</b>	<b>note</b>
<b>016</b>	0	B-R	4,80	Mark su giunti metallici
<b>017</b>	1	A-R	5,10	Mark su soglia e su ultimo giunto
<b>018</b>	2	A-R	5,10	Mark su giunti metallici
<b>019</b>	3	A-R	5,10	Mark su soglia e su giunti
<b>020</b>	4	B-R	4,80	Mark su giunti metallici
<b>021</b>	5	B-P	4,20	Mark su giunti metallici
<b>022</b>	6	C-N	3,30	Mark su giunto metallico
<b>023</b>	7	C-M	3,00	Mark su foro e non su giunto
<b>024</b>	8	C-K	2,40	Mark su giunto metallico e su fori
<b>025</b>	9	C-J	2,10	Nessuna indicazione
<b>026</b>	10	C-J	2,10	Mark su giunto e su foro
<b>027</b>	11	C-I	1,80	Nessuna indicazione
<b>028</b>	12	C-H	1,50	Nessuna indicazione
<b>029</b>	13	C-H	1,50	Nessuna indicazione
<b>030</b>	14	C-H	1,50	Nessuna indicazione
<b>031</b>	15	C-H	1,50	Nessuna indicazione
<b>032</b>	16	C-H	1,50	Nessuna indicazione

*Tabella 8.2 Assegnazione dei codici e lunghezze per le linee eseguite in direzione Y*

<b>file</b>	<b>codice</b>	<b>percorso</b>	<b>lunghezza</b>	<b>note</b>
<b>033</b>	A	1-3	0,60	Nessuna indicazione
<b>034</b>	B	0-5	1,50	Nessuna indicazione
<b>035</b>	C	0-16	4,80	Mark su giunti metallici
<b>036</b>	D	0-16	4,80	Mark su giunti metallici
<b>037</b>	E	0-16	4,80	Mark su giunti metallici
<b>038</b>	F	0-16	4,80	Mark su giunti e fori
<b>039</b>	G	0-16	4,80	Mark su giunti
<b>040</b>	H	0-16	4,80	Mark su giunti e foro
<b>041</b>	I	0-11	3,30	Mark su giunti e foro
<b>042</b>	J	0-10	3,00	Mark su giunto
<b>043</b>	K	1-8	2,10	Mark su giunto
<b>044</b>	L	0-7	2,10	Mark su giunto
<b>045</b>	M	0-7	2,10	Nessuna indicazione
<b>046</b>	N	0-6	1,80	Nessuna indicazione
<b>047</b>	O	0-5	1,50	Nessuna indicazione
<b>048</b>	P	0-4	1,50	Mark su giunto
<b>049</b>	Q	0-4	1,20	Mark su giunto
<b>050</b>	R	0-4	1,20	Nessuna indicazione

Lo spostamento del punto di partenza della linea K è stato causa di un errore durante le fasi di acquisizione dei dati: infatti, gli appunti riportano che la linea è iniziata da 0 ed è terminata in corrispondenza di 8, ma durante l'analisi dei dati è stato riscontrato che tutti i segnali individuati risultavano fuori posto di 30 cm. La certezza dell'errore commesso in fase di acquisizione dati è stata data osservando la riflessione del giunto metallico attraversato dalla linea: la posizione di questo risultava fuori allineamento rispetto alle riflessioni individuate mentre facendo traslare il punto di inizio della linea tale riflessione si posiziona correttamente in asse.



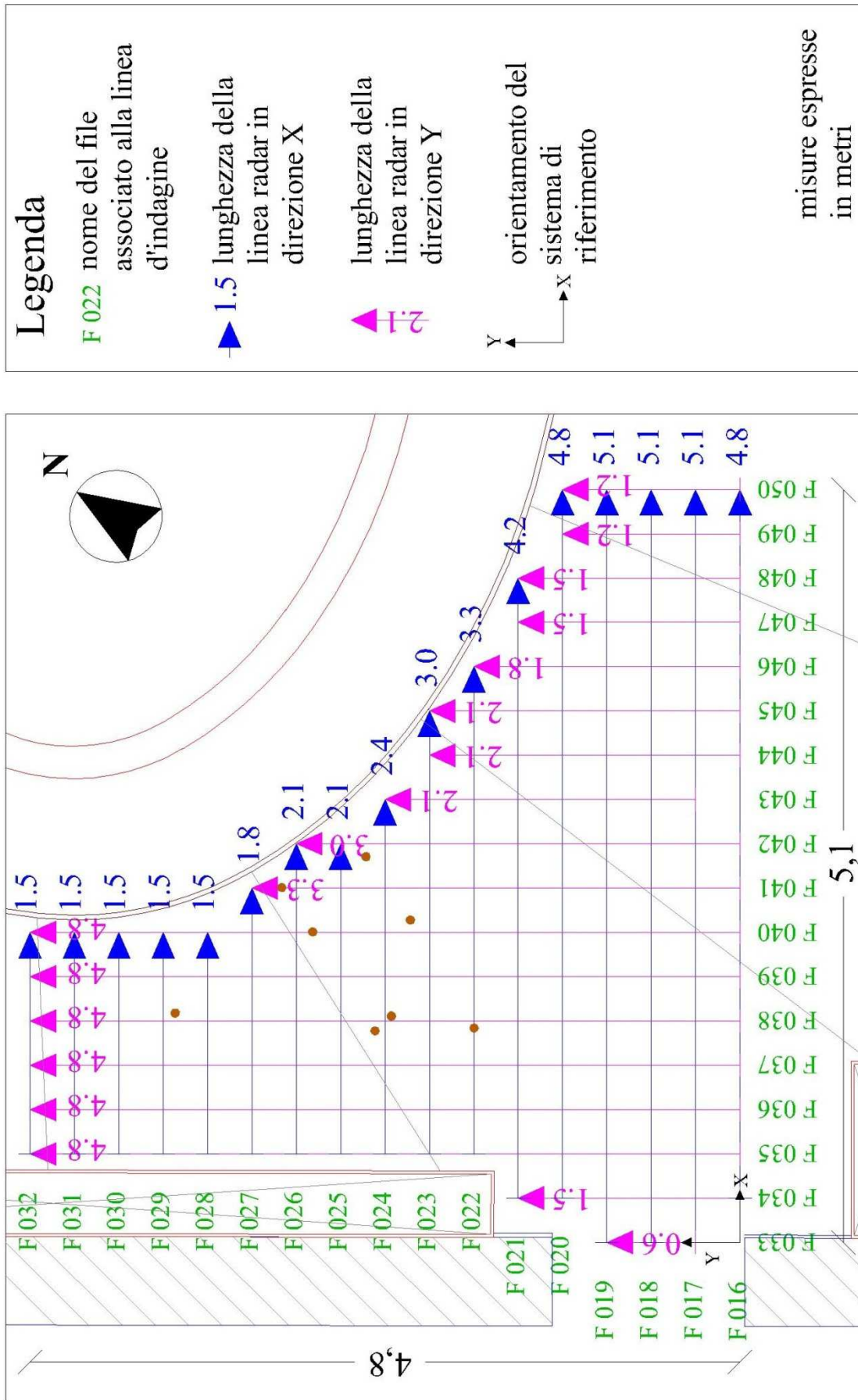


Figura 8.6 Geometria della griglia radar utilizzata per l'indagine.



Come in tutte le indagini radar, prima di iniziare la procedura di acquisizione dei dati è necessario settare la strumentazione in modo tale da registrare un segnale leggibile. La spiegazione dei singoli parametri è già stata affrontata nel capitolo 6 quindi, in questa sede, verranno solamente indicati i valori e discussi brevemente i principali settaggi utilizzati per questa indagine.

La finestra d'ascolto (*range*) è stata selezionata pari a 20 ns in quanto nelle precedenti indagini non si erano notati particolari segnali oltre tale soglia; ricordando che il segnale deve percorrere in andata e ritorno il tragitto antenna-riflettore ed avendo ipotizzando una velocità di propagazione delle onde all'interno del solaio di circa 0,1m/ns è possibile osservare una profondità di circa

$$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{0,1 \cdot 20}{2} = 1,0m.$$

Gli altri parametri inseriti nell'unità digitale di controllo vengono riportati nella Tabella 8.3. Il parametro più significativo risulta essere il *mode* che in questo caso è stato impostato il valore *distance* avendo a disposizione un'antenna dotata di odometro.

*Tabella 8.3 Riassunto dei parametri impostati nell'unità digitale di controllo*

<b>PARAMETRI GPR</b>	
<b>Mode</b>	Distance
<b>Samples</b>	1024
<b>Format (bits)</b>	16
<b>Range (ns)</b>	20
<b>Diel</b>	6
<b>Gain (dB)</b>	12
	67
<b>Rate</b>	64
<b>Scan/unit</b>	300
<b>Offset (ns)</b>	14.46
<b>Surface (%)</b>	10%

Finita la procedura di preparazione è stato possibile procedere con l'acquisizione dei dati.

In questa fase sono state registrate prima tutte le linee in direzione X, poi si è passati a quelle nella direzione ortogonale: utilizzando questa antenna provvista di odometro, non è stato necessario inserire i Mark in corrispondenza delle sezioni di controllo per valutare la distanza percorsa dall'antenna, ma è stato sufficiente posizionare i segnali solamente nei punti d'interesse quali fori o giunti metallici presenti sulla pavimentazione. La possibilità di inserire i Mark direttamente tramite l'antenna e di fermare il tragitto di questa in qualsiasi istante agevola notevolmente le operazioni di acquisizione dei dati: seppur la strumentazione consentirebbe l'utilizzo di un solo operatore per questo tipo d'indagine, ancora una volta ne sono stati impiegati due, il primo addetto alla movimentazione dell'antenna, il secondo al controllo dell'unità digitale. In questo modo è possibile

procedere più rapidamente nell'acquisizione dei dati ed è possibile trascrivere tutte le informazioni rilevate in un quaderno per gli appunti.



*Figura 8.7 Operatori durante la fase di acquisizione dei dati: controllo dell'unità digitale (a sinistra) e movimentazione dell'antenna (a destra).*

## 8.4 Elaborazione e visualizzazione dei dati

### 8.4.1 Elaborazioni bidimensionali

L'elaborazione dei dati dagine non è stata diversa da quella già eseguita per i radargrammi collezionati nelle precedenti analisi. In questo paragrafo verranno riportati solamente i valori attribuiti alle singole funzioni;

*Tabella 8.4 Riassunto dei valori attribuiti alle funzioni di elaborazione dei dati*

<b>File</b>	<b>Surface Position Adjustment (ns)</b>	<b>Background Removal (scan)</b>	<b>Gain (lineare)</b>
<b>016-050</b>	2,15	Massimo	2,5; 1,0

## **8.4.2 Elaborazioni tridimensionali**

Come per i dati raccolti con antenna da 900 MHz anche in questo caso è stato realizzato un modello tridimensionale; la procedura di creazione del volume solido non verrà riportata in quanto del tutto analoghe a quelle eseguite nel capitolo precedente anche se l'antenna e la griglia utilizzate sono diverse.

Per la creazione del modello 3D sono stati utilizzati tutti i file originali e si è proceduto solamente in seguito allo spostamento della riflessione superficiale verso l'alto tramite la funzione Surface Position Adjustment; in questo modo è stato possibile leggere direttamente sulla scala verticale del modello 3D la posizione degli elementi individuati.

## **8.5 Interpretazione dei risultati**

L'analisi eseguita sui file raccolti con l'antenna Palm da 2 GHz ha permesso di rilevare un elevato numero di dettagli costruttivi del solaio della Sala dell'Ovale. Ancora una volta sono state eseguite due differenti analisi sui file elaborati, una per i file bidimensionali, una per il modello tridimensionale

### **8.5.1 File bidimensionali**

Anche in questo caso i file analizzati hanno consentito di osservare le strutture già individuate nella precedente analisi, ma il dettaglio ottenuto in questo caso è stato maggiore. Nella maggior parte dei radargrammi è stato possibile osservare la presenza di elementi a volta posti a sostegno del pavimento, di elementi di sostegno delle volte stesse e la posizione dei giunti metallici a pavimento. Per ogni singolo file sono state riportate in tabella la posizione dei giunti metallici a pavimento, delle volte e dei sostegni di queste (Tabella 8.5 e Tabella 8.6).

L'antenna Palm, essendo provvista di odometro, ha consentito di ricavare immediatamente la posizione delle riflessioni individuate senza la necessità di dover modificare i file tramite funzioni che in qualche modo possono alterare la posizione degli elementi individuati all'interno dei radargrammi.

Tabella 8.5 Posizione dei giunti metallici, volte e sostegni individuati nei radargrammi

nome file	Giunti			sostegno sx			1° Volta			sostegno dx			2° Volta			sostegno dx			
	1°	2°	3°	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a	
016	1.65	4.11	*	*	*	*	2.15	2.03	2.23	3.61	3.53	3.7	3.95	3.56	4.21	4.33	4.21	4.47	
017	2.16	4.53	*	1.91	2.06	1.81	2.64	2.76	2.52	3.92	3.82	4.04	4.33	3.95	4.68	4.8	4.6	5	
018	0.01	2.36	4.64	2.01	2.13	1.95	2.82	2.93	2.73	3.97	3.81	4.13	4.40	4.03	4.77	4.71	4.64	4.78	
019	0.02	2.61	4.77	2.2	2.11	2.29	2.99	3.02	2.82	4.06	3.95	4.16	4.47	4.1	4.89	4.96	4.89	5.07	
020	2.56	4.59	*	2.16	2.04	2.25	2.85	2.8	2.71	3.87	3.81	3.92	4.30	3.89	4.67	4.78	4.65	4.85	
021	2.78	*	*	2.39	2.26	2.5	2.99	*	*	3.93	3.83	4.02	4.16	3.95	*	4.59	4.47	4.72	
022	2.72	*	*	*	*	*	0.97	*	*	*	*	*	*	2.62	2.34	2.87	2.91	2.78	3.02
023	0.01	*	*	*	*	*	0.76	1.45	1.37	1.54	*	*	2.79	2.54	3.04	*	*	*	
024	0.48	*	*	0.9	0.83	0.99	2.01	2.02	1.91	2.14	*	*	*	*	*	*	*	*	
025	0.96	*	*	*	*	*	1.96	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
026	1.44	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
027	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
028	*	*	*	*	*	*	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
029	*	*	*	*	*	*	0.745	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
030	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
031	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
032	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
033	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
034	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
035	2.12	4.68	*	*	*	*	1.82	2.32	2.2	2.43	*	*	3.83	3.53	4.11	4.29	4.09	4.4	
036	2.26	4.68	*	*	*	*	1.87	1.48	1.4	1.57	3.4	3.29	3.82	3.49	4.15	4.2	4.11	4.29	
037	2.47	4.71	*	1.64	1.57	1.71	2.42	*	*	*	3.52	3.44	3.6	3.61	4.16	4.2	4.1	4.31	
038	2.68	4.74	*	1.73	1.85	1.64	2.42	2.4	2.28	2.52	3.5	3.61	3.96	3.61	4.22	4.22	4.13	4.33	
039	2.84	4.74	*	0.14	0.05	0.25	0.58	*	*	*	*	*	2.25	1.89	2.53	2.53	2.4	2.61	
040	0.2	3.05	4.77	*	*	*	0.23	0.78	0.67	0.88	2.21	2.13	2.43	2.09	2.7	*	*	*	
041	0.64	3.27	*	*	*	*	0.62	1.12	1.02	1.21	*	*	2.6	2.32	2.85	*	*	*	

<b>042</b>	1.04	*	*	0.45	0.38	0.51	1.08	0.52	1.52	1.65	1.58	1.78	2.51	2.44	2.59	2.71	2.52	2.92	2.93	2.84	3.01
<b>043</b>	1.1	*	*	0.56	0.48	0.62	1.2	0.61	1.27	1.69	1.6	1.76	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>044</b>	1.87	*	*	1.68	1.6	1.79	2.02	1.61	2.15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>045</b>	*	*	*	*	*	*	0	0	1.51	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>046</b>	*	*	*	0.61	0.5	0.74	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>047</b>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>048</b>	0.36	*	*	*	*	*	1.07	0	1.55	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>049</b>	1.1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>050</b>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*Tabella 8.6 Posizione della terza volta e dei sostegni individuati per i file 039 e 040.*

nome file	sostegno sx			3° Volta			sostegno dx		
	centro	da	a	centro	da	a	centro	da	a
<b>039</b>	*	*	*	3.96	3.58	4.33	4.22	4.16	4.31
<b>040</b>	3.66	3.58	3.73	4.00	3.75	4.28	4.23	4.15	4.32

Le misure sono espresse in metri e sono riferite al singolo radargramma

La posizione delle riflessioni raccolte in Tabella 8.5 e Tabella 8.6 sono state poi inserite in una tavola per individuare graficamente la disposizione spaziale degli elementi del solaio (Figura 8.8).

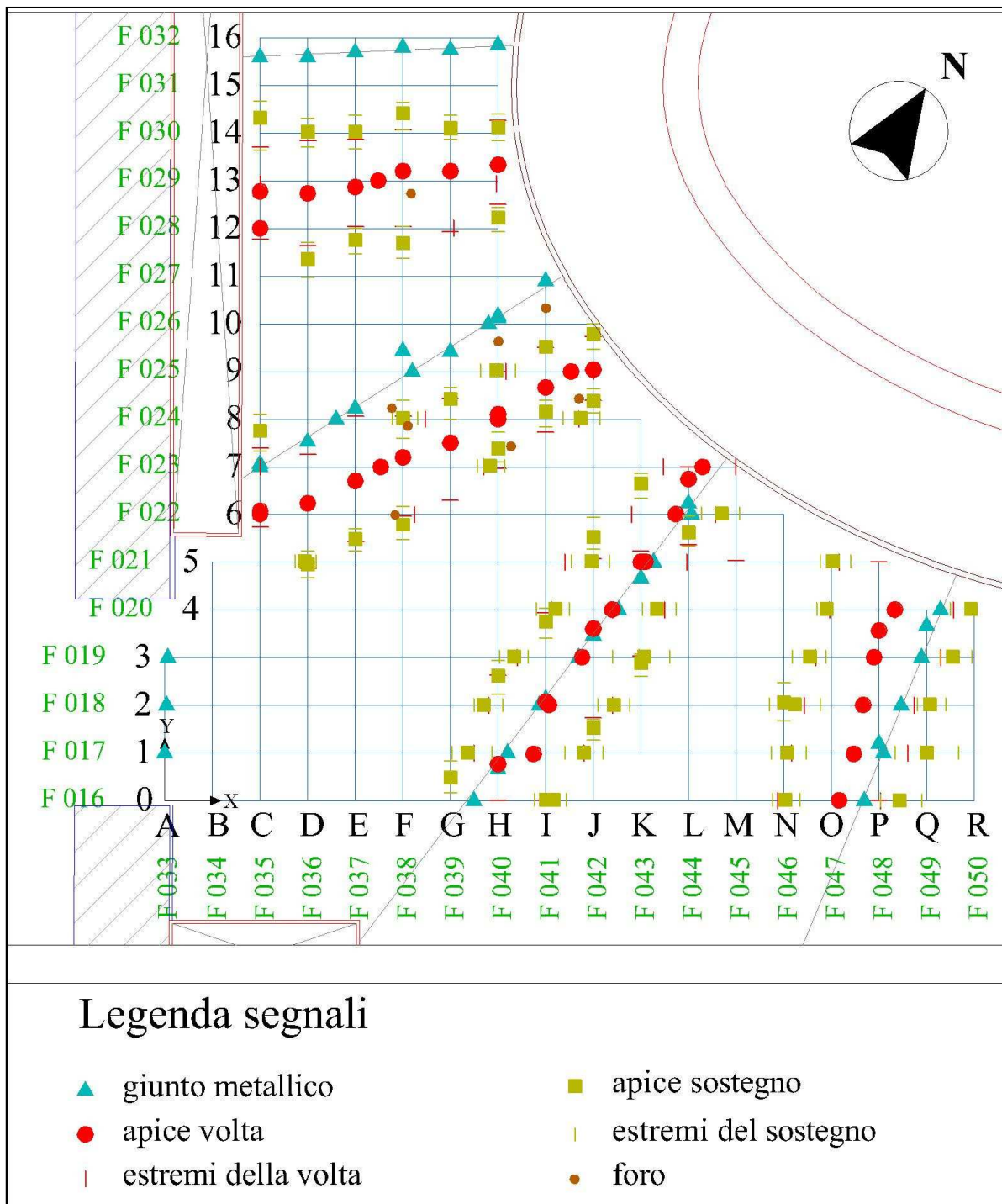


Figura 8.8 Segnali individuati nei file registrati nella Sala dell'Ovale.

Con i dati riportati nella precedente tabella sono stati calcolati gli sviluppi laterali delle volte (Tabella 8.7 e Tabella 8.8).



Tabella 8.7 Estensione delle volte e dei sostegni individuati nei radargrammi in direzione X

nome file	sx	1° volta	dx	sx	2° volta	dx	sx	3° volta	dx
016	*	*	0.2	0.17	0.65	0.26	*	*	*
017	0.25	0.69	0.24	0.22	0.73	0.4	*	*	*
018	0.18	0.78	0.2	0.32	0.74	0.14	*	*	*
019	0.18	0.77	0.36	0.21	0.79	0.18	*	*	*
020	0.21	0.71	0.21	0.11	0.78	0.2	*	*	*
021	0.24	0.6	*	0.19	*	0.25	*	*	*
022	*	0.97	*	*	0.53	0.24	*	*	*
023	*	1.41	0.17	*	0.5	*	*	*	*
024	0.16	0.97	0.23	*	*	*	*	*	*
025	*	0.55	*	*	*	*	*	*	*
026	*	0	*	*	*	*	*	*	*
027	*	0	*	*	*	*	*	*	*
028	*	1.22	*	*	*	*	*	*	*
029	*	1.49	*	*	*	*	*	*	*
030	*	*	*	*	*	*	*	*	*
031	*	*	*	*	*	*	*	*	*
032	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabella 8.8 Estensione delle volte e dei sostegni individuati nei radargrammi in direzione Y

nome file	sx	1° volta	dx	sx	2° volta	dx	sx	3° volta	dx
033	*	*	*	*	*	*	*	*	*
034	*	*	*	*	*	*	*	*	*
035	*	0.5	0.23	0	0.58	0.31	*	*	*
036	*	0.72	0.17	0.22	0.66	0.18	*	*	*
037	0.14	0.79	*	0.16	0.55	0.21	*	*	*
038	0.21	0.63	0.24	0.2	0.61	0.2	*	*	*
039	0.2	0.37	*	*	0.64	0.21	*	0.75	0.15
040	*	0.56	0.21	0.19	0.61	*	0.15	0.53	0.38
041	*	1.18	0.19	*	0.53	*	*	*	*
042	0.13	1.00	0.2	0.15	0.4	0.17	*	*	*
043	0.14	0.66	0.16	*	*	*	*	*	*
044	0.19	0.54	*	*	*	*	*	*	*
045	*	1.51	*	*	*	*	*	*	*
046	0.24	*	*	*	*	*	*	*	*
047	*	*	*	*	*	*	*	*	*
048	*	1.55	*	*	*	*	*	*	*
049	*	*	*	*	*	*	*	*	*
050	*	*	*	*	*	*	*	*	*

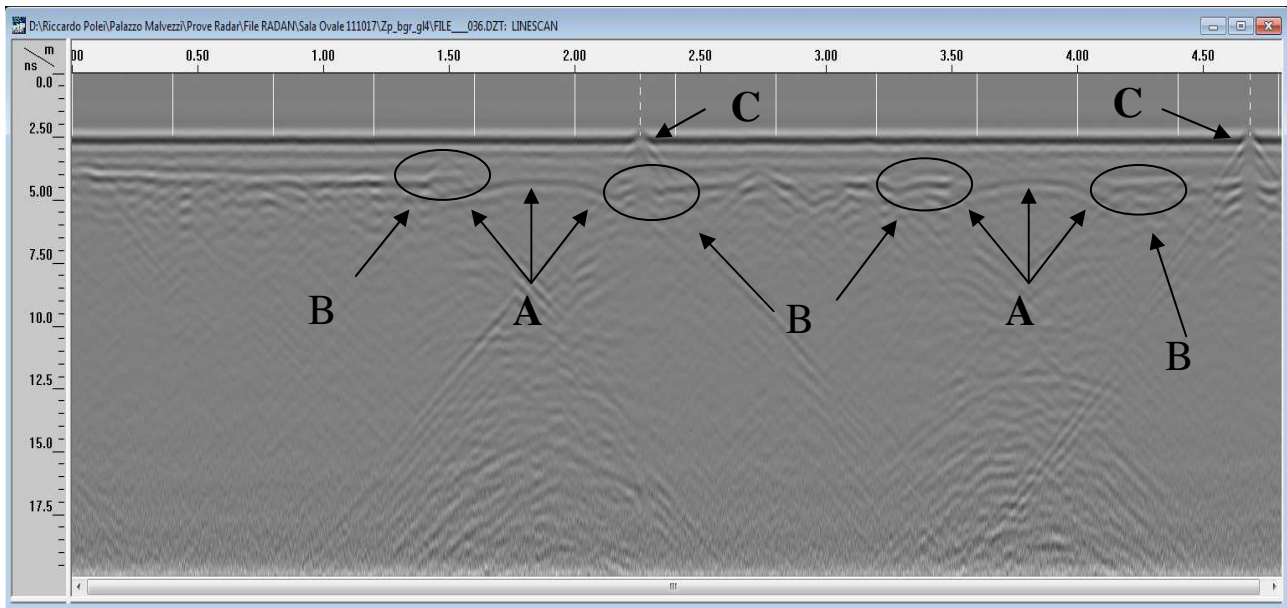


Figura 8.9 Radargramma n.°36, linea eseguita nella zona centrale della griglia in direzione Y: è possibile osservare la presenza delle volte (A), dei sostegni (B) e dei giunti a pavimento (C).

L'analisi dei dati bidimensionali non ha consentito di valutare altri dettagli come ad esempio la visione dell'intradosso della volta; pur avendo stimato la velocità del segnale elettromagnetico all'interno del solaio della Sala dell'Ovale pari a 12 cm/ns (da precedenti analisi eseguite con antenna da 900MHz), avendo impostato il range a 20 ns e prevedendo una profondità di penetrazione del segnale di

$$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{12 \text{ cm/ns} \cdot 20 \text{ ns}}{2} = 120 \text{ cm},$$

non è stato possibile osservare l'intradosso della volta neppure nella zona vicino al foro ovale dove lo spessore del solaio è pari circa 84 cm (Capobianchi, 2009) e pari a 89 cm (indagini laser).

Al di sotto delle volte superficiali sono state individuate altre riflessioni; nella maggior parte dei casi queste presentano un andamento che rispecchia quello degli elementi osservati in superficie mentre in altri possono risultare diversamente inclinati. Se in questo ultimo caso risulta difficile poter definire cosa possa rappresentare questo tipo di segnale, in quanto tali riflessioni si presentano isolate e non visibili nelle sezioni radar adiacenti, per le restanti è possibile pensare che rappresentino parte della volta del solaio. Infatti, nei radargrammi dove è possibile osservare queste riflessioni si nota la presenza consecutiva di due elementi: innanzitutto, osservando che tali riflessioni presentano un andamento simile a quello individuato più in superficie, è possibile supporre che queste rappresentino un piano circa orizzontale, mentre la presenza dei due segnali consecutivi può rappresentare l'estradosso e l'intradosso della volta sottostante, visione che farebbe supporre la presenza di una camera d'aria posizionata al di sotto della volta superficiale di sostegno del solaio (Figura 8.10).

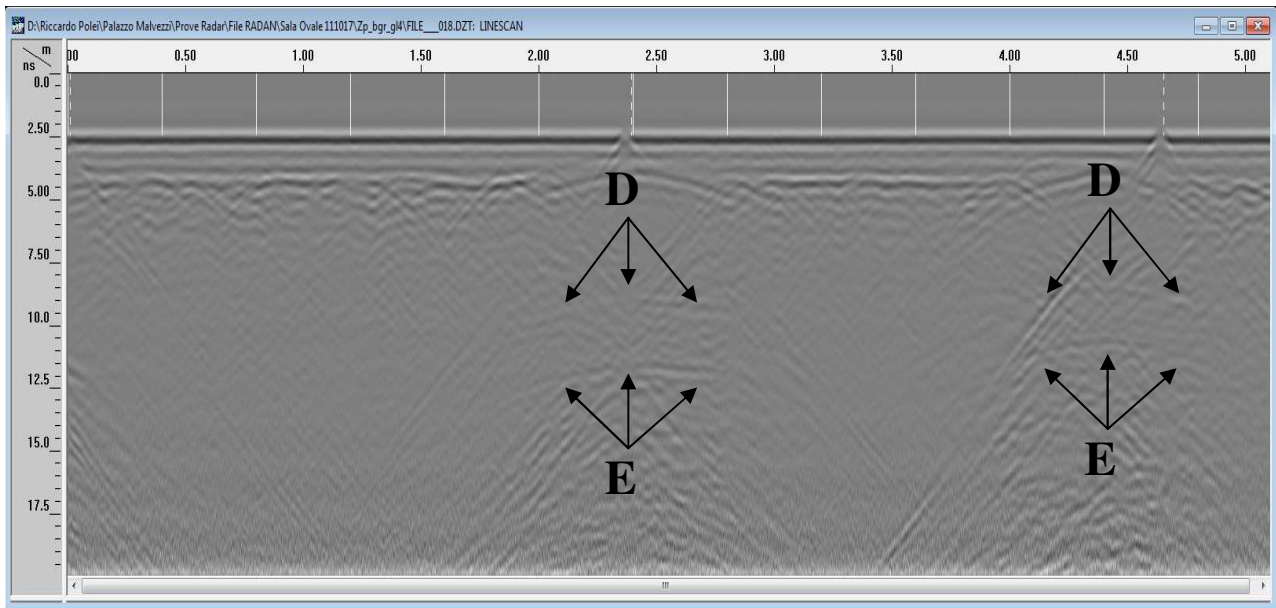


Figura 8.10 File 018, linea in direzione X: è possibile osservare la presenza di due riflessioni (D, E) posizionate al di sotto delle due volte superficiali.

Analizzando i primi 5 file registrati in direzione X (file 016-020) in cui si osservano le due volte situate più ad Est, è possibile notare che la riflessioni tendono ad diminuire la loro profondità spostandosi dalla parete verso il centro della sala e che il segnale posizionato sotto la prima volta di sostegno (quella ad Ovest) risulta posizionato più in profondità. Questi due fenomeni sono così spiegabili: spostandosi verso il centro della sala lo spessore della volta tende a diminuire e in questo modo minore sarà la profondità da cui arriva il segnale dell'intradosso mentre spostandosi verso Ovest la profondità della volta tenderà ad aumentare provocando anche un aumento della profondità della sua riflessione all'interno di un radargramma.

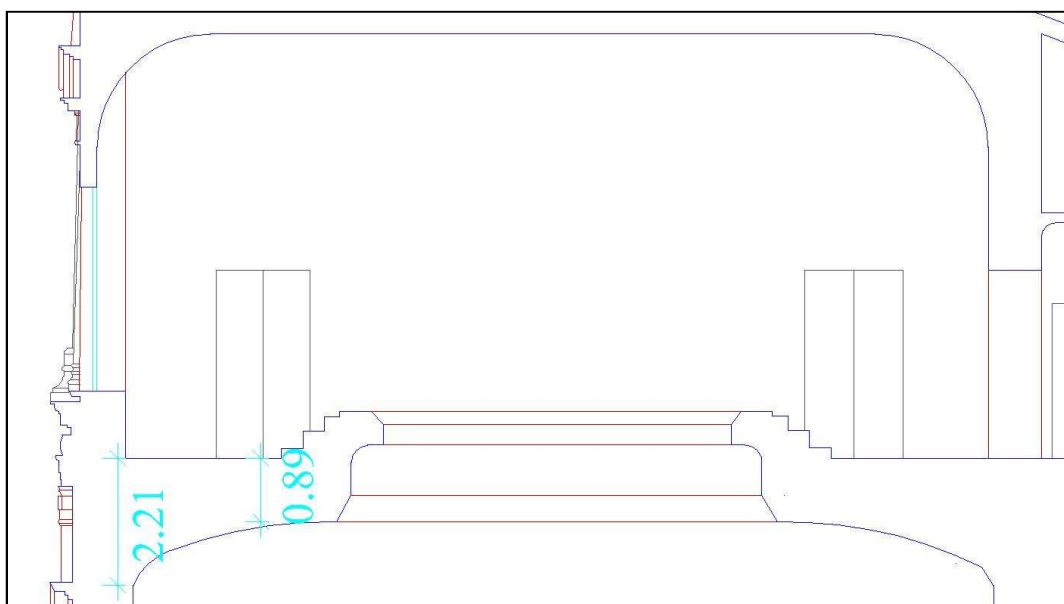


Figura 8.11 Sezione trasversale N-S del solaio della Sala dell'Ovale, vista verso Est.

Nella Tabella 8.9 vengono riportate le profondità delle riflessioni individuate nei file 016-020: la profondità delle riflessioni è stata calcolata considerando la presenza di aria al di sotto della volta di sostegno del solaio e quindi una velocità del segnale di 0,3 m/ns. Questa soluzione è stata adottata dopo aver valutato la profondità di tali riflessioni anche con velocità minori che hanno fornito profondità non attendibili.

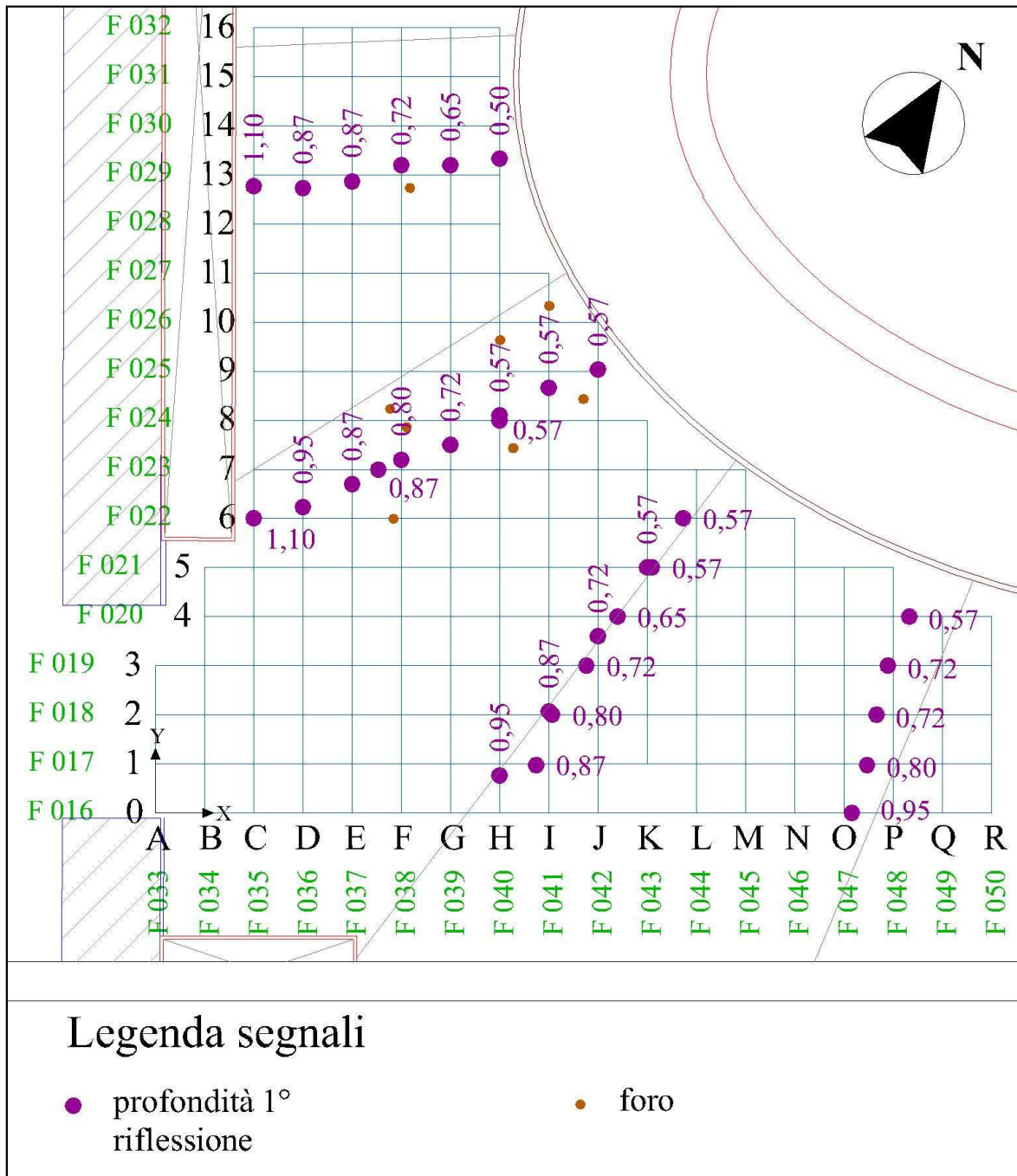


Figura 8.12 Profondità della 1° riflessione osservata al di sotto delle voltine superficiali (unità di misura in metri).

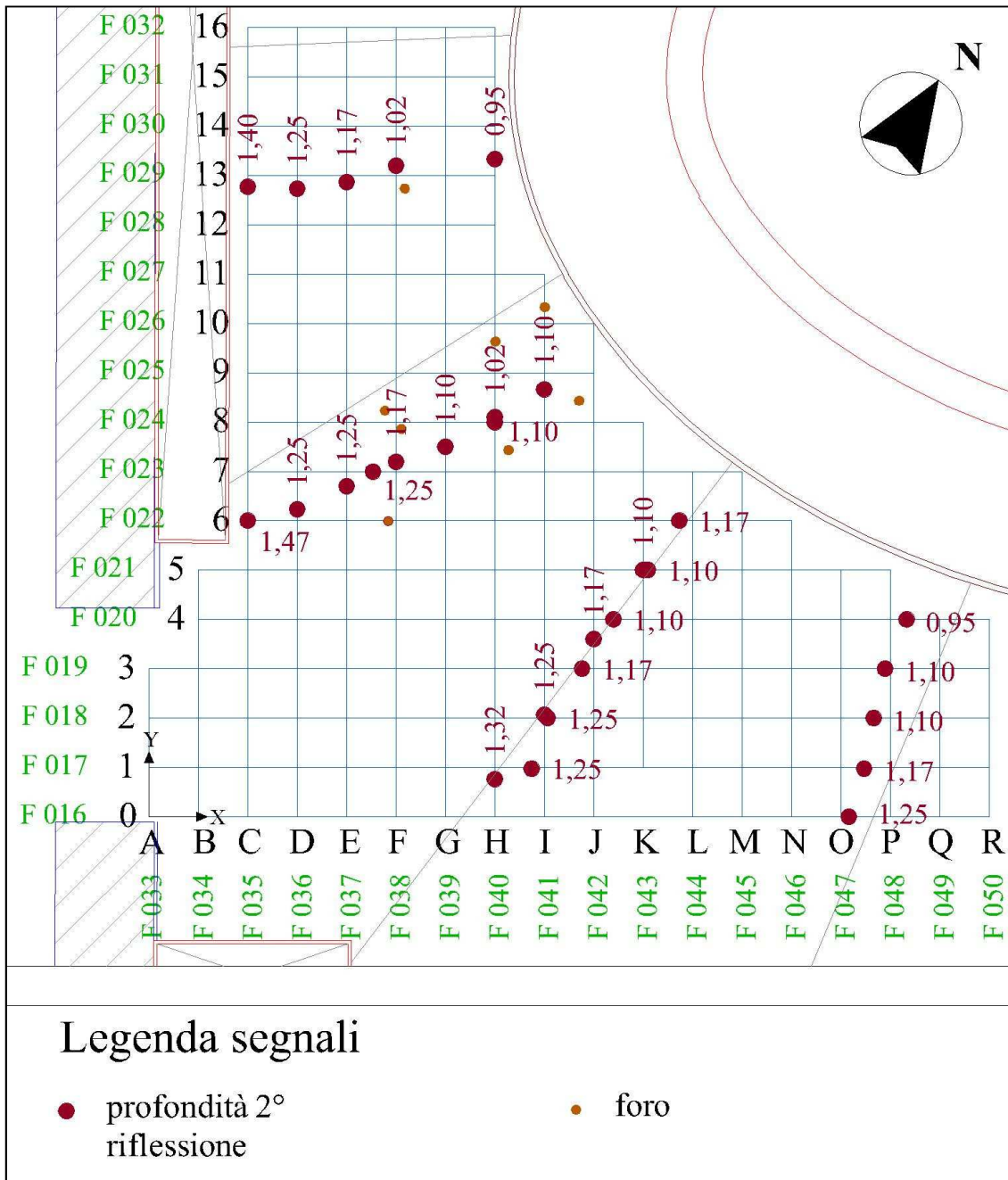


Figura 8.13 Profondità delle riflessioni più profonde osservate al di sotto delle voltine superficiali (unità di misura in metri).

Tabella 8.9 Profondità (in metri) delle riflessioni osservate nei primi 5 file in direzione X.

File	1° Volta		2° Volta	
	1° riflessione	2° riflessione	1° riflessione	2° riflessione
016	0,83	0,30	*	*
017	0,75	0,375	0,68	0,38
018	0,68	0,45	0,60	0,38
019	0,60	0,45	0,60	0,38
020	0,53	0,45	0,45	0,38

Tabella 8.10 Tempi e profondità ricavate dalle linee Y delle indagini radar eseguite sul solaio della sala dell'Ovale con antenna Palm (2 GHz). La profondità in metri della riflessione superficiale è stata calcolata con velocità pari a 0,12 m/ns, tutte le altre con velocità di 0,3 m/ns

File	TEMPI (ns)						PROFONDITA' (m)									
	rifles. sup.	1°volta		2°volta		3°volta	rifles. sup.	1°volta		2°volta		3°volta				
		1°rif.	2°rif.	1°rif.	2°rif.			1°rif.	2°rif.	1°rif.	2°rif.	1°rif.	2°rif.	1°volta	2°volta	
																TOTALI
035	2.00	6.5	2	*	*	*	0.12	0.98	0.30	*	*	*	*	1.40	*	*
036	2.00	5.5	2	5	2.5	*	0.12	0.83	0.30	0.75	0.38	*	*	1.25	1.25	*
037	2.00	5	2.5	5	2	*	0.12	0.75	0.38	0.75	0.30	*	*	1.25	1.17	*
038	2.00	4.5	2.5	4	2	*	0.12	0.68	0.38	0.60	0.30	*	*	1.17	1.02	*
039	2.00	4	2.5	3.5	*	*	0.12	0.60	0.38	0.53	*	*	*	1.10	*	*
040	2.00	5.5	2.5	3	3	2.5	0.12	0.83	0.38	0.45	0.45	0.38	0.45	1.32	1.02	0.95
041	2.00	5	2.5	3	3.5	*	0.12	0.75	0.38	0.45	0.53	*	*	1.25	1.10	*
042	2.00	4	3	3	*	*	0.12	0.60	0.45	0.45	*	*	*	1.17	*	*
043	2.00	3	3.5	*	*	*	0.12	0.45	0.53	*	*	*	*	1.10	*	*

Tabella 8.11 Tempi e profondità ricavate dalle linee X delle indagini radar eseguite sul solaio della sala dell'Ovale con antenna Palm (2 GHz). La profondità in metri della riflessione superficiale è stata calcolata con velocità pari a 0,12 m/ns, tutte le altre con velocità di 0,3 m/ns

File	TEMPI (ns)						PROFONDITA' (m)						
	rifles. sup.	1°volta		2°volta		rifles. sup.	rifles. sup.	1°volta		2°volta		TOTALI	
		1°rif.	2°rif.	1°rif.	2°rif.			1°rif.	2°rif.	1°volta	2°volta	1°volta	2°volta
016	2.00	5.5	2	*	*	0.12	0.12	0.83	0.3	*	*	1.25	*
017	2.00	5	2.5	2.5	4.5	2.5	0.12	0.75	0.375	0.68	0.38	1.25	1.17
018	2.00	4.5	3	4	4	2.5	0.12	0.68	0.45	0.60	0.38	1.25	1.10
019	2.00	4	3	3	4	2.5	0.12	0.60	0.45	0.60	0.38	1.17	1.10
020	2.00	3.5	3	3	3	2.5	0.12	0.53	0.45	0.45	0.38	1.10	0.95



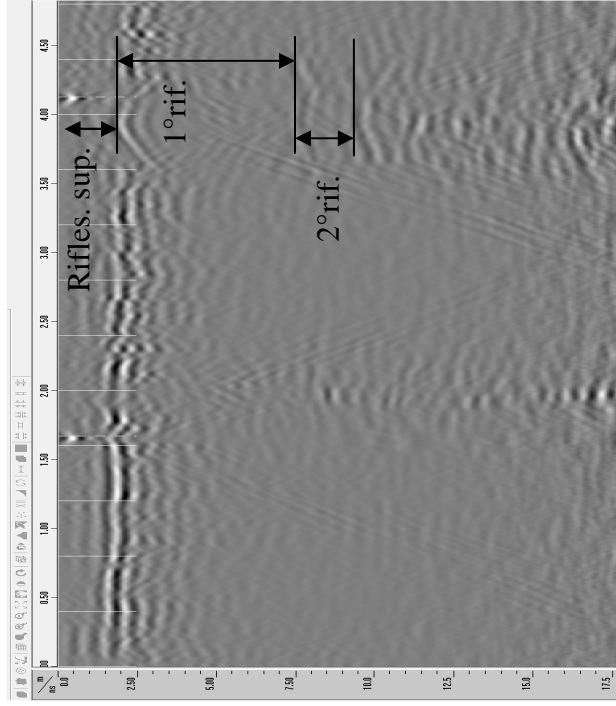
021	2.00	3	3.5	*	*	0.12	0.45	0.525	*	*	1.10	*
022	2.00	6.5	2.5	3	4	0.12	0.98	0.375	0.45	0.60	1.47	1.17
023	2.00	5	2.5	*	*	0.12	0.75	0.375	*	*	1.25	*
024	2.00	3	3.5	*	*	0.12	0.45	0.525	*	*	1.10	*

Esempi di calcolo delle profondità per il file 035 in cui è visibile solo una volta di sostegno:

$$\frac{\text{tempo rifles.sup.} \times \text{velocità}}{2} = \text{profondità rifles.sup.} ; \frac{2,00 \text{ ns} \times 0,12 \text{ m/ns}}{2} = 0,12 \text{ m}$$

$$\frac{\text{tempo 1° rif.} \times \text{velocità}}{2} = \text{profondità 1° rif.} ; \frac{6,5 \text{ ns} \times 0,3 \text{ m/ns}}{2} = 0,98 \text{ m}$$

$$\text{profondità 1° rif.} + \text{profondità 2° rif.} = \text{profondità totale 1° volta} ; 0,98 + 0,30 = 1,40 \text{ m}$$



## 8.5.2 Volume 3D

L'analisi del modello tridimensionale ha permesso di evidenziare le principali strutture presenti nel solaio della sala. In questa analisi sono state osservate diverse sezioni e diversi spessori del volume investigato. Le immagini verranno presentate iniziando dalle sezioni più superficiali aumentando poi la profondità; lo spessore dei piani visualizzati è pari a zero.

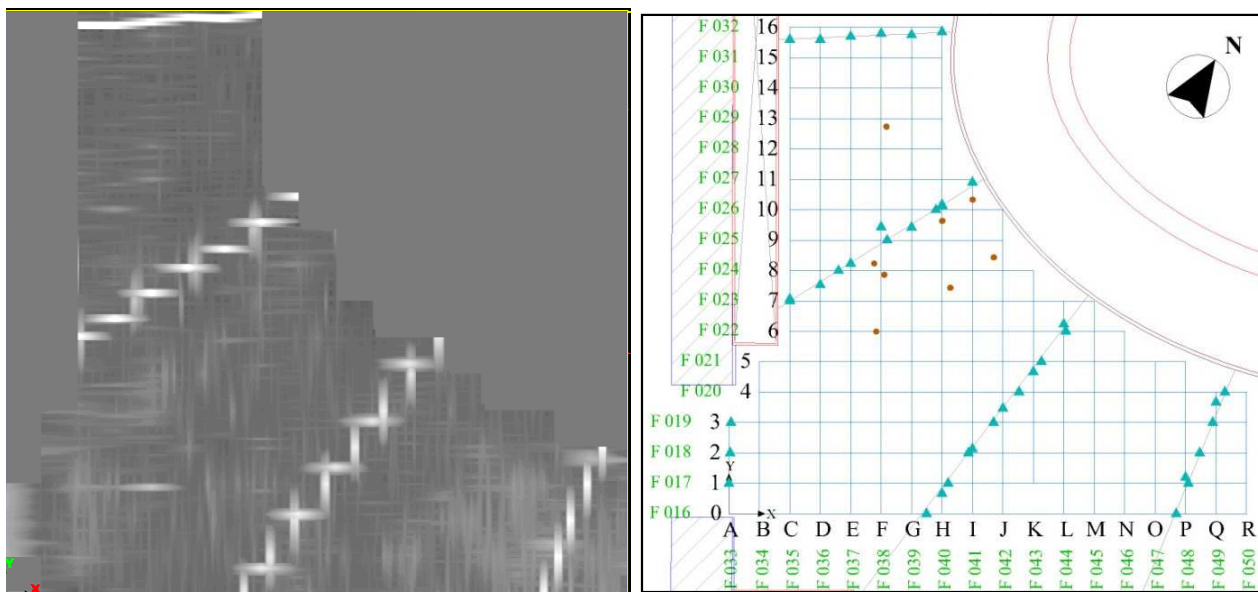


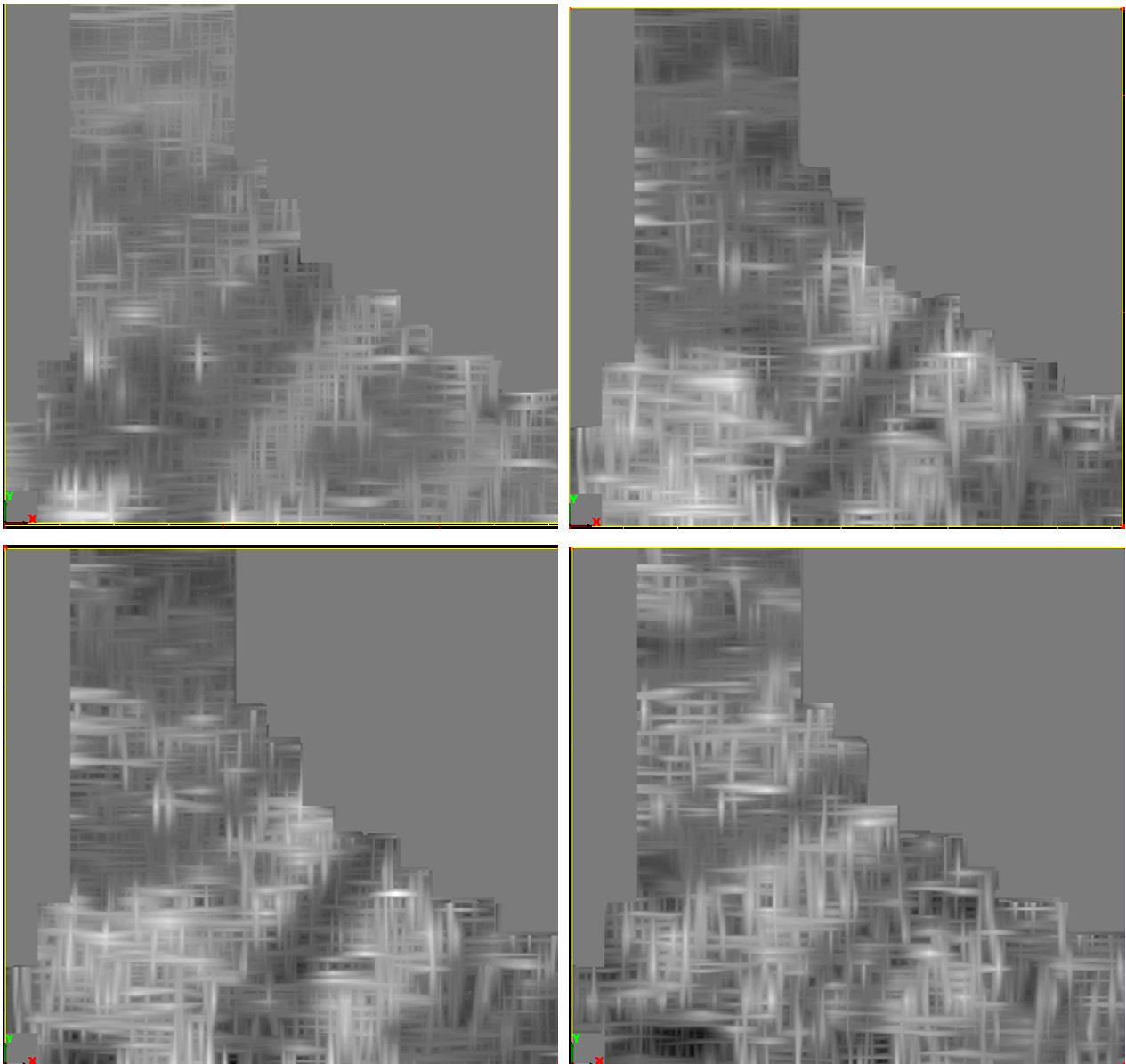
Figura 8.14 Riflessioni dei giunti viste tramite sezione del modello 3D posizionata alla profondità di  $Z = 0$  ns (a sinistra) e disegno con segnali realizzato durante l'analisi dei file bidimensionali (a destra).

Nella parte più superficiale del modello ( $Z = 0$  ns) è stato possibile osservare la posizione dei giunti metallici presenti nella pavimentazione (Figura 8.14).

Come si può notare dalla Figura 8.14 c'è una perfetta corrispondenza tra le due immagini. Il giunto metallico posizionato più a Nord viene rappresentato come un elemento continuo mentre gli altri elementi vengono visualizzati come una serie di segmenti intersecati tra loro; tale differenza è causata dall'orientazione dei giunti rispetto la linea eseguita con l'antenna.

Analizzando le sezioni radar successive è stato possibile osservare l'andamento dei primi starti del solaio: dalla Figura 8.15 si nota come nell'immagine in alto a sinistra (corrispondente al piano più superficiale di tale sequenza) sia presente una forte riflessione in corrispondenza della zona Sud-Ovest e che questa tende ad espandersi nelle sezioni seguenti. Il fenomeno descritto indica che il solaio analizzato non è perfettamente orizzontale, ma presenta un leggera inclinazione verso il basso spostandosi da questo angolo (dove la riflessione appare prima) verso il centro della sala; in

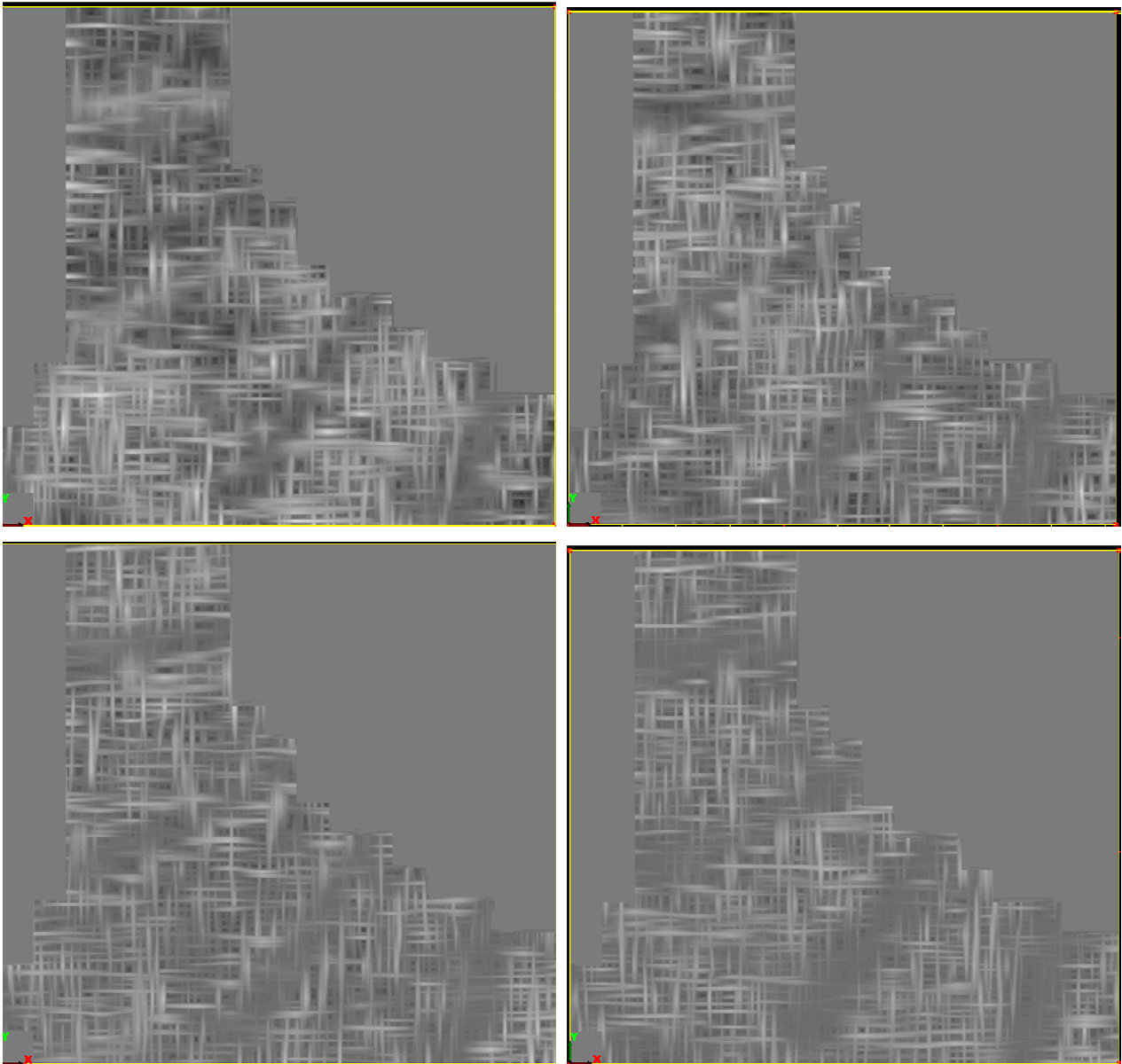
particolare è possibile notare che la zona Nord è quella più bassa rispetto alle altre in quanto è l'ultima area ad essere raggiunta da tale riflessione.



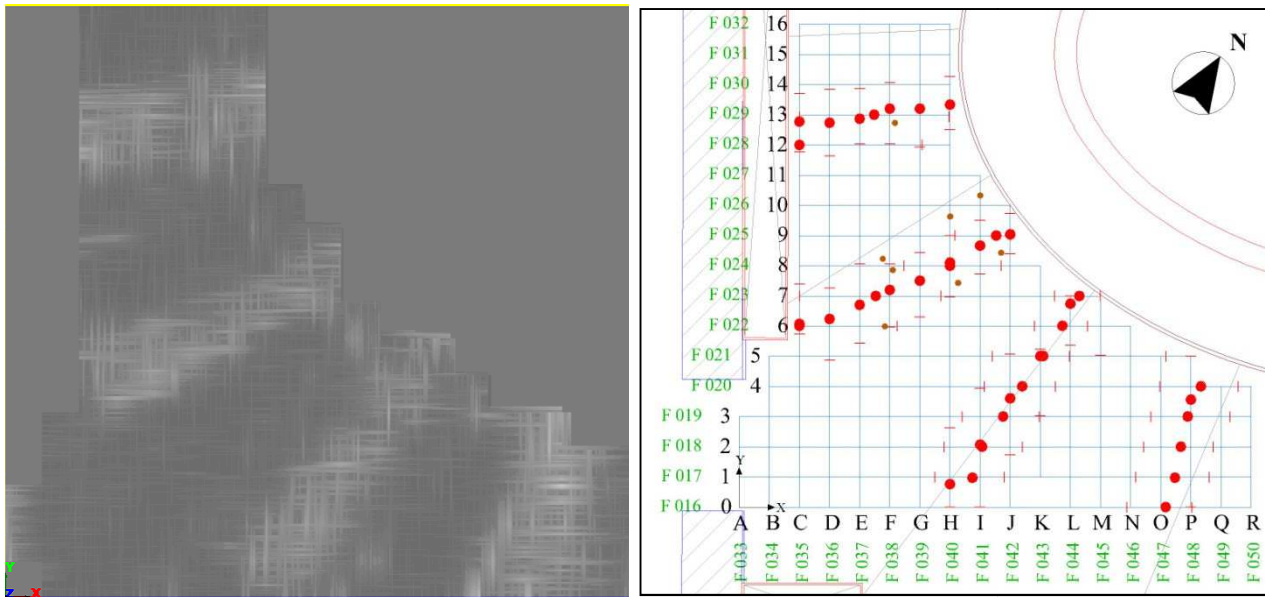
*Figura 8.15 Sequenza di sezioni radar posizionate alle profondità di 10, 11, 12 e 13 cm (iniziando da in alto a sinistra): si nota come la riflessione più forte presente nella zona Sud-Ovest della prima immagine si espanda poi in tutto la sezione.*

Aumentando ulteriormente la profondità delle sezioni è possibile osservare con maggiore dettaglio le riflessioni disposte a raggiera già individuabili nella sequenza di Figura 8.15: tali strutture individuano la posizione delle volte di sostegno del solaio della Sala del Consiglio della Provincia. Dalla sequenza di Figura 8.16, oltre a notare ancora l'anticipo dei segnali presenti nella zona più a Sud (nella parte bassa delle singole immagini), è possibile osservare le riflessioni provocate degli elementi strutturali presenti nel solaio; nelle sezioni più superficiali di tale sequenza, le volte

vengono individuate da riflessioni distribuite su una linea, mentre più in profondità queste tendono ad allargarsi delimitando gli estremi delle volte. Questo fenomeno risulta evidente osservando la volta posizionata più a Nord: nella prima immagine di Figura 8.16, questa è individuata da un'unica linea, ma già nella sezione successiva si nota la presenza di due linee separate tra loro che tendono a distanziarsi ulteriormente aumentando la profondità delle sezioni visualizzate.



*Figura 8.16 Sezioni posizionate alla profondità di 15, 16, 17 e 18 cm (iniziando da in alto a sinistra): visione delle volte di sostegno del solaio disposte a raggiera.*



*Figura 8.17 Sezione interna del volume 3D, profondità (Z) 10 ns: si osserva la perfetta corrispondenza tra le riflessioni individuate nei radargrammi bidimensionali (riportati nella tavola a destra) e quelle individuate nel modello 3D.*

## 8.6 Osservazioni e suggerimenti

Le analisi condotte in questa sala hanno permesso di rilevare gli elementi strutturali portanti di questa sala; è stato possibile osservare le volte di sostegno del solaio e la presenza di altri elementi strutturali posizionati ai lati di queste mentre la visione della riflessione dell'intradosso della volta è risultata difficoltosa.

Per ottenere maggiori informazioni si potrebbe eseguire l'analisi utilizzando una griglia radar con una maglia di passo minore ed aumentando la finestra temporale di ascolto (range) del segnale.

## Capitolo 9

# PIANO INTERRATO: INDAGINE DI UMIDITÀ IN MURATURE TRAMITE GPR RADAR

---

### 9.1 Scopi delle prove

Lo scopo dell'indagine condotta nel piano interrato di Palazzo Malvezzi è quello di studiare la presenza di umidità all'interno delle murature e valutare il livello di risalita capillare all'interno degli elementi strutturali studiati; a tale scopo è stata utilizzata la tecnologia radar GPR che consente di investigare le caratteristiche del mezzo in esame lungo una sua sezione fornita dal radargramma. Le indagini si sono svolte in due aree diverse del palazzo: la prima situata nella sala cablaggi, la seconda in prossimità del vano ascensori, entrambe in data 23/11/2010

### 9.2 Strumentazione utilizzata

Per questa prova è stata utilizzata la stessa strumentazione radar GPR già impiegata nell'analisi della conformazione dei solai descritta nel precedente capitolo. Per non appesantire la lettura non verranno nuovamente riportate le caratteristiche già ampiamente descritte.

Con la strumentazione utilizzata è stata stimata una risoluzione del segnale basandosi solamente sulla frequenza centrale delle antenne; così, considerando una velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto pari a 300.000 Km/s (0,3 m/ns) e considerando una costante dielettrica del mezzo pari a 9 è stata calcolata innanzitutto la velocità del segnale all'interno del mezzo pari a

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = 0,1 \text{ m/ns}$$

per poi valutare la lunghezza d'onda  $\lambda$  e la risoluzione  $R$  attraverso le formule

$$v = \lambda \cdot f \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

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

Con questi dati è stata ricavata una lunghezza d'onda ed una risoluzione pari a

$$\lambda = 0,11 \text{ m}$$

$$R = 0,037 \text{ m.}$$

I valori ottenuti servono solamente a dare indicazioni sulle grandezze in gioco in quanto la costante dielettrica del mezzo e le frequenze reali sono diverse da quelle ipotizzate.



### 9.3 Posizioni di prova e preparazione del test

La prima operazione eseguita per scegliere quali fossero gli elementi strutturali da sottoporre ad analisi radar è stata un'ispezione visiva finalizzata alla ricerca di efflorescenze o di altri segnali che indicassero la presenza di umidità all'interno delle murature. Verificate le buone condizioni superficiali degli elementi presenti all'interno della stanza cablaggi, sono stati scelti come soggetti dell'indagine i due pilastri presenti e la parete perimetrale esposta a Nord (Figura 9.2); un'ulteriore indagine è stata condotta in una parete non presente all'interno della sala e posizionata davanti all'uscita degli ascensori.

Per distinguere i due pilastri presenti nella sala cablaggi, sono stati denominati rispettivamente pilastro1 quello verso Est e pilastro2 quello verso Ovest mentre per la parete Nord sono state definite due posizioni, una sulla lesena qui presente di fronte al pilastro2 e l'altra accanto al lato sinistro di questa.

Nell'altra area di studio, invece, in superficie si sono notate notevoli efflorescenze, indice della presenza di umidità all'interno del mezzo (Figura 9.1).



*Figura 9.1 Parete in zona ascensori: si osserva la presenza di efflorescenze.*

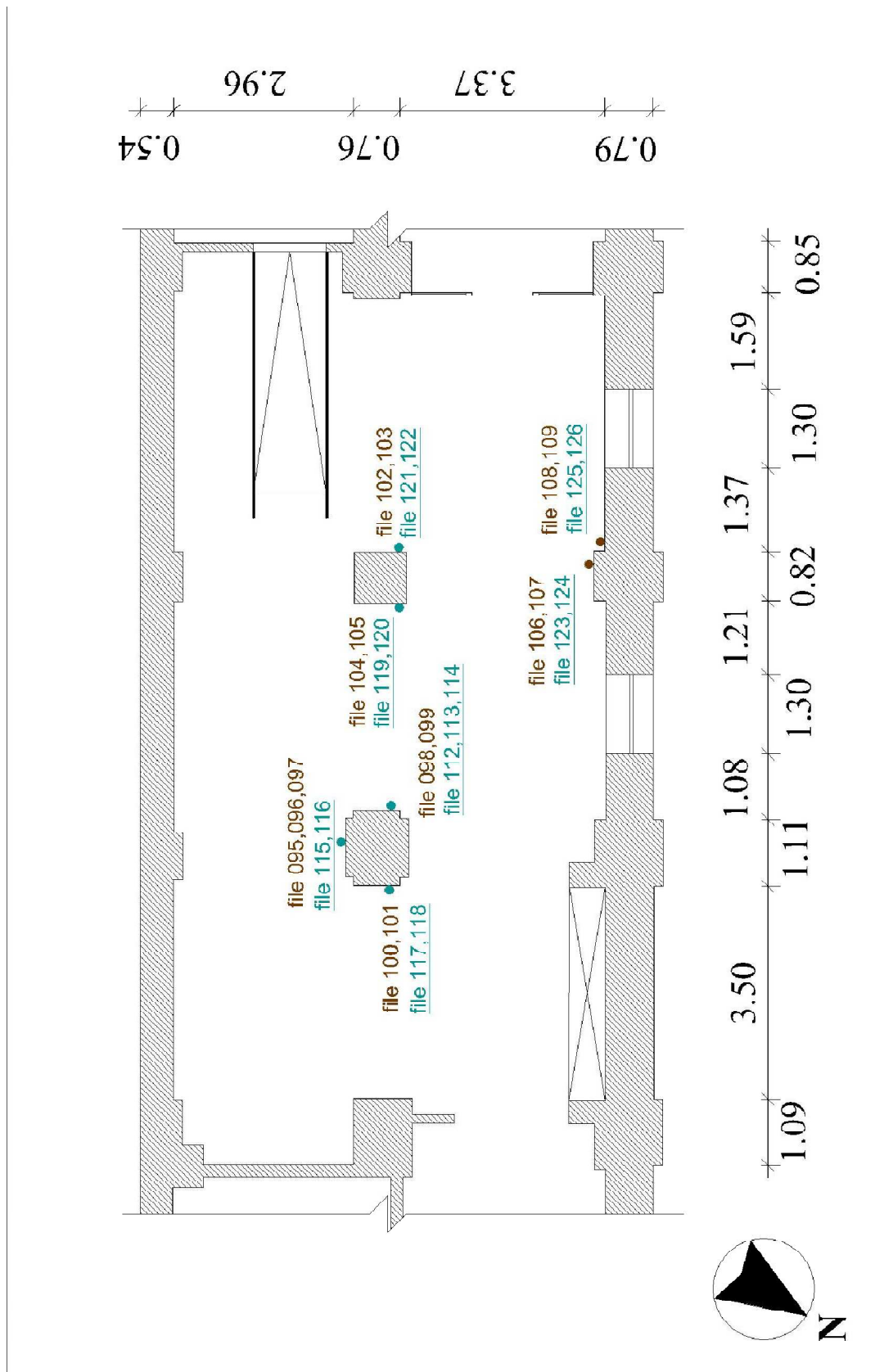


Figura 9.2 Posizioni delle linee d'indagine nella sala cablaggi: in marrone le linee eseguite con antenna a 900MHz, quelle in azzurro e sottolineate con antenna a 400MHz (modificato da Capobianchi, 2009).

Questa seconda area d'indagine è stata definita zona ascensori per poterla distinguere dalla prima.

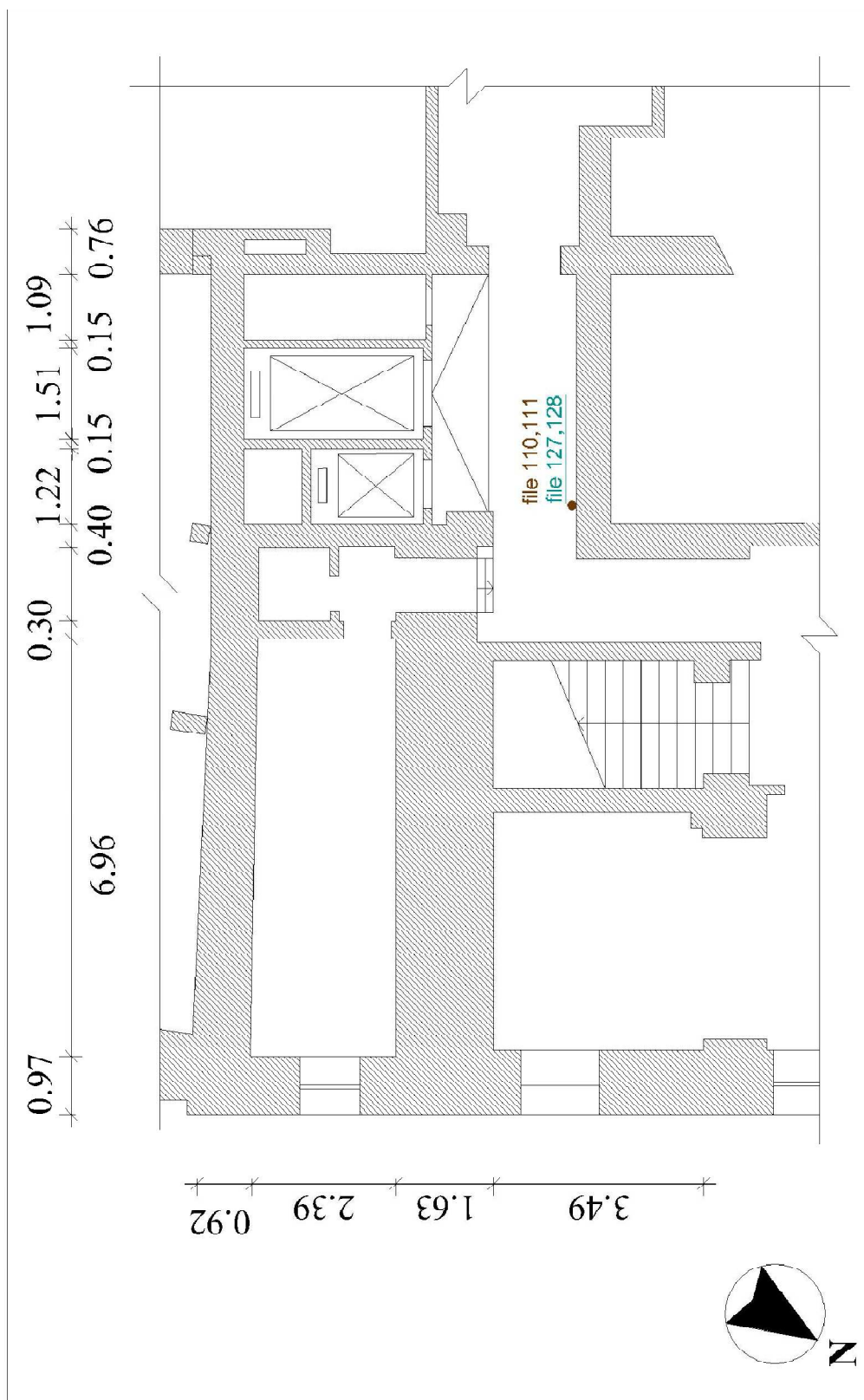


Figura 9.3 Posizione delle linee d'indagine nella zona ascensori: in marrone sono indicate le linee radar eseguite con antenna a 900MHz, sottolineate ed in azzurro con antenna a 400MHz (modificato da Capobianchi, 2009).

- PILASTRO1

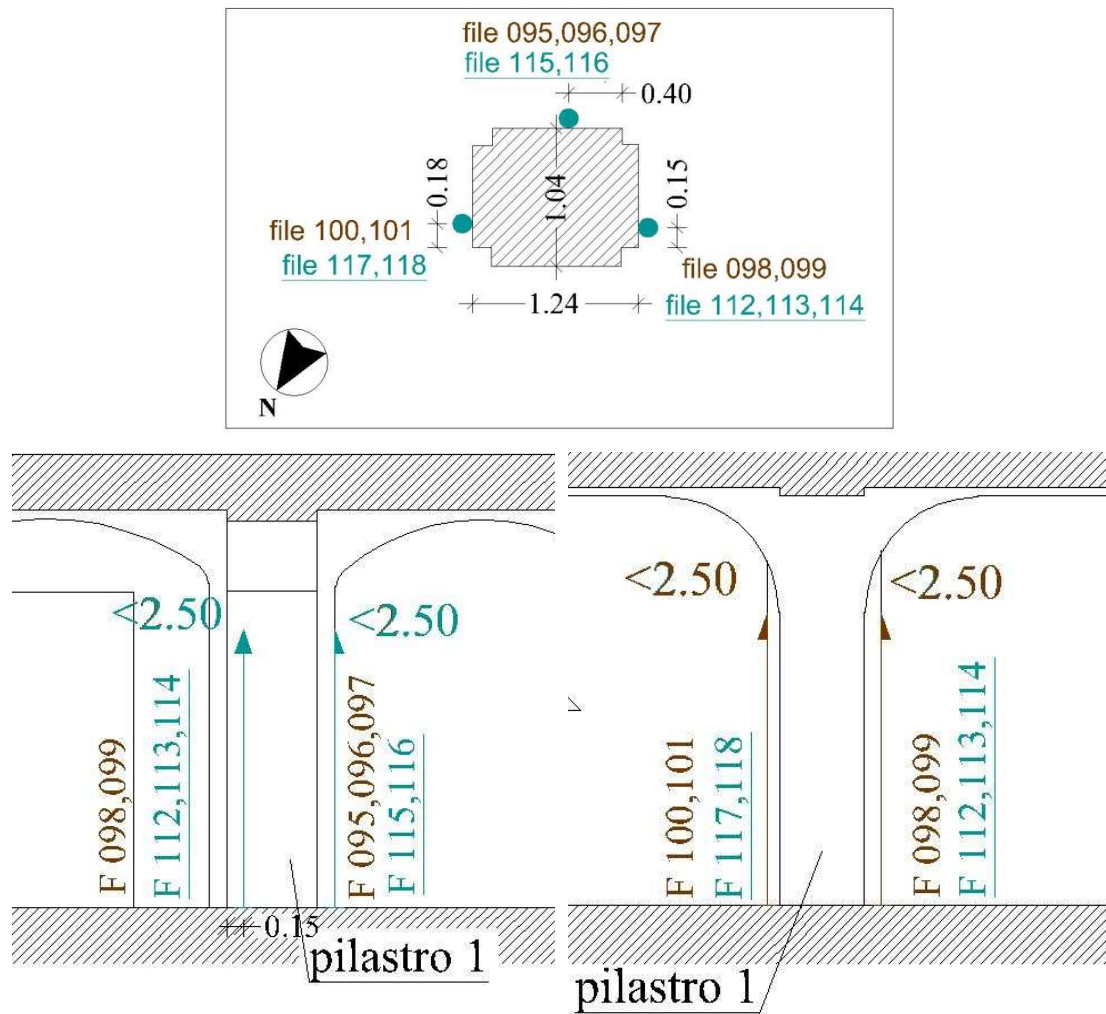


Figura 9.4 Posizioni di prova sul Pilastro1: in alto è rappresentata la sezione ed in basso il prospetto rivolto a Sud (sinistra) e quello rivolto ad Est (a destra)

Il pilastro si presenta con forma a croce e dalla geometria irregolare in quanto i lati esposti ad Est e ad Ovest presentano lunghezze differenti; nel pilastro sono installati quadri elettrici che in alcuni casi hanno condizionato le fasi di acquisizione dei dati causando spostamenti del percorso dell'antenna.

Le indagini condotte sono state eseguite sui lati Est, Sud ed Ovest collezionando un totale di quattordici linee eseguire per metà con l'antenna a 900 MHz e per l'altra metà con l'antenna a 400 MHz. Sui lati sottoposti ad indagine, lungo le linee di rilievo radar, sono state disegnate con gesso delle linee orizzontali di riferimento posizionate ad un interasse di 50 cm l'una dall'altra a cominciare dal piano di calpestio; questi riferimenti sono stati utilizzati per inserire i Mark all'interno del radargramma durante l'acquisizione dei dati. Tali linee sono state disegnate in modo tale che non venissero coperte durante il passaggio dell'antenne su di esse in quanto il

posizionamento dei Mark deve essere eseguito in corrispondenza del centro antenna. La direzione di scorrimento delle antenne è stata dal basso verso l'alto.

Mentre il primo file registrato (file 095) è stato eseguito come prova per verificare il segnale ricevuto, gli altri sono a due a due ripetizioni della stessa linea; infatti i file 096 e 097, così come le coppie 098-099 e 100-101, sono sezioni radar dello stesso percorso, ma tra loro varia solamente l'orientamento dell'antenna, verticale nel primo caso ed orizzontale nel secondo. Tutte le linee eseguite su questo pilastro hanno uno sviluppo superiore ai due metri raggiungendo e a volte superando l'imposta delle volte (i percorsi terminano poco dopo la quarta linea di gesso posta a due metri di altezza). Per tutte le linee eseguite su questo elemento, l'antenna è stata posizionata a contatto con il pavimento: la posizione del centro antenna rispetto alla pavimentazione è pari a 9,5 cm nel caso di polarizzazione orizzontale e pari a 16,5 cm nel caso di polarizzazione verticale.

Inoltre, per questo elemento strutturale è stata rilevata la geometria misurando le dimensioni dei lati maggiori e degli angoli rientranti; in questo modo è stato possibile calcolare la lunghezza del percorso effettuato dalle onde elettromagnetiche e ricavare la velocità e la costante dielettrica dell'elemento.



*Figura 9.5 Pilastro1: visione dei riferimenti distanziometrici lungo la linea di rilievo sulla faccia*

*Sud.*



- PILASTRO2

La sezione è di forma leggermente rettangolare con i lati maggiori esposti nella ad Est e ad Ovest. Le indagini di questo pilastro hanno riguardato solamente questi due lati e sono state collezionate otto linee in totale, quattro con antenna a 900 MHz e quattro con antenna a 400 MHz; sui due lati oggetto dell'indagine sono stati disegnati dei riferimenti orizzontali con interasse pari a 50 cm per poter valutare l'altezza di risalita all'interno del radargramma. Le linee qui eseguite sono state registrate facendo muovere l'antenna dal basso verso l'alto. A causa della presenza di lampade installate sul pilastro, tali linee hanno uno sviluppo inferiore rispetto a quelle registrate per gli altri elementi strutturali sottoposti a questa analisi; infatti il percorso dell'antenna supera solamente tre linee di gesso per fermarsi in prossimità della quarta, ma senza superarla. Anche qui per ogni linea di analisi sono stati registrati due file con differente polarizzazione dell'antenna. Sono state inoltre rilevate le dimensioni del pilastro per poter procedere con il calcolo delle velocità e delle costanti dielettriche

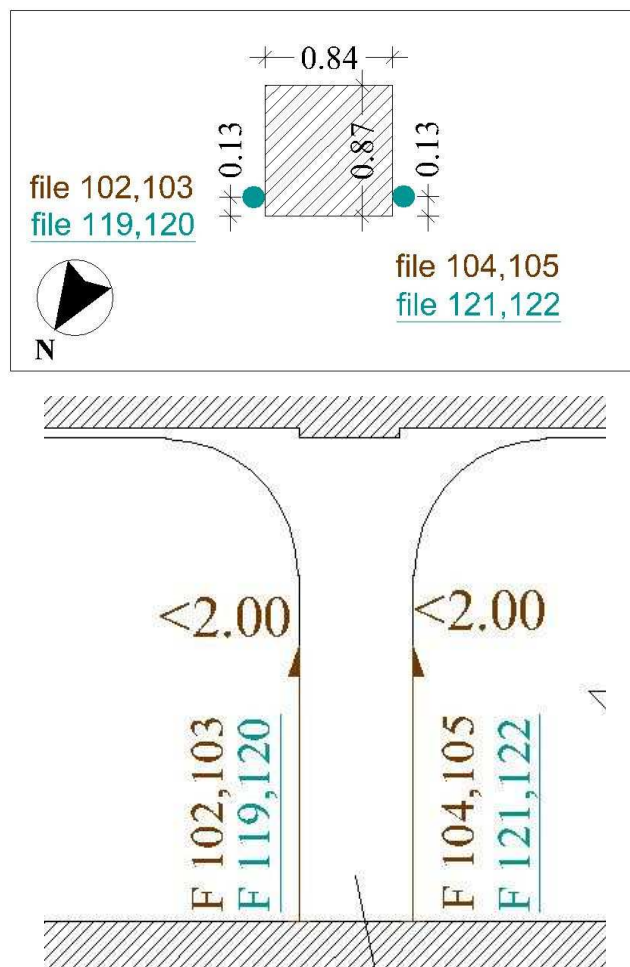


Figura 9.6 Posizioni di prova sul Pilastro2: in alto è rappresentata la sezione del pilastro, in basso il prospetto rivolto verso Sud.



- PARETE NORD



*Figura 9.7 Parete Nord: particolare della lesena e della trave*

Il punto d'inizio delle linee effettuate nella parete Nord è posizionato ad un'altezza dal pavimento di 56 cm a causa di una trave presente lungo tutta la parete. In questa zona sono stati selezionati due percorsi, uno sulla lesena a 22 cm dal bordo Ovest, l'altro al di fuori e posizionato alla sinistra di questa ad una distanza di 15 cm; in totale sono state eseguite otto linee, quattro con antenna a 900 MHz e quattro con quella a 400MHz. Ancora una volta sul percorso da effettuare sono state segnalate le postazioni con interasse paria 50 cm per inserire i Mark all'interno del radargramma e la direzione di scorrimento delle antenne procede dal basso verso l'alto; la lunghezza totale percorsa è superiore ai due metri ed ogni percorso è stato ripetuto due volte facendo variare la polarizzazione dell'antenna (file 106 e 108 antenna verticale; file 107 e 109 antenna orizzontale). Il punto di partenza del centro antenna è misurato a partire dell'estradosso della trave (0,56 m dal piano della pavimentazione) ed è pari a 9,5 cm per antenna disposta orizzontalmente e 16,5 cm per antenna disposta verticalmente.

In questa zona è stato impossibile procedere con la misurazione dello spessore della parete in quanto l'elemento strutturale indagato è perimetrale e non consente l'accesso alla visione del retro. In questo caso la distanza percorsa dalle onde elettromagnetiche necessaria per il calcolo delle

velocità e delle costanti dielettriche è stata ricavata dai disegni presenti in altre tesi (Capobianchi, 2009).

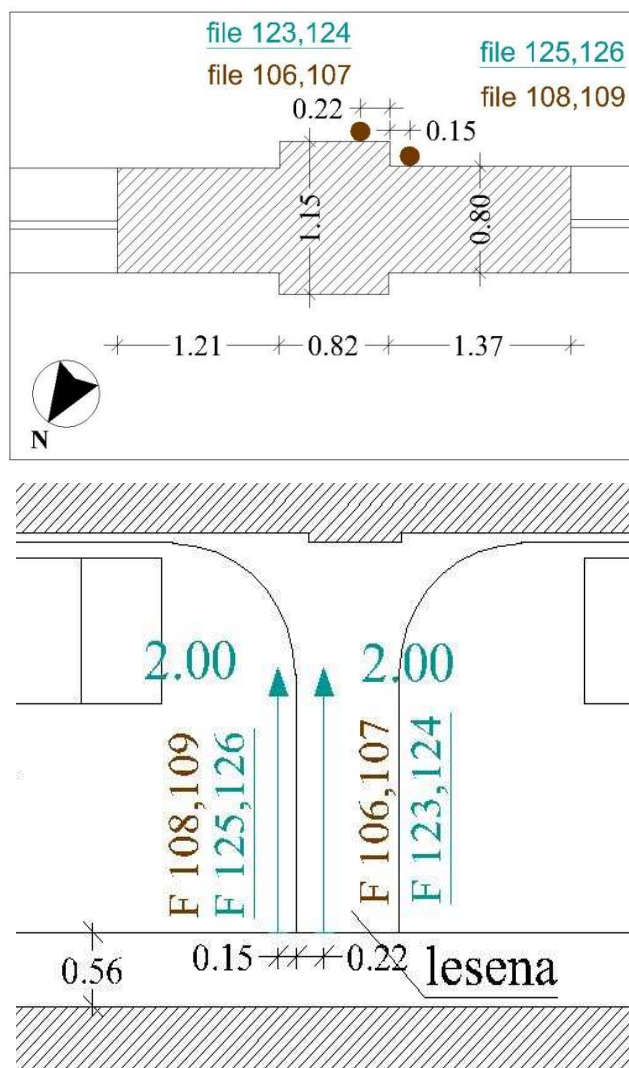


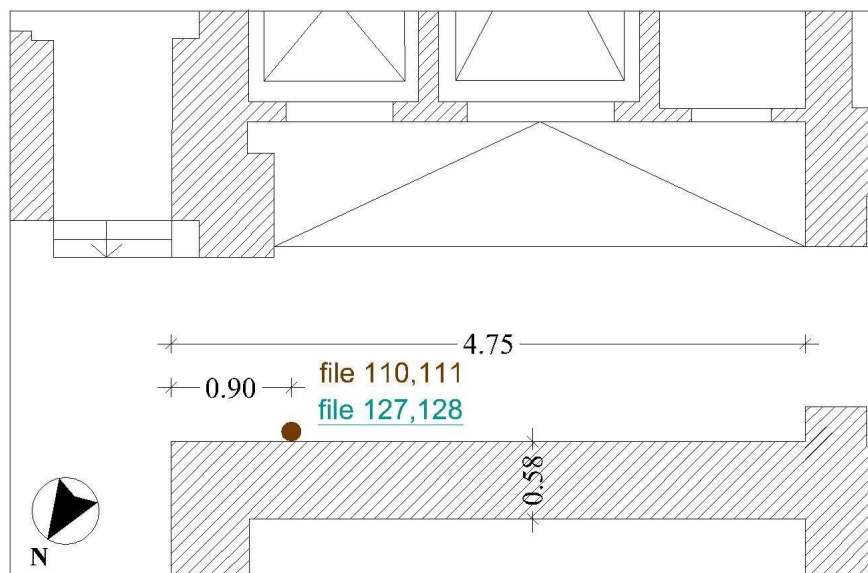
Figura 9.8 Posizioni di prova sulla parete Nord: in alto è riportata la sezione, in basso il prospetto della parete

#### - ZONA ASCENSORI

In questa zona è stato scelto un solo asse di percorrenza posto a 90 cm dall'angolo che la parete forma con il corridoio. I file registrati in questa zona sono quattro, due eseguiti con antenna a 900 MHz e due con quella a 400MHz. Ancora una volta, sulla parete sono state segnalate tramite linee orizzontali di gesso le stazioni posizionate ad interasse di 50 cm e utilizzate come riferimenti per posizionare i Mark all'interno di un radargramma. Tutte le linee qui registrate sono state condotte partendo con l'antenna a contatto del pavimento per poi farla scorrere verso l'alto per una lunghezza totale superiore ai due metri.

Anche qui il singolo percorso effettuato è stato ripetuto facendo variare la polarizzazione dell'antenna valutando la posizione del suo centro a 9,5 cm dalla pavimentazione nel caso si antenna orizzontale ed a 16,5 cm per antenna verticale.

La parete sottoposta ad indagine è perimetrale e non consente la misura diretta dello spessore dell'elemento strutturale; per ricavare tale valore sono stati utilizzati gli elaborati grafici presenti in altre tesi (Capobianchi, 2009)



*Figura 9.9 Posizioni di prova*



*Figura 9.10 Particolare della parete davanti agli ascensori: notevole presenza di efflorescenze.*

Nella Figura 9.10 si può osservare la presenza delle efflorescenze ed il livello di risalita capillare visibile in superficie ed evidenziato con gesso colorato (linea ondulata al di sopra della crepa) alla quota di 57 cm in questo punto.

Prima di iniziare con la fase di acquisizione dei dati è stato necessario impostare i parametri dell'unità digitale di controllo: alla costante dielettrica è stato attribuito il valore 9 mentre per il Range è stata scelta una finestra di tempo pari a 30 ns (Tabella 9.1).

Tabella 9.1 Settaggi dell'unità digitale di controllo per l'analisi eseguita nell'interrato del palazzo

PARAMETRI GPR	
T Rate (KHz)	100
Mode	Time
Samples	512
Format (bits)	16
Range (ns)	30
Diel	9
Gain (dB)	9
	55
Rate	64
Scan/unit	200
Offset (ns)	1.42
Surface (%)	0

Con questo settaggio dell'unità digitale di controllo, ed in particolare riferendosi ai valori della costante dielettrica (Diel) e della finestra temporale di invio e ricezione del segnale (Range), è possibile prevedere una velocità di propagazione all'interno del mezzo pari a

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{0,3}{\sqrt{9}} = 0,1 \text{ m/s}$$

mentre la profondità raggiungibile è

$$s = v \cdot \frac{t}{2} = 0,1 \cdot \frac{30}{2} = 1,5 \text{ m.}$$

Questi dati sono puramente indicativi in quanto solamente durante l'analisi dei dati è possibile ricavare l'esatto valore della costante dielettrica e quindi della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche.

## 9.4 Procedura di acquisizione

La procedura di acquisizione dei dati radar GPR è piuttosto semplice e richiede l'utilizzo di due operatori, il primo addetto all'unità di controllo ed il secondo alla traslazione dell'antenna sulla superficie dell'elemento sottoposto a indagine (Figura 9.11).



*Figura 9.11 Operazioni di acquisizione dei dati radar: trascinamento dell'antenna (a sinistra e controllo dell'unità digitale (a destra).*

Le antenne utilizzate nella prova sono sprovviste di odometro e per tale motivo l'operatore addetto alla movimentazione dell'antenna deve mantenere l'antenna ad una velocità costante in modo che il radargramma sia ben proporzionato lungo l'asse orizzontale dei tempi.

L'addetto all'unità digitale di controllo ha il compito di inserire correttamente i Mark all'interno del radargramma: tale operazione consiste nel premere il tasto Mark presente sull'unità di controllo, al passaggio del centro dell'antenna sui riferimenti (segmenti orizzontali) disegnati precedentemente per il controllo delle distanze.

Le operazioni, differenziate in questo modo, permettono di realizzare radargrammi proporzionati, in cui la distanza tra i Mark posizionati risulti costante: l'immagine finale sarà un radargramma privo



di compressioni o allungamenti lungo l'asse orizzontale (visibile tramite il posizionamento dei Mark, più vicini o lontani a seconda della variazione di velocità di trascinamento dell'antenna). Non avendo stabilito con precisione la posizione del centro antenna prima di effettuare la linea radar, questa è stata misurata di volta in volta prima di effettuare la registrazione dei singoli file (Figura 9.12).



*Figura 9.12 Zona ascensori: fase di misurazione della posizione del centro antenna sulla linea radar da registrare.*

I primi file registrati sono quelli del Pilastro1, seguiti rispettivamente da quelli del Pilastro2, Parete Nord e Zona ascensori.

- Pilastro1

La procedura di acquisizione dei file registrati in questa posizione non ha comportato particolari difficoltà. Tutte le linee eseguite sono state condotte dal basso verso l'alto per una lunghezza superiore ai due metri.



- Pilastro2

La lunghezza delle linee registrate sono inferiori ai due metri di lunghezza a causa della presenza dell'impianto d'illuminazione presente sul pilastro. Durante la registrazione del file 103 eseguito con l'antenna a frequenza centrale di 900 MHz e dei file 119 e 120 eseguiti con l'antenna a 400 MHz è stato necessario deviare il percorso tra i 50 e i 120 cm facendo sporgere lo strumento fuori dal pilastro a causa della presenza del quadro elettrico (Figura 9.13).



*Figura 9.13 Ostacoli presenti nel Pilastro2: impianto d'illuminazione (a destra) e quadro elettrico (a sinistra).*

- Parete Nord

Tutte le linee registrate in questa zona sono di lunghezza superiore ai due metri e sono state eseguite partendo con l'antenna a contatto della trave.

- Zona ascensori

Anche qui durante l'acquisizione dei dati non sono state riscontrate particolari difficoltà. Per poter eseguire correttamente la linea d'indagine e consentire di manovrare liberamente l'antenna è stato necessario rimuovere un estintore appeso alla parete evitando così anche possibili disturbi del segnale. (Figura 9.14)



*Figura 9.14 Fase terminale di acquisizione nella zona ascensori.*

## 9.5 Elaborazione e visualizzazione dei dati

Il file radar GPR registrato durante le fasi di acquisizione può essere sfruttato solamente per una prima analisi eseguita direttamente in situ, ma per uno studio più dettagliato e specifico deve essere elaborato; a tale scopo è stato utilizzato il software RADAN 6.6 fornito dalla GSSI.

Lo scopo principale dell'analisi consiste nell'individuare l'andamento della risalita capillare all'interno degli organi strutturali sottoposti ad indagine e l'elaborazione dei dati è stata finalizzata a migliorare le condizioni di leggibilità di tale livello.

Le funzioni del programma utilizzate per modificare i file non verranno descritte in quanto il loro funzionamento è stato già spiegato nel capitolo precedente. Dovendo eseguire le indagini su elementi differenti tra loro (pilastri e pareti esterne) è stato necessario applicare alle funzioni utilizzate nella modifica dei file dei valori a seconda dell'elemento strutturale analizzato:

*Tabella 9.2 Riassunto dei valori attribuiti alle funzioni utilizzate per elaborare i radargrammi Antenna 900MHz*

FUNZIONE	PILASTRO 1	PILASTRO 2	PARETE NORD	ZONA ASCENSORI
Surface position adjustment	2,29 ns	2,29ns	2,17 ns	2,05 ns
Background removal	Minimo	Minimo	Massimo	Massimo
Gain	1.5; 1.0	3.0; 0.0	2.0; 0.0	2.0; 0.0

### Antenna 400MHz

FUNZIONE	PILASTRO 1	PILASTRO 2	PARETE NORD	ZONA ASCENSORI
Surface position adjustment	2,64 ns	2,64 ns	2,75 ns	2.93 ns
Background removal	Minimo	Minimo	Minimo	Minimo
Gain	4.8; 0.3	4.3; 0.4	3.3; 0.5	4.4; 0,0

Il valore “minimo” indica che il filtro è stato applicato a tutto il file in modo leggero evitando così la possibilità di eliminare segnali reali dal radargramma.

In questa fase di studio è stata calcolata anche l’altezza di risalita capillare visibile all’interno dei radargrammi: per valutare con esattezza tale punto è stato necessario effettuare una proporzione tra lo scan corrispondente alla risalita massima visibile e quello corrispondente al Mark posizionato a 2,0 m;

$$2,0m : scan\ corrispondente\ all'\ altezza\ di\ 2,0m = altezza\ di\ risalita : scan\ di\ risalita$$

$$\frac{2,0m \cdot scan\ di\ risalita}{scan\ corrispondente\ all'\ altezza\ di\ 2,0m} = altezza\ di\ risalita.$$

La valutazione degli scan da inserire all’interno della proporzione è stata eseguita sui file originali in quanto l’applicazione dei filtri può provocare degli spostamenti dei segnali presenti all’interno del radargramma falsando i risultati.

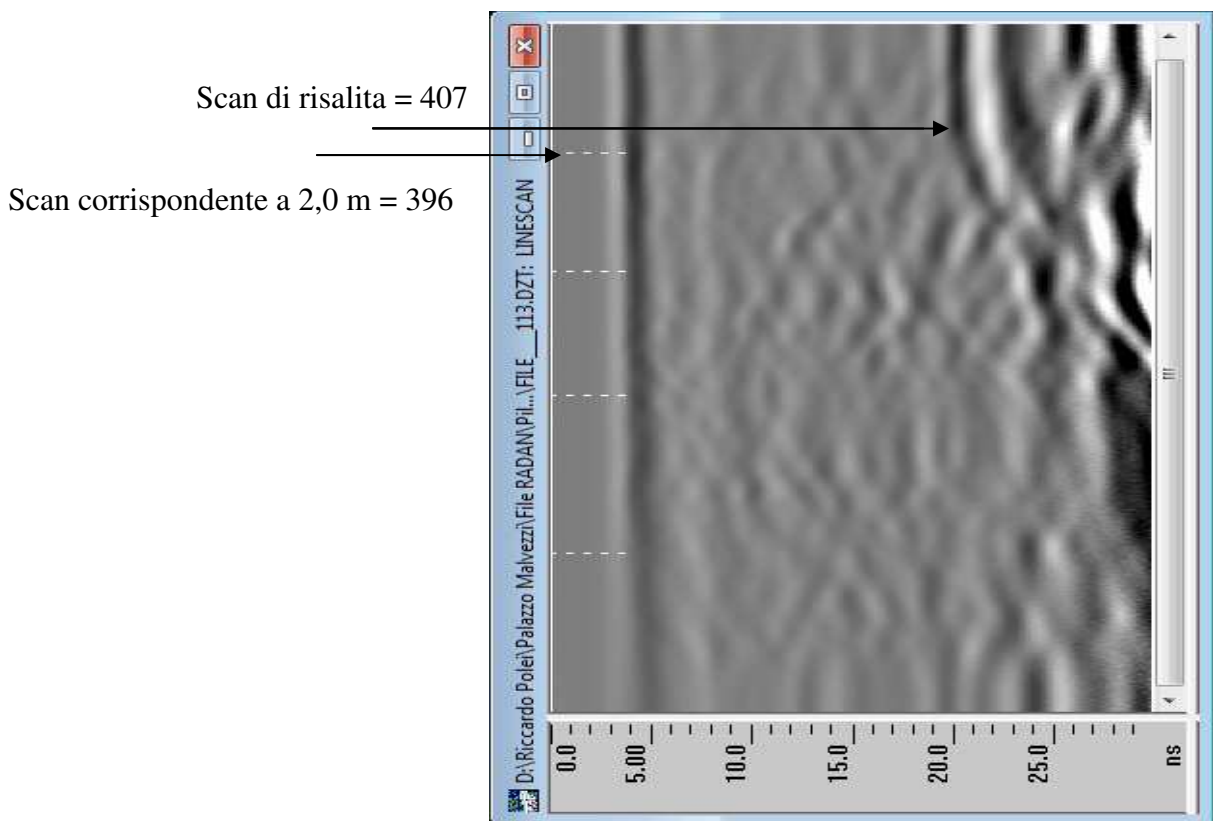


Figura 9.15 File 113 registrato sulla faccia Ovest del pilastro 2 con antenna 400MHz: valutazione dell’altezza di risalita capillare all’interno dell’elemento strutturale

Considerando il file 113 di Figura 9.15 e inserendo i valori indicati all’interno della formula è possibile ricavare l’altezza di risalita capillare:

$$\frac{2,0m \cdot 407}{396} = 2,059m.$$

Questa operazione è stata eseguita per tutti i file in cui era possibile vedere il lato opposto dell'elemento ispezionato.

Per tutti i file analizzati sono state inoltre calcolate le frequenze del segnale sulle due riflessioni maggiori (corrispondenti a quella superficiale ed a quella della visione del retro): valutando l'istante iniziale e quello finale di una singola riflessione è stato possibile valutarne la frequenza invertendo l'intervallo di tempo  $\Delta T$  trascorso tra i due momenti.

$$\Delta T = T1 - T2 ; \text{freq.} = \frac{1}{\Delta T}.$$

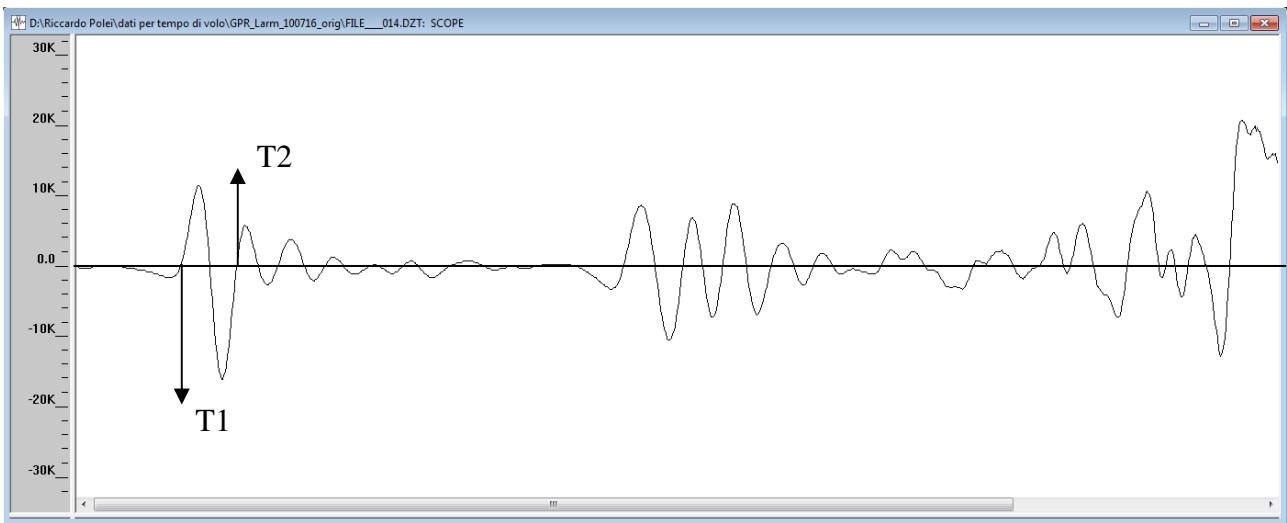


Figura 9.16 Scan 480 (in zona asciutta) del file 113 registrato sulla faccia Ovest del pilastro 2: valutazione degli istanti T1 e T2 per il calcolo delle frequenze del segnale.

Per valutare gli istanti T1 e T2 tramite il software utilizzato nell'analisi (Radan 6.6) è sufficiente posizionare il cursore sui punti indicati per ottenere il valore esatto del tempo

$$\Delta T = T1 - T2 = 5,18 - 2,08 = 3,1ns$$

cui corrisponde una frequenza di

$$\text{freq.} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{3,1} = 0,322GHz = 322MHz.$$

Nei file in cui è stato possibile osservare la presenza del retro dell'elemento sottoposto ad indagine, è stato possibile calcolare anche la velocità del segnale e la costante dielettrica tramite le formule

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} ; \epsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2.$$

In questo caso, il tempo indicato nella formula è valutato come differenza tra inizio della riflessione superficiale T1s ed inizio della riflessione del retro dell'elemento investigato T1r (Figura 9.17)

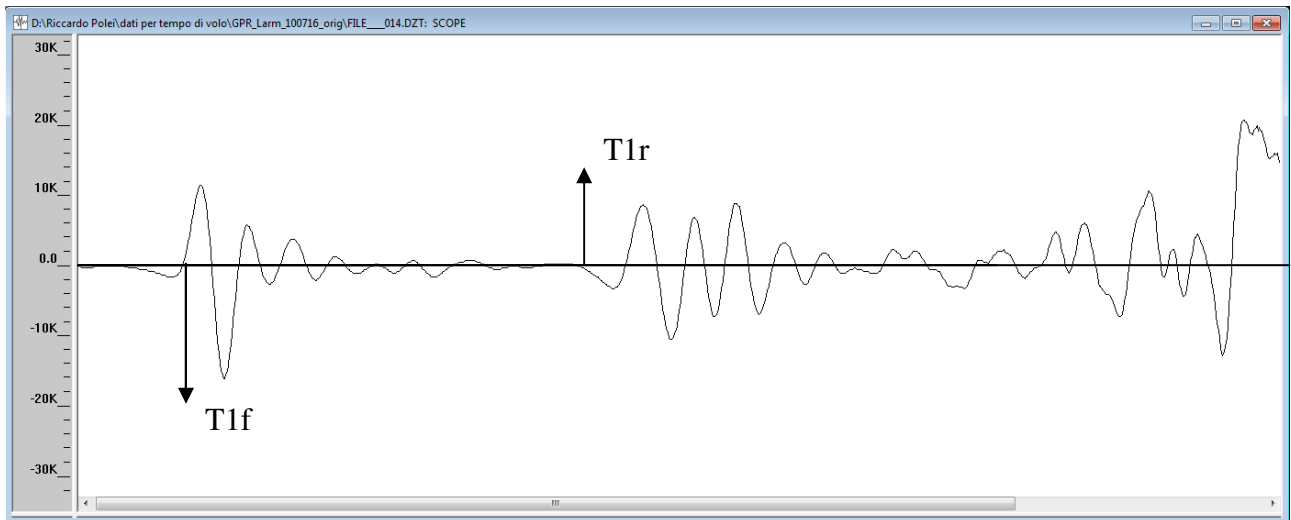


Figura 9.17 scan 480 (in zona asciutta) del file 113 registrato sulla faccia Ovest del pilastro 2: valutazione del tempo impiegato dal segnale per coprire la distanza superficie-retro.

## 9.6 Interpretazione dei dati

La propagazione delle onde elettromagnetiche è governata dalle proprietà dielettriche del mezzo che attraversa: se le caratteristiche dell'oggetto investigato rimangono costanti e non variano, la velocità di propagazione non subirà variazioni mantenendosi costante.

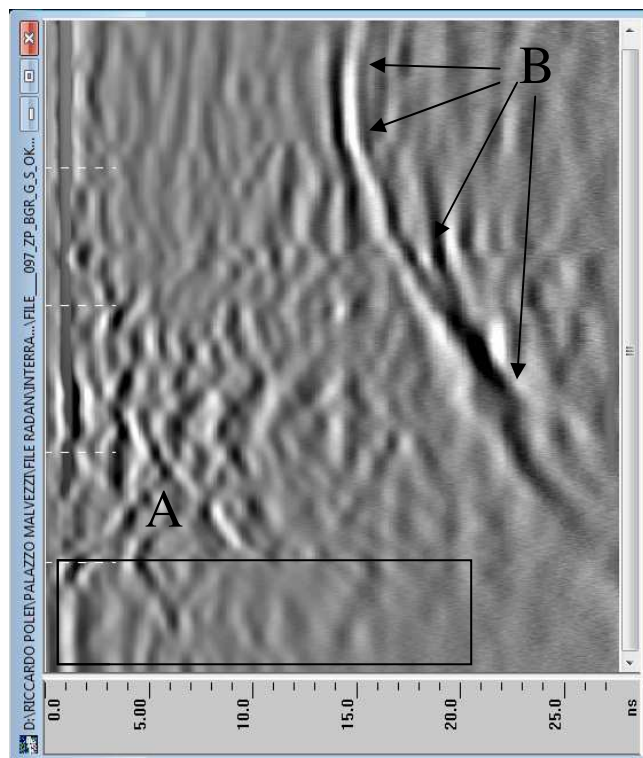
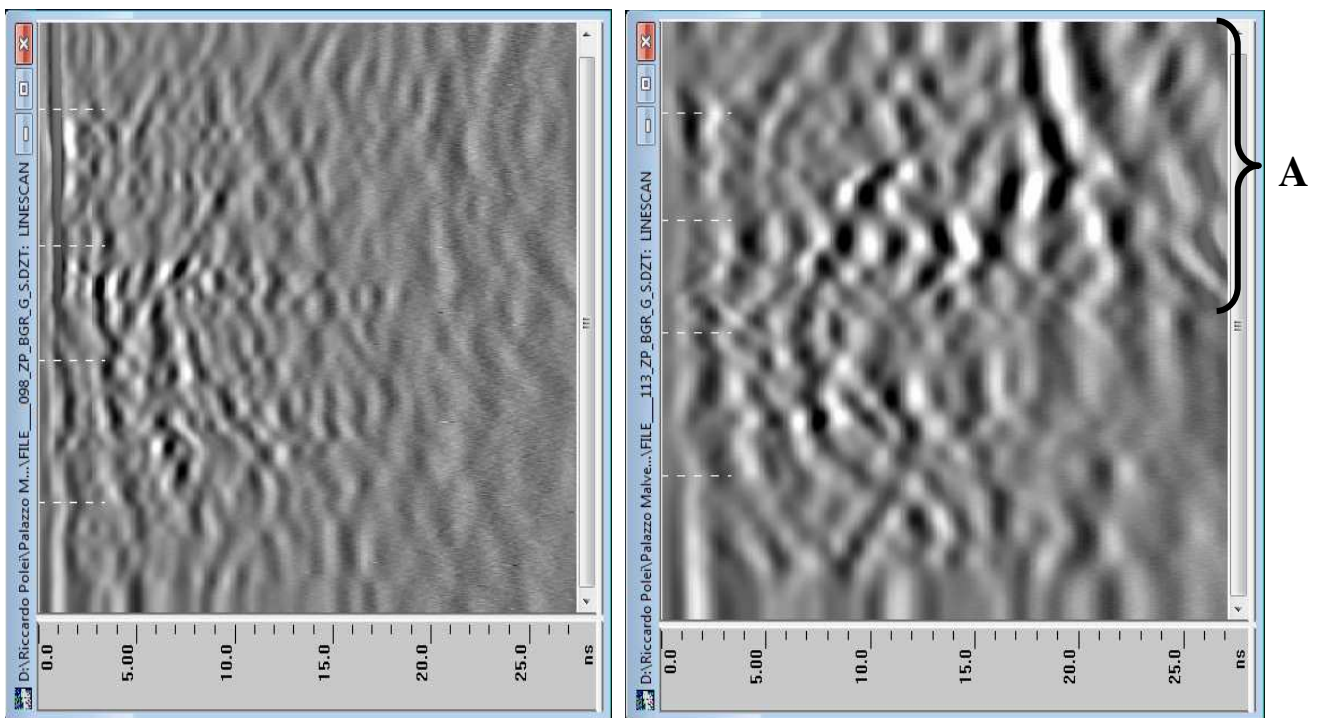


Figura 9.18 Presenza di umidità all'interno di elementi strutturali: distensione dell'onda del segnale (A) e diminuzione della velocità (B).

La presenza di umidità all'interno degli elementi strutturali altera le caratteristiche dielettriche del mezzo stesso facendo variare in questo modo la velocità dell'onda elettromagnetica producendo un rallentamento del segnale. In un radargramma la presenza di umidità si può notare osservando che la riflessione di una superficie nella realtà rettilinea appare invece curva. Oltre questo fenomeno, in presenza di umidità aumenta anche il tempo che una singola onda del segnale impiega per compiere un'oscillazione completa passando dal suo picco positivo a quello negativo (Figura 9.18).

- Pilastro 1

Il numero maggiore di dettagli è stato rilevato con l'antenna a 900MHz mentre con quella a 400MHz è stato possibile ottenere maggiori informazioni per quanto riguarda la presenza di umidità all'interno dell'elemento strutturale (Figura 9.19). Dalle linee eseguite sulle facce Ovest ed Est del pilastro (file 112, 113, 114, 117 e 118 con antenna 400MHz) è stato possibile osservare le facce opposte (rispettivamente Est ed Ovest) ad una profondità di 17ns osservabili nella zona superiore dei radargrammi (al di sopra del 2°Mark); a causa della presenza di umidità, tali linee tendono ad aumentare la loro profondità fino ad uscire al di fuori del radargramma (Figura 9.20).



*Figura 9.19* Linee radar eseguite sul lato Ovest del pilastro 2, confronto tra le due antenne: a sinistra file 098 registrato con antenna a 900MHz, a destra file 113 con antenna a 400MHz. Si nota come la riflessione del retro (A nel radargramma a destra) non sia visibile con l'antenna a 900MHz.



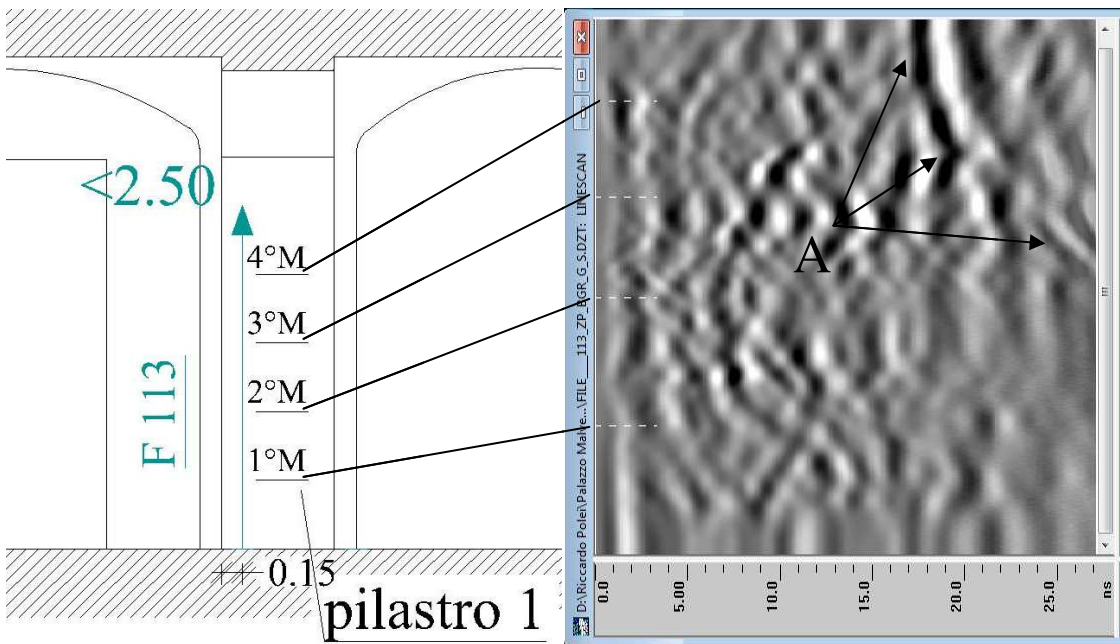


Figura 9.20 File 113 registrato con antenna 400MHz: a sinistra è riportato il prospetto (visione Est) con la lunghezza della linea e le posizioni dei Mark, a destra la sezione radar dove è possibile notare la riflessione del retro del pilastro (A).

Conoscendo le dimensioni geometriche del pilastro (e di conseguenza il percorso effettuato dal segnale) è stato possibile ricavare la velocità di propagazione dell'onda secondo la formula

$$v = \frac{2 \cdot s}{t}$$

Nella zona più alta del pilastro, cioè in assenza di umidità, tale velocità è stata calcolata pari a

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 124}{17} = 14.58 \text{ cm/ns},$$

mentre a metà altezza (circa 1m dalla base) tale valore è di

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 124}{26} = 9.53 \text{ cm/ns}.$$

Dalla lettura dei file 112 e 113 eseguiti sulla faccia Ovest con antenna a 400MHz si nota la presenza di una serie di stratificazioni posizionate ad una profondità di 3 e 5ns; ancora una volta, a causa dell'umidità, tali linee non risultano verticali, ma si nota un aumento della profondità del segnale nella zona compresa tra i Mark 2 e 4.

Nei radargrammi eseguiti sulla faccia Sud (file097 rappresentato in Figura 9.21) si può ancora osservare l'andamento curvilineo della riflessione del segnale del retro del pilastro che nella parte superiore del file (a circa 2m dal piano di calpestio) è posizionata ad una profondità di 14ns mentre nella parte centrale (circa 1m) è situato a 26ns; anche in questo caso è stato possibile ricavare la velocità del segnale nelle due zone:

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 100.5}{14} = 14.35 \text{ cm/ns}$$

per la parte superiore del pilastro

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 100.5}{10.5} = 9.57 \text{ cm/ns}$$

per la parte centrale.

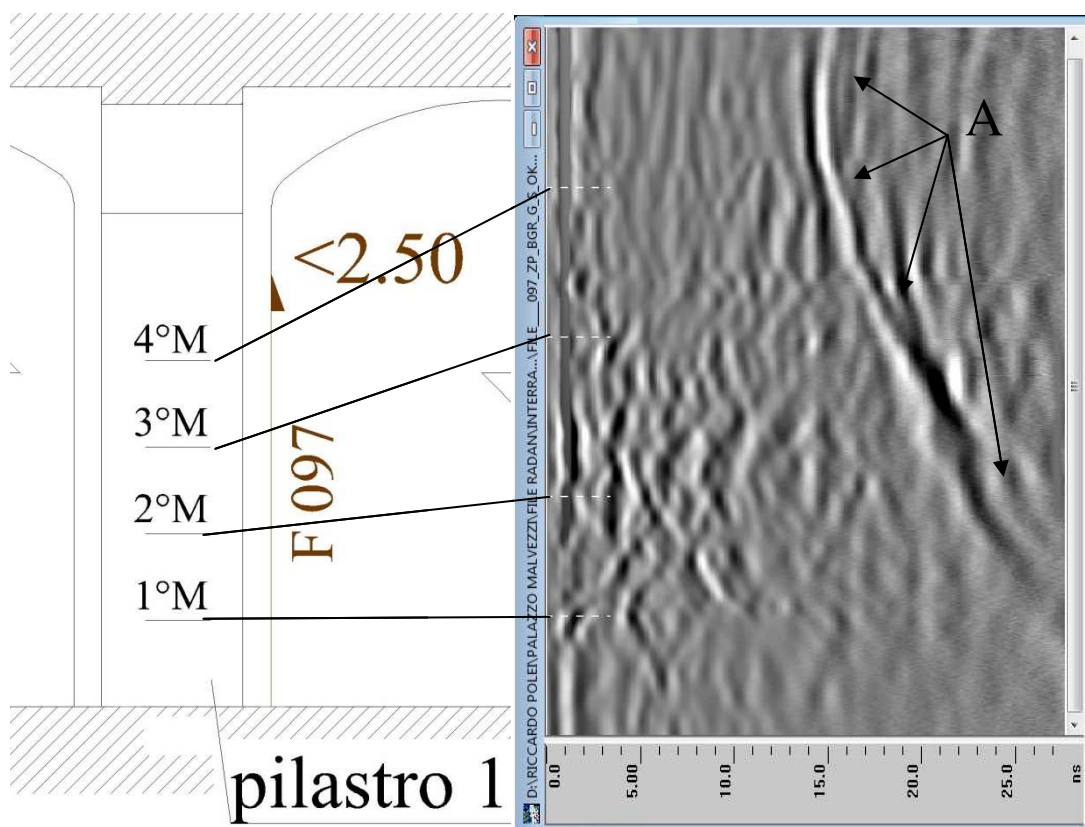


Figura 9.21 File 097 eseguito con antenna 900MHz: a sinistra è riportata in prospetto (visione Est) l'estensione della linea eseguita e la posizione dei Mark (M), a destra è rappresentata le sezione radar in cui è visibile il retro del pilastro (A).

In tutti i file analizzati per questo pilastro, è stato possibile notare che la presenza di umidità all'interno di questo elemento strutturale si spinge fino circa i 2 metri di altezza: infatti solamente superando questa zona i segnali provenienti dal retro presentano un andamento rettilineo.

Nella seguenti tabelle verranno riportati i valori delle velocità del segnale e delle costanti dielettriche calcolate in tre distinti punti del pilastro: uno in zona asciutto, uno in zona umida e l'ultimo nella parte più bassa del pilastro. Nell'ultimo caso è impossibile procedere con il calcolo di tali valori in quanto non è visibile il retro del pilastro. Nelle tabelle viene anche riportato il valore dell'altezza di risalita calcolata sul singolo file.

Tabella 9.3 Velocità, costanti dielettriche e altezze di risalita valutate sul pilastro 1

FACCIA EST DEL PILASTRO 1

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 2,0m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
100 (900MHz pol.Vert.)	380	2.16	1.97	543	18.97	472	1.24	17	0.15	4.23	368	352	2.091
	210	1.19	1.97	518	x	x	x	x	x	x			
	100	0.57	2	383	x	x	x	x	x	x			
101 (900MHz pol.Oriz.)	440	2.27	1.94	571	18.64	469	1.24	16.7	0.15	4.08	410	388	2.113
	262	1.35	1.97	571	25.91	543	1.24	23.94	0.10	8.39			
	120	0.62	1.94	439	x	x	x	x	x	x			
117 (400MHz pol.Vert.)	390	2.22	2.1	341	19.73	474	1.24	17.63	0.14	4.55	349	352	1.983
	310	1.76	2.09	325	21.71	457	1.24	19.62	0.13	5.63			
	60	0.34	2.06	241	x	0	x	x	x	x			
118 (400MHz pol.Oriz.)	405	2.23	2.09	331	19.56	422	1.24	17.47	0.14	4.47	374	364	2.055
	340	1.87	2.09	332	19.64	299	1.24	17.55	0.14	4.51			
	60	0.33	2	238	x	x	x	x	x	x			

FACCIA SUD DEL PILASTRO 1

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 2,0m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
96 (900MHz pol.Vert.)	530	2.37	1.97	571	15.97	637	1	14	0.14	4.41	474	448	2.116
	365	1.63	1.97	562	20.52	602	1	18.55	0.11	7.74			
	180	0.80	1.97	562	x	x	x	x	x	x			
97 (900MHz pol.Oriz.)	570	2.24	2.03	602	15.91	637	1	13.88	0.14	4.33	518	508	2.039
	360	1.42	1.97	541	22.12	377	1	20.15	0.10	9.14			
	225	0.89	1.94	543	25.85	370	1	23.91	0.08	12.86			

115 (400MHz pol.Vert.)	351	2.14	2.08	342	16.42	351	1	14.34	0.14	4.63	341	328	2.079
	280	1.71	2.08	314	21.11	613	1	19.03	0.11	8.15			
	63	0.38	2.16	255	x	x	x	x	x	x			
116 (400MHz pol.Oriz.)	380	2.21	2.08	319	16.42	325	1	14.34	0.14	4.63	361	344	2.099
	310	1.80	2.05	319	19.91	541	1	17.86	0.11	7.18			
	60	0.35	2	253	x	x	x	x	x	x			

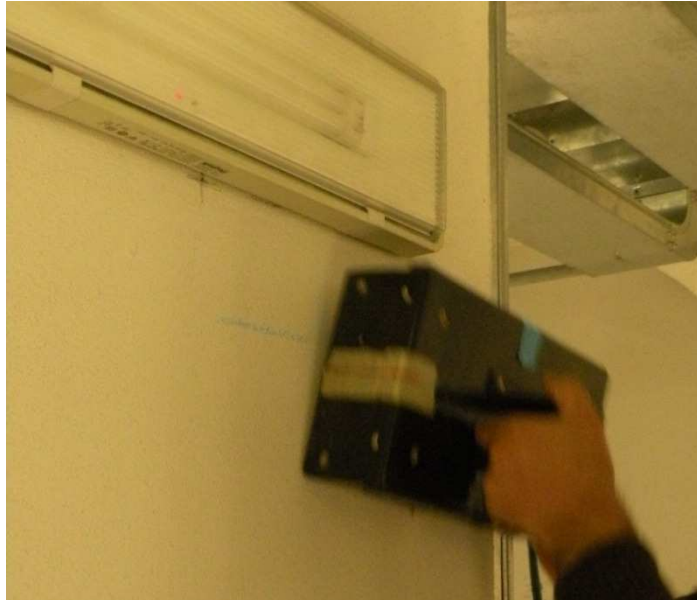
#### FACCIA OVEST DEL PILASTRO 1

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di rislita	scan di 2,0m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
98 (900MHz pol.Vert.)	390	2.12	1.94	581	16.81	524	1.24	14.87	0.17	3.24	x	368	x
	220	1.20	1.95	513	x	x	x	x	x	x			
	100	0.54	1.94	332	x	x	x	x	x	x			
99 (900MHz pol.Oriz.)	515	2.11	1.94	552	18.71	417	1.24	16.77	0.15	4.12	x	488	x
	300	1.23	1.78	500	x	x	x	x	x	x			
	100	0.41	1.88	407	x	x	x	x	x	x			
112 (400MHz pol.Vert.)	480	2.11	2.08	336	19.76	361	1.24	17.68	0.14	4.57	453	456	1.987
	333	1.46	2.08	321	24.7	676	1.24	22.62	0.11	7.49			
	32	0.14	2.06	236	x	x	x	x	x	x			
113 (400MHz pol.Vert.)	430	2.17	2.08	323	19.71	361	1.24	17.63	0.14	4.55	407	396	2.056
	370	1.87	2.09	344	20.71	325	1.24	18.62	0.13	5.07			
	55	0.28	2.09	246	x	x	x	x	x	x			
114 (400MHz pol.Oriz.)	466	2.08	2.08	325	19.47	357	1.24	17.39	0.14	4.43	438	448	1.955
	360	1.61	2.08	319	19.98	353	1.24	17.9	0.14	4.69			
	60	0.27	2.08	271	x	x	x	x	x	x			

Note: il simbolo "x" all'interno di una casella indica che il valore in esame non è stato calcolato o è stato impossibile ricavarlo tramite il software di analisi.

- Pilastro 2

In questo elemento strutturale sono state analizzate solamente le due facce opposte esposte ad Est e ad Ovest; a causa della presenza di diversi ostacoli ed in particolare dell'impianto d'illuminazione (Figura 9.22) il termine di tutte le linee radar eseguite su questo pilastro è posizionato al di sotto dei 2,0 m di altezza



*Figura 9.22 Rappresentazione dell'ostacolo presente lungo il percorso delle linee eseguite sulla faccia Est del pilastro 2.*

Nonostante gli effetti provocati dall'umidità siano qui meno evidenti, la velocità del segnale risulta inferiore rispetto a quella calcolata per il primo elemento studiato: la riflessione del retro risulta posizionata a 16ns nella parte di radargramma corrispondente all'estremità superiore della linea radar e a 17ns in corrispondenza di quella opposta (file 102, Figura 9.23) facendo ricavare valori di velocità pari a

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 84}{16} = 10.5 \text{ cm/ns}$$

$$v = \frac{2 \cdot s}{t} = \frac{2 \cdot 84}{17} = 9.88 \text{ cm/ns}$$

rispettivamente.

I valori sopra indicati sono stati ricavati studiando il radargramma n.°102 realizzato con l'antenna a 900MHz in quanto per tutti quelli registrati con l'antenna a frequenza minore è presente un forte disturbo nella parte più profonda del file che rende difficoltà la lettura di questo.

In molti dei file registrati su questo pilastro è presente un segnale continuo che si estende per tutta la lunghezza dei radargrammi ad una profondità di circa 2ns.

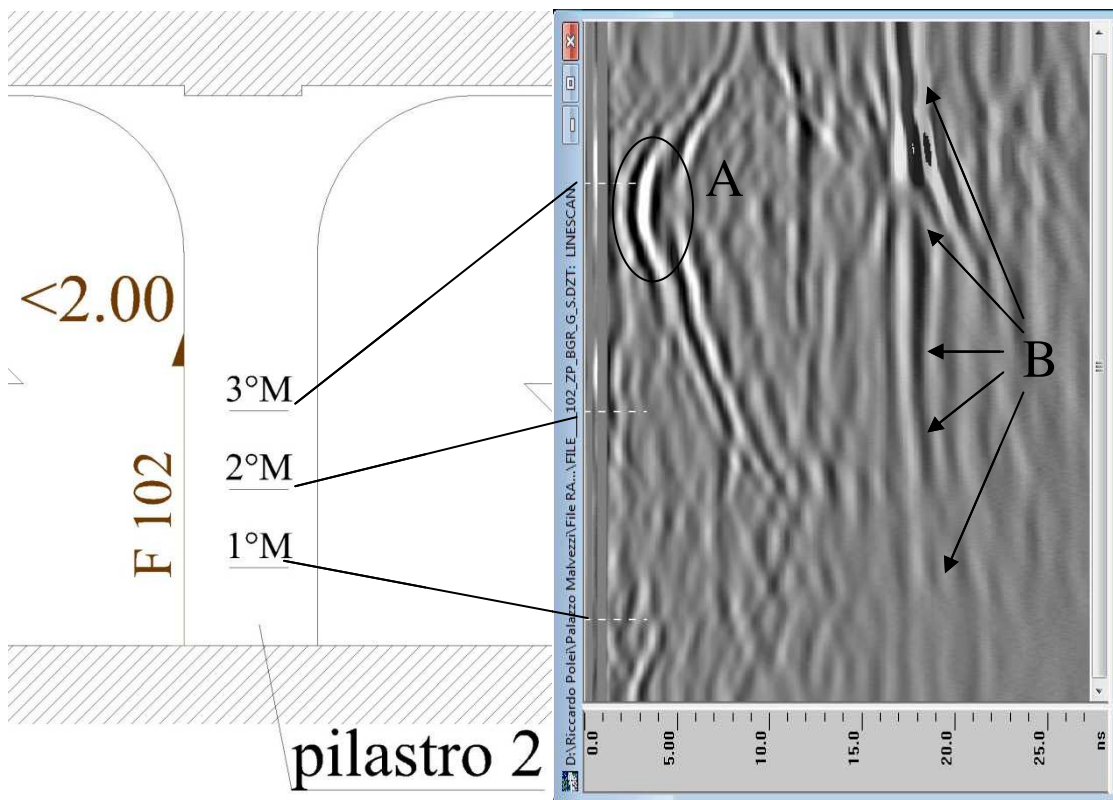


Figura 9.23 File 102 registrato con antenna 900MHz: a sinistra è visibile la lunghezza del file e la posizione dei Mark mentre nel radargramma è possibile osservare la riflessione superficiale a 1,5m (A) e la visione rettilinea del retro del pilastro (B).

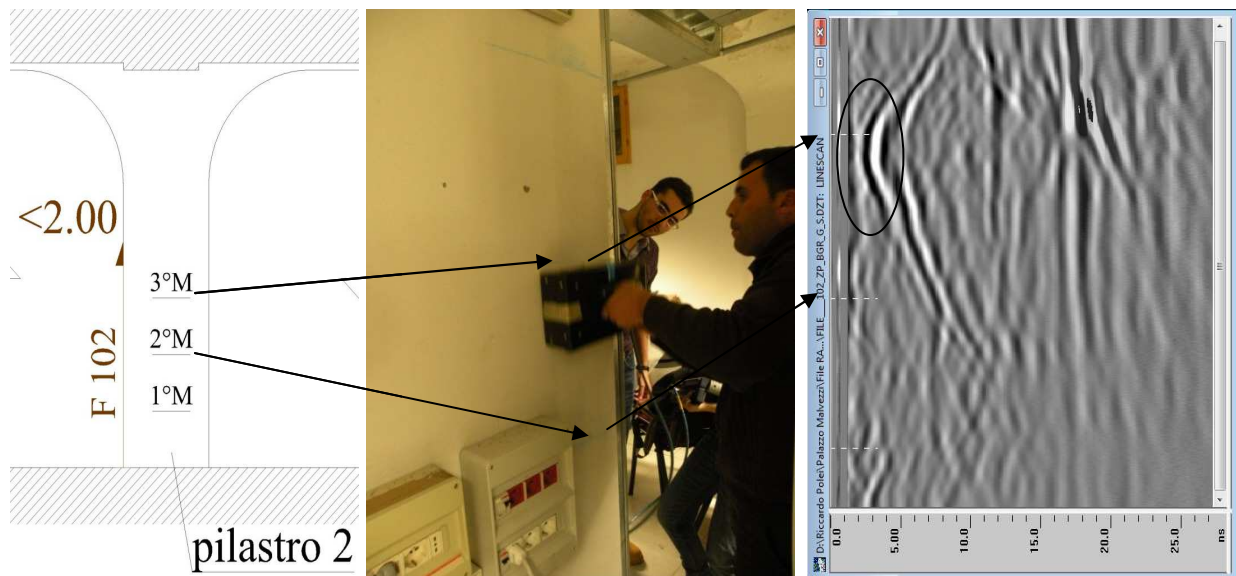


Figura 9.24 Pilastro 2 faccia Est antenna a 400MHz, file 102: posizionamento della riflessione visibile nel radargramma.



Tabella 9.4 Velocità, costanti dielettriche e altezze di risalita valutate sul pilastro 2

FACCIA EST DEL PILASTRO 2

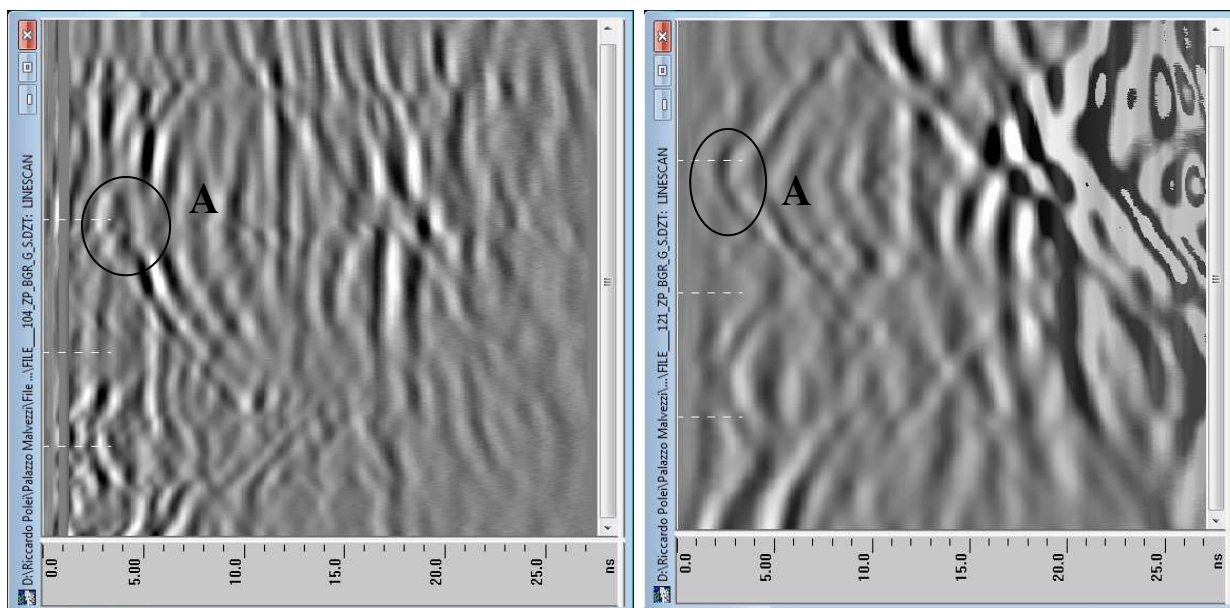
NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 1,5m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
104 (900MHz pol.Vert.)	555	2.24	1.97	602	13.02	694	0.84	11.05	0.15	3.89	506	372	2.040
	320	1.29	1.97	592	17.88	465	0.84	15.91	0.11	8.07			
	160	0.65	2.09	625	23.02	346	0.84	20.93	0.08	13.97			
105 (900MHz pol.Oriz.)	540	1.65	1.95	571	17.35	735	0.84	15.4	0.11	7.56	560	492	1.707
	390	1.19	1.98	575	17.37	694	0.84	15.39	0.11	7.55			
	240	0.73	1.98	602	x	x	x	x	x	x			
119 (400MHz pol.Vert)	517	1.96	2.05	348	13.79	446	0.84	11.74	0.14	4.40	487	396	1.845
	280	1.06	2.1	345	20.54	549	0.84	18.44	0.09	10.84			
	60	0.23	2.08	346	23.74	427	0.84	21.66	0.08	14.96			
120 (400MHz pol.Oriz.)	418	1.82	2.09	369	16.77	427	0.84	14.68	0.11	6.87	x	344	x
	290	1.26	2	365	17.32	407	0.84	15.32	0.11	7.48			
	80	0.35	2.09	382	23.88	365	0.84	21.79	0.08	15.14			

FACCIA OVEST DEL PILASTRO 2

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 1,5m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
102 (900MHz pol.Vert.)	610	1.83	2.06	625	19.05	518	0.84	16.99	0.10	9.20	576	500	1.728
	360	1.08	1.97	581	19.8	654	0.84	17.83	0.09	10.14			
	200	0.60	2.03	625	x	x	x	x	x	x			
103 (900MHz)	610	1.89	1.97	592	16.22	813	0.84	14.25	0.12	6.48	616	484	1.909
	390	1.21	1.97	581	17.42	758	0.84	15.45	0.11	7.61			

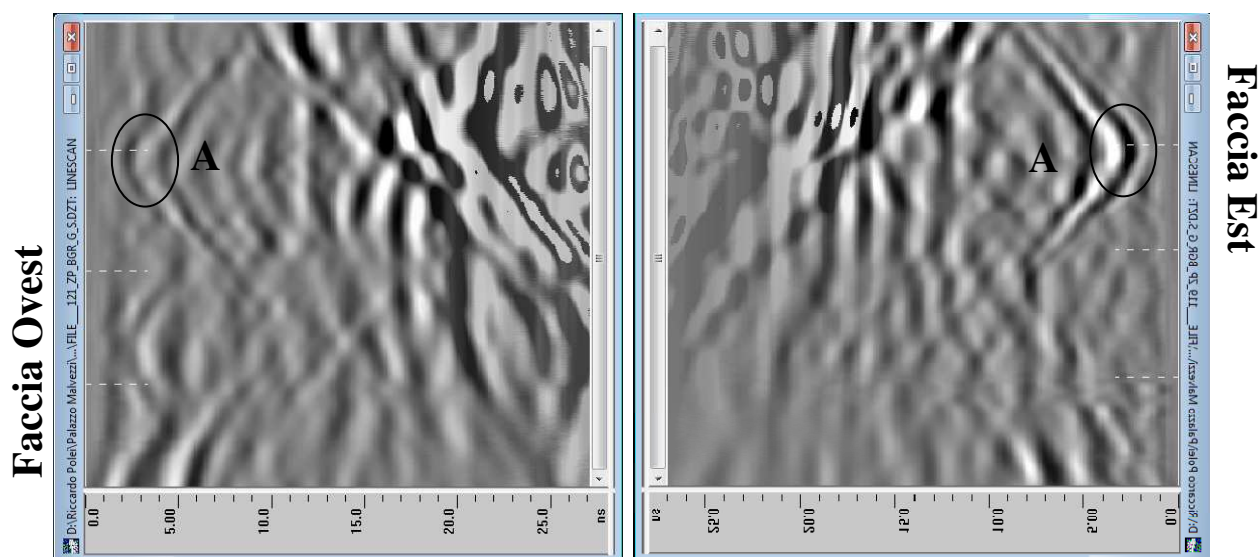
pol.Oriz.)	260	0.81	2	625	22.58	532	0.84	20.58	0.08	13.51		
121	530	1.93	2.09	353	13.57	361	0.84	11.48	0.15	4.20		
(400MHz	310	1.13	2.06	342	18.89	433	0.84	16.83	0.10	9.03	513	412
pol.Vert)	140	0.51	2.09	346	25.91	478	0.84	23.82	0.07	18.09		1.868
122	475	1.84	2.09	417	17.29	478	0.84	15.2	0.11	7.37		
(400MHz	290	1.12	2.09	395	20.22	339	0.84	18.13	0.09	10.48	479	388
pol.Oriz.)	140	0.54	2.06	422	21.57	273	0.84	19.51	0.09	12.14		1.852

Note: il simbolo "x" all'interno di una casella indica che il valore in esame non è stato calcolato o è stato impossibile ricavarlo tramite il software di analisi



*Figura 9.25 Linea eseguita sulla faccia Est del pilastro 2, confronto tra le antenne utilizzate: a sinistra antenna a 900MHz (file 104), a destra antenna a 400MHz (file 121). Nel radargramma a destra si osservano i minori dettagli ed il forte disturbo presente alle spalle del pilastro. Si nota inoltre come il segnale in corrispondenza del terzo Mark (A) risulti differente.*

Dal confronto tra i radargrammi di Figura 9.25 è possibile notare la differente visualizzazione dello stesso segnale (A) utilizzando antenne caratterizzate da frequenze centrali diverse: nella figura a sinistra (antenna a 900MHz) risulta difficoltosa la lettura dell'apice dell'iperbole e sembra che siano presenti due differenti riflettori all'interno del pilastro mentre nella sezione radar a destra (antenna a 400MHz) l'iperbole risulta uniforme e più netta.



*Figura 9.26 Confronto tra i segnali individuati sulle due facce opposte del pilastro 2 (antenna 400MHz): a sinistra file 121 realizzato sulla faccia Ovest, a destra file 119 realizzato sulla faccia Est.*

Confrontando i radargrammi realizzati sulle facce opposte del pilastro (Figura 9.26) è possibile osservare una riflessione (A) presente nelle due sezioni radar in corrispondenza del 3°Mark: questi segnali lasciano pensare alla presenza di un rinforzo strutturale metallico posto a questa altezza. La riflessione del retro del pilastro risulta nei due casi disturbata, ma la profondità del segnale risulta simile (vedi Tabella 9.4).

- Prete Nord

La lettura dei file raccolti in questa parete non evidenziano particolari segnali; dall'analisi del radargramma n.°123 raccolto con l'antenna a 400MHz si possono osservare delle linee continue visibili tra i 1 e 2m di altezza ad una profondità di 21ns (Figura 9.27).

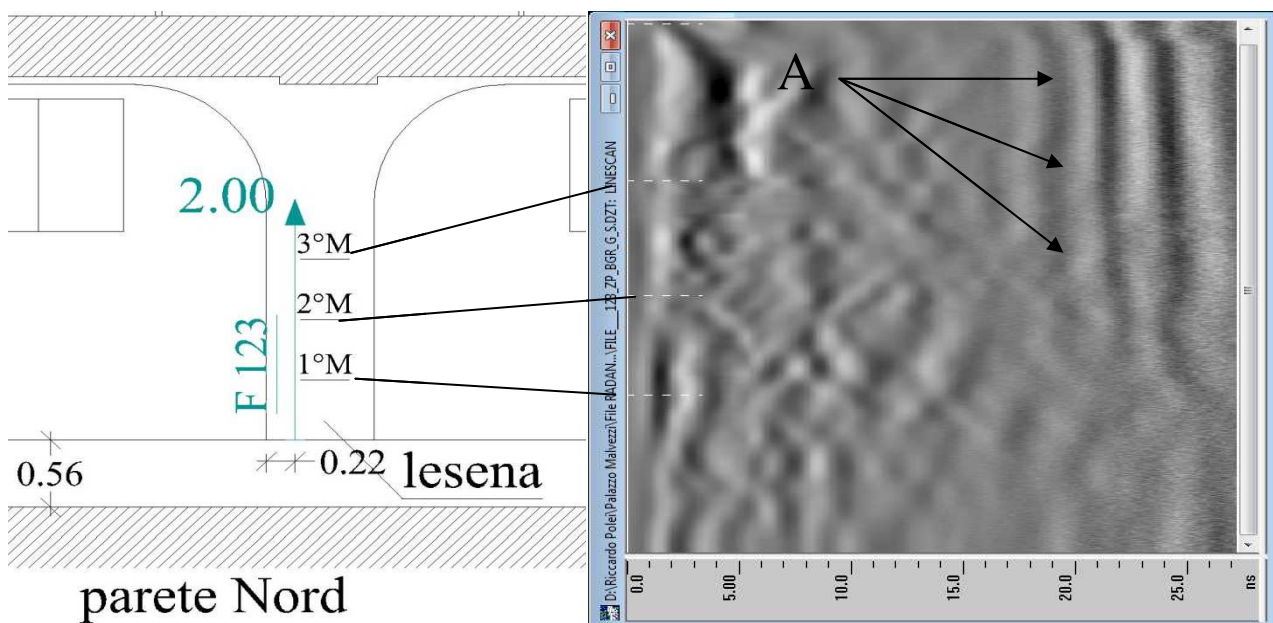


Figura 9.27 File 123 eseguito con antenna 400MHz: a destra è riportato la sezione radar dove è visibile la riflessione del retro del pilastro (A), a sinistra il prospetto della parete Nord.

La presenza di questi segnali potrebbe indicare la presenza del retro della parete analizzata.

Anche per i dati raccolti l'antenna a 900MHz il solo file che presenta segnali rilevanti è stato quello registrato sulla lesena con polarizzazione verticale (file 106).

Il calcolo della velocità del segnale è stato possibile solamente tramite l'analisi dei file sopra citati; per gli altri file eseguiti è stato impossibile riuscire a individuare il retro del muro nonostante dagli elaborati grafici risulta che i file 125 e 126 per l'antenna a 400MHz e i file 108 e 109 per l'antenna a 900MHz sono stati eseguiti su un elemento murario di minore spessore. (Figura 9.28)

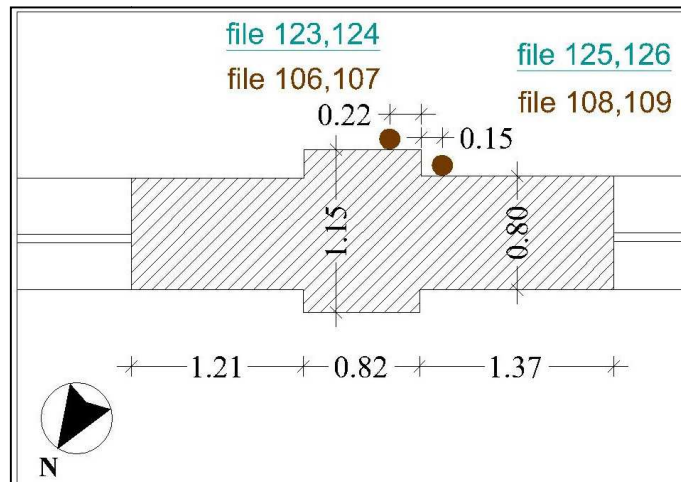


Figura 9.28 Linee d'indagine effettuate con antenna a 400MHz e 900MHz sulla parete Nord: si notano i diversi spessori della parete esterna in corrispondenza delle linee radar.

A differenza di tutti i dati raccolti nell'interrato del palazzo Malvezzi, in questo caso risulta maggiormente chiara la riflessione del retro della parete sulla sezione radar eseguita tramite l'antenna a 900MHz. Infatti, dal confronto tra i file 106 e 123 (Figura 9.29), si osserva come nel primo radargramma la visione del retro sia più definita potendo valutarne con esattezza l'andamento curvilineo mentre nel secondo radargramma il segnale risulta più marcato, ma con una definizione minore: in questo caso non è possibile valutare con chiarezza l'andamento della riflessione che sembra sparire nella parte più bassa del radargramma.

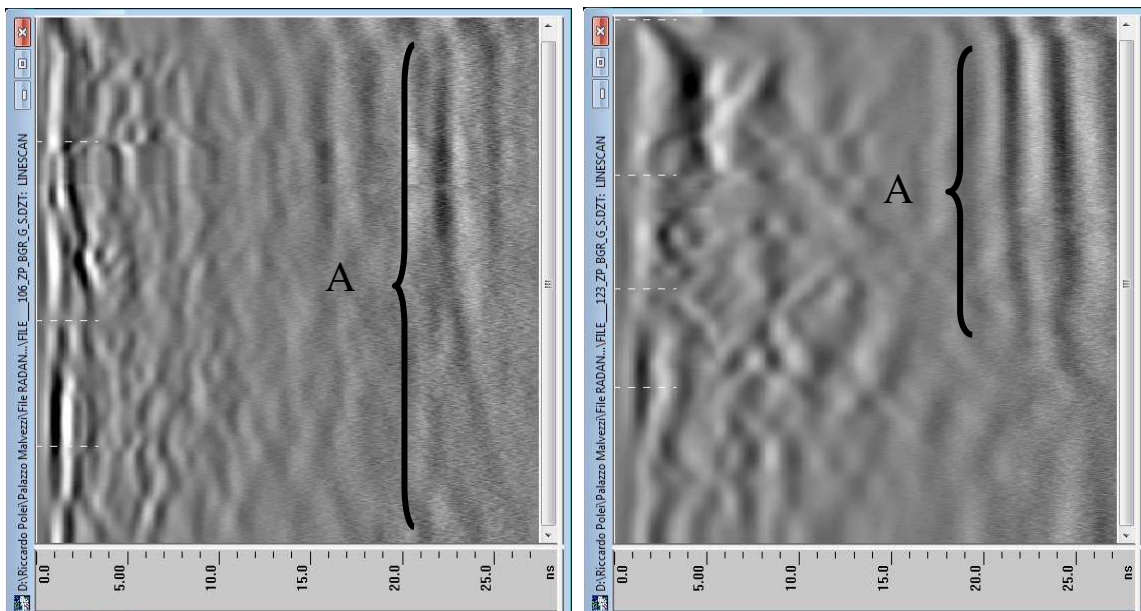


Figura 9.29 Linea radar eseguita sulla lesena, confronto tra le antenne utilizzate: a sinistra file 106 registrato con antenna a 900MHz, a destra file 123 con antenna a 400MHz. Visione del retro della parete (A).

Tabella 9.5 Velocità, costanti dielettriche e altezze di risalita valutate sulla parete Nord

PARETE NORD

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 1,5m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
106 (900MHz pol. Vert.)	515	1.60	1.93	645	23.29	366	1.15	21.36	0.11	7.76	386	484	1.196
	430	1.33	1.96	730	23.81	476	1.15	21.85	0.11	8.12			
	210	0.65	1.99	667	25.62	654	1.15	23.63	0.10	9.50			

Note: il simbolo "x" all'interno di una casella indica che il valore in esame non è stato calcolato o è stato impossibile ricavarlo tramite il software di analisi



- Zona ascensori

Nei dati raccolti in questa zona è stato possibile osservare diverse riflessioni presenti nei radargrammi (Figura 9.30). Nella parte più superficiale dei file si notano due iperboli, la prima posizionata ad un metro di altezza e ad una profondità di circa 1ns mentre la seconda si trova a 2m da terra ma alla stessa profondità della prima.

Dall'analisi dei dati è stata osservata la presenza di tre riflessioni continue ben visibili tra 1 e 2m (dal 2°Mark fino al termine del file) mentre nella parte del file corrispondente alla sezione della parete compresa tra 1m ed il piano di calpestio (da inizio file fino al 2°Mark) risultano meno nette a causa della presenza di umidità: infatti, come descritto nel paragrafo Figura 9.30, in questa zona sono presenti delle efflorescenze che indicano la presenza di una forte umidità della parete. La profondità di queste linee è di 5ns per la prima, 8ns per la seconda e 11ns per la terza (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

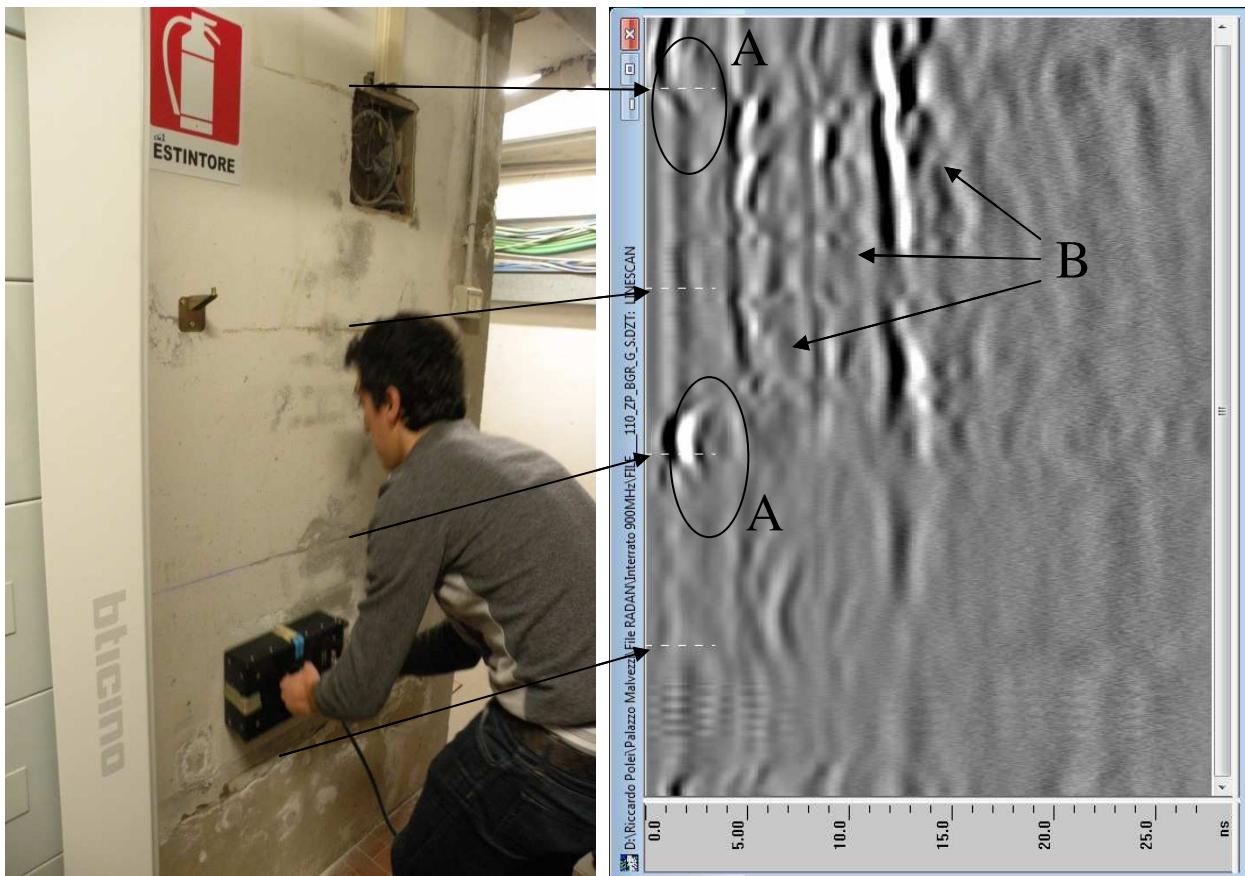


Figura 9.30 File 110, sezione radar della zona ascensori eseguita con antenna a 900MHz: si osservano le riflessioni superficiali (A) e le tre linee a diverse profondità (B)

I segnali rilevati in questa zona sono probabilmente causati da una modifica dell'assetto murario qui analizzato: infatti, osservando le tavole geometriche del piano interrato del palazzo, si nota come queste differiscano dalla reale situazione presentando un vano ora non più visibile (Figura 9.31).

Tutti i file analizzati in questa zona presentano una forte attenuazione del segnale nella prima metà del radargramma (altezze inferiori di 1m da terra) a causa della forte presenza di umidità.

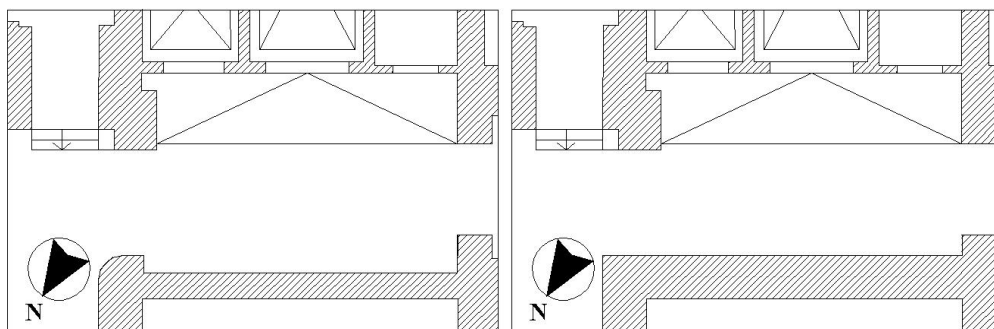


Figura 9.31 Zona ascensori: raffronto tra la situazione preesistente (a sinistra) e quella attuale (a destra).

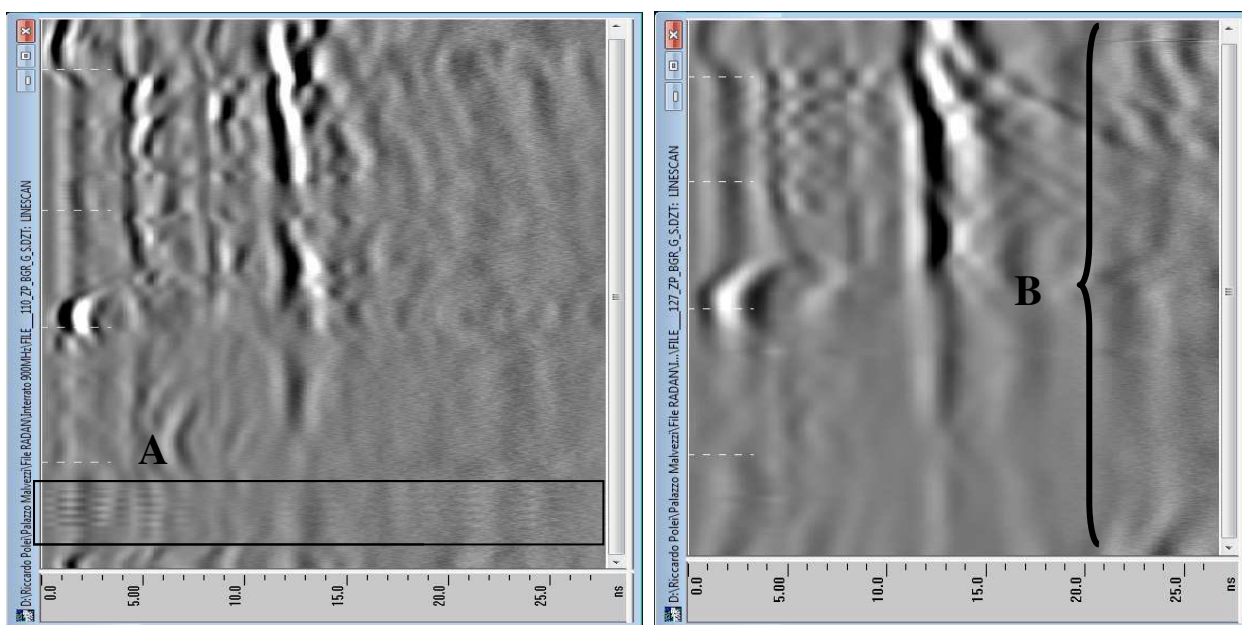


Figura 9.32 Linea eseguita sulla zona ascensori, confronto tra le due antenne utilizzate: a sinistra file 110 eseguito con antenna a 900MHz, a destra file 127 con antenna a 400MHz. Si nota la presenza di una riflessione profonda (B) nella sezione radar a destra, assente in quella a sinistra.

Ancora una volta, dall'analisi dei file registrati con antenne diverse, ma su una stessa linea (file 110 e 127 della Figura 9.32), è possibile notare che la frequenza maggiore produce segnali più dettagliati mentre le frequenze più basse consentono un maggiore potere di penetrazione. Nella zona compresa tra i 50 cm (1° mark) ed il punto d'inizio del radargramma è possibile notare un disturbo provocato dalle efflorescenze saline (A in Figura 9.32) presenti in questo tratto di muro e chiaramente visibile nelle sezioni radar eseguite con antenna a 900MHz (per i radargrammi registrati con l'antenna a 400MHz il disturbo è meno visibile).

Tabella 9.6 Velocità, costanti dielettriche e altezze di risalita valutate sulla zona ascensori

ZONA ASCENSORI

NOME DEL FILE	SCAN	posizione dello scan (m)	FRONTE		RETRO		lunghezza file (m)	delta T (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica	scan di risalita	scan di 2,0m	altezza di risalita (m)
			T1f (ns)	frequenze (MHz)	T1r (ns)	frequenze (MHz)							
110 (900MHz pol.Oriz.)	700	2.05	1.95	752	12.27	455	0.58	10.32	0.11	7.12	367	684	1.073
	400	1.17	1.94	379	13.71	427	0.58	11.77	0.10	9.27			
	250	0.73	1.94	336	x	x	x	x	x	x			
111 (900MHz pol.Vert.)	690	2.04	1.94	391	13.14	353	0.58	11.2	0.10	8.39	376	676	1.112
	420	1.24	1.95	357	13.81	420	0.58	11.86	0.10	9.41			
	220	0.65	1.97	342	x	x	x	x	x	x			
127 (400MHz pol.Vert.)	560	2.00	2.03	271	13.71	350	0.58	11.68	0.10	9.12	322	560	1.150
	400	1.43	2.09	254	14.66	282	0.58	12.57	0.09	10.57			
	200	0.71	2.05	250	14.77	255	0.58	12.72	0.09	10.82			
128 (400MHz pol.Oriz.)	495	2.12	2.05	216	13.13	292	0.58	11.08	0.10	8.21	241	468	1.030
	290	1.24	2.08	258	14.46	265	0.58	12.38	0.09	10.25			
	130	0.56	2	242	14.13	235	0.58	12.13	0.10	9.84			

Note: il simbolo “x” all’interno di una casella indica che il valore in esame non è stato calcolato o è stato impossibile ricavarlo tramite il software di analisi

## **9.7 Osservazioni e suggerimenti**

Le analisi condotte nel piano interrato di palazzo Malvezzi hanno consentito di rilevare la presenza di umidità in tutte le strutture sottoposte allo studio; per tutti gli elementi strutturali analizzati è stato possibile calcolare la velocità e la frequenza del segnale, la costante dielettrica del mezzo e l'altezza di risalita visibile all'interno dei radargrammi. Lo studio del pilastro 1 ha evidenziato maggiormente gli effetti provocati dalla presenza di umidità al suo interno producendo visioni del retro fortemente curvilinee.

## Capitolo 10

# SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO: INDAGINE GPR DI RISALITA CAPILLARE IN PROVINI MURARI

---

### 10.1 Scopi delle prove

In questo capitolo verranno presentate le prove eseguite tramite tecnica radar GPR su elementi murari a 2 e 3 teste costruiti in laboratorio in vasche metalliche e successivamente esposti a condizioni climatiche naturali dal giorno 07/06/2010. Lo scopo delle prove è stato quello di simulare diverse situazioni reali di risalita capillare facendo variare il contenuto d'acqua presente nelle vasche e variando il tipo e la concentrazione di sale in questa disciolto. I dati sono stati raccolti nei giorni 09, 16 e 21 luglio 2010 con antenna Palm da 2 GHz e nel giorno 02 dicembre 2010 con antenna 900 MHz per poter osservare diversi livelli di risalita: infatti, i primi dati (09/07/2010) sono stati raccolti in condizioni "asciutte" dopo aver lasciato i provini all'aperto per circa un mese, mentre nelle altre date sono state previste delle immissioni di soluzioni saline. Oltre a monitorare i livelli di risalita raggiunti in queste date, lo studio è stato eseguito cercando di valutare la distribuzione dell'umidità e dei sali presenti all'interno dei provini. A questi scopi sono state valutate le variazioni dei segnali radar intermini di tempo di propagazione, ampiezze e frequenze. I dati raccolti con antenna Palm hanno consentito lo studio solamente dei muretti a 2 teste (PNDA, PNDB, PNDC) in quanto la presenza dei difetti artificiali inseriti negli altri elementi (PNDD, PNDE, PNDF) ha reso difficoltosa la lettura del retro del muretto, provocando inoltre variazioni di velocità del segnale influenzate dalle diverse caratteristiche dielettriche di questi; per i dati raccolti con antenna da 900 MHz è stato possibile eseguire l'analisi su tutti i muretti non avendo osservato tali problematiche.

### 10.2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione radar utilizzata (sistema GSSI SIR-3000 e antenne da 900 MHz e 2 GHz Figura 10.1) è la stessa utilizzata per le prove eseguite nei giorni 24/11/2010 e 17/10/2011 sul solaio della Sala dell'Ovale di Palazzo Malvezzi (capitoli 7 e 8) e non verranno quindi riportate le informazioni già riportate in tali capitoli ma solamente le dimensioni delle antenne utilizzate in quanto queste verranno utilizzate per il calcolo dell'altezza di risalita capillare all'interno dei provini murari.



					
<b>DIMENSIONI ANTENNA PALM</b>			<b>DIMENSIONI ANTENNA 900MHz</b>		
<b>Altezza</b>	104,5	mm	<b>Altezza</b>	90	mm
<b>Larghezza</b>	91,5	mm	<b>Larghezza</b>	190	mm
<b>Lunghezza (con ruota)</b>	154,7	mm	<b>Lunghezza</b>	330	mm

Figura 10.1 Dimensioni delle antenne da 2 GHz e 900 MHz utilizzate nelle indagini.

### 10.3 Descrizione dei muretti e preparazione della prova

I provini analizzati in questa prova sono 6 di cui 3 con spessore 25 cm (muretti a 2 teste) e 3 con spessore 38 cm (muretti a 3 teste) (Figura 10.2). Tutti i muretti sono realizzati utilizzando mattoni pieni standard di dimensioni 5,5 x 12 x 25 cm e 1 cm di malta tra questi elementi: nei provini a due teste sono presenti delle inclusioni di pietre diverse, mentre in quelli a 3 teste sono stati creati artificialmente dei difetti interni per simulare la presenza di vuoti e di muratura a sacco. Tutti i muretti sono definiti PND, sigla per indicare che sono stati realizzati per eseguirvi Prove Non Distruttive, a cui viene aggiunta una lettera per distinguere i singoli provini: in questo modo si distingueranno in PNDA, PNDB e PNDC quelli realizzati a 2 teste e PNDD, PNDE e PNDF quelli realizzati a 3 teste.

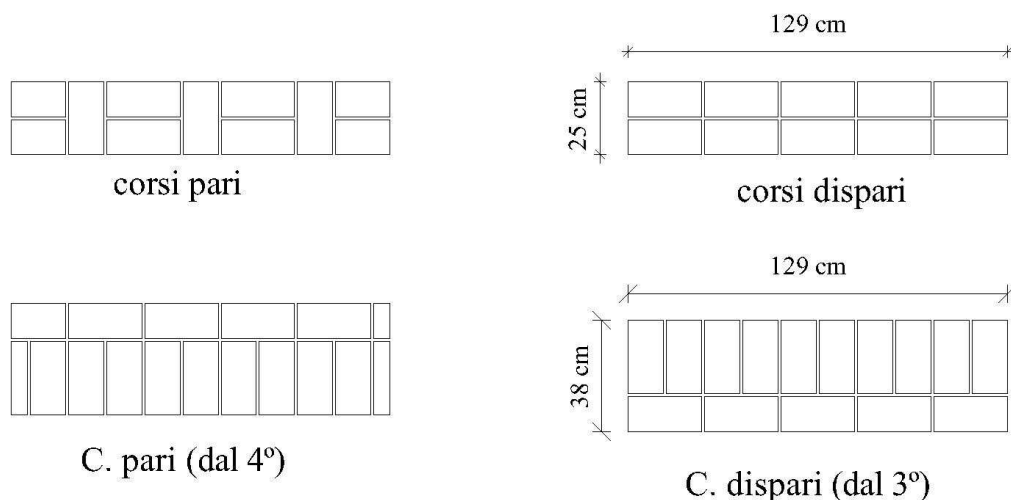


Figura 10.2 Disposizione dei laterizi in sezione orizzontale nei muretti a 2 teste (sopra) e 3 teste (sotto).



Tutti i provini sono appoggiati in una vasca metallica realizzata per poter contenere l'acqua o salamoia necessari per i test di risalita capillare.

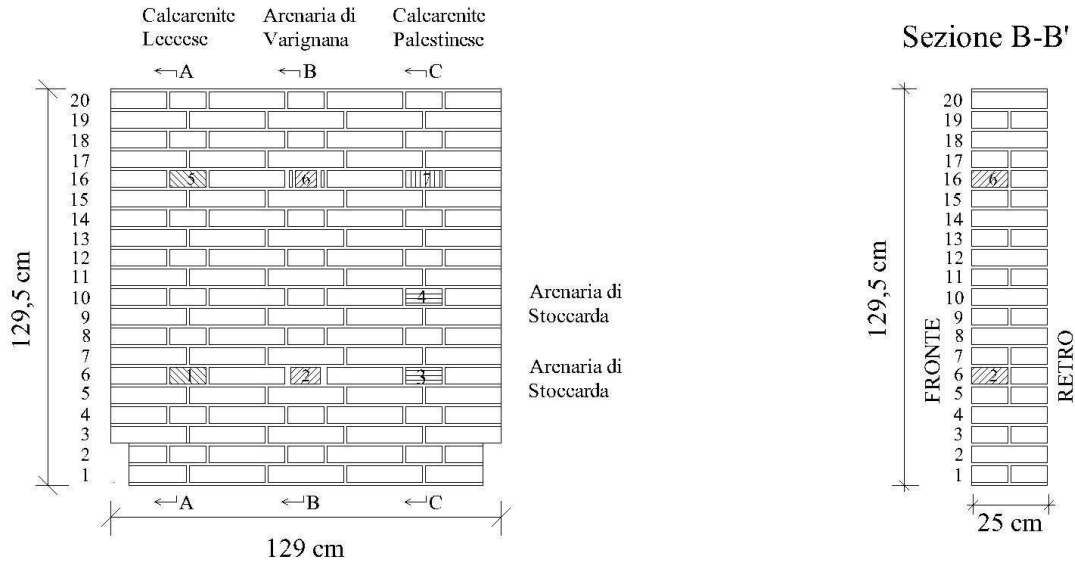


Figura 10.3 PNDA, le inclusioni lapidee sono 7: Calcarenite Leccese in posizione 1 e 5. Arenaria di Varignana in 2 e 6, Arenaria di Stoccarda in 3 e 4 e Calcarenite Palestinese in posizione 7

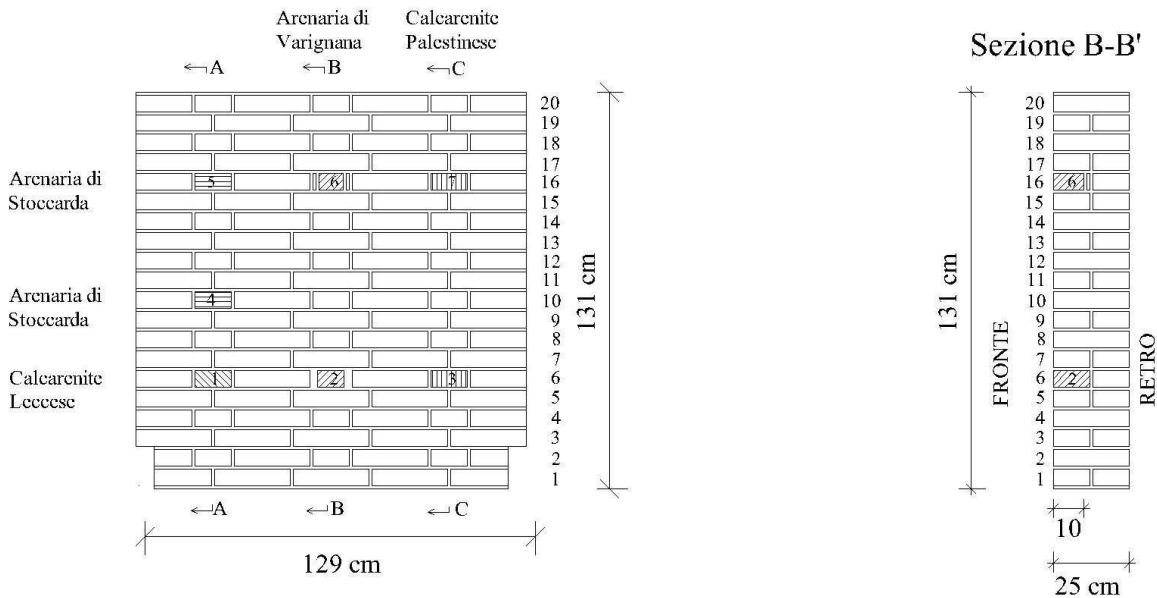


Figura 10.4 PNDB, inclusioni: Calcarenite Leccese in posizione 1, Arenaria di Varignana in 2 e 6, Calcarenite Palestinese in 3 e 7, ed Arenaria di Stoccarda in 4 e 5.

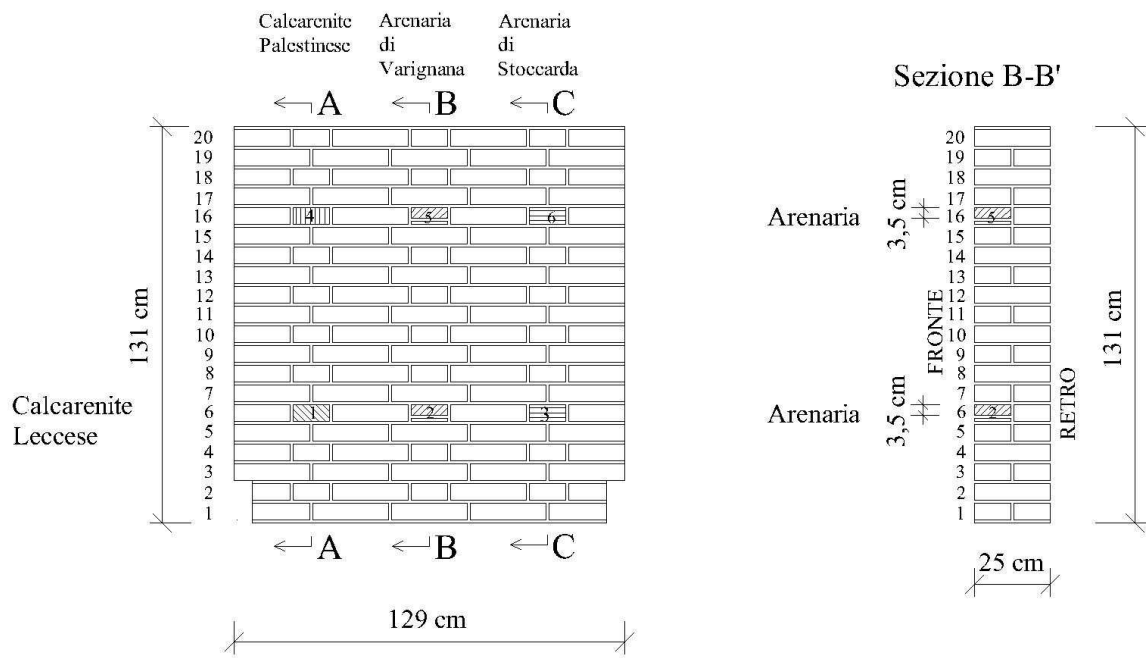


Figura 10.5 PNDC, 6 inclusioni lapidee: Calcarenite Palestinese in posizione 4, Calcarenite Leccese in posizione 1, Arenaria di Varignana in 2 e 5 e Arenaria di Stoccarda in 3 e 6.

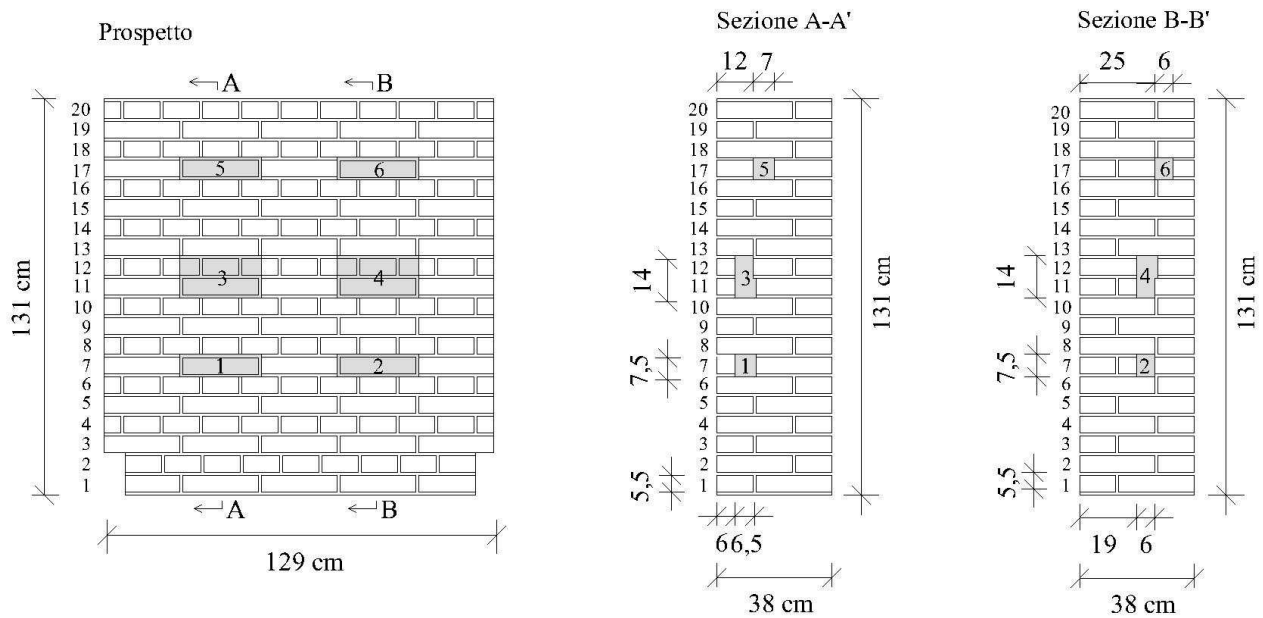


Figura 10.6 PNDD, geometria e difetti interni.

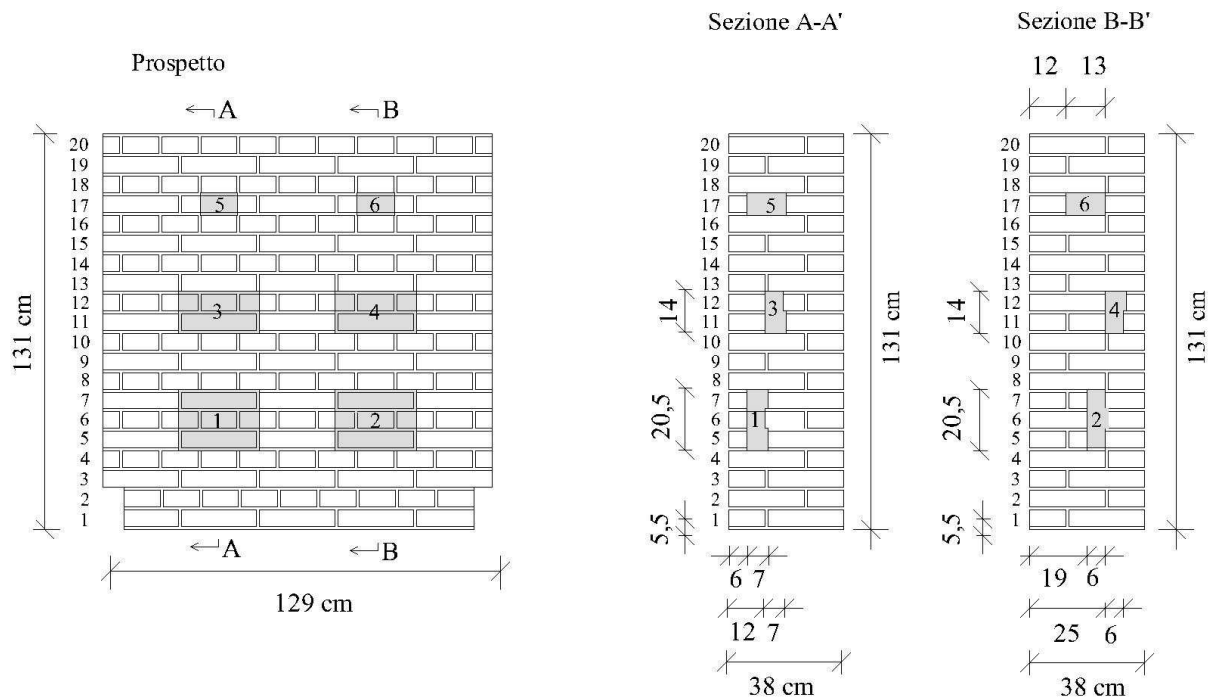


Figura 10.7 PNDE, geometria e difetti interni.

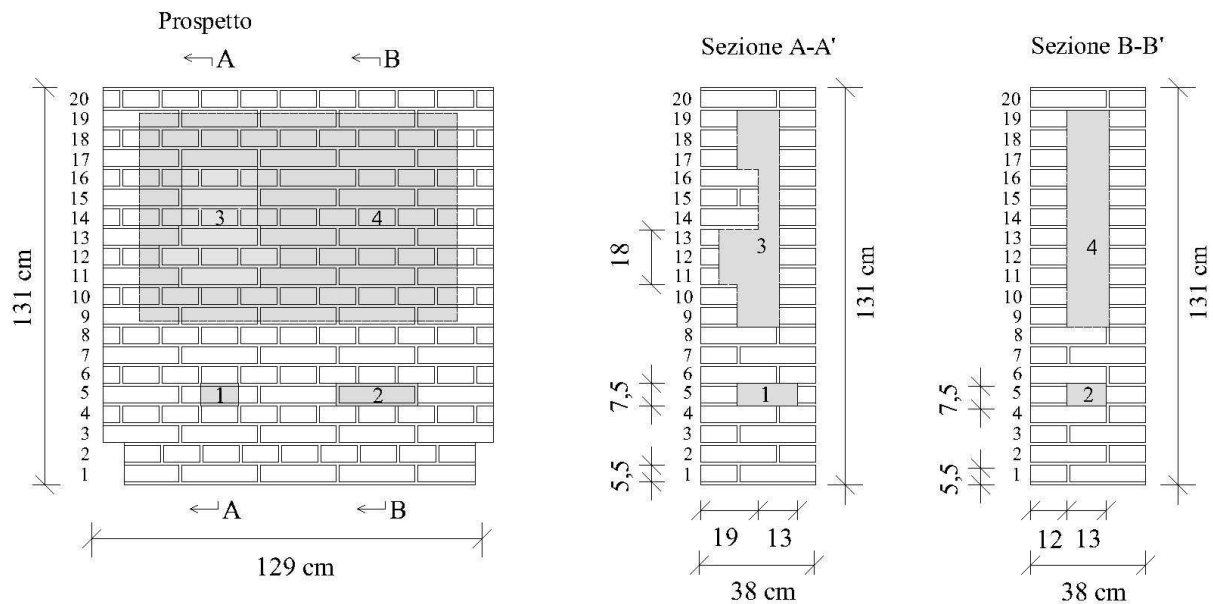


Figura 10.8 PNDF, geometria, difetti (1 e 2) e costruzione a sacco (3 e 4).

La fase principale di preparazione delle prove prevede l'inserimento di acqua (eventualmente con dei sali disciolti) nella vasca posta alla base dei muretti: per capillarità, la soluzione salina tenderà a salire all'interno del provino mentre l'evaporazione superficiale farà cristallizzare (in superficie) i sali in essa disciolti. La fase successiva per la preparazione delle prove è quella di scegliere la posizione, la direzione ed il lato su cui effettuare i rilievi radar: tutte le linee orizzontali sono state

eseguite procedendo con l'antenna da sinistra a destra mentre per quelle verticali la direzione è stata dall'alto verso il basso per la giornata del 21/07/2010, e in direzione opposta per tutte le altre. Solamente per il muretto PNDF nella giornata del 09/07/2010 è stata eseguita una griglia radar su una porzione d'area limitata in corrispondenza del sacco.

Tutti i dati radar acquisiti con antenna Palm sono stati acquisiti sul retro dei muretti ad eccezione del provino PNDB e della griglia radar eseguita sul PNDF nel giorno 09/07/2010, mentre quelli registrati con antenna 900 MHz sono stati acquisiti sul fronte dei provini.

Tutti i dati radar sono stati acquisiti in modalità di riflessione del segnale.

## 10.4 Acquisizione dei dati in data 09/07/2010

L'indagine svolta in questa giornata ha studiato i provini PNDA, PNDB e PNDF, ponendo maggiore attenzione al secondo di questi. Per il primo elemento sono state eseguite solamente due linee dal basso verso l'alto mentre per il terzo è stata realizzata una griglia 36 x 22 cm con passo della maglia di 2,0 cm. Nel caso del muretto PNDA le linee sono state eseguite sul retro mentre negli altri due casi sul fronte.

In questa data i muretti si presentavano relativamente asciutti non essendo iniziata la fase di risalita programmata, ma la loro esposizione alle condizioni atmosferiche per più di un mese ha permesso la formazione di umidità alla base di questi e l'infiltrazione di pioggia dall'alto.

### 10.4.1 PNDA

In questa data il muretto risultava già provvisto dello strato d'intonaco spesso 1 cm eseguito sul retro mentre le prove di risalita non erano ancora iniziate. Nel mese di esposizione all'aperto del provino si sono verificate precipitazioni atmosferiche, ciò che ha causato di acquisire i dati in condizioni di muretto non completamente asciutto.

Nelle 2 linee radar verticali eseguite con antenna Palm 2 GHz dal basso verso l'alto sul retro intonacato del provino, sono stati inseriti 3 mark, il primo a 20 cm dalla base del muretto, il secondo a 30 cm ed il terzo in corrispondenza della mezzeria (Figura 10.9 e Tabella 10.1). La posizione iniziale del centro antenna è a 11 cm dalla base e quella finale in corrispondenza del bordo superiore.

*Tabella 10.1 PNDA, linee radar eseguite sul retro del muretto (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro del retro). Gain di acquisizione lineare: 4 dB - 54 dB.*

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione
070	Palm 2 GHz	9	30	basso/alto
071	Palm 2 GHz	9	mezzeria	basso/alto

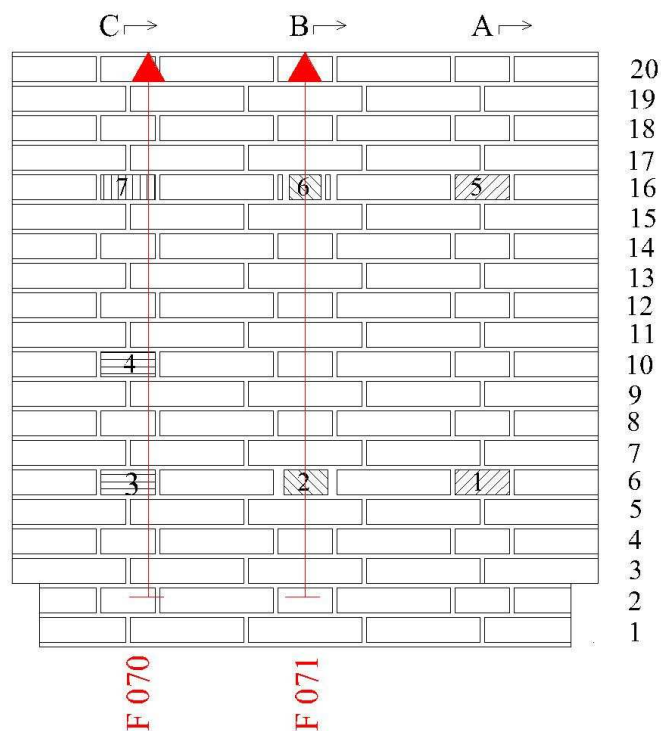


Figura 10.9 Retro intonacato del muretto PNDA, linee radar eseguite il giorno 09/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

#### 10.4.2 PNDB

Le prove di risalita non erano iniziate in questa data ed il muretto risultava non completamente asciutto essendo stato esposto a precipitazioni atmosferiche. In questo provino erano già installati sensori di potenziale dal 16/06/2010 per controllare il livello di risalita.

In questa giornata di prove sono state acquisite 15 linee radar sul fronte del muretto con antenna Palm 2 GHz in modalità di riflessione, 7 in orizzontale con posizione iniziale del centro antenna sul bordo sinistro e 8 verticali (dal basso verso l'alto) con centro antenna posizionato a 11 cm dalla base e arrivo in corrispondenza della piastra superiore (Tabella 10.2). I mark presenti nei radargrammi sono stati posizionati in corrispondenza delle inclusioni lapidee.

Tabella 10.2 PNDB, linee radar eseguite sul fronte del muretto (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare 11 dB - 54 dB.

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione	Note
019	Palm 2 GHz	9	55	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
020	Palm 2 GHz	9	74	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
021	Palm 2 GHz	9	77	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
022	Palm 2 GHz	9	Mezzeria (65)	basso/alto	divisa in 2 parti

023	Palm 2 GHz	9	51	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
024	Palm 2 GHz	9	45	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
025	Palm 2 GHz	9	25.5	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
026	Palm 2 GHz	9	12	basso/alto	Parte a 11cm dal basso
063	Palm 2 GHz	9	corso 6	sx/dx	
064	Palm 2 GHz	9	corso 1	sx/dx	
065	Palm 2 GHz	9	corso 3	sx/dx	
066	Palm 2 GHz	9	corso 10	sx/dx	Lunga 16cm
067	Palm 2 GHz	9	corso 16	sx/dx	
068	Palm 2 GHz	9	corso 19	sx/dx	
069	Palm 2 GHz	9	corso 14	sx/dx	

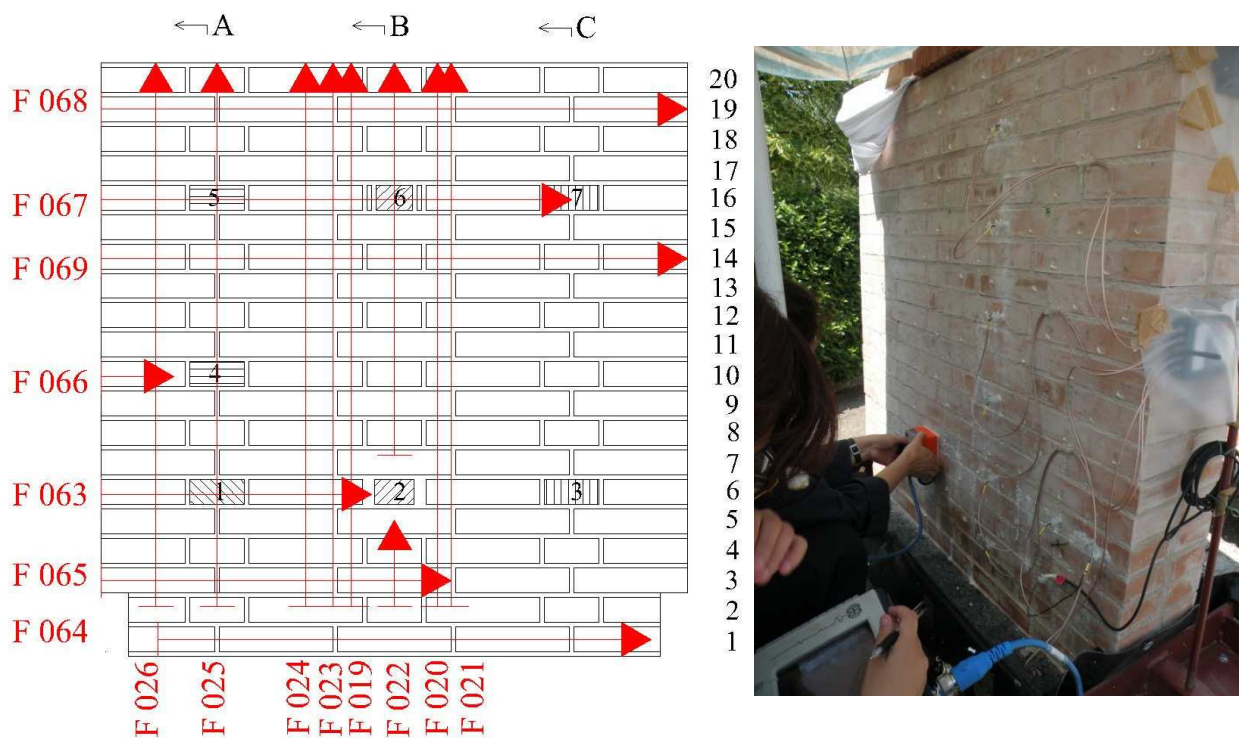


Figura 10.10 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PND il giorno 09/07/2010 con antenna 2 GHz. Nella foto (a destra) è possibile osservare i sensori di potenziale installati in questo muretto che hanno influenzato la lunghezza delle linee radar eseguite.

### 10.4.3 PND

In un'area di 36 x 22 cm tra i corsi 14 e 17, sulla parte destra del fronte del muretto, è stata eseguita un'acquisizione 3D tramite 12 linee orizzontali e 19 verticali (Tabella 10.3). Durante l'acquisizione di questi file non sono stati inseriti dei riferimenti (mark).



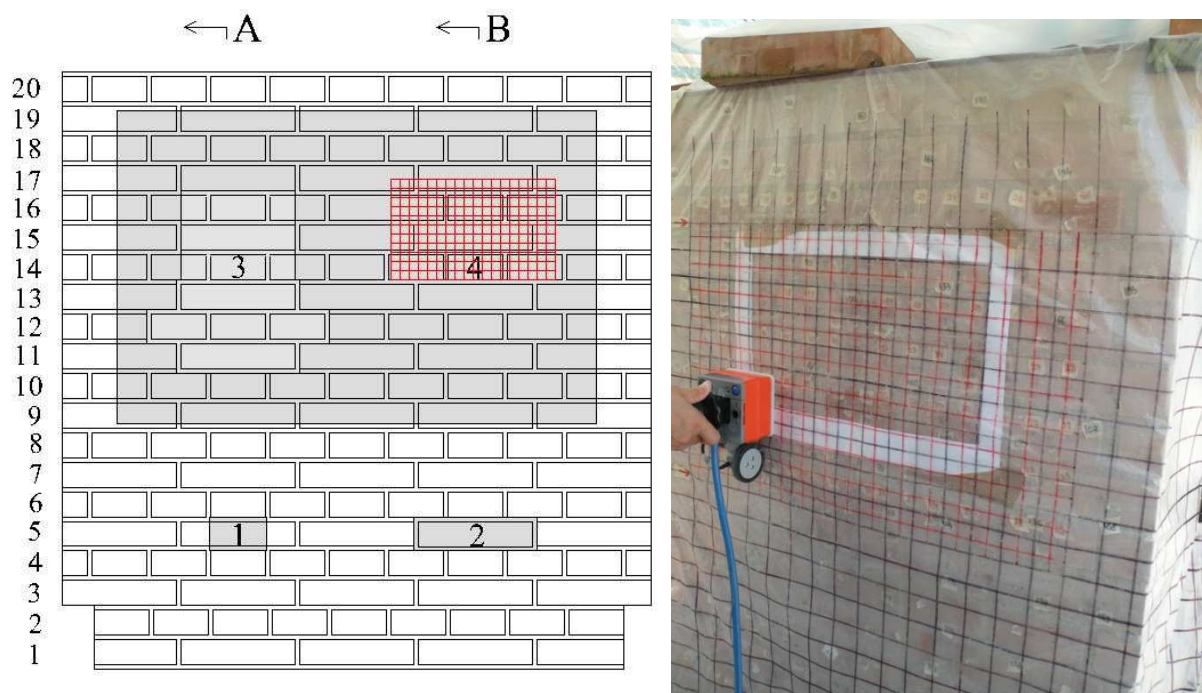


Figura 10.11 Griglia radar 36 x 22 cm con passo 2 cm eseguita sul fronte del muretto PNDF il 09/07/2010 con antenna Palm da 2 GHz.

Tabella 10.3 PNDF, linee radar eseguite sul muretto (la posizione in cm è riferita al bordo destro). Gain di acquisizione lineare 4 dB - 54 dB.

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione
072	Palm 2 GHz	9	corso 14	sx/dx
073	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
074	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
075	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
076	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
077	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
078	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
079	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
080	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
081	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
082	Palm 2 GHz	9	*	sx/dx
083	Palm 2 GHz	9	corso 17	sx/dx
084	Palm 2 GHz	9	21.5	basso/alto
085	Palm 2 GHz	9	23.5	basso/alto
086	Palm 2 GHz	9	25.5	basso/alto
087	Palm 2 GHz	9	27.5	basso/alto
088	Palm 2 GHz	9	29.5	basso/alto
089	Palm 2 GHz	9	31.5	basso/alto
090	Palm 2 GHz	9	33.5	basso/alto
091	Palm 2 GHz	9	35.5	basso/alto
092	Palm 2 GHz	9	37.5	basso/alto

093	Palm 2 GHz	9	39.5	basso/alto
094	Palm 2 GHz	9	41.5	basso/alto
095	Palm 2 GHz	9	43.5	basso/alto
096	Palm 2 GHz	9	45.5	basso/alto
097	Palm 2 GHz	9	47.5	basso/alto
098	Palm 2 GHz	9	49.5	basso/alto
099	Palm 2 GHz	9	51.5	basso/alto
100	Palm 2 GHz	9	53.5	basso/alto
101	Palm 2 GHz	9	55.5	basso/alto
102	Palm 2 GHz	9	57.5	basso/alto

## 10.5 Campagna del 16/07/2010

In questa giornata i test radar hanno interessato i muretti PNDA, PNDC, PNDD, PNDE e PNDF. Per i muretti PNDD e PNDF e hanno previsto la ripetizione dell'acquisizione dei dati in diverse ore del giorno e con diverse altezze di risalita: nel primo caso (PNDD), la salamoia inserita in vasca consiste in una soluzione di solfato di sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) al 0,5% in peso mentre nel secondo caso (PNDF) è stata versata nella vasca acqua dell'acquedotto bolognese prelevata dai rubinetti del laboratorio.

### 10.5.1 PNDA

In questa data, causa le precipitazioni atmosferiche, il provino era parzialmente umido.

Il numero totale delle linee d'indagine realizzate con antenna Palm da 2 GHz sul retro intonacato del muretto è 10 di cui 5 orizzontali con posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro del muretto (osservando il retro) e 5 verticali (posizione iniziale del centro antenna a 11 cm dalla base del provino) (Tabella 10.4).

I mark nei radargrammi sono posizionati in corrispondenza delle linee radar incrociate (corsi 3, 6, 10, 14 e 16 per le linee verticali). La posizione iniziale del centro antenna è situata a 11 cm dalla base del muretto e mentre quella finale in corrispondenza del bordo superiore.

*Tabella 10.4 PNDA, linee radar eseguite sul retro del muretto (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (12 dB – 80 dB)*

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione	Note
060	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	
061	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
062	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
063	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
064	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto	
065	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
066	Palm 2 GHz	15	corso 6	sx/dx	

067	Palm 2 GHz	15	corso 10	sx/dx	
068	Palm 2 GHz	15	corso 14	sx/dx	
069	Palm 2 GHz	15	corso 16	sx/dx	

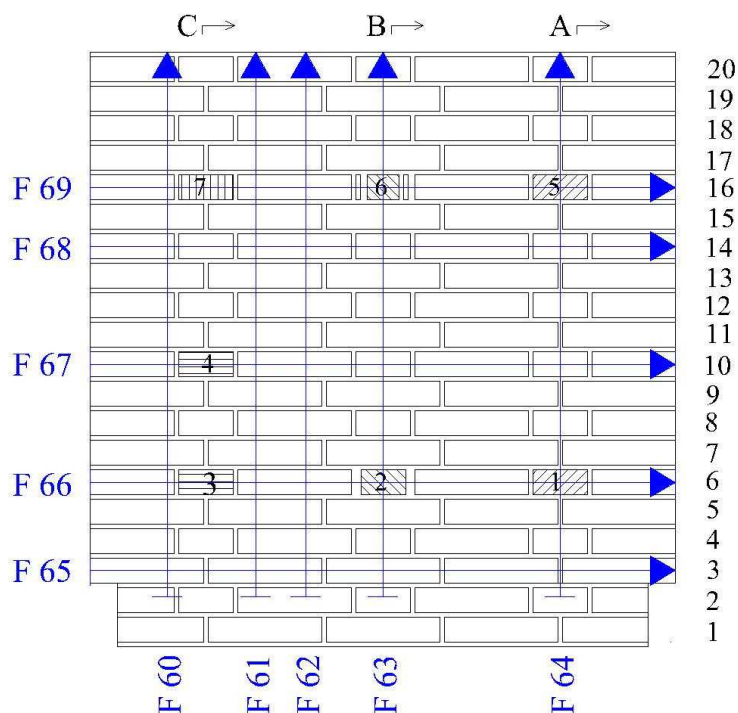


Figura 10.12 PNDA, linee radar eseguite sul retro del muretto il giorno 16/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

### 10.5.2 PNDC

Per questo provino non sono previste immissioni di acqua o soluzione salina all'interno della vasca valutando solamente la risalita capillare provocata dall'assorbimento di acqua proveniente da precipitazioni atmosferiche che, non essendo state assenti nel periodo di esposizione del provino (07/06/2010 – 16/07/2010), hanno causato la raccolta dei dati radar in condizioni parzialmente umide.

Le linee realizzate con antenna Palm da 2 GHz sono 9, 5 in direzione orizzontale con posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro del muretto (osservando il retro) e 4 verticali (posizione iniziale del centro antenna a 11 cm dalla base del muretto e posizione finale in corrispondenza del bordo superiore) (Tabella 10.5).

Anche in questo caso i mark sono posizionati in corrispondenza delle linee radar incrociate (corsi 3, 6, 10, 16, e 18 per le linee verticali).

Tabella 10.5 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDC (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (12 dB – 80 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione
011	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto
012	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto
013	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto
014	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto
015	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx
016	Palm 2 GHz	15	corso 6	sx/dx
017	Palm 2 GHz	15	corso 10	sx/dx
018	Palm 2 GHz	15	corso 16	sx/dx
019	Palm 2 GHz	15	corso 18	sx/dx

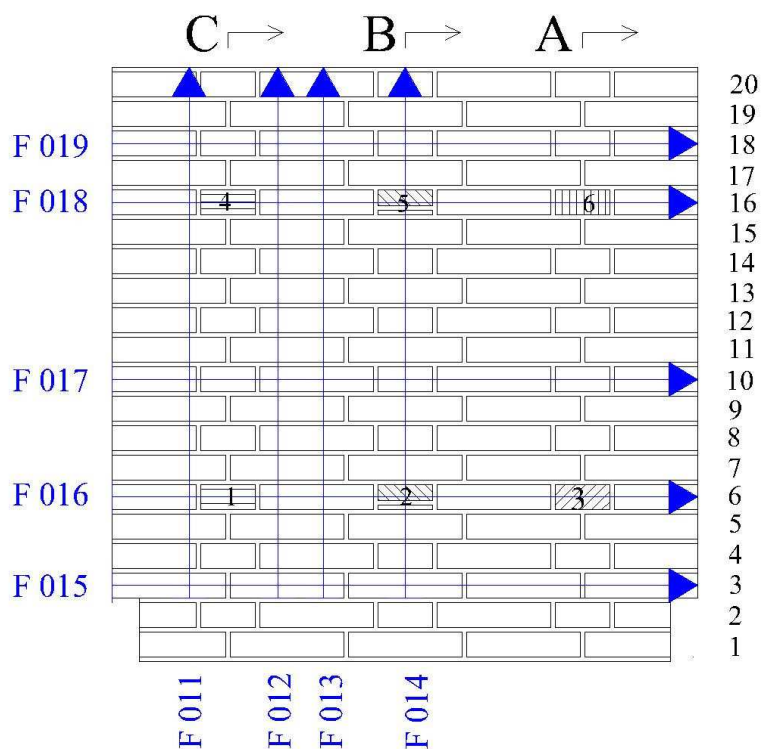


Figura 10.13 PNDC, linee radar eseguite sul retro del muretto il giorno 16/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

### 10.5.3 PNDD

Le acquisizioni effettuate il 16/07/2010 sono state ripetute più volte a intervalli non regolari di alcune ore le une dalle altre dopo aver versato soluzione di solfato di sodio nella vasca. La prima immissione è stata eseguita alle ore 10:40 con una concentrazione di solfato di sodio del 5% in peso (mentre in tutte le altre giornate è stata immessa soluzione allo 0,5%). Dall'ispezione visiva effettuata alle ore 10:00 è stata notata la presenza di una fascia di laterizi (fino al terzo corso) di

diversa colorazione causata dall'umidità della risalita capillare verificatasi nei precedenti giorni di esposizione alle precipitazioni atmosferiche (Figura 10.15).

Le linee radar sono in totale 11, 6 in direzione orizzontale con posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro (osservando il retro) e 5 verticali (posizione iniziale del centro antenna a 11cm dalla base e posizione finale in corrispondenza del bordo superiore); queste posizioni, ripercorse 6 volte durante l'intera giornata, hanno consentito di collezionare 51 radargrammi. I primi radargrammi (ore 10:22) sono stati acquisiti in condizioni "asciutte" mentre i restati dopo l'inserimento della soluzione salina (ore 10:40) (Tabella 10.6).

Per tutte le linee eseguite su questo muretto i mark presenti nei radargrammi sono posizionati in corrispondenza delle linee radar incrociate.

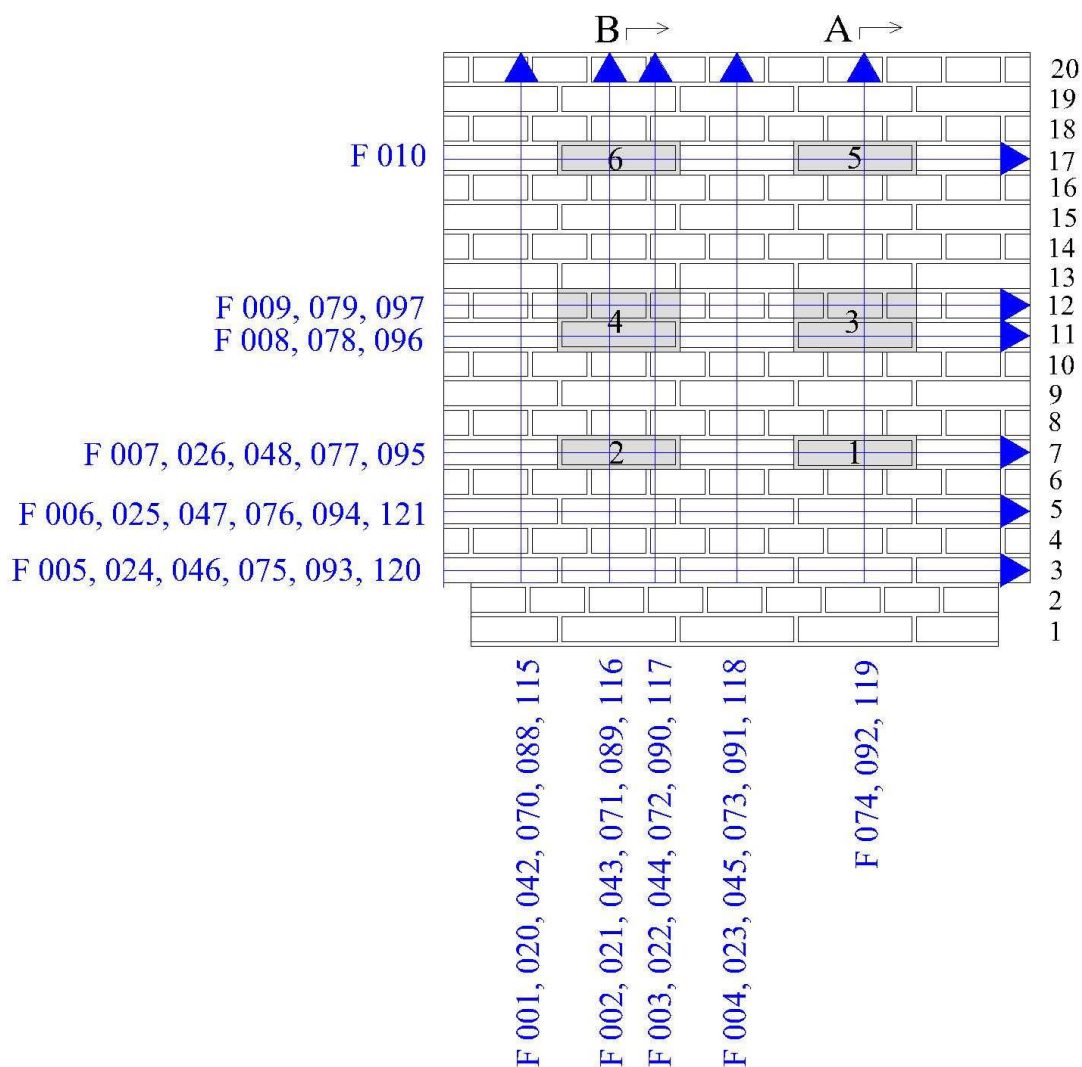


Figura 10.14 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

Tabella 10.6 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDD (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (12 dB – 80 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione	Note
001	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 10:22
002	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
003	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
004	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
005	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
006	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
007	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
008	Palm 2 GHz	15	corso 11	sx/dx	
009	Palm 2 GHz	15	corso 12	sx/dx	
010	Palm 2 GHz	15	corso 17	sx/dx	Ore 10:40: aggiunta soluzione salina
020	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 11:10
021	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
022	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
023	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
024	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
025	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
026	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
042	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 12:20
043	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
044	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
045	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
046	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
047	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
048	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
070	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 14:40
071	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
072	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
073	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
074	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto	
075	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
076	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
077	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
078	Palm 2 GHz	15	corso 11	sx/dx	
079	Palm 2 GHz	15	corso 12	sx/dx	
088	Palm 2 GHz	25	17	basso/alto	Ore 16:40
089	Palm 2 GHz	25	36.5	basso/alto	Gain 14dB-80dB
090	Palm 2 GHz	25	47.5	basso/alto	
091	Palm 2 GHz	25	65	basso/alto	
092	Palm 2 GHz	25	92.5	basso/alto	
093	Palm 2 GHz	25	corso 3	sx/dx	
094	Palm 2 GHz	25	corso 5	sx/dx	
095	Palm 2 GHz	25	corso 7	sx/dx	
096	Palm 2 GHz	25	corso 11	sx/dx	
097	Palm 2 GHz	25	corso 12	sx/dx	



115	Palm 2 GHz	25	17	basso/alto	Ore 18:30
116	Palm 2 GHz	25	36.5	basso/alto	
117	Palm 2 GHz	25	47.5	basso/alto	
118	Palm 2 GHz	25	65	basso/alto	
119	Palm 2 GHz	25	92.5	basso/alto	
120	Palm 2 GHz	25	corso 3	sx/dx	
121	Palm 2 GHz	25	corso 5	sx/dx	



*Figura 10.15 Retro (a sinistra) e fronte (a destra) del muretto PNDD. Nella parte bassa dei muretti è possibile individuare una diversa colorazione dei laterizi indice del livello di risalita capillare osservato prima di iniziare la prova.*



*Figura 10.16 A sinistra, istante della prima immissione della soluzione salina (solfato di sodio al 5% in peso) e, a destra, livello di salamoia presente nella vasca (ore 10:40).*



Figura 10.17 Altezza di risalita osservata alle ore 11:10 sull'angolo in basso a sinistra del retro del muretto PNDD.

#### 10.5.4 PNDE

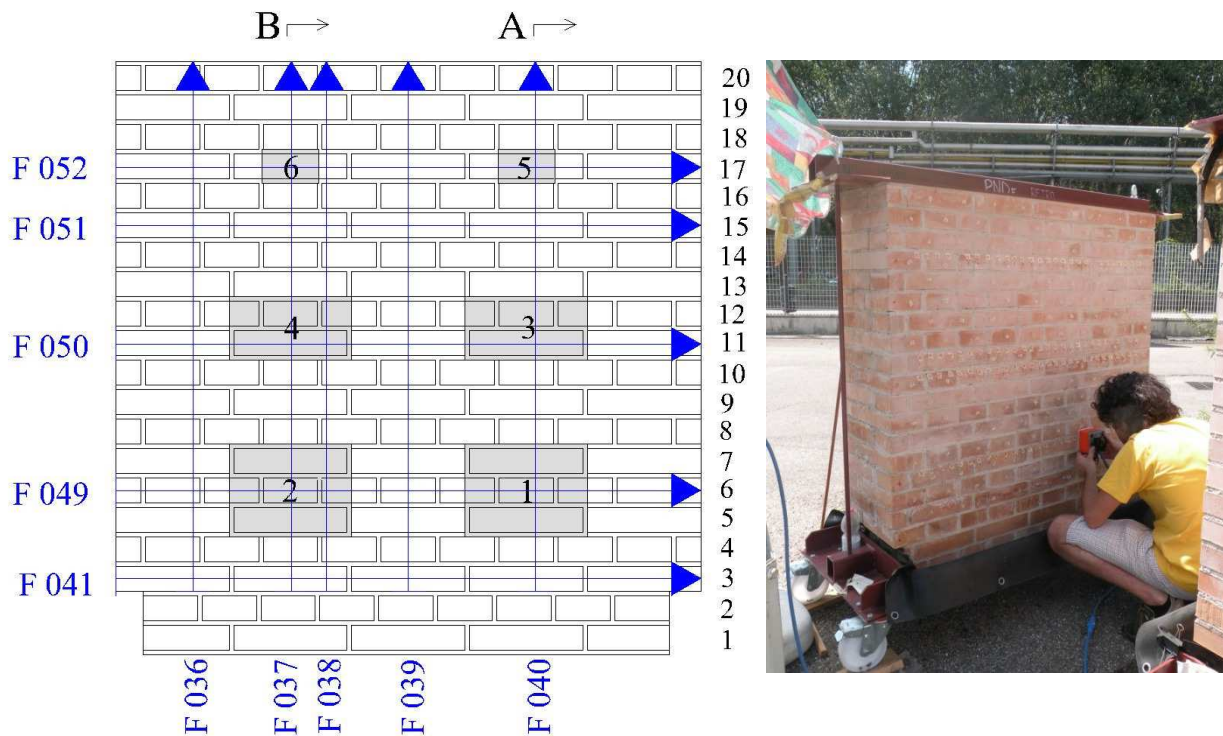


Figura 10.18 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDE il giorno 16/07/2010 con antenna Palm 2 GHz. Nella foto (a destra) un momento della fase di acquisizione dati.

Le indagini condotte sul muretto PNDE in questa giornata (16/07/2010) non hanno previsto prove di risalita. Le linee radar eseguite sono in totale 10, di cui 5 verticali con posizione iniziale del

centro antenna a 11 cm dalla base del muretto (e posizione finale in corrispondenza del bordo superiore) e 5 orizzontali (posizione iniziale del centro antenna sul bordo sinistro osservando il retro). Lungo le sezioni radar verticali i mark sono posizionati in corrispondenza delle linee orizzontali e viceversa.

*Tabella 10.7 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDD (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (12dB – 80 dB).*

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione
036	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto
037	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto
038	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto
039	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto
040	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto
041	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx
049	Palm 2 GHz	15	corso 6	sx/dx
050	Palm 2 GHz	15	corso 11	sx/dx
051	Palm 2 GHz	15	corso 15	sx/dx
052	Palm 2 GHz	15	corso 17	sx/dx

### 10.5.5 PNDF

Le indagini radar svolte in questa giornata (16/07/2010) hanno riguardato la risalita capillare con l'utilizzo di acqua dell'acquedotto bolognese. Le prime acquisizioni (ore 11:27) sono state effettuate in condizioni "asciutte" e al termine di queste (ore 11:40) è stata versata l'acqua nella vasca. La prima acquisizione in condizioni bagnate è stata eseguita alle 12:40, 1 ora dopo.

Il numero di percorsi effettuati con l'antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto è in totale 9 di cui 5 verticali con posizione iniziale del centro antenna a 11 cm dalla base del muretto e 4 orizzontali (posizione iniziale del centro antenna sul bordo sinistro osservando il retro del muretto): i percorsi sono stati ripetuti in tutto 4 volte (11:27, 12:40, 15:02, 17:00) collezionando 20 sezioni verticali e 14 sezioni orizzontali (Tabella 10.8). I mark posizionati all'interno dei radargrammi corrispondono al passaggio delle linee d'ispezione su quelle ortogonali a quella investigata.

*Tabella 10.8 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDF (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (12dB – 80 dB).*

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione	Note
027	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 11:27
028	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
029	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
030	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
031	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto	



032	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
033	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
034	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
035	Palm 2 GHz	15	corso 15	sx/dx	aggiunta acqua ore 11:40
053	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 12:40
054	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
055	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
056	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
057	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto	
058	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
059	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
080	Palm 2 GHz	15	17	basso/alto	Ore 15:02
081	Palm 2 GHz	15	36.5	basso/alto	
082	Palm 2 GHz	15	47.5	basso/alto	
083	Palm 2 GHz	15	65	basso/alto	
084	Palm 2 GHz	15	92.5	basso/alto	
085	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
086	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
087	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx	
098	Palm 2 GHz	25	17	basso/alto	Ore 17:00
099	Palm 2 GHz	25	36.5	basso/alto	
100	Palm 2 GHz	25	47.5	basso/alto	
101	Palm 2 GHz	25	65	basso/alto	
102	Palm 2 GHz	25	92.5	basso/alto	
103	Palm 2 GHz	25	corso 3	sx/dx	
104	Palm 2 GHz	25	corso 5	sx/dx	
105	Palm 2 GHz	25	corso 7	sx/dx	



Figura 10.19 Muretto PND, fronte, ore 11:40: livello d'acqua presente nella vasca.



Figura 10.20 Muretto PNDP, fronte, ore 15:12: l'acqua nella vasca è completamente evaporata (visione generale a sinistra e particolare d'angolo a destra)

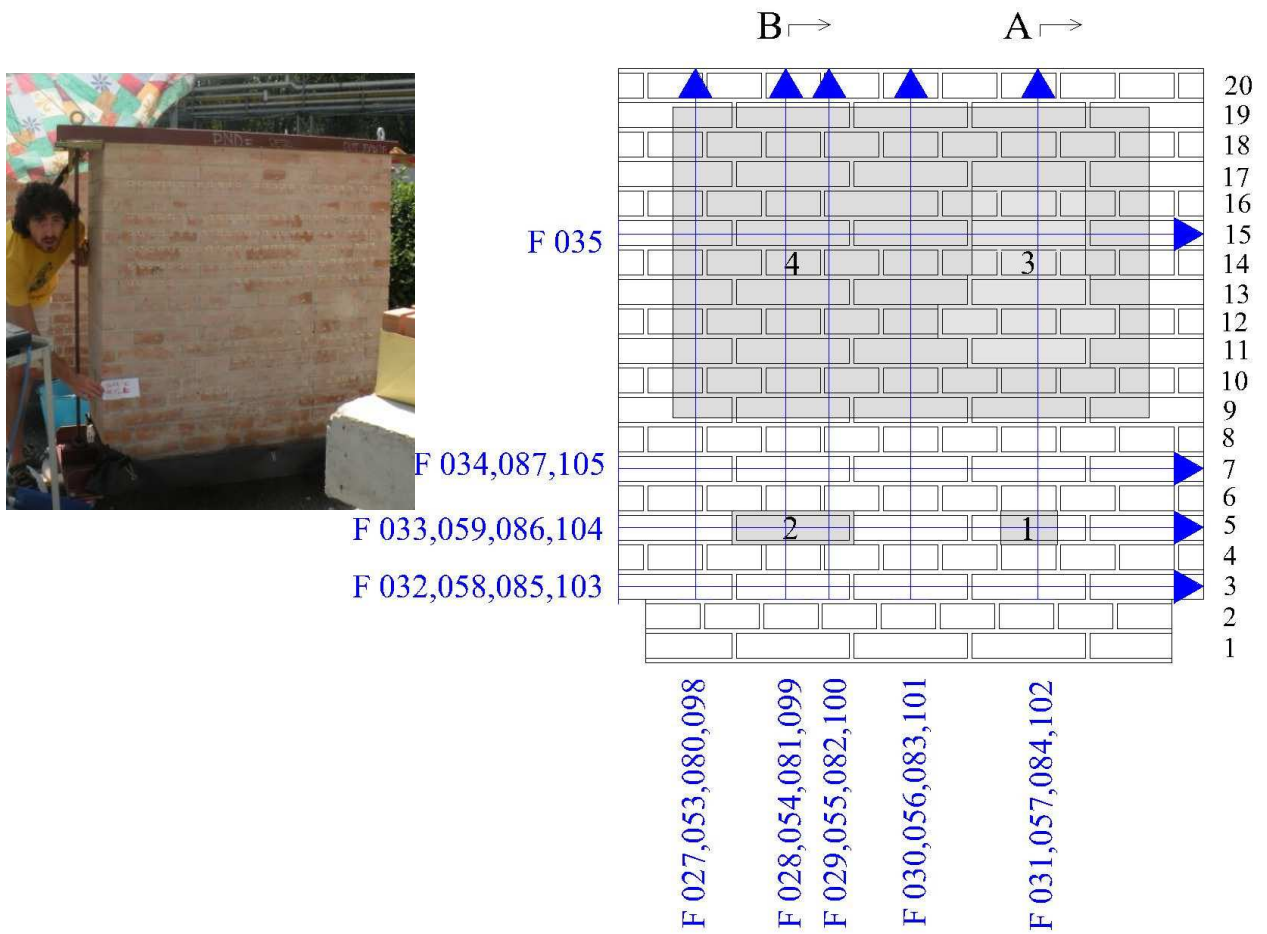


Figura 10.21 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDP il giorno 16/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

## 10.6 Campagna di acquisizione del 21/07/2010

In questa giornata sono stati analizzati solamente 3 provini: PNDB, PNDD e PNDF. Nel primo caso l'acquisizione dei dati è stata ripetuta più volte durante la giornata volendo valutare le fasi iniziali di risalita capillare provocata dall'aggiunta di salamoia nella vasca (cloruro di sodio allo 0,05% in peso), mentre negli altri casi è stata eseguito un unico rilievo per monitorare l'incremento di livello della risalita avendo previsto ulteriori aggiunte di acqua o soluzione salina versata 5 giorni prima. In questa campagna di acquisizione dei dati le linee verticali sono state eseguite dall'alto verso il basso, cioè in direzione opposta rispetto a quanto realizzato nelle precedenti indagini.

### 10.6.1 PNDB

In questa giornata (21/07/2010) è iniziata la risalita per questo muretto utilizzando cloruro di sodio allo 0,05% in peso: alle ore 8:10 sono stati versati 4 litri di salamoia nella vasca. A causa della temperatura elevata e conseguentemente della forte evaporazione, alle 14:00 la vasca risultava vuota.

La presenza dei sensori di potenziale installati sul fronte di questo muretto ha costretto a interrompere il percorso di alcune linee radar: in totale sono stati effettuati 14 percorsi con antenna Palm di cui 4 verticali con posizione di inizio del centro antenna a 6 cm del bordo superiore del muretto e posizione finale col centro antenna a 4,5 cm dalla base e 10 orizzontali (posizione iniziale del centro antenna sul bordo sinistro del muretto osservando il fronte di questo). Tutti i percorsi radar verticali sono stati ripetuti 3 volte durante la giornata mentre per quelli orizzontali sono stati scelti i percorsi corrispondenti ai corsi di mattoni n. 2, 3, 6 e 9 acquisendo in totale 25 radargrammi (Tabella 10.9). Al termine della giornata di prove (ore 19:00) sono stati versati 6 litri di salamoia all'interno della vasca.

*Tabella 10.9 Linee eseguite sul fronte del muretto PNDB (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare 9 dB - 80 dB.*

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione	Note
001	Palm 2 GHz	15	corso 9	sx/dx	Ore 11:00, 3 ore dopo aver aggiunto acqua+NaCl 0,05%
002	Palm 2 GHz	15	9	alto/basso	
003	Palm 2 GHz	15	25.5	alto/basso	
004	Palm 2 GHz	15	44.5	alto/basso	
005	Palm 2 GHz	15	64.5	alto/basso	
006	Palm 2 GHz	15	corso 2	sx/dx	
007	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
008	Palm 2 GHz	15	corso 6	sx/dx	
009	Palm 2 GHz	15	corso 9	sx/dx	



010	Palm 2 GHz	15	corso 10	sx/dx	
011	Palm 2 GHz	15	corso 12	sx/dx	
012	Palm 2 GHz	15	corso 15	sx/dx	
013	Palm 2 GHz	15	corso 16	sx/dx	
014	Palm 2 GHz	15	corso 18	sx/dx	
039	Palm 2 GHz	15	9	alto/basso	ore 14:00
040	Palm 2 GHz	15	25.5	alto/basso	
041	Palm 2 GHz	15	44.5	alto/basso	
042	Palm 2 GHz	15	64.5	alto/basso	
043	Palm 2 GHz	15	corso 2	sx/dx	
044	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
045	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx	
046	Palm 2 GHz	15	corso 9	sx/dx	
047	Palm 2 GHz	15	9	alto/basso	ore 17:00
048	Palm 2 GHz	15	25.5	alto/basso	
049	Palm 2 GHz	15	44.5	alto/basso	
050	Palm 2 GHz	15	64.5	alto/basso	
051	Palm 2 GHz	15	corso 2	sx/dx	
052	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx	
053	Palm 2 GHz	15	corso 6	sx/dx	

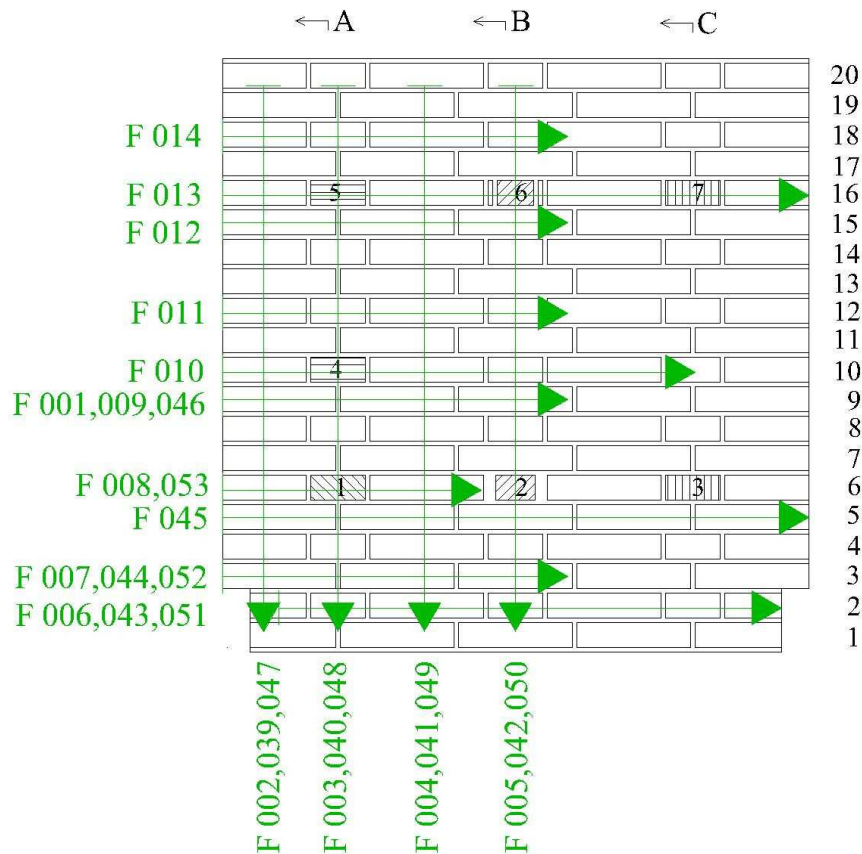


Figura 10.22 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDB il giorno 21/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

## 10.6.2 PNDD

L'acquisizione dei dati radar effettuata sul muretto PNDD il giorno 21/07/2010 avviene (1 sola volta) 5 giorni dopo l'aggiunta di soluzione salina di solfato di sodio al 5%.. La vasca si presentava vuota e sul muretto erano visibili i depositi salini provocati dall'evaporazione della salamoia (Figura 10.24). I radargrammi acquisiti in questa data sono 12, di cui 4 verticali con posizione iniziale del centro antenna (Palm 2 GHz) a 6 cm dal bordo superiore della piastra e posizione finale a 11,8 cm dalla base (causa vasca stretta) e 8 orizzontali (posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro del muretto osservando il retro) (Tabella 10.10).

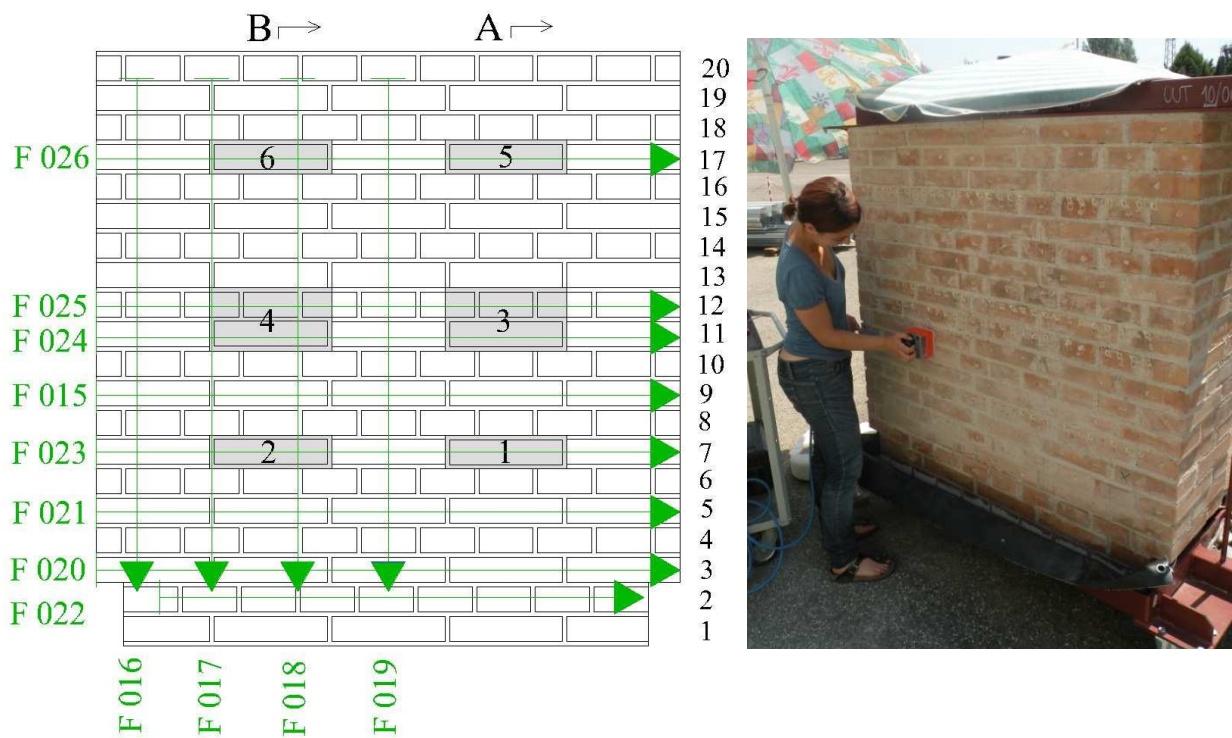


Figura 10.23 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDD il giorno 21/07/2010 con antenna Palm 2 GHz. A destra in istante dell'acquisizione dei dati.

Tabella 10.10 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDD (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare 9 dB – 80 dB.

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm / corso)	Direzione
015	Palm 2 GHz	15	corso 9	sx/dx
016	Palm 2 GHz	15	9	alto/basso
017	Palm 2 GHz	15	25.5	alto/basso
018	Palm 2 GHz	15	44.5	alto/basso
019	Palm 2 GHz	15	64.5	alto/basso

020	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx
021	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx
022	Palm 2 GHz	15	corso 2	sx/dx
023	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx
024	Palm 2 GHz	15	corso 11	sx/dx
025	Palm 2 GHz	15	corso 12	sx/dx
026	Palm 2 GHz	15	corso 17	sx/dx



Figura 10.24 Depositi di sale (solfato di sodio al 5%) visibili sul muretto PNDD il 21/07/2010 alle ore 12:30: angolo destro e sinistro del retro (in alto), fronte ed angolo destro del fronte (in basso).

### 10.6.3 PNDF

Le prove radar eseguite sul retro del muretto il 21/07/2010 avvengono 5 giorni dopo l'aggiunta di acqua nella vasca.

Il numero totale di linee è 12 di cui 5 verticali con posizione iniziale del centro antenna a 6 cm dal bordo superiore del muretto e posizione finale a 11,8 cm dal bordo inferiore e 7 orizzontali (posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza del bordo sinistro osservando il retro) (Tabella 10.11).

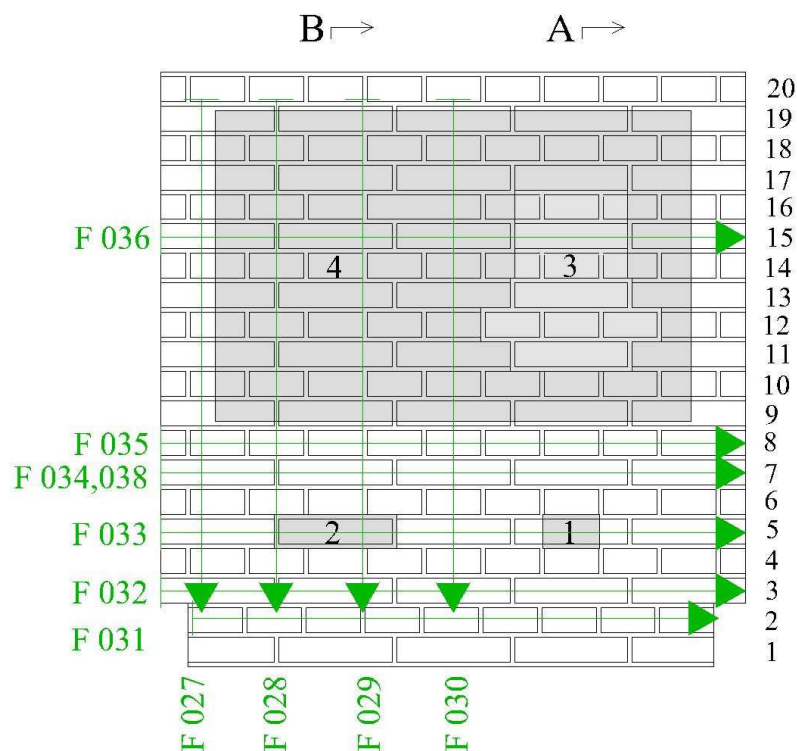


Figura 10.25 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDP il giorno 21/07/2010 con antenna Palm 2 GHz.

Tabella 10.11 Linee radar eseguite sul retro del muretto PNDP (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare 9 dB – 80 dB.

File	Antenna	Range	Posizione (cm / corso)	Direzione
027	Palm 2 GHz	15	9	alto/basso
028	Palm 2 GHz	15	25.5	alto/basso
029	Palm 2 GHz	15	44.5	alto/basso
030	Palm 2 GHz	15	64.5	alto/basso
031	Palm 2 GHz	15	corso 2	sx/dx
032	Palm 2 GHz	15	corso 3	sx/dx
033	Palm 2 GHz	15	corso 5	sx/dx
034	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx
035	Palm 2 GHz	15	corso 8	sx/dx
036	Palm 2 GHz	15	corso 15	sx/dx
038	Palm 2 GHz	15	corso 7	sx/dx

## 10.7 Campagna di acquisizione del 02/12/2010

In questa giornata sono stati analizzati tutti i muretti sul fronte, ma con l'antenna da 900 MHz. L'acquisizione dei dati è avvenuta in condizioni "bagnate" essendo ancora presente nelle vasche la soluzione salina o l'acqua utilizzata per queste prove.



### 10.7.1 PNDA

In data 02/12/2010, sono state eseguite 3 linee su questo muretto, tutte con direzione basso – alto e posizione del centro antenna in corrispondenza di metà corso 4. Per tutti i file acquisiti i mark sono posizionati in corrispondenza dei corsi 6, 10 e 16. Le prove di risalita per questo provino erano iniziate il giorno 28/10/2010 con una soluzione salina di cloruro di sodio allo 0,1% in peso e nel giorno di acquisizione dei dati con antenna da 900 MHz le vasche risultavano ancora piene fino al 1° corso di salamoia miscelata ad acqua piovana (Figura 10.26).



*Figura 10.26 Muretto PNDA: livello di salamoia (cloruro di sodio 0,1%) in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.*

*Tabella 10.12 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDA (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).*

<b>File</b>	<b>Antenna</b>	<b>Range (ns)</b>	<b>Posizione (cm)</b>	<b>Direzione</b>
010	900MHz	20	25.5	basso/alto
011	900MHz	20	65	basso/alto
012	900MHz	20	103.5	basso/alto

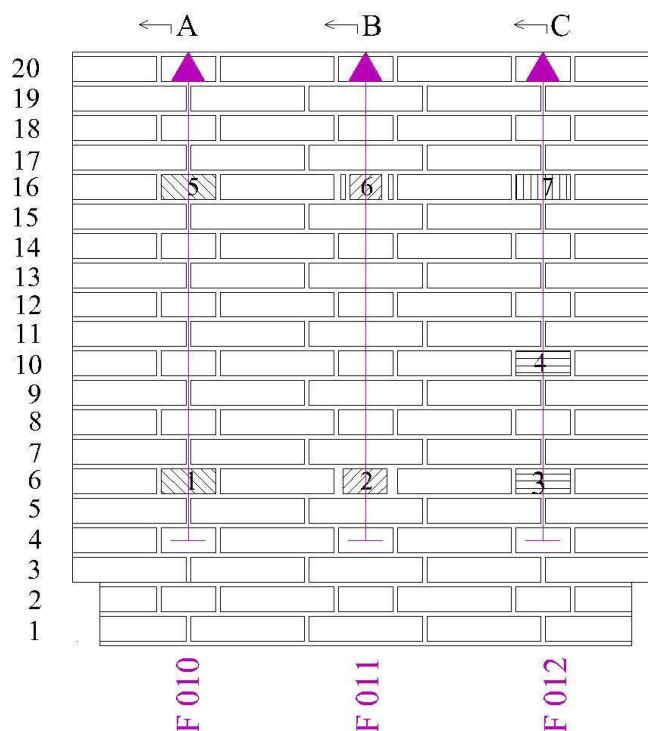


Figura 10.27 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDA il giorno 02/12/2010 con antenna da 900 MHz.

### 10.7.2 PNDB

Su questo muretto sono state eseguite 2 linee radar con direzione basso – alto e posizione iniziale del centro antenna (900 MHz) in corrispondenza di metà corso 4. Sono stati posizionati i mark in corrispondenza dei corsi 6, 10 e 16. Come visto nelle precedenti date di acquisizione, la risalita capillare (cloruro di sodio allo 0,05% in peso) per questo muretto è iniziata in data 21/07/2010 e durante l’acquisizione dei dati con antenna 900 MHz è stata rilevata la presenza di salamoia poco al di sotto del primo corso (Tabella 10.13 e Figura 10.28). Questo muretto è stato provvisto di telo in plastica per non permettere all’acqua piovana di miscelarsi con la soluzione salina.

Tabella 10.13 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDB (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm)	Direzione
013	900MHz	20	25.5	basso/alto
014	900MHz	20	44.5	basso/alto





Figura 10.28 Muretto PNDB: livello di salamoia (cloruro di sodio 0,05%) in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.

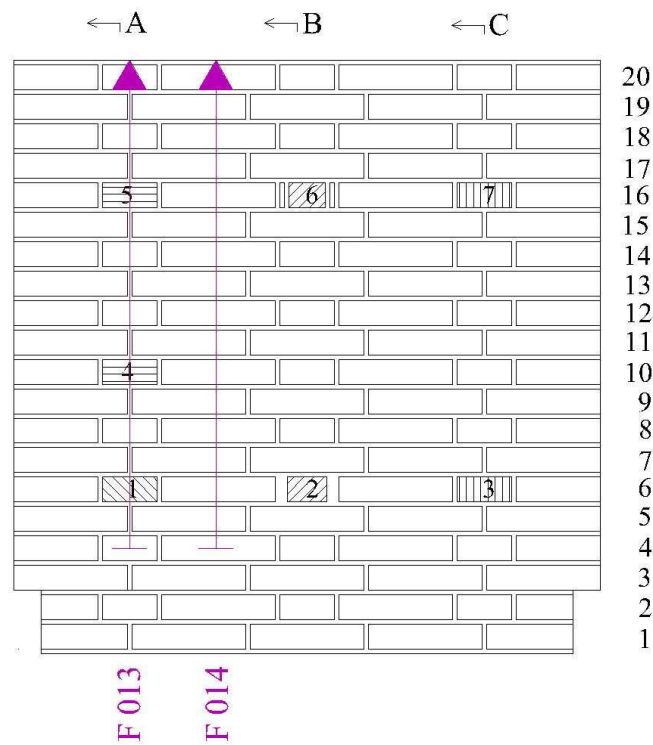


Figura 10.29 Linee radar eseguite sul fronte del provino PNDB il giorno 02/12/2010 con antenna da 900 MHz.

### 10.7.3 PNDC



Figura 10.30 Muretto PNDC: livello d'acqua in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.

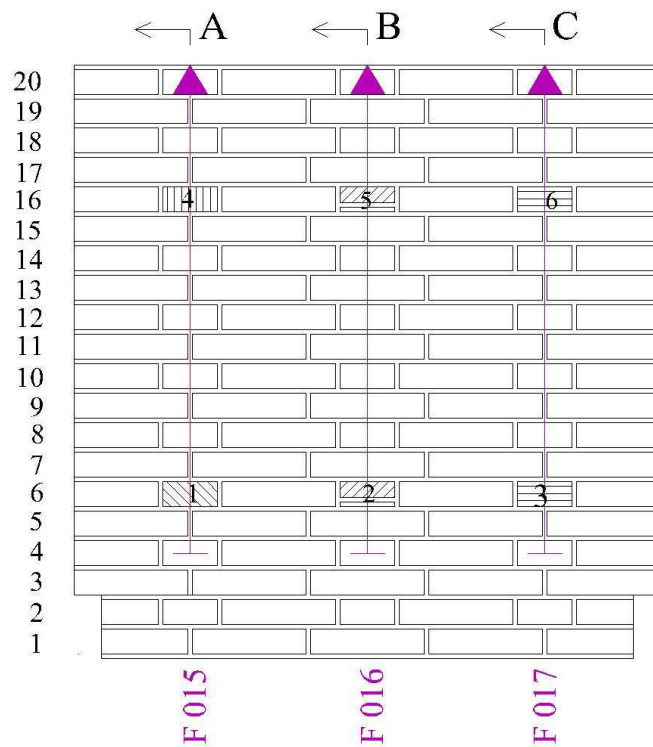


Figura 10.31 PNDC, linee radar eseguite sul fronte il 02/12/2010 con antenna 900 MHz.

Il numero di linee radar eseguite su questo muretto è 3, tutte in direzione basso – alto e con posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza di metà corso 4 (Tabella 10.14). La posizione dei mark corrisponde ai corsi 6, 11 e 16. Per questo provino non è stata prevista risalita capillare tramite l’aggiunta di acqua o soluzione nella vasca, ma durante l’acquisizione dei dati la vasca si presentava piena fino poco sotto il primo corso (Figura 10.30).

Tabella 10.14 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDC (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm)	Direzione
015	900MHz	20	25.5	basso/alto
016	900MHz	20	65	basso/alto
017	900MHz	20	103.5	basso/alto

#### 10.7.4 PNDD

La risalita capillare in questo muretto è iniziata il 16/07/2010 con soluzione di solfato di sodio al 5%. Nella giornata delle acquisizioni dei dati con antenna da 900 MHz non è stata versata salamoia (solfato di sodio allo 0,5% in peso): infatti, in questa data, la vasca risultava già piena di salamoia, ma non ne è stato rilevato il livello presente. Le linee radar eseguite in questa giornata sono 3, tutte in direzione basso – alto e con posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza di metà corso 4 (Tabella 10.15). I mark sono stati posizionati in corrispondenza dei corsi 7, 12 e 17.

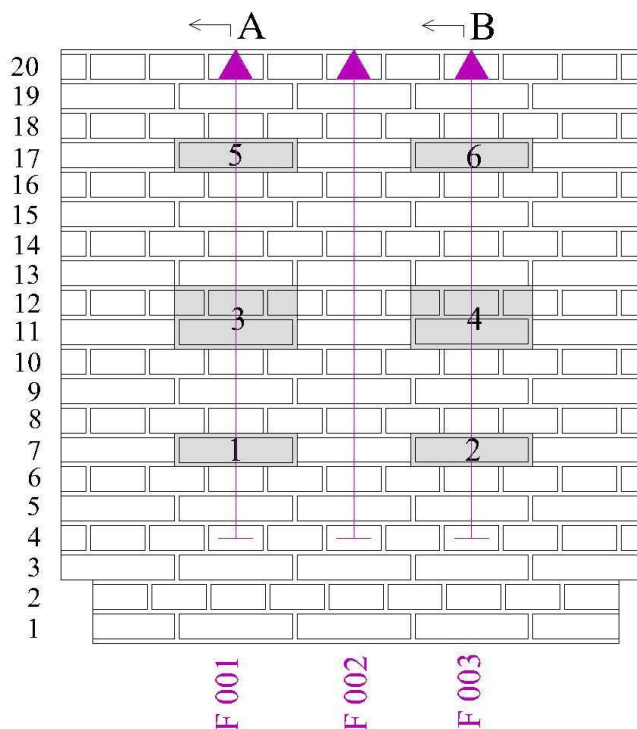


Figura 10.32 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDD il giorno 02/10/2010 con antenna da 900 MHz.



Tabella 10.15 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDD (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm)	Direzione
001	900MHz	20	36.5	basso/alto
002	900MHz	20	65	basso/alto
003	900MHz	20	92.5	basso/alto



Figura 10.33 Muretto PNDD: livello di salamoia (solfato di sodio 0,5%) in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.

### 10.7.5 PNDE

Il 02/12/2010 sono state acquisite 3 linee radar tutte con direzione basso – alto e posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza di metà corso 4. Anche in questo caso la posizione dei mark all'interno dei radargrammi corrisponde alla posizione dei difetti inseriti nel muretto (corsi 6, 11 e 17) (Tabella 10.16). Le prove di risalita erano iniziate il giorno 04/08/2010 con solfato di sodio allo 0,05% in peso e durante l'acquisizione dei dati con antenna da 900 MHz non è stata aggiunta salamoia in vasca in quanto già presente fino a metà del primo corso (Figura 10.34).



Figura 10.34 Muretto PNDE: livello di salamoia (solfato di sodio 0,5%) in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.

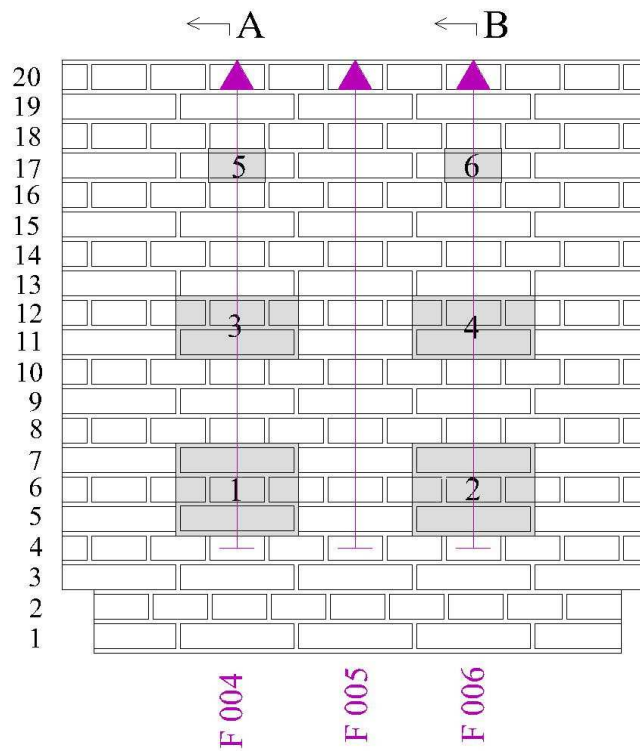


Figura 10.35 Linee radar eseguite sul fronte del PNDE il 02/12/2010 con antenna 900 MHz.



Tabella 10.16 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDE (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm)	Direzione
004	900MHz	20	36.5	basso/alto
005	900MHz	20	65	basso/alto
006	900MHz	20	92.5	basso/alto

### 10.7.6 PNDF

La risalita capillare per questo provino è iniziata il 16/07/2010 con acqua dell'acquedotto bolognese e durante l'acquisizione dei dati con antenna a 900 MHz (02/12/2010) non ne è stata aggiunta altra: infatti, in questa data, nella vasca era presente acqua fin sopra il primo corso di malta (Figura 10.36).

Le 3 linee radar hanno tutte direzione basso–alto e posizione iniziale del centro antenna in corrispondenza di metà corso 4 (Tabella 10.17). I mark sono in corrispondenza dei corsi 5, 9, 12 e 15.



Figura 10.36 Muretto PNDF: livello d'acqua in vasca e condizioni superficiali del fronte (a sinistra) e del retro (a destra) durante l'acquisizione del 02/12 con antenna 900 MHz.



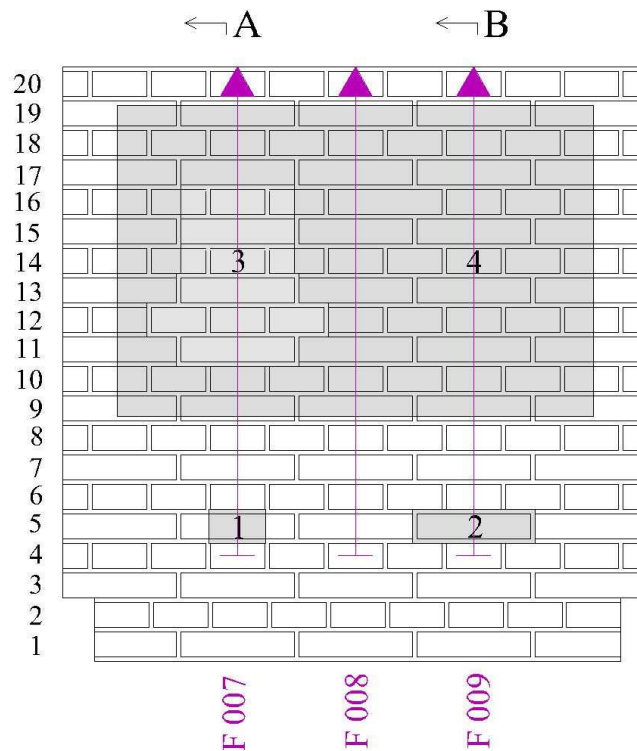


Figura 10.37 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDF il 02/12/2010 con antenna 900 MHz.

Tabella 10.17 Linee radar eseguite sul fronte del muretto PNDF (la posizione in cm è riferita al bordo sinistro). Gain di acquisizione lineare (1 dB – 32 dB).

File	Antenna	Range (ns)	Posizione (cm)	Direzione
007	900MHz	20	36.5	basso/alto
008	900MHz	20	65	basso/alto
009	900MHz	20	92.5	basso/alto

## 10.8 Elaborazione e visualizzazione dei dati

Dovendo valutare le velocità di propagazione del segnale, la sua attenuazione ed il valore della costante dielettrica del mezzo investigato, in questa prima fase dello studio i radargrammi acquisiti nelle diverse giornate non hanno subito alcuna elaborazione. È necessario infatti, dover lavorare su segnali non modificati mentre ogni elaborazione eseguita tramite software, produce delle variazioni delle forme d'onda che può falsare i risultati.

Sono riportati dapprima i tempi e le velocità di propagazione del segnale e il valore delle costanti dielettriche dei mezzi investigati, successivamente le analisi in frequenza, indice dell'attenuazione del segnale ed infine i valori delle altezze di risalita capillare nella muratura.

### 10.8.1 Tempi, velocità e costanti dielettriche

L'analisi dei tempi, velocità e delle costanti dielettriche è stata condotta solamente per i muretti pieni a 2 teste (PNDA, PNDB e PNDC) in quanto negli elementi a 3 teste (PNDD, PNDE e PNDF) la presenza dei vuoti interni provoca dei disturbi e delle variazioni di velocità di propagazione del segnale.

Per valutare i tempi e le velocità del segnale tra il fronte e il retro di ciascun muretto alle varie quote sono stati individuati tramite gli O-scope (forme d'onda del segnale) gli istanti di inizio riflessione superficiale ( $T_{1f}$ ) e quelli di inizio riflessione del retro del muretto ( $T_{1r}$ ): posizionando il cursore in corrispondenza di questi istanti è possibile leggere direttamente tramite software il tempi d'interesse (Figura 10.38).

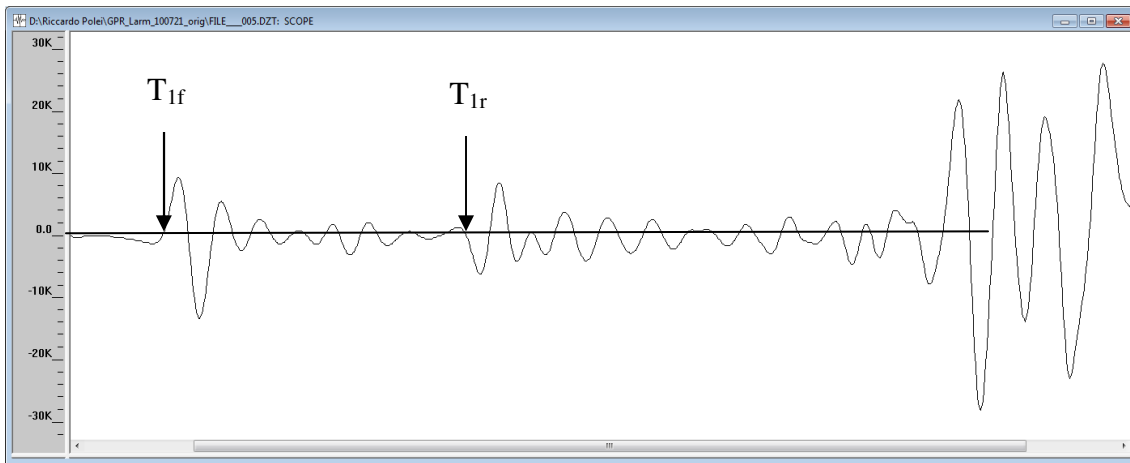


Figura 10.38 Esempio da radargramma con antenna 2 GHz di valutazione dei tempi “ $T_i$ ” utilizzati per il calcolo della velocità di propagazione del segnale:  $T_{1f}$  inizio riflessione superficiale,  $T_{1r}$  inizio riflessione retro del muretto.

Conoscendo la distanza percorsa dal segnale in andata ed in ritorno (le prove sono state eseguite in riflessione) e potendo ricavare il tempo impiegato da questo per coprire tale distanza come differenza dei valori indicati ( $T_{1r} - T_{1f}$ ), è possibile ricavare la velocità del segnale e il valore della costante dielettrica del mezzo attraverso le seguenti formule:

$$v = \frac{2 \cdot s}{(T_{1r} - T_{1f})} \quad ; \quad \varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2$$

dove  $s$  è pari allo spessore del muretto oggetto di studio e  $c$  è il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto (0,3 m/ns).

Per valutare le differenze di questi parametri provocate dalla presenza di umidità, sono stati valutati tre differenti scan dello stesso radargramma, uno in corrispondenza di una zona asciutta del muretto, uno in posizione umida ed uno in posizione satura (dove possibile) (Figura 10.39).

Tutti i dati ricavati nelle analisi sono stati ottenuti dallo studio delle sezioni radar eseguite in corrispondenza della mezzeria dei muretti.

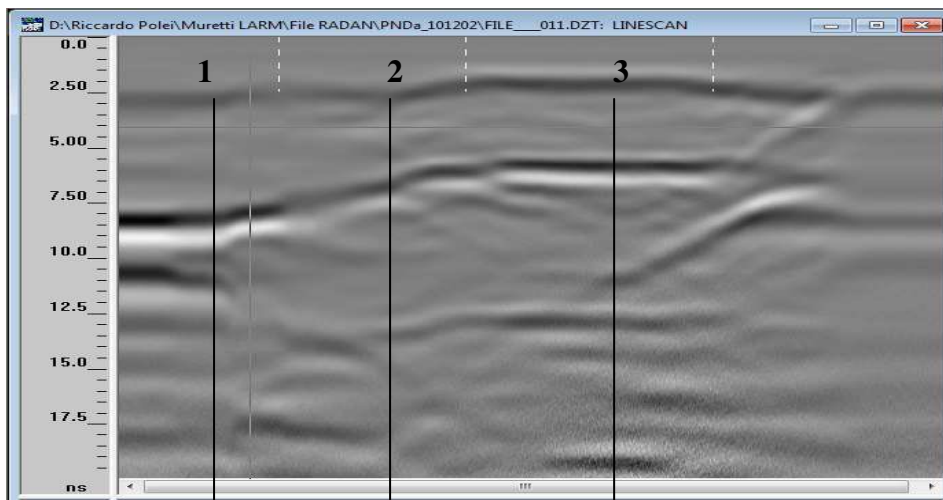


Figura 10.39 Esempio da radargramma con antenna 900 MHz di valutazione delle tre posizioni scelte per il calcolo dei tempi, delle velocità e delle costanti dielettriche: muratura saturo (1), umida (2) e asciutta (3).

### 10.8.2 Ampiezze e frequenze del segnale

L'analisi delle ampiezze dei picchi e del contenuto in frequenza del segnale è finalizzata a valutare l'attenuazione subita dal segnale mentre attraversa il mezzo da investigare; nello studio qui presentato, il fenomeno viene valutato osservando la diminuzione dei picchi delle ampiezze del segnale e le frequenze della riflessione superficiale e del retro del muretto.

La valutazione dei picchi osservati in corrispondenza delle due riflessioni d'interesse viene eseguita tramite software: utilizzando la funzione O-scope, che visualizza la forma d'onda dello scan oggetto di studio, e posizionando il cursore in corrispondenza dei picchi d'interesse è possibile leggere direttamente il valore di questi (Figura 10.40).

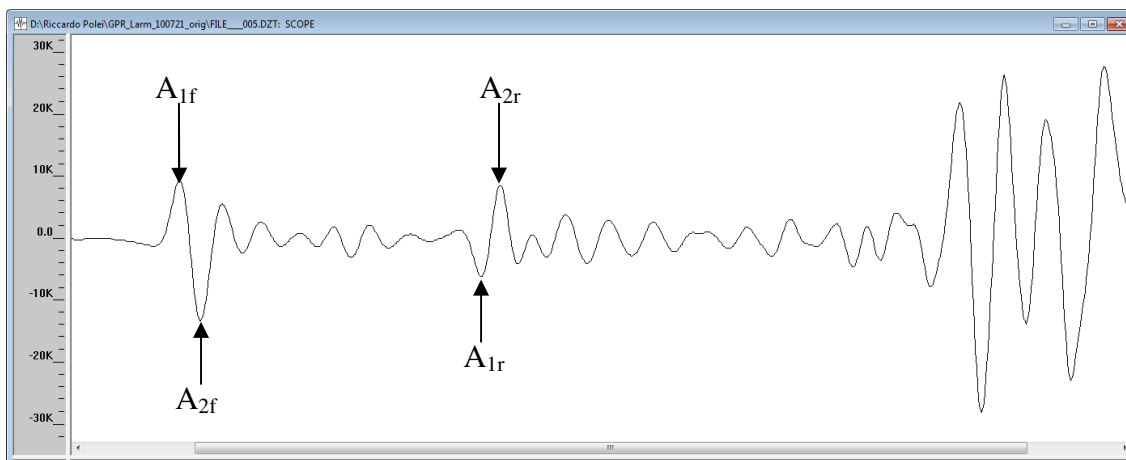


Figura 10.40 Esempio di valutazione dei picchi osservati per la riflessione superficiale ( $A_{1f}$  e  $A_{2f}$ ) e per quella del retro del muretto ( $A_{1r}$  e  $A_{2r}$ ).

I dati sono sempre stati acquisiti con un Gain lineare, la cui differenza tra valore in superficie ed in profondità è generalmente molto elevata (> 30 dB), fattore che non consente di annullare tale strumento e rendere direttamente confrontabili i valori delle ampiezze osservati tra fronte e retro. La valutazione di come variano le ampiezze verrà quindi eseguita in funzione di quanto osservato nelle tre diverse posizioni dello stesso radargramma, confrontando cioè le variazioni che la riflessione superficiale subisce nelle tre differenti posizioni, separatamente da ciò che accade per quella del retro del muretto.

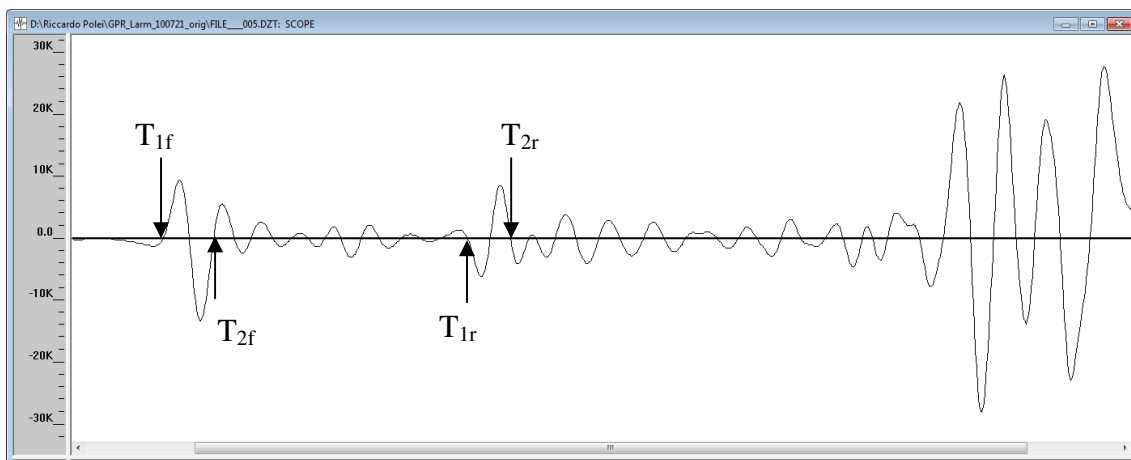
La valutazione delle ampiezze del segnale fornisce informazioni riguardanti la presenza di elementi conduttori (in questo caso sali) all'interno del mezzo investigato: infatti, in presenza di questi elementi, la conduttività elettrica ( $\sigma$ ) del mezzo tende notevolmente ad aumentare facendo diminuire le ampiezze osservate.

La valutazione delle frequenze, invece, è stata misurata come inverso del tempo trascorso per far compiere al segnale un'oscillazione completa: valutando l'istante di inizio ( $T_{1f}$ ) e quello finale ( $T_{2f}$ ) della riflessione superficiale, la frequenza è stata calcolata come inverso di tale differenza (Figura 10.41):

$$f = \frac{1}{T_{2f} - T_{1f}}.$$

Similmente si è proceduto con la riflessione del retro del muretto.

Questo parametro è un indice della velocità di propagazione del segnale all'interno del mezzo investigato: infatti, per velocità elevate, gli istanti di inizio e fine oscillazione saranno molto vicini tra di loro fornendo valori delle frequenze elevati, mentre in caso di segnale lento, tali istanti si distanzieranno nel tempo fornendo frequenze inferiori.



*Figura 10.41 Esempio di valutazione dei tempi  $T_i$  utilizzati per il calcolo delle frequenze del segnale.*

### 10.8.3 Altezze di risalita

La presenza di umidità all'interno dei provini in muratura causa una diminuzione della velocità di propagazione del segnale provocando un ritardo nelle riflessioni osservabili: il retro del muretto, in questo caso, risulterà posizionato in corrispondenza di tempi maggiori rispetto quelli osservati in sezioni asciutte dei muretti. L'altezza di risalita capillare massima è stata valutata quindi osservando la quota in cui la riflessione proveniente dal retro dei muretti perde la sua linearità.

Per i dati acquisiti con antenna Palm da 2 GHz provvista di odometro, è sufficiente spostare il cursore in corrispondenza del punto d'interesse per valutare la sua posizione, mentre per i dati acquisiti con l'antenna da 900 MHz è stato necessario calcolare la posizione di tali punti: conoscendo la quota di 1 mark all'interno del radargramma (ad esempio posizionato a 0,137 m rispetto all'inizio del radargramma) e valutando lo scan corrispondente a tale posizione (ad esempio lo scan n.°116) e quello corrispondente al livello massimo di risalita (scan 274) (Figura 10.42) è stato possibile valutare tramite proporzione il valore dell'altezza secondo la formula:

$$\text{altezza di risalita nel radargramma} = \frac{\text{quota del mark} \cdot \text{scan di risalita}}{\text{scan corrispondente al mark di quota nota}};$$

$$\text{altezza di risalita nel radargramma} = \frac{0,137 \cdot 274}{116} = 0,552 \text{ m};$$

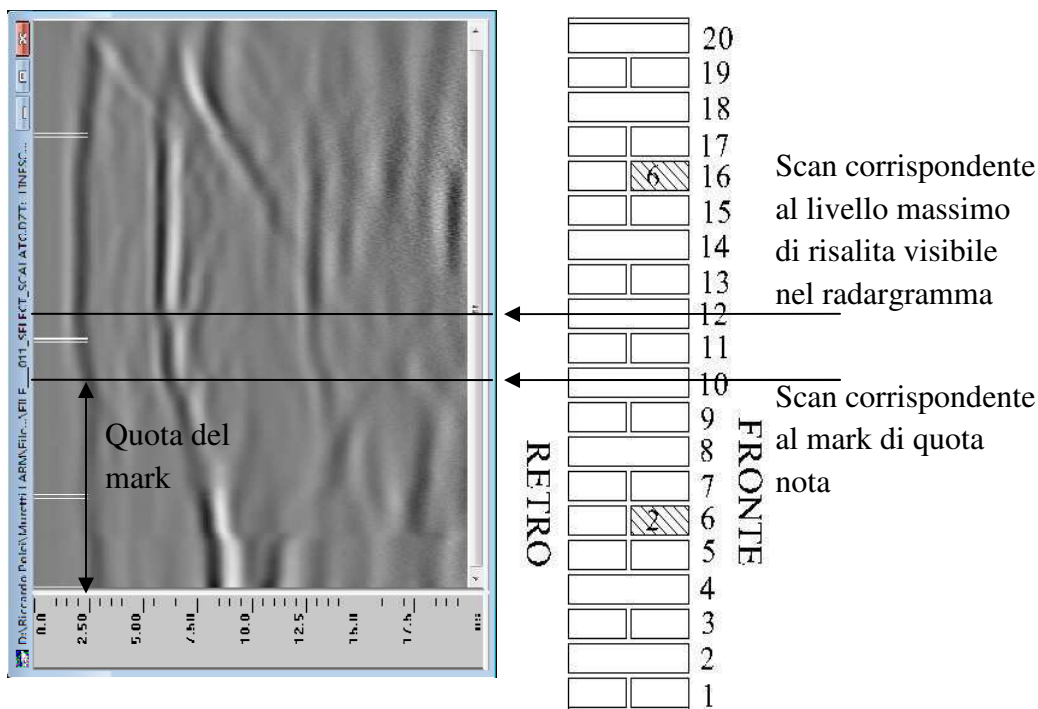


Figura 10.42 Esempio di valutazione dell'altezza di risalita nel radargramma (il mark a quota nota è sul 10° corso).

Rispetto a tale livello osservato nel radargramma è necessario aggiungere la quota della posizione iniziale del centro antenna valutata rispetto alla base del muretto per ottenere l'altezza totale di risalita (Figura 10.43):

$$\text{altezza totale di risalita} = \text{altezza di risalita nel radargramma} + \text{quota iniziale del centro antenna}$$

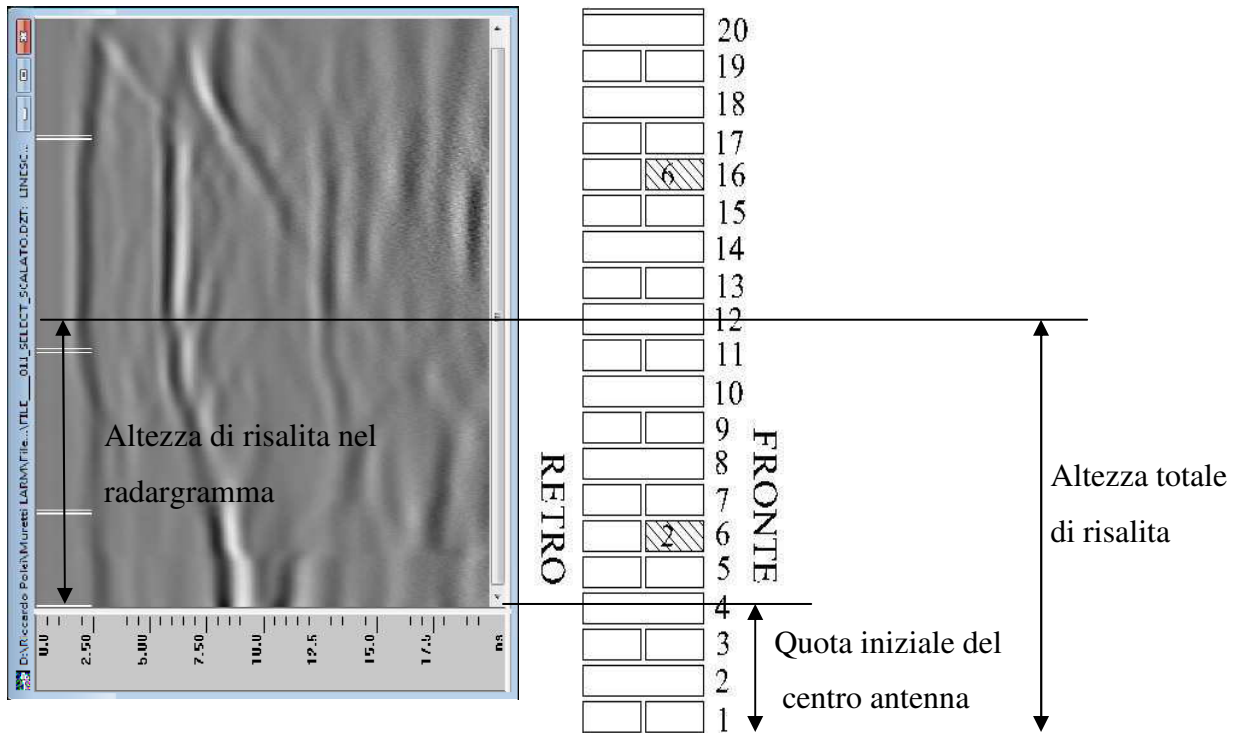


Figura 10.43 Valutazione dell'altezza totale di risalita.

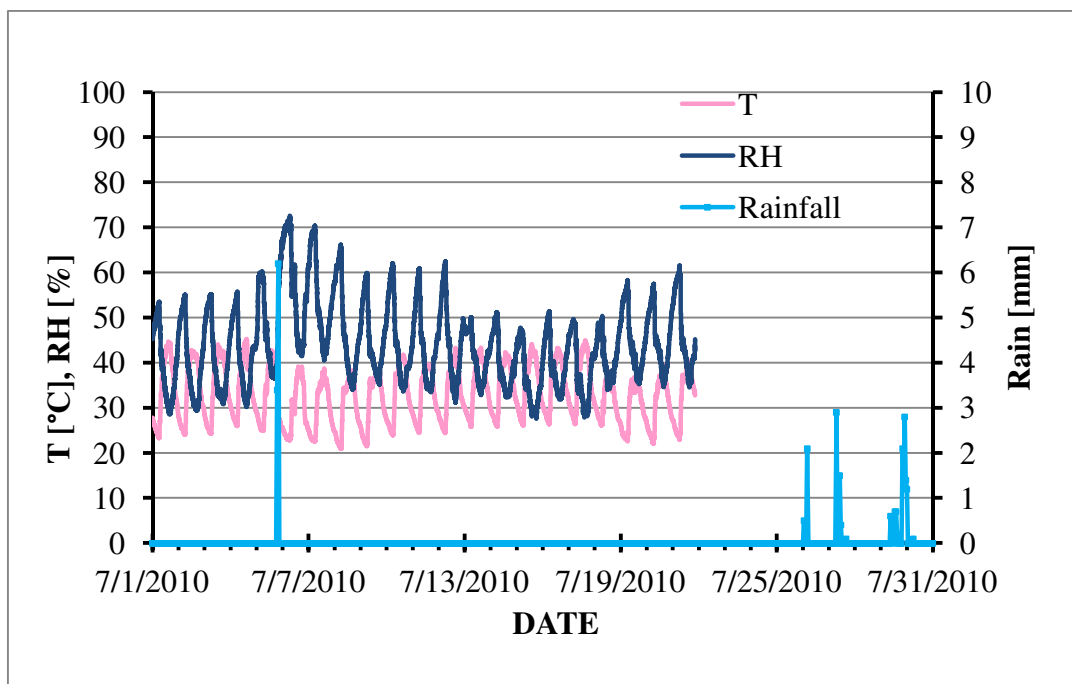
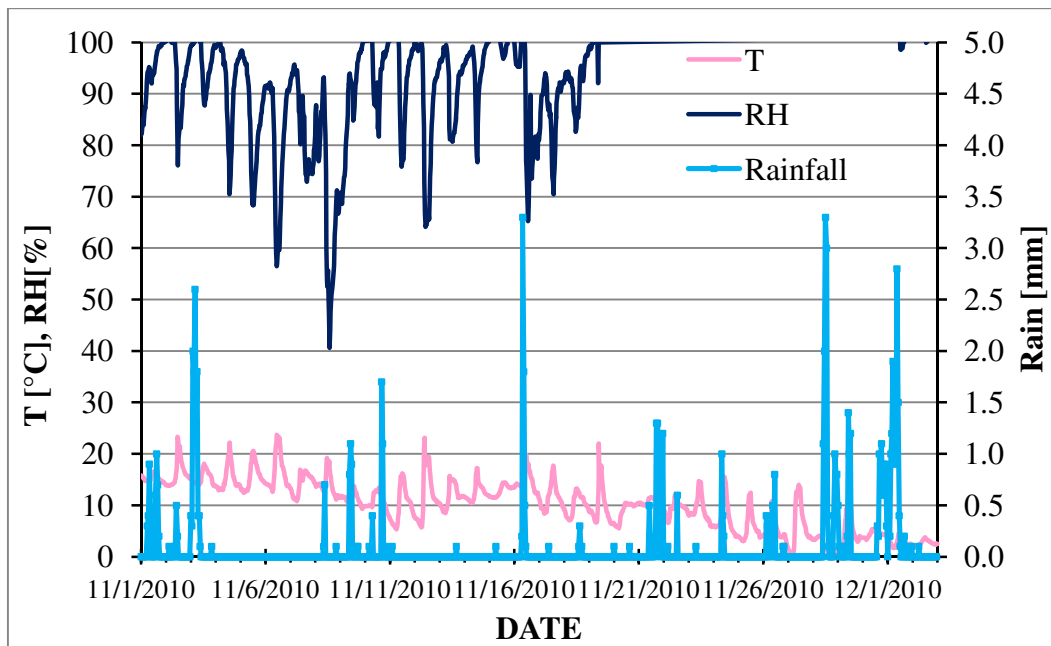


Figura 10.44 Temperatura, umidità e precipitazioni piovose del mese di luglio.





*Figura 10.45 Temperatura, umidità e precipitazioni piovose del mese di novembre e primi due giorni di dicembre.*

Per poter comprendere chiaramente i radargrammi ottenuti nelle diverse giornate di acquisizione è necessario conoscere anche le condizioni meteorologiche a cui sono stati esposti i provini (Figura 10.44 e Figura 10.45): infatti, diversi fenomeni osservati sono stati spiegati osservando l'andamento delle precipitazioni atmosferiche avvenute durante l'esposizione esterna dei muretti.

#### **10.8.4 PNDA**

Come visto nei precedenti paragrafi 10.4, 10.5, e 10.7, le giornate di acquisizione dati per questo muretto sono state tre (09 e 16/07/2010 e 02/12/2010), di cui le prime due in condizioni asciutte (non considerando le precipitazioni atmosferiche) sul retro e la terza dopo 35 giorni di risalita (dal 28/10/2010 al 02/12/2010) sul fronte. Sono stati analizzati radargrammi acquisiti lungo la sezione verticale di mezzera.

I valori ottenuti nelle prime due giornate di prova radar risultano confrontabili tra loro: nonostante le prove siano avvenute in condizioni "asciutte", è stato osservato un aumento della velocità del segnale (da 0,10 m/ns a 0,12 m/ns) spostandosi dal basso verso l'alto del muretto e conseguentemente è stata evidenziata una diminuzione del valore della costante dielettrica nella stessa direzione (da 9,14 a 6,80) (Tabella 10.18 e Tabella 10.20). I muretti, rimasti esposti alle precipitazioni atmosferiche, hanno assorbito acqua prima che iniziassero le prove di risalita dando origine a tale variazioni di velocità che, come osservato, risultano in ogni modo di piccola entità.

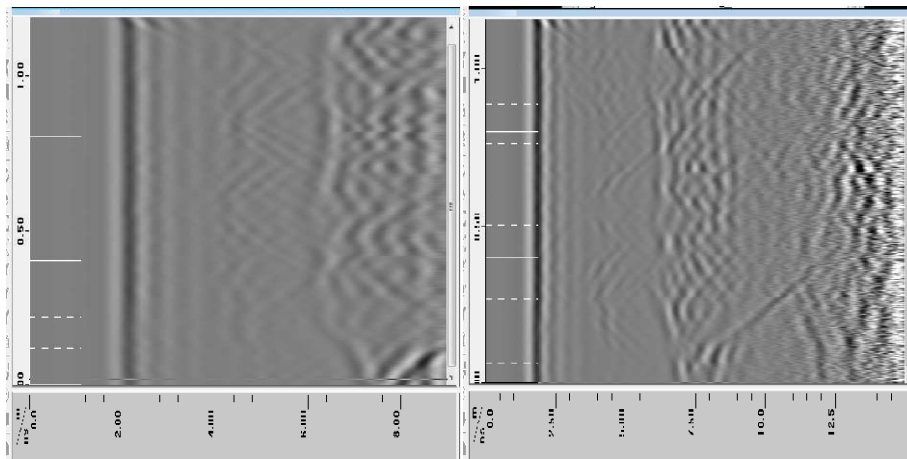


Figura 10.46 PNDA retro, mezzeria; radargramma n.071 a sinistra acquisito il 09/07/2010 con antenna Palm (range 9 ns) e radargramma n.°063 a destra acquisito il 16/07/2010 (range 15 ns): nella parte corrispondente alla base dei muretti è possibile osservare la presenza di umidità manifestata da uno spostamento a profondità maggiori della riflessione del retro.

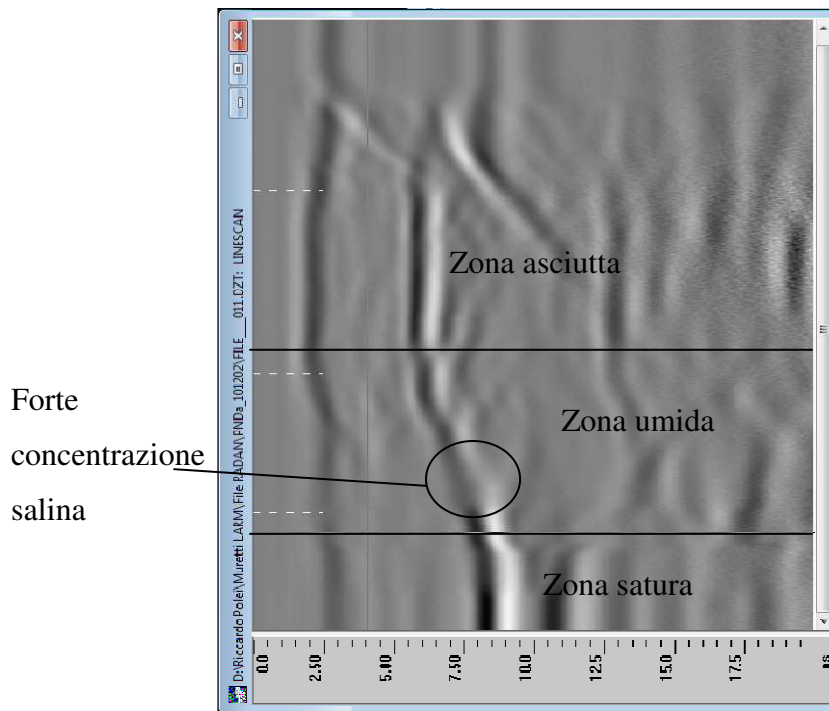


Figura 10.47 PNDA fronte, mezzeria; radargramma n.°011 acquisito il 02/12/2010 con antenna 900 MHz (range 20 ns): si notano le 3 zone (satura, umida e asciutta) del provino e la presenza di sali manifestata come attenuazione della riflessione del retro nella zona umida.

Anche le frequenze della riflessione superficiale risultano simili (1,37 GHz nella prima giornata e 1,45 GHz per la seconda) mentre quelle osservate per il retro del muretto evidenziano delle variazioni all'interno della stessa giornata di prova (tra 1,15 e 1,61 GHz per il giorno 16/07 e tra 1,28 e 1,64 GHz per il giorno 09/07) (Tabella 10.19 e Tabella 10.22). Le ampiezze dei picchi delle

riflessioni superficiali e del retro del muretto calcolate nelle due giornate di luglio mostrano un andamento comune aumentando, cioè, dal basso verso l'alto.

Le altezze di risalita capillare (Figura 10.46) rilevate nelle due giornate risultano confrontabili e sono di circa 0,33 m in corrispondenza della sezione C-C' (a sinistra osservando il retro) e tra 0,39 e 0,35 m nella mezzeria del muretto (Tabella 10.20, Tabella 10.23 e Figura 10.48).

I valori ottenuti con l'antenna 900 MHz sono differenti sia a causa della frequenza centrale delle antenne utilizzate nelle prove (2 GHz e 900 MHz), sia a causa del trattamento atmosferico subito dal muretto: infatti questo è rimasto esposto all'aperto dal 07/06/2010. Le velocità calcolate con questi dati sono sensibilmente inferiori nella parte bassa (0,07 m/ns) rispetto a quelle ricavate nelle altre giornate, mentre risultano paragonabili a queste se valutate al centro (0,10 m/ns) (Tabella 10.24).

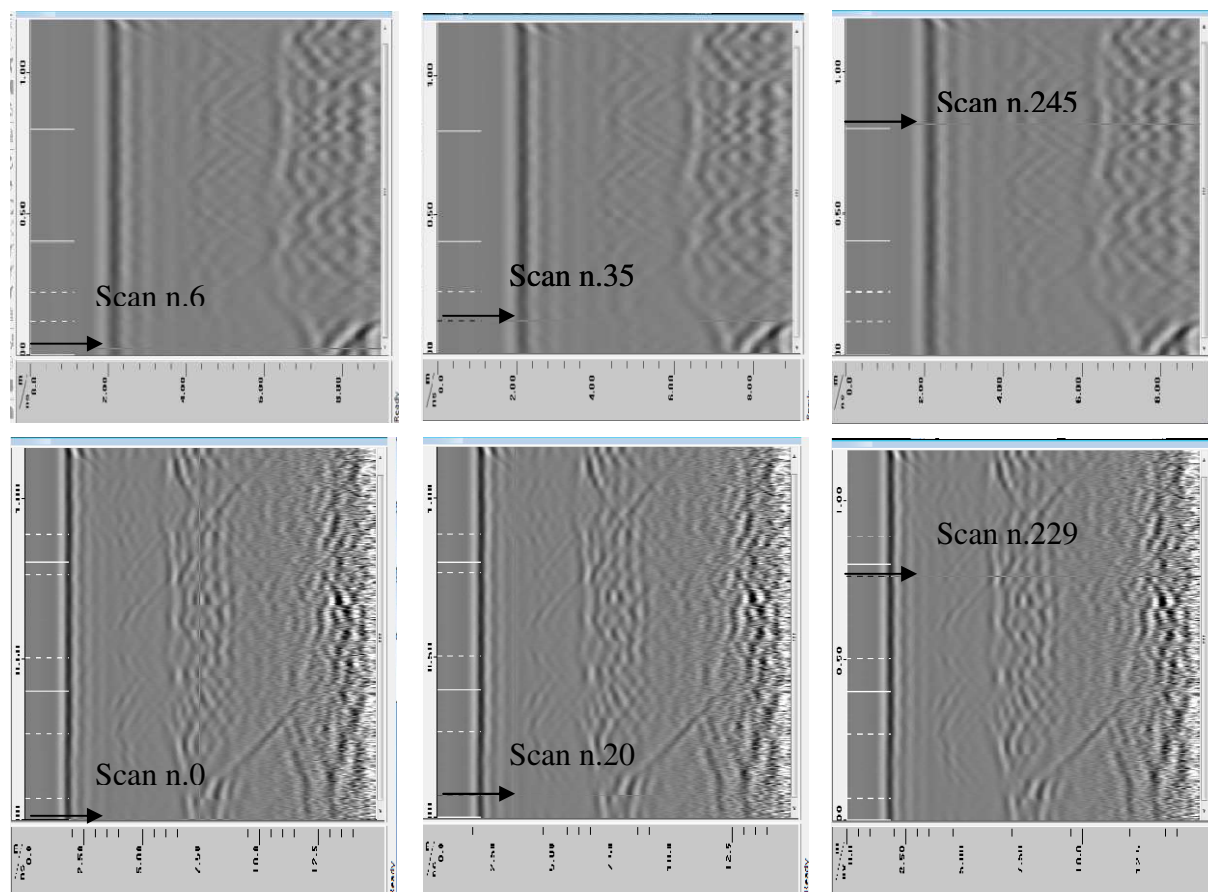


Figura 10.48 Radargramma n.°071 (sopra) eseguito il giorno 09/07 e radargramma n.°063 (sotto) eseguito il giorno 16/07. Antenna Palm (2 GHz), retro del muretto: posizioni utilizzate per il calcolo delle velocità, costanti dielettriche, frequenze e ampiezze (riferimento alla Tabella 10.8: scan 6, 25 e 245 file 071; riferimento alla Tabella 10.21: scan 0, 20 e 229 file 063)

Le frequenze osservate per la riflessione superficiale (0,28 – 0,39 GHz) sono inferiori rispetto a quelle del retro del muretto (0,58 – 0,73 GHz) mentre le ampiezze, che subiscono un aumento graduale spostandosi dal basso verso l'alto in corrispondenza della riflessione superficiale,

subiscono un netto calo solo in corrispondenza della seconda sezione (scan 181) (Tabella 10.25). Da questi radargrammi, oltre a valutare l'altezza di risalita capillare (Tabella 10.26), è stato possibile evidenziare la presenza di concentrazioni saline: queste si manifestano come zone in cui le ampiezze del segnale subiscono una forte diminuzione (Figura 10.47).

**Giorno 09/07/2010, linee eseguite sul retro (antenna Palm 2 GHz)**

*Tabella 10.18 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA con i dati acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1f</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
071	6	1.60	6.84	0.26	5.24	0.10	9.14
	35	1.59	6.57	0.26	4.98	0.10	8.25
	245	1.59	6.11	0.26	4.52	0.12	6.80

dove:

-T<sub>1f</sub>: tempo d'inizio della riflessione superficiale;

-T<sub>1r</sub>: tempo d'inizio della riflessione del retro muretto;

-lunghezza percorso: tragitto compiuto dal segnale elettromagnetico ("s" nelle formule).

$$v = \frac{2 \cdot s}{(T_{1r} - T_{1f})} \rightarrow v = \frac{2 \cdot 0,26}{5,24} = 0,10m/ns$$

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{0,3}{0,099}\right)^2 = 9,14$$

*Tabella 10.19 Tempi, frequenze e ampiezze calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA con i dati acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz)*

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
071	6	1.60	2.37	0.77	1.30	6.84	7.45	0.61	1.64	5904	-9066	14970	-4741	4074	8815
	35	1.59	2.32	0.73	1.37	6.57	7.35	0.78	1.28	6330	-9810	16140	-3688	4939	8627
	245	1.59	2.32	0.73	1.37	6.11	6.76	0.65	1.54	7304	-12593	19897	-6471	8278	14749

Tabella 10.20 Livelli di risalita capillare calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz)

NOME DEL FILE	Posizione sul muretto (cm)	scan di risalita	altezza asciutta (m)	lunghezza file (m)	quota iniziale centro antenna (m)	risalita da radargr. (m)	altezza di risalita (m)
70	65	69	0.9706	1.2	0.11	0.2294	0.3394
71	30	87	0.9108	1.2	0.11	0.2892	0.3992

**Giorno 16/07/2010, linee eseguite sul retro (antenna Palm 2 GHz)**

Tabella 10.21 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA con i dati acquisiti il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1f</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
063	0	1.31	6.45	0.26	5.14	0.10	8.79
	20	1.31	6.53	0.26	5.22	0.10	9.07
	229	1.32	5.92	0.26	4.6	0.11	7.04

Tabella 10.22 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA con i dati acquisiti il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE						
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO			
		T1	T2	freq. (GHz)	T1	T2	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A	
063	0	1.31	2.00	1.45	6.45	7.32	0.87	1.15	11851	-17895	29746	-5113	7668	12781
	20	1.31	2.00	1.45	6.53	7.16	0.63	1.59	11368	-17663	29031	-6508	9527	16035
	229	1.32	2.03	1.41	5.92	6.54	0.62	1.61	13013	-21381	34394	-8832	13710	22542



Tabella 10.23 Livelli di risalita capillare calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	altezza asciutta (m)	lunghezza file (m)	quota iniziale centro antenna (m)	risalita da radargr. (m)	altezza di risalita (m)
60	17	36	1.0603	1.18	0.11	0.1197	0.2297
61	36,5	68	0.944	1.17	0.11	0.226	0.336
62	47,5	52	0.9972	1.17	0.11	0.1728	0.2828
63	65	73	0.9374	1.18	0.11	0.2426	0.3526
64	92,5	67	0.9473	1.17	0.11	0.2227	0.3327

**Giorno 02/12/2010, linee eseguite sul fronte (antenna 900 MHz)**

Tabella 10.24 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA (fronte) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1r</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
011	95	0.20	7.45	0.26	7.25	0.07	17.49
	181	0.17	6.50	0.26	6.33	0.08	13.34
	384	0.15	5.53	0.26	5.38	0.10	9.63

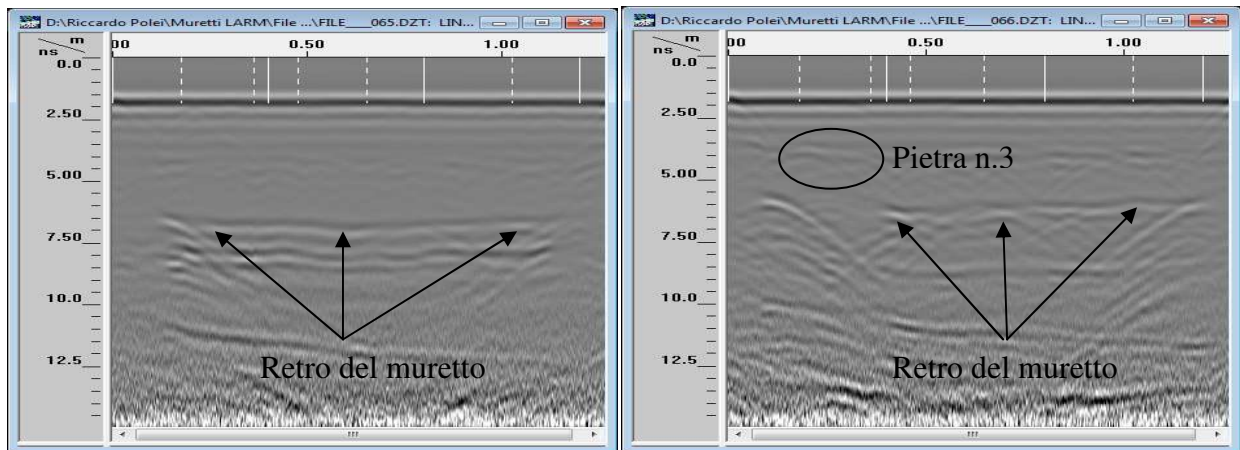
Tabella 10.25 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDA (fronte) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
011	95	0.20	3.28	3.08	0.32	7.45	9.18	1.73	0.58	2295	-8140	10435	-23093	26088	49181
	181	0.17	3.80	3.63	0.28	6.50	8.09	1.59	0.63	3130	-9114	12244	-12732	11200	23932
	348	0.15	2.69	2.54	0.39	5.53	6.90	1.37	0.73	8835	-14680	23515	-22889	21218	44107

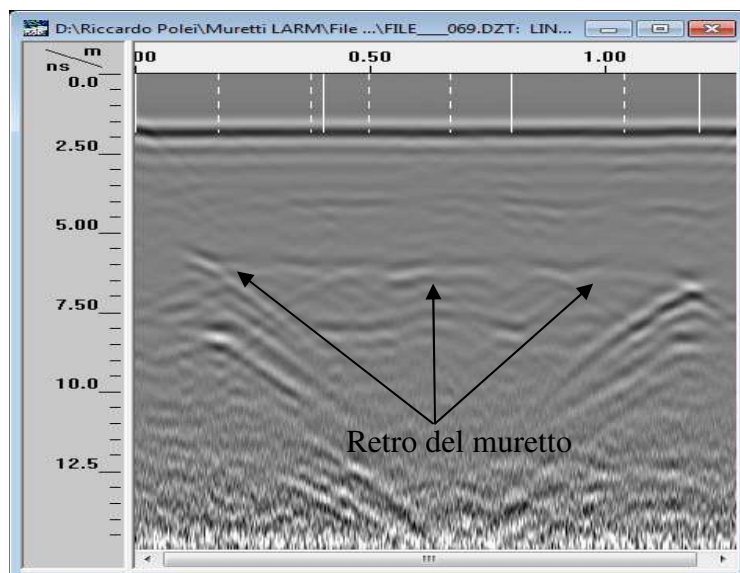
Tabella 10.26 Livelli di risalita capillare e delle efflorescenze calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	scan 1° mark	quota 1° mark (pietra)	quota iniziale centro antenna (m)	altezza di risalita (m)	posizione sali (scan)		posizione sali (m)	
							inizio	fine	inizio	fine
10	25,5	274	116	0.365	0.227	0.552	*	*	*	*
11	65	272	116	0.365	0.227	0.549	121	171	0.380	0.538
12	103,5	253	88	0.365	0.227	0.622	102	257	0.423	0.808

La distribuzione orizzontale di umidità all'interno del muretto risulta piuttosto uniforme: osservando le sezioni radar orizzontali del giorno 16/07/2010 (antenna Palm 2 GHz), la riflessione del retro si presenta rettilinea in tutti i file analizzati. Solamente quelli acquisiti in corrispondenza dei corsi 3 e 6 (Figura 10.49) evidenziano alcune particolarità come una maggiore concentrazione di umidità in corrispondenza della mezzeria per il file 065 (corso 3) e nella parte sinistra per il file 066 (corso 6); nella sezione realizzata sul 16° corso (file 069), invece, si nota una maggiore concentrazione di umidità in corrispondenza della parte destra del muretto (Figura 10.50).



*Figura 10.49 retro del muretto PNDA: radargrammi n.065 (corso 3) e 066 (corso 6), linee orizzontali acquisite il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz): la distribuzione di umidità risulta leggermente superiore al centro del muretto (file 065) mentre nel file 066 la pietra n.3 copre la visione del retro.*



*Figura 10.50 Radargramma n.°069 (corso 16) eseguito con antenna Palm sul retro del muretto PNDA il giorno 16/07/2010: in questa sezione si nota una maggiore concentrazione di umidità sulla destra del muretto.*

Per questo muretto sono stati ricavati i profili delle velocità e delle costanti dielettriche osservabili lungo la linea radar n.° 011 eseguita con antenna 900 MHz il giorno 02/12/2010 (Figura 10.47). Il radargramma, lungo 1,078 m (a cui corrispondono 508 scan) è stato suddiviso in intervalli di 2 cm e per ogni punto individuato sono state calcolate le velocità (Figura 10.51) e la costante dielettrica (Figura 10.52). Inoltre, valutando la relazione tra i valori della costante dielettrica con l'umidità (espressa come percentuale di volume) è stato possibile realizzare un profilo rappresentate il contenuto di umidità all'interno del provino (Figura 10.54). Nei calcoli e nei rispettivi grafici sono stati riportati i risultati ottenuti per un'altezza di 86 cm in quanto oltre tale livello gli effetti di bordo presenti nei radargrammi hanno disturbato la lettura delle forme d'onda del segnale utilizzate per il calcolo dei parametri di prova.

La porosità del muretto è stata valutata come media pesata sul volume di quelle relative ai singoli componenti: conoscendo il valore delle area di laterizio e di malta presenti sulla superficie del provino e considerando questa distribuzione uniforme lungo il suo spessore, sono stati calcolati i relativi volumi e la porosità media:

$$Volume\ laterizi = area\ laterizi \times spessore = 1,228 \times 0,25 = 0,307mc$$

$$Volume\ malta = area\ malta \times spessore = 0,176 \times 0,25 = 0,044mc$$

$$\begin{aligned} porosità\ media &= \frac{Volume\ laterizi \times porosità\ lat. + Volume\ malta \times porosità\ mal.}{Volume\ malta + Volume\ laterizi} = \\ &= \frac{0,307 \times 0,232 + 0,044 \times 0,206}{0,307 + 0,044} = 0,229 = 22,9\%. \end{aligned}$$

Noti tali valori è possibile stimare la relazione tra percentuale di umidità e valore della costante dielettrica, attribuendo il valore minimo rilevato per quest'ultima alle condizioni di laterizio secco (5% di acqua nei pori), ed il valore massimo al mattone saturo (100% di acqua nei pori) (Figura 10.53). L'equazione di tale retta sarà fornita da:

$$y = 59,38x + 9,07$$

dove  $y$  è il valore della costante dielettrica ed  $x$  è quello dell'umidità espressa in percentuale sul volume. Dovendo ricavare i valori dell'umidità in funzione di quelli dalla costante dielettrica, l'equazione dovrà essere invertita:

$$x = \frac{y - 9,07}{59,38}$$

Inserendo i valori della costante dielettrica calcolati, verranno forniti quelli dell'umidità negli stessi punti.

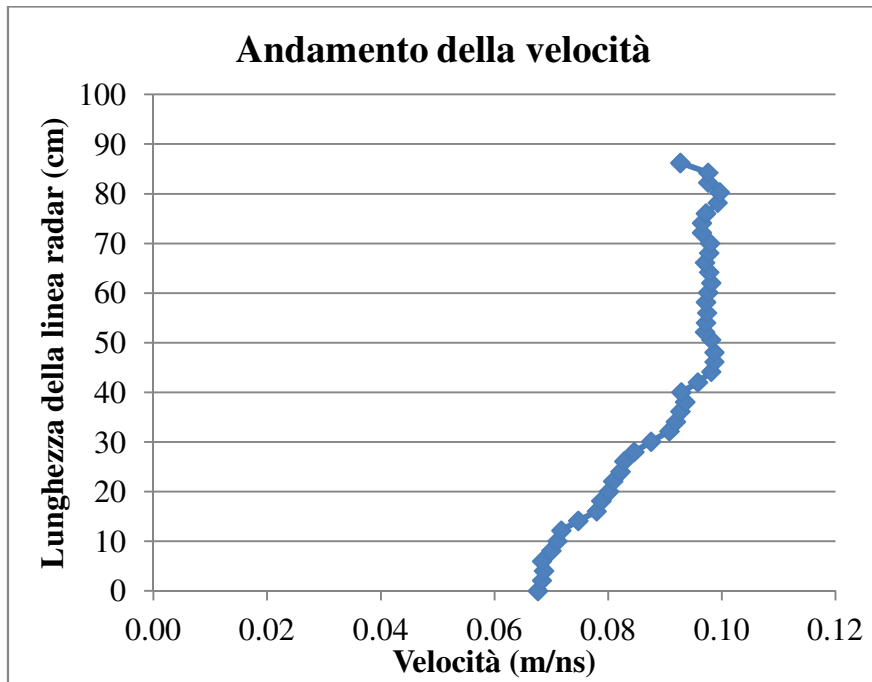


Figura 10.51 Muretto PNDA fronte, mezzeria: andamento delle velocità con antenna 900 MHz, 2/12/2010 (file 011).

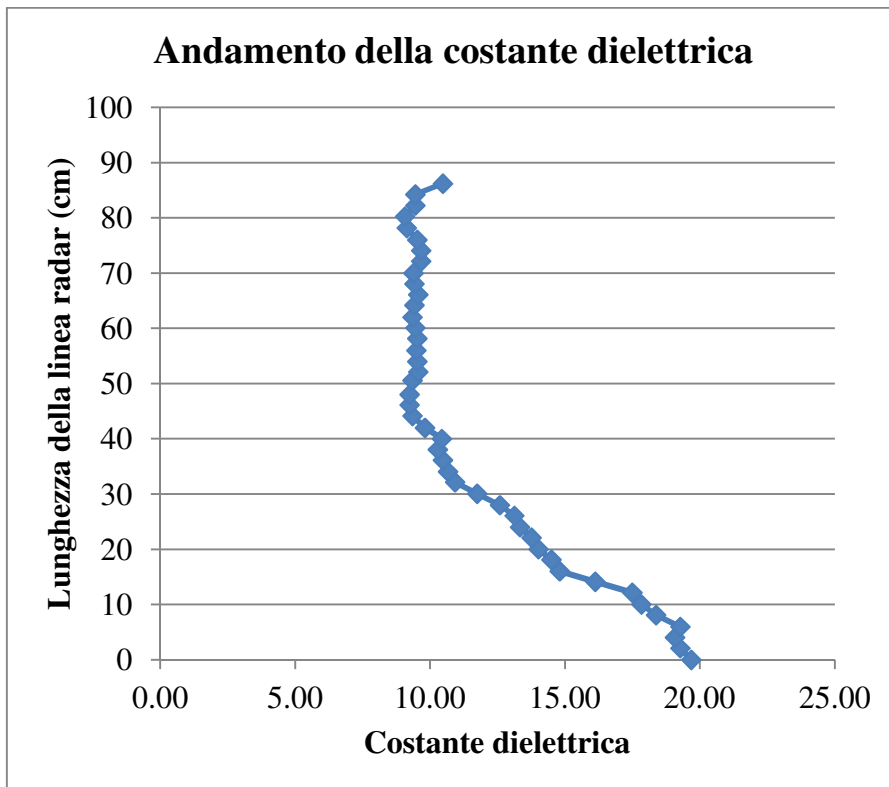


Figura 10.52 Muretto PNDA fronte, mezzeria andamento della costante dielettrica.

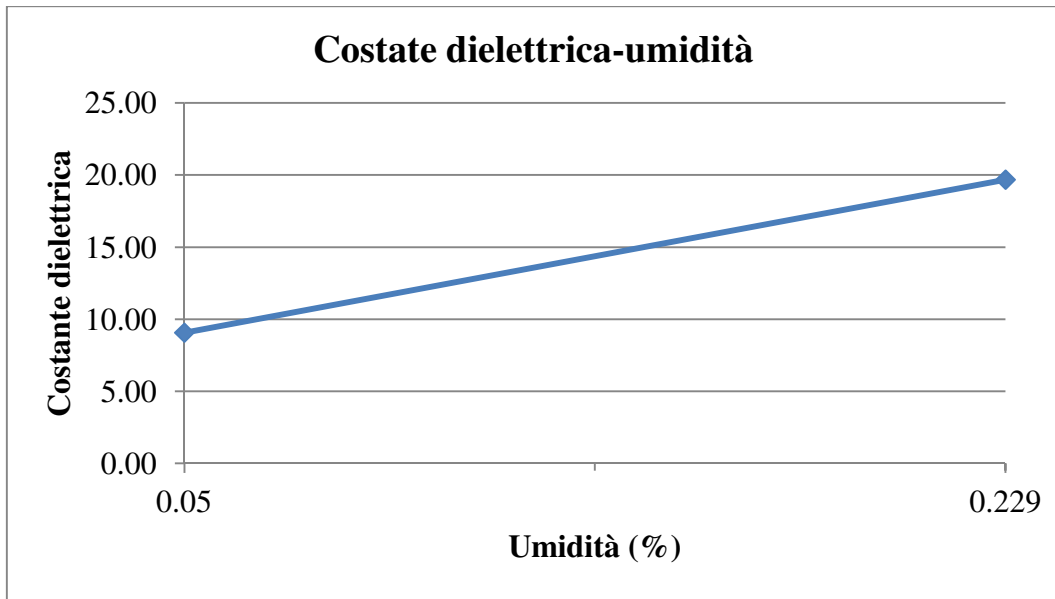


Figura 10.53 Andamento della relazione tra costante dielettrica e umidità valutata per il muretto PNDA.

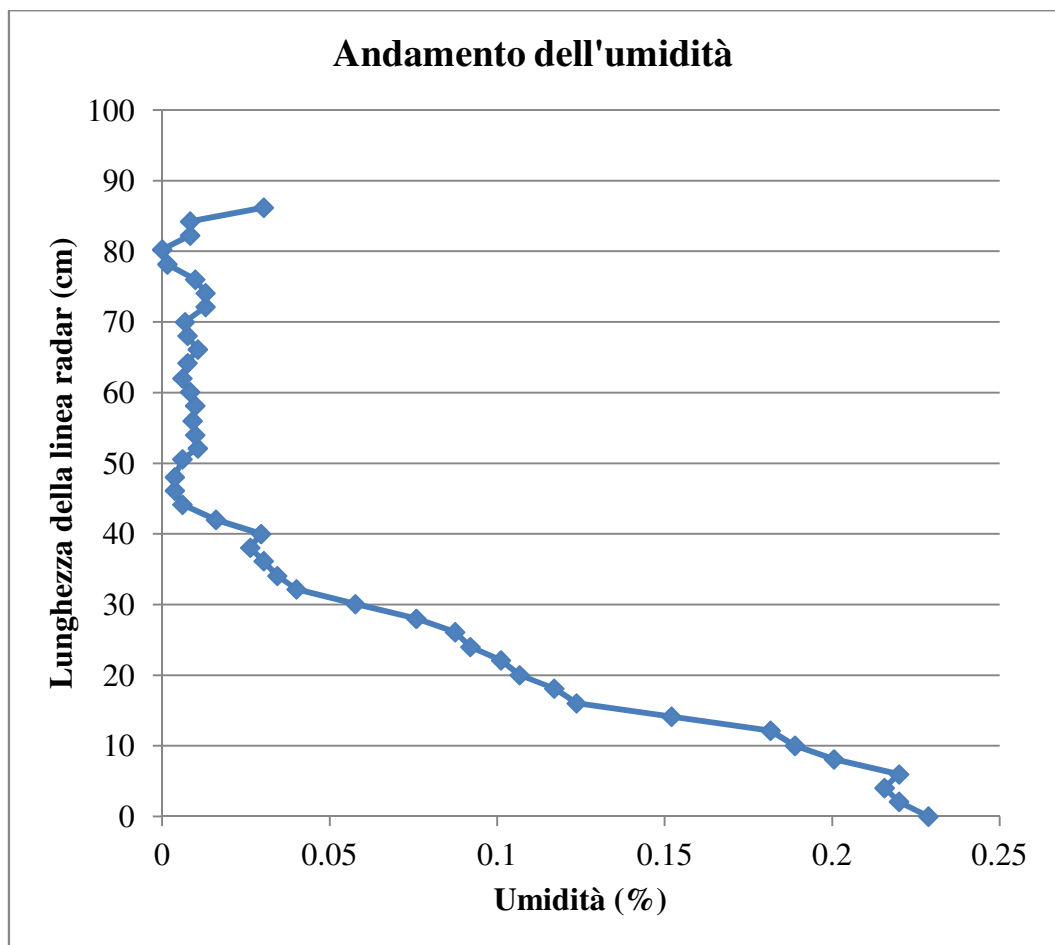


Figura 10.54 Andamento dell'umidità all'interno del muretto PNDA.



### 10.8.5 PNDB

I risultati ottenuti per questo muretto derivano dai dati acquisiti sul fronte in tre diverse giornate di prova (09 e 21/07/2010 e 02/12/2010) e utilizzando due antenne di frequenza diversa (Palm 2 GHz nelle prime due giornate di luglio, 900 MHz in quella di dicembre); inoltre, il 21/07/2010, è iniziata la risalita con soluzione salina di cloruro di sodio allo 0,05%.

Confrontando i risultati ottenuti con stessa antenna (Palm) nelle due giornate (Figura 10.55), è possibile notare alcune differenze: innanzitutto, nonostante il 21/07/2010 sia iniziata la risalita capillare, la prima velocità osservata nella parte bassa del muretto (0,12 m/ns alle ore 11:00, 3 ore dopo aver aggiunto la soluzione salina di cloruro di sodio) risulta superiore rispetto a quella del 09/07 (0,11 m/ns) mentre le costanti dielettriche evidenziano un andamento opposto, inferiore nel primo caso (6,59) e superiore nel secondo (8,05) (Tabella 10.27 e Tabella 10.30). I dati di pioggia (Figura 10.44) mostrano una precipitazione il giorno 06/07, fenomeno che ha influenzato i parametri sopra indicati: il muretto, esposto all'aperto, ha trattenuto parte di quest'acqua nella base alterando in tal modo le sue proprietà dielettriche e rallentando il segnale.

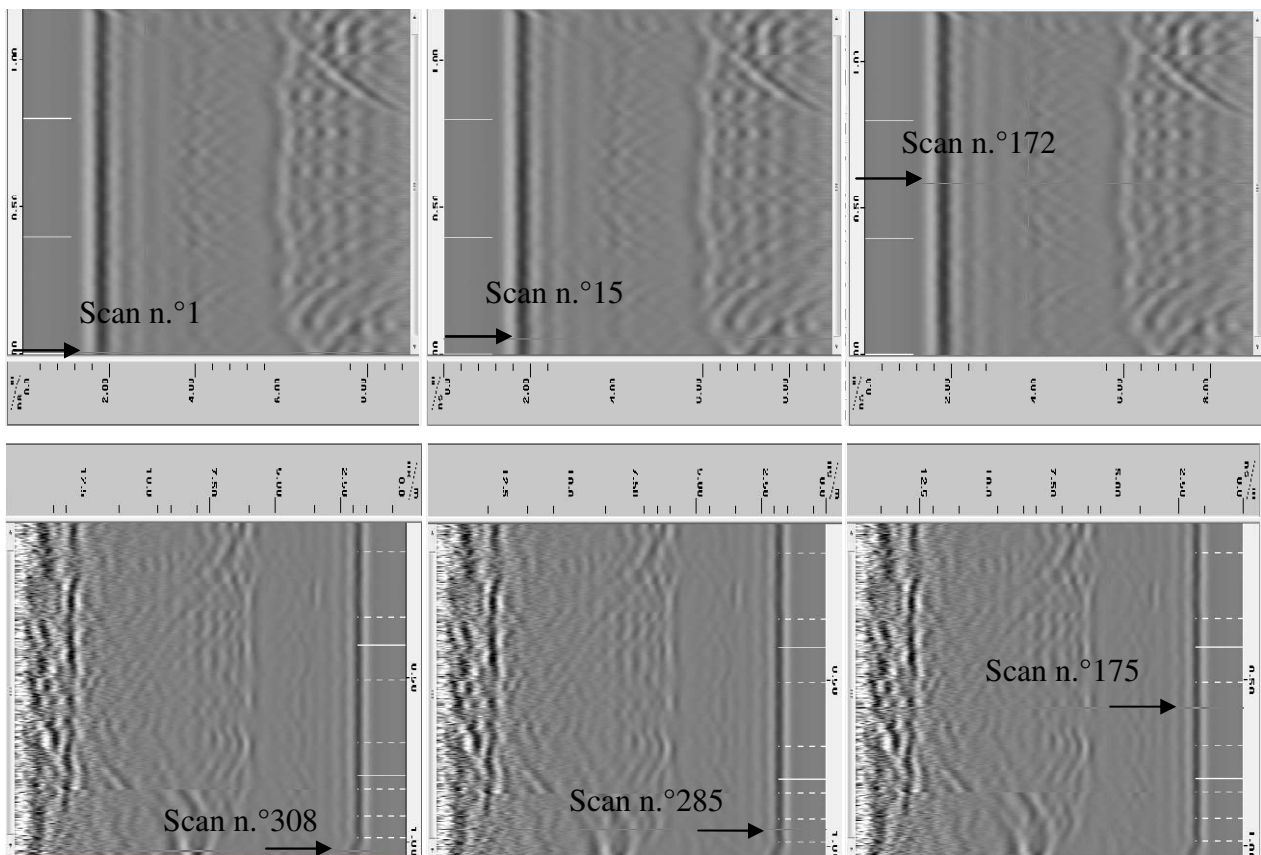
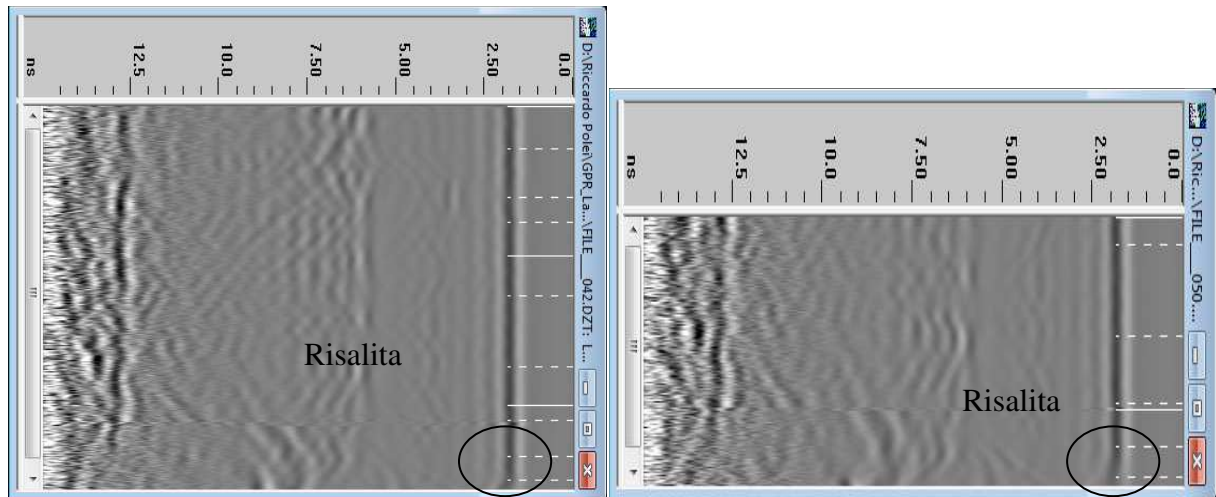


Figura 10.55 Radargramma n.°023 (sopra, linee basso-alto) eseguito il giorno 09/07 e radargramma n.°005 (sotto, linee alto-basso) eseguito il giorno 21/07. Antenna Palm (2 GHz), fronte del muretto: posizioni utilizzate per il calcolo delle velocità, costanti dielettriche, frequenze e ampiezze (riferimento alla Tabella 10.27: scan 1, 15 e 172 file 026; riferimento alla Tabella 10.30: scan 308, 285 e 175 file 005).

Nelle osservazioni successive (ore 14:00 e 17:00, Figura 10.56) del 21/07, invece, è visibile una netta variazione delle velocità nelle stesse posizioni mostrando valori sensibilmente inferiori (da 0,12 m/ns a 0,9 m/ns), indice che la risalita capillare ha raggiunto tali livelli; anche la costante dielettrica ha subito un notevole aumento essendo superiore a 10 (Tabella 10.27 e Tabella 10.30).



*Figura 10.56 Radargrammi n.°042 (ore 14:00, a sinistra) e 050 (ore 17:00, a destra, più corto) eseguiti in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte), il giorno 21/07/2010: in superficie si osserva il diverso livello di risalita..*

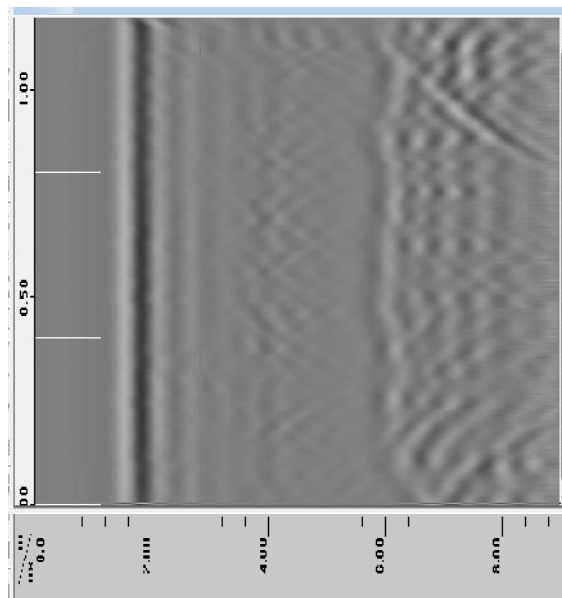
Le velocità e le costanti dielettriche calcolate nella zona asciutta del muretto (posizione centrale) non presentano differenze tra i diversi giorni mentre per quelle osservate nella zona umida è visibile una leggera variazione: i valori osservati il 09/07 sono simili a quelli del primo rilievo radar eseguito il 21/07 (velocità 0,11 m/ns e costante dielettrica circa 7,5) mentre nei dati successivi si nota una diminuzione del valore della costante dielettrica (circa 6,5) ed un aumento della velocità (Tabella 10.27 e Tabella 10.30).

Le frequenze e le ampiezze osservate il 09/07 presentano alcune particolarità: in corrispondenza della riflessione del retro del muretto, i valori delle frequenze tendono ad aumentare spostandosi dal basso verso l'alto (da 1,04 a 1,52 GHz) mentre in corrispondenza della riflessione superficiale si mantengono costanti (1,41 GHz) (Tabella 10.28). Da questi dati è chiaramente visibile l'effetto dell'umidità presente all'interno del muretto che provoca un rallentamento del segnale facendo aumentare il tempo necessario perché si compia un'oscillazione completa del segnale stesso e diminuendo la frequenza ad esso associata. Osservando le ampiezze, invece, è presente una netta diminuzione in corrispondenza della zona umida intermedia nel retro del muretto (scan 15 Tabella 10.27): questi fenomeni sono legati alla presenza di elementi con elevate conduttività (ad esempio sali) non visibili nelle foto raccolte nella giornata di prove (Figura 10.57).

Le frequenze ricavate per il giorno 21/07 mostrano come la presenza di acqua all'interno dei muretti provochi una diminuzione dei valori osservabili: in presenza di umidità, le frequenze calcolate per la riflessione superficiale e per il retro diminuiscono notevolmente rispetto a quelle ricavate in condizioni asciutte (Tabella 10.31).



*Figura 10.57 Particolare del fronte del muretto PNDB. Non sono visibili particolari concentrazioni saline in corrispondenza della linea radar n.°023 eseguita a 51 cm dal bordo sinistro del provino il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).*

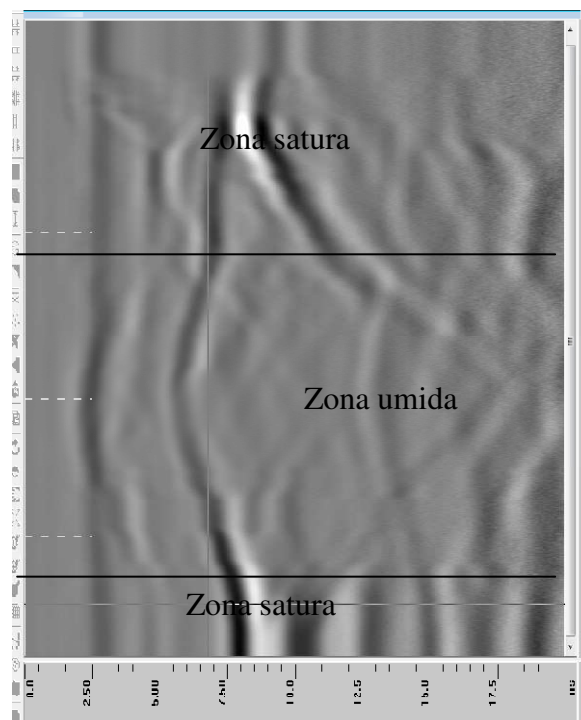


*Figura 10.58 Radargramma n.°023 eseguito il giorno 09/07/2010 sul fronte del muretto PNDB a 51 cm dal bordo sinistro con antenna Palm 2 GHz. Si osserva la risalita capillare nella parte bassa del muretto.*

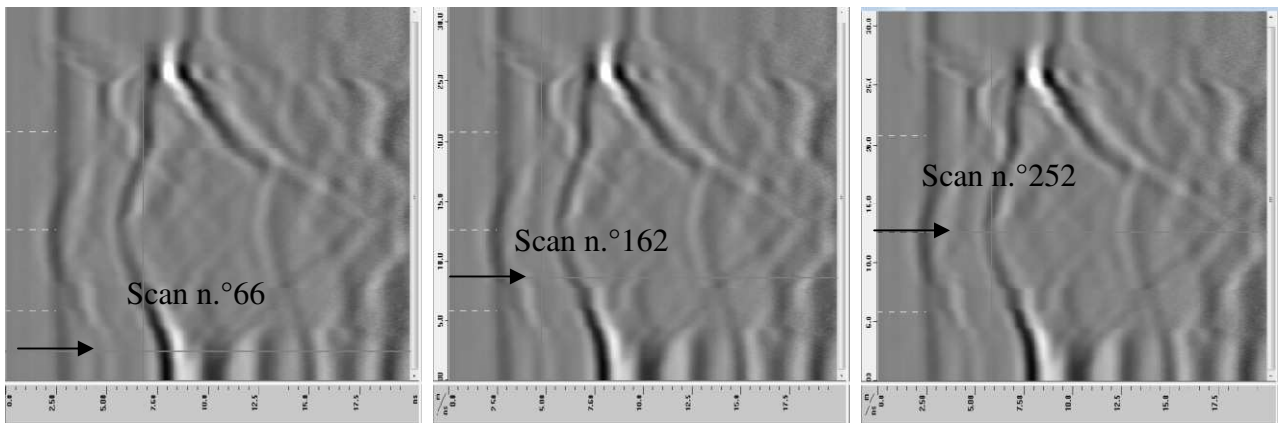
Le ampiezze valutate in corrispondenza della riflessione superficiale subiscono una variazione analoga a quella osservata per le frequenze, cioè diminuisce il loro valore in presenza di umidità mentre ciò non accade per quelle rilevate sul retro del muretto: infatti, in questo caso, nei primi dati registrati (ore 11:00), le ampiezze inferiori si osservano in corrispondenza della sezione posizionata più in basso (scan 308 del file 005 Tabella 10.31) mentre nel rilievo successivo (ore 14:00, file 042) qui è raggiunto il valore maggiore.

I dati acquisiti con antenna 900 MHz, mostrano velocità inferiori rispetto a quelle osservate nelle altre campagne di prova: iniziando dalla parte più bassa (metà del 4° corso) i valori ottenuti sono 0,07 m/ns in zona satura, 0,09 m/ns in zona umida e 0,10 m/ns in zona asciutta (Tabella 10.33 e Figura 10.60).

Le frequenze osservate in corrispondenza della riflessione superficiale si mantengono costanti nelle tre posizioni analizzate mentre le ampiezze aumentano spostandosi dal basso verso l'alto del muretto (Tabella 10.34); per il retro del muretto, invece, le frequenze presentano un minimo in corrispondenza della sezione umida intermedia mentre le ampiezze diminuiscono sensibilmente spostandosi dal basso verso l'alto, fenomeno opposto a quello osservato per la riflessione superficiale. Il comportamento osservato per le ampiezze può indicare che nella parte superficiale del muretto, la concentrazione di sali sia minore in basso mentre questi siano presenti in quantità maggiore a circa metà altezza e nella parte interna del muretto.



*Figura 10.59 Radargramma n.°014 eseguito sul fronte del muretto PNDB il giorno 02/12/2010 a 44,5 cm dal bordo sinistro con antenna 900 MHz. La riflessione del retro sembra non manifestare alcuna zona asciutta del muretto.*



*Figura 10.60 Radargramma n.°014 eseguito il giorno 02/12. Antenna 900 MHz, fronte del muretto PNDB: posizioni utilizzate per il calcolo delle velocità, costanti dielettriche, frequenze e ampiezze (riferimento alla Tabella 10.33: scan 66, 162 e 252 file 026).*

**Giorno 09/07/2010, linee eseguite sul fronte**

*Tabella 10.27 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1f</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
023	1	1.31	6.04	0.25	4.73	0.11	8.05
	15	1.31	5.85	0.25	4.54	0.11	7.42
	172	1.3	5.56	0.25	4.26	0.12	6.53

*Tabella 10.28 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	Freq . (GHz)	T1	T2	deltaT	Freq . (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
023	1	1.31	2.02	0.71	1.41	6.04	7.00	0.96	1.04	10223	-14305	24528	-4907	8399	13306
	15	1.31	2.02	0.71	1.41	5.85	6.73	0.88	1.14	11120	-15932	27052	-1461	2434	3895
	172	1.30	2.01	0.71	1.41	5.56	6.22	0.66	1.52	11478	-16767	28245	-4940	6887	11827

*Tabella 10.29 Livelli di risalita capillare calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).*

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	altezza asciutta (m)	lunghezza file (m)	quota iniziale centro antenna (m)	risalita da radargr. (m)	altezza di risalita (m)	note
19	55	34	1.067	1.18	0.11	0.113	0.223	



20	74	35	1.073	1.19	0.11	0.116	0.226	
21	77	35	1.070	1.19	0.11	0.119	0.229	
22	65	42	0.910	1.05	0.11	0.139	0.249	file diviso
23	51	40	1.057	1.19	0.11	0.133	0.243	
24	45	31	1.077	1.18	0.11	0.103	0.213	
25	22.5	23	1.083	1.16	0.11	0.076	0.186	
26	12	18	1.050	1.11	0.11	0.059	0.169	

**Giorno 21/07/2010, linee eseguite sul fronte (antenna Palm 2 GHz)**

*Tabella 10.30 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 21/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1f</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
005	308	1.31	5.59	0.25	4.28	0.12	6.59
	285	1.29	5.91	0.25	4.62	0.11	7.68
	175	1.29	5.55	0.25	4.26	0.12	6.53
042	308	1.32	6.77	0.25	4.27	0.09	10.69
	285	1.27	5.48	0.25	4.29	0.12	6.38
	175	1.27	5.56	0.25	5.45	0.12	6.63
050	173	1.3	6.79	0.25	5.49	0.09	10.85
	35	1.32	5.62	0.25	4.3	0.12	6.66
	1	1.33	5.54	0.25	4.21	0.12	6.38

Tabella 10.31 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 21/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
005	308	1.31	2.03	0.72	1.39	5.59	6.09	0.50	2.00	9211	-12634	21845	-1843	3947	5790
	285	1.29	2.02	0.73	1.37	5.91	6.61	0.70	1.43	9036	-12625	21661	-2691	4345	7036
	175	1.29	2.01	0.72	1.39	5.55	6.20	0.65	1.54	8978	-12711	21689	-4878	5395	10273
042	308	1.32	2.18	0.86	1.16	6.77	7.83	1.06	0.94	4868	-7107	11975	-3290	15264	18554
	285	1.27	1.99	0.72	1.39	5.48	6.19	0.71	1.41	8601	-12844	21445	-4202	7641	11843
050	175	1.27	2.01	0.74	1.35	5.56	6.19	0.63	1.59	9211	-13950	23161	-4475	5395	9870
	173	1.30	2.22	0.92	1.09	6.79	8.17	1.38	0.72	4737	-6449	11186	-3422	8684	12106
	35	1.32	2.03	0.71	1.41	5.62	6.22	0.60	1.67	9211	-13818	23029	-6054	7632	13686
	1	1.33	2.03	0.70	1.43	5.54	5.91	0.37	2.70	9737	-14740	24477	-3685	4737	8422

Tabella 10.32 Livelli di risalita capillare calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 21/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	scan 1° mark	quota 1° mark (pietra)	quota iniziale centro antenna (m)	altezza di risalita (m)	scan di risalita	note
002	9	342	1.14	1.21	0.045	0.07	0.115	
003	22.5	337	1.12	1.19	0.045	0.07	0.115	
004	44.5	338	1.12	1.2	0.045	0.08	0.125	
005	65	290	0.96	1.03	0.045	0.07	0.111	file diviso
039	9	341	1.13	1.21	0.045	0.08	0.125	
040	22.5	333	1.11	1.19	0.045	0.08	0.125	

041	44.5	337	1.12	1.19	0.045	0.07	0.115	
42	65	291	0.97	1.05	0.045	0.08	0.128	file diviso
047	9	192	0.64	0.75	0.045	0.11	0.158	
048	22.5	199	0.67	0.75	0.045	0.08	0.126	
049	44.5	207	0.69	0.74	0.045	0.05	0.098	
050	65	146	0.48	0.58	0.045	0.10	0.141	file diviso

**Giorno 02/12/2010, linee eseguite sul fronte (antenna a 900 MHz)**

*Tabella 10.33 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1f</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
014	66	0.22	7.33	0.25	7.11	0.07	18.20
	162	0.22	6.08	0.25	5.86	0.09	12.36
	252	0.22	5.43	0.25	5.21	0.10	9.77

*Tabella 10.34 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDB (fronte) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE		RETRO					
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	delta A		
14	66	0.22	3.39	3.17	0.32	7.33	9.10	1.77	0.56	2276	-8762	11038	-26146	28214	54360

162	0.22	3.15	2.93	0.34	6.08	8.31	2.23	0.45	3103	-9314	12417	-10141	5173	15314
252	0.22	3.01	2.79	0.36	5.43	6.85	1.42	0.70	6153	-12891	19044	-4824	3908	8732

Tabella 10.35 Livelli di risalita capillare e sali calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di rislita	scan 1° mark	quota 1° mark (pietra)	quota iniziale centro antenna (m)	altezza di risalita (m)	posizione Sali (scan)		posizione Sali (m)	
							inizio	fine	inizio	fine
13	22.5	294	116	0.365	0.2275	0.575	107	308	0.336	0.969
14	44.5	252	116	0.365	0.2275	0.526	121	266	0.380	0.836

La distribuzione orizzontale di umidità non risulta uniforme in PNDB: infatti, osservando i radargrammi raccolti nella prima giornata di prove (09/07/2010), nonostante l'acquisizione sia avvenuta in condizioni "asciutte", è possibile notare che la riflessione del retro del muretto non si presenta rettilinea. Nel file 064 (Figura 10.61), eseguito in corrispondenza del 1° corso, si nota una maggiore concentrazione di umidità nella parte sinistra, fenomeno che si manifesta in maniera opposta nelle altre sezioni radar (file 063 e 065) eseguite sui corsi 3 e 6 (Figura 10.62) in cui la maggiore concentrazione di umidità è visibile nella parte destra del radargramma.

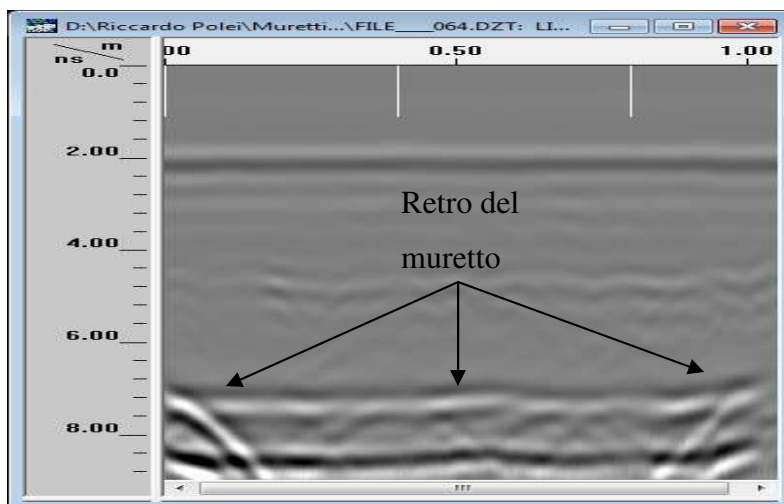


Figura 10.61 Radargramma n.°064 eseguito sul fronte del muretto PNDB il giorno 09/07/2010 (antenna Palm 2 GHz) con direzione sinistra – destra sul 1° corso: la distribuzione di umidità risulta leggermente inferiore nella parte destra (minore profondità della riflessione del retro del muretto).

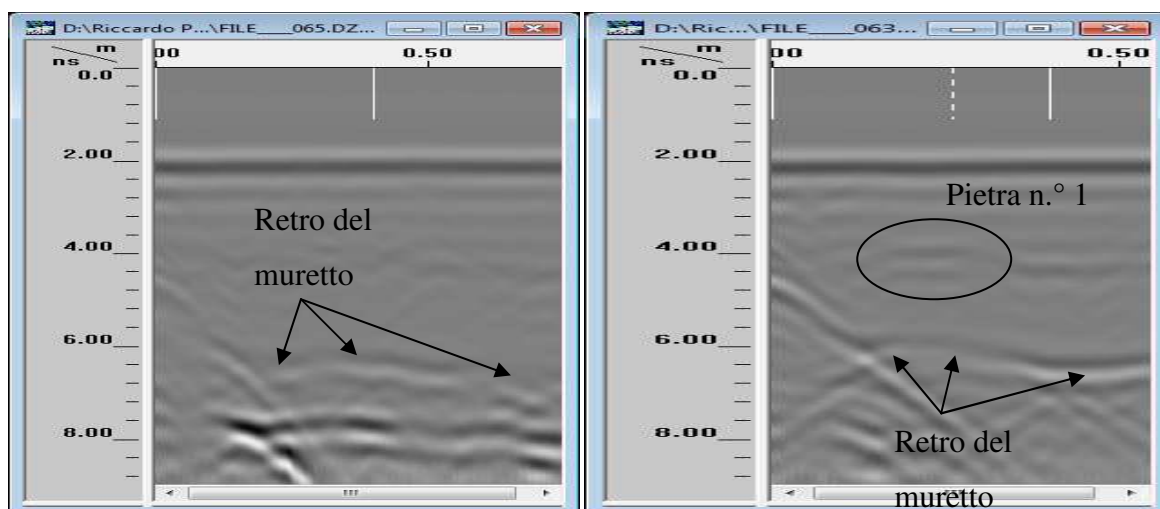
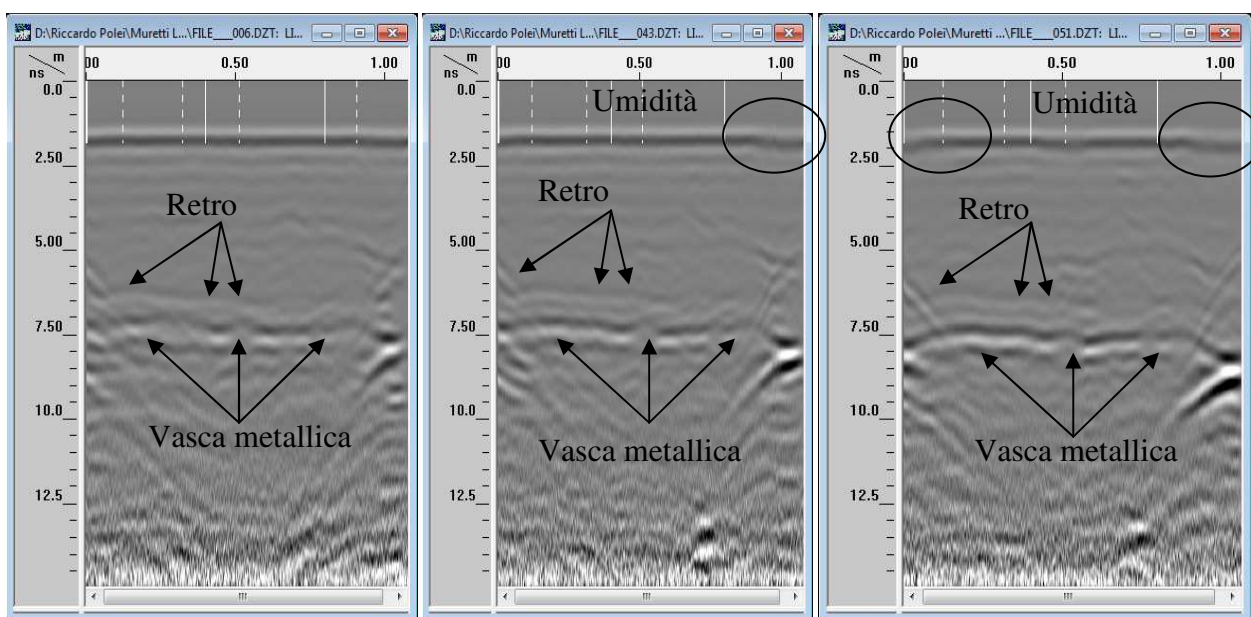


Figura 10.62 Radargrammi n.065 (a sinistra) e 063 (a destra) eseguiti il giorno 09/07/2010 sul fronte del muretto PNDB con antenna Palm (2 GHz) e direzione sinistra – destra. La riflessione del retro sul primo radargramma (3° corso) è poco visibile (presenza di concentrazione salina) e curvilinea evidenziando una diversa distribuzione di umidità. Nel file 063 la visione del retro non è rettilinea a causa della pietra 1 (corso 6).

Confrontando la visione del retro per i file 064 (corso 1), 065 (corso 3) e 063 (corso 6) si nota come questo sia posizionato ad una profondità che diminuisce spostandosi dal basso verso l'alto (da 7,2 ns per il primo file a 6,40 ns per l'ultimo); tale fenomeno indica la presenza di maggiore umidità nella parte bassa del provino.

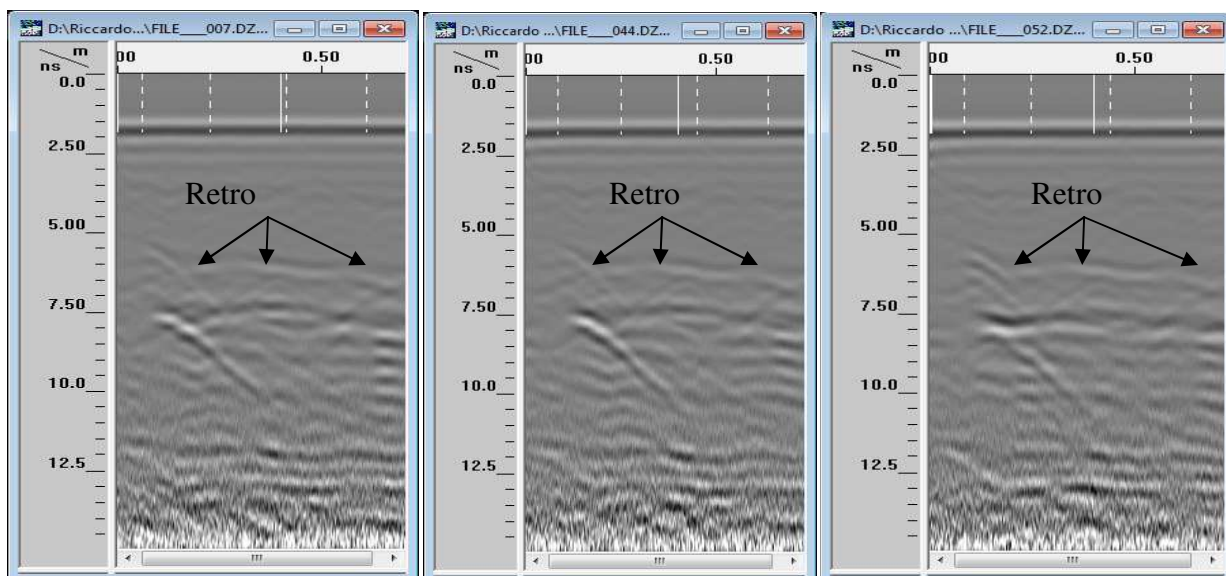
Dai dati acquisiti durante le prove di risalita capillare (16/07/2010) non si notano sostanziali differenze, solamente nei radargrammi eseguiti in corrispondenza del 2° corso (file 005, 043 e 051) è possibile notare alcune variazioni: la riflessione del retro del muretto non è chiaramente visibile, ma osservando quella della vasca metallica si nota come questa diventa sempre più evidente con il passare del tempo e si sposta leggermente a profondità maggiori. La riflessione superficiale mostra un progressivo rallentamento delle onde elettromagnetiche che si propaga dai bordi del provino verso il centro di questo: tale fenomeno è visibile anche osservando la riflessione della vasca metallica che si sposta progressivamente verso profondità maggiori (Figura 10.63).



*Figura 10.63 Radargrammi eseguiti il giorno 16/07/2010 in corrispondenza del 2° corso con antenna Palm (2 GHz) sul fronte del muretto PNDB. Da sinistra: file 005 ore 11:00, file 043 ore 14:00 e file 051 ore 17:00.*

Nelle sezioni radar eseguite in corrispondenza del corso 6 non si evidenziano differenze con i dati acquisiti 7 giorni prima: la distribuzione di umidità all'interno del muretto è ancora maggiore nel centro di questo e non subisce variazioni durante lo svolgimento della prova. Anche la riflessione superficiale non presenta variazioni (Figura 10.64).

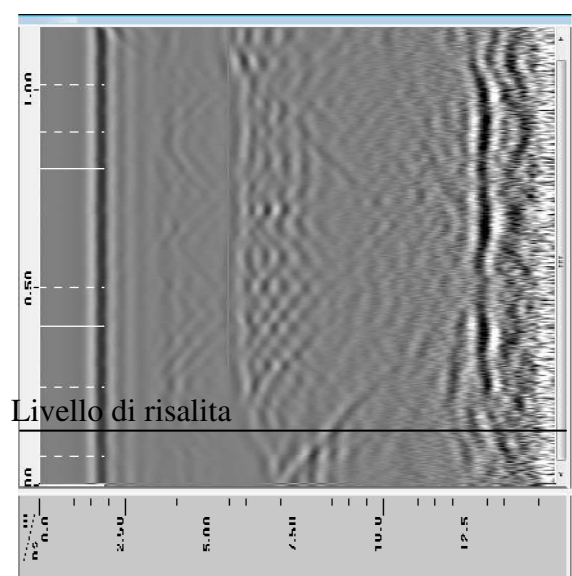




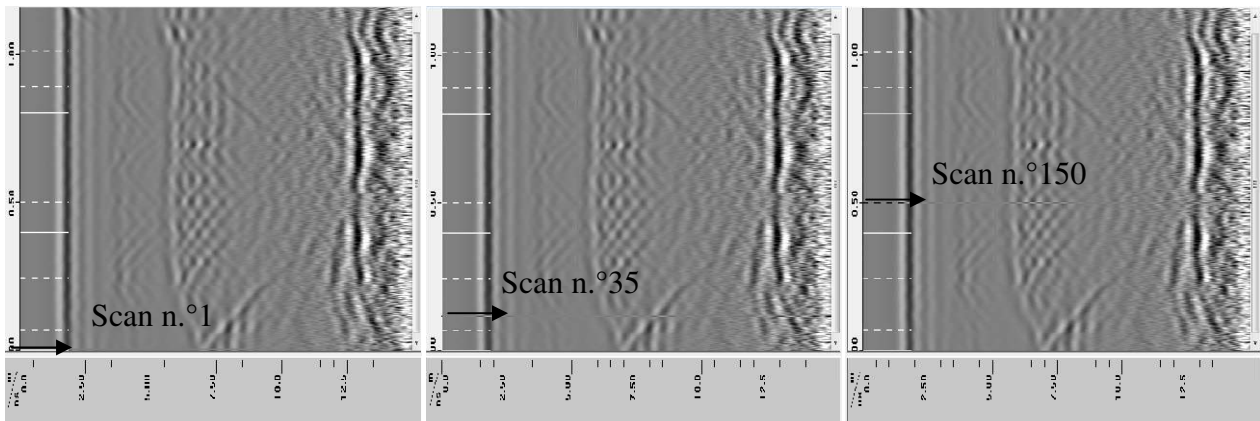
*Figura 10.64 Radargrammi acquisiti sul fronte del muretto PNDB il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz) in corrispondenza del corso 6. Da sinistra: file 007 ore 11:00, file 044 ore 14:00 e file 052 ore 17:00.*

### 10.8.6 PNDC

I dati raccolti per il provino PNDC sono da ritenere di riferimento in quanto su questo muretto pieno a 2 teste non vengono effettuate prove di risalita con salamoia, ma vengono valutati solamente gli effetti provocati dalle precipitazioni atmosferiche. Le campagne di acquisizione effettuate sul provino sono 2, una con antenna Palm 2 GHz (16/07/2010), l'altra con antenna 900 MHz (02/12/2010).



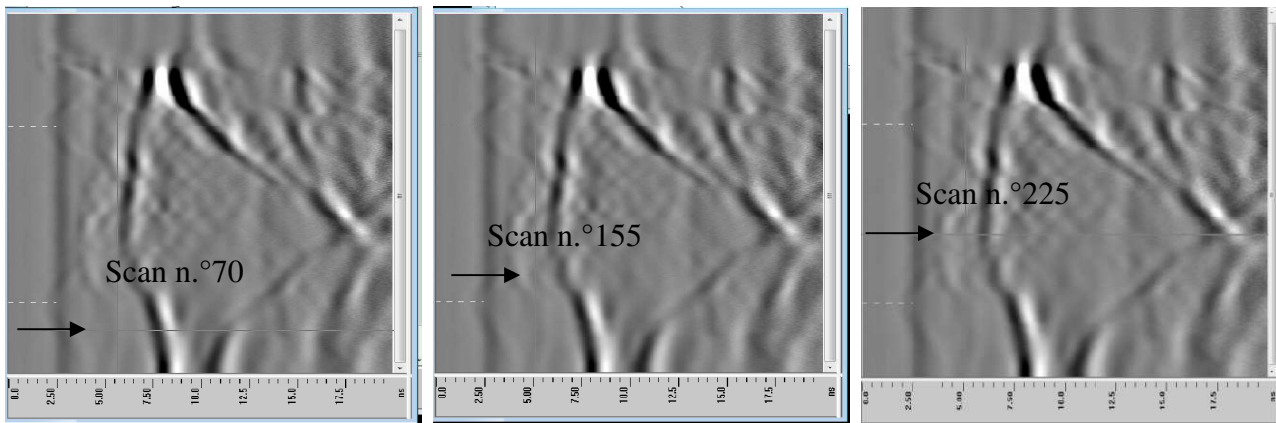
*Figura 10.65 Radargramma n.°014 eseguito in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDC (retro) il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz). Nella parte bassa (inizio radargramma) si osserva la presenza di umidità.*



*Figura 10.66 Radargramma n.°014 eseguito il giorno 16/07. Antenna Palm (2 GHz), retro del muretto: posizioni utilizzate per il calcolo delle velocità, costanti dielettriche, frequenze e ampiezze (riferimento alla Tabella 10.36: scan 1, 35 e 150 file 014).*

Le velocità calcolate il primo giorno (file 014, Figura 10.66) mostrano un progressivo aumento (da 0,10 a 0,12 m/ns) spostandosi dal basso verso l'alto mentre le costanti dielettriche mostrano un andamento opposto (da 8,82 a 6,11) (Tabella 10.36). Le frequenze misurate in corrispondenza della riflessione superficiale risultano circa costanti (1,45 GHz) mentre quelle osservate per la riflessione del retro presentano una variazione spostandosi dal basso (1,03 GHz) verso l'alto (1,89 GHz): tale variazione può indicare la presenza di umidità all'interno degli strati più bassi del muretto. Le ampiezze del segnale calcolate per la riflessione superficiale (retro di PNDC) mostrano un progressivo aumento dal basso verso l'alto, mentre osservando la riflessione del retro del muretto si nota un valore minimo in corrispondenza della posizione umida intermedia (Tabella 10.37).

I risultati ottenuti dai dati del file 016 acquisiti il giorno 02/12 mostrano ancora un andamento simile delle velocità, ma con valori diversi: dai 0,07 m/ns misurati in corrispondenza del 4° corso, a cui corrisponde una costante dielettrica di 17,29, si passa a 0,09 m/ns a circa metà muretto (costante dielettrica paria a 10,30) (Tabella 10.39). Le frequenze rilevate in corrispondenza della riflessione superficiale si mantengono circa costanti (0,33 GHz) mentre quelle del retro del muretto presentano un aumento solamente in corrispondenza della sezione rilevata in posizione asciutta (Figura 10.67). Le ampiezze misurate per la riflessione superficiale sono costanti mentre nel retro del muretto si nota il valore minimo in corrispondenza della prima sezione in posizione umida (Tabella 10.40). Dai dati ricavati nelle due giornate, nonostante i livelli di risalita siano differenti, è stato osservato un comune aumento delle velocità del segnale spostandosi dal basso del muretto verso l'alto, fenomeno provocato dalla presenza di umidità nel provino; le ampiezze presentano un minimo in corrispondenza della zona umida provocato probabilmente dalla presenza di una concentrazione salina più elevata.



*Figura 10.67 Radargramma n.°016 eseguito sul retro del muretto PNDC (mezzeria) il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz. Il provino non presenta alcuna zona asciutta (assenza di tratto verticale nella riflessione del retro del muretto) (riferimento alla Tabella 10.39: scan 70, 155 e 225 file 016).*

**Giorno 16/07/2010, linee eseguite sul retro (antenna Palm 2 GHz)**

*Tabella 10.36 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDC (retro) con i dati acquisiti il giorno 21/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1r</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
014	1	1.28	6.23	0.25	4.95	0.10	8.82
	35	1.28	6.18	0.25	4.9	0.11	7.58
	150	1.28	5.4	0.25	4.12	0.12	6.11

*Tabella 10.37 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDC (retro) con i dati acquisiti il giorno 16/07/2010 con antenna Palm a 2 GHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
14	1	1.28	1.98	0.70	1.43	6.23	7.20	0.97	1.03	10922	-16036	26958	-3719	9062	12781
	35	1.27	1.96	0.69	1.45	5.86	6.60	0.74	1.35	12209	-17592	29801	-2139	2276	4415
	150	1.28	1.97	0.69	1.45	5.40	5.93	0.53	1.89	12548	-19522	32070	-3951	6272	10223

*Tabella 10.38 Livelli di risalita capillare calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 21/07/2010 con antenna Palm (2 GHz).*

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	altezza asciutta (m)	lunghezza file (m)	altezza antenna (m)	risalita radargr. (m)	altezza di risalita (m)
011	17	53	1.004	1.18	0.11	0.175	0.285
012	36.5	55	0.997	1.18	0.11	0.182	0.292

013	47.5	45	1.020	1.17	0.11	0.149	0.259
014	65	30	1.080	1.18	0.11	0.099	0.209

**Giorno 02/12/2010, linee eseguite sul retro (antenna a 900 MHz)**

*Tabella 10.39 Velocità, tempi e costanti dielettriche calcolate in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDC (retro) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.*

NOME DEL FILE	SCAN	T <sub>1r</sub> (ns)	T <sub>1r</sub> (ns)	lunghezza percorso (m)	tempo (ns)	velocità (m/ns)	costante dielettrica
016	70	0.26	7.19	0.25	6.93	0.072	17.29
	155	0.22	6.03	0.25	5.81	0.086	12.15
	225	0.26	5.61	0.25	5.35	0.093	10.30

*Tabella 10.40 Tempi, frequenze e ampiezze in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDC (retro) con i dati acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.*

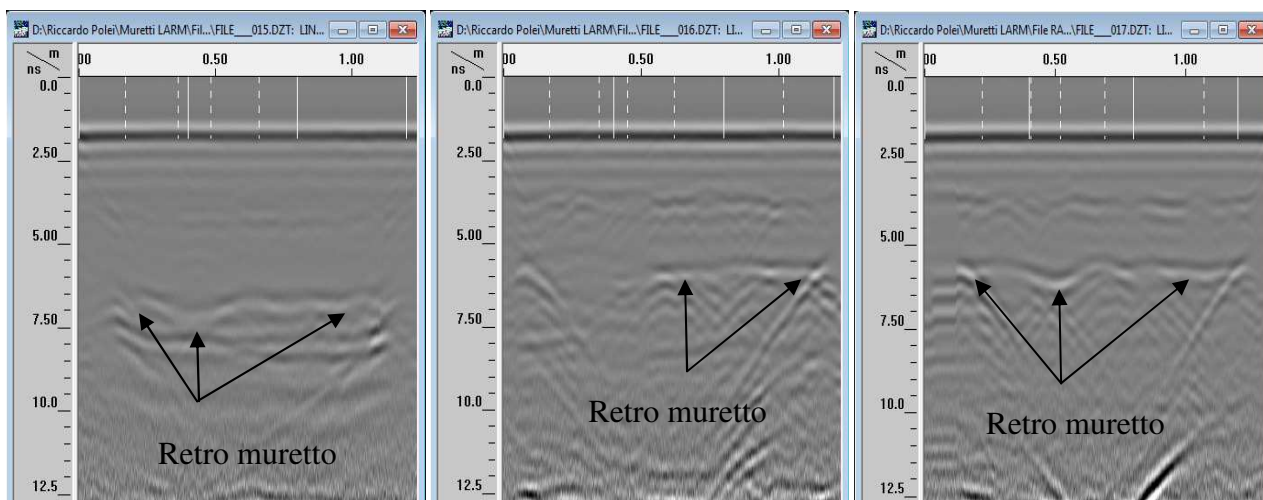
NOME DEL FILE	SCAN	TEMPI (ns)						AMPIEZZE							
		FRONTE			RETRO			FRONTE			RETRO				
		T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	T1	T2	deltaT	freq. (GHz)	A1	A2	delta A	A1	A2	delta A
16	70	0.26	3.31	3.05	0.33	7.19	9.54	2.35	0.43	3002	-9702	12704	-21411	23273	44684
	155	0.22	3.26	3.04	0.33	6.03	8.46	2.43	0.41	3002	-10314	13316	-11358	7963	19321
	225	0.26	3.93	3.67	0.27	5.61	7.10	1.49	0.67	3480	-9243	12723	-14204	12122	26326

Tabella 10.41 Livelli di risalita capillare e sali calcolati tramite radargrammi acquisiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz.

NOME DEL FILE	Posizioni sul muretto (cm)	scan di risalita	scan 1° mark	quota 1° mark (pietra)	quota iniziale centro antenna (m)	altezza di risalita (m)	posizione Sali (scan)		posizione Sali (m)	
							inizio	fine	inizio	fine
15	36.5	274	116	0.365	0.227	0.552	*	*	*	*
16	65	272	116	0.365	0.227	0.549	121	171	0.370	0.430
17	92.5	253	88	0.365	0.227	0.622	102	257	0.386	0.629

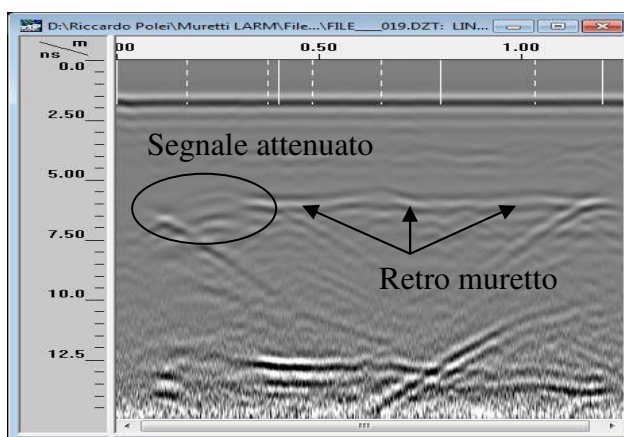


Analizzando le sezioni radar orizzontali eseguite il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz) è possibile osservare una distribuzione non uniforme dell'umidità: la linea radar sul 3° corso (file 015) evidenzia una concentrazione di umidità in corrispondenza del secondo mark (a 36,5 cm dal bordo sinistro osservando il retro del muretto). Questo fenomeno non è visibile nella sezione n.°016 (il retro non è visibile), ma si ripresenta nel radargramma n.°017 (Figura 10.68).



*Figura 10.68 Da sinistra: radargrammi n. 015 (corso 3), 016 (corso 6) e 017 (corso 10) acquisiti il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDC con antenna Palm (2 GHz). Nel primo file (015) si può osservare la presenza di umidità all'interno del provino (riflessione del retro posizionata ad una profondità maggiore rispetto a quella osservata negli altri 2 file).*

Nella parte più alta, il muretto presenta una distribuzione uniforme: infatti, osservando il file n.°019 (corso 18), la riflessione del retro del muretto risulta essere rettilinea non mostrando variazioni di profondità. Solamente nella prima parte del file (fino al secondo mark) non risulta visibile il retro (forte attenuazione del segnale).



*Figura 10.69 Radargramma n.°019 acquisito il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDC con antenna Palm (2 GHz) sul corso n.°18.*

## 10.9 Interpretazione dei risultati

Dai radargrammi acquisiti lungo le linee verticali è stato possibile calcolare in diverse posizioni le velocità di propagazione del segnale, le costanti dielettriche dei muretti e le altezze di risalita capillare mentre dai file orizzontali è stato possibile osservare la distribuzione dell'umidità all'interno dei provini; dai file acquisiti il 02/12/2010 con antenna a 900 MHz, inoltre, sono state ricavate informazioni riguardanti la presenza di concentrazioni saline, visibili nei radargrammi come zone di forte attenuazione del segnale elettromagnetico.

### 10.9.1 PNDA

Le velocità calcolate nelle diverse giornate di prova mostrano un comune aumento del loro valore spostandosi dalla base del muretto verso l'alto. Tale fenomeno, maggiormente evidente nei dati acquisiti con antenna 900 MHz il giorno 02/12/2010 è causato dalla presenza di umidità all'interno dei provini. Infatti, il fenomeno della risalita capillare, si sviluppa dal piede dei muretti in presenza di acqua (o soluzione salina) ed è tanto più elevato quanto maggiore è il livello d'acqua che bagna la base. Questo fenomeno è influenzato anche dalle condizioni ambientali in cui viene a trovarsi il provino stesso: una maggiore ventilazione delle superfici e della temperatura esterna consentono l'evaporazione di una maggiore quantità di umidità che permette di mantenere livelli di risalita più bassi.

Dai dati ricavati nelle tre giornate di prova, confrontando in particolare i dati di luglio con quelli di dicembre, è possibile notare come le velocità osservate nei mesi estivi siano superiori rispetto quelle invernali, mentre i livelli di risalita capillare siano nettamente superiori in dicembre rispetto quelli di luglio; infatti, le prove di risalita, sono iniziate il 28/10/2010.

Le altezze di risalita osservate per questo muretto, però, mostrano dei valori che sono superiori il giorno 09/07 rispetto quelli del 16/07, nonostante le due prove siano state eseguite in condizioni asciutte: i dati di pioggia di luglio (Figura 10.44) mostrano una precipitazione superiore ai 6 mm il 06/07/2010, fenomeno che ha provocato una maggiore concentrazione di umidità ed una minore temperatura atmosferica nei giorni immediatamente successivi. Ad ogni modo, è possibile notare un comune andamento delle altezze di risalita osservate nel periodo estivo: nella sezione in mezzeria al muretto (B-B') tale livello risulta il più elevato mentre spostandosi verso il bordo sinistro (osservando il retro) si nota una graduale diminuzione. Nei risultati ottenuti per il mese di dicembre, invece, sono opposti rispetto ai precedenti mostrando livelli superiori nel bordo sinistro del muretto (Figura 10.70).

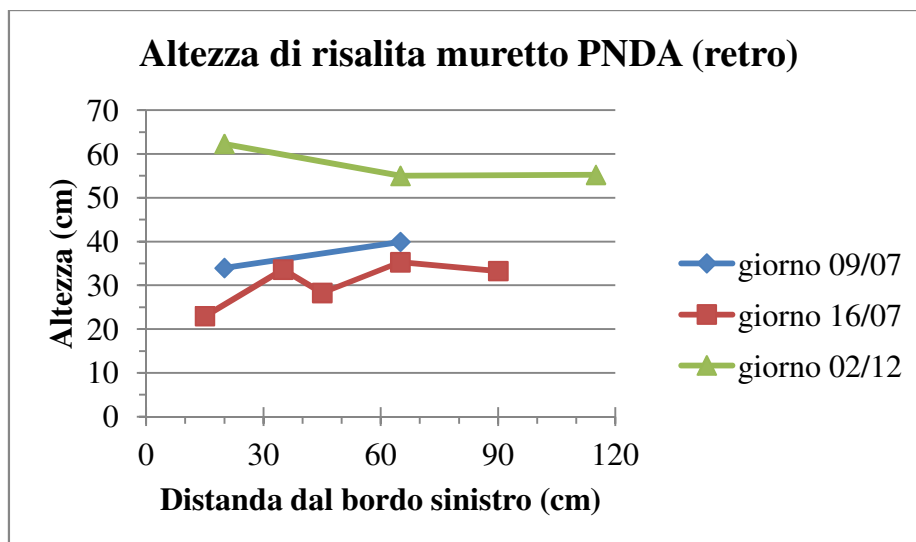


Figura 10.70 Altezze di risalita ricavate dai dati radar analizzati per il muretto PNDA (retro). Per il giorno 02/12/2010: sezione C-C' a sinistra, sezione B-B' al centro e sezione A-A' a destra.

La distribuzione di umidità all'interno del provino non si presenta uniforme: infatti, nella parte più bassa, questa è maggiormente presente nella parte centrale del muretto mentre, salendo verso l'alto, prima si distribuisce uniformemente su tutta la larghezza del provino, poi, in corrispondenza del corso 16 si nota una maggiore concentrazione sulla parte sinistra (osservando il retro).

Dai file acquisiti il 02/12/2010 è possibile notare che la sezione A-A' (file 010) risulta uniformemente umida: infatti, la riflessione del retro del muretto è posizionato ad una profondità costante (circa) che non risulta però coincidente con quella minima osservata nelle altre due sezioni (B-B', file 011 e C-C' file 012)

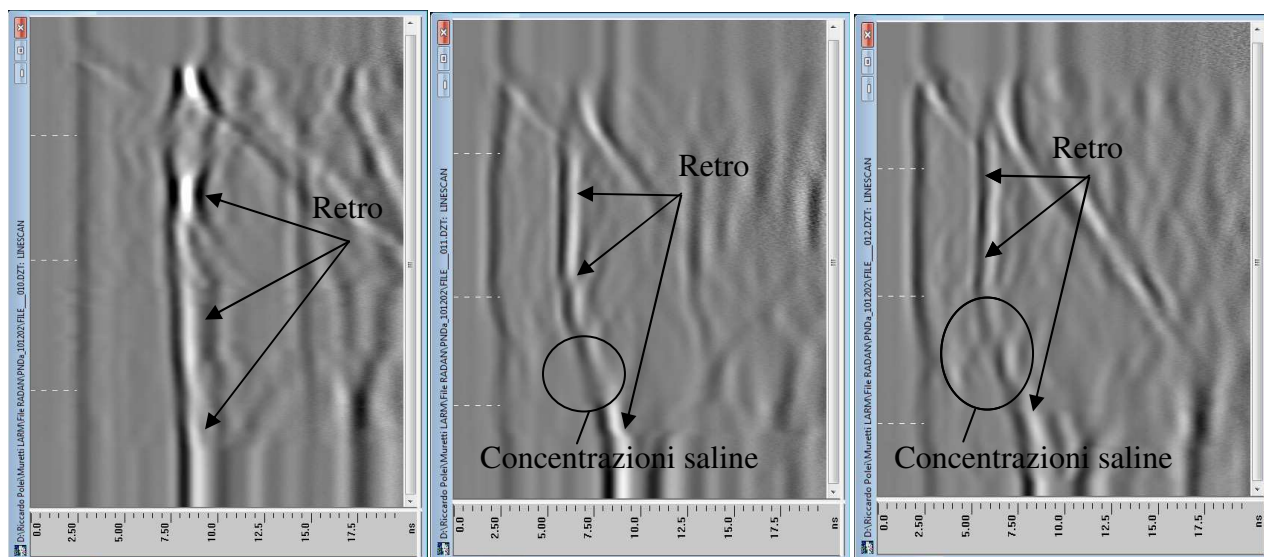


Figura 10.71 Da sinistra: radargramma n.010 (sezione A-A'), 011 (sezione B-B') e 012 (sezione C-C') eseguiti il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz sul fronte del muretto PNDA. Si notano le

riflessioni del retro e la presenza di concentrazioni saline (attenuazione della visione del retro del muretto).

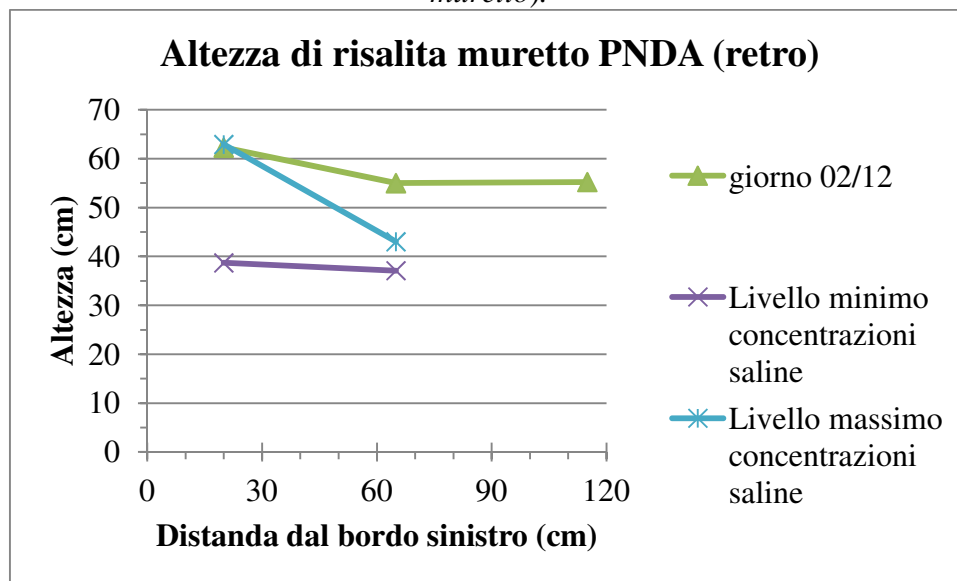


Figura 10.72 Altezza di risalita capillare e presenza di concentrazioni saline individuate nelle sezioni radar eseguite il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz sul fronte del muretto PNDA. Nel grafico i dati vengono riportati come letture sul retro del muretto, in accordo con quelli precedenti (da sinistra: sezione C-C', B-B' ed A-A')

### 10.9.2 PNDB

Le velocità osservate per questo muretto mostrano ancora un aumento dei valori calcolati spostandosi dalla base del provino verso l'alto ed in questo caso, è stato possibile osservare con maggiore attenzione tale fenomeno in quanto durante le acquisizioni del giorno 21/07/2010 sono state eseguite anche le prove di risalita capillare. I valori ottenuti dai dati acquisiti alle ore 11:00 (0,12 m/ns), mostrano un brusco calo nelle letture successive (0,09 m/ns) che si presentano circa uguali indicando uno stesso grado di umidità.

Le altezze di risalita capillare mostrano ancora un valore maggiore nei dati del 09/07/2010 rispetto quelli del 21/07/2010: quanto spiegato in precedenza (paragrafo 10.9.1), risulta ancora più valido in questo caso avendo lasciato trascorrere un numero maggiore di giorni in cui il provino è rimasto esposto a condizioni climatiche favorevoli (temperature elevate ed umidità bassa) che hanno permesso una maggiore traspirazione del provino.

Le altezze osservate il giorno 21/07/2010 mostrano un andamento particolare: dai primi due rilievi (ore 11:00 e 14:00) si nota un livello di risalita simile, mentre nel terzo caso (ore 17:00) il profilo delle altezze è nettamente differente presentando un massimo a sinistra ed un minimo (inferiore ai livelli osservati nelle ore precedenti) in corrispondenza della sezione posizionata a 44,5 cm dal bordo sinistro. Questo andamento risulta essere in controtendenza rispetto quello osservato il giorno

09/07 in cui si nota un graduale aumento dei livelli spostandosi dal margine sinistro verso il centro, mentre risulta in accordo con quanto osservato per il giorno 02/07/2010, in cui il valore più elevato viene evidenziato nella posizione più esterna (Figura 10.73).

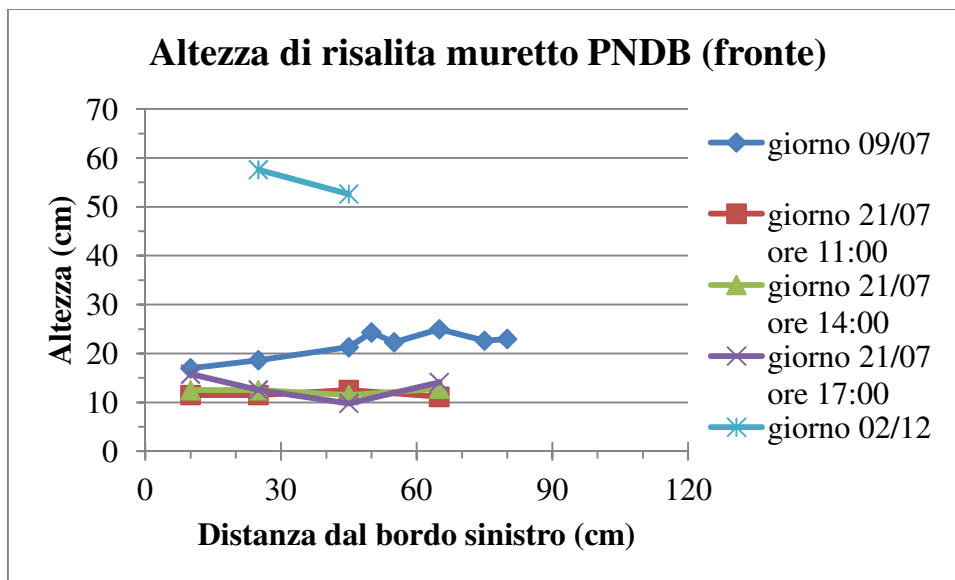


Figura 10.73 Altezze di risalita capillare calcolati sul fronte del muretto PNDB. A 25 cm dal bordo sinistro sezione A-A', a 62,5 cm la mezzeria del muretto.

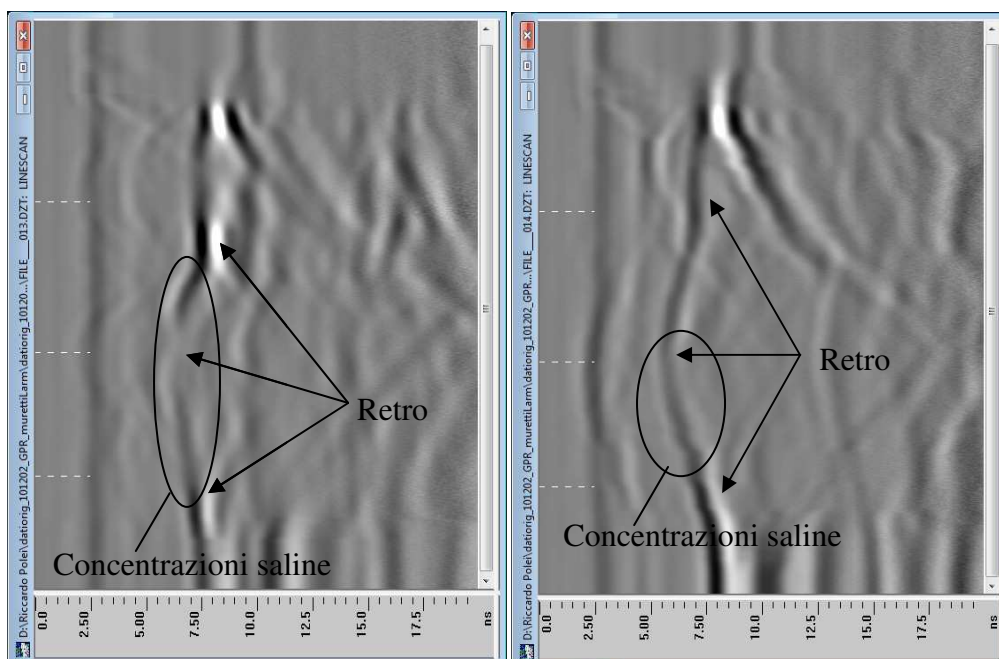


Figura 10.74 Da sinistra: radargrammi n.013 (sezione A-A') e 014 (sezione a 32,5 cm dal bordo sinistro) eseguiti sul fronte del muretto PNDB il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz. Si possono osservare le riflessioni del retro del muretto e la presenza di concentrazioni saline (visione del retro attenuata).

Come già osservato, la distribuzione dell'umidità all'interno del provino non risulta uniforme, ma presenta una maggiore concentrazione in corrispondenza della mezzeria del provino visibile in tutte le linee radar orizzontali eseguite nelle due giornate estive.

Dai file acquisiti in inverno, è stato possibile osservare che il muretto non presenta zone asciutte: infatti, la riflessione del retro del muretto non evidenzia tratti verticali se non in aree sature (Figura 10.74).

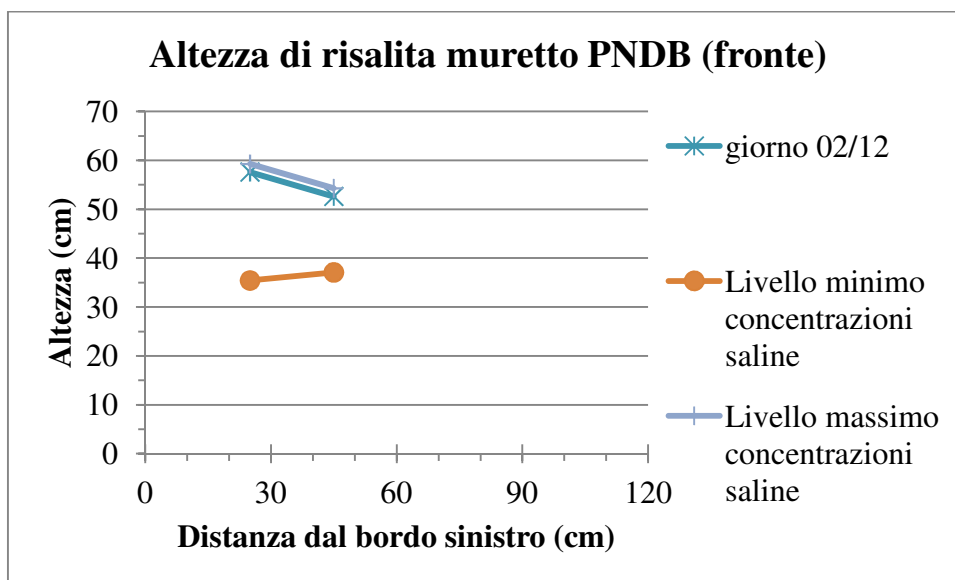


Figura 10.75 Altezza di risalita capillare e presenza di concentrazioni saline individuate nelle sezioni radar eseguite il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz sul fronte del muretto PNDB.

### 10.9.3 PNDC

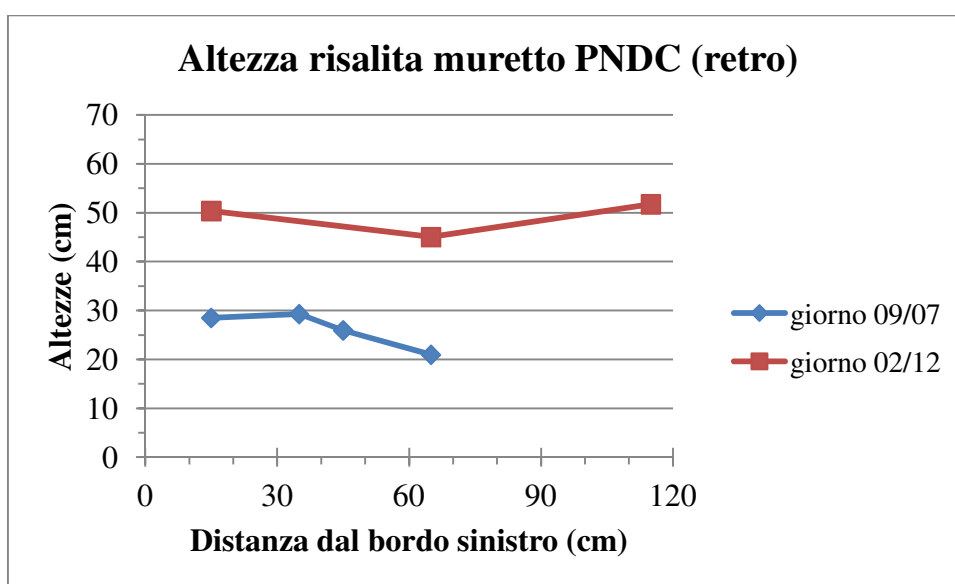


Figura 10.76 Valori delle altezze di risalita capillare ricavati sul retro del muretto PNDC: per il giorno 02/12 sezioni C-C', B-B' e A-A' da sinistra a destra.



I dati a disposizione per questo provino riguardano solamente due giornate; per questo muretto non sono state previste prove di risalita capillare dovendo fungere da elemento di confronto per gli altri e non sono disponibili quindi diversi dati acquisiti nella stessa giornata.

I livelli di risalita ricavati per le due giornate (estiva ed invernale) mostrano uno stesso andamento: infatti, nella parte sinistra del muretto (osservando il retro), si hanno dei valori più elevati rispetto quelli visibili al centro (Figura 10.76).

La distribuzione dell'umidità all'interno del provino risulta piuttosto uniforme evidenziando solamente una zona in cui si nota una maggiore concentrazione: dal 3° al 10° corso e tra i 36,5 e 47,5 cm dal bordo sinistro del muretto, è presente un'area in cui la visione del retro del muretto dai radargrammi risulta non rettilinea o posizionata a profondità più elevate.

Dai file eseguiti il giorno 02/07/2010 è stato possibile notare la presenza di concentrazioni saline evidenziate da una forte attenuazione della riflessione del retro del muretto: per le prime due sezioni analizzate (A-A' e B-B'), le posizioni dei sali sono simili mentre nella terza (C-C') risultano posizionate più in basso (Figura 10.78). Il provino si presenta quasi completamente umido in quanto nelle due sezioni B-B' e C-C' la riflessione del retro non presenta alcun tratto rettilineo mentre solamente la prima sezione analizzata (A-A') è possibile rilevare un tratto verticale (Figura 10.77).

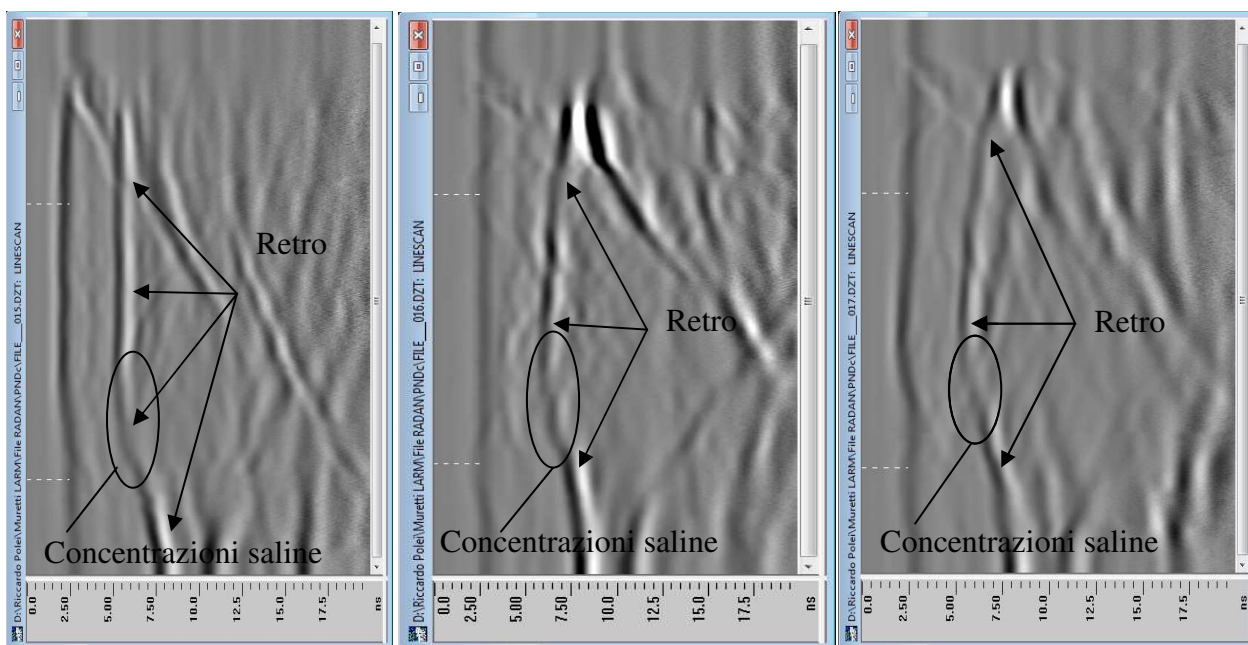
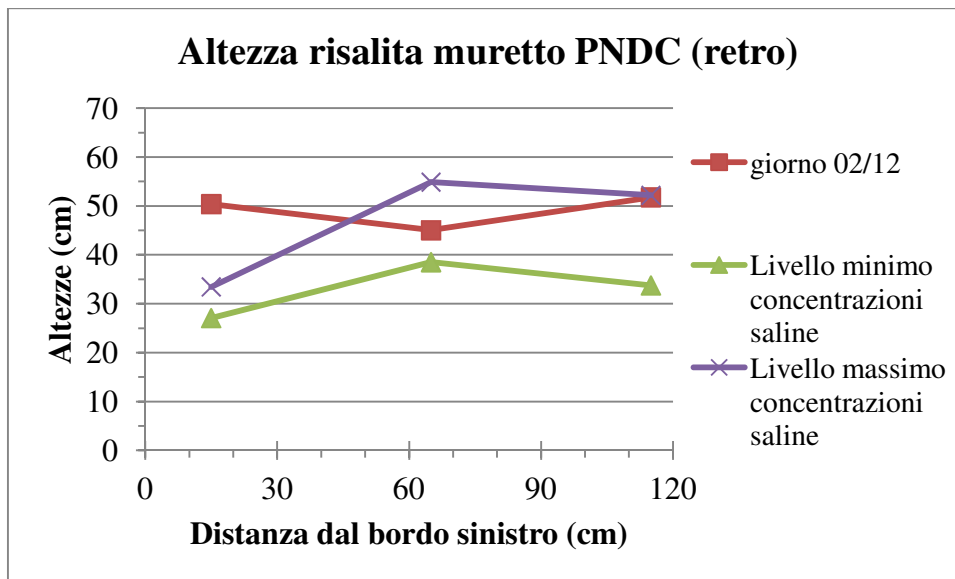


Figura 10.77 Da sinistra: radargrammi 015 (sezione A-A'), 016 (sezione B-B') e 017 (sezione C-C') eseguiti sul fronte del muretto PNDC il giorno 02/07/2010 con antenna a 900 MHz. Si nota la riflessione del retro e la presenza di concentrazioni saline (riflessione del retro attenuata).



*Figura 10.78 Altezza di risalita capillare e presenza di concentrazioni saline individuate nelle sezioni radar eseguite il giorno 02/12/2010 con antenna a 900 MHz sul fronte del muretto PNDC. Nel grafico i dati vengono riportati come letture sul retro del muretto, in accordo con quelli precedenti (da sinistra: sezione C-C', B-B' ed A-A')*

## 10.10 Osservazioni e suggerimenti

L'analisi eseguita tramite la tecnica radar GPR sui muretti del laboratorio ha permesso di evidenziare diversi aspetti legati alla risalita capillare e alla presenza di umidità all'interno di elementi in muratura.

Innanzitutto, le velocità del segnale tendono a diminuire in presenza di acqua: tanto maggiore è il contenuto, tanto minore è la velocità di propagazione. Questo fenomeno, osservato nei dati acquisiti in un'unica giornata, diventa ancora più evidente confrontando i dati estivi con quelli invernali in cui un elevato contenuto di umidità, presente fino ai corsi centrali del muretto, provoca una forte diminuzione della velocità di propagazione del segnale.

I file acquisiti in dicembre con antenna a 900 MHz hanno consentito di rilevare, oltre le altezze di risalita capillare, anche la presenza di concentrazioni saline: queste si presentano come forti attenuazioni della riflessione del retro del muretto in quanto la presenza di sali aumenta la conduttività del materiale (quindi influenzando le ampiezze) senza alterare le velocità, non provocando variazioni del valore della parte reale della costante dielettrica. Non avendo eseguito linee radar orizzontali in questa giornata di prove non è stato possibile osservare in dettaglio tale fenomeno, ma sono state individuate in ogni caso queste caratteristiche del segnale. Osservare la presenza di sali utilizzando l'antenna Palm a 2 GHz è possibile solamente in presenza di linee radar orizzontali: infatti, lungo linee verticali, l'elevata risoluzione del segnale, provoca una

sovrapposizione di riflessioni che non permettono di evidenziare chiaramente tale problema mentre lungo linee orizzontali, i disturbi presenti sono minori (minor numero di giunti di malta) e consentono quindi una visione del retro più netta e continua.

Le altezze di risalita capillare, invece, sono facilmente individuabili con entrambe le antenne utilizzate nelle prove: la presenza di acqua provoca rallentamenti del segnale visibili all'interno dei radargrammi come spostamenti della riflessione del retro del muretto, il quale viene visualizzato a diverse profondità che risultano funzione del contenuto d'acqua: maggiore è la sua presenza, maggiore sarà la profondità osservata. Questo fenomeno non è condizionato dalla frequenza delle antenne utilizzate e risulta quindi evidente indipendentemente dal tipo di antenna utilizzata.

Altro scopo delle indagini è stata la descrizione della distribuzione dell'umidità all'interno dei provini murari: anche questo fenomeno risulta facilmente individuabile con i risultati ottenuti per le due antenne (900 MHz e Palm da 2 GHz) in quanto influenzato dalla presenza di acqua all'interno del provino. La valutazione della distribuzione di umidità può essere facilmente descritta utilizzando delle linee radar eseguite secondo le due direzioni principali del provino (orizzontali e verticali): in questo modo, infatti, è possibile valutare sia in altezza che in larghezza tale distribuzione permettendo di ottenere un quadro generale della situazione. Ancora una volta, una maggiore concentrazione di umidità provoca uno spostamento verso profondità maggiori delle riflessioni individuate all'interno dei radargrammi.

La strumentazione radar GPR si è dimostrata uno strumento potente per la valutazione delle problematiche legate alla risalita capillare ed alla presenza di umidità all'interno di elementi murari consentendo di ottenere buoni risultati e in breve tempo: infatti, la presenza di umidità ed i livelli di risalita possono essere valutati già in situ tramite l'utilizzo di antenne dotate di odometro che consentono di posizionare correttamente le riflessioni individuate nello schermo dell'unità GSSI SIR-3000. L'elaborazione dei dati tramite software, invece, permette di ottenere risultati in dettaglio, come effettuato per il muretto PNDA, per il quale è stato possibile realizzare un profilo delle velocità, delle costanti dielettriche e del contenuto di umidità (espressa come percentuale sul volume) lungo una linea verticale.

Come strumento di diagnostica per le problematiche esposte, i risultati ottenuti con questa tecnica sono da ritenersi qualitativi, in quanto non è stato possibile calibrare i risultati ottenuti in queste prove con altri risultati di altre tecniche.

## Capitolo 11

# SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO: INDAGINE GPR DI DIFETTI E PIETRE IN PROVINI MURARI

---

### 11.1 Scopi delle prove

Le prove eseguite tramite tecnologia radar GPR presentate in questo capitolo hanno lo scopo di valutare il corretto posizionamento di inclusioni lapidee e vuoti interni fornito dalle immagini radar rispetto alla situazione reale. I radargrammi acquisiti in una campagna d'indagine, presentano delle riflessioni posizionate in corrispondenza di difetti nascosti o superfici di separazione tra materiali dalle diverse proprietà dielettriche: tali segnali non corrispondono nella forma a quella dell'oggetto reale, ma si presentano come iperboli (più o meno ampie) o come superfici rettilinee. Lo scopo di questo studio è di valutare la corrispondenza tra riflessione individuata all'interno del radargramma ed effettiva geometria dell'oggetto che ha provocato tale segnale. A tale scopo sono stati utilizzati dei muretti costruiti in laboratorio in cui sono stati inseriti difetti artificiali o inclusioni di pietre di materiale diverso dal laterizio utilizzato per la costruzione di tali provini: conoscendo in questo modo l'esatta posizione (profondità) di tali elementi e le loro dimensioni, è stato possibile procedere con il confronto tra i risultati ottenuti dall'indagine radar e la reale geometria dei difetti.

Questo aspetto, che sembrerebbe banale, risulta di particolare interesse: infatti, nelle indagini radar, il fascio di onde elettromagnetiche emanato dalle antenne, si sviluppa secondo superfici tronco coniche che attraversano il mezzo investigato: in questo modo, la riflessioni individuate nei radargrammi, non saranno posizionate esattamente in corrispondenza dell'oggetto che le ha provocate, ma si svilupperanno su superfici di dimensioni maggiori.

Con questa analisi si cerca di dare un valore anche quantitativo ai risultati ottenuti dalle indagini eseguite tramite tecnologia radar GPR.

La campagna di acquisizione dei dati è stata svolta presso il laboratorio LISG del Dipartimento DICAM in via Terracini in tre differenti giornate di luglio (09, 16 e 21/07/2010).

### 11.2 Strumentazione utilizzata

Nelle prove di seguito descritte è stata utilizzata la stessa strumentazione presentata nel capitolo precedente. In particolare, in questo caso di studio, non si è fatto uso dell'antenna a frequenza

centrale 900 MHz in quanto la necessità di ottenere informazioni precise sul posizionamento e la dimensione delle riflessioni individuate, ha richiesto l'utilizzo di frequenze elevate e conseguentemente di risoluzioni maggiori, fornite dall'antenna Palm 2 GHz; ulteriormente, la prima antenna è sprovvista di odometro, necessario nelle analisi radar in cui è richiesta la massima precisione dei risultati. Le prove sono state eseguite su muretti a due e tre teste costruiti in laboratorio le cui dimensioni e caratteristiche sono già state trattate nel capitolo precedente.

### 11.3 Preparazione della prova

La preparazione delle prove da eseguire per una indagine radar consiste nella scelta della strumentazione adatta agli scopi, lo studio degli elementi da sottoporre ad analisi e la scelta del numero e della posizione delle linee radar da eseguire: questi aspetti sono stati trattati nel precedente capitolo in quanto sia i muretti da testare che i dati acquisiti sono gli stessi, mentre si differenziano solamente gli scopi e le procedure di elaborazione dei dati che verranno di seguito descritte in dettaglio.

### 11.4 Elaborazione e visualizzazione dei dati

L'elaborazione dei dati prevista in questo studio è stata suddivisa in due fasi in cui, nella prima sono state eseguite le modifiche ai singoli radargrammi necessarie a migliorare la visione delle riflessioni presenti e diminuire gli eventuali disturbi, mentre nella seconda si è proceduto con la valutazione dell'estensione e posizione (dimensioni e profondità) dei difetti e pietre presenti nei muretti analizzati.

#### 11.4.1 Modifica dei radargrammi

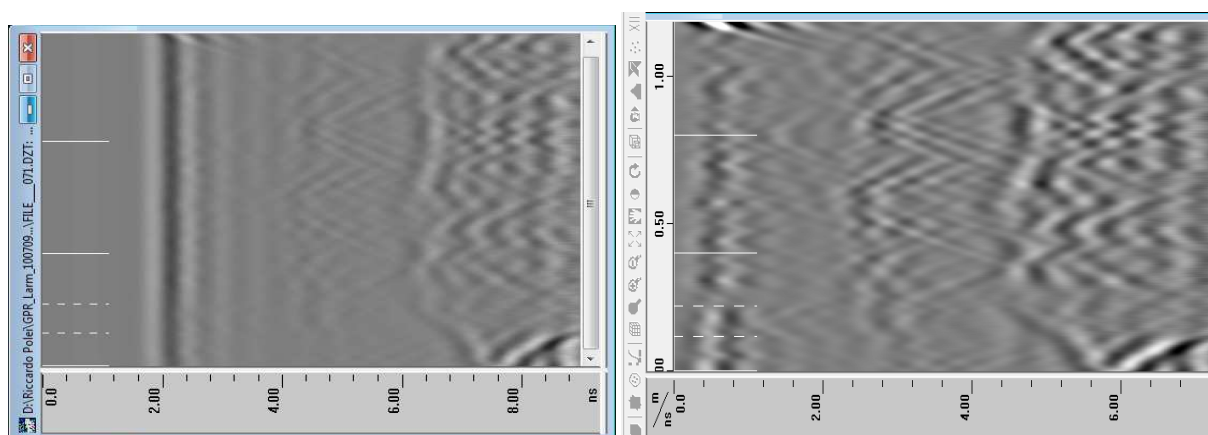
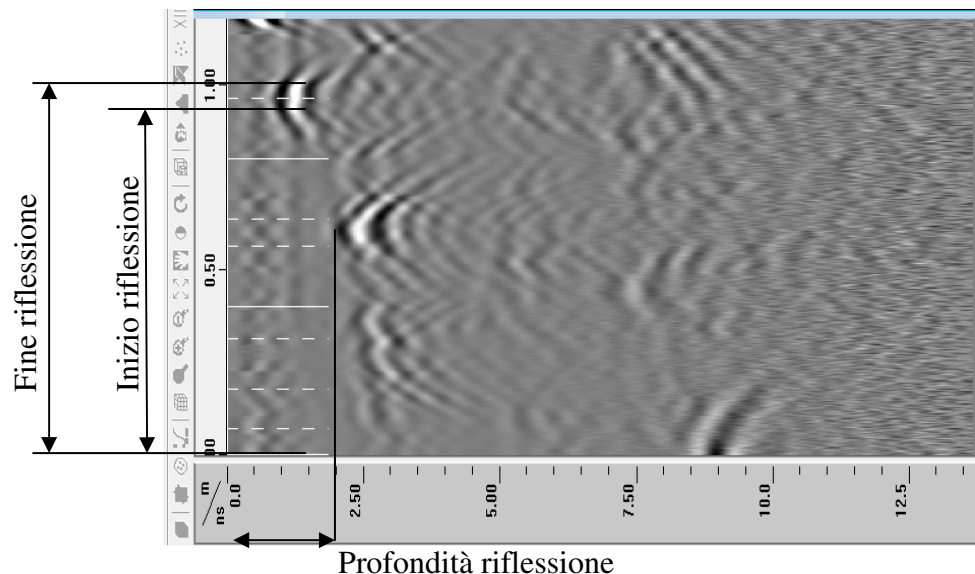


Figura 11.1 File 071 acquisito sul retro del muretto PNDA il giorno 09/07/2010 con antenna Palm (2 GHz). Esempio di modifiche eseguite su un radargramma: file originale (a sinistra) e modificato (a destra).

L'elaborazione dei dati radar acquisiti nelle diverse giornate di prova, è stata necessaria per poter individuare con maggiore precisione le riflessioni provocate dai difetti artificiali e delle pietre inserite nei muretti e per eliminare i disturbi visibili nei radargrammi (Figura 11.1). Gli strumenti utilizzati per tale procedura (Surface Position Adjustment, Background removal e Gain) sono stati descritti nei precedenti capitoli (6, Sala Rossa: indagine della conformazione dei solai tramite GPR radar) e in questa sede verranno solamente riportati i valori ad essi assegnati.

#### 11.4.2 Valutazione della posizione e delle dimensioni dei difetti artificiali e delle inclusioni di pietre

Terminata l'elaborazione dei dati, è stato possibile ricercare all'interno dei radargrammi le riflessioni corrispondenti ai difetti artificiali o alle inclusioni di pietre e valutare la loro posizione e dimensione: il software utilizzato nelle analisi permette di rilevare la posizione di un punto del radargramma spostando semplicemente il cursore in corrispondenza di questo. Avendo acquisito i dati con antenna provvista di odometro, il software ha fornito correttamente il valore della distanza del punto selezionato rispetto all'inizio del radargramma, mentre la profondità della riflessione è stata espressa in nanosecondi (ns) non avendo inserito alcun valore della costante dielettrica.



*Figura 11.2 File 003 acquisito il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDD con antenna Palm (2 GHz). Esempio di valutazione dalla posizione dei difetti artificiali inseriti all'interno del muretto.*

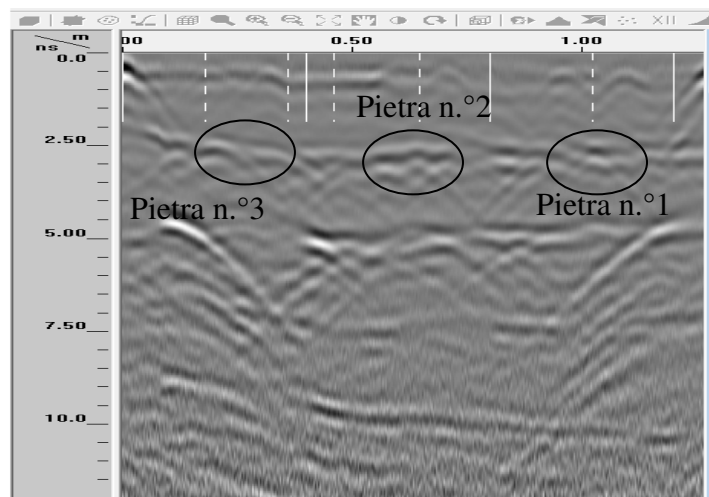
Innanzitutto, in questa analisi, sono state selezionate le sezioni radar utili allo scopo: infatti, non tutte le linee acquisite intersecano gli elementi d'interesse e non sono state quindi utilizzate nello studio. Su uno stesso muretto, inoltre, i dati sono stati acquisiti in più giornate ed in alcuni casi più volte all'interno dello stesso giorno: i radargrammi utilizzati sono stati scelti in modo tale che le



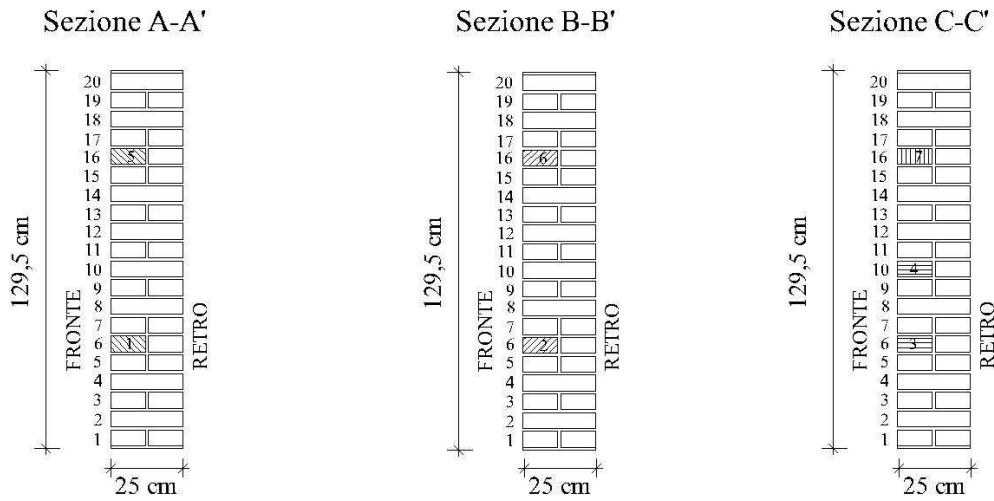
condizioni al contorno (temperatura e umidità) fossero le più simili tra loro, cercando di ridurre al minimo le variabili. A questo proposito, per l'analisi eseguita sui muretti con difetti artificiali (PNDD, PNDE e PNDF), sono stati selezionati i dati acquisiti il giorno 16/07/2010 mentre per quella effettuata sui muretti con inclusioni di pietre (PNDA, PNDB e PNDC) è stato necessario utilizzare i dati di diversi giorni: in questo caso, infatti, le linee radar eseguite in una giornata non sono state sufficienti per coprire tutte le pietre presenti ed è stato necessario dover utilizzare anche file provenienti da altre acquisizioni. Individuati i file utili per lo studio, sono state compilate delle tabelle in cui inserire i valori di inizio e fine riflessione e delle profondità individuate per ogni difetto (Figura 11.2): valutato lo sviluppo longitudinale di queste anomalie e trasformato il tempo in distanza tramite l'uso delle velocità calcolate, sono stati confrontati questi valori con quelli reali.

### 11.4.3 PNDA

Su questo muretto, l'acquisizione dei dati radar è stata svolta in due giornate (09 e 16/07/2010); i file collezionati nelle prove sono in totale 12, di cui 2 il primo giorno e 10 il secondo (Tabella 11.1). In tutti i radargrammi acquisiti lungo linee verticali è stato possibile osservare la presenza dei giunti di malta orizzontali disposti tra i corsi di laterizi, una serie di riflessioni posizionate a circa 2,5 ns che indicano la presenza del giunto di malta presente al retro dei mattoni disposti di lista e la riflessione del retro del muretto (Figura 11.5). Nei radargrammi realizzati secondo linee orizzontali è possibile notare chiaramente la disposizione dei laterizi lungo il corso ispezionato: infatti, in superficie (0 ns) si osserva una serie di piccole iperboli (giunti di malta) intervallate da linee continue (laterizi disposti di lista osservando un prospetto del muretto) (Figura 11.3).



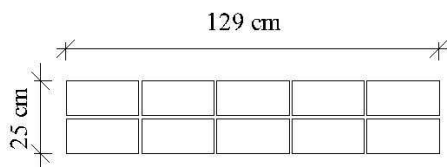
*Figura 11.3 Radargramma n.°066 eseguito sul 6° corso nel retro del muretto PNDA il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz): si notano le riflessioni dei giunti di malta superficiali, quelli posizionati a metà muretto (2,5 ns), il retro di questo (5 ns) e le pietre 1, 2 e 3.*



Corsi senza inclusioni

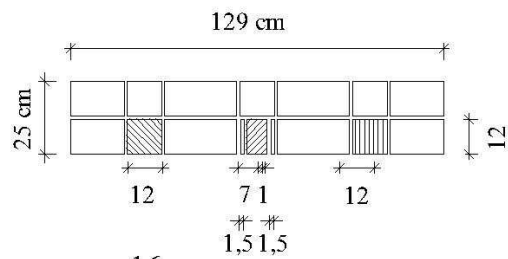


corsi pari

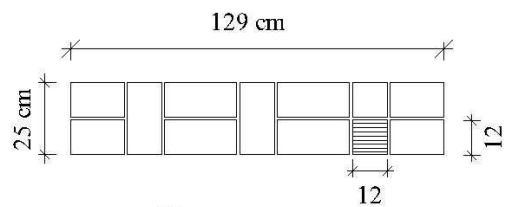


corsi dispari

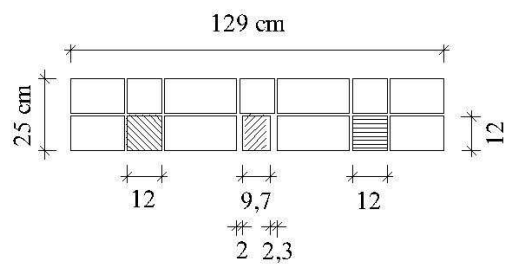
Corsi con inclusioni (pietre diverse)



corso 16



corso 10



corso 6

Figura 11.4: Sezioni verticali ed orizzontali del muretto PNDA in corrispondenza delle pietre

Tabella 11.1 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul retro muretto PNDA nelle due giornate di prova (09 e 16/07/2010): valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.

Giorno	File	Surface Position Adjustment (ns)	Background Removal (scan)	Gain (modalità lineare)
09/07/2010	070-071 (vert.)	1,68	massimo	9,1; 6,5; 3,9; 0,5
16/07/2010	060-064 (vert.)	1,41	massimo	7,2; 4,5; 2,5; 1,8
	065-069 (orizz.)	1,42	massimo	8,0; 4,6; 2,5; 1,0

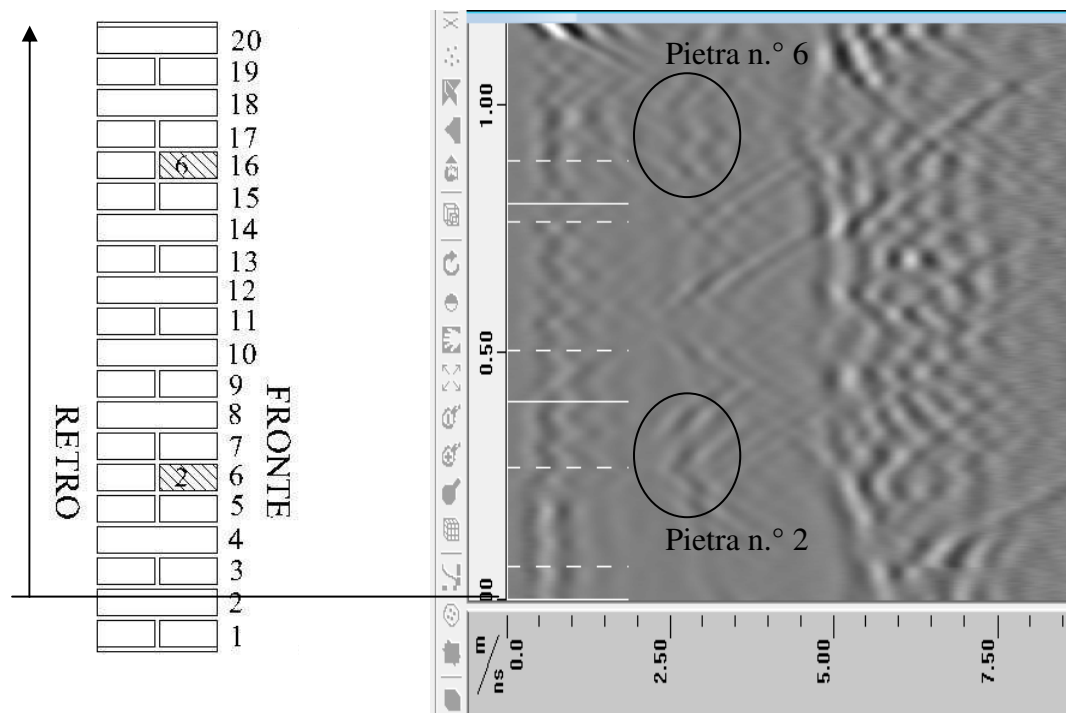
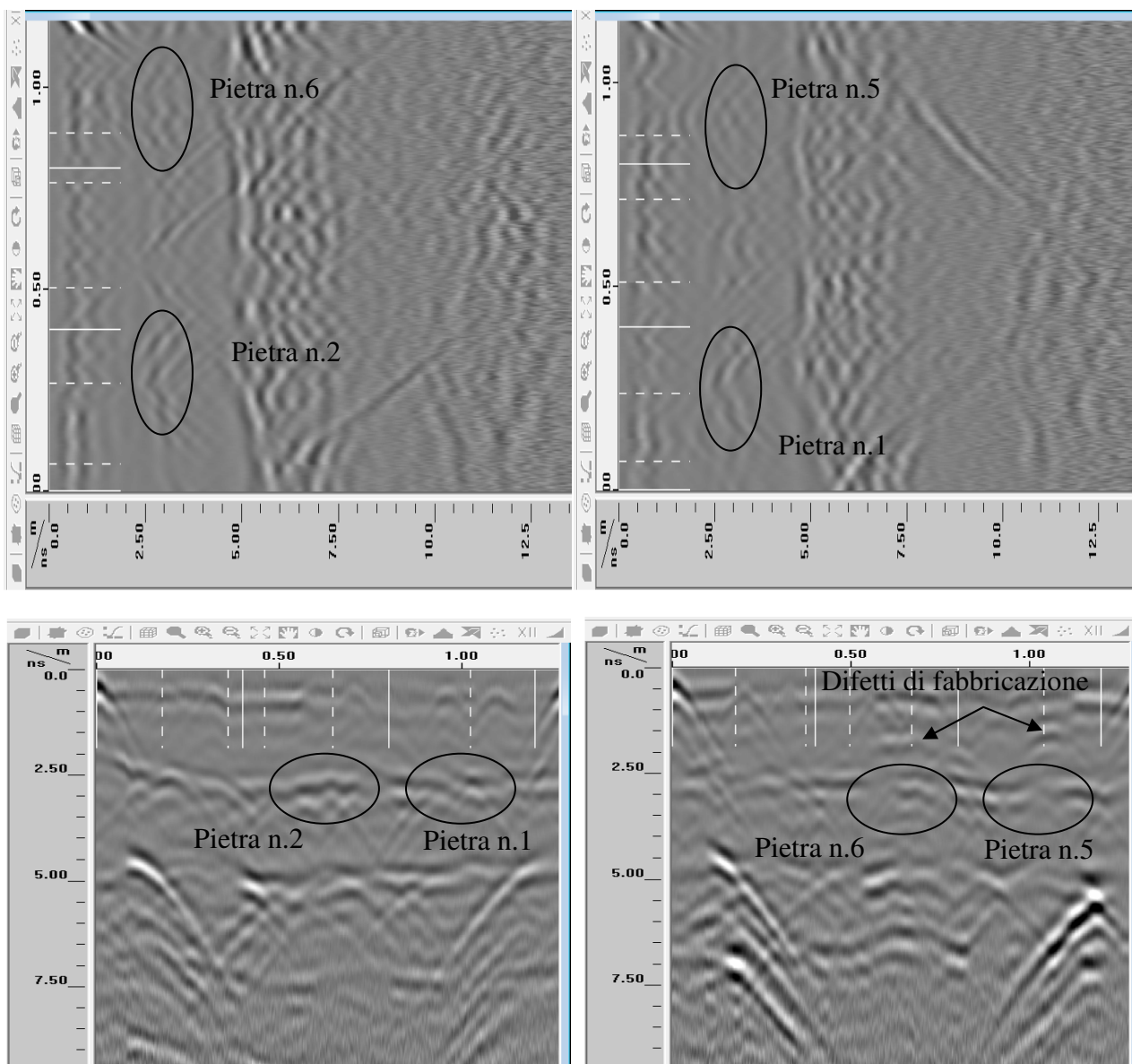


Figura 11.5 Sezione radar n.°063 del giorno 16/07/2010 eseguita con antenna Palm (2 GHz) nella mezzeria del muretto PNDA. I mark non sono posizionati con precisione, ma si nota la riflessione provocata dalla pietra 2 in corrispondenza del 2°mark e quella dell'inclusione 6 in corrispondenza dell'ultimo.

Nelle linee verticali eseguite in corrispondenza delle sezioni principali A-A', B-B' e C-C', si nota che le riflessioni provocate dallo stesso tipo di pietra risultano differenti se posizionate su corsi diversi,; nei radargrammi n. 063 e 064, in cui sono visibili le Arenarie di Varignana (n.1 e 5) nel secondo caso e le Calcareniti Leccesi (n. 2 e 6) nel primo, le riflessioni provocate dalle inclusioni risultano diverse. Infatti, in corrispondenza del corso più alto (16), le pietre sembrano essere posizionate più in superficie mentre nella realtà risultano essere collocate alla stessa profondità di quelle posizionate nel corso 6. Dalle linee orizzontali eseguite sui corsi 6 e 16 risulta ancora evidente tale fenomeno: nella sezione radar n.°069 si nota la presenza di 2 riflessioni che coprono le pietre n. 5 e 6 (Figura 11.6).

Nei casi osservati, la riflessione proveniente dal lato opposto del muretto non subisce delle variazioni della profondità, indice che in questo caso la velocità del segnale non subisce variazioni.



*Figura 11.6 Radargrammi n. 063 e 064 (linee verticali, in alto) e 066 e 069 (linee orizzontali, in basso) acquisiti con antenna Palm il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDA: visione delle pietre n.1 e 5 (Calacrenite Leccese) e n. 2 e 6 (Arenaria di Varignana).*

Per poter effettuare lo studio del posizionamento delle pietre inserite in questo provino è stato necessario utilizzare radargrammi provenienti dalle due giornate: infatti, nonostante il maggior numero di informazioni sia stato raccolto dall'analisi dei dati del 16/07/2010, per valutare l'altezza delle pietre n. 3, 4 e 7 è stato necessario il file 070 acquisito il 09/07/2010 in corrispondenza della sezione C-C' del muretto in quanto questa è l'unica linea radar eseguita in corrispondenza di tale sezione. Non è stato possibile rilevare la larghezza della pietra n.°4 in quanto non è visibile nel radargramma n.°067, unica linea orizzontale che interseca tale inclusione. Come detto in

precedenza, le pietre n.° 5 e 6 posizionate sul 16 corso, sono coperte da altre riflessioni e la stima della loro posizione è risultata non immediata, mentre per gli altri elementi inseriti nel muretto è stato possibile procedere con il calcolo delle dimensioni e delle profondità potendo contare in quest'ultimo caso su una doppia lettura (profondità osservata nelle linee orizzontali e verticali (Tabella 11.2 e Tabella 11.3).

*Tabella 11.2 Posizioni iniziali, finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDA il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.*

Pietra	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
2	0.126	2.290					0.276	0.219	0.349	0.130	63
6	0.144	2.620					0.552	0.509	0.605	0.096	
1	0.138	2.510					0.236	0.213	0.309	0.096	64
5	0.087	1.580					0.904	0.851	0.945	0.094	
1	0.148	2.690	0.984	0.918	1.040	0.122					66
2	0.153	2.780	0.575	0.502	0.635	0.133					
3	0.140	2.540	0.196	0.146	0.253	0.106					69
7	0.129	2.350	0.263	0.163	0.372	0.210					
6	0.074	1.350	0.642	0.569	0.705	0.136					
5	0.085	1.540	1.050	0.991	1.110	0.119					

*Tabella 11.3 Posizioni iniziali, finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDA il giorno 09/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.*

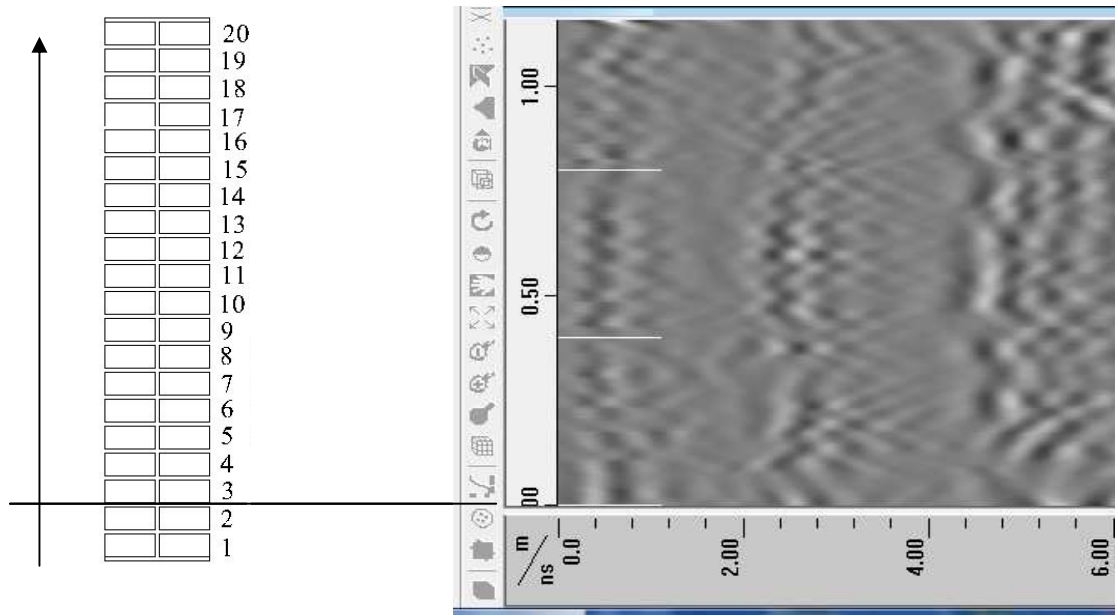
Pietra	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
3	0.137	2.490					0.276	0.219	0.329	0.110	70
4	0.136	2.470					0.462	0.522	0.605	0.083	
7	0.133	2.420					0.957	0.888	1.020	0.133	

#### 11.4.4 PNDB

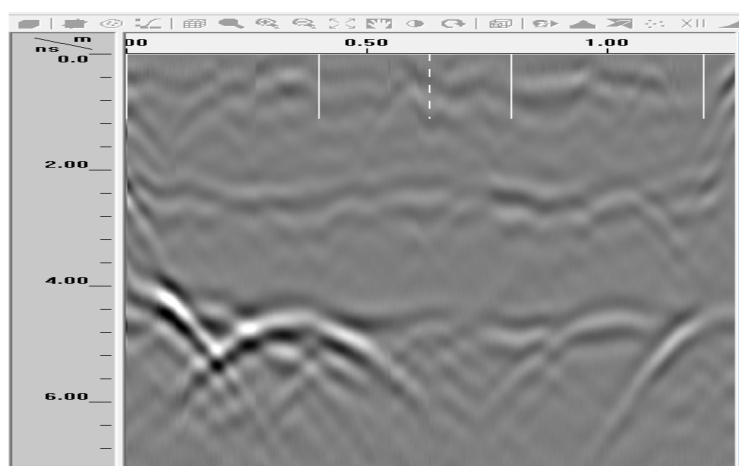
Per questo muretto, l'acquisizione dei dati con antenna Palm si è svolta nelle giornate del 09 e 21 luglio; molte delle linee radar realizzate su questo muretto sono interrotte a causa della presenza del sistema di monitoraggio del potenziale, fattore che non ha permesso il rilevamento di alcune pietre inserite (2, 3 e 7). Il numero delle linee eseguite sul muretto e gli strumenti di modifica applicati a queste è riassunto in Tabella 11.4.

In tutte le linee radar verticali è possibile osservare in superficie la presenza dei giunti orizzontali di malta, a circa 2,5 ns di profondità una serie di riflessioni che rappresentano l'altro giunto di malta presente al retro dei laterizi disposti di lista e la riflessione del retro (circa 5 ns) (Figura 11.7).

Osservando le linee orizzontali eseguite al di fuori delle pietre, è possibile notare le riflessioni dei giunti di malta verticali (in superficie), una serie di segnali a 2,4 ns che indicano la presenza del giunto di malta posizionato a metà sezione del muretto e il retro di questo a 4,4 ns.

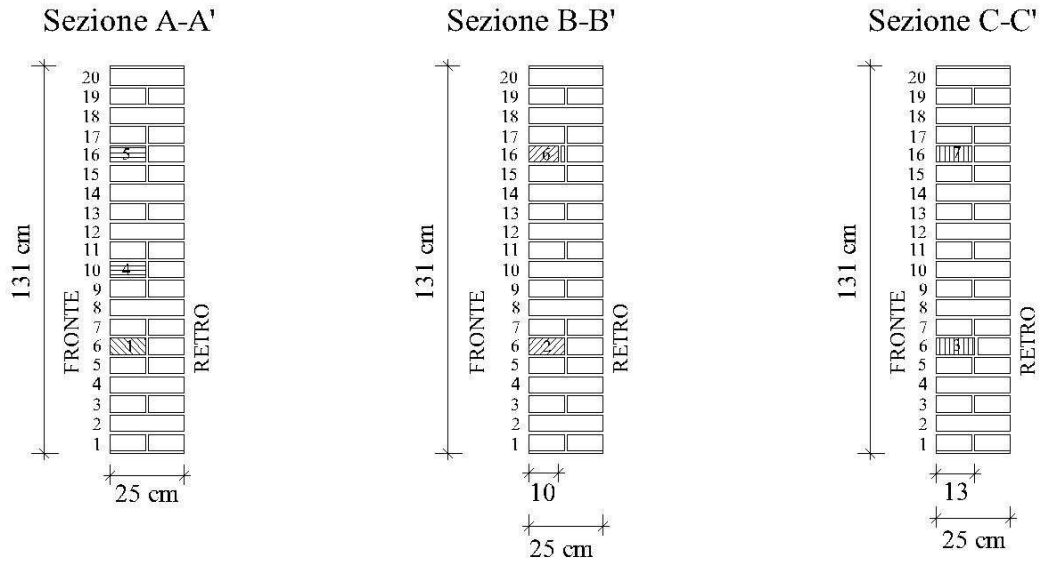


*Figura 11.7 Sezione radar n.°024 del giorno 09/07/2010 eseguita in posizione generica sul fronte del muretto PNDB con antenna Palm. È possibile osservare le riflessioni dei giunti di malta presenti a circa 2,5 ns e quella del retro.*

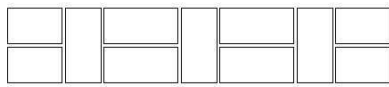


*Figura 11.8 Radargramma n.°069 eseguito in corrispondenza del corso 14 sul fronte del muretto PNDB con antenna Palm (2 GHz) il giorno 09/07/2010. Si notano i giunti di malta in corrispondenza della superficie (0 ns), quelli presenti a metà sezione (2,4 ns) ed il retro del muretto.*

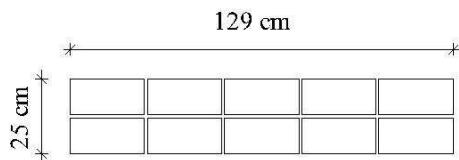




Corsi senza inclusioni

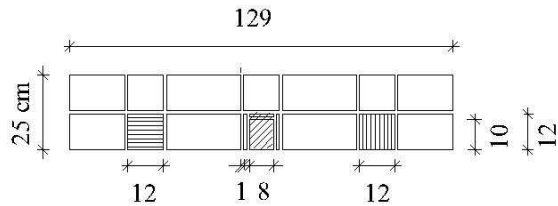


corsi pari

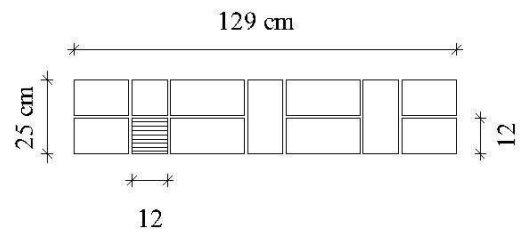


corsi dispari

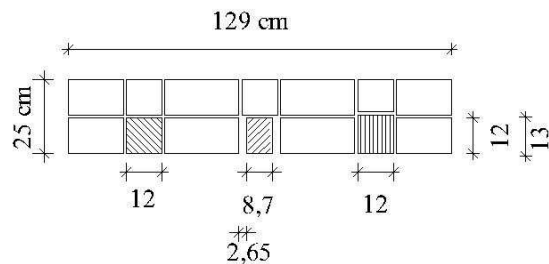
Corsi con inclusioni (pietre diverse)



corso 16



corso 10



corso 6

Figura 11.9 Sezioni verticali ed orizzontali del muretto PNDB in corrispondenza delle pietre.

*Tabella 11.4 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul fronte del muretto PNDB nelle 2 giornate di prova (09 e 21/07/2010): valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.*

<b>Giorno</b>	<b>File</b>	<b>Surface Position Adjustment (ns)</b>	<b>Background Removal (scan)</b>	<b>Gain (modalità lineare)</b>
09/07/2010	019-026 (vert.)	1,37	massimo	10; 4,4; 1,0
	064-069 (orizz.)	1,75	massimo	10; 4,1; 1,6; 1,0
21/07/2010	002-005; 039-042; 047-050 (vert.)	1,35	massimo	10,0; 1,0; 1,0
	001; 006-014; 043-044; 051-053 (oriz)	1,39	massimo	8,5; 2,4; 3,6; 1,0

Dallo studio delle linee eseguite in corrispondenza delle sezioni principali A-A' e B-B' sono visibili le pietre n. 1, 4 e 5 nel primo caso e la n.° 6 nel secondo. Osservando il radargramma n.°025 eseguito in corrispondenza della prima sezione (A-A'), si nota che la riflessione del retro del muretto in corrispondenza delle tre pietre, risulta posizionata ad una profondità minore rispetto a quella individuata al di fuori di queste: lo stesso fenomeno, anche se meno evidente, si presenta in corrispondenza della sezione di mezzeria (file n.°022) in cui la riflessione del retro del muretto è visibile ad una profondità minore se osservata in corrispondenza della sesta pietra (Figura 11.10). In corrispondenza delle linee radar orizzontali è possibile osservare in dettaglio tale fenomeno: nel radargramma n.° 063 (6° corso), la pietra n.°1 (Calcarenite Leccese) produce uno spostamento della riflessione del retro ad una profondità minore rispetto a quella visibile ai lati di questa. Anche nel radargramma n.° 069 la riflessione del retro del muretto risulta avere tempi minori se osservata in corrispondenza delle due pietre (5, Arenaria di Stoccarda e 6, Arenaria di Varignana) (Figura 11.11).

La riflessione superficiale di queste pietre risulta essere del tutto simile a quella dei laterizi utilizzati per la fabbricazione del provino, mentre quella più profonda è maggiormente visibile per le pietre 1 (Calcarenite Leccese) e 4 (Arenaria di Stoccarda); per la n.° 5 (Arenaria di Stoccarda), invece si nota una riflessione più debole è spostata leggermente a profondità minore, anche se la sua tipologia e le sue dimensioni sono uguali alla n.°4. Per la valutazione della posizione e dimensione delle pietre inserite nel muretto sono stati utilizzati prevalentemente i file acquisiti il primo giorno di prove (radargrammi verticali n.° 022 e 025 e orizzontale n.° 067 del 09/07/2010) e solamente due linee (file 008 e 010) del giorno 21/07/2010 necessarie per definire la larghezza delle inclusioni n.° 1 e 4 (Tabella 11.5 e Tabella 11.6). La profondità osservata, in questo caso, è pari all'estensione della pietra osservata: infatti, avendo eseguito le linee radar in corrispondenza del fronte del

muretto, lato in cui sono visibili le inclusioni, le riflessioni a metà profondità, corrispondono proprio alla parte retrostante delle pietre.

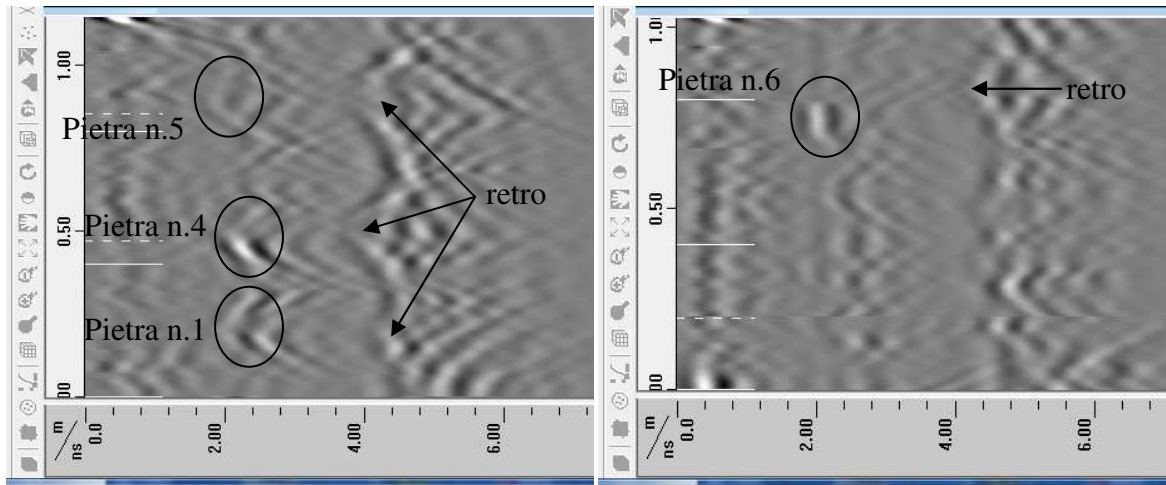


Figura 11.10 Radargrammi n.° 025 (a sinistra) e 022 (a destra, più corto perché diviso in 2 parti in corrispondenza del mark) eseguiti il giorno 09/07/2010 con antenna Palm sul fronte del muretto PNDB. Pietre: n.°1 Calcarenite Leccese, n.°4 e 5 Arenaria di Stoccarda e n.°6 Arenaria di Varignano.

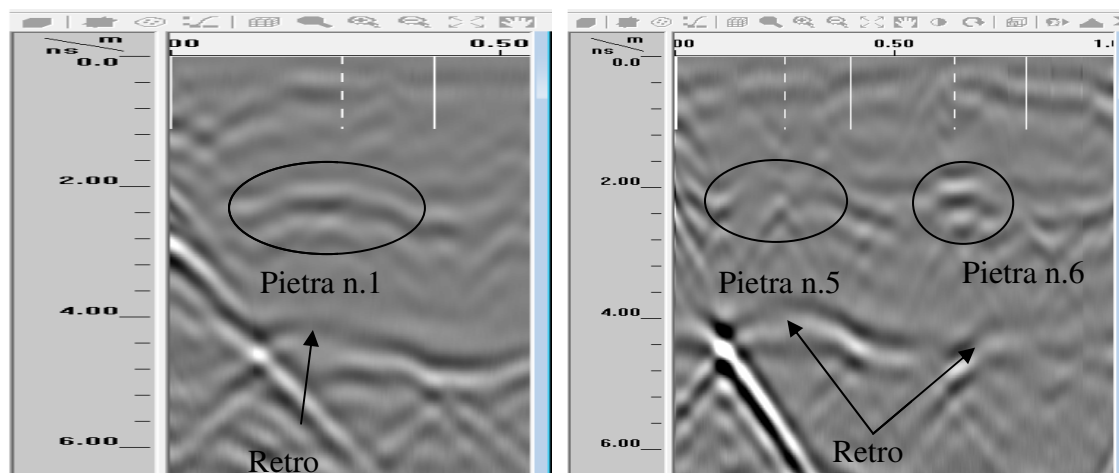


Figura 11.11 Radargrammi n.°063 (a sinistra) e 067 (a destra) eseguiti il giorno 09/07/2010 sul fronte del muretto PNDB con antenna Palm (2 GHz). Il retro del muretto è posizionato a profondità minori se osservato in corrispondenza delle pietre inserite nel muretto.

Tabella 11.5 Posizioni iniziali, finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDB il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.

Pietra	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
5	0.088	1.600					0.887	0.847	0.944	0.097	25
4	0.105	1.900					0.475	0.425	0.482	0.057	
1	0.118	2.150					0.209	0.143	0.246	0.103	

6	0.096	1.740					0.744	0.685	0.794	0.110	22
6	0.095	1.720	0.655	0.591	0.698	0.106					
5	0.106	1.920	0.163	0.106	0.233	0.126					67

Tabella 11.6 Posizioni iniziali, finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDB il giorno 21/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.

Pietra	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
1	0.118	2.150		0.149	0.282	0.133					8
4	0.100	1.810		0.199	0.309	0.110					10

#### 11.4.5 PNDC

Come negli altri radargrammi acquisiti sui muretti a due teste ed osservati nei precedenti punti (11.4.3 e 11.4.4), anche in questo caso risultano visibili i giunti di malta superficiali, quelli posizionati a metà sezione ed il retro del muretto (Figura 11.12 e Figura 11.14). Le linee radar acquisite su questo muretto sono 9, 4 verticali e 5 orizzontali (Tabella 11.7).

La sola linea radar verticale eseguita in corrispondenza di una delle sezioni principali, e quindi in presenza delle pietre, è la n.° 014 nella mezzeria del muretto: lungo questa sezione, si incrociano le due Arenarie posizionate sul corso 6 e 16 e la loro visione risulta immediata e simile all'interno del radargramma: le pietre, in questo caso, vengono rappresentate come due riflessioni ravvicinate a causa della presenza di un pezzo di laterizio utilizzato come spessore per l'inserimento delle pietre. Tale fenomeno è maggiormente visibile per l'inclusione posizionata più in basso (Figura 11.15). Osservando la riflessione proveniente dal lato opposto del muretto, si nota che la sua profondità non subisce variazione in presenza delle pietre: la velocità di propagazione delle onde rimane costante.

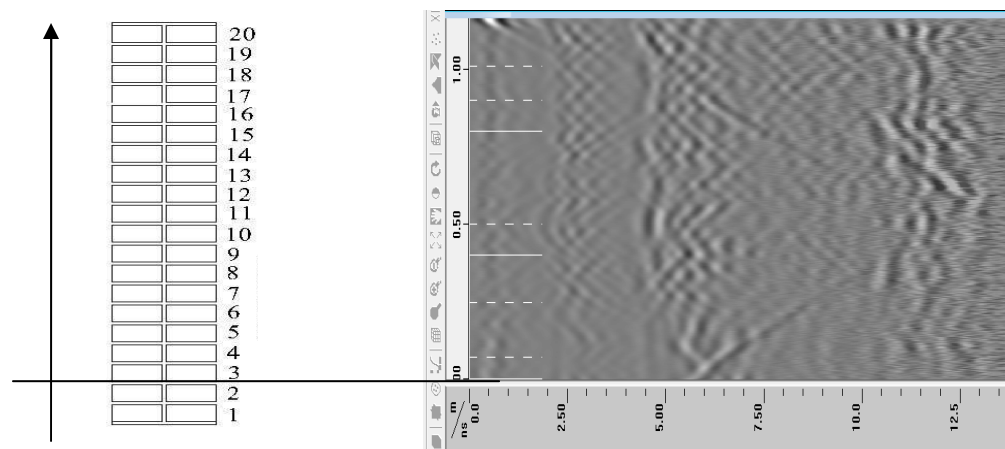
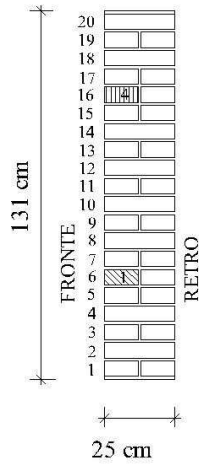
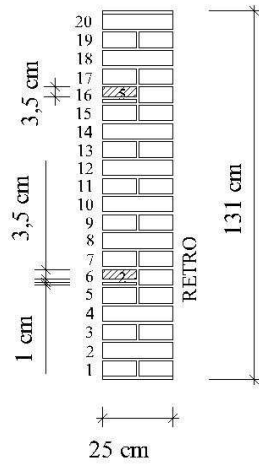


Figura 11.12 Radargramma n.°013 eseguito con antenna Palm sul retro del muretto PNDC il giorno 16/07/2010 in posizione generica. Si osservano le riflessioni dei giunti di malta orizzontali (in superficie), quelli posizionati a metà sezione (2,5 ns) ed il retro del muretto (5 ns).

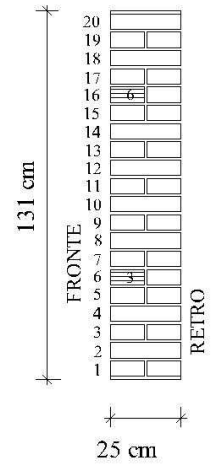
Sezione A-A'



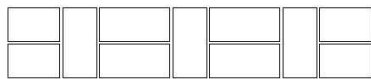
Sezione B-B'



Sezione C-C'

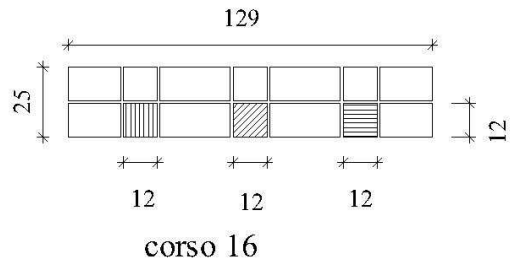


Corsi senza inclusioni

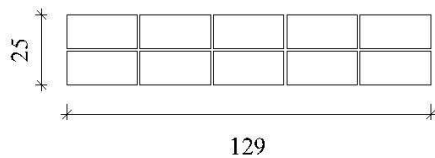


corsi pari

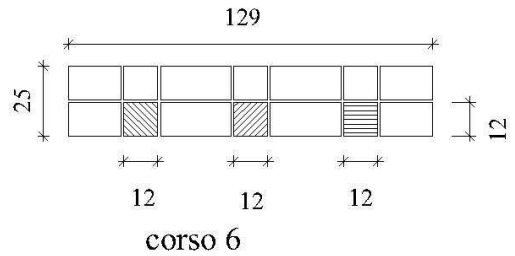
Corsi con inclusioni (pietre diverse)



corso 16



corsi dispari



corso 6

Figura 11.13 Sezioni verticali ed orizzontali del muretto PNDC in corrispondenza delle pietre.

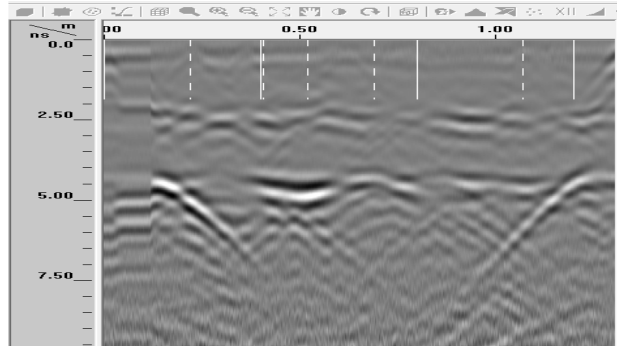


Figura 11.14 Sezione radar n.°017 eseguita in corrispondenza del 17° corso sul retro del muretto PNDC il giorno 16/07/2010. Si notano le riflessioni superficiali dei giunti di malta orizzontali, quelle provocate dal giunto verticale di malta presente a metà sezione (2,5 ns) ed il retro del muretto (5 ns).

Tabella 11.7 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto PNDC nella giornata di prova (16/07/2010): valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.

Giorno	File	Surface Position Adjustment (ns)	Background Removal (scan)	Gain (modalità lineare)
16/07/2010	011-014 (vert.)	1,38	massimo	7,3; 4,9; 1,8; 1,0
	015-019 (oriz.)	1,36	massimo	9,8; 6,9; 2,1; 1,0

Dalle linee radar eseguite lungo i corsi 6 e 16, invece, è stato possibile osservare tutte le pietre presenti nel muretto. Nonostante siano a coppie uguali tra loro (1 e 3, 2 e 5, 3 e 6), la loro visione all'interno dei radargrammi è differente: per quelle posizionate più in alto (corso 16) ed escludendo quella nella sezione di mezzeria (n.°5), si nota che la riflessione del retro del muretto è collocata ad una profondità minore, indice di un aumento di velocità del segnale (Figura 11.16). Osservando il retro del provino in corrispondenza delle pietre 3 e 5 (Calcarenite Palsetinese) si nota una diminuzione dell'ampiezza del segnale. Per il posizionamento delle pietre sono stati utilizzati il solo file verticale eseguito in corrispondenza della sezione di mezzeria del muretto (file 014) e le due linee orizzontali in corrispondenza delle pietre (file 016 e 018). Da questi radargrammi è stato possibile ricavare le larghezze di tutti gli elementi incrociati, mentre sono state calcolate solamente le altezze delle Arenarie (Tabella 11.8).

Tabella 11.8 Posizioni iniziali finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDB il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.

Pietra	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
2	0.120	2.180					0.253	0.209	0.289	0.080	14
4	0.125	2.270					0.854	0.828	0.894	0.066	



3	0.108	1.970		0.163	0.239	0.077					
2	0.128	2.330	0.614	0.539	0.698	0.160					
1	0.135	2.450	1.010	0.964	1.040	0.076					16
6	0.107	1.950		0.133	0.236	0.103					
5	0.107	1.940	0.702	0.625	0.735	0.110					
4	0.112	2.030	0.951	0.894	1.000	0.106					18

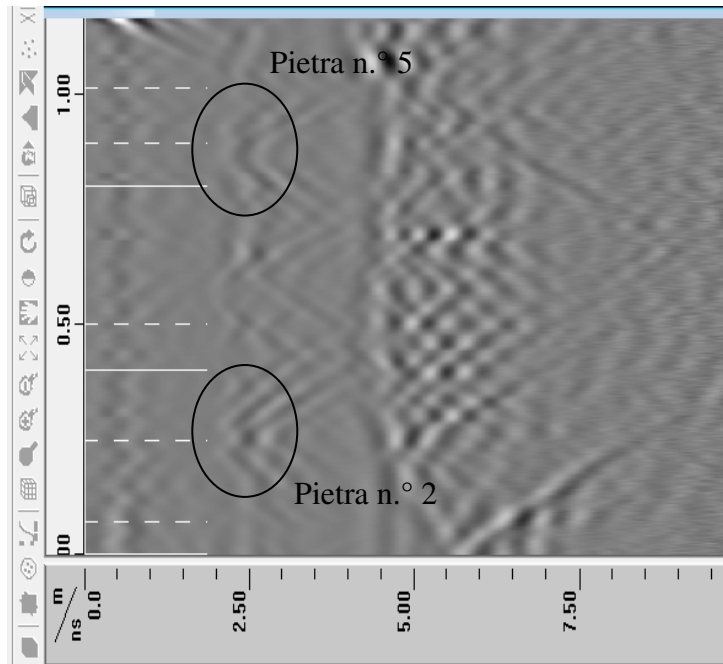


Figura 11.15 Sezione radar n.°014 eseguita il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDC in corrispondenza della mezzeria (antenna Palm a 2 GHz). Le 2 Arenarie si presentano ciascuna come due iperboli tra loro ravvicinate. Il fenomeno è maggiormente visibile per la pietra n.°2.

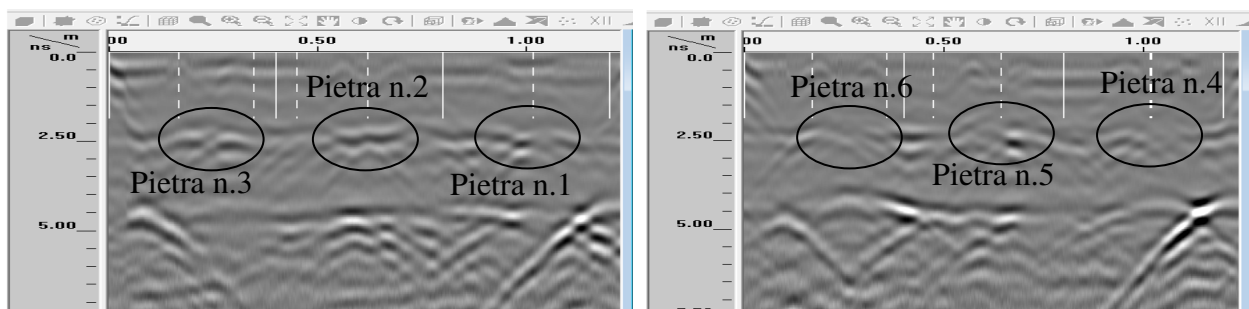


Figura 11.16 Radargramma n.°016 (a sinistra, corso 6) e 018 (a destra, corso 16) acquisiti il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDC con antenna Palm (2 GHz). Pietre: n.°1 e 4 Calcarenite Palestinese, n.°2 e 5 Arenaria di Varignana e n.°3 e 6 Arenaria di Stoccarda. In corrispondenza delle inclusioni n.° 6 e 4 si osserva che la riflessione del retro del muretto risulta posizionata ad una profondità minore.

### 11.4.6 PNDD

Le giornate di acquisizione dei dati sia in direzione verticale che in orizzontale con antenna Palm su questo muretto sono state 2 collezionando file (Tabella 11.9). Nelle sezioni radar eseguite in corrispondenza dei difetti artificiali è stato difficile riuscire ad individuare la posizione del retro del muretto e non è stato possibile fornire indicazioni per quanto riguarda la variazione di velocità di propagazione del segnale causata da questi elementi. Lungo le linee radar eseguite al di fuori dei difetti, invece, è stato possibile osservare la presenza dei giunti di malta orizzontali (0 ns), delle riflessioni posizionate a 2,5 ns corrispondenti al giunto di malta presente al retro dei mattoni disposti di lista dei corsi pari e la riflessione del retro del muretto posizionate a circa 7,5 ns (Figura 11.17).

Nei radargrammi acquisiti in direzione orizzontale al di fuori dei difetti, è possibile osservare alcune serie di riflessioni posizionate a profondità diverse: la prima, in superficie, rappresenta la riflessione superficiale dei laterizi, la seconda, a 2,5 ns, il primo giunto di malta al retro dei mattoni disposti di lista, la terza, a 5,5 ns, il secondo giunto di malta presente al termine dei laterizi disposti di testa e la quarta, a 7,5 ns, la visione del retro del muretto (Figura 11.19).

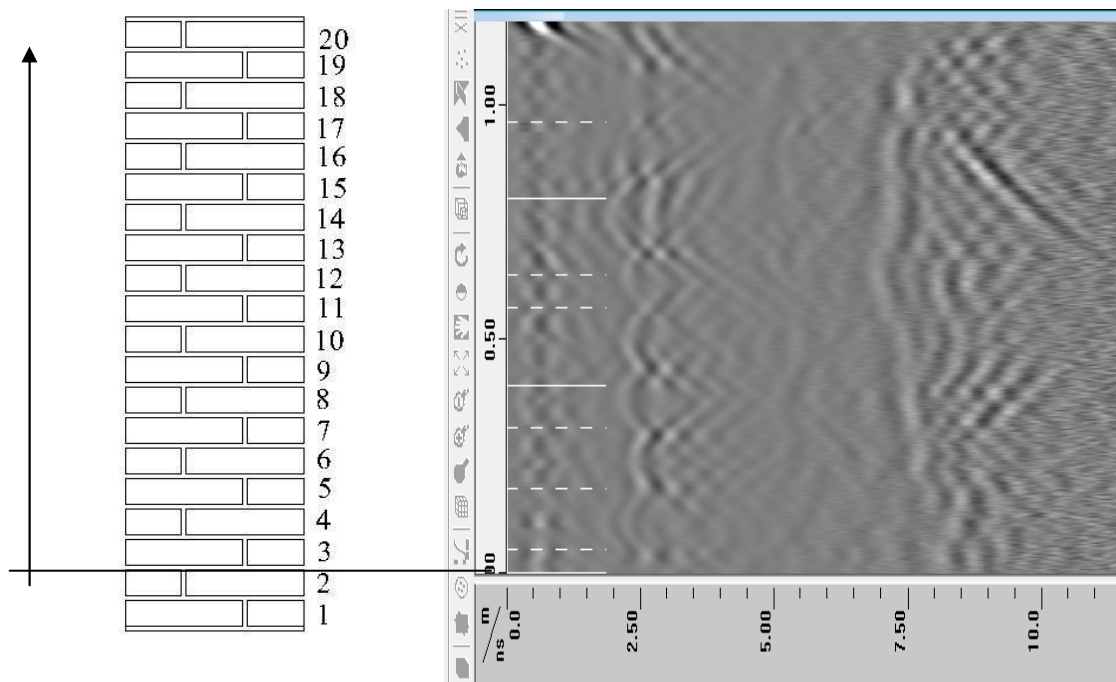


Figura 11.17 Sezione radar n.°073 eseguita il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDD con antenna Palm (2 GHz) in posizione generica (senza difetti).

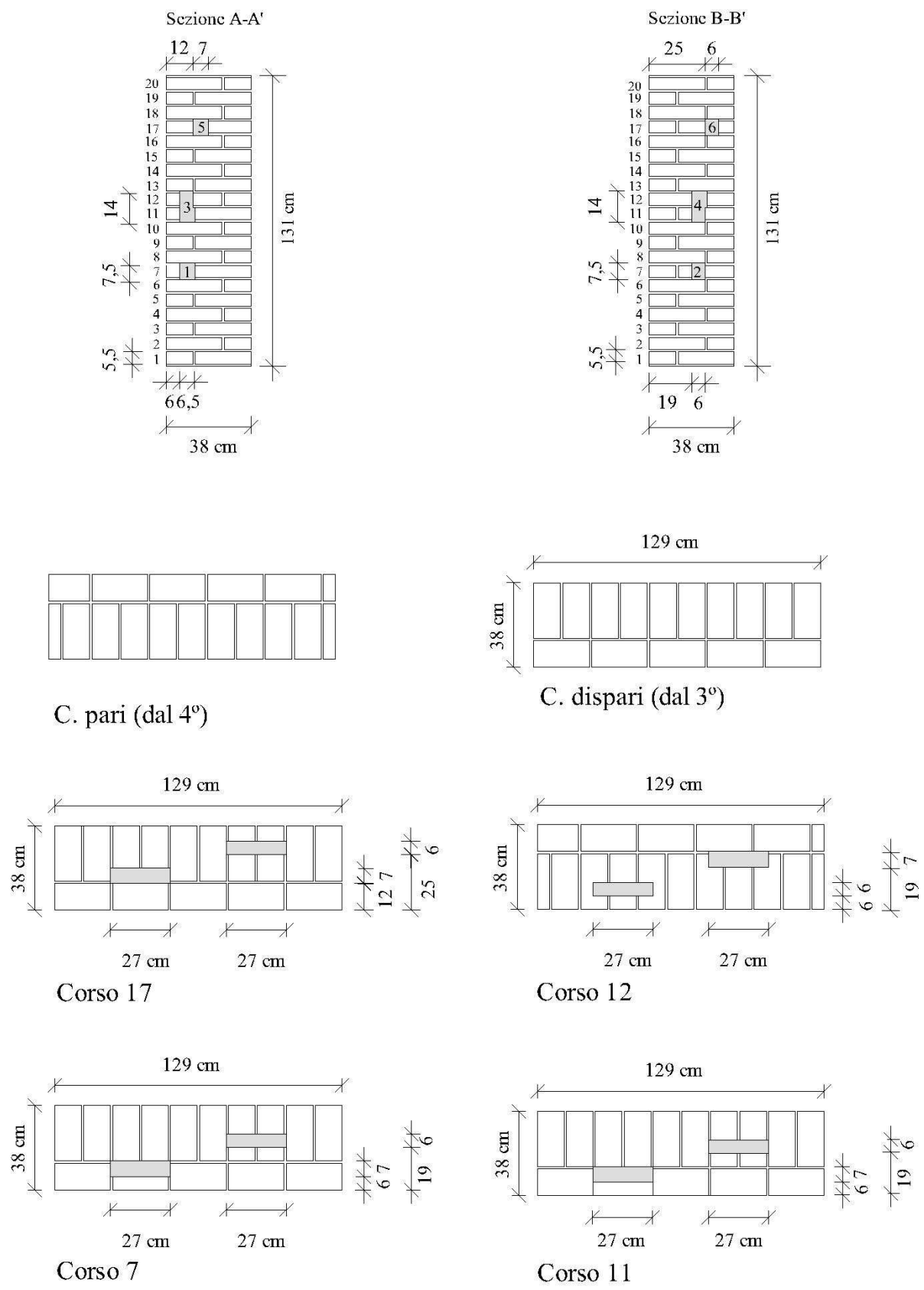


Figura 11.18 Sezioni verticali ed orizzontali del muretto PNDD in corrispondenza dei difetti.

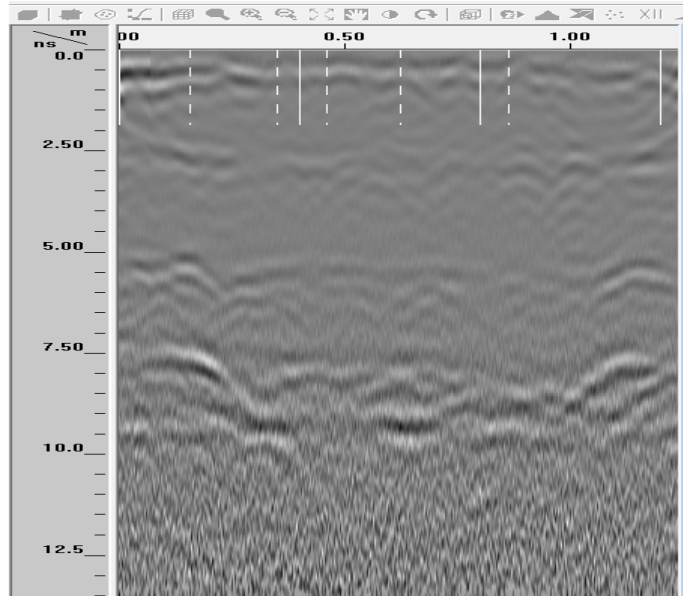


Figura 11.19 File n.°075 eseguito con antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010. L'ultima riflessione visibile a circa 9,5 ns corrisponde alla visione della vasca metallica; il retro è posizionato a 7,5 ns.

Tabella 11.9 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto PNDD nelle 2 giornate di prova (16 e 21/07/2010): valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.

Giorno	File	Surface Position Adjustment (ns)	Background Removal (scan)	Gain (modalità lineare)
16/07/2010	001-004; 020-023; 042-045; 070-074; 088-092; 115-119	1,38	massimo	8,6; 5,9; 2,9; 1,0
	005-010; 024-026; 046-048; 075-079; 093-097; 120-121	1,38	massimo	10; 4,1; 1,6; 1,0
21/07/2010	016-019 (vert.)	1,35	massimo	10,0; 3,5; 1,0
	015; 022-026 (oriz)	1,38	massimo	10; 7,9; 3,1; 1,0

Nei muretti a tre teste, le sezioni principali sono solamente due (A-A' e B-B') situate in corrispondenza dei difetti. Nei radargrammi acquisiti in queste posizioni, è possibile osservare la presenza dei difetti, ma risulta difficoltosa se non impossibile la visione del retro del muretto che, ad ogni modo, non è rettilineo a causa della diversa velocità di propagazione del segnale provocata dai difetti. Dalle sezioni radar ricavate in queste posizioni, è possibile notare che una stessa tipologia di difetto, viene rappresentata diversamente all'interno del radargramma: infatti, i difetti n.° 2 e 6 che hanno le stesse dimensioni, ma sono posizionati a profondità diverse, vengono

individuati con riflessioni diverse. Nel primo caso (n.° 2), sono visibili 2 iperboli che rappresentano l'inizio e la fine del difetto (le due superfici di separazione tra difetto e muretto), mentre nel secondo (n.° 6), si osserva una riflessione continua. Il difetto con estensione maggiore (2 corsi) e posizionato a due differenti profondità (12 e 13 cm), sembra di estensione minore rispetto agli altri due e posizionato su un unico livello (Figura 11.20). Osservando la sezione A-A', i difetti qui presenti risultano posizionati a profondità maggiori rispetto a quelle individuate nell'altra sezione (B-B'): ancora una volta si nota che lo stesso difetto (n.° 1 e 5) viene rappresentato in modo diverso se posizionato a profondità diverse (Figura 11.20).

Anche nei file eseguiti lungo linee orizzontali in corrispondenza dei difetti (corsi 7, 11, 12 e 17) la visione del retro del muretto non risulta possibile; solamente nel file eseguito sul corso più alto si nota la presenza di una riflessione posizionata a 7,5 ns. Nonostante i difetti abbiano la stessa larghezza, si nota che questa, nelle sezioni radar, può sembrare molto differente così come la sua rappresentazione (Figura 11.21).

Per eseguire l'analisi della posizione dei difetti sono stati selezionati i file eseguiti lungo le due sezioni principali verticali (n.°071 sezione B-B' e 074 sezione A-A') e quelli acquisiti in corrispondenza dei corsi 7, 11, 12 e 17 (file n.°077, 078, 079 e 010 rispettivamente) (Tabella 11.10)

*Tabella 11.10 Posizioni iniziali finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.*

Difetto	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
6	0.042	0.840					0.964	0.911	1.010	0.099	71
4	0.092	1.830					0.612	0.552	0.685	0.133	
2	0.113	2.250					0.313	0.269	0.376	0.106	
5	0.173	3.460					0.941	0.864	0.980	0.116	74
3	0.259	5.180					0.602	0.549	0.705	0.156	
1	0.242	4.840					0.322	0.273	0.434	0.161	
6	0.043	0.860	0.366	0.249	0.492	0.243					10
5	0.176	3.520	0.864	0.728	0.958	0.229					
4	0.096	1.920	0.376	0.213	0.487	0.274					
3	0.217	4.340	0.924	0.854	0.989	0.135					79
4	0.093	1.850	0.396	0.266	0.519	0.253					78
3	0.221	4.410	0.928	0.851	1.070	0.219					
2	0.114	2.270	0.376	0.219	0.525	0.306					
1	0.241	4.820	0.841	0.745	0.888	0.143					77

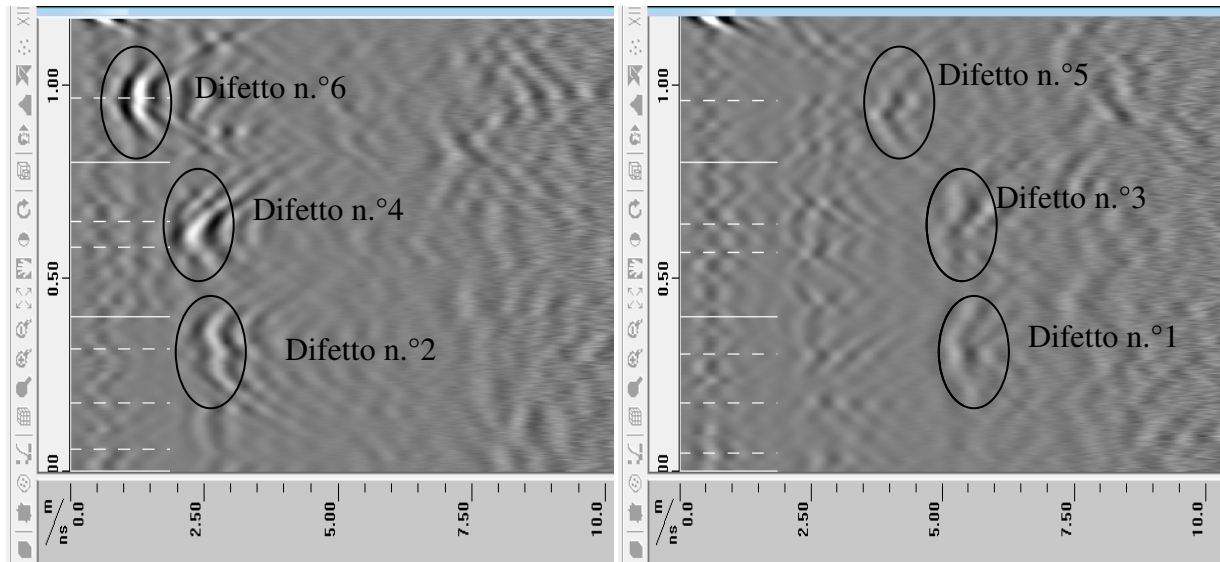


Figura 11.20 Radargrammi n.°071 (a sinistra, sezione B-B') e 074 (a destra, sezione A-A') eseguiti sul retro del muretto PNDD con antenna Palm. Si nota la diversa rappresentazione di difetti simili posizionati a diverse profondità (n.° 2 e 6 a sinistra e n.° 1 e 5 a destra)

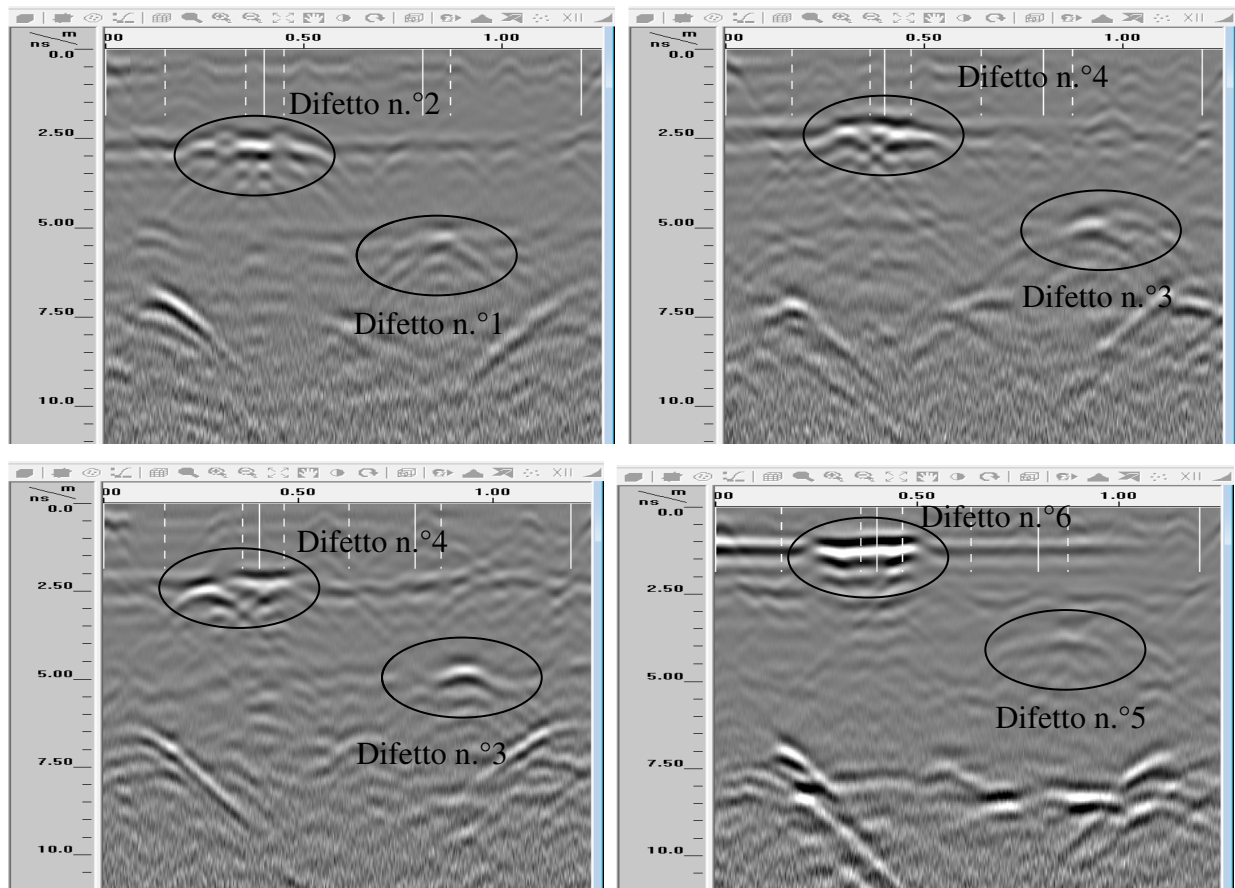


Figura 11.21 File n.°077 (corso 7), 078 (corso 11), 079( corso 12) e 010 (corso 17) eseguiti sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010 con antenna Palm (2 GHz). Visione dei difetti nelle sezioni radar orizzontali.



### 11.4.7 PNDE

Tabella 11.11 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto PNDE nella giornata di prova: valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.

Giorno	File	Surface Position Adjustment (ns)	Background Removal (scan)	Gain (modalità lineare)
16/07/2010	036-040 (vert.)	1,38	massimo	10; 4,3; 2,7; 1,0
	041-042; 050-052	1,38	massimo	10; 9,6; 7,9; 3,2; 1

L'acquisizione dei dati con antenna Palm per questo muretto è stata eseguita in una sola giornata collezionando in tutto 10 linee, di cui 5 verticali ed altrettante orizzontali (Tabella 11.11).

Le sezioni radar collezionate in assenza di difetti non verranno qui descritte in quanto risultano del tutto analoghe a quelle viste per il muretto PNDD.

I difetti presenti in questo muretto hanno geometrie diverse tra loro: in corrispondenza del 6° corso si osservano quelli con altezza pari a 20,5 cm (3 corsi), in corrispondenza dell'11° quelli pari a 14 cm (2 corsi) e sul 17° corso quelli a 7,5 cm (1 corso). Dai radargrammi eseguiti lungo le sezioni principali (A-A' e B-B') si nota che queste differenze non sono evidenti, ma le riflessioni osservate hanno estensioni simili. Per i difetti n.° 3 e 4 è possibile notare che il radar GPR è stato in grado di valutare la loro conformazione: infatti, le due riflessioni sono collocate su due livelli leggermente diversi. Tale fenomeno è visibile anche per il difetto n.° 2, ma in maniera meno evidente (Figura 11.22). Da queste linee si può notare che i difetti posizionati a metà muretto (corso 11) risultano maggiormente visibili.

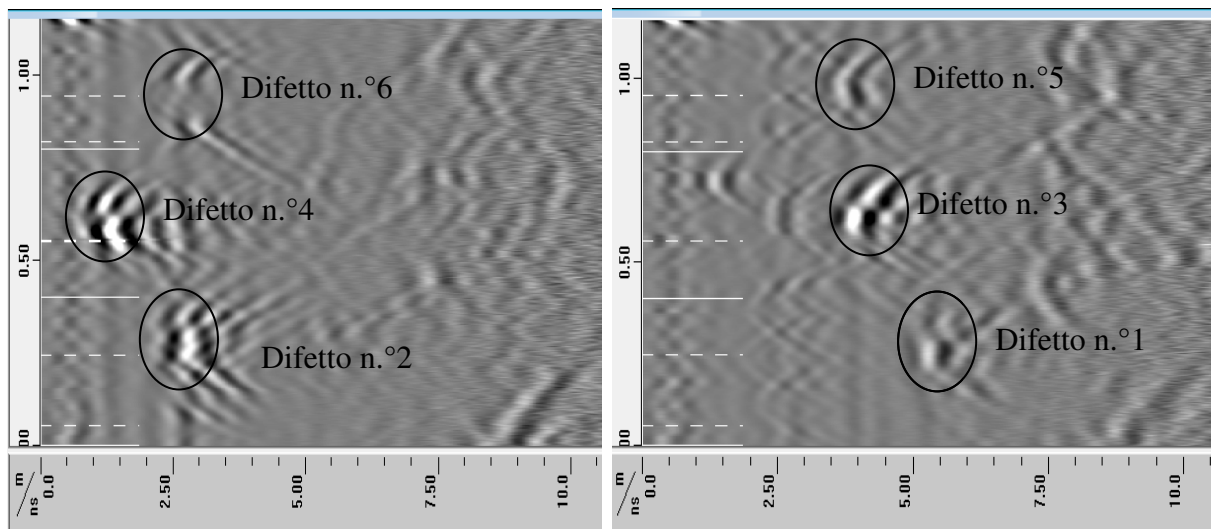


Figura 11.22 Radargrammi n.°037 (a sinistra, sezione B-B') e 040 (a destra, sezione A-A') acquisiti il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDE con antenna Palm (2 GHz).

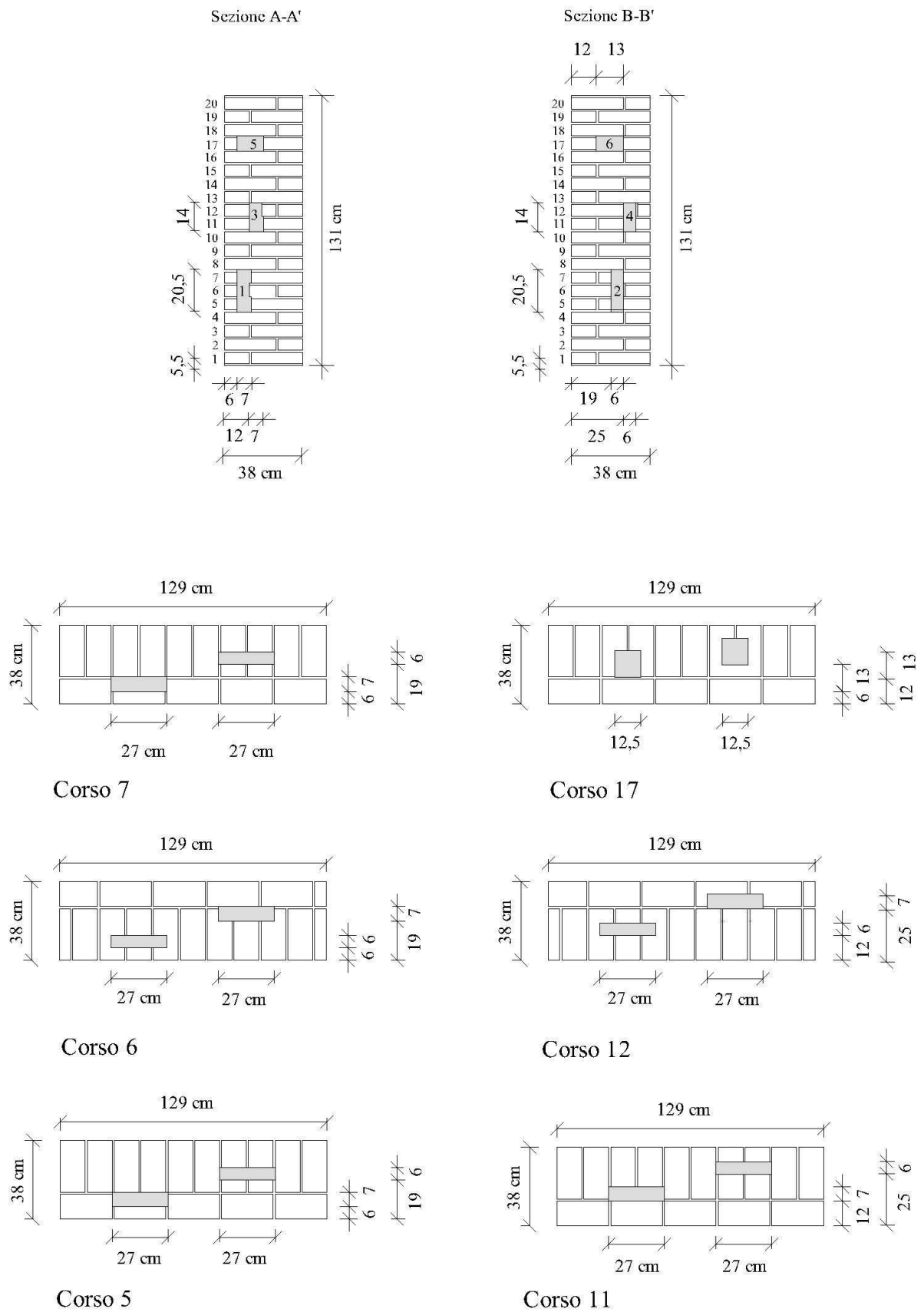


Figura 11.23 Sezioni verticali ed orizzontali del muretto PNDD in corrispondenza dei difetti.

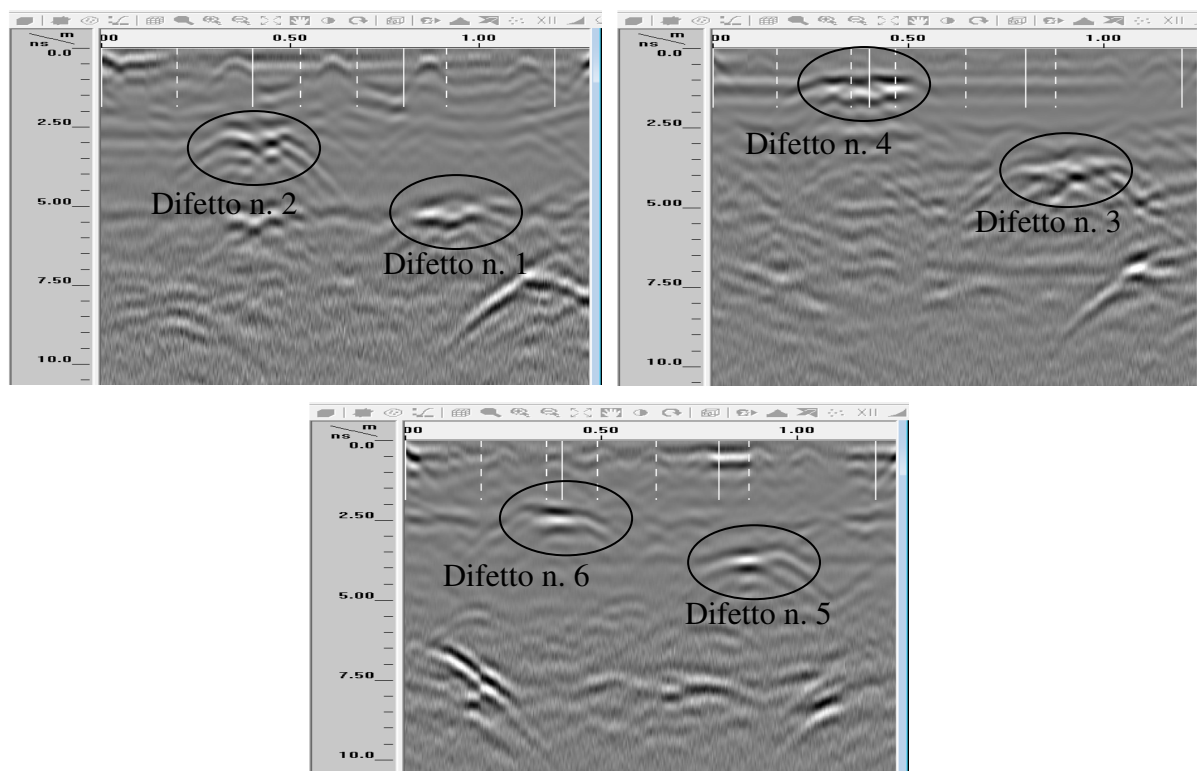


Figura 11.24 Radargrammi n.° 049 (corso 6), 050 (corso 11) e 052 (corso 17) eseguiti sul retro del muretto PNDE il giorno 16/07/2010

Le linee orizzontali acquisite in corrispondenza dei difetti mostrano un'estensione delle riflessioni molto simili tra loro nonostante quelle presenti nel radargramma n.° 052 (corso 17) rappresentano dei difetti di estensione minore.

Per lo studio delle dimensioni dei difetti artificiali sono stati utilizzati 2 file acquisiti in corrispondenza delle sezioni principali (A-A' file 037 e B-B' file 040) e tre orizzontali in corrispondenza dei difetti (file 049 corso, file 050 corso 11 e file 052 corso 17) (Tabella 11.12).

Tabella 11.12 Posizioni iniziali finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.

Difetto	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
6	0.114	2.270					0.941	0.950	1.020	0.070	37
4	0.043	0.860					0.605	0.519	0.685	0.166	
2	0.115	2.290					0.266	0.206	0.359	0.153	
5	0.168	3.350					0.991	0.914	1.020	0.106	40
3	0.176	3.520					0.612	0.568	0.707	0.139	
1	0.245	4.890					0.243	0.190	0.299	0.110	
6	0.106	2.120	0.386	0.345	0.462	0.117					52
5	0.169	3.370	0.868	0.808	0.924	0.116					
4	0.043	0.860	0.382	0.263	0.512	0.249					

3	0.164	3.280	0.921	0.811	1.020	0.209					
2	0.116	2.310	0.399	0.306	0.515	0.210					
1	0.236	4.710	0.924	0.828	1.020	0.192					49

#### 11.4.8 PNDF

L'acquisizione dei dati con antenna Palm da 2 GHz è stata svolta nelle tre giornate di luglio (09, 16 e 21); la prima campagna ha previsto l'uso di una griglia radar (posizionata sul fronte del muretto) e per tale motivo ai radargrammi non sono state apportate modifiche durante l'analisi dei singoli file bidimensionali, mentre quelli acquisiti nelle restanti due giornate hanno subito un trattamento diverso (Tabella 11.13).

Osservando i radargrammi collezionati in direzione verticale in corrispondenza della mezzeria del muretto, è possibile notare le riflessioni dei giunti di malta orizzontali (0 ns), una serie di segnali a 2,5 ns e, nella parte bassa (al di sotto dei 50 cm), il retro del muretto a 7,5 ns. Le riflessioni posizionate a 2,5 ns corrispondono a due differenti superfici di separazione: la prima (sotto ai 50 cm) corrisponde al giunto di malta presente al retro dei laterizi disposti di lista) mentre, superiormente, la seconda rappresenta la muratura a sacco. Questa distinzione non è visibile all'interno del radargramma se non per alcuni particolari: il segnale provocato dalla muratura a sacco risulta caotico e copre la visione del retro del muretto mentre accade l'esatto opposto per i segnali osservati al di fuori di questa (Figura 11.26). Dalla sezione radar orizzontale eseguita in corrispondenza del corso 7 privo di difetti si osservano ancora le stesse serie di riflessioni (0 ns, 2,5 ns e 7,5 ns), ed una ulteriore posizionate a 5 ns che descrive il giunto di malta presente al termine dei laterizi disposti di teste nei corsi adiacenti. È visibile, inoltre, una riflessione posizionate in corrispondenza del secondo mark ad una profondità diversa da quelle precedentemente descritte: tale segnale corrisponde al difetto n.º2 osservato dal corso n. 7.

*Tabella 11.13 File acquisiti con antenna Palm (2 GHz) sul retro del muretto PNDF nelle 2 giornate di prova: valori attribuiti agli strumenti di modifica dei radargrammi.*

<b>Giorno</b>	<b>File</b>	<b>Surface Position Adjustment (ns)</b>	<b>Background Removal (scan)</b>	<b>Gain (modalità lineare)</b>
16/07/2010	027-031; 053-057; 080-084; 098-102	1,38	massimo	7,2; 4,0; 3,1; 1,0
	032-035; 058-059; 085-087; 103-105	1,38	massimo	10; 7,4; 4,8; 2,1; 1
21/07/2010	027-032 (vert.)	1,36	massimo	10;8,9; 2,1; 1,0
	031-036 (oriz.)	1,38	massimo	10; 8,2; 6,5; 2,7; 1

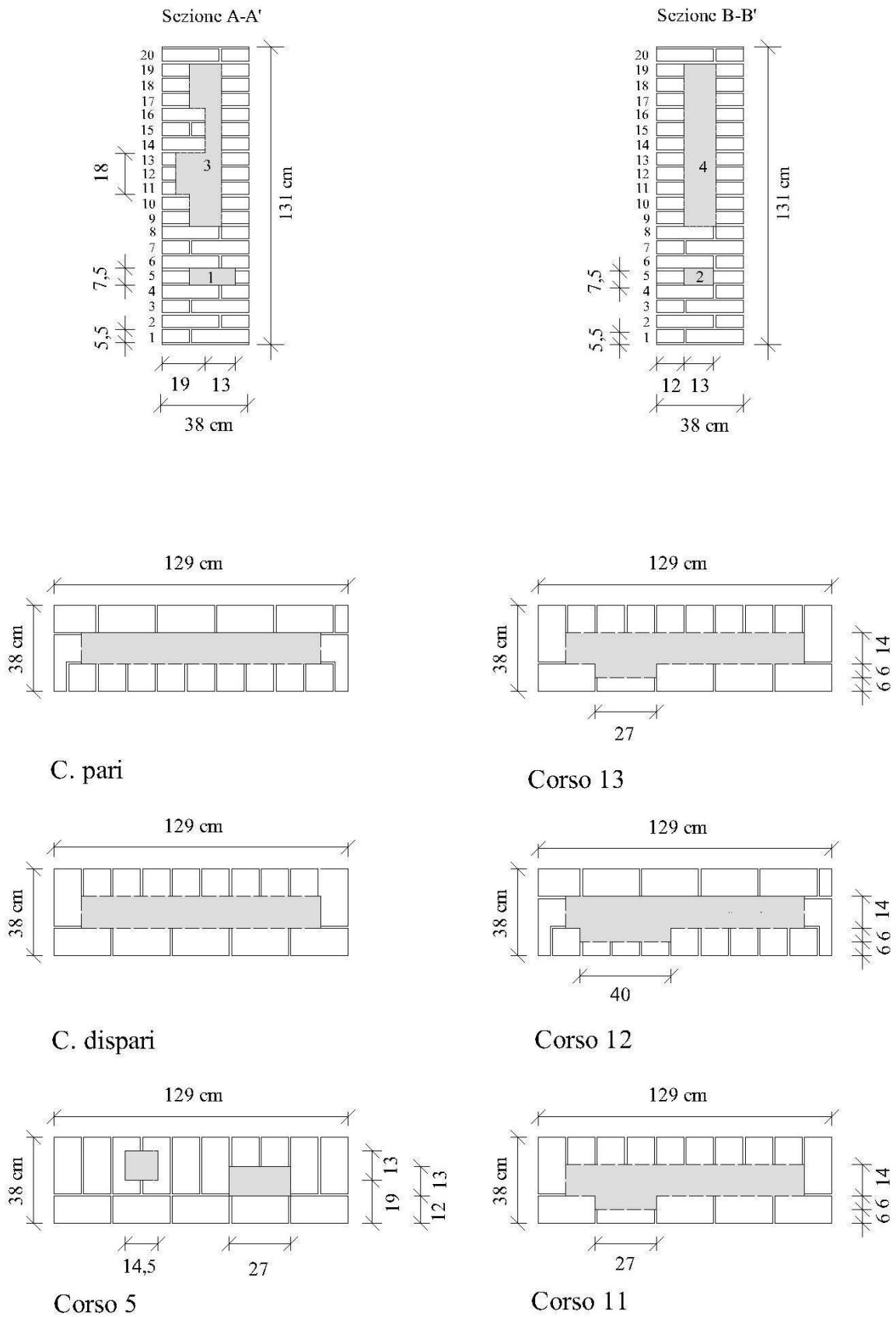
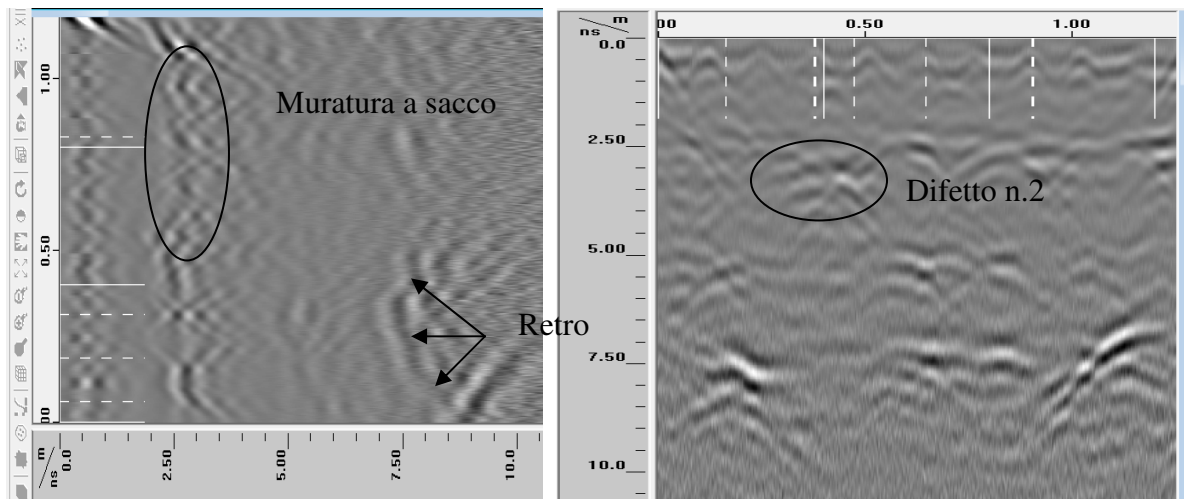


Figura 11.25 Sezioni verticali e orizzontali del muretto PNDF in corrispondenza dei difetti.



*Figura 11.26 Radargramma verticale n.°030 (a sinistra) eseguito in corrispondenza della mezzeria del muretto PNDP (retro) con antenna Palm (2 GHz). A destra radargramma orizzontale n.° 034 eseguito sul 7° corso: è possibile osservare il difetto n.° 2 nonostante sia posizionato in altro corso, ma non il n.° 1.*

Mettendo a confronto i radargrammi acquisiti in questa posizione (Figura 11.26, a destra) con quelli eseguiti sul corso n. 5 (Figura 11.28, a sinistra), si nota che tale profondità diminuisce passando da 3 ns nel primo caso a 2,5 ns nel secondo. Il difetto n.° 1 non viene rappresentato nel secondo radargramma in quanto, essendo posizionato più in superficie, non viene raggiunto dal cono di onde elettromagnetiche generato dall'antenna Palm (Figura 11.26, a destra).

Nelle linee verticali acquisite in corrispondenza delle sezioni principali del muretto risultano ben visibili i difetti inseriti nella parte bassa (corso 5), mentre diventa poco chiara la lettura del sacco: infatti, come visto in precedenza, questo si presenta come una serie di riflessioni caotiche di difficile interpretazione. Per individuare i punti di inizio e fine di tale tipologia costruttiva è necessario osservare altri dettagli come la perdita della regolarità delle riflessioni ed il loro spostamento a profondità maggiori (Figura 11.27, a sinistra) o la riflessione del retro del muretto che risulta visibile solo al di fuori del sacco (Figura 11.27, a destra).

Nonostante l'estensione verticale dei difetti n.°1 e 2 sia uguale e pari ad un corso, dai radargrammi acquisiti lungo le sezioni A-A' e B-B' è possibile notare ancora una volta che il difetto posizionato più in profondità sembra avere uno sviluppo maggiore; anche la loro rappresentazione risulta diversa mostrando due iperboli molto ravvicinate nel primo caso e due riflessioni più distaccate nel secondo (Figura 11.27).

Osservando il radargramma acquisito lungo la linea orizzontale corrispondente al corso 5, si nota che l'estensione longitudinale del difetto superficiale (n.° 1) risulta visivamente meglio definita rispetto a quella del difetto più profondo (n.° 2): in questo caso risulta difficoltoso apprezzare la differente larghezza dei due elementi analizzati (Figura 11.27, a sinistra) pari a 12,5 cm per il n.°1 e



27 cm per il n.º2. Nella linea radar eseguita sul corso 15, invece, oltre ad osservare la riflessione del fronte del sacco, sembra possibile individuarne anche il retro (circa 5 ns), mentre non è chiaramente individuabile l'estensione laterale (Figura 11.28, a destra).

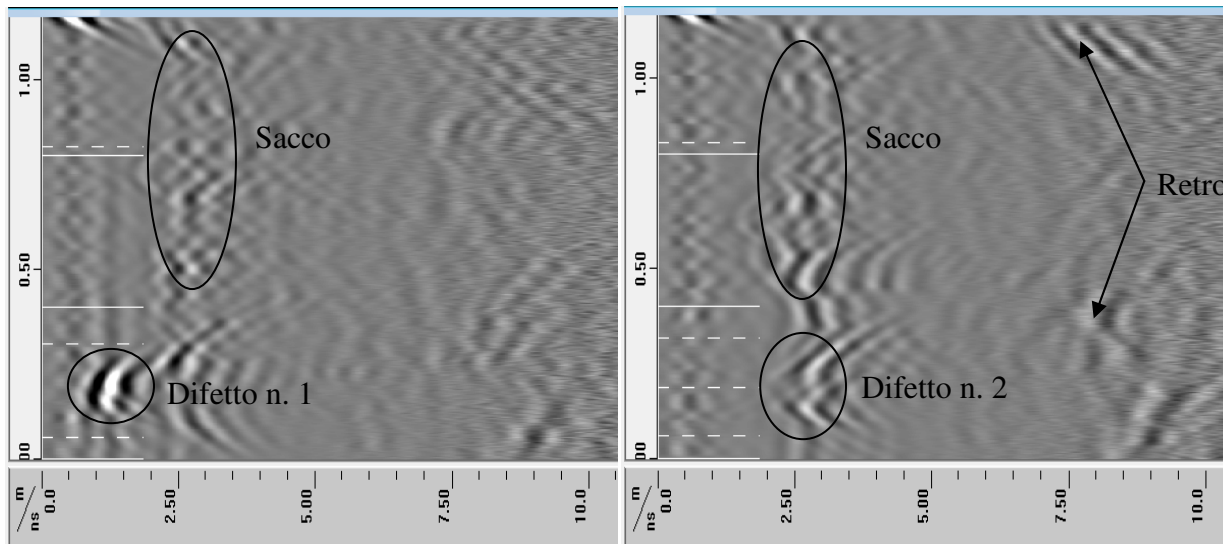


Figura 11.27 Radargrammi n.º028 (a sinistra, sezione B-B') e 031 (a destra, sezione A-A') eseguite sul retro del muretto PNDF con antenna Palm (2 GHz) il giorno 16/07/2010.

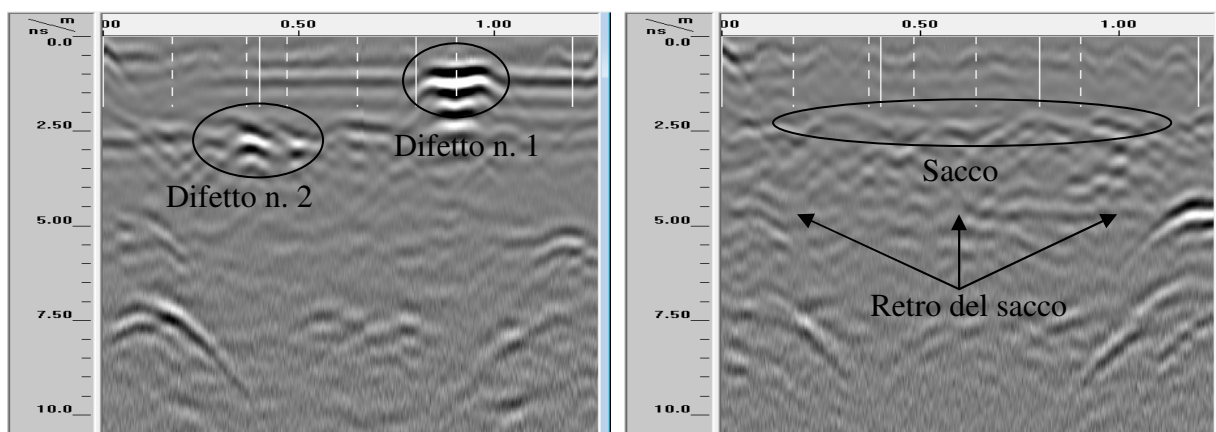


Figura 11.28 Linee radar n.º 033 (corso 5) e 035 (corso 15) eseguite il giorno 16/07/2010 sul retro del muretto PNDF con antenna Palm (2 GHz).

Come detto in precedenza, nella prima giornata di prove è stata utilizzata una griglia radar posizionata in alto a destra sul fronte del muretto PNDF: da questi dati è stato possibile ottenere un volume tridimensionale dell'area analizzata. Dalle sezioni più superficiali del volume è stata osservata la disposizione dei laterizi e dei giunti di malta mentre al di sotto di questi, il sacco si presenta come una serie di riflessioni casuali di cui risulta difficile l'interpretazione (Figura 11.29).

Per l'analisi della posizione dei difetti sono stati utilizzati i file acquisiti nella seconda giornata di prove (16/07/2010): le linee verticali sono quelle corrispondenti ai file 028 e 031 mentre per quelle orizzontali sono stati utilizzati i file 035 e 033. Dall'analisi di questi radargrammi non è stato possibile definire la posizione del difetto n.º3 in quanto, avendo acquisito le sezioni radar sul retro del muretto, tale elemento risulta coperto dal sacco (Tabella 11.14).

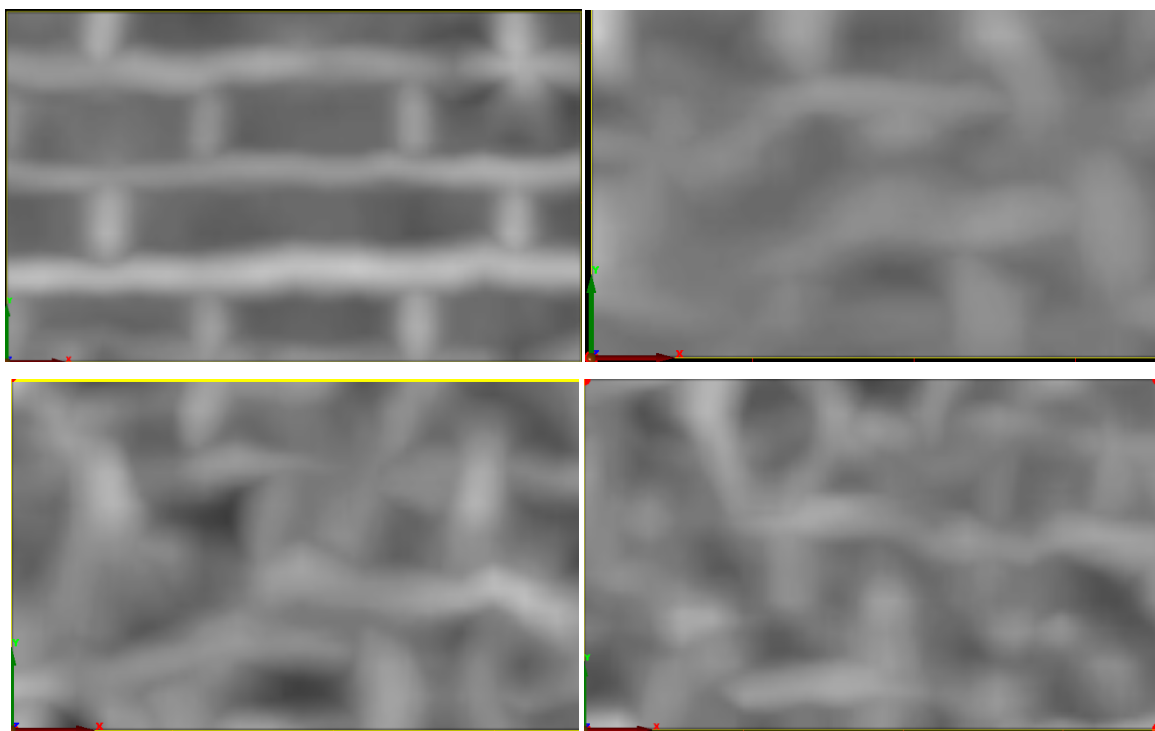


Figura 11.29 Sezioni radar del volume 3D ricavato dai dati acquisiti sul fronte del muretto PNDF il giorno 09/07/2010. Sezione superficiale (0 cm, a sinistra), ad inizio sacco (12 cm a destra e, in presenza del sacco (15 e 17 cm, in basso)

Tabella 11.14 Posizioni iniziali finali e centrali delle riflessioni individuate nei radargrammi acquisiti sul retro del muretto PNDD il giorno 16/07/2010 con antenna Palm. . La profondità in metri è stata calcolata con velocità pari a 0,11 m/ns.

Difetto	Profondità		Larghezza (m)				Altezza (m)				file
	(m)	(ns)	centro	inizio	fine	delta	centro	inizio	fine	delta	
4	0.125	2.27 (media)					*	0.416	1.040	0.625	28
2	0.128	2.330					0.180	0.090	0.269	0.180	
3	0.124	2,25 (media)					*	0.376	1.010	0.634	31
1	0.045	0.810					0.173	0.106	0.259	0.153	
4	0.115	2,09 (media)	*	0.166	1.070	0.904					35
2	0.128	2.330	0.372	0.333	0.452	0.120					
1	0.043	0.790	0.901	0.825	0.981	0.156					33

## 11.5 Interpretazione dei risultati

I risultati ottenuti in questa analisi vengono riportati cercando di valutare la precisione del posizionamento dei difetti osservati nei radargrammi rispetto alla loro reale conformazione; in questo modo si cerca di valutare la tecnica radar GPR come strumento di analisi quantitativa e non solo qualitativa.

Le profondità all'interno di un radargramma sono espresse in nanosecondi (ns, un tempo) e per trasformarli in lunghezze è necessario moltiplicare tali valori per una velocità: nei dati raccolti, tale valore è stato scelto pari a 0,11 m/ns, velocità media di propagazione del segnale nei muretti. In alcuni casi, la profondità è stata calcolata come media dei valori ricavati per la stessa riflessione: infatti, in alcuni casi, il difetto (o la pietra) è stato osservato in due linee radar differenti (verticale ed orizzontale) ricavando così due valori che spesso si sono rivelati diversi, ma molto simili tra loro. I risultati verranno mostrati mettendo a confronto i dati reali della geometria con quelli ricavati dai radar e la differenza verrà espressa in punti percentuali tra le rilevazioni.

### 11.5.1 PNDA

Le pietre inserite in questo muretto hanno quasi tutte le stesse dimensioni, solamente la n.° 2 e la n.° 6 (Arenarie di Varignana) hanno una larghezza minore delle altre (9,7 e 7 cm rispettivamente). Per la valutazione della profondità, è stata presa in considerazione l'interfaccia tra inclusione e giunto di malta (13 cm = 12 cm del laterizio + 1 cm di malta) avendo acquisito le linee radar sul retro del provino.

I risultati hanno mostrato che la migliore approssimazione è stata fornita per il posizionamento della profondità delle riflessioni in cui l'errore risulta inferiore al 10% se si escludono i dati ricavati per le pietre n.° 5 e 6 che, come osservato nel paragrafo 11.4.3, risultano di non semplice individuazione all'interno dei radargrammi. Tutte le profondità rilevate tramite i radargrammi risultano superiori a quelle reali.

La valutazione delle larghezze delle pietre, invece, ha portato ad errori più elevati: i risultati variano tra -13% (la dimensione ricavata tramite i dati radar è minore di quella reale) ad un +43%, non considerando ancora una volta le inclusioni n.° 5 e 6; in questo caso, la larghezza della pietra n.° 5 presenta un ottimo risultato (solo -1%) mentre la n.° 6 il peggiore di quelli osservati (49%).

Le altezze rilevate nei radargrammi presentano tutte un notevole divario rispetto a quelle reali: il valore minore è stato osservato in corrispondenza della pietra n.° 4 (34%) mentre per tutte le altre la differenza è superiore al 40%. Questa notevole differenza tra dimensioni reali e quelle ricavate con indagini radar è spiegabile notando che gli errori di valutazione più elevati si presentano sulle

piccole dimensioni: infatti, l'altezza reale delle pietre è di 5,5 cm mentre l'estensione più piccola osservata nei radargrammi è pari a 8,3 cm (pietra n.° 4). Questo fenomeno, escluse alcune anomalie (pietra n.°7), è osservabile anche per le larghezze: infatti, le differenze maggiori sono state rilevate in corrispondenza delle pietre con estensione minore (n.° 2 e 6) (Tabella 11.15).

*Tabella 11.15 Dimensioni delle pietre nel muretto PNDA: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 16/07/2010 eseguito sul retro del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar. In giallo i dati provenienti dai file del giorno 09/07/2010*

Pietra	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.13	0.12	0.055	0.143	0.122	0.094	0.09	0.02	0.42
2	0.13	0.097	0.055	0.139	0.133	0.130	0.07	0.27	0.58
3	0.13	0.12	0.055	0.138	0.106	0.110	0.06	-0.13	0.50
4	0.13	0.12	0.055	0.136	*	0.083	0.04	*	0.34
5	0.13	0.12	0.055	0.086	0.119	0.094	-0.52	-0.01	0.42
6	0.13	0.07	0.055	0.109	0.136	0.096	-0.19	0.49	0.43
7	0.13	0.12	0.055	0.131	0.210	0.133	0.01	0.43	0.58

### 11.5.2 PNDB

La presenza dei sensori di potenziale installati su questo muretto non ha permesso una completa analisi delle pietre: infatti, è stato possibile ricavare informazioni solamente per 4 pietre (n.° 1, 4, 5 e 6). In questo caso, le linee di acquisizione sono state eseguite sul fronte del muretto e la profondità ricavata, quindi, corrisponde con l'estensione della pietra visibile nei radargrammi. Le dimensioni delle prime tre inclusioni sono di 5,5 x 12 x 12 cm mentre l'ultima analizzata, la n.° 6 (Arenaria di Varignana) è leggermente inferiore e pari a 5,5 x 8 x 11 cm.

Le profondità ricavate dai radargrammi risultano meno precise rispetto quelle osservate per il muretto PNDA e sono tutte inferiori a quelle reali: come visto nel paragrafo 11.4.4, in presenza delle pietre il segnale aumenta la sua velocità, ma avendo convertito i tempi che misurano le profondità con valori di velocità inferiori (0,11 m/ns calcolati in assenza delle inclusioni), le lunghezze ricavate saranno minori.

La valutazione delle larghezze delle pietre risulta in questo caso buona, con errori inferiori al 10% per le inclusioni più grandi, e del 25% per quella più piccola (n.°6); anche in questo caso, si nota che risulta difficile rilevare dimensioni piccole con una buona precisione, fattore confermato osservando i risultati ottenuti per le altezze. In questo caso, infatti, solamente per la pietra n.°4 (Arenaria di Stoccarda) è stato ottenuto un errore del 3%, mentre negli altri casi tale differenza è superiore al 40% (Tabella 11.16).

*Tabella 11.16 Dimensioni delle pietre inserite nel muretto PNDB: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 09/07/2010 eseguite sul fronte del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar. In giallo i dati provenienti dai file del giorno 21/07/2010*

Pietra	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.12	0.12	0.055	0.118	0.133	0.103	-0.01	0.09	0.47
2	0.12	0.087	0.055	*	*	*	*	*	*
3	0.13	0.12	0.055	*	*	*	*	*	*
4	0.12	0.12	0.055	0.102	0.110	0.057	-0.18	-0.09	0.03
5	0.12	0.12	0.055	0.097	0.126	0.097	-0.24	0.05	0.43
6	0.11	0.08	0.055	0.095	0.106	0.110	-0.16	0.25	0.50
7	0.12	0.12	0.055	*	*	*	*	*	*

### 11.5.3 PNDC

Anche nell'ultimo muretto a due teste non è stato possibile rilevare tutti i dati per le pietre presenti; i dati acquisiti in un'unica giornata, non sono stati sufficienti per poter valutare tutte le dimensioni delle inclusioni. Le pietre n.° 1, 3 e 4 presentano le stesse dimensioni 5,5 x 12 cm mentre la n.° 2 è di altezza minore (3,5 cm).

Per questo muretto, le profondità rilevate nei radargrammi risultano meno precise rispetto a quelle osservate per gli altri due muretti a 2 teste: i valori ricavati tramite analisi radar risultano quasi tutti inferiori rispetto a quelli reali, solamente la prima pietra approssima la posizione per eccesso (4%).

Anche la valutazione delle larghezze risulta piuttosto variabile (tra 9 e 58%) presentando differenze maggiori per i dati ricavati in corrispondenza del corso inferiore (n.° 6); osservando i valori ottenuti lungo una linea orizzontale (pietre n.° 1, 2 e 3 e pietre n.° 4, 5 e 6) i risultati migliori sono stati ricavati per le inclusioni posizionate al centro (n.° 2 e 5).

Ancora una volta, la valutazione dell'altezza della pietra più grande risulta più precisa (n.° 4, 17%) rispetto a quella più piccola (n.° 2, 56%) (Tabella 11.17).

*Tabella 11.17 Dimensioni delle pietre nel muretto PNDC: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 16/07/2010 eseguite sul retro del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar.*

Pietra	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.13	0.12	0.055	0.135	0.076	*	0.04	-0.58	*
2	0.13	0.12	0.035	0.124	0.160	0.080	-0.05	0.25	0.56
3	0.13	0.12	0.055	0.108	0.077	*	-0.20	-0.57	*
4	0.13	0.12	0.055	0.118	0.106	0.066	-0.10	-0.14	0.17
5	0.13	0.12	0.035	*	0.110	*	*	-0.09	*
6	0.13	0.12	0.055	*	0.103	*	*	-0.17	*

#### 11.5.4 PNDD

I difetti inseriti in questo muretto hanno tutti la stessa larghezza mentre le altre dimensioni risultano variabili; lungo uno stesso corso, il difetto posizionato nella sezione B-B' risulta più superficiale rispetto a quello visibile nella sezione A-A'.

Le profondità calcolate tramite i dati radar mostrano un errore maggiore in corrispondenza dei difetti posizionati lungo la sezione principale B-B' in cui si raggiungono differenze del 63% in presenza del difetto n.° 6, posizionato più vicino alla superficie d'indagine, mentre quelle ricavate per la sezione A-A' mostrano differenze minori, il cui massimo è visibile in presenza del difetto n.°3 (16%). Questo fenomeno è spiegabile osservando che 1 cm di differenza tra i risultati ottenuti da indagini radar e le reali dimensioni dell'oggetto, ha un peso maggiore se confrontato con piccole distanze (difetto superficiale), mentre inciderà in maniera minore su grandi distanze (difetto profondo).

Le larghezze individuate tramite radargramma per i difetti posizionati lungo la sezione B-B' (n.° 2, 4 e 6) presentano degli errori inferiori rispetto a quelli valutati per la sezione A-A' nonostante la loro dimensione trasversale sia identica: questo fenomeno può essere spiegato osservando che nella sezione B-B' i difetti sono posizionati più in superficie rispetto agli altri e risulta più facile poterne definire l'estensione in quanto la riflessione che li descrive è più netta.

Questo fenomeno è osservabile anche nella valutazione delle altezze: i difetti n.° 2, 4 e 6 presentano errori minori rispetto agli elementi posizionati sullo stesso corso, ma in corrispondenza dell'altra sezione principale del muretto (n.° 1, 3, 5). Le differenze più piccole in percentuale sono visibili per i difetti n.° 3 e 4 che presentano uno sviluppo maggiore (Tabella 11.18).

*Tabella 11.18 Dimensioni dei difetti nel muretto PNDD: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 16/07/2010 sul retro del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar.*

Difetto	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.255	0.27	0.075	0.241	0.143	0.161	-0.06	-0.89	0.53
2	0.13	0.27	0.075	0.114	0.306	0.106	-0.15	0.12	0.29
3	0.255	0.27	0.14	0.221	0.219	0.156	-0.16	-0.23	0.10
4	0.12	0.27	0.14	0.093	0.274	0.133	-0.30	0.02	-0.05
5	0.19	0.27	0.075	0.176	0.229	0.116	-0.08	-0.18	0.35
6	0.07	0.27	0.075	0.043	0.243	0.099	-0.63	-0.11	0.24



### 11.5.5 PNDE

I difetti presenti in questo muretto sono di dimensioni diverse: quelli posizionati più in basso (corso 6), sono larghi 27 cm e alti 20,5 cm (pari a 3 corsi), quelli a metà muretto hanno la stessa larghezza dei precedenti, ma altezza minore (2 corsi, 14 cm) mentre quelli posti in alto (corso 17) hanno dimensioni pari a 12 x 7,5 cm (larghezza x altezza).

Osservando le profondità è possibile notare che i valori ricavati dai radargrammi per i difetti posizionati in corrispondenza della sezione B-B' presentano errori maggiori rispetto a quelli ricavati nella sezione A-A': infatti, nel primo caso, la profondità dei questi è inferiore. Questo fenomeno conferma quanto già osservato per il muretto PNDD.

I risultati ottenuti per le larghezze evidenziano degli errori inferiori per i difetti con estensione minore (n.° 5 e 6), e per quelli posizionati su uno stesso corso, l'approssimazione migliore viene fornita per i difetti posizionati a minore profondità (difetti n.° 2, 4 e 6). I risultati ottenuti per le altezze mostrano un andamento simile, con la sola eccezione dei difetti n.° 3 e 4 per i quali si presenta un'inversione dei valori (errore più piccolo per il difetto posizionato a maggiore profondità) (Tabella 11.19).

*Tabella 11.19 Dimensioni dei difetti nel muretto PNDE: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 16/07/2010 sul retro del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar*

Difetto	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.245	0.27	0.205	0.236	0.192	0.110	-0.04	-0.41	-0.87
2	0.125	0.27	0.205	0.116	0.210	0.153	-0.08	-0.29	-0.34
3	0.185	0.27	0.14	0.164	0.209	0.139	-0.13	-0.29	-0.01
4	0.065	0.27	0.14	0.043	0.249	0.166	-0.51	-0.08	0.16
5	0.19	0.125	0.075	0.169	0.116	0.106	-0.13	-0.07	0.29
6	0.13	0.125	0.075	0.106	0.117	0.070	-0.23	-0.07	-0.07

### 11.5.6 PNDF

I difetti presenti in questo muretto consistono in una muratura a sacco nella parte alta del provino e di due elementi di diversa larghezza ma uguale altezza in corrispondenza del corso n.° 5. Per questo muretto non è stato possibile rilevare il difetto n.° 3 in quanto le linee di acquisizione dei dati sono state eseguite sul retro del provino e la presenza del sacco ha nascosto la visione del difetto.

Osservando i risultati ottenuti, si nota che la stima della profondità ricavata dai radargrammi per il difetto n.°2 e per il sacco risulta ottima (errore pari all'1%) mentre per il n.° 1 si riscontra un valore

maggiore (errore = 36%); come visto in precedenza, tale fenomeno è influenzato dalla vicinanza del difetto alla superficie d'indagine.

La stima della larghezza del difetto n.° 1 e della muratura a sacco risulta pari o inferiore al 20%, mentre per il secondo difetto i risultati ricavati con l'indagine radar sono nettamente inferiori rispetto alla reale geometria dell'oggetto (126%).

L'errore di valutazione delle altezze non risulta inferiori al 50% per i due difetti posizionati sul corso 5 mentre per il sacco l'approssimazione è inferiore del 16%. Anche in questo caso ha una notevole importanza la dimensione ispezionata: infatti, per il sacco, un errore di valutazione di circa 10 cm ha un peso pari al 16% mentre, per il difetto n.° 1, 8 cm corrispondono al 51% (Tabella 11.20).

*Tabella 11.20 Dimensioni dei difetti nel muretto PNDF: confronto tra valori reali (geometria) e quelli radar del giorno 16/07/2010 sul retro del provino. Errore espresso in percentuale e riferito ai dati radar*

Difetto	Geometria (m)			Radar (m)			Errore (%)		
	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.	Profon.	Largh.	Alt.
1	0.06	0.125	0.075	0.044	0.156	0.153	-0.36	0.20	0.51
2	0.13	0.27	0.075	0.128	0.120	0.196	-0.01	-1.26	0.62
3	0.12	1.05	0.725	0.124	*	0.634	0.03	*	-0.14
4	0.12	1.05	0.725	0.119	0.904	0.625	-0.01	-0.16	-0.16

## 11.6 Osservazioni e suggerimenti

L'indagine condotta in questo capitolo ha mostrato che la tecnica radar non può essere utilizzata come una prova in grado di fornire dati quantitativi: infatti, nonostante siano note le caratteristiche dei materiali utilizzati per la costruzione dei muretti, delle inclusioni in pietra e dei difetti e si conosca la posizione dei singoli elementi e la loro forma, risulta difficile poter valutare con precisione dimensioni e posizioni.

Dall'analisi dei radargrammi è possibile notare che uno stesso difetto, posizionato a profondità diverse, viene rappresentato in maniera diversa complicando la lettura dei dati. Per definire con precisione la geometria degli elementi ispezionati, è necessario che questi siano posizionati il più possibile vicino alla superficie di trascinamento dell'antenna e che l'estensione di questi in direzione parallela alla linea d'indagine sia superiore o uguale ai 12 cm: al di sotto di tale valore i risultati subiscono un notevole incremento dell'errore di valutazione.

Se le dimensioni planimetriche (larghezze ed altezze) risultano influenzate positivamente dalla vicinanza tra i difetti e l'antenna, per la valutazione della profondità risulta valido l'opposto: infatti, maggiore è la profondità dell'oggetto, minore sarà l'errore (in percentuale) ad esso associato. Il

calcolo delle profondità è influenzato da diversi parametri che in un mezzo eterogeneo come la muratura risultano difficili da valutare: in questo studio, è stato possibile ottenere dei buoni risultati in quanto le velocità utilizzate nei calcoli sono state ricavate proprio sugli elementi analizzati. Gli errori di misurazione elevati osservati per questa grandezza sono causati dalla poca profondità di alcuni elementi: infatti, per piccoli valori reali della profondità del difetto (es.: difetto n.° 4, muretto PNDD, profondità = 0,065 m), anche una buona stima di tale grandezza (profondità radar = 0,043 m) può provocare errori percentuali elevati (errore = 51%).

## Capitolo 12

# SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO: INDAGINI DI VUOTI IN LATERIZI TRAMITE TERMOGRAFIA IR ATTIVA

---

### 12.1 Scopi delle prove

Lo scopo delle prove eseguite in laboratorio tramite la termografia IR attiva il giorno 25/11/2011 è quello di indagare la presenza di vuoti di varia forma e a diversa profondità artificialmente creati all'interno di laterizi pieni; tale analisi è stata finalizzata ad individuare quale differenza di temperature consentisse di meglio localizzare i vuoti durante il raffreddamento dei laterizi e quale tipologia di vuoto fosse più facilmente visibile utilizzando questa tecnica d'indagine. La prova è stata eseguita nella sala malte del laboratorio LISG del Dipartimento DICAM in via Terracini.

### 12.2 I laterizi utilizzati nella prova

Le tipologie di laterizio utilizzate per questa prova sono due, pieno standard e forato standard prodotti dalla IBL. Le dimensioni del primo elemento sono 5,5 x 12 x 25 cm, mentre quelle del secondo elemento sono 5,5 x 13,5 x 28 cm (Figura 12.1 e Tabella 12.1). Per la prova sono stati utilizzati un mattone forato industriale e 12 mattoni pieni standard di cui uno dotato di termocoppia e 9 forati con carotatrice per simulare diverse tipologie di cavità.

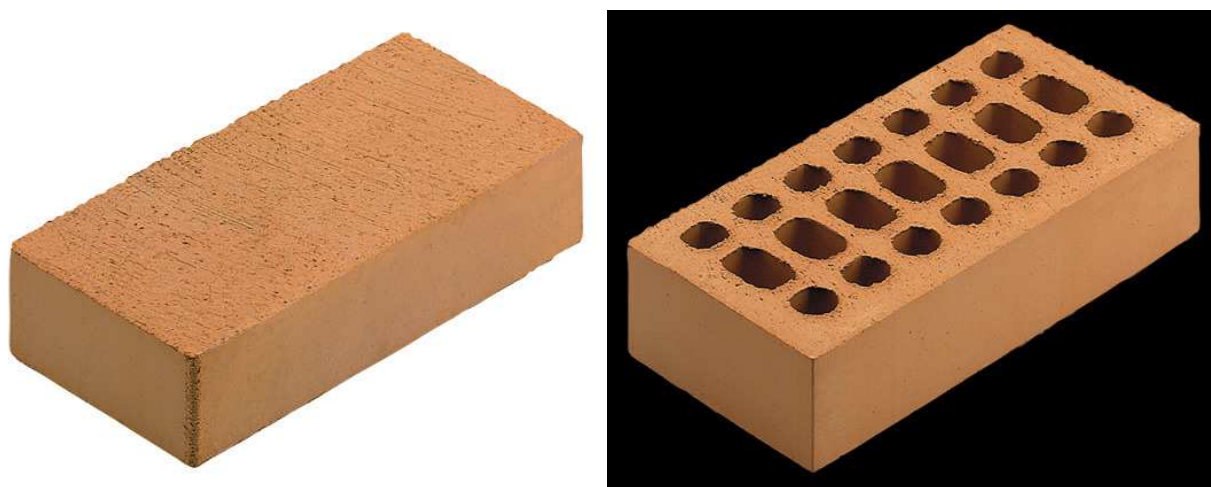


Figura 12.1 Immagini delle due differenti tipologie di laterizio utilizzate nella prova: mattone pieno standard (a sinistra) e mattone industriale standard (a destra).

([http://www.iblspa.it/ibl/28/mattoni\\_da\\_intonaco.aspx#TyKKZPnN18E](http://www.iblspa.it/ibl/28/mattoni_da_intonaco.aspx#TyKKZPnN18E))

*Tabella 12.1 Caratteristiche dei laterizi utilizzati nella prova.*

	<b>Mattone pieno UNI</b>	<b>Mattone forato industriale</b>
<b>Lunghezza [mm]</b>	250	280
<b>Larghezza [mm]</b>	120	135
<b>Altezza [mm]</b>	55	55
<b>Massa volumica netta [Kg/mc]</b>	1750	1740
<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	0,530	0,400 (equivalente)

### **12.3 Strumentazione utilizzata**

La strumentazione utilizzata in queste prove consiste in una cella climatica per poter riscaldare i laterizi da sottoporre ad analisi, una termocoppia collegata ad una centralina di acquisizione per il monitoraggio della temperatura, una termocamera per registrare i dati da analizzare, un termoigrometro per rilevare temperatura ed umidità della sala di prova ed una macchina fotografica per documentare le varie fasi della prova. Nelle preparazione dei laterizi è stato utilizzato un trapano con fresa per rifinire i fori creati tramite carotatrice.

#### 12.3.1 Cella climatica



*Figura 12.2 Forno utilizzato nella fase di riscaldamento dei laterizi.*

La cella climatica Heraeus Kendro T/UT 6760 (Tabella 12.2) ha permesso di sottoporre i laterizi alla temperatura di 100°C per circa sei ore (dalle 9:15 alle 15:00); al termine del trattamento la

temperatura dei laterizi ha raggiunto i 96.8°C (registrati tramite una termocoppia applicata ad uno dei mattoni).

Tabella 12.2 Caratteristiche tecniche della cella climatica Heraeus Kendro T/UT 6760.

([http://vitw.cms.schunk-group.com/sixcms/media.php/1197/HeatingandDryingOvens6000\\_E\\_03.pdf](http://vitw.cms.schunk-group.com/sixcms/media.php/1197/HeatingandDryingOvens6000_E_03.pdf))

Temperature			300	300	300	300	300	300
Temperature range <sup>1)</sup>		°C	300	300	300	300	300	300
Spatial temperature deviation <sup>2)</sup>	at 70 °C	± °C	1.5	2/1	2/1	2/1	3/1.5	2/2
	at 150 °C	± °C	3	4/3	4/3	4/3	3.5/3	5/4
	at 300 °C	± °C	6	5/7	5/7	5/6	4/6	6/7
Temp. deviation over time		± °C	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Times								
Heating-up times	70 °C	min <sup>2)</sup>	15	15/8	10/10	20/7	40/10	55/12
to 98% of	150 °C	min <sup>2)</sup>	30	25/18	20/20	30/23	35/30	55/30
	300 °C	min <sup>2)</sup>	75	60/55	60/60	65/65	70/80	80/85
Recovery time <sup>3)</sup>								
to 98% of the	at 70 °C	min	2	4/1	4/1	5/2	6/1	3/1
initial value	at 150 °C	min	6	6/4	4/5	5/4	11/6	5/6
	at 300 °C	min	10	12/8	9/11	10/11	18/10	8/11
Air exchange max. no. of air exchanges 1/h								
(air flap open)	at 70 °C	1/h	14	7/36	19/32	11/29	11/20	10/18
	at 150 °C	1/h	34	12/35	21/29	15/28	16/20	14/18
	at 300 °C	1/h	33	14/33	25/27	21/20	21/21	12/12
Fresh air flow								
(air flap open)	at 70 °C	m³/h	0.6	0.5/2.7	2.6/4.4	2.6/7.0	5.6/9.8	8.6/15.0
	at 150 °C	m³/h	1.45	0.9/2.7	2.9/4.0	3.6/6.7	7.8/9.8	12.0/15.5
	at 300 °C	m³/h	1.4	1.1/2.5	3.4/3.7	5.0/4.8	10.3/10.3	10.3/10.3
Max. flow of circulating air								
(fan capacity) at 20 °C		m³/h	-	2.0	5.5	5.2	5.9	6.2
Electrical data								
Rated voltage (50/60 Hz) <sup>4)</sup>		V	230~	230~	230~	230~	400.3~/N	400.3~/N
Rated power		kW	0.8	1.6/1.65	2.2/2.4	2.7/2.8	4.1/4.2	6.1/6.3
Heat emission	at 70 °C	Wh/h	55	75/185	85/265	120/325	210/420	280/520
	at 150 °C	Wh/h	150	200/410	265/580	350/695	610/1100	890/1250
	at 300 °C	Wh/h	415	550/900	780/1280	1000/1570	1800/2500	2600/3300

<sup>1)</sup> Control range T: electronic controller from T<sub>ambient</sub> +10 °C to 300 °C; control range UT: electronic controller from T<sub>ambient</sub> +20 °C to 300 °C

<sup>2)</sup> The values stated apply to the unloaded oven in conjunction with wire mesh trays (measurement according to DIN 12880, Part 2), air flap closed.

<sup>3)</sup> Door open for 60 s

<sup>4)</sup> Other voltages on request

### 12.3.2 Centralina

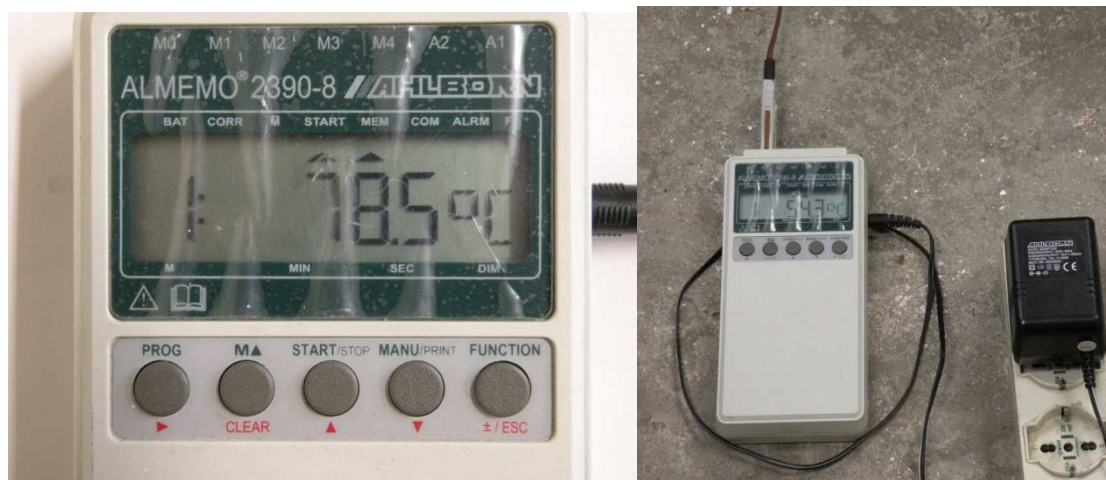


Figura 12.3 Centralina ALMEMO 2390-8 AHLBORN.



La centralina digitale di acquisizione dati ALMEMO 2309-8 AHLBORN (Figura 12.3) consente di visualizzare sullo schermo e registrare nella memoria interna i valori della temperatura forniti dalla termocoppia ad esso collegata. I dati registrati vengono poi forniti in colonne tempo-temperatura per poter essere analizzati e graficati. Nelle prove analizzate in questo capitolo i dati della termocoppia non sono stati acquisiti a causa di una errata impostazione, ma è stato in ogni caso possibile utilizzare alcuni valori visualizzati durante il test in quanto erano stati riportati negli appunti.

*Tabella 12.3 Caratteristiche tecniche della centralina ALMEMO 2390-8*  
[\(<http://www.ahlborn.com/download/ba/eng/23908e.pdf>\)](http://www.ahlborn.com/download/ba/eng/23908e.pdf).

<b>Technical data</b> (s.a. Hb. 2.2)	
<b>Measuring inputs :</b>	5 ALMEMO® sockets for ALMEMO® flat connectors
<b>Channels :</b>	4 channels / sensor maximum (measuring and function channels, depending on sensor type) 4 function channels in device
<b>A/D converter :</b>	delta - sigma, 16-bit, 2.5 / 10 meas. per second
<b>Sensor power supply :</b>	Battery : 7 to 9 V, max. 70 mA Mains adapter : approx. 12 V, max. 100 mA
<b>Outputs :</b>	Two ALMEMO® sockets for all output modules
<b>Equipment</b>	
<b>Display :</b>	6.5-digit 7-segment, 2-digit 16-segment, 12 mm
<b>Keypad :</b>	5 keys
<b>Date and time-of-day :</b>	buffered with device battery
<b>Memory (option S):</b>	522-KB EEPROM (6400 to 100000 meas. values)
<b>Microprocessor :</b>	M16C62
<b>Power supply :</b>	7 to 13 V DC, not electrically isolated
<b>Mains adapter :</b>	ZB 2290-NA, 230 V AC to 12 V DC, 200 mA, electrically isolated
<b>Adapter cable, electr. isol. :</b>	ZB 2290-UK, 10-30 V DC. to 12 V DC, 250 mA
<b>Current consumption</b>	active : approx. 10 mA (without input and output modules) standby: approx. 0.02 mA (real-time clock and sleep mode)
<b>Housing</b>	180 x 85 x 33 mm, ABS (acrylonitrile butadiene styrene) high impact resistance (maximum 70 °C)
<b>Environmental conditions :</b>	
<b>Operating temperature</b>	-10 to +60 °C
<b>Storage temperature</b>	-30 to +60 °C
<b>Ambient relative humidity :</b>	10 to 90 % (non-condensing)
<b>Delivery includes :</b>	Measuring instrument ALMEMO® 2390-8 Operating instructions ALMEMO® 2390-8 ALMEMO® Manual AMR-Control software

### 12.3.3 Termocamera

La termocamera (Figura 12.4) utilizzata in queste prove è la FLIR P620 con lente F40 e consente di registrare sia i termogrammi sia le corrispondenti immagini digitali del visibile in formato \*.JPEG. Con un singolo scatto dello strumento vengono salvati contemporaneamente i due file (l'immagine digitale ed il termogramma) ed il processo di salvataggio consente di registrare da 3 a 5 coppie di

file al minuto. Le impostazioni dello strumento utilizzate nella prova sono quelle di default potendo modificare i loro valori in fase di elaborazione dei dati.

Tabella 12.4 Caratteristiche tecniche della termocamera FLIR P620

([http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography\\_APAC/Products/Product\\_Literture/P620\\_Datasheet%20APAC.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/P620_Datasheet%20APAC.pdf))

FLIR P620 Technical Specifications	
<b>Imaging and optical data</b>	
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	24° × 18° / 0.3 m
Spatial resolution (IFOV)	0.65 mrad
Thermal sensitivity / NETD	40 mK @ +30°C
Image frequency	30 Hz
Focus	Automatic or manual (electric or on the lens)
Zoom	1–2× continuous, digital zoom, including panning
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5–13 μm
IR resolution	640 × 480 pixels
<b>Measurement</b>	
Temperature range	–40°C to +500°C
Accuracy	±2°C or ±2% of reading
<b>Measurement analysis</b>	
Spotmeter	3
Area	3 boxes or circles with max. / min. / average
Automatic hot / cold detection	Max / Min temp. value and position shown within box, circle or on a line
Isotherm	2 with above / below / interval
Difference temperature	Delta temperature between measurement functions or reference temperature
Reference temperature	Manually set or captured from any measurement function
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0 or selected from editable materials list
Measurement corrections	Reflected temperature, optics transmission, atmospheric transmission and external optics
<b>Storage of images</b>	
Image storage	Standard JPEG, including measurement data, on memory card
Image storage mode	IR / visual images; simultaneous storage of IR and visual images Visual image is automatically associated with corresponding IR image
Periodic image storage	Every 10 seconds up to 24 hours
Panorama	For creating panorama images in FLIR Reporter Building software
<b>Environmental data</b>	
Operating temperature range	–15°C to +50°C
Storage temperature range	–40°C to +70°C
Humidity (operating and storage)	IEC 68-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C
Encapsulation	IP 54 (IEC 60529)
Bump	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibration	2 g (IEC 60068-2-6)

Tabella 12.5 Valore dei parametri impostati nella termocamera

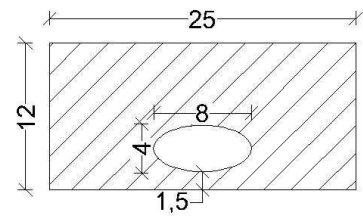
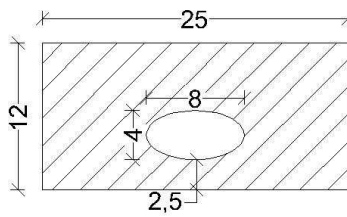
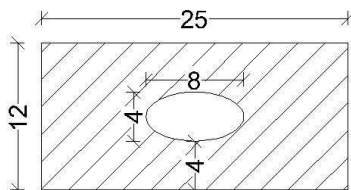
Emissività	Temperatura dell'aria (°C)	Umidità relativa (%)	Distanza dall'oggetto (m)
0,95	25	35	2.5



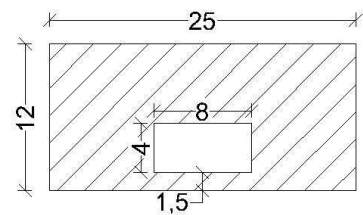
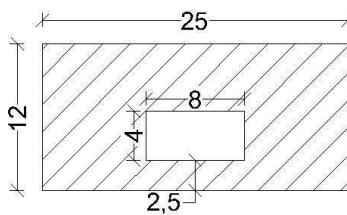
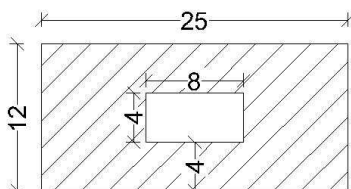
Figura 12.4 Termocamera FLIR P 620 utilizzata durante l'acquisizione dati.

## 12.4 Preparazione della prova

### Foro ellittico



### Foro rettangolare



### Foro circolare

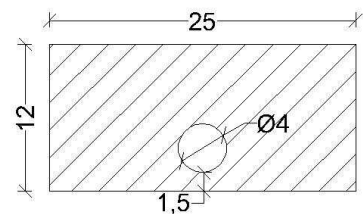
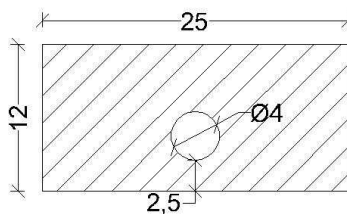
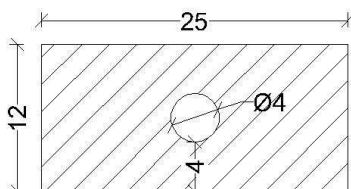


Figura 12.5 Forme e profondità dei fori eseguiti nei laterizi (dimensioni in cm).

La preparazione della prova ha previsto due fasi: nella prima sono stati creati i fori nei laterizi da sottoporre ad analisi mentre nella seconda sono state scelte le posizioni da assegnare ai mattoni nel corso del test. Nella fase di progettazione della prova sono state scelte tre differenti forme di foro

(circolare, rettangolare ed ellittica) e tre differenti profondità del foro rispetto alla faccia del laterizio che sarebbe stata inquadrata dalla termocamera (1,5 cm, 2,5 cm e 4,0 cm) (Figura 12.5).

#### 12.4.1 Preparazione dei laterizi

La scelta dei laterizi ha previsto dapprima una ispezione visiva dei mattoni da utilizzare in questa prova: dovendo eseguire i fori in prossimità di una faccia, sono stati cercati quegli elementi con il minor numero di difetti visibili superficialmente (crepe o non uniformità di materiale). Individuate le 9 unità necessarie per la prova, sono stati riportati su questi le tre diverse forme dei fori nelle tre diverse profondità previste: per fare questo sono state realizzate dei disegni a stampa 1:1 dei singoli laterizi con i rispettivi fori nei quali è stata poi ritagliata la sagoma del foro stesso. Facendo coincidere i bordi del disegno con quelli del mattone è stato possibile posizionare correttamente tali sagome. La fase di foratura dei laterizi ha comportato non pochi problemi: non essendo un'operazione prevista nei comuni utilizzi del mattone e non essendo presente nel mercato la strumentazione adatta a tale scopo, in un primo tempo sono stati eseguiti dei carotaggi di diametro 4 cm che, nel caso del foro circolare, hanno consentito di realizzare immediatamente il difetto interessato, ma per le altre due tipologie non hanno consentito di realizzare la forma desiderata. In particolare, per la forma rettangolare è stato necessario eseguire altri carotaggi di diametro inferiore ai precedenti (1,2 cm eseguiti con carotatrice da 1,4 cm) in corrispondenza degli spigoli più superficiali (Figura 12.6). La fase di rifinitura è stata eseguita con trapano e punta ogiva tronca per fresare di diametro 12 mm e lunghezza 30 mm (Figura 12.8) che ha consentito di eliminare le imperfezioni rimaste.



*Figura 12.6 Laterizio con foro rettangolare posizionato a 2,5 cm di profondità: nell'immagine è possibile notare i fori aggiuntivi da 1,2 cm eseguiti con carota da 1,4 cm nella parte frontale del mattone mentre questi non sono stati eseguiti sulla parte retrostante del foro.*





Figura 12.7 Laterizi dopo la fase di carotaggio: foro ellittico (a sinistra) e foro rettangolare (a destra). In quest'ultimo caso non sono ancora stati eseguiti i carotaggi in corrispondenza degli spigoli frontali.



Figura 12.8 Punta ogiva tronca e trapano utilizzati per la fresatura dei laterizi (<http://www.freserotative.com/inglese/listino/listino.pdf>)

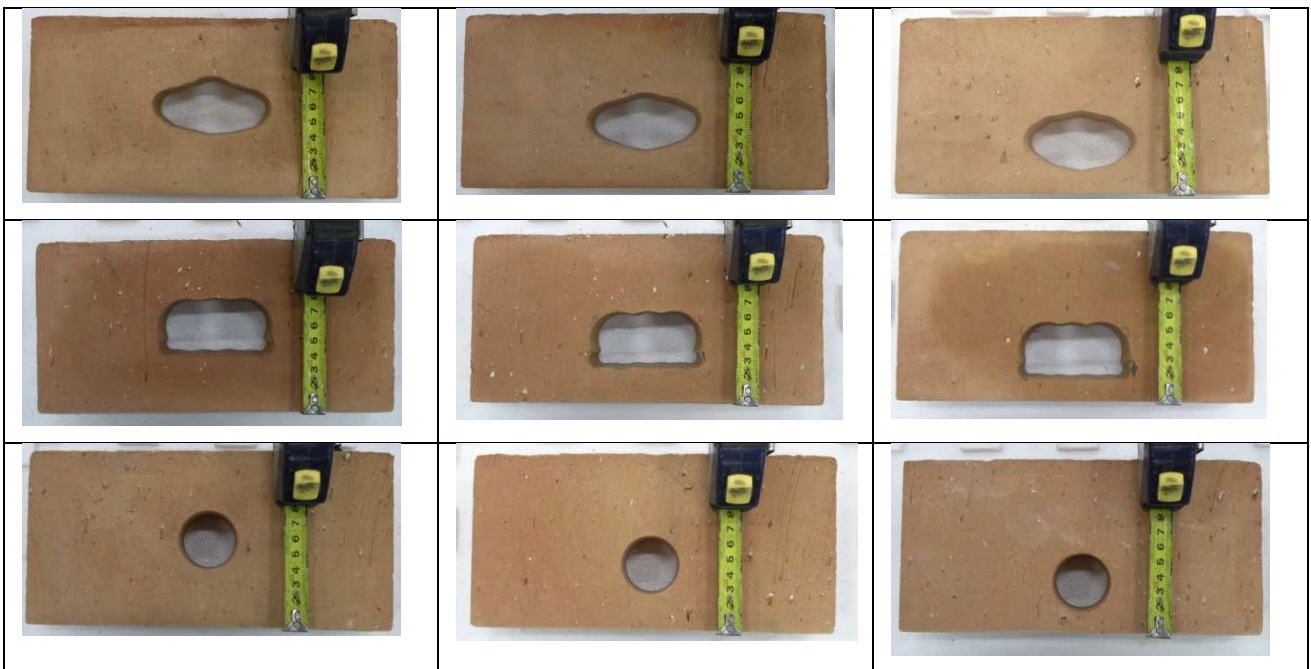
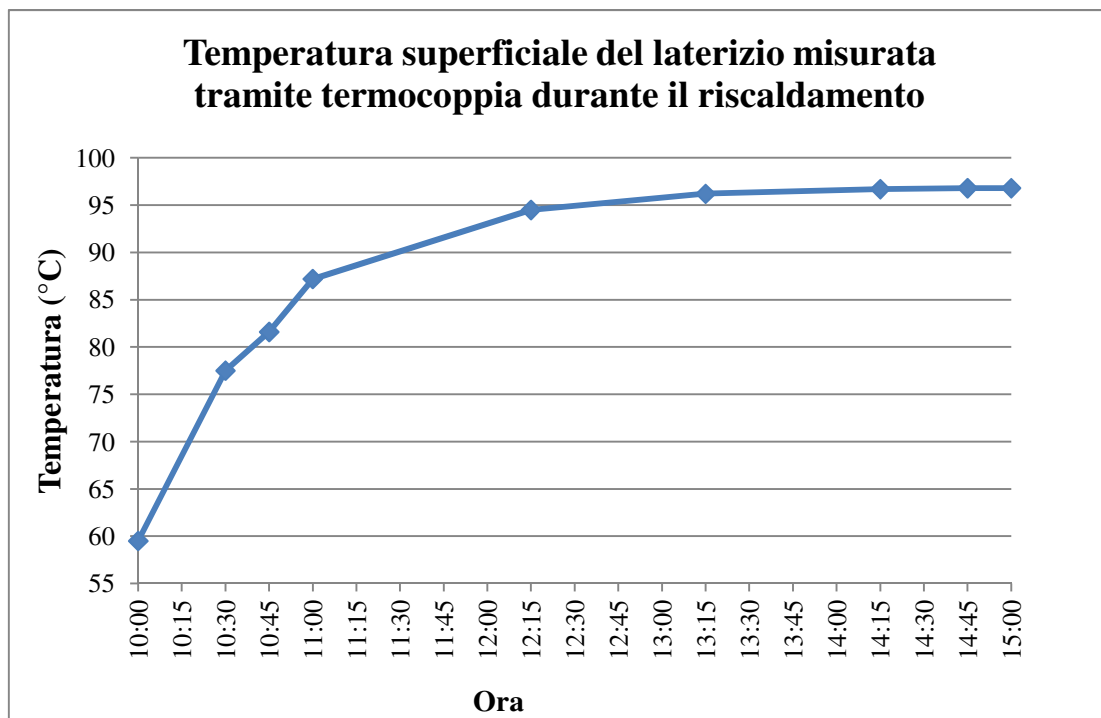


Figura 12.9 Laterizi al termine della fase di fresatura: nella colonna a sinistra si osservano i vuoti alla profondità di 4 cm, nella centrale quelli posizionati a 2,5 cm e in quella a destra i vuoti a 1,5 cm.

La difficoltà nella fresatura del laterizio non ha consentito di ottenere forme perfette e la rifinitura migliore è stata eseguita solamente su un lato del difetto, quello posizionato più vicino alla faccia da esporre alla termocamera, mentre per i restanti è stata eseguita solamente una sgrossatura (Figura 12.9). La preparazione dei provini ha previsto anche l'incollaggio di due fogli di polistirolo sulle facce di allettamento del laterizio: questa operazione è stata necessaria perché i fori non fossero a contatto diretto con l'aria e che all'interno di questi si creasse una camera d'aria in grado di trattenere calore durante la prova. L'incollaggio di tali fogli è stato realizzato tramite colla a caldo.

*Tabella 12.6 Valori di temperatura superficiale forniti dalla termocoppia durante la fase di riscaldamento dei laterizi in cella climatica.*

<b>Ora</b>	<b>Temp.</b>
<b>10:05</b>	59.5
<b>10:30</b>	77.5
<b>10:46</b>	81.6
<b>11:05</b>	87.2
<b>12:15</b>	94.5
<b>13:20</b>	96.2
<b>14:20</b>	96.7
<b>14:55</b>	96.8
<b>15:00</b>	96.8



*Figura 12.10 Andamento della temperatura superficiale del laterizio pieno provvisto di termocoppia durante la fase di riscaldamento durata circa 5 ore e 45 minuti.*

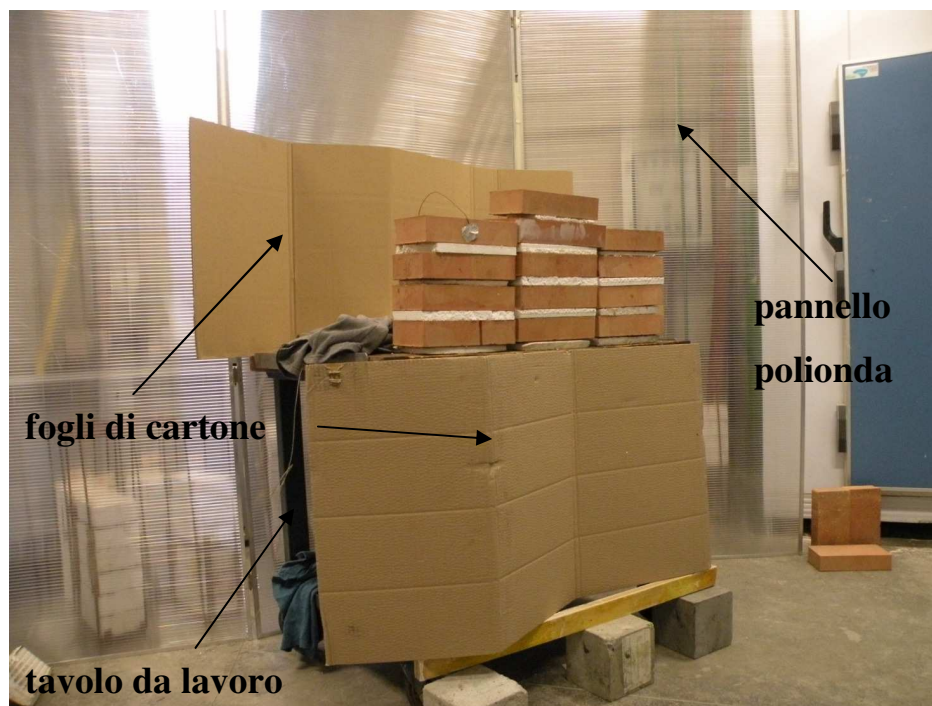


I laterizi così preparati sono stati utilizzati per diversi test ed hanno subito diversi passaggi in forno che hanno danneggiato i fogli di polistirolo ed hanno provocato lo scioglimento della colla: ciò ha reso necessaria l'interposizione di nuovi elementi isolanti tra i mattoni durante le fasi di acquisizione dei dati.

Nella prova qui descritta i laterizi sono rimasti in cella climatica per 5 ore e 45 minuti (dalle ore 9,15 alle 15:00), ma il monitoraggio della loro temperatura superficiale è stato possibile solamente a partire dalle 9:50 quando nella cella è stato inserito anche il laterizio provvisto di termocoppia (Figura 12.10).

#### 12.4.2 Geometria della prova

Un tavolo da lavoro di metallo con piano in legno e con rotelle è stato utilizzato per realizzare il piano su cui appoggiare i laterizi da sottoporre alla termografia. Per schermare eventuali fonti fredde o calde presenti all'interno dell'inquadratura della termocamera, uno schermo polionda è stato posizionato dietro al carrello e dei fogli di cartone sono stati posti davanti al tavolo di lavoro e dietro i mattoni per eliminare eventuali fonti residue.



*Figura 12.11* Disposizione degli elementi della prova: pannello polionda, fogli di cartone, tavolo da lavoro e laterizi

Queste operazioni sono state necessarie per evitare che fonti di calore indesiderate entrassero nel campo visivo della termocamera alterando così la scala di temperature da questa registrata: l'obiettivo è stato quello di ridurre l'intervallo di temperature degli oggetti inquadrati dalla

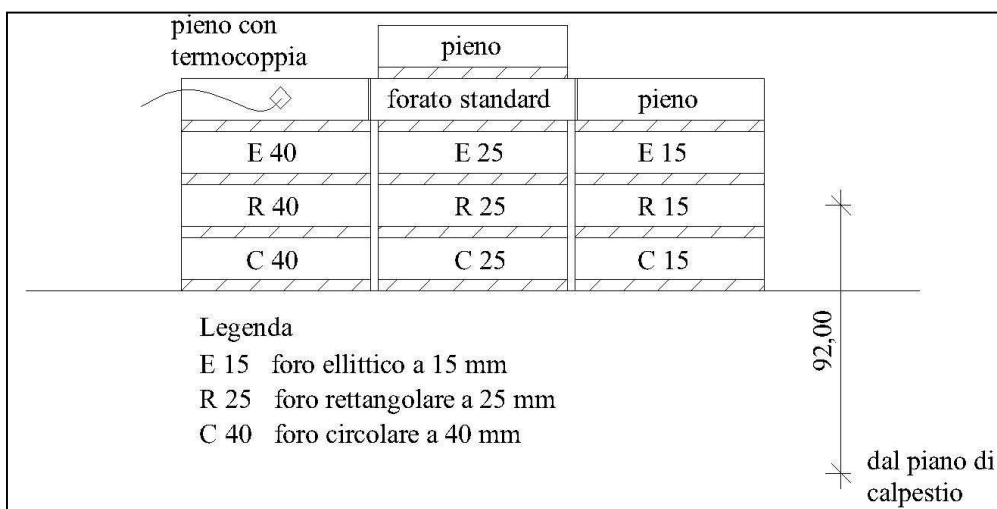
termocamera ottenendo così un migliore contrasto già durante le fasi di acquisizione dei dati (Figura 12.11).



*Figura 12.12 Posizione dei laterizi e della termocamera nella prova.*

Per posizionare sul tavolo i mattoni appena usciti dalla cella climatica, gli operatori hanno dovuto munirsi di guanti di cuoio e pezzi di stoffa: protetti in questo modo, hanno poi sistemato i laterizi disponendoli su tre colonne in base alla profondità dei fori e inserendo fogli di polistirolo.

La disposizione dei laterizi ha previsto il seguente schema: nella parte bassa di ogni colonna sono stati posizionati i mattoni con il foro circolare, al di sopra di questi quelli con foro rettangolare e nella terza fila (partendo dal basso) quelli provvisti di foro ellittico (Figura 12.13).



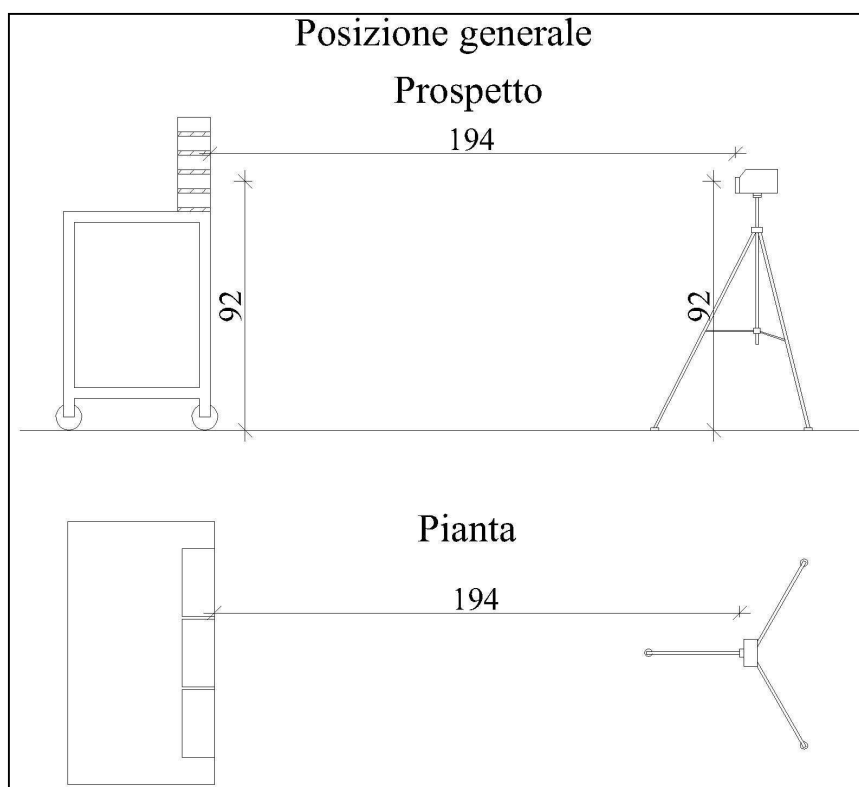
*Figura 12.13 Disposizione dei laterizi per la prova di termografia IR attiva*

Nella quarta fila sono stati posizionati due mattoni pieni al di sopra delle colonne laterali, di cui quello a sinistra munito di termocoppia, e di un mattone forato standard al centro; al di sopra di quest'ultimo è stato posizionato un ulteriore laterizio pieno. La colonna destra è composta da

elementi con foro alla profondità di 1,5 cm, quella centrale con foro a 2,5 cm mentre per quella sinistra la profondità delle cavità è pari a 4,0 cm.



*Figura 12.14 Immagine dei laterizi visibile dalla termocamera. Il corretto posizionamento della termocamera ha permesso di visualizzare tutti i laterizi utilizzati nella prova.*



*Figura 12.15 Disposizione della prova di termografia IR: prospetto e pianta.*

L'obiettivo della termocamera è stato posizionato a 1,94 m dal piano individuato dai laterizi e ad una altezza dal piano di calpestio di circa 92 cm: questa posizione è stata scelta per ottenere riprese il più frontali possibile in modo tale da sfruttare al meglio la risoluzione della termocamera. Infatti, la posizione del centro dell'area dei laterizi d'interesse (quelli provvisti di fori) è posizionata a questa altezza (Figura 12.15) mentre la distanza di 1,94 m ha permesso di contenere l'immagine di tutti i mattoni all'interno di un unico termogramma (Figura 12.14). Subito al termine delle

operazioni descritte, estratti i mattoni dalla cella e posti come pianificato, è stato possibile iniziare la fase di acquisizione dei dati.

## 12.5 Procedura di acquisizione dei dati

La fase di acquisizione dei dati è consistita nel registrare termogrammi ed immagini visuali dei laterizi da sottoporre ad analisi termografica durante la loro fase di raffreddamento; le foto salvate durante la prova hanno il solo scopo di aiutare la visione dei termogrammi mentre per quest'ultimi è necessario procedere poi con una elaborazione.

La preparazione della prova è terminata alle ore 15:05 del 25/10/2011 e la prima ripresa è stata scattata alle ore 15:06: da questo istante, l'operatore addetto alla termocamera, ha registrato una serie di file (dal 695 al 1293) ad un intervallo di tempo tra di questi compreso tra 20 e 12 secondi (corrispondente a 3-5 registrazioni al minuto) per una durata di circa 1 ora e 45 minuti (fino alle 16:51) collezionando 297 termogrammi ed altrettante foto. Terminata questa fase la termocamera è stata utilizzata per altri esperimenti in atto nel laboratorio e solo al termine di questi sono state eseguite altre 4 riprese, due alle ore 17:13 e due alle 17:38; in totale sono stati registrati 301 termogrammi e 301 fotogrammi in 24 movimenti diversi sulla prova.



*Figura 12.16 Istanti dell'acquisizione dei dati delle posizioni ravvicinate: in alto a sinistra la posizione 1, in alto a destra e in basso a sinistra la posizione 2 ed in basso a destra la terza.*

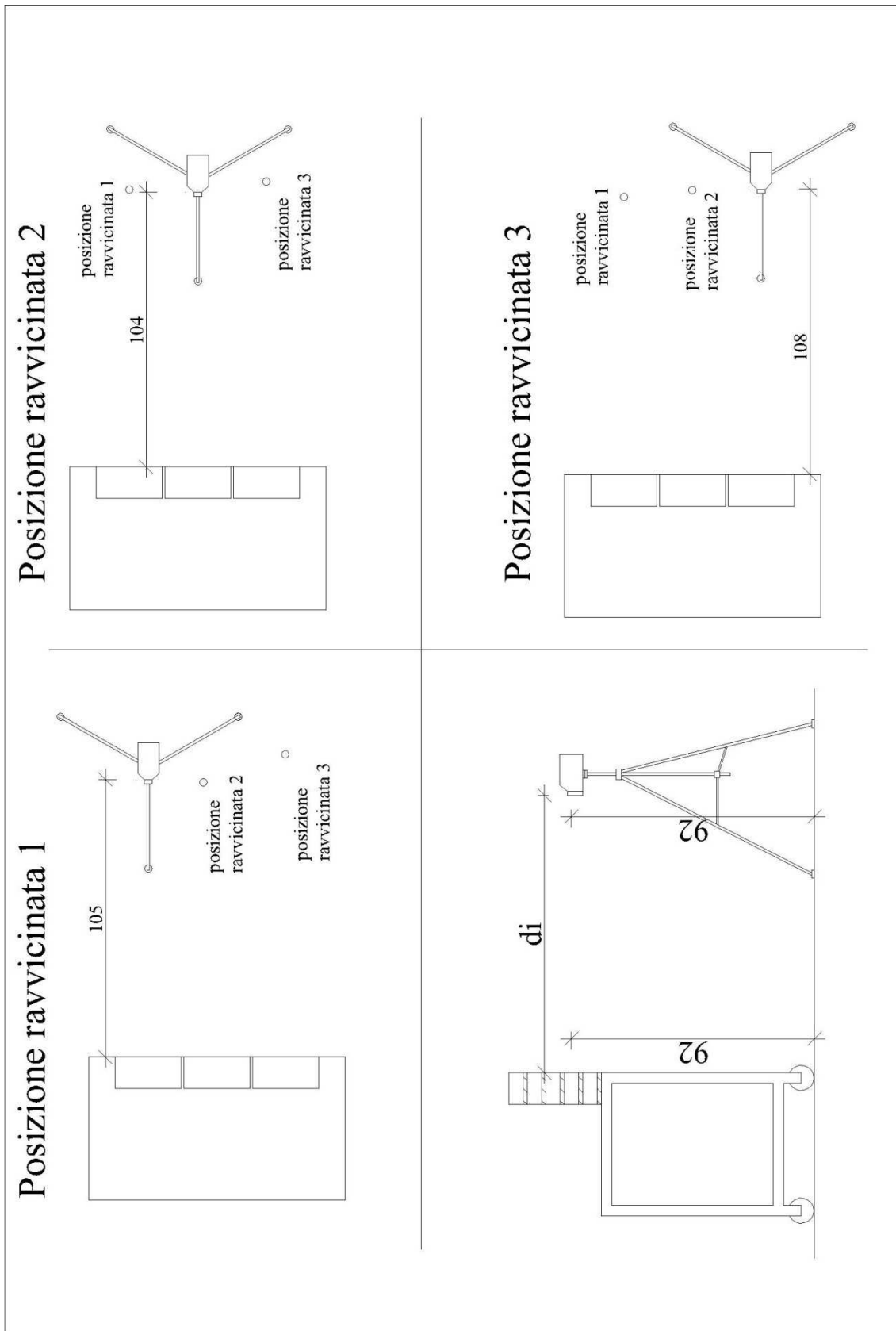
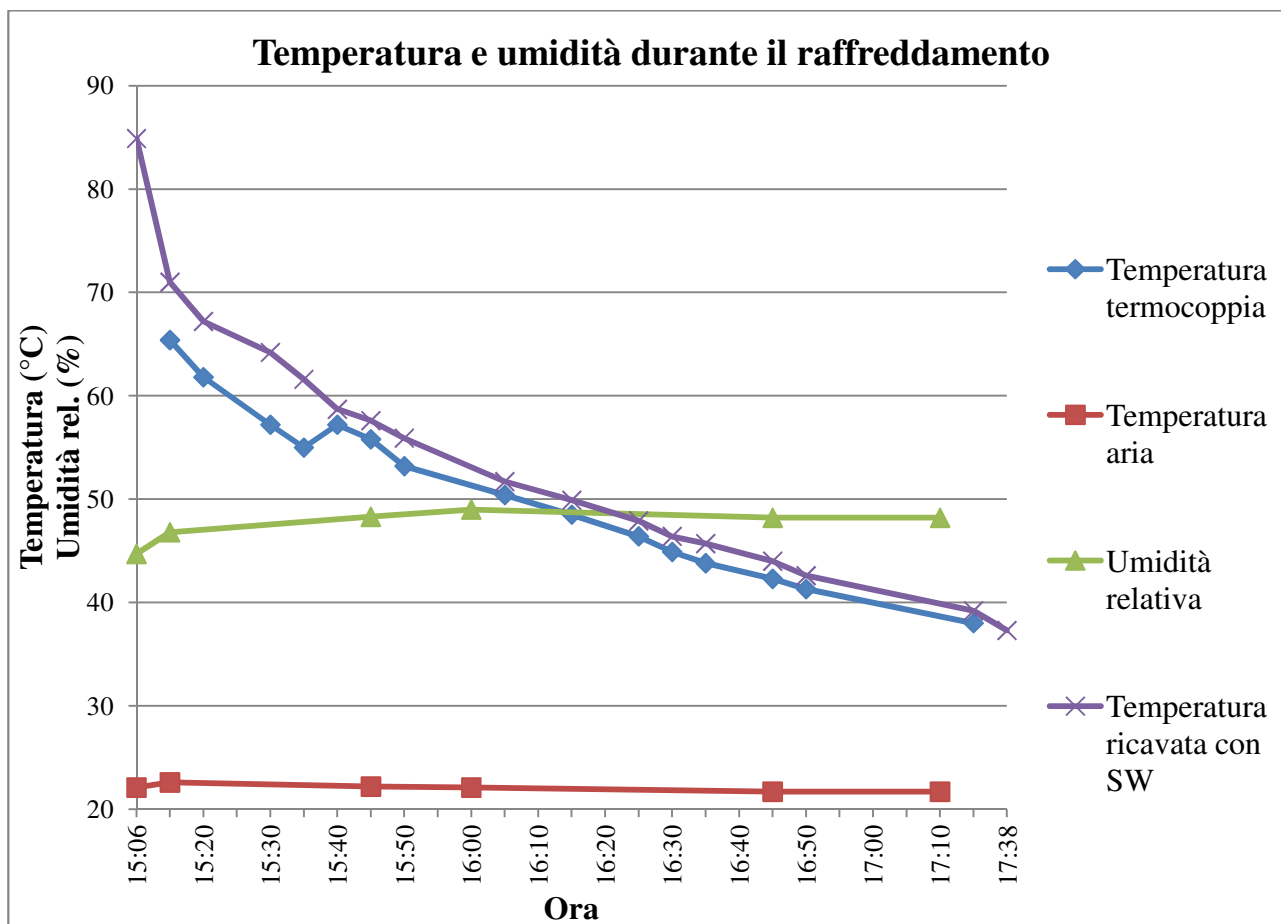


Figura 12.17 Posizioni di prova ravvicinate. La distanza “ $d_i$ ” generica indicata nel prospetto deve essere letta nella singole piante per le singole posizioni ravvicinate.



In questa fase sono state realizzate diverse letture della temperatura superficiale fornite dalla termocoppia e dopo 10 minuti dall'inizio del test questa segnava una temperatura di 65,4°C. Durante queste fasi è stato riscontrato un problema con la termocoppia: il calore del laterizio ha provocato un parziale scioglimento della colla adesiva che permetteva il contatto tra laterizio e termocoppia provocando un leggero distacco di questa è una errata registrazione della temperatura superficiale. Esercitando una leggera pressione sulla termocoppia per farla aderire perfettamente al mattone è stato riscontrato un aumento di temperatura.



*Figura 12.18 Andamento della temperatura e dell'umidità rilevate all'interno della sala malte durante la prova. Nel grafico è visibile anche l'andamento della temperatura superficiale del laterizio fornita dalla termocoppia e ricavata tramite software (SW) con puntatore per la temperatura vicino alla termocoppia.*

Utilizzando il termoigrometro sono stati eseguiti diversi rilievi della temperatura e umidità dell'aria che hanno permesso di graficare tali andamenti durante il corso della prova. Nella fase di raffreddamento, oltre alla temperatura superficiale del laterizio misurata tramite termocoppia, sono state monitorate anche l'umidità relativa e la temperatura dell'aria dell'ambiente di prova (Tabella 12.7). Osservando l'andamento della temperatura fornito dalla termocoppia si nota un andamento non regolare causato dalla non perfetta aderenza tra questa e la superficie del laterizio;



ripristinando il contatto tra i due elementi è visibile un immediato innalzamento della temperatura rilevata (Figura 12.18).

Volendo ottenere immagini di maggiore dettaglio, è stata spostata la termocamera in tre diverse posizioni: la prima di fronte alla colonna destra ad una distanza da questa di 105 cm, la seconda in linea con la colonna centrale alla distanza di 104 cm e la terza davanti alla colonna sinistra a 108 cm (Figura 12.16). Tutte le distanze indicate sono riferite al centro dell'obiettivo della termocamera (Figura 12.17). Per ogni postazione ravvicinata sono state raccolte 5 serie di termogrammi (e foto) in 5 istanti temporali diversi iniziando dalla colonna destra, passando poi a quella centrale per terminare con quella sinistra: la prima serie è iniziata alle 15:28, la seconda alle 15:43, la terza alle 15:59, la quarta alle 16:25 e la quinta alle 16:41.

*Tabella 12.7 Valori della temperatura superficiale del laterizio munito di termocoppia (ricavate tramite software e termocoppia), della temperatura dell'aria e della sua umidità relativa rilevate nella sala malte tramite termoigrometro digitale.*

<b>Ora</b>	<b>n.° termogramma</b>	<b>Temp. software</b>	<b>Temp. termocoppia</b>	<b>Temp. aria</b>	<b>Rh</b>
<b>15:06</b>	695	84.9	-	22.1	44.7
<b>15:15</b>	745	71.0	65.4	-	-
<b>15:22</b>	789	67.2	61.8	22.6	46.8
<b>15:28</b>	825	64.2	57.2	-	-
<b>15:32</b>	853	61.6	55	-	-
<b>15:40</b>	897	58.7	57.2	-	-
<b>15:44</b>	915 (15:42)	57.6	55.8	-	-
<b>15:49</b>	950	55.9	53.2	22.2	48.3
<b>16:05</b>	1042*	51.7*	50.4	22.1	49
<b>16:13</b>	1090	49.9	48.5	-	-
<b>16:24</b>	1160	47.9	46.4	-	-
<b>16:31</b>	1192	46.4	44.9	-	-
<b>16:34</b>	1208	45.7	43.8	-	-
<b>16:46</b>	1266	44.0	42.3	-	-
<b>16:51</b>	1288	42.6	41.3	21.7	48.2
<b>17:13</b>	1294	39.2	38	-	-
<b>17:38</b>	1304	37.2	-	-	-

Nella tabella, il valore con asterisco (\*) indica che nel termogramma analizzato l'immagine non risulta correttamente a fuoco mentre il valore riportato tra parentesi per il termogramma n.° 915 indica l'orario di salvataggio dell'immagine che non corrisponde con l'ora di registrazione della temperatura superficiale realizzata con la termocoppia. Questa differenza è causata dall'impossibilità di rilevare la temperatura superficiale accanto alla termocoppia da un termogramma registrato alle 15:44; infatti, in questo istante, i termogrammi sono stati realizzati in

corrispondenza della colonna centrale (posizione ravvicinata 2), immagine in cui non è visibile la termocoppia.

## 12.6 Elaborazione e visualizzazione dei dati

*Tabella 12.8 Valori dei parametri modificati prima dell'analisi dei termogrammi*

Ora di acquisizione	File	Emissività	Temperatura aria (°C)	Umidità relativa (%)	Distanza dall'oggetto (m)
15:14-15:23	695-797	1	22.1	44.7	1.94
15:23-15:27	799-825	1	22.6	46.8	1.94
15:28-15:28	827-833	1	22.6	46.8	1.05
15:29-15:30	835-843	1	22.6	46.8	1.04
15:31-15:32	845-853	1	22.6	46.8	1.08
15:32-15:42	855-915	1	22.6	46.8	1.94
15:43-15:44	917-926	1	22.6	46.8	1.05
15:44-15:46	928-936	1	22.6	46.8	1.04
15:46-15:47	938-946	1	22.6	46.8	1.08
15:48-15:58	948-1010	1	22.2	48.3	1.94
15:59-16:00	1012-1020	1	22.2	48.3	1.05
16:01-16:02	1022-1030	1	22.2	48.3	1.04
16:03-16:04	1032-1040	1	22.2	48.3	1.08
16:05-16:24	1042-1160	1	22.1	49	1.94
16:25-16:26	1162-1170	1	22.1	49	1.05
16:27-16:28	1172-1180	1	22.1	49	1.04
16:29-16:30	1182-1190	1	22.1	49	1.08
16:31-16:40	1192-1244	1	22.1	49	1.94
16:41-16:42	1246-1254	1	22.1	49	1.05
16:44-16:45	1256-1264	1	22.1	49	1.04
16:46-16:48	1266-1274	1	22.1	49	1.08
16:48-16:52	1276-1292	1	22.1	49	1.94
17:13-17:14	1294 e 1296	1	23.1	48.2	1.94
17:38-17:39	1302 e 1304	1	23.1	48.2	1.94

La fase di elaborazione ha consentito di mettere in risalto le differenze di temperatura presenti nei termogrammi: il software FLIR QuickReport permette di modificare i principali parametri che influenzano le temperature visualizzate (emissività dell'oggetto, temperatura dell'aria, umidità

relativa e distanza dall'oggetto ispezionato) e di variare l'intervallo delle temperature visibili in un termogramma.

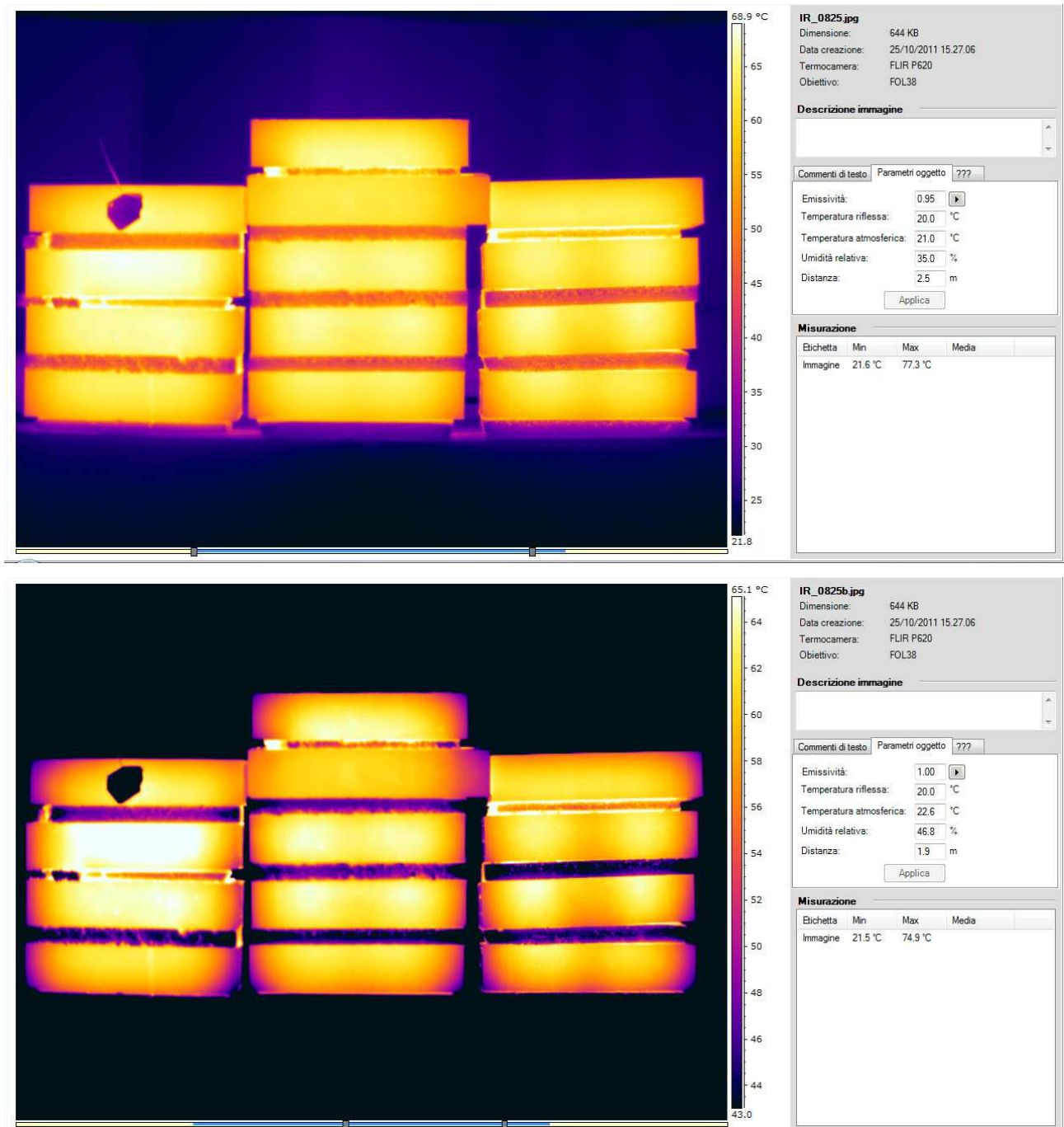


Figura 12.19 Termogramma n.825, ore 15:27 (21 minuti dopo inizio prova): immagine originale (in alto) e modificata (in basso).

Per ogni singola posizione della termocamera sono stati inseriti nel software i relativi valori di distanza dell'oggetto dall'obiettivo ed i parametri ambientali (Tabella 12.8)

In funzione dei dati inseriti, il software calcola i nuovi valori delle temperatura visibili nel termogramma selezionato; a questo punto è possibile variare manualmente i limiti superiore ed inferiore della scala delle temperature (Figura 12.19). In questa fase ogni singolo termogramma è stato modificato cercando di far risaltare il più possibile le differenze di temperatura visibili: a tale scopo i limiti della scala delle temperature sono stati cambiati in maniera non sistematica, non sono state scelte, cioè, delle temperature massime e minime da assegnare a tutti i termogrammi per mantenere un intervallo costante tra i due valori.

Il software consente di visualizzare la temperatura di singoli punti selezionati tramite puntatori: questa funzione è stata utilizzata per ricavare la temperatura dei singoli laterizi in corrispondenza dei fori (Figura 12.20). I dati ricavati sono stati inseriti in una tabella temperatura-tempo per visualizzare tale andamento in funzione della forma dei fori e delle diverse profondità di questi. Nella fase di studio successiva è stato utilizzato lo “strumento linea” del software che consente di valutare la temperatura massima e minima registrate lungo una linea; in questo modo, posizionando tale segmento a metà altezza del laterizio ed in corrispondenza dei fori (Figura 12.22) è stato possibile rilevare le differenze di temperatura causate dalla presenza dei fori. Questa operazione è stata eseguita sia sui termogrammi registrati nelle posizioni ravvicinate sia in quelli acquisiti dalla posizione generale. I dati così ottenuti sono stati inseriti in tabelle temperatura-tempo.

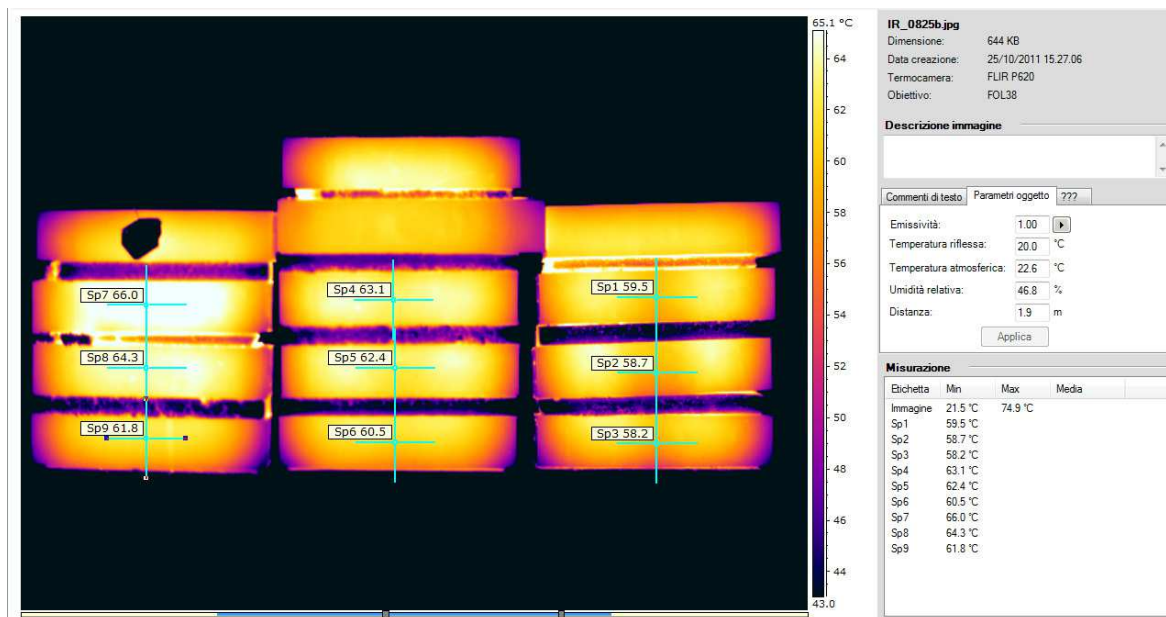
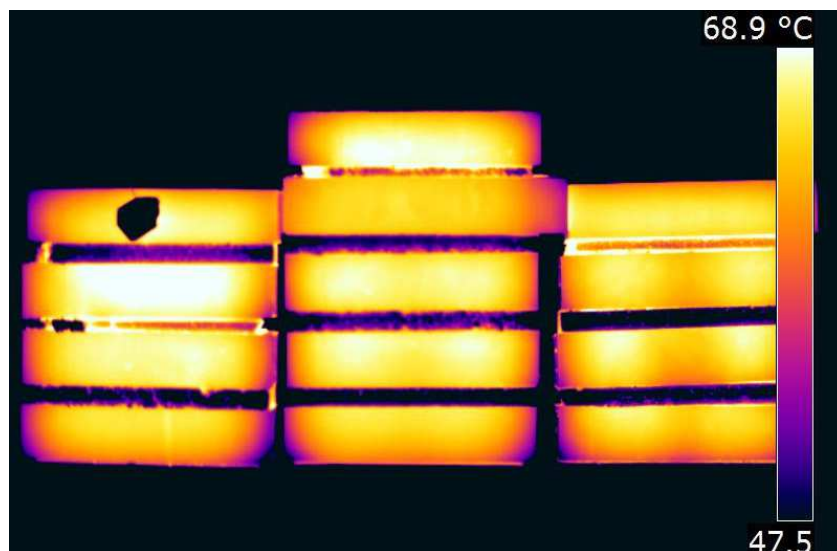


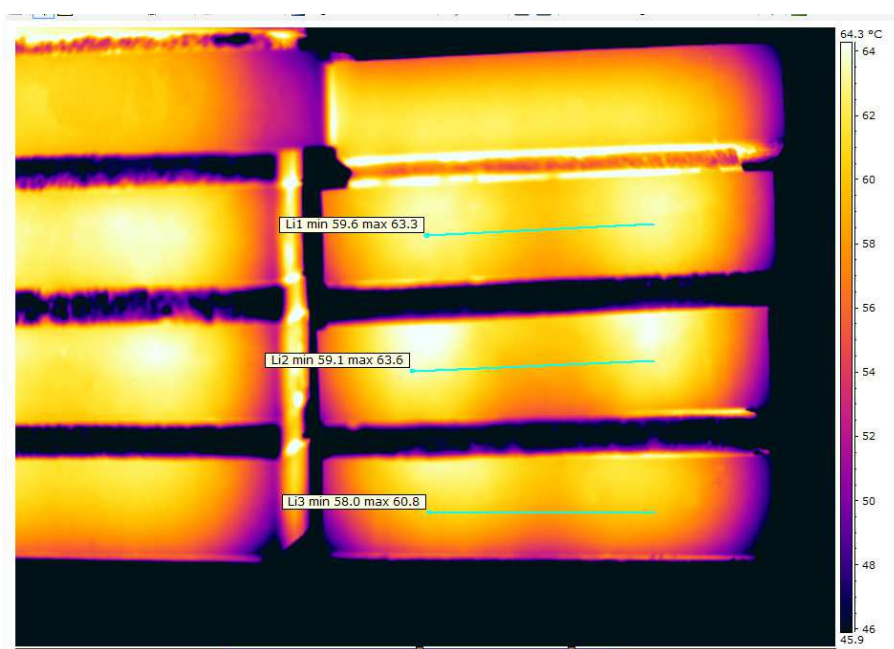
Figura 12.20 Funzione puntatore mobile applicata al termogramma n.825: valutazione della temperatura superficiale dei laterizi in corrispondenza dei fori.

Dai termogrammi analizzati è stato possibile osservare che le temperature più alte sono state raggiunte dai laterizi collocati nella colonna a sinistra (quella con i vuoti a profondità maggiore pari a 4 cm) e per una stessa colonna dai laterizi posizionati più in alto (Figura 12.21).



*Figura 12.21 Termogramma modificato 0773 registrato in posizione generale alle ore 15:19; Si può notare che le temperature più elevate (colori più chiari) sono osservabili nella colonna a sinistra.*

Osservando in dettaglio un termogramma realizzato in una delle tre posizioni ravvicinate è possibile notare che la distribuzione di temperatura sulla superficie del laterizio non risulta uniforme: nella parte più alta di questi la temperatura è superiore rispetto a quella più bassa. Questa condizione può essere facilmente interpretata per il laterizi posizionati all'estremità inferiore delle colonne: infatti, questi elementi, non sono circondati da altre fonti di calore, ma si trovano a scambiare calore con l'aria della sala che risulta ad una temperatura nettamente inferiore.



*Figura 12.22 Strumento linea applicato al termogramma n.827, ore 15:28; valutazione della temperatura massima e minima registrate lungo la linea*

Questa condizione, che si verifica anche per i laterizi posizionati all'estremità superiore delle colonne, produce un maggiore scambio di calore dal laterizio all'aria della sala provocando una diminuzione della temperatura superficiale repentina visibile nei termogrammi come zone dal colore più scuro.

Terminata l'elaborazione dei dati è stato possibile inserire i dati ricavati all'interno di tabelle che hanno consentito di graficare i risultati ottenuti.

#### 12.6.1 Posizione generale

L'analisi dei dati acquisiti dalla posizione generale della termocamera ha permesso di eseguire diversi confronti tra le temperature registrate: innanzitutto tra gli andamenti osservati per i diversi fori ma alla stessa profondità, ed in seguito tra gli andamenti osservati per una stessa conformazione di foro, ma a diverse profondità. Le temperature sono state ricavate da termogrammi registrati con intervallo di tempo pari a 5 minuti; non sempre è stato possibile mantenere costante tale intervallo di tempo.

*Tabella 12.9 Valori delle temperature superficiali misurate tramite puntatori in corrispondenza dei fori*

Ora	Tempo trascorso (min)	numero termogr.	Profondità 4,0 cm			Profondità 2,5 cm			Profondità 1,5 cm		
			Ell.	Ret.	Cer.	Ell.	Ret.	Cer.	Ell.	Ret.	Cer.
15:06	1	0695	83.9	82.1	80.2	79.7	79.3	76.8	77.3	77.5	76.9
15:08	3	0699	79.3	77.7	75.9	77.5	77.3	75.1	74.8	75.3	75.1
15:10	5	0712	76.9	75.4	73.8	74.7	74.6	72.5	71.9	72.4	72.1
15:15	10	0745	72.4	71	69.2	70	69.2	67.3	66.7	66.8	66.7
15:20	15	0775	69.5	68.2	66.1	66.7	66	64.1	63.2	62.9	63
15:25	20	0809	67.4	65.8	62.6	64.1	63	61.5	60.6	59.9	59.6
15:33	28	0855	63.9	62.5	59.9	60.4	59.1	58	57.1	56.3	56.1
15:36	31	0877	63	61.4	58.4	59.3	58	56.6	56.1	55.4	55.2
15:40	35	0897	61.6	59.9	57.1	57.8	56.1	54.6	53.5	53	53.4
15:50	45	0954	58.3	56.7	53.9	54.6	53.1	52	51.6	50.9	50.3
15:55	50	0988	56.9	55.2	52.5	53.2	51.7	51.2	50.4	49.6	48.9
15:58	53	1006	56	54.3	51.6	52.3	50.8	49.7	49.6	48.8	48.1
16:05	60	1042	53.9	52.1	48.9	50.3	48.9	47.5	47.6	46.9	46.3
16:10	65	1072	52.7	50.9	48.2	49.1	47.3	46.6	46.6	46.7	45.3
16:15	70	1100	51.5	49.7	46.9	48	46.6	45.6	45.5	44.9	44
16:20	75	1132	50.2	48.4	45.8	46.9	45.5	44.8	44.4	43.6	43.9
16:24	79	1158	49.2	47.6	44.8	46	44.7	43.6	43.5	43.1	42
16:31	86	1192	47.7	45.9	43.4	44.6	43.3	42	42.2	41.6	40.5
16:35	90	1214	46.7	45.1	42.5	43.8	42.5	41	41.5	41.2	40
16:40	95	1240	45.8	44	41.5	42.8	41.6	40.2	40.6	40.2	39.1
16:48	103	1276	43.9	42.3	39.9	41.4	40.1	38.9	39.2	38.6	37.6
16:50	105	1280	43.3	41.4	38.8	40.9	39.6	38.8	38.5	37.7	36.9
16:52	107	1292	39.3	37.9	35.8	37.6	36.4	35.4	35.3	35	34



17:13	128	1294	37.7	36.4	34.5	36.3	35.5	34.5	34	34.1	33.2
17:38	153	1302	37.6	36.2	34.2	36.1	35.2	34.3	33.9	33.6	33
17:39	154	1304	37.6	36.2	34.2	36.1	35.2	34.3	33.9	33.6	33

L'andamento della temperatura in funzione del tempo di raffreddamento è mostrato dapprima per tipologia di foro: iniziando da quelli posizionati più in profondità, confrontati per i diversi fori (Figura 12.23), mostrano un diverso andamento delle temperature in funzione della forma della cavità. Seppur in tutti e tre i casi è possibile osservare che la legge di decrescita della temperatura viene descritta da una curva, nel caso di foro circolare alla profondità di 40 mm tale andamento risulta maggiormente marcato presentando una concavità maggiore. A parità di tempo trascorso dall'inizio della prova, la differenza di temperatura superficiale (tra istante iniziale e generico istante "t") ricavata tramite software per il laterizio con cavità circolare, mostra un valore maggiore rispetto a quella individuata per gli altri due elementi: dopo 7 minuti, tale differenza è di 6,7°C per il laterizio con foro circolare e di 6,4° e 6,3°C per i casi di foro ellittico e rettangolare rispettivamente, dopo 12 minuti è di 10°C per il primo caso e di 9,3°C per gli altri due, mentre dopo 17 minuti è pari a 12,8°C per il laterizio con cavità circolare e di 11,6° e 11,8°C per il caso ellittico e rettangolare. Come si può notare, confrontando le differenze di temperatura tra i diversi fori, è possibile assistere ad un graduale ma costante aumento di tali valori: infatti, da pochi decimi di grado (tra 6,7°C e 6,3°C ricavati dal primo caso presentato) si giunge a superarne uno intero (tra 12,8°C e 11,6°C dell'ultimo caso).

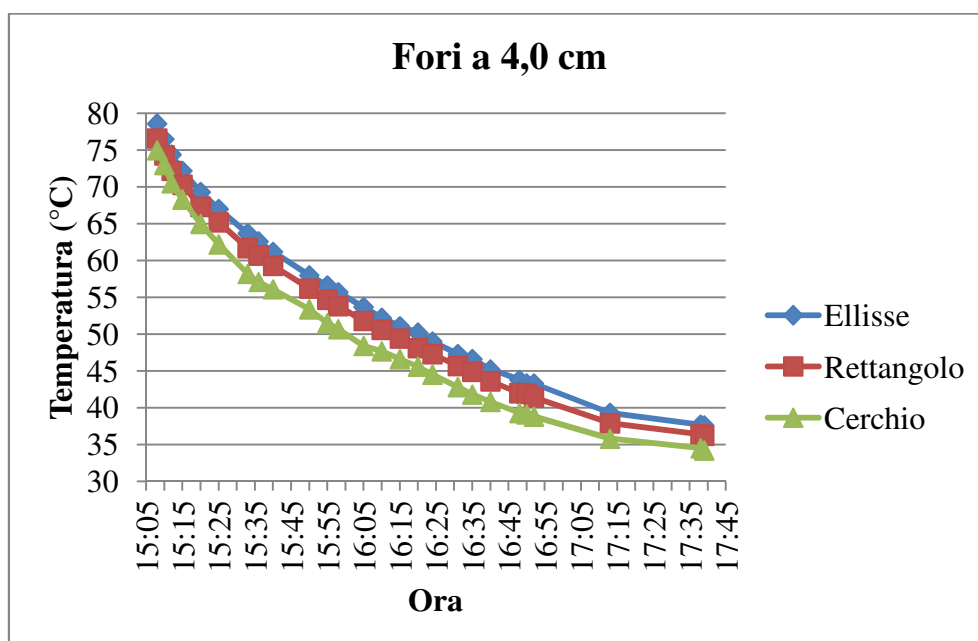


Figura 12.23 Temperature rilevate in corrispondenza dei fori a 4 cm di profondità con termocamera da posizione generale

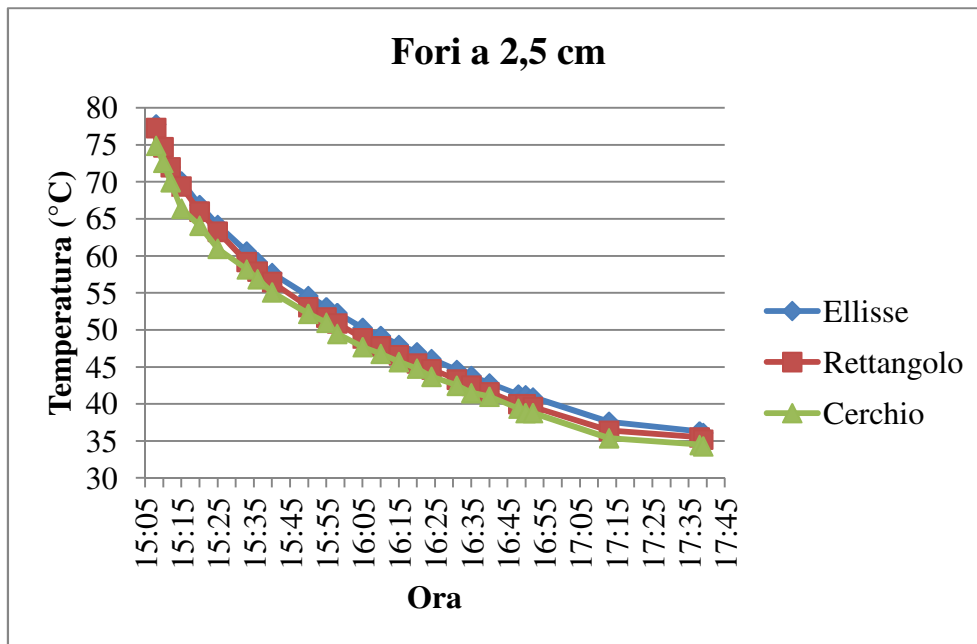


Figura 12.24 Temperature rilevate in corrispondenza dei fori a 2,5 cm di profondità da termocamera in posizione generale.

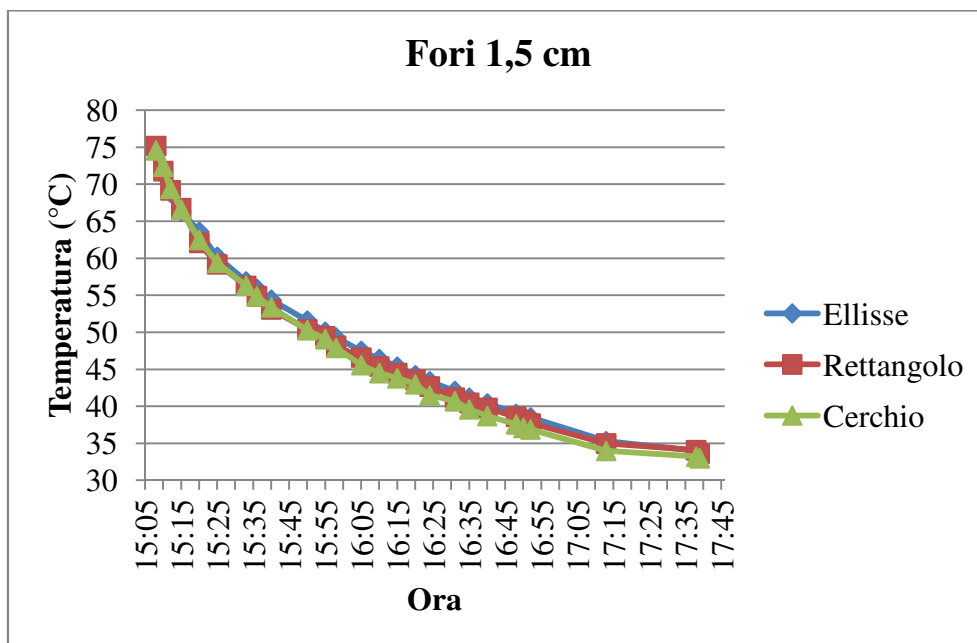


Figura 12.25 Andamento delle temperature rilevate in corrispondenza dei fori a 1,5 cm di profondità dalla posizione generale della termocamera.

Osservando gli andamenti delle temperature superficiali ricavate per i casi di fori a profondità di 2,5 cm (Figura 12.24) si nota che questa differenza di comportamento risulta meno evidente (seppur mantenendo le principali caratteristiche sopra descritte), mentre scompare del tutto nell'ultimo caso

(fori a 1,5 cm, Figura 12.25) in cui tutte e tre le curve tendono a sovrapporsi; ora, l'andamento dei grafici rispecchia maggiormente quello osservato per il laterizio con foro circolare posizionato a 4 cm di profondità con una diminuzione di temperatura accentuata nella fase iniziale del test.

In tutti i casi analizzati è stato possibile osservare che la temperatura superficiale più alta è stata registrata in corrispondenza del laterizio con foro ellittico, poi da quello con foro rettangolare ed in fine da quello con foro circolare.

Nei grafici successivi, invece, verranno valutate le temperature registrate per le stesse tipologie di foro, ma posizionato a profondità diverse.

Osservando i dati raccolti per il laterizio con foro ellittico (Figura 12.26) si può notare un diverso andamento delle temperature in funzione delle profondità: seppur la diminuzione di temperatura mostri una legge curvilinea per tutti e tre i casi studiati, i dati ricavati per il foro a profondità maggiore (4 cm) evidenziano una concavità meno pronunciata rispetto al caso con foro superficiale (1,5 cm) dove il decadimento della temperatura nelle fasi iniziali del test è più repentino (andamento del grafico maggiormente inclinato rispetto all'asse delle ascisse). Le temperature misurate in corrispondenza del vuoto a 2,5 cm mostrano un andamento intermedio a quello descritto per gli altri due fori. Osservando le curve corrispondenti ai fori posizionati alla profondità di 2,5 e 4 cm, si nota che nelle fasi iniziali le temperature rilevate sono simili, si differenziano poi durante lo svolgimento della prova ed infine si riavvicinano al termine dell'esperimento; questo andamento risulta meno evidente per la curva corrispondente al foro a 1,5 cm.

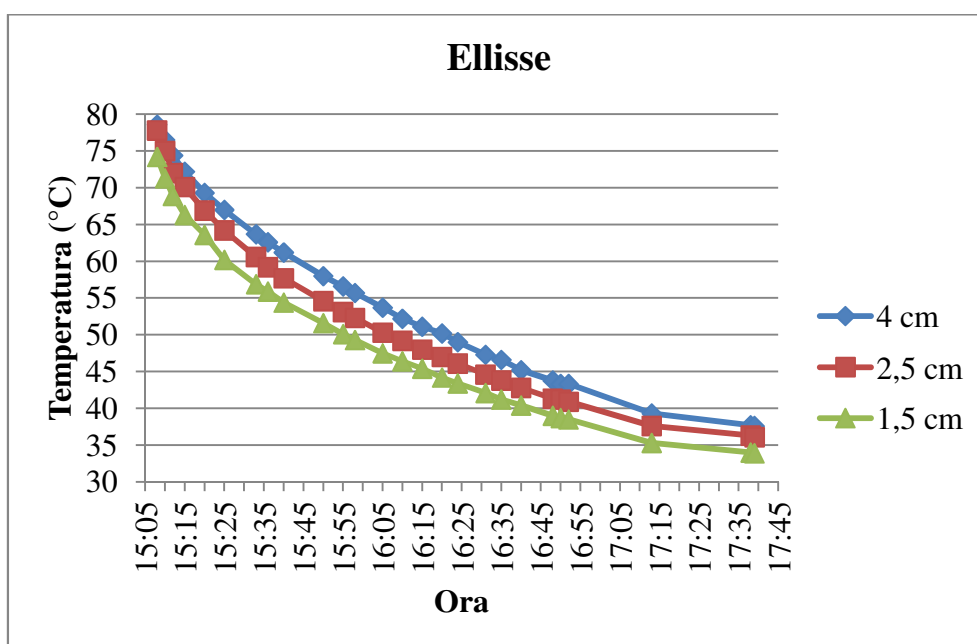


Figura 12.26 Andamento della temperatura superficiale per laterizio con foro ellittico misurata in corrispondenza del difetto tramite software.

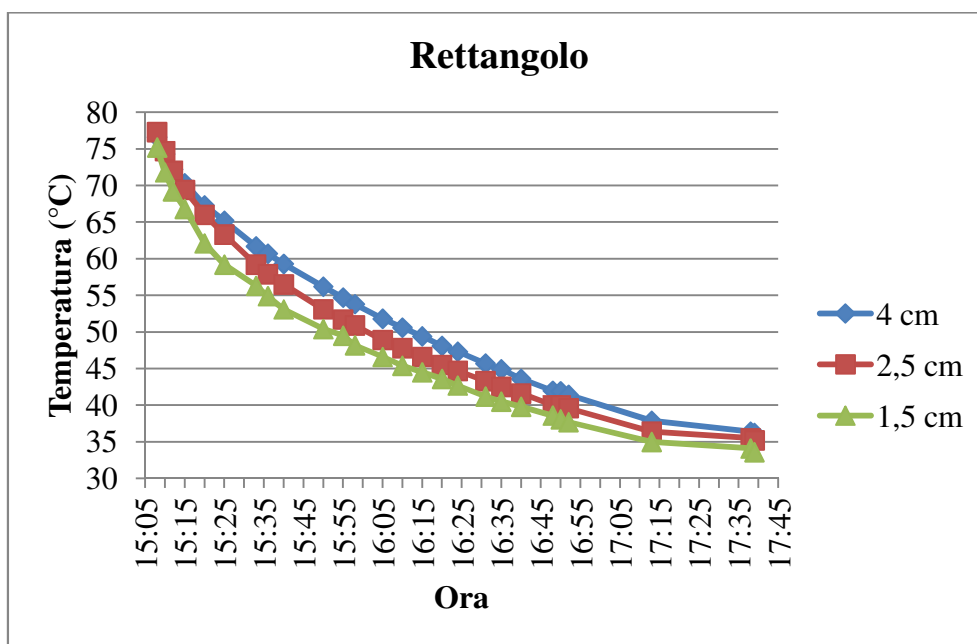


Figura 12.27 Andamento delle temperature superficiali misurate in corrispondenza del difetto per i laterizi con foro rettangolare posto a diverse profondità

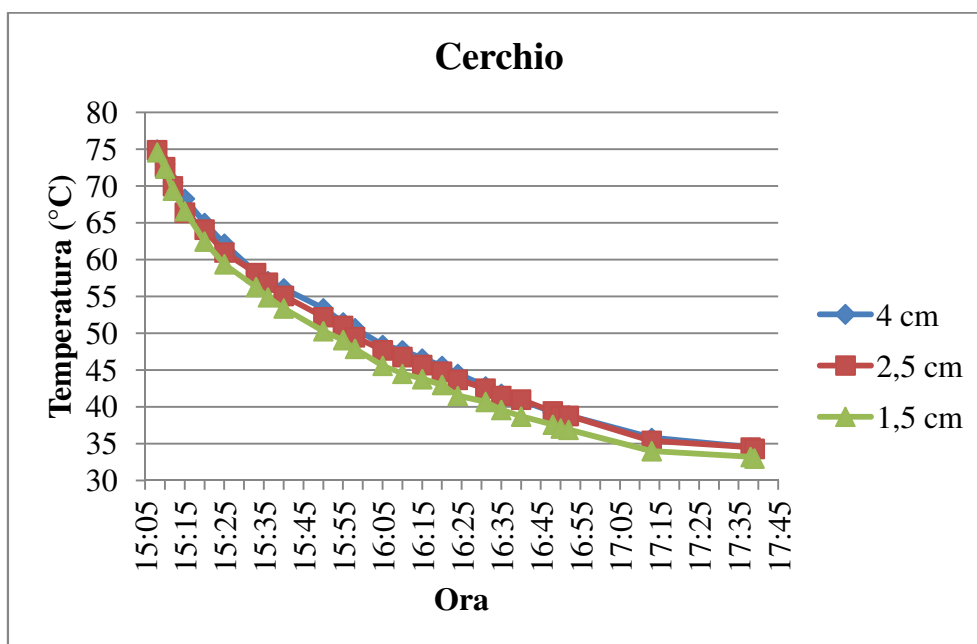


Figura 12.28 Temperature superficiali dei laterizi con foro circolare a diverse profondità: il rilevamento è stato eseguito tramite software in corrispondenza del foro.

I dati riguardanti il foro rettangolare posizionato a diverse profondità (Figura 12.27) mostrano un andamento delle temperature simile a quello descritto per il foro ellittico, ma nel caso intermedio (foro a 2,5 cm) è possibile notare alcune differenze: innanzitutto, nella prima fase della prova (circa

20 minuti), la temperatura rilevata in corrispondenza del difetto risulta prossima a quella del laterizio con cavità più profonda mentre, superato tale intervallo, si osserva il passaggio graduale ad una temperatura intermedia (rispetto a quella osservata per i due casi estremi profondità 1,5 e 4 cm). Analizzando questi dati è possibile notare che le temperature iniziali delle tre curve risultano vicine per poi differenziarsi durante lo svolgimento della prova ed infine avvicinarsi nuovamente con il concludersi del test.

L'andamento delle temperature rilevate per il foro circolare posizionato a diverse profondità (Figura 12.28) non mostra particolari differenze tra le tre curve. In questo caso, infatti, gli andamenti tendono a sovrapporsi (in particolare per le cavità a 2,5 e 4 cm) i cui valori ottenuti sono praticamente uguali per tutta la durata della prova mentre per il laterizio con foro superficiale (1,5 cm) si può osservare una leggera variazione.

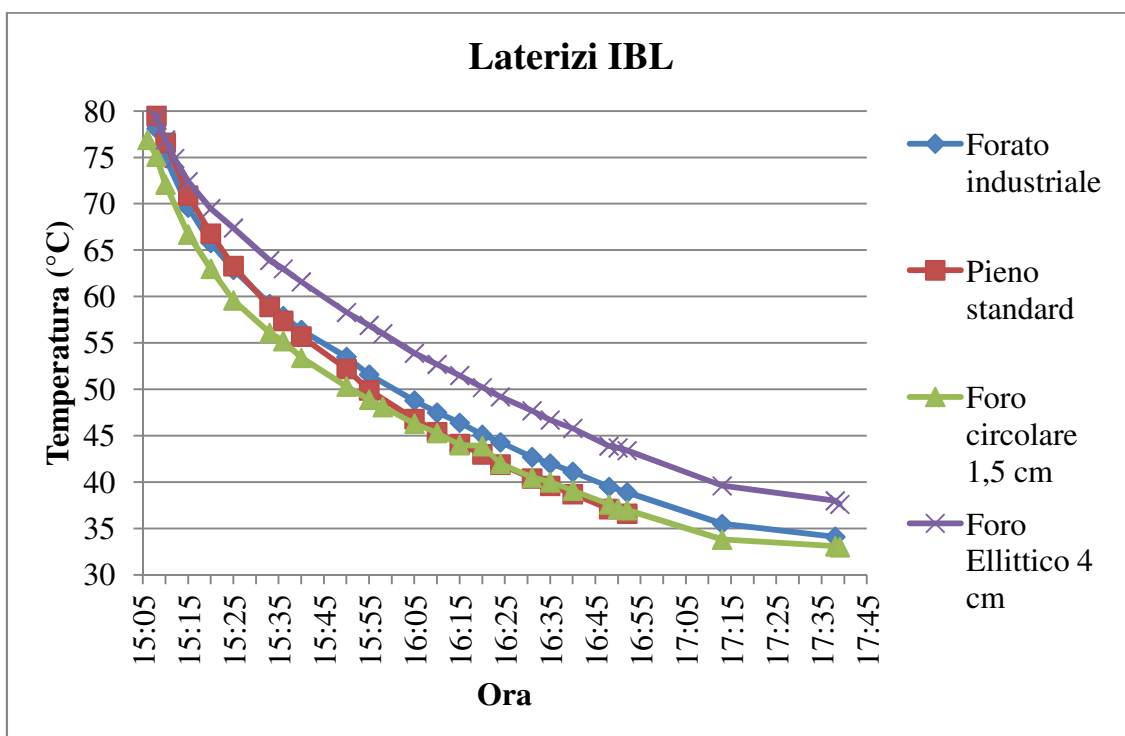


Figura 12.29 Andamento delle temperature rilevate tramite software in corrispondenza del centro dei laterizi IBL non modificati e di quelle dei due casi limite individuati.

Le temperature rilevate in corrispondenza dei centri del laterizio pieno standard e di quello forato industriale (Figura 12.29), si collocano in una posizione intermedia rispetto a quelle ottenute per i due casi limite analizzati: negli istanti iniziali della prova, i valori risultano prossimi a quelli del laterizio con foro ellittico a 4 cm (estremo superiore), mentre col procedere del test si avvicinano a quelli del mattone con foro circolare a 1,5 cm (estremo inferiore). Dalla Figura 12.29 si nota che nelle fasi iniziali, il mattone pieno standard risulta più caldo rispetto a quello forato industriale,

mente tale tendenza viene invertita dopo le 15:26 (Tabella 12.10). Il forato standard mantiene una temperatura superiore rispetto al limite inferiore per tutta la durata della prova, mentre quello pieno standard tende a sovrapporsi a questo da metà test.

*Tabella 12.10 Valori delle temperatura rilevati in corrispondenza del centro del laterizio pieno standard e di quello forato industriale.*

Ora	Tempo progressivo (minuti)	Laterizi IBL					
		forato industriale			pieno standard		
		centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$
15:08	3	78.1	76.9	1.2	79.5	78.9	0.6
15:10	5	75	73.8	1.2	76.6	76	0.6
15:15	10	69.6	68.5	1.1	70.9	70.1	0.8
15:20	15	65.8	64.6	1.2	66.8	65.9	0.9
15:25	20	62.9	61.6	1.3	63.3	62.3	1
15:33	28	59.2	57.4	1.8	58.9	57.9	1
15:36	31	57.9	56	1.9	57.4	56.4	1
15:40	35	56.4	54.4	2	55.7	54.6	1.1
15:50	45	53.5	51.2	2.3	52.2	50.7	1.5
15:55	50	51.6	49.4	2.2	49.9	48.4	1.5
16:05	60	48.8	46.4	2.4	46.8	45.3	1.5
16:10	65	47.5	45.2	2.3	45.4	43.8	1.6
16:20	75	45.1	43	2.1	43	41.4	1.6
16:24	79	44.3	42.2	2.1	41.9	40.3	1.6
16:31	86	43.1	40.9	2.1	40.4	38.7	1.7
16:35	90	42	39.9	2.1	39.6	37.8	1.8
16:40	95	41.1	39.2	1.9	38.7	37	1.7
16:48	103	39.5	37.7	1.8	37.1	35.5	1.6
16:52	107	38.9	37.4	1.5	36.6	35	1.6
17:13	128	35.5	34.4	1.1			
17:38	153	34.1	33.3	0.8			

Con i dati raccolti in questa posizione (generale) è stato possibile anche valutare le temperature superficiali in corrispondenza del foro e accanto a questo: utilizzando lo “strumento linea” del software QuickReport come indicato nel paragrafo 12.6 sono stati individuati tali valori ed è stata calcolata inoltre la loro differenza. Anche in questo caso verranno prima presentati i risultati ottenuti confrontando le temperature superficiali rilevate per una stessa profondità ma su diversa tipologia di foro.

I dati ricavati per i fori a 4 cm di profondità (Figura 12.30, Figura 12.31 e Figura 12.32) mostrano che le temperature superficiali rilevate in corrispondenza del difetto risultano più elevate di quella



misurata ai lati di questo. Le differenze calcolate non presentano sensibili variazioni se non nel caso di foro circolare; infatti, in questo caso, è possibile notare che tale curva presenta un massimo (2,4°C) verificatosi alle 15:58, dopo 53 minuti dall'inizio della prova, mentre per il foro ellittico tale valore è di 1,7°C rilevato allo stesso orario (Tabella 12.11).

Le differenze di temperatura rilevate per il foro rettangolare, invece, hanno evidenziato due istanti di massimo, il primo ad inizio prova, il secondo a metà test. Il primo valore (1,8°C osservato alle 15:06) è confrontabile con quello ottenuto successivamente (1,7°C alle ore 15:50), ma l'andamento del grafico lascia presupporre che il massimo venga raggiunto prima dell'istante di inizio acquisizione dati. In realtà, i primi termogrammi risultano sfuocati provocando una diminuzione della risoluzione della termocamera ed una minore sensibilità dei valori della temperatura ottenuti: questo fattore ha influenzato l'accuratezza dei risultati ottenuti con la possibilità di aver rilevato dati non precisi che possono giustificare tale andamento "anomalo".

*Tabella 12.11 Valori di temperatura ricavati dalla posizione generale per i fori a 4 cm di profondità*

Ora	tempo progressivo (minuti)	numero termogr.	Temperature (°C). Profondità 4,0 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$
15:06	1	695	81.2	80	1.2	79.5	77.7	1.8	77.8	76.7	1.1
15:08	3	699	79.3	78.1	1.2	77.7	76.2	1.5	76.1	74.9	1.2
15:10	5	712	76.9	75.7	1.2	75.4	74	1.4	73.8	72.7	1.1
15:15	10	745	72.4	71.3	1.1	71	69.9	1.1	69.2	67.8	1.4
15:20	15	775	69.5	68.3	1.2	68.2	67	1.2	66.1	64.6	1.5
15:25	20	809	67.4	66.2	1.2	65.8	64.6	1.2	62.6	61.1	1.5
15:33	28	855	63.9	62.7	1.2	62.5	61.2	1.3	60.1	58.3	1.8
15:36	31	877	63	61.8	1.2	61.4	60	1.4	58.4	56.5	1.9
15:40	35	897	61.6	60.3	1.3	59.9	58.4	1.5	57.1	55.2	1.9
15:50	45	954	58.3	56.8	1.5	56.7	55	1.7	53.9	51.7	2.2
15:55	50	988	56.9	55.3	1.6	55.1	53.5	1.6	52.5	50.2	2.3
15:58	53	1006	56	54.3	1.7	54.3	52.7	1.6	51.6	49.2	2.4
16:05	60	1042	53.9	52.3	1.6	52.1	50.5	1.6	48.9	46.5	2.4
16:10	65	1072	52.7	51.2	1.5	50.9	49.3	1.6	48.2	45.9	2.3
16:15	70	1100	51.5	50	1.5	49.7	48.1	1.6	46.9	44.7	2.2
16:20	75	1132	50.2	48.8	1.4	48.4	46.8	1.6	45.8	43.8	2
16:24	79	1158	49.2	47.8	1.4	47.6	46.1	1.5	44.8	42.9	1.9
16:31	86	1192	47.7	46.3	1.4	45.9	44.4	1.5	43.4	41.5	1.9
16:35	90	1214	46.7	45.4	1.3	45.1	43.7	1.4	42.5	40.7	1.8
16:40	95	1240	45.8	44.6	1.2	44	42.6	1.4	41.5	39.7	1.8
16:48	103	1276	43.9	42.7	1.2	42.3	40.9	1.4	39.9	38.1	1.8
16:50	105	1280	43.7	42.6	1.1	41.9	40.6	1.3	39.7	37.9	1.8

<b>16:52</b>	107	1292	43.4	42.3	1.1	41.7	40.5	1.2	39.5	37.8	1.7
<b>17:13</b>	128	1294	39.6	38.5	1.1	38.2	37.1	1.1	36.1	34.6	1.5
<b>17:38</b>	153	1302	38	37.1	0.9	36.7	35.9	0.8	34.8	33.8	1

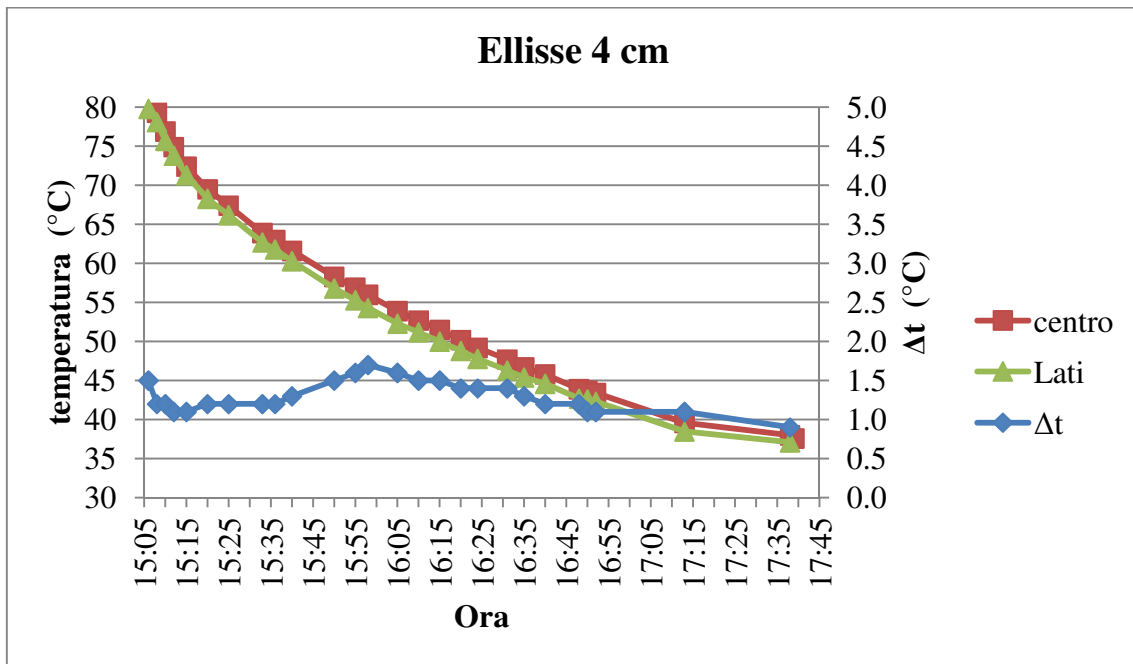


Figura 12.30 Temperatura superficiale rilevata tramite software in corrispondenza del foro e accanto a questo. In blu la differenza tra tali valori.

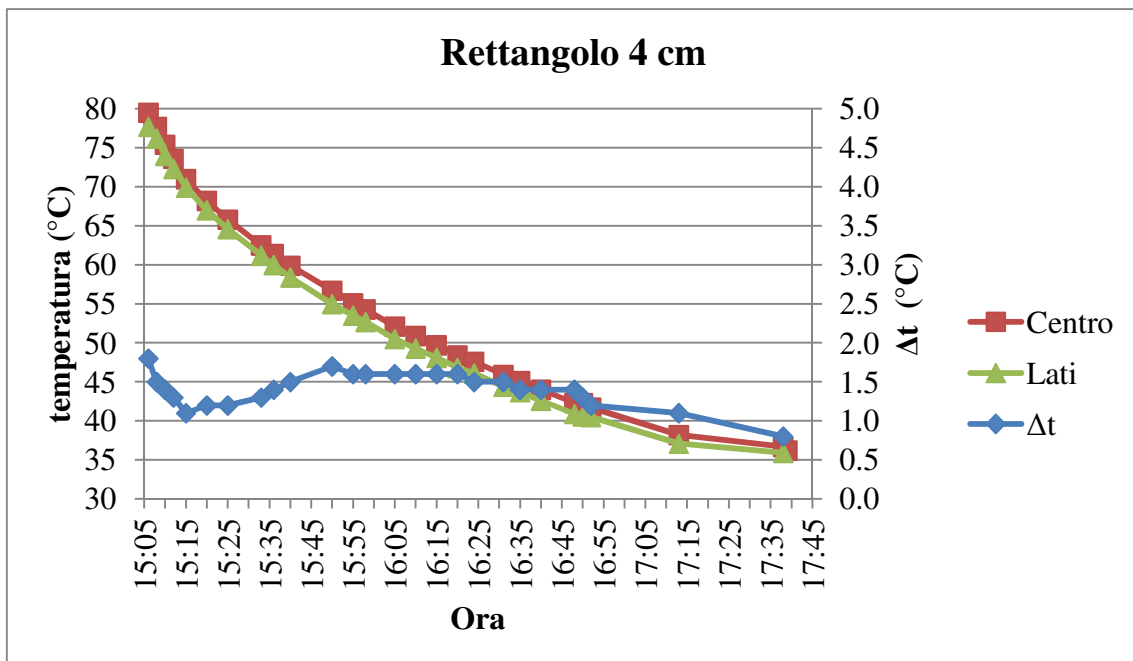


Figura 12.31 Andamento delle temperature superficiali rilevate in corrispondenza del foro e accanto ad esso. In blu la differenza tra tali valori.

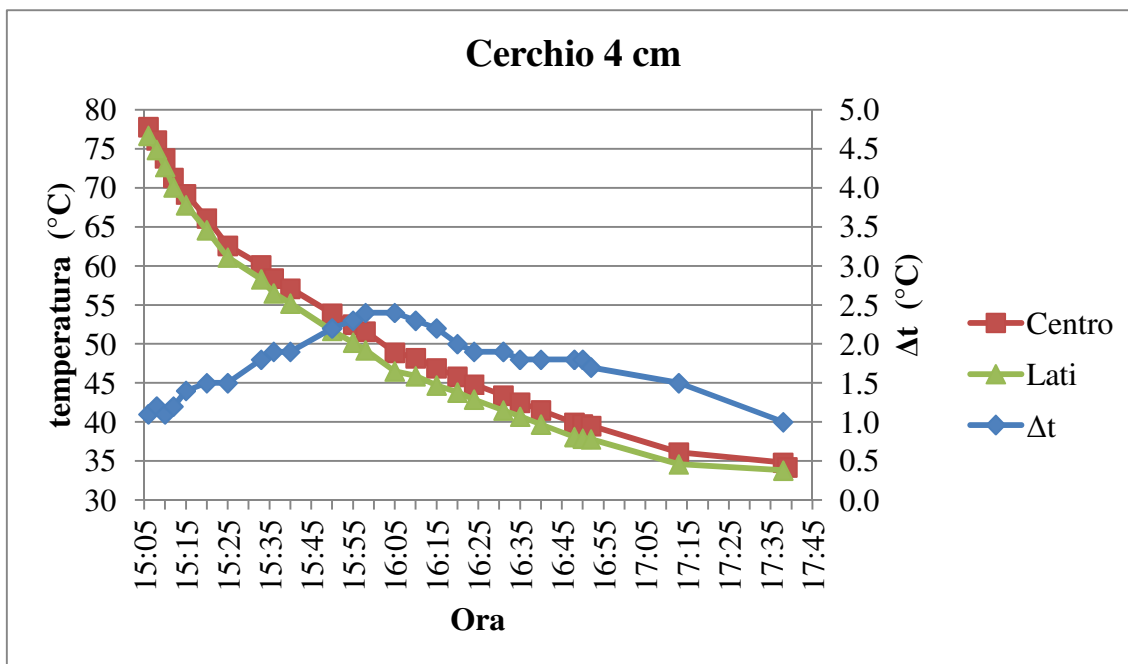


Figura 12.32 Temperature superficiali rilevate tramite software in corrispondenza del foro e accanto a questo. In blu la differenza tra queste.

Osservando i risultati ottenuti per il foro ellittico a 2,5 cm (Figura 12.33), è possibile notare una prima fase in cui le differenze di temperature superficiale aumentano rapidamente, raggiungono il massimo (1,6°C) dopo 15 minuti dall'inizio della prova (ore 15:20) per poi diminuire costantemente fino al termine dove tali valori risultano minori di quelli rilevati all'inizio. Analizzando le differenze di temperature superficiali rilevate per il laterizio con foro rettangolare a 2,5 cm (Figura 12.34), si osserva che il massimo è raggiunto dopo 45 minuti e tale valore (pari a 2,6°C) risulta più elevato rispetto al caso precedente. L'aumento di tali differenze è più repentino rispetto la loro diminuzione: infatti, il ramo ascendente del grafico risulta maggiormente inclinato rispetto quello discendente. I risultati ottenuti per il laterizio con foro circolare a 2,5 cm (Figura 12.35) mostrano ancora una volta un andamento delle differenze delle temperature simile ai due casi precedenti (ramo ascendente e discendente del grafico), ma i valori ottenuti risultano i minori tra quelli registrati per questa profondità: infatti, il massimo risulta pari a 1,1°C ed è registrato alle ore 15:36 (21 minuti dopo l'inizio della prova) (Tabella 12.12).

Tabella 12.12 Valori di temperatura ricavati dalla posizione generale per i fori a 2,5 cm di profondità

Ora	tempo progressivo (minuti)	numero termogramma	Temperature (°C). Profondità 2,5 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	Δt	centro	lato	Δt	centro	lato	Δt
15:06	1	695	79.7	80.6	0.9	79.3	80.7	1.4	76.8	77.2	0.4
15:08	3	699	77.5	78.7	1.2	77.3	78.9	1.6	75.1	75.6	0.5

15:10	5	712	74.7	76.1	1.4	74.6	76.3	1.7	72.5	73.1	0.6
15:15	10	745	70	71.5	1.5	69.2	71.1	1.9	67.3	68.1	0.8
15:20	15	775	66.7	68.3	1.6	66	68	2	64.1	65	0.9
15:25	20	809	64.1	65.7	1.6	63	65.3	2.3	61.5	62.5	1
15:33	28	855	60.4	61.9	1.5	59.1	61.5	2.4	58	59	1
15:36	31	877	59.3	60.8	1.5	58	60.5	2.5	56.6	57.7	1.1
15:40	35	897	57.8	59.5	1.5	56.1	58.6	2.5	54.6	55.7	1.1
15:50	45	954	54.6	56.1	1.5	53.1	55.7	2.6	52	53	1
15:55	50	988	53.2	54.6	1.4	51.7	54.2	2.5	51.2	52.1	0.9
15:58	53	1006	52.3	53.7	1.4	50.8	53.2	2.4	49.7	50.6	0.9
16:05	60	1042	50.3	51.6	1.3	48.9	51.1	2.2	47.5	48.3	0.8
16:10	65	1072	49.1	50.3	1.2	47.3	49.5	2.2	46.6	47.4	0.8
16:15	70	1100	48	49.2	1.2	46.6	48.8	2.2	45.6	46.3	0.7
16:20	75	1132	46.9	48	1.1	45.5	47.5	2	44.8	45.5	0.7
16:24	79	1158	46	47.3	1.1	44.7	46.7	2	43.6	44.1	0.7
16:31	86	1192	44.6	45.5	0.9	43.3	45.1	1.8	42	42.7	0.7
16:35	90	1214	43.8	44.7	0.9	42.5	44.2	1.7	41	41.8	0.8
16:40	95	1240	42.8	43.7	0.9	41.6	43.3	1.7	40.2	40.9	0.7
16:48	103	1276	41.4	42.3	0.9	40.1	41.7	1.6	38.9	39.6	0.7
16:50	105	1280	40.8	41.7	0.9	39.6	41.1	1.5	38.7	39.4	0.7
16:52	107	1292	40	40.9	0.9	38.7	40.2	1.5	38.6	39.2	0.6
17:13	128	1294	37.4	38.2	0.8	36.5	37.9	1.4	35	35.6	0.6
17:38	153	1302	36.3	36.9	0.6	35.4	36.5	1.1	34.5	35	0.5

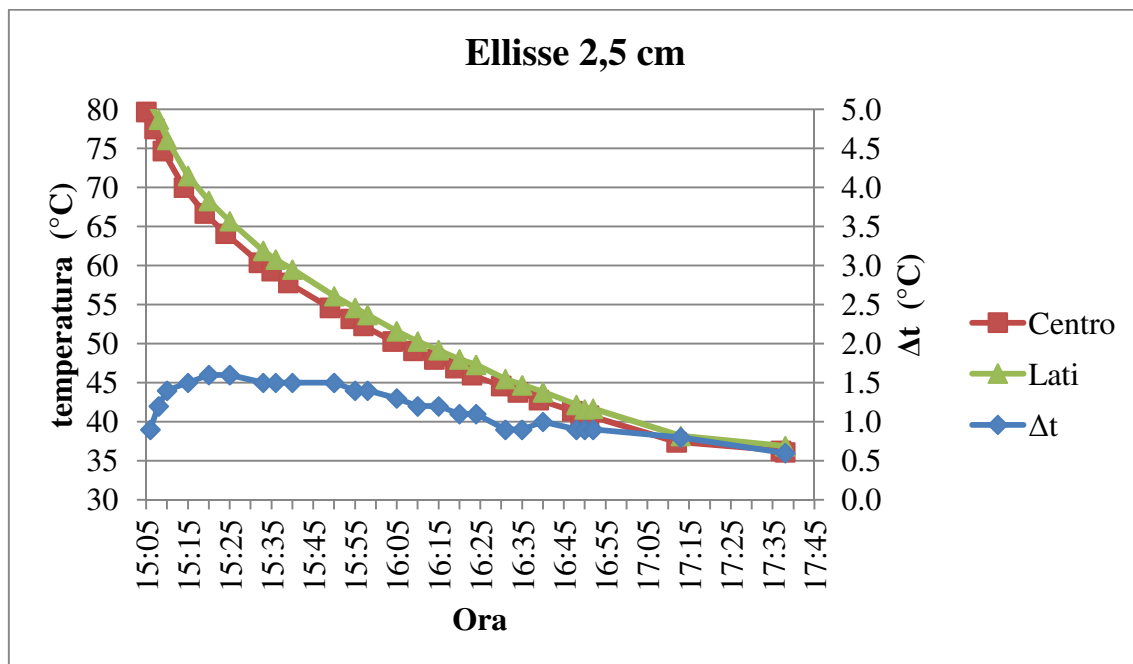


Figura 12.33 Andamento delle temperature superficiali rilevate in corrispondenza del foro a lato di questo. In blu le differenze tre tali valori.

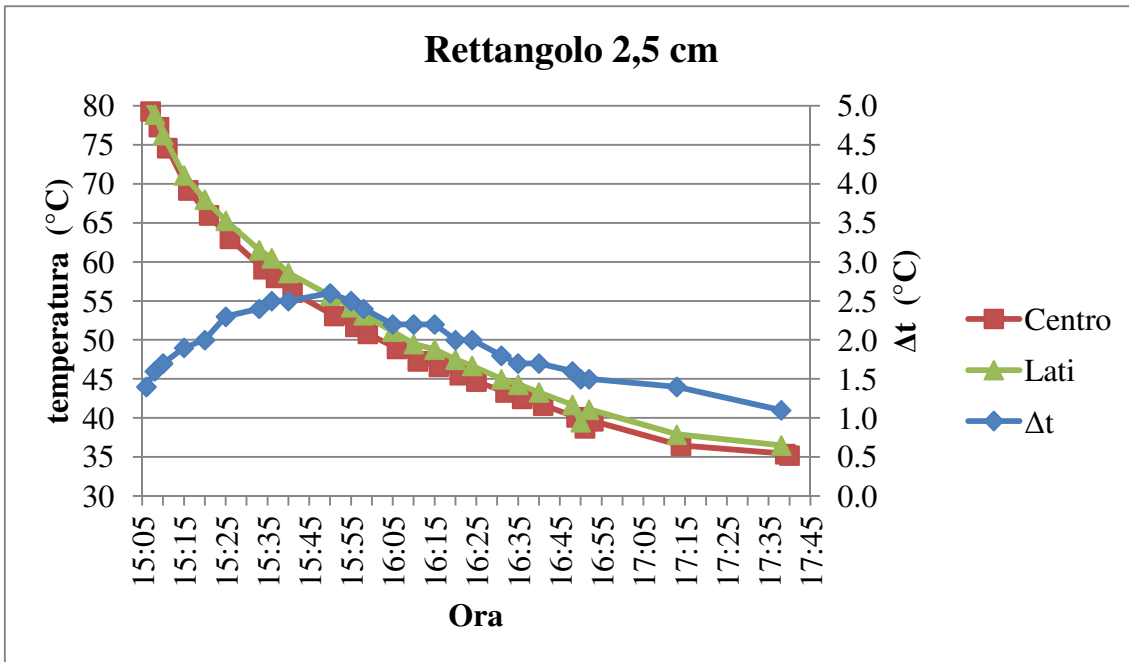


Figura 12.34 Andamento delle temperature superficiali rilevate tramite software in corrispondenza del foro a lato di questo. In blu le differenze tra tali valori.

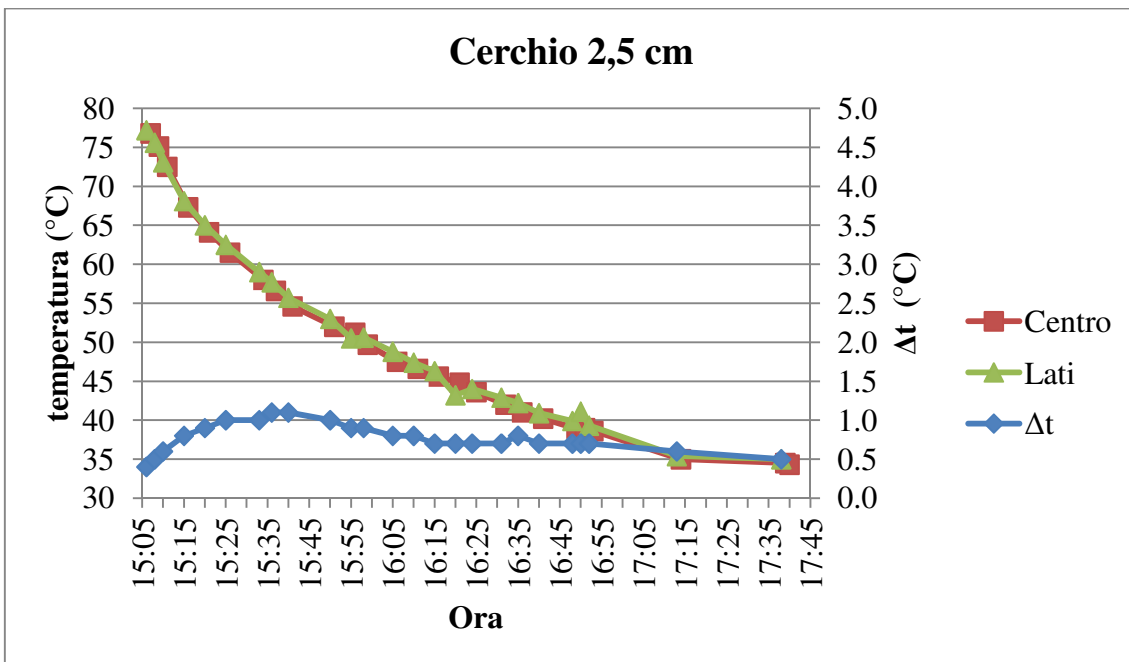


Figura 12.35 Andamento delle temperature superficiali misurate tramite software in corrispondenza del foro e ai lati di questo. In blu la differenza tra i due valori.

I dati ricavati dai laterizi con fori più superficiali (1,5 cm di profondità) hanno mostrato le differenze di temperature più elevate osservate in questo lavoro. L'analisi dei risultati per il foro ellittico a 1,5 cm (Figura 12.36) mostra ancora un andamento del grafico con i due rami ascendente

e discendente, ma in questo caso il valore massimo raggiunto è pari a 3,7°C rilevato dopo 15 minuti dall'inizio della prova (ore 15:20). Come si può notare dal grafico, l'aumento delle differenze di questi valori risulta repentino mentre la loro diminuzione è più lenta e continua per tutta la durata della prova.

Per il laterizio con foro rettangolare a 1,5 cm di profondità (Figura 12.37), si può osservare il massimo valore di differenza di temperatura registrato in tutta la prova: 4,5°C dopo 20 minuti (ore 15:25). L'andamento del grafico è del tutto simile a quello precedentemente descritto.

I risultati ottenuti per il mattone dotato di foro circolare a 1,5 cm (Figura 12.38), risultano simili a quelli descritti per i due casi precedenti variando solamente i valori delle differenze di temperature: in questo caso, infatti, il massimo è raggiunto dopo 20 minuti dall'inizio della prova ed il suo valore è pari a 2,7°C (Tabella 12.13).

*Tabella 12.13 Valori di temperatura ricavati dalla posizione generale per i fori a 1,5 cm di profondità*

Ora	tempo progress. (minuti)	numero termogr.	Temperature (°C). Profondità 1,5 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$
15:06	1	695	77.3	80.1	2.8	77.5	79.3	1.8	76.9	77.7	0.8
15:08	3	699	74.8	78	3.2	75.3	77.6	2.3	75.1	76.3	1.2
15:10	5	712	71.9	75.4	3.5	72.4	75.3	2.9	72.1	73.5	1.4
15:15	10	745	66.7	70.3	3.6	66.8	70.9	4.1	66.7	68.8	2.1
15:20	15	775	63.2	66.9	3.7	62.9	67.2	4.3	63	65.5	2.5
15:25	20	809	60.6	64.3	3.7	59.9	64.4	4.5	59.6	62.3	2.7
15:33	28	855	57.1	60.7	3.6	56.3	60.8	4.5	56.1	58.6	2.5
15:36	31	877	56.1	59.6	3.5	55.4	59.7	4.3	55.2	57.7	2.5
15:40	35	897	53.5	56.8	3.3	53.5	57.5	4	53.4	55.8	2.4
15:50	45	954	51.6	54.8	3.2	50.9	54.7	3.8	50.3	52.7	2.4
15:55	50	988	50.4	53.3	2.9	49.6	53.2	3.6	48.9	51.2	2.3
15:58	53	1006	49.6	52.4	2.8	48.8	52.3	3.5	48.1	50.2	2.1
16:05	60	1042	47.6	50.4	2.8	46.9	50.1	3.2	46.3	48.1	2.1
16:10	65	1072	46.6	49.2	2.6	46.7	49.9	3.2	45.3	47.4	2.1
16:15	70	1100	45.5	48.1	2.6	44.9	47.9	3	44	45.9	1.9
16:20	75	1132	44.4	46.9	2.5	43.6	46.6	3	43.9	45.4	1.8
16:24	79	1158	43.5	46	2.5	43.1	45.9	2.8	42	43.8	1.8
16:31	86	1192	42.2	44.5	2.3	41.6	44.3	2.7	40.5	42.3	1.8
16:35	90	1214	41.5	43.7	2.2	41.2	43.8	2.6	40	41.6	1.6
16:40	95	1240	40.6	42.7	2.1	40.2	42.6	2.4	39.1	40.7	1.6
16:48	103	1276	39.2	41.2	2	38.6	40.9	2.3	37.6	39.1	1.5
16:50	105	1280	38.9	40.8	1.9	38.4	40.7	2.3	37.1	38.6	1.5



<b>16:52</b>	107	1292	38.7	40.6	1.9	38.2	40.4	2.2	37	38.4	1.4
<b>17:13</b>	128	1294	35.4	37.2	1.8	35.2	37.1	1.9	33.8	35.2	1.4
<b>17:38</b>	153	1302	34.1	35.6	1.5	34.2	35.9	1.7	33.1	34.4	1.3

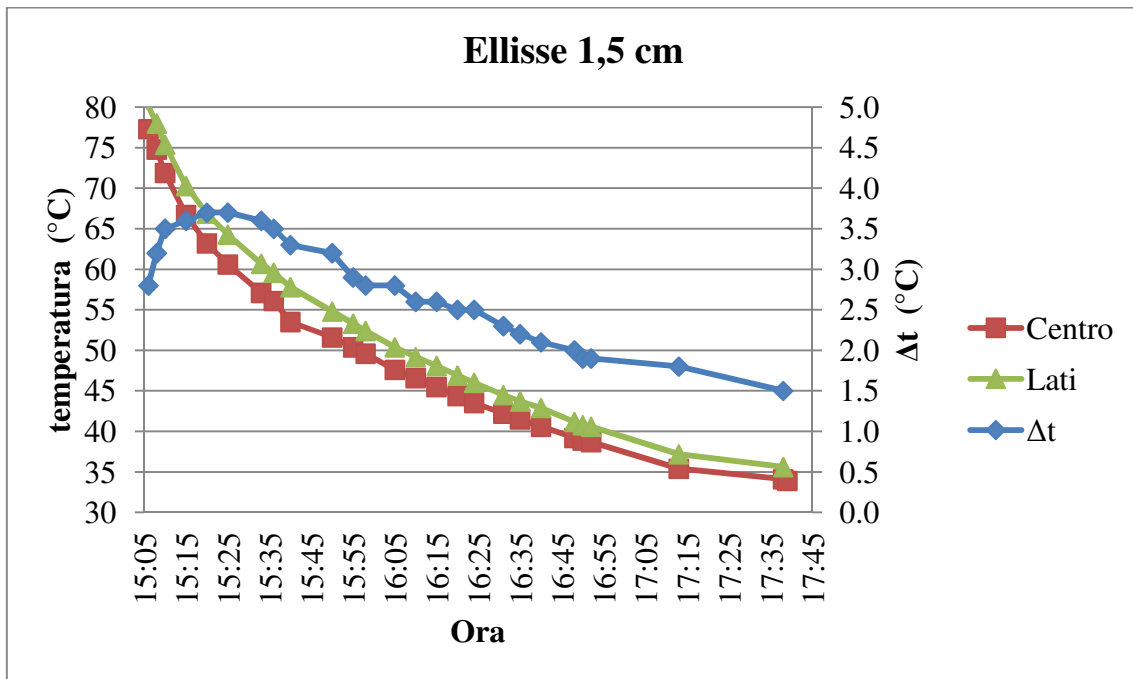


Figura 12.36 Temperature superficiali misurate in corrispondenza del foro ellittico e a lato di questo tramite software. In blu la differenza tra tali valori.

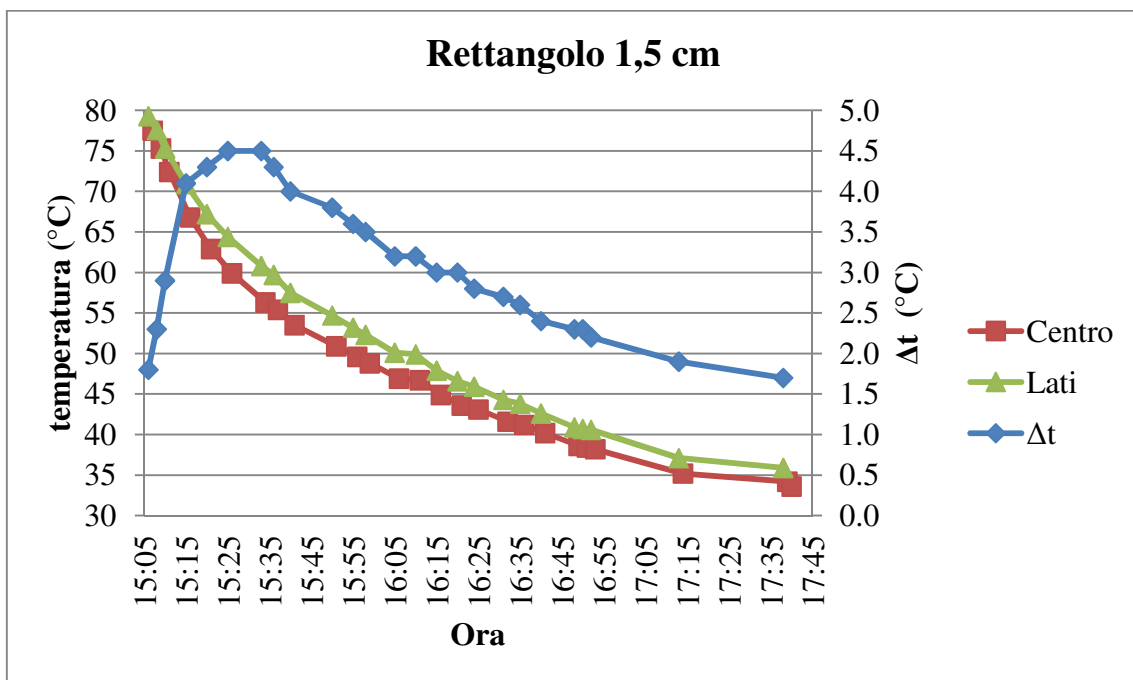


Figura 12.37 Temperature superficiali rilevate tramite software in corrispondenza del foro rettangolare e a lato di questo. In blu le differenze tra tali valori.

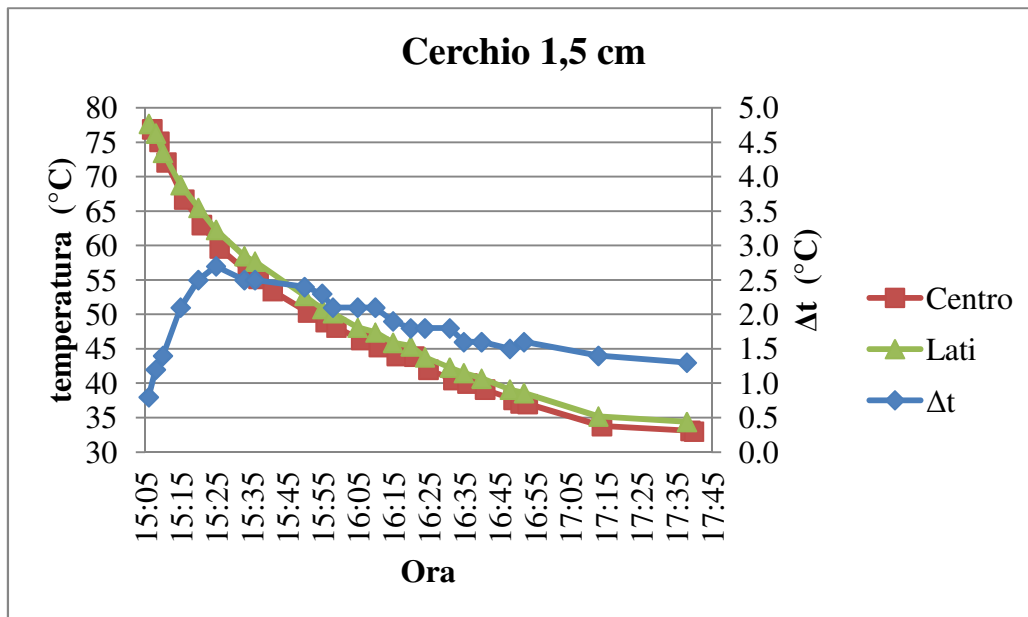


Figura 12.38 Temperature superficiali rilevate tramite software in corrispondenza del foro circolare e a lato di questo. In blu le differenze tra tali valori.

#### 12.6.2 Posizioni ravvicinate

L'analisi dei dati acquisiti da posizione ravvicinata ai provini ha consentito di valutare con maggiore precisione la differenza di temperatura tra la posizione del foro e quella ai lati di questo, visibile sulla stessa faccia del laterizio. Prima sono forniti i dati dei fori posizionati a 4 cm, poi quelli dei fori a 2,5 cm ed infine quelli a 1,5 cm.

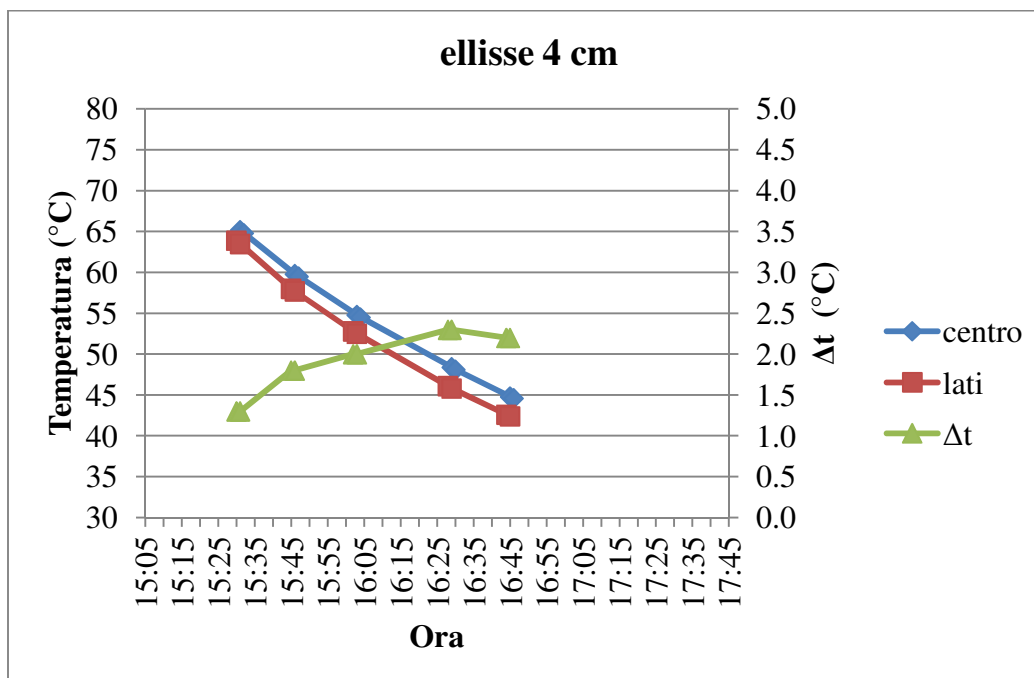


Figura 12.39 Posizione ravvicinata 3: temperature rilevate tramite software in corrispondenza del foro ellittico e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori.

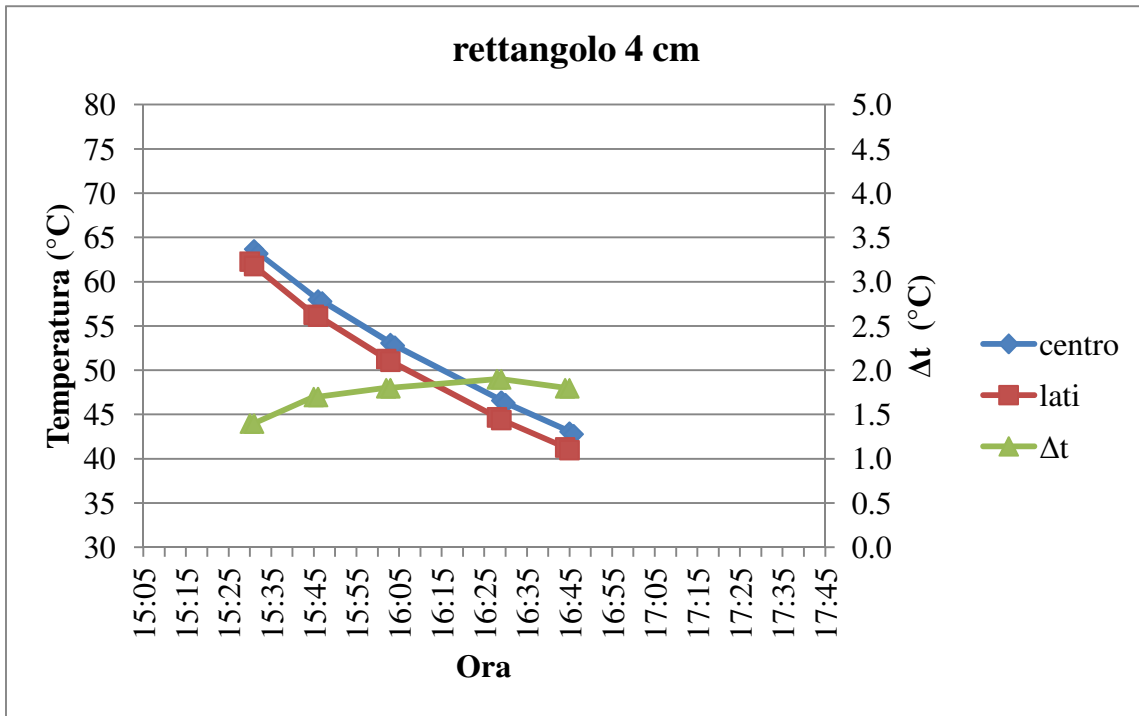


Figura 12.40 Posizione ravvicinata 3: temperatura rilevata tramite software in corrispondenza del foro rettangolare e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori.

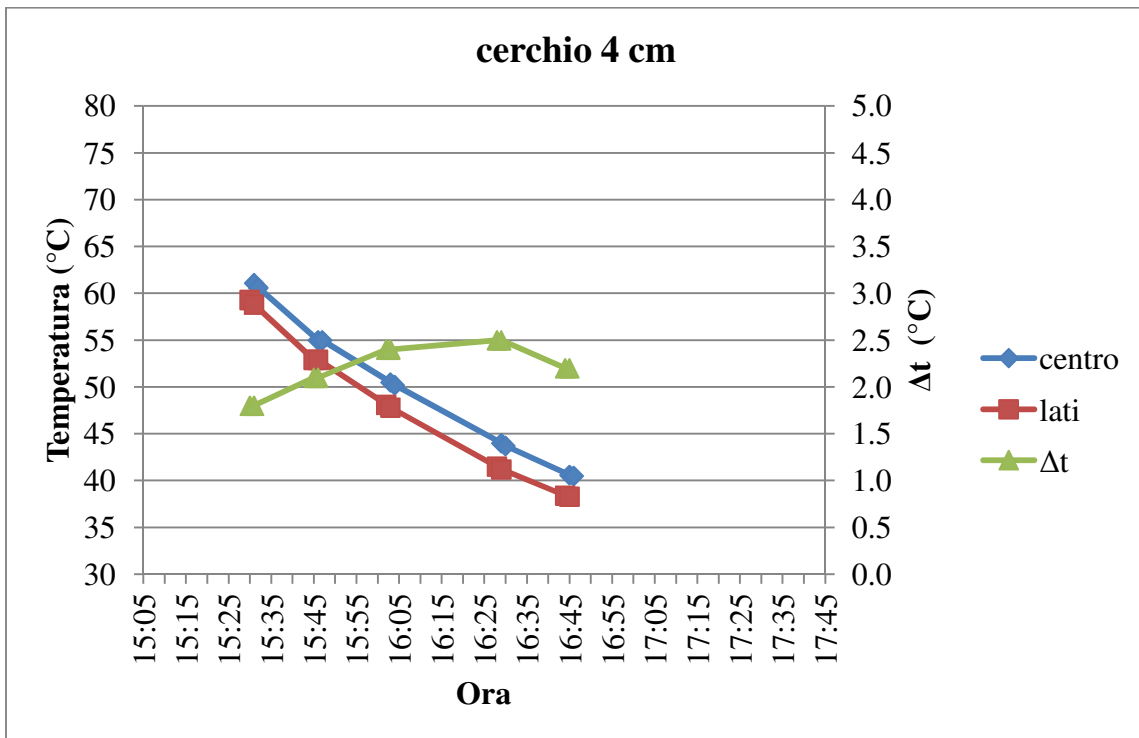


Figura 12.41 Posizione ravvicinata 3: temperature rilevate tramite software in corrispondenza del foro circolare e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori.

Tabella 12.14 Valori di temperatura ricavati solo dalla "posizione ravvicinata 3"  
(profondità dei fori 4 cm)

Ora	tempo progressivo	numero termogr.	Temperatura rilevata (°C). Profondità fori 4 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$	centro	lato	$\Delta t$
15:31	26	845	65.2	63.9	1.3	63.7	62.3	1.4	61.1	59.3	1.8
15:32	27	853	64.8	63.5	1.3	63.2	61.8	1.4	60.6	58.8	1.8
15:46	41	938	59.8	58	1.8	58	56.3	1.7	55	52.9	2.1
15:47	42	946	59.5	57.7	1.8	57.8	56.1	1.7	55	52.9	2.1
16:03	58	1032	54.8	52.8	2	53.1	51.3	1.8	50.5	48.1	2.4
16:04	59	1040	54.5	52.5	2	52.8	51	1.8	50.2	47.8	2.4
16:29	84	1182	48.4	46.1	2.3	46.6	44.7	1.9	44	41.5	2.5
16:30	85	1190	48.1	45.8	2.3	46.3	44.4	1.9	43.7	41.2	2.5
16:45	100	1263	44.8	42.6	2.2	43.1	41.3	1.8	40.6	38.4	2.2
16:46	101	1266	44.6	42.4	2.2	42.8	41	1.8	40.5	38.3	2.2

Osservando le differenze di temperatura rilevate nei laterizi con foro a 4 cm (Figura 12.39, Figura 12.40 e Figura 12.41), è possibile osservare che in tutti e tre i casi il valore massimo viene raggiunto in corrispondenza della registrazione della quarta serie di termogrammi avvenuta tra le 16:29 e le 16:30; per il foro ellittico tale valore è di 2,3°C, per quello rettangolari di 1,9°C mentre per quello circolare è di 2,5°C (Tabella 12.14).

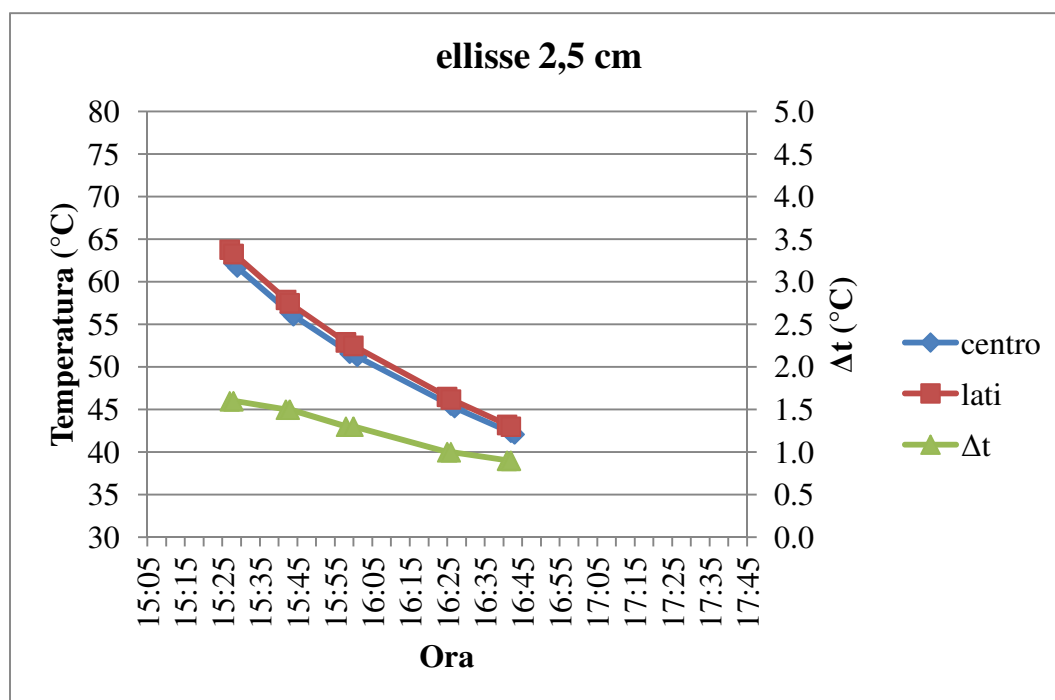


Figura 12.42 Posizione ravvicinata 2: temperature rilevate tramite software in corrispondenza del foro ellittico e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori

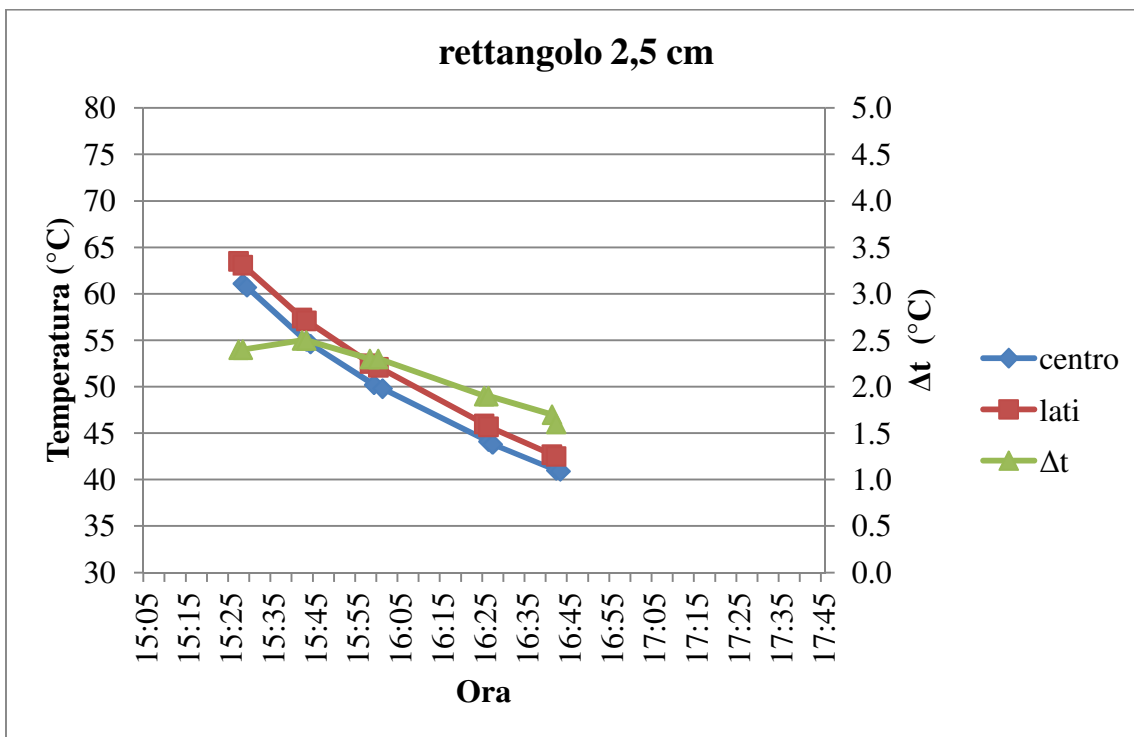


Figura 12.43 Posizione ravvicinata 2: temperature rilevate tramite software in corrispondenza del foro rettangolare e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori.

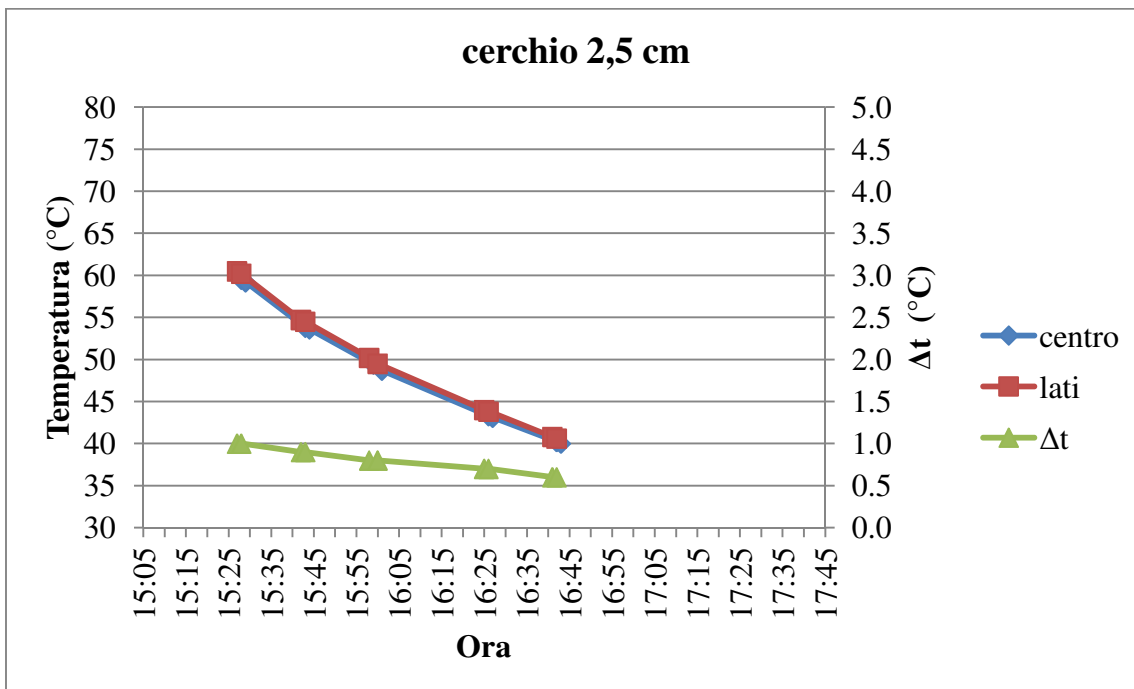


Figura 12.44 Posizione ravvicinata 2: temperature rilevate tramite software in corrispondenza del foro circolare e ai lati di questo. In verde le differenze tra tali valori.

Analizzando i risultati ottenuti per la posizione ravvicinata 2 del foro ellittico (Figura 12.42) si può osservare solamente il ramo decrescente delle differenze di temperature calcolate: il valore massimo è pari a 1,6°C (Tabella 12.15). Anche per il foro circolare (Figura 12.44) è possibile osservare solamente il ramo decrescente di tale andamento ed il valore massimo rilevato è di 1°C (Tabella 12.15). Per il laterizio con foro rettangolare a 2,5 cm di profondità (Figura 12.43), invece, la differenza massima di temperatura rilevata dalla posizione ravvicinata 2, è stata osservata alle ore 15:44 (dopo 39 minuti dall'inizio della prova) ed è pari a 2,5°C (Tabella 12.15). Questo risultato è in linea con quanto osservato dalla posizione generale: infatti, in questo caso, il valore di picco viene raggiunto più tardi rispetto agli altri laterizi con foro alla stessa profondità (ore 15:50).

Nella posizione ravvicinata 1 (Figura 12.45, Figura 12.46 e Figura 12.47), per tutti i casi analizzati la differenza di temperatura osservata riguarda solamente il ramo discendente di tale andamento: il valore più elevato è stato rilevato per il laterizio con foro rettangolare (4,4°C), poi per quello ellittico (3,6°C) ed infine per quello circolare (2,8°C) tutti rilevati alle ore 15:28 (Tabella 12.16).

*Tabella 12.15 Valori di temperatura ricavati solo dalla "posizione ravvicinata 2" (profondità dei fori 2,5 cm)*

Ora	tempo progressivo (minuti)	numero termogr.	Temperatura rilevata (°C). Profondità fori 2,5 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	Δt	centro	lato	Δt	centro	lato	Δt
15:29	24	835	62.2	63.8	1.6	61.1	63.5	2.4	59.5	60.5	1
15:30	25	843	61.7	63.3	1.6	60.7	63.1	2.4	59.2	60.2	1
15:44	39	928	56.4	57.9	1.5	54.9	57.4	2.5	53.8	54.7	0.9
15:46	41	936	56	57.5	1.5	54.6	57.1	2.5	53.6	54.5	0.9
16:01	56	1022	51.6	52.9	1.3	50.2	52.5	2.3	49.4	50.2	0.8
16:02	57	1030	51.2	52.5	1.3	49.8	52.1	2.3	48.7	49.5	0.8
16:27	82	1172	45.5	46.5	1	44.1	46	1.9	43.3	44	0.7
16:28	83	1180	45.2	46.2	1	43.8	45.7	1.9	43.1	43.8	0.7
16:44	99	1256	42.3	43.2	0.9	41	42.7	1.7	40.2	40.8	0.6
16:45	100	1264	42.1	43	0.9	40.9	42.5	1.6	40	40.6	0.6

I risultati ottenuti dalla posizione ravvicinata 1 per i laterizi con foro a 1,5 cm di profondità (Figura 12.45, Figura 12.46 e Figura 12.47) mostrano solamente il ramo discendente delle differenze di temperature superficiali. I valori massimi, quindi, corrispondono a quelli osservati negli istanti iniziali (ore 15:28, dopo 23 minuti dall'inizio della prova) e corrispondono a 3,6°C per il foro ellittico, 4,4°C per quello rettangolare e a 2,8°C per quello circolare.

Osservando i grafici è possibile notare che la velocità con cui decresce la differenza di temperatura risulta differente per i tre casi: confrontando tali valori misurati ad inizio e fine prova, è possibile notare una differenza di 2°C per il laterizio con foro rettangolare (da 4,4°C a 2,4°C), di 1,5°C per



quello con foro ellittico (da 3,6°C a 2,1°C) e di 1,3°C per quello circolare (da 2,8°C a 1,5°C) (Tabella 12.16).

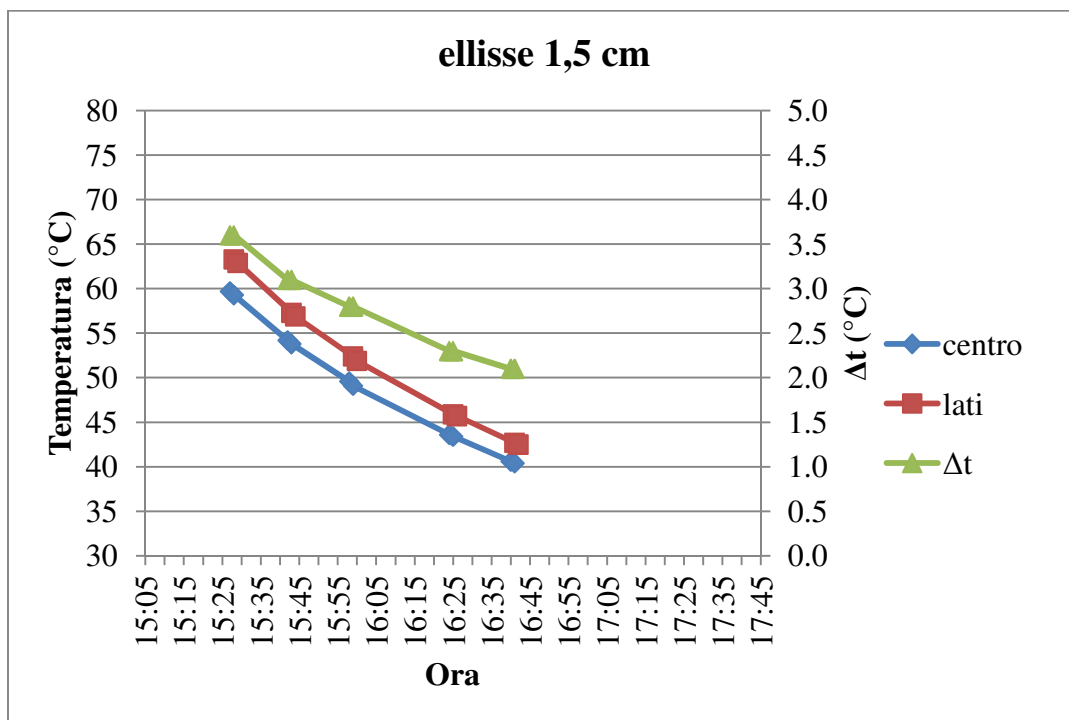


Figura 12.45 Posizione ravvicinata 1: temperature superficiali ricavate tramite software per il difetto ellittico alla profondità di 1,5 cm. In blu le differenze tra tali valori

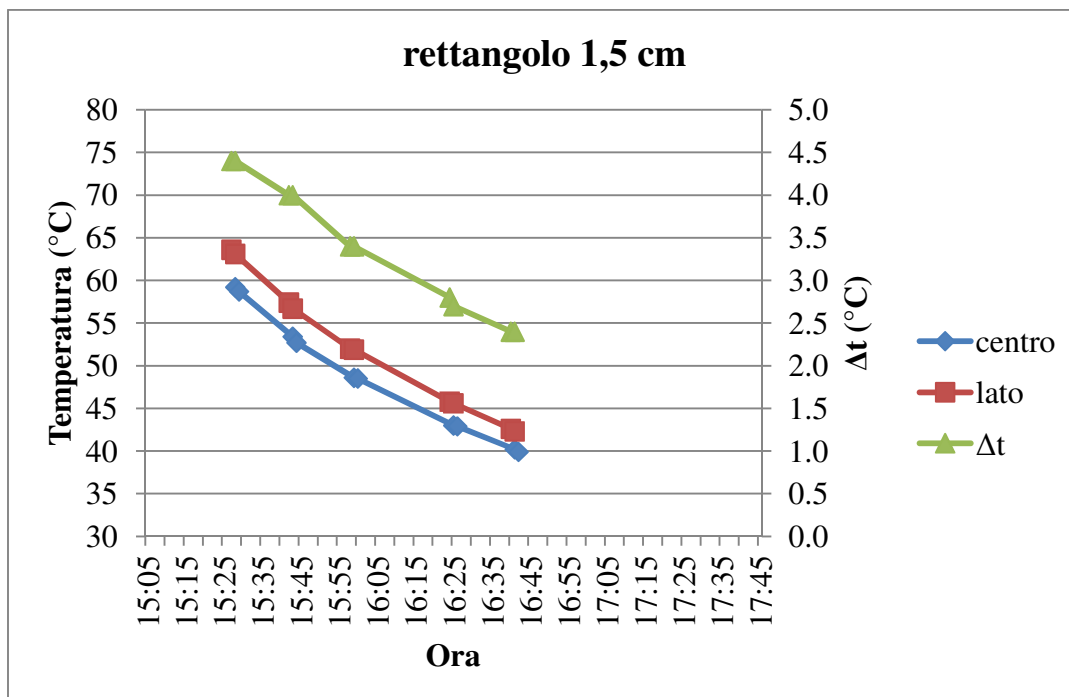


Figura 12.46 Posizione ravvicinata 1: temperature superficiali ricavate tramite software in corrispondenza del foro rettangolare e ai lati di questo. In blu le differenze tra tali valori

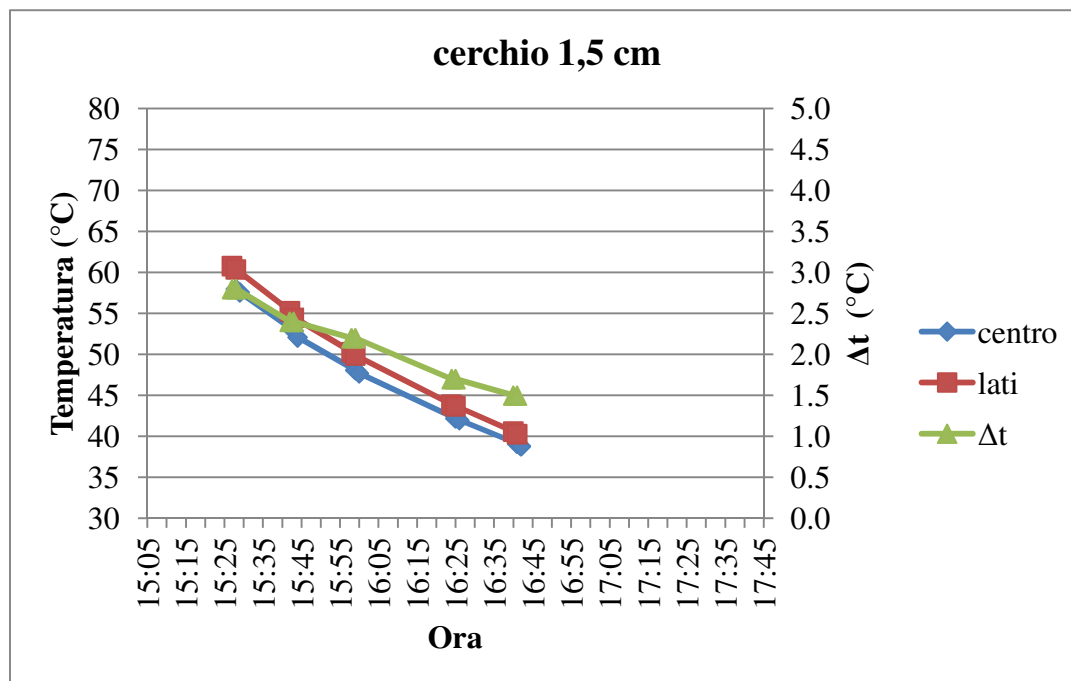


Figura 12.47 Posizione ravvicinata 1: temperatura ricavate tramite software in corrispondenza del foro circolare e ai lati di questo. In blu le differenze tra tali valori.

Tabella 12.16 Valori di temperatura ricavati solo dalla "posizione ravvicinata 1" (profondità dei fori a 1,5 cm)

Ora	tempo progress. (minuti)	numero termogr.	Temperature rilevate (°C). Profondità fori 1,5 cm								
			Ellisse			Rettangolo			Cerchio		
			centro	lato	Δt	centro	lato	Δt	centro	lato	Δt
15:28	23	827	59.7	63.3	3.6	59.2	63.6	4.4	58	60.8	2.8
15:29	24	833	59.3	62.9	3.6	58.7	63.1	4.4	57.6	60.4	2.8
15:43	38	917	54.2	57.3	3.1	53.4	57.4	4	52.9	55.3	2.4
15:44	39	924	53.8	56.9	3.1	52.7	56.7	4	52.1	54.5	2.4
15:59	54	1012	49.6	52.4	2.8	48.6	52	3.4	48.1	50.3	2.2
16:00	60	1020	49.1	51.9	2.8	48.5	51.9	3.4	47.7	49.9	2.2
16:25	80	1162	43.6	45.9	2.3	43	45.8	2.8	42.2	43.9	1.7
16:26	81	1170	43.4	45.7	2.3	42.9	45.6	2.7	42	43.7	1.7
16:41	96	1246	40.6	42.7	2.1	40.2	42.6	2.4	39.1	40.6	1.5
16:42	97	1254	40.4	42.5	2.1	39.9	42.3	2.4	38.8	40.3	1.5

## 12.7 Interpretazione dei risultati

L'analisi dei dati di termografia attiva ha messo in evidenza diversi aspetti. Innanzitutto, osservando le curve che rappresentano l'andamento generale delle temperature (da Figura 12.23 a Figura 12.29), è possibile notare che la loro variazione non è costante: nella prima parte, corrispondente

alle temperature comprese tra 60 e 80°C, si nota che il decadimento di queste avviene rapidamente, mentre nella restante parte dei grafici tale andamento risulta meno marcato. Infatti, osservando i risultati ottenuti, ed in particolare quelli relativi al laterizio con il foro ellittico posizionato alla profondità di 4,0 cm (Figura 12.48), si nota che per avere una diminuzione di temperatura di circa 20°C, sono necessari 35 minuti nel caso di temperature elevate (tra 60 ed 80°C), mentre per avere lo stesso decremento nella seconda fascia di temperature (40-60°C) risulta necessaria 1 ora e 30 minuti circa. La variazione più rapida si osserva per il laterizio con foro circolare posizionato alla profondità di 1,5 cm: per raggiungere la temperatura di 60°C sono bastati circa 20 minuti mentre per arrivare a quella di 40°C è stata necessaria un'ulteriore ora e 20 minuti; in ogni caso bisogna considerare che, seppur le temperature dei laterizi ad inizio test sono simili in quanto hanno subito lo stesso trattamento in cella climatica, il primo dato rilevato segnala una temperatura di 3,5°C superiore per il laterizio con foro ellittico.

Osservando le differenze di temperatura massime registrate (Tabella 12.17) si può notare come queste siano comprese tra un minimo di 3,5°C ed un massimo di 7,9°C: il grafico che rappresenta l'andamento di tali differenze presenta un tratto centrale circa orizzontale e due rami laterali inclinati. Il primo di questi rami presenta un'inclinazione maggiore rispetto al secondo (Figura 12.48).

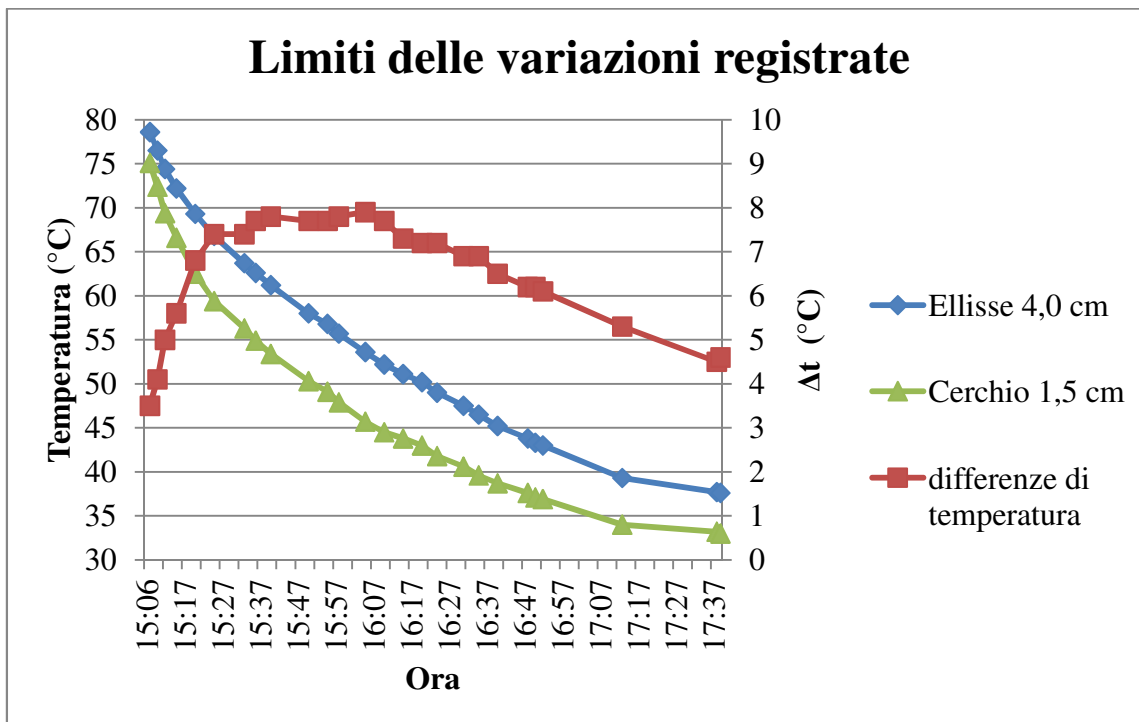


Figura 12.48 Andamento della temperatura rilevata dalla postazione generale per il laterizio con foro ellittico a 4,0 cm di profondità e per quello con foro circolare a 1,5 cm. Le differenze di temperatura devono essere lette sull'asse secondario.

Tabella 12.17 Differenze di temperatura massime

Ora	Ellisse 4,0 cm (°C)	Cerchio 1,5 cm (°C)	$\Delta T$ max (°C)
15:08	78.6	75.1	3.5
15:10	76.5	72.4	4.1
15:12	74.4	69.4	5
15:15	72.2	66.6	5.6
15:20	69.3	62.5	6.8
15:25	66.8	59.4	7.4
15:33	63.7	56.3	7.4
15:36	62.6	54.9	7.7
15:40	61.2	53.4	7.8
15:50	58	50.3	7.7
15:55	56.8	49.1	7.7
15:58	55.7	47.9	7.8
16:05	53.6	45.7	7.9
16:10	52.2	44.5	7.7
16:15	51.1	43.8	7.3
16:20	50.2	43	7.2
16:24	49	41.8	7.2
16:31	47.5	40.6	6.9
16:35	46.5	39.6	6.9
16:40	45.2	38.7	6.5
16:48	43.8	37.6	6.2
16:50	43.3	37.1	6.2
16:52	43.3	36.9	6.4
17:13	39.3	34	5.3
17:38	37.7	33.2	4.5
17:39	37.6	33	4.6

### 12.7.1 Posizione generale

I risultati ottenuti nelle prove hanno mostrato che l'andamento delle differenze di temperature superficiali rilevate in corrispondenza del foro e accanto a questo sono funzione della profondità e della forma del difetto: aumentando la profondità di questo, diminuisce il picco massimo ed aumenta il tempo necessario per raggiungere tale valore (Figura 12.49 - Figura 12.53). Per una stessa profondità del foro, i valori più elevati sono mostrati dal laterizio con foro rettangolare, poi da quello con foro ellittico ed infine da quello con foro circolare; questa tendenza, però, non viene rispettata per la profondità di 4 cm dove i valori maggiori sono osservati per il foro circolare mentre per gli altri due casi le curva tendono a sovrapporsi (Figura 12.53).

Osservando i grafici delle differenze di temperatura per i fori superficiali (Figura 12.49) si può notare che le curve corrispondenti ai laterizi dotati di foro ellittico e rettangolare risultano più vicine tra loro: nonostante i valori del picco siano sensibilmente differenti (4,5°C per il rettangolo e 3,7°C per l'ellisse), si osserva come le due curve tendano ad avvicinarsi superato il loro massimo. Tale andamento è visibile anche per la curva corrispondente al mattone con foro circolare, ma in questo caso risulta meno evidente.

Nella fase finale della prova (ore 17:38) le differenze di temperature rilevate per i tre casi sono in ogni caso confrontabili tra loro: 1,5°C per il laterizio con foro ellittico, 1,7°C per quello con foro rettangolare e 1,3°C per quello con foro circolare.

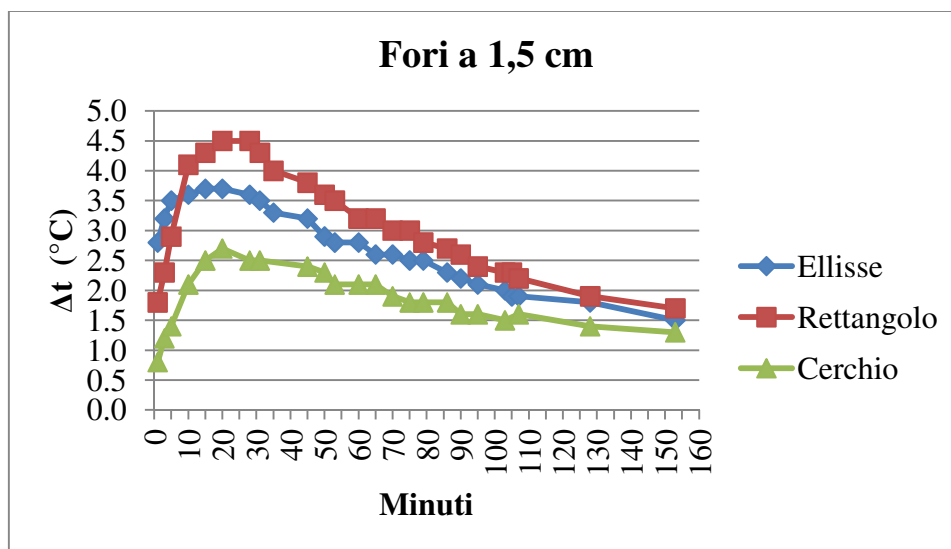


Figura 12.49 Confronto tra le differenze di temperature rilevate dalle posizioni generali per i laterizi con diverso foro posizionato alla stessa profondità (1,5 cm)

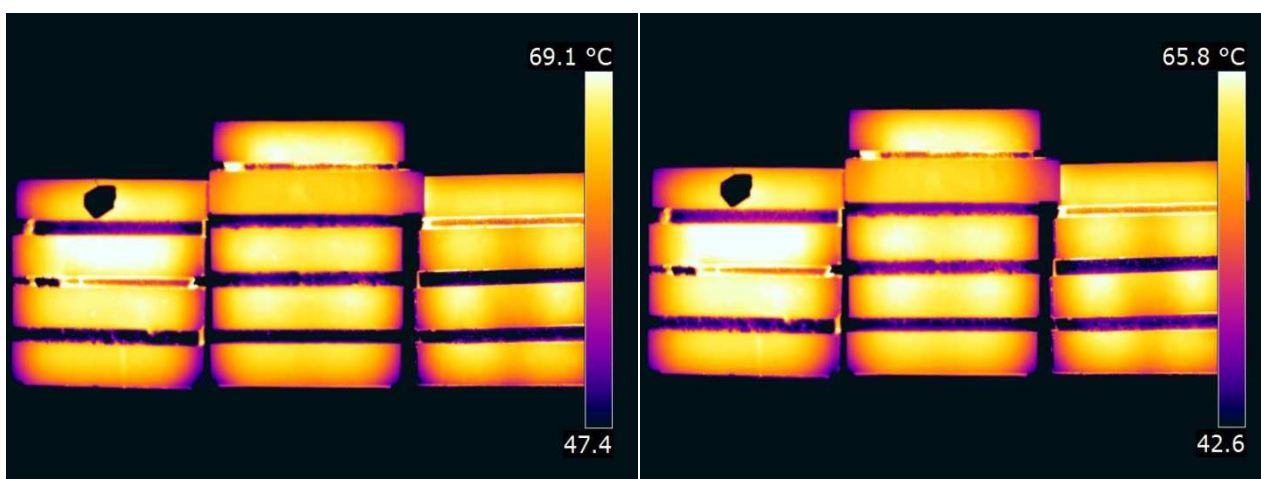


Figura 12.50 Termogrammi modificati corrispondenti alla massima differenza di temperatura osservata per i fori a 1,5 cm (colonna di destra). A sinistra: termogramma 775, ore 15:20, massima visibilità del foro ellittico (in cima). A destra: termogramma 809, ore 15:25, massima visibilità dei fori rettangolare e circolare (in basso).

I laterizi dotati di fori a 2,5 cm di profondità (Figura 12.48), invece, mostrano un diverso andamento: in questo caso, infatti, nella parte iniziale della prova, i valori delle differenze di temperature rilevati per il rettangolo e per l'ellisse sono molto vicini tra loro ma, superato il suo massimo, la curva corrispondente all'ellisse tende ad avvicinarsi a quella del cerchio fino ad evidenziare valori simili a fine prova (0,6°C per il primo caso e 0,5°C per il secondo).

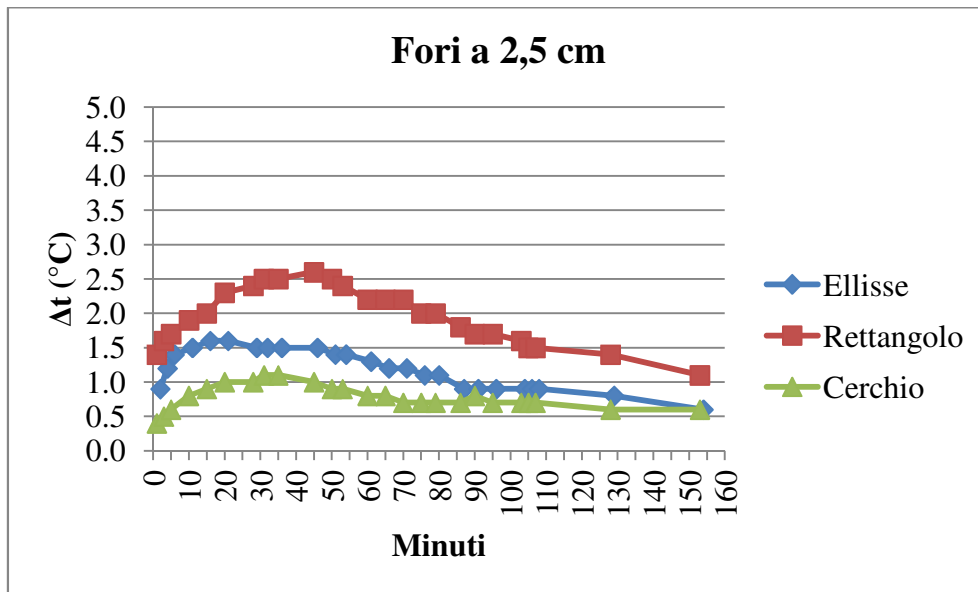


Figura 12.51 Confronto tra le differenze di temperature rilevate dalle posizioni generali per i laterizi con diverso foro posizionato alla stessa profondità (2,5 cm).

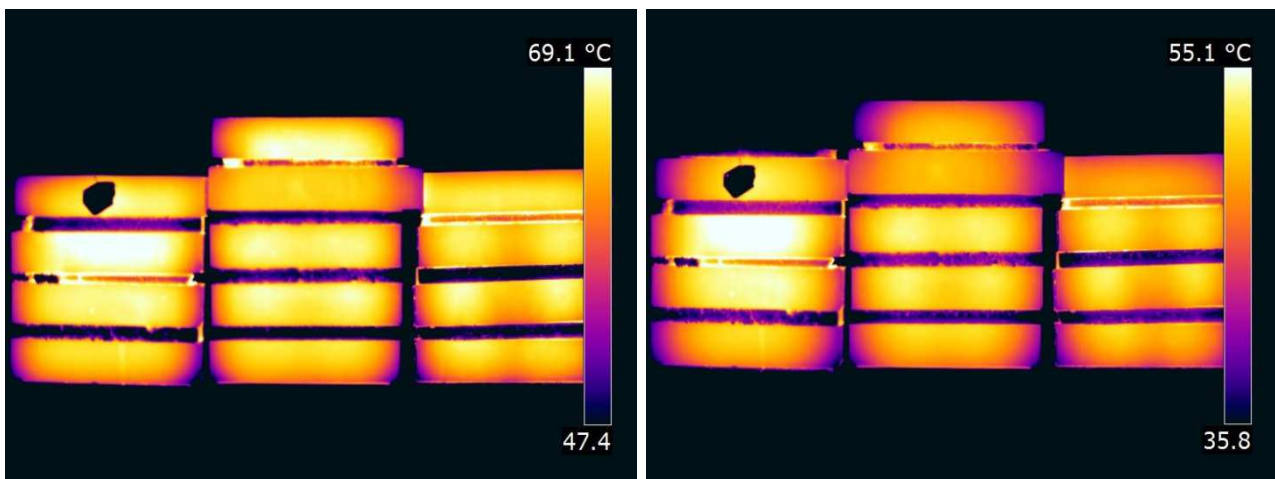


Figura 12.52 Termogrammi modificati degli istanti di massimo contrasto tra le temperature rilevate in corrispondenza dei fori a 4 cm e a lato di questi (colonna sinistra dei laterizi). A sinistra: termogramma 954, ore 15:50, massima visibilità del foro ellittico (3° dal basso). A destra: termogramma 1006, ore 15:58, massima visibilità fori rettangolare e circolare (2° e 1° mattone dal basso).



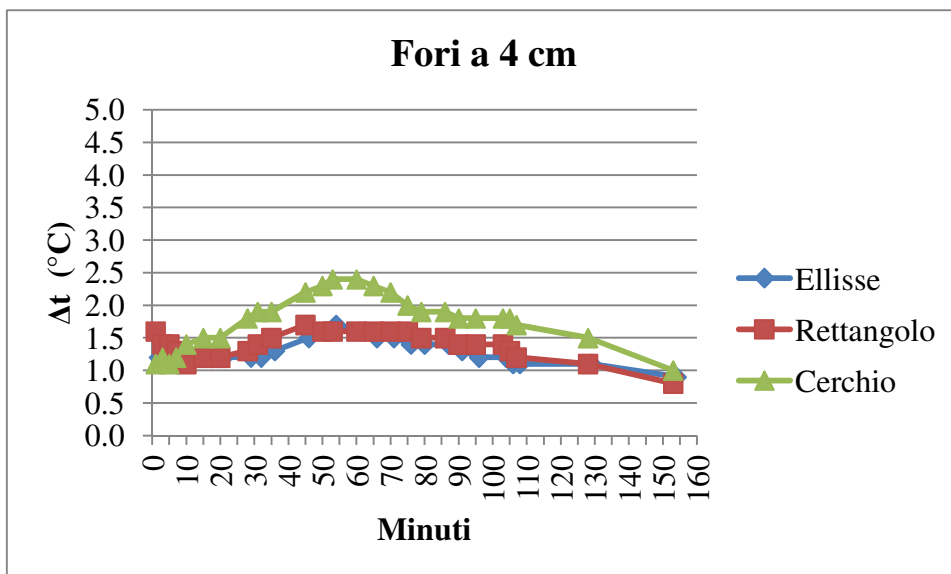


Figura 12.53 Confronto tra le differenze di temperature rilevate dalle posizioni generali per i laterizi con diverso foro posizionati alla stessa profondità (4cm).

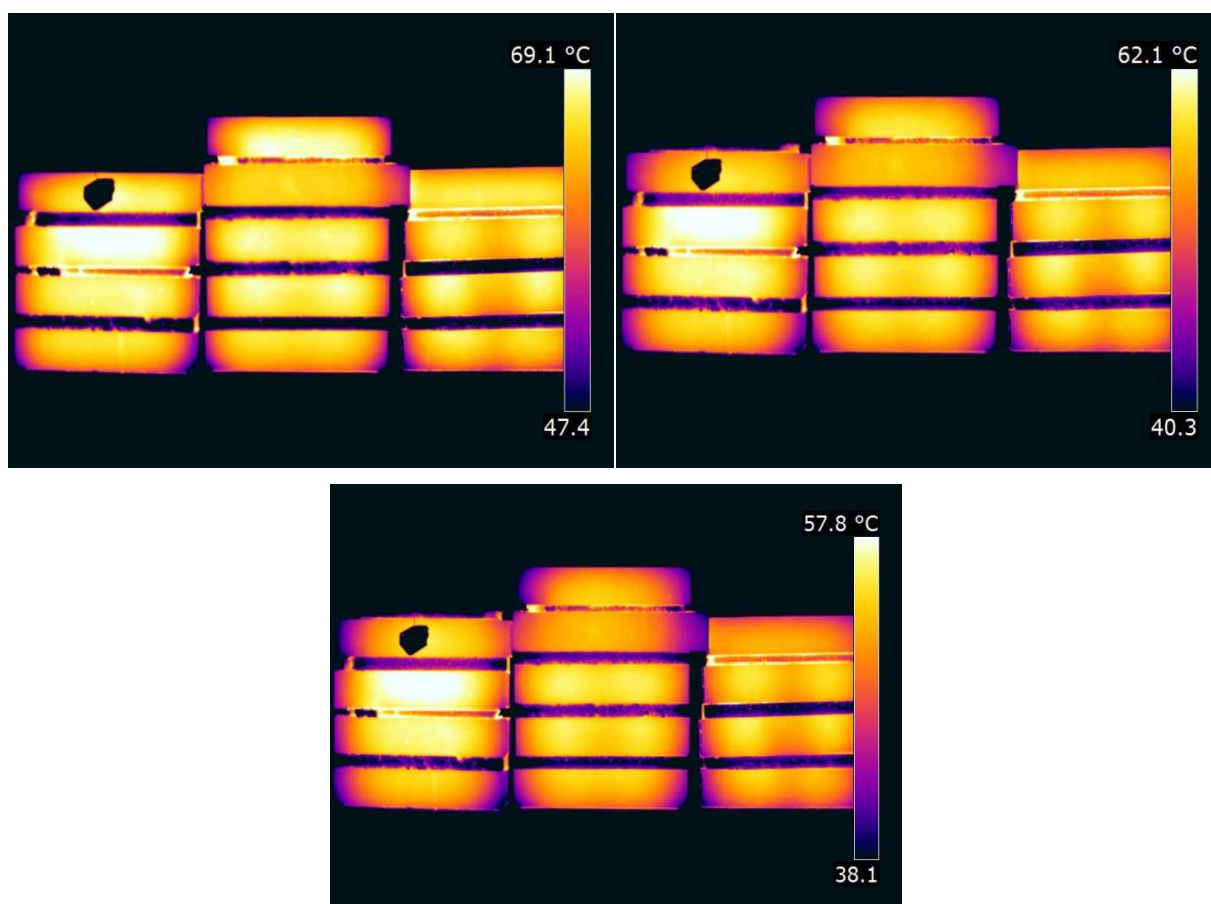


Figura 12.54 Termogrammi modificati degli istanti di massimo contrasto tra le temperature rilevate in corrispondenza dei fori posizionati a 2,5 cm e a lato di questi (colonna centrale). In alto a sinistra: termogramma 775, ore 15:20, massima visibilità del foro ellittico (3° dal basso). In alto a destra: termogramma 877, ore 15:36, massima visibilità foro circolare (1° laterizio dal basso). In basso: termogramma 954, ore 15:50, massima visibilità foro rettangolare (2° laterizio dal basso).

I risultati ottenuti per i laterizi con difetto posizionato a 4 cm di profondità (Figura 12.53), hanno evidenziato un comportamento simile per i mattoni con foro ellittico e rettangolare: le due curve, in questo caso, tendono a sovrapporsi e mostrano valori ed andamenti simili. Seppur il mattone con foro ellittico mostri temperature superficiali più elevate rispetto a quelle del mattone con foro rettangolare, le differenze tra tali valori risultano pressoché simili (Figura 12.52 e Figura 12.53).

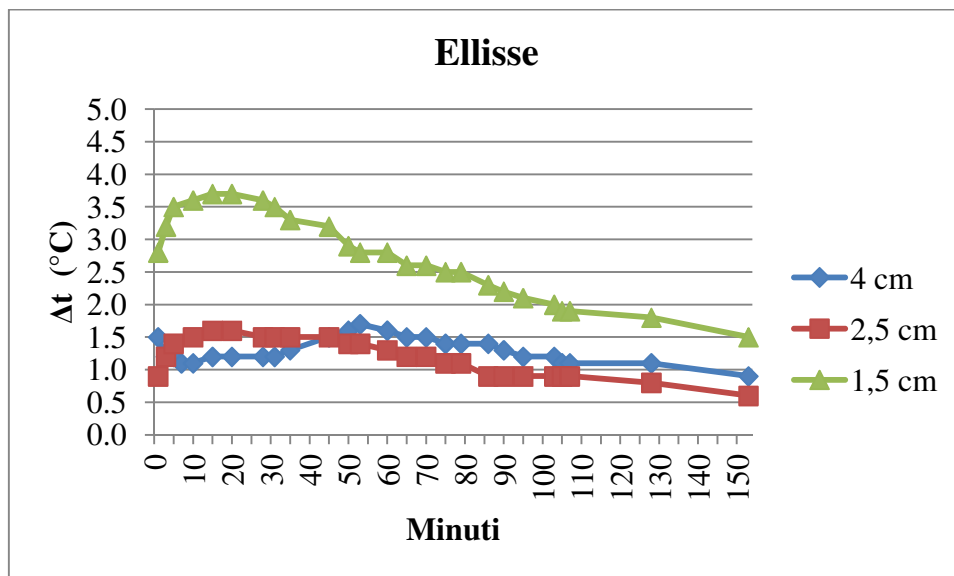


Figura 12.55 Differenze di temperature ricavate dalla posizione generale per il laterizio con foro ellittico.

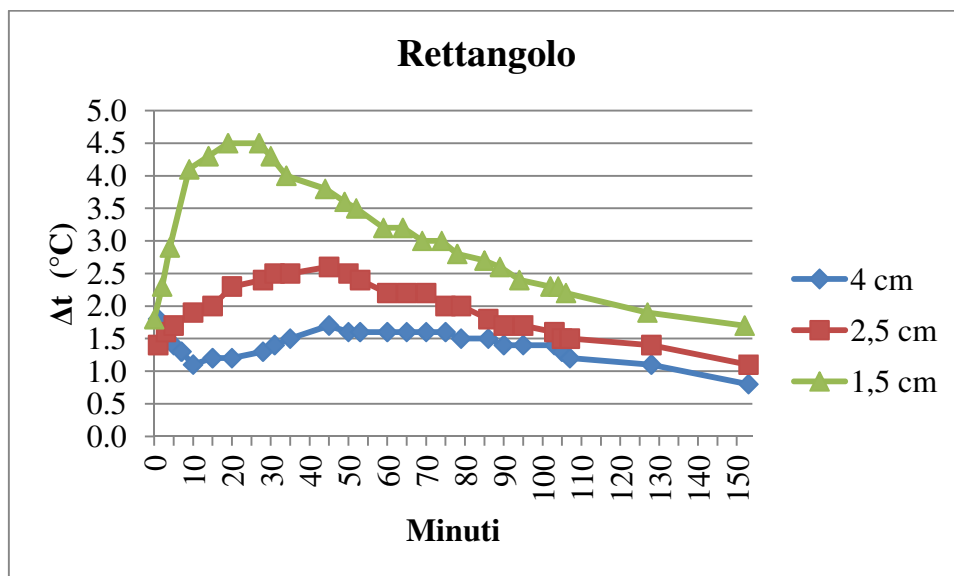


Figura 12.56 Differenze di temperature ricavate dalla posizione generale per il laterizio con foro rettangolare.

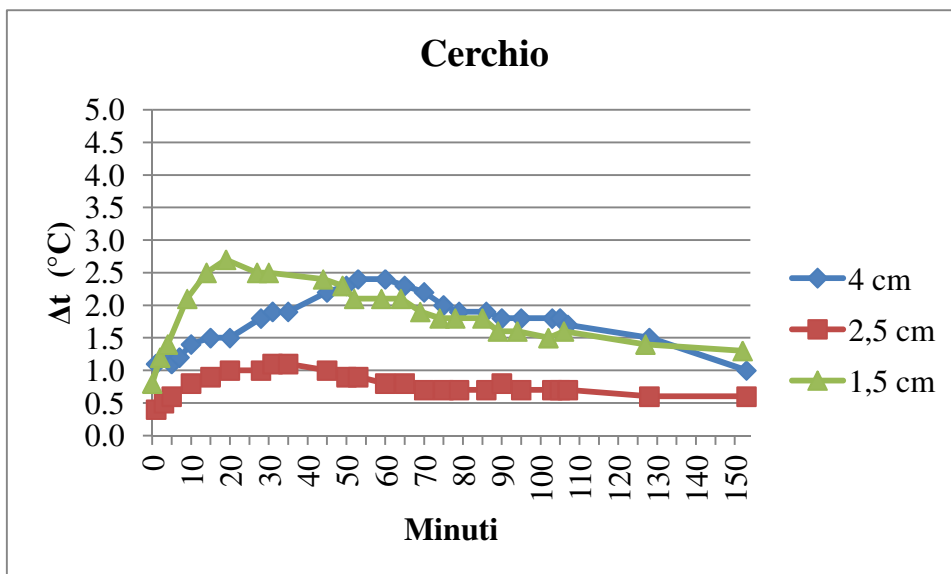


Figura 12.57 Differenze di temperature rilevate dalla posizione generale per il laterizio con foro circolare.

Osservando Figura 12.55, che mostra l'andamento delle differenze di temperature superficiali per il foro ellittico, ma posizionato a profondità differenti, si nota che nel caso di difetto superficiale (1,5 cm), i valori ricavati sono nettamente distinguibili da quelli ottenuti negli altri due casi in cui il solo modo di rilevare la diversa profondità del difetto è quella di valutare l'istante in cui si verifica il picco di tali differenze di temperature.

Situazione analoga si presenta per il laterizio con foro circolare (Figura 12.57): in questo caso, il difetto posizionato a 2,5 cm fornisce valori distinguibili dagli altri due casi che mostrano, invece, risultati simili. Anche in questo caso, per valutare la profondità del difetto, sarà necessario dover osservare l'istante in cui si verifica il picco delle differenze di temperature superficiali.

I risultati ottenuti per il mattone con foro rettangolare (Figura 12.55), invece risultano distinguibili in tutti e tre i casi analizzati sia per il valore massimo, sia per l'istante in cui viene raggiunto tale valore.

Dall'analisi dei risultati condotta dalla posizione generale si può quindi concludere che i difetti maggiormente visibili sono quelli posizionati più in superficie (1,5 cm) e tra questi il più evidente risulta quello di forma rettangolare.

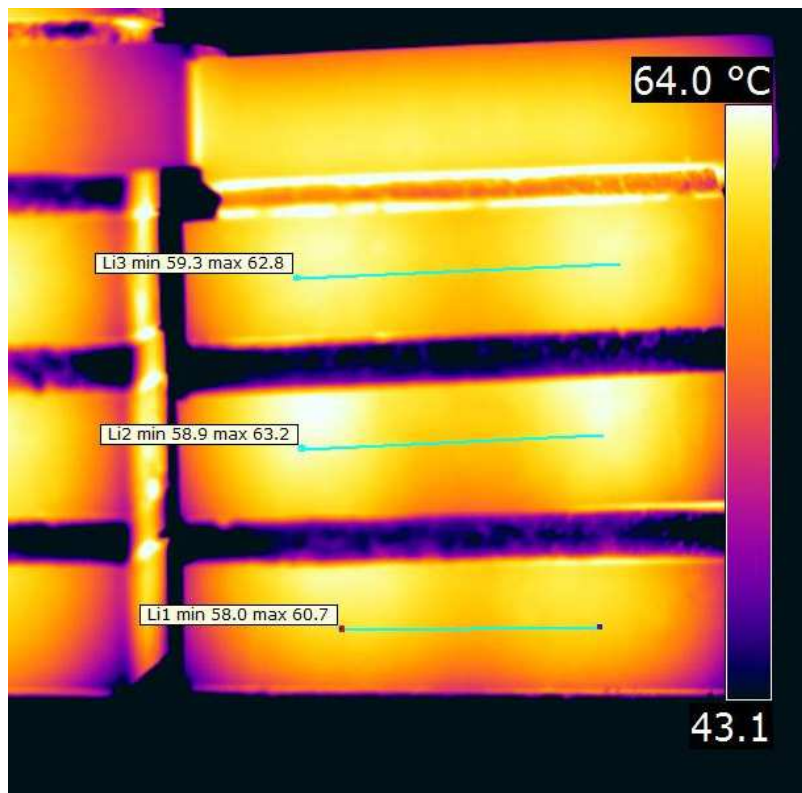
#### 12.7.2 Posizioni ravvicinate

I risultati ottenuti dall'analisi dei termogrammi raccolti in queste posizioni ha confermato quanto osservato già nella precedente analisi eseguita dalla posizione generale. Le differenze di temperature ricavate per i fori a 1,5 cm e 2,5 cm (Figura 12.59 e Figura 12.61) presentano un andamento del tutto analogo a quello evidenziato nelle precedenti analisi mentre risulta diverso

quello per il foro più profondo: se nel precedente solo i dati ottenuti per il mattone con foro circolare hanno mostrato una variazione sensibile di temperatura durante il corso della prova, in questo caso, invece, per tutti e tre i mattoni sono state osservate delle variazioni.

Ancora una volta, i valori massimi registrati sono quelli ottenuti dall'analisi dei fori più superficiali e tra questi il più elevato è stato individuato per il mattone con foro rettangolare, poi da quello con foro ellittico ed infine da quello con foro circolare come rilevato dalla posizione generale. Questa situazione si mantiene anche per i fori a 2,5 cm mentre risulta del tutto invertita per i fori a 4 cm dove il massimo delle differenze di temperature è raggiunto dal laterizio con foro circolare, poi da quello con foro ellittico ed in fine da quello con foro rettangolare (Figura 12.63).

I dati raccolti dalla posizione ravvicinata 1 (Figura 12.59) non hanno consentito di osservare il picco della curva: infatti, il primo termogramma registrato da questa posizione (ore 15:28) risulta successivo all'istante in cui viene osservato il valore massimo dalla posizione generale corrispondente alle ore 15:20 per il foro ellittico e alle 15:25 per quello rettangolare e circolare (Tabella 12.13). Dal grafico è possibile osservare come le curve corrispondenti ai laterizi con foro rettangolare ed ellittico tendono ad avvicinarsi nella fase finale della prova come individuato dalla posizione generale.



*Figura 12.58 Termogramma 0827 modificato, ore 15:28 posizione ravvicinata 1: massima differenza di temperatura osservata per i laterizi con foro a 1,5 cm*

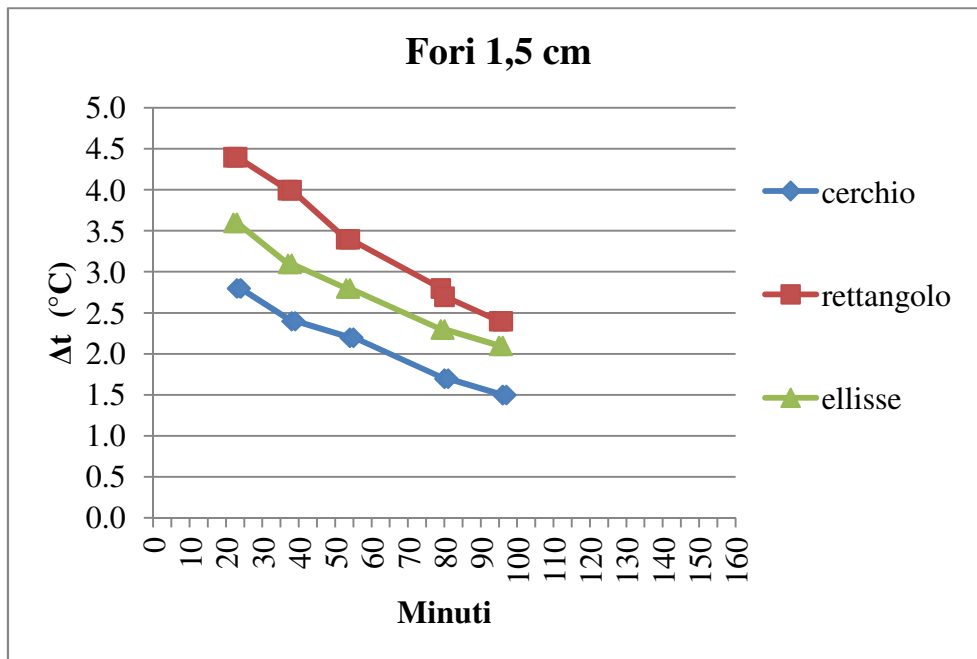


Figura 12.59 Differenze di temperature rilevate dalla posizione ravvicinata 1 per i laterizi con foro a 1,5 cm.

Per i fori a 2,5 cm (Figura 12.61), invece, è possibile notare l'apice della curva corrispondente al laterizio con cavità rettangolare: in questo caso, analogamente a quanto evidenziato dalla posizione generale, il valore massimo viene raggiunto più tardi rispetto agli altri due e precisamente alle 15:44 per i termogrammi acquisiti dalla posizione ravvicinata 2 e alle 15:50 per quelli registrati dalla posizione generale.

Dagli andamenti delle differenze di temperature superficiali è possibile osservare che le curve corrispondenti ai fori circolare ed ellittico presentano dei valori più vicini rispetto a quelli del mattone con foro rettangolare. Questo comportamento era stato evidenziato anche analizzando i risultati ottenuti dalla posizione generale.

I risultati ottenuti per il foro realizzato a maggiore profondità (Figura 12.63) risultano differenti rispetto a quelli ottenuti in precedenza: in questo caso, le curve presentano tutte un andamento crescente fino a raggiungere il loro massimo alle ore 16:29 (dopo 84 minuti dall'inizio della prova) e dopo tale istante le differenze di temperatura tornano a diminuire. Questo comportamento è stato già osservato dalla posizione generale per il mattone con foro circolare, ma si presenta diverso per gli altri due. Nei primi dati osservati da questa posizione (prime due serie) è possibile notare che le curve relative ai mattoni dotati di foro ellittico e di foro rettangolare sono praticamente coincidenti come evidenziato dalla posizione generale; dopo tale istante le curve tendono a differenziarsi e perdono la corrispondenza con i dati precedentemente analizzati.

I valori di picco raggiunti per i mattoni con foro circolare e rettangolare sono confrontabili con quelli ottenuti dalla precedente analisi mentre risultano superiori (0,6°C) quelli ottenuti per il foro ellittico.

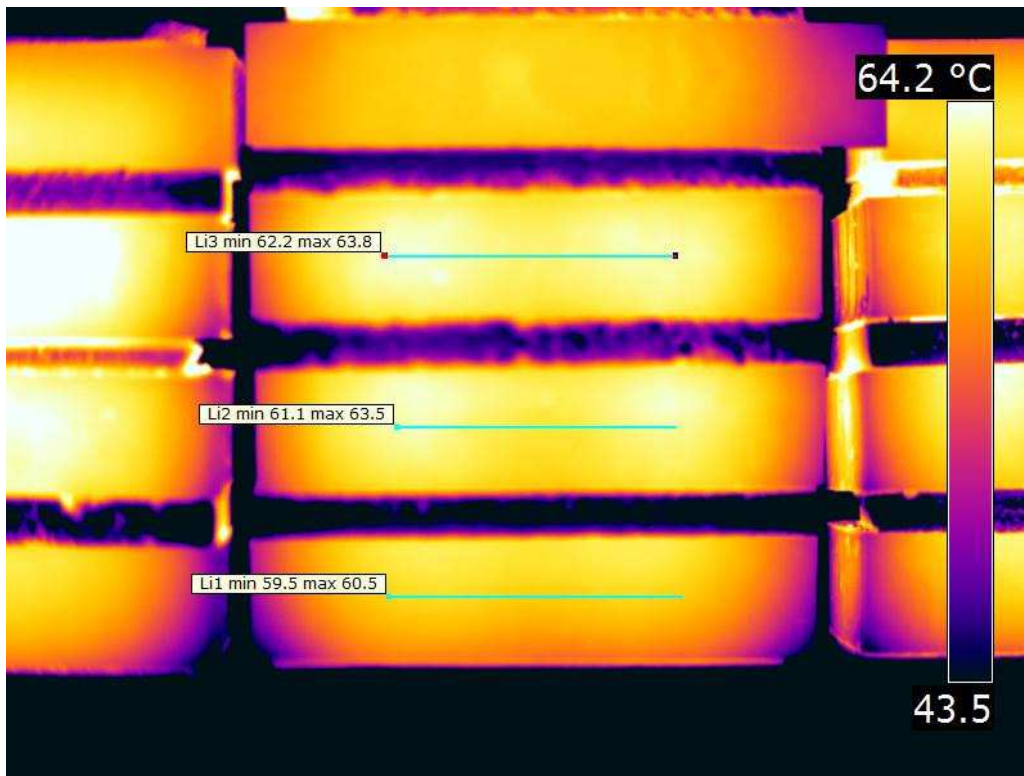


Figura 12.60 Termogramma 0809 modificato, ore 15:29, posizione ravvicinata: massima differenza di temperature osservata per i laterizi a 2,5 cm.

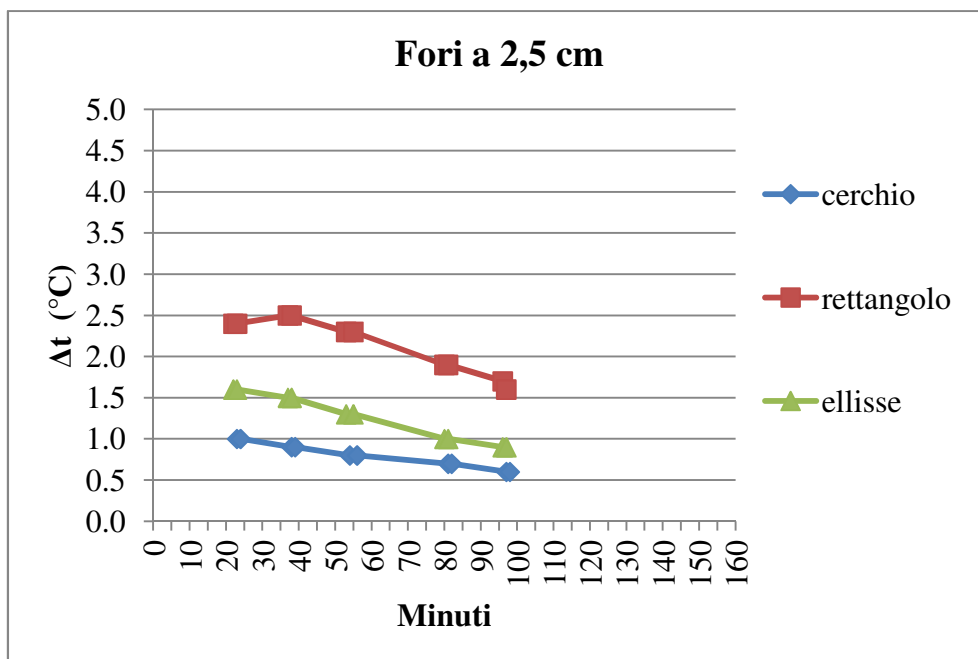


Figura 12.61 Differenze di temperature rilevate dalla posizione ravvicinata 2 per i laterizi con foro a 2,5 cm.



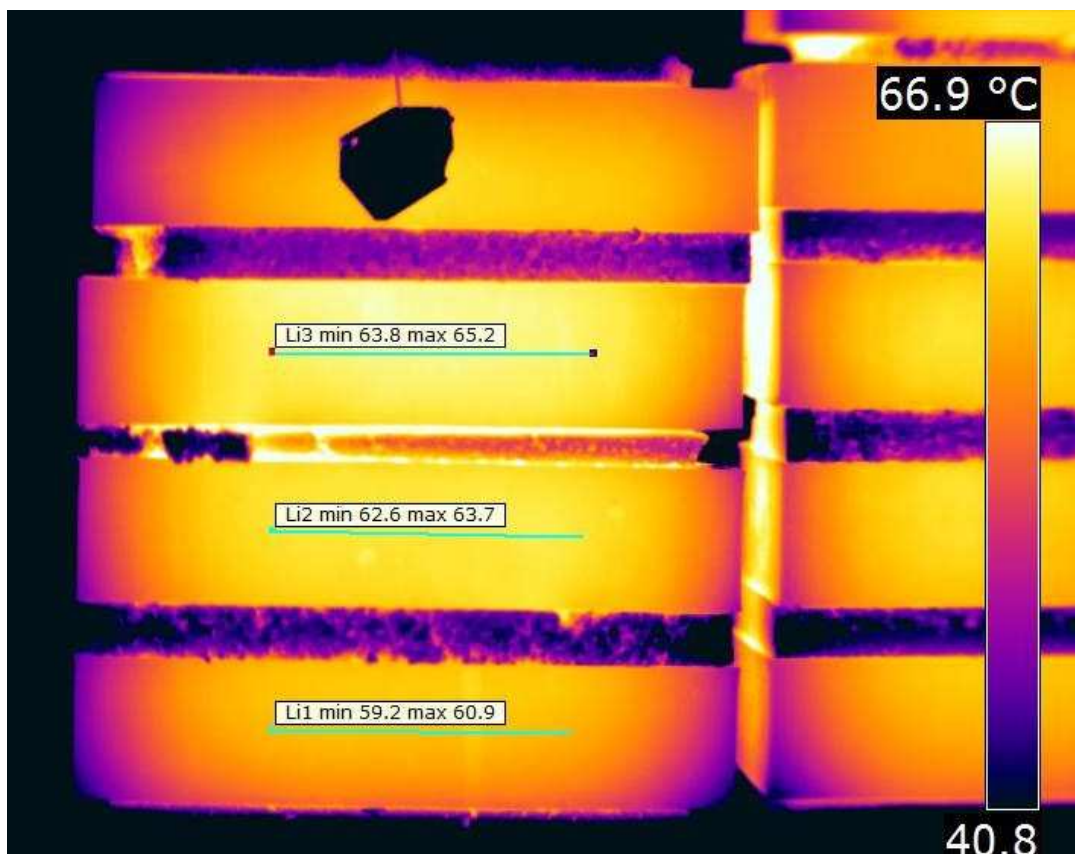


Figura 12.62 Termogramma 0845 modificato, ore 15:31, posizione ravvicinata 3: massima differenza di temperatura osservata per i laterizi con foro a 4 cm.

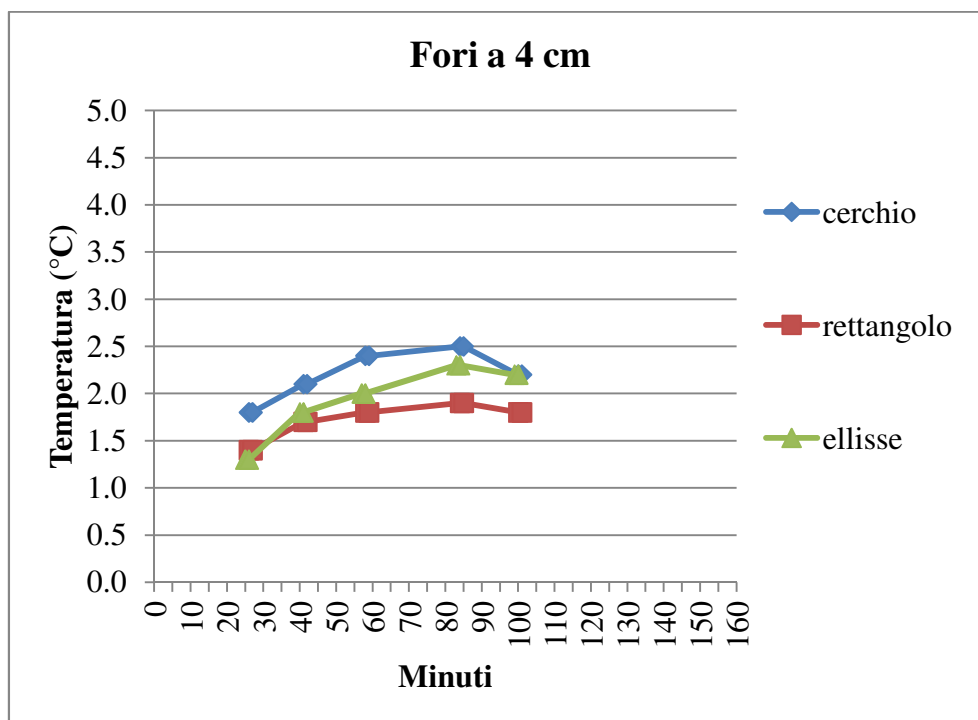


Figura 12.63 Differenze di temperature rilevate dalla posizione ravvicinata 3 per i laterizi con foro a 4 cm.

## 12.8 Osservazioni e suggerimenti

È stato possibile osservare che i fori posti in profondità (4,0 cm) appaiono, quando visibili, come delle zone a temperatura più elevata rispetto a quella che si registra per un laterizio privo di cavità: questo fenomeno potrebbe essere spiegato pensando che il calore immagazzinato nella cavità d'aria tende a disperdersi più lentamente attraverso le pareti del laterizio. Nel caso di foro circolare la differenza di temperatura registrata tra le due posizioni (in corrispondenza e a fianco del foro) è più elevata rispetto a quella osservata per le altre forme: probabilmente, l'area più piccola di questa cavità consente di mantenere più calda una minore superficie del laterizio.

I primi difetti visibili sono stati quelli posizionati alla profondità di 1,5 cm nell'ordine ellisse, rettangolo e cerchio: l'estensione maggiore visibile è stata quella associata al foro rettangolare mentre la minore quella al foro circolare.

Nella colonna centrale corrispondente ai fori a 2,5 cm di profondità sono visibili i difetti a forma rettangolare ed ellittica mentre risulta impercettibile quello di forma circolare: ancora una volta l'estensione maggiore corrisponde al laterizio con foro rettangolare.

# Conclusioni

---

In questa tesi di laurea sono stati affrontati diversi problemi legati alla diagnostica strutturale e per ognuno di questi è stata utilizzata una tecnica specifica d'indagine.

Le prove soniche eseguite per lo studio della profondità delle fessure, non si sono dimostrate adatte agli scopi: le frequenze generate con questa tecnica, non sono in grado di cogliere discontinuità materiali come quelle presenti nel solaio della sala Rossa di palazzo Malvezzi. Nonostante le indagini condotte con questa tecnica non abbiano fornito i risultati richiesti, è stato possibile rilevare le velocità di propagazione del segnale e, tramite queste, esaminare l'intervento di ristilatura effettuato sulle crepe: infatti, dalle variazioni di velocità, è stato possibile notare che l'intervento di "restauro", ha conferito una compattezza maggiore al solaio: i valori delle velocità osservati a cavallo delle fessure ristilate, sono superiori rispetto a quelli ricavati al di fuori di queste, indice che l'intervento ha conferito maggiore densità al solaio. La prova sonica consente anche di ricavare già in cantiere i primi risultati: questa caratteristica permette di modificare le posizioni di prova adattando la tecnica alle esigenze del test.

Potendo contare su un contenuto in frequenze maggiore del segnale, e quindi su una sensibilità (risoluzione) maggiore, la tecnica impact-echo, invece, si è dimostrata adatta ai fini delle indagini: i dati ricavati hanno permesso di valutare la profondità della fessura analizzata.

Il problema maggiore riscontrato in questo tipo di indagini è il tempo necessario per eseguire le prove: l'utilizzo della strumentazione da parte di addetti non specializzati, obbliga a ripetere i colpi con il martello strumentato o con la sfera in acciaio più volte, rallentando l'acquisizione dei dati. L'utilizzo di impatti ad energia calibrata potrebbe senza dubbio accelerare il processo di acquisizione dei dati.

La tecnica radar GPR si è dimostrata uno strumento molto versatile ed i maggiori pregi risiedono nella rapidità dell'acquisizione dei dati e nella possibilità di variare la profondità d'indagine e la risoluzione del segnale: queste caratteristiche hanno consentito di analizzare sia la conformazione dei solai della sala Rossa e della sala dell'Ovale, sia la presenza di umidità all'interno degli elementi strutturali del piano interrato di palazzo Malvezzi, fornendo in tutti i casi i dati necessari alle indagini. In particolare, per la sala dell'Ovale, è stato possibile notare in dettaglio la conformazione del solaio avendo utilizzato un'antenna ad elevata frequenza. Se l'analisi della risalita capillare risulta essere un fenomeno facilmente descrivibile tramite l'utilizzo di questa tecnica, lo studio della conformazione del solaio ha presentato problematiche maggiori: infatti, i radargrammi forniti dalle indagini radar, non risultano di facile interpretazione e la loro lettura può

essere piuttosto difficoltosa. Anche la strumentazione radar GPR consente di visualizzare i dati durante la loro acquisizione: questa caratteristica può risultare molto importante perché permette all'operatore di adattare l'analisi in base a ciò che viene osservato, variando così, le linee d'indagine o il setup della strumentazione. Queste caratteristiche rendono la tecnica molto versatile e adatta a diversi tipi di analisi.

Lo studio condotto in laboratorio sulla risalita capillare ha permesso di evidenziare maggiormente gli ottimi risultati ottenibili tramite un'indagine radar: infatti, in queste analisi, è stato possibile evidenziare che la tecnica, non solo è in grado di valutare i livelli di risalita capillare, ma può anche rilevare la distribuzione dell'umidità e la presenza di concentrazioni saline all'interno degli elementi analizzati. Inoltre, è stato possibile realizzare una prima approssimazione sulla relazione contenuto di umidità-caratteristiche elettromagnetiche del mezzo che hanno permesso di valutare qualitativamente il contenuto di umidità all'interno di un provino. I risultati ottenuti in questa tesi, non sono che il primo passo svolto per ottenere indicazioni dettagliate sull'analisi dell'umidità all'interno degli elementi strutturali: la relazione tra contenuto di umidità e costante dielettrica, è stata ipotizzata assumendo approssimazioni sia sulla porosità media del muretto analizzato, sia sul contenuto d'acqua presente nei pori dei diversi materiali da costruzione, imprecisioni che una analisi maggiormente dettagliata potrebbe eliminare. Porosità e caratteristiche dielettriche del mezzo sono diverse per i vari materiali da costruzione e per lo stesso tipo di materiale variano in base al loro produttore: questo evidenzia la difficoltà nel poter descrivere con una relazione generale tale fenomeno.

I principali difetti di questa tecnica, riguardano la non semplice lettura dei dati e la natura quantitativa delle indagini, e nel capitolo 11 di questa tesi viene analizzato questo aspetto: i risultati ottenuti hanno mostrato che l'indagine radar non è in grado di valutare con precisione le estensioni di oggetti inferiori ai 12 cm, e che l'errore di valutazione aumenta in base alla profondità d'ispezione. Un ulteriore problema è provocato dalla diversa rappresentazione dello stesso difetto: un oggetto posto a profondità diverse all'interno dello stesso mezzo, viene visualizzato in modi diversi nei radargrammi, fattore che ne complica la lettura.

L'ultima tecnica di diagnostica analizzata in questa tesi, la termografia, si presenta come un valido strumento di individuazione di vuoti nei laterizi. I risultati ottenuti nelle indagini svolte in laboratorio, hanno permesso di individuarne la presenza, ed in base alla loro conformazione, di valutarne la differenza massima di temperatura superficiale osservabile per ogni tipologia di difetto. Valutando anche l'istante in cui si presenta la visione di questi difetti, è possibile distinguerne la profondità e la forma: infatti, due cavità di dimensioni massime simili (rettangolo ed ellisse) e posizionate alla stessa profondità, si presentano in momenti diversi, il primo dei quali è per il

rettangolo, mentre, per una stessa forma, si presenterà prima il difetto a profondità minore. Di particolare interesse sono i risultati ottenuti per i difetti più profondi: in questo caso, il difetto viene rappresentato come zona a maggior calore, contrariamente a quanto osservato negli altri casi.

Il problema fondamentale della diagnostica è quello di poter fornire dati solamente qualitativi, ma non quantitativi: non esistono ancora relazioni tra i parametri rilevabili nelle prove e le caratteristiche meccaniche degli elementi ispezionati, se non per le prove di tipo sonico che risultano essere le più onerose dal punto di vista del tempo necessario per eseguire le indagini. Lo sviluppo tecnologico ha permesso di effettuare notevoli passi in avanti sia per la termografia, sia per il radar GPR, strumenti d'indagine dalle grandi potenzialità, ma ancora in fase di sviluppo.

La necessità di recuperare e mantenere un patrimonio architettonico importante, e la necessità di eseguire degli adeguamenti sismici in grado di rispondere alle moderne esigenze di sicurezza, sta offrendo un forte impulso alla diagnostica strutturale; questo aspetto viene evidenziato anche dalle normative vigenti che iniziano a definire standard anche in questo campo.

# Bibliografia

---

1. ACI 228.2R-98: Nondestructive Test Method for Evaluation of Concrete in Structures.
2. Arndt R.W. (2010), Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, vol. 53, 2010, pp. 246-253.
3. Augelli F. et al. (2011), Knowledge of the different roofing systems typologies in a public complex of XX century: geometric survey and material investigation. SHATIS International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 2011, Lisbon, Portugal.
4. Avdelidis N.P., Moropoulou A., Theoulakis P. (2002), Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging. *Infrared Physics & Technology*, vol. 44, 2003, pp. 183-190.
5. ASTM C 1383: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, Versione 2004, West Conshohocken, PA, U.S.A: ASTM International.
6. ASTM D 4748-10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar. West Conshohocken, PA, U.S.A.: ASTM International.
7. ASTM D 6087: Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar. Versione 2008, West Conshohocken, PA, U.S.A.: ASTM International.
8. ASTM D 6432: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation. Versione 1999, West Conshohocken, PA, U.S.A.: ASTM International.
9. Binda L., Condoleo P., Zanzi L., Lualdi M., (2005), The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *NDT&E International*, vol. 38, 2005, pp. 171-179.
10. Binda L. et al. (2000), Investigation procedure for the investigation of historic masonries, *Construction and Building Materials*, vol.14, 2000, pp.199-213.
11. Binda L., Lenzi G., Saisi A. (1998), NDE of masonry structures: use of radar test for the characterisation of stone masonries. *NDT&E International*, vol. 31, No. 6, 1998, pp. 411-419.



12. Caner-Saltik E.N., Düzgünes A., Demirci Ş., Tavukçuoğlu A. (2005), Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzikarahan (Aksaray), Turkey. *NDT&E International*, vol. 38, 2005, pp. 402-410.
13. Capobianchi L. (2009), Diagnostica di strutture storiche: il caso di studio del palazzo Malvezzi De' Medici in Bologna. Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Rel. Prof. G. Pascale, Co-rel. Dr. C. Colla, A.A 2008-2009 Sessione I, pp. 211
14. Carino N.J. (2001), *The Impact-Echo Method: an Overview*. National Institute of Standard and Technology. Reprinted from the proceeding of the 2001 Structure Congress & Exposition; Washington, D.C., May 21-23, 2001, American Society of Civil Engineering, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 18p.
15. Carlomagno G.M., Di Maio R., Meola C., Roberti N., (2005), Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis*, vol. 12, 2005, pp. 875-892.
16. Chen C. H. (2007), *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material characterization*. World Scientific, Singapore
17. Clark M.R., McCann D.M., Forde M.C. (2003), Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT&E International*, vol. 36, 2003, pp. 265-275.
18. Colla C. (2009), Diagnosi di muratura, calcestruzzo e legno tramite georadar per la valutazione e conservazione di costruzioni e infrastrutture. *AIPnD Journal, Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica*, settembre, 2009.
19. Colla C. (2009), Diagnosi di elementi strutturali lignei e murari mediante tomografia sonora: esempi applicativi per la valutazione dello stato conservativo di beni storico-culturali. *AIPnD*, 2009.
20. Colla C., Pascale G. (2007), Prove soniche superficiali per l'indagine dello stato fessurativo di murature in laterizio. *AIPnD*, 2007.
21. Colla C., Gabrielli E., Pascale G. (2009). Metodo impact-echo per la valutazione dello stato di riempimento di guaine di postcompressione in strutture di calcestruzzo. *AIPnD*, 2009.
22. Daniels D.J. (2004), *Ground Penetrating Radar – 2<sup>nd</sup> Edition*. Institution of Electrical Engineers. United Kingdom, London.
23. Di Giovenale A. (2008), Metodo impact-echo per la diagnostica strutturale: esperienza di laboratorio su solette di calcestruzzo contenenti guaine per post-tensione. Tesi di Laurea

- Specialistica in Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Rel. Prof. G. Pascale, Co-rel Prof. A. Benedetti, C. Colla, A.A. 2007-2008 Sessione I, pp.318
24. Forde M.C.(2008), Georadar for the investigation of existing structures. SACoMaTiS 2008, International RILEM Conference, 1-2 September, Italy.
  25. FLIR (2009), Manuale dell'utente. FILR 600 series. March, 2009
  26. Gabrielli E. (2007), Diagnostica strutturale con il metodo impact-echo di solette in calcestruzzo contenenti guaine per post-tensione. Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Rel. Prof. G. Pascale, Co-rel. Prof. A. Benedetti, C. Colla.
  27. GSSI (2009), RADAN Manual, version 6.6. Geophysical Survey System, August, 2009.
  28. Hallier C.J. (2003), Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill, U.S.A
  29. Hugenschmidt J. (2008), Il Georadar per la valutazione non distruttiva di infrastrutture di trasporto. AIPnD Journal, Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, aprile, 2009.
  30. Jol H.M. (2009), Ground Penetrating Radar. Theory and Applications. Elsevier. The Netherlands, Amsterdam
  31. Kahle M. (1993), Investigation of Historic Masonry by Means of Radar. IABSE Symposium, Structural Preservation of the Architectural Heritage, vol. 70, 1993, Rome, Italy, pp. 205-212
  32. Kahle M., Wenzel F. (1993), Indirect Methods of Investigation for Evaluating Historic Masonry. IABSE Symposium, Structural Preservation of the Architectural Heritage, vol. 70, 1993, Rome, Italy, pp. 75-90
  33. Longo P., Proverbio E., Venturi V., Santacroce D., Venturi M. (2009), L'apprioccio integrato alla valutazione del danno delle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi. Un esempio pratico di applicazione di tecniche di indagine innovative: impact-echo, emissione acustica, georadar (GPR). AIPnD, 2009.
  34. Lorenzo H., Novo A., Rial F.I., Solla M. (2011), GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). NDT&E International, vol. 4, pp. 8-12.
  35. Lualdi M., Zanzi L.(2008), Recenti progressi nella tecnologia GPR e loro impatto sulle applicazioni per la diagnostica. AIPnD Journal (2008), Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica.
  36. Maierhofer C., Röllig M., Trela C., Wöstmann J. (2008), Investigation of moisture content and distribution with radar and active thermography. SACoMaTiS 2008, UInternational RILEM Conference, 1-2 September, Italy, pp. 411-420.

37. Meola C. (2007), Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Physics & Technology*, vol. 49, 2007, pp. 228-233.
38. Meola C. (2007), A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. *Materials Letters*, vol. 61, 2007, pp. 747-750.
39. Mix P.E. (2005), *Introduction to Nondestructive Testing. A Training Guide, Second Edition.* Wiley, New Jersey.
40. RILEM TC 127-MS: Tests for masonry materials and structures (2001). RILEM TC 127-MS: NONDESTRUCTIVE TESTS FOR MASONRY MATERIALS AND STRUCTURES. *Materials and Structures*, vol. 34 April 2001, pp. 134-143.
41. RILEM TC 177-MDT: "Masonry durability and on-site testing" (2005), MD.E.1: Determination of moisture distribution and level using radar in masonry built with regular units. *Materials and Structures*, vol. 38, March 2005, pp. 283-388.
42. Sadri A. (2003), Application of impact-echo technique in diagnoses and repair of stone masonry structures. *NDT&E international*, vol.36, 2003, pp.195-202.
43. Sansalone M.J.(1997), *Impact-Echo: the Complete Story*, *ACI Structural Journal*, November-December 1997, pp. 777-786
44. Sansalone M.J., Streett W.B. (1997), *Impact-Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry.* Ithaca, N.Y.
45. Shull P.J. (2001), *Nondestructive Evaluation. Theory, Techniques, and Application.* Marcel Dekker, New York