

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA delle STRUTTURE, dei TRASPORTI,
delle ACQUE, del RILEVAMENTO del TERRITORIO*

DISTART

TESI DI LAUREA

In

Meccanica dei Materiali Innovativi

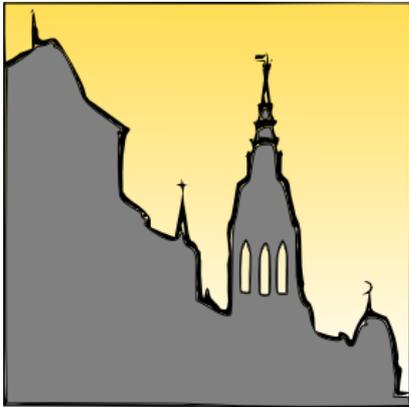
**DIAGNOSI NON DISTRUTTIVA DI MURATURE DI LATERIZIO:
APPLICAZIONI DI TOMOGRAFIA SONICA IN LABORATORIO**

CANDIDATO
Valentina Serra

RELATORE
Prof. Ing. Giovanni Pascale

CORRELATORI
Dr. Arch. Camilla Colla
Prof. Ing. Francesco Ubertini

Anno Accademico 2009/10
Sessione I



SHOOHS

www.smoohs.eu



INDICE

1. Introduzione	1
2. Diagnostica delle strutture attraverso prove non distruttive: tomografia sonora ...	5
2.1 Cenni su tecniche di indagine non distruttiva	5
2.2 Basi teoriche delle prove sonore	13
2.3 Definizione di tomografia sonora	20
2.4 Applicazioni di tomografia sonora a edifici storici.....	23
3. Muratura di laterizio: descrizione dei modelli fisici.....	31
3.1. Murature: cenni storici, materiali componenti, loro fabbricazione e regole dell'arte	31
3.2. Caratteristiche dei materiali: geometria e costruzione dei provini	37
4. Procedura di acquisizione ed elaborazione dei dati	51
4.1 Progettazione delle acquisizioni	51
4.2 Illustrazione della strumentazione	77
4.3 Procedura di acquisizione dei dati in laboratorio	79
4.4 Descrizione dei software di analisi e inversione dei dati.....	87
4.4.1 Calcolo dei tempi di volo.....	87
4.4.2 Inversione dei tempi di volo.....	92
4.4.3 Calcolo dell'attenuazione.....	107
5. Tomografia sonora: analisi dei tempi di volo e visualizzazione dei corsi orizzontali	111
5.1. Muretto PNDE, corso 6: studio parametrico di fattori di inversione tomografica	111
5.1.1. Numero dei pixel	121
5.1.2. Influenza e tipo di iterazioni	130
5.2. Muretto PNDE.....	163
5.2.1 Corso 6: confronto tra griglia di 43x19 pixel e griglia di 34x10 pixel.....	163
5.2.2 Corso 11: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 34x10 pixel.....	178
5.2.3 Corso 12: confronto tra griglia di 43x19 pixel e griglia di 32x19 pixel.....	194
5.2.4 Corso 17: confronto tra griglia di 52x19 pixel e 32x19 pixel.....	210
5.3. Muretto PNDF	227
5.3.1 Corso 5: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 32x19 pixel.....	227
5.3.2 Corso 7: griglia di 43x19 pixel.....	242
5.3.3 Corso 12: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 32x19 pixel.....	254
5.4 Confronti e osservazioni critiche.....	268
6. Tomografia sonora: analisi dei dati e visualizzazione delle sezioni verticali.....	277
6.1 Muretto PNDE.....	278

6.1.1. SEZIONE A-A': confronto tra griglia di 19x52 pixel, griglia di 19x33 pixel, griglia di 9x33 pixel e griglia di 11x38 pixel	280
6.1.2 SEZIONE B-B': confronto tra griglia di 19x52 pixel, griglia di 19x33 pixel, griglia di 9x31 pixel e griglia di 11x38 pixel	312
6.2 Muretto PNDF.....	341
6.2.1. SEZIONE A-A': confronto tra griglia di 19x52 pixel e griglia di 11x38 pixel	342
6.2.2 SEZIONE B-B': confronto tra griglia di 19x52 pixel e griglia di 11x38 pixel.....	361
6.3 Confronti e osservazioni critiche.....	378
7. Prove soniche dirette: analisi dei corsi orizzontali.....	383
7.1 Muretto PNDE	383
7.1.1 Corso 6.....	383
7.1.2 Corso 11.....	387
7.1.3 Corso 12.....	391
7.1.4 Corso 17.....	394
7.2 Muretto PNDF.....	398
7.2.1 Corso 5.....	398
7.2.2 Corso 7.....	402
7.2.3 Corso 12.....	405
8. Prove soniche dirette: analisi delle sezioni verticali.....	409
8.1 Muretto PNDE	409
8.1.1 Sezione A-A'	409
8.1.2 Sezione B-B'	413
8.2 Muretto PNDF.....	417
8.2.1 Sezione A-A'	417
8.2.2 Sezione B-B'	421
9. Confronto fra i risultati ottenuti dalle prove dirette e dalla tomografia	425
10. Conclusioni	437
11. Riferimenti bibliografici.....	441

Introduzione

Il lavoro svolto nella presente tesi di laurea si sviluppa all'interno del progetto di ricerca europeo SmooHs (Smart Monitoring of Historic Structures-Monitoraggio intelligente di edifici e strutture storiche) nell'ambito del 7 Programma Quadro della Commissione Europea. Gli edifici storici sono caratterizzati da elementi architettonici, materiali e soluzioni progettuali uniche e pertanto da valorizzare. Al fine di salvaguardare tali beni storici si richiede una conoscenza approfondita dei processi di deterioramento, legati spesso a fattori ambientali, e una loro rilevazione immediata. Il monitoraggio continuo dei possibili parametri che influenzano i suddetti processi può contribuire significativamente, ma un'applicazione estesa di questa tecnica è finora fallita a causa dei costi elevati di sistemi completi di monitoraggio; per questo sono stati osservati solitamente pochi parametri. L'obiettivo del progetto prevede lo sviluppo di strumenti di monitoraggio e diagnostica competitivi per gli specialisti nel settore che vada al di là del mero accumulo di dati. La normativa, in particolare le Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza PCM-3274 del 2005, evidenziano l'importanza di raggiungere un elevato livello di informazione dell'oggetto e del suo comportamento strutturale attraverso un percorso conoscitivo pluriramificato. "Si ha pertanto la necessità di affinare tecniche di analisi ed interpretazione dei manufatti storici mediante fasi conoscitive dal diverso grado di attendibilità, anche in relazione al loro impatto. La conoscenza può infatti essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche e delle indagini sperimentali" (Linee guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'ordinanza PCM-3274, 2005). Per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica dei materiali, la normativa cita "Tecniche diagnostiche non distruttive di tipo indiretto, quali prove soniche ed ultrasoniche, consentono di valutare l'omogeneità dei parametri meccanici nelle diverse parti della costruzione, ma non forniscono stime quantitative attendibili dei loro valori, in quanto essi vengono desunti dalla misura di altre grandezze". Non viene identificata una procedura univoca di prove non distruttive per ciascuna tipologia edilizia, pertanto ci domandiamo quale sia la procedura più idonea da utilizzare, considerando il tipo di risultato che si vuole ottenere. Si richiedono quindi degli studi di fattibilità di diverse

tecniche non distruttive, soprattutto tecniche per immagini che diano un risultato più immediato da comprendere. Per questo scopo è stato impostato un programma di ricerca per valutare l'efficacia di una tecnica non distruttiva, la tomografia sonora, su provini in muratura costruiti nei laboratori del LaRM (Laboratorio di Resistenza dei Materiali del DISTART dell'Università di Bologna), reputando questa la strada da percorrere verso una diagnostica strutturale sempre più dettagliata. I provini in muratura di laterizio PNDE e PNDF, presentano al loro interno dei difetti (in polistirolo espanso) di geometria e posizione nota e diverse tessiture murarie (muratura di laterizio tradizionale e muratura a sacco).

Nel capitolo 2 vengono descritte le caratteristiche e le basi teoriche delle prove soniche e di altre tecniche non distruttive, al fine di poterne fare un confronto. La tomografia sonora è definita e sono illustrate le sue peculiarità; vengono inoltre riportati alcuni esempi di applicazioni della stessa su strutture storiche lignee e murarie.

Nel capitolo 3 sono presentati i provini oggetto di studio ed introdotto qualche accenno sulla natura delle murature di laterizio. Sono specificati i corsi e le sezioni verticali sui quali viene sperimentata la tomografia; essi hanno precise caratteristiche che permettono di eseguire una sperimentazione mirata all'individuazione di anomalie in una sezione e al riconoscimento di diverse tessiture murarie.

Nel capitolo 4 è illustrata la procedura di acquisizione dei dati in laboratorio e di rielaborazione degli stessi nella fase di post-processing. Dopo aver scelto, in base alla risoluzione, la distanza che intercorre tra le stazioni di misura, sono stati progettati i vari percorsi uscenti da ogni stazione trasmittente, andando a definire i ray-paths delle sezioni sia orizzontali che verticali. I software per il calcolo dei tempi di volo (in ambiente LabView) e per l'inversione degli stessi (Geotom) sono presentati e vengono definite le istruzioni per l'utilizzo.

Il capitolo 5 assieme al capitolo 6, mostra i risultati ottenuti dall'inversione dei tempi di volo. Per i diversi corsi orizzontali e sezioni verticali sono riportate le mappe di velocità ottenute al variare di diversi parametri di settaggio impostati nel software tomografico. Le immagini tomografiche evidenziano le caratteristiche interne delle sezioni studiate, in base alla risoluzione geometrica della tecnica.

Nel capitolo 7 e 8 sono mostrati i risultati delle prove soniche dirette applicate sia sui corsi verticali sia sulle sezioni verticali. Le stazioni di misura considerate sono le stesse utilizzate per la tomografia.

Il capitolo 9 riporta il confronto tra le mappe di velocità prodotte dalla tomografia sonora e gli istogrammi delle velocità registrate nelle prove sonore dirette. Si evidenziano le differenze nell'individuazione di difetti tra due metodologie differenti.

Infine sono riportate le conclusioni sul lavoro svolto. I limiti e i vantaggi della tecnica tomografica vengono desunti dai risultati ottenuti per varie tipologie di sezioni, a confronto anche con risultati di prove sonore dirette. Ciò ci porta a definire la fattibilità di utilizzo della tomografia sonora nella diagnosi delle strutture in muratura.

Capitolo 2

Diagnostica delle strutture attraverso prove non distruttive: tomografia sonora

2.1 Cenni su tecniche di indagine non distruttiva

Le tecniche di prova non distruttive, da qualche decennio, sono uno degli strumenti a disposizione degli ingegneri civili per l'indagine dello stato di conservazione delle strutture moderne e antiche. Storicamente l'utilizzo era limitato ad ottenere informazioni geometriche (ad esempio, spessori), ad indagare le variazioni di densità dei materiali e ad individuare la presenza di eventuali difetti o difformità. Le modalità di prova sono state in genere limitate a letture puntuali in aree ristrette dell'elemento lontane da eventuali effetti di disturbo. I dati forniti dalle prove richiedevano l'elaborazione e l'interpretazione dell'utente. Inizialmente queste tecniche erano maggiormente impiegate per lo studio del cemento armato, solo successivamente sono state applicate anche a materiali non macroscopicamente omogenei e isotropi, ma complessi come la muratura. Questo passaggio ha allargato gli scopi di prova, ma ridotto la risoluzione delle stesse dovuto alla differenza fra le proprietà meccaniche dei materiali costituenti le murature.

Negli ultimi anni, si è assistito ad uno sviluppo di strumentazione specifica per vari tipi di strutture e di tecniche di prova non distruttiva che consentono di visualizzare i dati in tempo reale. Inoltre è possibile integrare vari tipi di prove tra loro complementari, al fine di ottenere maggiori informazioni. È evidente come la diagnosi delle strutture sia diventata il primo passo da effettuare in un intervento sul costruito, per avere una visione chiara delle effettive condizioni dell'opera e qualora vi sia necessità di un intervento di consolidamento è utile per testare la buona riuscita dell'intervento stesso. I metodi di indagine acustica, basati cioè sullo studio dei fenomeni legati alla propagazione di perturbazioni elastiche nel materiale, rivestono notevole interesse per l'efficacia con cui consentono la definizione di svariate informazioni sulle proprietà della struttura e del materiale. La continua evoluzione tecnico-scientifica ha permesso lo sviluppo di studi e applicazioni di tali metodi in una molteplicità di campi. È diventata routine l'applicazione di metodologie di ricostruzione grafica automatizzata ai cosiddetti "mezzi trasparenti alle

vibrazioni”, come pezzi metallici di notevoli dimensioni o porzioni di corpo umano; proprio nelle tecniche di analisi medica, quali ecografia e tomografia assiale computerizzata (TAC), trovano fondamento alcune tra le più importanti metodiche di indagine non distruttiva delle strutture. I materiali meno trasparenti alle onde di vibrazione, quali calcestruzzi, malte, pietre, legni, murature ecc, essendo sostanzialmente non omogenei, creano maggiori difficoltà e quindi un ritardo nell’applicazione di tali metodi. Di seguito verranno illustrate alcune tra le metodiche non distruttive maggiormente diffuse nel campo delle costruzioni.

Prove soniche e ultrasoniche

Le prove soniche e ultrasoniche si basano sulla propagazione di onde elastiche di compressione. Nello specifico, le onde nelle prove soniche sono generate da un breve impatto meccanico sulla superficie del materiale, che nel caso delle murature deve essere una superficie il più possibile liscia, omogenea e non intonacata. Il segnale viene generato artificialmente da una sorgente emittente e acquisito mediante un opportuno ricevitore dopo aver attraversato il mezzo secondo traiettorie opportunamente scelte. Una molteplicità di informazioni sul materiale o sulla struttura si trae dall’analisi dei processi e dei parametri connessi alla propagazione delle perturbazioni acustiche, tra le quali:

- livello di omogeneità del materiale,
- qualità e degrado del materiale,
- stima di alcune proprietà elastiche e meccaniche,
- individuazione di anomalie presenti nei materiali o nella struttura,
- andamento dei vari fenomeni nel tempo e in relazione alle sollecitazioni cui i materiali sono sottoposti.

Le caratteristiche intrinseche del mezzo indagato influiscono notevolmente sulla scelta della tipologia di metodo acustico da utilizzare, ovvero nella scelta della strumentazione, dei criteri di interpretazione dei risultati e soprattutto nella scelta della frequenza del segnale da utilizzare. Come già accennato, il livello di omogeneità del mezzo attraversato dal segnale determina principalmente una preferenza nell’uso di certe frequenze rispetto ad altre. I metodi ultrasonici utilizzano un segnale con frequenze piuttosto alte, al di sopra dei 20 KHz. Nel caso di assenza di disomogeneità naturali il segnale si propaga senza che

si verificano apprezzabili fenomeni di diffusione per riflessione, rifrazione o conversione; così l'attenuazione del segnale, non essendoci anomalie se non locali, risulta essere trascurabile. Il metodo ultrasonico consente l'impiego di bassissima energia e consente di rilevare difetti anche molto piccoli emettendo fasci di irradiazione molto stretti attraverso sonde fortemente direzionali. L'analisi risulta essere minuziosa e localizzata in zone geometricamente ristrette. Al contrario, elementi caratterizzati da forte eterogeneità impongono l'impiego di sorgenti ad alta energia di emissione, con un contenuto prevalentemente in bassa frequenza (generalmente 2-200 Hz), in modo da compensare l'elevato assorbimento del mezzo e la totale perdita di direzionalità del segnale. Un esempio è l'analisi stratigrafica dei terreni contraddistinti da dimensioni elevate e notevole livello di disomogeneità.

La problematica nasce quando il mezzo da investigare è intrinsecamente disomogeneo e di dimensioni non molto grandi come ad esempio quelli costituenti le strutture edilizie, dove le anomalie si differenziano poco per dimensione e geometria dalle disomogeneità naturali del mezzo in esame. È importante scegliere in modo corretto la frequenza del segnale da utilizzare, mediando tra le caratteristiche proprie dei segnali ultrasonici (maggiore precisione diagnostica al prezzo di maggiore attenuazione e quindi minore capacità interpretativa) e quelle proprie dei segnali sonici (elevate capacità penetrativa al prezzo di scarsa definizione). I risultati ottenuti in seguito ad una sperimentazione su strutture in muratura calcarea hanno messo in luce come entrambi i segnali (sonici ed ultrasonici) consentano di rilevare la presenza di anomalie macroscopiche presenti all'interno della struttura, ma siano sensibili in modo differente alle caratteristiche strutturali intrinseche e alle condizioni ambientali. Nel dettaglio, uno studio è stato effettuato su un setto murario campione realizzato in conci di pietra calcarea, al cui interno sono stati inseriti in posizione nota alcuni elementi metallici e di legno, assunti come anomalia della struttura. Inoltre è stata realizzata una cavità di forma irregolare dovuta all'irregolarità dei conci perimetrali e l'intrusione di malta. La misura della velocità di propagazione dei segnali ad alta e bassa frequenza attraverso lo spessore del muro ha mostrato che valori crescenti sono associati ad una migliore qualità del materiale. Le due distribuzioni di velocità appaiono piuttosto simili, ne deriva che i due metodi restituiscono sostanzialmente lo stesso range di velocità, con massimi e minimi localizzati nelle stesse aree e siano utili per la rilevazione di anomalie macroscopiche presenti all'interno della muratura lapidea (Concu, 2006).

I parametri associati al segnale, che vengono considerati in uno studio d'indagine, sono:

- tempo di volo, ovvero il tempo impiegato dal segnale per coprire il percorso tra sorgente e ricevitore
- velocità di propagazione del segnale, ottenuta come rapporto tra la distanza tra la sorgente e il ricevitore e il tempo di volo
- attenuazione del segnale nel passaggio attraverso l'elemento

La velocità del segnale è importante in quanto è funzione delle caratteristiche elastiche del materiale ovvero modulo elastico dinamico, coefficiente di Poisson dinamico e delle densità. L'applicazione più classica consiste nella misura del tempo di volo, il quale subisce delle variazioni in presenza di anomalie nel mezzo. Non sempre però il tempo di transito è in grado di apprezzare le discontinuità presenti all'intero del mezzo indagato; infatti la presenza di un'anomalia che intercetta il segnale determina la riflessione all'interfaccia di parte dell'energia ad esso associata, provocandone una sensibile attenuazione in uscita, mentre il tempo, che non dipende dall'energia trasportata dal segnale, può non mostrare apprezzabili variazioni qualora parte del fascio trasmesso giunga indisturbato al ricevitore. L'attenuazione del segnale è un parametro molto sensibile ad ogni tipo di discontinuità del materiale che causi una perdita di energia e perciò è molto adatta per indagini ad alta definizione su aree ristrette. In tempi più recenti, si è affiancata a tempo e attenuazione anche l'analisi delle caratteristiche energetiche associate al segnale quali intensità, frequenza e ampiezza. Quest'ultime prevedono un'analisi spettrale del segnale ovvero un metodo basato sull'analisi del contenuto in frequenza dello stesso, in quanto il mezzo si comporta di fatto come un filtro che trasmette solo una certa banda di frequenze con diverso grado di attenuazione e spostamento di fase.

Le prove si distinguono in:

- prove per trasmissione diretta del segnale (o per trasparenza)
- prove trasmissione indiretta del segnale (o trasmissione superficiale)
- prove per trasmissione semidiretta

Nel primo caso due sonde, una trasmittente e una ricevente, sono posizionate sulle due superfici opposte dell'elemento in modo tale che, gli impulsi emessi dalla prima raggiungano la seconda seguendo un percorso pressoché rettilineo che attraversa una

porzione del materiale. In figura 2.1 si indica con T la sonda trasmittente e con R la sonda ricevente.

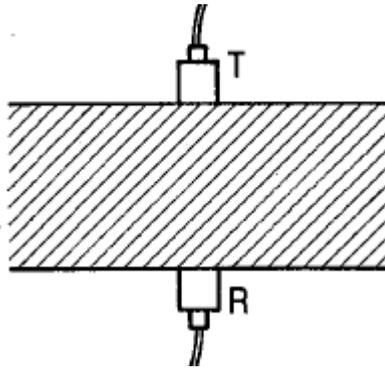


Figura 2.1 Prova per trasmissione diretta

Nel secondo caso, trasmittente e ricevente sono collocate sulla stessa superficie, ma distanziate tra loro (figura 2.2). Esistono anche prove per riflessione, dove le sonde sono adiacenti tra loro. In questa situazione, il segnale viaggia nel materiale e viene riflesso quando incontra una superficie riflettente. Viene utilizzata preferibilmente per la localizzazione dei difetti interni.



Figura 2.2 Prova per trasmissione indiretta

Nel terzo caso i punti di emissione e di ricezione sono applicati su facce adiacenti del mezzo indagato, come mostrato in figura 2.3.

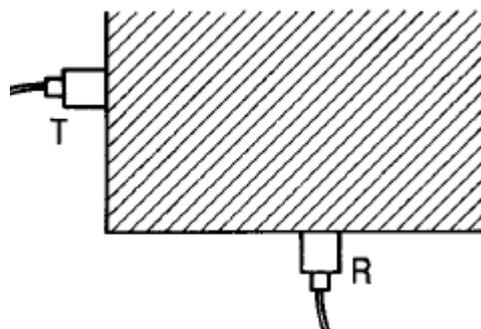


Figura 2.3 Prova per trasmissione semidiretta

La metodologia per trasmissione diretta è la più efficace, in quanto la direzione di massima propagazione dell'energia è perpendicolare alla superficie della sorgente e in più il segnale attraversa l'intero spessore dell'elemento.

Il set strumentale è costituito solitamente da una sonda trasmittente, dalla quale si genera il fronte dell'onda, da un ricevitore e da un'unità di acquisizione e trattamento dei dati. Il sensore ricevitore è un accelerometro che registra e trasmette al sistema di acquisizione la risposta del materiale alla propagazione del segnale nella sezione. La differenza fondamentale tra il metodo sonico e ultrasonico risiede nelle caratteristiche della sorgente. Il metodo sonico richiede l'uso di segnali ad elevato contenuto di energia e quindi a bassa frequenza, per cui l'eccitazione si genera tramite l'impatto di un martelletto strumentato. Il metodo ultrasonico impiega segnali ad alta frequenza, in quanto non vi deve essere eccessiva dissipazione di energia all'interno del materiale, per cui il segnale viene introdotto per mezzo di un trasduttore generalmente piezoelettrico.

Le diverse applicazioni delle indagini soniche e ultrasoniche hanno evidenziato dei limiti nell'esecuzione di tali metodi e nella loro ripetibilità come l'influenza della pressione acustica esercitata dai trasduttori impiegati e l'effetto, sui dati acquisiti, dell'applicazione di un mezzo di accoppiamento acustico interposto tra materiale investigato e trasduttori. Una serie di test sperimentali (Concu, 2006) hanno mostrato che le migliori condizioni operative sono quelle che prevedono sia l'impiego dell'agente accoppiante, interposto tra superficie del materiale e trasduttori utilizzati per l'esecuzione delle misure, sia l'esercizio di una pressione costante, per tutta la durata della prova, sui trasduttori stessi. L'incertezza introdotta dalla variabilità della pressione e dalle condizioni del mezzo di accoppiamento (spessore, temperatura e viscosità) si traduce in una variazione dell'energia associata al segnale trasmesso e quindi incide sulla forma d'onda e sullo spettro del segnale.

Nella fase di progettazione delle acquisizioni soniche, si deve tener conto sia delle caratteristiche della strumentazione e sia delle condizioni dell'elemento su cui si deve indagare. Si predispongono una griglia (reticolo con posizioni di misura) in modo tale da averla come riferimento per le posizioni di battuta e di ricezione. La massa del martello è legata secondo una relazione inversamente proporzionale alla massima frequenza del segnale generato, da cui dipende direttamente la risoluzione della tecnica, ossia la sua capacità di localizzare con precisione interfaccia e difetti presenti nella sezione.

Un'altra tecnica di indagine non distruttiva della famiglia delle prove acustiche è la tecnica dell'impact-echo, ideato per l'indagine di strutture in cemento armato e solo

successivamente sono stati condotti studi sull'applicazione dello stesso alle murature. I risultati che si ottengono da questo tipo di prova sono atti a valutare lo spessore di un elemento o di sue stratificazioni, a localizzare e determinare l'estensione di vuoti, difetti, particolari costruttivi, aree di distacchi e delaminazioni locali. È un metodo acustico in riflessione dove sonda trasmittente e ricevente sono adiacenti e vengono spostate assieme in ogni stazione di misura della superficie di prova; questo permette di analizzare elementi accessibili o idonei solo da un lato. Come le prove soniche, si basa sulla propagazione di onde elastiche di compressione, ma si differenzia perché misura anche le riflessioni successive alla prima riflessione delle onde acustiche nel materiale. L'analisi dei dati ottenuti, a differenza delle prove soniche, è compiuta nel dominio delle frequenze e non nel dominio del tempo (C.Colla et al.)

Tecniche per immagini: georadar e termografia

Tra i metodi di indagine non distruttiva più recenti ci sono il georadar e la termografia. Essi, così come la tomografia, permettono di visualizzare i risultati sotto forma di immagini che dovranno poi essere interpretate da personale esperto. Il georadar o GPR sfrutta la diffusione caratteristica e la proprietà di riflessione di oggetti e materiali nei confronti delle onde elettromagnetiche; infatti quando un fascio di queste onde penetra nel mezzo e raggiunge un'interfaccia tra due materiali, una parte di energia viene riflessa, mentre la restante parte prosegue attraverso l'interfaccia del secondo materiale e può essere nuovamente riflessa da un'interfaccia successiva. La velocità di propagazione nel materiale e l'ampiezza delle onde elettromagnetiche varia considerevolmente in funzione della distanza percorsa e soprattutto del tipo di materiale attraversato. La tecnica radar produce un'immagine detta radargramma che restituisce nel dominio del tempo i contrasti di riflessione del segnale elettromagnetico, sfruttando le proprietà dielettriche dei vari materiali. La risoluzione dipende dalla frequenza del segnale e dalle condizioni in sito. Le applicazioni consentono di investigare sia la geometria interna di elementi strutturali, sia di differenziare i tipi di materiali impiegati e il loro stato di conservazione; nello specifico della muratura si determinano spessori, tecnologie costruttive (paramenti murari, geometri dei corsi) e si individuano eventuali anomalie nel materiale. I sistemi radar consistono in un'unità di controllo composta da un generatore di segnale, un registratore, un'antenna e un oscilloscopio. Queste apparecchiature sono piuttosto costose, e nonostante consentano una visualizzazione del radargramma in tempo reale, necessitano di personale qualificato nell'interpretazione dei risultati ottenuti.

La strumentazione termografica, oltre ad essere non distruttiva, non entra a contatto con la superficie dell'elemento da analizzare. La tecnica si basa sulle radiazioni infrarosse emesse dai corpi, i quali, a seconda delle caratteristiche fisico-termiche e delle condizioni ambientali, se sottoposti a irraggiamento solare o a fonti di luce artificiale emettono radiazioni infrarosse. Le radiazioni assorbite, trasmesse e riflesse dai corpi non dipendono dalla temperatura dei corpi stessi, ma dalla loro struttura e composizione materica, ovvero anche da caratteristiche che non sono visibili dall'occhio umano. La termografia è una tecnica superficiale, in quanto analizza fino a pochi centimetri di spessore e produce un termogramma, immagine che fornisce le informazioni relative alle superfici degli oggetti indagati. L'analisi dei termogrammi può consentire di individuare trattamenti, contaminazioni, degradi e impurità su una superficie di materiale omogeneo e in alcuni elementi strutturali può localizzare particolari costruttivi e inclusioni di diversa natura. La strumentazione odierna permette di indagare differenze di temperatura anche di decimi di grado e per ottenere un maggior contrasto tra zone a livelli di emissività simili, si può alterare artificialmente la temperatura superficiale dell'elemento. Questo è il caso della termografia attiva, che fa uso di lampade ad incandescenza, con filtri infrarossi, che devono essere tenute a idonea distanza dalla superficie. L'apparecchiatura di acquisizione è costituita da una macchina da ripresa che converte le radiazioni infrarosse in segnali elettronici, che vengono amplificati e inviati su uno schermo, dove vengono visualizzati in immagini bi-dimensionali (termogrammi), che mettono in relazione le temperature rilevate con mappe cromatiche corrispondenti. Successive elaborazioni che agiscono sulle soglie di temperatura permettono di evidenziare dettagli non osservabili (C.Colla et al.).

Queste due metodologie, a differenza della tomografia, permettono di visualizzare in breve tempo delle immagini, che una volta interpretate forniscono lo stato conservativo dell'oggetto analizzato. La tomografia richiede un maggior dispendio di tempo poiché le immagini ottenute sono il risultato di complesse operazioni di elaborazione dei dati. Le apparecchiature per georadar e termografia sono molto più costose rispetto a quelle usate in tomografia.

2.2 Basi teoriche delle prove soniche

Un solido, quando viene eccitato da una vibrazione applicata in un punto della sua superficie esterna, mostra al suo interno una propagazione di onde meccaniche. I meccanismi che regolano questa propagazione vengono descritti ipotizzando un materiale omogeneo, isotopo e in stato elastico lineare. Le perturbazioni che propagano nei mezzi solidi sono analoghe alle onde acustiche che si propagano sia nell'aria sia nei mezzi solidi e liquidi, quindi si farà riferimento alle leggi dell'acustica. L'onda che si diffonde in un solido non produce movimento di materia, ma solo trasmissione di energia a partire dal punto di emissione. Si chiama fronte d'onda, il luogo dei massimi (o dei minimi) relativi al tipo d'onda in considerazione. Esso può essere, una linea retta (nel caso in cui si osserva un'onda in un'area ristretta e lontano dal punto di emissione) o una superficie sferica e concentrica (nel caso in cui si considera la propagazione in un mezzo tridimensionale). Si parla anche di onde piane, quando la superficie del fronte d'onda è piana. Le onde hanno una velocità di propagazione nel mezzo dipendente sia dalle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale sia dalla frequenza dell'onda. A seconda del tipo di materiale, si determina l'entità dell'attenuazione che le onde subiscono nell'attraversarlo. La presenza di difetti all'interno del mezzo provoca delle anomalie nella propagazione del segnale e questo è alla base di metodi di indagine basati sulle onde soniche.

Se conosciamo il comportamento di un materiale integro, lo possiamo poi confrontare con quello di un materiale della stessa natura, ma degradato. Solitamente alti valori di velocità e bassi valori di attenuazione identificano solidi omogenei, mentre materiali porosi e eterogenei mostrano basse velocità e alte attenuazioni.

Le onde sono di compressione e al loro passaggio le particelle del solido oscillano nella stessa direzione di propagazione dell'onda. La deformazione che avviene nel materiale comporta dilatazioni lineari e non scorrimenti angolari.

Un'onda stazionaria è caratterizzata da specifiche grandezze e relazioni fondamentali:

Velocità di propagazione V

È la velocità con cui si muove l'onda. Si chiama anche velocità di fase e si distingue in velocità V_p e V_s a seconda del tipo di onda, longitudinale o trasversale. L'unità di misura

considerata è solitamente m/s. È espressa come il rapporto tra lo spazio percorso tra sorgente-ricevitore (S) e il tempo necessario a percorrerlo (t_c):

$$V = \frac{S}{t_c}$$

Ciclo

Si definisce ciclo una completa oscillazione compiuta da una particella.

Periodo T

Data una funzione periodica, si definisce periodo il tempo necessario al sistema per riprendere la medesima configurazione assunta al tempo t. Rappresenta la durata di un ciclo completo di oscillazione. Si esprime in secondi s. Nella figura 2.4 viene rappresentato all'interno di un diagramma ampiezza (u) – tempo (t).

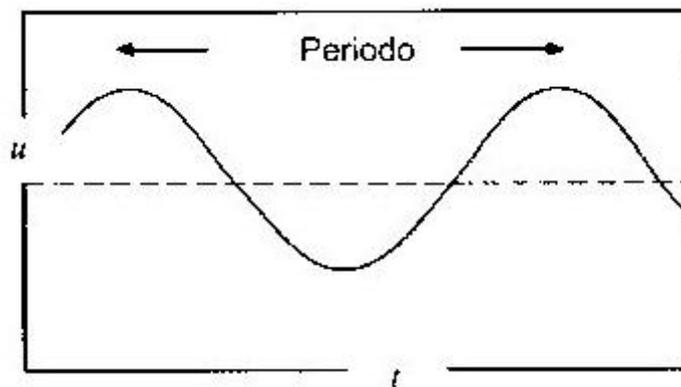


Figura 2.4 Diagramma ampiezza (u) - tempo (t) (G. Pascale, 2008)

Frequenza f

È il numero dei cicli compiuti dalla massa nell'unità di tempo. L'unità di misura è l'hertz (Hz) che rappresenta il numero di oscillazioni compiute in un secondo (Hz = cicli/s). Si usano anche dei multipli come kilohertz (KHz), megahertz (MHz) o gigahertz (GHz), corrispondenti rispettivamente a 10^3 , 10^6 e 10^9 Hz. È definita come il reciproco del rapporto:

$$f = \frac{1}{T}$$

Pulsazione ω

Considerando l'equazione del moto $u(t) = C_1 \cdot \text{sen}\omega t + C_2 \cdot \text{cos}\omega t$ dove u è lo spostamento in funzione del tempo e C_1, C_2 sono due costanti, si osserva che la pulsazione rappresenta la somma delle proiezioni sull'asse delle ascisse di due vettori di modulo C_1 e C_2 che ruotano con velocità angolare ω , come raffigurato nel riferimento cartesiano in figura 2.5.

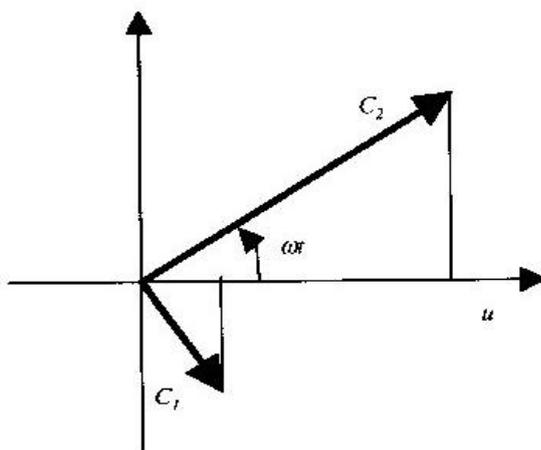


Figura 2.5 Rappresentazione grafica del vettore $u(t)$ (G. Pascale, 2008)

In modo analogo se scriviamo l'equazione nella seguente forma:

$$u(t) = C \cdot \text{cos}(\omega t - \varphi)$$

dove con φ indichiamo la fase, si nota che essa rappresenta la proiezione sull'asse delle ascisse di un vettore di modulo C con velocità angolare ω , come rappresentato in figura 2.6.

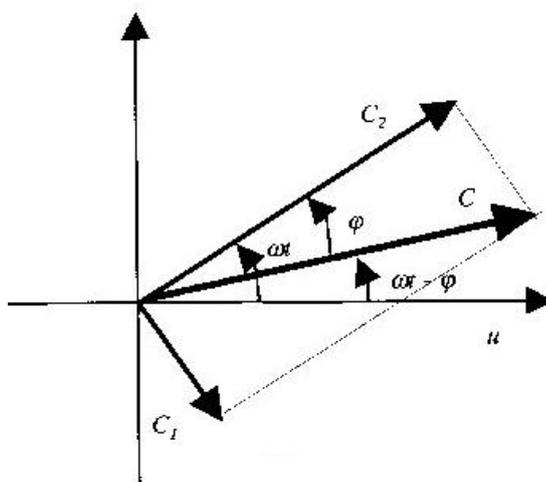


Figura 2.6 Rappresentazione grafica del vettore $u(t)$ (G. Pascale, 2008)

Un giro completo del vettore consiste in un angolo 2π e viene compiuto nel tempo T (periodo). La pulsazione, espressa come velocità angolare del vettore, vale quindi:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = 2\pi f$$

L'unità di misura è radianti al secondo (rad/s).

Lunghezza d'onda λ

Essa rappresenta la distanza fra due successivi massimi dell'ampiezza, come visualizzato in figura 2.7 dove viene definita all'interno di un diagramma ampiezza (u) – posizione (x).

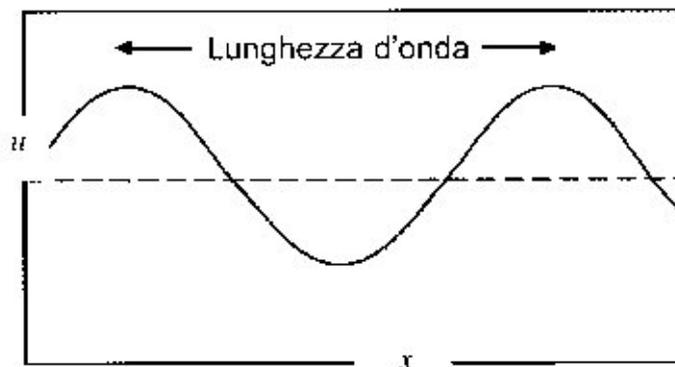


Figura 2.7 Diagramma ampiezza (u) – posizione (t) (G. Pascale, 2008)

Considerando la relazione della velocità V , poiché il periodo T è il tempo necessario all'onda per percorrere un tratto di lunghezza λ , si può scrivere:

$$V = \frac{\lambda}{T}$$

$$V = \lambda f$$

Una sorgente di vibrazione meccanica, di forma circolare con diametro D , applicata esternamente ad un solido semi-infinito genera un processo vibratorio che investe una parte del solido. Le onde, che si propagano a partire dalla sorgente, sono di forma emisferica se la fonte è puntiforme e verrà chiamata sorgente elementare di vibrazione.

Un esempio riportato in figura 2.8.

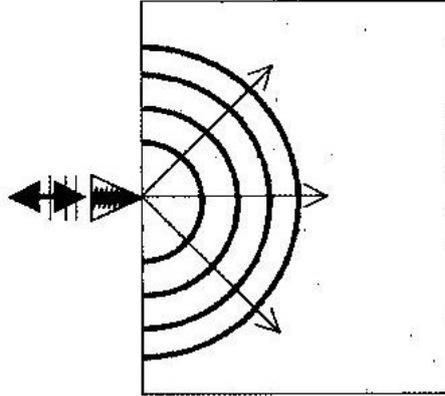


Figura 2.8 Onde sferiche originate da una sorgente di vibrazione (G. Pascale, 2008)

La fonte di vibrazione, come ad esempio il martello strumentato utilizzato nelle prove soniche, può essere vista come un insieme di sorgenti elementari di vibrazione e di conseguenza il fronte d'onda sarà un involuppo di onde sferiche di uguale raggio. Le onde generate si mantengono piane per una certa distanza, denominata campo vicino, oltre la quale poi divergeranno e andranno ad occupare un volume conico. Nella figura 2.9 successiva viene rappresentata la propagazione delle onde da una sorgente non puntiforme.

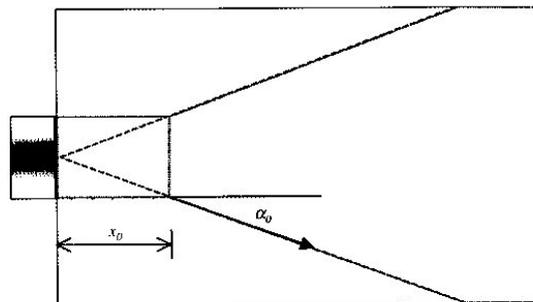


Figura 2.9 Propagazione di un'onda da una sorgente non puntiforme (G. Pascale, 2008)

La zona all'interno del cono delimitato dalle rette tratteggiate rappresenta il campo di irradiazione, x_0 è la lunghezza prossima alla sorgente ovvero del campo vicino e si ricava come segue:

$$x_0 = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}$$

essendo D il diametro della sorgente e λ la lunghezza d'onda.

L'angolo α_0 è l'angolo di divergenza e l'apertura del cono si trova con la seguente relazione:

$$\text{sen } \alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

I parametri D e λ definiscono la forma del campo di irradiazione. È interessante valutare il rapporto λ/D poiché per materiali metallici assume valori piccoli, in quanto si usano frequenze elevate e λ piccoli, mentre per materiali lapidei si opera con λ elevate non molto diverse dal diametro D . In quest'ultimo caso il campo vicino è pressoché nullo e l'angolo di divergenza è prossimo a 90° .

Le caratteristiche direzionali delle sonde trasmettenti sono rappresentate in diagrammi polari o lobi di irradiazione. In figura 2.10 è rappresentato l'involuppo dei vettori uscenti dal centro della sorgente e aventi come modulo la pressione acustica relativa. La forma del diagramma polare deriva dal rapporto tra D e λ . L'apertura del lobo dipende da α_0 e quindi assegnato D , dipende dalla lunghezza d'onda. L'angolo α_0 si riduce all'aumentare della frequenza e quindi al diminuire della λ ; si concentra così il campo di irradiazione.

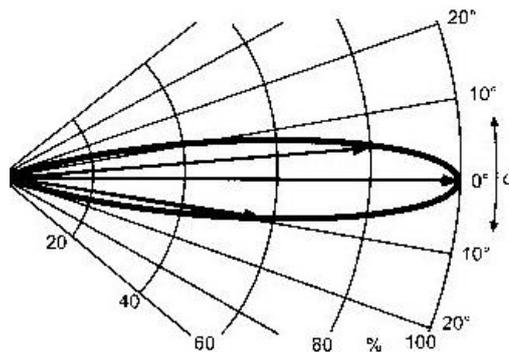


Figura 2.10 Diagramma polare di pressione acustica

Nei materiali lapidei usati nelle costruzioni, come laterizi, pietre, marmi e conglomerati cementizi, il meccanismo di propagazione delle onde subisce delle variazioni rispetto a quanto avviene per materiali omogenei come i metalli. Ciò è dovuto alle notevoli dimensioni dei grani, all'elevata porosità, alle superfici di interfaccia tra materiali diversi e alla presenza di micro fessure. Per questi materiali si ha un elevato valore dell'angolo α_0 e non è possibile inviare impulsi concentrati. Le molteplici superfici di riflessione creano una forte attenuazione strutturale, la cui definizione verrà data in seguito. Le frequenze impiegate quindi sono poco al di sopra della soglia di udibilità ed è necessario che la lunghezza d'onda sia maggiore della dimensione massima delle particelle. Questo porta a conseguenze negative che interessano la dimensione minima dei difetti rilevabili e

la precisione nella misura, che dipendono appunto da λ e dalla frequenza. La risoluzione R del metodo è legata alla lunghezza d'onda e vale circa:

$$R = \frac{1}{2} \div \frac{1}{3} \lambda$$

Nel caso della tomografia sonora la risoluzione si può considerare pari a $\frac{1}{4} \lambda$.

Riprendendo l'acustica, il suono viene percepito con intensità decrescente mano a mano che ci si allontana dalla fonte che lo ha generato; allo stesso modo si comportano le onde all'interno di un solido. Una delle cause dell'attenuazione è la divergenza del fascio di irradiazione, il quale allontanandosi dall'origine fa sì che l'energia immessa si distribuisca su superfici di estensione crescente. In questo caso parliamo di attenuazione geometrica. Esiste anche l'attenuazione strutturale dovuta principalmente a due cause:

- dispersione di energia sotto forma di calore
- diffusione dovuta alle riflessioni delle onde quando incontrano delle discontinuità

Le leggi analitiche dei due tipi di attenuazioni sono diverse, ma entrambe funzione della distanza.

Attenuazione geometrica

Innanzitutto introduciamo una nuova grandezza che è l'intensità I. Essa rappresenta la quantità di energia che attraversa nell'unità di tempo la superficie unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione. La sua relazione è data da:

$$I = \frac{p^2}{2Z}$$

dove p è la pressione acustica, ovvero la pressione presente in un determinato istante in un punto di un solido attraversato da onde di pressione e Z è l'impedenza acustica, ovvero la resistenza che si oppone al movimento fisico. Inoltre sappiamo che l'intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza e quindi anche la pressione acustica è inversamente proporzionale a tale distanza. Si ricava che :

$$p = p_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda} \cdot \frac{1}{x}$$

essendo p_0 la pressione acustica alla sorgente e p la pressione acustica ad una distanza x.

Attenuazione strutturale

L'attenuazione strutturale provoca uno smorzamento dell'onda in relazione alla discontinuità e ai difetti presenti nel materiale. Si ricava che:

$$p = p_0 e^{-\gamma x}$$

dove γ è il coefficiente di attenuazione.

Essendo le variazioni di pressione acustica anche di diversi ordini di grandezza, si opera in scala logaritmica. Si usa come unità di misura il decibel (dB). L'attenuazione A viene definita come:

$$A \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \frac{p_0}{p}$$

Tra il logaritmo in base 10 e il logaritmo naturale esiste la relazione:

$$\log_{10} x = 0,434 \ln x$$

E quindi si ricava che:

$$A'' = 20 \cdot 0,434 \cdot \ln \frac{p_0}{p} = 20 \cdot 0,434 \cdot \ln e^{\gamma x} = 8,68 \cdot \gamma x = \beta x$$

dove β è il coefficiente di attenuazione espresso in dB/m. (Pascale, 2008)

2.3 Definizione di tomografia sonica

Il termine tomografia deriva dalle parole greche *tomòs* (letteralmente *fetta* o *strato*) e *graphos* (letteralmente *visualizzazione*, *rappresentazione*), quindi può essere tradotta come rappresentazione a fette. La definizione di tomografia dal Dizionario Scientifico Minerva è: “Insieme delle tecniche analitiche non distruttive di acquisizione bi e tri-dimensionali per la mappatura spaziale delle proprietà chimico-fisiche di strutture complesse. È assistita da elaborazioni computerizzate dei dati ottenuti sfruttando fenomeni fisici quali l'attenuazione dei raggi X (Tac) e la Risonanza magnetica, la propagazione di onde acustiche, le variazioni di conducibilità termica o elettrica del mezzo. La Tac e la Risonanza magnetica sono impiegate nella diagnosi medica, consentono di visualizzare, con elevato contrasto, sezioni sottili e localizzate all'interno del corpo umano. Altre applicazioni riguardano controlli non distruttivi sui manufatti”.

Il matematico boemo Johann Radon (1887-1956) posò le basi teoriche di questa tecnica e mostrò come un oggetto potesse essere ricostruito partendo da un set completo delle sue proiezioni. Le prime applicazioni si ebbero in campo astronomico, in quanto fu possibile individuare numerosi corpi celesti (non visibili a occhio nudo) attraverso le diffrazioni

subite dai raggi luminosi provenienti da altri corpi. La tomografia ha trovato però massima applicazione in campo medico, in quanto tutti gli aspetti di diagnostica non possono prescindere dall'impiego della TAC (tomografia assiale computerizzata). Si basa sullo studio dell'attenuazione del segnale che subiscono i raggi X nell'attraversare i vari tessuti in esame: una piccola variazione della densità del tessuto può fornire indicazioni sulla presenza di tessuti anomali. I recenti sviluppi hanno consentito l'uso della tomografia anche in campo geofisico e ingegneristico. Nel primo caso si investigano gli strati profondi della litosfera, al fine di valutare la stratigrafia e le superfici di discontinuità della crosta terrestre per ottenere maggiori informazioni sulle proprietà meccaniche del sottosuolo. Nelle applicazioni ingegneristiche stanno assumendo grande importanza gli sviluppi in campo diagnostico strutturale. Già in campo meccanico, l'utilizzo di fasci di raggi (raggi X e raggi γ) ad elevate frequenza permettono di ottenere screening completi di organi meccanici, in modo da valutare eventuali carenze strutturali. Lo sviluppo maggiore si sta conoscendo in questi anni, nel campo della tutela e recupero di edifici e monumenti di rilevanza storica con applicazioni su strutture murarie, elementi lignei e opere in conglomerato cementizio.

La tomografia sonora rappresenta una naturale evoluzione della tecnica di trasmissione diretta. I segnali emessi da più sorgenti vengono acquisiti da più ricevitori, disposti in modo da consentire l'esecuzione di un elevato numero di misure del tempo di transito dei segnali che viaggiano lungo percorsi a diversa inclinazione e che si incrociano mutuamente su sezioni piane della struttura. La somma di tutti i raggi dà una copertura più o meno omogenea di tutta la sezione analizzata. In figura 2.11 sono schematizzati vari tipi di posizionamento delle stazioni di misura e copertura della sezione. L'impulso generato per ogni percorso sorgente-ricevitore attraversa il provino e interagisce con la struttura interna dell'elemento. Le variazioni spaziali nelle proprietà fisiche corrispondono alle variazioni nelle caratteristiche dei segnali ricevuti e quindi ogni misurazione rispecchia la composizione interna dell'oggetto indagato.

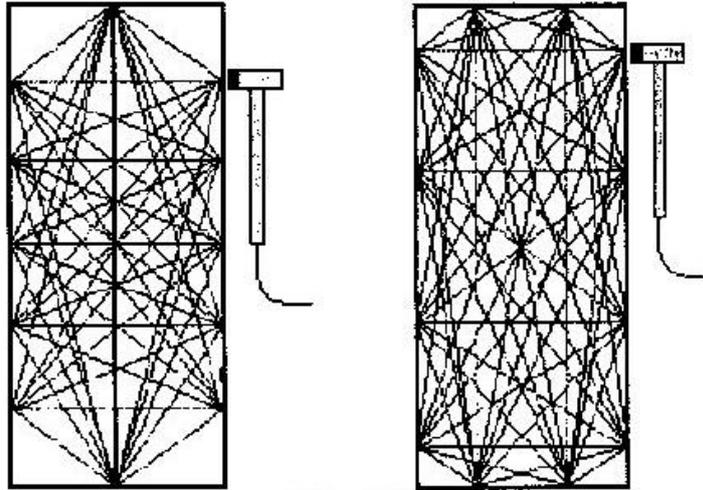


Figura 2.11 Diverse rappresentazioni di posizionamento di stazioni di misura

Il software tomografico ricostruisce un'immagine della sezione combinando le informazioni di un set di proiezioni ottenute da punti di partenza differenti degli impulsi. Si basa su un sistema algebrico, le cui incognite sono costituite dalla velocità del segnale nei nodi di un reticolo disposto sulla sezione piana del mezzo contenente le sorgenti e i ricevitori. È possibile utilizzare, per ricostruire la mappa delle velocità, la tecnica di "espansione in serie" che considera la funzione continua delle inverse delle velocità come una serie di elementi discreti, detti pixel, aree su cui si può considerare costante la velocità. Il tempo di volo rappresenta l'integrale inverso della velocità e passando al caso discreto, diventa una sommatoria. Quest'ultima può essere riscritta sotto forma di matrice compatta. Il vettore P soluzione del problema tomografico, noto il vettore di tempi di volo T e la geometria della sezione (matrice D), è definito così: $P = D^{-1}T$. L'inversione della matrice D è realizzata utilizzando diverse tecniche di ricostruzione algebrica, come ad esempio ART (algebraic reconstruction technique). Nella ricostruzione iterativa della matrice, si parte da un modello iniziale di velocità e questo viene modificato iterativamente minimizzando la differenza tra i tempi di volo misurati e quelli calcolati nella precedente iterazione. I residui vengono retro-proiettati per ottenere dei fattori di correzione, i quali aggiornano il modello in maniera iterativa fino alla convergenza della soluzione. La tomografia consente dunque di determinare la distribuzione delle velocità su sezioni piane. L'utilizzo di impulsi energetici di diversa natura permette di conoscere differenti proprietà del materiale: segnali elettrici o elettromagnetici danno indicazioni sulla permeabilità e permittività elettrica, mentre impulsi acustici danno informazioni sulle proprietà elastiche. Il segnale acustico viaggia più velocemente in materiali densi,

così i valori di velocità saranno più elevati in questi elementi. Se invece è presente un vuoto, il fronte d'onda aggira la cavità, causando una diminuzione della velocità apparente. Nel caso acustico si analizza il tempo di volo e l'ampiezza (e dunque anche l'attenuazione) del segnale. Il tempo di volo dipende dalla lunghezza e dalla velocità lungo il percorso, quindi permette di ottenere immagini sulla distribuzione delle velocità all'interno dell'area investigata. La misurazione dell'ampiezza è determinata dalla distanza percorsa e dall'attenuazione lungo il tragitto, così la variazione spaziale dell'attenuazione può essere ricostruita con la tomografia partendo da proiezioni sull'ampiezza. Il grado di risoluzione del metodo dipende dalla distanza tra sorgenti e ricevitori, dal passo di misura e dalla copertura angolare formata dalle varie traiettorie. La tomografia consente di superare il limite della metodologia per trasparenza e cioè l'impossibilità di discriminare un'alterazione estesa da un'anomalia confinata solo in una parte lungo il percorso sorgente-ricevitore, dovuta al fatto che per ogni traiettoria il comportamento dell'elemento è descritto da un unico valore di velocità. La tecnica tomografica, attraverso la fitta rete di traiettorie tra loro intersecanti, consente di ottenere una distribuzione delle velocità con elevata definizione, rendendo possibile la localizzazione delle eventuali anomalie presenti. Le principali limitazioni alla diffusione della tecnica tomografica dipendono dai maggiori tempi di esecuzione rispetto alla tradizionale tecnica diretta, dal maggior costo della strumentazione necessaria e dalla complessità della risoluzione del "problema tomografico", ovvero la ricostruzione della distribuzione delle velocità a partire dall'acquisizione dei tempi di volo.

2.4 Applicazioni di tomografia sonora a edifici storici

In questo capitolo verranno presentate una serie di applicazioni di tomografia sonora su varie tipologie strutturali realizzate da diversi autori.

Trave lignea

Si tratta di una trave storica di abete bianco facente parte di una catena di una capriata di 5,6 m di lunghezza e di forma rettangolare con smussi. La prima ispezione visiva presenta nodosità e fessure da ritiro, oltre alla presenza di una zona con perdita di materiale. In figura 2.12 è rappresentata la trave; oggetto di studio.



Figura 2.12 Trave di legno (Passini, 2007)

Le indagini sono state svolte su una sezione longitudinale e due sezioni trasversali in zona integra e in zona degradata. Lungo la sezione longitudinale, le stazioni di misura hanno interspazio di 4 cm e la copertura della sezione con percorsi ideali rettilinei ha previsto l'utilizzo di ventagli con apertura di 45 gradi e 5 raggi di misura ciascuno. Una volta riportati i punti di misura sulla trave, sono stati acquisiti i tempi di volo per ciascun percorso attraverso una strumentazione sonica composta da martello strumentato e accelerometro come ricevitore. All'interno del software tomografico sono stati inseriti i valori dei tempi di volo in forma tabulare. Nella figura 2.13 sottostante è mostrata la mappa delle velocità ottenute: i toni di grigio mostrano i diversi valori della velocità, ove i toni più scuri indicano basse velocità. Questi valori sono prossimi alla velocità di propagazione del suono in aria e evidenziano le zone della trave degradate.

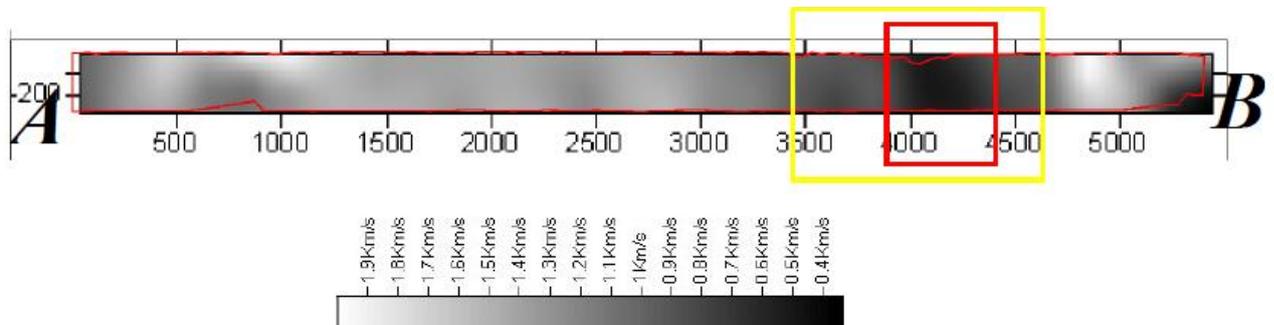


Figura 2.13 Mappa della velocità della sezione longitudinale della trave (Passini, 2007)

Cattedrale S. Nicolò dell'Arena a Catania

Dopo il terremoto del 1990, gli elementi strutturali della Chiesa S. Nicolò dell'Arena, come la cupola e le volte, sono state danneggiate e sono state rilevate una serie di fessure verticali lungo lo sviluppo di due pilastri in muratura. Un programma di indagine costituito da prove soniche e prove semi-distruttive, come carotaggi, hanno investigato lo stato di conservazione della chiesa. La tomografia, applicata ai dati sonici sui pilastri, è stata affiancata nell'analisi dai dati ottenuti dalle prove di carico con martinetti piatti e prove radar. La ricerca ha messo in evidenza come la tecnica tomografica applicata a elementi accessibili da tutti e 4 i lati dia risultati accurati e precisi. La tomografia sonica è stata applicata per localizzare il quadro fessurativo presente nei pilastri e vista la grande dimensioni degli stessi (circa 5m x 4m) la risoluzione di anomalie è stata facilitata. Le stazioni di misura sono state prese lungo 18 sezioni orizzontali e 10 verticali, impiegando un martello strumentato e 24 accelerometri fissati sulla superficie della sezioni analizzate. I risultati in figura 2.14 mostrano le mappe di velocità ottenute per un pilastro a diverse altezze dello stesso. Nella legenda i toni scuri rappresentano valori alti di velocità, mentre i toni di grigio più chiaro evidenziano basse velocità. La distribuzione della velocità evidenzia un valore medio relativamente alto per la zona alla base e nelle zone più alte del pilastro e velocità più basse nella zona centrale. Quest'ultime rappresentano un pericoloso quadro di fessure. Altri pilastri evidenziano invece un valore di velocità più alta ad indicare uno stato conservativo migliore (figura 2.15). Le maggiori problematiche riscontrate nell'intervento, legate alle fasi di acquisizione, sono state dettate in massima parte da grandi variabilità nei dati di attenuazione del segnale in relazione all'inefficienza del materiale di accoppiaggio. (Binda, 2003)

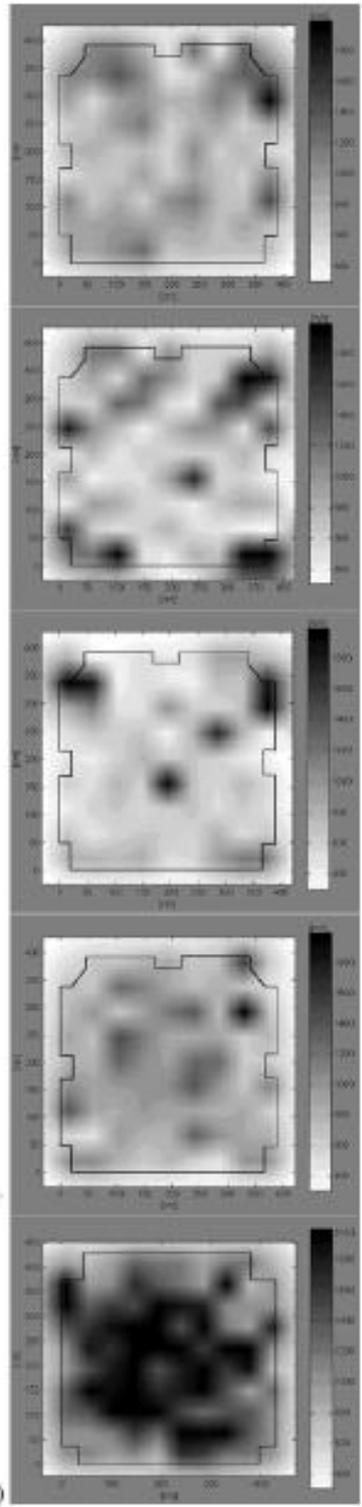


Figura 2.14 Sezioni orizzontali del pilastro 2 alle altezze di 7.6, 4.9, 3.8 e 1.8m (Binda, 2003)

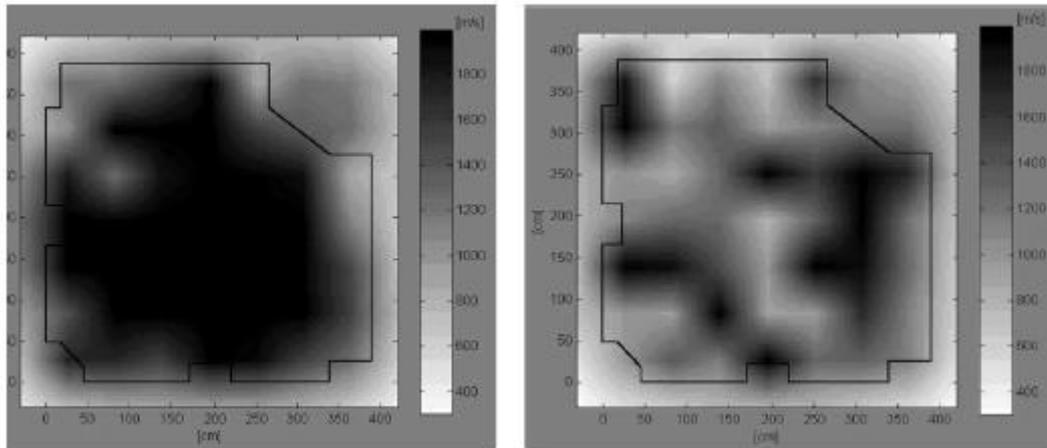


Figura 2.15 Sezioni orizzontali dei pilastri 6 e 10 all'altezza di 5.8 m (Binda, 2003)

Chiesa del Carmine a Padova

La facciata della chiesa alta più di 10 m è costituita da muratura degli inizi del 14° secolo. Presenta uno spessore di 95 cm formato da una muratura mista di mattoni e pietre collegati tra loro con giunti di malta di forma irregolare. La parte superiore della facciata è stata distrutta nel 1491 da un terremoto e ricostruita nel 16° secolo. Le prove soniche sono state eseguite nella parte bassa della facciata fino ad un'altezza di circa 6 m, nella zona attraversata da fessure verticali. Lo scopo delle prove è di indagare la zona fessurata presente. La tomografia è stata applicata al secondo e quinto corso e alla seconda e quinta colonna. Le sezioni orizzontali scelte interessano la zona danneggiata, mentre quelle verticali si trovano ad una distanza di 80 cm e 20 cm dalla fessura (figura 2.16).

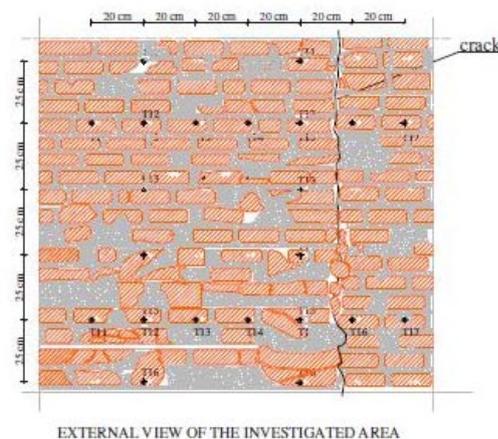


Figura 2.16 Visualizzazione dell'area investigata (Da porto et al., 2003)

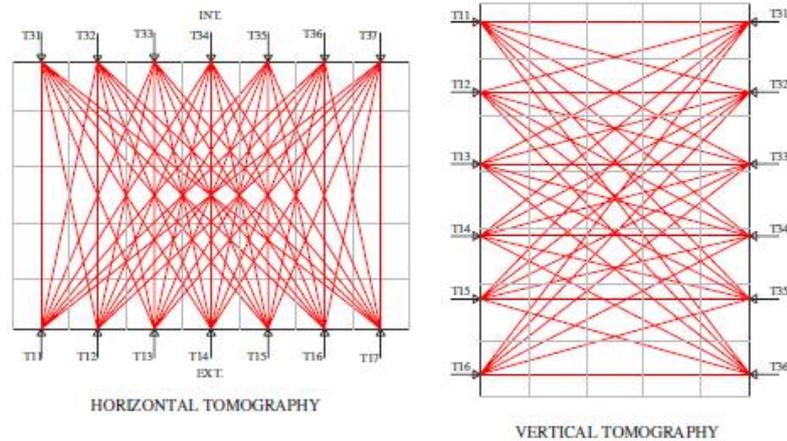


Figura 2.17 Distribuzione stazioni di misura e copertura della sezione (Da porto et al., 2003)

La distribuzione dei raggi per ciascuna sezione è rappresentata nelle immagini seguenti (figura 2.17). I risultati ottenuti (figura 2.18) confermano i valori di velocità ottenuti anche con prove soniche dirette. La sezione orizzontale inferiore è caratterizzata da bassi valori di velocità rispetto alla sezione superiore; i valori medi di velocità sono di 1050 m/s e 1450 m/s rispettivamente (figura 2.19 sinistra). Anche le sezioni verticali mostrano una zona inferiore con basse velocità rispetto al resto del muro investigato (figura 2.19 centro e destra)

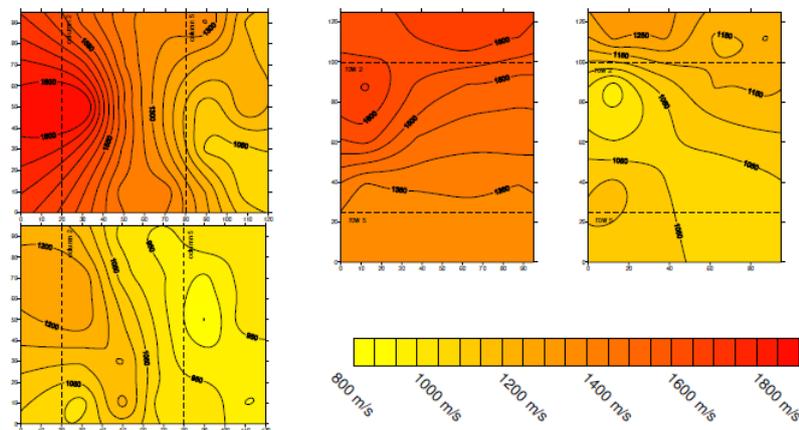


Figura 2.19 Mappe di velocità per sezioni orizzontali e verticali (Da porto et al., 2003)

La tomografia verticale mostra anche la differenza nella tessitura della muratura. Dalle analisi condotte si deduce che la muratura è in condizioni abbastanza buone e che si può definire una muratura in cattivo stato conservativo se il valore della velocità è al di sotto dei 1000 m/s (Da porto et al., 2003).

Mura di Cittadella (Padova)

Le mura della città sono state costruite nel 1220. Hanno un diametro di 450 m e lungo il perimetro ci sono 32 torri con interasse di 40 m. Il muro è alto 13-14 m e spesso 220 cm. Gli strati esterni sono costituiti da un'alternanza di livelli di ciottoli e mattoni (figura 2.20). La parte interna è costruita con la tecnica del "opus concretum" con strati orizzontali di pietre connesse con spessi giunti di malta. I lavori di restaurazione hanno rinforzato le fondazioni delle torri e riparato le fessure con iniezioni di intonaco.



Figura 2.20 Vista delle mura e della tessitura interna delle mura (Da porto et al., 2003)

Prove soniche dirette su griglie di 60 cm x 30 cm e tomografia su sezioni verticali sono state eseguite prima e dopo gli interventi di consolidamento. La velocità delle sezioni tomografiche verticali prima dell'iniezione era compresa tra 690 m/s e 1030 m/s, valori che corrispondono a non buone condizioni della muratura. Dopo l'intervento di restauro le velocità sono aumentate, assumendo un valore medio pari a 1110 m/s. L'incremento più significativo delle velocità è stato circa del 35%. Nella figura 2.21 sono mostrati i risultati della tomografia prima e dopo l'intervento di consolidamento.

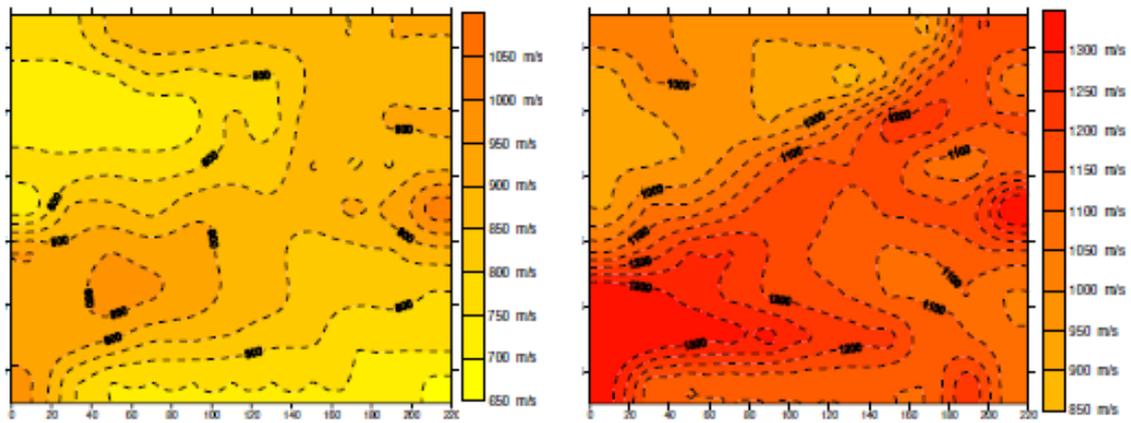


Figura 2.4.9 Mappe di velocità in condizioni originali e dopo l'iniezione di intonaco (Da porto et all, 2003)

Capitolo 3

Muratura di laterizio: descrizione dei modelli fisici

3.1. Murature: cenni storici, materiali componenti, loro fabbricazione e regole dell'arte

La conoscenza dello sviluppo che ha caratterizzato le costruzioni murarie, non solo è presupposto essenziale alla progettazione dei nuovi edifici, ma costituisce un'informazione imprescindibile per chi debba intervenire sul patrimonio edilizio esistente con interventi di manutenzione, consolidamento, miglioramento o adeguamento. Le prime costruzioni lapidee furono ottenute semplicemente sovrapponendo pietre nella forma in cui si trovavano in natura, cioè come si erano distaccate dai massi rocciosi per effetto degli agenti atmosferici o degli apparati radicali della vegetazione. I primi muri erano realizzati “a secco”, ovvero senza l'impiego di malta e la loro stabilità era affidata sia alla grandezza dei blocchi che alla loro regolarità e risultava tanto migliore quanto maggiore era la superficie di contatto tra i blocchi. In presenza di materiale fine o di pietre arrotondate (come quelle di fiume) o fortemente irregolari, si rese necessario l'uso di un elemento complementare come il fango che avesse funzione di connettore. Con il perfezionamento degli utensili, si capì che per conseguire maggiori superfici di contatto conveniva sbazzare le pietre manualmente, prima della messa in opera. Si capì che quanto più tali superfici, oltre che piane, erano orizzontali, tanto più stabili risultavano i muri. Fu naturale, pertanto, l'evoluzione verso la pietra squadrata, la cui forma di parallelepipedo consentiva un perfetto contatto tra le pietre e la trasmissione delle sole componenti verticali delle forze di gravità. Il legante, inizialmente, fu costituito da fango di natura qualunque e, solo in seguito, da argilla; certamente, però, la natura dei luoghi fece sperimentare e adottare anche altri materiali. Frequenti sono stati i ritrovamenti di malte di gesso utilizzate come legante, dagli egizi nel III millennio a.C. e dai greci in età ellenistica; tali malte, pur presentando una presa molto rapida, perdevano però capacità resistente alla presenza di umidità. I romani, invece, codificarono l'uso del gesso quale legante allo stato puro (come dimostrano gli edifici di epoca repubblicana in *opus quadratum*). Nelle località ove mancavano pietre naturali di grandi dimensioni, ma erano

presenti materiali argillosi, ebbe origine la muratura con pietre artificiali ovvero confezionate attraverso la miscelazione di materiali argillosi. Quest'ultimi, modellati allo stato plastico quando erano saturi d'acqua, mantenevano la forma dopo esser stati fatti asciugare all'aria, dando luogo a zolle rigide. Per evitare le screpolature che si verificavano durante l'essiccazione dell'argilla cruda si pensò di combinarla con altri materiali aventi funzione di ridurre tale fenomeno. Un primo sistema si ritrova negli stessi scritti biblici, ove si narra che gli impasti per la costruzione dei mattoni venivano "additivati" con paglia avente funzione sgrassante: questa conferiva al materiale una maggiore resistenza a trazione esercitando una funzione di armatura capillare e dando così vita agli antenati dei conglomerati fibro-rinforzati. Un altro inerte adoperato per limitare i fenomeni di ritiro era la sabbia. Le murature a base di argilla cruda potevano essere costituite, in definitiva da:

- un impasto di terreno argilloso e paglia tritata, detto torchi;
- un conglomerato di terreno argilloso e pietre, denominato pisé;
- mattoni crudi essiccati al sole (caratterizzati da maggiore leggerezza rispetto alle pietre naturali e da tempi rapidissimi di produzione e di posa in opera).

Fra queste tre tipologie, la seconda assume grande importanza in quanto rappresenta l'antenato del calcestruzzo. Il pisé era costituito da un impasto di terra e pietre costipato all'interno di casseforme in legno. Tale tecnologia costruttiva si differenziava completamente da quella delle murature in pietra, non solo in quanto impiegava un materiale decisamente più economico, ma soprattutto perché l'uso delle casseforme consentiva di modellare le forme più svariate. Il pisé era considerato troppo umile per le costruzioni in confronto alla nobile pietra da taglio e quindi fu relegato tra i materiali poveri sino alla fine dell'ottocento. I mattoni crudi presentavano una consistenza bassa (plastica allorché venivano a contatto con l'acqua) e allora si pensò di cuocere gli elementi, dando luogo alla cosiddetta terracotta. Nella confezione di mattoni cotti vennero usati solamente sgrassanti minerali (come la sabbia), in quanto quelli vegetali (come la paglia) venivano distrutti durante la fase di cottura. La cottura comportava costi elevatissimi e la produzione di mattoni cotti fu limitata alle opere più importanti, perlomeno fino all'avvento delle moderne fonti di energia. Il mattone ebbe un campo di utilizzazione più ridotto di quello della pietra, innanzitutto perché presentava una resistenza minore ma anche perché, essendo la stabilità dei muri affidata al peso proprio e

allo spessore, particolarmente nelle sollecitazioni da sforzo normale eccentrico, era preferibile impiegare materiali dotati di elevato peso specifico.

Definiamo muratura una qualsiasi struttura muraria costituita da diversi elementi (pietra, laterizio) sovrapposti gli uni agli altri senza o con l'interposizione di malta o altro materiale cementante. In riferimento alle funzioni costruttive possiamo avere: muratura portante, di fondazione, di rinforzo, ecc.; evidenziandone il materiale di cui è composta: muratura di pietrame, di mattoni, di tufo, di cemento, mista. Secondo il tipo di lavorazione, la muratura viene classificata come muratura a faccia vista, a cassa vuota, di pietra da taglio o a conci regolari (formata da blocchi parallelepipedi di pietra detti conci, con la faccia esterna lavorata e collegati tra loro con perni e grappe), muratura a sacco detta anche a getto (formata gettando pezzi di pietra e malta alla rinfusa in casseforme, cavi di fondazione o tra due sottili cortine di muratura di conci), muratura a secco, (costruita con pezzi di pietra squadrati o informi senza interposizione di malta), muratura listata, costituita da pannelli di muratura in pietrame listato, cioè alternato verticalmente a ricorsi semplici o doppi di mattoni. I mattoni si possono disporre in maniera differenti all'interno dei vari corsi, perciò si distinguono: muratura in coltello, il cui spessore è uguale al minimo spessore dei mattoni; muratura a una o più teste, avente lo spessore di una o più teste di mattoni (www.architetturaweb.it). In figura 3.1 sono presentate alcune tipologie di murature.

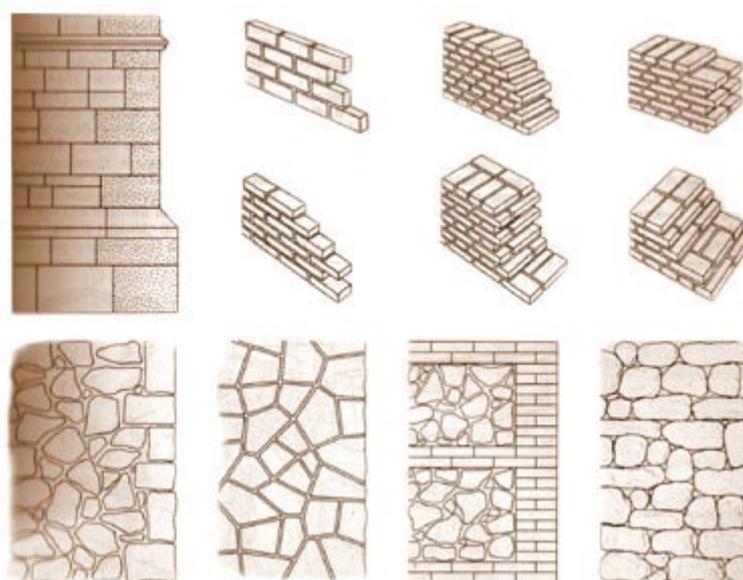


Figura 3.1 Illustrazione di vari tipi di murature (www.architetturaweb.it)

Gli spessori dei muri in laterizio sono ottenuti e misurati come multipli della larghezza o testa del mattone. La “testa” è perciò il modulo base di riferimento:

- un muro il cui spessore è uguale alla larghezza di un mattone si definisce "a una testa";
- un muro il cui spessore è uguale alla lunghezza (o a due volte la larghezza) di un mattone si definisce "a due teste";
- un muro cui spessore è uguale ad una lunghezza e mezzo (o a tre volte la larghezza) di un mattone si definisce "a tre teste";

Normalmente il mattone pieno (quello unificato) misura 5,5 cm x 12 cm (la testa) x 25 cm, per cui le misure delle murature corrisponderanno alle seguenti misure:

- un muro ad “una testa”=12 cm;
- un muro a “due teste” = 25 cm (un mattone in lunghezza oppure due mattoni di testa ed 1 cm di malta di separazione);
- un muro “tre teste” = 38 cm (un mattone in lunghezza separato da 1 cm di malta da un mattone di testa oppure tre mattoni di testa separati da due spessori da 1 cm di malta).

I singoli mattoni di un muro, per dar luogo ad un regolare collegamento, devono ricevere rispetto a sé stessi e al muro diverse posizioni, secondo le quali prendono diversi nomi. Quando posano con tutta la lunghezza parallelamente alla lunghezza del muro, il filare è chiamato corso in grossezza e i mattoni definiti di lista; quando la larghezza del mattone è parallela alla lunghezza del muro, il corso dicesi corso in chiave e i singoli laterizi chiamati di testa. Si può procedere alla disposizione di essi come si vuole, purché si osservino delle regole generali, valide per qualsiasi spessore del muro costruito:

- i corsi con mattoni di lista e di testa devono alternarsi nell’elevazione del muro;
- quando il muro è angolare, se da un lato un corso è in grossezza, all’altro lato lo stesso deve essere in chiave;
- le commesse verticali di due corsi sovrapposti, l’uno all’altro, non devono mai cadere in uno stesso piano verticale. I giunti verticali tra i mattoni di un corso devono sempre essere coperti dai mattoni del corso sottoposto e da quelli del corso sovrapposto. Quanto più gli strati giacciono l’uno sopra all’altro, senza che

i giunti verticali coincidano, tanto più è salda la struttura del muro (Breymann, 2003).

Nello specifico, il mattone è un materiale ceramico a pasta porosa utilizzata fin dall'antichità, solitamente a forma di parallelepipedo, ottenuto dalla cottura ad elevate temperature di impasti di argilla e di acqua. Il termine laterizio spesso associato al mattone o in alternativa, pur riferendosi specificamente ai mattoni d'epoca romana, viene utilizzato per indicare la vasta gamma di materiali utilizzati per le costruzioni. Il materiale base è costituito principalmente da argilla, formata da silice nella percentuale variabile attorno al 50%, più un 20-30% di carbonato di calcio, oltre a una modesta percentuale, attorno al 2%, di ossido di ferro e una percentuale a partire dal 4-6% di acqua. La prima operazione per la realizzazione di un mattone consiste nella preparazione dell'impasto. Si porta il prodotto alla plasticità voluta mediante miscelazione di argille di qualità diversa o mediante aggiunta di opportuni smagrenti quali sabbia silicea o frammenti sminuzzati di laterizi scartati per difetto di cottura. Il composto così ottenuto di argilla e acqua viene di solito foggato mediante trafilatura. La pasta viene pressata contro un orifizio dal quale esce sotto forma di nastro continuo. Un filo d'acciaio provvede a tagliare il nastro in pezzi della lunghezza desiderata. I pezzi più complessi sono invece prodotti solitamente per colaggio, ma non si parla più di materiali per l'edilizia e in questo caso si aggiunge carbonato di sodio che funge da fluidificante.

Il legante utilizzato nei nostri provini è malta di calce idraulica naturale, ma in alternativa può essere impiegata una malta di calce aerea o cemento portland. La calce idraulica è prodotta in quantità modeste e solo in alcuni paesi. La sua importanza è soprattutto storica, in quanto deve essere considerata il precursore del moderno cemento portland. Essa si distingue dalla calce aerea perché i suoi impasti possono indurire a contatto con l'acqua. L'idraulicità garantisce anche la possibilità di un regolare indurimento nel cuore dei getti o all'interno delle malte cioè nelle condizioni in cui sono limitate le possibilità di scambio con le sostanze presenti nell'aria che consentono le reazioni di indurimento della calce aerea. Si può distinguere tra:

- calce idrauliche vere e proprie, ottenute per cottura di calcari argillosi o da miscele di calcari e argille;
- calce idrauliche attualmente in commercio che, in effetti sono costituite da

cemento portland opportunamente “diluito”;

- calce idrauliche ottenute per aggiunta alla calce aerea di materiali pozzolanici o scoria d’altoforno;

Nel primo caso, per riscaldamento di miscele di calcare e argilla (roccia sedimentaria assai diffusa, di composizione chimica e mineralogica variabile, costituita fondamentalmente da silicati idrati di alluminio tra cui: caolinite $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ e la montmorillonite $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) a temperature superiori a $900^\circ C$ si forma ossido di calcio che in parte reagisce con la silice e l’allumina prodotte dalla dissociazione dell’argilla per dar luogo a composti, quali il silicato bicalcico ($2CaO \cdot SiO_2$) e l’alluminato monocalcico ($CaO \cdot Al_2O_3$). Nel prodotto cotto sono presenti anche ossido di calcio, silice e allumina. L’aggiunta di acqua stechiometricamente controllata, permette la conversione dell’ossido di calcio non combinato in idrossido e pertanto, alla fine del processo, si ottiene una miscela di idrossido, silicato bicalcico, alluminato monocalcico, oltre a silice e allumina non combinate. Il prodotto così preparato, detto calce idraulica, si comporta da legante idraulico per la presenza in particolar modo del silicato bicalcico e dell’alluminato di calcio.

La calce idraulica può essere anche sostituita da prodotti ottenuti miscelando il cemento portland con una notevole percentuale di materiale inerte macinato finemente (filler). In passato era prodotta anche come miscelazione di calce aerea (spenta) con pozzolana naturale (roccia di origine vulcanica a struttura vetrosa, molto reattiva, a base prevalentemente di SiO_2 e di Al_2O_3) o artificiale oppure con scoria granulata di altoforno, nel caso la pozzolana non fosse reperibile. Le proprietà idrauliche sono dovute nel caso della pozzolana ai prodotti di reazione della stessa e calce, mentre nel caso della scoria sono dovute ai prodotti di idratazione della scoria attivata dalla presenza di idrossido di calcio.

La calce idraulica pozzolanica è di rilevanza storica; i romani, come documenta Vitruvio nel suo trattato De architettura, producevano materiali cementizi in grado di far presa e indurire a contatto con l’acqua appunto mescolando pozzolana (pulvis puteolana cioè di Pozzuoli) o polvere di mattone con calce e H_2O . Opere prestigiose, come il Pantheon, costruite duemila anni fa utilizzando questo tipo di legante e arrivate in perfetta efficienza fino ai giorni nostri, testimoniano le elevate caratteristiche meccaniche e di durabilità del materiale cementizio prodotto dai romani.

Nelle migliori condizioni di realizzazione quanto a disposizione, costipamento e

maturazione, la resistenza a compressione di una malta ottenuta con calce e pozzolana o con una calce idraulica vera e propria può arrivare rispettivamente a 3 e 9 MPa (valori molto minori di quelli di una malta di cemento Portland, compresi tra i 10 e 40 MPa), ma nettamente superiori a quelli una malta con calce aerea (Bertolini, Pedferri 2004).

3.2. Caratteristiche dei materiali: geometria e costruzione dei provini

Nello studio svolto in questa tesi si considerano due provini in muratura di altezza pari a 131 cm, di larghezza pari a 129 cm e spessore di 38 cm. I provini nominati PNDE e PNDF hanno definite caratteristiche per quanto riguarda la composizione dei vari corsi. Entrambi sono muri a “tre teste” di mattoni pieni e malta di calce idraulica naturale. Nelle figure 3.2 e 3.3 sono presentati i muretti che erano già stati costruiti in laboratorio all’interno di un ampio progetto di ricerca volto alla diagnostica e al monitoraggio di strutture storiche. Essi sono posizionati all’interno di particolari supporti in metallo, dotati di ruote per la movimentazione degli stessi e di vasche nella parte inferiore da riempire con acqua miscelata con sali. Un’ulteriore funzione di sicurezza è attribuita al sostegno, per evitare eventuali oscillazioni del muro durante lo svolgimento delle prove.



Figura 3.2 Provino PNDE

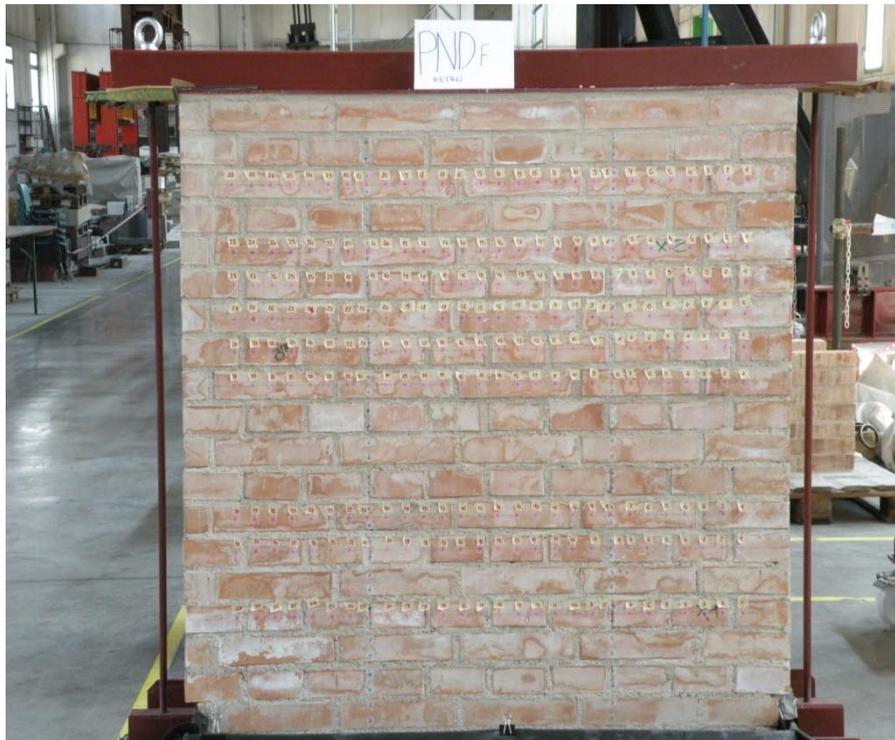


Figura 3.3 Provino PNDF

Ambedue i provini sono composti da 20 corsi, la cui numerazione parte dal basso verso l'alto. I corsi 1 e 2 misurano 116 cm, mentre dal 3 al 20 la larghezza è pari a 129 cm. I difetti introdotti nel provino PNDE sono collocati a livello del corso 5, 6, 7, 11, 12 e 17 come mostra l'assonometria in figura 3.4. Nel prospetto in figura 3.5 sono riportate le linee di sezione verticale A e B coincidenti rispettivamente con il punto di mezzeria del difetto di sinistra e di quello di destra; invece la vista laterale da destra illustra la posizione delle anomalie nello spessore del muro. A lato è riportata una scala di valori che rappresenta le reali quote del provino misurare direttamente dopo la costruzione. Nel dettaglio la sezione A-A' e la sezione B-B' in figura 3.6, ottenute sezionando il muro in corrispondenza delle linee verticali A e B riportate nel prospetto, evidenziano le distanze dei vari difetti dal lato fronte.

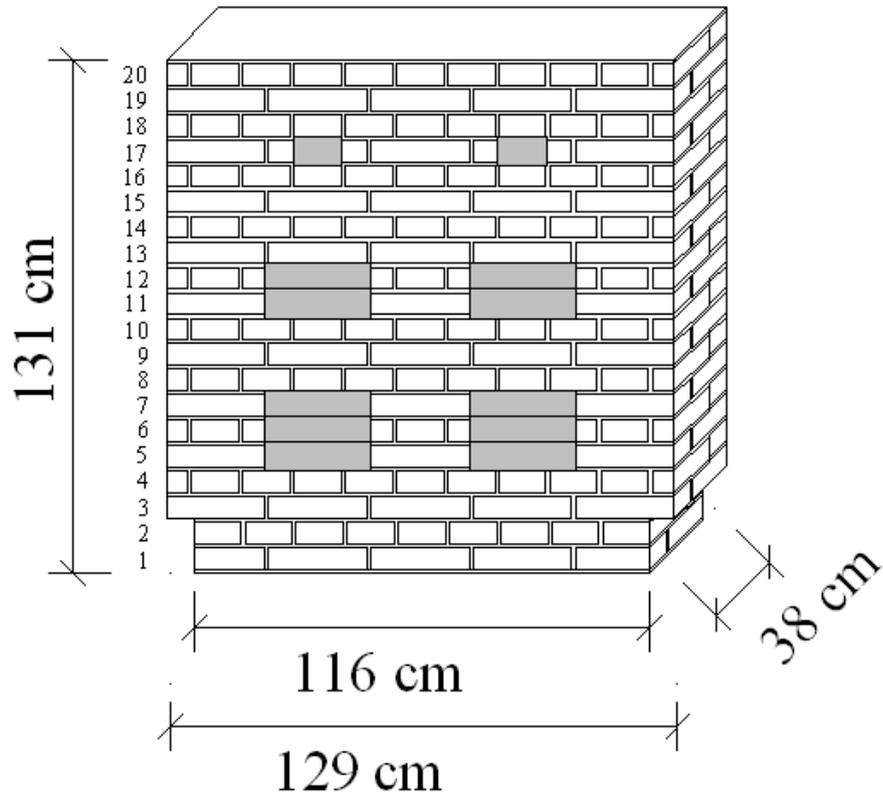


Figura 3.4 Muretto PNDE, assonometria (Colla e Gabrielli, 2009)

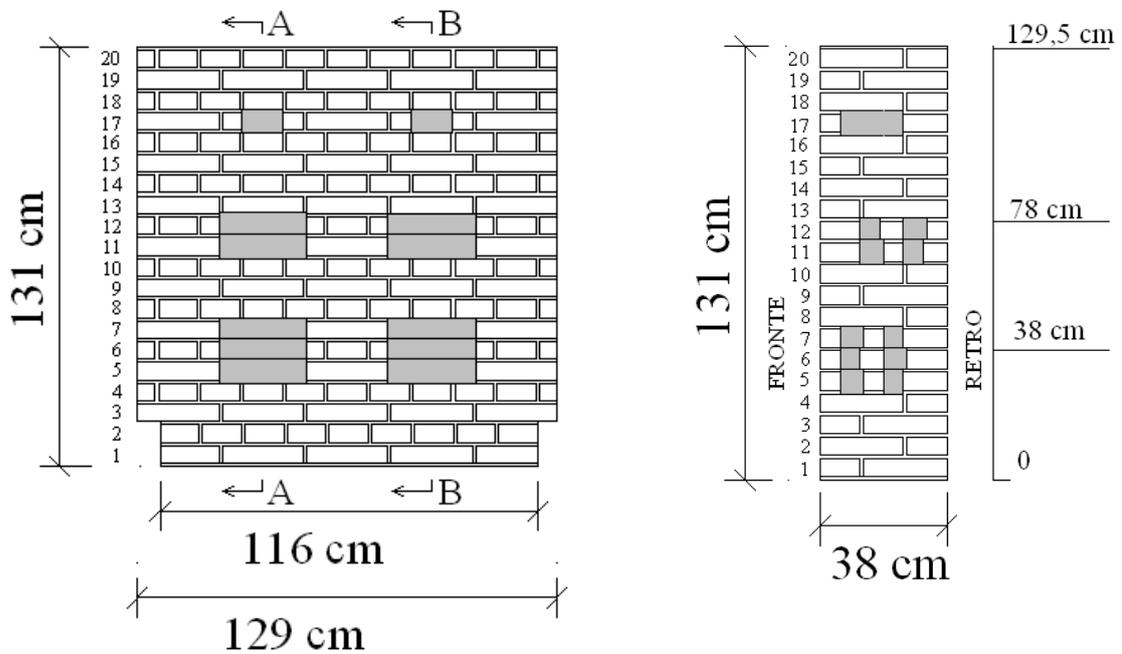


Figura 3.5 Muretto PNDE, prospetto e vista laterale da destra (Colla e Gabrielli, 2009)

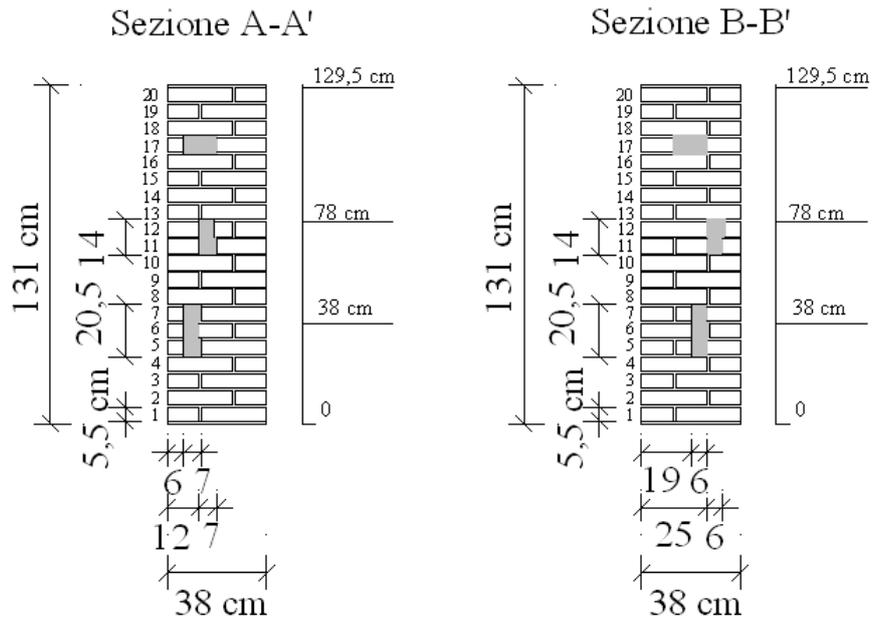


Figura 3.6 Muretto PNDE, sezione A-A' e Sezione B-B' (Colla e Gabrielli, 2009)

La disposizione geometrica dei mattoni nei corsi che non presentano difetti è illustrata in figura 3.7. In figura 3.8 si ha nel dettaglio, corso per corso, la dimensione e la distanza dal lato fronte dei difetti introdotti.

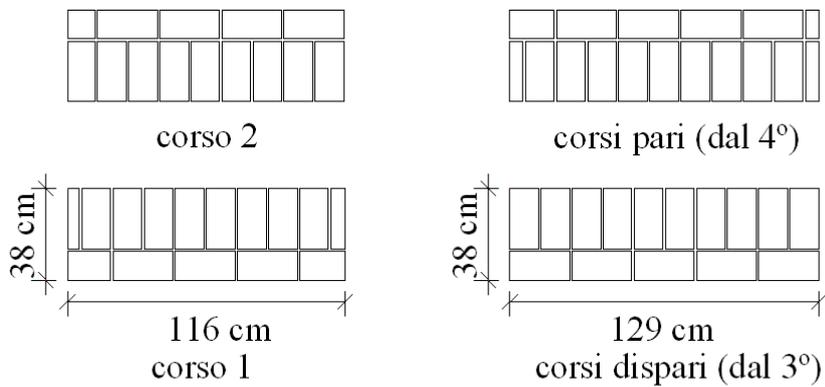


Figura 3.7 Muretto PNDE, corsi senza difetti (Colla e Gabrielli, 2009)

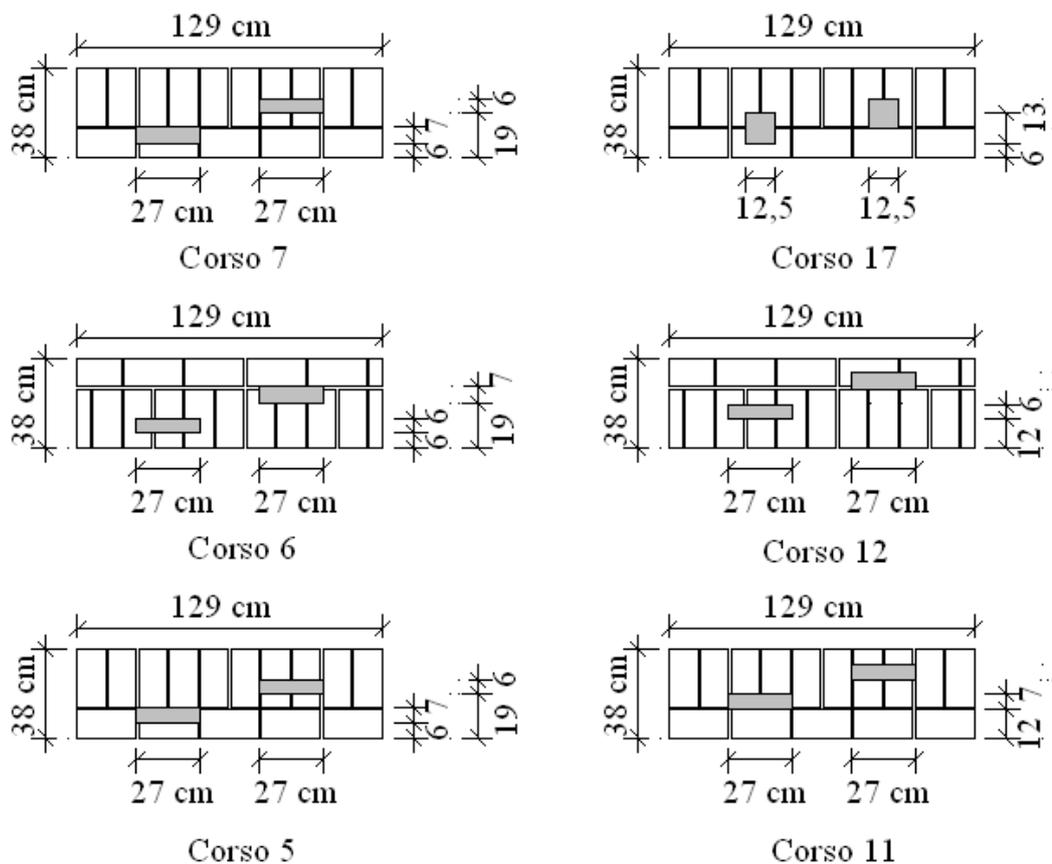


Figura 3.8 Muretto PNDE, corsi con difetti (Colla e Gabrielli, 2009)

La profondità dei difetti è di 6 cm e diventa 7 cm nel caso di adiacenza con il giunto di malta. Hanno dimensioni e forme differenti (figura 3.9).

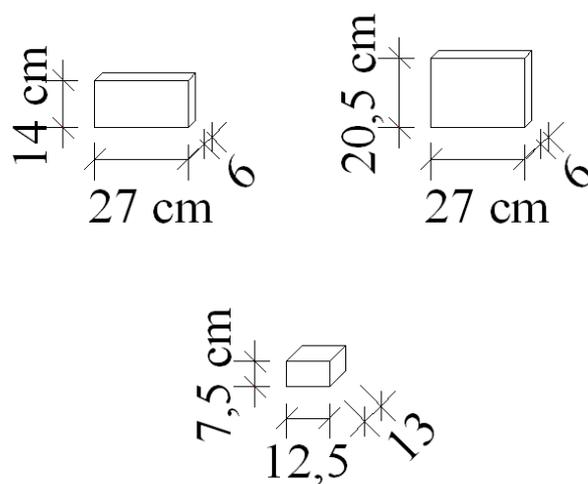


Figura 3.9 Muretto PNDE, dimensioni e forma dei difetti (Colla e Gabrielli, 2009)

Il provino PNDF, anch'esso alto 20 corsi, presenta a livello del corso 5 due difetti di forma piuttosto ridotta e dal corso 9 al 19 muratura a sacco. La muratura a sacco è costituita da una cornice di mattoni pieni e all'interno vi è un nocciolo di materiale irregolare come pietrame da cava, rottami di laterizi e scorie tutte amalgamate da uno strato di malta. Nell'assonometria di figura 3.10 la zona tratteggiata individua "il sacco", mentre la zona retinata in color grigio mostra le parti più o meno sporgenti rispetto al perimetro dei corsi 9, 10, 17, 18 e 19 (figura 3.11). Le sezioni A-A' e B-B' in figura 3.12 aiutano a definire meglio la composizione del muretto. Nella figura 3.13 i corsi senza difetti 1 e 2 hanno dimensione di 116 cm di larghezza, mentre quelli pari e dispari dal corso 3 verso l'alto hanno una larghezza di 129 cm. I corsi col sacco sono rappresentati in figura 3.14 e 3.15.

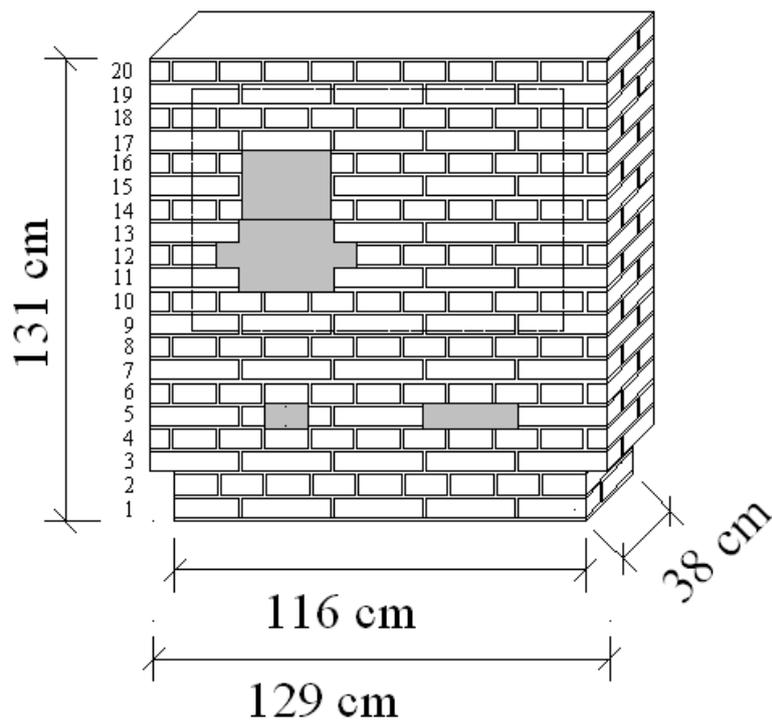


Figura 3.10 Muretto PNDF, assonometria (Colla e Gabrielli, 2009)

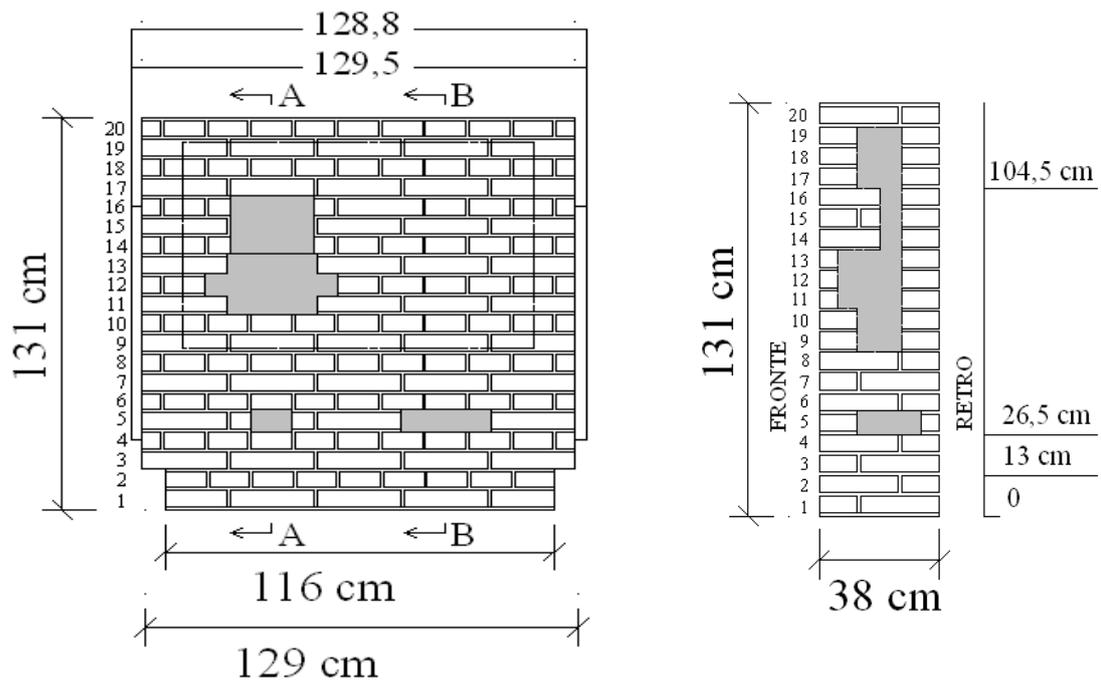


Figura 3.11 Muretto PNDF, prospetto e vista laterale da destra (Colla e Gabrielli, 2009)

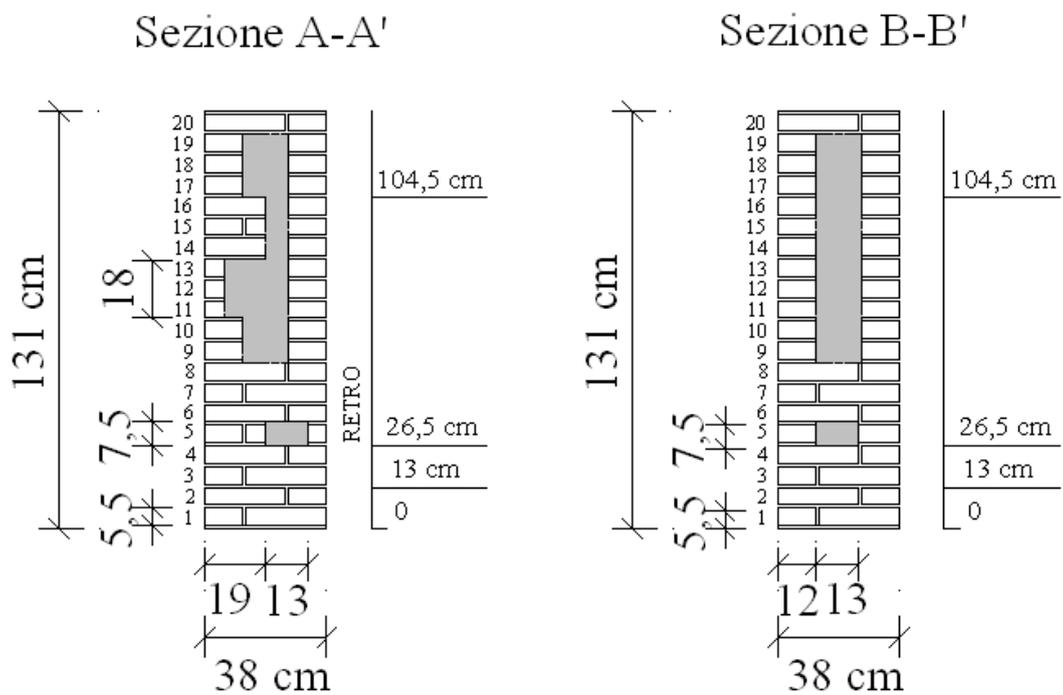


Figura 3.12 Muretto PNDF, sezione A-A' e sezione B-B' (Colla e Gabrielli, 2009)

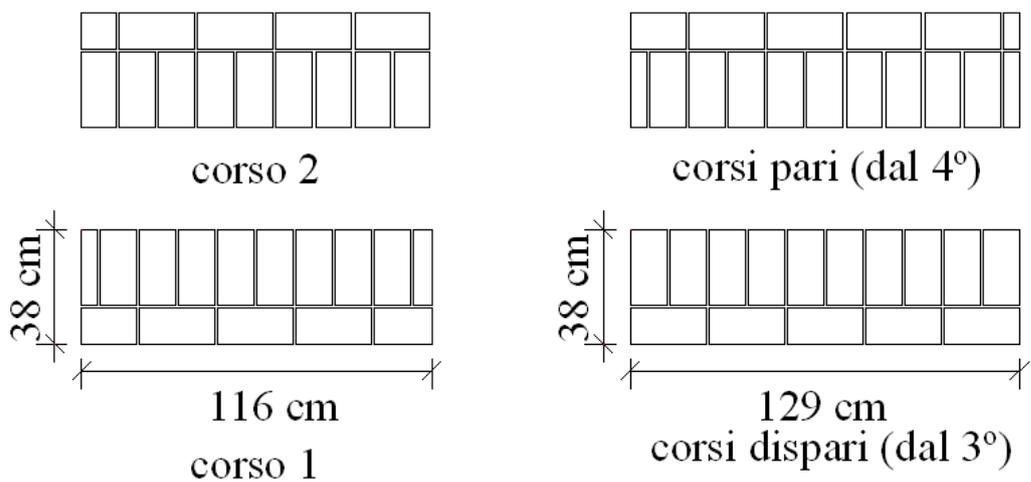


Figura 3.13 Muretto PNDF, corsi senza difetti (Colla e Gabrielli, 2009)

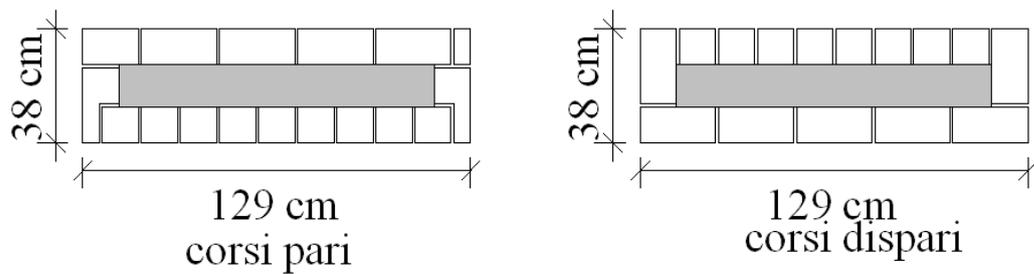


Figura 3.14 Muretto PNDF, corsi compresi tra il 9 e il 19 con muratura a sacco (Colla e Gabrielli, 2009)

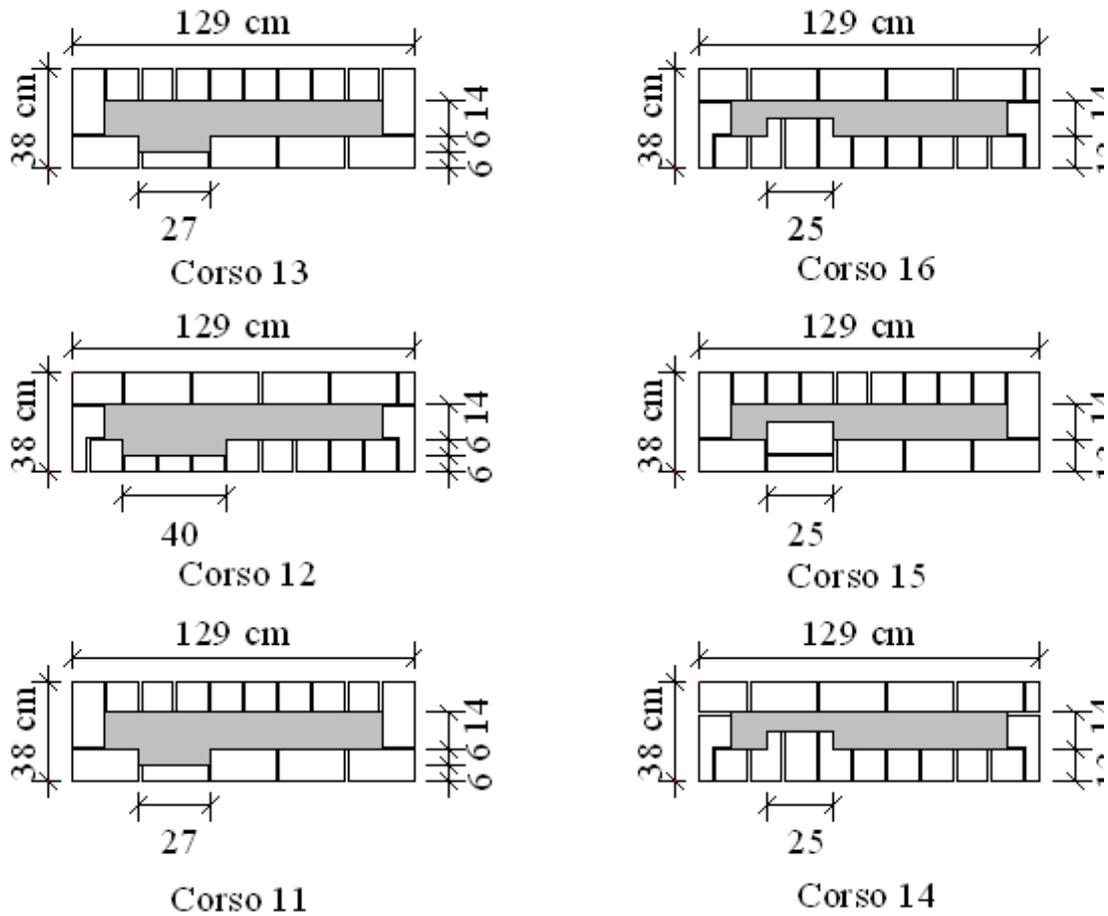
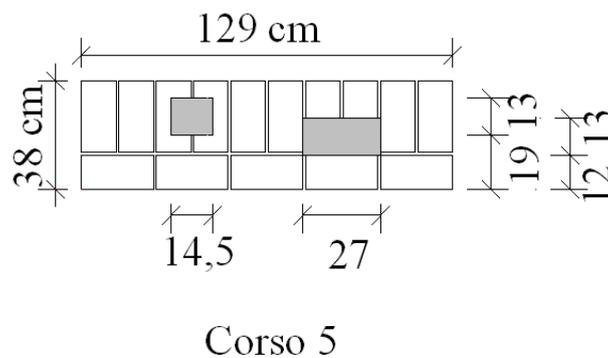


Figura 3.15 Muretto PNDF, corsi 11, 12, 13, 14, 15 e 16 con muratura a sacco irregolare (Colla e Gabrielli, 2009)

Nel corso 5 sono stati introdotti due difetti, la cui disposizione e dimensione sono presentati in figura 3.16 e 3.17.



Corso 5

Figura 3.16 Muretto PNDF, corso 5 (Colla e Gabrielli, 2009)

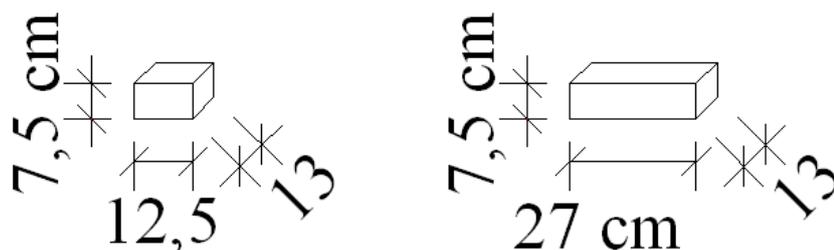


Figura 3.17 Muretto PNDF, dimensioni e forma dei difetti del corso 5 (Colla e Gabrielli, 2009)

La scelta di una gamma di difetti con dimensioni e forme diverse e la presenza di una muratura a sacco serve per poter riprodurre diverse tipologie di anomalie o di tessiture murarie che si possono ritrovare in strutture storiche. Le analisi soniche di vario tipo che saranno applicate al provino, daranno conferma o meno delle potenzialità di ciascuna tecnica nell'individuare situazioni particolari, anche con prove eseguite direttamente in sito.

La realizzazione dei provini, avvenuta nei laboratori del Larm, è stata eseguita da personale esperto. I muretti sono costruiti a regola d'arte: le dimensioni dei giunti controllate con un distanziatore e il corretto allineamento dei mattoni verificato con livelle e fili a piombo (figura 3.18). Prima della costruzione, si è provveduto alla preparazione dei difetti da inserire all'interno. Essi sono fatti di polistirolo espanso, al fine di simulare la presenza di vuoti, essendo il polistirolo composto dal 98% circa di aria e sono stati sagomati secondo le dimensioni scelte da progetto. Nelle figure 3.19 e 3.20 sono riportate le messe in opera dei difetti all'interno della tessitura muraria dei muretti PNDE e PNDF.



Figura 3.18 Fase di realizzazione dei corsi 11 e 4 del muretto PNDE



Figura 3.19 Fasi di costruzione del corso 5 e 6 del muretto PNDE



Figura 3.20 Fasi di costruzione del corso 5 del muretto PNDF

Per quanto riguarda la muratura a sacco presente nel provino PNDF, è stata costruita inizialmente la cornice di mattoni per alcuni corsi poi successivamente riempita con malta e frammenti di laterizio. Prima di procedere alla realizzazione della cornice del corso successivo, il nocciolo centrale viene compattato bene con l'aggiunta di ulteriore malta per colmare eventuali lacune rimaste tra i pezzi di mattone (figura 3.21).



Figura 3.21 Fasi di realizzazione della muratura a sacco nel muretto PNDf

Capitolo 4

Procedura di acquisizione ed elaborazione dei dati

4.1 Progettazione delle acquisizioni

La procedura di acquisizione dei tempi di volo nella tomografia sonica prevede la progettazione di un elevato numero di stazioni di misura lungo il perimetro della sezione. Da ciascuna delle stazioni trasmittente si dipartono dei percorsi a formare un ventaglio verso più stazioni riceventi. La scelta della distanza che intercorre tra le stazioni di misura è basata sulla valutazione della lunghezza d'onda degli impulsi prodotti dallo strumento e dalla posizione che le stesse stazioni occupano se poste con un certo intervallo. Noto il valore della lunghezza d'onda, piuttosto indicativo in quanto ottenuto dalla media delle velocità ottenute da misurazioni preliminari, è stata progettata la disposizione delle stazioni di misura e i percorsi da stazione sorgente a ricevente. La definizione dello schema per le misurazioni soniche è l'aspetto primario per l'applicazione della tecnica tomografica. Le caratteristiche fondamentali di cui si deve tener conto sono:

- Omogeneità della campitura formata dai percorsi di misura della sezione in esame, considerando le traiettorie rettilinee;
- Raffittimento dei percorsi nelle zone vicino ai bordi dell'area indagata;
- Valutazione del numero complessivo di misurazioni per ogni sezione con conseguente raggiungimento di un compromesso tra omogeneità di campitura e numero totale di acquisizioni;
- Valutazione dell'angolo di apertura del ventaglio di percorsi per ogni stazione emittente.

Considerando una certa distanza dai bordi (10,5 cm cadauno), la lunghezza effettivamente utile per il posizionamento delle stazioni di misura in un corso orizzontale risulta pari a 108 cm, essendo la lunghezza complessiva di ogni corso di 129 cm. La scelta della distanza dal bordo è stata ricavata considerando che rimanesse la stessa distanza tra i due bordi e la prima e l'ultima stazione di misura e la quantità rimanente fosse divisibile per 4. Lo spessore delle sezioni è pari a 38 cm. La distanza scelta tra le stazioni di misura

lungo un corso di muratura è pari a 4 cm per un totale di 28 stazioni emittenti e altrettante riceventi. Noto il numero e la posizione delle stazioni, sono state fatte diverse ipotesi di ventagli di percorsi. Per avere una conferma visiva della copertura della sezione, si è deciso di disegnare tutti i percorsi; ognuno rappresenta una misura ideale in quanto rettilinea e viene indicato da un segmento che congiunge una stazione emittente con una ricevente.

La prima ipotesi è composta da una distribuzione simmetrica di 5 raggi per ogni stazioni emittente con apertura del ventaglio di 46° . In figura 4.1 si vede la sagoma della sezione e in color blu è rappresentato il ventaglio di percorsi uscenti da ogni stazioni trasmettente, riportato simbolicamente in una sola stazione. In figura 4.2 è mostrata la copertura della sezione con la rappresentazione di tutti i ventagli per le 28 stazioni emittenti. La campitura abbastanza omogenea con l'altezza dei triangoli di bordo (linea in colore rosso) di 4,75 cm. La disposizione dei percorsi nel ventaglio non è omogenea in quanto i raggi tendono a coprire la zona più laterale del ventaglio.

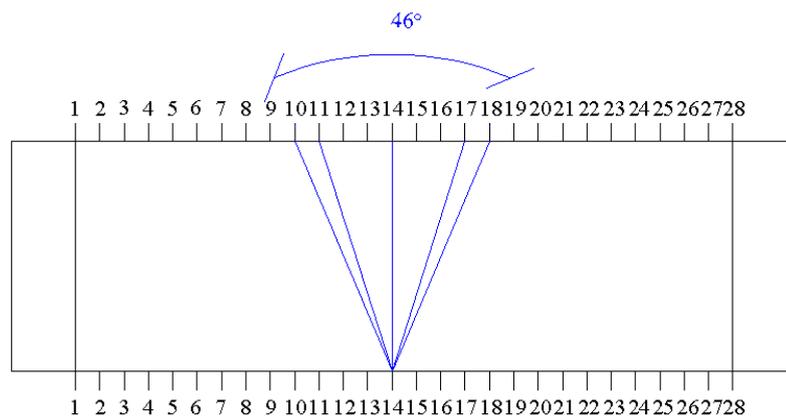


Figura 4.1 Rappresentazione del ventaglio di percorsi uscente da una stazione trasmettente

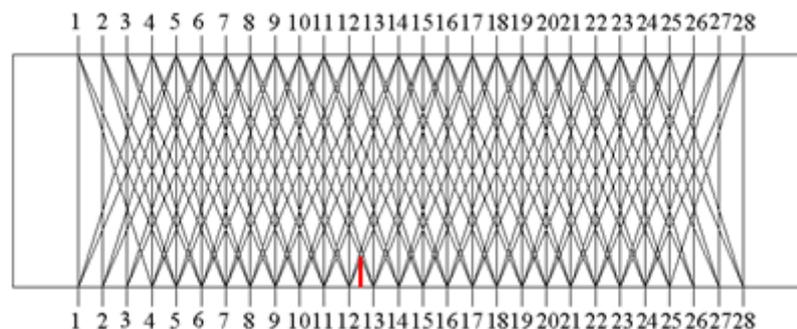


Figura 4.2 Rappresentazione della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmettente

Considerando ancora un ventaglio con apertura di 46° , una seconda ipotesi è stata fatta scegliendo una diversa distribuzione dei 5 percorsi di misura. In figura 4.3 è riportato un singolo ventaglio, mentre in figura 4.4 è riportata l'intera sezione ricoperta dai percorsi di misura. La copertura è omogenea, anche se due raggi si trovano a solo una stazione di distanza dalla misura diretta e i restanti percorsi sono disposti a 4 stazioni di distanza dalla diretta con conseguente copertura più densa vicino a quest'ultima.

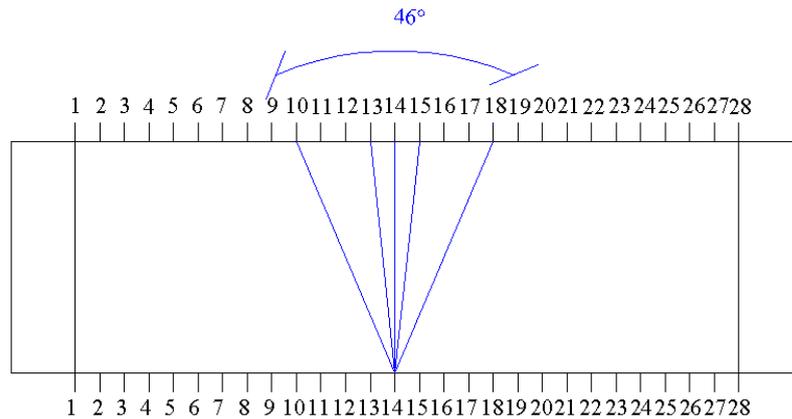


Figura 4.3 Rappresentazione del ventaglio di percorsi uscente da una stazione trasmittente

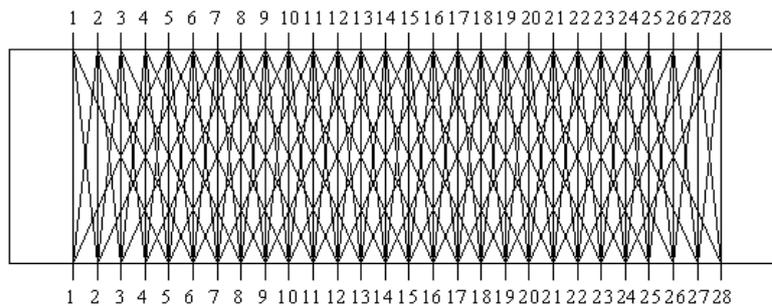


Figura 4.4 Rappresentazione della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

Le successive ipotesi di progettazione considerano un ventaglio con apertura di 56° , con 5 percorsi per ciascun ventaglio. Nelle figure 4.5, 4.6 e 4.7 sono riportati i singoli ventagli e la campitura dell'intera sezione in tre diversi casi. Per avere una copertura omogenea con

la minor presenza di zone non coperte dai percorsi di misura, sono state scelte tre distribuzioni di raggi di cui due hanno raggi più fitti o vicino alla diretta o ai lati del ventaglio. La figura 4.6 mostra una campitura meno densa nella zona centrale, mentre nella figura 4.7 la zona centrale è più densa. Non aumentando in maniera considerevole l'angolo del ventaglio, poiché ampiezze piuttosto elevate non garantiscono una corretta copertura della sezione, le altre ipotesi considerate hanno un ventaglio di ampiezza di 65° con 5 percorsi per ventaglio. Si era anche ipotizzato 7 raggi per ventaglio, ma il numero elevato di acquisizioni che ne deriva, ne ha sconsigliato l'uso. Nelle figure 4.8, 4.9 e 4.10 sono presentate le ipotesi con ampiezza di 65° . Esse sono state scartate perché nei casi in cui c'è campitura abbastanza omogenea (figura 4.10) la distribuzioni dei percorsi all'interno del ventaglio non è ottimale, mentre nei casi in cui vi è una buona distribuzioni dei raggi (figura 4.8 e 4.9), la campitura presenta zone più dense di altre e zone con presenza di aree triangolari senza copertura di percorsi di misura. Quest'ultime presentano una campitura con triangoli vuoti di bordo con un altezza (linea rossa) pari a 3,17 cm e l'altezza (linea rossa) di quelli centrali è di 6,34 cm. È importante la dimensione di quest'ultimi per sapere quanta parte di sezione rimane scoperta e nel caso in cui in quella zona vi sia un difetto, se vi è la possibilità di identificarlo o risulta essere di dimensioni inferiori all'area senza copertura di raggi di misura. Nel nostro caso quasi tutti i corsi presentano difetti di dimensioni superiori ai 6 cm, ma è meglio non avere una copertura della sezione con aree così ampie senza percorsi di misura. Sono state fatte ipotesi anche con ventagli di ampiezza al di sopra di 65° , ma i raggi risulta essere piuttosto distanti tra loro e molti ventagli perdono alcuni dei loro percorsi poiché questi fuoriescono dall'area di indagine considerata.

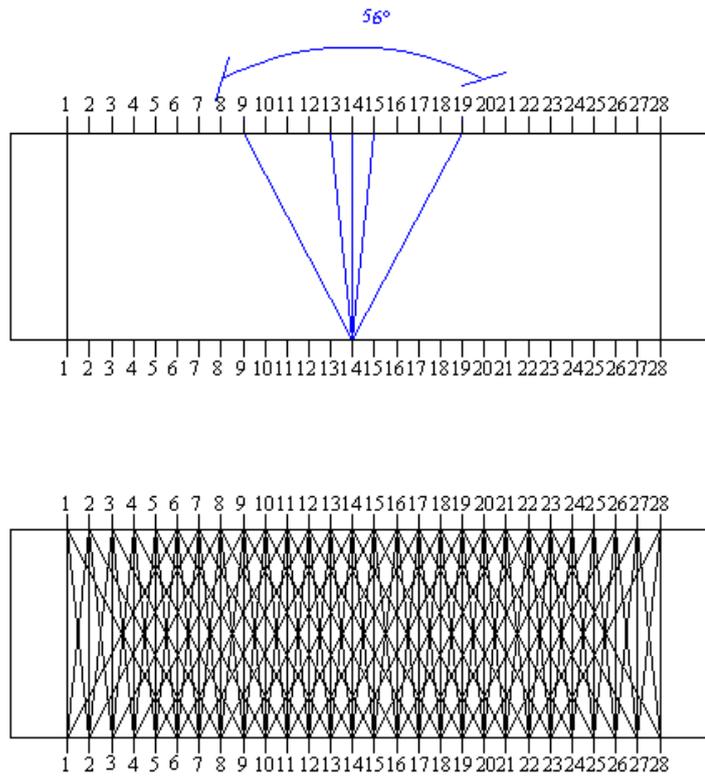


Figura 4.5 Rappresentazione di un ventaglio a 56° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

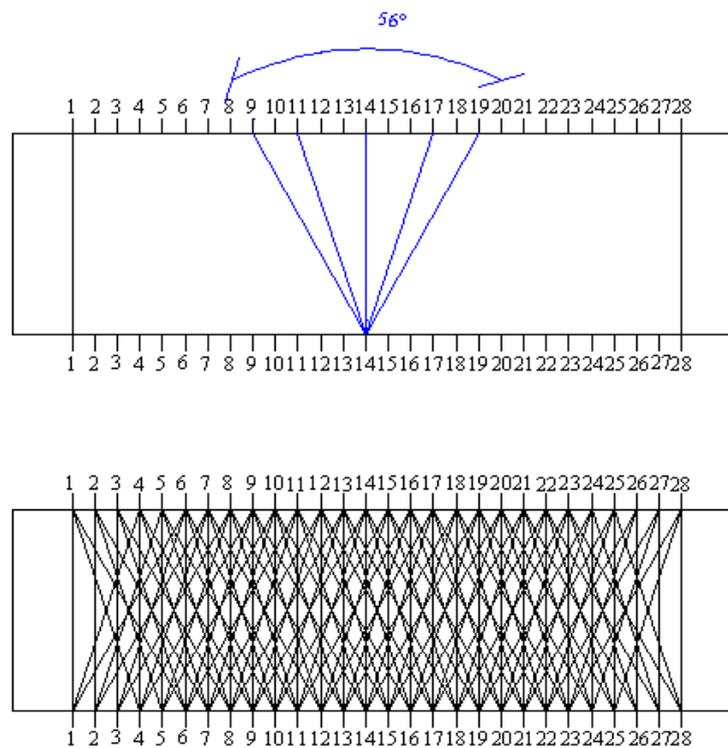


Figura 4.6 Rappresentazione di un ventaglio a 56° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

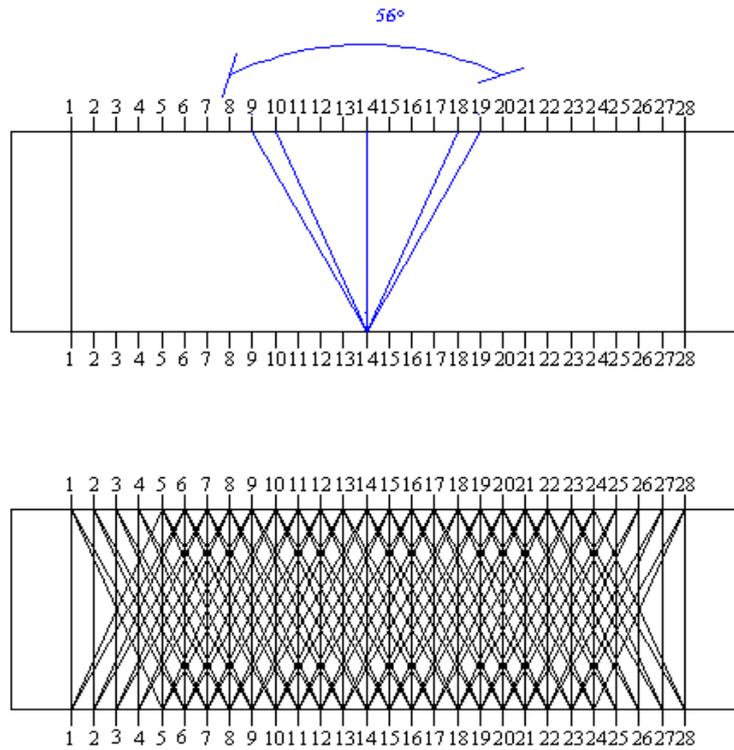


Figura 4.7 Rappresentazione di un ventaglio a 56° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

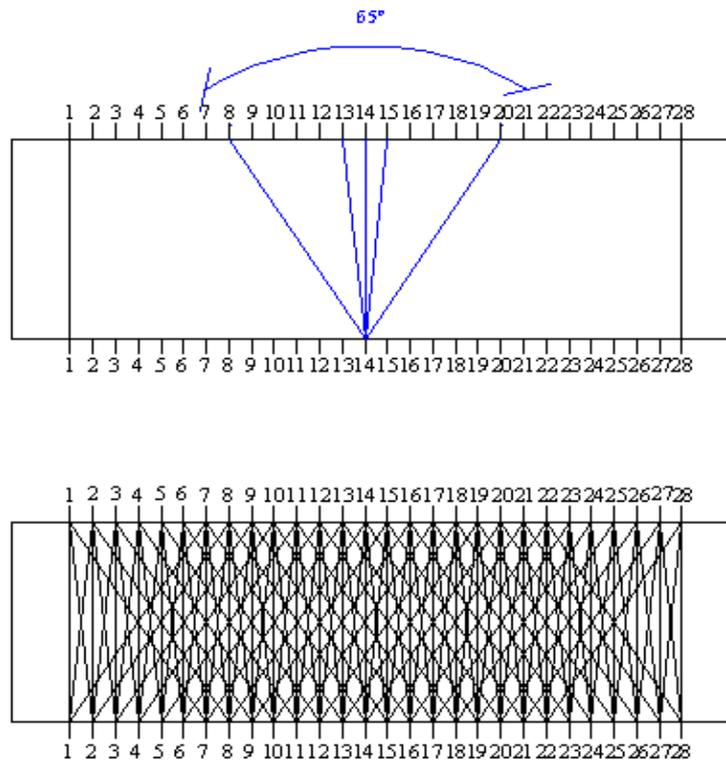


Figura 4.8 Rappresentazione di un ventaglio a 65° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

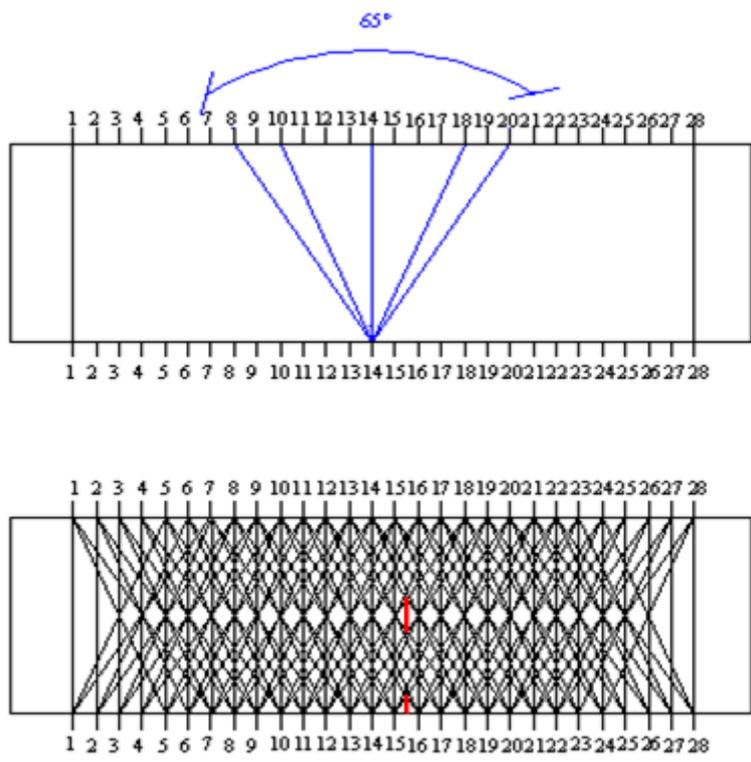


Figura 4.9 Rappresentazione di un ventaglio a 65° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

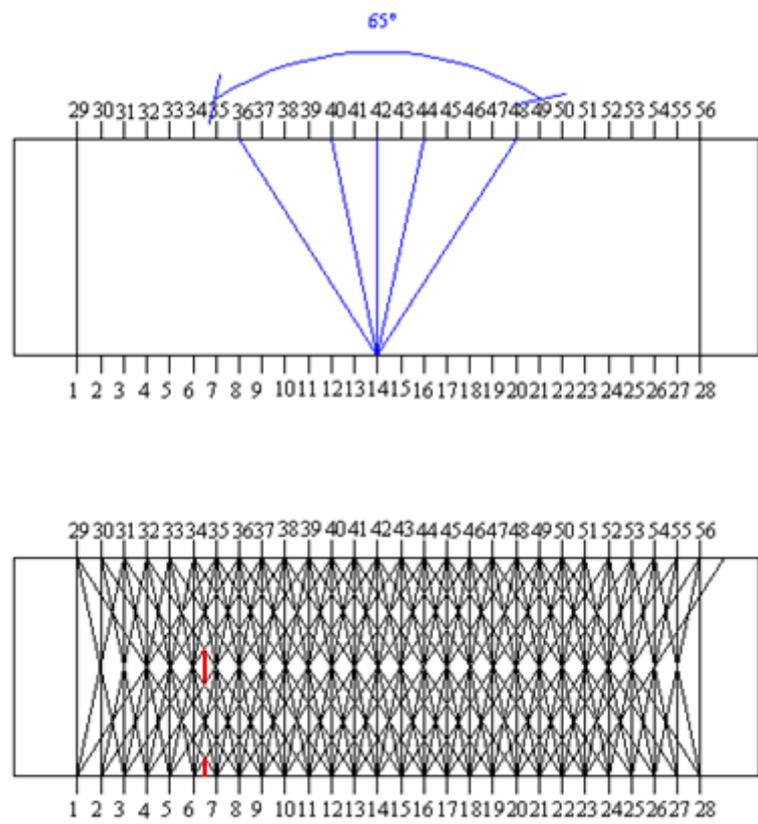


Figura 4.10 Rappresentazione di un ventaglio a 65° e della copertura della sezione con tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

La copertura della sezione che è stata scelta tiene conto delle considerazioni fatte dalle diverse ipotesi illustrate fino ad ora. È un compromesso tra un giusto valore di ampiezza del ventaglio, disposizione dei percorsi al suo interno e campitura omogenea della sezione. L'altezza delle aree triangolari di bordo è pari a 3,8 cm, mentre il resto della copertura risulta avere la stessa densità. Ai 5 raggi che compongono il ventaglio sono stati aggiunti dei percorsi aggiuntivi (in colore rosso per meglio identificarli) nelle zone laterali dell'area indagata per colmare la mancanza dei percorsi che ai bordi vengono eliminati poiché cadono al di fuori della zona dove si effettuano le misure. In figura 4.11 è presentato il singolo ventaglio per una stazione emittente, mentre in figura 4.12 è riportata tutta la copertura della sezione senza però avere ancora aggiunto i percorsi aggiuntivi di bordo. La rappresentazione totale di tutti i percorsi di misura è illustrata in figura 4.13 dove in rosso sono evidenziati i raggi aggiuntivi di bordo. Essi partono dalla stazione Tx numero 1 fino alla 6 e collegano ciascuna di queste stazioni con tutte le Rx dalla 1 alla 6; specularmente è stato fatto per la stazioni Tx dalla 23 alla 28. Successivamente verranno riportati i percorsi per ogni stazione emittente in figura 4.14, in modo da avere nel dettaglio le traiettorie uscenti da ogni stazione emittente verso diverse stazioni riceventi.

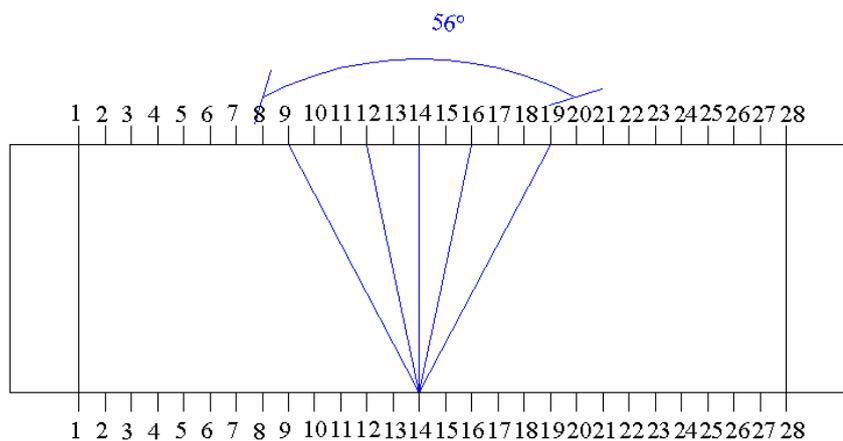


Figura 4.11 Rappresentazione del ventaglio scelto a 56° uscente da ogni stazione trasmittente

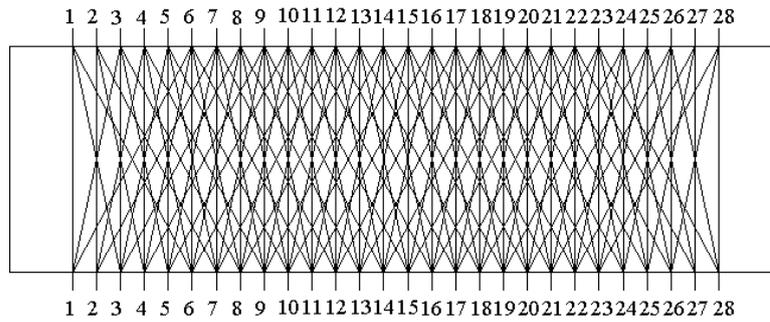


Figura 4.12 Rappresentazione della copertura scelta della sezione con di tutti i ventagli uscenti da ogni stazione trasmittente

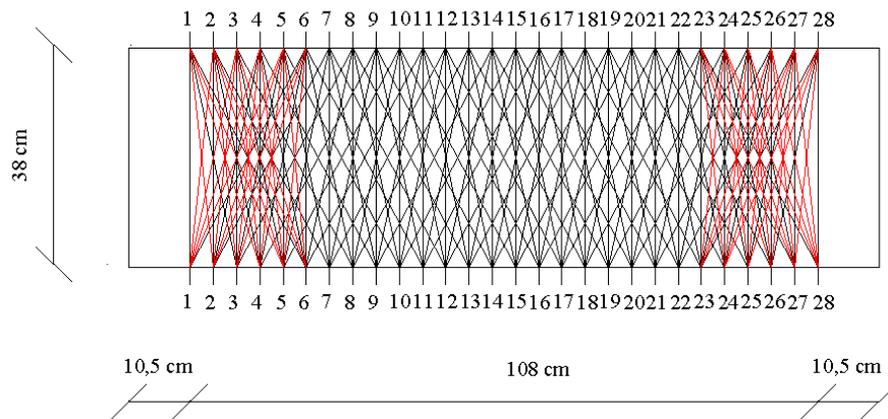
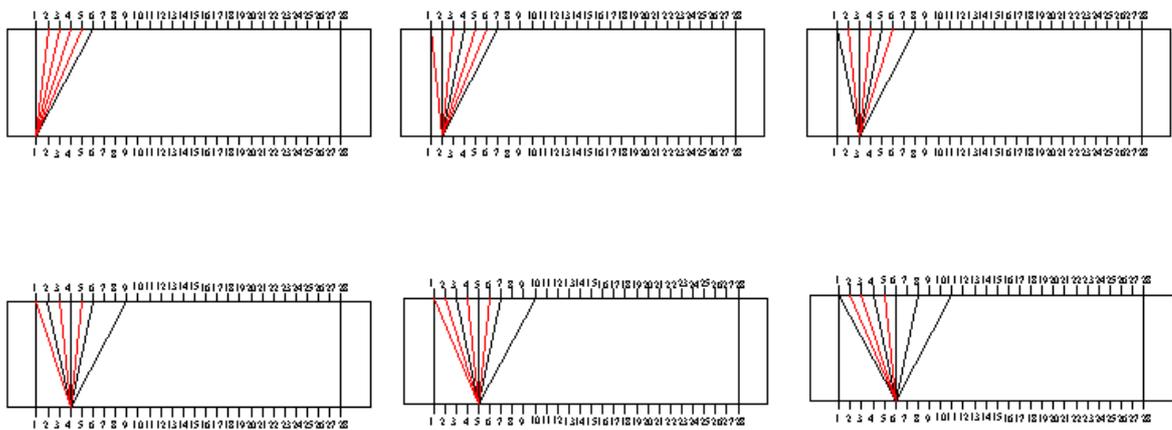


Figura 4.13 Rappresentazione della copertura scelta della sezione con i percorsi aggiuntivi uscenti dalle prime sei stazione trasmettente di bordo



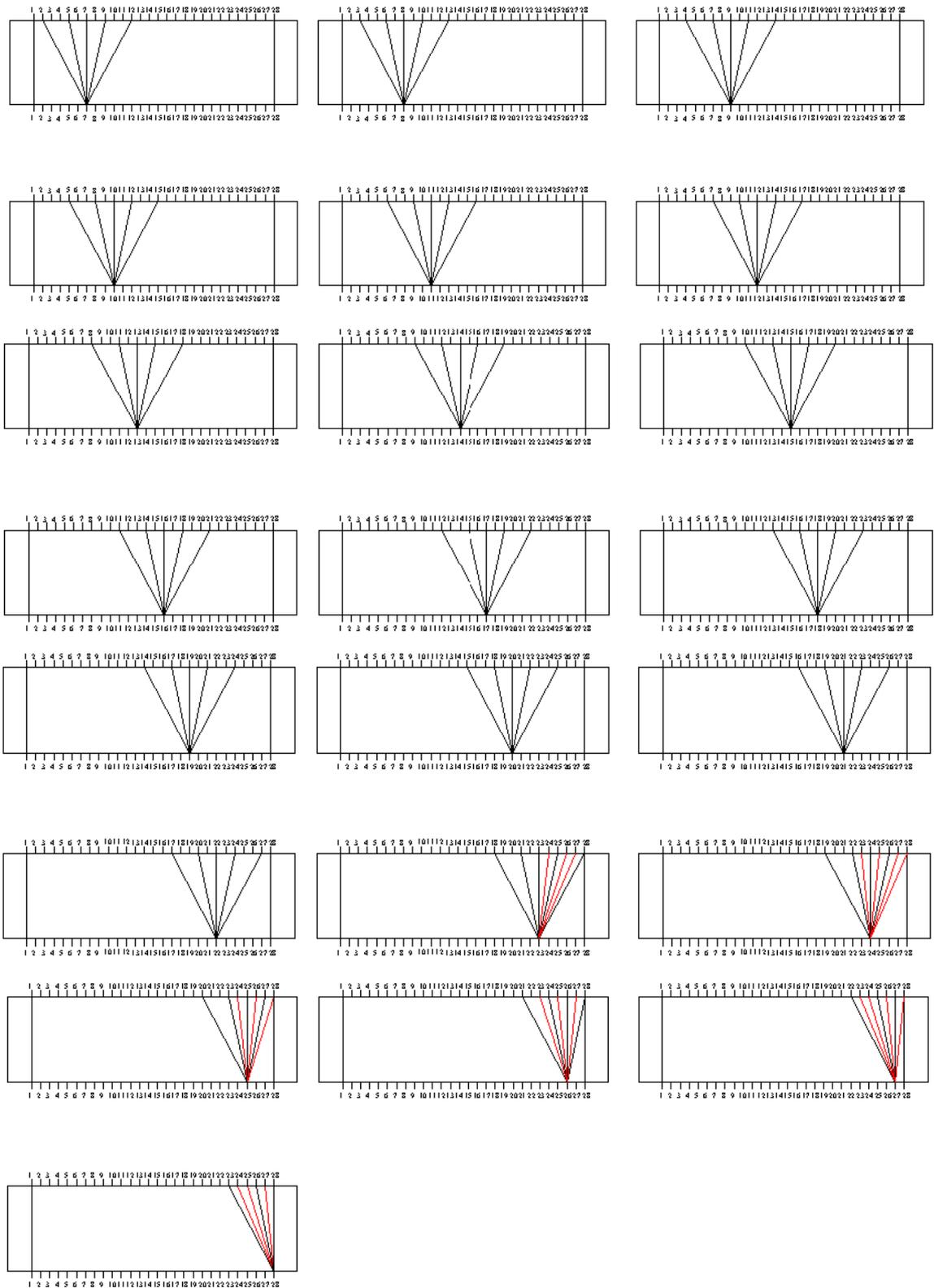


Figura 4.14 Rappresentazione dei percorsi di misura scelta per ogni stazione Tx

In modo analogo si è proceduto per determinare i percorsi di misura per le sezioni A-A' e B-B' dei muretti PNDE e PNDF. Inizialmente sono state fatte diverse ipotesi per la dislocazione delle stazioni di misura: in un caso le stazioni sono poste a metà altezza di ogni mattone con interasse di 6,5 cm, in un secondo caso a distanza di 3 cm l'una dall'altra e infine un terzo caso i cui le stazioni sono poste alternativamente alla distanza di 3 cm e 3,5 cm. La prima ipotesi è stata scartata perché risultano poche stazioni di misura e ci sarebbero voluti almeno 7 raggi per ventaglio per ottenere una numerosità soddisfacente. La seconda proposta è stata anch'essa esclusa perché non avendo una dimensione regolare dei giunti di malta, alcune stazioni sarebbero cadute sulla malta e non sul mattone. È stato scelto il terzo caso, così partendo dal corso 2 fino al corso 19, per ogni mattone ci sono due stazioni di misura intervallate tra loro di 3 cm, mentre la distanza tra due stazioni di misura che giacciono su due mattoni adiacenti è di circa 3,5 cm (valore che dipende dalla regolarità del mattone e dallo spessore del giunto di malta). Ne risultano 36 stazioni in totale per ciascun lato del muretto, quindi 36 stazioni emittenti e altrettante riceventi. Il ventaglio uscente da ogni Tx è stato supposto che sia di ampiezza analoga a quello delle sezioni orizzontali, all'incirca nell'intorno di 56°. Di conseguenza le ipotesi sulla distribuzione delle traiettorie di misura impiegano ampiezze di 46°, 54° e 62°. Un primo caso riprende la stessa ripartizioni dei raggi dei corsi orizzontali, con il percorso diretto, due percorsi a distanza di 2 stazioni di misura da esso e altri due percorsi a 5 stazioni di misura da esso. Il ventaglio che ne deriva è ampio 46 gradi (figura 4.15) e la campitura appare abbastanza omogenea. In figura 4.16 sono riportati tutti i percorsi di misura e in colore rosso sono evidenziate le dimensioni delle zone senza copertura di raggi di misura. Si è proseguito aumentando i gradi di ampiezza del ventaglio fino a 54°. In questo caso sono state fatte tutte e quattro le ipotesi possibili. In una prima ipotesi i percorsi (figura 4.17 e 4.18) raggiungono la stazione Rx diretta, quelle a due stazioni di distanza da essa e quelle a sei stazioni di distanza. La campitura mostra una serie di aree centrali romboidali la cui altezza è pari a 6,82 cm. La distribuzione dei raggi è piuttosto omogenea, ma la copertura risulta essere meno densa nella parte centrale rispetto ai bordi laterali. Nella seconda e terza ipotesi (figure 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22) il ventaglio è formato da percorsi che non coprono in maniera ottimale tutto il cono di misura formato dal ventaglio stesso. La campitura invece appare piuttosto omogenea in figura 4.20, al contrario vi è la presenza di zone vuote nella parte centrale della figura 4.22.

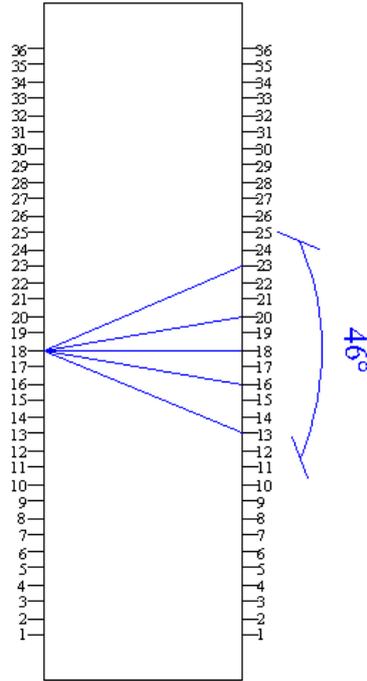


Figura 4.15 Rappresentazione di un ventaglio a 46° uscente da ogni stazione trasmittente

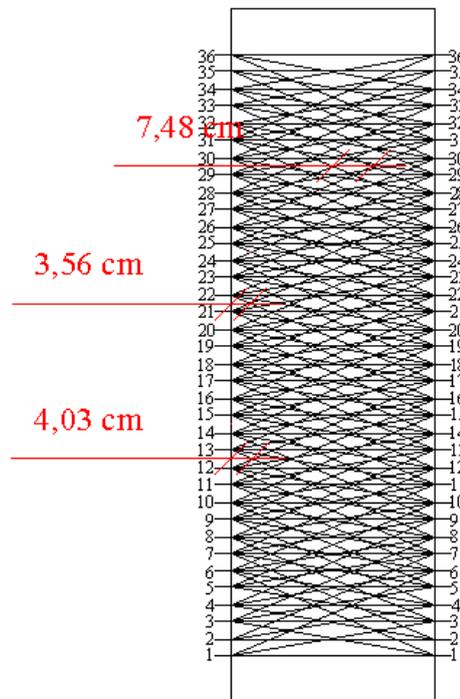


Figura 4.16 Rappresentazione della copertura della sezione con i percorsi uscenti stazioni trasmettenti

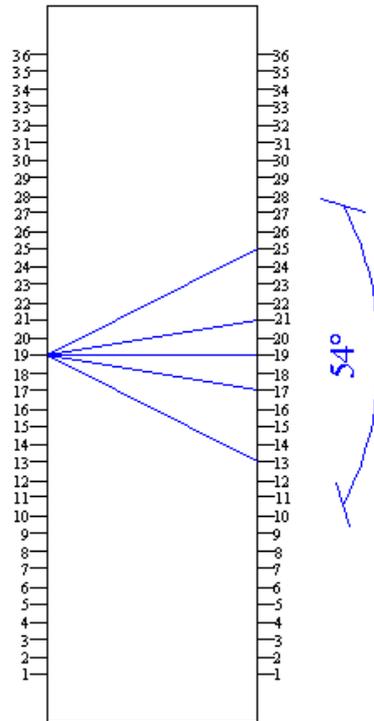


Figura 4.17 Rappresentazione di un ventaglio a 54° uscente da ogni stazione trasmittente, prima ipotesi

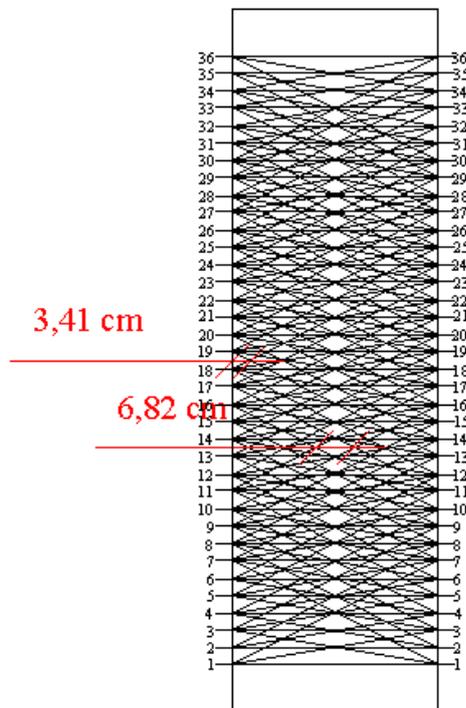


Figura 4.18 Rappresentazione della copertura della sezione con i percorsi uscenti stazioni trasmittenti della prima ipotesi

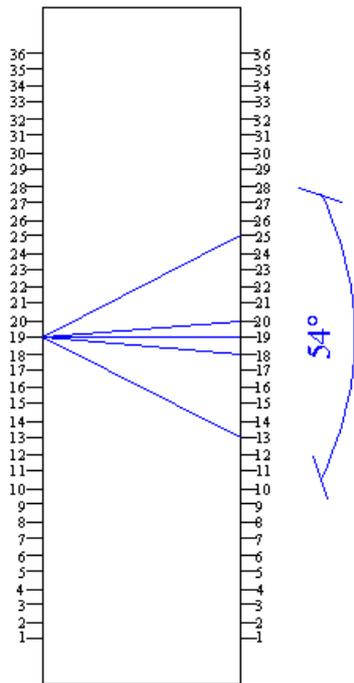


Figura 4.19 Rappresentazione di un ventaglio a 54° uscente da ogni stazione trasmittente, seconda ipotesi

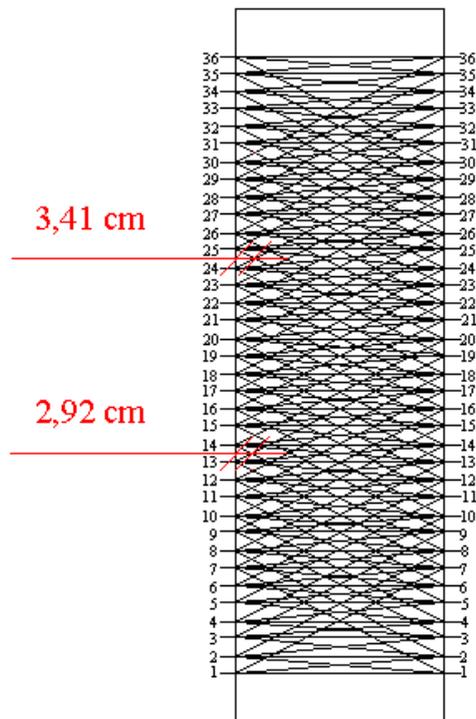


Figura 4.20 Rappresentazione della copertura della sezione con i percorsi uscenti stazioni trasmittenti della seconda ipotesi

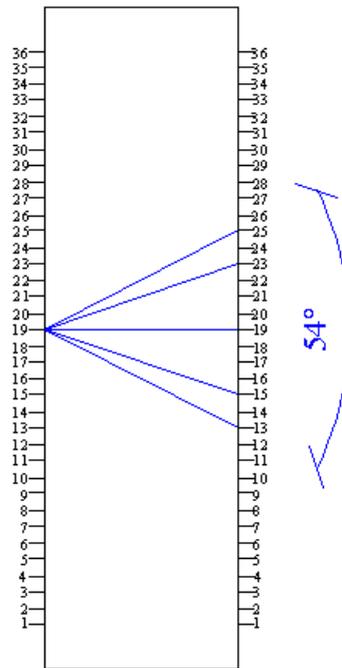


Figura 4.21 Rappresentazione di un ventaglio a 54° uscente da ogni stazione trasmittente, terza ipotesi

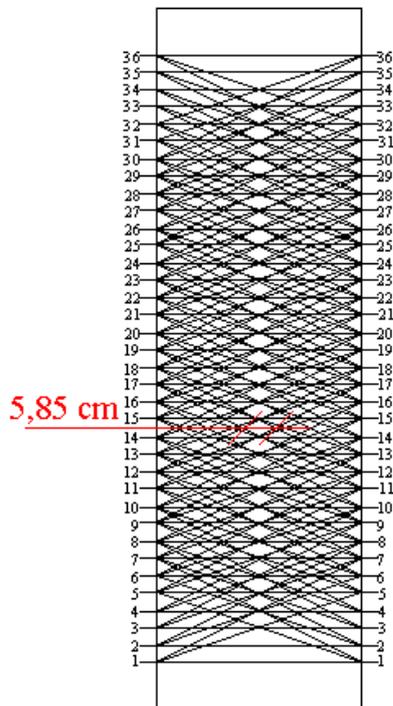


Figura 4.22 Rappresentazione della copertura della sezione con i percorsi uscenti stazioni trasmittenti della terza ipotesi

Un'ulteriore ipotesi è stata fatta considerando un ventaglio di ampiezza di 62° , dando risultati più o meno analoghi a quelli riscontrati precedentemente. In figura 4.23 sono riportate le immagini del ventaglio e della copertura della sezione. La scelta dei percorsi di misura per le sezioni verticali deve essere comparabile con quello dei corsi orizzontali, quindi si sceglie un'ampiezza del ventaglio di 54° , ampiezza più vicina a quella orizzontale di 56° . Si è preferito avere una distribuzione omogenea dei raggi all'interno del ventaglio a scapito della campitura che mostra due file di zone romboidali di altezza 5,85 cm. In figura 4.24 è riportato un singolo ventaglio, in figura 4.25 sono riportati tutti i percorsi di misura e in figura 4.26 sono evidenziati i percorsi aggiuntivi in colore rosso ai bordi dell'area di indagine. Per le sezioni verticali le stazioni con raggi aggiuntivi sono quelle dalla 1 alla 6 e dalla 31 alla 36, con un raffittimento speculare, ma non fitto quanto quello dei corsi orizzontali. Di seguito nella figura 4.27 sono riepilogati i percorsi di misura uscenti da ogni stazione emittente.

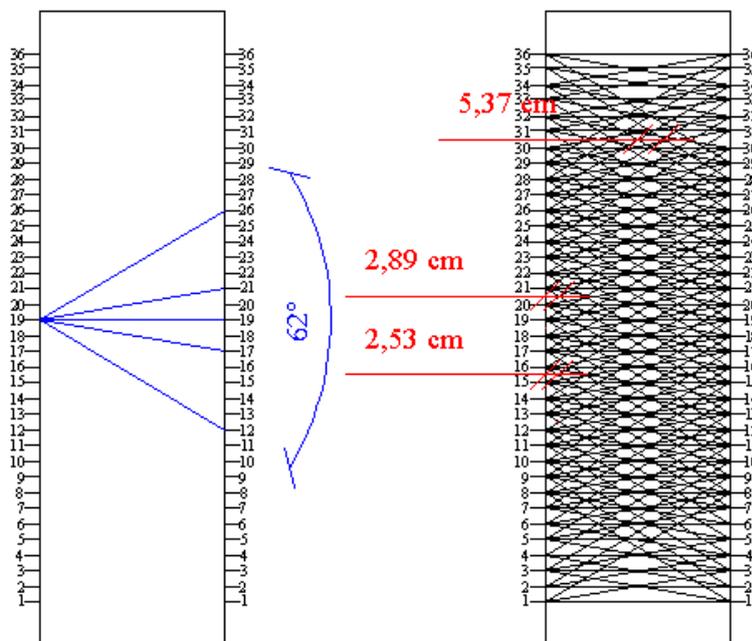


Figura 4.23 Rappresentazione di un ventaglio a 62° e della copertura della sezione con i percorsi uscenti dalle stazioni trasmettenti

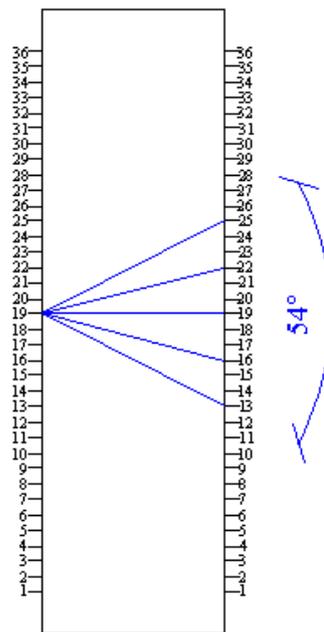


Figura 4.24 Rappresentazione del ventaglio a 54° scelto uscente da ogni stazione trasmittente

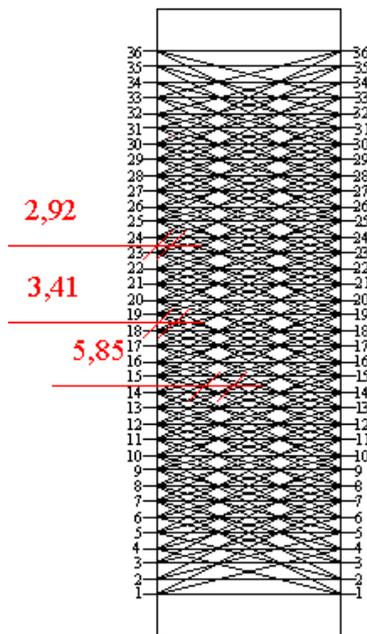


Figura 4.25 Rappresentazione della copertura scelta della sezione con i percorsi uscenti dalle stazioni trasmettenti

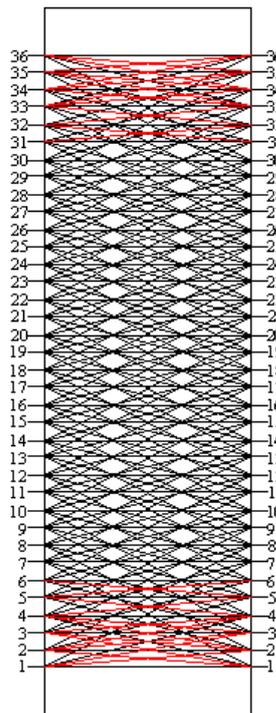
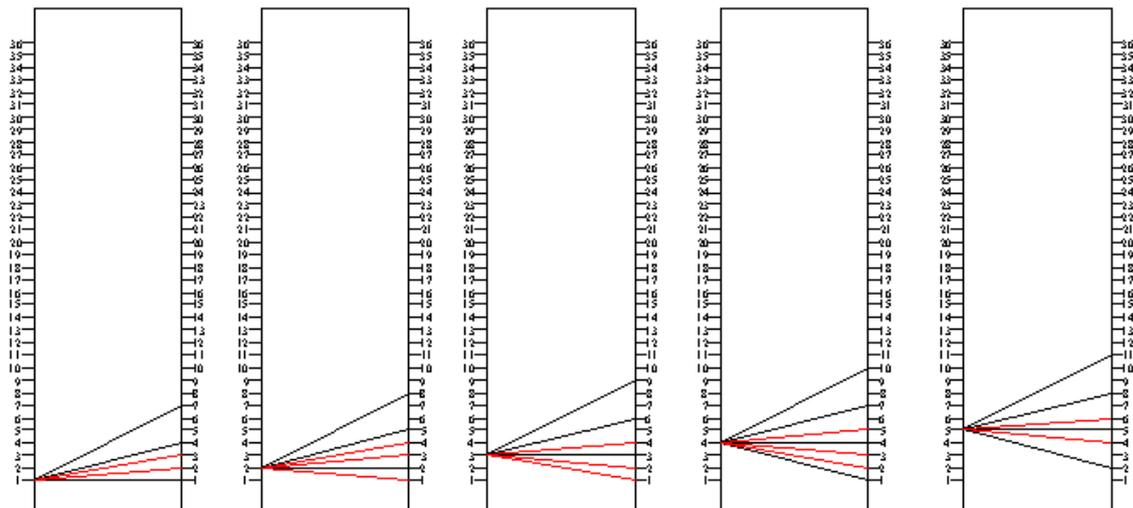
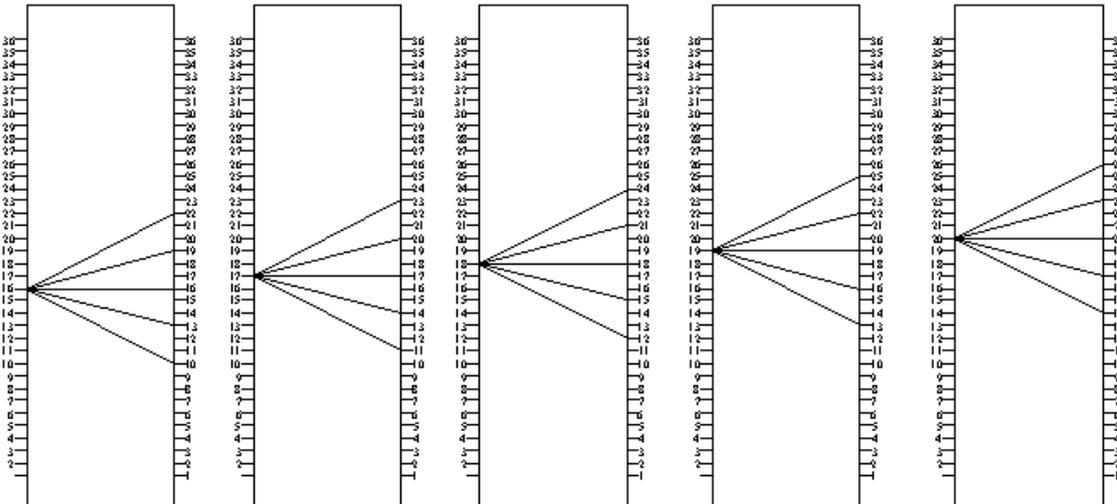
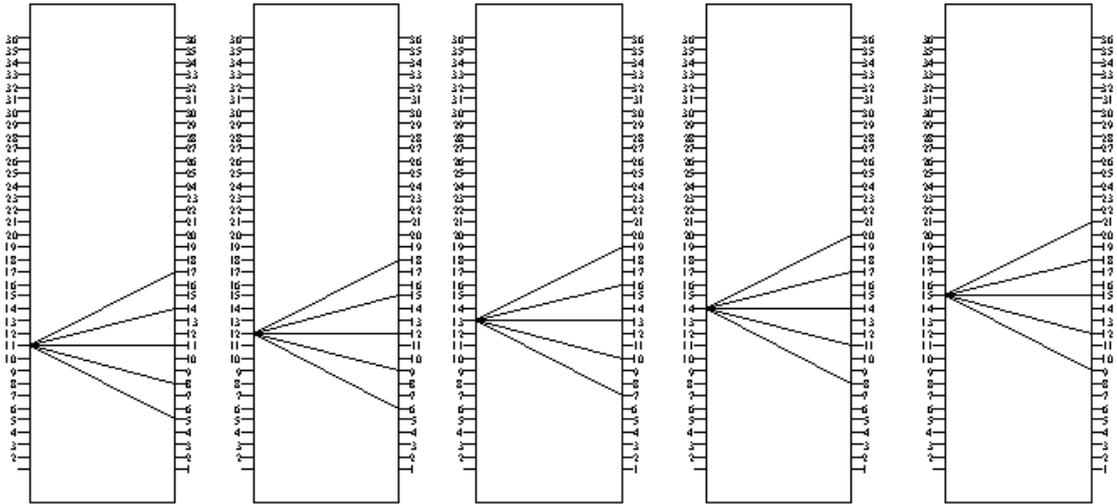
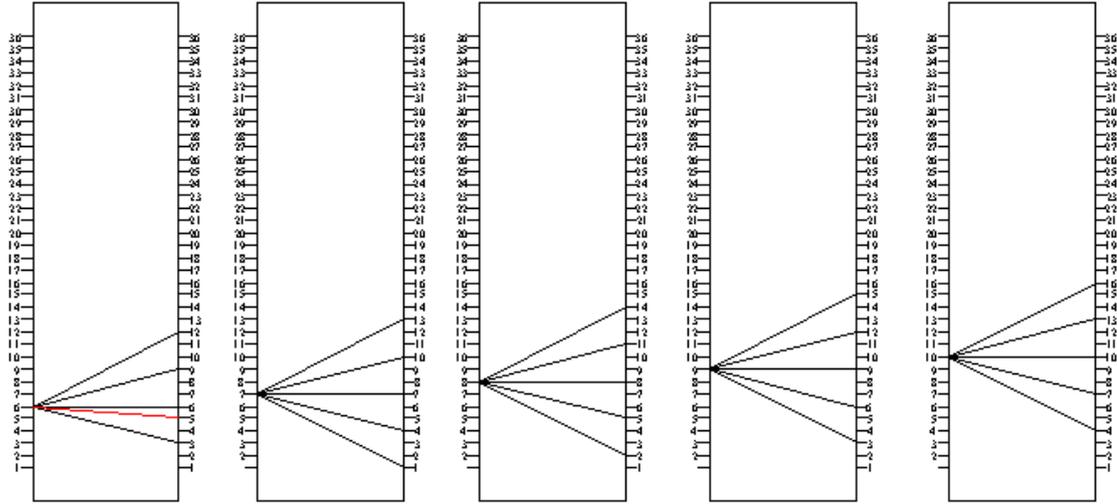
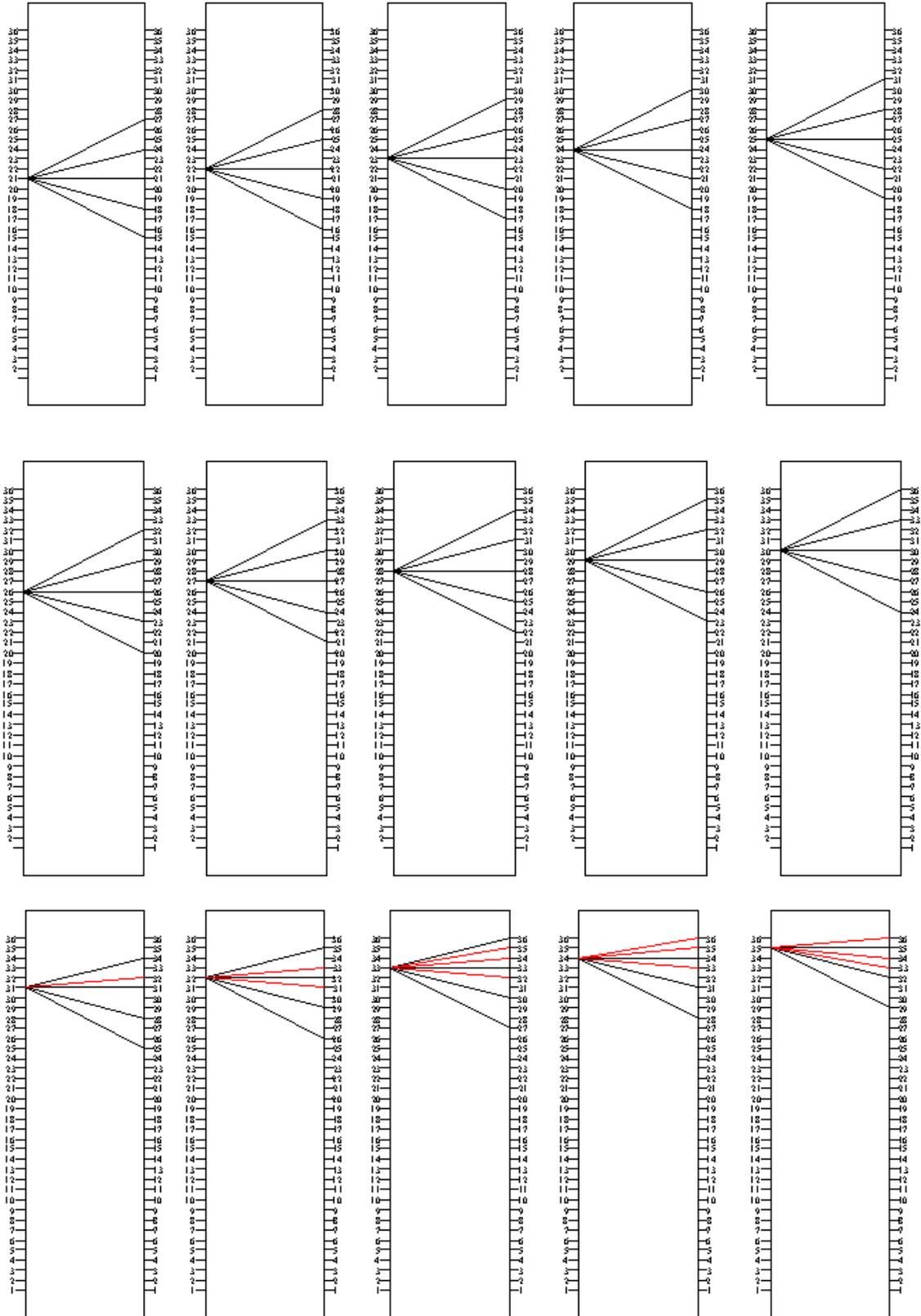


Figura 4.26 Rappresentazione della copertura della sezione scelta con i percorsi aggiuntivi uscenti dalle prime sei stazioni trasmettente di bordo







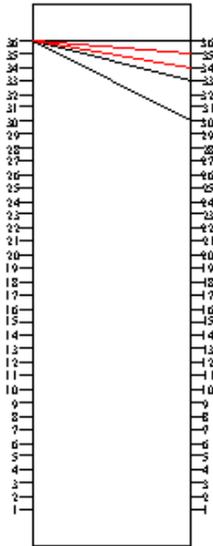


Figura 4.27 Rappresentazione dei percorsi di misura scelti per ogni stazione Tx

Non è facile ottenere il giusto compromesso fra tutte le proprietà, elencate all'inizio del capitolo; la scelta andrà a scapito di qualcuna di esse per avvantaggiarne altre. Ovviamente più numerosi sono i percorsi di misura, più dettagliati sono i risultati che si ottengono, ma si deve tener conto del costo in termini di tempo sia di acquisizione sia di rielaborazione delle misure ricavate. Nelle seguenti figure 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 sono riportati i corsi 6, 11, 12 e 17 del muretto PNDE con la sovrapposizione di tutti i percorsi di misura. Le aree in colore blu sono i difetti presenti all'interno di ogni sezione. Sono inoltre specificati i lati fronte e retro del muretto e le rispettive stazioni emittenti e riceventi. Le figure 4.32, 4.33 e 4.34 mostrano i corsi 5, 7 e 12 del muretto PNDF. La stessa sovrapposizione è stata fatta anche per le sezioni A-A' e B-B' dei muretti PNDE e PNDF, rispettivamente nelle figure 4.35 e 4.36 per provino PNDE e figure 4.37 e 4.38 per provino PNDF.

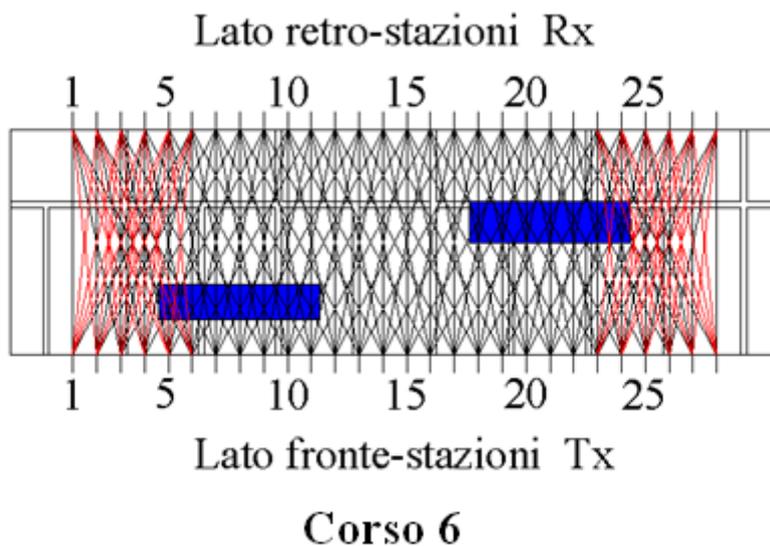


Figura 4.28 Muretto PNDE, corso 6 con sovrapposizione dei percorsi di misura

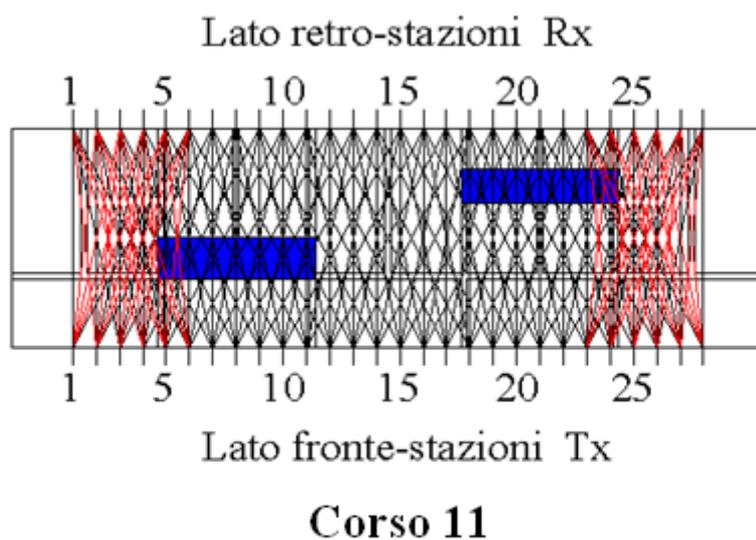


Figura 4.29 Muretto PNDE, corso 11 con sovrapposizione dei percorsi di misura

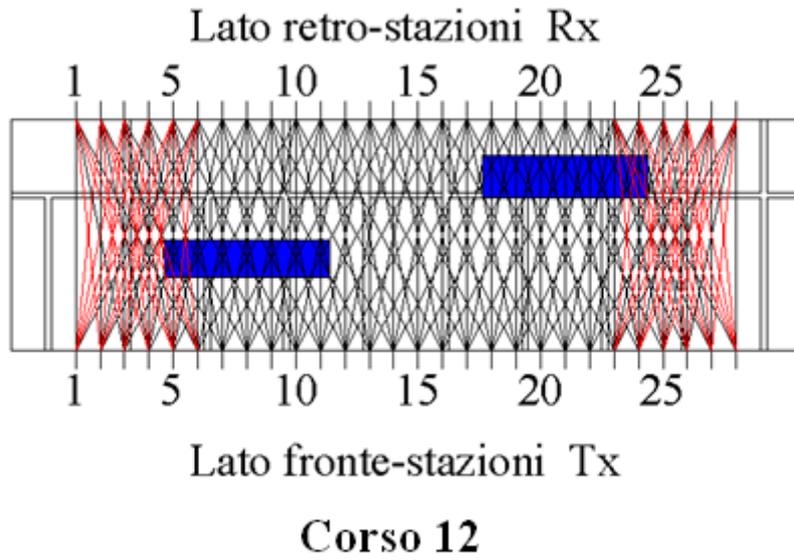


Figura 4.30 Muretto PNDE, corso 12 con sovrapposizione dei percorsi di misura

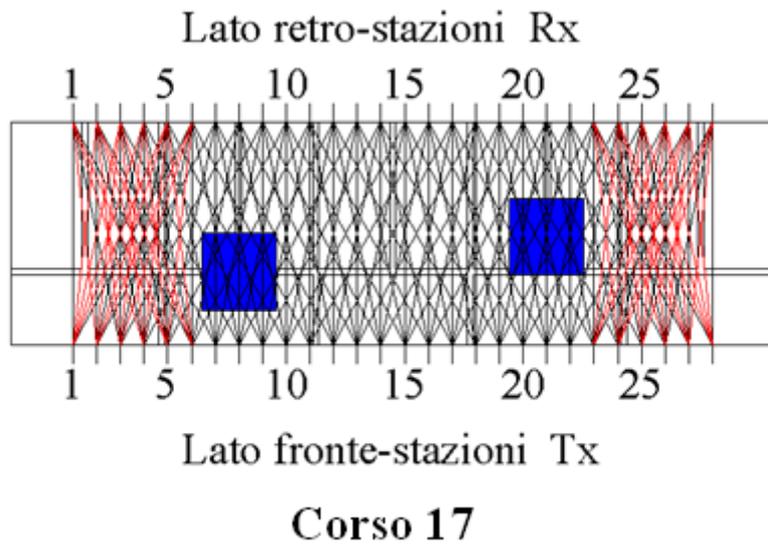


Figura 4.31 Muretto PNDE, corso 12 con sovrapposizione dei percorsi di misura

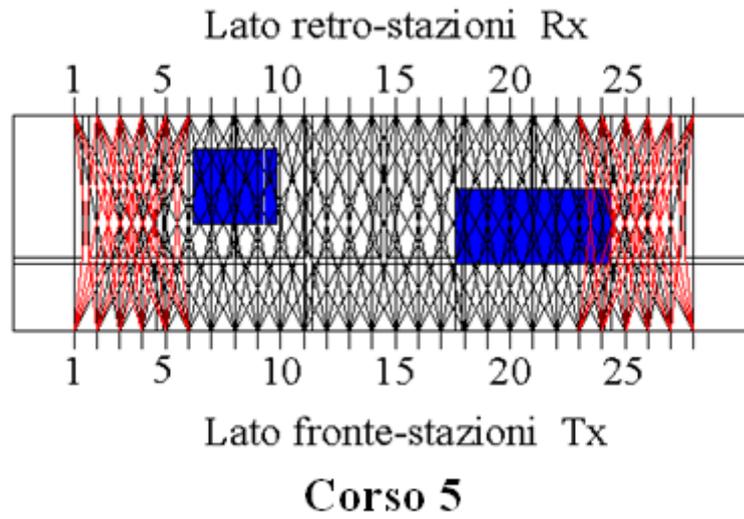


Figura 4.32 Muretto PNDF, corso 5 con sovrapposizione dei percorsi di misura

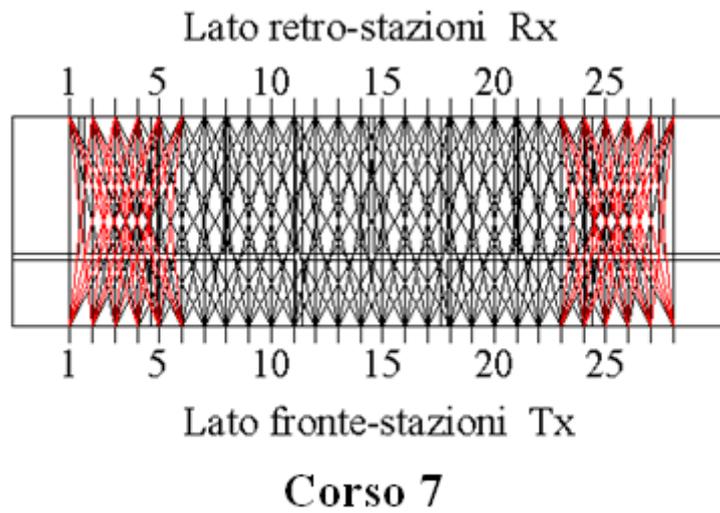


Figura 4.33 Muretto PNDF, corso 7 con sovrapposizione dei percorsi di misura

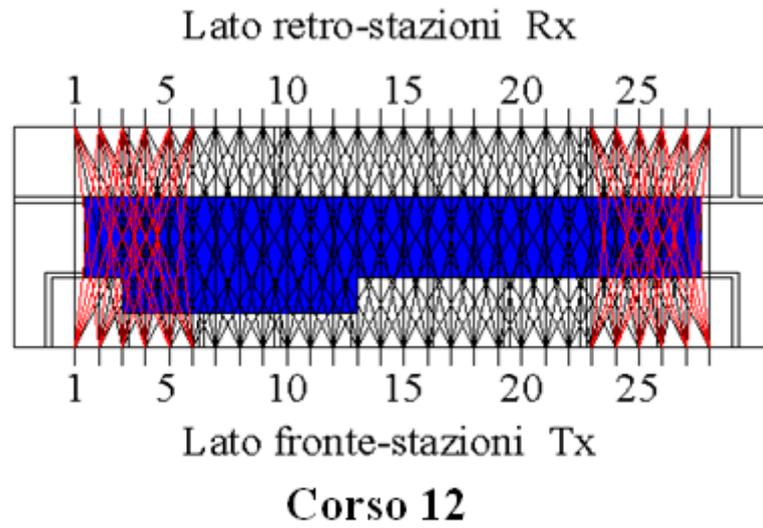


Figura 4.34 Muretto PNDE, corso 12 con sovrapposizione dei percorsi di misura

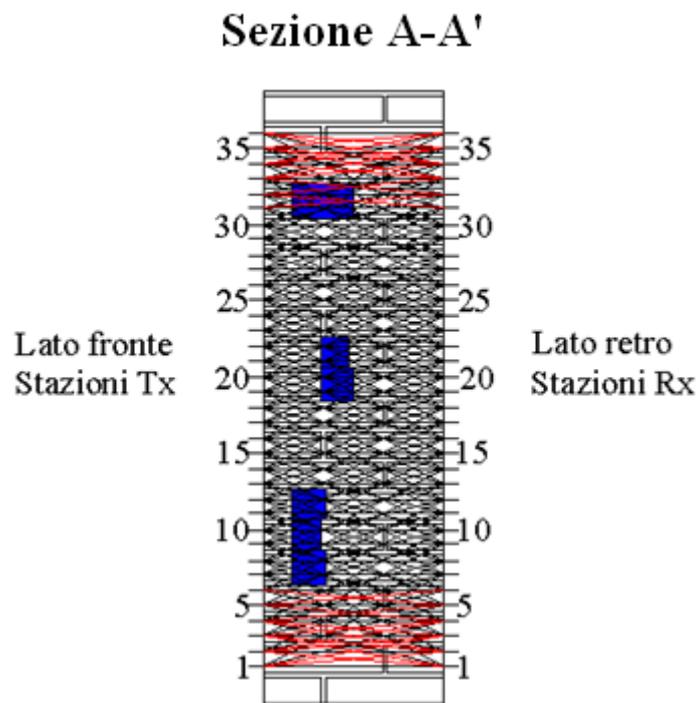


Figura 4.35 Muretto PNDE, Sezione A-A' con sovrapposizione dei percorsi di misura

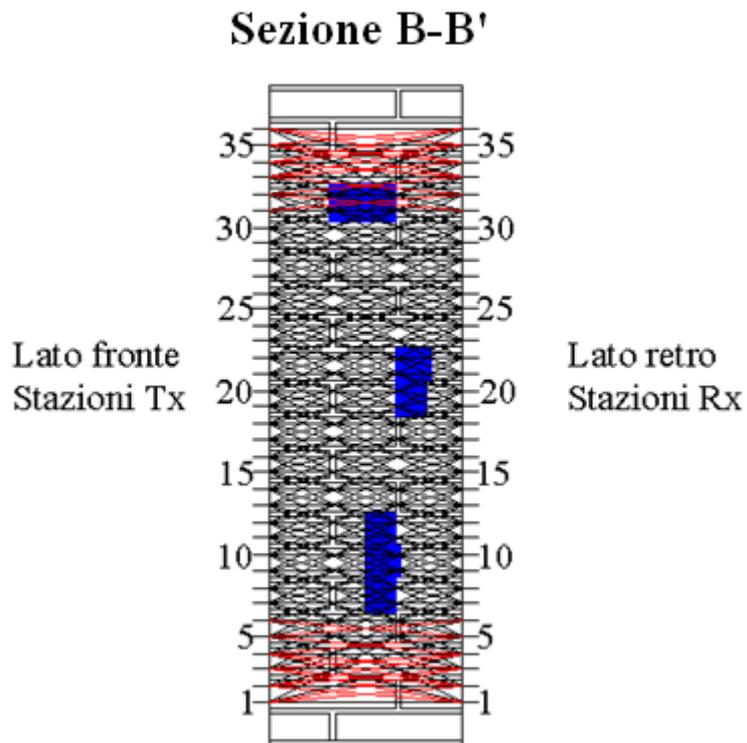


Figura 4.36 Muretto PNDE, sezione B-B' con sovrapposizione dei percorsi di misura

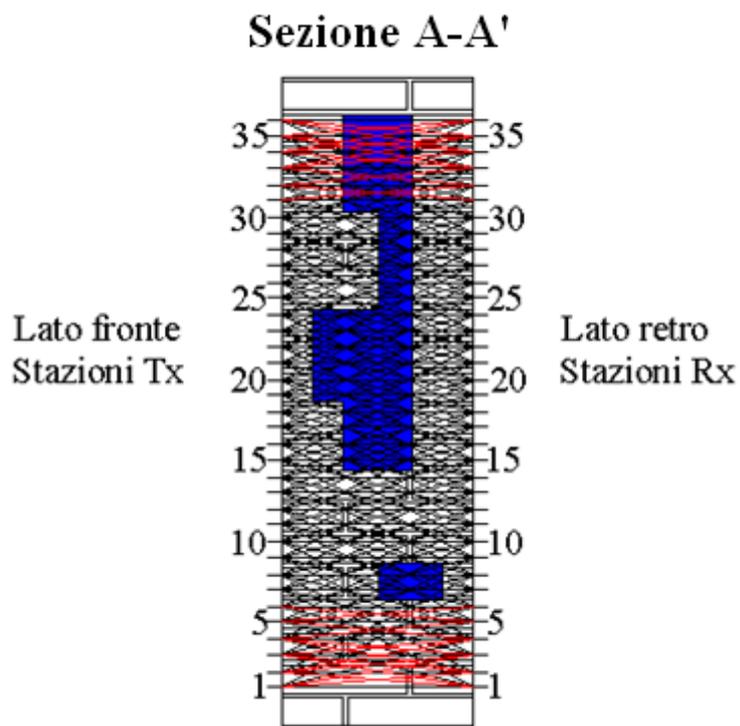


Figura 4.37 Muretto PNDF, Sezione A-A' con sovrapposizione dei percorsi di misura



Figura 4.38 Muretto PND, Sezione B-B' con sovrapposizione dei percorsi di misura

4.2 Illustrazione della strumentazione

La strumentazione utilizzata per acquisire i tempi di volo che impiega il segnale a percorrere ogni traiettoria che collega una stazione emittente con una ricevente è di tipo sonico (figura 4.39). Essa è costituita da un emettitore impulsivo di onde elastiche, ovvero un martello strumentato e da un ricevitore, ovvero un accelerometro. Il martello strumentato PCB con punta in berillio (figura 4.40) è connesso elettricamente ad una centralina di acquisizione mediante un cavo coassiale schermato. È caratterizzato da una frequenza massima di 10 KHz, dunque ampiamente nel campo sonico di applicazione, essendo il limite tra impulsi sonici ed ultrasonici posto alla frequenza di circa 20 KHz. Per quanto riguarda l'accelerometro, sono stati utilizzati per motivi di laboratorio, due diversi accelerometri. Nelle acquisizioni dei corsi orizzontali, il microaccelerometro IE utilizzato è riportato in figura 4.41. Esso è elettricamente collegato ad una centralina di acquisizione mediante un cavo coassiale schermato. Per le acquisizioni delle sezioni verticali è stato utilizzato un accelerometro di tipo DITRAN, di dimensioni maggiori e utilizzabile anche per frequenze più alte.

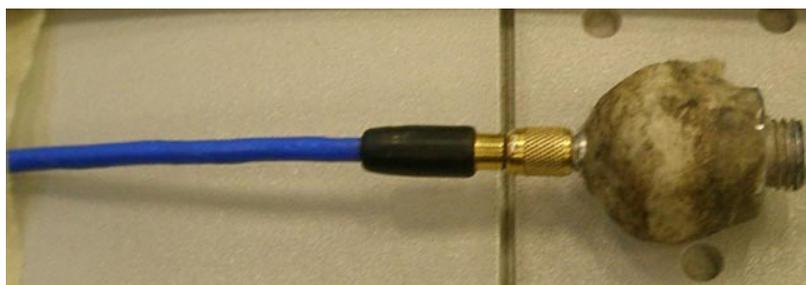
La centralina di acquisizione (figura 4.42) amplifica il segnale e lo trasmette ad un'apparecchiatura di rilevazione, che nel nostro caso è un computer, il quale mediante appositi software permette di visualizzare i segnali ricevuti oltre a consentirne il salvataggio e la rielaborazione. Dato che alcune stazioni di misura si trovano su giunti di malta, l'accelerometro in questi casi è posizionato sulla superficie con l'interposizione di un agente accoppiante (plastilina) opportunamente sistemato al fine di favorirne l'accoppiamento.



Figura 4.39 Strumentazione sonica utilizzata



4.40 Martello PCB con punta in berillio



4.41 Accelerometro



4.42 Centralina di amplificazione del segnale

4.3 Procedura di acquisizione dei dati in laboratorio

L'acquisizione dei dati è stata effettuata nei laboratori del LaRM (Laboratorio di resistenza dei materiali). Prima di tutto le stazioni di misura vengono riportate sui provini mediante l'utilizzo di un righello e di una livella. Si considera il lato fronte dei muretti e per i corsi considerati si riportano con gessetti colorati le stazioni di misura a 4 cm di distanza l'una dall'altra. Si parte dal centro del mattone che identifica la mezzeria del difetto di sinistra e da esso si riportano i tratti a 4 cm di distanza, controllando che la distanza finale dai due bordi sia di 10,5 cm. Sul retro del muretto in maniera speculare sono disegnate le stazioni di misura, individuando prima il punto di mezzeria del difetto che in questo lato è sulla destra, verificando successivamente la restante distanza dai bordi del muretto. La numerazione delle stazioni di misura va da sinistra verso destra nel lato di fronte del muretto e in maniera speculare sul retro del provino. Per le linee verticali sia sul fronte che sul retro si identificano le linee verticali passanti per la mezzeria dei due difetti inseriti nei corsi orizzontali del muretto PNDE e del corso 5 del muretto PNDF, dopodiché si riportano sui mattoni dei corsi dal 2 al 19, due stazioni a distanza 3 cm l'una dall'altra e quindi a distanza

1,5 cm dalla metà dell'altezza del mattone. Si è notato che sui retri dei provini tali linee cadono lungo diversi giunti di malta verticali per cui si è spostata tale linea di 2 cm verso sinistra e in modo speculare è stata spostata anche quella sul fronte del muretto. Nelle immagini successive (figura 4.43 e 4.44) sono riprodotti i prospetti dei muretti PNDE e PNDF ed è evidenziato in color rosso la posizione delle stazioni di misura, evidenziando la distanza che si mantiene tra l'ultima o la prima stazione e il bordo del muretto. Le acquisizioni vengono effettuate solo sui corsi 6, 11, 12 e 17 del muretto PNDE e i corsi 5,7 e 12 del muretto PNDF. Nelle figure 4.45 e 4.46 il prospetto dei provini mette in evidenza la linea verticale lungo le quali sono stati acquisiti i dati. Le tacche orizzontali indicano la posizione delle stazioni di misura. La linea rossa rappresenta la posizione di progetto, mentre la linea blu rappresenta l'effettiva posizione (a 2 cm di distanza dalla rossa, come spiegato prima) delle acquisizioni.

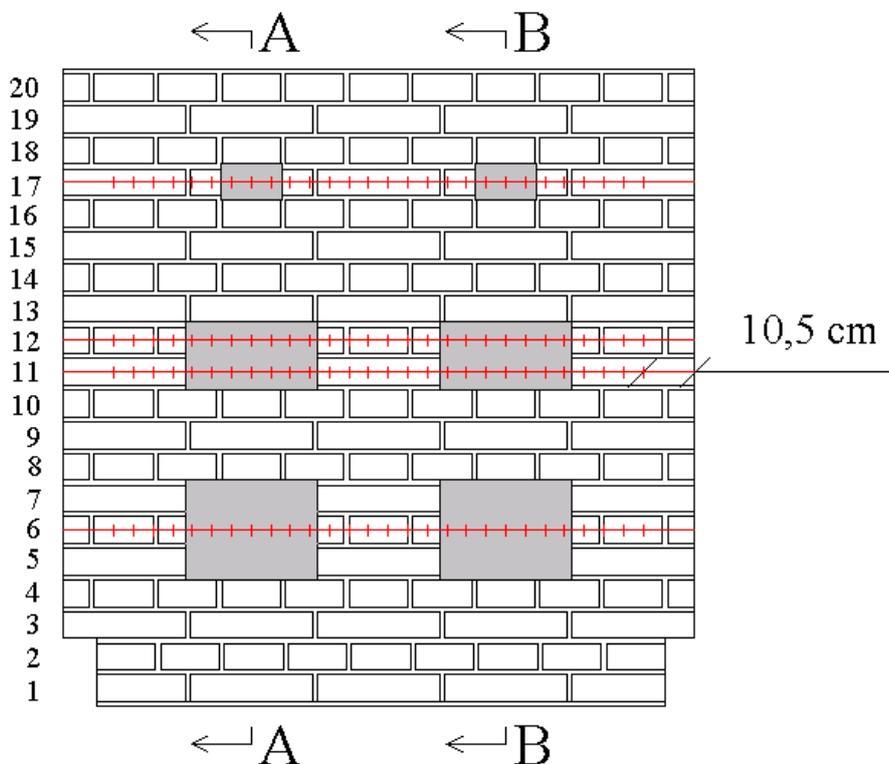


Figura 4.43 Muretto PNDE, prospetto con stazioni di misura sui corsi 6, 11, 12 e 17

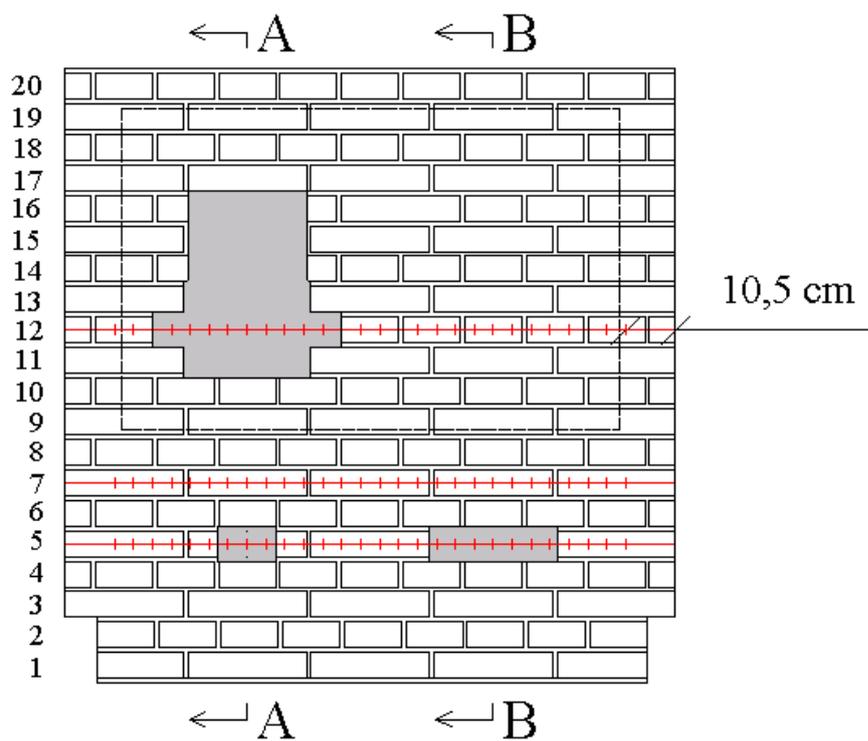


Figura 4.44 Muretto PNDF, prospetto con stazioni di misura sui corsi 5, 7 e 12

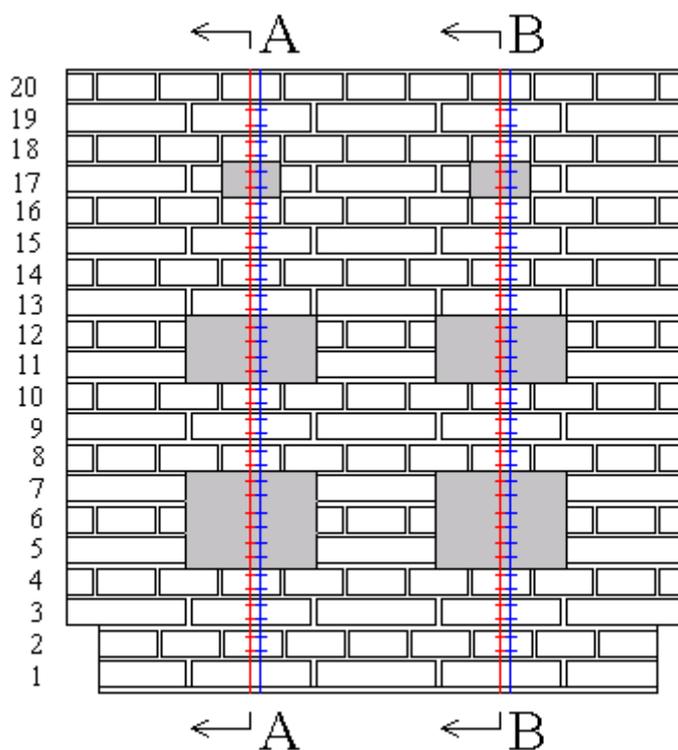


Figura 4.45 Muretto PNDE, prospetto con stazioni di misura sulle sezioni A-A' e B-B'

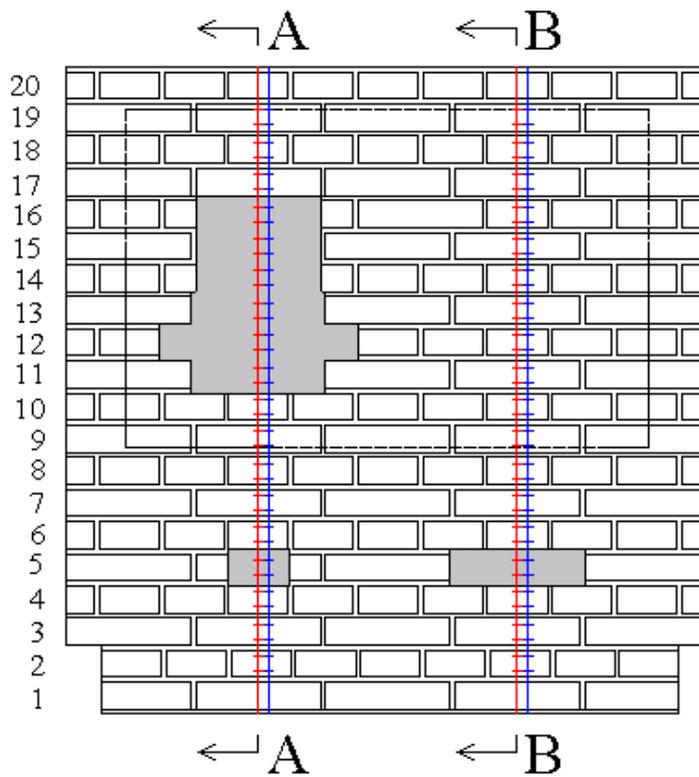


Figura 4.46 Muretto PNDF, prospetto con stazioni di misura sulle sezioni A-A' e B-B'

Le acquisizioni sono effettuate da due operatori: una persona si colloca davanti al fronte del muretto e munita di martello, batte sulle varie stazioni di misura, un'altra persona invece sul retro del muretto si occupa di ricevere il segnale ponendo l'accelerometro in corrispondenza delle stazioni riceventi e controlla le forme d'onda acquisite sul monitor del computer, eseguendo il salvataggio se esse sono corrette. Le foto in figura 4.47 e 4.48 presentano operatori che acquisiscono i dati tomografici.

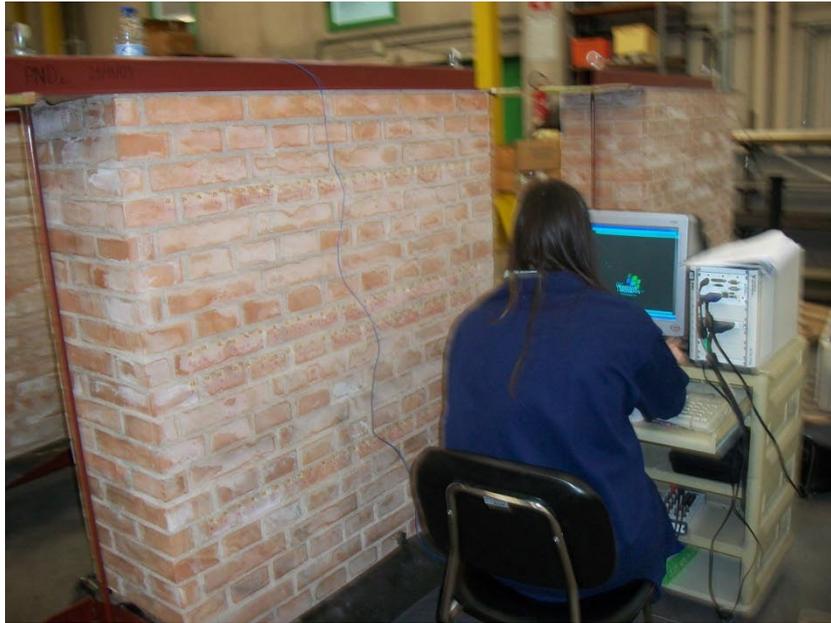


Figura 4.47 Operatore al lavoro nel laboratorio Larm



Figura 4.48 Operatore al lavoro nel laboratorio Larm

Il meccanismo di acquisizione dei dati prevede una successione di operazioni:

- Si avvia il computer e la centralina di amplificazione del segnale a cui sono già stati connessi su due canali distinti il martello e l'accelerometro: Canale 1 per martello e Canale 2 per l'accelerometro
- Si avvia il software di acquisizione associato alla strumentazione utilizzata. La schermata (figura 4.49) mostra in alto a sinistra gli oscillogrammi completi

registrati durante la battuta; i grafici riportano il tempo in ascissa e le ampiezze espresse in volt in ordinata. L'oscillogramma superiore è quello relativo al martello, mentre quello inferiore è relativo all'accelerometro. La finestra in basso a sinistra riporta nel dettaglio la parte iniziale della curva del martello e dell'accelerometro per permettere all'operatore di valutare l'idoneità della forma d'onda da acquisire.

- Successivamente si setta il software impostando valori opportuni di pretrigger, del livello e dello zoom. Il pretrigger, espresso in microsecondi, permette di anticipare l'inizio della registrazione delle forme d'onda, in modo da poter visualizzare interamente le stesse, senza tagliare la parte iniziale ed è stato fissato un valore pari a 300 μ s. Il livello si pone pari a 0.10 e nella casella centrale in basso si setta il valore di zoom per poter visualizzare in maniera adeguata la curva del martello (grafico basso a sinistra figura 4.49) e soprattutto la sua parte iniziale. Il valore dello zoom va da un minimo di 0 a un massimo di 0,0013. Un'ulteriore impostazione è quella relativa alla finestra a destra dello schermo nella quale si ha la visualizzazione 2-D delle forme d'onda registrate ad ogni battuta visualizzando con una scala di toni di grigio le ampiezze dei segnali ricevuti. Il grafico riporta sulle ascisse il valore del tempo di volo e in ordinata il numero dell'acquisizione effettuata. Ad ogni colore della scala di toni grigi viene associata una specifica ampiezza, così si ha una prima visualizzazione dell'andamento dei tempi di volo.

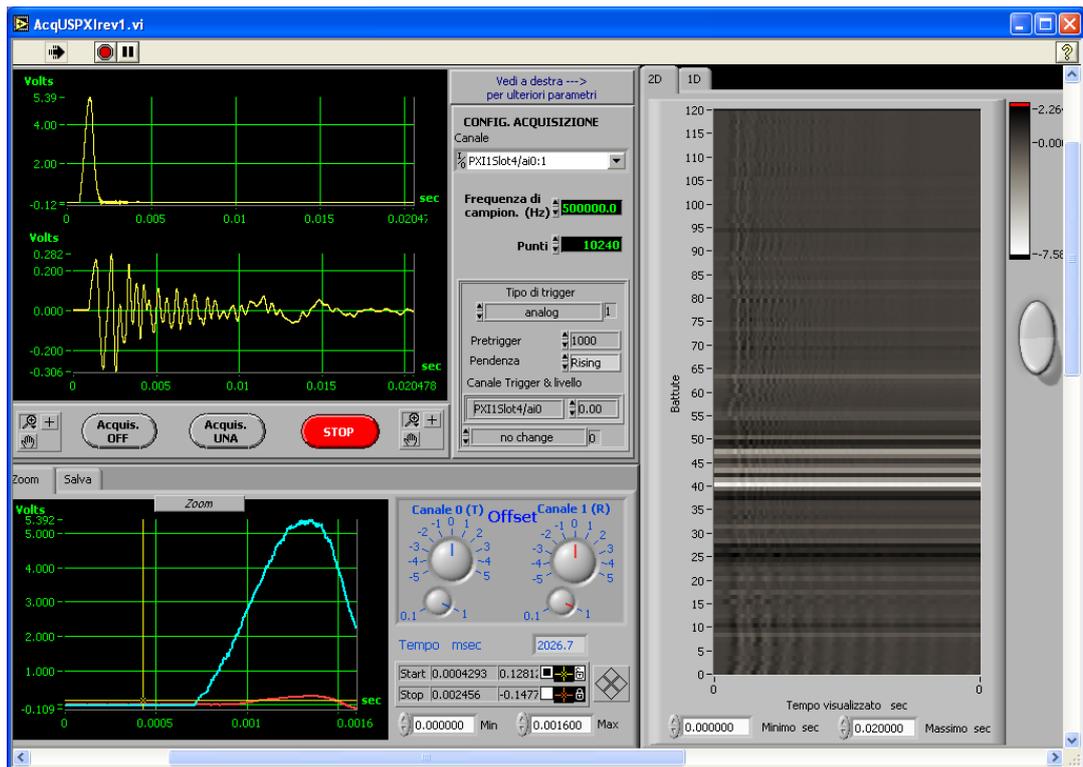


Figura 4.49 Schermata del software di acquisizione

- Prima di iniziare le acquisizioni occorre predisporre una cartella, dove poi verranno salvate le forme d'onda delle varie battute registrate, all'interno della quale deve essere inserito un file del tipo "bin". Quest'ultimo dovrà essere richiamato dal software e rinominato a piacimento. Inoltre occorre dotarsi di una tabella excel, in forma cartacea dove sono riportati i percorsi dalle stazioni Tx alle stazioni Rx come progettati nel capitolo 4.1. Un esempio di tabella è in Tabella 1, dove sono inserite delle colonne per annotare eventuali note, il nome del file dove si salvano le battute e lo spessore del corso che si sta analizzando.

Tabella 1 Tabella di esempio da tenere durante le acquisizioni

Nome file	Stazione Emittente Tx	Stazione Ricevente Rx	Note	Spessore e sezione lato dx	Spessore e sezione lato sx
	1	1			
	1	2			
	1	3			

- Si predispose il software premendo il comando di start e si esegue un test iniziale per constatare la presenza del segnale. Si esegue una battuta col martello direttamente sull'accelerometro e si verifica la visualizzazione delle forme d'onda.
- Si iniziano le acquisizioni posizionando martello e accelerometro nelle stazioni di misura segnate. L'operatore che si occupa del martello provvede a battere sulla stazione segnalata con un colpo elastico, ortogonale alla superficie e con un'intensità simile per tutte le battute. Qualora la stazioni di misura si trovi su un giunto di malta, lo comunica all'altro operatore. Le acquisizioni prevedono che la stazione emittente sia ferma e che sia la stazione ricevente a cambiare ogni qualvolta, ovvero l'operatore al martello batte sulla stessa stazione di battuta fino a che l'operatore con l'accelerometro non si è spostato su tutte le stazioni riceventi che il ventaglio di percorsi richiede. Una volta terminate tutte le acquisizioni per una stazione trasmittente si passa a quella successiva. L'operatore che provvede a posizionare l'accelerometro nella stazione ricevente, dà anche un segnale di via all'operatore che esegue la battuta e controlla il monitor del computer. La forma d'onda del martello che viene visualizzata deve avere un'ampiezza compresa tra i 7 e i 9,99 volt e soprattutto deve presentare una parte iniziale della curva senza elevati effetti di disturbo per poter successivamente nella fase di post-processing valutare in maniera chiara l'effettivo tempo di volo. Nel caso in cui non siano soddisfatti i precedenti requisiti, la battuta deve essere ripetuta nuovamente. Ogni 118 acquisizioni per i corsi orizzontali e ogni 115 acquisizioni per le sezioni verticali si crea una nuova cartella poiché il software prevede un massimo di 127 acquisizioni per cartella. Il software, ad ogni battuta produce 3 file:
 1. 1 file avente sintassi (*bin_nomefile_n° battuta*) contenente le forme d'onda, che viene utilizzato dal software in LabView
 2. 1 file avente sintassi (*note_nomefile_n° battuta*) in cui sono riportate le note inserite
 3. 1 file avente sintassi (*nomefile_n° battuta*) in cui sono riportate le forme d'onda registrate nell'acquisizione. Le forme d'onda sono ricostruite, punto per punto, in excel.

4.4 Descrizione dei software di analisi e inversione dei dati

4.4.1 Calcolo dei tempi di volo

Una volta ultimate le acquisizioni si prelevano i file registrati nelle cartelle e si procede alla fase di post-processing. Il software per il calcolo dei tempi di volo è in ambiente LabVieW, un programma in visual basic fornito dal LARM. La schermata iniziale del software è presentata in figura 4.50.



Figura 4.50 Schermata del software ElaborSonic2rev1

Nel riquadro in alto a sinistra si visualizzano le forme d'onda del martello e dell'accelerometro. In ascissa sono riportati i tempi espressi in secondi e in ordinata il valore dell'ampiezza espressa in volt. L'oscillogramma superiore, relativo al martello, si individua poiché presenta un picco di elevata intensità e breve durata, mentre

l'oscillogramma inferiore, relativo all'accelerometro mostra un lento smorzarsi dell'impulso nel tempo, oltre a valori di ampiezza del segnale notevolmente inferiori a quelli del martello strumentato, aspetto dovuto all'assorbimento esercitato dal materiale sull'impulso durante l'attraversamento. La finestra in alto a destra riporta uno zoom delle due curve ognuna rappresentata in un colore differente. Cliccando sul simbolo di cartella a lato del riquadro "file da caricare" in basso sulla sinistra, si apre una finestra nella quale possiamo scegliere il numero di acquisizione che vogliamo raffigurare. Si aprono solo file con sintassi "bin". Successivamente si clicca sul bottone giallo carica e si visualizzano le forme d'onda inerenti al numero di battuta selezionato. Nella figura 4.51 si osserva la schermata del software una volta caricato un file. Questa schermata si ottiene selezionando zoom T nella schermata precedente. La curva in blu rappresenta la forma d'onda del martello, quella in rosso dell'accelerometro. Si posiziona il cursore di colore blu sul punto di inizio della curva dello stesso colore, in modo tale che si trovi in un punto di altezza pari circa alla metà altezza del rumore di fondo e che da quel punto in poi la curvatura della forma d'onda cambi andamento. Lo stesso procedimento si esegue con il cursore rosso. Per selezionare i cursori si sposta il mouse sulle frecce a lato del riquadro con scritto martello o accelerometro e con il tasto sinistro si seleziona "bring to centre" (vedi figura 4.52). Il cursore si posiziona nel centro dello schermo e poi lo si sposta nella posizione che riteniamo opportuna a soddisfare i requisiti sopra descritti. È necessario settare i limiti del grafico zoom: per il tempo si tiene un minimo pari a 0,0005 secondi e un massimo di 0,0008 secondi, variabile a seconda della curva che abbiamo; per l'ampiezza il valore massimo settato è di 0,02 e minimo di -0,02, anche essi modificabili a seconda di come voglia visualizzare la curva. I tasti nel riquadro di "posizione curve" permettono di sfasare le curve qualora risultino essere sovrapposte e non sia possibile individuare il punto d'inizio. Dopo aver posizionato i cursori nel punto di inizio di ciascuna curva, nella finestra in basso a destra denominata tempo di volo in microsecondi, viene appunto riportato il tempo di volo che intercorre tra il punto d'inizio della curva del martello e quella dell'accelerometro espresso in μs . Terminato questo procedimento per un'acquisizione, si effettua lo stesso anche per tutte le altre fino ad avere i tempi di volo di tutti i percorsi di misura di una sezione.



Figura 4.51 Schermata del software ElaborSonic2rev1 dopo aver caricato un file

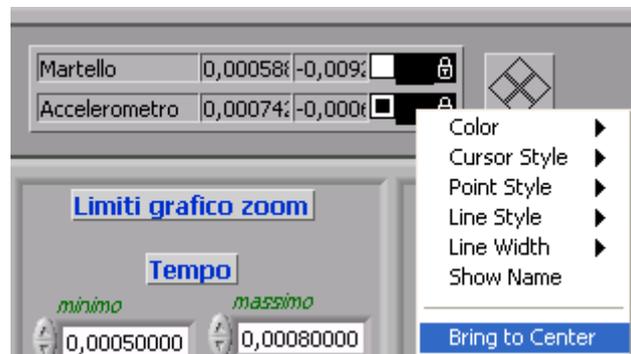


Figura 4.52 Posizionamento dei cursori nel software ElaborSonic2rev1

È molto importante porre attenzione nella scelta del punto di inizio delle curve mostrate dal software, perché influisce molto sul tempo di volo che ci viene restituito. Il punto d'inizio deve corrispondere al primo punto in cui la curva cambia pendenza, passando dalla zona di rumore di fondo al primo picco. Il metodo utilizzato prevede di posizionare il cursore nel primo punto di cambio pendenza della curva e che si trovi a metà altezza del rumore di fondo. Se non è possibile trovare un punto con queste caratteristiche, si considera il primo punto che sia al di sotto della metà del rumore di fondo. Come mostrato nell'esempio di figura 4.53, il cursore blu (martello) è posizionato nel punto in

cui si ha un cambio di pendenza della curva e si trova ad un'altezza che è media tra quella dei picchi del rumore di fondo. Nella curva rossa invece, non si trova un punto con le stesse caratteristiche, il punto d'inizio si prende ad un'altezza inferiore a quella di metà del rumore di fondo.

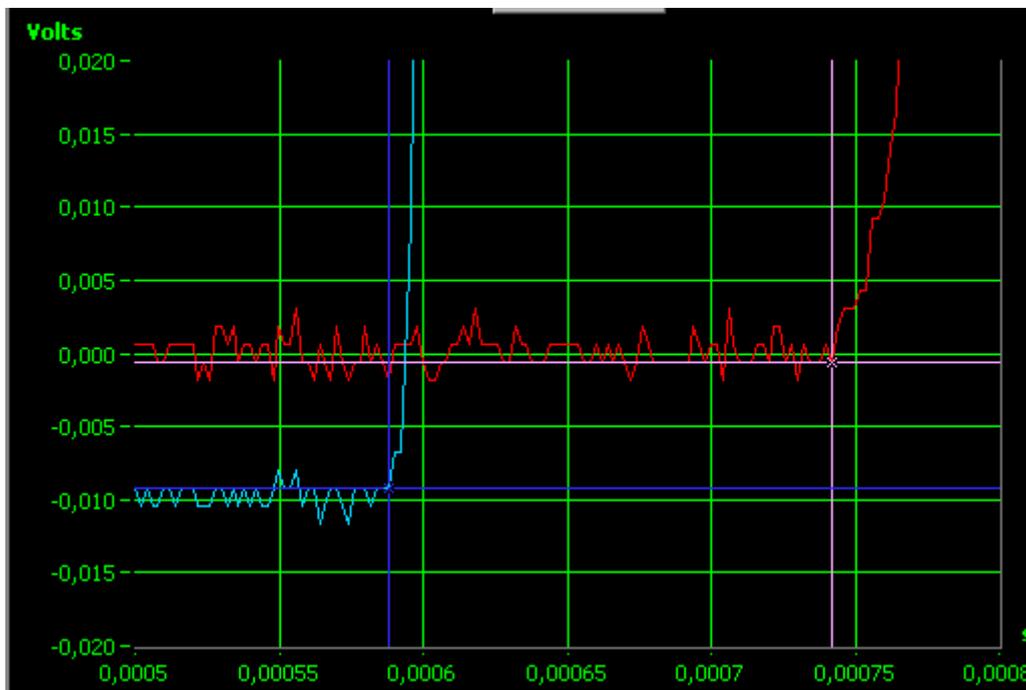


Figura 4.53 Posizionamento ottimale dei cursori delle curve del martello e dell'accelerometro nel software in ambiente LabView

I tempi di volo ottenuti sono riportati in una tabella, assieme alla lunghezza dei percorsi (misurata in AutoCad) ed ad eventuali note riguardanti ogni specifica acquisizione. Un esempio di come vengono organizzati i dati acquisiti è riportato in Tabella 2. Le caselle iniziali servono per riassumere le informazioni riguardanti la data di acquisizione e il nome degli operatori. Nelle prime colonne si immette il nome del file, il numero della stazione emittente e ricevente. Si calcola poi la lunghezza del percorso che viene espressa in metri e si riporta il tempo di volo elaborato dal software. Si converte in secondi, in modo da ottenere la velocità in m/s. Nella colonna delle note si riportano le osservazioni sia sulla qualità della superficie di battuta o ricezione, sia sull'andamento delle curve del martello o dell'accelerometro qualora abbiano delle caratteristiche particolari.

Tabella 2 Esempio di tabella per la fase di post-processing

Data di acquisizione :
Nome operatori :

Nome file	Stazione Emittente Tx	Stazione Ricevente Rx	l (m)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Spessore sezione lato dx	Spessore sezione lato sx
	1	1						
	1	2						
	1	3						

Per avere maggiori informazioni sull'andamento dei tempi di volo ottenuti dal software, nello stesso foglio excel vengono creati diversi grafici e sottotabelle, che saranno riportati nel capitolo 5 e 6. Dopo aver ricavato con questo procedimento i tempi di volo di tutti i percorsi di misura di tutte le sezioni sia orizzontali che verticali, si procede all'inversione dei dati tramite l'utilizzo del software Geotom.

Attraverso il software ElaborSonic2rev1 si calcola anche il tempo di contatto, utile per il calcolo della lunghezza d'onda e della risoluzione del metodo utilizzato. Il tempo di contatto t_c si misura posizionando il cursore blu del martello all'inizio del picco corrispondente alla curva trasmittente e il cursore rosso al termine dello stesso. Si ricorda che il tempo di contatto è influenzato dalla geometria della massa battente e dalla superficie d'impatto. Misurato il tempo di contatto t_c è possibile stimare la frequenza dell'onda acustica generata come:

$$f_{max} = \frac{1}{t_c}$$

La f_{max} è importante per calcolare la lunghezza d'onda, dalla quale si ricava la risoluzione. Quest'ultima ci permette di conoscere le dimensioni minime del difetto riconoscibile all'interno della sezione indagata.

4.4.2 Inversione dei tempi di volo

Il software Geotom ha permesso l'inversione dei tempi di volo, al fine di ottenere delle mappe di velocità della sezione considerata. Prima di descrivere la fase pratica di utilizzo del programma, ne viene descritta la teoria che c'è alla base.

In Tomografia ogni punto delle proiezioni illustrate nella figura 4.54 corrisponde ad un particolare tragitto compiuto dal raggio che va da una sorgente fissa in posizione Tx (S = Source = Trasmettitore) ad una tra le posizioni riceventi Rx (Receiver = Ricevitore). Il tempo impiegato dal fronte d'onda per propagarsi dalla sorgente al ricevitore riflette la velocità media lungo il tragitto che unisce Tx a Rx.

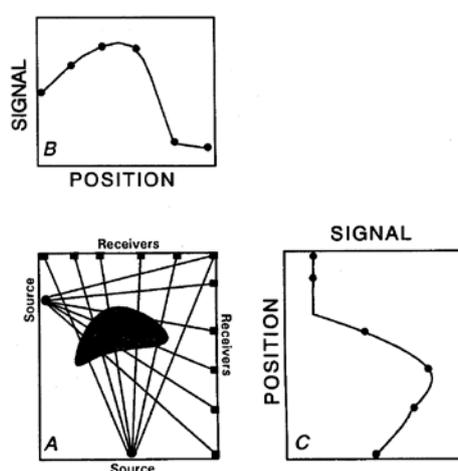


Figura 4.54 Illustrazione schematica della proiezione di un'anomalia. Il difetto fisico (A) viene proiettato come un'anomalia dei dati (B e C); la tomografia comporta una ricostruzione delle anomalie fisiche partendo dalle loro proiezioni (Jackson e Tweeton, 1994)

Secondo la notazione matematica, il tempo di volo rappresenta l'integrale della lentezza cioè rappresenta l'inverso della velocità lungo il percorso che congiunge la sorgente emittente a quella ricevente. Il tempo t viene così definito in funzione della velocità v dell'impulso e della lentezza p :

$$t = \int_S^R \frac{1}{v} \cdot \delta l = \int_S^R p \cdot \delta l$$

dove δl rappresenta il tratto infinitesimo congiungente le sonde e R e T sono rispettivamente la sorgente ricevente e quella emittente.

Esistono due possibili procedimenti per ricostruire la distribuzione delle velocità (o lentezza) a partire da un set di integrali monodimensionali dei tempi di volo. Il primo si basa su una trasformazione e convoluzione di Fourier. È più adatto a essere applicato in

campo medico in quanto richiede standard di misura piuttosto elevati, idonei a modalità di acquisizione con precisione quasi assoluta nel posizionamento delle sonde e nel rilevamento dei dati. Se utilizzato, rappresenta una scelta ottimale per la precisione dei risultati ottenuti. Il secondo metodo si basa sulla “tecnica di espansione in serie” e risulta meno vincolato alla modalità di acquisizione dei dati, quindi più idoneo al campo ingegneristico in esame. Viene approssimata la funzione continua $p(x, z)$ con una serie di elementi discreti, detti pixel (o voxel per elementi tridimensionali), cioè aree in cui si può considerare suddivisa la sezione, ciascuno dei quali con una lentezza p_j costante (essendo $j=1,2,\dots,M$ con M corrispondente al numero dei pixel). L’integrale corrispondente al tempo di volo t_j , essendo $j=1,2,\dots,N$ con N numero delle osservazioni, diventa una sommatoria:

$$t_i = \sum_{j=1}^M p_j \cdot d_{ij}$$

dove $i=1,2,\dots,N$ e d_{ij} rappresenta la distanza percorsa dall’impulso i -esimo sul pixel j -esimo. Per l’intero set di percorsi, la sommatoria può essere espressa in forma matriciale compatta:

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

dove \mathbf{T} e \mathbf{P} sono dei vettori colonna rispettivamente di lunghezza N e M e \mathbf{D} rappresenta la matrice rettangolare di dimensioni $N \times M$ contenente le distanze tra la sonda emittente e la sonda ricevente. La visualizzazione tomografica richiede pertanto la risoluzione di \mathbf{P} , il vettore delle lentezze, fornita la matrice dei tempi di volo \mathbf{T} . Questo certamente richiede che la matrice \mathbf{D} sia nota. Se la forma dei percorsi è approssimata con quella rettilinea, la matrice \mathbf{D} può essere ottenuta mediante semplici formulazioni geometriche, mentre quando la velocità varia in funzione della posizione, il tragitto dei segnali subisce delle rifrazioni. Se la velocità subisce notevoli variazioni (elevato gradiente), la matrice \mathbf{D} deve essere calcolata mediante un attento tracciamento dei percorsi.

L’obiettivo della tomografia è quello di risolvere il problema nel vettore \mathbf{P} , noto il vettore dei tempi di volo \mathbf{T} :

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

dove \mathbf{D}^{-1} è l’inversa della matrice delle distanze \mathbf{D} . Solitamente la matrice \mathbf{D} risulta essere singolare, ovvero con determinante nullo, e quindi non esiste l’inversa. Il fatto di avere delle singolarità è dipendente dalla natura dei dati misurati, i quali possono essere insufficienti in numero oppure essere in numero sovrabbondante ma inconsistenti

(possono manifestare una rumorosità di fondo). Si considera una soluzione approssimata che utilizza la trasposta della matrice \mathbf{D} , anziché l'inversa, applicando una normalizzazione delle distanze misurate:

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

dove \mathbf{D}^{*T} è la matrice ottenuta dividendo ciascuna riga di \mathbf{D} , corrispondente al generico percorso di misura, per il quadrato della lunghezza del percorso stesso. Ne deriva che:

$$P_j = \sum_{i=1}^N \frac{D_{ij}}{D_i^2}$$

dove $j=1,2,\dots,M$

Un'approssimazione migliore è data dalla soluzione ai minimi quadrati che soddisfa i dati inconsistenti nel modo migliore possibile:

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

Si deve fare attenzione perché la matrice $(\mathbf{D}^T\mathbf{D})$ può essere singolare o molto prossima ad esserlo e questo può portare a risultati sbagliati. Questo ha condotto all'applicazione smorzata dei minimi quadrati:

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

dove λ è il parametro di smorzamento e \mathbf{I} la matrice identità.

Un'efficiente alternativa è da ricercare nella famiglia delle tecniche di ricostruzione algebrica, definite anche ART (algebraic reconstruction techniques). Il software GeotomCG utilizza la tecnica di ricostruzione algebrica SIRT (Lytle et al. 1978; Peterson et al. 1985).

Nella ricostruzione iterativa, un modello di velocità iniziale è progressivamente modificato sino alla convergenza ad una soluzione. Questo conduce al seguente passaggio, il quale prevede innanzitutto che venga definito un modello iniziale, il quale, viene poi impiegato per calcolare un corrispondente modello per i tempi di volo, rappresentato in notazione matriciale contratta:

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

dove la notazione con l'apice si riferisce al modello iniziale. Il modello dei tempi di volo viene sottratto dai tempi misurati sino ad ottenere dei residui:

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

Il passo chiave sta quindi nella proiezione all'indietro dei residui al fine di ottenere un set di perturbazioni, dette anche fattori di correzione:

$$dP = D^{*T} dT$$

Il modello viene quindi aggiornato con i calcolati fattori di correzione:

$$P'' = P' + dP'$$

Il processo viene proseguito in maniera iterativa, da qui la definizione di processo iterativo, sino alla convergenza ad una soluzione.

Oltre all'elaborazione dei tempi di volo misurati sperimentalmente, è utile considerare anche l'attenuazione subita dal raggio nel percorso dalla sorgente al ricevitore. Queste due metodologie devono dare risultati consistenti in quanto i due fenomeni fisici sono strettamente legati. Anche questo secondo tipo di elaborazione può essere eseguito utilizzando il programma "Geotom CG" già impiegato, con la differenza che la grandezza misurata sarà l'attenuazione del segnale anziché i tempi di volo. Questo richiede però un processo preliminare per la riduzione dei dati, prima di produrre il file di input per il software tomografico. Per i tempi di volo, il programma calcola l'integrale della lentezza lungo ciascun percorso, mentre se integriamo il coefficiente di attenuazione α lungo ogni percorso otteniamo il logaritmo della caduta dell'ampiezza (o totale attenuazione) dA come mostrato successivamente. Nello specifico, ciò che interessa è la caduta logaritmica dell'ampiezza dA_A dovuta all'attenuazione intrinseca del materiale o all'assorbimento, che è una componente dell'attenuazione totale. Per calcolare dA_A , all'attenuazione è sottratta la quota persa dovuta alla diffusione geometrica dA_G :

$$dA_A = dA - dA_G$$

La perdita dovuta alla dispersione (scattering) dA_S non riesce ad essere introdotta, per cui in effetti viene considerata come assorbimento.

Descrivendo in dettaglio le operazioni da eseguire per ottenere il file di input per il software GeoTom nel caso di inversioni di attenuazioni, il primo passaggio consiste nell'acquisizione delle ampiezze del segnale alle sorgenti ed ai ricevitori. In generale si considera l'ampiezza del primo o dei primi tre picchi del segnale. In presenza di raggi riflessi e diretti, è meglio utilizzare i raggi diretti se è possibile distinguerli.

La seconda operazione che può essere necessaria è l'uniformizzazione dei dati se sono utilizzati sensori diversi con diverse sensibilità. La misura (genericamente in Volt) può

essere convertita in accelerazione utilizzando la sensitività di ogni sensore (Volt per g dove g è l'accelerazione di gravità pari a 9.8 m/s^2 sulla superficie terrestre).

Se le dimensioni delle sorgenti sono molto minori rispetto alle dimensioni dei percorsi (condizione generalmente soddisfatta), è possibile utilizzare un modello sferico per la propagazione delle onde, quindi l'attenuazione geometrica del segnale è del tipo $1/r$.

Nel caso di sorgenti che non irradiano energia in modo uniforme in tutte le direzioni, è necessario considerare la perdita dovuta alla posizione del ricevitore rispetto alla direzione di massimo della sorgente sia θ l'angolo tra la direzione del ricevitore e la direzione di massimo e $F(\theta)$ la funzione che descrive la distribuzione di energia di quella sorgente, l'ampiezza del segnale di ogni raggio deve essere divisa per il corrispondente $F(\theta)$. Lo stesso discorso vale in modo duale per il ricevitore se questo presenta direzioni con sensibilità diversa.

Supponendo che non sussistano questi problemi, siano A_0 l'ampiezza del segnale alla sorgente, A l'ampiezza del segnale al ricevitore, L la distanza tra sorgente e ricevitore e α il coefficiente di attenuazione in una stima iniziale. Il modello di attenuazione diviene quindi $A = \left(\frac{A_0}{L}\right) \exp(-\alpha L)$. L'inverso del coefficiente di attenuazione è il parametro da utilizzare come input in Geotom. Infatti è possibile riscrivere l'equazione come $\ln(AL) = \ln(A_0) - \alpha L$ da cui $\ln(A_0) - \ln(AL) = \alpha L$ poiché α è positivo per definizione. Ricordando la relazione per i tempi di volo che è del tipo $tempo = \frac{1}{velocità} * spazio$, si può notare come le due espressioni siano della stessa forma. Al tempo corrisponde il valore $\ln(A_0) - \ln(AL)$ mentre alla velocità corrisponde $1/\alpha$. Quindi utilizzando come file di input per il Geotom i valori delle ampiezze così processati, il software calcola l'inverso del coefficiente di attenuazione.

La risoluzione possibile per la tecnica tomografica è in stretta relazione alla lunghezza d'onda degli impulsi generati dalla strumentazione. In generale, al diminuire della lunghezza d'onda diminuisce la dimensione massima dei difetti che possano essere percepiti dal segnale. D'altro canto piccole lunghezze d'onda comportano maggiori attenuazioni del segnale rispetto a segnali con lunghezze d'onda maggiori. Si deve pertanto trovare un compromesso tra questi aspetti, cercando un equilibrio tra una buona risoluzione e allo stesso tempo un'attenuazione non troppo elevata del segnale. Il matematico Radon dimostrò come, dato un set completo di proiezioni di un oggetto,

questo possa essere ricostruito esattamente. Nella realtà sperimentale, tuttavia, non è possibile ottenere un set completo di proiezioni raccolte in continuo, in quanto i dati raccolti, pur in numero elevato, sono da ricondurre ad un numero finito di acquisizioni. Al fine di valutare questo passaggio dal campo dell'infinito a quello del finito, sono stati prodotti una serie di modelli matematici al fine di dimostrare come le limitazioni delle restituzioni tomografiche siano da ricondurre essenzialmente alle limitazioni presenti nei dati raccolti. Il migliore metodo pratico da seguire, nell'effettuare acquisizioni, è quello di poter circondare completamente l'area della sezione da indagare con stazioni riceventi e emittenti, in modo che l'area venga ricoperta da raggi che viaggiano in versi opposti in tutte le direzioni considerate. Talvolta i dati si riescono a raccogliere solo su due superfici di misurazione. La serie di dati sui tempi di volo può essere ugualmente inserita in una serie di modelli di velocità differenti. Questo è conosciuto come non-unicità del problema, il quale interessa ogni ricostruzione tomografica basata su di un set di dati caratterizzato da una copertura non omogenea della sezione. La metodologia di ricostruzione iterativa, SIRT, algoritmo che si basa su semplici considerazioni algebriche e procede iterativamente sino al raggiungimento di una soluzione esatta dal punto di vista numerico, converge ad una soluzione ben diversa rispetto a quella rappresentata dal modello di partenza. Al fine di migliorare la risoluzione partendo dal posizionamento su soli due lati del provino, è necessario aggiungere informazioni al modello considerando il problema della non unicità, i vincoli e la Fuzzy Logic (Jackson e Tweeton, 1994). Per quanto riguarda il tracciamento dei percorsi, l'approssimazione con percorsi rettilinei è accettabile solo per velocità che differiscono tra zone adiacenti del 10%, invece per valori superiori al 50% è inaccettabile. Per valori compresi tra il 10% e il 50%, i percorsi rettilinei sono accettati solo in relazione al grado di precisione richiesta dall'analisi. Esistono numerosi modelli che permettono di analizzare il tempo di volo tracciando i percorsi di misura anche su materiali eterogenei. Un approccio piuttosto comune è quello di dividere il piano mediante pixels triangolari, entro i quali la velocità varia linearmente con la posizione. Sotto queste condizioni, il segmento di percorso contenuto in un pixel può essere calcolato analiticamente applicando la legge di Snell. Il calcolo di un percorso di misura che collega i punti di stazione della sonda trasmittente alla sonda ricevente è un tipico problema con due condizioni al contorno. I metodi maggiormente impiegati sono quelli dello ray shooting e quello del ray bending (letteralmente raggio sparante e raggio deviante). Il primo metodo individua il percorso dalla sorgente alla ricevente tracciando raggi aventi differenti angoli di inclinazione rispetto alla sorgente interpolando il percorso

sino a quando questo non passi sufficientemente vicino alla ricevente. Il secondo metodo invece parte da un percorso di tentativo che unisca la sonda emittente a quella ricevente: il percorso è pertanto iterativamente perturbato sino a che il tempo di volo non è stato minimizzato. Ciascuno di questi due metodi ha degli svantaggi. Il primo metodo può condurre a risultati erranei nel caso di complesse distribuzioni della velocità sulla sezione investigata, nel caso cioè che le traiettorie dei percorsi siano estremamente variabili: questa variabilità è dovuta all'irregolarità della funzione dell'angolo di inclinazione del raggio uscente dalla sonda trasmittente, aspetto questo che conduce a problemi di discontinuità nella soluzione. Un esempio di questo può essere osservato nell'incapacità da parte del percorso di raggiungere la stazione ricevente posta in un'area ad alta velocità, in quanto una forte rifrazione tende ad allontanare il percorso dalla ricevente. Questo fenomeno viene comunemente definito come il problema della zona d'ombra (Figura 4.55). Questa problematica indica come si ottengano risultati errati dall'inversione dei dati nel 20% dei casi.

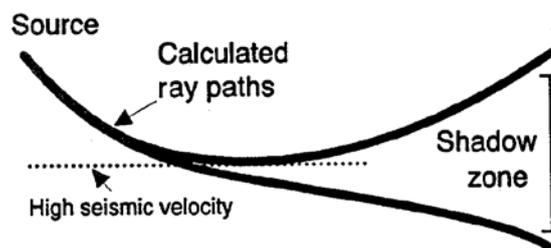


Figura 4.55 Il problema della zona d'ombra: i raggi sono rifratti lontano da zone ad alta velocità; questo sbandamento è causato dall'estrema sensibilità della funzione dell'angolo di inclinazione del raggio rispetto alla sorgente (Jackson e Tweeton, 1994)

Il software considera la propagazione del fronte d'onda mediante il principio di Huygens. Questo principio, originariamente formulato per l'ottica, permette di modellare la propagazione di un fronte d'onda attraverso un materiale caratterizzato da un'eterogenea distribuzione della velocità considerando ogni punto sul fronte d'onda come un istantaneo punto di sorgente. La posizione del fronte d'onda un tempo infinitesimo dopo l'istante iniziale corrisponde al luogo dell'interferenza costruttiva di queste wavelet di Huygens. L'interferenza costruttiva rappresenta la definizione di un fenomeno fisico (definito nel campo della ottica – fisica) relativo all'interazione tra due onde inizialmente in fase le quali, colpendo un ostacolo (es. discontinuità materiale) andranno a percorrere cammini diversi. Le wavelet nascono con lo scopo di risolvere le problematiche, nate dall'analisi di

serie di dati nel dominio del tempo, che emergono dall'utilizzo delle trasformate di Fourier. La trasformata di Fourier restituisce indicazioni sulla presenza di componenti di frequenza dominanti, riferite al dominio della frequenza e non al dominio del tempo, e dunque in un campo monodimensionale di analisi. Questo comporta difficoltà nell'analisi in quanto non è possibile determinare l'istante in cui un determinato evento, caratterizzato da una certa frequenza, vada a verificarsi. Questo problema è stato in parte risolto dall'avvento delle wavelet, in quanto permettono di svolgere analisi dei dati temporali associando la frequenza secondo cui si ripete un certo fenomeno al tempo in cui tale fenomeno vada a verificarsi. Un fronte d'onda circolare, inizialmente infinitesimo, localizzato in corrispondenza della sorgente dell'impulso, si propaga in una serie di intervalli di tempo attraverso la ricostruzione di wavelet circolari calcolate su di un numero prestabilito di punti del fronte d'onda, ciascuno avente un raggio proporzionale alla velocità locale. Il luogo dell'interferenza costruttiva è approssimato dalla linea tangente alle adiacenti wavelets di Huygens. Ogni punto appartenente al corrente fronte d'onda è avanzato, nell'intervallo di tempo, alla posizione di mezzeria della wavelet calcolata tra i punti di tangenza al fronte d'onda (figura 4.56). La traiettoria di un punto di controllo sul fronte d'onda rappresenta il percorso dell'impulso. In seguito all'espansione del fronte d'onda, si aggiungono nuovi punti di controllo, ottenuti mediante l'interpolazione dei dati; nell'interesse dell'efficienza computazionale, i punti appartenenti al fronte d'onda vengono cancellati una volta che siano stati attraversati e che il fronte d'onda si sia allontanato dalla regione d'interesse.

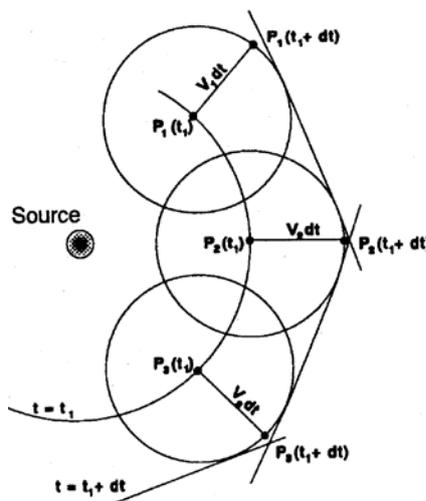


Figura 4.56 Schematizzazione del principio di Huygens (Jackson e Tweeton, 1994)

Ritornando al problema di aver solamente due facce di un provino nello svolgere le indagini mediante impulsi microsismici, emergono grossi problemi nel rilevamento di anomalie presenti nel provino stesso, soprattutto se disposte parallelamente alla disposizione delle stazioni di misura. Il grosso problema che emerge in questo tipo di prove, nella restituzione tomografica, è il problema matematico relativo alla non-unicità della soluzione ottenuta. L'impossibilità di avere ventagli caratterizzati da grandi aperture angolare conduce ad ottenere, in termini matematici, una matrice singolare durante l'inversione. Il problema in certi casi può essere risolto andando ad incrementare le misurazioni intervenendo anche sui lati del provino non considerati nelle acquisizioni, ma nel caso in cui questo fosse impossibile, bisogna rifarsi a strategie di diversa natura, imponendo certi vincoli alla procedura di calcolo. Questi limiti possono essere imposti sulle proprietà statistiche della soluzione; ad esempio, si può imporre una condizione per cui la soluzione sia quella a cui corrisponde il minimo della varianza. Un approccio differente può essere quello di sopperire alla mancanza di informazioni in termini di tempi di volo aggiungendo informazioni riguardanti il provino stesso. Queste informazioni aggiuntive possono essere incorporate nell'inversione allestendo un appropriato modello di partenza, o più esplicitamente limitando, attraverso vincoli, il range delle possibili soluzioni. Queste informazioni aggiuntive pertanto hanno lo scopo di indirizzare la soluzione verso un range di possibili soluzioni che possano essere ritenute come probabili. Il metodo della ricostruzione iterativa conosce l'avvio da un modello di partenza ragionevole, e in generale si rimane vicini al modello di partenza, eccetto in quei casi in cui siano richieste delle interpolazioni nei dati. Inoltre è possibile aggiungere una serie di vincoli espliciti i quali possono essere incorporati nel calcolo mediante il software (vincoli di velocità su determinate zone note nelle caratteristiche anche solo parzialmente), vincoli che non si sarebbero potuti inserire direttamente nella matrice dei dati di input per l'inversione. Ad esempio, la soluzione può essere forzata per rispettare i valori limite di velocità noti a priori. I metodi iterativi dunque permettono una maggiore flessibilità nella natura dei vincoli che possono essere applicati.

Dopo aver visto un excursus sulla teoria alla base del software, vengono descritte ora le procedure pratiche per l'avvio e l'utilizzo del Geotom CG.

Il primo step prevede la preparazione di file excel con i dati geometrici e i tempi di volo ricavati con ElaborSonic2rev1. Il file 3-D è costituito da 8 colonne (Tabella 3): la prima comprende il numero progressivo delle acquisizioni, dalla seconda alla quarta si

immettono i dati geometrici della sorgente emettitrice lungo i tre assi X, Y, Z e allo stesso modo dalla quinta alla settima si inseriscono i dati della stazione ricevente. L'ottava colonna contiene i tempi di volo.

Tabella 3 Esempio tabella excel per il software Geotom CG

Riga 1 per parametri

#	SorgX	SorgY	SorgZ	RicevX	RicevY	RicevZ	Time
1	105	0	0	105	0	380	
2	105	0	0	145	0	380	
3	105	0	0	185	0	380	
4	105	0	0	225	0	380	

È importante che i dati geometrici siano espressi in mm e i tempi di volo espressi in microsecondi, perché altrimenti il valore dei residui risulterebbe così basso che non sarebbe possibile plottarlo nel grafico prodotto da Geotom. La mappa della velocità che ne deriva è espressa in Km/s. Il file excel deve essere salvato come testo delimitato da tabulazione, ovvero con la sintassi .txt. Deve essere rinominato successivamente con la sintassi .3dd. A questo punto, dopo aver installato il software, si apre il programma. La schermata iniziale è riportata in figura 4.57.

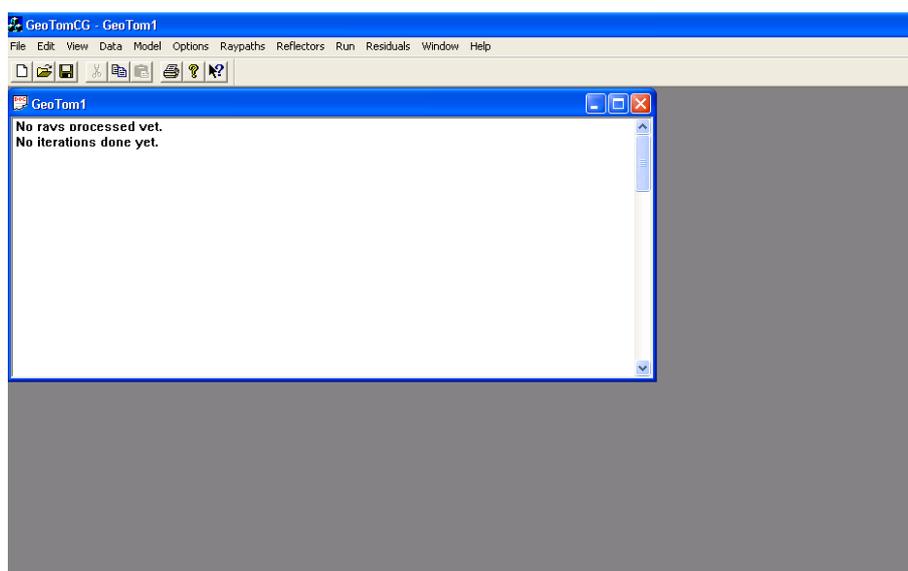


Figura 4.57 Schermata iniziale del Geotom

Cliccando in alto su *Data*, appare un menù dove scegliamo *Open data file*. In questo modo il programma carica il file di dati sopra descritto. La schermata che otteniamo è rappresentata in figura 4.58.

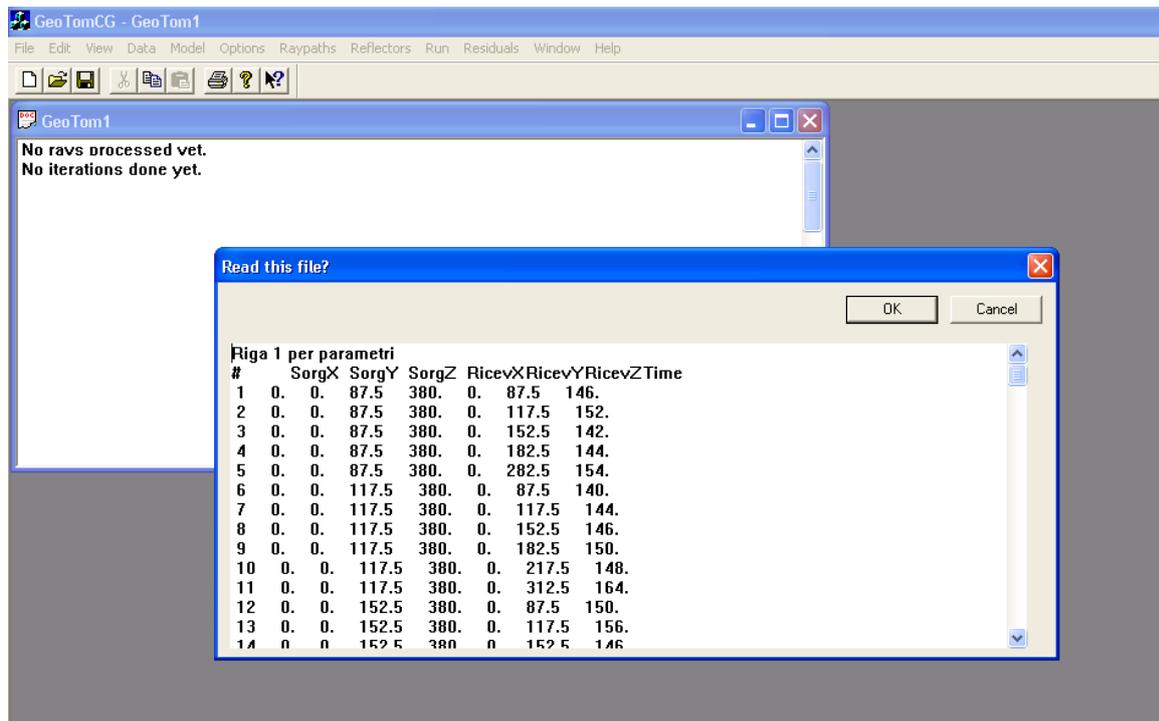


Figura 4.58 Schermata del Geotom per introdurre il file dei dati

Dopo aver dato ok, si imposta il modello di velocità iniziale cliccando su *Model, Generate Model*. La finestra che si apre (figura 4.59) contiene le informazioni sul modello corrente dato dai valori geometrici immessi e si possono impostare nuovi parametri. In basso si immettono i limiti geometrici della sezione su cui stiamo lavorando e nelle caselle sotto number il numero di pixel con cui vogliamo dividere l'area, nelle tre direzioni X, Y e Z. Si può impostare un valore di *Uniform velocity* e un valore per l'anisotropia del materiale nelle caselle a destra. La velocità di default è compresa tra il valor medio e la velocità più bassa calcolata nel file di dato. Nel nostro caso si è utilizzato il valore di *Uniform velocity* di default e si è mantenuto il valore 1 per *Uniform Anisotropy*, poiché non abbiamo considerato l'anisotropia del materiale poiché da lavori

precedentemente svolti (K.Runggaldier) si è osservato che i valori di velocità al variare delle diverse direzioni dei percorsi si mantengono pressoché costanti.

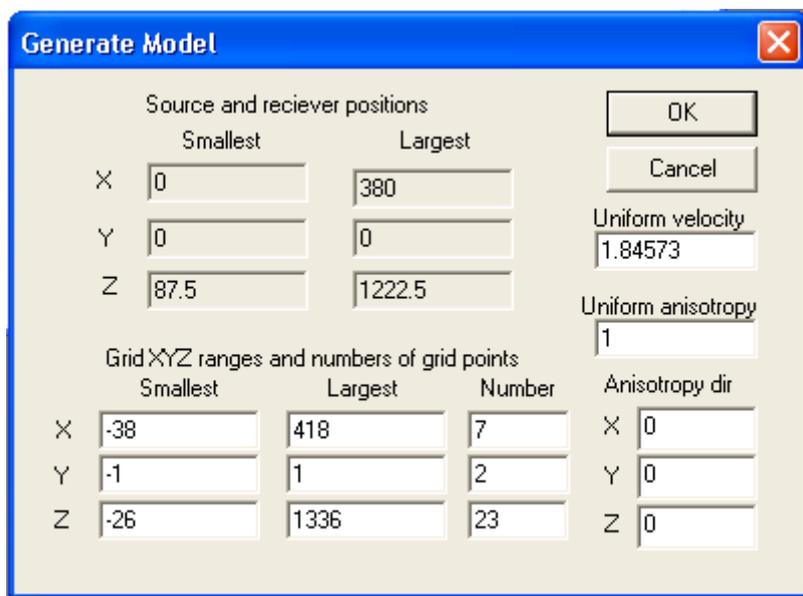


Figura 4.59 Schermata del Geotom per generare il modello iniziale

Il modello di velocità realizzato viene salvato. Successivamente si clicca su *Model, Open Model File* e apre il file con il modello di velocità appena realizzato. Vi è la possibilità di specificare dei valori per quanto riguarda la velocità, i vincoli e l'anisotropia nei vari punti della griglia in cui è suddivisa la sezione. Si clicca su *Model, Edit Model* e appare la finestra (figura 4.60). Vi sono tre riquadri nominati *Set grid point velocities*, *Set grid point constrains* and *Set grid point anisotropies*, nei quali si può selezionare i parametri che si vogliono settare. Se si sceglie *None* significa che nessun valore di quel tipo deve essere settato. Se si sceglie *Slice* significa che solo i punti di una fetta assumeranno i valori che noi immettiamo nel riquadro a fianco. Se si sceglie *Through* significa che tutti punti dell'intero volume analizzano assumeranno i valori immessi. Nel nostro caso si è lasciato *None* per tutti i valori.

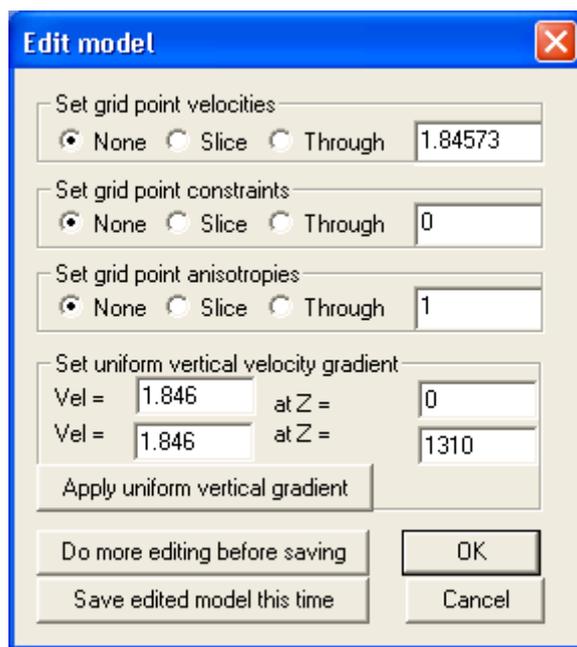
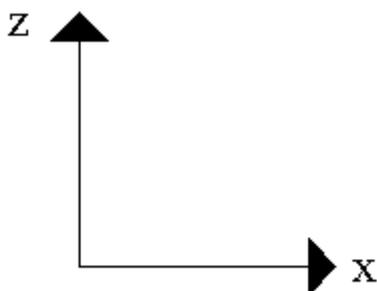


Figura 4.60 Schermata del Geotom per specificare il modello di velocità

Prima di procedere è importante sapere come sono posizionati gli assi, si clicca allora su *Option, Pos Z axis up or down* e si sceglie la posizione dell'asse Z verso l'alto. Gli assi nel caso bidimensionale che utilizzeremo sono così disposti:



Per procedere con l'inversione dei dati si clicca su *Options, Inversion Parameters*. La finestra (figura 4.61) che si apre ci dà la possibilità di scegliere il numero di iterazioni straight o bending, ovvero che far considerare al programma solo raggi rettilinei o anche raggi curvi. Nelle caselle in basso si imposta il valore massimo e minimo della velocità entro cui vogliamo far iterare i dati. Per le nostre prove utilizziamo un valore massimo pari a 3 Km/s=3000m/s e un valore minimo pari a 0.3Km/s=300m/s che rappresenta la velocità del suono nell'aria.

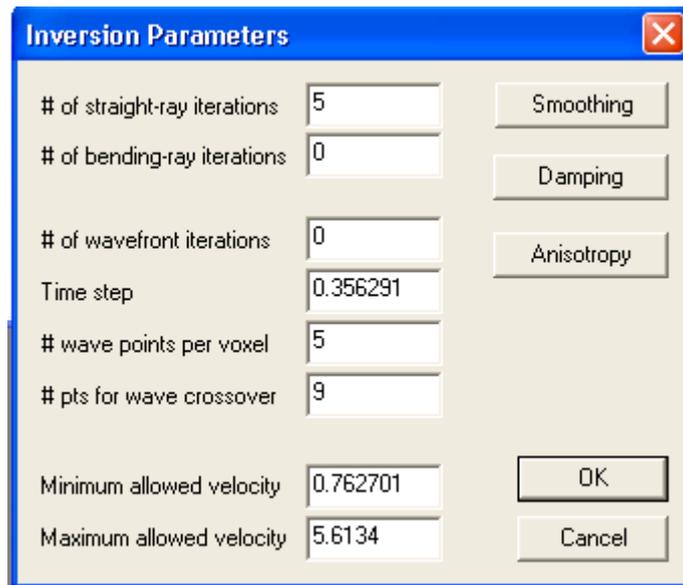


Figura 4.61 Schermata del Geotom per impostare i parametri di inversione

Si ha la possibilità di visualizzare la traiettoria dei percorsi considerata dal software, cliccando su *Raypaths*, *Save Raypath* si salva un file che poi potrà essere sovrapposto all'immagine tomografica prodotta con la rappresentazione dell'andamento dei percorsi di misura. Si procede poi con *Run*, *Run standard inversion* per far girare il programma. Una volta terminate le iterazioni il programma fornisce la distribuzione delle velocità della sezione assegnata. Un esempio è riportato in figura 4.62, ricordando che le velocità sono espresse in Km/s. Le lettere S indicano le stazioni emittenti e le lettere R le stazioni riceventi.

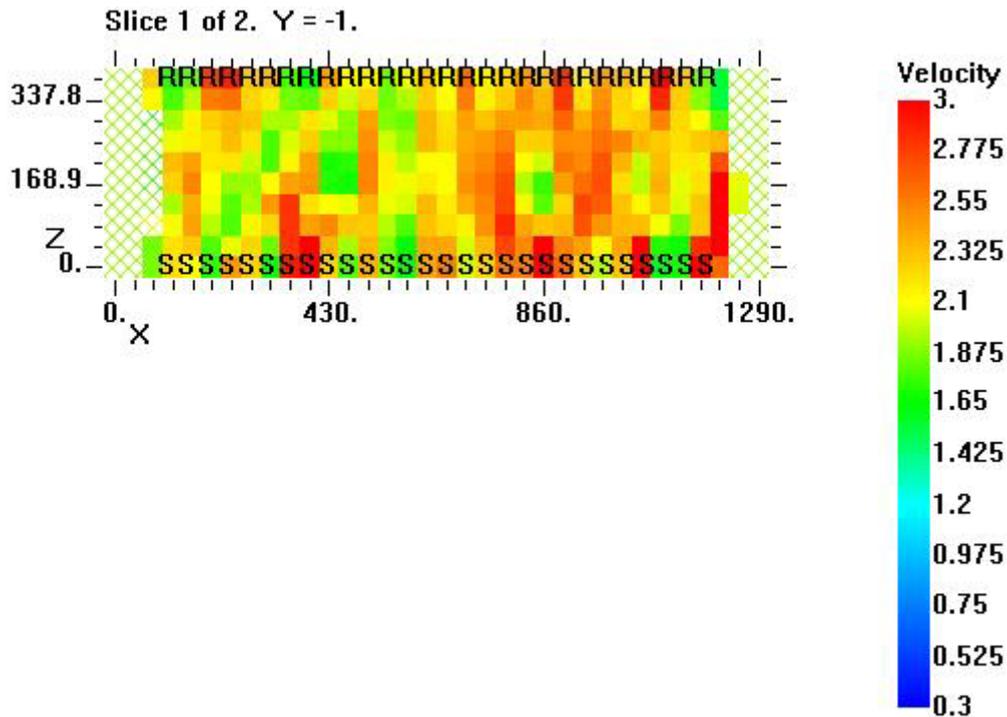


Figura 4.62 Mappa della velocità in Km/sec prodotta dal software Geotom

Se vogliamo plottare i residui, si clicca su Residuals, Open residuals file e si sceglie il file relativo alla prova che si è eseguito. Successivamente cliccando Residuals, Plot e si ottiene un grafico a dispersione dove in ascissa sono riportati i valori dei residui e in ordinata il numero delle acquisizioni (figura 4.63).

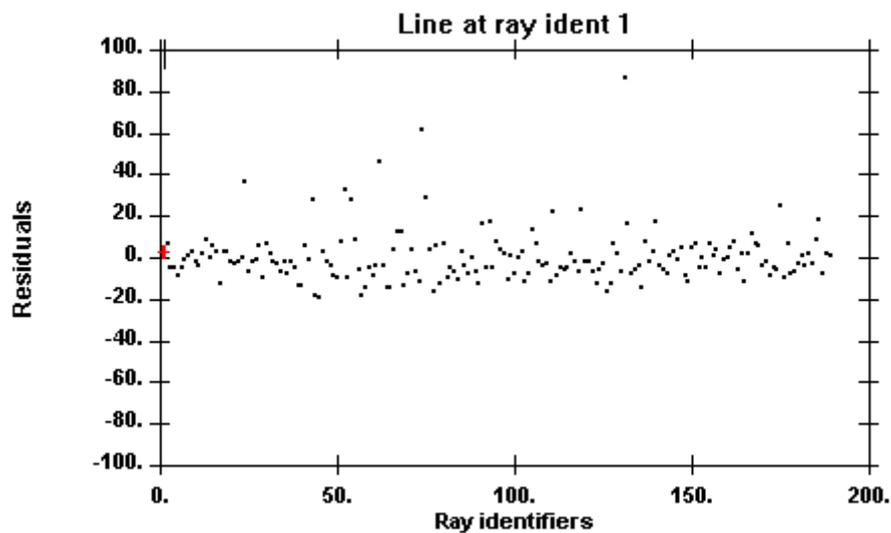


Figura 4.63 Grafico dei residui prodotto dal software Geotom

4.4.3 Calcolo dell'attenuazione

Per calcolare l'attenuazione del segnale si può procedere in due maniere: si realizza una tabella excel con i dati delle ampiezze e si creano dei grafici per vedere l'andamento oppure si ottiene la distribuzione dell'attenuazione tramite l'inversione dei valori delle ampiezze tramite il software Geotom CG.

Si visualizza l'oscillogramma totale, dove è possibile misurare i valori di ampiezza massima del segnale trasmittente e di quello ricevente e posizionando il cursore nel punto di massimo di ogni curva e si legge il corrispondente valore di ampiezza. Nel software ElaborSonic2rev1 è possibile posizionare il cursore nel punto di massimo e vedere il valore di ampiezza corrispondente nel riquadro al centro con scritto martello e accelerometro (evidenziato in figura 4.64). Per quanto riguarda il segnale ricevente il valore di massima ampiezza è stato calcolato dalla differenza tra il valore massimo della fase positiva ($A_{max Rx}$) ed il massimo della fase negativa ($A_{min Rx}$) della curva. Importante è ricordare che questi valori sono stati misurati sempre sul primo picco della curva ricevente, indipendentemente che fosse o meno quello con massima ampiezza. L'ampiezza totale del segnale ricevuto è stata quindi calcolata mediante la seguente formula:

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

dove $A_{max Rx}$ è l'ampiezza massima del segnale del ricevitore e $A_{max Tx}$ è l'ampiezza massima del segnale del trasmettitore.

L'attenuazione espressa in decibel è stata calcolata per ogni singolo valore acquisito lungo le stazioni riceventi applicando la seguente formula:

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

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

Ricavati questi dati si crea una tabella in excel (Tabella 4) e si valuta, inserendo le formule opportune, il valore dell'attenuazione del segnale per ogni acquisizione fatta.

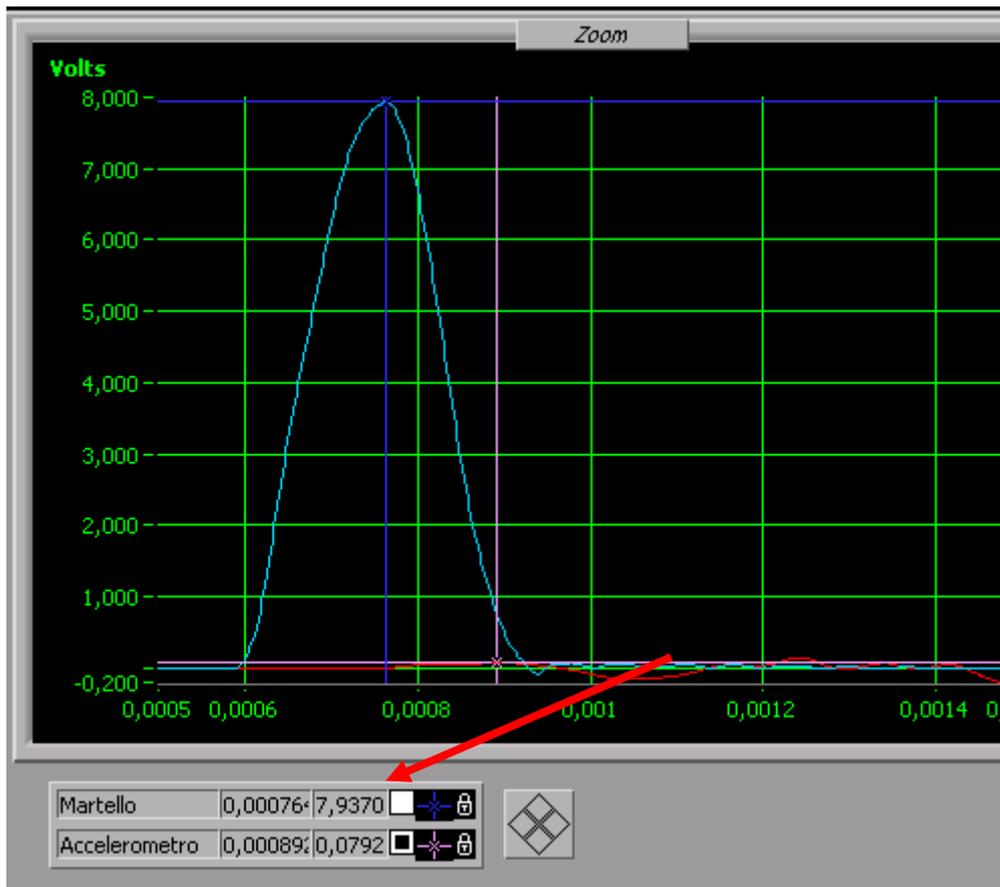


Figura 4.64 Oscillogramma della forma d'onda del martello

Tabella 4.4 Tabella esempio dove sono calcolate le ampiezze e l'attenuazione

Nome File	Numerazione sequenza acquisizioni	A max TX (V) <i>Ao</i>	A max sup. RX (V)	A min inf. RX (V)	A max RX (V) <i>(A)</i>	Ampiezza	<i>Ao/A</i>	log10 <i>Ao/A</i>	Attenuazione (dB)
	1								
	2								
	3								
	4								

Per quanto riguarda il software Geotom CG, si prepara un apposita tabella in excel, costituita da 9 colonne. Le prime otto colonne sono le stesse già preparate per l'inversione dei dati alle quali si aggiunge un'ulteriore colonna con il valore dell'attenuazione già calcolata come riportato nella parte teorica sopra esposta. La tabella viene salvata con la sintassi .txt e rinominata come .tam. Si apre il Geotom CG, si clicca su *Data, Combined Real Amplitude* e si sceglie il file preparato. Successivamente si apre il modello di velocità che si vuole utilizzare dal menu *Model, Open model file*. Dopo aver scelto in

Options il numero di iterazioni che si vuol fare eseguire, si procede con *Run* e si fa girare il programma. È importante ricordare che per l'inversione delle ampiezze si possono utilizzare solo iterazioni straight. Si ottiene una mappa che rappresenta l'attenuazione espressa come $\frac{1}{\alpha}$ dove α è il coefficiente di attenuazione. I valori riportati in legenda sono riferiti al rapporto sopra definito. L'attenuazione sarà maggiore laddove la velocità assume valori bassi.

Capitolo 5

Tomografia sonora: analisi dei tempi di volo e visualizzazione dei corsi orizzontali

In questo capitolo sono visualizzati i risultati ottenuti dall'analisi dei tempi di volo e dall'inversione dei dati con il software Geotom. Ciascun caso analizzato metterà in evidenza i limiti della tecnica tomografica, al fine di poter valutare l'attendibilità della prova qualora venga applicata in sito su murature storiche.

I corsi orizzontali del muretto PNDE e PNDF mostrano caratteristiche differenti tra loro in termini di disposizione dei mattoni, di presenza di vuoti o di muratura a sacco. Essi sono analizzati individualmente, ma per poterlo fare, vengono prima eseguite delle prove su un corso in particolare per definire i parametri più indicati per il proseguo del lavoro (numero di pixel, numero di iterazioni e valore dei residui).

5.1. Muretto PNDE, corso 6: studio parametrico di fattori di inversione tomografica

Il corso 6 del muretto PNDe viene preso in esame per lo studio di accettabilità dei parametri che si devono inserire all'interno del software. La geometria del corso 6 presenta due difetti di larghezza pari a 27 cm e spessore variabile tra i 6 e i 7 cm. Essi sono posizionati a differenti profondità rispetto al fronte (figura 5.1). In figura 5.2 è rappresentata invece la copertura dei percorsi utilizzati dalle stazioni sorgenti ai ricevitori.

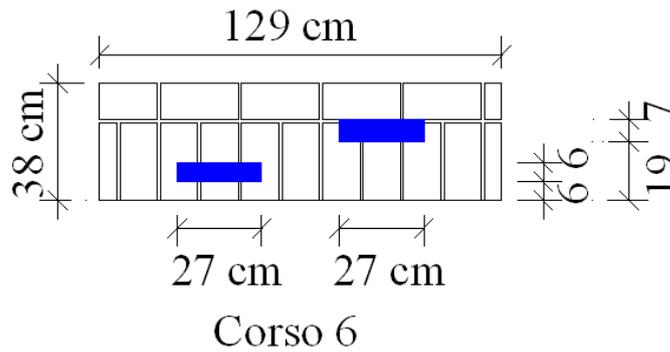


Figura 5.1 Muretto PNDE, corso 6, geometria della sezione (Colla e Gabrielli, 2009)

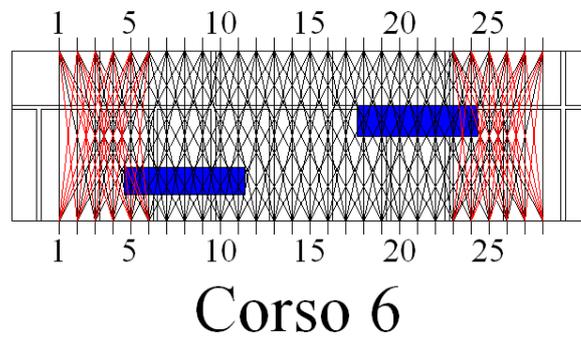


Figura 5.2 Muretto PNDE, corso 6, ray-paths

Dall'analisi delle forme d'onda acquisite effettuata con il software in ambiente LabView, si sono desunti i tempi di volo necessari al segnale per raggiungere ogni stazione ricevente a partire dalla sorgente, seguendo un percorso teoricamente rettilineo. Nella realtà il segnale si propaga secondo traiettorie più o meno curve al variare degli ostacoli che incontra. Nella tabella 5.1, ciascun percorso ha una numerazione progressiva da 1 a 166 e per ognuno sono riportati i tempi di volo, la lunghezza del percorso calcolata in Autocad e considerata rettilinea e la velocità del segnale. Per meglio visualizzare i tempi e le velocità ottenute, essi vengono plottati in grafici (figura 5.3 e 5.4) ad istogramma. Si nota in corrispondenza dei percorsi che attraversano o lambiscono parzialmente uno dei due difetti l'aumentare del tempo di volo e il diminuire di conseguenza della velocità. Riportando in un grafico (figura 5.5), le velocità in funzione della lunghezza del percorso e andando ad impostare la funzione di regressione lineare, si visualizza l'andamento più o meno lineare dei dati ottenuti.

Tabella 5.1 Provino PNDE, corso 6: valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso6	1	1	1	0.38	144	0.000144	2638.88889		N
PNDe_corso6	1	2	2	0.3821	146	0.000146	2617.12329		N
PNDe_corso6	1	3	3	0.3883	146	0.000146	2659.58904	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone	N
PNDe_corso6	1	4	4	0.3985	156	0.000156	2554.48718		N
PNDe_corso6	1	5	5	0.4123	168	0.000168	2454.16667		N
PNDe_corso6	1	6	6	0.4294	170	0.00017	2525.88235		N
PNDe_corso6	2	1	7	0.3821	136	0.000136	2809.55882		N
PNDe_corso6	2	2	8	0.38	146	0.000146	2602.73973		N
PNDe_corso6	2	3	9	0.3821	154	0.000154	2481.16883	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone	N
PNDe_corso6	2	4	10	0.3883	144	0.000144	2696.52778		N
PNDe_corso6	2	5	11	0.3985	162	0.000162	2459.87654		N
PNDe_corso6	2	6	12	0.4123	160	0.00016	2576.875		N
PNDe_corso6	2	7	13	0.4294	178	0.000178	2412.35955		N
PNDe_corso6	3	1	14	0.3883	158	0.000158	2457.59494	Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	3	2	15	0.3821	152	0.000152	2513.81579	Posizione martello sul giunto di malta.	N
PNDe_corso6	3	3	16	0.38	142	0.000142	2676.05634	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone.Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	3	4	17	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	3	5	18	0.3883	176	0.000176	2206.25	Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	3	6	19	0.3985	174	0.000174	2290.22989	Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	3	8	20	0.4294	168	0.000168	2555.95238	Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	4	1	21	0.3985	200	0.0002	1992.5		N
PNDe_corso6	4	2	22	0.3883	146	0.000146	2659.58904		N
PNDe_corso6	4	3	23	0.3821	150	0.00015	2547.33333	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone	N
PNDe_corso6	4	4	24	0.38	150	0.00015	2533.33333		N

PND _e _corso6	4	5	25	0.3821	148	0.000148	2581.75676	INCERTO punto curva accelerometro	N
PND _e _corso6	4	6	26	0.3883	156	0.000156	2489.10256		N
PND _e _corso6	4	9	27	0.4294	196	0.000196	2190.81633		S
PND _e _corso6	5	1	28	0.4123	162	0.000162	2545.06173		N
PND _e _corso6	5	2	29	0.3985	156	0.000156	2554.48718		N
PND _e _corso6	5	3	30	0.3883	148	0.000148	2623.64865	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone	S
PND _e _corso6	5	4	31	0.3821	150	0.00015	2547.33333		S
PND _e _corso6	5	5	32	0.38	152	0.000152	2500		S
PND _e _corso6	5	6	33	0.3821	156	0.000156	2449.35897		S
PND _e _corso6	5	7	34	0.3883	164	0.000164	2367.68293		S
PND _e _corso6	5	10	35	0.4294	184	0.000184	2333.69565	INCERTO	S
PND _e _corso6	6	1	36	0.4294	174	0.000174	2467.81609		S
PND _e _corso6	6	2	37	0.4123	188	0.000188	2193.08511		S
PND _e _corso6	6	3	38	0.3985	182	0.000182	2189.56044	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone	S
PND _e _corso6	6	4	39	0.3883	170	0.00017	2284.11765		S
PND _e _corso6	6	5	40	0.3821	180	0.00018	2122.77778		S
PND _e _corso6	6	6	41	0.38	172	0.000172	2209.30233	Parte finale del picco del martello non è lineare	S
PND _e _corso6	6	8	42	0.3883	214	0.000214	1814.48598	Parte finale del picco del martello non è lineare. Picco accelerometro pendenza negativa. INCERTO.	S
PND _e _corso6	6	11	43	0.4294	242	0.000242	1774.38017	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso6	7	2	44	0.4294	202	0.000202	2125.74257		S
PND _e _corso6	7	5	45	0.3883	224	0.000224	1733.48214		S
PND _e _corso6	7	7	46	0.38	300	0.0003	1266.66667		S
PND _e _corso6	7	9	47	0.3883	254	0.000254	1528.74016	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PND _e _corso6	7	12	48	0.4294	282	0.000282	1522.69504	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso6	8	3	49	0.4294	206	0.000206	2084.46602	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone. Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso6	8	6	50	0.3883	212	0.000212	1831.60377	Picco accelerometro pendenza negativa.	S

PNDe_ corso6	8	8	51	0.38	234	0.000234	1623.93162	Curva del martello con la finale del picco non lineare. Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	8	10	52	0.3883	258	0.000258	1505.03876	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	8	13	53	0.4294	250	0.00025	1717.6	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	9	4	54	0.4294	228	0.000228	1883.33333	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	9	7	55	0.3883	236	0.000236	1645.33898	Parte finale del picco del martello non lineare. Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	9	9	56	0.38	308	0.000308	1233.76623	Parte finale del picco del martello non lineare.	S
PNDe_ corso6	9	11	57	0.3883	258	0.000258	1505.03876	INCERTO	S
PNDe_ corso6	9	14	58	0.4294	258	0.000258	1664.34109		S
PNDe_ corso6	10	5	59	0.4294	246	0.000246	1745.52846	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	10	8	60	0.3883	212	0.000212	1831.60377	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	10	10	61	0.38	182	0.000182	2087.91209	INCERTO	S
PNDe_ corso6	10	12	62	0.3883	208	0.000208	1866.82692	INCERTO	S
PNDe_ corso6	10	15	63	0.4294	182	0.000182	2359.34066	Parte finale del picco del martello non lineare	S
PNDe_ corso6	11	6	64	0.4294	198	0.000198	2168.68687	INCERTO. Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	11	9	65	0.3883	168	0.000168	2311.30952		S
PNDe_ corso6	11	11	66	0.38	162	0.000162	2345.67901		S
PNDe_ corso6	11	13	67	0.3883	154	0.000154	2521.42857		S
PNDe_ corso6	11	16	68	0.4294	164	0.000164	2618.29268	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PNDe_ corso6	12	7	69	0.4294	184	0.000184	2333.69565		S
PNDe_ corso6	12	10	70	0.3883	148	0.000148	2623.64865		N
PNDe_ corso6	12	12	71	0.38	146	0.000146	2602.73973		N
PNDe_ corso6	12	14	72	0.3883	148	0.000148	2623.64865		N
PNDe_ corso6	12	17	73	0.4294	168	0.000168	2555.95238		N
PNDe_ corso6	13	8	74	0.4294	176	0.000176	2439.77273	Posizione martello su giunto di malta, battuta sull'angolo del mattone.	N
PNDe_ corso6	13	11	75	0.3883	146	0.000146	2659.58904	Posizione martello su giunto di malta, battuta sull'angolo del mattone.	N
PNDe_ corso6	13	13	76	0.38	138	0.000138	2753.62319	Posizione martello su giunto di malta, battuta sull'angolo del	N

								mattone.	
PND _e _corso6	13	15	77	0.3883	132	0.000132	2941.66667	Posizione martello su giunto di malta,battuta sull'angolo del mattone.	N
PND _e _corso6	13	18	78	0.4294	164	0.000164	2618.29268	Posizione martello su giunto di malta,battuta sull'angolo del mattone.	N
PND _e _corso6	14	9	79	0.4294	156	0.000156	2752.5641		N
PND _e _corso6	14	12	80	0.3883	144	0.000144	2696.52778		N
PND _e _corso6	14	14	81	0.38	148	0.000148	2567.56757		N
PND _e _corso6	14	16	82	0.3883	146	0.000146	2659.58904	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PND _e _corso6	14	19	83	0.4294	162	0.000162	2650.61728		N
PND _e _corso6	15	10	84	0.4294	154	0.000154	2788.31169		N
PND _e _corso6	15	13	85	0.3883	150	0.00015	2588.66667		N
PND _e _corso6	15	15	86	0.38	134	0.000134	2835.8209		N
PND _e _corso6	15	17	87	0.3883	146	0.000146	2659.58904		N
PND _e _corso6	15	20	88	0.4294	178	0.000178	2412.35955		S
PND _e _corso6	16	11	89	0.4294	164	0.000164	2618.29268	Posizione martello su giunto di malta.	N
PND _e _corso6	16	14	90	0.3883	154	0.000154	2521.42857	Posizione martello su giunto di malta.	N
PND _e _corso6	16	16	91	0.38	132	0.000132	2878.78788	Posizione martello su giunto di malta.Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	N
PND _e _corso6	16	18	92	0.3883	144	0.000144	2696.52778	Posizione martello su giunto di malta.	N
PND _e _corso6	16	21	93	0.4294	204	0.000204	2104.90196	Posizione martello su giunto di malta.	S
PND _e _corso6	17	12	94	0.4294	168	0.000168	2555.95238		N
PND _e _corso6	17	15	95	0.3883	156	0.000156	2489.10256		N
PND _e _corso6	17	17	96	0.38	138	0.000138	2753.62319		N
PND _e _corso6	17	19	97	0.3883	170	0.00017	2284.11765		S
PND _e _corso6	17	22	98	0.4294	214	0.000214	2006.54206	INCERTO.Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso6	18	13	99	0.4294	180	0.00018	2385.55556		N
PND _e _corso6	18	16	100	0.3883	144	0.000144	2696.52778		N
PND _e _corso6	18	18	101	0.38	144	0.000144	2638.88889		S

PNDe_ corso6	18	20	102	0.3883	182	0.000182	2133.51648		S
PNDe_ corso6	18	23	103	0.4294	206	0.000206	2084.46602	INCERTO.Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	19	14	104	0.4294	168	0.000168	2555.95238		N
PNDe_ corso6	19	17	105	0.3883	148	0.000148	2623.64865		S
PNDe_ corso6	19	19	106	0.38	154	0.000154	2467.53247		S
PNDe_ corso6	19	21	107	0.3883	184	0.000184	2110.32609	INCERTO.Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	19	24	108	0.4294	230	0.00023	1866.95652	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	20	15	109	0.4294	174	0.000174	2467.81609		S
PNDe_ corso6	20	18	110	0.3883	180	0.00018	2157.22222	Parte finale del picco del martello non lineare.	S
PNDe_ corso6	20	20	111	0.38	216	0.000216	1759.25926	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	20	22	112	0.3883	214	0.000214	1814.48598	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	20	25	113	0.4294	180	0.00018	2385.55556	INCERTO punto inizio curva accelerometro.	S
PNDe_ corso6	21	16	114	0.4294	172	0.000172	2496.51163	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.INCERTO punto inizio curva accelerometro.	S
PNDe_ corso6	21	19	115	0.3883	252	0.000252	1540.87302	Picco accelerometro pendenza negativa.INCERTO(punto inizio curva accelerometro)	S
PNDe_ corso6	21	21	116	0.38	220	0.00022	1727.27273	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	21	23	117	0.3883	234	0.000234	1659.40171	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	21	26	118	0.4294	186	0.000186	2308.60215		S
PNDe_ corso6	22	17	119	0.4294	262	0.000262	1638.9313	INCERTO punto inizio curva accelerometro.	S
PNDe_ corso6	22	20	120	0.3883	200	0.0002	1941.5	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	22	22	121	0.38	208	0.000208	1826.92308	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	22	24	122	0.3883	164	0.000164	2367.68293		S
PNDe_ corso6	22	27	123	0.4294	162	0.000162	2650.61728		N
PNDe_ corso6	23	18	124	0.4294	252	0.000252	1703.96825	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	23	21	125	0.3883	216	0.000216	1797.68519	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	23	23	126	0.38	176	0.000176	2159.09091		S
PNDe_ corso6	23	24	127	0.3821	162	0.000162	2358.64198		S

PNDe_ corso6	23	25	128	0.3883	166	0.000166	2339.15663		S
PNDe_ corso6	23	26	129	0.3985	160	0.00016	2490.625		N
PNDe_ corso6	23	27	130	0.4123	162	0.000162	2545.06173		N
PNDe_ corso6	23	28	131	0.4294	170	0.00017	2525.88235		N
PNDe_ corso6	24	19	132	0.4294	232	0.000232	1850.86207	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	24	22	133	0.3883	182	0.000182	2133.51648		S
PNDe_ corso6	24	23	134	0.3821	152	0.000152	2513.81579		S
PNDe_ corso6	24	24	135	0.38	160	0.00016	2375		S
PNDe_ corso6	24	25	136	0.3821	160	0.00016	2388.125		N
PNDe_ corso6	24	26	137	0.3883	156	0.000156	2489.10256		N
PNDe_ corso6	24	27	138	0.3985	154	0.000154	2587.66234		N
PNDe_ corso6	24	28	139	0.4123	164	0.000164	2514.02439		N
PNDe_ corso6	25	20	140	0.4294	188	0.000188	2284.04255	INCERTO.Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	25	23	141	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso6	25	24	142	0.3821	158	0.000158	2418.35443		N
PNDe_ corso6	25	25	143	0.38	146	0.000146	2602.73973		N
PNDe_ corso6	25	26	144	0.3821	182	0.000182	2099.45055		N
PNDe_ corso6	25	27	145	0.3883	174	0.000174	2231.6092		N
PNDe_ corso6	25	28	146	0.3985	160	0.00016	2490.625		N
PNDe_ corso6	26	21	147	0.4294	180	0.00018	2385.55556	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDe_ corso6	26	23	148	0.3985	166	0.000166	2400.60241	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDe_ corso6	26	24	149	0.3883	150	0.00015	2588.66667	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	26	25	150	0.3821	148	0.000148	2581.75676	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	26	26	151	0.38	162	0.000162	2345.67901	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	26	27	152	0.3821	160	0.00016	2388.125	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	26	28	153	0.3883	168	0.000168	2311.30952	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	27	22	154	0.4294	170	0.00017	2525.88235		S

PNDe_ corso6	27	23	155	0.4123	158	0.000158	2609.49367		N
PNDe_ corso6	27	24	156	0.3985	158	0.000158	2522.1519		N
PNDe_ corso6	27	25	157	0.3883	150	0.00015	2588.66667		N
PNDe_ corso6	27	26	158	0.3821	146	0.000146	2617.12329		N
PNDe_ corso6	27	27	159	0.38	154	0.000154	2467.53247		N
PNDe_ corso6	27	28	160	0.3821	144	0.000144	2653.47222		N
PNDe_ corso6	28	23	161	0.4294	194	0.000194	2213.40206		N
PNDe_ corso6	28	24	162	0.4123	178	0.000178	2316.29213		N
PNDe_ corso6	28	25	163	0.3985	180	0.00018	2213.88889		N
PNDe_ corso6	28	26	164	0.3883	164	0.000164	2367.68293		N
PNDe_ corso6	28	27	165	0.3821	144	0.000144	2653.47222		N
PNDe_ corso6	28	28	166	0.38	146	0.000146	2602.73973		N

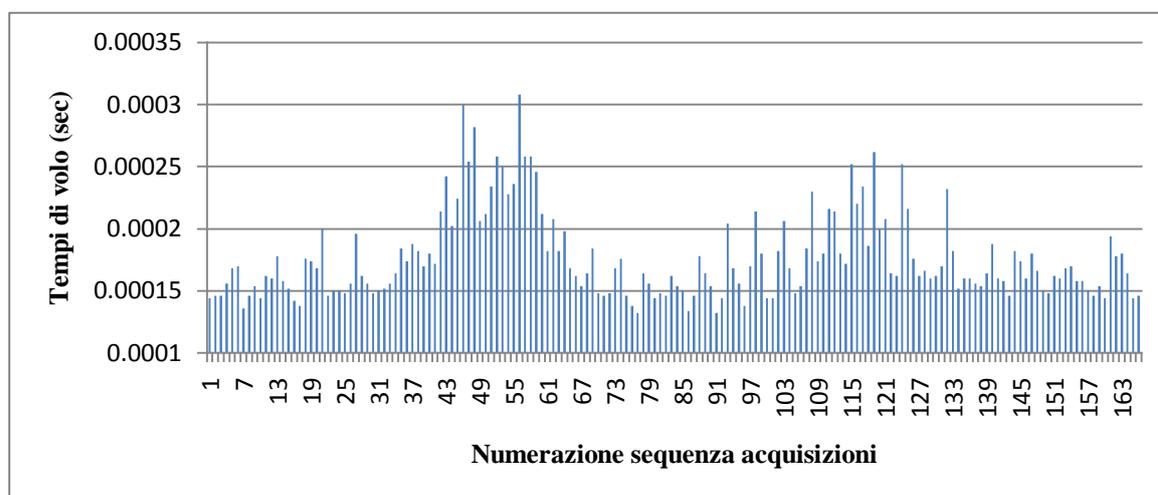


Figura 5.3 Muretto PNDE, corso 6, istogramma dei tempi di volo

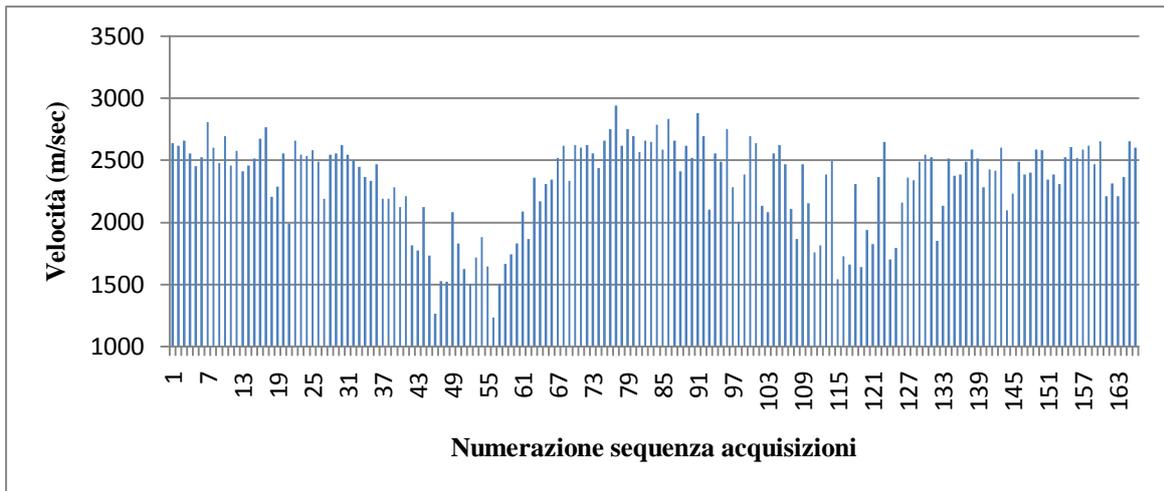


Figura 5.4 Muretto PNDE, corso 6, istogramma delle velocità registrate

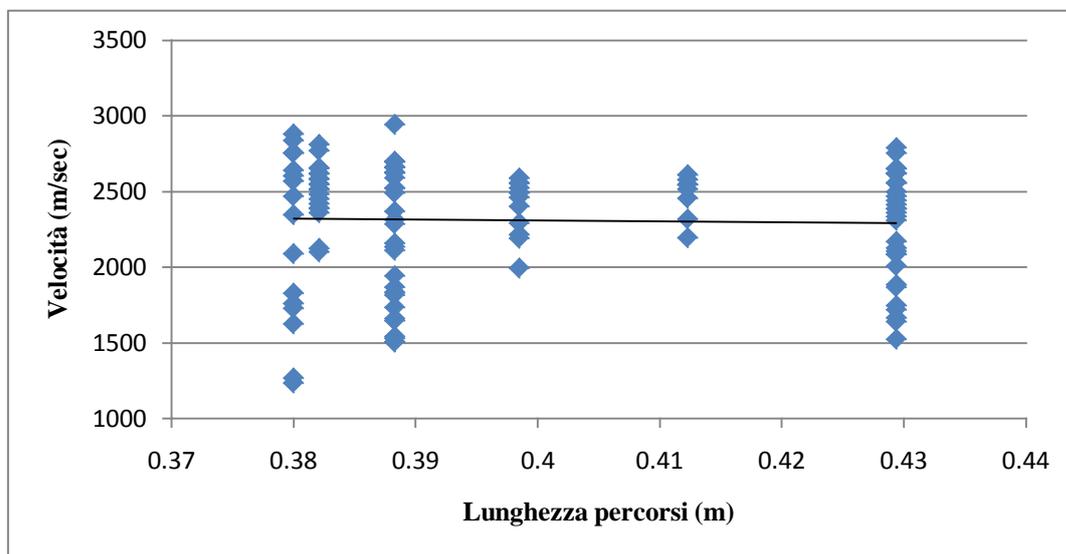


Figura 5.5 Muretto PNDE, corso 6, grafico velocità-lunghezza dei percorsi

Nel nostro caso, avendo la retta un andamento lineare, pressoché orizzontale, non c'è bisogno di studiare particolari modelli per materiali anisotropi attraverso i quali modificare i dati immessi e di impostare nel software l'opzione per anisotropia del materiale. Si considera questa valutazione idonea per i tutti i corsi elaborati, mostrando poi per ognuno la conferma di questa ipotesi.

5.1.1. Numero dei pixel

Successivamente, al fine di poter valutare il numero di pixel da utilizzare nel software Geotom, si considerano due ventagli uscenti rispettivamente dalla stazione sorgente 8 e 14 e di ciascuno vengono presi i raggi più esterni e il raggio centrale diretto. È una misura a campione ed è stata scelta quindi una posizione che si trova di fronte al difetto e una posizione che si trova in una zona centrale del muretto, lontana dai difetti. Vengono calcolati i tempi di contatto, ovvero il tempo che intercorre andando a posizionare i cursori del software in ambiente LabView all'inizio e alla fine della curva del martello. Secondo le relazioni note, si trovano il valore della frequenza massima F_{max} e della lunghezza d'onda minima λ ; si ricava poi il valore della risoluzione in m, che nel caso specifico della tomografia è valutata come $\frac{1}{4}$ di λ . Nella tabella 5.2 sono riassunti i dati ottenuti.

Tabella 5.2 Provino PNDE, corso 6, calcolo a campione della frequenza massima del segnale e della risoluzione massima ottenibile

Nome file	Stazione Emittente Tx	Stazione Ricevente Rx	Numerazione sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Tempo di contatto tc (microsec)	Tempo di contatto tc (sec)	Fmax(1/sec)	λ (m)	Risoluzione (m)
PNDe_corso6	8	3	49	0.4294	206	0.000206	2084.466019	284	0.000284	3521.126761	0.59198835	0.147997087
PNDe_corso6	8	8	51	0.38	234	0.000234	1623.931624	274	0.000274	3649.635036	0.444957265	0.111239316
PNDe_corso6	8	13	53	0.4294	250	0.00025	1717.6	280	0.00028	3571.428571	0.480928	0.120232
PNDe_corso6	14	9	79	0.4294	156	0.000156	2752.564103	298	0.000298	3355.704698	0.820264103	0.205066026
PNDe_corso6	14	14	81	0.38	148	0.000148	2567.567568	296	0.000296	3378.378378	0.76	0.19
PNDe_corso6	14	19	83	0.4294	162	0.000162	2650.617284	260	0.00026	3846.153846	0.689160494	0.172290123
						media	2232.7911	media	0.000282	3553.737882	0.631216368	0.157804092

La risoluzione varia da un minimo di 11 cm a un massimo di 20 cm, con un valore medio di 15 cm circa. Si possono considerare come dimensioni iniziali dei pixel circa 6x6 cm; dividendo le dimensioni della sezione in quadratini di 6 cm circa di lato, si ottengono 20 pixel per il lato lungo e 6 pixel per il lato più corto. In Geotom è stato generato un modello impostando le dimensioni del corso e il numero di pixel con cui suddividere ciascun lato (figura 5.6).

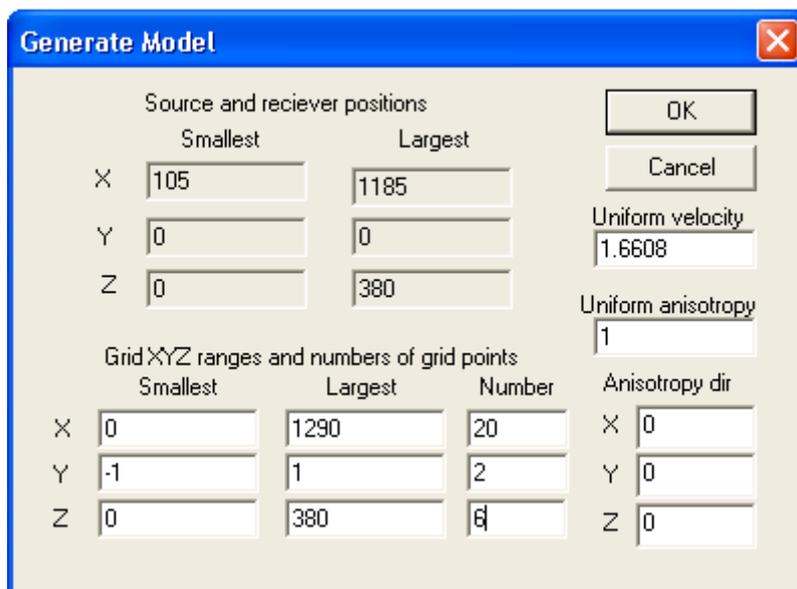


Figura 5.6 Schermata Geotom con valori di pixel impostati

Si è scelto un numero standard di 5 iterazioni straight con il quale iniziare le inversioni una volta scelte le possibili dimensioni dei pixel, per poter vedere, a parità di iterazioni, la diversa visualizzazione ottenuta dal variare delle dimensioni degli stessi (tabella 5.3). Nella figura 5.7 si vede la distribuzione delle velocità dopo 5 iterazioni con griglia 20x6, ossia di dimensioni 6 cm x 6 cm. Riducendo le dimensioni dei pixel, si ottengono griglie da 24x7 pixel, con dimensioni di circa 5x5 cm di lato (figura 5,8) e riducendo ulteriormente sempre con pixel di forma quadrata con lati di circa 4x4 cm si ottiene una griglia di 34x10 (figura 5.9). Se si considera la mappa di velocità da 34x10 pixel, il lato del pixel è assimilabile alla distanza che intercorre tra le stazioni di misura. Aumentando progressivamente il numero di “quadratini”, quindi diminuendo le dimensioni del lato degli stessi, si analizzano successivamente griglie da 44x13, 51x15 e 64x19 (figura 5.10, 5.11 e 5.12). In Figura 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, sono riportate le mappe di velocità ottenute con 5 iterazioni per i valori di pixel menzionati in Tabella 5.3.

Tabella 5.3 Provino PNDE, corso 6, casi studiati con 5 iterazioni straight e pixel quadrati e rettangolari

Numero Pixel	Dimensione Pixel	Numero iterazioni straight	Figura
20x6	6 cm x 6 cm	5	Figura 5.7
24x 7	5 cm x 5 cm	5	Figura 5.8
34x10	4 cm x 4 cm	5	Figura 5.9
44x13	3 cm x 3 cm	5	Figura 5.10
51x15	2,5 cm x 2,5 cm	5	Figura 5.11
64x19	2 cm x 2 cm	5	Figura 5.12
32x19	4 cm x 2 cm	5	Figura 5.13
43x19	3 cm x 2 cm	5	Figura 5.14
52x19	2,5 cm x 2 cm	5	Figura 5.15
86x19	1,5 cm x 2 cm	5	Figura 5.16

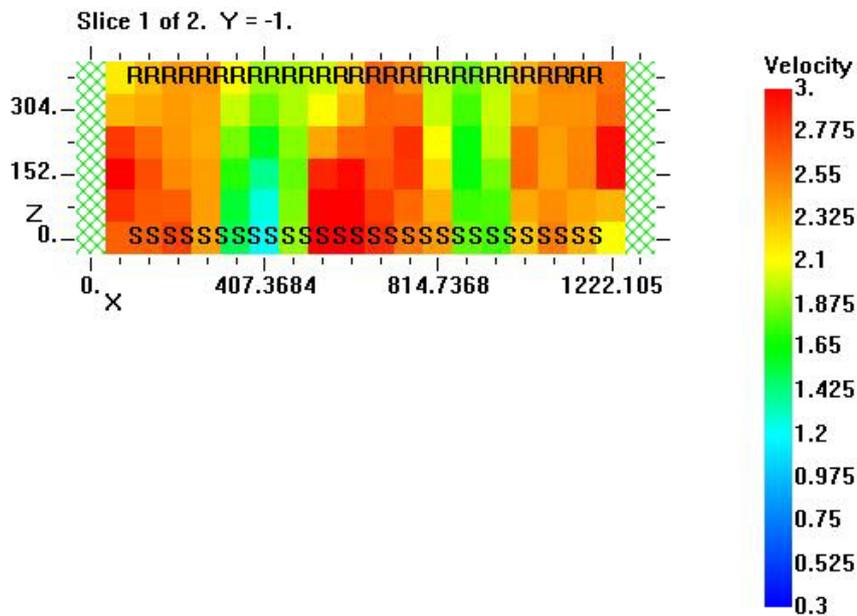


Figura 5.7 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 20x6 con lato di 6 cm x 6cm

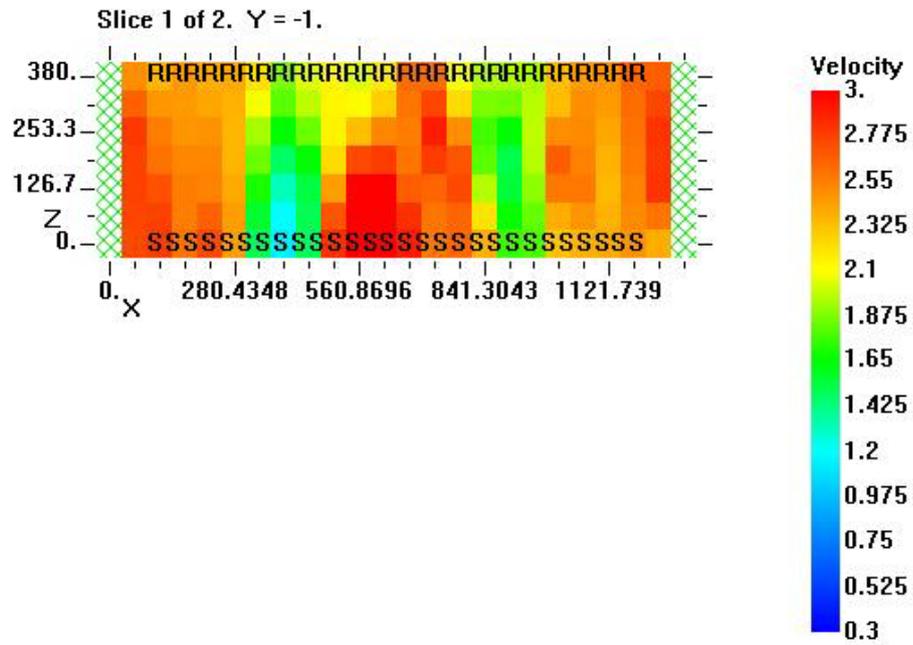


Figura 5.8 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 24x7 con lato di 5 cm x 5 cm.

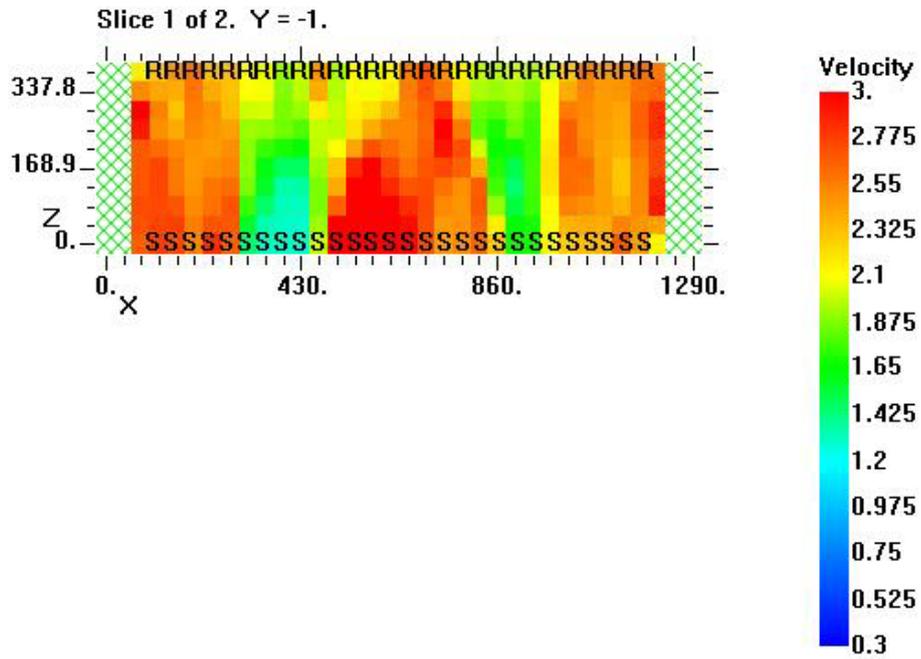


Figura 5.9 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 34x10 con lato di 4 cm x 4 cm.

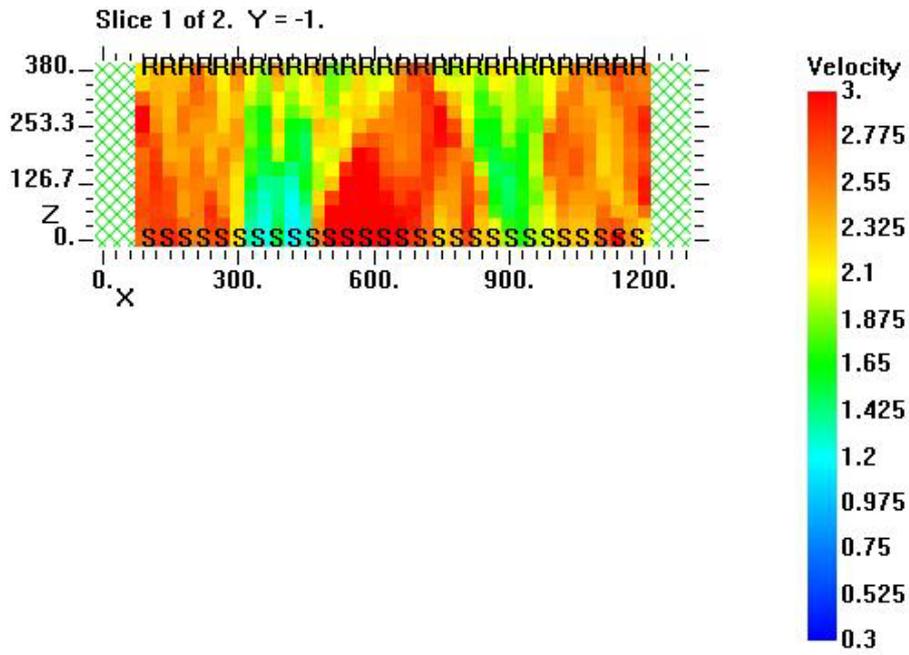


Figura 5.10 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 44x13 con lato di 3 cm x 3 cm.

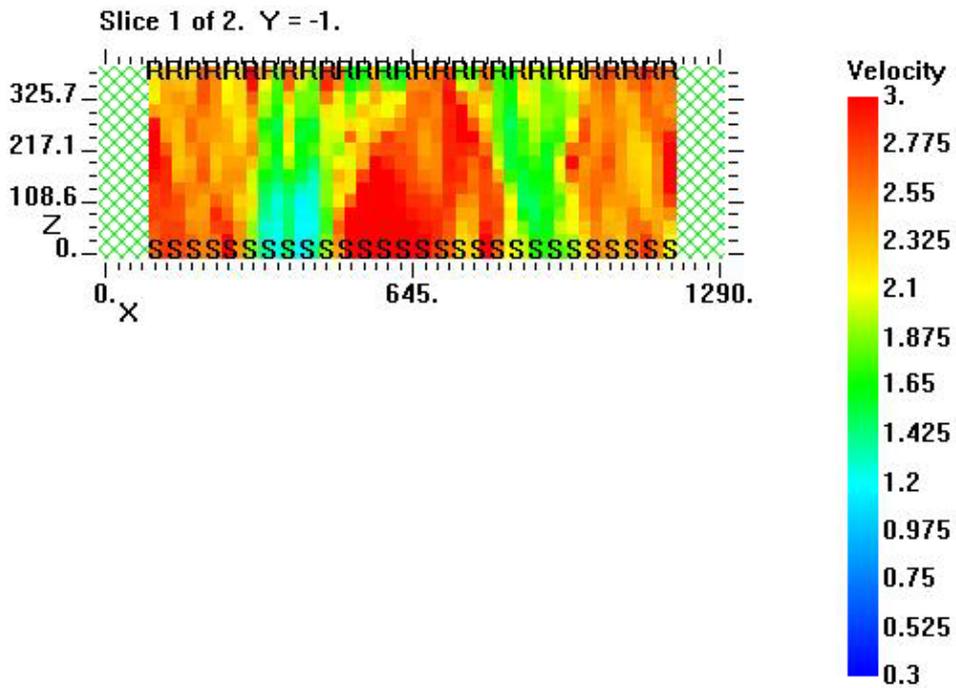


Figura 5.11 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 51x15 con lato di 2,5 cm x 2,5 cm.

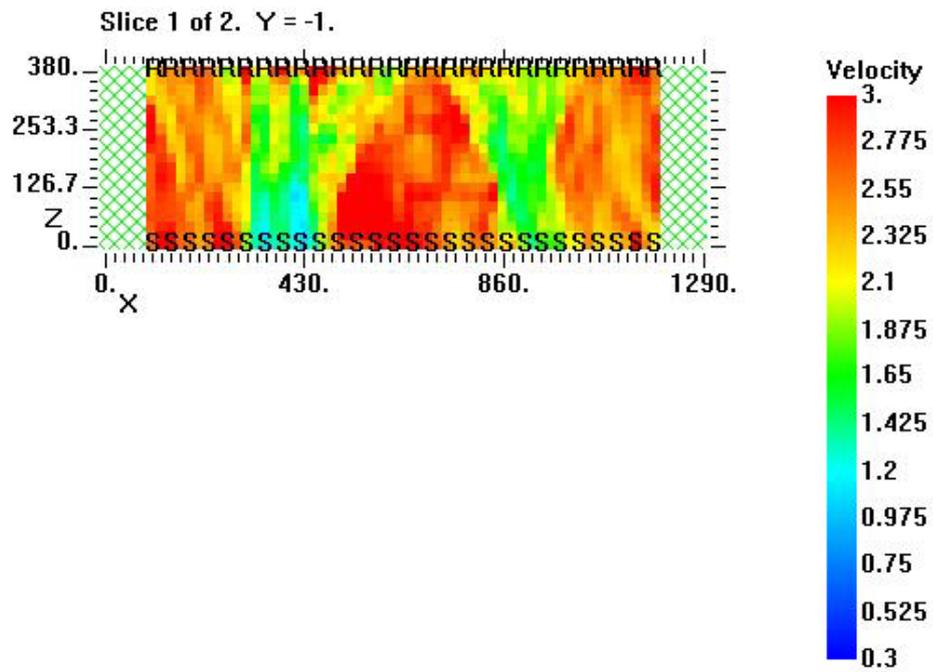


Figura 5.12 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 64x19 con lato di 2 cm x 2 cm.

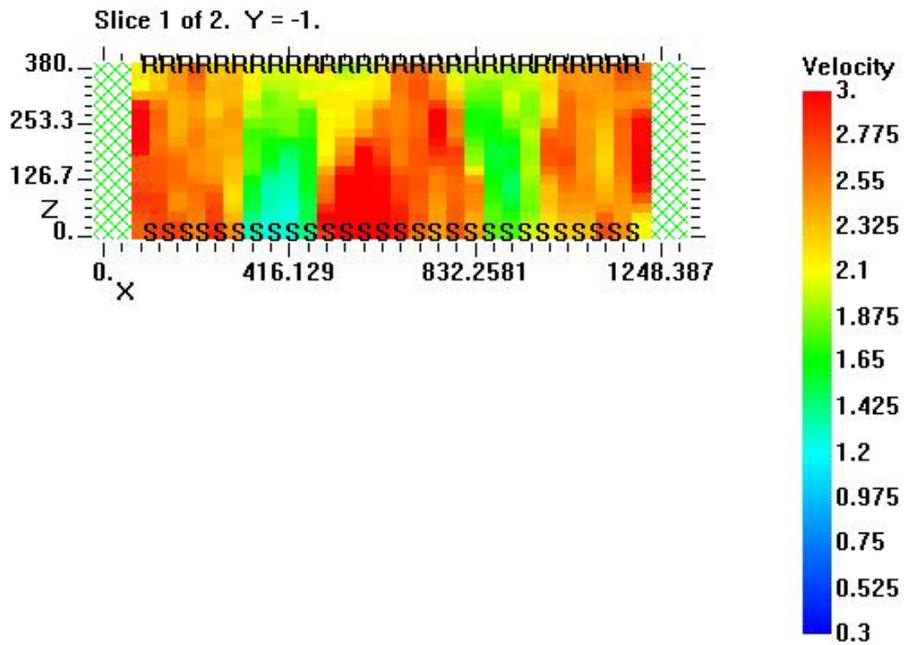


Figura 5.13 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 32x19 con lato di 4 cm x 2 cm.

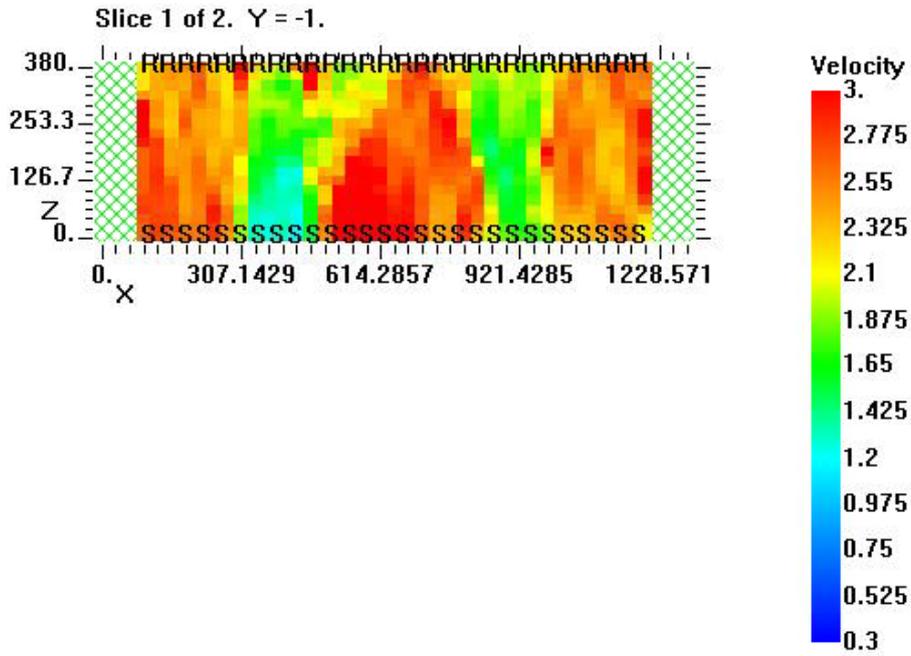


Figura 5.14 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 43x19 con lato di 3 cm x 2 cm.

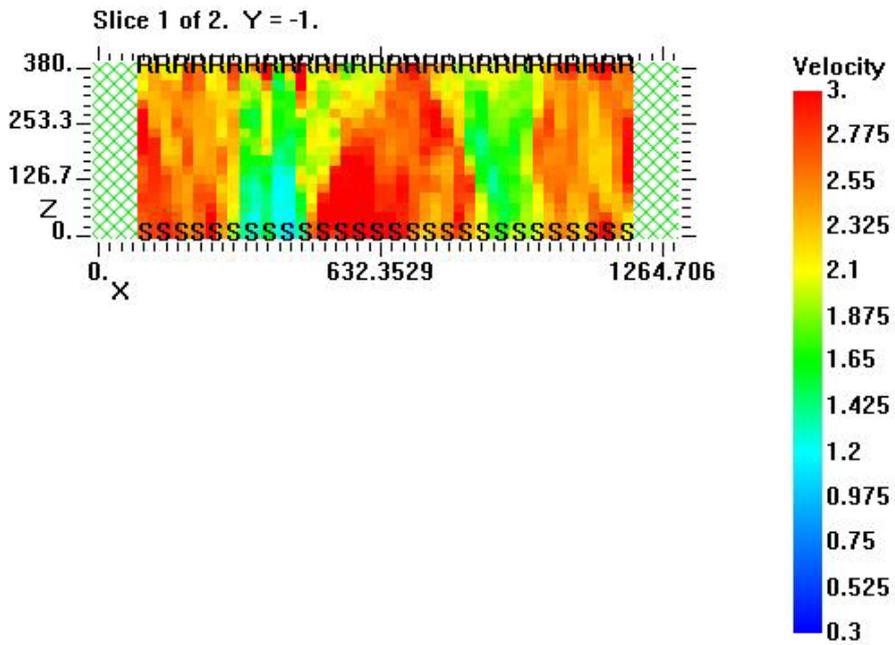


Figura 5.15 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 52x19 con lato di 2,5 cm x 2 cm.

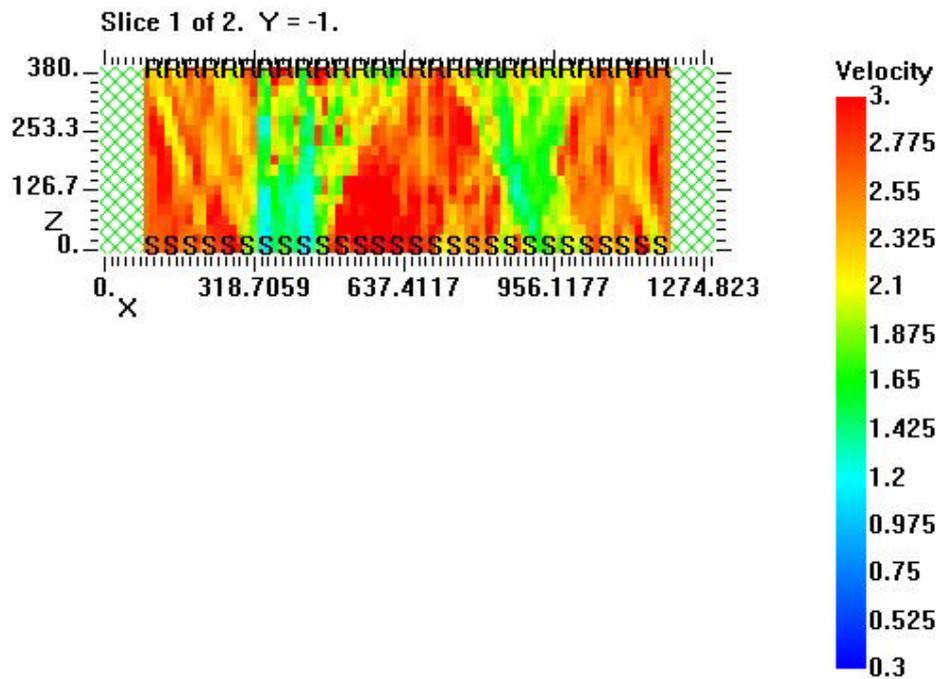


Figura 5.16 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità dopo 5 iterazioni straight con griglia di pixel 86x19 con lato di 1,5 cm x 2 cm.

Si nota che, aumentando le dimensioni dei pixel, la campitura del grafico diventa più omogenea, non mettendo in evidenza i bordi di ciascun quadratino che invece sono ben definiti quando le dimensioni degli stessi sono piccole. L'utilizzo di pixel di forma rettangolare dà risultati simili all'uso di pixel quadrati, quindi variando di poco la forma non si hanno diversità apprezzabili. La dimensione dei lati è la grandezza che deve essere studiata nel particolare, visualizzando attentamente il tipo di campitura ottenuta. Nel prossimo capitolo si vedrà come al variare delle dimensioni dei pixel venga variato il valore dei residui, soprattutto oltre le 5 iterazioni straight. Si è deciso così di scegliere quattro diverse griglie di pixel da applicare nell'analisi di tutti i corsi orizzontali: 52x19 (2,5cmx2cm), 43x19 (3cmx2cm), 32x19 (4cmx2cm) e 34x10 (4cmx4cm). Sono state scartate le dimensioni dei pixel più grandi e più piccole. L'attenzione è stata posta su pixel rettangolare con dimensioni più piccole o simili alla distanza che intercorre tra le stazioni di misura.

5.1.2. Influenza e tipo di iterazioni

Il numero di iterazioni necessarie al software per ricostruire la distribuzione delle velocità sulla sezione dipende dai dati inseriti e viene valutato in funzione sia dei residui ottenuti per ogni iterazione successiva sia della qualità grafica, in termini di visualizzazione dei difetti noti per ogni sezione considerata. Si iniziano le inversioni sempre da iterazioni straight, in numero variabile da 1 a 5 e poi si aggiungono altre iterazioni che possono essere straight o bending. Quest'ultime considerano i percorsi non più rettilinei, ma raggi che per aggirare l'ostacolo seguono traiettorie curvilinee. In un primo step, il modello iniziale di velocità, viene fatto iterare per 30 volte in gruppi di 5 ognuna; ne derivano una serie di files diversi tra loro all'aumentare delle iterazioni. Nel modello iniziale di velocità vengono impostati i parametri come l'intervallo di velocità e le dimensioni dei pixel (si considerano quelle precedentemente studiate). Di pari passo sono stati plottati i valori dei residui per poter vedere a quale valore di iterazione il metodo converge e di conseguenza quando fermare il processo, poichè non si otterrebbero miglioramenti a livello grafico nella visualizzazione dei difetti. In tabella 5.4 sono riassunte le operazioni che verranno eseguite, al fine di valutare l'influenza e il tipo di iterazioni. Si iniziano le inversioni utilizzando una griglia di 86x19 pixel e sole iterazioni straight. In tabella 5.5 vengono riportati i nomi dei file input e output rispettivi per la griglia di 86x19 pixel.. Di seguito sono riportati le mappe tomografiche derivanti dai file output (figure 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22) e il grafico che rappresenta i residui ottenuti per le 30 iterazioni straight (figura 5.23).

Tabella 5.4 Provino PNDE, corso 6, casi studiati al variare del numero di iterazioni e delle dimensioni dei pixel

Numero dei pixel	Dimensione dei pixel	Numero di iterazioni straight	Numero di iterazioni curved	Figure
86x19	1,5 cm x 2 cm	30	0	5.17-5.23
86x19	1,5 cm x 2 cm	5	25	5.24-5.29
64x19	2 cm x 2cm	30	0	5.30-5.36
64x19	2 cm x 2cm	5	25	5.37-5.42
44x13	3 cm x 3cm	30	0	5.43-5.49
44x13	3 cm x 3cm	5	25	5.50-5.55
20x6	6 cm x 6 cm	30	0	5.56
20x6	6 cm x 6 cm	5	25	5.57

43x19	3 cm x 2 cm	1	20	5.58-5.59
43x19	3 cm x 2 cm	2	20	5.60-5.61
43x19	3 cm x 2 cm	3	15	5.62-5.63

Tabella 5.5 Muretto PNDE, corso 6, parametri di inversione con una griglia di 86x19 pixel

Pixel: 86x19		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_100	5	0	5	corso6_101	Figura 5.17
corso6_101	5	0	10	corso6_102	Figura 5.18
corso6_102	5	0	15	corso6_103	Figura 5.19
corso6_103	5	0	20	corso6_104	Figura 5.20
corso6_104	5	0	25	corso6_105	Figura 5.21
corso6_105	5	0	30	corso6_106	Figura 5.22

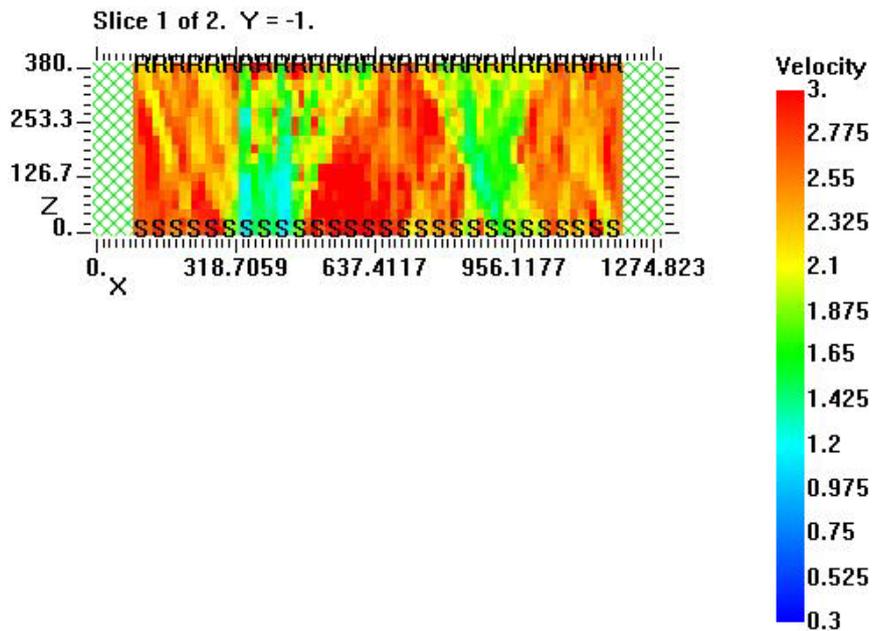


Figura 5.17 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_101

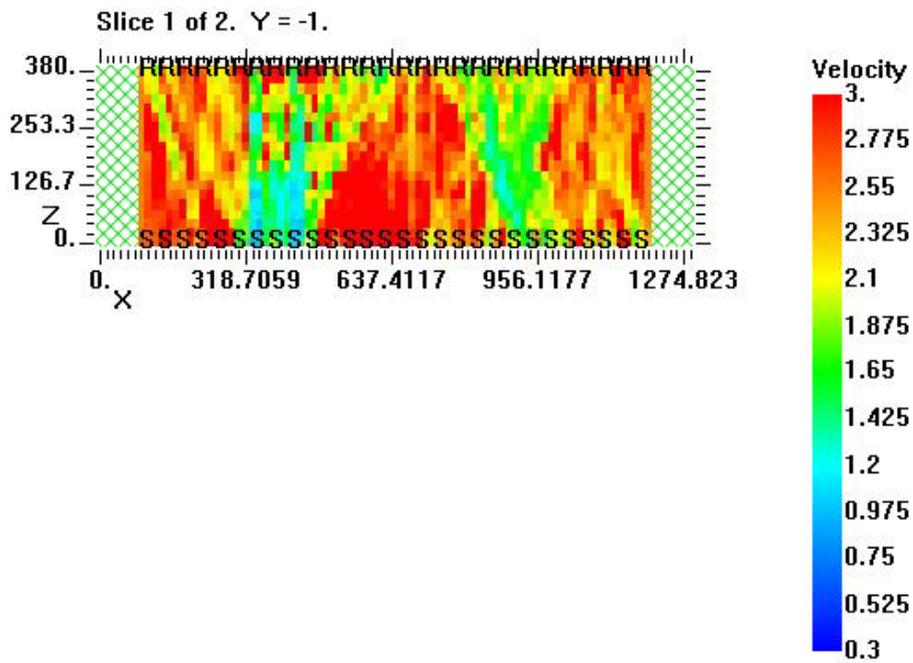


Figura 5.18 Muretto PDE, corso 6, mappa di velocità, 10 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_102

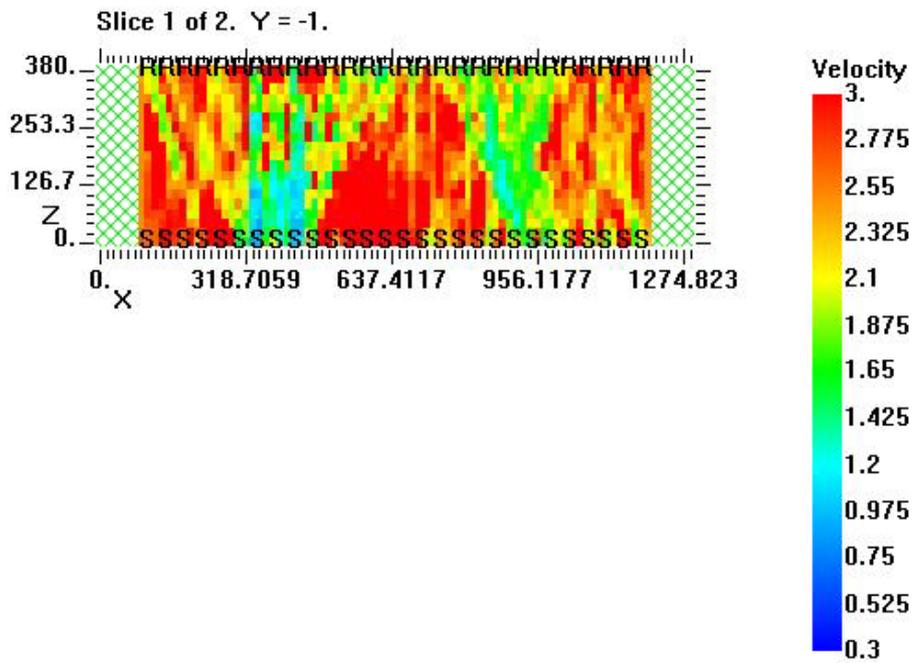


Figura 5.19 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 15 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_103

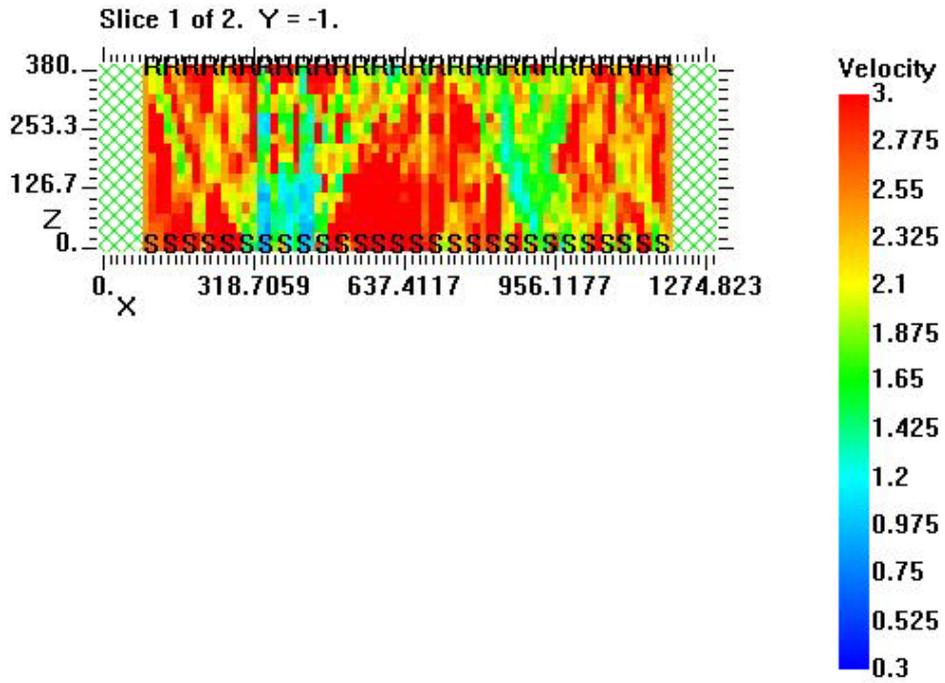


Figura 5.20 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 20 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_104

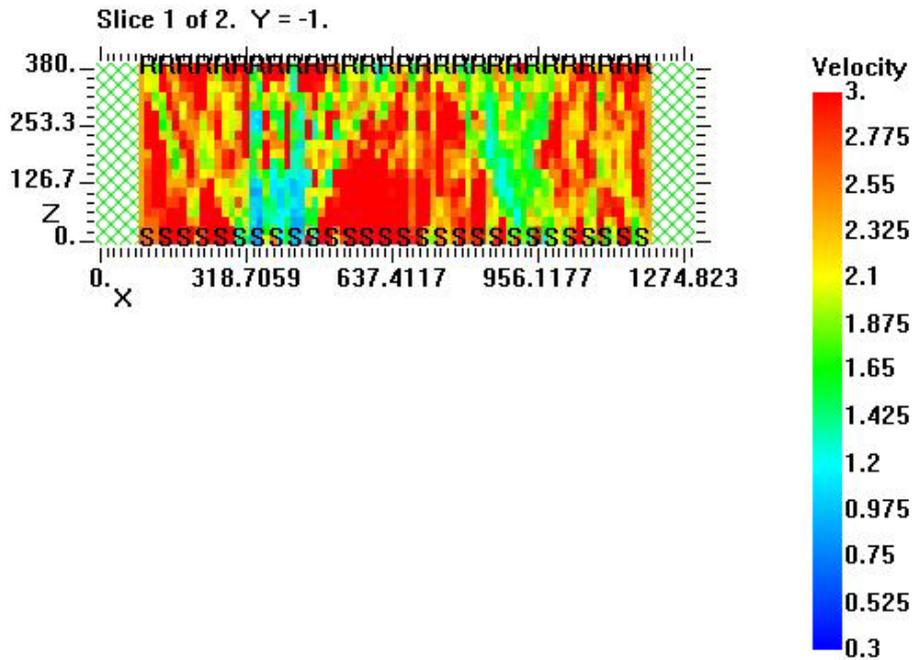


Figura 5.21 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 25 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_105

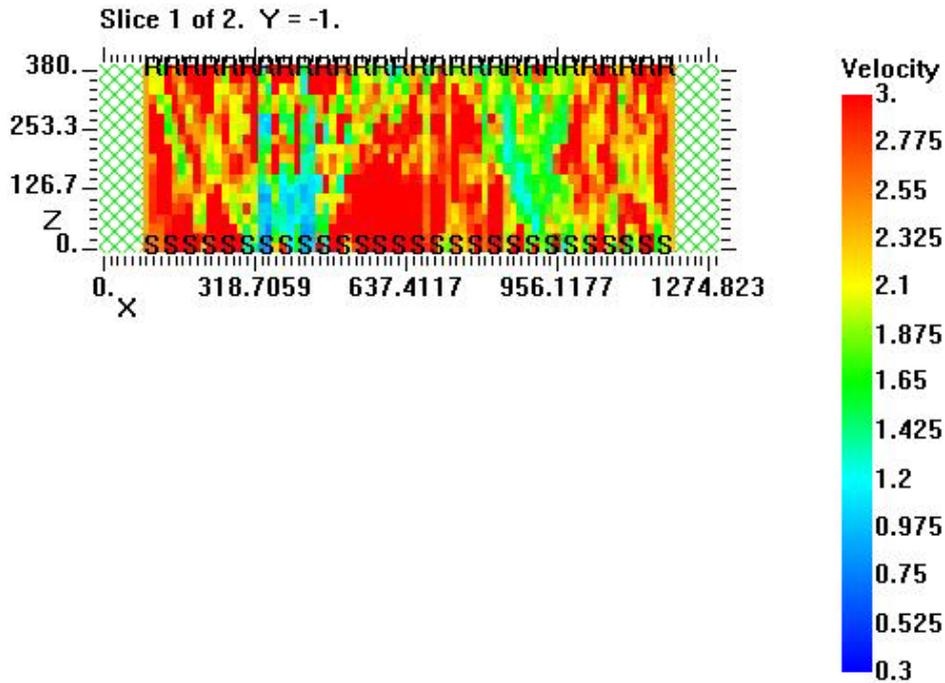


Figura 5.22 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 30 iterazioni straight, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_106

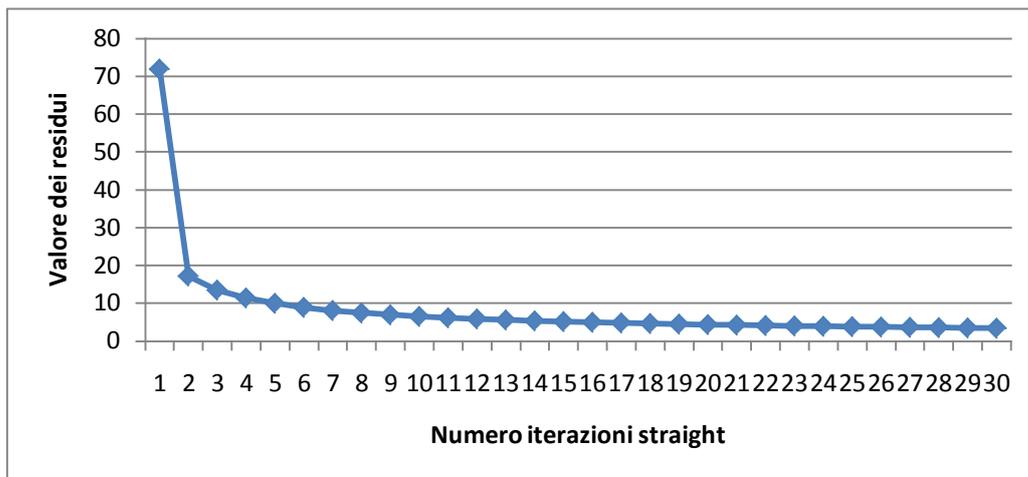


Figura 5.23 Muretto PNDE, corso 6, valore dei residui con 30 iterazioni straight, per una griglia di 86x19 pixel

Dal grafico dei residui si nota che già dalla decima iterazione il metodo converge. I valori successivi si stabilizzano intorno al valore 4, diminuendo all'aumentare del numero di iterazioni. Questo viene rispecchiato anche nelle immagini dei file output, infatti tra il file output corso6_101 e file output corso6_102 si osservano delle variazioni abbastanza significative, mentre nei file output con un numero di iterazioni superiori non si evidenziano variazioni di velocità notevoli.

Dopo aver visualizzato l'andamento solo con iterazioni straight, è interessante vedere come avviene l'inversione dei dati utilizzando l'opzione di raggi bending. Si iniziano le inversioni sempre da 5 iterazioni straight, andando a sommare quelle curved per un totale di 30 iterazioni in gruppi di 5 ognuna (tabella 5.6). Le mappe di velocità per ciascun file output mostrano i risultati ottenuti, utilizzando raggi curved (figure 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27e 5.28).

Tabella 5.6 Muretto PNDE, corso 6, parametri di inversione con una griglia di 86x19 pixel

Pixel: 86x19		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_100	5	0	5	corso6_101	Figura 5.17
corso6_101	0	5	10	corso6_107	Figura 5.24
corso6_107	0	5	15	corso6_108	Figura 5.25
corso6_108	0	5	20	corso6_109	Figura 5.26
corso6_109	0	5	25	corso6_110	Figura 5.27
corso6_110	0	5	30	corso6_111	Figura 5.28

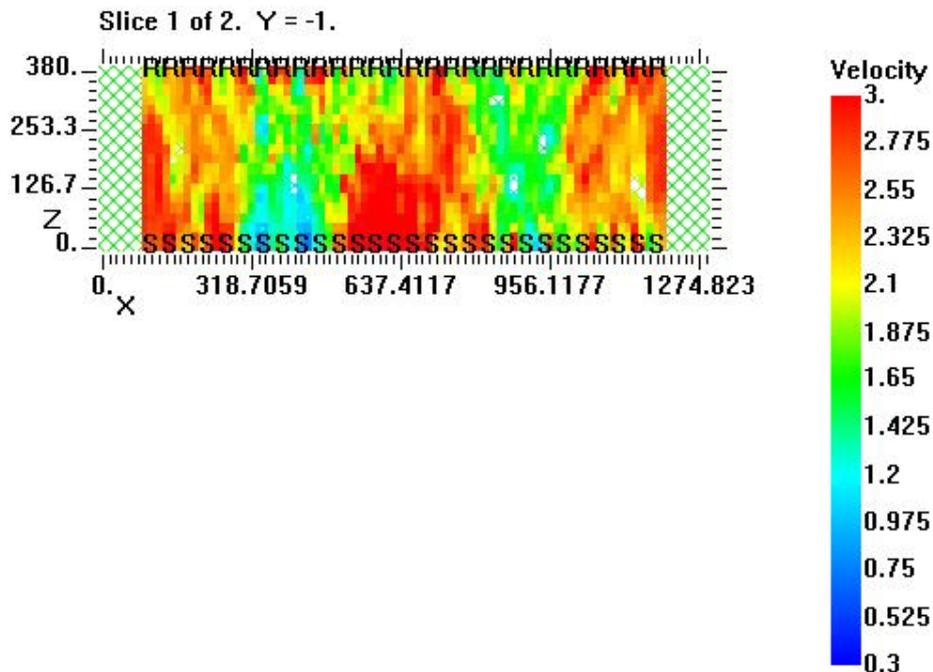


Figura 5.24 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_107

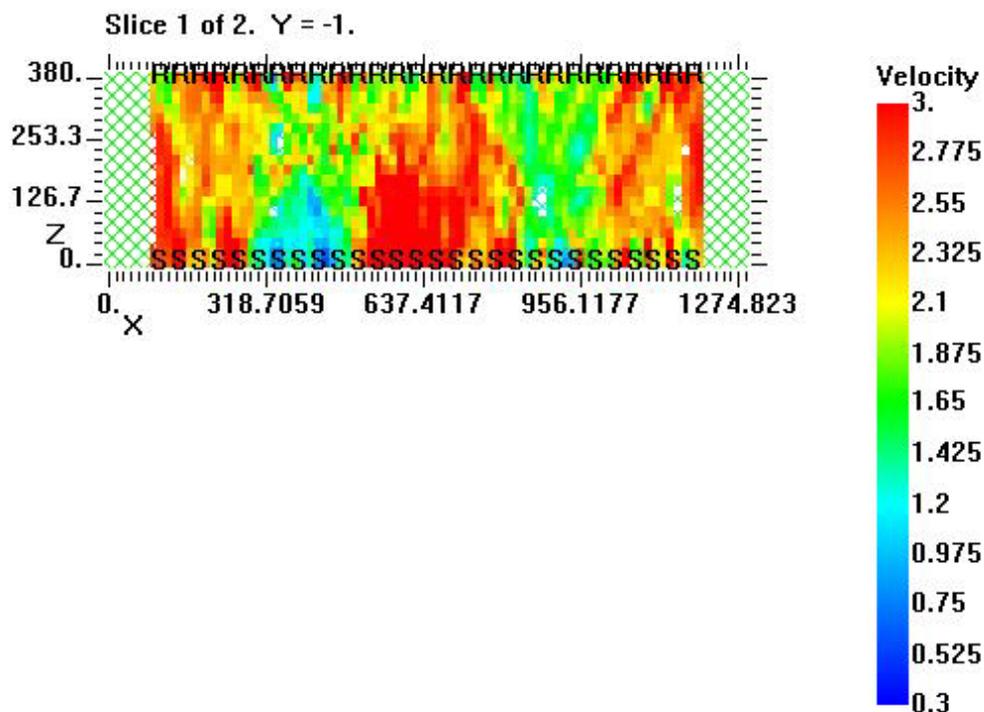


Figura 5.25 muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_108

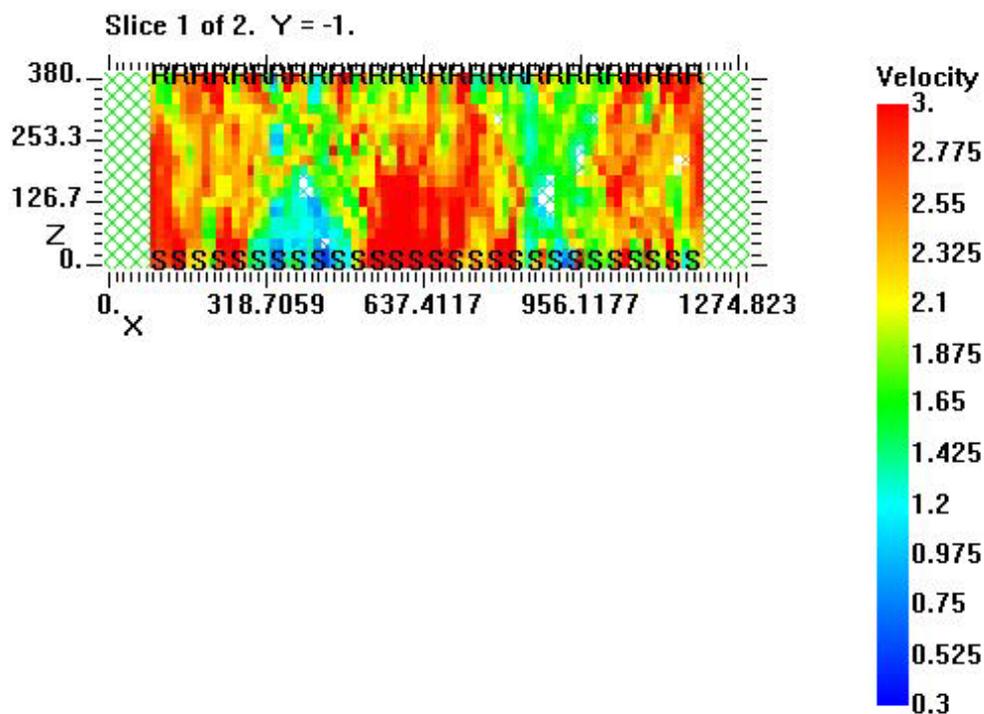


Figura 5.26 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_109

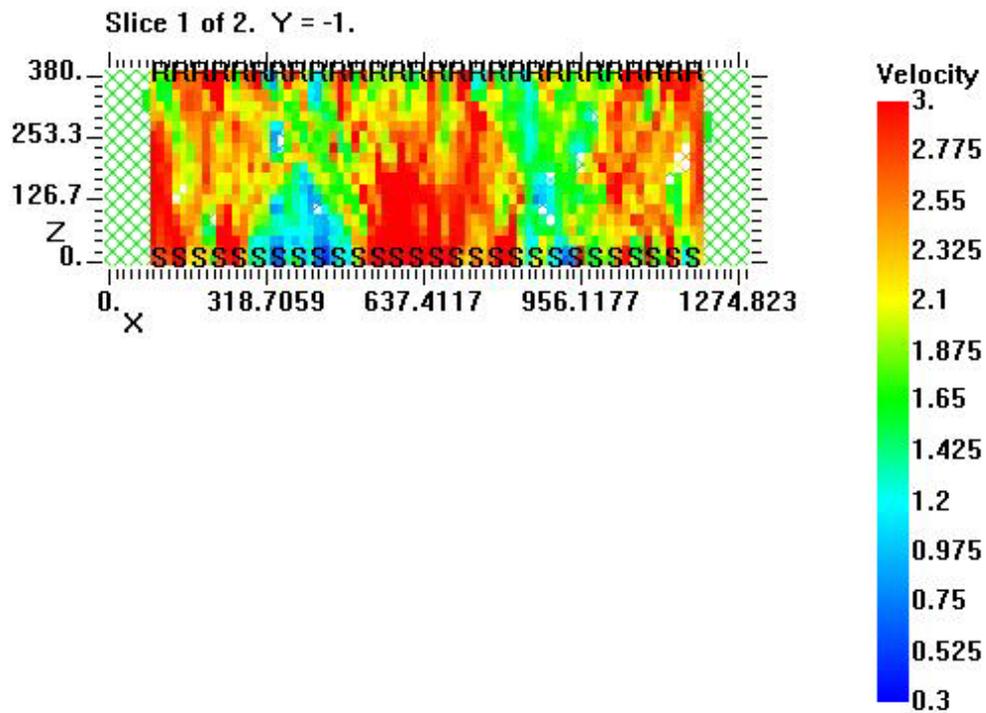


Figura 5.27 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_110

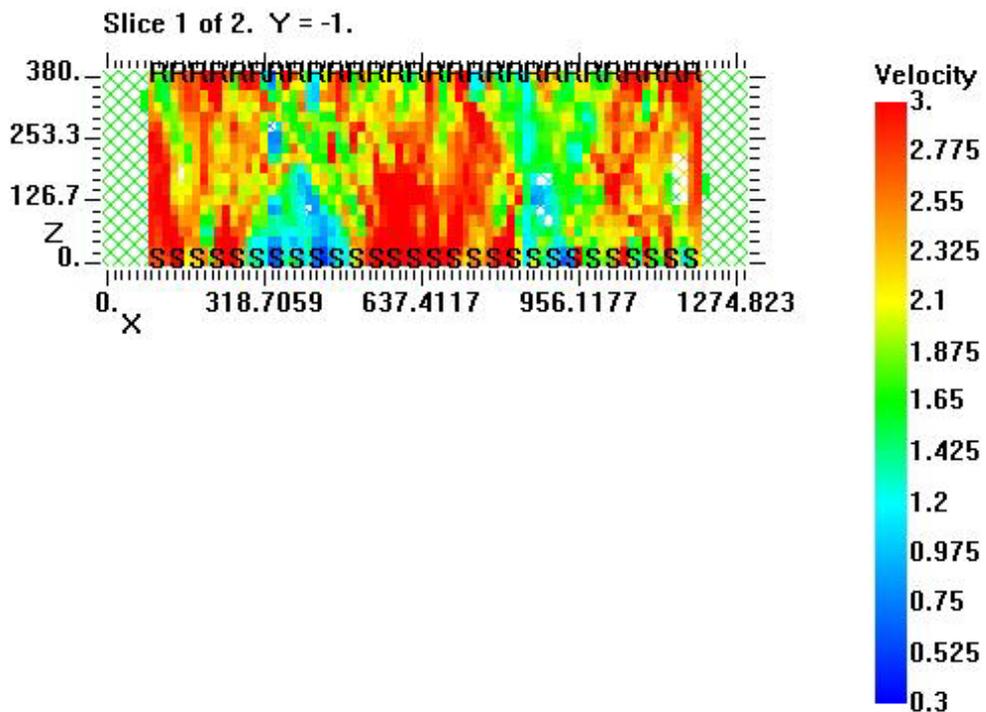


Figura 5.28 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 25 curved, griglia di 86 x 19 pixel, file output corso6_111

Per ciascuna ripetizione si valutano i valori dei residui che mostrano un andamento iperbolico nel caso di iterazioni straight e un andamento iperbolico, ma con presenza di picchi nel caso delle curved, dovuto al fatto che durante il tracciamento dei fronti d'onda si sono presentati dei "loop", cioè avvolgimenti delle curve su se stesse (figura 5.29). Il valore alla trentesima iterazione per iterazioni straight e curved è circa pari a 10, un valore nettamente più alto rispetto al valore alla stessa iterazione per sole iterazioni straight. In questo caso solo dalla quindicesima iterazione in poi si hanno dei valori più o meno stabili. Il file output corso6_109, corrispondente a 20 iterazioni di cui 5 straight e 15 curved, individua due zone di colore verde-azzurro che corrispondono quantitativamente ai due difetti presenti nella sezione, identificandone in maniera piuttosto precisa la posizione, ma meno le dimensioni effettive e la forma. Proseguendo con le iterazioni il risultato non si raffina e non diventa più dettagliato. Ciò ci porta alla conclusione che oltre le 20 iterazioni non è necessario proseguire, ma è necessario arrivare almeno alle 15-20 iterazioni per avere un discreto risultato.

Allo stesso modo si è proseguito con lo stesse tipologie di prove anche per le altre dimensioni delle griglia di pixel in cui è stata suddivisa la sezione. In tabella 5.7 sono riportati i file input ed output per una griglia di 64x19 pixel, mentre nelle figure 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36 le immagini ricavate dal Geotom e i valori dei residui.

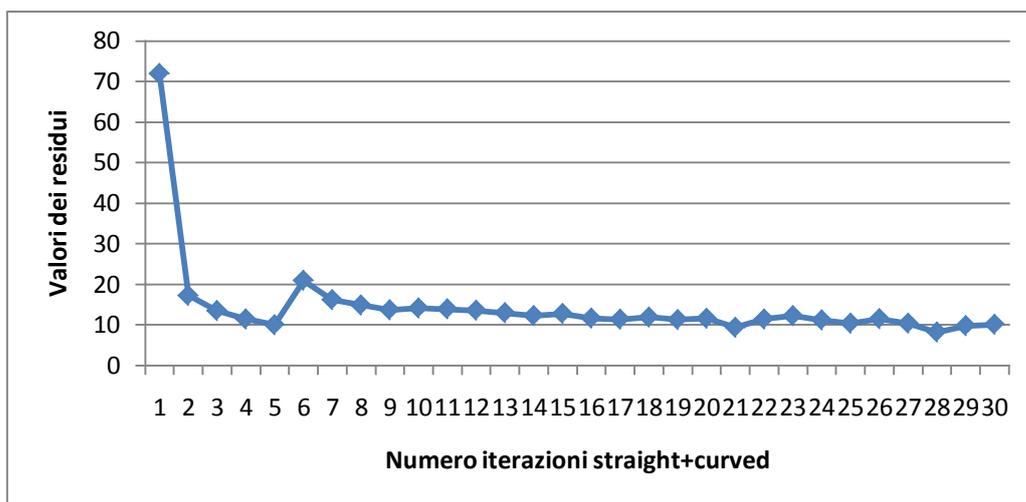


Figura 5.29 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazioni straight+curved per una griglia di 86x19 pixel

Tabella 5.7 Muretto PNDE, corso 6, parametri di inversione con una griglia di 64x19 pixel

Pixel: 64x19		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_112	5	0	5	corso6_113	Figura 5.30
corso6_113	5	0	10	corso6_114	Figura 5.31
corso6_114	5	0	15	corso6_115	Figura 5.32
corso6_115	5	0	20	corso6_116	Figura 5.33
corso6_116	5	0	25	corso6_117	Figura 5.34
corso6_117	5	0	30	corso6_118	Figura 5.35

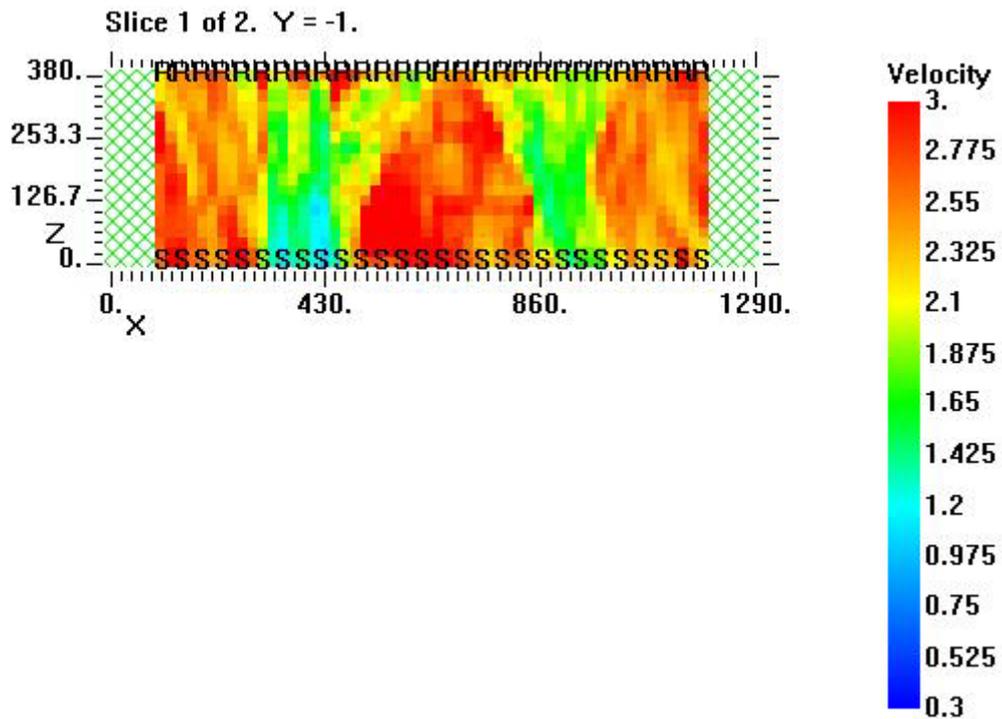


Figura 5.30 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_113

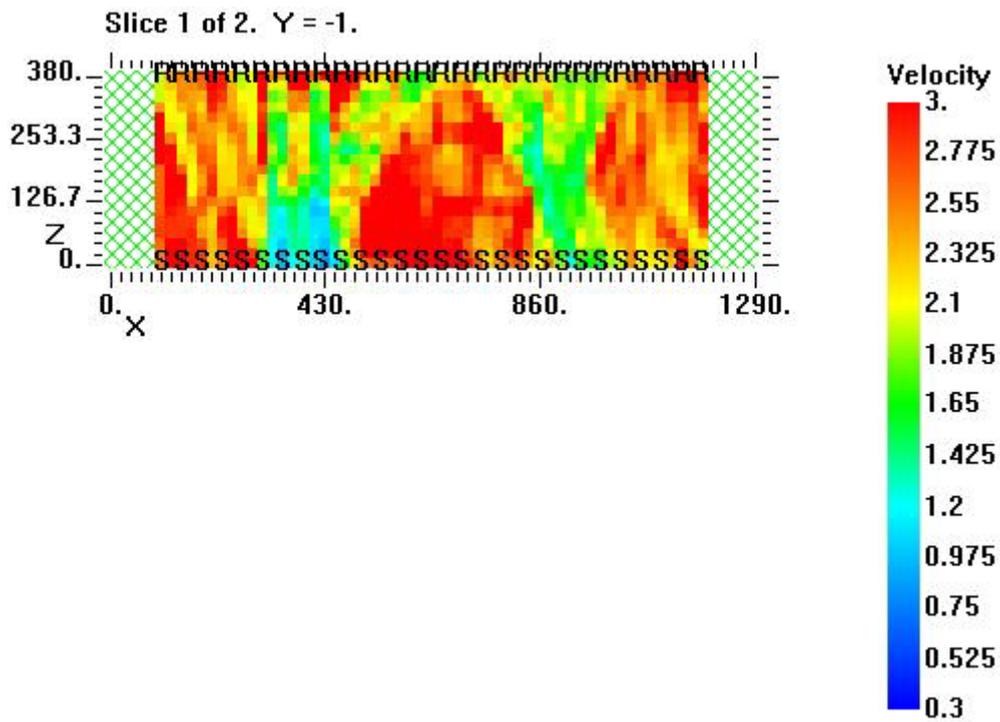


Figura 5.31 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 10 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_114

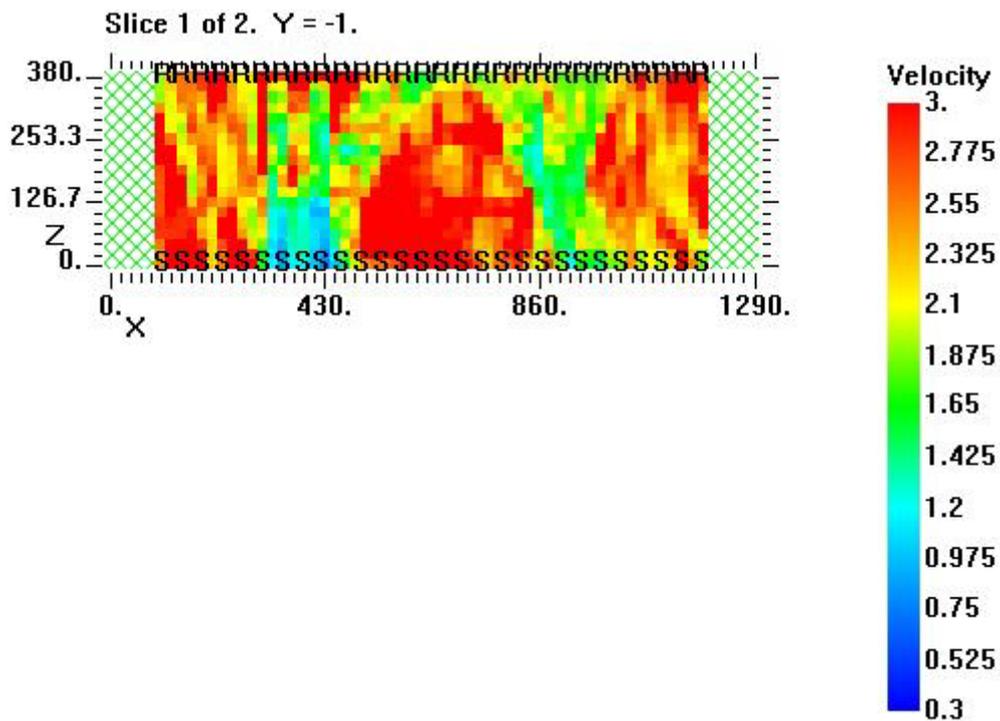


Figura 5.32 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 15 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_115

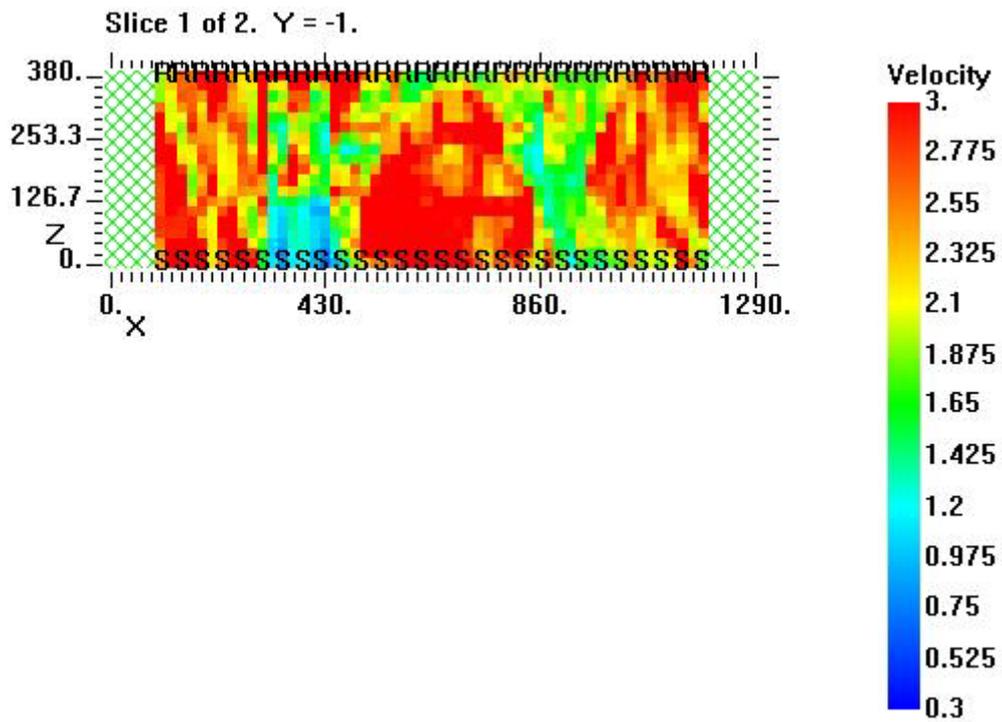


Figura 5.33 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 20 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_116

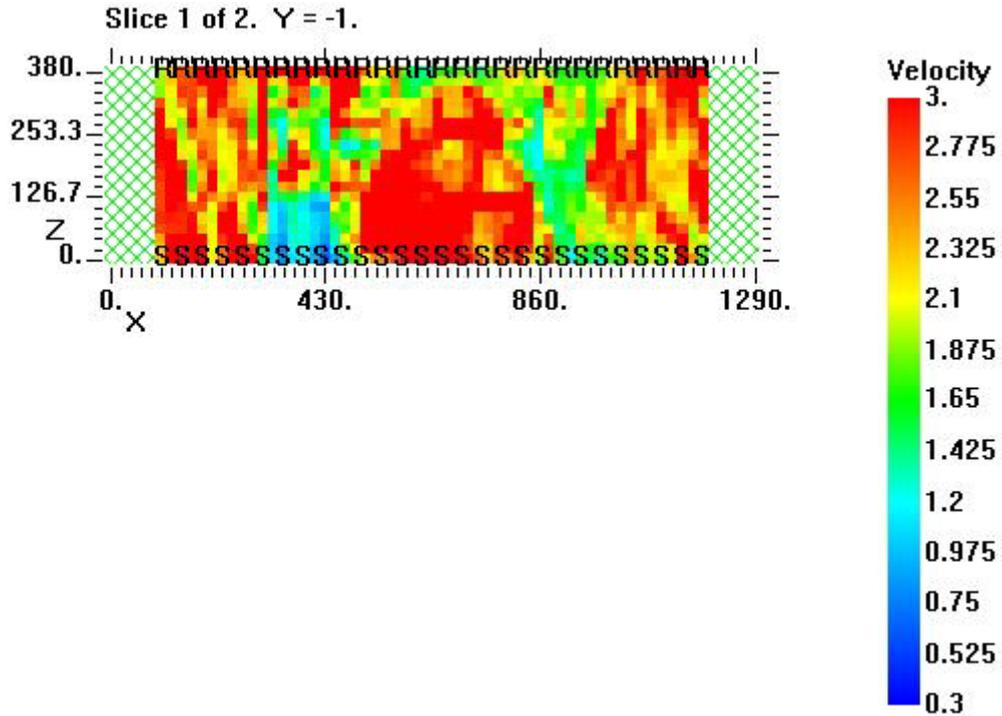


Figura 5.34 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 25 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_117

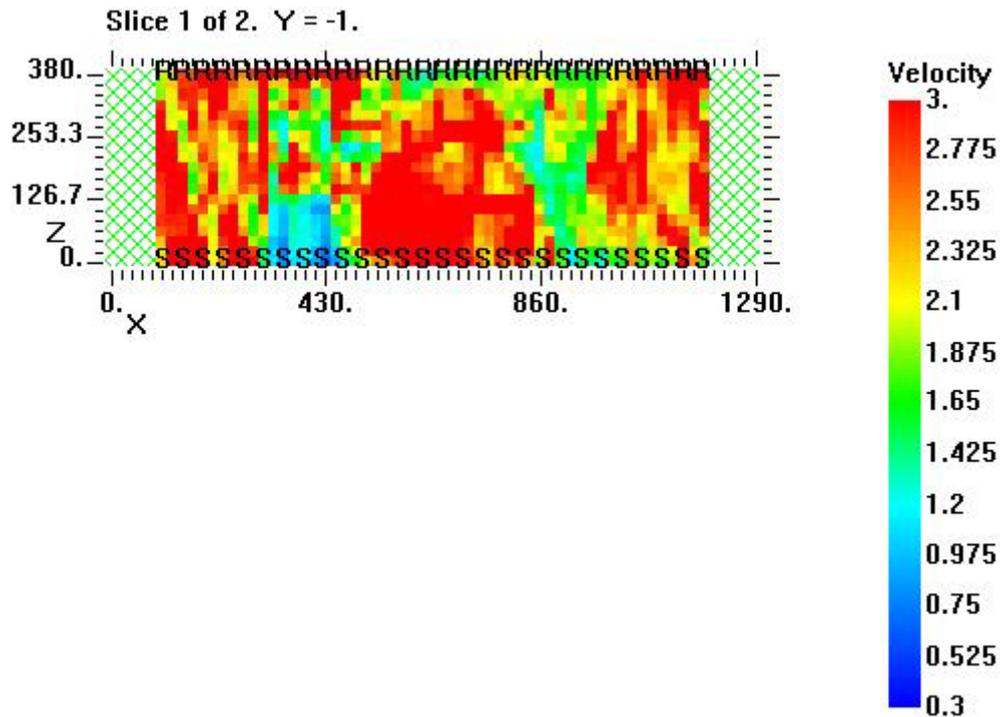


Figura 5.35 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 30 iterazioni straight, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_118

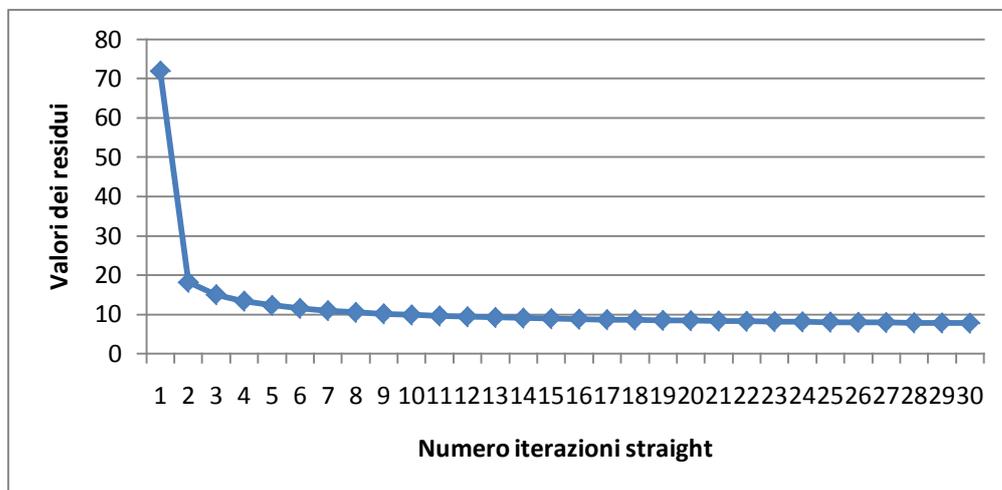


Figura 5.36 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight per una griglia di 64x19 pixel

La convergenza del metodo si può già identificare intorno alla quinta iterazione, poiché i valori per iterazioni successive sono piuttosto simili. Rispetto ai valori di residui per la griglia di pixel 86x19 di sole iterazioni straight, i residui sono più alti in questo caso. Se si utilizzano iterazioni curved, ci possiamo aspettare un aumento del valore dei residui

rispetto alle straight. In tabella 5.8 sono riassunte le 30 iterazioni straight e curved e le rispettive immagini tomografiche sono riportate nelle figure 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 e 5.41.

Tabella 5.8 Muretto PNDE, corso 6, parametri di inversione con una griglia di 64x19 pixel

Pixel: 64x19		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_112	5	0	5	corso6_113	Figura 5.30
corso6_113	0	5	10	corso6_119	Figura 5.37
corso6_119	0	5	15	corso6_120	Figura 5.38
corso6_120	0	5	20	corso6_121	Figura 5.39
corso6_121	0	5	25	corso6_122	Figura 5.40
corso6_122	0	5	30	corso6_123	Figura 5.41

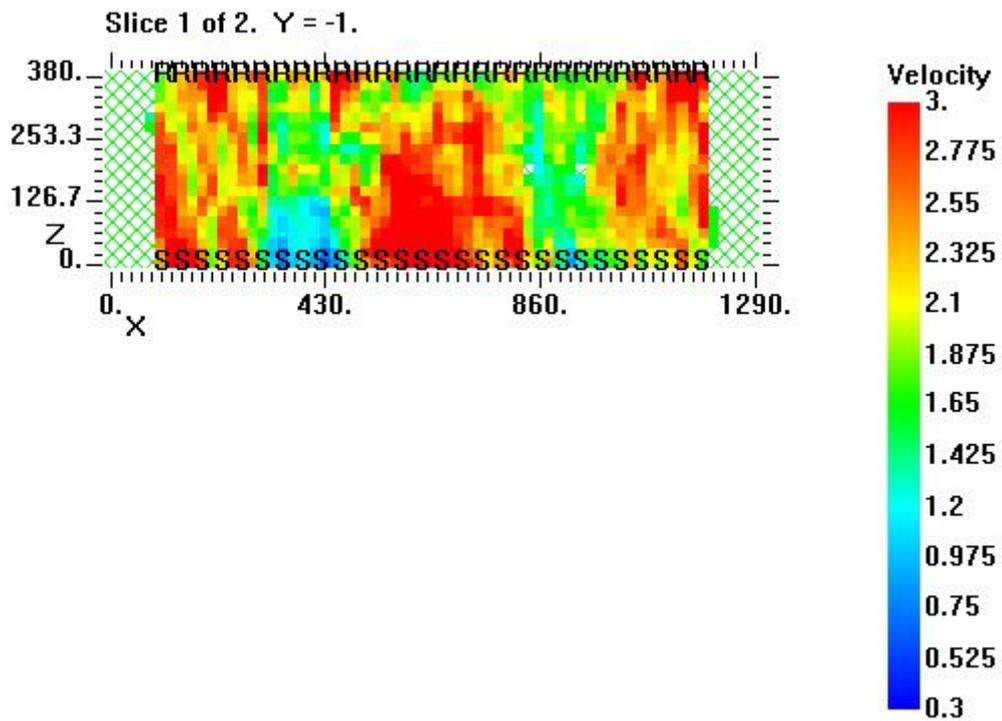


Figura 5.37 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_119

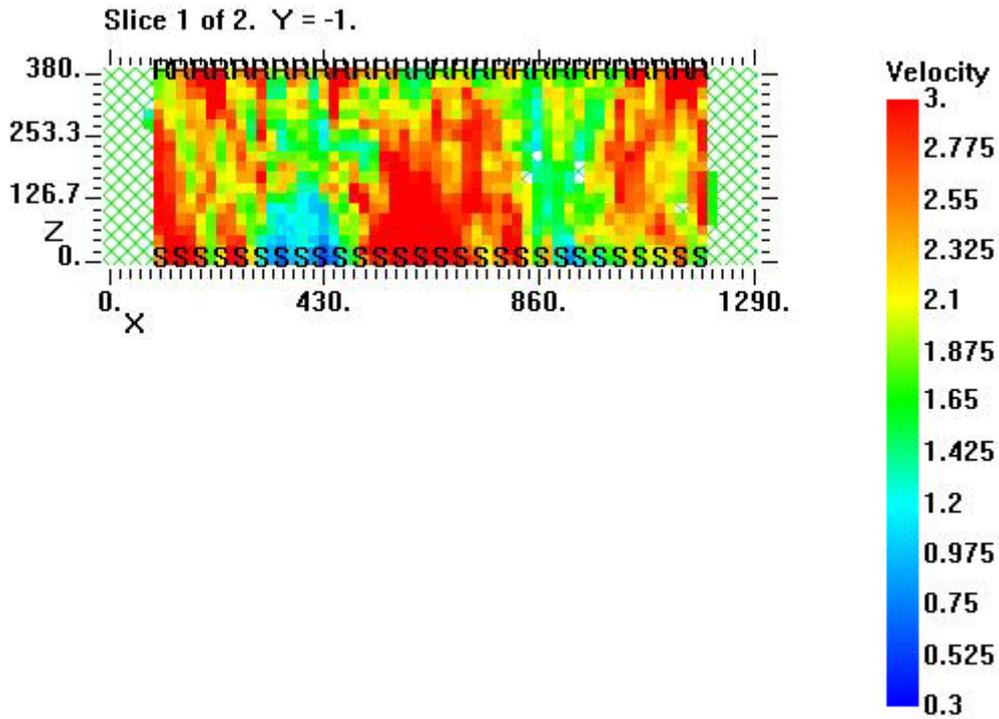


Figura 5.38 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_120

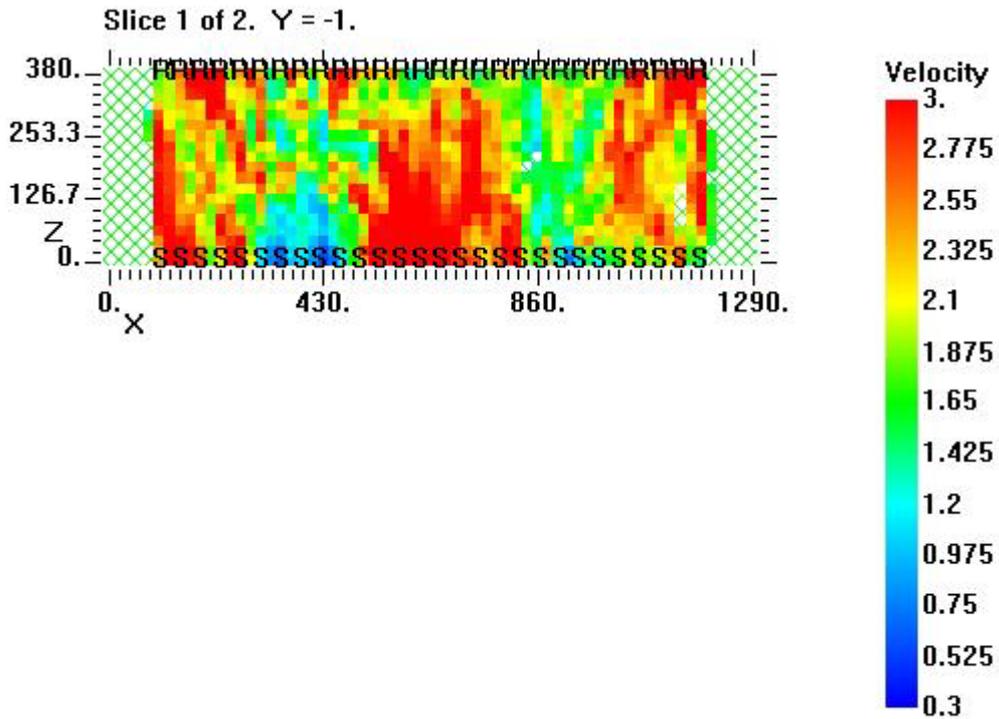


Figura 5.39 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_121

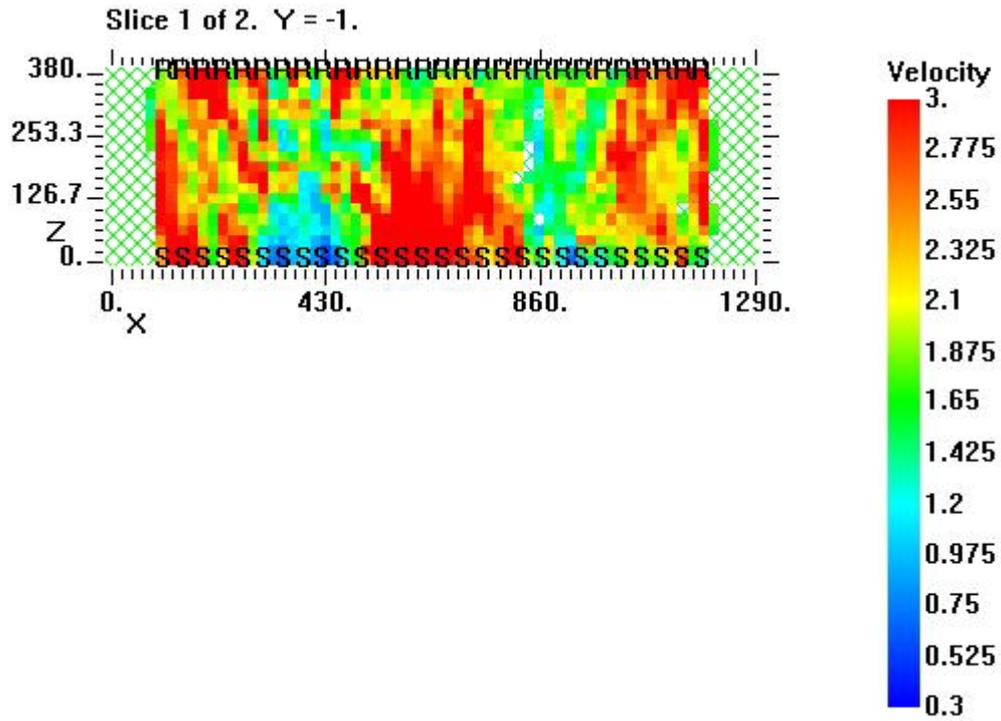


Figura 5.40 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_122

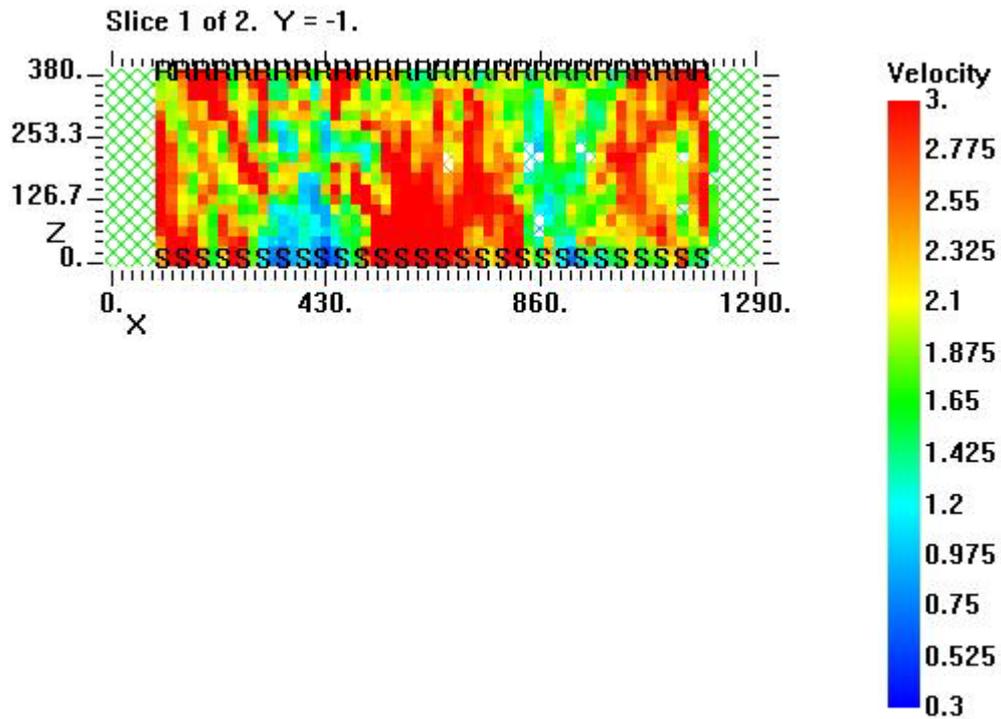


Figura 5.41 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 25 curved, griglia di 64 x 19 pixel, file output corso6_123

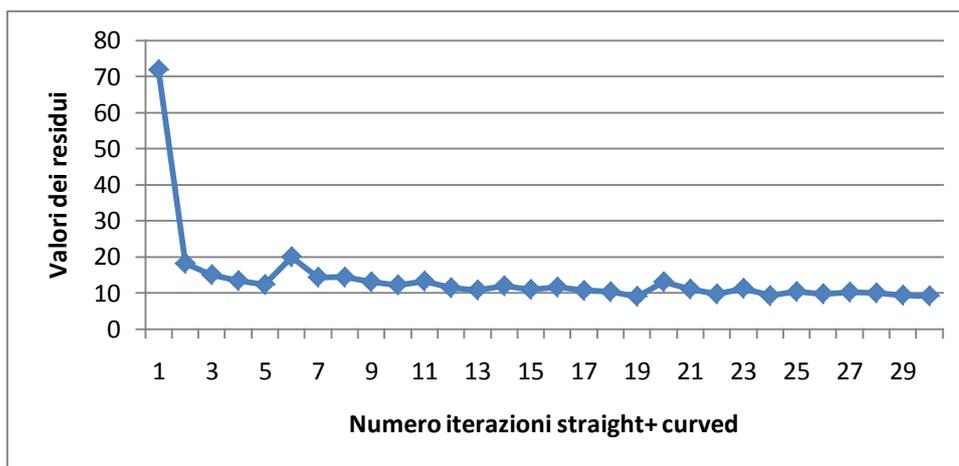


Figura 5.42 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight+curved per una griglia di 64x19 pixel

Oltre la ventesima iterazione (file output corso6_121), il difetto di sinistra assume una forma più simile a quella reale, mentre la zona che identifica il difetto di destra si disperde e non dà informazioni più dettagliate sulla posizione dell'anomalia. Ciò è da tenere in considerazione, in quanto la scelta del numero più adatto di iterazioni deve portare ad una rappresentazione dei difetti più vero somigliante alla realtà. Si deve fare un bilanciamento tra la due definizioni delle imperfezioni, in modo da non prediligere, per quanto sia possibile, la raffigurazione migliore di un difetto rispetto all'altro. Il grafico dei residui ottenuto per queste 30 iterazioni è rappresentato in figura 5.42. I residui delle iterazioni straight e curved hanno un andamento simile a quello delle stesse per una griglia di pixel di 86x19. Prima è stato ipotizzato ci fosse un aumento dei valori dei residui rispetto al caso di 86x19 pixel, ma ciò è stato smentito perché i valori dopo la decima iterazione più o meno si equivalgono. Proseguendo con griglie con dimensioni di pixel maggiori, le stesse analisi sono state eseguite per una griglia di 44x13 pixel corrispondente a pixel quadrati di lato 3 cm x 3 cm. Nella tabella 5.9 sono riportate le iterazioni straight attuate e le figure 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48 rappresentano le distribuzioni di velocità corrispondenti. Al fine di confrontare i valori è utile creare un grafico con il valore dei residui (figura 5.49) che ci indica la bontà del metodo che stiamo utilizzando. Per completare l'analisi sono state fatte anche iterazioni curved (tabella 5.10), visualizzate le rispettive mappe di velocità (figure 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.54) e il grafico dei residui (figura 5.55).

Tabella 5.9 Muretto PNDE, corso 6, parametri di inversione con una griglia di 64x19 pixel

Pixel: 44x13		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_196	5	0	5	corso6_197	Figura 5.43
corso6_197	5	0	10	corso6_198	Figura 5.44
corso6_198	5	0	15	corso6_199	Figura 5.45
corso6_199	5	0	20	corso6_200	Figura 5.46
corso6_200	5	0	25	corso6_201	Figura 5.47
corso6_201	5	0	30	corso6_202	Figura 5.48

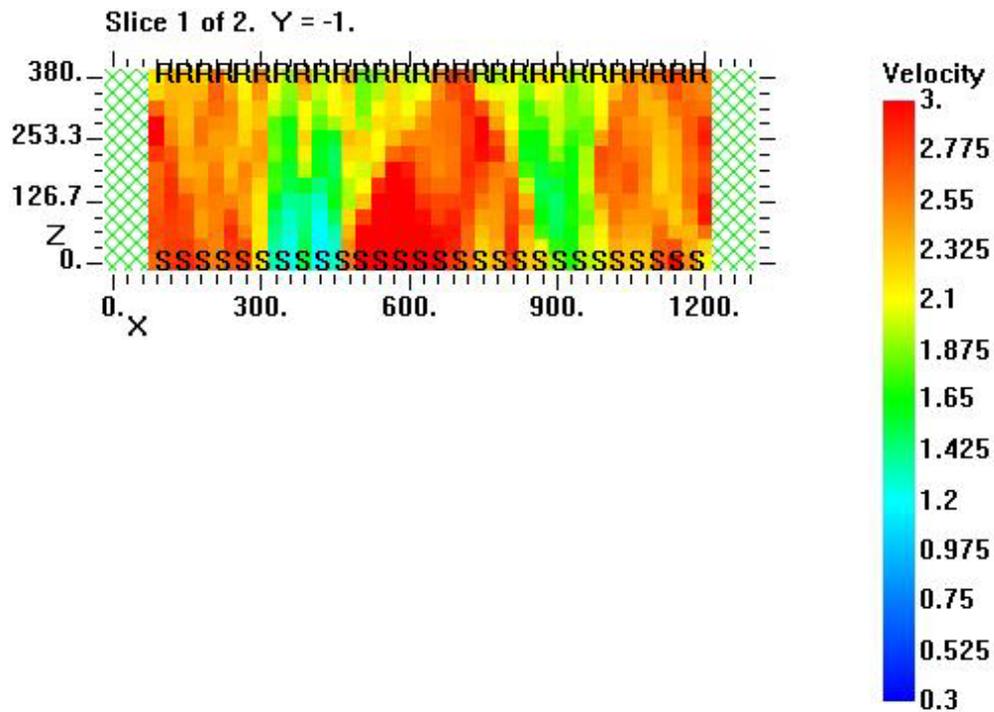


Figura 5.43 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_197

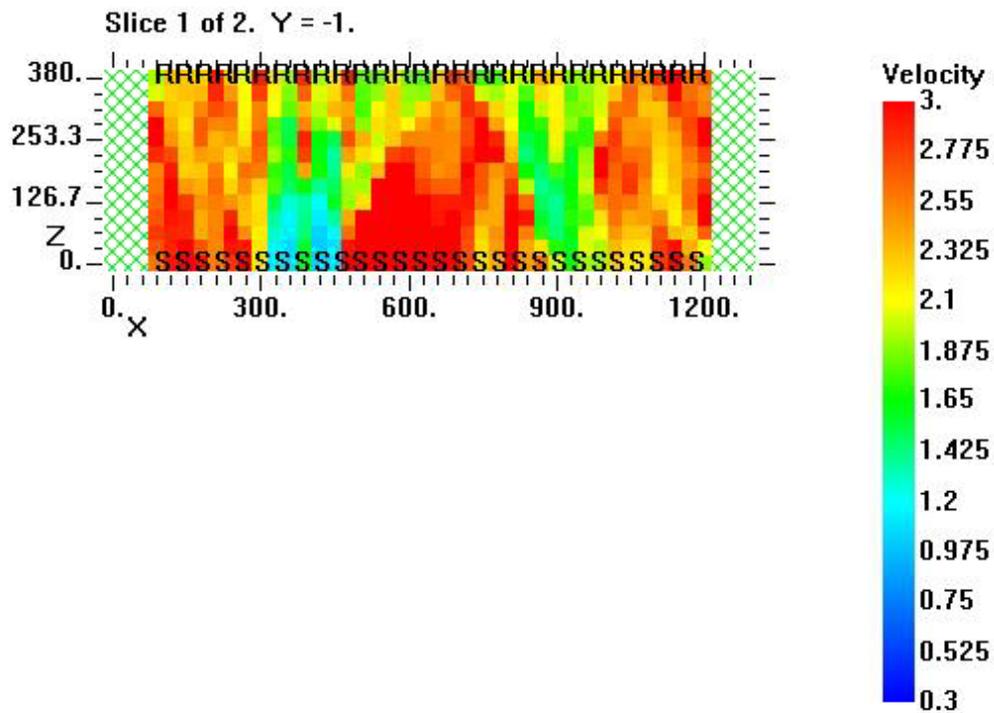


Figura 5.44 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 10 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_198

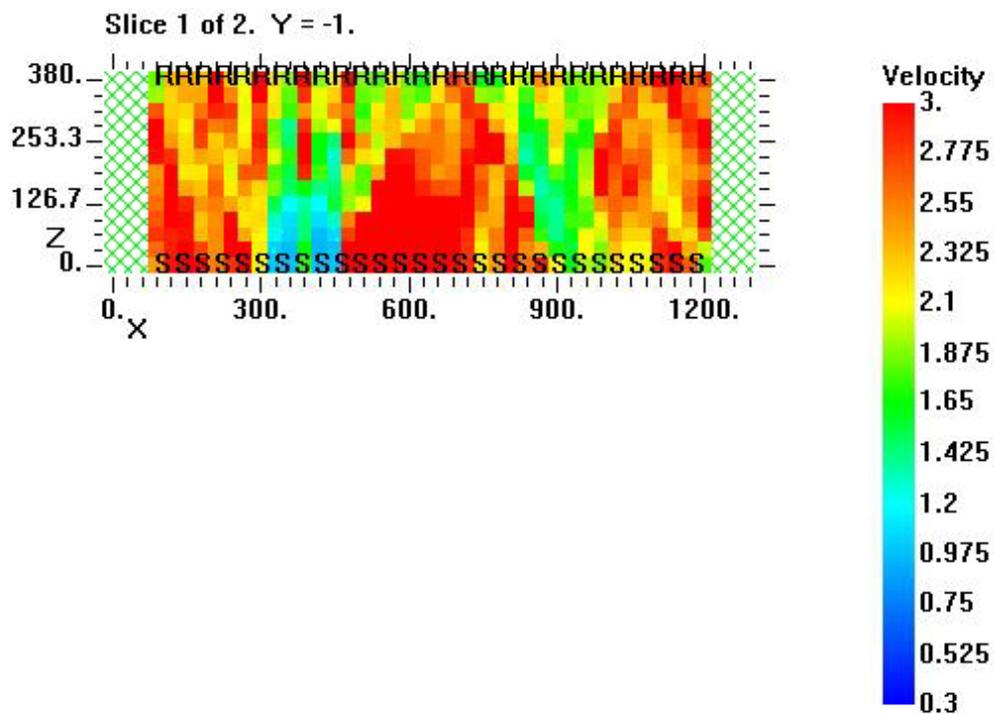


Figura 5.45 Muretto PNDE, corso 6. mappa di velocità, 15 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_199

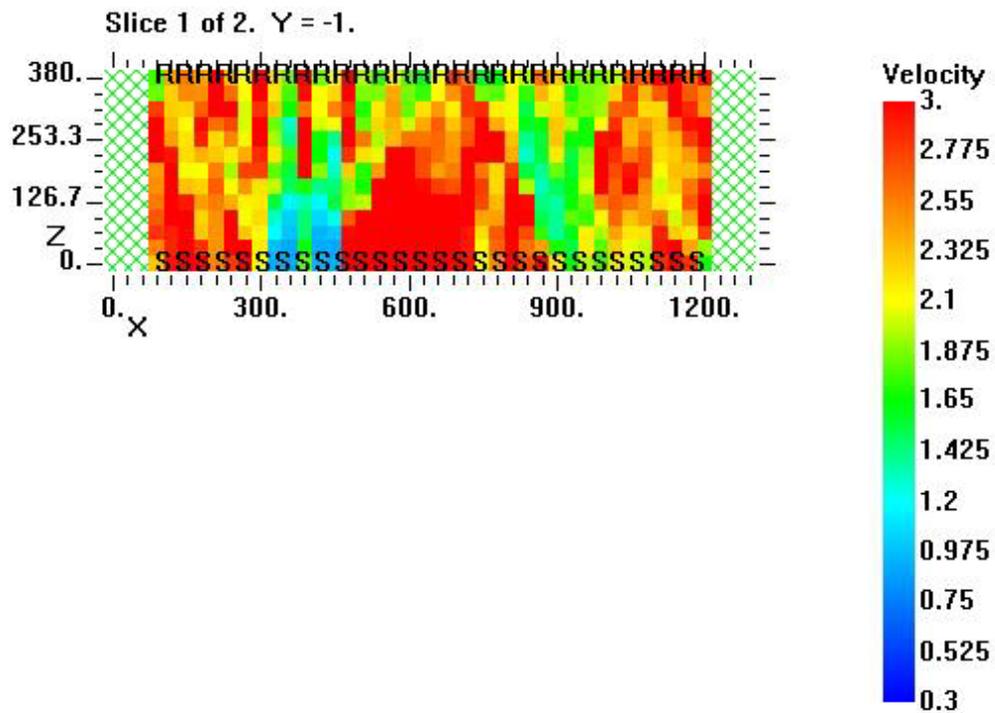


Figura 5.46 Mureto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 20 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_200

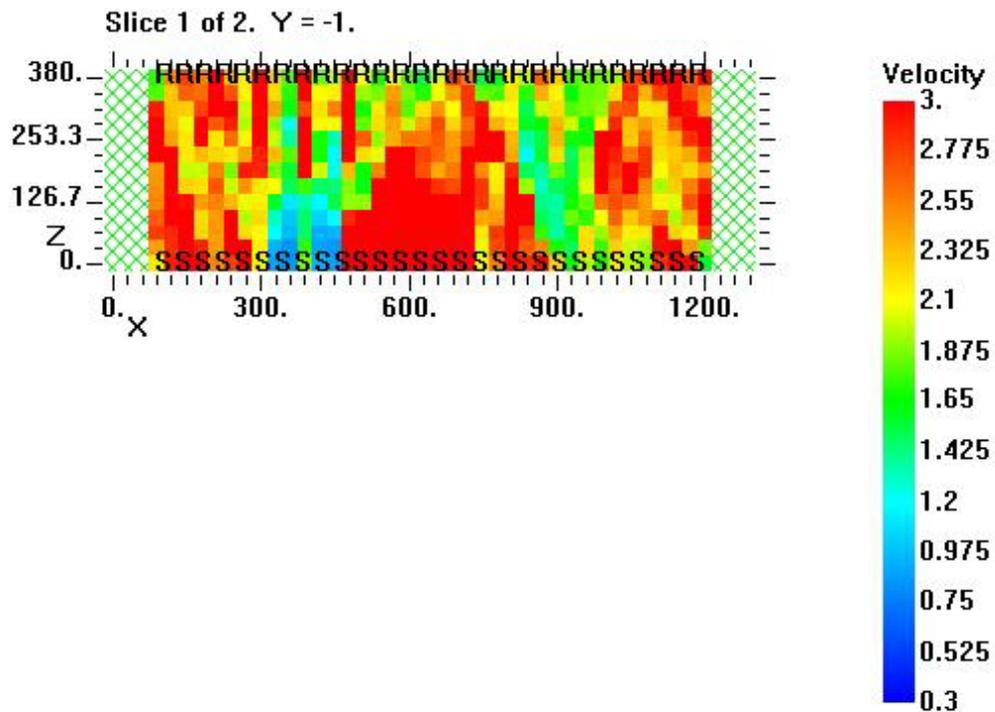


Figura 5.47 Mureto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 25 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_201

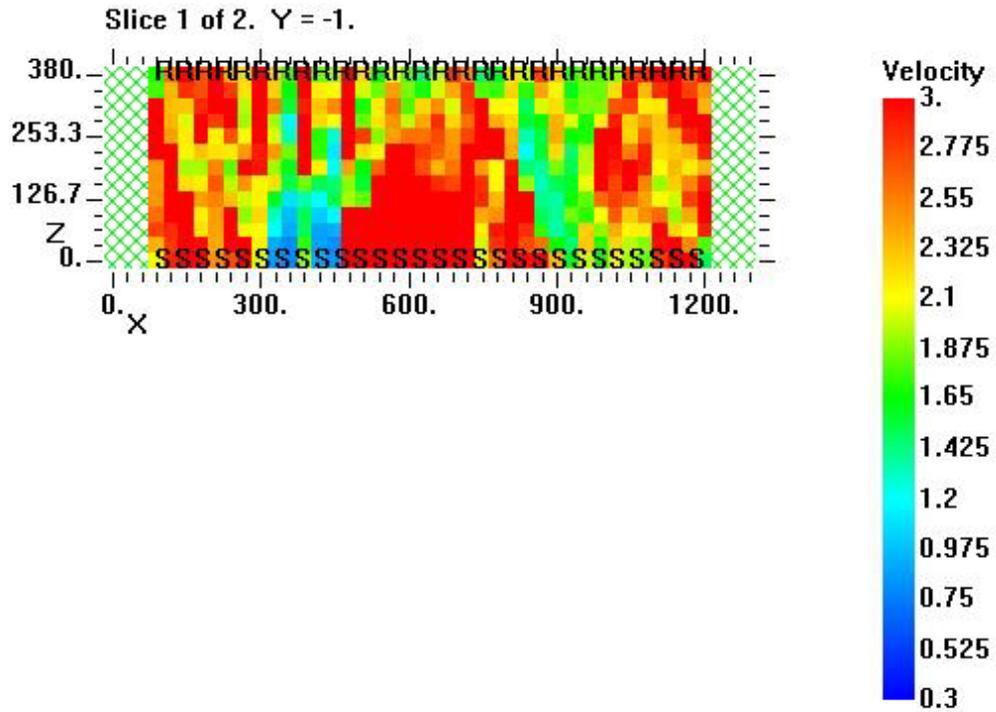


Figura 5.48 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 30 iterazioni straight, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_202

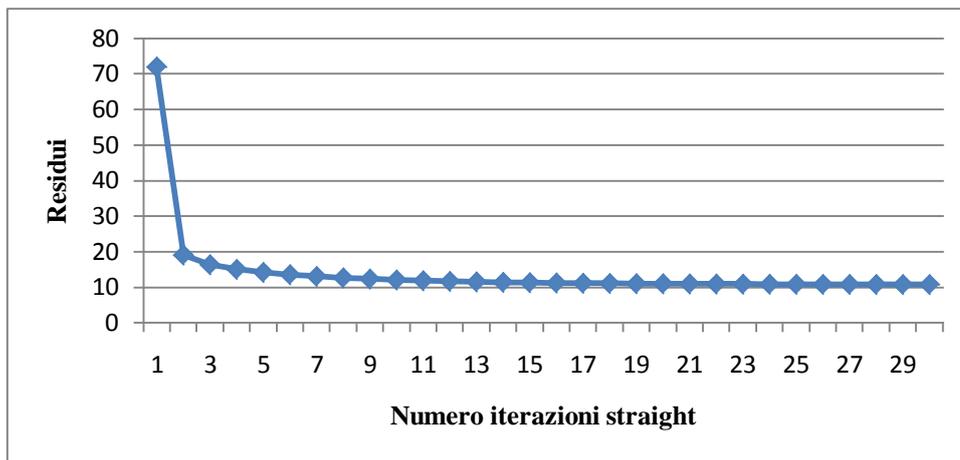


Figura 5.49 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight per una griglia 44x13 pixel

Tabella 5.10 Muretto PNDE, corso, parametri di inversione con una griglia di 44 x 13 pixel

Pixel: 44x13		Intervallo velocità: 0,3 Km/s- 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappa di velocità
corso6_196	5	0	5	corso6_197	Figura 5.43
corso6_197	0	5	10	corso6_203	Figura 5.50
corso6_203	0	5	15	corso6_204	Figura 5.51
corso6_204	0	5	20	corso6_205	Figura 5.52
corso6_205	0	5	25	corso6_206	Figura 5.53
corso6_206	0	5	30	corso6_207	Figura 5.54

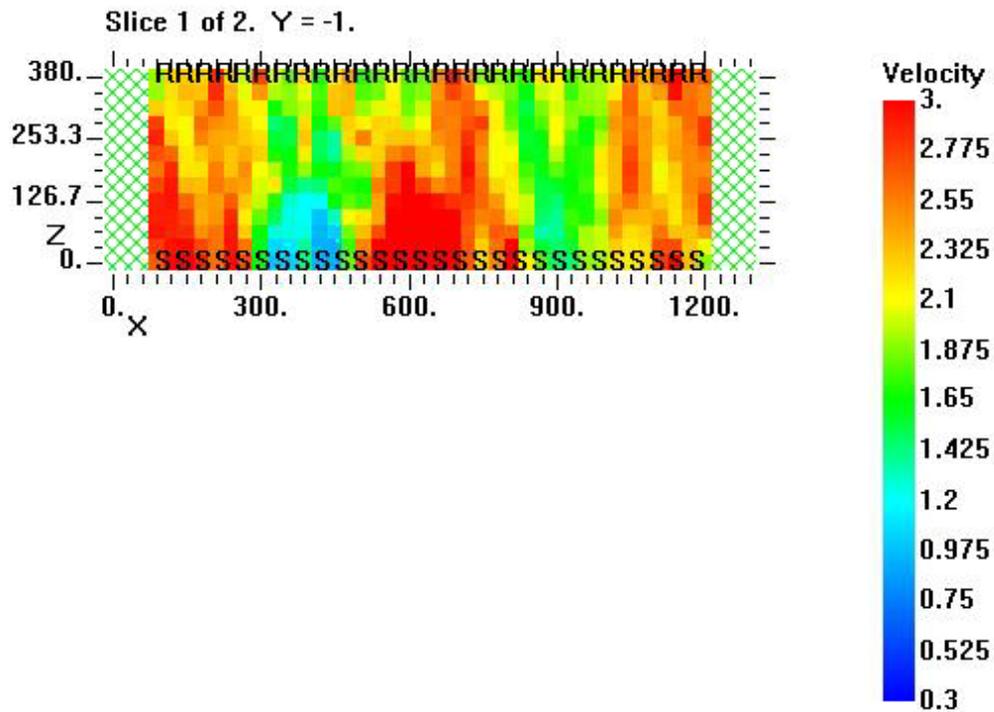


Figura 5.51 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_203

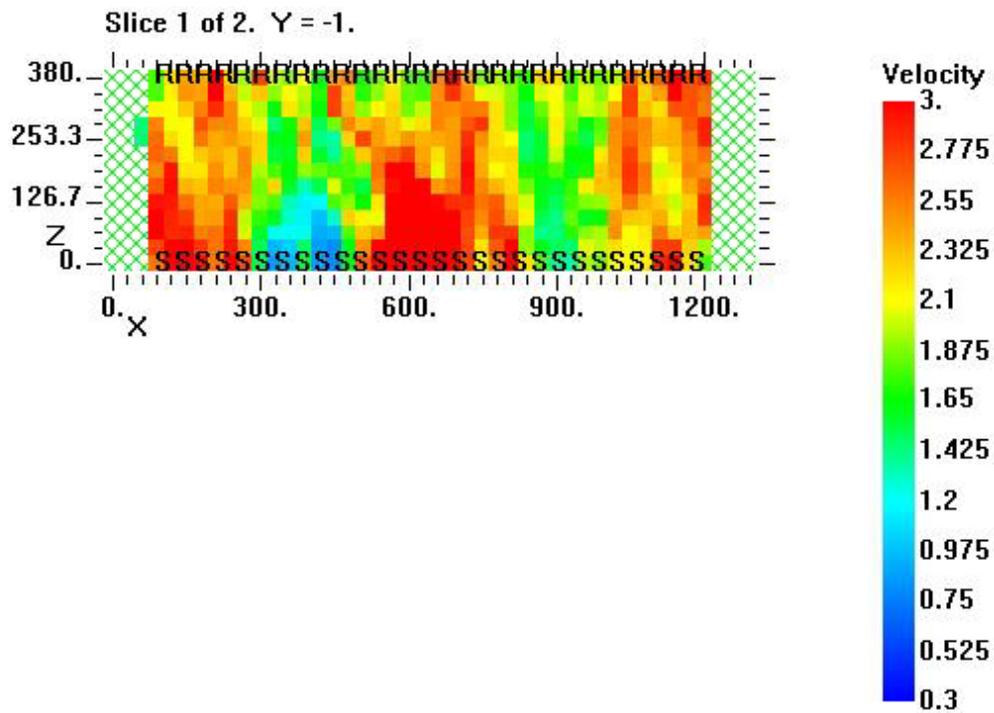


Figura 5.51 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_204

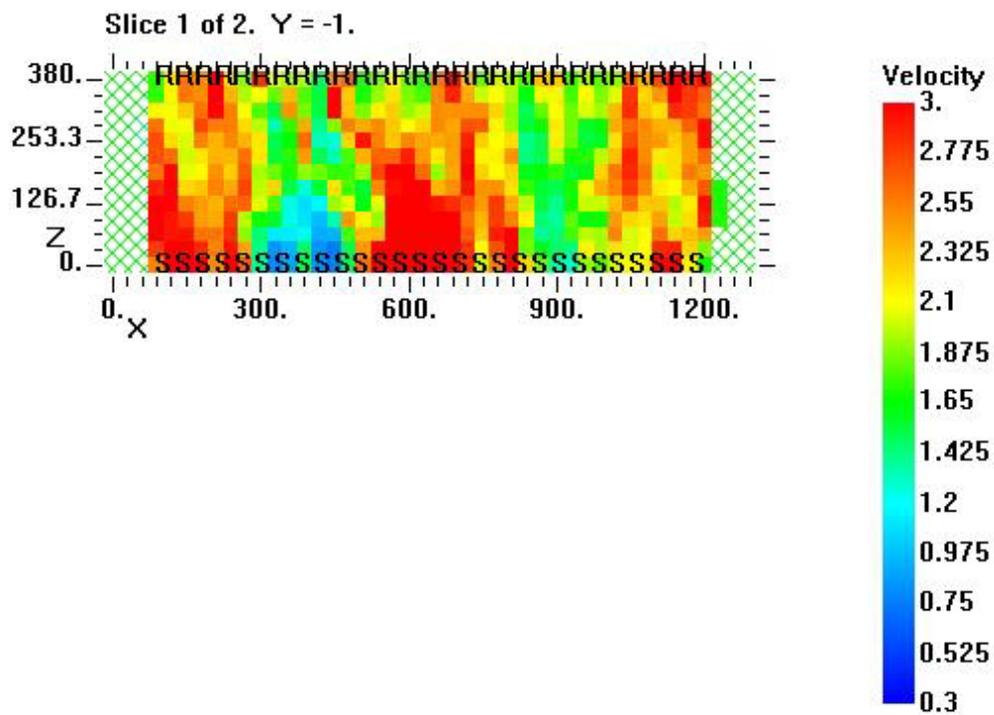


Figura 5.52 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_205

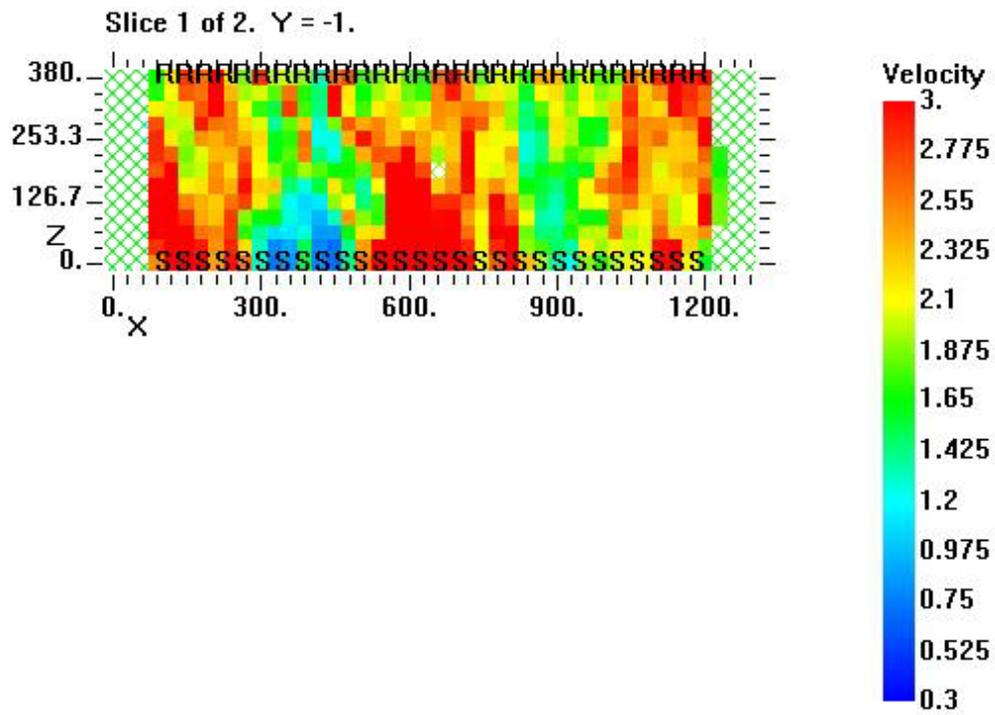


Figura 5.53 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_206

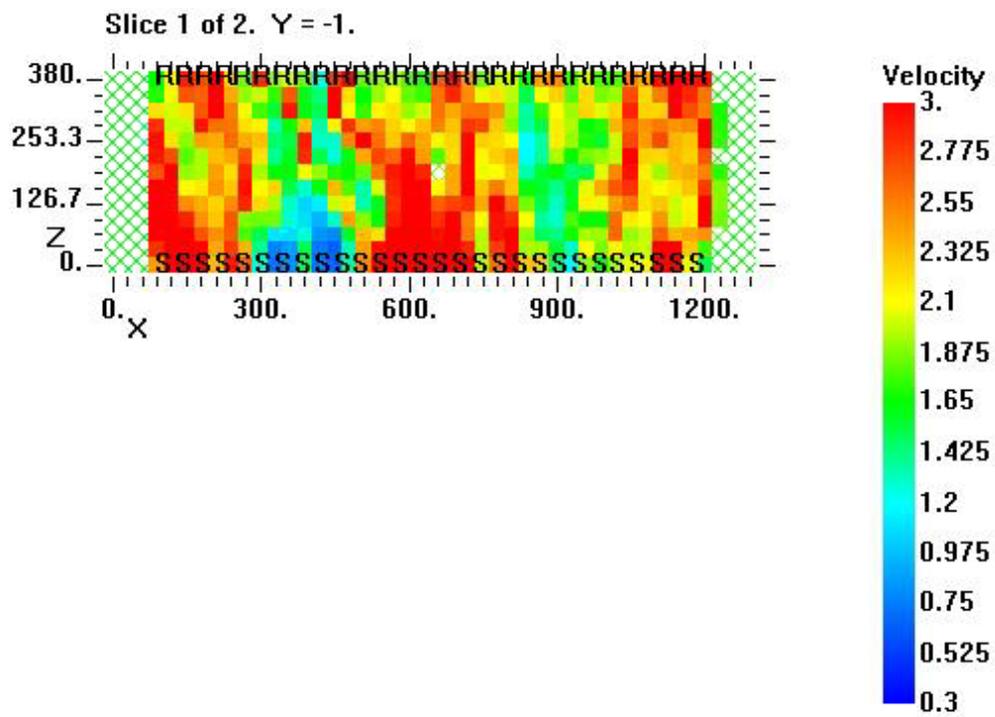


Figura 5.54 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 25 curved, griglia di 44 x 13 pixel, file output corso6_207

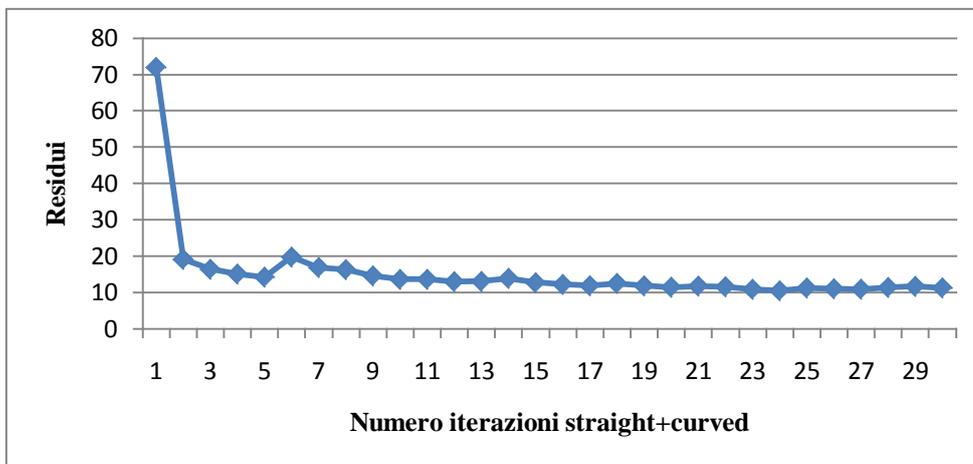


Figura 5.55 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight+curved per una griglia di 44x13 pixel

Si nota che il valore dei residui dopo la quinta iterazione aumenta all'aumentare della dimensione dei pixel. Per quanto riguarda il numero di iterazioni, già dopo la nona iterazione si ha la convergenza del metodo, disponendosi asintoticamente sul valore di 10. I residui delle iterazioni curved mostrano un primo picco per poi tendere anch'essi ad un valore stabile di 10 circa. È interessante evidenziare come in questo caso a differenza dei dati ottenuti per la griglia di 64x19, la convergenza del metodo avvenga ad un numero di iterazione maggiore. Per capire se è un fatto dovuto ad una casualità o legato magari alle dimensioni di pixel, si riportano i grafici dei residui per iterazioni straight e curved con una suddivisione in pixel di 20x6 (ovvero 6 cm x 6 cm). Le immagini non mostrano significative variazioni nella visualizzazione del difetto. In figura 5.56 si osserva che la convergenza del metodo si ha già alla quinta iterazione, così come in figura 5.57 i valori dei residui si stabilizzano dopo l'ottava iterazione. Si può concludere che indicativamente si può arrestare le iterazioni a 15, 20 iterazioni che siano solo straight o straight e curved; proseguire oltre non porta a miglioramenti (i residui infatti non diminuiscono in maniera considerevole). Il valore dei residui dipende unicamente dai dati immessi.

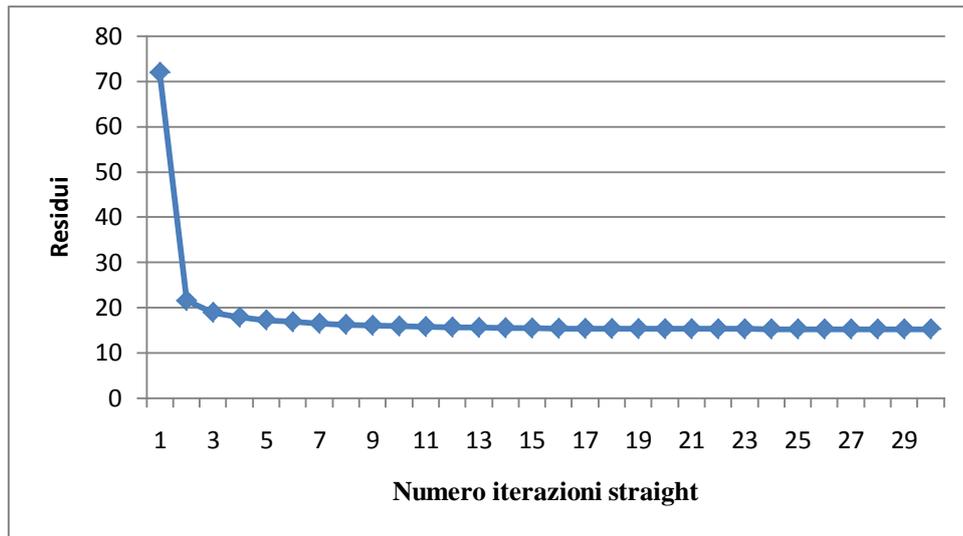


Figura 5.56 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight per una griglia di 20x6 pixel

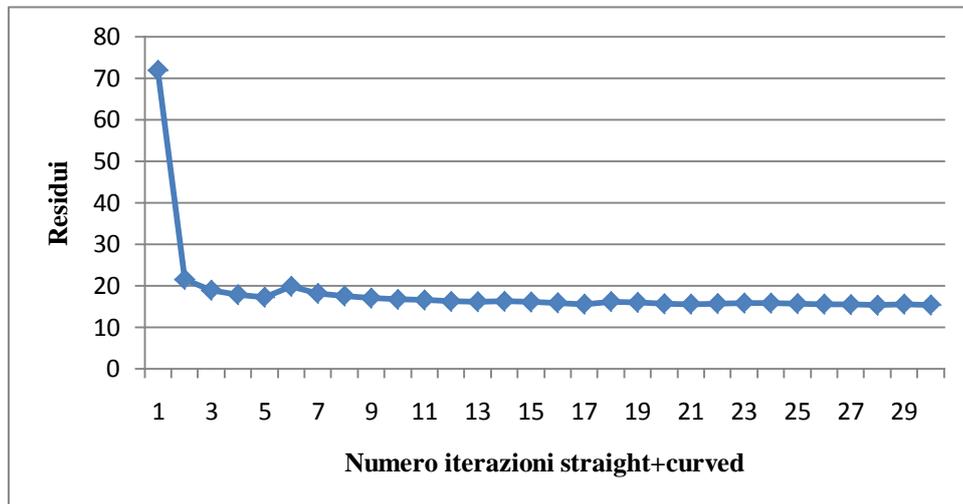


Figura 5.57 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazioni straight+curved per una griglia di 20x6 pixel

È interessante, una volta scelto le migliori distribuzioni dei pixel, capire se ci possono essere delle variazioni sostanziali modificando il passo tra le iterazioni e il numero di iterazioni straight da cui partire. Se si procede in gruppi di 5 iterazioni o gruppi da 10 per volta, non si modifica il risultato; quest'ultimo mostra qualche variazione in termini di raggiungimento della convergenza o piccola differenza delle velocità registrate se si utilizzassero gruppi di 50 iterazioni alla volta (Guscelli, 2009). Per quanto riguarda il numero iniziale di straight, si considerano 1, 2, 3 straight per poi proseguire con gruppi da 5 curved per volta. In questo caso non si prosegue fino a 30 iterazioni poiché nella trattazione precedente si è visto che la convergenza avviene già per un numero minore

delle stesse. Riepilogando il procedimento utilizzato, si ottiene la tabella 5.11 dove sono indicate le migliori griglie di pixel scelte e la tabella 5.12 dove per la griglia 43x19 sono riepilogate le operazioni eseguite. Si è scelto di riportare una sola griglia, poiché l'obiettivo che vogliamo raggiungere è quello di confrontare le immagini ottenute al variare delle iterazioni e non delle dimensioni dei pixel. È ugualmente riportata la tabella riassuntiva delle quattro griglie scelte per rendere note tutte le prove fatte e per anticipare i tipi di griglia che troveremo per i vari corsi analizzati successivamente. Le mappe di velocità (figure 5.58 e 5.59) mostrano solamente le distribuzioni di velocità ottenute con una sola iterazione straight iniziale. Le figure 5.60 e 5.61 presentano le immagini tomografiche con 2 iterazioni straight iniziali e le figure 5.62 e 5.63 riportano le mappe di velocità delle prove con 3 iterazioni straight. Confrontando le figure 5.58, 5.60 e 5.62 con la figura 5.9 data da 5 iterazioni straight iniziali, si osserva che per iterazioni iniziali molto piccole (1 e 2) si ottengono delle distribuzioni, come ci si aspetterebbe, molto approssimative. Sono presenti strisce monocromatiche ad individuare zone larghe quanto lo spessore del provino. Proseguendo con altre 5 iterazioni curved, il risultato si affina. L'immagine tomografica con 3 iterazioni straight iniziali evidenzia già una maggiore definizione delle aree comprensive di imperfezioni. È l'unica distribuzione tra queste ora presentate che può essere messa a confronto con una mappa di velocità di 5 iterazioni iniziali. Per avere ulteriore conferma di quanto descritto, vengono riportati i grafici dei residui (figure 5.64, 5.65, 5.66 e 5.67). Mano a mano che aumentano le iterazioni iniziali, dopo un primo valore sopra i 70 si scende a valori inferiori al di sotto del 20. Questo simboleggia che vi è un miglioramento nell'individuazione dei difetti, come visto anche dalle immagini. L'andamento dei residui per 1 o 2 iterazioni iniziali straight è molto simile all'andamento di residui di sole iterazioni straight senza la presenza di picchi positivi o negativi nella curva. Si è così scelto di mantenere 5 iterazioni straight iniziali per le inversioni dei corsi orizzontali, mentre per le sezioni verticali si è provato ad iniziare da 3 iterazioni visto i risultati discreti ottenuti.

Tabella 5.11 Numero dei pixel e dimensione dei pixel per i quattro casi scelti

Numero di pixel	Dimensioni dei pixel
52x19	2,5 cm x 2 cm
43x19	3 cm x 2 cm
32x19	4 cm x 2 cm
34x10	4 cm x 4 cm

Tabella 5.12 Muretto PNDE, corso 6, riepilogo delle iterazioni per una griglia di 43x 19 pixel

Pixel: 43x 19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso6_315	1	0	1	corso6_316	Figura 5.58
corso6_316	0	5	6	corso6_317	Figura 5.59
corso6_317	0	5	11	corso6_318	
corso6_318	0	5	16	corso6_319	
corso6_319	0	5	21	corso6_320	
corso6_300	2	0	2	corso6_321	Figura 5.60
corso6_321	0	5	7	corso6_322	Figura 5.61
corso6_322	0	5	12	corso6_323	
corso6_323	0	5	17	corso6_324	
corso6_324	0	5	22	corso6_325	
corso6_300	3	0	3	corso6_326	Figura 5.62
corso6_326	0	5	8	corso6_327	Figura 5.63
corso6_327	0	5	13	corso6_328	
corso6_328	0	5	18	corso6_329	

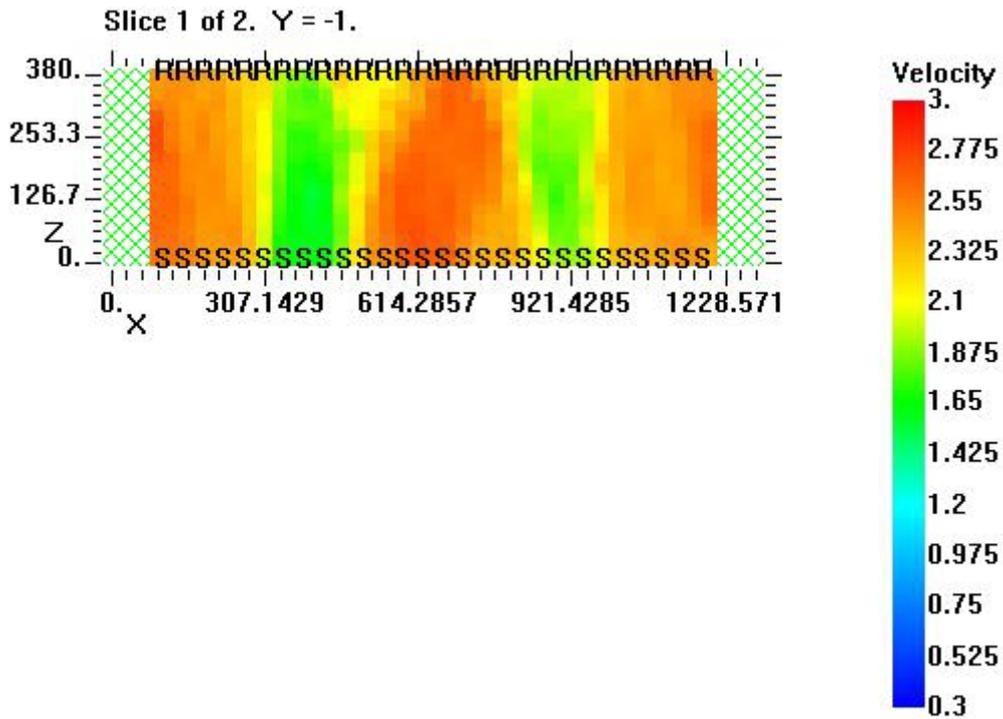


Figura 5.58 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 1 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_316

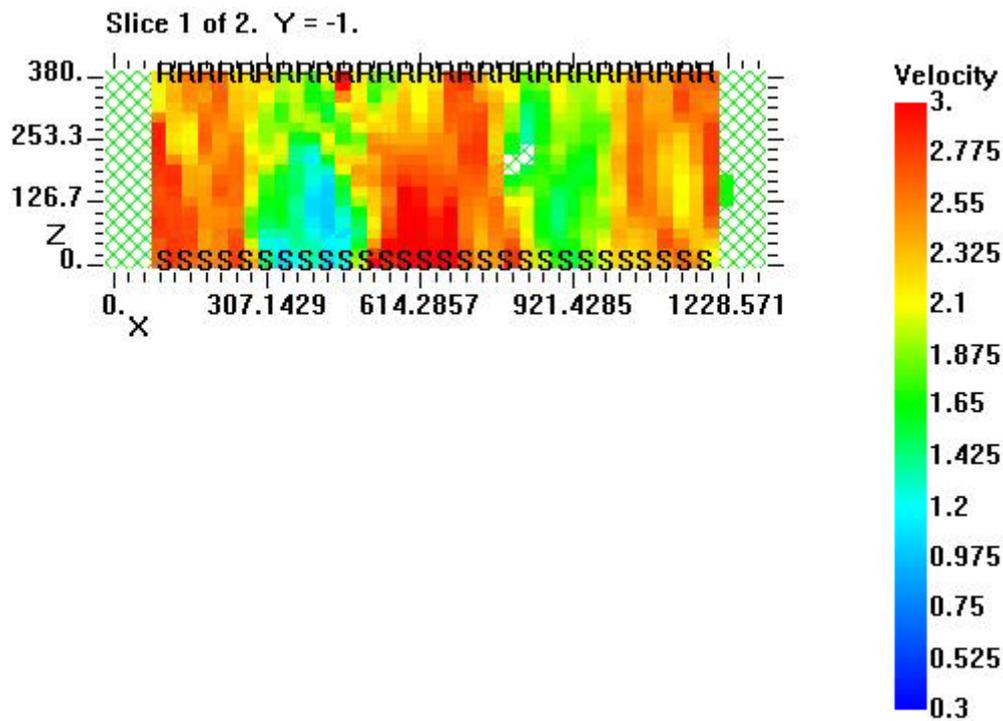


Figura 5.59 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 1 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_317

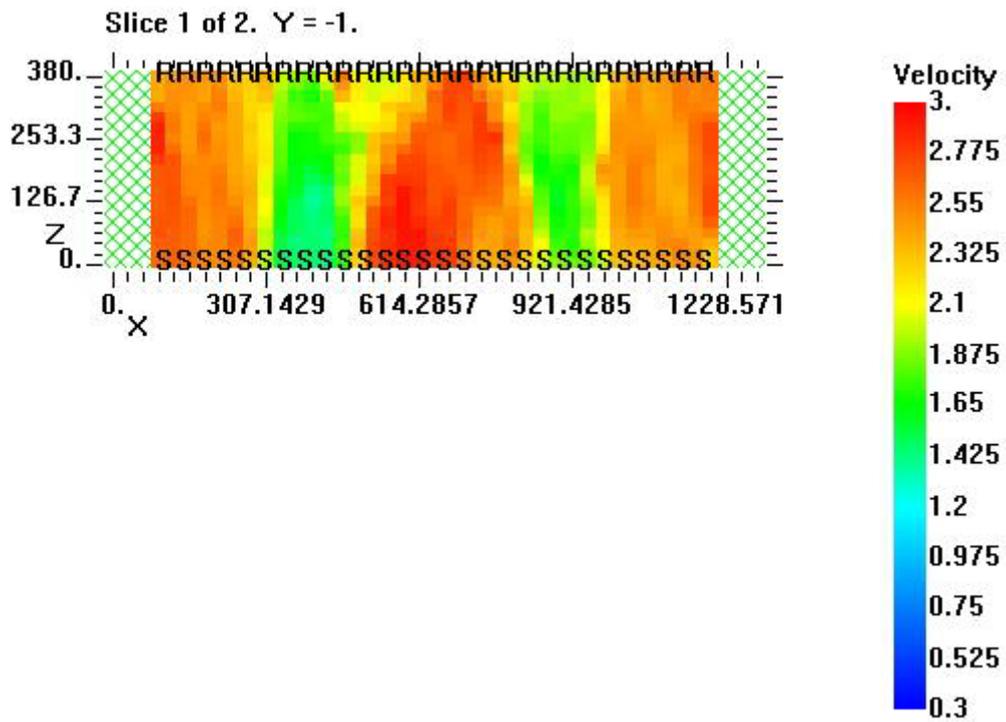


Figura 5.60 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 2 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_321

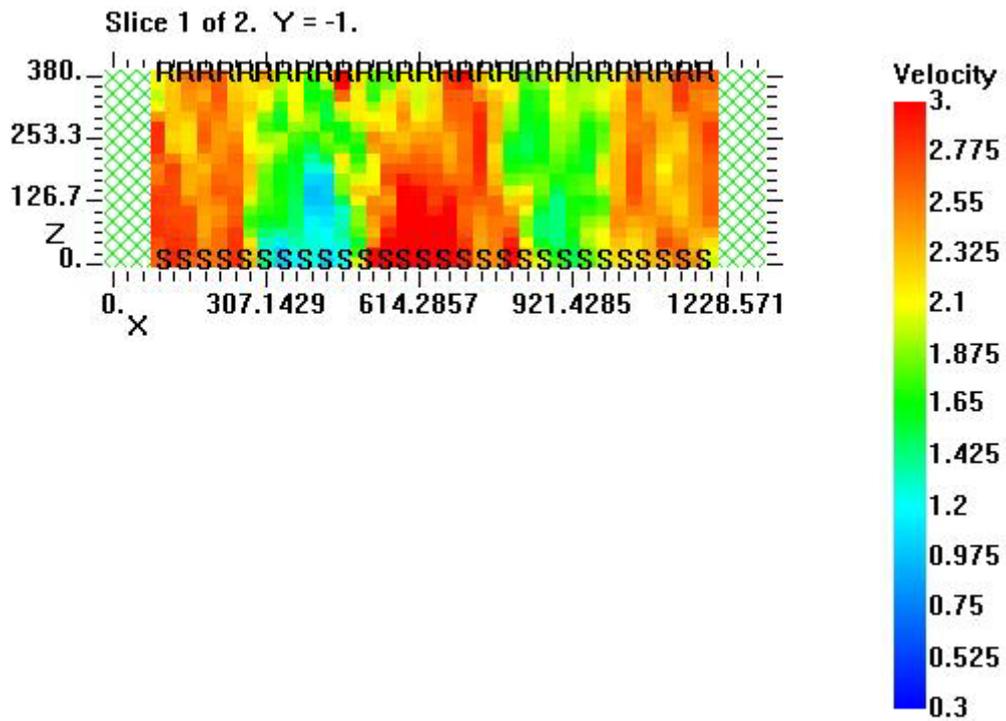


Figura 5.61 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 2 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_322

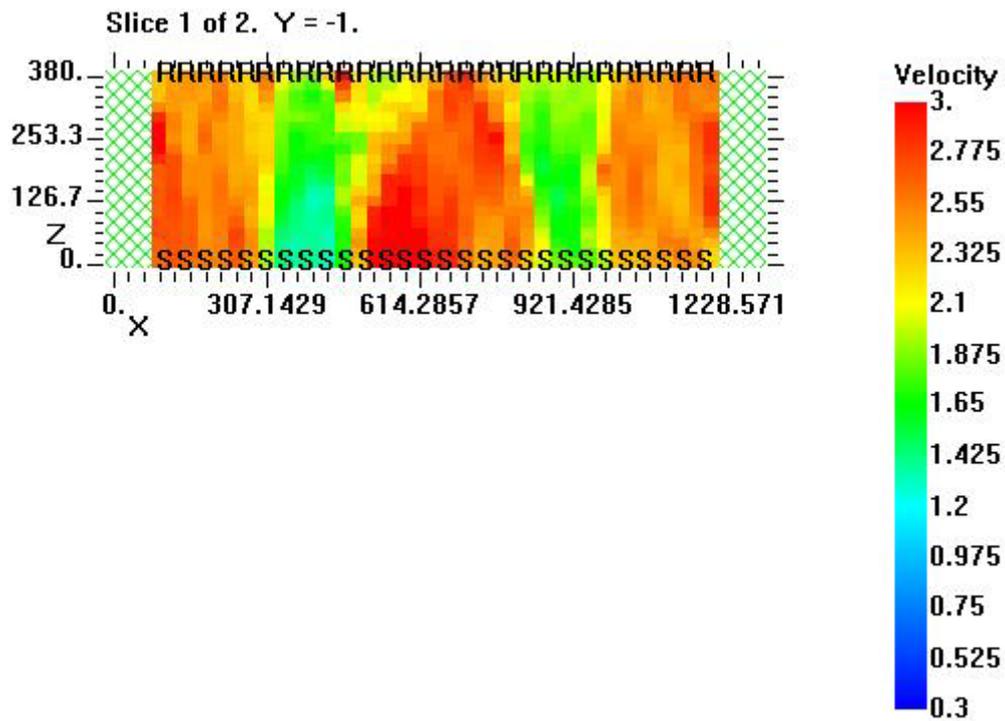


Figura 5.62 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_326

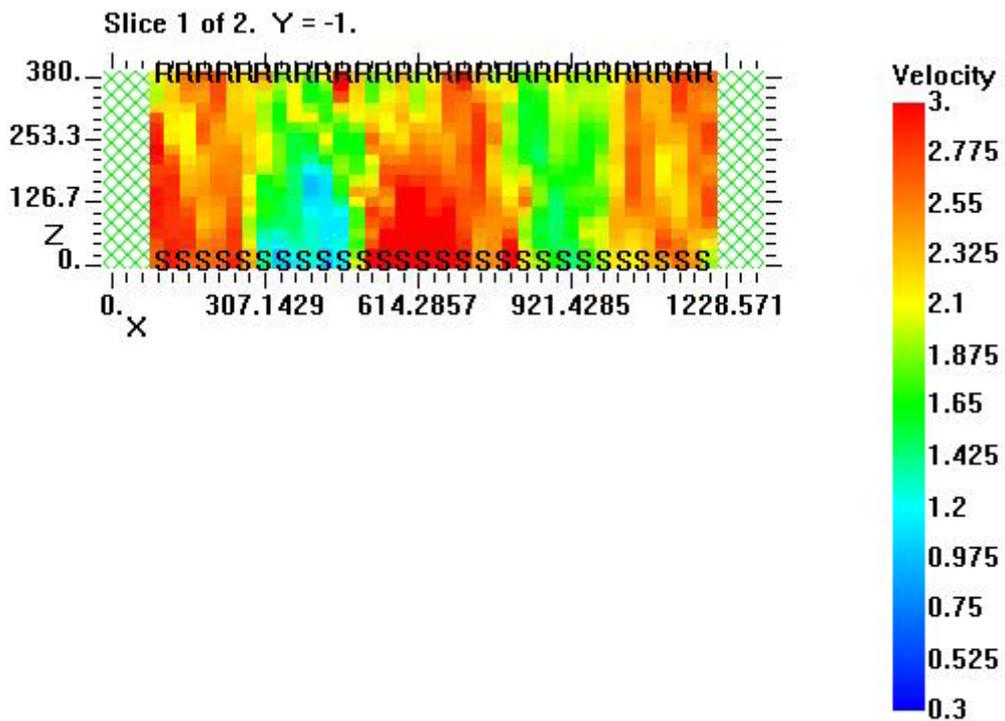


Figura 5.63 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_327

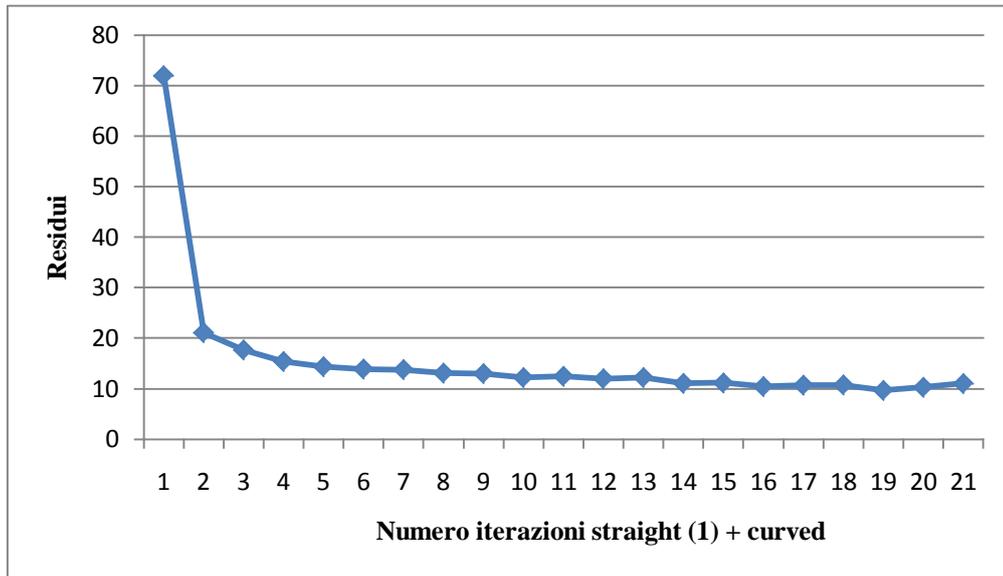


Figura 5.64 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight(1)+curved per una griglia di 43x19 pixel

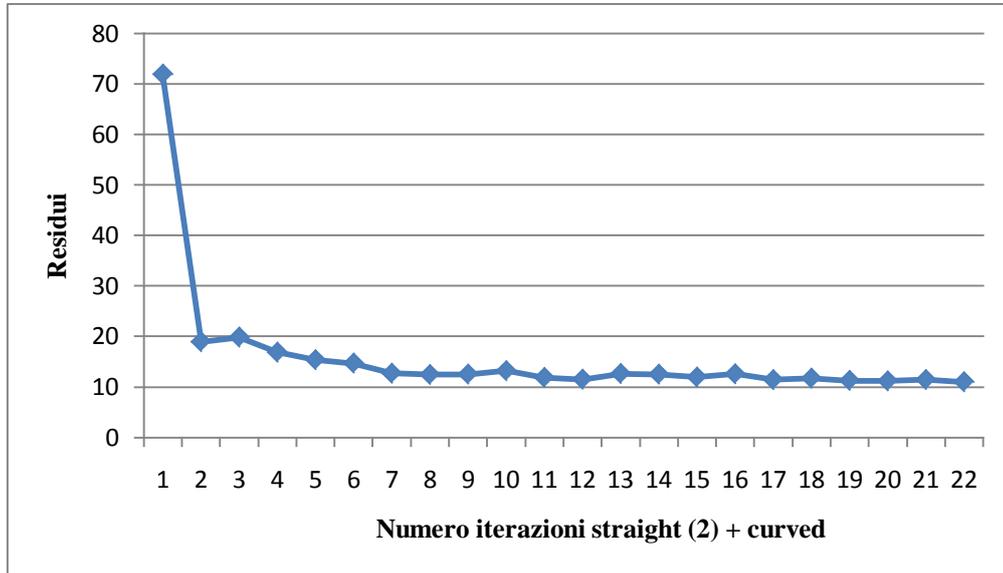


Figura 5.65 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight(2)+curved per una griglia di 43x19 pixel

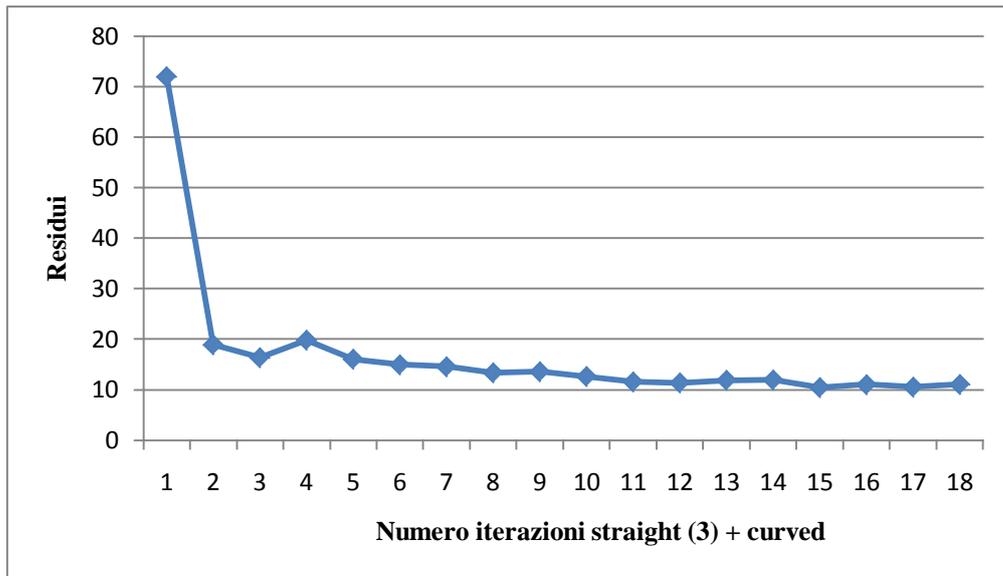


Figura 5.66 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight(3)+curved per una griglia di 43x19 pixel

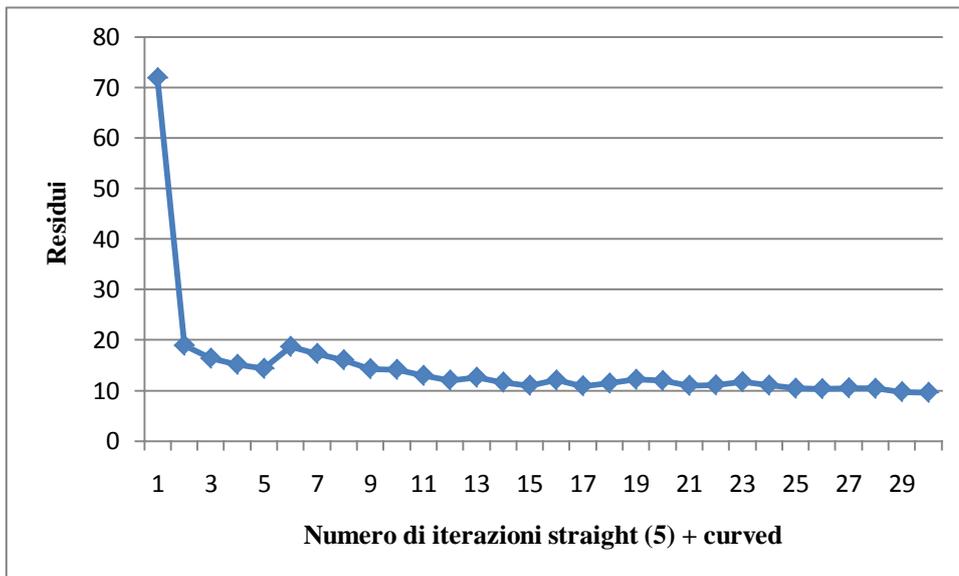


Figura 5.67 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazione straight(5)+curved per una griglia di 43x19 pixel

5.2. Muretto PNDE

5.2.1 Corso 6: confronto tra griglia di 43x19 pixel e griglia di 34x10 pixel

La geometria del corso presenta una prima fila di mattoni di testa e una seconda fila di mattoni di lista. Il difetto a sinistra è posizionato ad una profondità di 6 cm dal fronte, mentre quello a destra è profondo 19 cm dal lato frontale. Entrambi sono alti tre corsi e il corso 6 è quello centrale tra i tre. Lo spessore è costante e pari a 38cm. Per la tabella dei tempi di volo e gli istogrammi inerenti si rimanda al capitolo precedente. Nelle note sono evidenziate le caratteristiche particolari di alcune stazioni e l'andamento delle curve che presentano delle incertezze, qualora influenzino il valore del tempo di volo. Per meglio visualizzare se effettivamente quest'ultimo sia conforme con la presenza di un'anomalia, nei grafici successivi (figura 5.68 e 5.69) sono riportate le posizioni che toccano il difetto e i percorsi che partono da stazioni trasmettenti di fronte al difetto.

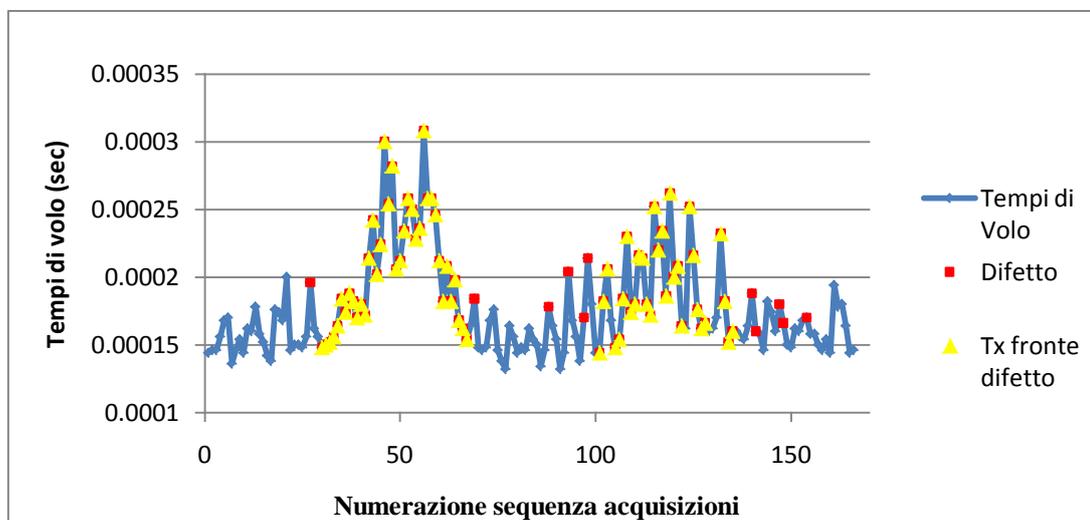


Figura 5.68 Muretto PNDE, corso 6, tempi di volo espressi in secondi con dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto e che hanno stazione Tx di fronte ad un difetto

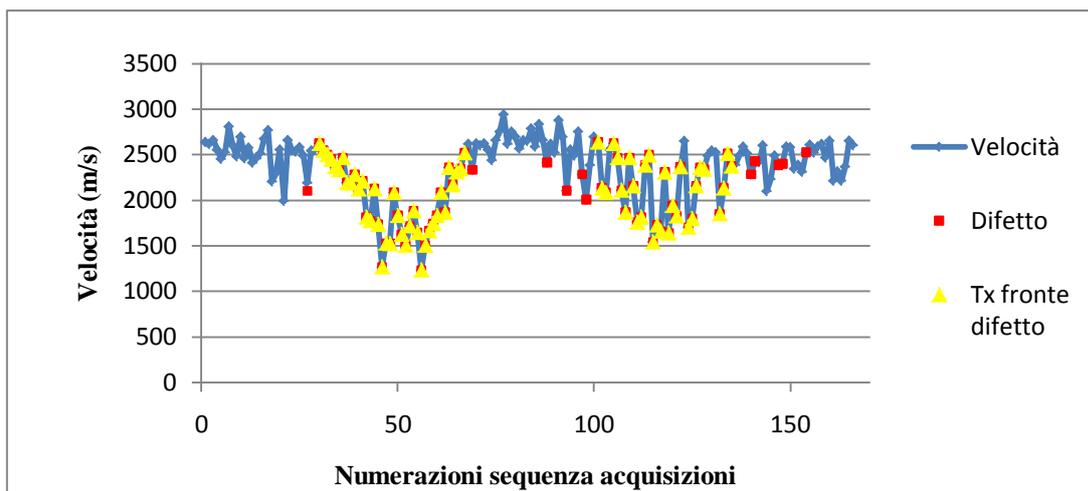


Figura 5.69 Muretto PNDE, corso 6, velocità espressa in m/sec con dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto e che hanno stazione Tx di fronte ad un difetto

La presenza della stazione ricevente sul giunto di malta ci porterebbe a pensare che il tempo di volo impiegato fosse maggiore rispetto a Rx su mattone, ma osservando i dati, nel caso di misure lontane dai difetti, si riscontra invece che la velocità che si ottiene è più alta rispetto ad altre stazioni. È stato ipotizzato che ciò potesse dipendere dal fatto che le stazioni su giunto siano rientranti, di qualche millimetro rispetto a quelle su mattone, e provando così a diminuire la lunghezza di quel percorso, si ottengono valori di velocità più ridotte. Per averne una conferma, in laboratorio le stazioni su giunto sono state controllate ed è stato notato che non tutte sono rientranti, anzi alcune sono addirittura più sporgenti. Questo allora ci conduce ad un'attenta analisi della malta utilizzata, le cui proprietà potrebbero migliorare la propagazione del segnale. Per un'ulteriore verifica anche della corretta procedura di acquisizione dei dati, sono state poste in un grafico solo i percorsi che hanno origine nelle stazioni che si trovano nella zona centrale della sezione e non sono di fronte a nessuno dei due difetti (figure 5.70 e 5.71). L'andamento oscillante del grafico temporale presenta massimi in corrispondenza dei raggi più inclinati del ventaglio (più lunghi) e minimi nei percorsi diretti; al contrario nel grafico delle velocità. Ci si aspetterebbe che le misure, all'interno di un ventaglio, di raggi con uguale lunghezza avessero uguale tempo di volo, invece ciascuno assume un valore proprio. Questo può essere dovuto all'errore commesso dall'operatore durante la battuta o dai errori, seppur minimi, introdotti nel posizionamento delle stazioni, oltre al fatto che ciascun percorso attraversa una differente configurazione di mattoni e malta.

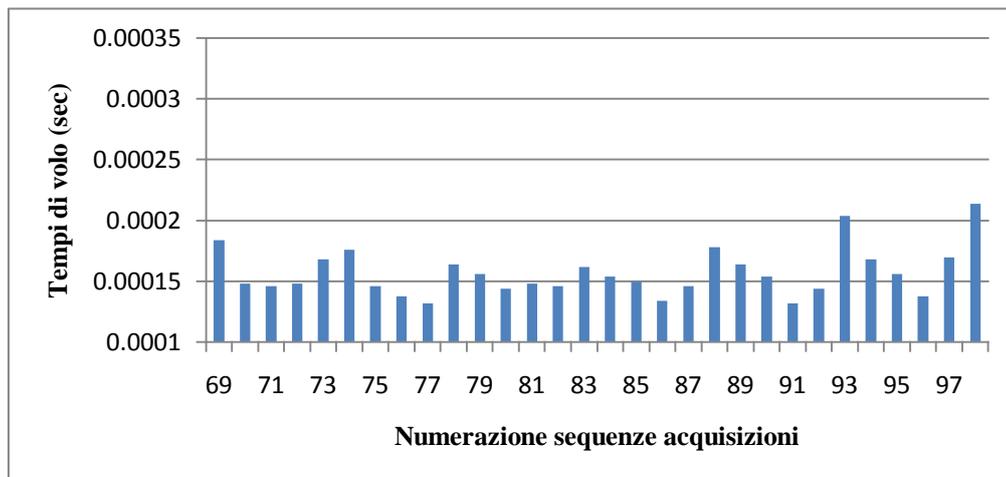


Figura 5.70 Muretto PNDE, corso 6, tempi di volo espressi in sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

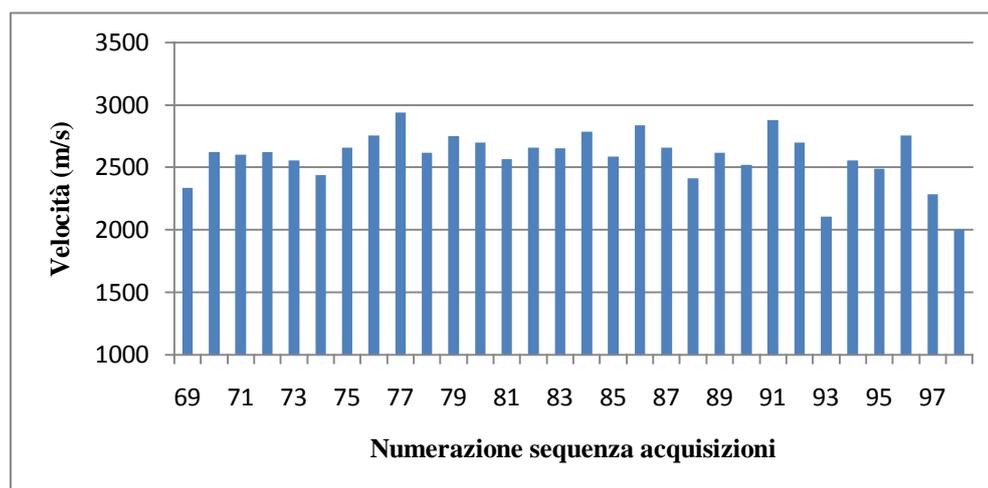


Figura 5.71 Muretto PNDE, corso 6, velocità espressa in m/sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

La velocità media ottenuta per un corso in muratura, laddove non vi siano irregolarità evidenti è di 2661 m/s; un valore che denota una buona muratura. Poiché alcuni dei percorsi precedenti toccano uno dei due difetti, i grafici successivi (figura 5.72 e 5.73) mettono in evidenza i suddetti raggi e nel grafico della velocità viene introdotta anche la velocità media. Successivamente per l'inversione dei dati con il software Geotom, dalla sperimentazione precedente sono state scelte le griglie di 43x19 pixel e 34x10 pixel fino ad un massimo di 30 iterazioni. Vengono di seguito riportate le tabelle (tabella 5.13 e 5.14) di riepilogo delle iterazioni e le immagini delle inversioni più significative in figura 5.74 – 5.82.

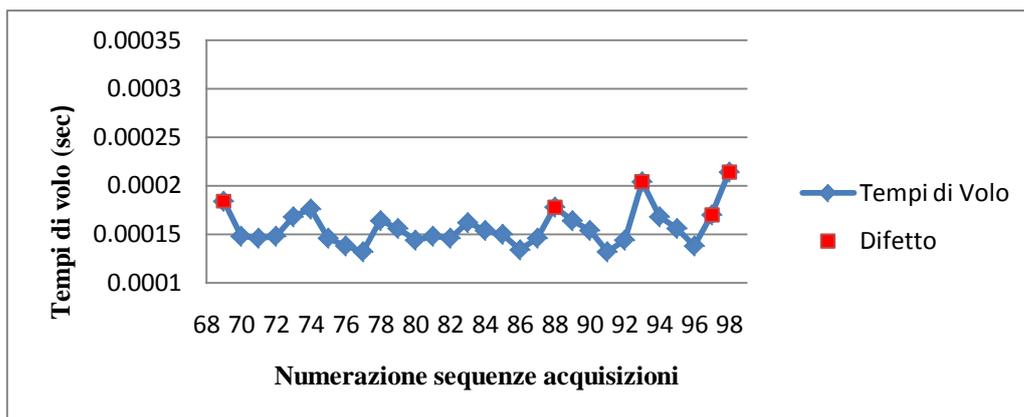


Figura 5.72 Muretto PNDE, corso 6, tempi di volo espressi in sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

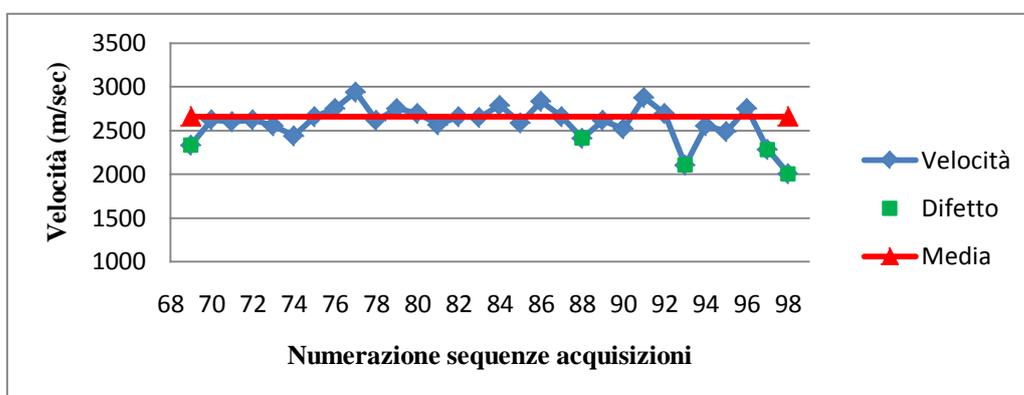


Figura 5.73 Muretto PNDE, corso 6, velocità espressa in m/sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

Tabella 5.13 Muretto PNDE, corso 6, riepilogo iterazioni eseguite per una griglia di 43x19 pixel e relative mappe di velocità

Pixel: 43x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso6_136	5	0	5	corso6_137	Figura 5.74
corso6_137	5	0	10	corso6_138	
corso6_138	5	0	15	corso6_139	
corso6_139	5	0	20	corso6_140	
corso6_140	5	0	25	corso6_141	
corso6_141	5	0	30	corso6_142	
corso6_136	5	0	5	corso6_137	
corso6_137	0	5	10	corso6_143	Figura 5.75
corso6_143	0	5	15	corso6_144	Figura 5.76
corso6_144	0	5	20	corso6_145	Figura 5.77
corso6_145	0	5	25	corso6_146	Figura 5.78
corso6_146	0	5	30	corso6_147	

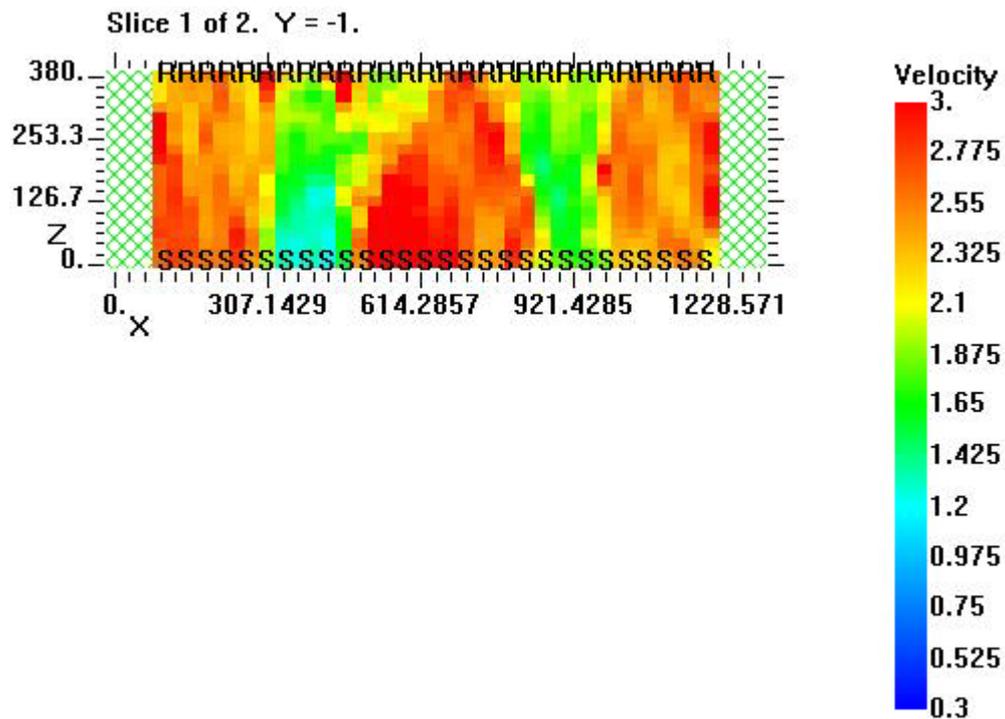


Figura 5.74 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_137

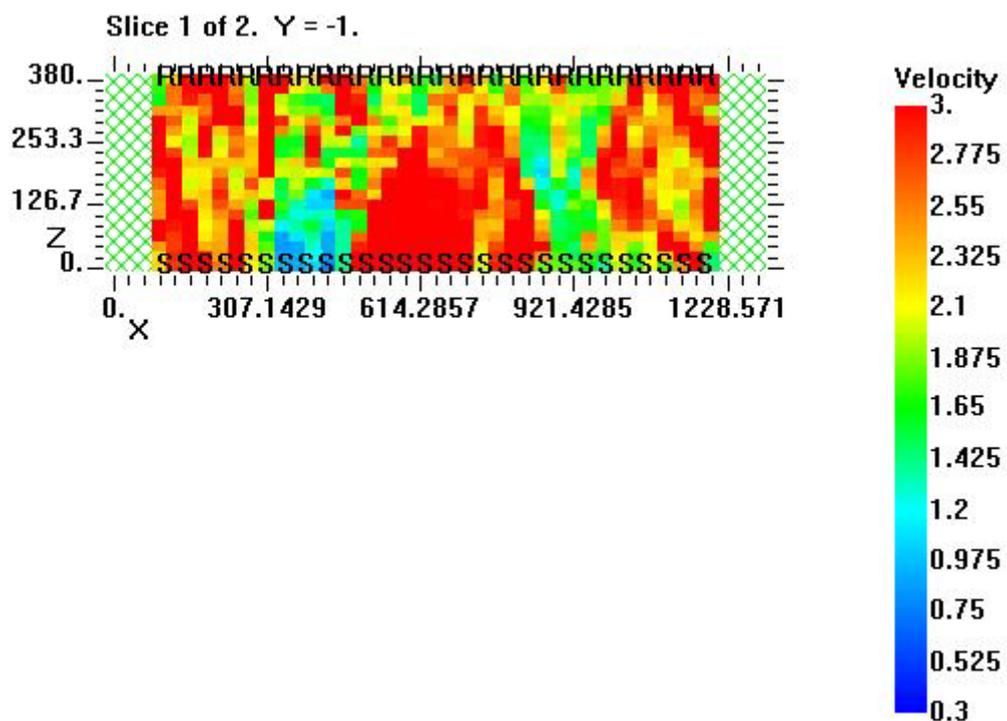


Figura 5.75 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_143

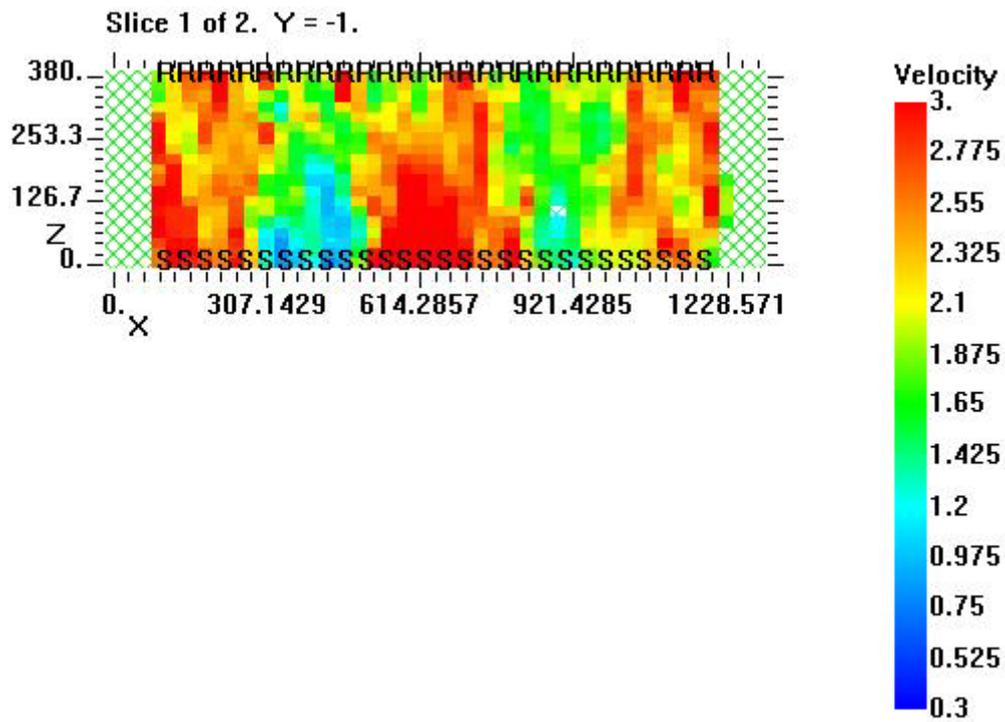


Figura 5.76 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_144

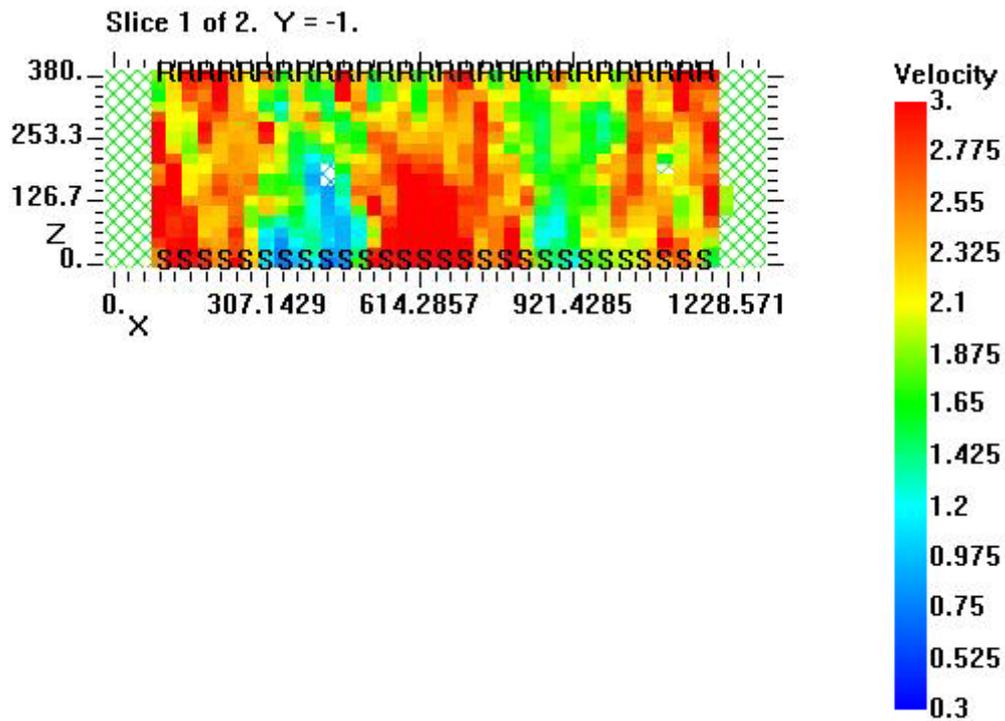


Figura 5.77 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_145

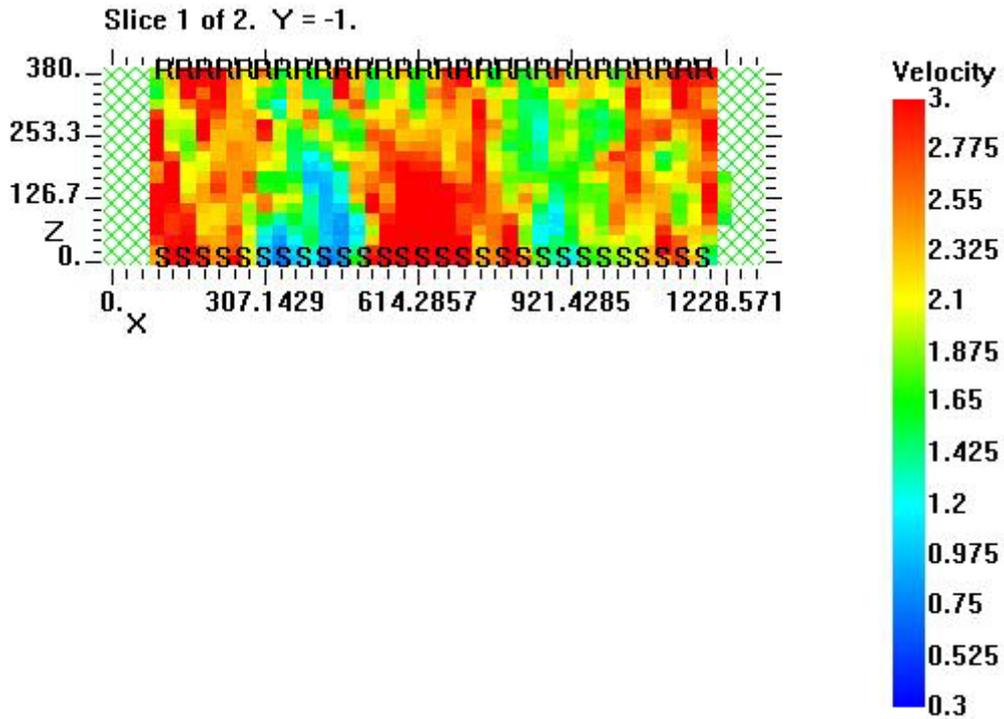


Figura 5.78 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso6_146

Tabella 5.14 Muretto PNDE, corso 6, riepilogo iterazioni eseguite per una griglia di 34x10 pixel e relative mappe di velocità

Pixel:34x10		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso6_208	5	0	5	corso6_209	Figura 5.79
corso6_209	5	0	10	corso6_210	
corso6_210	5	0	15	corso6_211	
corso6_211	5	0	20	corso6_212	
corso6_212	5	0	25	corso6_213	
corso6_213	5	0	30	corso6_214	
corso6_208	5	0	5	corso6_209	
corso6_209	0	5	10	corso6_215	Figura 5.80
corso6_215	0	5	15	corso6_216	Figura 5.81
corso6_216	0	5	20	corso6_217	Figura 5.82
corso6_217	0	5	25	corso6_218	
corso6_218	0	5	30	corso6_219	

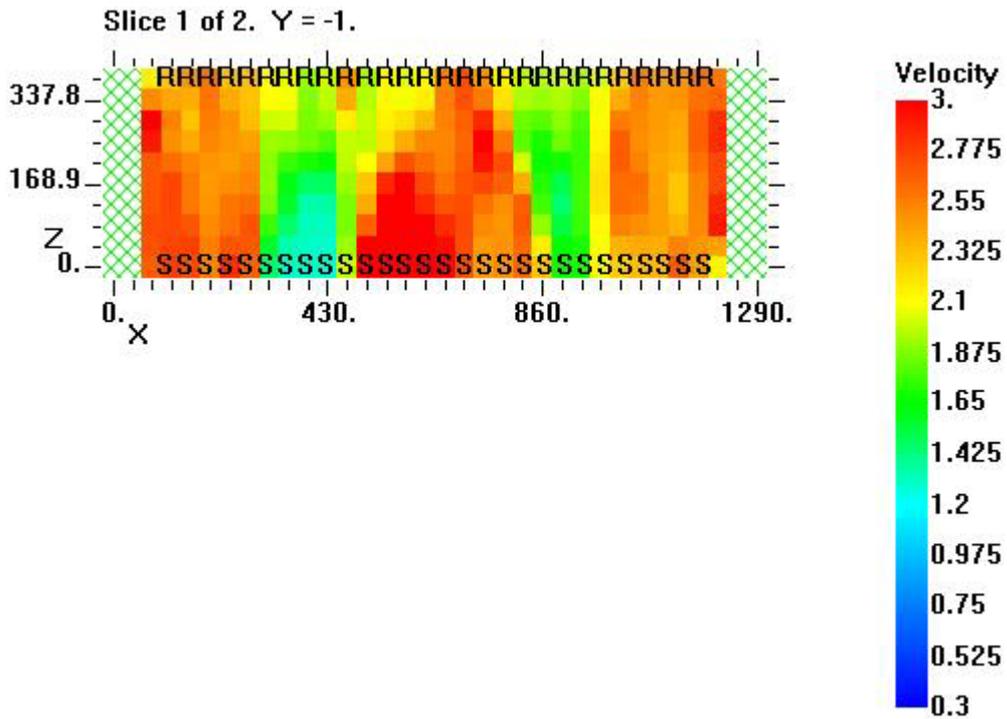


Figura 5.79 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso6_209

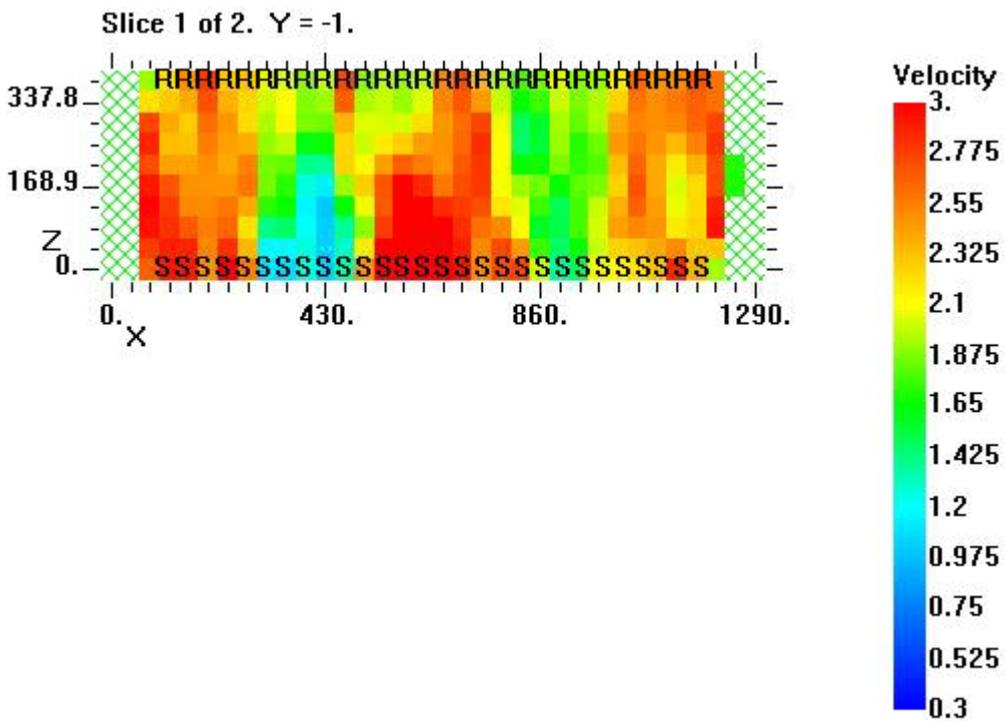


Figura 5.80 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso6_215

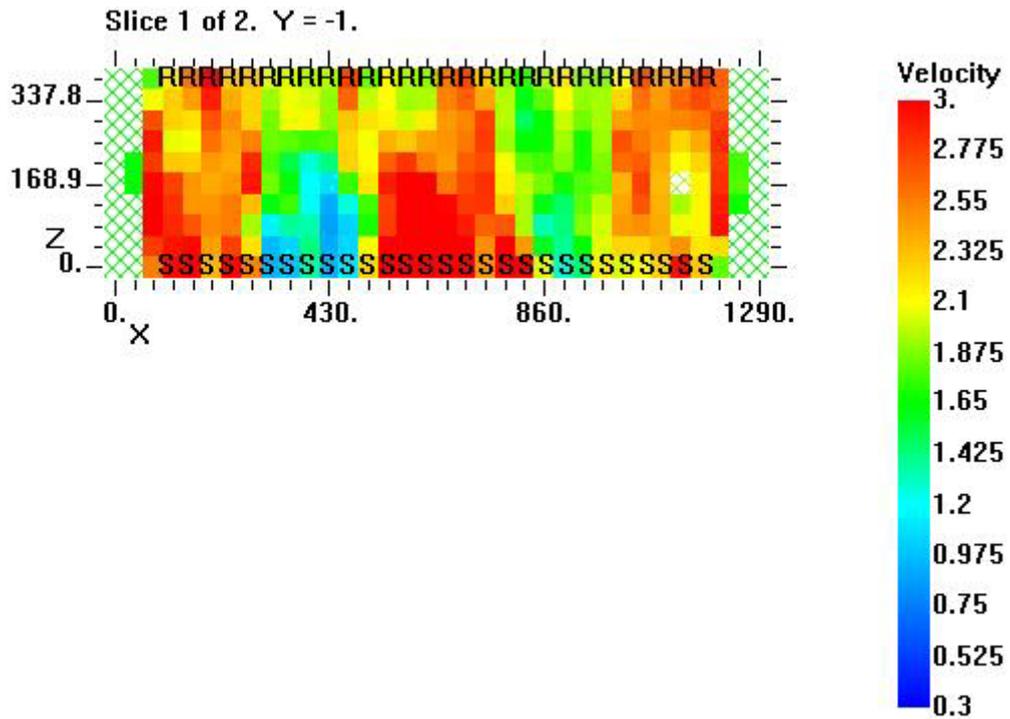


Figura 5.81 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso6_216

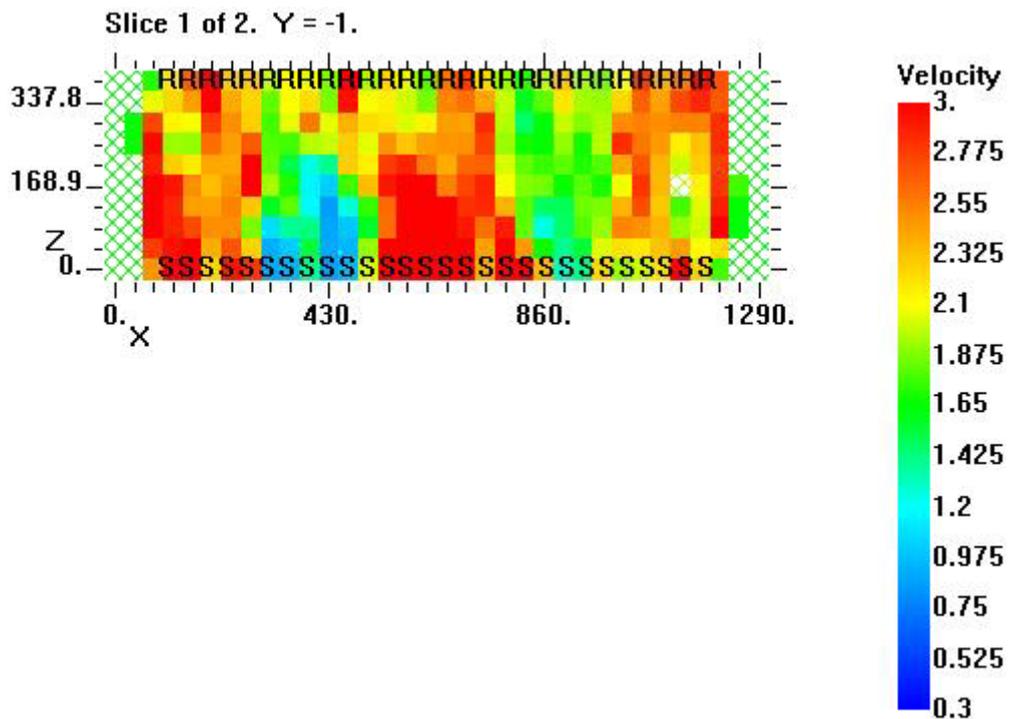


Figura 5.82 Muretto PNDE, corso 6, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso6_217

I difetti sono rilevati, seppure con delle limitazioni nell'individuazione della forma e delle dimensioni. Probabilmente l'utilizzo di più percorsi e il posizionamento delle stazioni su tutti e quattro i lati di misura avrebbero dato un risultato migliore. Nella zona di colore blu a sinistra si identifica il difetto, anche se appare in una posizione più superficiale rispetto a quello reale. Il difetto a destra viene visualizzato in colore verde, più chiaro rispetto al blu, che denota velocità più alte, come già mostrato dai dati in figura 5.3. La posizione risulta essere meno esatta rispetto a quello di sinistra e il volume più piccolo della realtà. Si è giunti alla conclusione che probabilmente la maggiore distanza dal fronte di battuta dell'anomalia, faccia deviare il percorso del segnale più tardi rispetto ad un difetto più vicino alla Tx e che quindi vi sia una prima fase in cui segue una traiettoria rettilinea come se non ci fossero imperfezioni. La presenza di un ostacolo quasi subito dopo la partenza del segnale, ne modifica subito il tragitto e anche dopo averlo superato, rimane deviato e impiega più tempo a raggiungere il ricevitore. Non si notano invece i giunti di malta nella campitura del grafico. Questo era già stato evidenziato nella tesi di Konrad Rungaldier e qua ve ne è una conferma. Le dimensioni ridotte di un giunto, pari a $1\div 2$ mm, non riescono ad essere individuate da questa tecnica, che ha una risoluzione pari a 15 cm circa. I valori dei residui ci danno la conferma del numero di iterazioni al quale dobbiamo fermare le inversioni poiché non si hanno successivi miglioramenti in quanto il metodo è giunto alla convergenza. Per il caso di 43x19 pixel (figura 5.83) i valori scendono fino a 10 circa dopo la decima iterazione, ma non mantengono un andamento costante, infatti fino alla ventesima iterazione si hanno dei buoni risultati nella distribuzione delle velocità. Nel caso di 34x10 pixel (figura 5.84), l'andamento cala in modo quasi costante fino al valore di 10 alla trentesima iterazione. Ciò ci porta a considerare tutti i risultati ottenuti, poiché al diminuire progressivo del valore dei residui ci dovrebbero mostrare piccole, ma positive modifiche nella mappa delle velocità. In realtà sono stati riportati solo alcune immagini tomografiche perché le immagini con numero di iterazioni maggiori comunque non porta modifiche visibili.

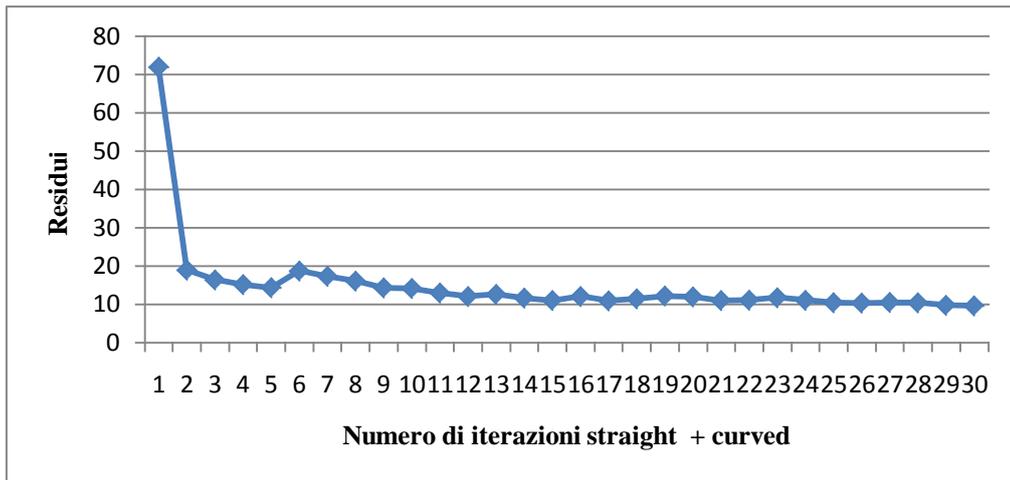


Figura 5.83 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazioni straight+curved per una griglia di 43x19 pixel

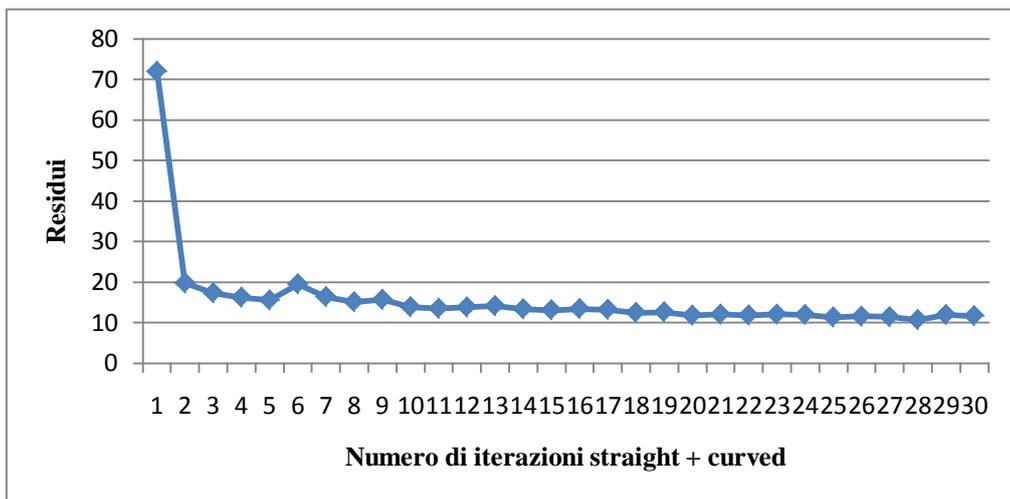


Figura 5.84 Muretto PNDE, corso 6, grafico dei residui con 30 iterazioni straight+curved per una griglia di 34x10 pixel

L'attenuazione è un altro parametro importante per la diagnostica delle strutture e viene studiata in parallelo allo studio delle velocità di propagazione del segnale nell'elemento. Allo stesso modo delle velocità essa può essere ottenuta per mezzo del software Geotom, tramite una serie di inversioni dei valori di ampiezza, opportunamente trattati prima di essere inseriti nel software. Il procedimento di trattamento dei dati per il software Geotom risulta essere piuttosto difficoltoso e non molto chiaro. Si è deciso quindi, in una prima analisi di ricavare il valore delle ampiezze del segnale con il software in ambiente LabView e considerando poi le formule note dalla teoria si ricava l'attenuazione espressa in decibel (tabella 5.15). Il grafico (figura 5.85) mostra come l'attenuazione sia maggiore in corrispondenza dell'attraversamento da parte del segnale di un ostacolo. La mappa dell'attenuazione prodotta con il software Geotom (figura 5.90) evidenzia delle zone di

colore blu-verde che dovrebbero rappresentare i difetti. Lo studio non è stato però approfondito ulteriormente, è stata riportata solo un'immagine esemplificativa.

Tabella 5.15 Muretto PNDE, corso 6, calcolo delle ampiezze e dell'attenuazione

Nome File	Sequenza acquisizioni	A max TX (V) Ao	A max sup. RX (V)	A min inf. RX (V)	A max RX (V) (A)	Ampiezza	Ao/A	log10 Ao/A	Attenuazione (dB)
grigliaE1	1	8.439941	0.302734	-0.6226	0.92529	0.10963264	9.12137128	0.960060134	19.20120268
grigliaE2	2	6.693115	0.163574	-0.2502	0.41382	0.06182746	16.1740431	1.208818595	24.1763719
grigliaE3	3	9.471436	0.284424	-0.6885	0.9729	0.10271942	9.73525759	0.988347447	19.76694894
grigliaE4	4	8.806152	0.200195	-0.5286	0.72876	0.08275576	12.0837511	1.082201769	21.64403539
grigliaE5	5	9.554443	0.216065	-0.4443	0.6604	0.06911972	14.4676517	1.160398046	23.20796092
grigliaE6	6	9.14917	0.187988	-0.3711	0.55908	0.0611074	16.3646299	1.213906187	24.27812374
grigliaE7	7	8.096924	0.318604	-0.7751	1.09375	0.13508216	7.40290194	0.869401997	17.38803994
grigliaE8	8	8.54248	0.343018	-0.6555	0.99854	0.11689055	8.55501138	0.932220592	18.64441183
grigliaE9	9	7.962646	0.212402	-0.5505	0.76294	0.09581481	10.4368001	1.018567365	20.3713473
grigliaE10	10	9.30542	0.333252	-0.6506	0.98389	0.10573266	9.45781568	0.975790846	19.51581691
grigliaE11	11	9.615479	0.297852	-0.6531	0.95093	0.09889552	10.1116815	1.00482338	20.09646759
grigliaE12	12	8.903809	0.236816	-0.4517	0.68848	0.07732383	12.932624	1.111686651	22.23373302
grigliaE13	13	8.752441	0.158691	-0.2722	0.43091	0.04923292	20.3116139	1.307744433	26.15488867
grigliaE14	14	9.310303	0.3479	-0.8423	1.19019	0.12783532	7.82256398	0.893349124	17.86698247
grigliaE15	15	8.948975	0.334473	-0.5713	0.90576	0.10121403	9.88005345	0.994759294	19.89518588
grigliaE16	16	8.370361	0.206299	-0.4578	0.66406	0.07933499	12.6047789	1.100535233	22.01070465
grigliaE17	17	7.050781	0.209961	-0.2295	0.43945	0.06232687	16.0444448	1.205324693	24.10649386
grigliaE18	18	8.50708	0.144043	-0.4187	0.56274	0.0661501	15.1171349	1.179469489	23.58938979
grigliaE19	19	9.393311	0.318604	-0.5945	0.91309	0.09720597	10.2874341	1.012307065	20.2461413
grigliaE20	20	6.80542	0.085449	-0.1025	0.18799	0.02762332	36.2012917	1.558724066	31.17448133
grigliaE21	21	8.400879	0.257568	-0.6567	0.91431	0.10883465	9.18825051	0.963232827	19.26465654
grigliaE22	22	7.784424	0.390625	-0.6848	1.07544	0.13815274	7.23836534	0.859640499	17.19280998
grigliaE23	23	7.440186	0.202637	-0.4065	0.60913	0.08187037	12.2144308	1.086873233	21.73746466
grigliaE24	24	8.656006	0.308838	-0.7007	1.00952	0.11662671	8.57436518	0.933201976	18.66403952
grigliaE25	25	7.963867	0.310059	-0.7019	1.01196	0.12706929	7.8697223	0.895959408	17.91918815
grigliaE26	26	8.397217	0.209961	-0.4456	0.65552	0.07806366	12.8100577	1.107551086	22.15102172
grigliaE27	27	8.601074	0.12207	-0.304	0.42603	0.04953165	20.1891108	1.305117191	26.10234383
grigliaE28	28	8.17627	0.279541	-0.4858	0.76538	0.09361002	10.6826171	1.028677661	20.57355322
grigliaE29	29	8.909912	0.349121	-0.6226	0.97168	0.10905604	9.16959776	0.962350285	19.2470057
grigliaE30	30	8.140869	0.279541	-0.603	0.88257	0.10841205	9.22406685	0.964922442	19.29844884
grigliaE31	31	8.861084	0.333252	-0.7495	1.08276	0.12219314	8.1837653	0.912953166	18.25906332
grigliaE32	32	7.327881	0.532227	-0.5786	1.11084	0.15159088	6.59670309	0.819326937	16.38653875
grigliaE33	33	9.199219	1.080322	-0.9583	2.03857	0.22160294	4.51257546	0.654424477	13.08848954
grigliaE34	34	8.006592	0.167236	-0.3809	0.5481	0.06845556	14.6080183	1.164591303	23.29182607
grigliaE35	35	9.984131	0.267334	-0.5273	0.79468	0.07959408	12.5637488	1.099119245	21.98238489
grigliaE36	36	7.011719	0.245361	-0.3711	0.61646	0.08791781	11.3742593	1.055923124	21.11846247
grigliaE37	37	8.294678	0.335693	-0.6738	1.00952	0.12170714	8.21644512	0.914683959	18.29367917

grigliaE38	38	7.36084	0.205078	-0.4395	0.64453	0.08756218	11.4204557	1.057683433	21.15366865
grigliaE39	39	9.543457	0.273438	-0.5957	0.86914	0.09107188	10.9803374	1.040615684	20.81231367
grigliaE40	40	8.336182	0.352783	-0.8765	1.22925	0.14745935	6.78152985	0.831327677	16.62655355
grigliaE41	41	9.425049	0.345459	-1.0059	1.35132	0.14337517	6.9747084	0.843526055	16.8705211
grigliaE42	42	8.010254	0.314941	-0.0067	0.3216	0.04014898	24.9072352	1.396325521	27.92651042
grigliaE43	43	9.488525	0.651856	-0.1001	0.75195	0.07924869	12.6185047	1.101007894	22.02015789
grigliaE44	44	7.877197	0.128174	-0.0781	0.2063	0.02618937	38.1834359	1.581875005	31.6375001
grigliaE45	45	7.298584	0.161133	-0.3955	0.55664	0.07626693	13.1118427	1.117663731	22.35327462
grigliaE46	46	8.110352	0.206299	-0.3723	0.57861	0.07134256	14.0168779	1.146651291	22.93302583
grigliaE47	47	7.626953	0.223389	-0.033	0.25635	0.03361076	29.7523777	1.473521679	29.47043358
grigliaE48	48	7.094727	0.229492	-0.0366	0.26611	0.0375086	26.6605512	1.425869125	28.51738249
grigliaE49	49	7.973633	0.129395	-0.0205	0.14991	0.01880009	53.1912234	1.725839979	34.51679958
grigliaE50	50	8.917236	0.178223	-0.0159	0.19409	0.02176592	45.9433843	1.662222983	33.24445967
grigliaE51	51	9.012451	0.334473	-0.0415	0.37598	0.04171747	23.9707757	1.379682089	27.59364178
grigliaE52	52	9.702148	0.324707	-0.0232	0.3479	0.03585808	27.8877205	1.445413017	28.90826034
grigliaE53	53	8.984375	0.136719	-0.0159	0.15259	0.01698369	58.8800195	1.769967945	35.39935891
grigliaE54	54	9.27124	0.529785	-0.1245	0.6543	0.07057275	14.1697752	1.151362961	23.02725922
grigliaE55	55	8.349609	0.543213	-0.0989	0.64209	0.07690059	13.0038016	1.114070334	22.28140668
grigliaE56	56	8.138428	0.012207	-0.022	0.03418	0.00419979	238.107133	2.376772406	47.53544812
grigliaE57	57	7.843018	0.070801	-0.2124	0.2832	0.03610894	27.6939714	1.442385239	28.84770479
grigliaE58	58	7.774658	0.109863	-0.1526	0.26245	0.03375727	29.6232519	1.471632731	29.43265462
grigliaE59	59	9.232178	0.60791	-0.0684	0.67627	0.07325136	13.6516242	1.135184323	22.70368647
grigliaE60	60	9.559326	0.635986	-0.0317	0.66772	0.06985059	14.3162709	1.155829909	23.11659818
grigliaE61	61	7.680664	0.443115	-1.0291	1.47217	0.191672	5.21724624	0.717441334	14.34882669
grigliaE62	62	8.54126	1.671143	-1.2854	2.95654	0.34614834	2.88893481	0.460737742	9.214754849
grigliaE63	63	9.238281	0.317383	-0.8972	1.2146	0.13147463	7.60603	0.881158034	17.62316068
grigliaE64	64	7.46582	0.183106	-0.0183	0.20142	0.02697842	37.0666588	1.56898344	31.3796688
grigliaE65	65	7.840576	0.147705	-0.2075	0.35522	0.04530593	22.072165	1.343844935	26.8768987
grigliaE66	66	7.930908	0.703125	-0.5701	1.27319	0.16053564	6.22914633	0.794428533	15.88857067
grigliaE67	67	9.295654	0.310059	-0.6226	0.93262	0.1003283	9.96727703	0.998576529	19.97153059
grigliaE68	68	8.262939	0.136719	-0.2588	0.39551	0.04786527	20.8919748	1.319979494	26.39958988
grigliaE69	69	7.189941	0.119629	-0.2734	0.39307	0.05466893	18.2919247	1.262259405	25.24518811
grigliaE70	70	8.170166	0.209961	-0.4871	0.69702	0.085313	11.7215426	1.068984768	21.37969537
grigliaE71	71	8.057861	0.266113	-0.686	0.95215	0.11816393	8.46281961	0.927515084	18.55030168
grigliaE72	72	8.695068	0.319824	-0.7532	1.073	0.12340306	8.10352675	0.90867407	18.17348141
grigliaE73	73	9.741211	0.246582	-0.6836	0.93018	0.09548871	10.4724419	1.020047961	20.40095921
grigliaE74	74	9.398193	0.109863	-0.2966	0.40649	0.04325238	23.1201159	1.363990006	27.27980012
grigliaE75	75	9.123535	0.306397	-0.7593	1.06567	0.11680492	8.56128301	0.932538854	18.65077708
grigliaE76	76	8.389893	0.878906	-0.7422	1.62109	0.19321983	5.17545223	0.713948304	14.27896608
grigliaE77	77	7.907715	0.236816	-0.6262	0.86304	0.10913862	9.1626594	0.962021543	19.24043086
grigliaE78	78	7.873535	0.146484	-0.4028	0.54932	0.06976744	14.3333332	1.156347197	23.12694394
grigliaE79	79	8.804932	0.131836	-0.2454	0.3772	0.04283931	23.3430471	1.368157546	27.36315092
grigliaE80	80	8.265381	0.290527	-0.769	1.05957	0.12819376	7.80069147	0.892133101	17.84266202
grigliaE81	81	9.854736	1.337891	-1.1401	2.47803	0.25145554	3.97684611	0.599538785	11.9907757
grigliaE82	82	8.510742	0.202637	-0.4822	0.68481	0.08046471	12.4278082	1.094394541	21.88789083

grigliaE83	83	9.024658	0.147705	-0.3491	0.49683	0.05505208	18.1646177	1.259226263	25.18452525
grigliaE84	84	7.1521	0.107422	-0.1331	0.24048	0.03362348	29.7411203	1.473357324	29.46714648
grigliaE85	85	7.362061	0.52124	-0.4822	1.00342	0.13629579	7.33698392	0.865517567	17.31035135
grigliaE86	86	8.736572	0.67627	-0.6396	1.31592	0.15062177	6.63914671	0.822112266	16.44224532
grigliaE87	87	7.703857	0.195313	-0.4724	0.66772	0.08667406	11.5374767	1.062110836	21.24221672
grigliaE88	88	7.76123	0.10376	-0.249	0.35278	0.04545455	21.9999989	1.342422658	26.84845317
grigliaE89	89	9.958496	0.106201	-0.2271	0.33325	0.03346409	29.8827794	1.475420989	29.50841978
grigliaE90	90	8.88916	0.152588	-0.3442	0.49683	0.05589124	17.8918906	1.252656233	25.05312466
grigliaE91	91	9.387207	0.253906	-0.3955	0.64941	0.06918075	14.4548886	1.160014748	23.20029496
grigliaE92	92	7.209473	0.098877	-0.1599	0.25879	0.0358957	27.8584932	1.444957623	28.89915247
grigliaE93	93	9.487305	0.19165	-0.3284	0.52002	0.05481214	18.2441332	1.261123233	25.22246466
grigliaE94	94	9.18457	0.161133	-0.4224	0.5835	0.06353004	15.7405851	1.197020871	23.94041742
grigliaE95	95	9.475098	0.334473	-0.8008	1.13525	0.11981448	8.34623691	0.921490708	18.42981416
grigliaE96	96	9.056396	0.267334	-0.5005	0.76782	0.08478232	11.7949114	1.071694683	21.43389366
grigliaE97	97	7.421875	0.084229	-0.2124	0.29663	0.0399671	25.0205795	1.398297363	27.96594727
grigliaE98	98	8.4729	0.256348	-0.0317	0.28809	0.03400087	29.4110113	1.468509957	29.37019915
grigliaE99	99	9.544678	0.234375	-0.5261	0.7605	0.0796777	12.5505629	1.098663205	21.97326411
grigliaE100	100	7.634277	0.202637	-0.282	0.48462	0.06347937	15.7531492	1.197367387	23.94734774
grigliaE101	101	7.561035	0.12085	-0.2563	0.3772	0.04988699	20.0453052	1.302012673	26.04025346
grigliaE102	102	7.518311	0.20874	-0.3479	0.55664	0.07403799	13.5065804	1.130545407	22.61090814
grigliaE103	103	9.138184	0.541992	-0.0647	0.60669	0.06639059	15.0623745	1.177893441	23.55786883
grigliaE104	104	8.527832	0.145264	-0.2979	0.44312	0.05196107	19.2451761	1.28432189	25.68643781
grigliaE105	105	8.391113	0.130615	-0.271	0.40161	0.04786151	20.8936178	1.320013646	26.40027291
grigliaE106	106	9.055176	0.279541	-0.4053	0.68481	0.07562685	13.2228177	1.121324012	22.42648024
grigliaE107	107	8.734131	0.396729	-0.0366	0.43335	0.04961565	20.1549308	1.304381311	26.08762623
grigliaE108	108	8.986816	0.422363	-0.0488	0.47119	0.05243141	19.0725374	1.280408476	25.60816952
grigliaE109	109	8.148193	0.095215	-0.2075	0.30273	0.03715356	26.9153245	1.42999962	28.59999241
grigliaE110	110	7.491455	0.181885	-0.2979	0.47974	0.06403781	15.6157736	1.193563503	23.87127007
grigliaE111	111	9.282227	0.429688	-0.0354	0.46509	0.05010521	19.9580062	1.300117154	26.00234307
grigliaE112	112	7.469482	0.338135	-0.0342	0.37231	0.04984475	20.062292	1.302380546	26.04761093
grigliaE113	113	9.458008	0.220947	-0.3345	0.55542	0.05872484	17.0285694	1.231178163	24.62356326
grigliaE114	114	8.310547	0.148926	-0.1868	0.33569	0.04039366	24.756361	1.393686807	27.87373614
grigliaE115	115	7.679443	0.213623	-0.0146	0.22827	0.029725	33.6417162	1.526878143	30.53756285
grigliaE116	116	7.960205	0.333252	-0.0488	0.38208	0.04799878	20.8338633	1.318769811	26.37539622
grigliaE117	117	7.767334	0.257568	-0.0183	0.27588	0.03551784	28.1548628	1.449553416	28.99106832
grigliaE118	118	9.768066	0.10376	-0.2856	0.3894	0.03986504	25.0846383	1.399407842	27.98815685
grigliaE119	119	7.247314	0.123291	-0.2124	0.33569	0.04631968	21.5890934	1.334234405	26.6846881
grigliaE120	120	7.39624	0.236816	-0.022	0.25879	0.03498927	28.580188	1.456065082	29.12130164
grigliaE121	121	8.603516	0.289307	-0.0293	0.3186	0.03703178	27.0038365	1.431425469	28.62850938
grigliaE122	122	8.937988	0.187988	-0.2466	0.43457	0.0486206	20.5674157	1.313179725	26.26359451
grigliaE123	123	7.830811	0.075684	-0.1392	0.21484	0.0274357	36.448859	1.561683937	31.23367874
grigliaE124	124	8.4729	0.318604	-0.0476	0.36621	0.04322144	23.1366667	1.36430079	27.28601581
grigliaE125	125	9.862061	0.41626	-0.0317	0.448	0.04542642	22.0136234	1.342691532	26.85383063
grigliaE126	126	8.031006	0.185547	-0.2698	0.45532	0.05669555	17.6380687	1.246451029	24.92902059
grigliaE127	127	8.712158	0.146484	-0.2698	0.41626	0.04777918	20.9296166	1.320761272	26.41522544

grigliaE128	128	9.366455	0.144043	-0.2551	0.39917	0.04261698	23.464827	1.370417357	27.40834714
grigliaE129	129	7.607422	0.289307	-0.3223	0.61157	0.08039152	12.4391233	1.094789773	21.89579545
grigliaE130	130	7.537842	0.104981	-0.0977	0.20264	0.02688259	37.1987904	1.570528819	31.41057637
grigliaE131	131	7.415771	0.117188	-0.177	0.29419	0.03967079	25.2074632	1.401529142	28.03058284
grigliaE132	132	7.960205	0.318604	-0.0317	0.35034	0.04401165	22.7212552	1.35643232	27.1286464
grigliaE133	133	7.994385	0.189209	-0.2197	0.40894	0.05115285	19.5492518	1.29113014	25.82260279
grigliaE134	134	9.310303	0.198975	-0.4004	0.59937	0.06437655	15.5336062	1.191272292	23.82544583
grigliaE135	135	8.422852	0.151367	-0.2698	0.42114	0.05	20	1.301029996	26.02059991
grigliaE136	136	8.137207	0.162354	-0.2917	0.4541	0.05580557	17.9193572	1.253322428	25.06644855
grigliaE137	137	8.220215	0.197754	-0.3235	0.52124	0.06340956	15.7704931	1.197845274	23.95690548
grigliaE138	138	8.453369	0.332031	-0.2563	0.58838	0.06960289	14.3672198	1.157372737	23.14745474
grigliaE139	139	9.659424	0.189209	-0.2881	0.47729	0.04941236	20.237853	1.306164436	26.12328872
grigliaE140	140	9.290771	0.236816	-0.0171	0.25391	0.02732887	36.5913457	1.563378381	31.26756763
grigliaE141	141	8.19458	0.133057	-0.2271	0.36011	0.04394458	22.7559334	1.357094653	27.14189307
grigliaE142	142	9.844971	0.828857	-0.7861	1.61499	0.16404215	6.09599427	0.78504455	15.700891
grigliaE143	143	8.757324	0.562744	-0.5774	1.14014	0.13019236	7.68094212	0.885414492	17.70828985
grigliaE144	144	9.321289	0.252686	-0.498	0.75073	0.08053955	12.4162604	1.093990814	21.87981627
grigliaE145	145	9.658203	0.335693	-0.5701	0.90576	0.09378161	10.6630717	1.027882329	20.55764657
grigliaE146	146	9.848633	0.26001	-0.6042	0.86426	0.08775409	11.3954806	1.056732646	21.13465293
grigliaE147	147	9.51416	0.15625	-0.2026	0.35889	0.03772132	26.510205	1.423413087	28.46826173
grigliaE148	148	8.980713	0.157471	-0.2258	0.3833	0.04268044	23.4299354	1.369771092	27.39542184
grigliaE149	149	8.937988	0.480957	-0.4956	0.97656	0.10925977	9.15249971	0.961539724	19.23079448
grigliaE150	150	7.990723	0.174561	-0.2356	0.41016	0.05132905	19.4821461	1.289636795	25.7927359
grigliaE151	151	7.015381	0.126953	-0.2319	0.35889	0.05115712	19.5476205	1.291093898	25.82187796
grigliaE152	152	9.073486	0.261231	-0.6018	0.86304	0.09511638	10.5134368	1.021744708	20.43489416
grigliaE153	153	9.797363	1.147461	-1.1536	2.30103	0.23486167	4.25782553	0.629187862	12.58375724
grigliaE154	154	8.088379	0.10376	-0.1599	0.26367	0.03259886	30.6759234	1.486797644	29.73595289
grigliaE155	155	9.442139	0.155029	-0.2441	0.39917	0.04227537	23.6544364	1.373912604	27.47825209
grigliaE156	156	7.420654	0.250244	-0.3003	0.55054	0.07418984	13.4789354	1.129655592	22.59311183
grigliaE157	157	8.128662	0.335693	-0.3308	0.6665	0.08199429	12.1959706	1.08621637	21.72432741
grigliaE158	158	7.879639	0.233154	-0.4785	0.71167	0.09031758	11.072042	1.044227723	20.88455447
grigliaE159	159	7.666016	0.279541	-0.6494	0.92896	0.12117834	8.25229982	0.916574998	18.33149996
grigliaE160	160	7.76001	0.251465	-0.6238	0.87524	0.11278904	8.86610947	0.947733089	18.95466178
grigliaE161	161	7.202148	0.089111	-0.2112	0.30029	0.04169491	23.9837415	1.379916934	27.59833868
grigliaE162	162	7.193604	0.157471	-0.3247	0.48218	0.06702867	14.9189894	1.173739406	23.47478811
grigliaE163	163	7.637939	0.179443	-0.4382	0.61768	0.08086943	12.3656115	1.092215599	21.84431198
grigliaE164	164	8.687744	0.263672	-0.7007	0.96436	0.11100183	9.00886032	0.954669853	19.09339707
grigliaE165	165	7.213135	0.751953	-0.6799	1.43188	0.19851073	5.03751105	0.702216012	14.04432024
grigliaE166	166	8.000488	1.016846	-0.9546	1.97144	0.24641444	4.05820367	0.608333839	12.16667679

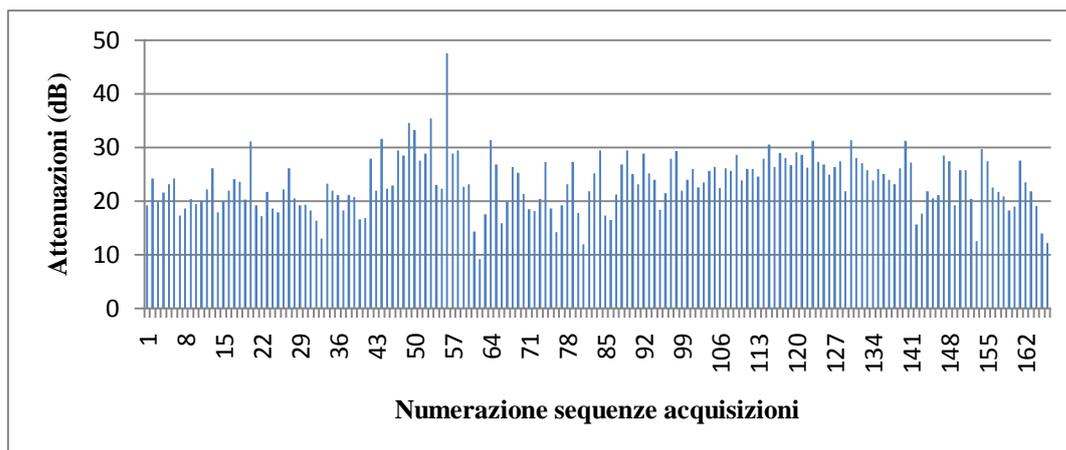


Figura 5.85 Muretto PNDE, corso 6, valori di attenuazioni

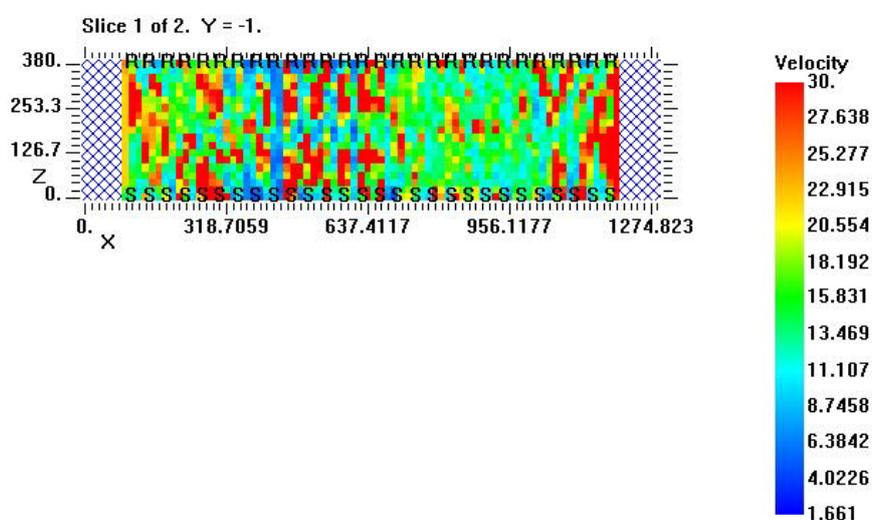


Figura 5.86 Muretto PNDE, corso 6, mappa dell'attenuazione

5.2.2 Corso 11: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 34x10 pixel

Il corso 11 presenta una prima fila di mattoni di lista e una seconda fila di mattoni di testa. Il difetto a destra dista 12 cm dal fronte, mentre quello a sinistra è profondo 25 cm dalla stazione trasmittente. Essi sono alti due corsi, di cui questo è quello inferiore. Lo spessore del corso sul lato destro rispetto al fronte è di 37,9 cm e sul lato sinistro di 37,7 cm; comunque si considera uno spessore costante di 38 cm perché queste variazioni millimetriche mi producono variazioni di lunghezze dei percorsi inferiori al 1%. L'analisi dei tempi di volo mi fornisce la tabella 5.16. A prima vista si nota che le velocità in corrispondenza dei difetti sono più alte rispetto ai valori del corso 6. Il segnale in corrispondenza dell'anomalia la aggira sia lateralmente sia inferiormente o superiormente e alla stazione ricevente giungerà per primo il segnale

che percorre una traiettoria più corta rispetto agli altri. In questo specifico caso, il segnale segue un cammino al di sotto del vuoto e quindi allunga il suo percorso di pochi centimetri, essendo la stazione a metà dell'altezza del corso di mattoni. Ne segue che i tempi di volo non subiscono un aumento considerevole da poter identificare con chiarezza la presenza di un'imperfezione. Le figure 5.87, 5.88 e 5.89 riportano tempi di volo e velocità, le quali non presentano evidenti picchi.

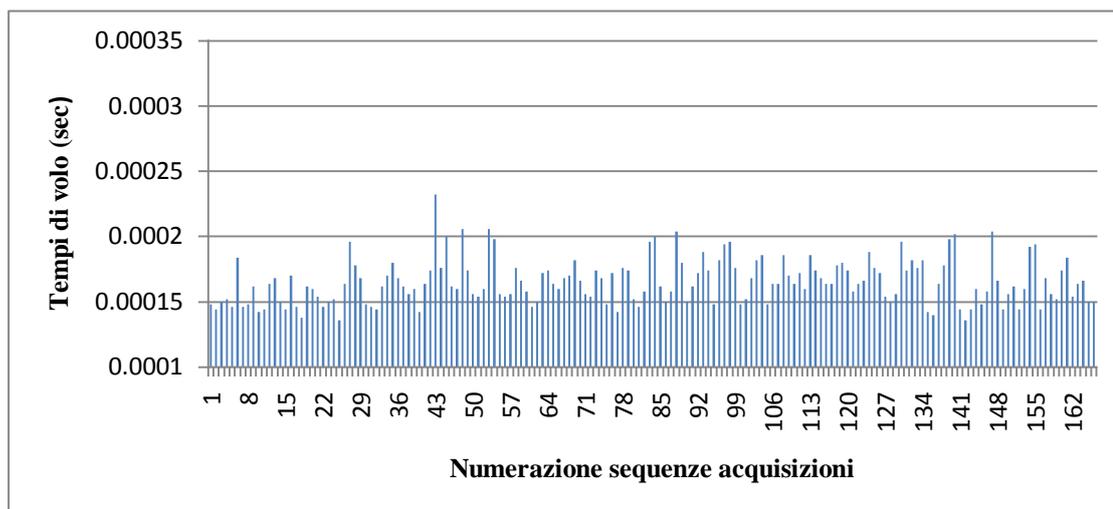


Figura 5.87 Muretto PNDE, corso 11, tempi di volo espressi in sec

Tabella 5.16 Provino PNDE, corso 11: valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corsol1	1	1	1	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDe_corsol1	1	2	2	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_corsol1	1	3	3	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_corsol1	1	4	4	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDe_corsol1	1	5	5	0.4123	146	0.000146	2823.972603	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PNDe_corsol1	1	6	6	0.4294	184	0.000184	2333.695652		N
PNDe_corsol1	2	1	7	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDe_corsol1	2	2	8	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDe_corsol1	2	3	9	0.3821	162	0.000162	2358.641975		N
PNDe_corsol1	2	4	10	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N

PNDe_ corso11	2	5	11	0.3985	144	0.000144	2767.361111	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PNDe_ corso11	2	6	12	0.4123	164	0.000164	2514.02439		N
PNDe_ corso11	2	7	13	0.4294	168	0.000168	2555.952381		N
PNDe_ corso11	3	1	14	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso11	3	2	15	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_ corso11	3	3	16	0.38	170	0.00017	2235.294118	Strana curva martello	N
PNDe_ corso11	3	4	17	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDe_ corso11	3	5	18	0.3883	138	0.000138	2813.768116	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PNDe_ corso11	3	6	19	0.3985	162	0.000162	2459.876543		N
PNDe_ corso11	3	8	20	0.4294	160	0.00016	2683.75		S
PNDe_ corso11	4	1	21	0.3985	154	0.000154	2587.662338		N
PNDe_ corso11	4	2	22	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDe_ corso11	4	3	23	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PNDe_ corso11	4	4	24	0.38	152	0.000152	2500		N
PNDe_ corso11	4	5	25	0.3821	136	0.000136	2809.558824	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	N
PNDe_ corso11	4	6	26	0.3883	164	0.000164	2367.682927		S
PNDe_ corso11	4	9	27	0.4294	196	0.000196	2190.816327		S
PNDe_ corso11	5	1	28	0.4123	178	0.000178	2316.292135	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDe_ corso11	5	2	29	0.3985	168	0.000168	2372.02381	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDe_ corso11	5	3	30	0.3883	148	0.000148	2623.648649	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDe_ corso11	5	4	31	0.3821	146	0.000146	2617.123288	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	5	5	32	0.38	144	0.000144	2638.888889	Posizione martello sul bordo mattone.Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso11	5	6	33	0.3821	162	0.000162	2358.641975	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	5	7	34	0.3883	170	0.00017	2284.117647	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	5	10	35	0.4294	180	0.00018	2385.555556	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	6	1	36	0.4294	168	0.000168	2555.952381		N

PNDe_ corso11	6	2	37	0.4123	162	0.000162	2545.061728		S
PNDe_ corso11	6	3	38	0.3985	156	0.000156	2554.487179		S
PNDe_ corso11	6	4	39	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso11	6	5	40	0.3821	142	0.000142	2690.84507	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina	S
PNDe_ corso11	6	6	41	0.38	164	0.000164	2317.073171		S
PNDe_ corso11	6	8	42	0.3883	174	0.000174	2231.609195		S
PNDe_ corso11	6	11	43	0.4294	232	0.000232	1850.862069		S
PNDe_ corso11	7	2	44	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S
PNDe_ corso11	7	5	45	0.3883	200	0.0002	1941.5		S
PNDe_ corso11	7	7	46	0.38	162	0.000162	2345.679012		S
PNDe_ corso11	7	9	47	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso11	7	12	48	0.4294	206	0.000206	2084.466019		S
PNDe_ corso11	8	3	49	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDe_ corso11	8	6	50	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDe_ corso11	8	8	51	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDe_ corso11	8	10	52	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso11	8	13	53	0.4294	206	0.000206	2084.466019		S
PNDe_ corso11	9	4	54	0.4294	198	0.000198	2168.686869		S
PNDe_ corso11	9	7	55	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDe_ corso11	9	9	56	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDe_ corso11	9	11	57	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDe_ corso11	9	14	58	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S
PNDe_ corso11	10	5	59	0.4294	166	0.000166	2586.746988		S
PNDe_ corso11	10	8	60	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDe_ corso11	10	10	61	0.38	146	0.000146	2602.739726		S
PNDe_ corso11	10	12	62	0.3883	150	0.00015	2588.666667		S
PNDe_ corso11	10	15	63	0.4294	172	0.000172	2496.511628		N
PNDe_ corso11	11	6	64	0.4294	174	0.000174	2467.816092	Posizione martello vicino bordo mattone.	S

PNDe_corsol1	11	9	65	0.3883	164	0.000164	2367.682927	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDe_corsol1	11	11	66	0.38	160	0.00016	2375	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDe_corsol1	11	13	67	0.3883	168	0.000168	2311.309524	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_corsol1	11	16	68	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_corsol1	12	7	69	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PNDe_corsol1	12	10	70	0.3883	166	0.000166	2339.156627		S
PNDe_corsol1	12	12	71	0.38	156	0.000156	2435.897436		N
PNDe_corsol1	12	14	72	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDe_corsol1	12	17	73	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDe_corsol1	13	8	74	0.4294	168	0.000168	2555.952381		S
PNDe_corsol1	13	11	75	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDe_corsol1	13	13	76	0.38	172	0.000172	2209.302326		N
PNDe_corsol1	13	15	77	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDe_corsol1	13	18	78	0.4294	176	0.000176	2439.772727		N
PNDe_corsol1	14	9	79	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDe_corsol1	14	12	80	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDe_corsol1	14	14	81	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_corsol1	14	16	82	0.3883	158	0.000158	2457.594937		N
PNDe_corsol1	14	19	83	0.4294	196	0.000196	2190.816327		S
PNDe_corsol1	15	10	84	0.4294	200	0.0002	2147	Strana curva martello	N
PNDe_corsol1	15	13	85	0.3883	162	0.000162	2396.91358		N
PNDe_corsol1	15	15	86	0.38	150	0.00015	2533.333333		N
PNDe_corsol1	15	17	87	0.3883	158	0.000158	2457.594937		N
PNDe_corsol1	15	20	88	0.4294	204	0.000204	2104.901961		S
PNDe_corsol1	16	11	89	0.4294	180	0.00018	2385.555556		N
PNDe_corsol1	16	14	90	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_corsol1	16	16	91	0.38	162	0.000162	2345.679012		N
PNDe_corsol1	16	18	92	0.3883	172	0.000172	2257.55814		S

PNDe_ corso11	16	21	93	0.4294	188	0.000188	2284.042553	Posizione accelerometro sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	17	12	94	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDe_ corso11	17	15	95	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDe_ corso11	17	17	96	0.38	182	0.000182	2087.912088		N
PNDe_ corso11	17	19	97	0.3883	194	0.000194	2001.546392		S
PNDe_ corso11	17	22	98	0.4294	196	0.000196	2190.816327		S
PNDe_ corso11	18	13	99	0.4294	176	0.000176	2439.772727		N
PNDe_ corso11	18	16	100	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDe_ corso11	18	18	101	0.38	152	0.000152	2500		S
PNDe_ corso11	18	20	102	0.3883	168	0.000168	2311.309524		S
PNDe_ corso11	18	23	103	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PNDe_ corso11	19	14	104	0.4294	186	0.000186	2308.602151		N
PNDe_ corso11	19	17	105	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDe_ corso11	19	19	106	0.38	164	0.000164	2317.073171		S
PNDe_ corso11	19	21	107	0.3883	164	0.000164	2367.682927	Posizione accelerometro sul bordo mattone.	S
PNDe_ corso11	19	24	108	0.4294	186	0.000186	2308.602151	Posizione accelerometro sul giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso11	20	15	109	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDe_ corso11	20	18	110	0.3883	164	0.000164	2367.682927		S
PNDe_ corso11	20	20	111	0.38	172	0.000172	2209.302326		S
PNDe_ corso11	20	22	112	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso11	20	25	113	0.4294	186	0.000186	2308.602151		S
PNDe_ corso11	21	16	114	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDe_ corso11	21	19	115	0.3883	168	0.000168	2311.309524		S
PNDe_ corso11	21	21	116	0.38	164	0.000164	2317.073171		S
PNDe_ corso11	21	23	117	0.3883	164	0.000164	2367.682927		S
PNDe_ corso11	21	26	118	0.4294	178	0.000178	2412.359551		S
PNDe_ corso11	22	17	119	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDe_ corso11	22	20	120	0.3883	174	0.000174	2231.609195		S

PND _e _corso11	22	22	121	0.38	158	0.000158	2405.063291		S
PND _e _corso11	22	24	122	0.3883	164	0.000164	2367.682927		S
PND _e _corso11	22	27	123	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PND _e _corso11	23	18	124	0.4294	188	0.000188	2284.042553		S
PND _e _corso11	23	21	125	0.3883	176	0.000176	2206.25	Posizione accelerometro sul bordo mattone.	S
PND _e _corso11	23	23	126	0.38	172	0.000172	2209.302326		S
PND _e _corso11	23	24	127	0.3821	154	0.000154	2481.168831		S
PND _e _corso11	23	25	128	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PND _e _corso11	23	26	129	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PND _e _corso11	23	27	130	0.4123	196	0.000196	2103.571429		N
PND _e _corso11	23	28	131	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PND _e _corso11	24	19	132	0.4294	182	0.000182	2359.340659	Posizione martello sul giunto di malta, battuto più in basso per evitare rottura del mattone.	S
PND _e _corso11	24	22	133	0.3883	176	0.000176	2206.25	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	S
PND _e _corso11	24	23	134	0.3821	182	0.000182	2099.450549	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	S
PND _e _corso11	24	24	135	0.38	142	0.000142	2676.056338	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	S
PND _e _corso11	24	25	136	0.3821	140	0.00014	2729.285714	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	N
PND _e _corso11	24	26	137	0.3883	164	0.000164	2367.682927	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	N
PND _e _corso11	24	27	138	0.3985	178	0.000178	2238.764045	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	N
PND _e _corso11	24	28	139	0.4123	198	0.000198	2082.323232	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	N
PND _e _corso11	25	20	140	0.4294	202	0.000202	2125.742574		S
PND _e _corso11	25	23	141	0.3883	144	0.000144	2696.527778		S
PND _e _corso11	25	24	142	0.3821	136	0.000136	2809.558824		S
PND _e _corso11	25	25	143	0.38	144	0.000144	2638.888889		N
PND _e _corso11	25	26	144	0.3821	160	0.00016	2388.125		N
PND _e _corso11	25	27	145	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PND _e _corso11	25	28	146	0.3985	158	0.000158	2522.151899		N
PND _e _corso11	26	21	147	0.4294	204	0.000204	2104.901961		S
PND _e _corso11	26	23	148	0.3985	166	0.000166	2400.60241		S

PNDe_ corso11	26	24	149	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDe_ corso11	26	25	150	0.3821	156	0.000156	2449.358974		N
PNDe_ corso11	26	26	151	0.38	162	0.000162	2345.679012		N
PNDe_ corso11	26	27	152	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_ corso11	26	28	153	0.3883	160	0.00016	2426.875		N
PNDe_ corso11	27	22	154	0.4294	192	0.000192	2236.458333		S
PNDe_ corso11	27	23	155	0.4123	194	0.000194	2125.257732		S
PNDe_ corso11	27	24	156	0.3985	144	0.000144	2767.361111		N
PNDe_ corso11	27	25	157	0.3883	168	0.000168	2311.309524		N
PNDe_ corso11	27	26	158	0.3821	156	0.000156	2449.358974		N
PNDe_ corso11	27	27	159	0.38	152	0.000152	2500		N
PNDe_ corso11	27	28	160	0.3821	174	0.000174	2195.977011		N
PNDe_ corso11	28	23	161	0.4294	184	0.000184	2333.695652		S
PNDe_ corso11	28	24	162	0.4123	154	0.000154	2677.272727		N
PNDe_ corso11	28	25	163	0.3985	164	0.000164	2429.878049		N
PNDe_ corso11	28	26	164	0.3883	166	0.000166	2339.156627		N
PNDe_ corso11	28	27	165	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PNDe_ corso11	28	28	166	0.38	150	0.00015	2533.333333		N

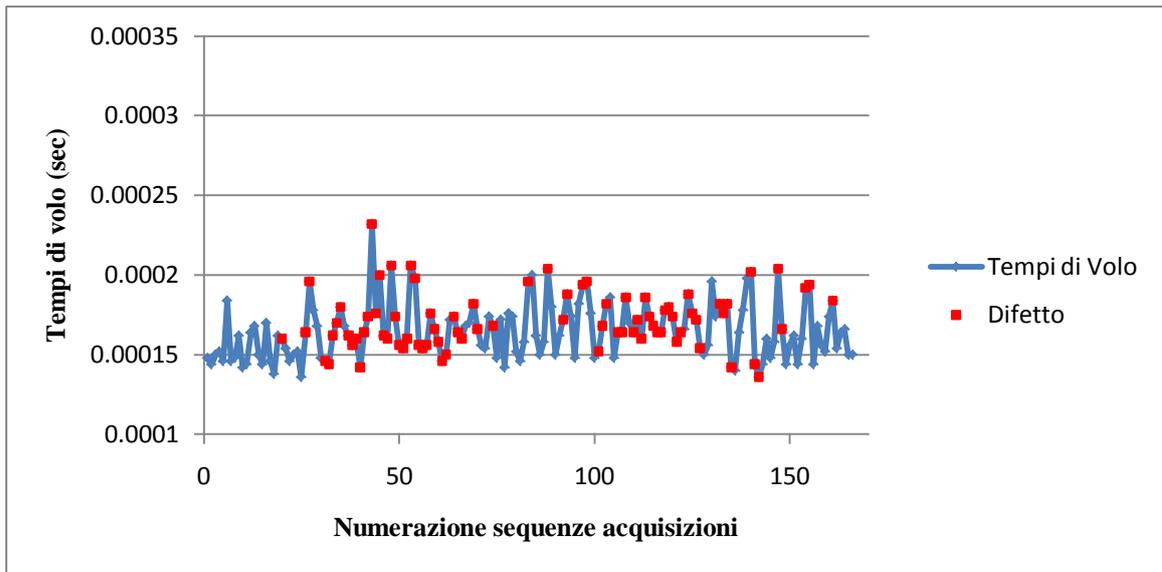


Figura 5.88 Muretto PNDE, corso 11, tempi di volo espressi in sec con dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto

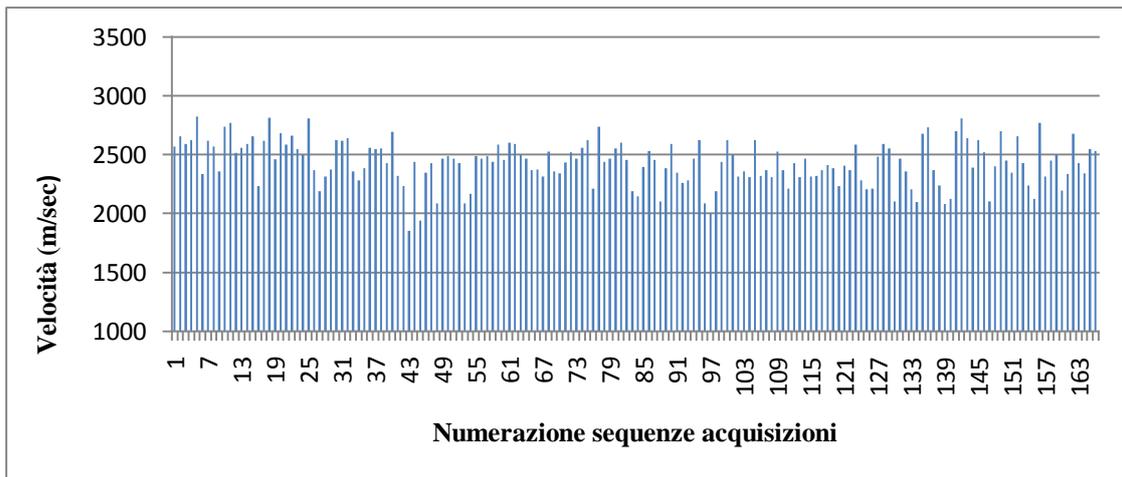


Figura 5.89 Muretto PNDE, corso 11, velocità espressa in m/sec

I percorsi che toccano i difetti sono in numero maggiore rispetto al corso 6 e quindi la zona in cui i raggi attraversano la sezione senza evidenti imperfezioni è piuttosto ridotta. I raggi all'interno sono influenzati dalla presenza dei vuoti creati. Ciò viene mostrato nelle figure 5.90, 5.91 e 5.92. La velocità media nella zona visualizzata è di 2394 m/s, che paragonata alla velocità del corso 6 è diminuita a seguito dei fattori sopra menzionati.

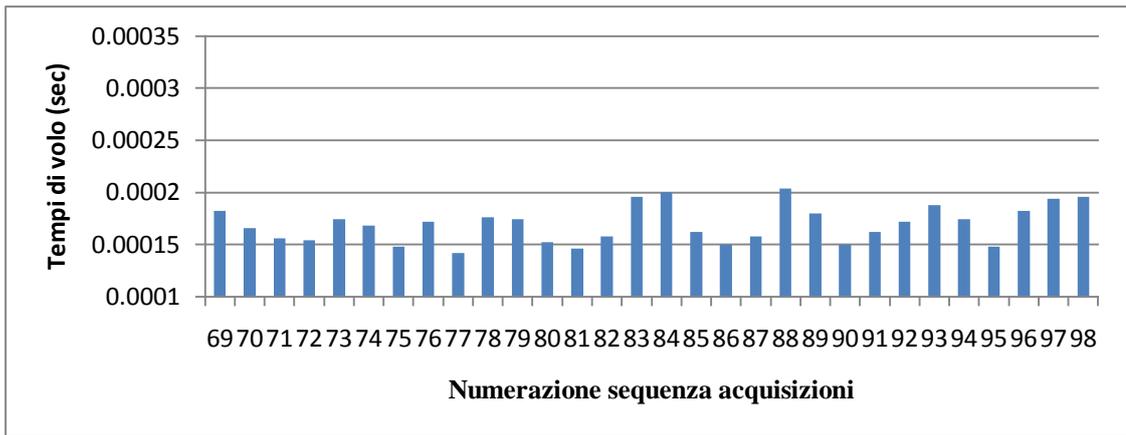


Figura 5.90 Muretto PNDE, corso 11, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi che non hanno stazioni Tx di fronte al difetto del corso 11 del muretto PNDE

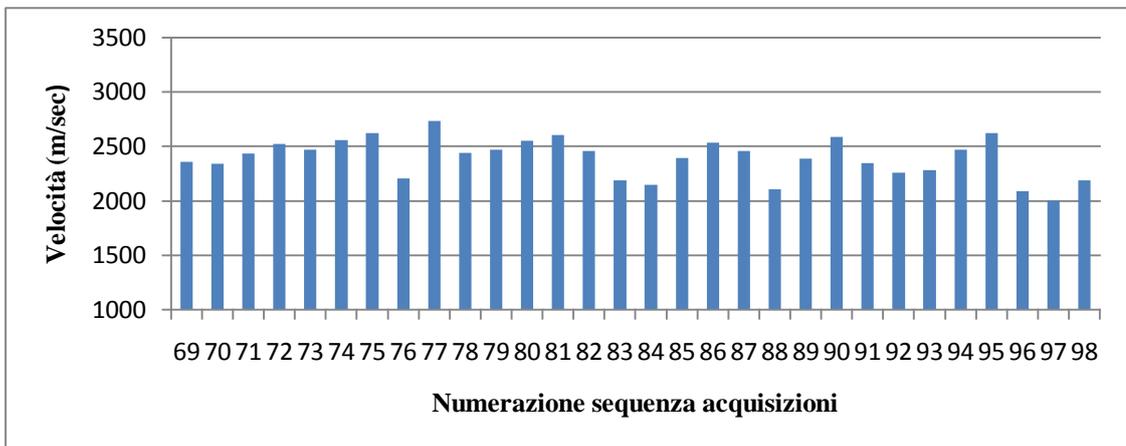


Figura 5.91 Muretto PNDE, corso 11, velocità dei percorsi che non hanno stazioni Tx di fronte al difetto

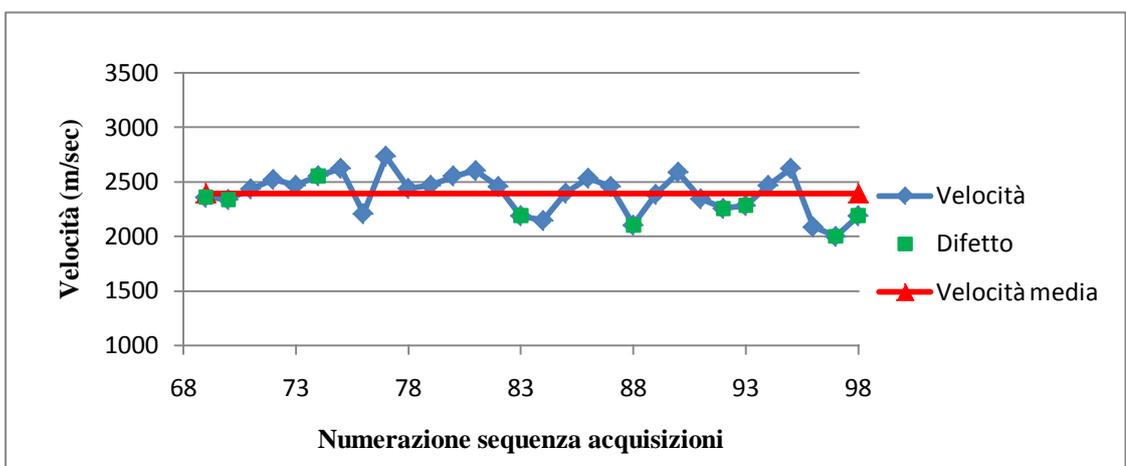


Figura 5.92 Muretto PNDE, corso 11, velocità espressa in m/s dei percorsi che non hanno stazioni Tx di fronte al difetto con dettaglio sui quelli che toccano il difetto

È notevole vedere il risultato che ci fornisce il software Geotom. Le dimensioni dei pixel e il numero di iterazioni rimangono uguali al corso 6, in modo da poterne poi fare un confronto per quanto riguarda la griglia di pixel di 34x10, mentre l'altra suddivisione considerata, visti i risultati ottenuti, è di 52x19 pixel. Le tabelle riassuntive 5.17 e 5.18 ci indicano il nome di ciascun file prodotto e le specifiche caratteristiche. I risultati prodotti sono visualizzati nelle figure 5.93, 5.94, 5.95, 5.96, 5.97, 5.98 e 5.99.

Tabella 5.17 Muretto PNDE, corso 11, parametri di inversione con una griglia di 52x19 pixel

Pixel: 52x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso11_100	5	0	5	corso11_101	Figura 5.93
corso11_101	5	0	10	corso11_102	
corso11_102	5	0	15	corso11_103	
corso11_103	5	0	20	corso11_104	
corso11_104	5	0	25	corso11_105	
corso11_105	5	0	30	corso11_106	
corso11_100	5	0	5	corso11_101	
corso11_101	0	5	10	corso11_107	Figura 5.94
corso11_107	0	5	15	corso11_108	Figura 5.95
corso11_108	0	5	20	corso11_109	
corso11_109	0	5	25	corso11_110	
corso11_110	0	5	30	corso11_111	

Tabella 5.18 Muretto PNDE, corso 11, parametri di inversione con una griglia di 34x10 pixel

Pixel: 34x10		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso11_136	5	0	5	corso11_137	Figura 5.96
corso11_137	5	0	10	corso11_138	
corso11_138	5	0	15	corso11_139	
corso11_139	5	0	20	corso11_140	
corso11_140	5	0	25	corso11_141	
corso11_141	5	0	30	corso11_142	
corso11_136	5	0	5	corso11_137	
corso11_137	0	5	10	corso11_143	Figura 5.97
corso11_143	0	5	15	corso11_144	Figura 5.98
corso11_144	0	5	20	corso11_145	Figura 5.99
corso11_145	0	5	25	corso11_146	
corso11_146	0	5	30	corso11_147	

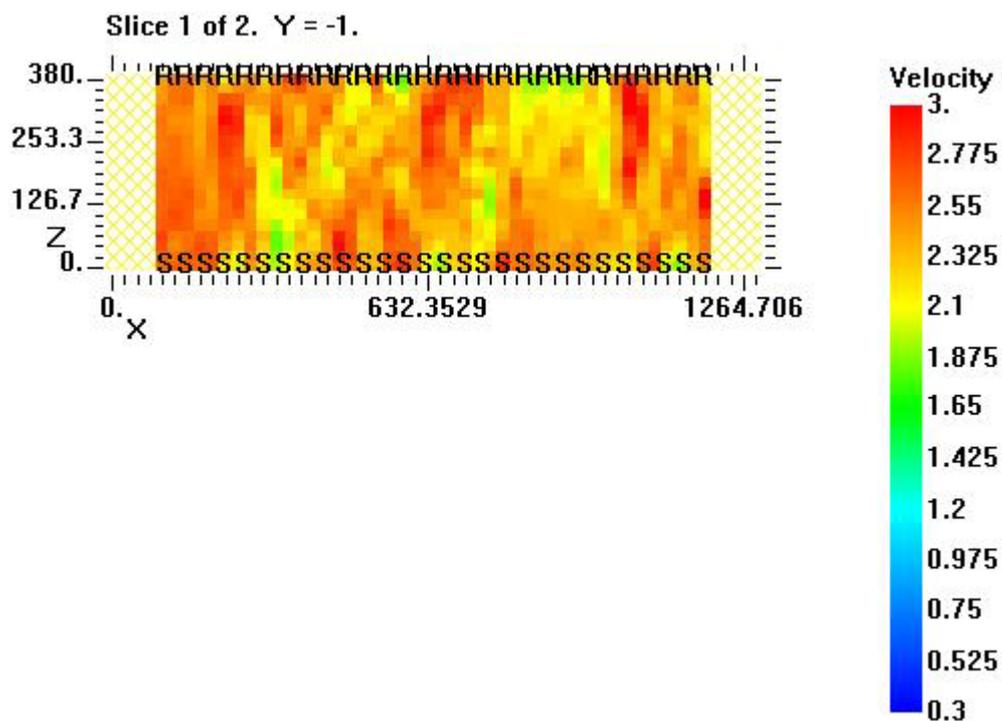


Figura 5.93 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso11_101

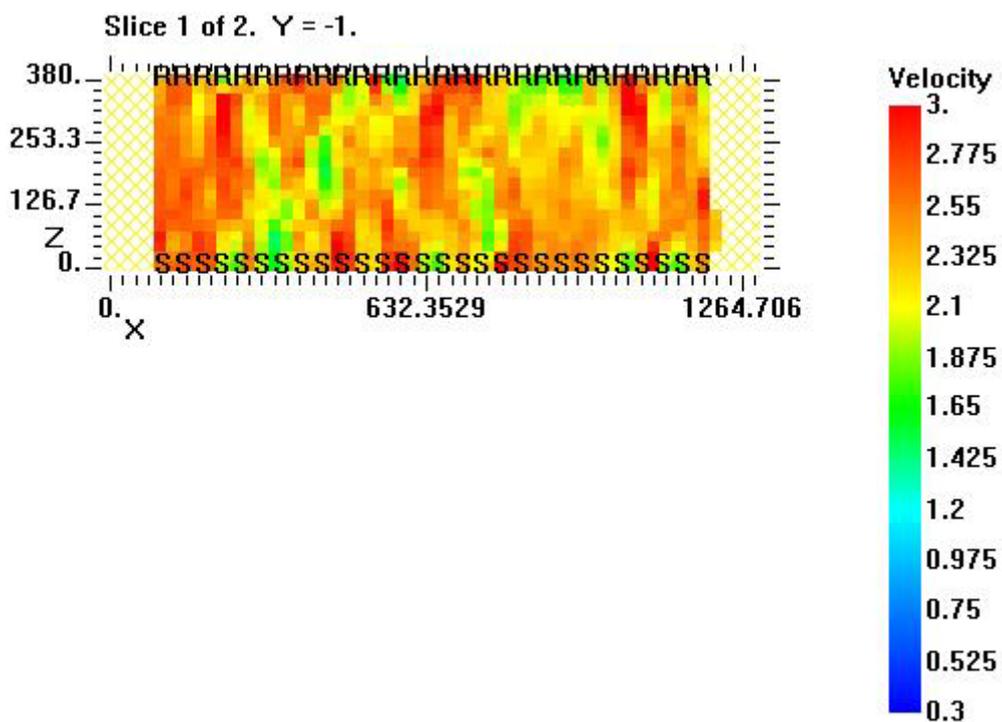


Figura 5.94 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso11_107

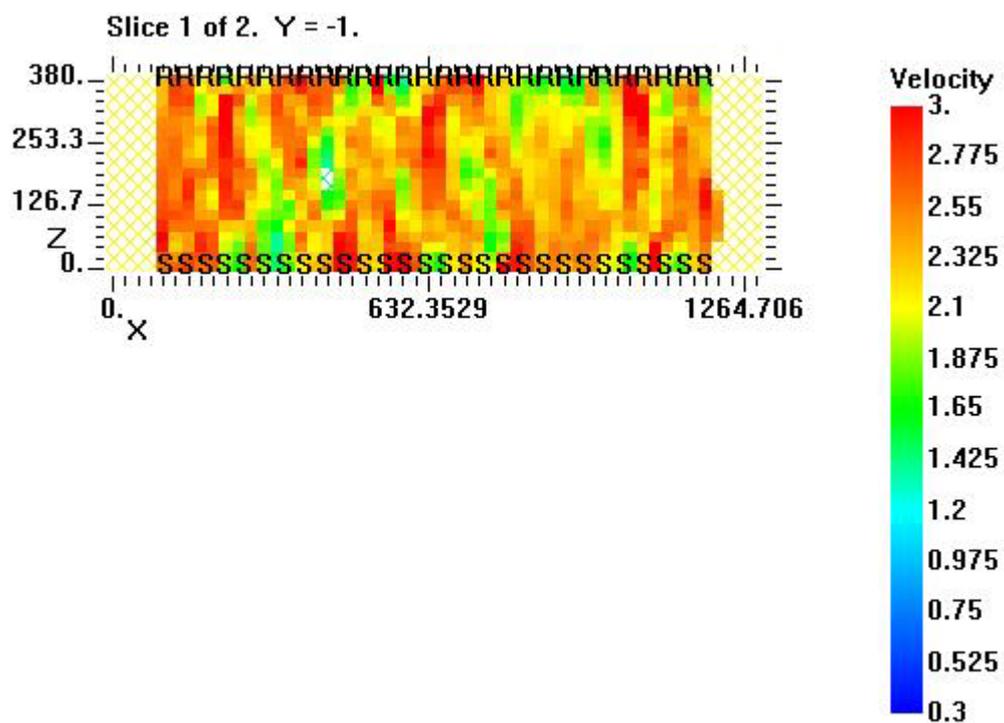


Figura 5.95 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso11_108

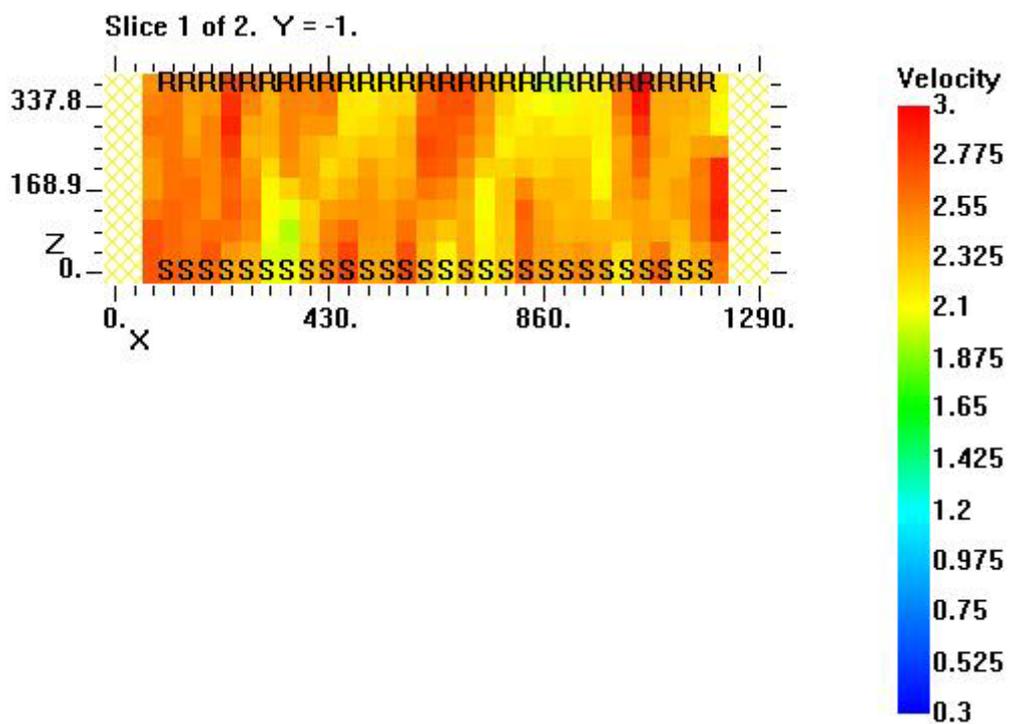


Figura 5.96 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso11_137

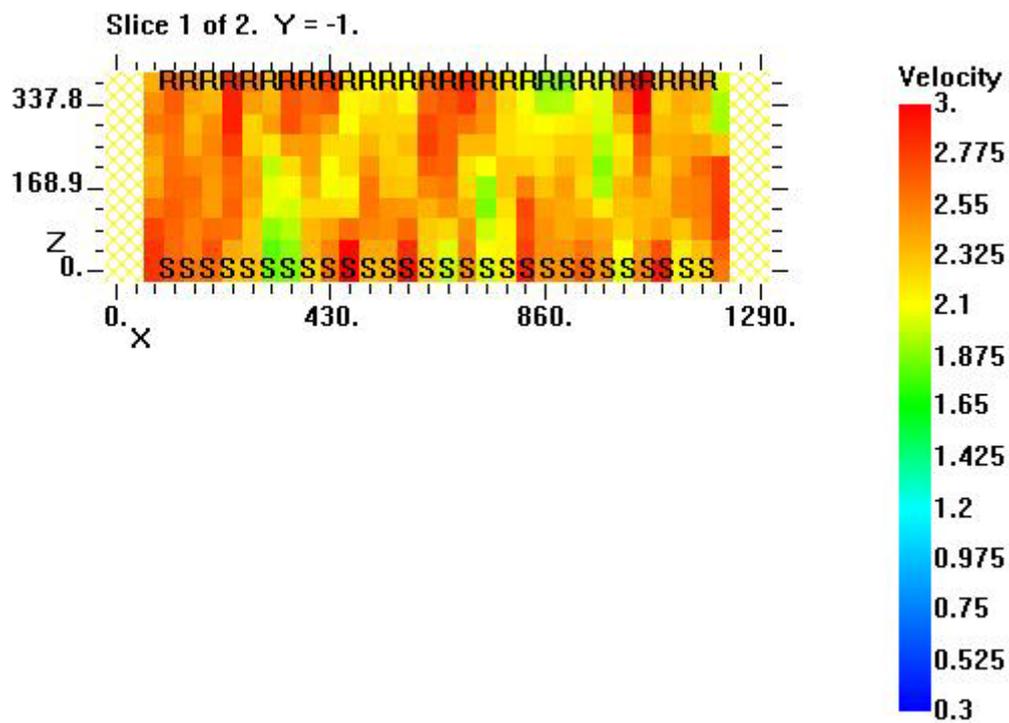


Figura 5.97 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso11_143

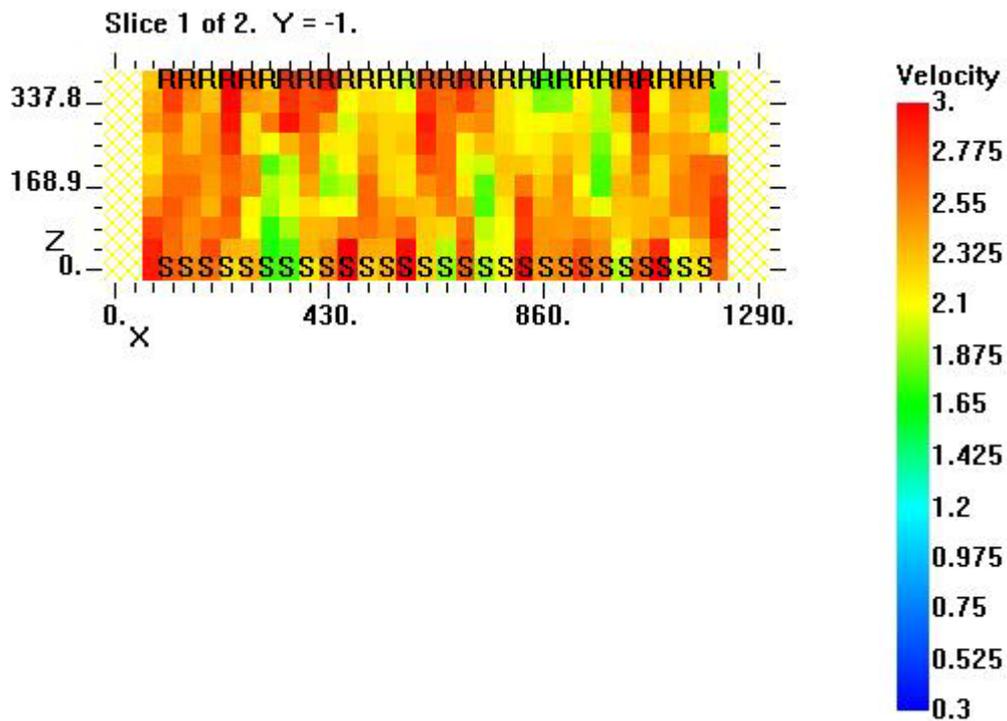


Figura 5.98 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso11_144

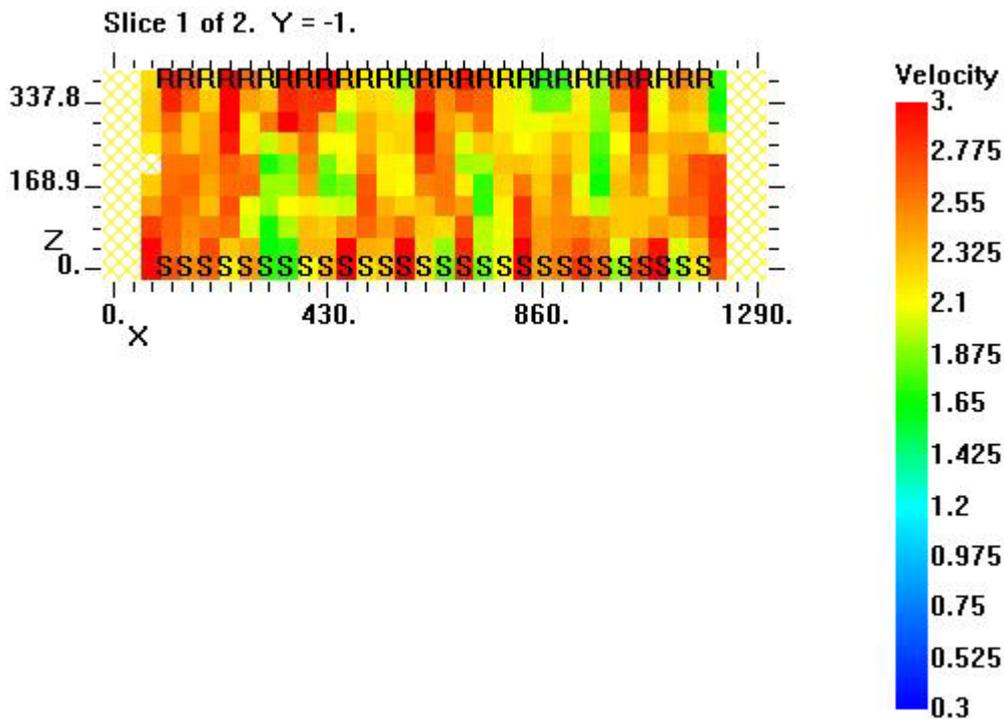


Figura 5.99 Muretto PNDE, corso 11, mappa di velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 34 x 10 pixel, file output corso11_145

La disposizione dei mattoni nel corso e la distanza dei provini rispetto al lato fronte possono essere una delle cause della non chiara identificazione dei vuoti all'interno della sezione. Si individuano una serie di zone di colore giallo-verde, dislocate in maniera casuale senza individuare una specifica area di anomalie. La prima considerazione che si potrebbe fare, se non si fosse a conoscenza della geometria del corso, è quella di identificare la sezione come se fosse completamente danneggiata, mostrando valori piuttosto diffusi di basse velocità. Al procedere del numero di iterazioni, non si vedono sostanziali modifiche alla mappa della velocità. Le dimensioni, forme e posizioni dei difetti non sono rilevate, nonostante ciò la loro posizione influenza anche i percorsi che non toccano direttamente uno dei due difetti, facendo aumentare il valore del tempo di volo tale da assomigliare a quello dei raggi che passano per il difetto. È stato misurato con Autocad la lunghezza del percorso ideale che percorre il segnale quando aggira il difetto sia lateralmente sia superiormente o inferiormente e si è notato che il percorso più breve tra questi ha una lunghezza molto simile a quella del percorso ideale rettilineo senza perturbazioni. Dai valori di residui ottenuti per le prove sopra visualizzate (figura 5.100 e figura 5.101) si

osserva che per la griglia 52x19 il valore massimo dei residui è pari a 30, anziché 70 del corso 6, e decresce fino ad un valore di 5. Nonostante valori così bassi non si riscontrano buone visualizzazioni nelle immagini tomografiche realizzate. Ciò è giustificato dal fatto che dati certi valori di tempo immessi, pur convergendo il metodo con valori bassi di residui, non si riesce ad identificare in maniera chiara la presenza di difetti. Nella figura 5.101 l'andamento dei residui assomiglia molto all'andamento di una curva ottenuta solamente con iterazioni straight. La convergenza si ha già dalla quinta iterazione, mantenendo poi un andamento della curva decrescente costante.

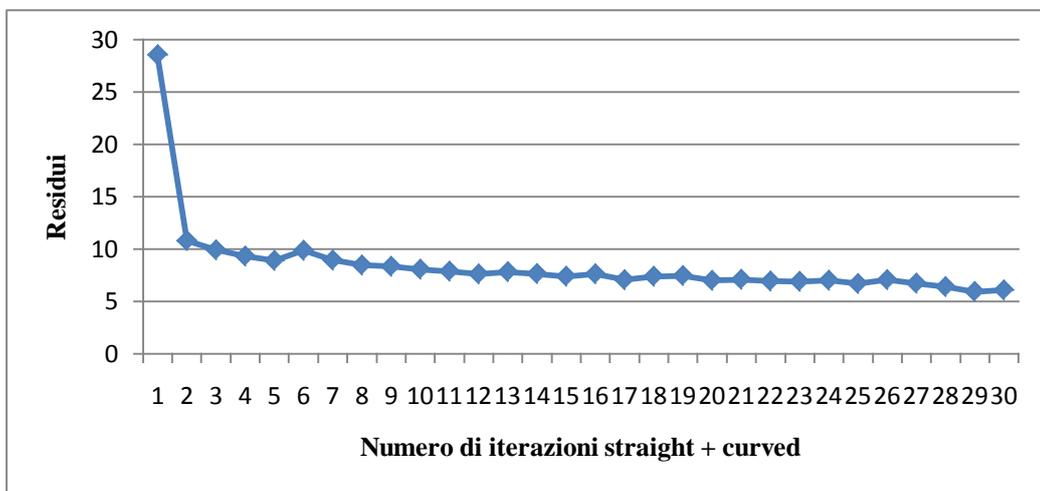


Figura 5.100 Muretto PNDE, corso 11, valori dei residui di 30 iterazioni straight+ curved, per una griglia di 52x19 pixel

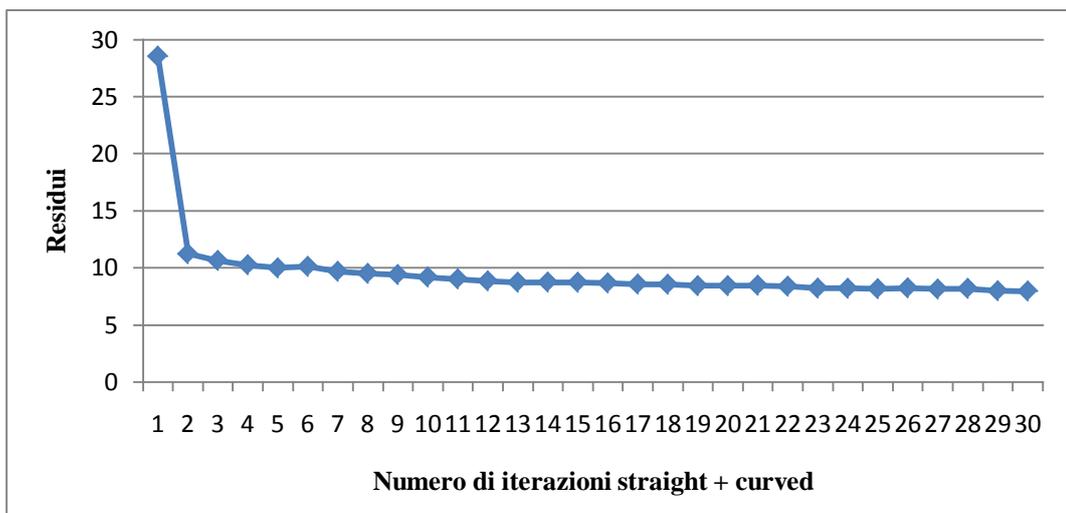


Figura 5.101 Muretto PNDE, corso 11, valori dei residui di 30 iterazioni straight+ curved, per una griglia di 34x10 pixel

5.2.3 Corso 12: confronto tra griglia di 43x19 pixel e griglia di 32x19 pixel

Il corso 12, assieme al corso 11 comprende i difetti alti due corsi con mezzeria rispettivamente nella stazione 8 e 21 del muretto. La disposizione dei mattoni è formata da un primo livello di testa e un secondo livello di lista. Lo spessore è di 37,5 cm sul lato destro rispetto al fronte e 37,9 cm sul lato sinistro. Il valore dei tempi di volo è mostrato nella tabella 5.19 e gli istogrammi relativi ai tempi e alle velocità nelle figure 5.102, 5.103 e 5.104.

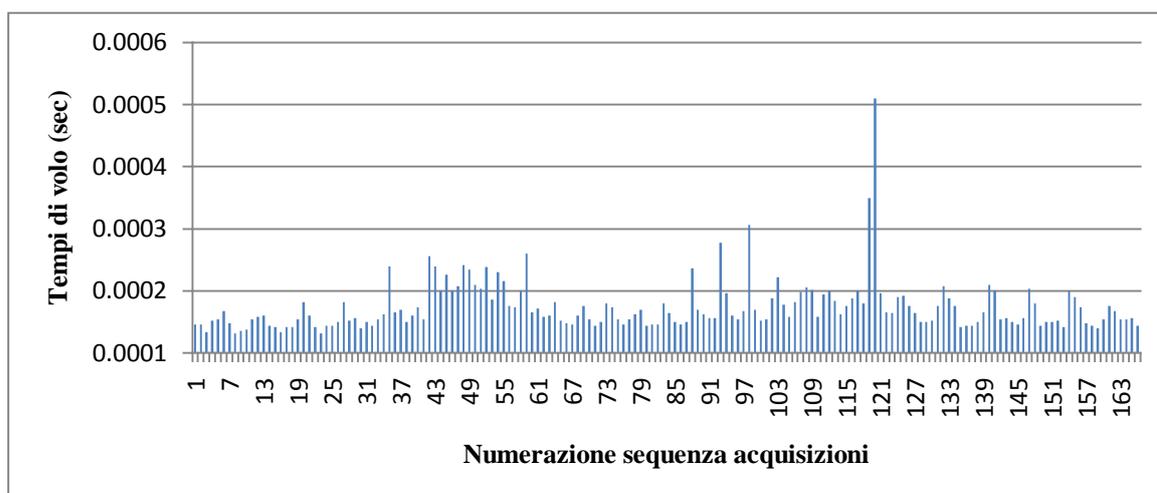


Figura 5.102 Muretto PNDE, corso 12, tempi di volo espressi in secondi

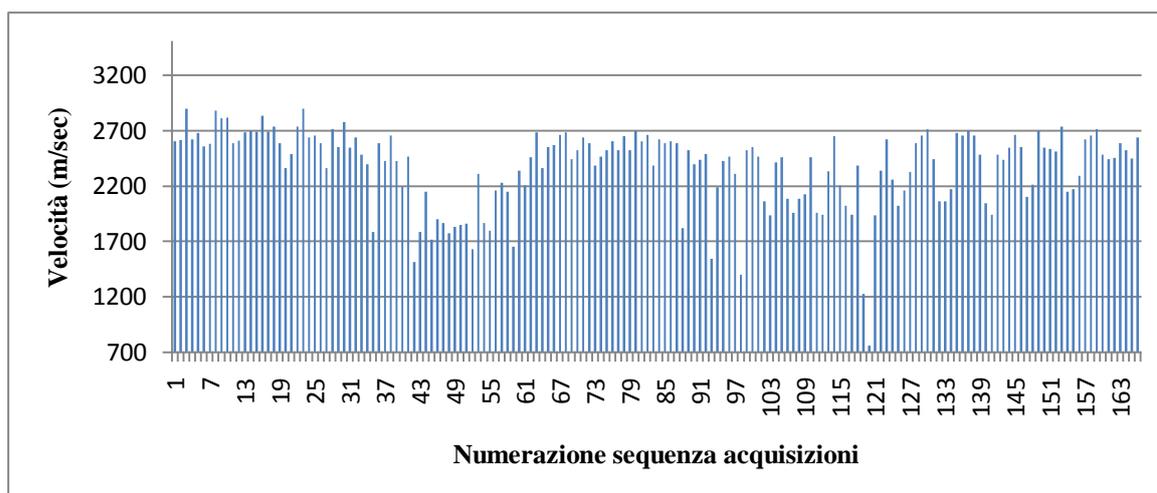


Figura 5.103 Muretto PNDE, corso 12, velocità espressa in m/s

Tabella 5.17 Provino PNDE, corso 12: valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso12	1	1	1	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_corso12	1	2	2	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDe_corso12	1	3	3	0.3883	134	0.000134	2897.761194	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_corso12	1	4	4	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDe_corso12	1	5	5	0.4123	154	0.000154	2677.272727		N
PNDe_corso12	1	6	6	0.4294	168	0.000168	2555.952381		N
PNDe_corso12	2	1	7	0.3821	148	0.000148	2581.756757		N
PNDe_corso12	2	2	8	0.38	132	0.000132	2878.787879		N
PNDe_corso12	2	3	9	0.3821	136	0.000136	2809.558824	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_corso12	2	4	10	0.3883	138	0.000138	2813.768116		N
PNDe_corso12	2	5	11	0.3985	154	0.000154	2587.662338		N
PNDe_corso12	2	6	12	0.4123	158	0.000158	2609.493671		N
PNDe_corso12	2	7	13	0.4294	160	0.00016	2683.75		N
PNDe_corso12	3	1	14	0.3883	144	0.000144	2696.527778	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_corso12	3	2	15	0.3821	142	0.000142	2690.84507	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_corso12	3	3	16	0.38	134	0.000134	2835.820896	Posizione martello vicino al bordo del mattone. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_corso12	3	4	17	0.3821	142	0.000142	2690.84507	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_corso12	3	5	18	0.3883	142	0.000142	2734.507042	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_corso12	3	6	19	0.3985	154	0.000154	2587.662338	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_corso12	3	8	20	0.4294	182	0.000182	2359.340659	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDe_corso12	4	1	21	0.3985	160	0.00016	2490.625		N

PNDe_ corso12	4	2	22	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDe_ corso12	4	3	23	0.3821	132	0.000132	2894.69697	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso12	4	4	24	0.38	144	0.000144	2638.888889		N
PNDe_ corso12	4	5	25	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_ corso12	4	6	26	0.3883	150	0.00015	2588.666667		S
PNDe_ corso12	4	9	27	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PNDe_ corso12	5	1	28	0.4123	152	0.000152	2712.5		N
PNDe_ corso12	5	2	29	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PNDe_ corso12	5	3	30	0.3883	140	0.00014	2773.571429	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso12	5	4	31	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PNDe_ corso12	5	5	32	0.38	144	0.000144	2638.888889		S
PNDe_ corso12	5	6	33	0.3821	154	0.000154	2481.168831		S
PNDe_ corso12	5	7	34	0.3883	162	0.000162	2396.91358		S
PNDe_ corso12	5	10	35	0.4294	240	0.00024	1789.166667	INCERTO.Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso12	6	1	36	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDe_ corso12	6	2	37	0.4123	170	0.00017	2425.294118		S
PNDe_ corso12	6	3	38	0.3985	150	0.00015	2656.666667	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso12	6	4	39	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDe_ corso12	6	5	40	0.3821	174	0.000174	2195.977011		S
PNDe_ corso12	6	6	41	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDe_ corso12	6	8	42	0.3883	256	0.000256	1516.796875	INCERTO	S
PNDe_ corso12	6	11	43	0.4294	240	0.00024	1789.166667	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso12	7	2	44	0.4294	200	0.0002	2147		S
PNDe_ corso12	7	5	45	0.3883	226	0.000226	1718.141593		S

PND _e _corso12	7	7	46	0.38	200	0.0002	1900	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	7	9	47	0.3883	208	0.000208	1866.826923	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	7	12	48	0.4294	242	0.000242	1774.380165	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	8	3	49	0.4294	234	0.000234	1835.042735	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PND _e _corso12	8	6	50	0.3883	210	0.00021	1849.047619		S
PND _e _corso12	8	8	51	0.38	204	0.000204	1862.745098	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	8	10	52	0.3883	238	0.000238	1631.512605	INCERTO. Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone.	S
PND _e _corso13	8	13	53	0.4294	186	0.000186	2308.602151		S
PND _e _corso12	9	4	54	0.4294	230	0.00023	1866.956522	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	9	7	55	0.3883	216	0.000216	1797.685185	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	9	9	56	0.38	176	0.000176	2159.090909		S
PND _e _corso12	9	11	57	0.3883	174	0.000174	2231.609195		S
PND _e _corso12	9	14	58	0.4294	200	0.0002	2147		S
PND _e _corso12	10	5	59	0.4294	260	0.00026	1651.538462	INCERTO. Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PND _e _corso12	10	8	60	0.3883	166	0.000166	2339.156627		S
PND _e _corso12	10	10	61	0.38	172	0.000172	2209.302326	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PND _e _corso12	10	12	62	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PND _e _corso12	10	15	63	0.4294	160	0.00016	2683.75		N
PND _e _corso12	11	6	64	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PND _e _corso12	11	9	65	0.3883	152	0.000152	2554.605263		S
PND _e _corso12	11	11	66	0.38	148	0.000148	2567.567568		S
PND _e _corso12	11	13	67	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PND _e _corso12	11	16	68	0.4294	160	0.00016	2683.75	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	N
PND _e _corso12	12	7	69	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S

PNDe_ corso12	12	10	70	0.3883	154	0.000154	2521.428571	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso12	12	12	71	0.38	144	0.000144	2638.888889		N
PNDe_ corso12	12	14	72	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso12	12	17	73	0.4294	180	0.00018	2385.555556		N
PNDe_ corso12	13	8	74	0.4294	174	0.000174	2467.816092	Posizione del martello vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso12	13	11	75	0.3883	154	0.000154	2521.428571	Strana curva martello.Posizione del martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	13	13	76	0.38	146	0.000146	2602.739726	Posizione del martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	13	15	77	0.3883	154	0.000154	2521.428571	Posizione del martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	13	18	78	0.4294	162	0.000162	2650.617284	Posizione del martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	14	9	79	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDe_ corso12	14	12	80	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDe_ corso12	14	14	81	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_ corso12	14	16	82	0.3883	146	0.000146	2659.589041	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	14	19	83	0.4294	180	0.00018	2385.555556		N
PNDe_ corso12	15	10	84	0.4294	164	0.000164	2618.292683	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	15	13	85	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso12	15	15	86	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_ corso12	15	17	87	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso12	15	20	88	0.4294	236	0.000236	1819.491525		N
PNDe_ corso12	16	11	89	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione martello su giunto di malta.	N
PNDe_ corso12	16	14	90	0.3883	162	0.000162	2396.91358	Posizione martello su giunto di malta.	N
PNDe_ corso12	16	16	91	0.38	156	0.000156	2435.897436	Posizione martello su giunto di malta. Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_ corso12	16	18	92	0.3883	156	0.000156	2489.102564	Posizione martello su giunto di malta.	S
PNDe_ corso12	16	21	93	0.4294	278	0.000278	1544.604317	Posizione martello su giunto di malta.	S

PNDe_ corso12	17	12	94	0.4294	196	0.000196	2190.816327		N
PNDe_ corso12	17	15	95	0.3883	160	0.00016	2426.875		N
PNDe_ corso12	17	17	96	0.38	154	0.000154	2467.532468		N
PNDe_ corso12	17	19	97	0.3883	168	0.000168	2311.309524		S
PNDe_ corso12	17	22	98	0.4294	306	0.000306	1403.267974		S
PNDe_ corso12	18	13	99	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDe_ corso12	18	16	100	0.3883	152	0.000152	2554.605263	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso12	18	18	101	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDe_ corso12	18	20	102	0.3883	188	0.000188	2065.425532		S
PNDe_ corso12	18	23	103	0.4294	222	0.000222	1934.234234	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso12	19	14	104	0.4294	178	0.000178	2412.359551	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_ corso12	19	17	105	0.3883	158	0.000158	2457.594937	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDe_ corso12	19	19	106	0.38	182	0.000182	2087.912088	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDe_ corso12	19	21	107	0.3883	198	0.000198	1961.111111	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDe_ corso12	19	24	108	0.4294	206	0.000206	2084.466019	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDe_ corso12	20	15	109	0.4294	202	0.000202	2125.742574		N
PNDe_ corso12	20	18	110	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDe_ corso12	20	20	111	0.38	194	0.000194	1958.762887		S
PNDe_ corso12	20	22	112	0.3883	200	0.0002	1941.5		S
PNDe_ corso12	20	25	113	0.4294	184	0.000184	2333.695652		S
PNDe_ corso12	21	16	114	0.4294	162	0.000162	2650.617284		S
PNDe_ corso12	21	19	115	0.3883	176	0.000176	2206.25		S
PNDe_ corso12	21	21	116	0.38	188	0.000188	2021.276596		S
PNDe_ corso12	21	23	117	0.3883	200	0.0002	1941.5	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S

PNDe_ corso12	21	26	118	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDe_ corso12	22	17	119	0.4294	350	0.00035	1226.857143	Strana curva martello.	S
PNDe_ corso12	22	20	120	0.3883	510	0.00051	761.372549	Strana curva martello.	S
PNDe_ corso12	22	22	121	0.38	196	0.000196	1938.77551		S
PNDe_ corso12	22	24	122	0.3883	166	0.000166	2339.156627		S
PNDe_ corso12	22	27	123	0.4294	164	0.000164	2618.292683		N
PNDe_ corso12	23	18	124	0.4294	190	0.00019	2260		S
PNDe_ corso12	23	21	125	0.3883	192	0.000192	2022.395833		S
PNDe_ corso12	23	23	126	0.38	176	0.000176	2159.090909	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso12	23	24	127	0.3821	164	0.000164	2329.878049		S
PNDe_ corso12	23	25	128	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso12	23	26	129	0.3985	150	0.00015	2656.666667		N
PNDe_ corso12	23	27	130	0.4123	152	0.000152	2712.5		N
PNDe_ corso12	23	28	131	0.4294	176	0.000176	2439.772727		N
PNDe_ corso12	24	19	132	0.4294	208	0.000208	2064.423077		S
PNDe_ corso12	24	22	133	0.3883	188	0.000188	2065.425532		S
PNDe_ corso12	24	23	134	0.3821	176	0.000176	2171.022727	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso12	24	24	135	0.38	142	0.000142	2676.056338		S
PNDe_ corso12	24	25	136	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_ corso12	24	26	137	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDe_ corso12	24	27	138	0.3985	150	0.00015	2656.666667		N
PNDe_ corso12	24	28	139	0.4123	166	0.000166	2483.73494		N
PNDe_ corso12	25	20	140	0.4294	210	0.00021	2044.761905		S
PNDe_ corso12	25	23	141	0.3883	200	0.0002	1941.5	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S

PND _e _corso12	25	24	142	0.3821	154	0.000154	2481.168831		S
PND _e _corso12	25	25	143	0.38	156	0.000156	2435.897436		N
PND _e _corso12	25	26	144	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PND _e _corso12	25	27	145	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PND _e _corso12	25	28	146	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PND _e _corso12	26	21	147	0.4294	204	0.000204	2104.901961	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	S
PND _e _corso12	26	23	148	0.3985	180	0.00018	2213.888889	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PND _e _corso12	26	24	149	0.3883	144	0.000144	2696.527778	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PND _e _corso12	26	25	150	0.3821	150	0.00015	2547.333333	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PND _e _corso12	26	26	151	0.38	150	0.00015	2533.333333	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PND _e _corso12	26	27	152	0.3821	152	0.000152	2513.815789	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PND _e _corso12	26	28	153	0.3883	142	0.000142	2734.507042	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PND _e _corso12	27	22	154	0.4294	200	0.0002	2147		S
PND _e _corso12	27	23	155	0.4123	190	0.00019	2170	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PND _e _corso12	27	24	156	0.3985	174	0.000174	2290.229885		N
PND _e _corso12	27	25	157	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PND _e _corso12	27	26	158	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PND _e _corso12	27	27	159	0.38	140	0.00014	2714.285714		N
PND _e _corso12	27	28	160	0.3821	154	0.000154	2481.168831		N
PND _e _corso12	28	23	161	0.4294	176	0.000176	2439.772727	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PND _e _corso12	28	24	162	0.4123	168	0.000168	2454.166667		N
PND _e _corso12	28	25	163	0.3985	154	0.000154	2587.662338		N
PND _e _corso12	28	26	164	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N

PNDe_ corso12	28	27	165	0.3821	156	0.000156	2449.358974		N
PNDe_ corso12	28	28	166	0.38	144	0.000144	2638.888889		N

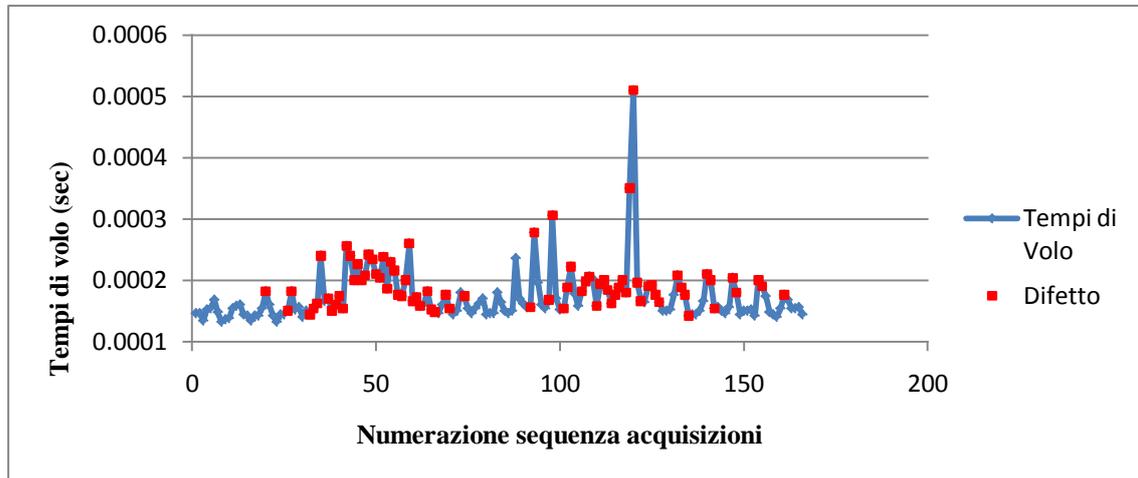


Figura 5.104 Muretto PNDE, corso 12, tempi di volo espressi in secondi con dettaglio sui percorsi che toccano un difetto

L'istogramma mette in evidenza una prima zona con valori di tempo di volo più alti rispetto alla media fino a quel momento ottenuta; proseguendo non si vedono ulteriori zone con tempi di volo alti che dovrebbero identificare la presenza dell'anomalia di sinistra. Si notano invece alcuni valori, ad esempio l'acquisizione 88, 93 e 98, che hanno valori di tempi di volo sopra i 200 microsecondi, e corrispondono a raggi che aggirano il difetto. Da quanto visualizzato ci si aspetta che il Geotom produca una mappa di velocità dove è ben chiaro il vuoto presente sul lato sinistro e meno quello sul lato destro. Al fine di poter valutare, anche per questo caso la velocità media del tratto lontano dai bordi e privo di anomalie evidenti, sono considerati solo i raggi uscenti dalle stazioni comprese tra la 12 e la 17. Il valore di velocità media in un tratto senza difetti è pari a 2420 m/s. I tre valori sopra i 200 microsecondi sono giustificati dall'allungamento delle traiettorie dell'onda del segnale. I grafici corrispondenti si trovano nelle figure 5.105. 5.106 e 5.107.

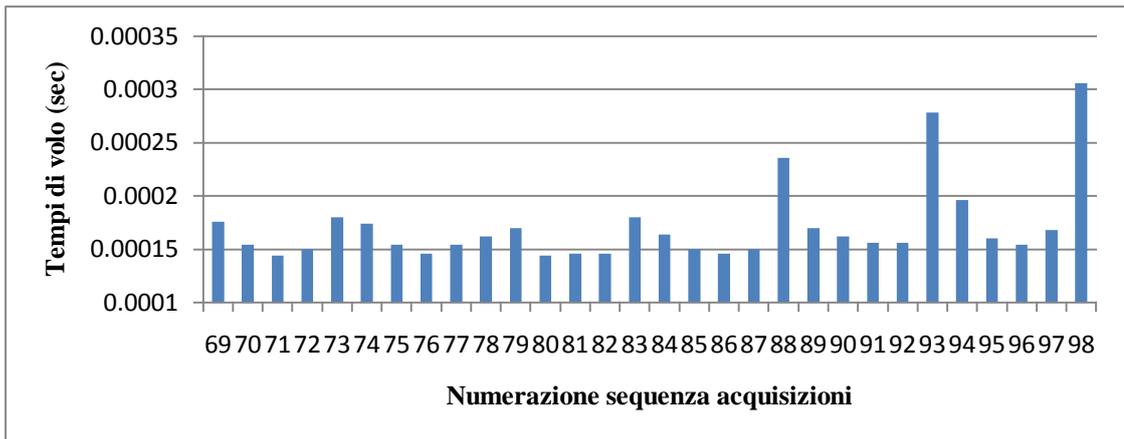


Figura 5.105 Muretto PNDE, corso 12, tempi di volo espressi in sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

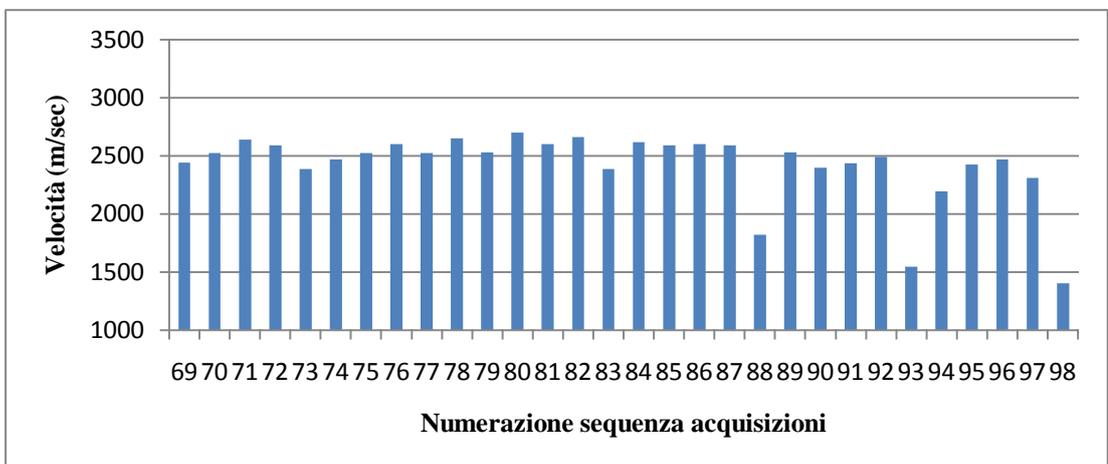


Figura 5.106 Muretto PNDE, corso 12, velocità espressa in m/sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto

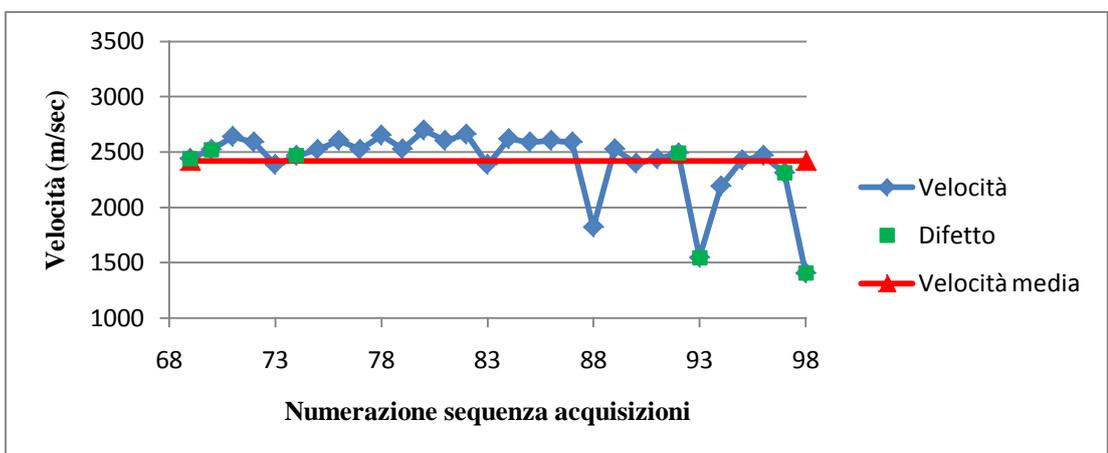


Figura 5.107 Muretto PNDE, corso 12, velocità espressa in m/sec dei percorsi che non hanno stazione Tx di fronte al difetto con dettaglio sui percorsi che toccano il difetto

Nell'utilizzo del software Geotom i parametri introdotti sono le misure della sezione, i tempi di volo ottenuti e le varie combinazioni di dimensioni dei pixel come già fatto precedentemente. Per quanto riguarda il parametro legato all'anisotropia, i valori di velocità si dispongono lungo una linea retta di poca inclinazione rispetto all'orizzontale. Si può quindi lasciare il valore di default di *Uniform anisotropy* pari a 1. Per quanto riguarda i parametri da settare nel software Geotom, in questo caso si è deciso di riportare i risultati ottenuti per griglie di pixel di 43x19 e 32x19. Seppur la dimensione dei pixel delle due griglia sia piuttosto simile, le mappe di velocità ottenute mostrano differenze interessanti e sono migliori nell'identificazione del difetto rispetto alle altre griglie di pixel testate. Nella tabella 5.20 è riportato il riepilogo delle iterazioni con griglia di pixel di 43x19, mentre in tabella 5.21 è presentato quello relativa alla griglia 32x19. Di seguito sono illustrate le immagini tomografiche più significative in figura 5.108, 5.109, 5.110, 5.111, 5.112, 5.113 e 5.114.

Tabella 5.20 Muretto PNDE, corso 12, parametri di inversione con una griglia di 43x19 pixel e relative mappe di velocità

Pixel: 43x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso12_110	5	0	5	corso12_111	Figura 5.108
corso12_111	5	0	10	corso12_112	
corso12_112	5	0	15	corso12_113	
corso12_113	5	0	20	corso12_114	
corso12_114	5	0	25	corso12_115	
corso12_110	5	0	5	corso12_111	
corso12_111	0	5	10	corso12_116	Figura 5.109
corso12_116	0	5	15	corso12_117	Figura 5.110
corso12_117	0	5	20	corso12_118	
corso12_118	0	5	25	corso12_119	

Tabella 5.21 Muretto PNDE, corso 12, parametri di inversione con una griglia di 32x19 pixel

Pixel: 32x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso12_120	5	0	5	corso12_121	Figura 5.111
corso12_121	5	0	10	corso12_122	
corso12_122	5	0	15	corso12_123	
corso12_123	5	0	20	corso12_124	
corso12_124	5	0	25	corso12_125	
corso12_120	5	0	5	corso12_121	
corso12_121	0	5	10	corso12_126	Figura 5.112
corso12_126	0	5	15	corso12_127	Figura 5.113
corso12_127	0	5	20	corso12_128	Figura 5.114
corso12_128	0	5	25	corso12_129	

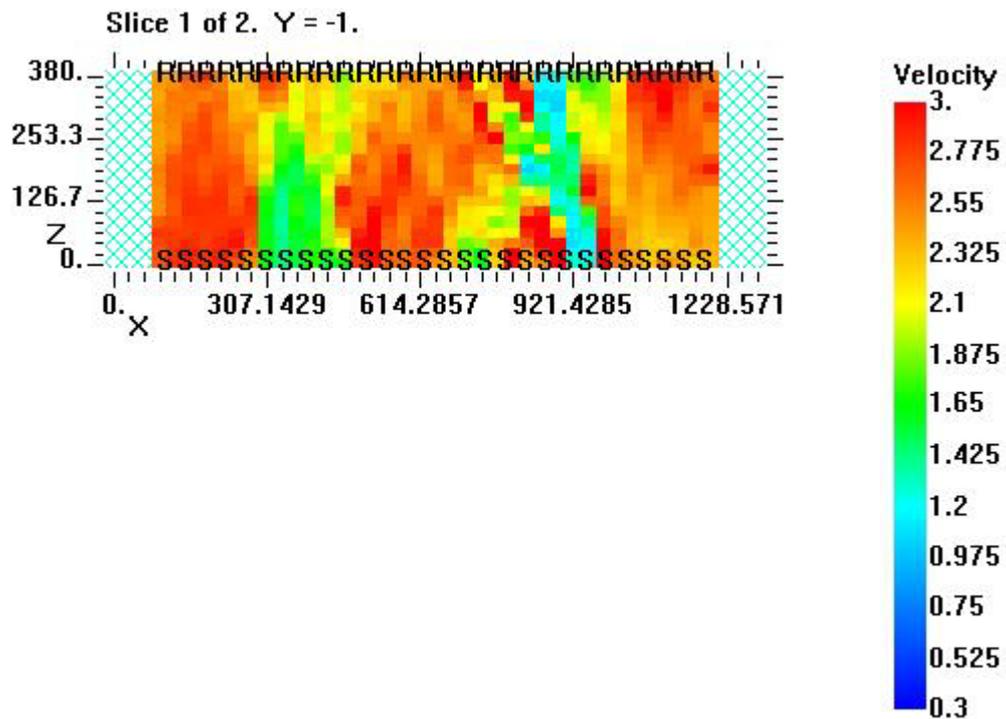


Figura 5.108 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso12_111

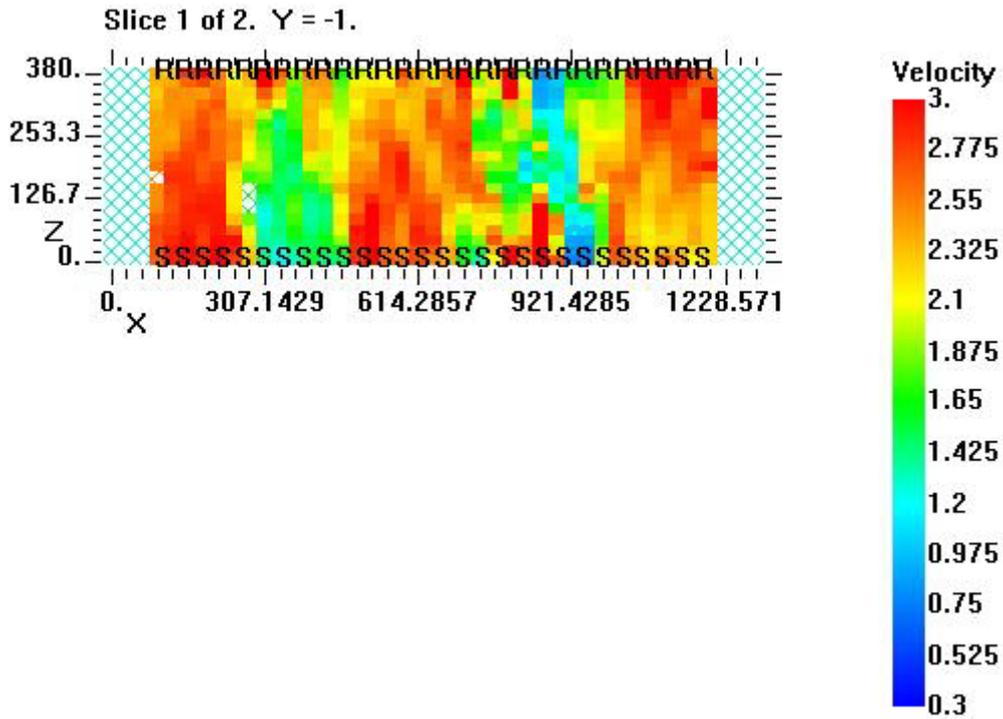


Figura 5.109 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso12_116

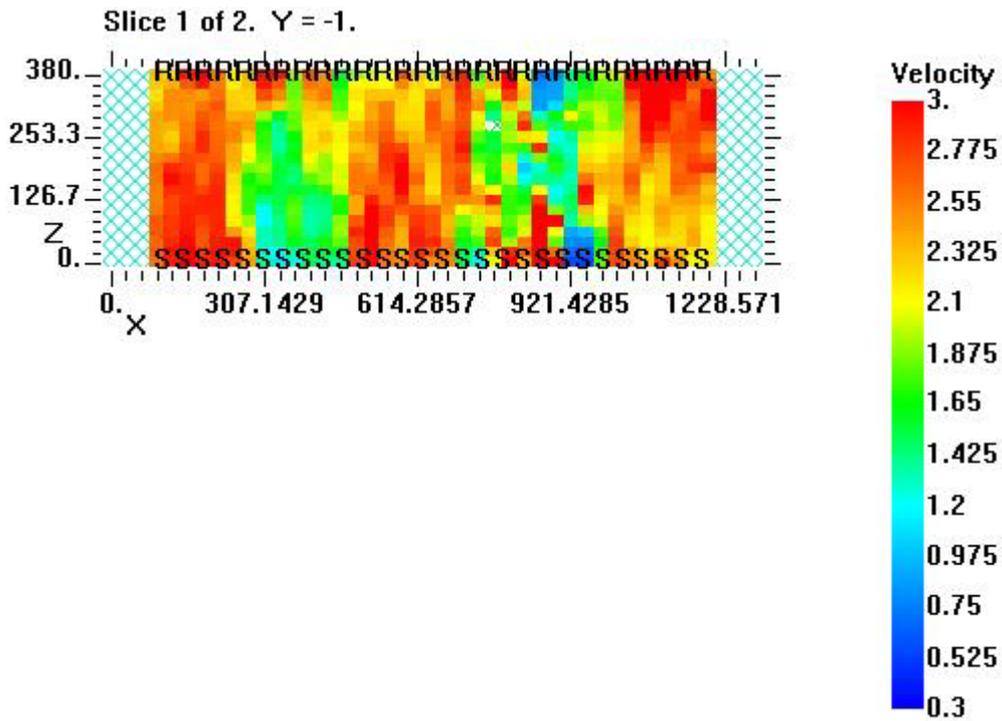


Figura 5.110 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso12_117

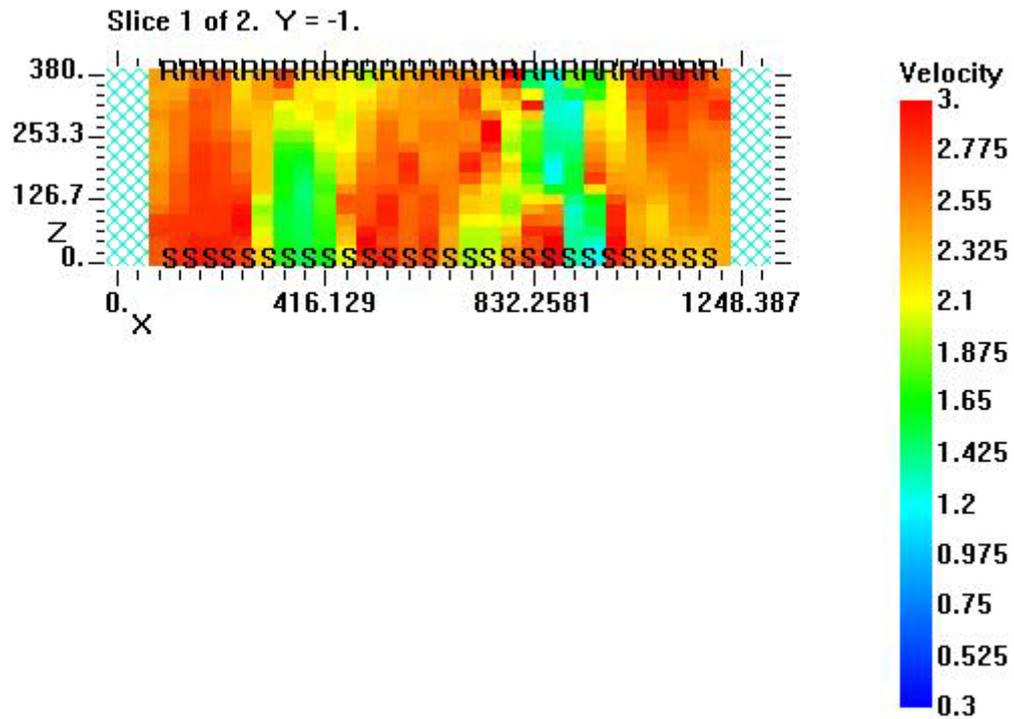


Figura 5.111 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12_121

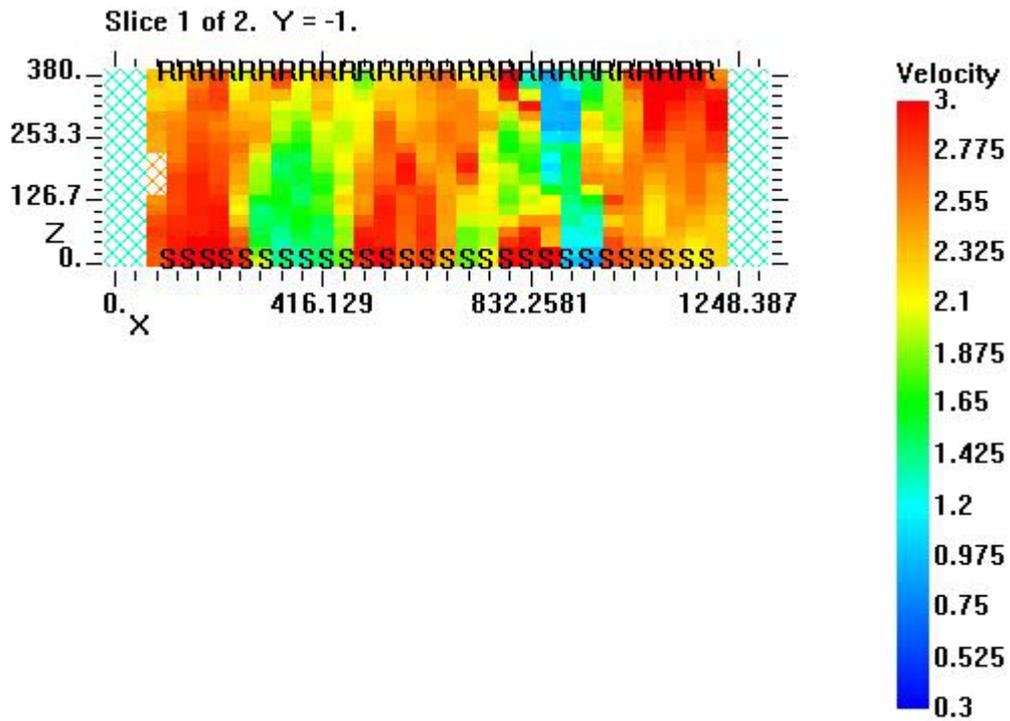


Figura 5.112 Muretto PNDE, corso1 2, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12_126

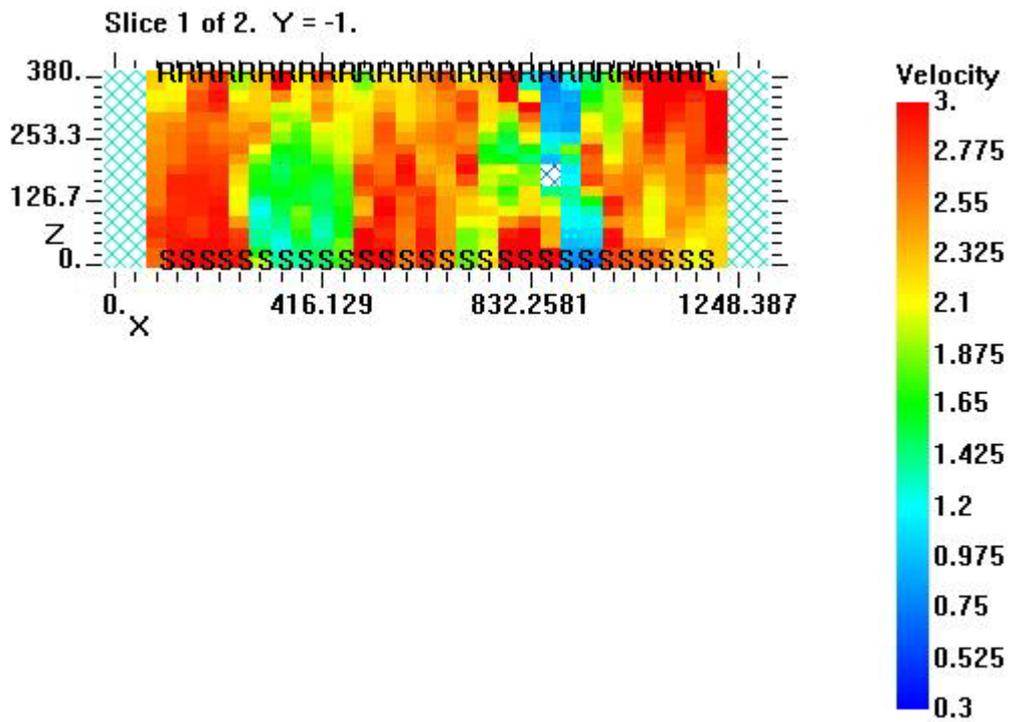


Figura 5.113 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12_127

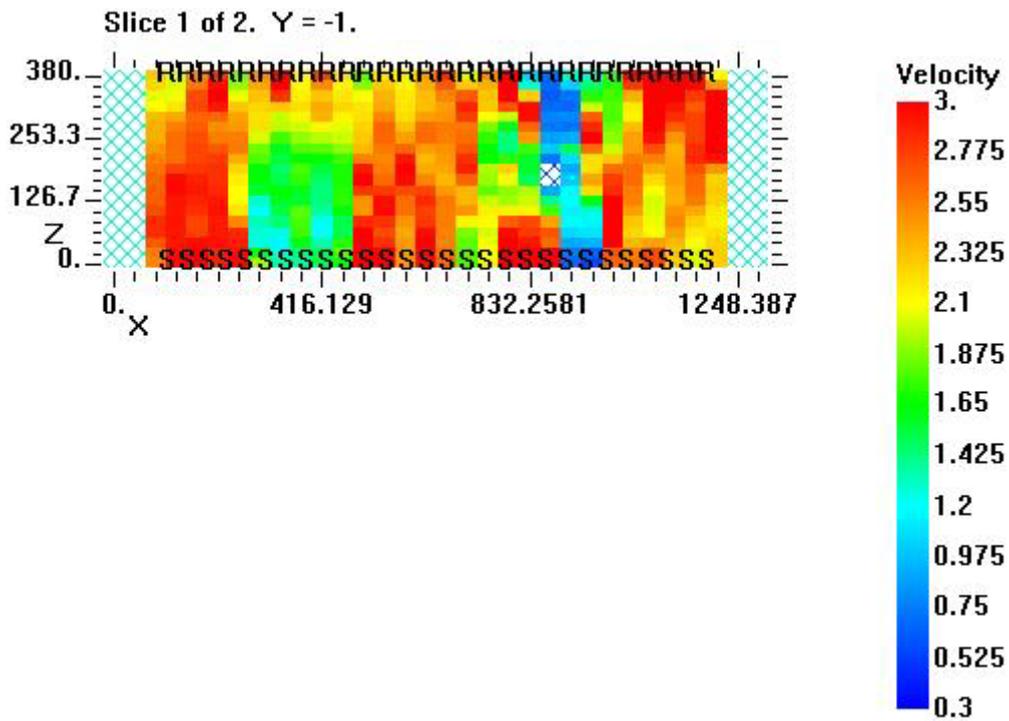


Figura 5.114 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12_128

La presenza del difetto di sinistra viene individuata in modo abbastanza netto seppur la forma, le dimensioni e la profondità risultano essere non precise. Esso si presenta più superficiale, di forma rettangolare ma con dimensioni invertite rispetto a quello reali. Del secondo difetto di destra se ne può solo approssimativamente dichiarare l'esistenza, in quanto si nota solo una striscia di altezza pari a quasi tutto lo spessore, rappresentata da velocità basse, ma senza definirne una precisa posizione, forma e dimensione. Rispetto ai risultati ottenuti fino ad adesso, si ha un'ennesima prova che il difetto più vicino al fronte di battuta è quello rilevato più chiaramente, mentre molto meno esatta è la visualizzazione di quello più vicino al fronte ricevente. Se paragoniamo le velocità, quelle più basse si presentano nel corso 6 per il difetto a destra rispetto a quello di sinistra; in questo caso, invece, ci accorgiamo di avere velocità più basse nel vuoto vicino al retro. Le immagini con griglia di 43x19 pixel mi individuano il difetto di destra in maniera ancor più nebulosa e disordinata rispetto alle immagini con griglia di 32x19 pixel dove non si definisce ancora con precisione la presenza dell'anomalia, ma si ha una maggior compattezza della zona color blu-verde. A differenza del corso 11, avente le stesse caratteristiche per quel che riguarda la posizione dei difetti, ed essendo anch'esso in uno dei due corsi che comprendono il difetto alto due corsi, in questo caso si ha una distinzione netta tra le zone con presenza di imperfezioni e la parte di muratura integra. Si considerano ora i residui derivati dalle iterazioni prodotte (figure 5.115 e 5.116). Il valore massimo da cui inizia la curva è addirittura di 160, a significare che con sole 5 iterazioni straight il metodo è ancora molto lontano dalla convergenza. Si ha un decremento dei valori fino ad un valore medio di 20, valore più alto trovato fino ad ora tra tutte le prove fatte per i corsi orizzontali, dopodiché non si hanno ulteriori abbassamenti dei residui a significare che non si possono ottenere risultati migliori. Gli andamenti delle due figure 5.115 e 5.116 sono pressoché simili, ad eccezione del grafico in figura 5.116 dove tra la ventesima e venticinquesima iterazione c'è un rialzo del valore dei residui, il quale dovrebbe corrispondere ad un peggioramento nelle immagini tomografiche. In realtà tra la figura 5.113 e 5.114 non si notano rilevanti differenze.

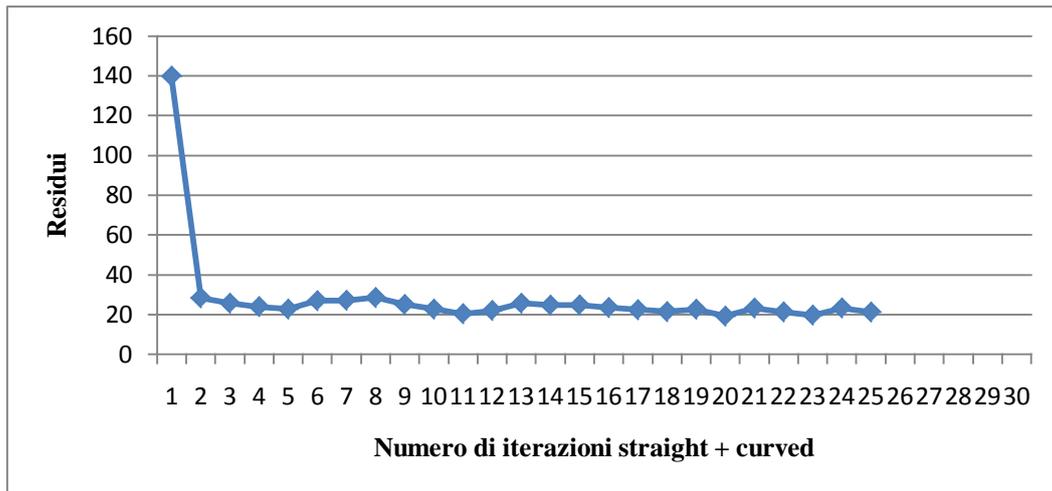


Figura 5.115 Muretto PNDE, corso 12, valori dei residui di 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 23x19 pixel

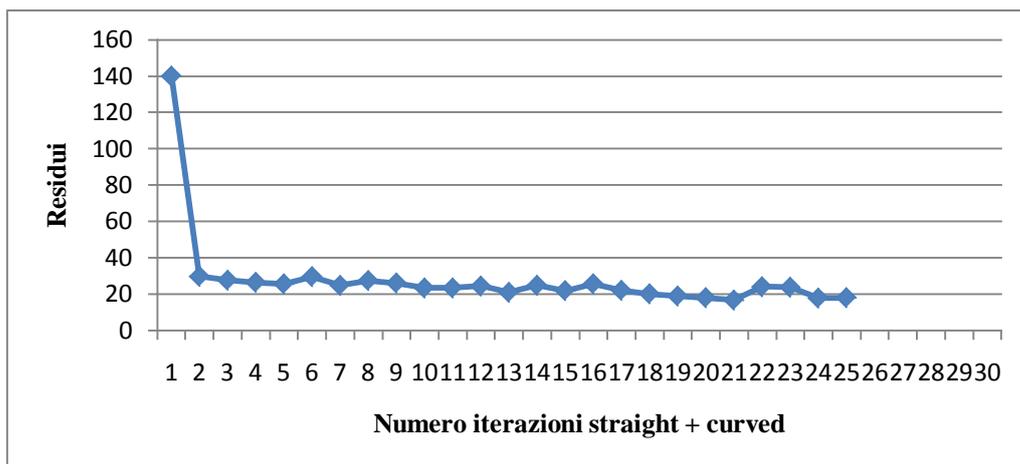


Figura 5.116 Muretto PNDE, corso 12, valori dei residui di 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 32x19 pixel

5.2.4 Corso 17: confronto tra griglia di 52x19 pixel e 32x19 pixel

Il corso più alto del muretto PNDE presenta dei vuoti posizionati a 6 cm e a 12 cm di profondità dal fronte rispettivamente con centro nella stazione di misura 8 e 21 della sezione. La forma è quadrata e di dimensioni ridotte in altezza (solo un corso), larghezza e lunghezza. Considerata la lunghezza d'onda e la risoluzione ottenuta, le

misure dei difetti sono più piccole e quindi ci si aspetta di non riuscire a comprendere a pieno la presenza degli stessi. Lo spessore del corso è a circa 38 cm da entrambi i lati. Il primo passo è quello di calcolare con il software in ambiente LabView i tempi di volo e le velocità. Le caselle segnate in giallo (tabella 5.22) indicano valori di tempi di volo che ci si aspetterebbe essere diversi, o più bassi perché non trovano lungo il cammino difetti noti o più alti perché un tale valore ci porta ad avere delle velocità più alte di 2600 m/s. Si nota che gran parte dei valori di tempi di volo evidenziati sono in corrispondenza di stazione di ricezione su giunto di malta e quindi accoppiati mediante plastilina. Dopo aver controllato che non tutti i giunti siano rientranti e quindi che la lunghezza del percorso non si accorci, si è concluso che siano le buone qualità meccaniche della malta a far viaggiare il segnale più velocemente quando viene attraversata. Nella tabella 5.22 sono riportati i valori del tempo, della lunghezza del percorso, della velocità e eventuali annotazioni sulle caratteristiche delle stazioni di prova o sulla forma d'onda. L'istogramma dei tempi di volo (figura 5.117) non mette in evidenza zone con tempi di volo maggiori rispetto ad altre. Tra l'acquisizione numero 41 e 91 si nota un leggero rialzamento dei tempi di pochi microsecondi rispetto alla media e si può associare alla presenza del difetto più a sinistra. Il grafico delle velocità (figura 5.118) evidenzia solo una zona con valori più bassi intorno alla cinquantesima acquisizione. Il grafico dei tempi di volo (figura 5.119) mette in mostra quali sono i percorsi che intercettano nel loro avanzare uno dei due difetti presenti nella sezione.

Tabella 5.22 Provino PNDE, corso 17: valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso17	1	1	1	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_corso17	1	2	2	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_corso17	1	3	3	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDe_corso17	1	4	4	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PNDe_corso17	1	5	5	0.4123	162	0.000162	2545.061728		N
PNDe_corso17	1	6	6	0.4294	168	0.000168	2555.952381	Posizione accelerometro con superficie in sporgenza.	N
PNDe_corso17	2	1	7	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDe_corso17	2	2	8	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDe_corso17	2	3	9	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDe_corso17	2	4	10	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDe_corso17	2	5	11	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDe_corso17	2	6	12	0.4123	160	0.00016	2576.875	Posizione accelerometro con superficie in sporgenza.	N
PNDe_corso17	2	7	13	0.4294	168	0.000168	2555.952381		N
PNDe_corso17	3	1	14	0.3883	162	0.000162	2396.91358		N
PNDe_corso17	3	2	15	0.3821	152	0.000152	2513.815789		N
PNDe_corso17	3	3	16	0.38	150	0.00015	2533.333333		N
PNDe_corso17	3	4	17	0.3821	154	0.000154	2481.168831		N
PNDe_corso17	3	5	18	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDe_corso17	3	6	19	0.3985	156	0.000156	2554.487179	Posizione accelerometro con superficie in sporgenza.	N
PNDe_corso17	3	8	20	0.4294	166	0.000166	2586.746988	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_corso17	4	1	21	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PNDe_corso17	4	2	22	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDe_corso17	4	3	23	0.3821	154	0.000154	2481.168831		N
PNDe_corso17	4	4	24	0.38	146	0.000146	2602.739726		N

PNDDe_ corso17	4	5	25	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PNDDe_ corso17	4	6	26	0.3883	154	0.000154	2521.428571	Posizione accelerometro con superficie in sporgenza.	N
PNDDe_ corso17	4	9	27	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S
PNDDe_ corso17	5	1	28	0.4123	168	0.000168	2454.166667		N
PNDDe_ corso17	5	2	29	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDDe_ corso17	5	3	30	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDDe_ corso17	5	4	31	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDDe_ corso17	5	5	32	0.38	136	0.000136	2794.117647		N
PNDDe_ corso17	5	6	33	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione accelerometro con superficie in sporgenza.	N
PNDDe_ corso17	5	7	34	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDDe_ corso17	5	10	35	0.4294	162	0.000162	2650.617284		S
PNDDe_ corso17	6	1	36	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDDe_ corso17	6	2	37	0.4123	156	0.000156	2642.948718		N
PNDDe_ corso17	6	3	38	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDDe_ corso17	6	4	39	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDDe_ corso17	6	5	40	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDDe_ corso17	6	6	41	0.38	140	0.00014	2714.285714		N
PNDDe_ corso17	6	8	42	0.3883	150	0.00015	2588.666667	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDDe_ corso17	6	11	43	0.4294	180	0.00018	2385.555556	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	S
PNDDe_ corso17	7	2	44	0.4294	162	0.000162	2650.617284		N
PNDDe_ corso17	7	5	45	0.3883	146	0.000146	2659.589041		S
PNDDe_ corso17	7	7	46	0.38	152	0.000152	2500		S
PNDDe_ corso17	7	9	47	0.3883	168	0.000168	2311.309524		S
PNDDe_ corso17	7	12	48	0.4294	184	0.000184	2333.695652		S
PNDDe_ corso17	8	3	49	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PNDDe_ corso17	8	6	50	0.3883	164	0.000164	2367.682927		S

PNDe_ corso17	8	8	51	0.38	144	0.000144	2638.888889	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso17	8	10	52	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDe_ corso17	8	13	53	0.4294	178	0.000178	2412.359551		S
PNDe_ corso17	9	4	54	0.4294	178	0.000178	2412.359551		S
PNDe_ corso17	9	7	55	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDe_ corso17	9	9	56	0.38	150	0.00015	2533.333333		S
PNDe_ corso17	9	11	57	0.3883	150	0.00015	2588.666667	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	S
PNDe_ corso17	9	14	58	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDe_ corso17	10	5	59	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDe_ corso17	10	8	60	0.3883	152	0.000152	2554.605263	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso17	10	10	61	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDe_ corso17	10	12	62	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso17	10	15	63	0.4294	164	0.000164	2618.292683		N
PNDe_ corso17	11	6	64	0.4294	168	0.000168	2555.952381	Posizione martello vicino al bordo mattone.	S
PNDe_ corso17	11	9	65	0.3883	144	0.000144	2696.527778	Posizione martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	11	11	66	0.38	144	0.000144	2638.888889	Posizione martello vicino al bordo mattone. Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	11	13	67	0.3883	156	0.000156	2489.102564	Posizione martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	11	16	68	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione martello vicino al bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	12	7	69	0.4294	166	0.000166	2586.746988		S
PNDe_ corso17	12	10	70	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDe_ corso17	12	12	71	0.38	138	0.000138	2753.623188		N
PNDe_ corso17	12	14	72	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDe_ corso17	12	17	73	0.4294	164	0.000164	2618.292683		N
PNDe_ corso17	13	8	74	0.4294	158	0.000158	2717.721519	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso17	13	11	75	0.3883	150	0.00015	2588.666667	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N

PNDDe_ corso17	13	13	76	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDDe_ corso17	13	15	77	0.3883	156	0.000156	2489.102564		N
PNDDe_ corso17	13	18	78	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDDe_ corso17	14	9	79	0.4294	180	0.00018	2385.555556		N
PNDDe_ corso17	14	12	80	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDDe_ corso17	14	14	81	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDDe_ corso17	14	16	82	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDDe_ corso17	14	19	83	0.4294	176	0.000176	2439.772727		N
PNDDe_ corso17	15	10	84	0.4294	172	0.000172	2496.511628		N
PNDDe_ corso17	15	13	85	0.3883	188	0.000188	2065.425532		N
PNDDe_ corso17	15	15	86	0.38	154	0.000154	2467.532468		N
PNDDe_ corso17	15	17	87	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDDe_ corso17	15	20	88	0.4294	172	0.000172	2496.511628		N
PNDDe_ corso17	16	11	89	0.4294	176	0.000176	2439.772727	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDDe_ corso17	16	14	90	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDDe_ corso17	16	16	91	0.38	144	0.000144	2638.888889		N
PNDDe_ corso17	16	18	92	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDDe_ corso17	16	21	93	0.4294	172	0.000172	2496.511628	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	17	12	94	0.4294	200	0.0002	2147		N
PNDDe_ corso17	17	15	95	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDDe_ corso17	17	17	96	0.38	142	0.000142	2676.056338		N
PNDDe_ corso17	17	19	97	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDDe_ corso17	17	22	98	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S
PNDDe_ corso17	18	13	99	0.4294	168	0.000168	2555.952381		N
PNDDe_ corso17	18	16	100	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDDe_ corso17	18	18	101	0.38	136	0.000136	2794.117647		N

PNDDe_ corso17	18	20	102	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDDe_ corso17	18	23	103	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDDe_ corso17	19	14	104	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDDe_ corso17	19	17	105	0.3883	140	0.00014	2773.571429		N
PNDDe_ corso17	19	19	106	0.38	136	0.000136	2794.117647		N
PNDDe_ corso17	19	21	107	0.3883	164	0.000164	2367.682927	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDDe_ corso17	19	24	108	0.4294	164	0.000164	2618.292683	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDDe_ corso17	20	15	109	0.4294	162	0.000162	2650.617284		N
PNDDe_ corso17	20	18	110	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDDe_ corso17	20	20	111	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDDe_ corso17	20	22	112	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDDe_ corso17	20	25	113	0.4294	168	0.000168	2555.952381		S
PNDDe_ corso17	21	16	114	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDDe_ corso17	21	19	115	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDDe_ corso17	21	21	116	0.38	146	0.000146	2602.739726	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDDe_ corso17	21	23	117	0.3883	146	0.000146	2659.589041		S
PNDDe_ corso17	21	26	118	0.4294	164	0.000164	2618.292683		N
PNDDe_ corso17	22	17	119	0.4294	168	0.000168	2555.952381		S
PNDDe_ corso17	22	20	120	0.3883	162	0.000162	2396.91358		S
PNDDe_ corso17	22	22	121	0.38	142	0.000142	2676.056338		S
PNDDe_ corso17	22	24	122	0.3883	138	0.000138	2813.768116	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	22	27	123	0.4294	166	0.000166	2586.746988	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDDe_ corso17	23	18	124	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDDe_ corso17	23	21	125	0.3883	140	0.00014	2773.571429	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDDe_ corso17	23	23	126	0.38	138	0.000138	2753.623188		N

PNDDe_ corso17	23	24	127	0.3821	134	0.000134	2851.492537	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	23	25	128	0.3883	138	0.000138	2813.768116		N
PNDDe_ corso17	23	26	129	0.3985	154	0.000154	2587.662338		N
PNDDe_ corso17	23	27	130	0.4123	150	0.00015	2748.666667		N
PNDDe_ corso17	23	28	131	0.4294	160	0.00016	2683.75		N
PNDDe_ corso17	24	19	132	0.4294	176	0.000176	2439.772727	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDDe_ corso17	24	22	133	0.3883	152	0.000152	2554.605263	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso17	24	23	134	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso17	24	24	135	0.38	144	0.000144	2638.888889	Posizione martello vicino al bordo del mattone. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	24	25	136	0.3821	146	0.000146	2617.123288	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso17	24	26	137	0.3883	148	0.000148	2623.648649	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso17	24	27	138	0.3985	148	0.000148	2692.567568	Posizione martello vicino al bordo del mattone. Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDDe_ corso17	24	28	139	0.4123	160	0.00016	2576.875	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso17	25	20	140	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDDe_ corso17	25	23	141	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDDe_ corso17	25	24	142	0.3821	134	0.000134	2851.492537	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	25	25	143	0.38	136	0.000136	2794.117647		N
PNDDe_ corso17	25	26	144	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDDe_ corso17	25	27	145	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDDe_ corso17	25	28	146	0.3985	144	0.000144	2767.361111		N
PNDDe_ corso17	26	21	147	0.4294	156	0.000156	2752.564103	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	26	23	148	0.3985	146	0.000146	2729.452055		N
PNDDe_ corso17	26	24	149	0.3883	132	0.000132	2941.666667	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso17	26	25	150	0.3821	140	0.00014	2729.285714		N

PNDe_ corso17	26	26	151	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDe_ corso17	26	27	152	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	26	28	153	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDe_ corso17	27	22	154	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDe_ corso17	27	23	155	0.4123	154	0.000154	2677.272727		N
PNDe_ corso17	27	24	156	0.3985	142	0.000142	2806.338028	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso17	27	25	157	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDe_ corso17	27	26	158	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDe_ corso17	27	27	159	0.38	136	0.000136	2794.117647	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	27	28	160	0.3821	152	0.000152	2513.815789		N
PNDe_ corso17	28	23	161	0.4294	162	0.000162	2650.617284		N
PNDe_ corso17	28	24	162	0.4123	156	0.000156	2642.948718	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso17	28	25	163	0.3985	154	0.000154	2587.662338		N
PNDe_ corso17	28	26	164	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDe_ corso17	28	27	165	0.3821	148	0.000148	2581.756757	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	28	28	166	0.38	150	0.00015	2533.333333		N

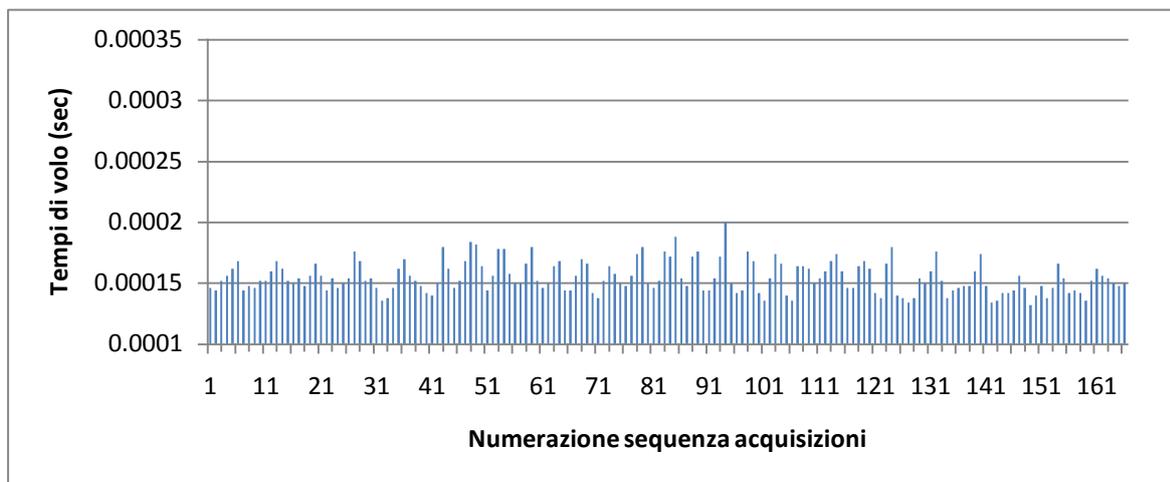


Figura 5.117 Muretto PNDE, corso 17, tempi di volo espressi in secondi

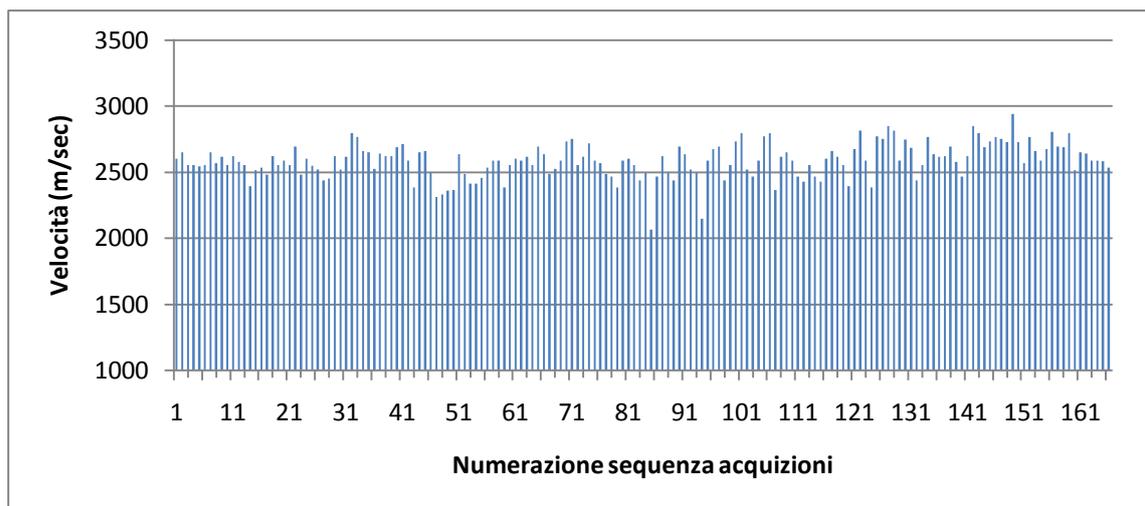


Figura 5.118 Muretto PNDE, corso 17, velocità espressa in m/s

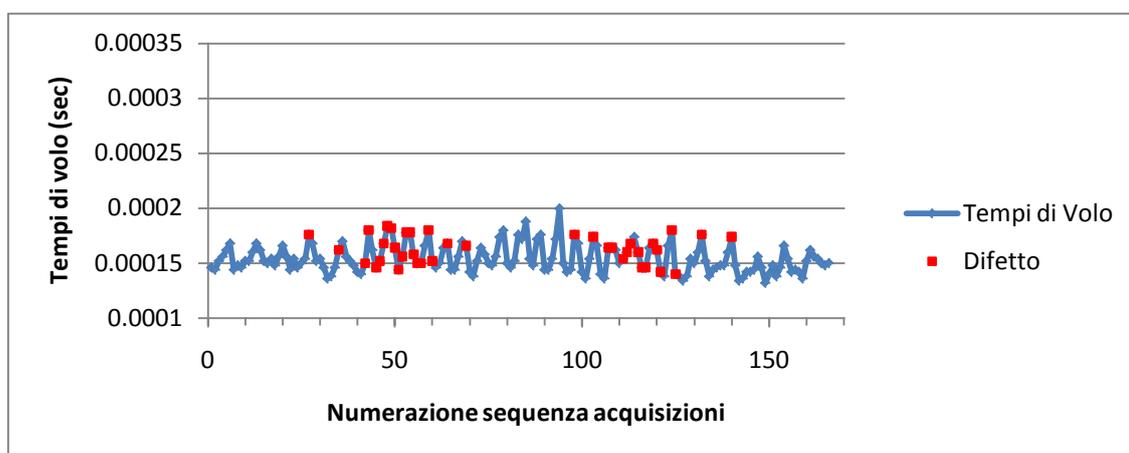


Figura 5.119 Muretto PNDE, corso 17, tempi di volo espressi in m/s con dettaglio sui percorsi che attraversano il difetto

La velocità media di tutti i percorsi dell'intera sezione è pari a 2589 m/s, mentre la velocità misurata solo con percorsi lontani dai bordi e nascenti da stazioni Tx che non si trovano di fronte al difetto è pari a 2560 m/s. È un risultato interessante in quanto si nota che non vi alcuna differenza tra velocità prese in una zona "integra" e la velocità presa lungo tutti i percorsi compresi quelli che attraversano un difetto. Ciò è dovuto al fatto che valori di velocità bassa per acquisizioni passanti sul difetto si equilibra con gli altri valori di velocità. I primi non assumono valori così bassi, mentre i secondi superano in alcuni casi anche i 2600 m/s. L'istogramma dei tempi di volo (figura 5.120) e quello delle velocità (figura 5.121) di percorsi che non hanno la stazione Tx di fronte al difetto, evidenziano un andamento alternato di convessità e concavità dovuto alla diversa lunghezza dei percorsi in un ventaglio di misura. Anche la figura 5.122 evidenzia questo

tipo di andamento, tranne qualche valore più basso degli altri, ma a sorpresa non coincidente con attraversamento di difetti.

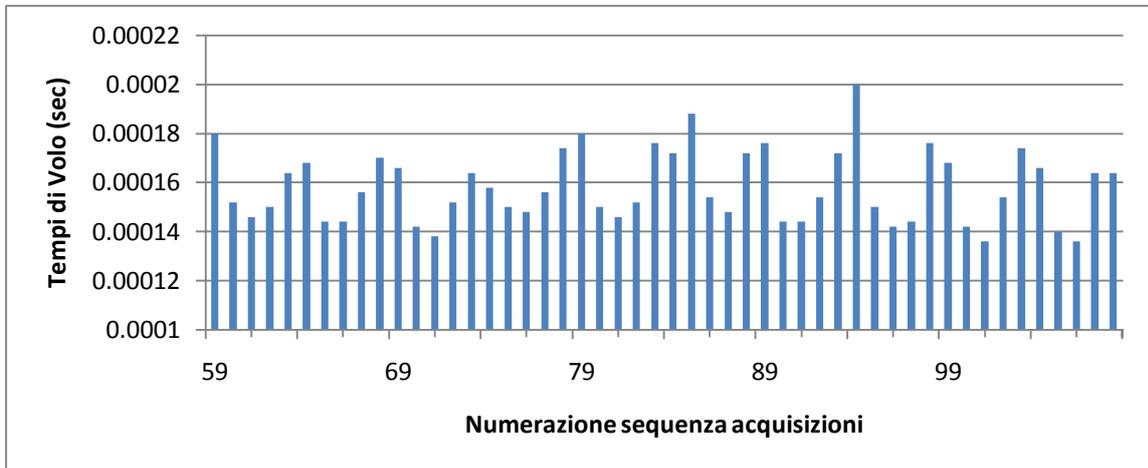


Figura 5.120 Muretto PNDE, corso 17, tempi di volo espresse in secondi dei percorsi che non hanno la stazione Tx di fronte al difetto

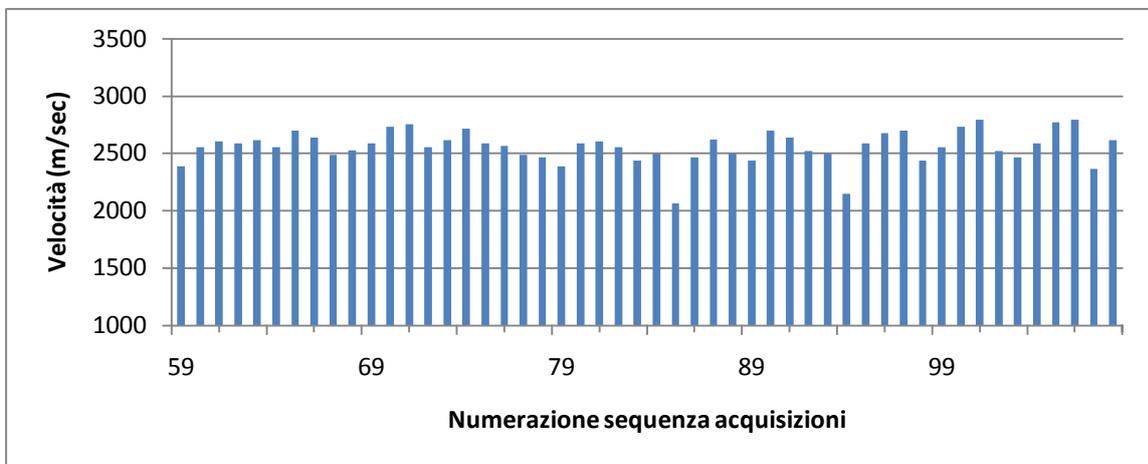


Figura 5.121 Muretto PNDE, corso 17, velocità espresse in m/s dei percorsi che non hanno la stazione Tx di fronte al difetto

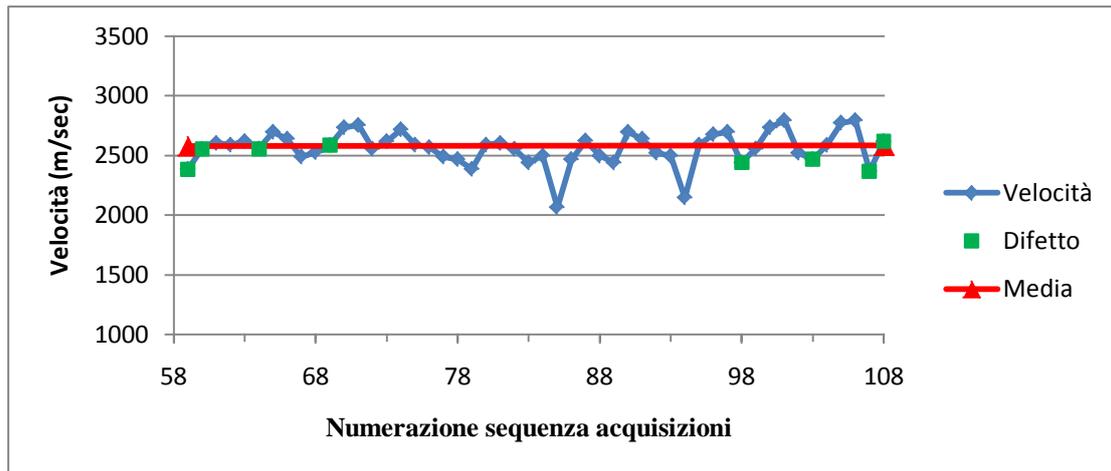


Figura 5.122 Muretto PNDE, corso 17, velocità espresse in m/s dei percorsi che non hanno la stazione Tx di fronte al difetto con dettaglio dei percorsi che attraversano i difetti

Dopo aver preparato un opportuna tabella da inserire nel software di inversione dati e aver deciso i parametri da settare, sono state effettuate varie prove con l'obiettivo di trovare l'immagine tomografica più esatta possibile. Nelle tabelle 5.23 e 5.24 sono riassunte le diverse iterazioni effettuate. Si è scelto tra la rosa delle quattro griglie di pixel scelte all'inizio della sperimentazione di riportare solo quelle relative a griglie di 52x19 e 32x19, poiché la griglia 34x10, aumentando la dimensione dei pixel, aumenta l'ampiezza della zona centrale a bassa velocità che non caratterizza nulla nella nostra sezione e la griglia 43x19 dà risultati molto simili alle griglie scelte.

Tabella 5.23 Muretto PNDE, corso 17, parametri di inversione con una griglia di 52x19 pixel

Pixel: 52x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso17_100	5	0	5	corso17_101	Figura 5.123
corso17_101	5	0	10	corso17_102	
corso17_102	5	0	15	corso17_103	
corso17_103	5	0	20	corso17_104	
corso17_104	5	0	25	corso17_105	
corso17_100	5	0	5	corso17_101	
corso17_101	0	5	10	corso17_106	Figura 5.124
corso17_106	0	5	15	corso17_107	Figura 5.125
corso17_107	0	5	20	corso17_108	
corso17_108	0	5	25	corso17_109	

Tabella 5.24 Muretto PNDE, corso 17, parametri di inversione con una griglia di 32x19 pixel

Pixel: 32x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso17_120	5	0	5	corso17_121	Figura 5.126
corso17_121	5	0	10	corso17_122	
corso17_122	5	0	15	corso17_123	
corso17_123	5	0	20	corso17_124	
corso17_124	5	0	25	corso17_125	
corso17_120	5	0	5	corso17_121	
corso17_121	0	5	10	corso17_126	Figura 5.127
corso17_126	0	5	15	corso17_127	Figura 5.128
corso17_127	0	5	20	corso17_128	
corso17_128	0	5	25	corso17_129	

Le immagini tomografiche presentate nelle figure 5.123, 5.124 e 5.125 sono distribuzioni di velocità ottenute con griglie di 52x19 pixel fino a 15 iterazioni di cui 5 iniziali straight e 10 curved in successione. Nelle figure 5.126, 5.127 e 5.128 le mappe di velocità sono realizzate con una suddivisione di 32x19 pixel fino ad un massimo di 15 iterazioni totali. Il primo gruppo di immagini tomografiche mostra tre zone sottili di colore giallo-verde a simboleggiare la presenza di anomalie. La striscia a velocità più basse tutta a sinistra della sezione potrebbe individuare il difetto sinistro mentre quella tutta a destra riportare il difetto di destra. La zona centrale color giallo non identifica nessuna anomalia a noi nota. Non crediamo neppure sia un giunto di malta in quanto quest'ultimi hanno dimensioni notevolmente più piccole della lunghezza d'onda considerata. Un operatore che ottiene un tipo di mappa tomografica, senza essere a conoscenza della reale geometria del corso, è portato a osservare la presenza di tre zone con imperfezioni rispetto all'intera sezione. Il secondo gruppo di immagini riporta gli stessi risultati, con una campitura più omogenea dovuta alle dimensioni maggiori dei pixel. Si osservano anche piccole zone lungo i bordi laterali di colore giallo, manifestando delle anomalie in prossimità delle zone di bordo. Il valore dei residui (figure 5.129 e 5.130) ci conferma che oltre al quindicesima iterazione non si ha un miglioramento nella convergenza del metodo. La figura 5.129 incomincia da un valore piuttosto basso pari a 22 circa per scendere al di sotto di 5. La figura 5.130 inizia dallo stesso valore, ma scende con andamento graduale fino a 5 circa, mostrando una curva simile a quella di sole iterazioni straight.

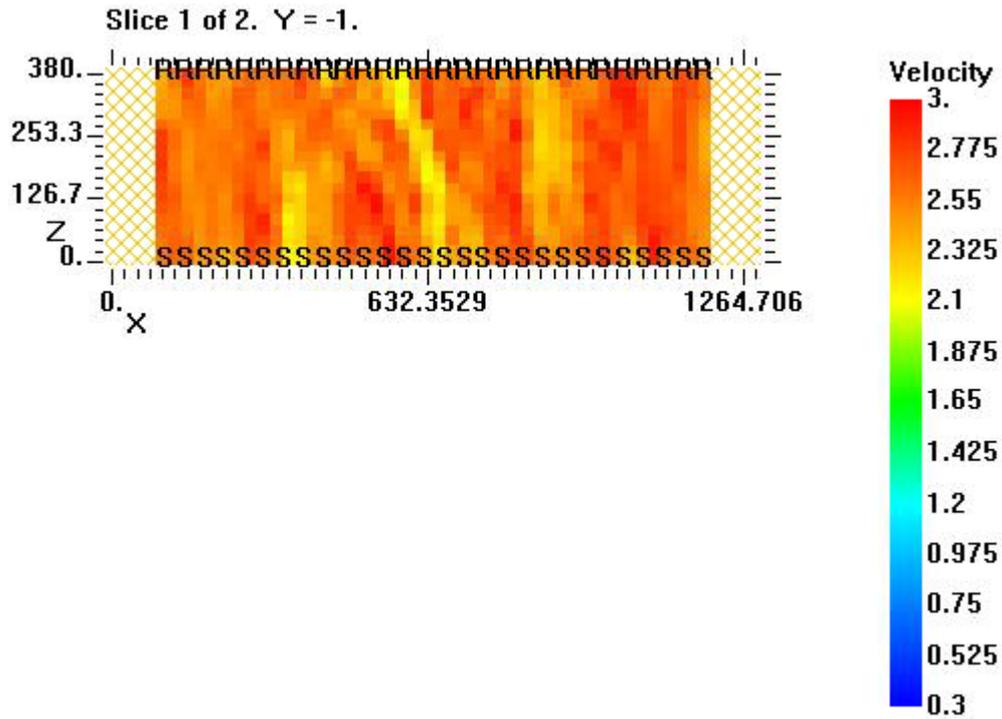


Figura 5.123 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso17_101

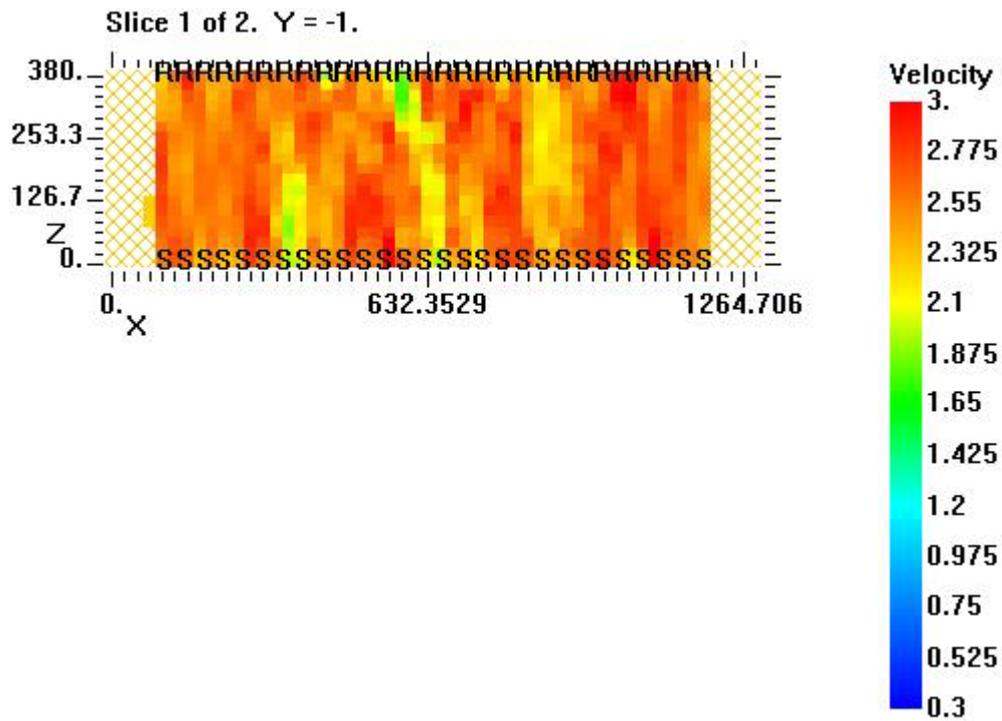


Figura 5.124 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso17_106

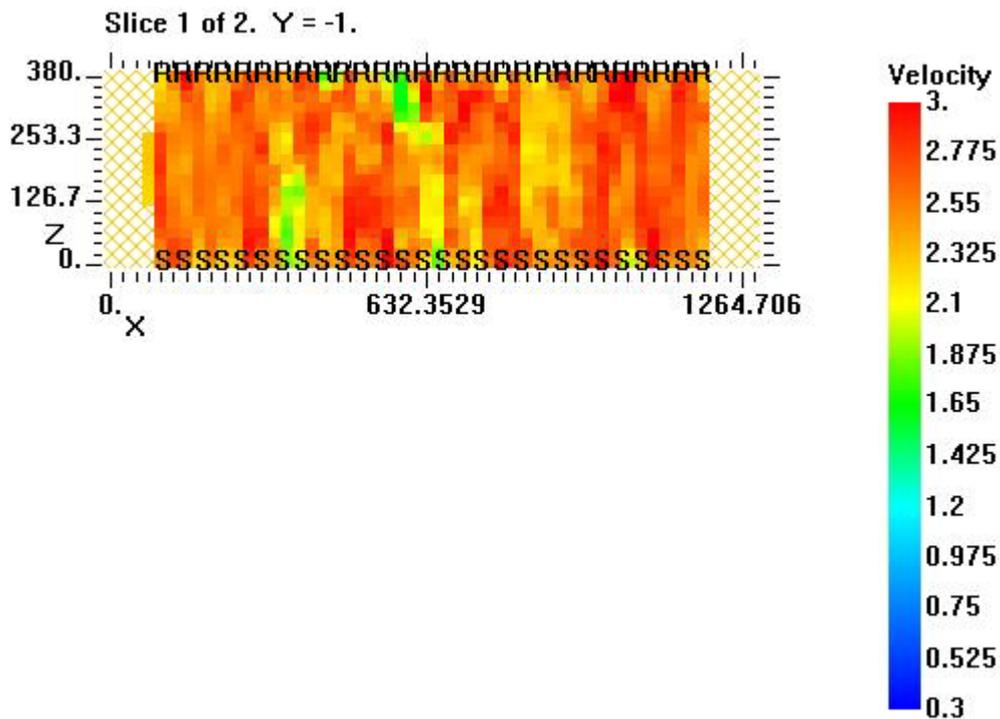


Figura 5.125 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso17_107

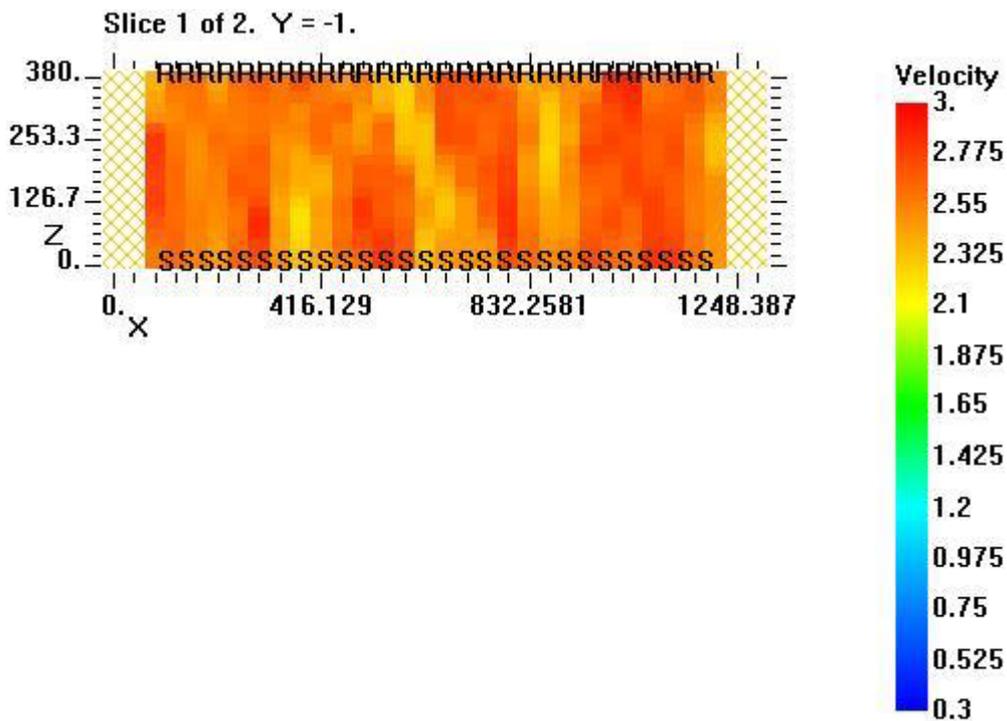


Figura 5.126 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso17_121

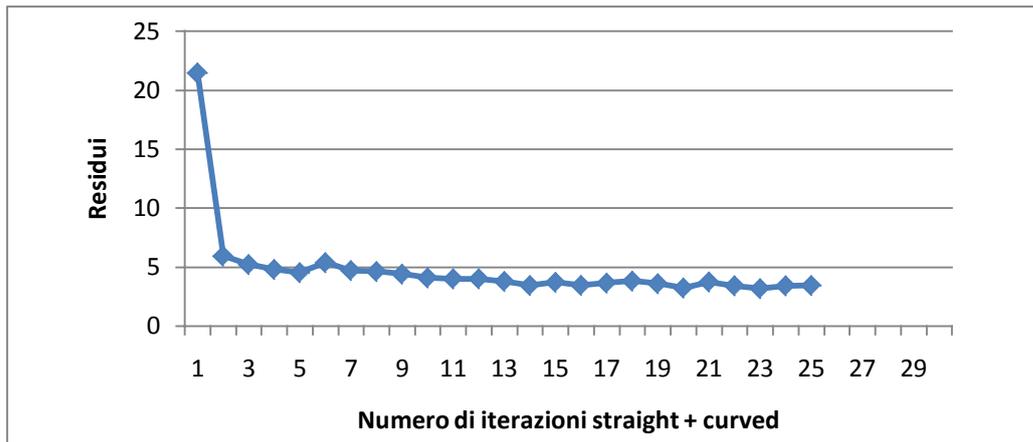


Figura 5.129 Muretto PNDE, corso 17, valori dei residui per 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 52x19 pixel

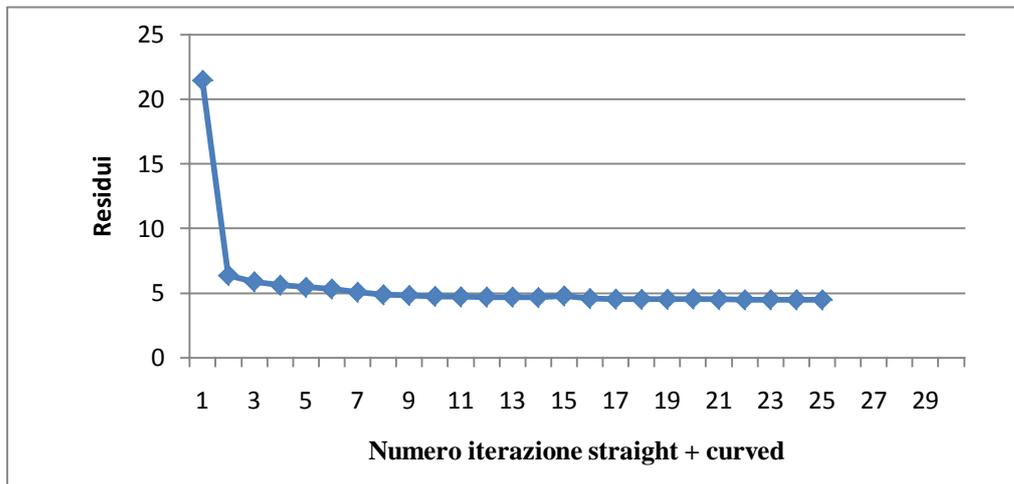


Figura 5.130 Muretto PNDE, corso 17, valori dei residui per 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 32x19 pixel

5.3. Muretto PPDF

5.3.1 Corso 5: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 32x19 pixel

Il corso 5 del muretto PPDF presenta due difetti di diverse dimensioni. Il difetto a sinistra è quasi quadrato di lati pari a 14,5 cm e 13 cm e dista 19 cm dal lato fronte del muretto. Il secondo difetto è rettangolare con lati che misurano 13 cm e 27 cm e dista 12 cm dal fronte del provino. La posizione centrale e le dimensioni rendono già noto, dalle sperimentazioni precedenti che sarà difficoltoso individuare in maniera chiara le anomalie. I tempi di volo di ciascun percorso progettato sono raccolti nella tabella 5.25, assieme alle lunghezze dei percorsi e alle relative velocità del segnale. Le caselle evidenziate in colore giallo indicano tempi di volo piuttosto alti per il tipo di percorso effettuato. Ciò può essere dovuto o a errori di rilevazione del segnale, ma è da escludere visto l'esattezza di tutti gli altri dati o ad ostacoli a noi non noti che il fronte d'onda ha incontrato nel suo cammino. Questi valori sicuramente, se non coincidono con percorsi che attraversano difetti, potrebbero portarci a immagini tomografiche fuorvianti.

La velocità media del corso 5 è pari a 2513, 85 m/sec. Visto la presenza di anomalie di dimensioni non elevate, è un risultato che non sorprende. Una prima analisi si ha con l'istogramma dei tempi di volo e delle velocità (figura 5.131 e 5.132) in relazione al percorso effettuato. L'andamento non presenta zone con tempi di volo più elevati rispetto ad altri, a parte un unico valore superiore ai 400 microsecondi. Esso non coincide però con un raggio nascente da una stazione Tx di fronte al difetto. Infatti per meglio capire in figura 5.133 sono riportati i percorsi che toccano un difetto e quelli con stazione emittente proprio di fronte all'anomalia. Quest'ultimi ci si aspetterebbe avessero i tempi di volo più elevati, invece ciò non accade. Sicuramente l'altezza dei difetti pari solo ad un corso non favorisce tempi di volo molto più alti degli altri in quanto la distanza aggiuntiva per aggirare il difetto non è così rilevante.

Tabella 5.24 Provino PNDF, corso 5: valori di analisi ed elaborazioni dei dati.

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDf_corso5	1	1	1	0.38	144	0.000144	2638.888889		N
PNDf_corso5	1	2	2	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDf_corso5	1	3	3	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDf_corso5	1	4	4	0.3985	150	0.00015	2656.666667		N
PNDf_corso5	1	5	5	0.4123	166	0.000166	2483.73494	Posizione accelerometro sul bordo del mattone.	N
PNDf_corso5	1	6	6	0.4294	162	0.000162	2650.617284		N
PNDf_corso5	2	1	7	0.3821	148	0.000148	2581.756757		N
PNDf_corso5	2	2	8	0.38	184	0.000184	2065.217391		N
PNDf_corso5	2	3	9	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDf_corso5	2	4	10	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDf_corso5	2	5	11	0.3985	164	0.000164	2429.878049	Posizione accelerometro sul bordo del mattone.	N
PNDf_corso5	2	6	12	0.4123	158	0.000158	2609.493671		N
PNDf_corso5	2	7	13	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDf_corso5	3	1	14	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDf_corso5	3	2	15	0.3821	144	0.000144	2653.472222		N
PNDf_corso5	3	3	16	0.38	140	0.00014	2714.285714		N
PNDf_corso5	3	4	17	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDf_corso5	3	5	18	0.3883	144	0.000144	2696.527778	Posizione accelerometro sul bordo del mattone.	N
PNDf_corso5	3	6	19	0.3985	146	0.000146	2729.452055		N
PNDf_corso5	3	8	20	0.4294	200	0.0002	2147	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDf_corso5	4	1	21	0.3985	158	0.000158	2522.151899		N
PNDf_corso5	4	2	22	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N
PNDf_corso5	4	3	23	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDf_corso5	4	4	24	0.38	144	0.000144	2638.888889		N

PNDf_ corso5	4	5	25	0.3821	144	0.000144	2653.472222	Posizione accelerometro sul bordo del mattone.	N
PNDf_ corso5	4	6	26	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDf_ corso5	4	9	27	0.4294	178	0.000178	2412.359551		S
PNDf_ corso5	5	1	28	0.4123	152	0.000152	2712.5	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	2	29	0.3985	148	0.000148	2692.567568	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	3	30	0.3883	146	0.000146	2659.589041	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	4	31	0.3821	142	0.000142	2690.84507	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	5	32	0.38	136	0.000136	2794.117647	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	6	33	0.3821	140	0.00014	2729.285714	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	5	7	34	0.3883	158	0.000158	2457.594937	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	5	10	35	0.4294	174	0.000174	2467.816092	Posizione martello sul bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	6	1	36	0.4294	172	0.000172	2496.511628		N
PNDf_ corso5	6	2	37	0.4123	156	0.000156	2642.948718		N
PNDf_ corso5	6	3	38	0.3985	158	0.000158	2522.151899		N
PNDf_ corso5	6	4	39	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDf_ corso5	6	5	40	0.3821	152	0.000152	2513.815789	Posizione accelerometro sul bordo del mattone.	N
PNDf_ corso5	6	6	41	0.38	148	0.000148	2567.567568		N
PNDf_ corso5	6	8	42	0.3883	176	0.000176	2206.25	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	6	11	43	0.4294	164	0.000164	2618.292683		S
PNDf_ corso5	7	2	44	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDf_ corso5	7	5	45	0.3883	156	0.000156	2489.102564	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	7	7	46	0.38	180	0.00018	2111.111111		S
PNDf_ corso5	7	9	47	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDf_ corso5	7	12	48	0.4294	172	0.000172	2496.511628		S
PNDf_ corso5	8	3	49	0.4294	178	0.000178	2412.359551		N
PNDf_ corso5	8	6	50	0.3883	152	0.000152	2554.605263		S
PNDf_ corso5	8	8	51	0.38	170	0.00017	2235.294118		S

PNDf_ corso5	8	10	52	0.3883	154	0.000154	2521.428571		S
PNDf_ corso5	8	13	53	0.4294	160	0.00016	2683.75		N
PNDf_ corso5	9	4	54	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDf_ corso5	9	7	55	0.3883	172	0.000172	2257.55814		S
PNDf_ corso5	9	9	56	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDf_ corso5	9	11	57	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDf_ corso5	9	14	58	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N
PNDf_ corso5	10	5	59	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	10	8	60	0.3883	182	0.000182	2133.516484	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	10	10	61	0.38	138	0.000138	2753.623188		N
PNDf_ corso5	10	12	62	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDf_ corso5	10	15	63	0.4294	162	0.000162	2650.617284		N
PNDf_ corso5	11	6	64	0.4294	178	0.000178	2412.359551	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	11	9	65	0.3883	152	0.000152	2554.605263	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	11	11	66	0.38	138	0.000138	2753.623188	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	11	13	67	0.3883	144	0.000144	2696.527778	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	11	16	68	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	12	7	69	0.4294	224	0.000224	1916.964286		S
PNDf_ corso5	12	10	70	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDf_ corso5	12	12	71	0.38	138	0.000138	2753.623188		N
PNDf_ corso5	12	14	72	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDf_ corso5	12	17	73	0.4294	158	0.000158	2717.721519		N
PNDf_ corso5	13	8	74	0.4294	182	0.000182	2359.340659		S
PNDf_ corso5	13	11	75	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDf_ corso5	13	13	76	0.38	146	0.000146	2602.739726		N
PNDf_ corso5	13	15	77	0.3883	152	0.000152	2554.605263		N
PNDf_ corso5	13	18	78	0.4294	160	0.00016	2683.75	Posizione accelerometro su giunto/bordo mattone.	N

PNDf_ corso5	14	9	79	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDf_ corso5	14	12	80	0.3883	278	0.000278	1396.76259	Strana curva del martello.	N
PNDf_ corso5	14	14	81	0.38	438	0.000438	867.5799087	Strana curva del martello.	N
PNDf_ corso5	14	16	82	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDf_ corso5	14	19	83	0.4294	232	0.000232	1850.862069	Strana curva del martello.	N
PNDf_ corso5	15	10	84	0.4294	166	0.000166	2586.746988		N
PNDf_ corso5	15	13	85	0.3883	146	0.000146	2659.589041		N
PNDf_ corso5	15	15	86	0.38	138	0.000138	2753.623188		N
PNDf_ corso5	15	17	87	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDf_ corso5	15	20	88	0.4294	172	0.000172	2496.511628		S
PNDf_ corso5	16	11	89	0.4294	174	0.000174	2467.816092		N
PNDf_ corso5	16	14	90	0.3883	212	0.000212	1831.603774	Strana curva del martello.	N
PNDf_ corso5	16	16	91	0.38	152	0.000152	2500		N
PNDf_ corso5	16	18	92	0.3883	154	0.000154	2521.428571		N
PNDf_ corso5	16	21	93	0.4294	174	0.000174	2467.816092	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	17	12	94	0.4294	164	0.000164	2618.292683		N
PNDf_ corso5	17	15	95	0.3883	144	0.000144	2696.527778		N
PNDf_ corso5	17	17	96	0.38	142	0.000142	2676.056338		N
PNDf_ corso5	17	19	97	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDf_ corso5	17	22	98	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDf_ corso5	18	13	99	0.4294	182	0.000182	2359.340659	Posizione martello sul bordo mattonne.	N
PNDf_ corso5	18	16	100	0.3883	156	0.000156	2489.102564	Posizione martello sul bordo mattonne.	N
PNDf_ corso5	18	18	101	0.38	160	0.00016	2375	Posizione martello sul bordo mattonne.Posizione accelerometro su giunto/bordo mattonne.	S
PNDf_ corso5	18	20	102	0.3883	170	0.00017	2284.117647	Posizione martello sul bordo mattonne.	S
PNDf_ corso5	18	23	103	0.4294	176	0.000176	2439.772727	Posizione martello sul bordo mattonne.	S
PNDf_ corso5	19	14	104	0.4294	170	0.00017	2525.882353		N

PNDf_ corso5	19	17	105	0.3883	150	0.00015	2588.666667		S
PNDf_ corso5	19	19	106	0.38	158	0.000158	2405.063291		S
PNDf_ corso5	19	21	107	0.3883	150	0.00015	2588.666667	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	19	24	108	0.4294	184	0.000184	2333.695652		S
PNDf_ corso5	20	15	109	0.4294	172	0.000172	2496.511628		S
PNDf_ corso5	20	18	110	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDf_ corso5	20	20	111	0.38	154	0.000154	2467.532468		S
PNDf_ corso5	20	22	112	0.3883	158	0.000158	2457.594937		S
PNDf_ corso5	20	25	113	0.4294	176	0.000176	2439.772727		S
PNDf_ corso5	21	16	114	0.4294	168	0.000168	2555.952381		S
PNDf_ corso5	21	19	115	0.3883	160	0.00016	2426.875		S
PNDf_ corso5	21	21	116	0.38	148	0.000148	2567.567568	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	21	23	117	0.3883	150	0.00015	2588.666667		S
PNDf_ corso5	21	26	118	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDf_ corso5	22	17	119	0.4294	184	0.000184	2333.695652		S
PNDf_ corso5	22	20	120	0.3883	156	0.000156	2489.102564		S
PNDf_ corso5	22	22	121	0.38	152	0.000152	2500		S
PNDf_ corso5	22	24	122	0.3883	152	0.000152	2554.605263		S
PNDf_ corso5	22	27	123	0.4294	172	0.000172	2496.511628		S
PNDf_ corso5	23	18	124	0.4294	174	0.000174	2467.816092		S
PNDf_ corso5	23	21	125	0.3883	184	0.000184	2110.326087	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	23	23	126	0.38	158	0.000158	2405.063291		S
PNDf_ corso5	23	24	127	0.3821	146	0.000146	2617.123288		S
PNDf_ corso5	23	25	128	0.3883	146	0.000146	2659.589041		S
PNDf_ corso5	23	26	129	0.3985	156	0.000156	2554.487179		S
PNDf_ corso5	23	27	130	0.4123	162	0.000162	2545.061728		S

PNDf_ corso5	23	28	131	0.4294	204	0.000204	2104.901961		N
PNDf_ corso5	24	19	132	0.4294	170	0.00017	2525.882353	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	24	22	133	0.3883	160	0.00016	2426.875	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	24	23	134	0.3821	156	0.000156	2449.358974	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	24	24	135	0.38	140	0.00014	2714.285714	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	24	25	136	0.3821	142	0.000142	2690.84507	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_ corso5	24	26	137	0.3883	134	0.000134	2897.761194	Posizione martello su bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	24	27	138	0.3985	156	0.000156	2554.487179	Posizione martello su bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	24	28	139	0.4123	156	0.000156	2642.948718	Posizione martello su bordo mattone.	N
PNDf_ corso5	25	20	140	0.4294	180	0.00018	2385.555556		S
PNDf_ corso5	25	23	141	0.3883	148	0.000148	2623.648649		S
PNDf_ corso5	25	24	142	0.3821	142	0.000142	2690.84507		N
PNDf_ corso5	25	25	143	0.38	138	0.000138	2753.623188		N
PNDf_ corso5	25	26	144	0.3821	138	0.000138	2768.84058		N
PNDf_ corso5	25	27	145	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDf_ corso5	25	28	146	0.3985	152	0.000152	2621.710526		N
PNDf_ corso5	26	21	147	0.4294	168	0.000168	2555.952381	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_ corso5	26	23	148	0.3985	162	0.000162	2459.876543		S
PNDf_ corso5	26	24	149	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDf_ corso5	26	25	150	0.3821	146	0.000146	2617.123288		N
PNDf_ corso5	26	26	151	0.38	154	0.000154	2467.532468		N
PNDf_ corso5	26	27	152	0.3821	140	0.00014	2729.285714		N
PNDf_ corso5	26	28	153	0.3883	142	0.000142	2734.507042		N
PNDf_ corso5	27	22	154	0.4294	172	0.000172	2496.511628		S
PNDf_ corso5	27	23	155	0.4123	156	0.000156	2642.948718		N
PNDf_ corso5	27	24	156	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PNDf_ corso5	27	25	157	0.3883	150	0.00015	2588.666667		N

PNDf_ corso5	27	26	158	0.3821	150	0.00015	2547.333333		N
PNDf_ corso5	27	27	159	0.38	150	0.00015	2533.333333		N
PNDf_ corso5	27	28	160	0.3821	138	0.000138	2768.84058		N
PNDf_ corso5	28	23	161	0.4294	246	0.000246	1745.528455		N
PNDf_ corso5	28	24	162	0.4123	170	0.00017	2425.294118		N
PNDf_ corso5	28	25	163	0.3985	156	0.000156	2554.487179		N
PNDf_ corso5	28	26	164	0.3883	148	0.000148	2623.648649		N
PNDf_ corso5	28	27	165	0.3821	162	0.000162	2358.641975		N
PNDf_ corso5	28	28	166	0.38	144	0.000144	2638.888889		N

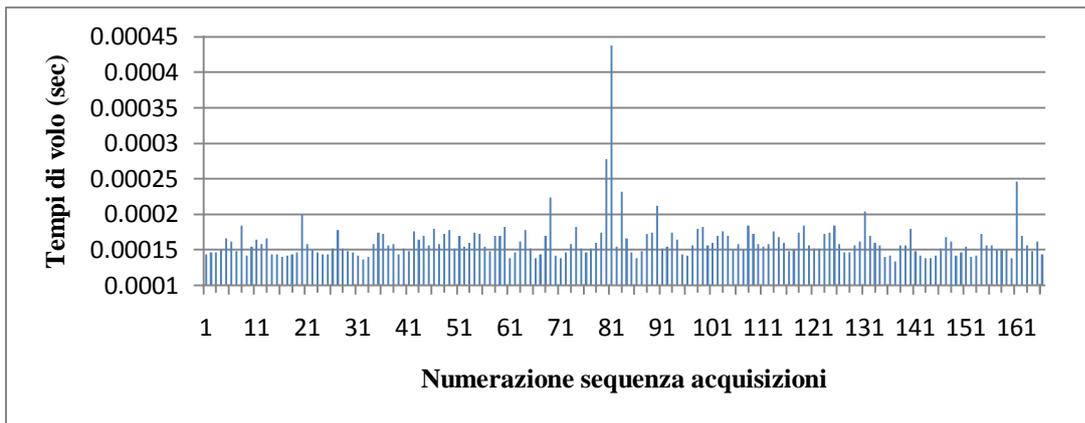


Figura 5.131 Muretto PNDF, corso 5, tempi di volo espressi in secondi

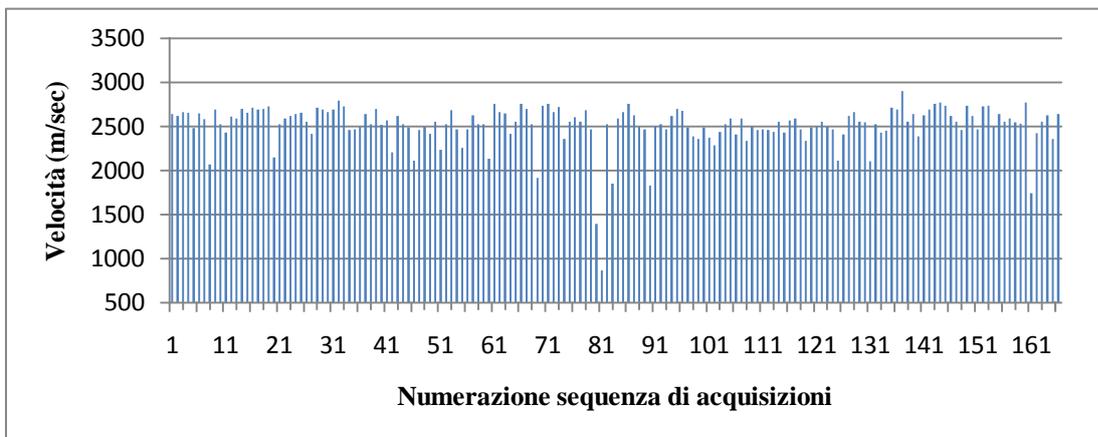


Figura 5.132 Muretto PNDF, corso 5, velocità espresse in m/s

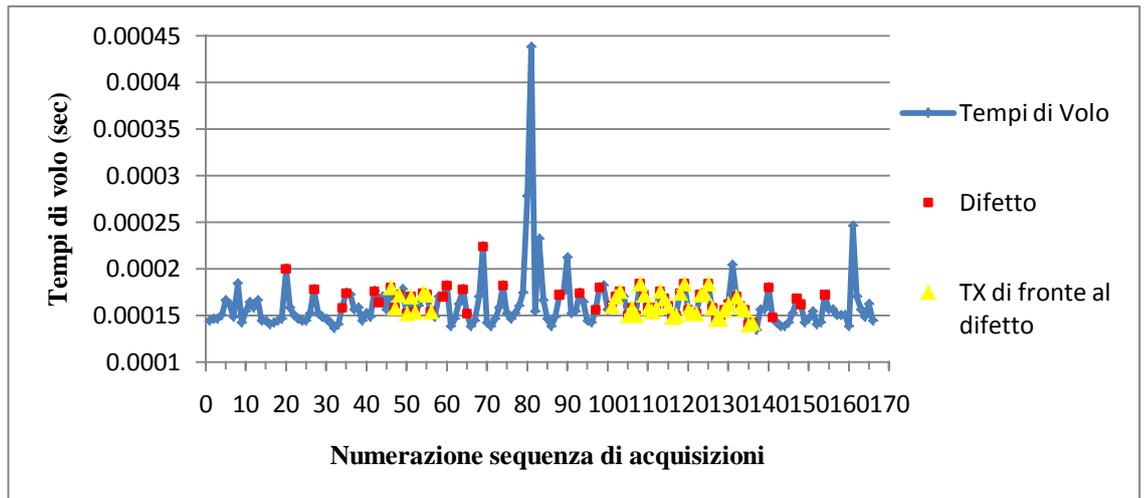


Figura 5.133 Muretto PNDP, corso 5, tempi di volo espressi in secondi con dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto

È interessante analizzare l'andamento delle velocità e dei tempi di volo per i raggi aventi le stazioni emittenti nella zona centrale della sezione e che non si trovano di fronte ad un difetto. In figura 5.134 e 5.135 è riportato l'istogramma dei tempi di volo e delle velocità per i percorsi compresi tra la stazione trasmittente 10 e 17. La velocità media che ne deriva è pari a 2452 m/sec, un valore addirittura inferiore rispetto alla velocità di tutti i percorsi compresi quelli nascenti da stazioni Tx di fronte ad un difetto. Ciò è giustificato, dalla presenza di alcuni valori di tempo di volo superiori ai 200 microsecondi e non corrispondenti necessariamente a percorsi che toccano un difetto (figura 5.136). Inoltre è da notare che la posizione dei difetti rispetto al lato frontale del muretto è molto simile (19 cm per il difetto di sinistra e 12 cm per il difetto di destra) e in un caso coincidente con la metà dello spessore della sezione. Questo porta ad una peggiore visualizzazione del difetto, e forse i valori dei tempi di volo dei percorsi anche che non interessano direttamente un difetto sono influenzati dalla presenza così ravvicinata dei due difetti. Per quanto riguarda le inversioni con il Geotom, per questo caso si è anche provato a eliminare qualche valore dalla tabella dei tempi di volo, in particolare proprio l'acquisizione numero 81. Si è visto che però non si sono ottenuti considerevoli miglioramenti e si è quindi proceduto in maniera standard. Il riepilogo delle iterazioni si trova in tabella 5.25 e tabella 5.26, essendo per questo corso più significative le mappe ottenute con griglie di 32x19 e 52x19 pixel.

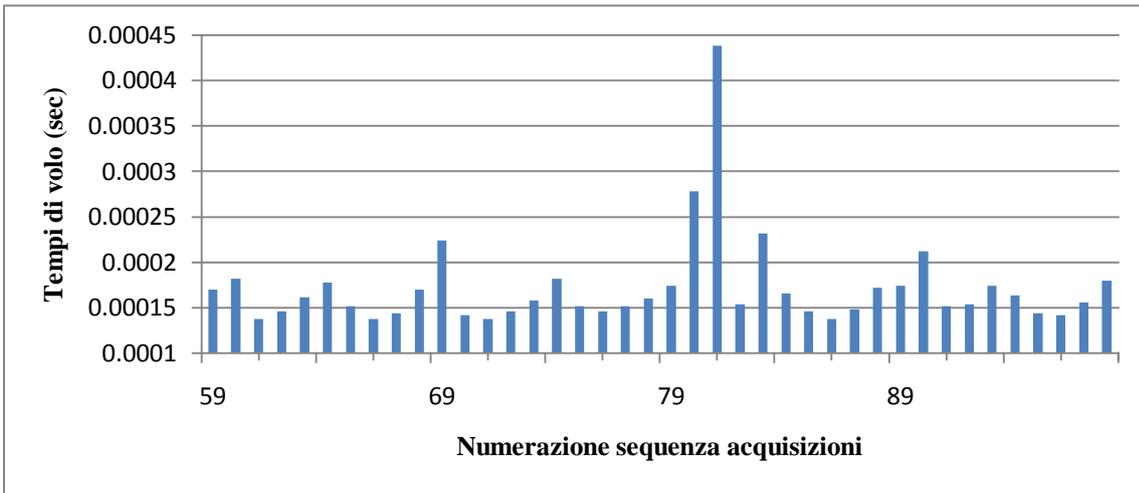


Figura 5.134 Muretto PNDF, corso 5, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi che non hanno le stazioni Tx di fronte al difetto

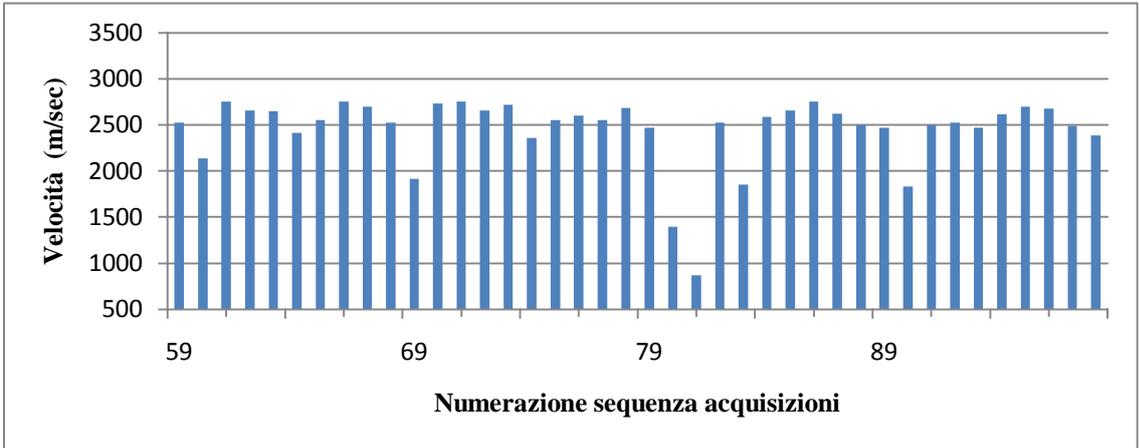


Figura 5.135 Muretto PNDF, corso 5; velocità espressa in m/s dei percorsi che non hanno le stazioni Tx di fronte al difetto

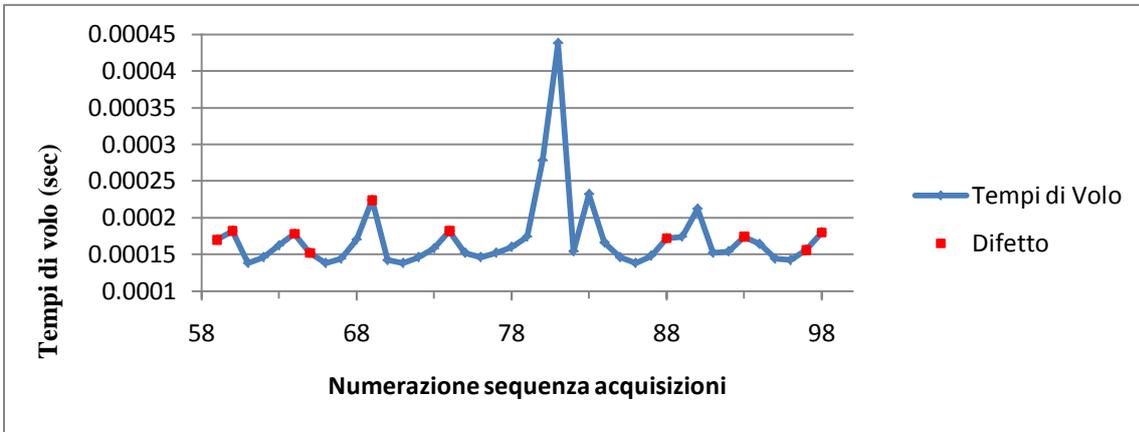


Figura 5.136 Muretto PNDF, corso 5, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi che non hanno le stazioni Tx di fronte al difetto con dettaglio sui percorsi che non attraversano il difetto

Tabella 5.25 Muretto PNDF, corso 5, parametri di inversione con una griglia di 52x19 pixel

Pixel:52x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso5_100	5	0	5	corso5_101	Figura 5.137
corso5_101	5	0	10	corso5_102	
corso5_102	5	0	15	corso5_103	
corso5_103	5	0	20	corso5_104	
corso5_104	5	0	25	corso5_105	
corso5_100	5	0	5	corso5_101	
corso5_101	0	5	10	corso5_106	Figura 5.138
corso5_106	0	5	15	corso5_107	Figura 5.139
corso5_107	0	5	20	corso5_108	Figura 5.140
corso5_108	0	5	25	corso5_109	

Tabella 5.26 Muretto PNDF, corso 5, parametri di inversione con una griglia di 32x19 pixel

Pixel: 32x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso5_120	5	0	5	corso5_121	Figura 5.141
corso5_121	5	0	10	corso5_122	
corso5_122	5	0	15	corso5_123	
corso5_123	5	0	20	corso5_124	
corso5_124	5	0	25	corso5_125	
corso5_120	5	0	5	corso5_121	
corso5_121	0	5	10	corso5_126	Figura 5.142
corso5_126	0	5	15	corso5_127	Figura 5.143
corso5_127	0	5	20	corso5_128	
corso5_128	0	5	25	corso5_129	

Le immagini tomografiche più rilevanti sono presentate nelle figure 5.137, 5.138, 5.139 e 5.140. La sezione viene suddivisa in due zone color giallo-arancio da una striscia centrale di colore più scuro blu-verde. L'area a sinistra con velocità più basse è in corrispondenza del primo difetto di sinistra, il quale potrebbe essere identificato nel rettangolino in alto a sinistra di colore verde. La posizione è alquanto più superficiale di quella reale e le dimensioni

notevolmente ridotte se si associa quest'area alla visualizzazione del difetto di sinistra. La striscia centrale è la rappresentazione di quei percorsi con tempi di volo superiori a 200 microsecondi. Essa non corrisponde a nessuna anomalia nota da progetto. La zona di colore giallo più a destra rende nota la presenza di imperfezioni, ma senza definirne l'entità, la posizione e la dimensione. L'area corrisponde al luogo dov'è collocato il difetto di destra, ma questo non viene visto nella sua specificità. Nelle immagini tomografiche di figura 5.141, 5.142 e 5.143 si ha, all'aumentare di una dimensione del pixel, un ingrandimento della fascia centrale a più bassa velocità. Proseguendo con il numero di iterazioni, mentre nel file corso5_108 si ha una progressiva diminuzione di questa zona, nel file corso5_118 si continua ad avere questa regione con proporzioni piuttosto vaste rispetto al file corso5_108. I valori dei residui (figura 5.144 e 5.145) iniziano da valori piuttosto alti, intorno a 140 fino a scendere al di sotto di 20. Non ci danno particolari informazioni sul numero di iterazioni a cui fermarci, poiché i valori si stabilizzano più o meno già dalla quinta iterazione.

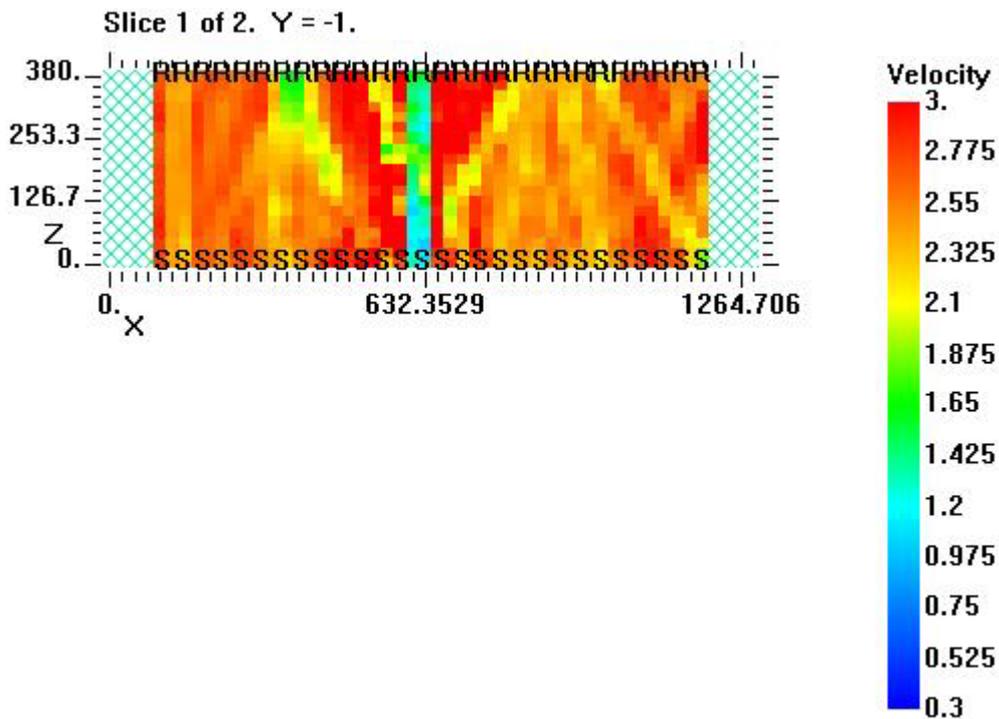


Figura 5.137 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso5_101

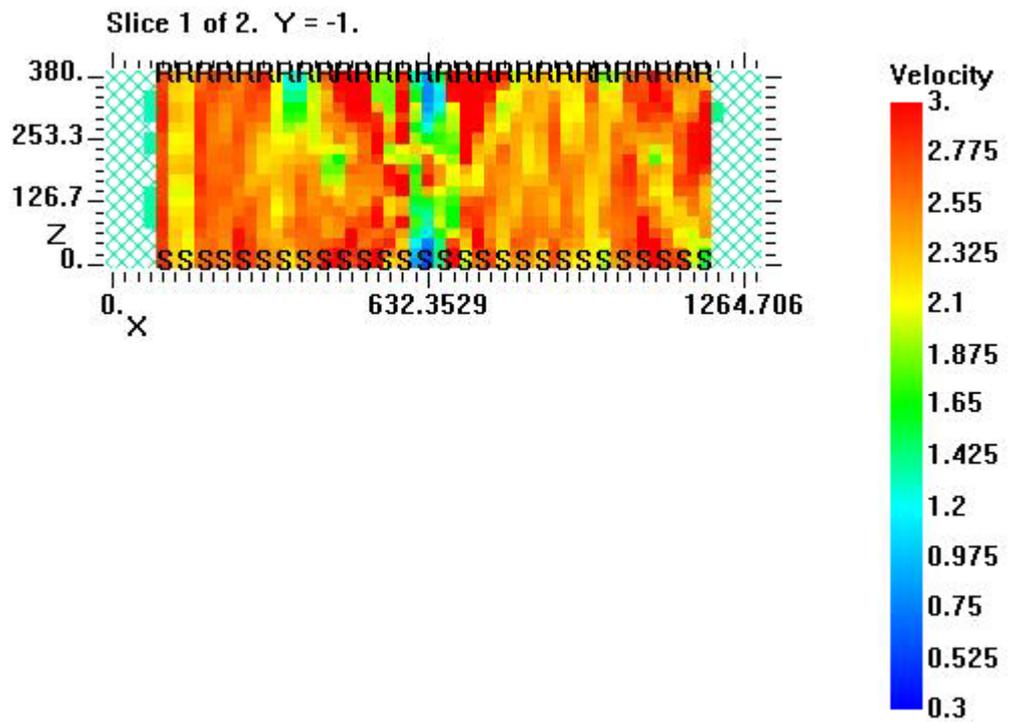


Figura 5.138 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso5_106

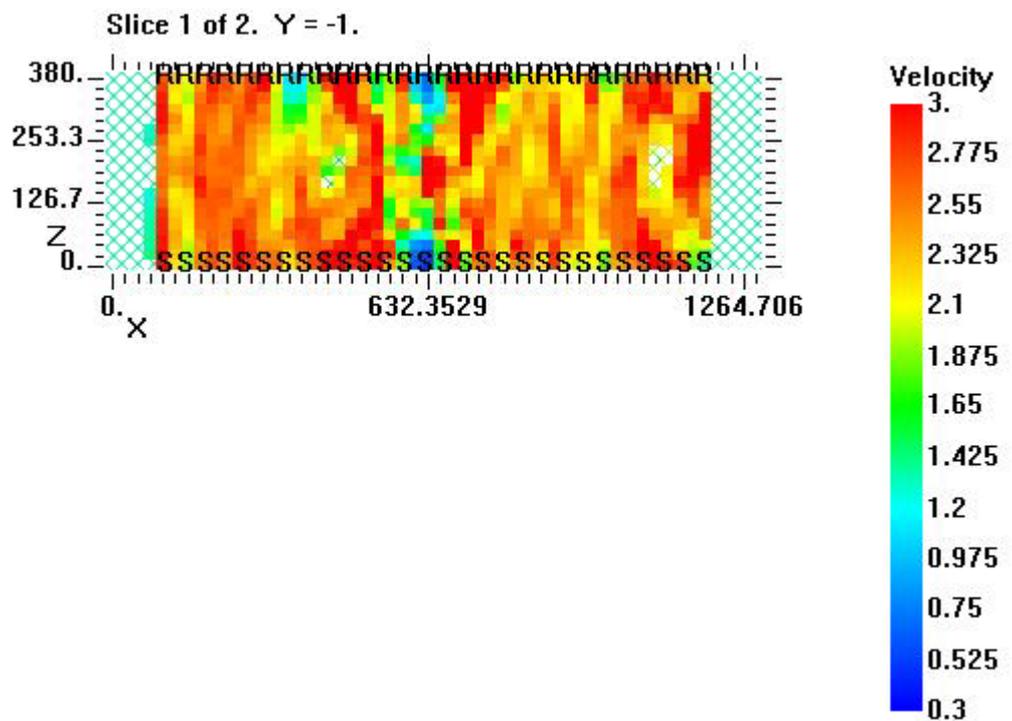


Figura 5.139 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso5_107

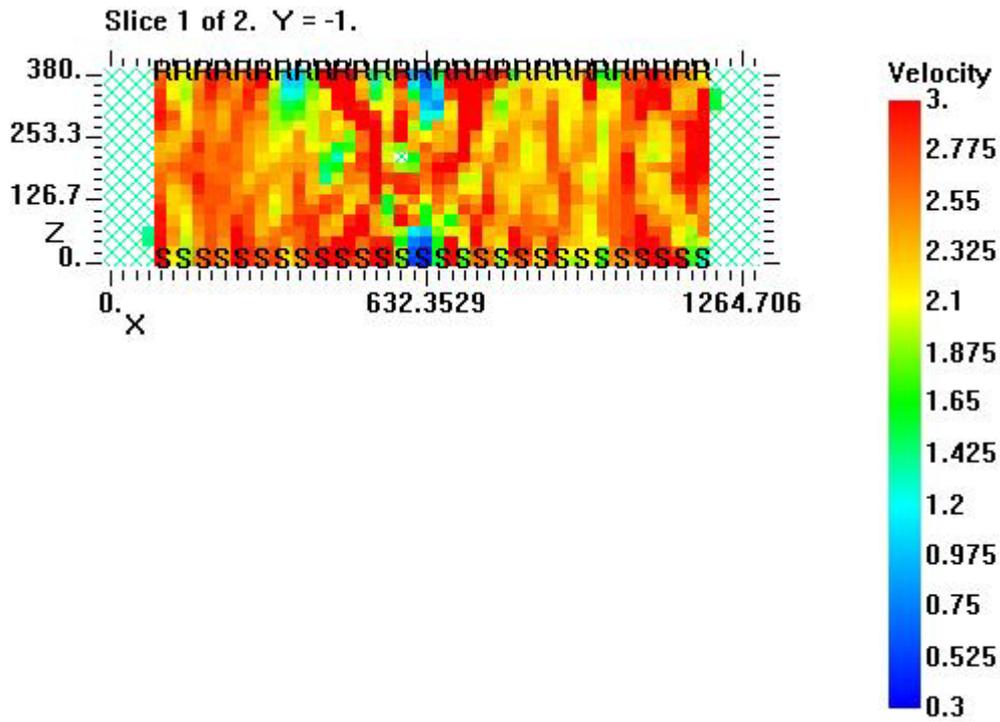


Figura 5.140 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso5_108

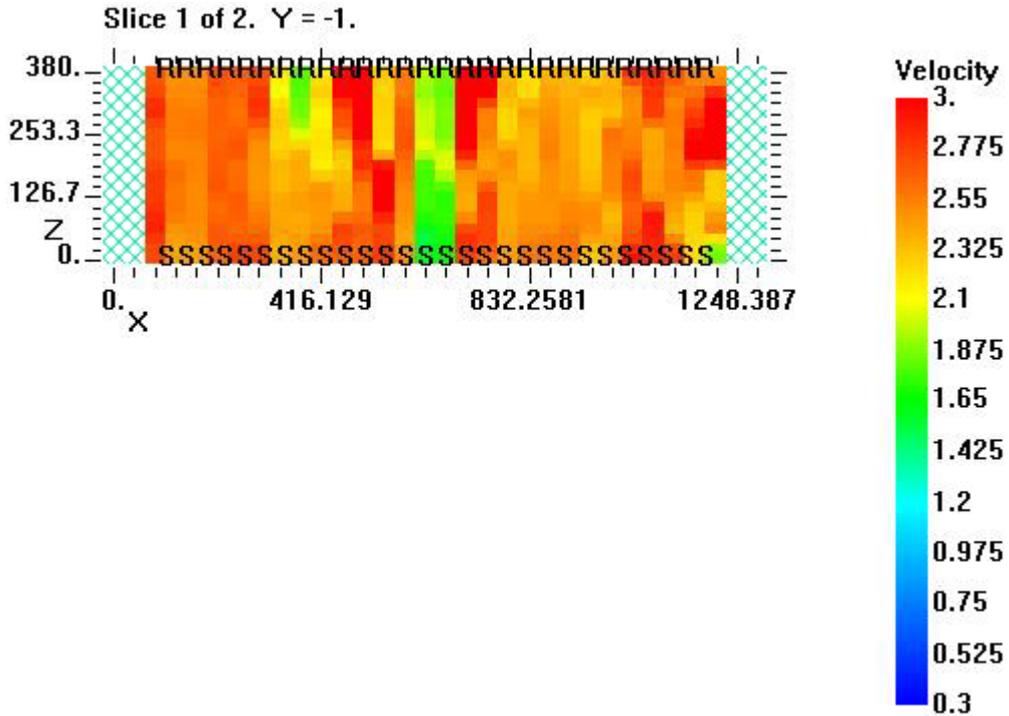


Figura 5.141 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso5_121

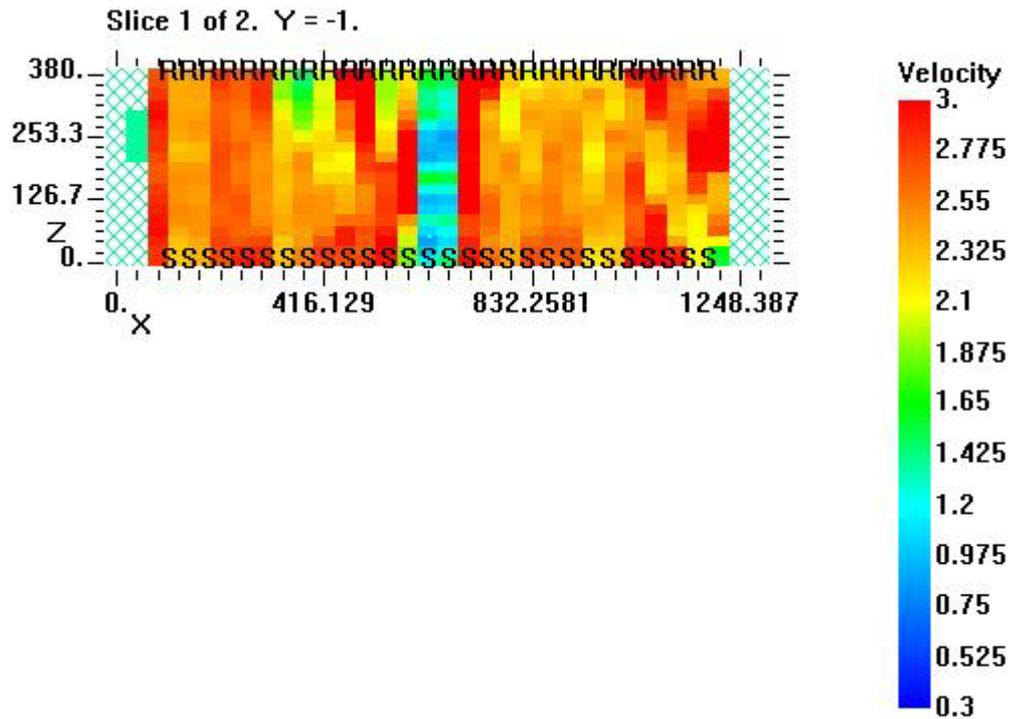


Figura 5.142 Muretto PPDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso5_126

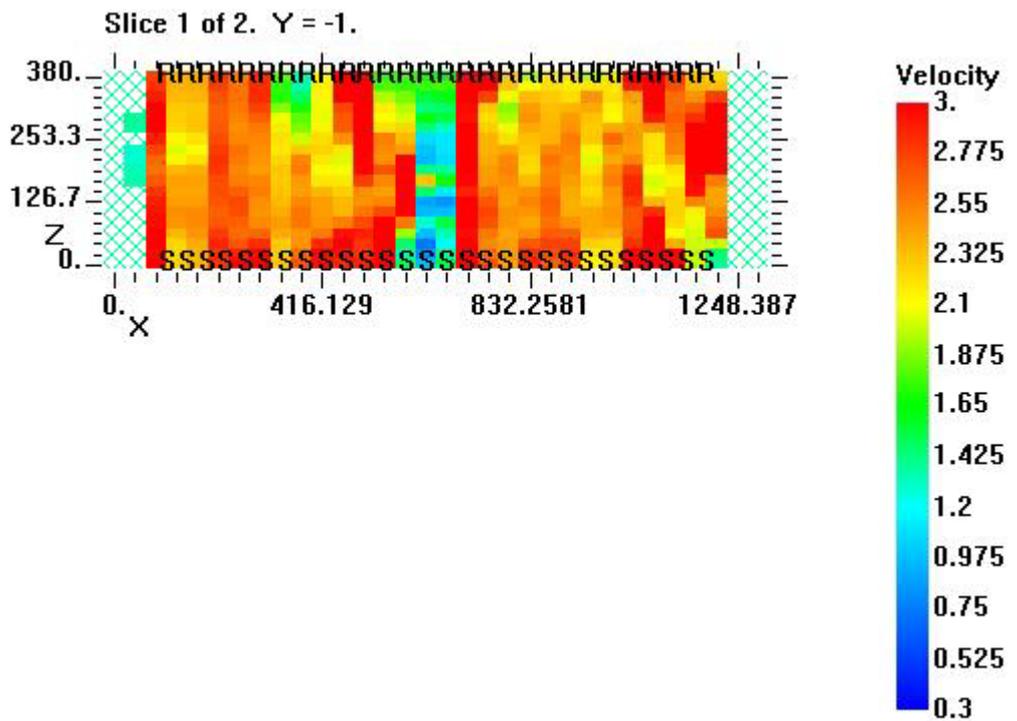


Figura 5.143 Muretto PPDF, corso 5, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso5_127

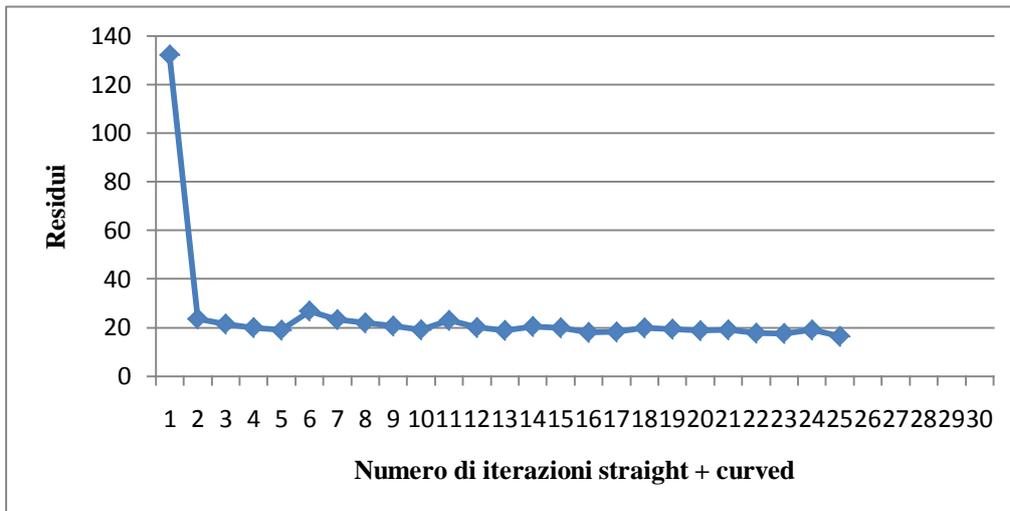


Figura 5.144 Muretto PNDF, corso 5, valore dei residui di 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 52x19 pixel

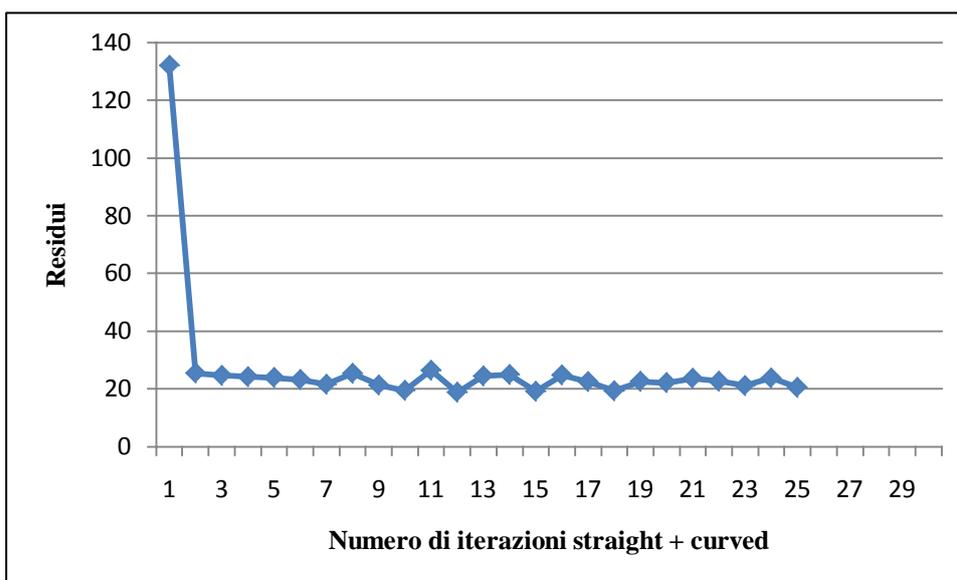


Figura 5.145 Muretto PNDF, corso 5, valore dei residui di 25 iterazioni straight+curved, per una griglia di 32x19 pixel

5.3.2 Corso 7: griglia di 43x19 pixel

La geometria del corso 7 del muretto PNDF non ha nessun tipo di difetto noto. Se guardiamo dal lato del fronte del muretto è composto da una prima fila di mattoni di lista e una seconda fila di mattoni di testa. I tempi di volo

ottenuti dalle prove soniche sono riportati nella tabella 5.27. Non si evidenziano particolari situazioni anomale tra i valori ottenuti, a parte qualche valore di velocità superiore a 2600 m/sec. Il valore medio della velocità è pari a 2596 m/s, che denota una buona muratura. Dall'istogramma dei tempi di volo (figura 5.146) si osserva un andamento ripetitivo con massimi e minimi periodici in base alla lunghezza del percorso. Per quanto riguarda i parametri da settare nel software di inversione dei dati, sono stati considerate tutte le suddivisioni in pixel finora scelte, me ne verrà riportata una solamente in quanto sono tutte pressoché uguali. La tabella (tabella 5.28) riassume il numero ed il tipo di iterazioni fatte.

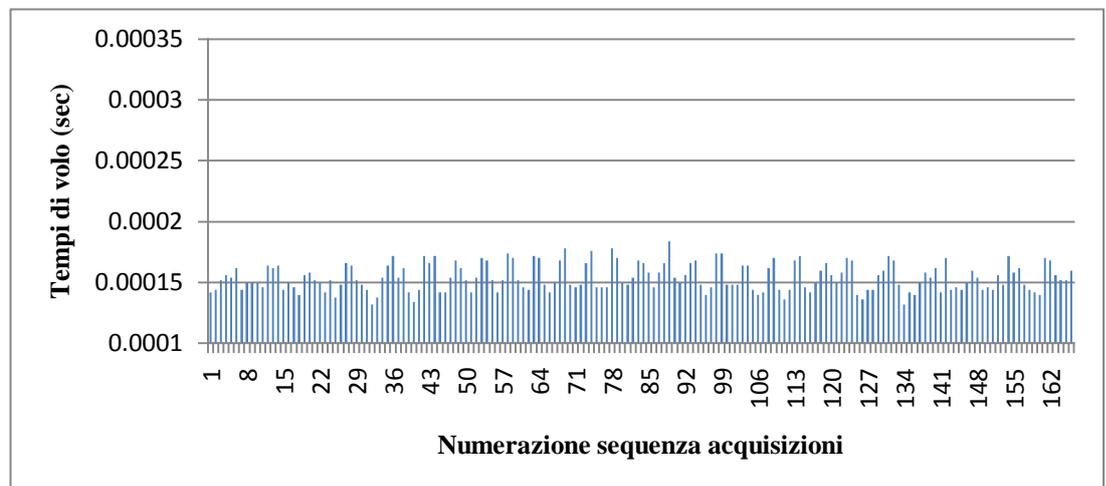


Figura 5.146 Muretto PNDf, corso 7, tempi di volo espressi in sec

Tabella 5.27 Provino PNDf, corso 7: valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note
PNDf_corso7	1	1	1	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_corso7	1	2	2	0.3821	144	0.000144	2653.47222	
PNDf_corso7	1	3	3	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_corso7	1	4	4	0.3985	156	0.000156	2554.48718	
PNDf_corso7	1	5	5	0.4123	154	0.000154	2677.27273	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.

PNDf_ corso7	1	6	6	0.4294	162	0.000162	2650.61728	
PNDf_ corso7	2	1	7	0.3821	144	0.000144	2653.47222	
PNDf_ corso7	2	2	8	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso7	2	3	9	0.3821	150	0.00015	2547.33333	
PNDf_ corso7	2	4	10	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	2	5	11	0.3985	146	0.000146	2729.45205	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	2	6	12	0.4123	164	0.000164	2514.02439	
PNDf_ corso7	2	7	13	0.4294	162	0.000162	2650.61728	
PNDf_ corso7	3	1	14	0.3883	164	0.000164	2367.68293	
PNDf_ corso7	3	2	15	0.3821	144	0.000144	2653.47222	
PNDf_ corso7	3	3	16	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso7	3	4	17	0.3821	146	0.000146	2617.12329	
PNDf_ corso7	3	5	18	0.3883	140	0.00014	2773.57143	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	3	6	19	0.3985	156	0.000156	2554.48718	
PNDf_ corso7	3	8	20	0.4294	158	0.000158	2717.72152	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	4	1	21	0.3985	152	0.000152	2621.71053	
PNDf_ corso7	4	2	22	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	4	3	23	0.3821	142	0.000142	2690.84507	
PNDf_ corso7	4	4	24	0.38	152	0.000152	2500	
PNDf_ corso7	4	5	25	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	4	6	26	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	4	9	27	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	5	1	28	0.4123	164	0.000164	2514.02439	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	5	2	29	0.3985	152	0.000152	2621.71053	Posizione martello vicino bordo mattone.

PNDf_ corso7	5	3	30	0.3883	148	0.000148	2623.64865	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	5	4	31	0.3821	144	0.000144	2653.47222	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	5	5	32	0.38	132	0.000132	2878.78788	Posizione martello vicino bordo mattone.Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	5	6	33	0.3821	138	0.000138	2768.84058	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	5	7	34	0.3883	154	0.000154	2521.42857	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	5	10	35	0.4294	164	0.000164	2618.29268	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso7	6	1	36	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso7	6	2	37	0.4123	154	0.000154	2677.27273	
PNDf_ corso7	6	3	38	0.3985	162	0.000162	2459.87654	
PNDf_ corso7	6	4	39	0.3883	142	0.000142	2734.50704	
PNDf_ corso7	6	5	40	0.3821	134	0.000134	2851.49254	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	6	6	41	0.38	144	0.000144	2638.88889	
PNDf_ corso7	6	8	42	0.3883	172	0.000172	2257.55814	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	6	11	43	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	7	2	44	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso7	7	5	45	0.3883	142	0.000142	2734.50704	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	7	7	46	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	7	9	47	0.3883	154	0.000154	2521.42857	
PNDf_ corso7	7	12	48	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	8	3	49	0.4294	162	0.000162	2650.61728	
PNDf_ corso7	8	6	50	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso7	8	8	51	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	8	10	52	0.3883	154	0.000154	2521.42857	

PNDf_ corso7	8	13	53	0.4294	170	0.00017	2525.88235	
PNDf_ corso7	9	4	54	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	9	7	55	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso7	9	9	56	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	9	11	57	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso7	9	14	58	0.4294	174	0.000174	2467.81609	
PNDf_ corso7	10	5	59	0.4294	170	0.00017	2525.88235	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	10	8	60	0.3883	152	0.000152	2554.60526	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	10	10	61	0.38	146	0.000146	2602.73973	
PNDf_ corso7	10	12	62	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	10	15	63	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso7	11	6	64	0.4294	170	0.00017	2525.88235	
PNDf_ corso7	11	9	65	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	11	11	66	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	11	13	67	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	11	16	68	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	12	7	69	0.4294	178	0.000178	2412.35955	
PNDf_ corso7	12	10	70	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	12	12	71	0.38	146	0.000146	2602.73973	
PNDf_ corso7	12	14	72	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	12	17	73	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	13	8	74	0.4294	176	0.000176	2439.77273	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	13	11	75	0.3883	146	0.000146	2659.58904	
PNDf_ corso7	13	13	76	0.38	146	0.000146	2602.73973	

PNDf_ corso7	13	15	77	0.3883	146	0.000146	2659.58904	
PNDf_ corso7	13	18	78	0.4294	178	0.000178	2412.35955	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	14	9	79	0.4294	170	0.00017	2525.88235	
PNDf_ corso7	14	12	80	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	14	14	81	0.38	148	0.000148	2567.56757	
PNDf_ corso7	14	16	82	0.3883	154	0.000154	2521.42857	
PNDf_ corso7	14	19	83	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	15	10	84	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	15	13	85	0.3883	158	0.000158	2457.59494	
PNDf_ corso7	15	15	86	0.38	146	0.000146	2602.73973	
PNDf_ corso7	15	17	87	0.3883	158	0.000158	2457.59494	
PNDf_ corso7	15	20	88	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	16	11	89	0.4294	184	0.000184	2333.69565	
PNDf_ corso7	16	14	90	0.3883	154	0.000154	2521.42857	
PNDf_ corso7	16	16	91	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso7	16	18	92	0.3883	156	0.000156	2489.10256	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	16	21	93	0.4294	166	0.000166	2586.74699	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	17	12	94	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	17	15	95	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	17	17	96	0.38	140	0.00014	2714.28571	
PNDf_ corso7	17	19	97	0.3883	146	0.000146	2659.58904	
PNDf_ corso7	17	22	98	0.4294	174	0.000174	2467.81609	
PNDf_ corso7	18	13	99	0.4294	174	0.000174	2467.81609	Posizione martello su bordo mattone/giunto.
PNDf_ corso7	18	16	100	0.3883	148	0.000148	2623.64865	Posizione martello su bordo mattone/giunto.

PNDf_ corso7	18	18	101	0.38	148	0.000148	2567.56757	Posizione martello su bordo mattone/giunto. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	18	20	102	0.3883	148	0.000148	2623.64865	Posizione martello su bordo mattone/giunto.
PNDf_ corso7	18	23	103	0.4294	164	0.000164	2618.29268	Posizione martello su bordo mattone/giunto.
PNDf_ corso7	19	14	104	0.4294	164	0.000164	2618.29268	
PNDf_ corso7	19	17	105	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	19	19	106	0.38	140	0.00014	2714.28571	
PNDf_ corso7	19	21	107	0.3883	142	0.000142	2734.50704	
PNDf_ corso7	19	24	108	0.4294	162	0.000162	2650.61728	
PNDf_ corso7	20	15	109	0.4294	170	0.00017	2525.88235	
PNDf_ corso7	20	18	110	0.3883	144	0.000144	2696.52778	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	20	20	111	0.38	136	0.000136	2794.11765	
PNDf_ corso7	20	22	112	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	20	25	113	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	21	16	114	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso7	21	19	115	0.3883	146	0.000146	2659.58904	
PNDf_ corso7	21	21	116	0.38	142	0.000142	2676.05634	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	21	23	117	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	21	26	118	0.4294	160	0.00016	2683.75	
PNDf_ corso7	22	17	119	0.4294	166	0.000166	2586.74699	
PNDf_ corso7	22	20	120	0.3883	156	0.000156	2489.10256	
PNDf_ corso7	22	22	121	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso7	22	24	122	0.3883	158	0.000158	2457.59494	
PNDf_ corso7	22	27	123	0.4294	170	0.00017	2525.88235	

PNDf_ corso7	23	18	124	0.4294	168	0.000168	2555.95238	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	23	21	125	0.3883	140	0.00014	2773.57143	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	23	23	126	0.38	136	0.000136	2794.11765	
PNDf_ corso7	23	24	127	0.3821	144	0.000144	2653.47222	
PNDf_ corso7	23	25	128	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	23	26	129	0.3985	156	0.000156	2554.48718	
PNDf_ corso7	23	27	130	0.4123	160	0.00016	2576.875	
PNDf_ corso7	23	28	131	0.4294	172	0.000172	2496.51163	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	24	19	132	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso7	24	22	133	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	24	23	134	0.3821	132	0.000132	2894.69697	
PNDf_ corso7	24	24	135	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	24	25	136	0.3821	140	0.00014	2729.28571	
PNDf_ corso7	24	26	137	0.3883	150	0.00015	2588.66667	
PNDf_ corso7	24	27	138	0.3985	158	0.000158	2522.1519	
PNDf_ corso7	24	28	139	0.4123	154	0.000154	2677.27273	
PNDf_ corso7	25	20	140	0.4294	162	0.000162	2650.61728	
PNDf_ corso7	25	23	141	0.3883	142	0.000142	2734.50704	
PNDf_ corso7	25	24	142	0.3821	170	0.00017	2247.64706	
PNDf_ corso7	25	25	143	0.38	144	0.000144	2638.88889	
PNDf_ corso7	25	26	144	0.3821	146	0.000146	2617.12329	
PNDf_ corso7	25	27	145	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	25	28	146	0.3985	150	0.00015	2656.66667	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	26	21	147	0.4294	160	0.00016	2683.75	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.

PNDf_ corso7	26	23	148	0.3985	154	0.000154	2587.66234	
PNDf_ corso7	26	24	149	0.3883	144	0.000144	2696.52778	
PNDf_ corso7	26	25	150	0.3821	146	0.000146	2617.12329	
PNDf_ corso7	26	26	151	0.38	144	0.000144	2638.88889	
PNDf_ corso7	26	27	152	0.3821	156	0.000156	2449.35897	
PNDf_ corso7	26	28	153	0.3883	148	0.000148	2623.64865	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	27	22	154	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso7	27	23	155	0.4123	158	0.000158	2609.49367	
PNDf_ corso7	27	24	156	0.3985	162	0.000162	2459.87654	
PNDf_ corso7	27	25	157	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso7	27	26	158	0.3821	144	0.000144	2653.47222	
PNDf_ corso7	27	27	159	0.38	142	0.000142	2676.05634	
PNDf_ corso7	27	28	160	0.3821	140	0.00014	2729.28571	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso7	28	23	161	0.4294	170	0.00017	2525.88235	
PNDf_ corso7	28	24	162	0.4123	168	0.000168	2454.16667	
PNDf_ corso7	28	25	163	0.3985	156	0.000156	2554.48718	
PNDf_ corso7	28	26	164	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso7	28	27	165	0.3821	152	0.000152	2513.81579	
PNDf_ corso7	28	28	166	0.38	160	0.00016	2375	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.

Tabella 5.28 Muretto PNDF, corso 7, parametri di inversione con una griglia di 43x19 pixel

Pixel: 43x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso7_110	5	0	5	corso7_111	Figura 5.146
corso7_111	5	0	10	corso7_112	
corso7_112	5	0	15	corso7_113	
corso7_113	5	0	20	corso7_114	
corso7_114	5	0	25	corso7_115	
corso7_110	5	0	5	corso7_111	
corso7_111	0	5	10	corso7_116	Figura 5.147
corso7_116	0	5	15	corso7_117	Figura 5.148
corso7_117	0	5	20	corso7_118	Figura 5.149
corso7_118	0	5	25	corso7_119	

Le immagini tomografiche sono riportate nelle figure 5.146 - 5.149. Si vede una copertura omogenea di colore arancione che denota velocità piuttosto alte e mano a mano che aumenta il numero di iterazioni si intravedono anche zone a velocità più bassa in colore giallo. Queste sono disposte in modo caotico, tale da non poter essere associato a nessuna anomalia neppure alla posizione dei giunti di malta. Il grafico dei residui (figura 5.150) parte da un valore di 14 per decrescere fino a 4. Dalla quindicesima iterazione in avanti i valori rimangono costanti.

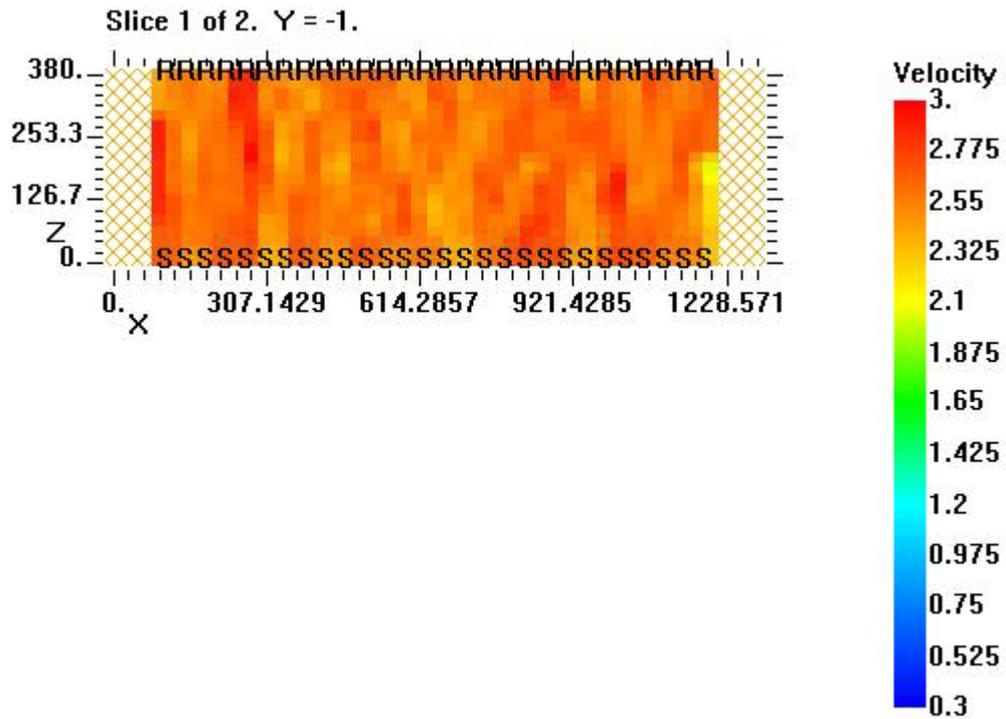


Figura 5.146 Muretto PPDF, corso 7, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso7_111

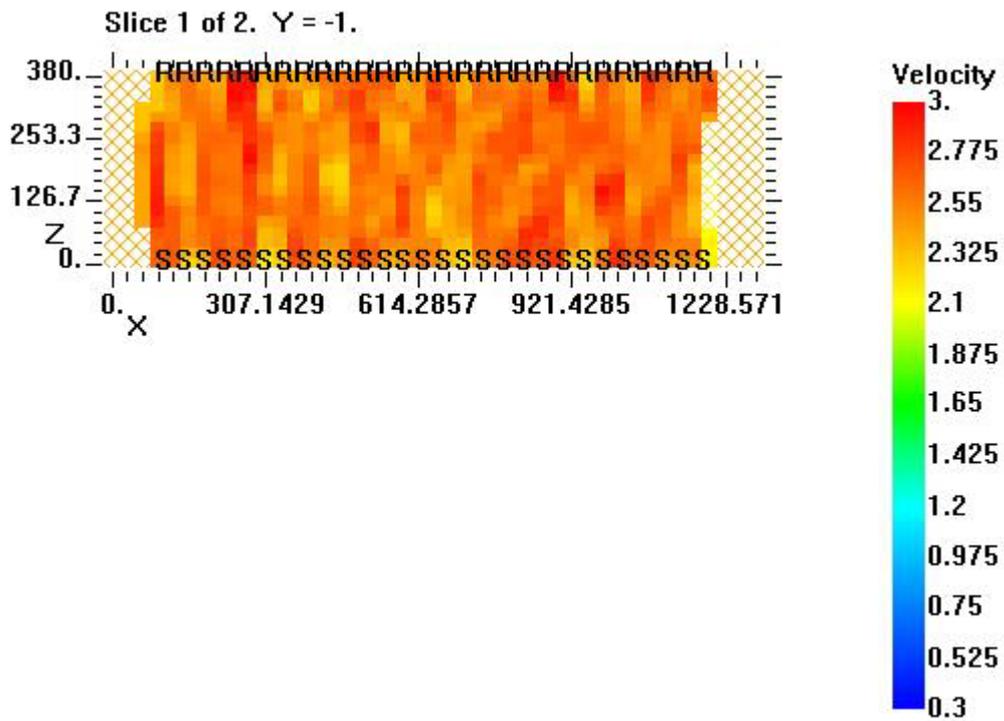


Figura 5.147 Muretto PPDF, corso 7, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso7_116

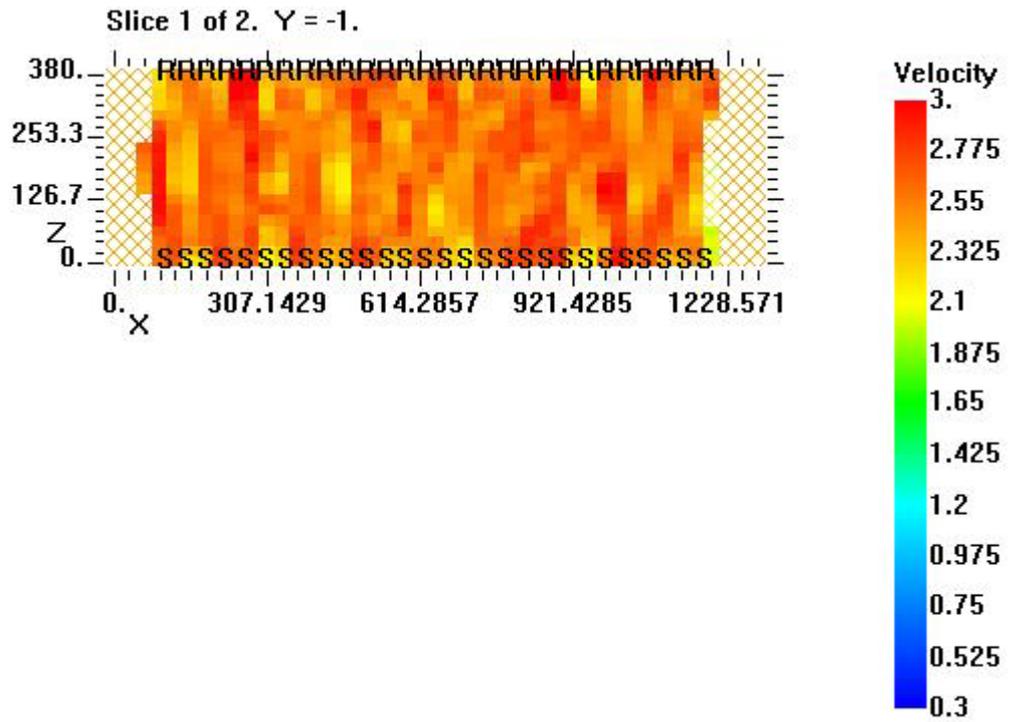


Figura 5.148 Muretto PNDF, corso 7, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso7_117

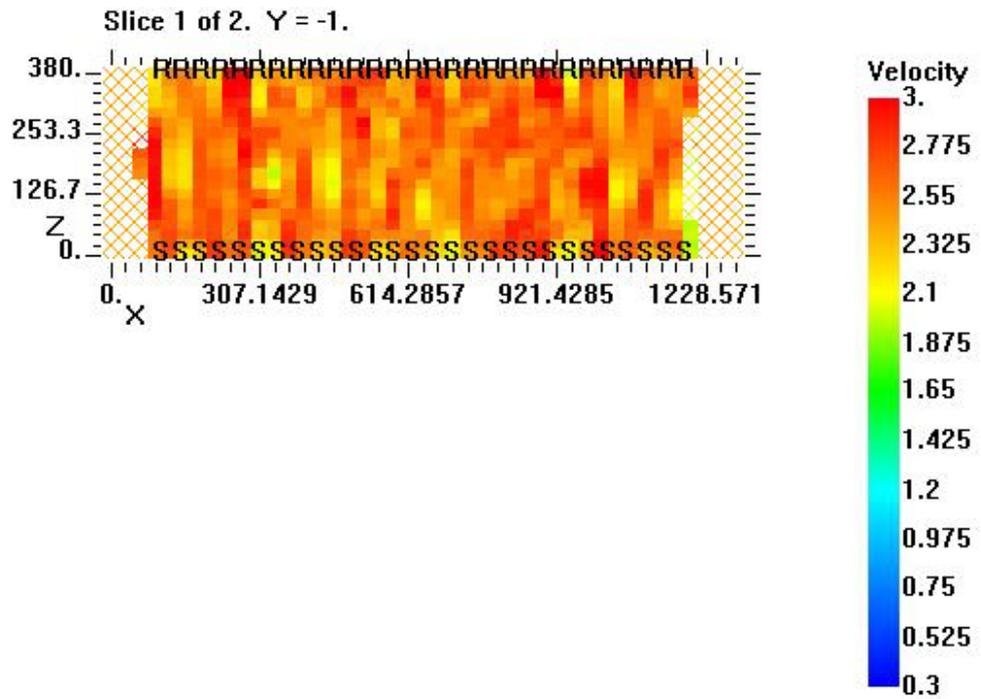


Figura 5.149 Muretto PNDF, corso 7, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 43 x 19 pixel, file output corso7_118

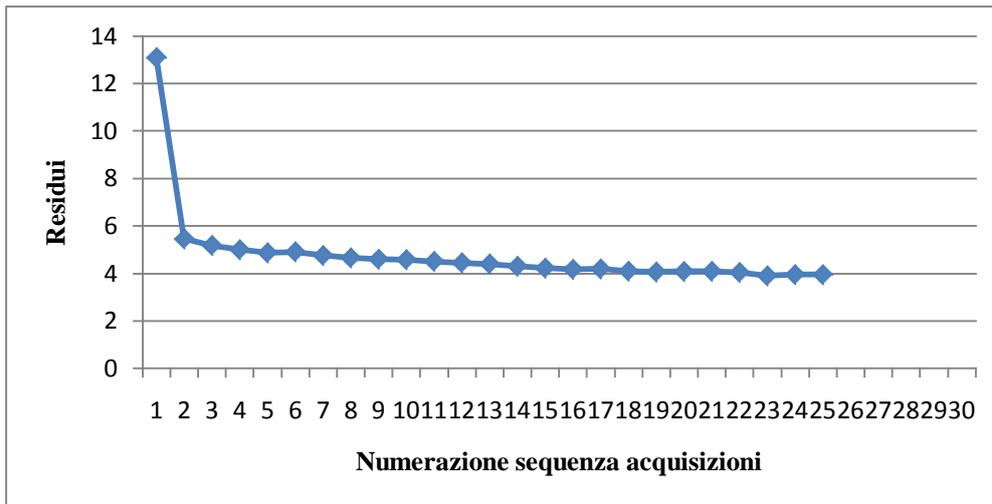


Figura 5.150 Muretto PNDF, corso 7, valori dei residui di 25 iterazioni per una griglia di 43x19 pixel

5.3.3 Corso 12: confronto tra griglia di 52x19 pixel e griglia di 32x19 pixel

Il corso 12 del muretto PNDF contiene al suo interno una zona di muratura a sacco di forma rettangolare ma con una sporgenza come presentato nel capitolo 3. Tutti i percorsi considerati attraversano questa zona. Questo corso è interessante da confrontare con il corso 7 del muretto PNDF, al fine di caratterizzare le potenzialità della tomografia nell'individuare diverse tessiture murarie. I tempi di volo ricavati sono illustrati nella tabella 5.29. I valori evidenziati mostrano tempi di volo più alti rispetto a quello che ci saremmo aspettati, ma per molti vi è la notifica che hanno la stazione di battuta su giunto di malta.

La velocità media è pari a 2295 m/s. Un valore più basso di quello ricavato per il corso 7; d'altronde la presenza di muratura non regolare costituita da frammenti di mattone compattati con malta influisce del tempo che impiega il segnale ad attraversare la sezione. Dall'istogramma dei tempi di volo (figura 5.151) si osserva che fino all'acquisizione 90 circa, i valori sono maggiori rispetto alle acquisizioni successive alla 90. Ciò è dovuto alla sporgenza della zona di muratura a sacco che lungo questi percorsi risulta essere più spessa. Si valutano anche le caratteristiche di anisotropia della sezione, vista la diversità di tessitura muraria, al fine di capire se è necessario settare diversamente i parametri nel software di inversione. Nella figura 5.152 è presentato il grafico con in ascissa le velocità e in ordinata la

lunghezza dei percorsi. Con il metodo di regressione lineare si interpolano i dati con una retta pressoché lineare, per cui si possono lasciare le impostazioni di default del programma.

Tabella 5.29 Provino PNDF, corso 12: valori di analisi ed elaborazioni dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note
PNDf_corso12	1	1	1	0.38	186	0.000186	2043.01075	Inizio curva martello strano.
PNDf_corso12	1	2	2	0.3821	172	0.000172	2221.51163	
PNDf_corso12	1	3	3	0.3883	166	0.000166	2339.15663	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_corso12	1	4	4	0.3985	188	0.000188	2119.68085	
PNDf_corso12	1	5	5	0.4123	176	0.000176	2342.61364	
PNDf_corso12	1	6	6	0.4294	188	0.000188	2284.04255	
PNDf_corso12	2	1	7	0.3821	174	0.000174	2195.97701	
PNDf_corso12	2	2	8	0.38	178	0.000178	2134.83146	
PNDf_corso12	2	3	9	0.3821	162	0.000162	2358.64198	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_corso12	2	4	10	0.3883	164	0.000164	2367.68293	
PNDf_corso12	2	5	11	0.3985	164	0.000164	2429.87805	
PNDf_corso12	2	6	12	0.4123	188	0.000188	2193.08511	
PNDf_corso12	2	7	13	0.4294	196	0.000196	2190.81633	
PNDf_corso12	3	1	14	0.3883	164	0.000164	2367.68293	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_corso12	3	2	15	0.3821	172	0.000172	2221.51163	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_corso12	3	3	16	0.38	158	0.000158	2405.06329	Posizione martello su giunto di malta. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_corso12	3	4	17	0.3821	174	0.000174	2195.97701	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_corso12	3	5	18	0.3883	180	0.00018	2157.22222	Posizione martello su giunto di malta.

PNDf_ corso12	3	6	19	0.3985	218	0.000218	1827.98165	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	3	8	20	0.4294	254	0.000254	1690.55118	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	4	1	21	0.3985	190	0.00019	2097.36842	
PNDf_ corso12	4	2	22	0.3883	192	0.000192	2022.39583	
PNDf_ corso12	4	3	23	0.3821	166	0.000166	2301.80723	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso12	4	4	24	0.38	168	0.000168	2261.90476	
PNDf_ corso12	4	5	25	0.3821	168	0.000168	2274.40476	
PNDf_ corso12	4	6	26	0.3883	186	0.000186	2087.63441	
PNDf_ corso12	4	9	27	0.4294	190	0.00019	2260	
PNDf_ corso12	5	1	28	0.4123	206	0.000206	2001.45631	
PNDf_ corso12	5	2	29	0.3985	200	0.0002	1992.5	
PNDf_ corso12	5	3	30	0.3883	178	0.000178	2181.46067	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso12	5	4	31	0.3821	164	0.000164	2329.87805	
PNDf_ corso12	5	5	32	0.38	164	0.000164	2317.07317	
PNDf_ corso12	5	6	33	0.3821	166	0.000166	2301.80723	
PNDf_ corso12	5	7	34	0.3883	176	0.000176	2206.25	
PNDf_ corso12	5	10	35	0.4294	190	0.00019	2260	Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	1	36	0.4294	210	0.00021	2044.7619	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	2	37	0.4123	212	0.000212	1944.81132	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	3	38	0.3985	188	0.000188	2119.68085	Posizione martello vicino bordo mattone. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso12	6	4	39	0.3883	168	0.000168	2311.30952	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	5	40	0.3821	196	0.000196	1949.4898	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	6	41	0.38	166	0.000166	2289.15663	Posizione martello vicino bordo mattone.

PNDf_ corso12	6	8	42	0.3883	180	0.00018	2157.22222	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	6	11	43	0.4294	204	0.000204	2104.90196	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	7	2	44	0.4294	204	0.000204	2104.90196	
PNDf_ corso12	7	5	45	0.3883	164	0.000164	2367.68293	
PNDf_ corso12	7	7	46	0.38	168	0.000168	2261.90476	
PNDf_ corso12	7	9	47	0.3883	166	0.000166	2339.15663	
PNDf_ corso12	7	12	48	0.4294	204	0.000204	2104.90196	
PNDf_ corso12	8	3	49	0.4294	172	0.000172	2496.51163	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso12	8	6	50	0.3883	160	0.00016	2426.875	
PNDf_ corso12	8	8	51	0.38	156	0.000156	2435.89744	
PNDf_ corso12	8	10	52	0.3883	162	0.000162	2396.91358	Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	8	13	53	0.4294	180	0.00018	2385.55556	
PNDf_ corso12	9	4	54	0.4294	190	0.00019	2260	
PNDf_ corso12	9	7	55	0.3883	168	0.000168	2311.30952	
PNDf_ corso12	9	9	56	0.38	172	0.000172	2209.30233	
PNDf_ corso12	9	11	57	0.3883	170	0.00017	2284.11765	
PNDf_ corso12	9	14	58	0.4294	192	0.000192	2236.45833	
PNDf_ corso12	10	5	59	0.4294	208	0.000208	2064.42308	Posizione martello su bordo mattone.
PNDf_ corso12	10	8	60	0.3883	178	0.000178	2181.46067	Posizione martello su bordo mattone.
PNDf_ corso12	10	10	61	0.38	184	0.000184	2065.21739	Posizione martello su bordo mattone. Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	10	12	62	0.3883	170	0.00017	2284.11765	Posizione martello su bordo mattone.
PNDf_ corso12	10	15	63	0.4294	202	0.000202	2125.74257	Posizione martello su bordo mattone.
PNDf_ corso12	11	6	64	0.4294	198	0.000198	2168.68687	

PNDf_ corso12	11	9	65	0.3883	182	0.000182	2133.51648	
PNDf_ corso12	11	11	66	0.38	170	0.00017	2235.29412	
PNDf_ corso12	11	13	67	0.3883	176	0.000176	2206.25	
PNDf_ corso12	11	16	68	0.4294	196	0.000196	2190.81633	
PNDf_ corso12	12	7	69	0.4294	218	0.000218	1969.72477	
PNDf_ corso12	12	10	70	0.3883	168	0.000168	2311.30952	Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	12	12	71	0.38	170	0.00017	2235.29412	
PNDf_ corso12	12	14	72	0.3883	182	0.000182	2133.51648	
PNDf_ corso12	12	17	73	0.4294	200	0.0002	2147	
PNDf_ corso12	13	8	74	0.4294	208	0.000208	2064.42308	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	13	11	75	0.3883	178	0.000178	2181.46067	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	13	13	76	0.38	218	0.000218	1743.11927	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	13	15	77	0.3883	180	0.00018	2157.22222	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	13	18	78	0.4294	190	0.00019	2260	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	14	9	79	0.4294	198	0.000198	2168.68687	
PNDf_ corso12	14	12	80	0.3883	180	0.00018	2157.22222	
PNDf_ corso12	14	14	81	0.38	176	0.000176	2159.09091	
PNDf_ corso12	14	16	82	0.3883	166	0.000166	2339.15663	
PNDf_ corso12	14	19	83	0.4294	176	0.000176	2439.77273	
PNDf_ corso12	15	10	84	0.4294	196	0.000196	2190.81633	Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	15	13	85	0.3883	170	0.00017	2284.11765	
PNDf_ corso12	15	15	86	0.38	162	0.000162	2345.67901	
PNDf_ corso12	15	17	87	0.3883	166	0.000166	2339.15663	
PNDf_ corso12	15	20	88	0.4294	174	0.000174	2467.81609	

PNDf_ corso12	16	11	89	0.4294	206	0.000206	2084.46602	Posizione martello su bordo mattonne.
PNDf_ corso12	16	14	90	0.3883	178	0.000178	2181.46067	Posizione martello su bordo mattonne.
PNDf_ corso12	16	16	91	0.38	160	0.00016	2375	Posizione martello su bordo mattonne.
PNDf_ corso12	16	18	92	0.3883	164	0.000164	2367.68293	Posizione martello su bordo mattonne.
PNDf_ corso12	16	21	93	0.4294	178	0.000178	2412.35955	Posizione martello su bordo mattonne.
PNDf_ corso12	17	12	94	0.4294	200	0.0002	2147	
PNDf_ corso12	17	15	95	0.3883	158	0.000158	2457.59494	
PNDf_ corso12	17	17	96	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso12	17	19	97	0.3883	156	0.000156	2489.10256	
PNDf_ corso12	17	22	98	0.4294	176	0.000176	2439.77273	
PNDf_ corso12	18	13	99	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso12	18	16	100	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	18	18	101	0.38	154	0.000154	2467.53247	
PNDf_ corso12	18	20	102	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	18	23	103	0.4294	186	0.000186	2308.60215	
PNDf_ corso12	19	14	104	0.4294	176	0.000176	2439.77273	Posizione martello vicino al bordo mattonne.
PNDf_ corso12	19	17	105	0.3883	154	0.000154	2521.42857	Posizione martello vicino al bordo mattonne.
PNDf_ corso12	19	19	106	0.38	144	0.000144	2638.88889	Posizione martello vicino al bordo mattonne.
PNDf_ corso12	19	21	107	0.3883	152	0.000152	2554.60526	Posizione martello vicino al bordo mattonne.
PNDf_ corso12	19	24	108	0.4294	174	0.000174	2467.81609	Posizione martello vicino al bordo mattonne.
PNDf_ corso12	20	15	109	0.4294	176	0.000176	2439.77273	
PNDf_ corso12	20	18	110	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	20	20	111	0.38	150	0.00015	2533.33333	
PNDf_ corso12	20	22	112	0.3883	150	0.00015	2588.66667	

PNDf_ corso12	20	25	113	0.4294	174	0.000174	2467.81609	
PNDf_ corso12	21	16	114	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso12	21	19	115	0.3883	168	0.000168	2311.30952	
PNDf_ corso12	21	21	116	0.38	146	0.000146	2602.73973	
PNDf_ corso12	21	23	117	0.3883	148	0.000148	2623.64865	
PNDf_ corso12	21	26	118	0.4294	168	0.000168	2555.95238	
PNDf_ corso12	22	17	119	0.4294	198	0.000198	2168.68687	
PNDf_ corso12	22	20	120	0.3883	154	0.000154	2521.42857	
PNDf_ corso12	22	22	121	0.38	146	0.000146	2602.73973	
PNDf_ corso12	22	24	122	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	22	27	123	0.4294	186	0.000186	2308.60215	
PNDf_ corso12	23	18	124	0.4294	174	0.000174	2467.81609	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	21	125	0.3883	152	0.000152	2554.60526	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	23	126	0.38	158	0.000158	2405.06329	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	24	127	0.3821	162	0.000162	2358.64198	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	25	128	0.3883	164	0.000164	2367.68293	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	26	129	0.3985	164	0.000164	2429.87805	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	27	130	0.4123	182	0.000182	2265.38462	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	23	28	131	0.4294	214	0.000214	2006.54206	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	24	19	132	0.4294	172	0.000172	2496.51163	
PNDf_ corso12	24	22	133	0.3883	162	0.000162	2396.91358	
PNDf_ corso12	24	23	134	0.3821	150	0.00015	2547.33333	
PNDf_ corso12	24	24	135	0.38	156	0.000156	2435.89744	
PNDf_ corso12	24	25	136	0.3821	168	0.000168	2274.40476	

PNDf_ corso12	24	26	137	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	24	27	138	0.3985	166	0.000166	2400.60241	
PNDf_ corso12	24	28	139	0.4123	170	0.00017	2425.29412	
PNDf_ corso12	25	20	140	0.4294	176	0.000176	2439.77273	
PNDf_ corso12	25	23	141	0.3883	152	0.000152	2554.60526	
PNDf_ corso12	25	24	142	0.3821	158	0.000158	2418.35443	
PNDf_ corso12	25	25	143	0.38	158	0.000158	2405.06329	
PNDf_ corso12	25	26	144	0.3821	164	0.000164	2329.87805	
PNDf_ corso12	25	27	145	0.3883	172	0.000172	2257.55814	
PNDf_ corso12	25	28	146	0.3985	164	0.000164	2429.87805	
PNDf_ corso12	26	21	147	0.4294	180	0.00018	2385.55556	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	23	148	0.3985	152	0.000152	2621.71053	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	24	149	0.3883	216	0.000216	1797.68519	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	25	150	0.3821	164	0.000164	2329.87805	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	26	151	0.38	178	0.000178	2134.83146	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	27	152	0.3821	178	0.000178	2146.62921	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	26	28	153	0.3883	216	0.000216	1797.68519	Posizione martello su giunto di malta.
PNDf_ corso12	27	22	154	0.4294	214	0.000214	2006.54206	
PNDf_ corso12	27	23	155	0.4123	160	0.00016	2576.875	
PNDf_ corso12	27	24	156	0.3985	174	0.000174	2290.22989	
PNDf_ corso12	27	25	157	0.3883	166	0.000166	2339.15663	
PNDf_ corso12	27	26	158	0.3821	172	0.000172	2221.51163	
PNDf_ corso12	27	27	159	0.38	156	0.000156	2435.89744	
PNDf_ corso12	27	28	160	0.3821	164	0.000164	2329.87805	

PNDf_ corso12	28	23	161	0.4294	198	0.000198	2168.68687
PNDf_ corso12	28	24	162	0.4123	176	0.000176	2342.61364
PNDf_ corso12	28	25	163	0.3985	164	0.000164	2429.87805
PNDf_ corso12	28	26	164	0.3883	154	0.000154	2521.42857
PNDf_ corso12	28	27	165	0.3821	160	0.00016	2388.125
PNDf_ corso12	28	28	166	0.38	156	0.000156	2435.89744

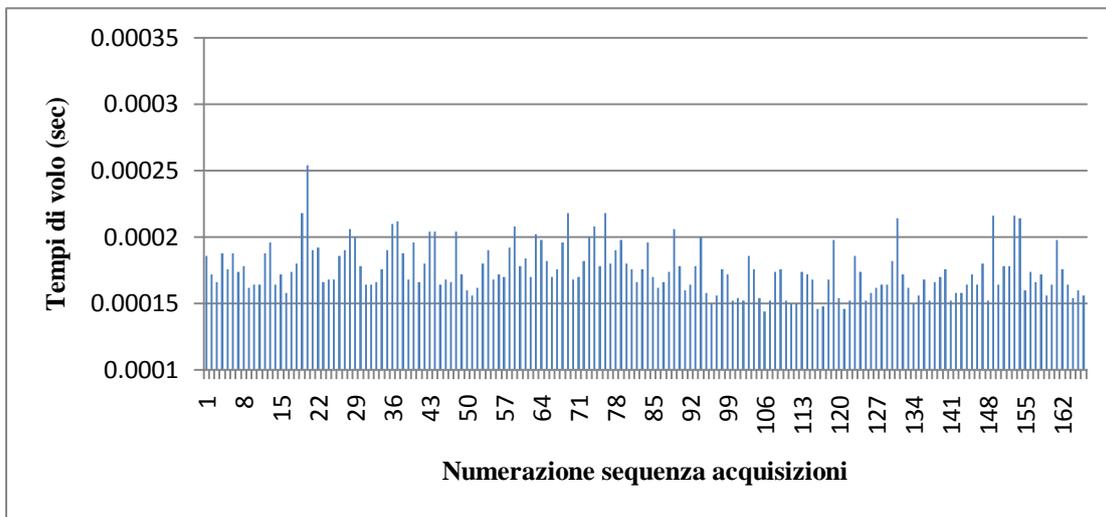


Figura 5.151 Muretto PNDF, corso 12, tempi di volo espressi in secondi

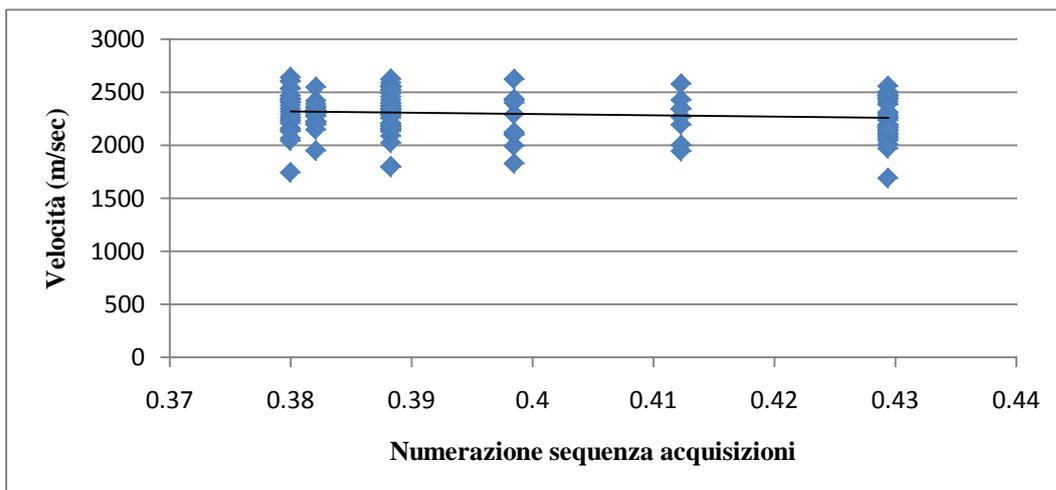


Figura 5.152 Muretto PNDF, corso 12, grafico delle velocità e delle lunghezze dei percorsi

Per quel che concerne il numero di pixel utilizzati nelle inversioni tomografiche, si è scelto di riportare solo le immagini prodotte da iterazioni tomografiche con griglie di 52x19 e 32x19 pixel. Nelle tabelle 5.30 e 5.31 sono riassunti i nomi dei file di input ed output prodotti. Le distribuzioni di velocità di alcuni di essi, tra i più significativi, si trovano illustrate nelle figure 5.153, 5.154, 5.155, 5.156, 5.157 e 5.158. Il file corso12f_106 e il file corso12f_107 si assomigliano già così tanto che continuare con le iterazioni non è più significativo. La sezione può essere suddivisa in due zone: quella più a sinistra di colore giallo-verde con velocità comprese tra i 1600 m/sec e i 2300 m/sec. La zona più a destra del corso mostra invece dei toni più arancioni a simboleggiare un aumento della velocità, anche se sono presenti piccole zone di color verde. La zona di sinistra, con le velocità più basse potrebbe rappresentare la zona a sacco più spessa e la striscia verde centrale lo spigolo tra questa e l'area a sacco meno spessa di sinistra. Successivamente sarà presentato il corso con sovrapposta la geometria dello stesso a identificare eventuali correlazioni o diversità. L'immagine ottenuta dal file corso12f_123 riporta una distinzione più netta tra le zone di colore verde-giallo e quelle di colore rosso-arancio. Il resto della mappa riporta qualche area di colore verde in posizione simile a quelle già viste nei file precedenti.

Tabella 5.30 Muretto PPDF, corso 12, parametri di inversione con una griglia di 52X19 pixel

Pixel: 52x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso12f_100	5	0	5	corso12f_101	Figura 5.153
corso12f_101	5	0	10	corso12f_102	
corso12f_102	5	0	15	corso12f_103	
corso12f_103	5	0	20	corso12f_104	
corso12f_104	5	0	25	corso12f_105	
corso12f_100	5	0	5	corso12f_101	
corso12f_101	0	5	10	corso12f_106	Figura 5.154
corso12f_106	0	5	15	corso12f_107	Figura 5.155
corso12f_107	0	5	20	corso12f_108	
corso12f_108	0	5	25	corso12f_109	

Tabella 5.31 Muretto PNDF, corso 7, parametri di inversione con una griglia di 32x19 pixel

Pixel: 32x19		Intervallo di velocità: 0,3 Km/s - 3 Km/s			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
corso12f_120	5	0	5	corso12f_121	Figura 5.156
corso12f_121	5	0	10	corso12f_122	
corso12f_122	5	0	15	corso12f_123	
corso12f_123	5	0	20	corso12f_124	
corso12f_124	5	0	25	corso12f_125	
corso12f_120	5	0	5	corso12f_121	
corso12f_121	0	5	10	corso12f_126	Figura 5.157
corso12f_126	0	5	15	corso12f_127	Figura 5.158
corso12f_127	0	5	20	corso12f_128	
corso12f_128	0	5	25	corso12f_129	

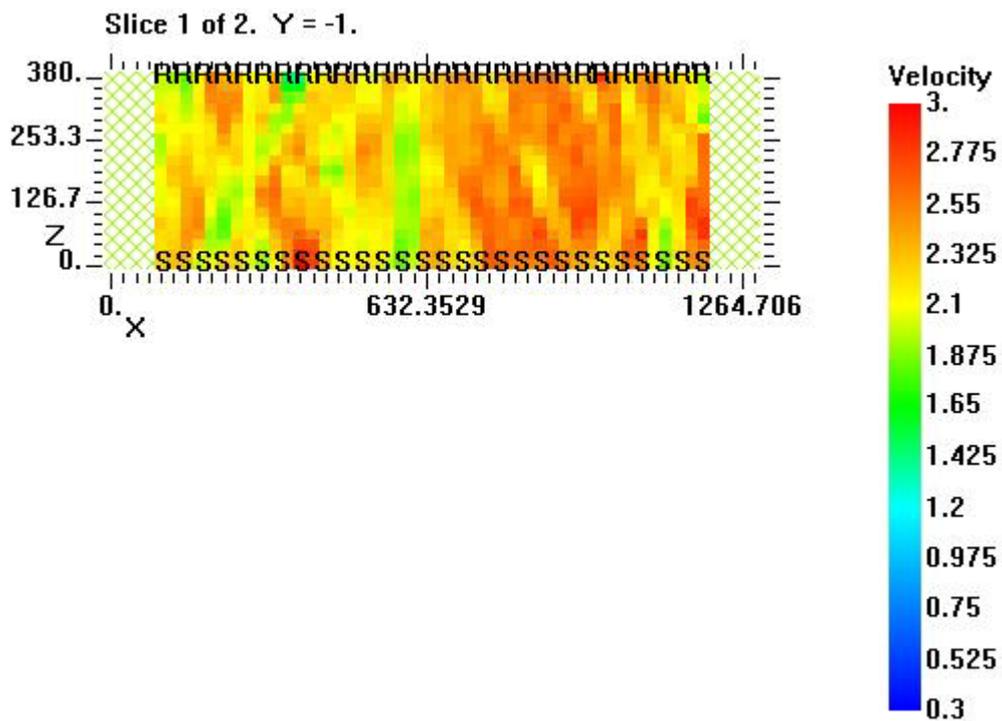


Figura 5.153 Muretto PNDF, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso12f_101

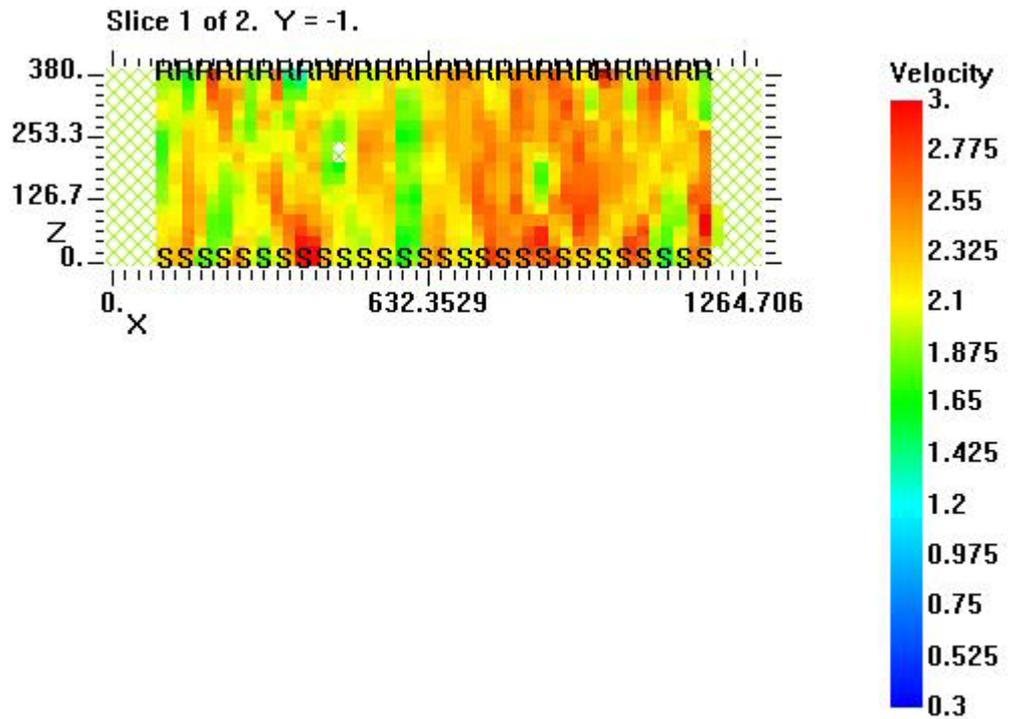


Figura 5.154 Muretto PNDF, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso12f_106

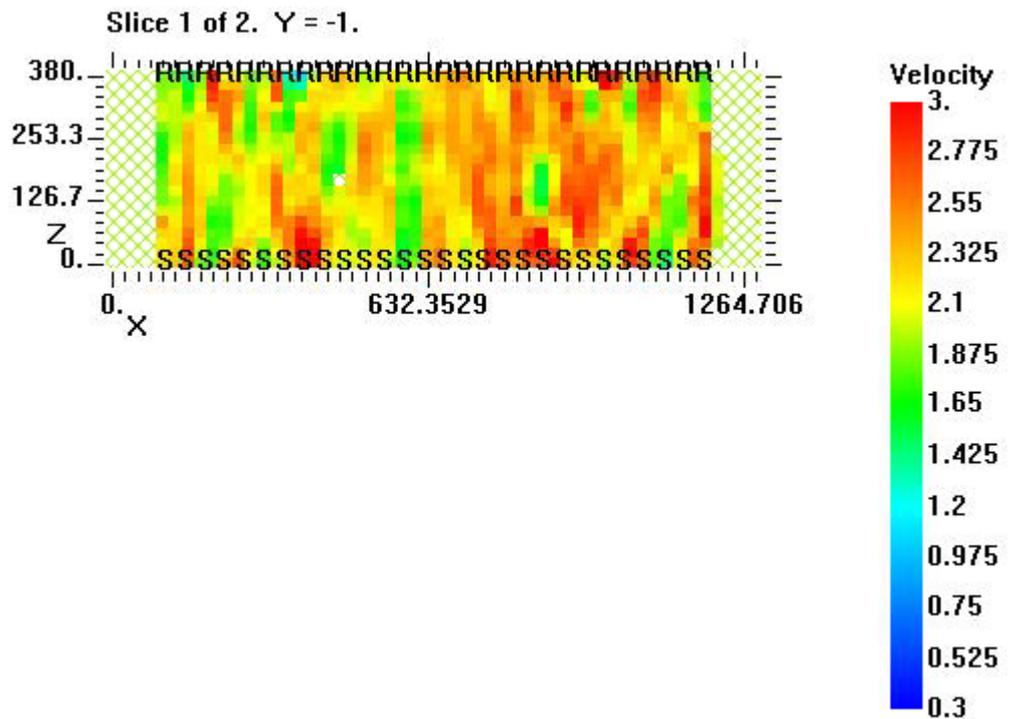


Figura 5.155 Muretto PNDF, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 52 x 19 pixel, file output corso12f_107

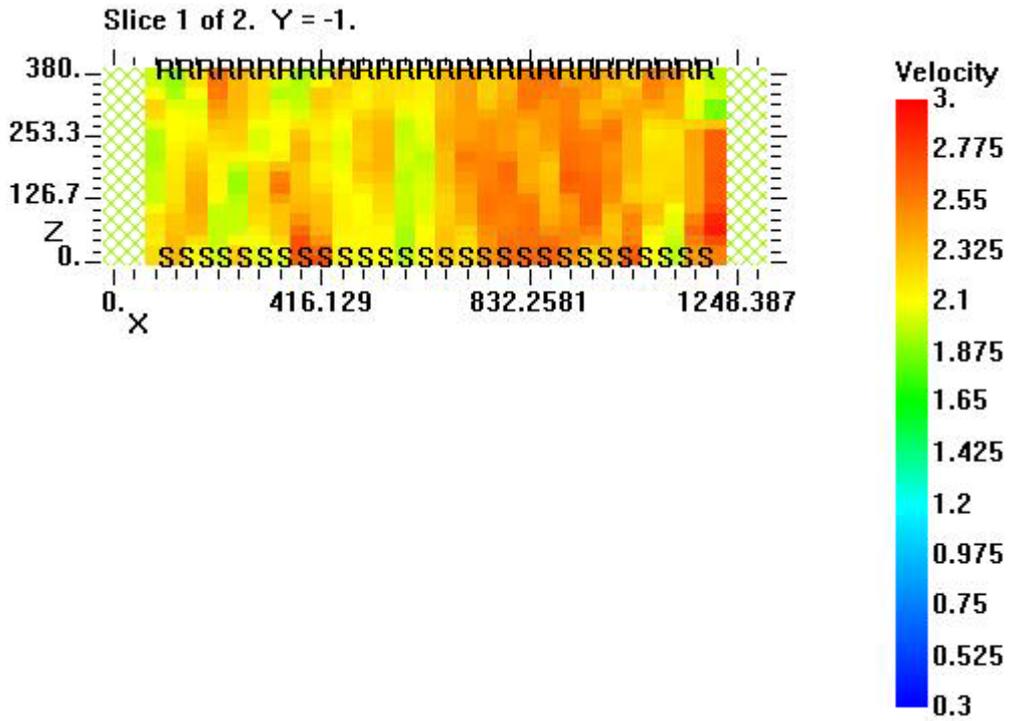


Figura 5.156 Muretto PNDF, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12f_121

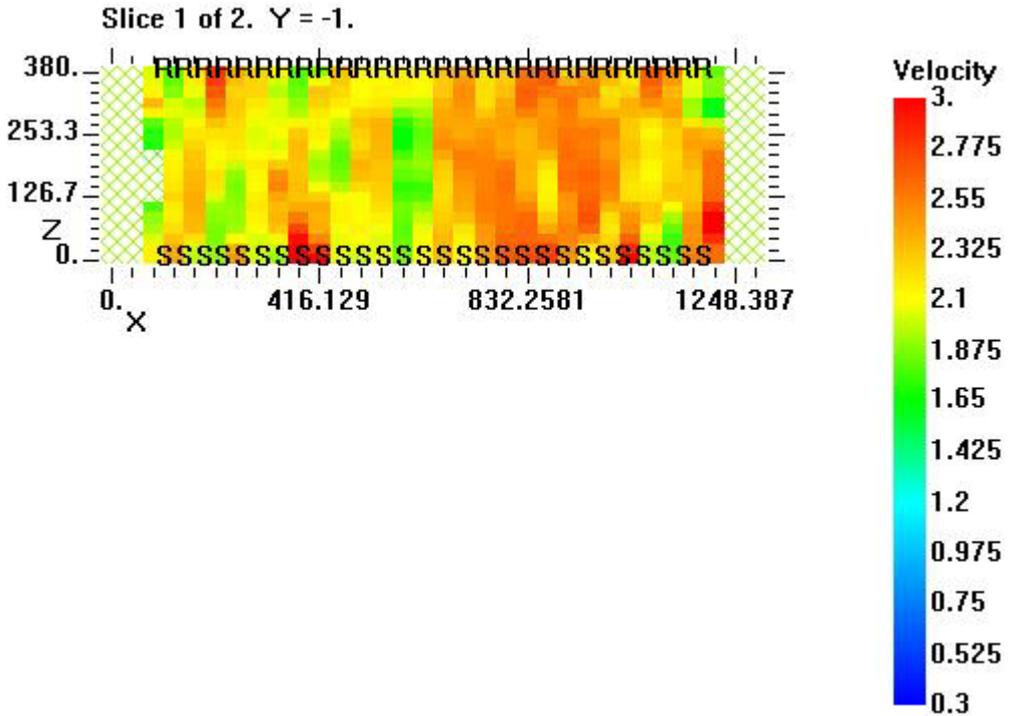


Figura 5.157 Muretto PNDF, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12f_126

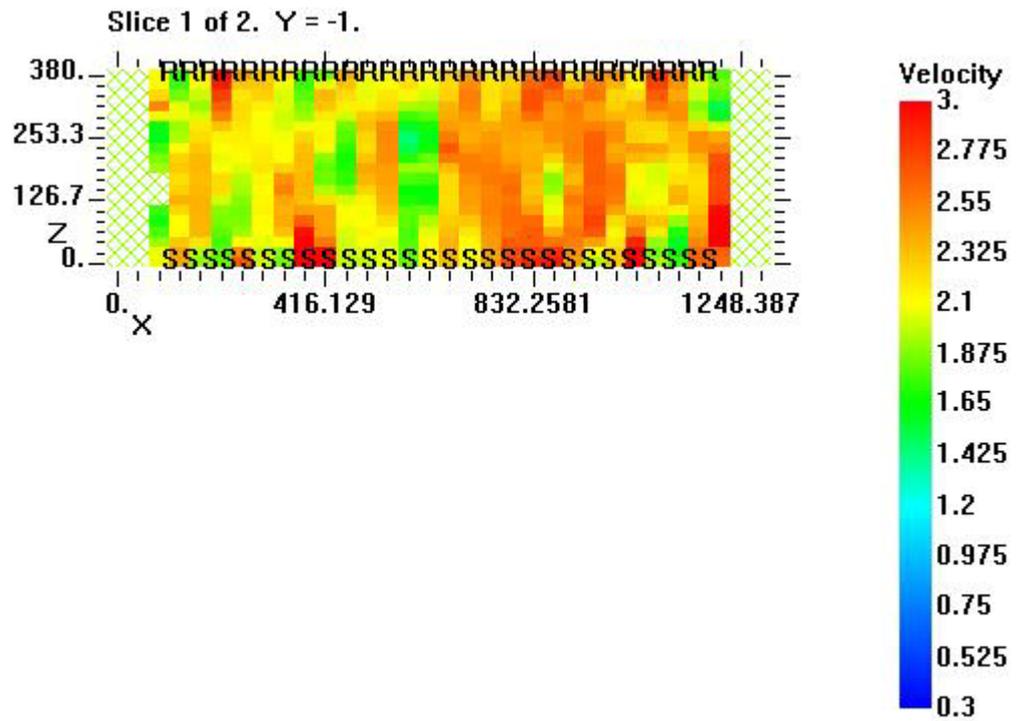


Figura 5.158 Muretto PNDf, corso 12, mappa delle velocità, 5 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 32 x 19 pixel, file output corso12f_127

I valori dei residui sono riportati nelle figure 5.159 e 5.160. Per la griglia di 52x19 pixel si inizia da un valore di 35 per scendere fino al di sotto di 10. Già dalla quinta iterazione si può approssimativamente fermarsi poiché non si sono ulteriori decrementi dei valori. Per la griglia di 32x19 si incomincia sempre da un valore attorno a 35 per scendere fino a 10 circa. Il valore dei residui finali è più alto rispetto al caso di 52x19, ciò può essere dovuto alle maggiori dimensioni dei pixel. L'andamento già dalla terza iterazione diventa lineare, tendendo asintoticamente a 9 circa. In questo caso ci si può fermare ancor prima con il numero di iterazioni.

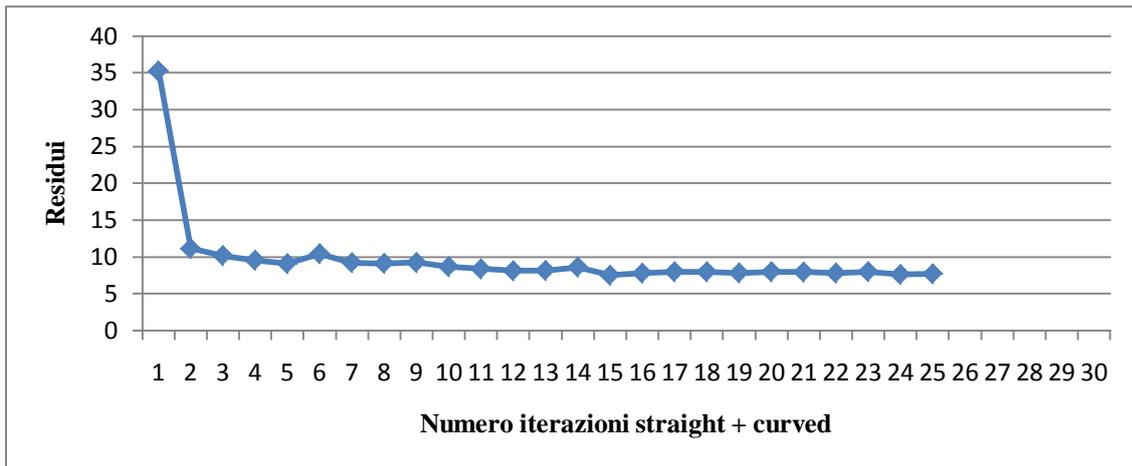


Figura 5.159 Muretto PNDF, corso 12, valori dei residui di 25 iterazioni straight+ curved per una griglia 52x19 pixel

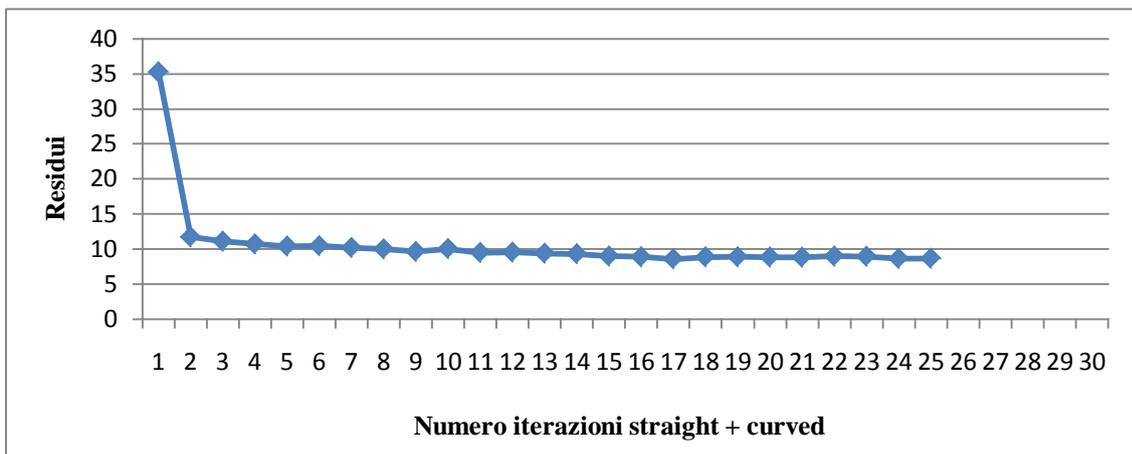


Figura 5.160 Muretto PNDF, corso 12, valori dei residui di 25 iterazioni straight+ curved per una griglia 32x19 pixel

5.4 Confronti e osservazioni critiche

In questo capitolo verranno analizzati i singoli corsi messi a confronto con la geometria degli stessi e verranno fatti dei confronti tra i vari risultati ottenuti per le varie sezioni orizzontali. Iniziando dal corso 6 del muretto PNDE si riporta in figura 5.162 la migliore immagine tomografica realizzata sovrapposta alla geometria dello stesso per poter valutare meglio la connessione tra le zone a bassa velocità e i reali difetti.

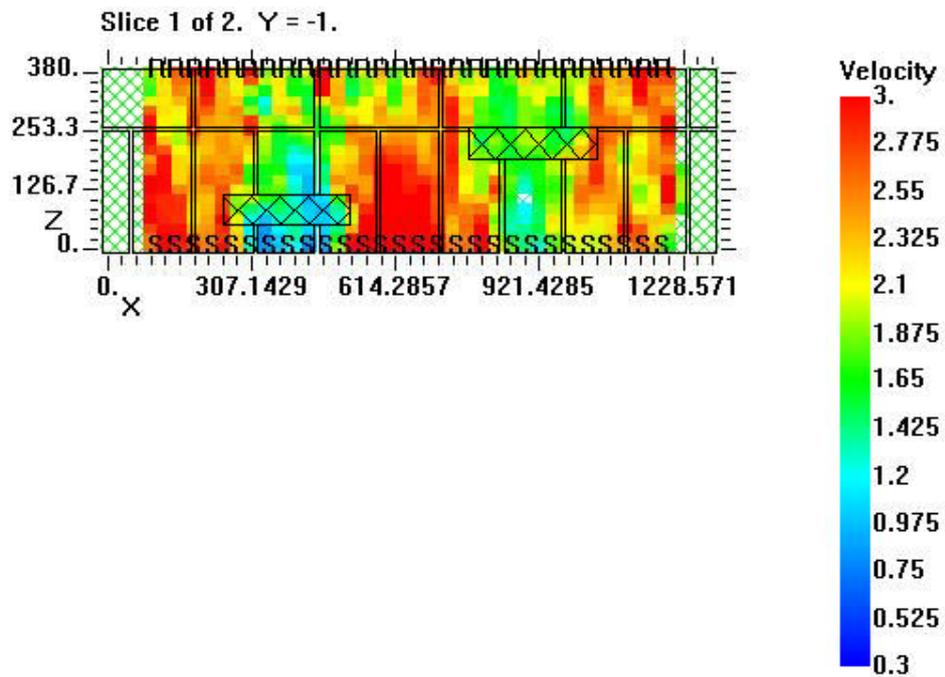


Figura 5.161 Muretto PNDE, corso 6, mappa delle velocità del file output corso6_144 con sovrapposizione della geometria

La figura 5.161 mette in evidenza le corrispondenze tra le zone con colori blu-verdi a bassa velocità e i difetti noti. Per il primo difetto di sinistra, la posizione e la forma vengono identificate in maniera abbastanza precisa. La zona di colore blu più scuro appare più superficiale rispetto alla reale posizione del difetto. Il difetto più a destra è riprodotto da un'area a velocità più alta rispetto all'altro difetto, senza darne una definizione in maniera chiara delle reali dimensioni. La differenza nei valori di velocità riscontrabile anche nell'istogramma delle velocità stesse, è dovuta alla diversa posizione degli stessi rispetto al lato di battuta del martello strumentato. Il segnale se incontra subito un'anomalia, rallenta il suo cammino poiché viene deviato subito, raggiungendo così la stazione ricevente con un tempo di volo maggiore. Al contrario se incontra il difetto più avanti lungo il suo percorso, la deviazione è minore e la velocità finale più alta.

Considerando il corso 11 del muretto PNDE, anche per esso è considerata la migliore immagine tomografica sovrapposta alla geometria della sezione (figura 5.162).

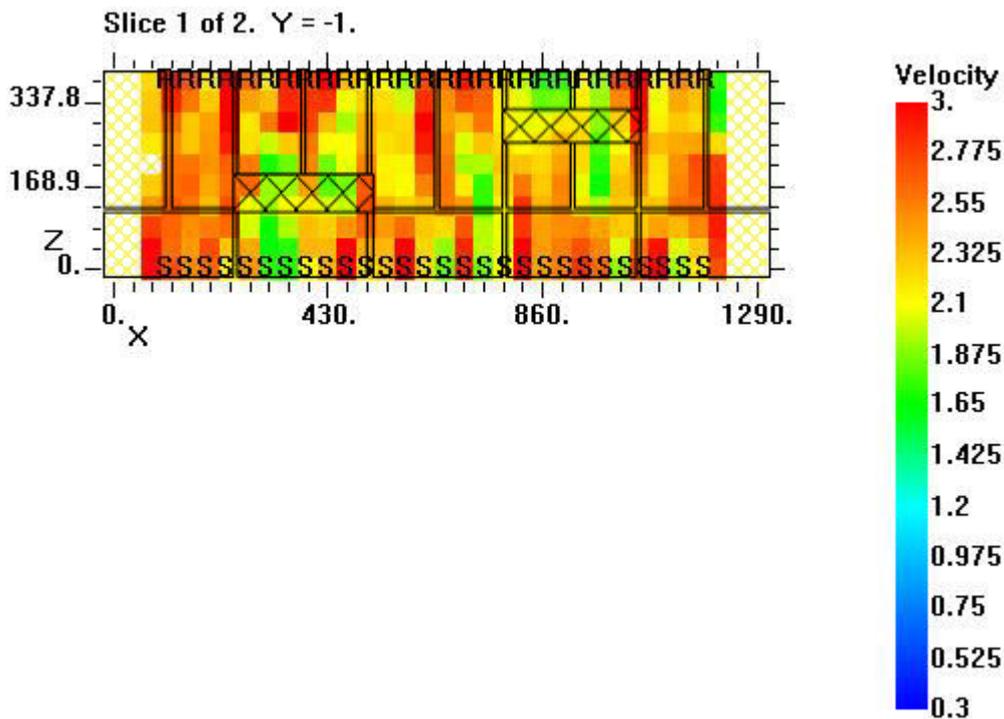


Figura 5.162 Muretto PNDE, corso 11, mappa delle velocità del file output corso11_117 con sovrapposizione della geometria

La figura 5.162 mostra una corrispondenza tra zone con velocità basse (color giallo) e i difetti, esse non hanno una delimitazione simile alle dimensioni e alla forma del difetto. Non essendoci poi velocità al di sotto di certi valori, non si hanno zone in colore blu. Ciò è dovuto al fatto che il difetto è alto solo due corsi e stiamo effettuando le misure su uno dei due corsi, quindi l'allungamento del percorso è minimo. È inoltre da tenere in considerazione la disposizione dei mattoni all'interno del corso, si ha fila di mattoni di lista, dietro alla quale è posizionato il difetto più a sinistra e da una fila di mattoni di testa. La velocità media pari a 2432 m/s, più alta di quella del corso 6 del muretto PNDE. La disposizione dei laterizi nel corso 12 dello stesso muretto è invertita con una prima di mattoni di testa e una di lista. Si presenta in figura 5.163 l'immagini tomografica con la sovrapposizione della geometria.

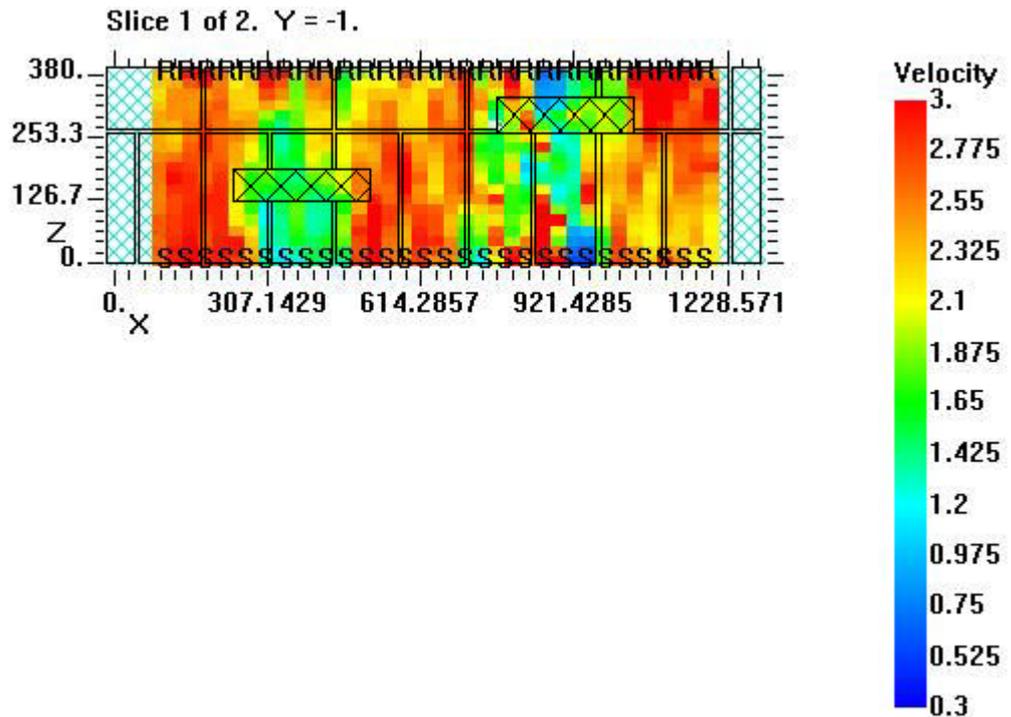


Figura 5.163 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità del file output corso12_117 con sovrapposizione della geometria

A differenza di quanto visto per il corso 11 dello stesso muretto, per questa sezione i difetti sono visualizzati in maniera più chiara nonostante abbiano le stesse caratteristiche dimensionali e di posizione del corso 11. Guardando la sovrapposizione della geometria sulla mappa delle velocità, si nota un riscontro tra le aree giallo-verdi con la presenza del difetto, ma non vi è precisione nell'individuazione della posizione e della dimensione. Si osserva in maniera critica che cambiando la geometria dispositiva dei mattoni all'interno della sezione, difetti con stesse caratteristiche sono rilevati in maniera differente. La velocità media del corso 12 è pari a 2373 M/sec, valore simile a quello del corso 6, e più basso di circa 0,5% rispetto al corso 6 come poi mostrato anche dalla mappa delle velocità.

Il corso 17 presenta difetti di dimensioni minore rispetto a quella degli altri corsi. L'immagine tomografica con sovrapposizione geometrica è presentata in figura 5.164.

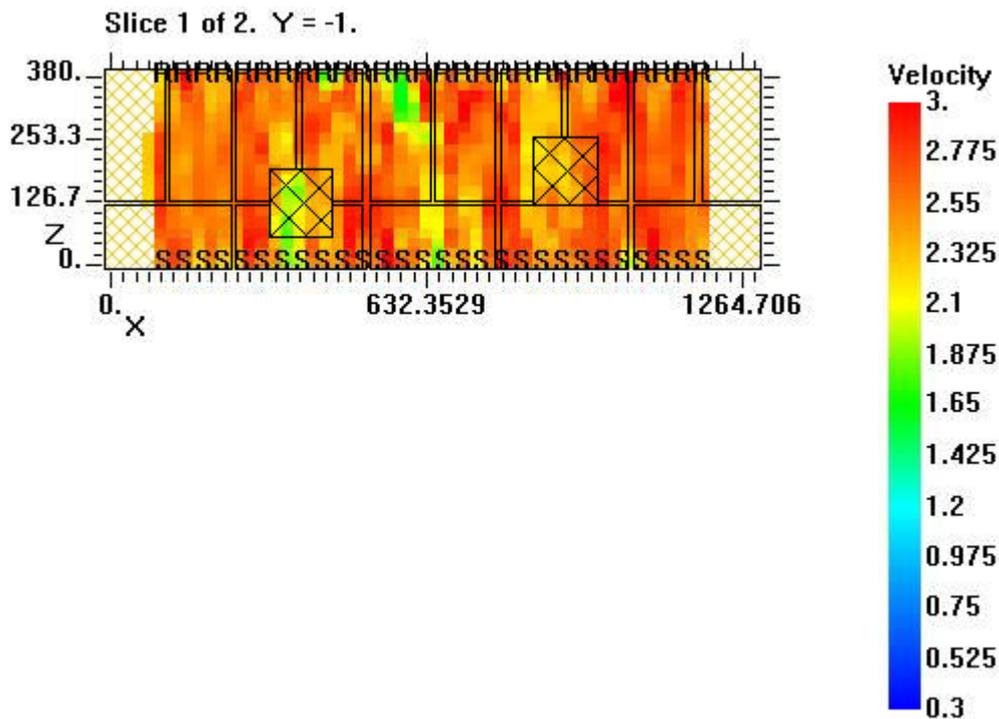


Figura 5.164 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità del file output corso17_107 con sovrapposizione della geometria

Per capire meglio l'analogia tra le zone a bassa velocità e la presenza delle anomalie, si è sovrapposta la geometria del corso alla mappa tomografica. L'immagine risultante evidenzia che i difetti non sono visualizzati nella loro interezza. Nel dettaglio il primo difetto è rilevato approssimativamente dall'area di colore verde più a sinistra. La posizione è centrata, ma le dimensioni sono più piccole rispetto a quelle del difetto reale. Un'altra area di colore verde è presente nella zona centrale del corso, ma essa non coincide neppure con un giunto di malta. Il difetto a destra, vista la distanza dal fronte (12 cm) e viste le dimensioni, è solo approssimativamente rilevato da una fascia di colore arancione chiaro. Anche in questo caso la disposizione geometrica dei mattoni probabilmente incide, oltre agli altri fattori dimensionali del difetto, nella difficile individuazione dello stesso. La velocità media del corso pari a 2589 m/sec, appare più alta di tutti gli altri corsi finora analizzati del muretto PNDE, ma giustificata dalle piccole dimensioni del difetto.

Si analizza ora il muretto PNDF e i suoi tre corsi orizzontali. L'immagine tomografica per il corso 5 sovrapposta alla geometria del corso è raffigurata in figura 5.165.

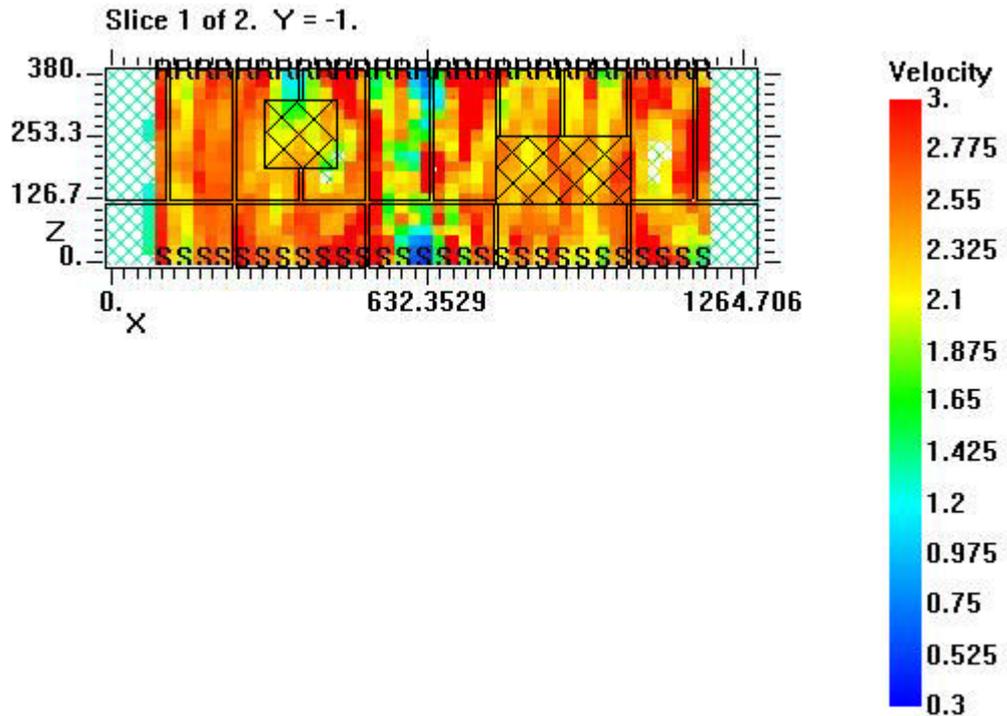


Figura 5.165 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità del file output del corso5_107 con sovrapposizione della geometria

La mappa tomografica non mette in evidenza in maniera chiara i difetti. Il primo difetto a sinistra, nonostante le ridotte dimensioni, essendo più vicino al lato del retro viene rappresentato dalla zona di colore blu in alto a sinistra. Ovviamente quest' area non coincide in maniera perfetta con la posizione e le dimensioni del difetto reale, mentre il secondo difetto di destra non viene rappresentato. La striscia centrale di colore blu può essere assimilata al giunto che si trova vicino, ma ciò è di dubbia certezza. La velocità media del corso 5 del muretto PNDE è pari a 2513 m/sec, un valore simile a quello del corso 7 del muretto PNDF che ha caratteristiche geometriche affini. Il corso 7 del muretto PNDF non presenta anomalie note, si riporta per dettaglio l'immagine tomografica con la sovrapposizione della geometria (figura 5.167). La distribuzione delle velocità identifica un valore medio al di sopra dei 2400 m/sec; le varie striature tra il colore rosso e l'arancione, come era prevedibile non identificano la presenza dei giunti di malta. La velocità media ricavata dai dati è di 2596 m/sec, valore superiore rispetto a tutti quelli degli altri corsi.

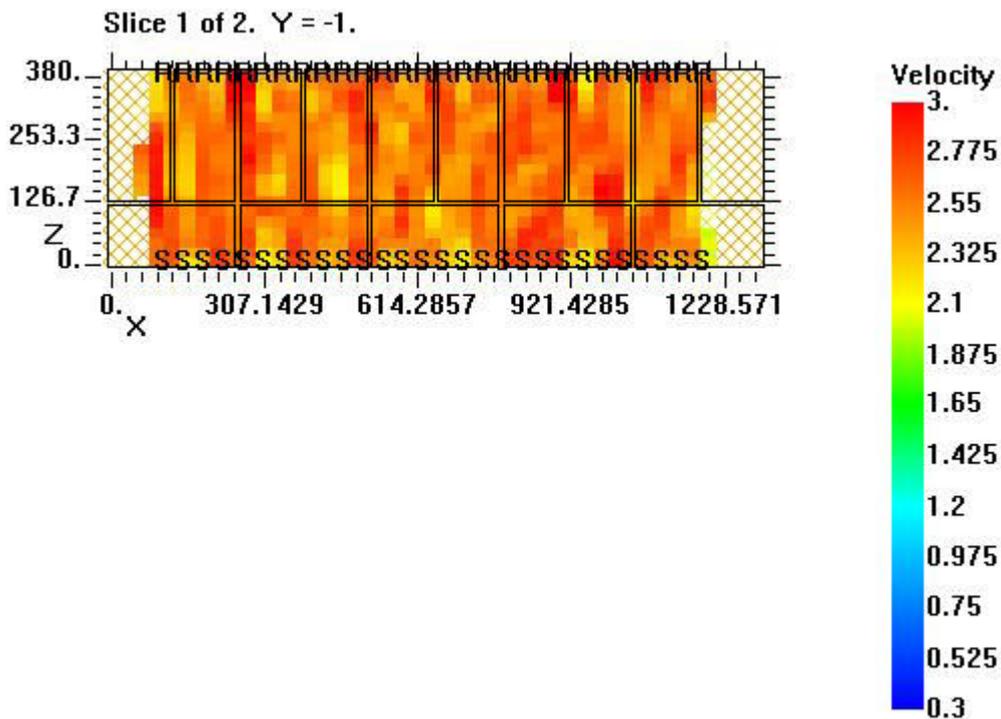


Figura 5.166 Muretto PNDF, corso 7, mappa delle velocità del file output del corso7_117 con sovrapposizione della geometria

Il corso 7 del muretto PNDF è da confrontare con il corso 12 dello stesso provino per osservare le qualità della tecnica tomografica nell'evidenziare diverse tessiture murarie. Anche per questo caso la geometria del corso viene fatta coincidere con un'immagine tomografica relativa (figura 5.167). La zona di colore giallo con qualche chiazza verde coincide con la parte di muratura a sacco più spessa; la striscia centrale di colore verde si identifica nello spigolo della stessa. Dove la muratura a sacco è più sottile, il colore della mappa tende all'arancione, ovvero si ha un incremento di velocità. Nell'istogramma delle velocità dall'acquisizione 90 circa in poi si nota infatti un innalzamento dei valori di velocità. Il valore di 2295 m/sec rappresenta la velocità media, ottenuta da tutti i percorsi che ricoprono la sezione; esso è nettamente inferiore rispetto a quello del corso 7 del muretto PNDF. La muratura a sacco attenua di più il segnale rispetto ad una muratura standard di laterizio.

Con queste prove termina il lavoro realizzato per i corsi orizzontali. I limiti della tecnica tomografica si riscontrano nell'impossibilità di rilevare anomalie di dimensioni inferiori alla sua lunghezza d'onda e posizionate in particolari

posizioni di una sezione. Sembra che a limitare l'efficienza della tecnica tomografica sia anche la disposizione dei mattoni nella sezione su cui si lavora.

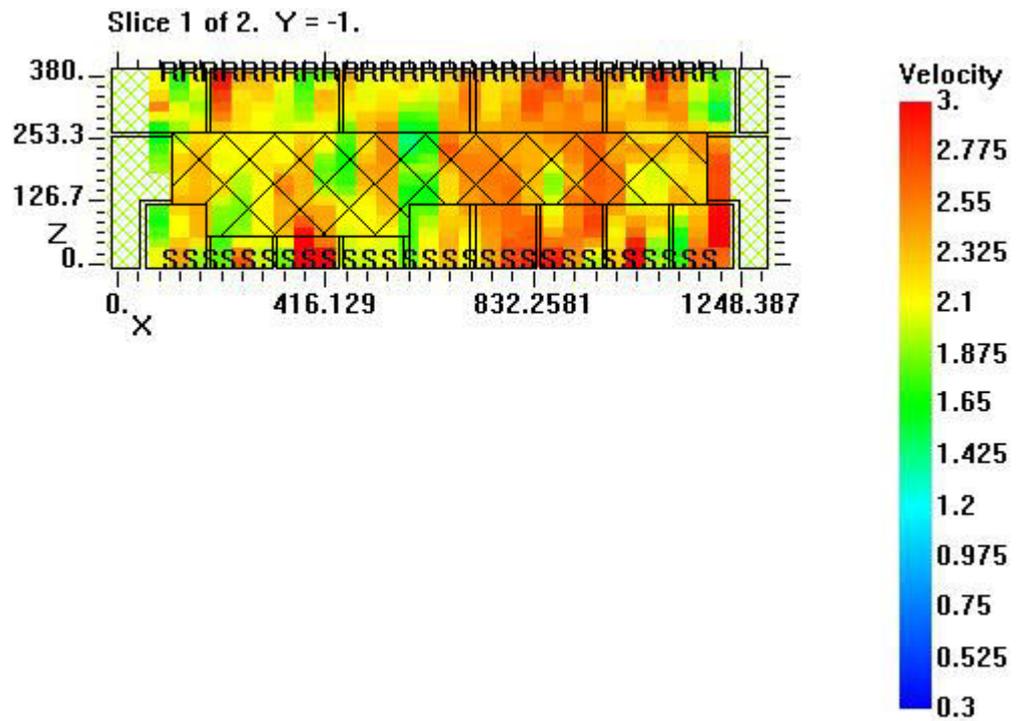


Figura 5.167 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità del file output del corso12f_127 con sovrapposizione della geometria

Capitolo 6

Tomografia sonora: analisi dei dati e visualizzazione delle sezioni verticali

La tomografia è stata eseguita anche lungo piani verticali dei provini (già definite nel capitolo 4) passanti per la mezzeria dei difetti inseriti nei corsi orizzontali dei muretti PNDE e PNDF. Poiché queste posizioni di prova, in entrambi i provini, nel lato retro del muretto cadono in corrispondenza di diversi giunti di malta verticali, i piani di sezione corrispondenti sono stati spostati rispetto al centro dei difetti, di due centimetri verso sinistra nel retro del muretto e di due centimetri verso destra nel fronte del muretto. In questo modo sia le stazioni sorgenti che le stazioni riceventi si trovano su mattone. Le acquisizioni lungo le sezioni verticali hanno richiesto maggior tempo, in quanto il numero di stazioni è maggiore rispetto a quelle orizzontali. Le stazioni sono numerate iniziano dal corso 2 fino al corso 19; per ogni corso si prendono due stazioni a distanza di 3 cm tra loro ovvero a distanza 1,5 cm dal centro dell'altezza del mattone del corso. Ne risulta che le stazioni che non si trovano sullo stesso mattone di un corso distinto tra loro di 3,5 cm, ma considerando che i giunti di malta non sono tutti regolari e di spessore pari a 1 cm, la lontananza delle stazioni di misura può aumentare o diminuire rispetto a 3,5 cm. Per quanto riguarda i parametri considerati durante le inversioni nel Geotom, si considerano griglie di pixel di diverse dimensioni (tabella 6.1).

Tabella 6.1 Numero e dimensione dei pixel considerati nello studio delle sezioni verticali

Numero dei pixel	Dimensione dei pixel
19 x 52	2 cm x 2,5 cm
19 x 33	2 cm x 4 cm
9 x 31	4,2 cm x 4,2 cm
11 x 38	3,4 cm x 3,4 cm

In tabella 6.1 il primo valore indica il numero di pixel lungo lo spessore, mentre il secondo la suddivisione in pixel del lato verticale; analogamente per quanto riguarda la dimensione dei pixel. La scelta è stata effettuata sulla base delle dimensioni già considerate per i corsi orizzontali con l'aggiunta della griglia 11x38, in cui le misure dei lati dei pixel sono confrontabili con la distanza che intercorre tra le stazioni di misura. Per quanto riguarda il numero di iterazioni, visti i buoni risultati ottenuti nel capitolo 5, si inizia con 3 iterazioni straight per poi proseguire con altre straight o curved fino ad un valore massimo di circa 20 iterazioni. Il procedimento seguito per ciascun corso è riassunto in tabella 6.2.

Tabella 6.2 Sezioni verticali, casi studiati al variare del numero di iterazioni e delle dimensioni dei pixel

Sezione, Muretto	Numero dei pixel	Numero iterazioni	Figure
Sezione A-A', PNDE	19x52	23 straight	6.10-6.14
Sezione A-A', PNDE	19x52	3 straight + 20 curved	6.16-6.19
Sezione A-A', PNDE	19x33	3 straight + 20 curved	6.21-6.25
Sezione A-A', PNDE	9x31	3 straight + 20 curved	6.27-6.31
Sezione A-A', PNDE	11x38	3 straight + 20 curved	6.33-6.37
Sezione B-B', PNDE	19x52	23 straight	6.46-6.50
Sezione B-B', PNDE	19x52	3 straight + 20 curved	6.52-6.55
Sezione B-B', PNDE	19x33	3 straight + 20 curved	6.57-6.61
Sezione B-B', PNDE	9x31	3 straight + 20 curved	6.63-6.67
Sezione B-B', PNDE	11x38	3 straight + 20 curved	6.69-6.73
Sezione A-A', PNDF	19X52	3 straight + 20 curved	6.81-6.85
Sezione A-A', PNDF	11x38	3 straight + 20 curved	6.87-6.91
Sezione B-B', PNDF	19X52	3 straight + 20 curved	6.97-6.101
Sezione B-B', PNDF	11X38	3 straight + 20 curved	6.103-6.107

6.1 Muretto PNDE

Il provino PNDE è formato da 20 corsi, con la presenza di difetti in 6 corsi. Nel prospetto del provino (figura 6.1), le linee rosse indicano le sezioni A-A' e B-B',

mentre le linee blu indicano le posizioni dove sono state eseguite le acquisizioni. In figura 6.2 è rappresentata la geometria delle sezioni A-A' e B-B'.

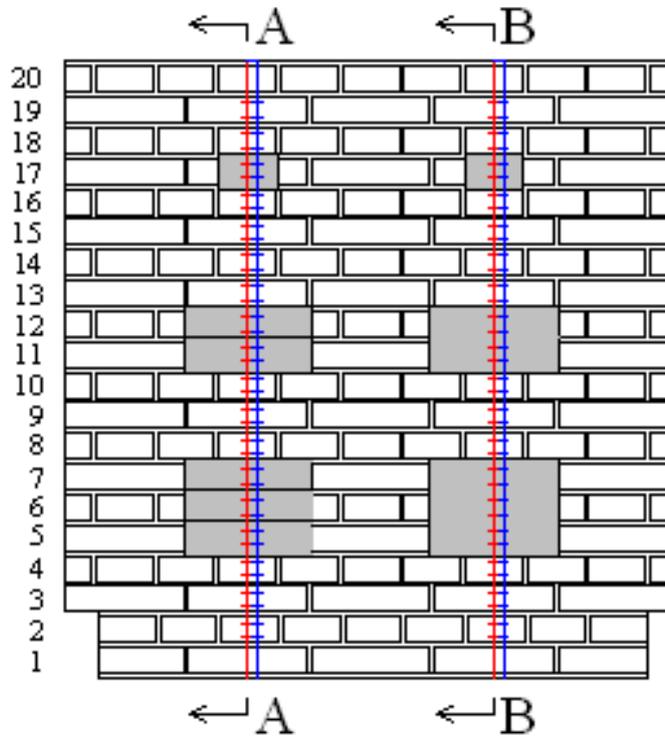
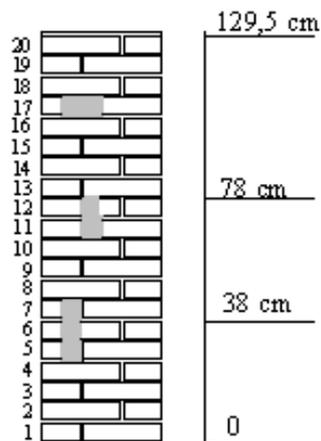


Figura 6.1. Muretto PNDE, prospetto

Sezione A-A'



Sezione B-B'

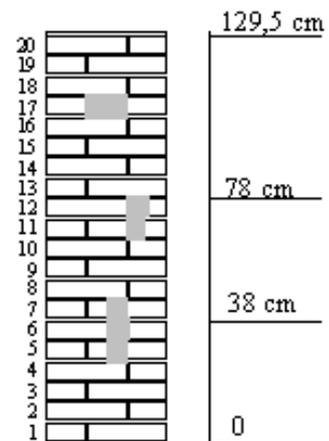


Figura 6.2 Muretto PNDE, sezioni A-A' e B-B'

6.1.1. SEZIONE A-A': confronto tra griglia di 19x52 pixel, griglia di 19x33 pixel, griglia di 9x33 pixel e griglia di 11x38 pixel

La morfologia della sezione A-A' presenta tre difetti in corrispondenza dei corsi 5, 6, 7, 11, 12 e 17. Questi si trovano a diversa profondità rispetto al lato fronte del muretto e presentano diversa altezza: un difetto alto tre corsi, un difetto alto due corsi e uno alto un corso solamente. I valori di tempo e velocità ottenuti sono presentati nella tabella 6.3.

Tabella 6.3 Provino PNDE, sezione A-A': valori di analisi ed elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Difetto
PNDe_vertA	1	1	1	0.38	136	0.000136	2794.1176	N
PNDe_vertA	1	2	2	0.3812	144	0.000144	2647.2222	N
PNDe_vertA	1	3	3	0.3855	140	0.00014	2753.5714	N
PNDe_vertA	1	4	4	0.3917	144	0.000144	2720.1389	N
PNDe_vertA	1	7	5	0.4271	158	0.000158	2703.1646	N
PNDe_vertA	2	1	6	0.3812	136	0.000136	2802.9412	N
PNDe_vertA	2	2	7	0.38	146	0.000146	2602.7397	N
PNDe_vertA	2	3	8	0.3816	146	0.000146	2613.6986	N
PNDe_vertA	2	4	9	0.3855	144	0.000144	2677.0833	N
PNDe_vertA	2	5	10	0.3929	152	0.000152	2584.8684	N
PNDe_vertA	2	8	11	0.4271	162	0.000162	2636.4198	N
PNDe_vertA	3	1	12	0.3855	140	0.00014	2753.5714	N
PNDe_vertA	3	2	13	0.3816	140	0.00014	2725.7143	N
PNDe_vertA	3	3	14	0.38	140	0.00014	2714.2857	N
PNDe_vertA	3	4	15	0.3812	142	0.000142	2684.507	N
PNDe_vertA	3	6	16	0.3917	154	0.000154	2543.5065	N

PND _e _vertA	3	9	17	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PND _e _vertA	4	1	18	0.3917	144	0.000144	2720.1389	N
PND _e _vertA	4	2	19	0.3855	148	0.000148	2604.7297	N
PND _e _vertA	4	3	20	0.3812	150	0.00015	2541.3333	N
PND _e _vertA	4	4	21	0.38	146	0.000146	2602.7397	N
PND _e _vertA	4	5	22	0.3816	150	0.00015	2544	N
PND _e _vertA	4	7	23	0.3929	150	0.00015	2619.3333	N
PND _e _vertA	4	10	24	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	5	2	25	0.3929	154	0.000154	2551.2987	N
PND _e _vertA	5	4	26	0.3816	154	0.000154	2477.9221	N
PND _e _vertA	5	5	27	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PND _e _vertA	5	6	28	0.3812	140	0.00014	2722.8571	N
PND _e _vertA	5	8	29	0.3917	146	0.000146	2682.8767	N
PND _e _vertA	5	11	30	0.4271	160	0.00016	2669.375	S
PND _e _vertA	6	3	31	0.3917	156	0.000156	2510.8974	N
PND _e _vertA	6	5	32	0.3812	148	0.000148	2575.6757	N
PND _e _vertA	6	6	33	0.38	138	0.000138	2753.6232	N
PND _e _vertA	6	9	34	0.3929	150	0.00015	2619.3333	S
PND _e _vertA	6	12	35	0.4271	164	0.000164	2604.2683	S
PND _e _vertA	7	1	36	0.4271	172	0.000172	2483.1395	N
PND _e _vertA	7	4	37	0.3929	168	0.000168	2338.6905	S
PND _e _vertA	7	7	38	0.38	190	0.00019	2000	S
PND _e _vertA	7	10	39	0.3917	214	0.000214	1830.3738	S
PND _e _vertA	7	13	40	0.4271	232	0.000232	1840.9483	S
PND _e _vertA	8	2	41	0.4271	238	0.000238	1794.5378	S
PND _e _vertA	8	5	42	0.3917	242	0.000242	1618.595	S
PND _e _vertA	8	8	43	0.38	222	0.000222	1711.7117	S

PNDe_vertA	8	11	44	0.3929	222	0.000222	1769.8198	S
PNDe_vertA	8	14	45	0.4271	240	0.00024	1779.5833	S
PNDe_vertA	9	3	46	0.4271	282	0.000282	1514.539	S
PNDe_vertA	9	6	47	0.3929	286	0.000286	1373.7762	S
PNDe_vertA	9	9	48	0.38	254	0.000254	1496.063	S
PNDe_vertA	9	12	49	0.3917	278	0.000278	1408.9928	S
PNDe_vertA	9	15	50	0.4271	280	0.00028	1525.3571	S
PNDe_vertA	10	4	51	0.4271	328	0.000328	1302.1341	S
PNDe_vertA	10	7	52	0.3917	246	0.000246	1592.2764	S
PNDe_vertA	10	10	53	0.38	270	0.00027	1407.4074	S
PNDe_vertA	10	13	54	0.3929	270	0.00027	1455.1852	S
PNDe_vertA	10	16	55	0.4271	234	0.000234	1825.2137	S
PNDe_vertA	11	5	56	0.4271	274	0.000274	1558.7591	S
PNDe_vertA	11	8	57	0.3929	192	0.000192	2046.3542	S
PNDe_vertA	11	11	58	0.38	162	0.000162	2345.679	S
PNDe_vertA	11	14	59	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PNDe_vertA	11	17	60	0.4271	180	0.00018	2372.7778	S
PNDe_vertA	12	6	61	0.4271	290	0.00029	1472.7586	S
PNDe_vertA	12	9	62	0.3917	174	0.000174	2251.1494	S
PNDe_vertA	12	12	63	0.38	164	0.000164	2317.0732	S
PNDe_vertA	12	15	64	0.3929	166	0.000166	2366.8675	S
PNDe_vertA	12	18	65	0.4271	176	0.000176	2426.7045	N
PNDe_vertA	13	7	66	0.4271	258	0.000258	1655.4264	S
PNDe_vertA	13	10	67	0.3929	184	0.000184	2135.3261	S
PNDe_vertA	13	13	68	0.38	146	0.000146	2602.7397	N
PNDe_vertA	13	16	69	0.3917	150	0.00015	2611.3333	N
PNDe_vertA	13	19	70	0.4271	174	0.000174	2454.5977	N

PND _e _vertA	14	8	71	0.4271	172	0.000172	2483.1395	S
PND _e _vertA	14	11	72	0.3917	134	0.000134	2923.1343	N
PND _e _vertA	14	14	73	0.38	138	0.000138	2753.6232	N
PND _e _vertA	14	17	74	0.3929	148	0.000148	2654.7297	N
PND _e _vertA	14	20	75	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	15	9	76	0.4271	154	0.000154	2773.3766	N
PND _e _vertA	15	12	77	0.3929	144	0.000144	2728.4722	N
PND _e _vertA	15	15	78	0.38	146	0.000146	2602.7397	N
PND _e _vertA	15	18	79	0.3917	150	0.00015	2611.3333	N
PND _e _vertA	15	21	80	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	16	10	81	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	16	13	82	0.3917	142	0.000142	2758.4507	N
PND _e _vertA	16	16	83	0.38	140	0.00014	2714.2857	N
PND _e _vertA	16	19	84	0.3929	154	0.000154	2551.2987	N
PND _e _vertA	16	22	85	0.4271	158	0.000158	2703.1646	S
PND _e _vertA	17	11	86	0.4271	156	0.000156	2737.8205	N
PND _e _vertA	17	14	87	0.3929	144	0.000144	2728.4722	N
PND _e _vertA	17	17	88	0.38	140	0.00014	2714.2857	N
PND _e _vertA	17	20	89	0.3917	140	0.00014	2797.8571	S
PND _e _vertA	17	23	90	0.4271	178	0.000178	2399.4382	S
PND _e _vertA	18	12	91	0.4271	154	0.000154	2773.3766	N
PND _e _vertA	18	15	92	0.3917	140	0.00014	2797.8571	N
PND _e _vertA	18	18	93	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PND _e _vertA	18	21	94	0.3929	146	0.000146	2691.0959	S
PND _e _vertA	18	24	95	0.4271	230	0.00023	1856.9565	S
PND _e _vertA	19	13	96	0.4271	156	0.000156	2737.8205	N
PND _e _vertA	19	16	97	0.3929	140	0.00014	2806.4286	N

PND _e _vertA	19	19	98	0.38	156	0.000156	2435.8974	S
PND _e _vertA	19	22	99	0.3917	162	0.000162	2417.9012	S
PND _e _vertA	19	25	100	0.4271	226	0.000226	1889.823	S
PND _e _vertA	20	14	101	0.4271	204	0.000204	2093.6275	N
PND _e _vertA	20	17	102	0.3917	194	0.000194	2019.0722	S
PND _e _vertA	20	20	103	0.38	232	0.000232	1637.931	S
PND _e _vertA	20	23	104	0.3929	286	0.000286	1373.7762	S
PND _e _vertA	20	26	105	0.4271	216	0.000216	1977.3148	S
PND _e _vertA	21	15	106	0.4271	158	0.000158	2703.1646	S
PND _e _vertA	21	18	107	0.3929	172	0.000172	2284.3023	S
PND _e _vertA	21	21	108	0.38	216	0.000216	1759.2593	S
PND _e _vertA	21	24	109	0.3917	176	0.000176	2225.5682	S
PND _e _vertA	21	27	110	0.4271	178	0.000178	2399.4382	N
PND _e _vertA	22	16	111	0.4271	172	0.000172	2483.1395	S
PND _e _vertA	22	19	112	0.3917	258	0.000258	1518.2171	S
PND _e _vertA	22	22	113	0.38	176	0.000176	2159.0909	S
PND _e _vertA	22	25	114	0.3929	178	0.000178	2207.3034	N
PND _e _vertA	22	28	115	0.4271	162	0.000162	2636.4198	N
PND _e _vertA	23	17	116	0.4271	190	0.00019	2247.8947	S
PND _e _vertA	23	20	117	0.3929	172	0.000172	2284.3023	S
PND _e _vertA	23	23	118	0.38	144	0.000144	2638.8889	N
PND _e _vertA	23	26	119	0.3917	150	0.00015	2611.3333	N
PND _e _vertA	23	29	120	0.4271	150	0.00015	2847.3333	N
PND _e _vertA	24	18	121	0.4271	180	0.00018	2372.7778	S
PND _e _vertA	24	21	122	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PND _e _vertA	24	24	123	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PND _e _vertA	24	27	124	0.3929	142	0.000142	2766.9014	N

PND _e _vertA	24	30	125	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PND _e _vertA	25	19	126	0.4271	182	0.000182	2346.7033	S
PND _e _vertA	25	22	127	0.3929	178	0.000178	2207.3034	N
PND _e _vertA	25	25	128	0.38	172	0.000172	2209.3023	N
PND _e _vertA	25	28	129	0.3917	164	0.000164	2388.4146	N
PND _e _vertA	25	31	130	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	26	20	131	0.4271	154	0.000154	2773.3766	N
PND _e _vertA	26	23	132	0.3917	142	0.000142	2758.4507	N
PND _e _vertA	26	26	133	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PND _e _vertA	26	29	134	0.3929	154	0.000154	2551.2987	N
PND _e _vertA	26	32	135	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PND _e _vertA	27	21	136	0.4271	164	0.000164	2604.2683	N
PND _e _vertA	27	24	137	0.3929	144	0.000144	2728.4722	N
PND _e _vertA	27	27	138	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PND _e _vertA	27	30	139	0.3917	146	0.000146	2682.8767	N
PND _e _vertA	27	33	140	0.4271	156	0.000156	2737.8205	N
PND _e _vertA	28	22	141	0.4271	168	0.000168	2542.2619	N
PND _e _vertA	28	25	142	0.3917	154	0.000154	2543.5065	N
PND _e _vertA	28	28	143	0.38	146	0.000146	2602.7397	N
PND _e _vertA	28	31	144	0.3929	152	0.000152	2584.8684	N
PND _e _vertA	28	34	145	0.4271	170	0.00017	2512.3529	S
PND _e _vertA	29	23	146	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PND _e _vertA	29	26	147	0.3929	150	0.00015	2619.3333	N
PND _e _vertA	29	29	148	0.38	144	0.000144	2638.8889	N
PND _e _vertA	29	32	149	0.3917	146	0.000146	2682.8767	S
PND _e _vertA	29	35	150	0.4271	182	0.000182	2346.7033	S
PND _e _vertA	30	24	151	0.4271	184	0.000184	2321.1957	N

PNDe_ vertA	30	27	152	0.3917	142	0.000142	2758.4507	N
PNDe_ vertA	30	30	153	0.38	136	0.000136	2794.1176	N
PNDe_ vertA	30	33	154	0.3929	144	0.000144	2728.4722	S
PNDe_ vertA	30	36	155	0.4271	186	0.000186	2296.2366	S
PNDe_ vertA	31	25	156	0.4271	174	0.000174	2454.5977	N
PNDe_ vertA	31	28	157	0.3929	168	0.000168	2338.6905	S
PNDe_ vertA	31	31	158	0.38	158	0.000158	2405.0633	S
PNDe_ vertA	31	32	159	0.3812	156	0.000156	2443.5897	S
PNDe_ vertA	31	34	160	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PNDe_ vertA	32	26	161	0.4271	182	0.000182	2346.7033	S
PNDe_ vertA	32	29	162	0.3917	164	0.000164	2388.4146	S
PNDe_ vertA	32	31	163	0.3812	162	0.000162	2353.0864	S
PNDe_ vertA	32	32	164	0.38	208	0.000208	1826.9231	S
PNDe_ vertA	32	33	165	0.3816	148	0.000148	2578.3784	S
PNDe_ vertA	32	35	166	0.3929	146	0.000146	2691.0959	S
PNDe_ vertA	33	27	167	0.4271	176	0.000176	2426.7045	S
PNDe_ vertA	33	30	168	0.3929	158	0.000158	2486.7089	S
PNDe_ vertA	33	32	169	0.3816	144	0.000144	2650	S
PNDe_ vertA	33	33	170	0.38	142	0.000142	2676.0563	N
PNDe_ vertA	33	34	171	0.3812	146	0.000146	2610.9589	N
PNDe_ vertA	33	35	172	0.3855	144	0.000144	2677.0833	N
PNDe_ vertA	33	36	173	0.3917	148	0.000148	2646.6216	N
PNDe_ vertA	34	28	174	0.4271	170	0.00017	2512.3529	S
PNDe_ vertA	34	31	175	0.3917	160	0.00016	2448.125	N
PNDe_ vertA	34	33	176	0.3812	146	0.000146	2610.9589	N
PNDe_ vertA	34	34	177	0.38	152	0.000152	2500	N
PNDe_ vertA	34	35	178	0.3816	142	0.000142	2687.3239	N

PNDe_ vertA	34	36	179	0.3855	142	0.000142	2714.7887	N
PNDe_ vertA	35	29	180	0.4271	164	0.000164	2604.2683	S
PNDe_ vertA	35	32	181	0.3929	160	0.00016	2455.625	N
PNDe_ vertA	35	33	182	0.3855	152	0.000152	2536.1842	N
PNDe_ vertA	35	34	183	0.3816	136	0.000136	2805.8824	N
PNDe_ vertA	35	35	184	0.38	154	0.000154	2467.5325	N
PNDe_ vertA	35	36	185	0.3812	148	0.000148	2575.6757	N
PNDe_ vertA	36	30	186	0.4271	162	0.000162	2636.4198	N
PNDe_ vertA	36	33	187	0.3917	150	0.00015	2611.3333	N
PNDe_ vertA	36	34	188	0.3855	144	0.000144	2677.0833	N
PNDe_ vertA	36	35	189	0.3812	140	0.00014	2722.8571	N
PNDe_ vertA	36	36	190	0.38	142	0.000142	2676.0563	N

La velocità media per la sezione risulta di 2.428 m/s, un valore che denota, nonostante la presenza di anomalie, una muratura in buono stato. Rispetto ai valori di velocità ottenuti per i corsi orizzontali, si nota che in corrispondenza di misure dirette (lunghezza dei percorsi di 0,38 m) senza attraversamento di difetti il segnale viaggia leggermente più veloce, con valori di velocità anche superiori a 2600 m/s. Ciò può essere dovuto al fatto che, essendo le stazioni di misura non nel centro del mattone, ma in zone del mattone più vicine ai giunti di malta, il segnale risente della presenza della malta e viaggia più velocemente, ovviamente sempre in termini di pochi microsecondi. Infatti, anche la velocità media del corso, nonostante tre difetti, è maggiore ad esempio del corso 6 dello stesso muretto PNDE, che pur presenta due difetti di altezza pari tre corsi murari.

I valori evidenziati in giallo in tabella ottenuti forme d'onda con incertezze sul punto di inizio della curva stessa e mostrano infatti dei valori di tempi volo che sono inferiori a quelli attesi. Ad esempio la misura 58 a cui corrisponde un tempo di 162 microsecondi ha un segnale dell'accelerometro (curva rossa in figura 6.3) con pendenza negativa in cui non è più individuabile bene il punto di inizio del cambio di pendenza, considerando che deve essere all'incirca a metà

del rumore di fondo. Il punto individuato rispecchia il metodo utilizzato fino ad ora per ricavare il tempo che intercorre tra sorgente e ricevitore, ma mostra un valore molto basso.

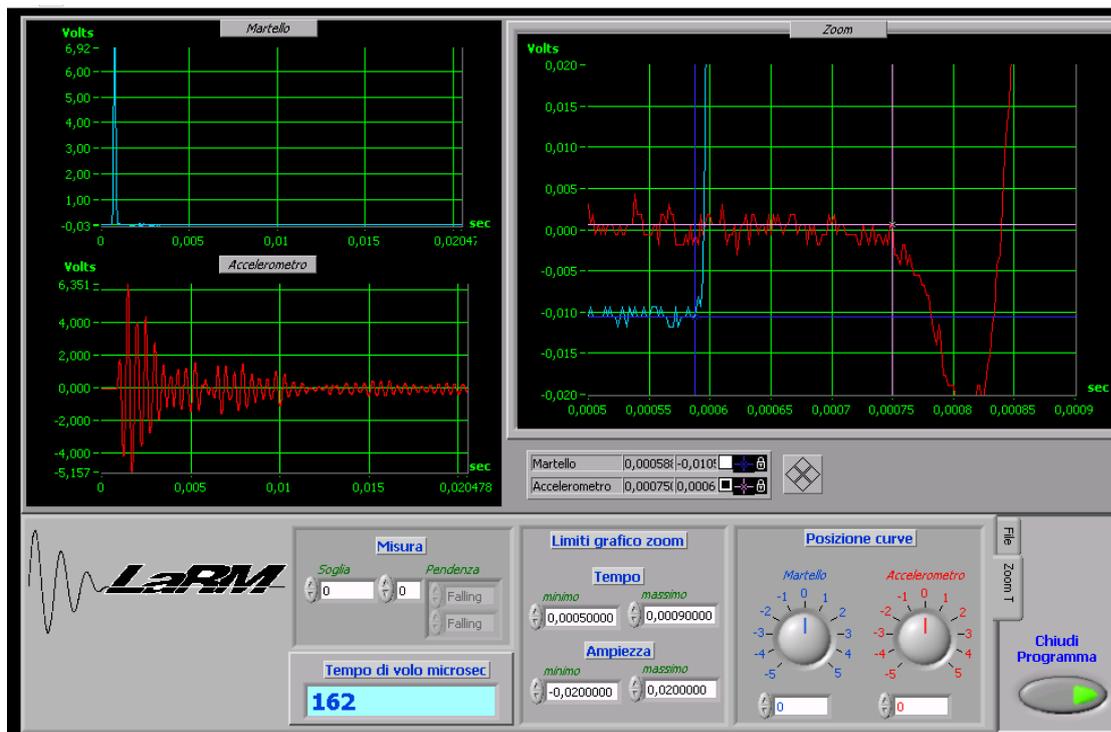


Figura 6.3 Muretto PNDE, sezione A-A', schermata LabView per acquisizione 58

L'istogramma dei tempi di volo (figura 6.4) evidenzia la presenza dei difetti; il primo dei difetti a partire dal basso è rappresentato dal primo picco, il secondo dal secondo picco, mentre il terzo non è individuato in maniera così netta. Sono stati pure evidenziati i percorsi che attraversano un difetto (con colore rosso) e quelli eseguiti a partire stazione di misura che si trova proprio di fronte al difetto (con colore giallo) (figura 6.5).

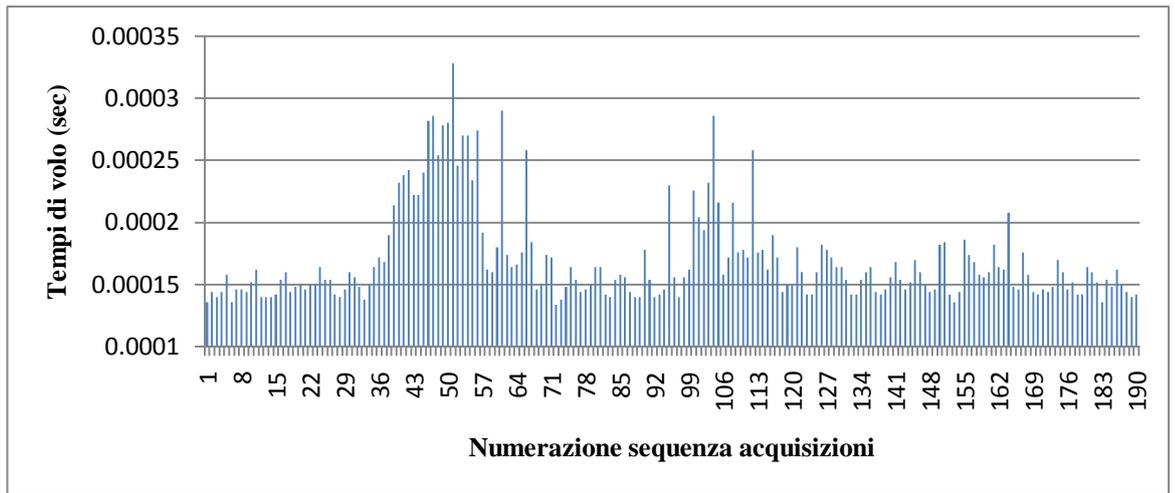


Figura 6.4 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi

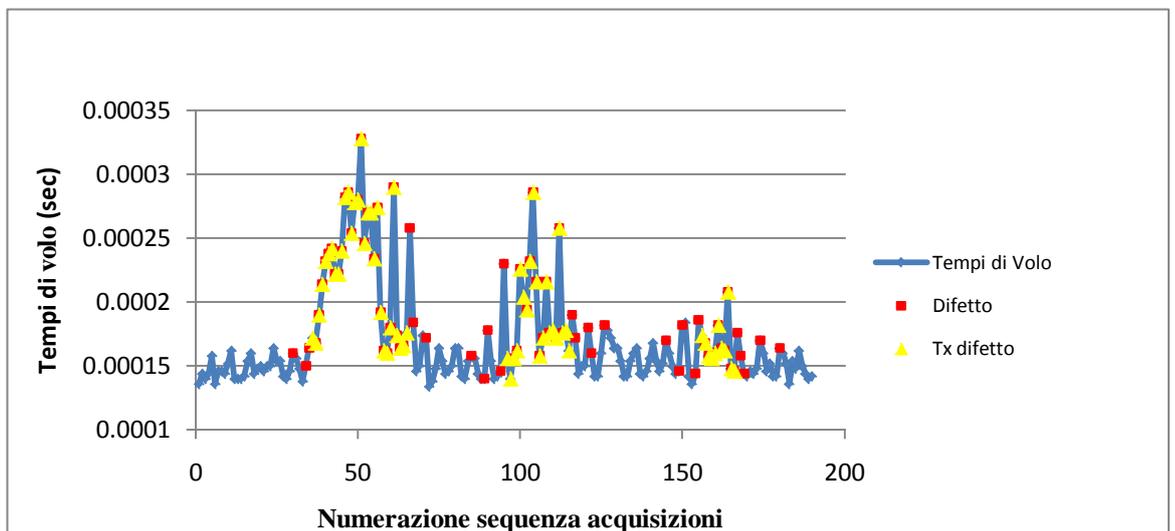


Figura 6.5 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi con dettaglio sui percorsi con difetto

Considerando solo i 70 percorsi delle stazioni Tx che non si trovano davanti a nessun difetto e lontane dai bordi per non risentire degli effetti di disturbo, la media delle velocità è di 2.578 m/s. L'andamento dei valori è una sequenza di convessità e concavità a rappresentare il variare dei tempi di volo al variare delle diverse lunghezze di percorsi del ventaglio uscente da ogni Tx. I maggiori valori di tempi di volo sono ottenuti da misure che percorrono traiettorie che devono "aggirare" un difetto (figure 6.6 e 6.7). In figura 6.8 sono riportate le velocità con l'aggiunta di informazioni sui raggi che toccano il difetto e la velocità media. Le misure sull'asse delle ascisse iniziano da 66 perché è la prima acquisizione ottenuta da una stazione TX che non si trovi di fronte ad un difetto.

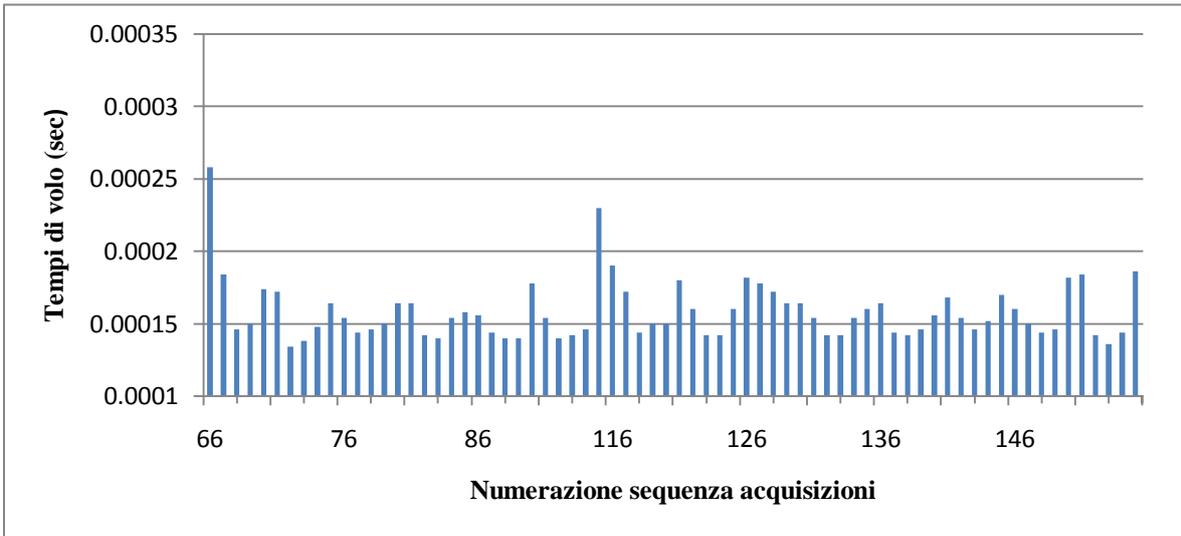


Figura 6.6 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi dei percorsi con stazione Tx che non sono di fronte a difetti

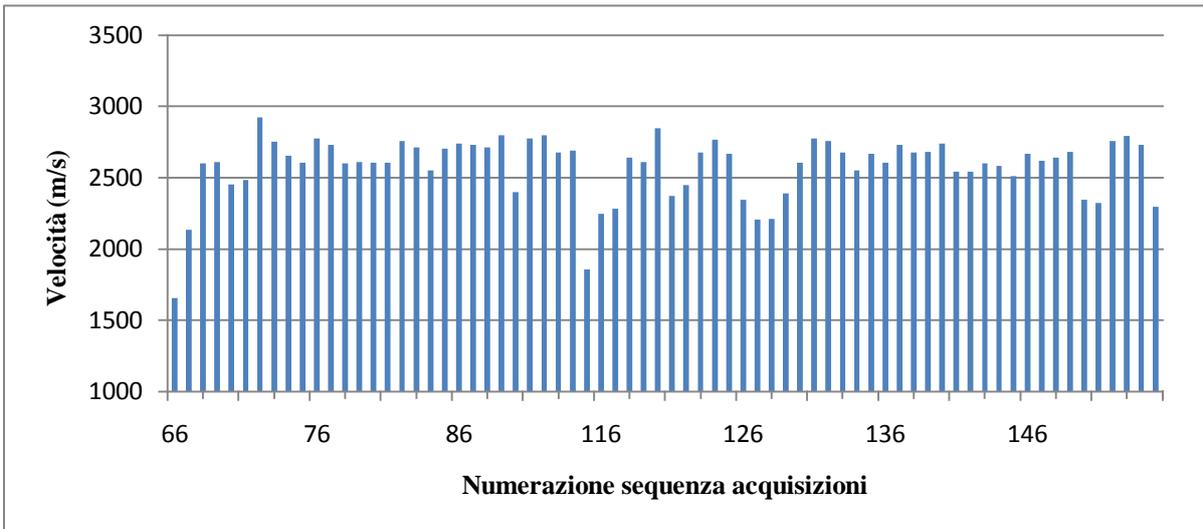


Figura 6.7 Muretto PNDE, sezione A-A', velocità espressa in m/s dei percorsi con stazione Tx che non sono di fronte a difetti

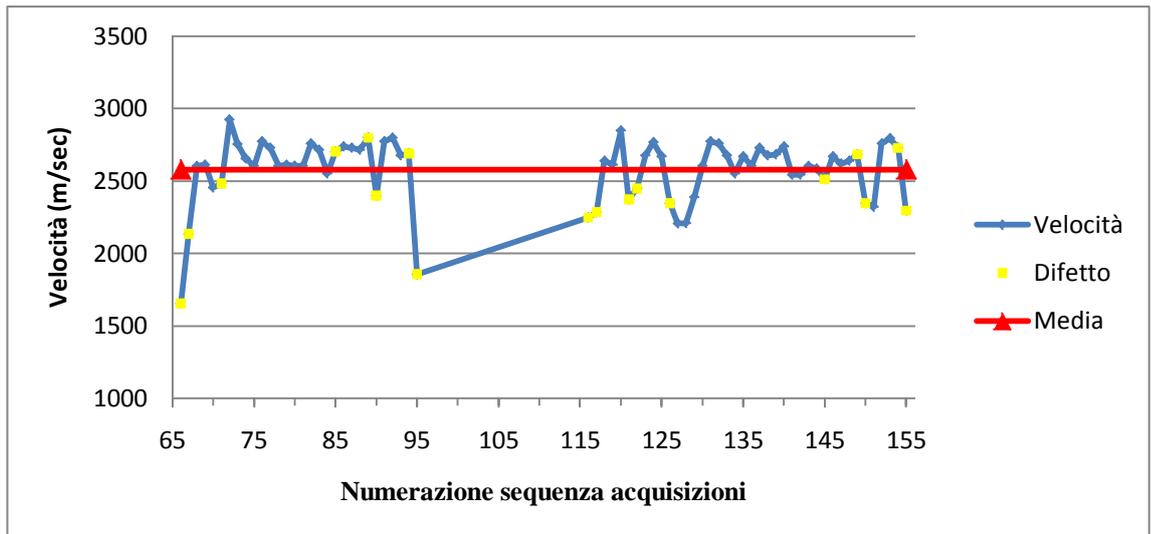


Figura 6.8 Muretto PNDE, sezione A-A', velocità espressa in m/s dei percorsi con stazione Tx che non sono di fronte a difetti e loro velocità media

In quest'ultimo grafico si nota maggiormente rispetto ai precedenti un salto tra le acquisizioni 95 e 105, dovuto al fatto che le acquisizioni nell'intervallo suddetto hanno stazioni Tx di fronte al difetto centrale della sezione e quindi non sono state incluse.

L'andamento delle velocità in funzione della lunghezza dei 190 percorsi, ci aiuta a valutare se la retta ottenuta per regressione lineare abbia una tendenza all'orizzontalità. Il risultato ottenuto (figura 6.9) permette di non modificare i valori da inserire nel software. Le prime inversioni tomografiche sono state eseguite con una griglia di 19x52 pixel, indicando con 19 pixel il lato orizzontale e con 52 il lato verticale. L'intervallo di velocità considerato è compreso tra 0,3 e 3 Km/s e si inizia da 3 iterazioni straight per poi proseguire con gruppi da 5 iterazioni straight. La tabella 6.4 riassume tutti i parametri di inversione utilizzati e i nomi dei file di input e di output e le immagini tomografiche relative si trovano in figura 6.10 - 6.14.

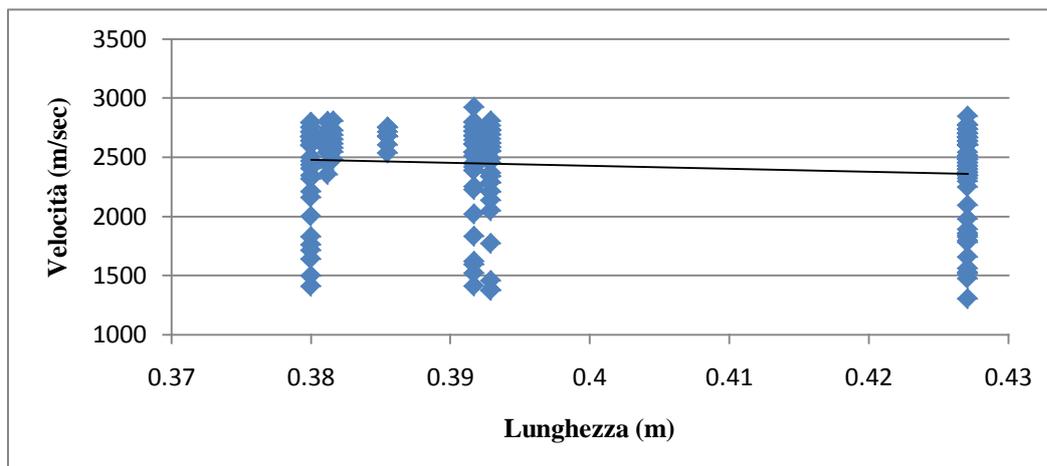


Figura 6.9 Muretto PNDE, sezione A-A', grafico velocità-lunghezza dei percorsi

Tabella 6.4 Muretto PNDE, sezione A-A', parametri di inversione per la griglia di 19x52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertA_100	3	0	3	PNDEvertA_101	Figura 6.10
PNDEvertA_101	5	0	8	PNDEvertA_102	Figura 6.11
PNDEvertA_102	5	0	13	PNDEvertA_103	Figura 6.12
PNDEvertA_103	5	0	18	PNDEvertA_104	Figura 6.13
PNDEvertA_104	5	0	23	PNDEvertA_105	Figura 6.14

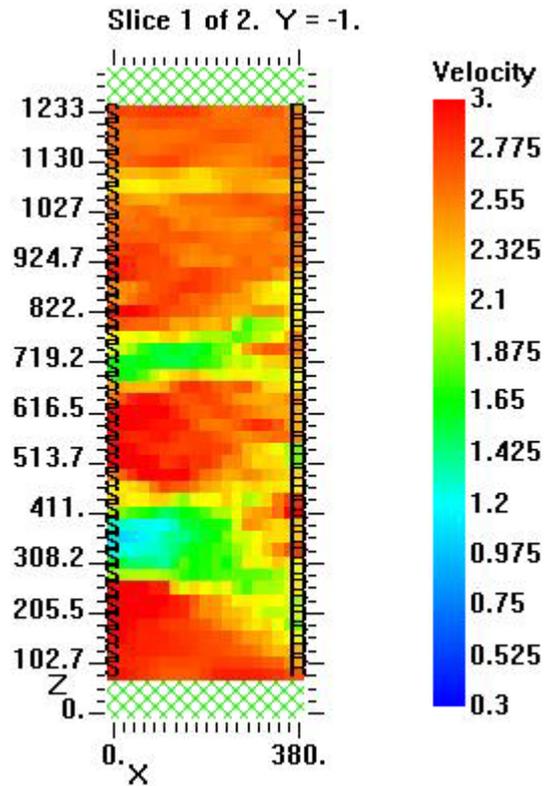


Figura 6.10 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19 x 52 pixel, file output PNDEvertA_101

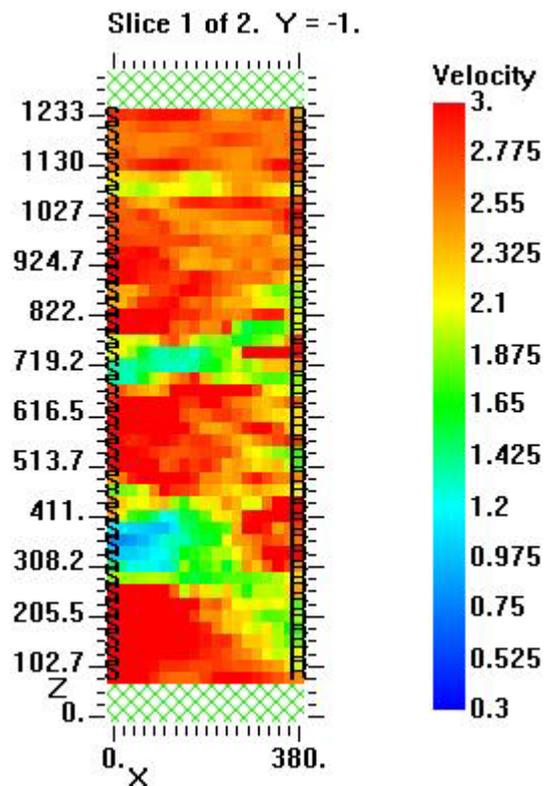


Figura 6.11 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 8 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_102

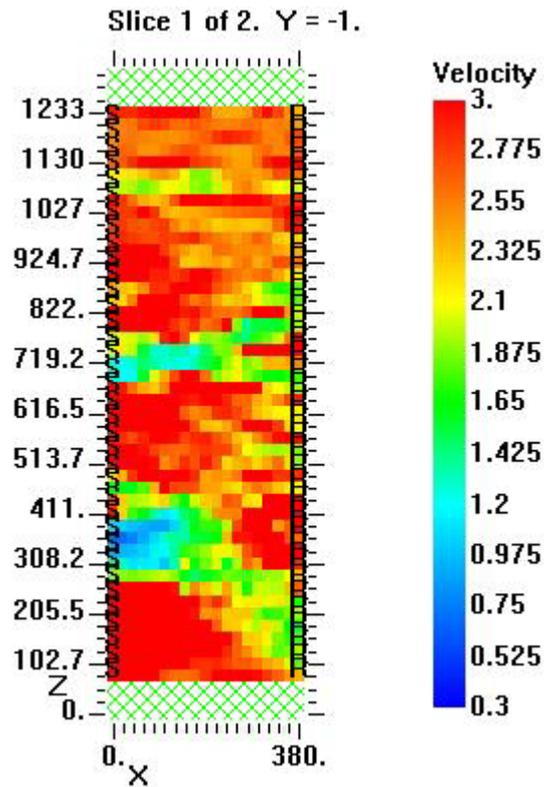


Figura 6.12 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 13 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_103

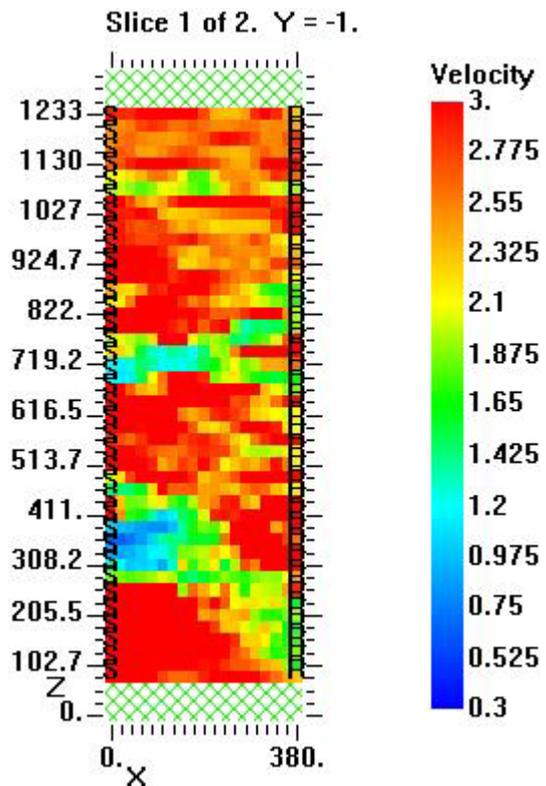


Figura 6.13 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 18 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_104

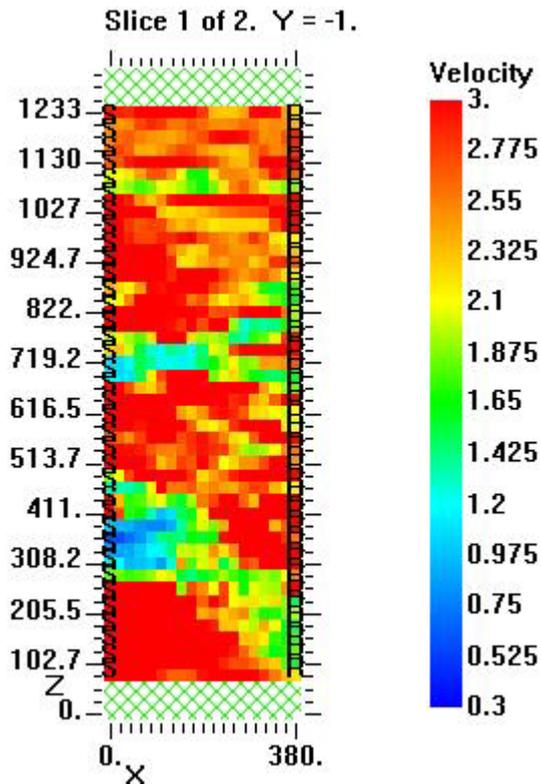


Figura 6.14 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 23 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_105

Le maggiori differenze tra le mappe ottenute si hanno entro le 10 iterazioni, dopodiché non si notano più apprezzabili diversità nella mappatura delle velocità. Il difetto inferiore è raffigurato dalla zona in azzurro intorno alla quota 308.2; tuttavia la posizione visualizzata è più superficiale di quella reale e le dimensioni sono inferiori. Il difetto centrale viene individuato più che altro per la posizione, mentre forma e dimensioni sono poco definite; come già visto per i corsi orizzontali un'imperfezione posizionata a metà dello spessore della sezione, non viene identificata in maniera precisa. Il difetto più in alto, avendo l'altezza pari allo spessore di un corso, risulta difficile da individuare, anche se si nota una zona in alto di colore verde con delle velocità inferiori. La posizione e la forma non sono ricostruibili da queste immagini. I residui ottenuti dalle singole iterazioni (figura 6.15) iniziano da un valore pari a 75 circa fino a diminuire a 11. Già dopo la decima iterazione si nota un andamento pressoché lineare, a dimostrazione che non vi sono più notevoli differenze nelle mappe ricavate.

Utilizzando l'opzione dei raggi curvi dopo sole 3 iterazioni straight (tabella 6.5), si ottengono i risultati, raffigurati in figura 6.16 - 6.19.

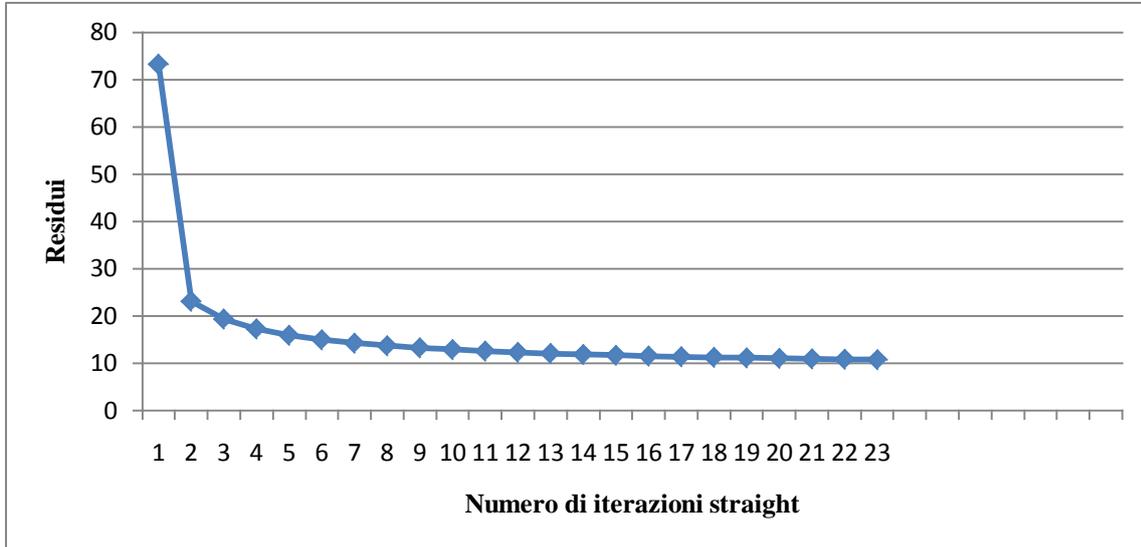


Figura 6.15 Muretto PNDE, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight per una griglia di 19x52 pixel

Tabella 6.5 Muretto PNDE, sezione A-A', parametri di inversione per la griglia di 19x52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertA_100	3	0	3	PNDEvertA_101	Figura 6.10
PNDEvertA_101	0	5	8	PNDEvertA_106	Figura 6.16
PNDEvertA_106	0	5	13	PNDEvertA_107	Figura 6.17
PNDEvertA_107	0	5	18	PNDEvertA_108	Figura 6.18
PNDEvertA_108	0	5	23	PNDEvertA_109	Figura 6.19

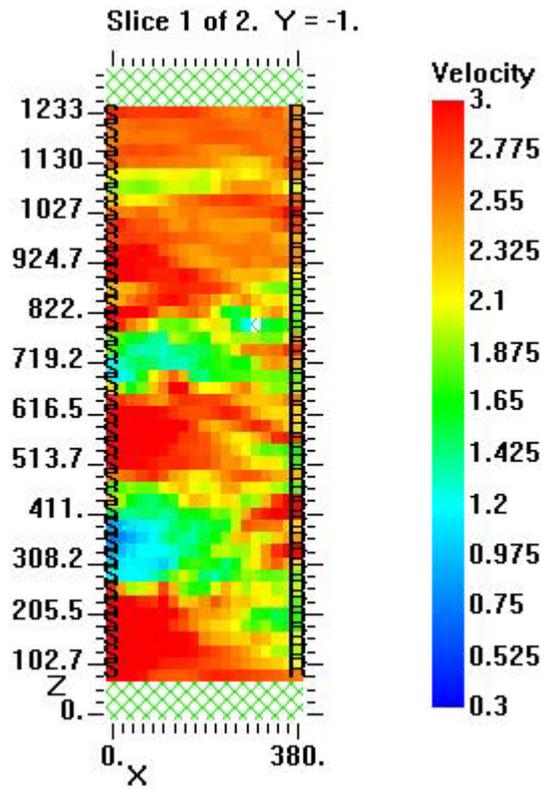


Figura 6.16 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_106

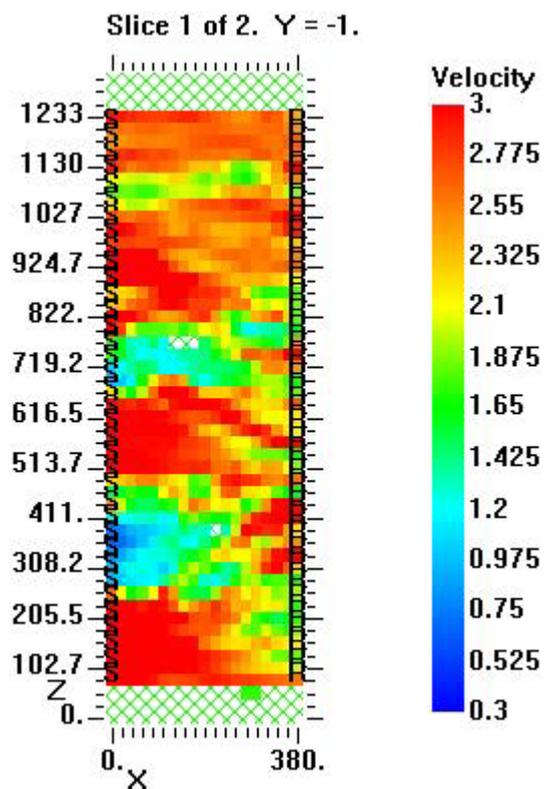


Figura 6.17 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_107

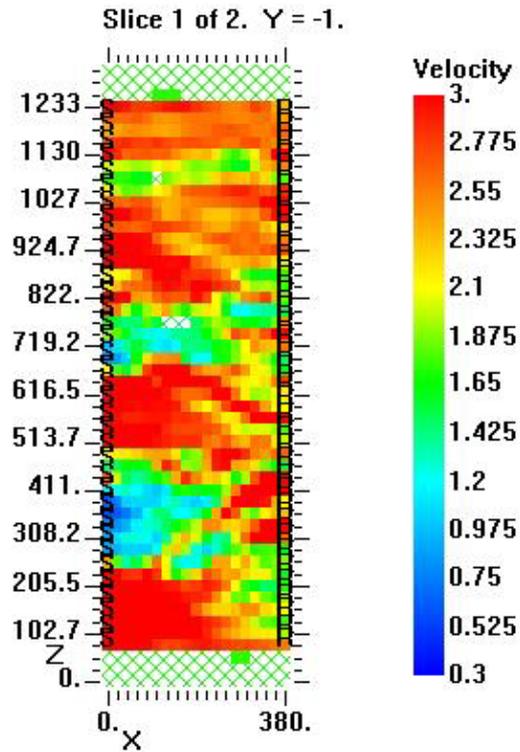


Figura 6.18 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_108

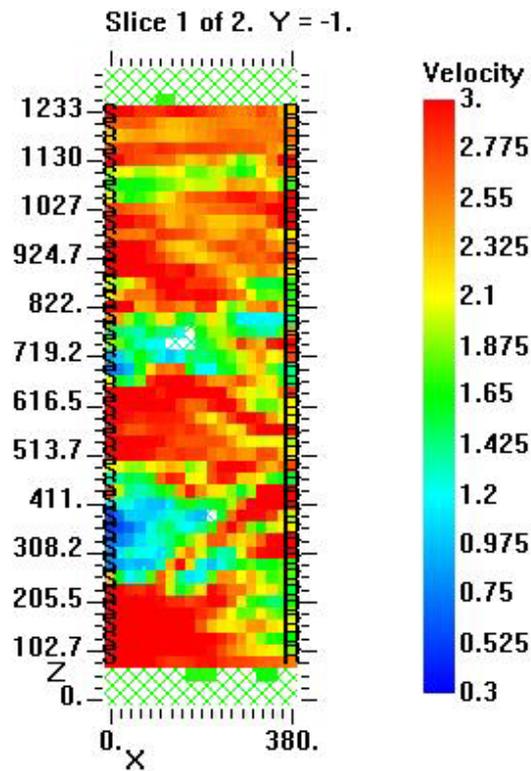


Figura 6.19 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertA_109

L'utilizzo delle iterazioni curved migliora la visualizzazione dei difetti. Il difetto inferiore mostra dimensioni più simili a quelle reali, con una forma rettangolare abbastanza identificata dalla zona in colore azzurro-blu. Anche il difetto centrale, alto due corsi, viene rappresentato da una zona verde più ampia rispetto a quella delineata per sole iterazioni straight. Il difetto superiore rimane sempre definito in maniera molto approssimativa, senza una definizione di forma e dimensioni. Se non sapessimo della presenza di un difetto alto un corso, potremmo identificare la presenza di un'imperfezione, ma senza capirne bene la posizione. I residui (figura 6.20) hanno un andamento non lineare fino a convergere ad un valore di 10 circa nelle ultime iterazioni. L'innalzamento dei valori dalla ventesima iterazione in poi corrisponde ad un peggioramento nella definizione delle velocità, infatti nella figura 6.19 si notano dei peggioramenti nella delineazione dei difetti, come ad esempio la zona azzurra in basso che sembra allargarsi maggiormente verso il centro del provino.

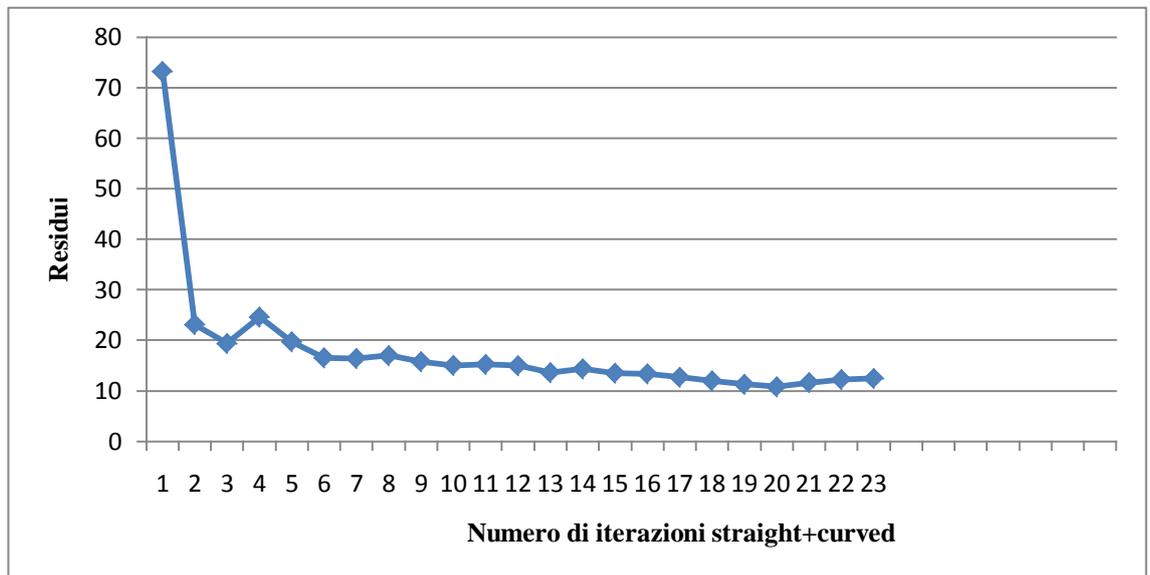


Figura 6.20 Muretto PNDE, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 19x52 pixel

Ripetendo la stessa procedura con altre griglie di pixel, si nota che le iterazioni curved danno dei risultati migliori. Pertanto verranno di seguito riportati solo i risultati con iterazioni bending. Per quanto riguarda la griglia 19x33, le

operazioni eseguite sono riepilogate in tabella 6.6. I file output sono presentati nelle figure 6.21 - 6.25.

Tabella 6.6 Muretto PNDE, sezione A-A', parametri di inversione per la griglia di 19x33 pixel

Pixel : 19x33		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertA_110	3	0	3	PNDEvertA_111	Figura 6.21
PNDEvertA_111	0	5	8	PNDEvertA_116	Figura 6.22
PNDEvertA_116	0	5	13	PNDEvertA_117	Figura 6.23
PNDEvertA_117	0	5	18	PNDEvertA_118	Figura 6.24
PNDEvertA_118	0	5	23	PNDEvertA_119	Figura 6.25

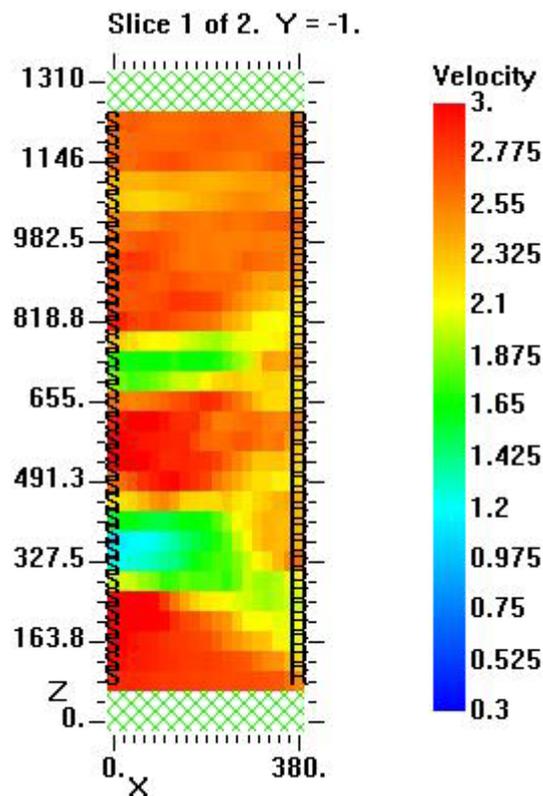


Figura 6.21 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertA_111

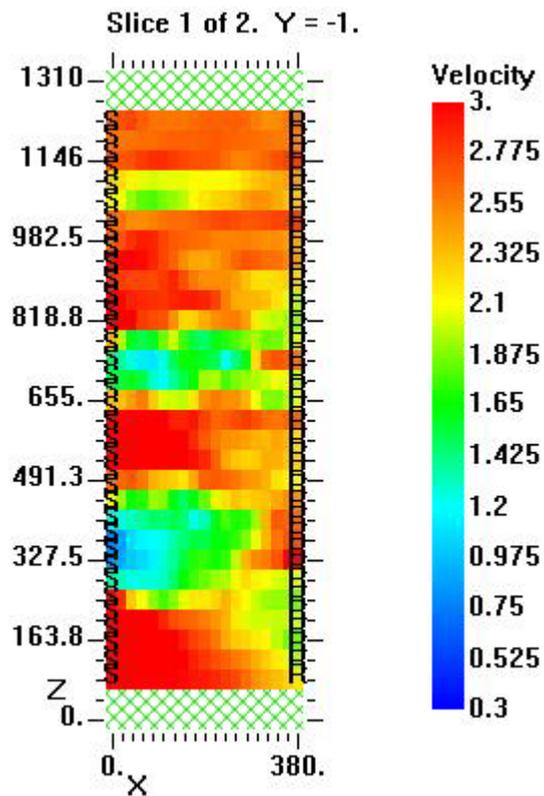


Figura 6.22 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertA_116

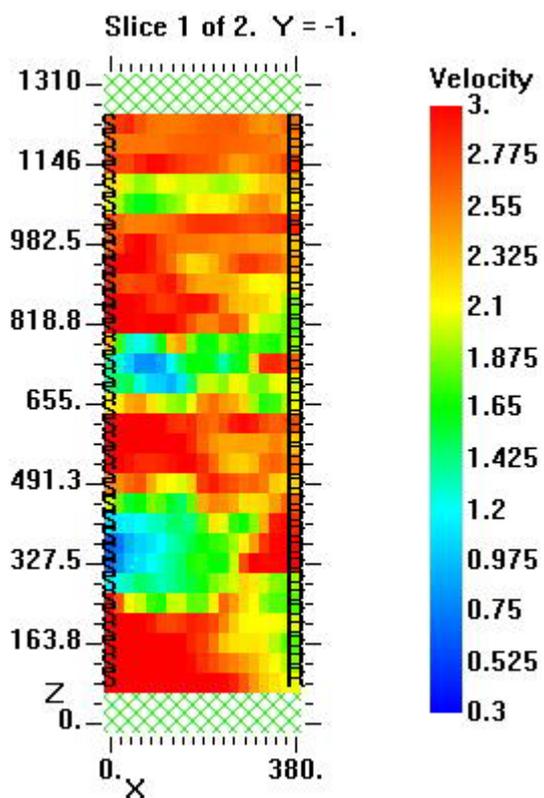


Figura 6.23 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertA_117

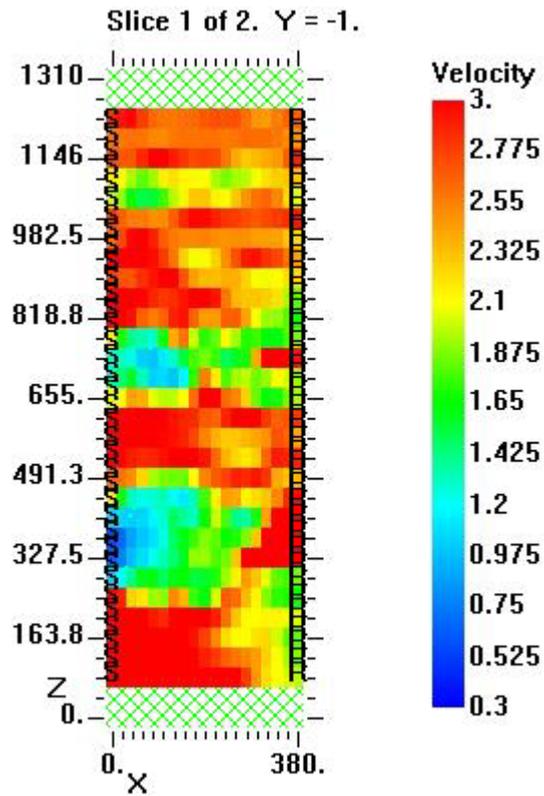


Figura 6.24 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertA_118

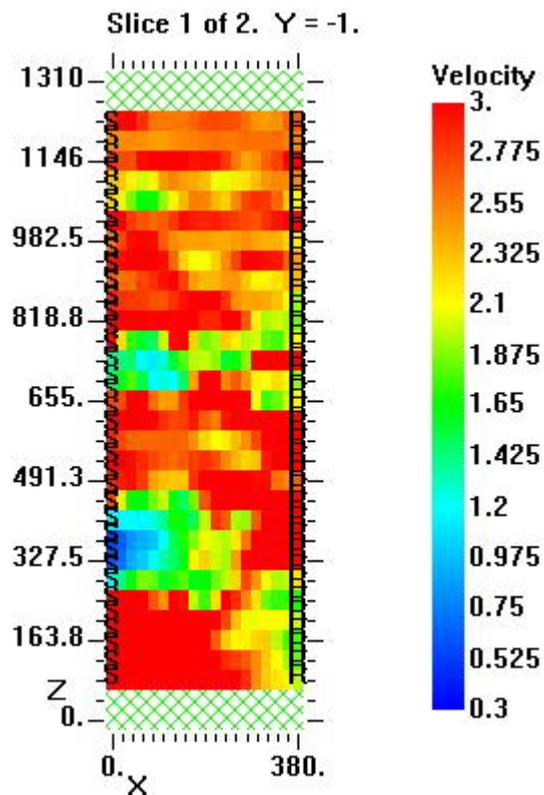


Figura 6.25 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertA_119

I difetti vengono individuati tutti e tre, ma con le stesse limitazioni del caso precedente. Le maggiori differenze si visualizzano ovviamente nel passaggio tra iterazioni straight e curved (figura 6.21 e figura 6.22) e anche nel passaggio tra le 18 e le 23 iterazioni (figura 6.24 e figura 6.25) dove le zone con basse velocità all'aumentare delle iterazioni diminuiscono di dimensione. I valori dei residui (figura 6.26) sono maggiori rispetto a quelli ottenuti per la griglia 19x52 pixel e convergono ad un valore di 15 rispetto al valore 10 ottenuto con la griglia 19x52 pixel. Questo risultato non è nuovo perché si era notato già nella sperimentazione con i corsi orizzontali. Il picco finale intorno alla ventunesima iterazione indica un peggioramento dell'immagine, come già evidenziato. Aumentando le dimensioni dei pixel, si considera una griglia di 9x31 pixel ovvero aventi un lato di 4,2 cm circa ciascuno. Le iterazioni eseguite sono sia straight che curved e i file relativi sono riepilogati nella tabella 6.7. Le inversioni tomografiche hanno prodotto delle mappe di velocità presentate nelle figure 6.27 - 6.31.

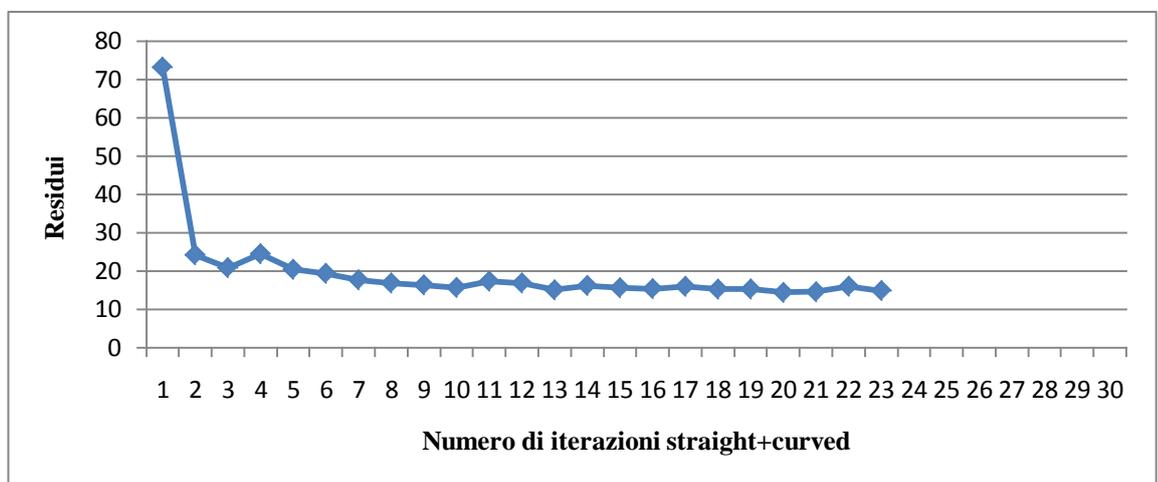


Figura 6.26 Muretto PNDE, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 19x33 pixel

Tabella 6.6 Muretto PNDE, sezione A-A', parametri di inversione per la griglia di 9x31 pixel

Pixel : 9x31		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertA_120	3	0	3	PNDEvertA_121	Figura 6.27
PNDEvertA_121	0	5	8	PNDEvertA_126	Figura 6.28
PNDEvertA_126	0	5	13	PNDEvertA_127	Figura 6.29
PNDEvertA_127	0	5	18	PNDEvertA_128	Figura 6.30
PNDEvertA_128	0	5	23	PNDEvertA_129	Figura 6.31

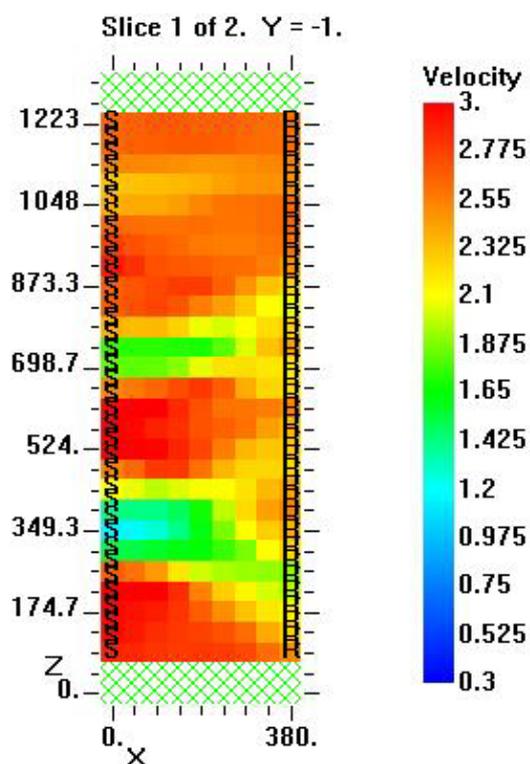


Figura 6.27 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertA_121

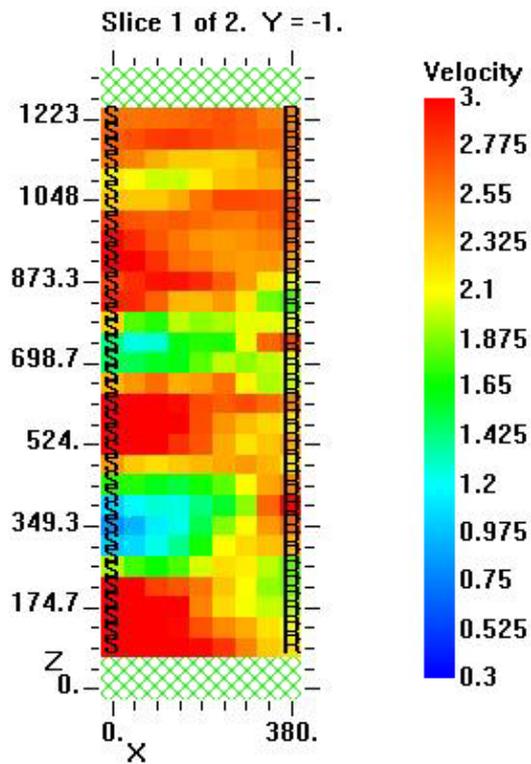


Figura 6.28 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertA_126

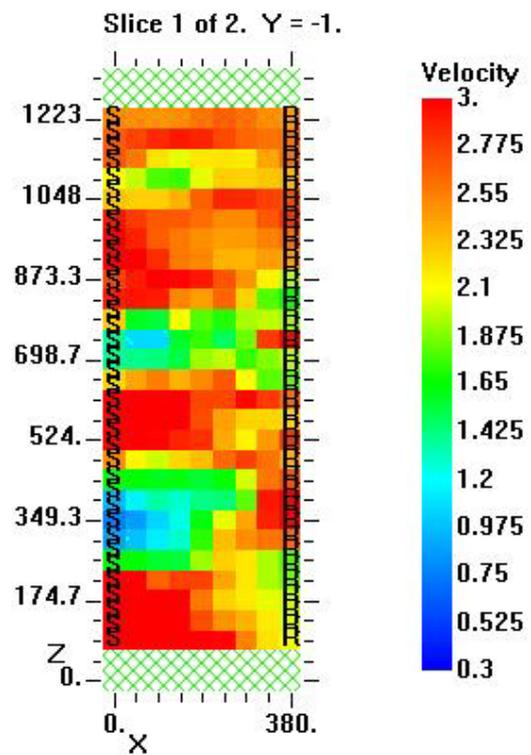


Figura 6.29 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertA_127

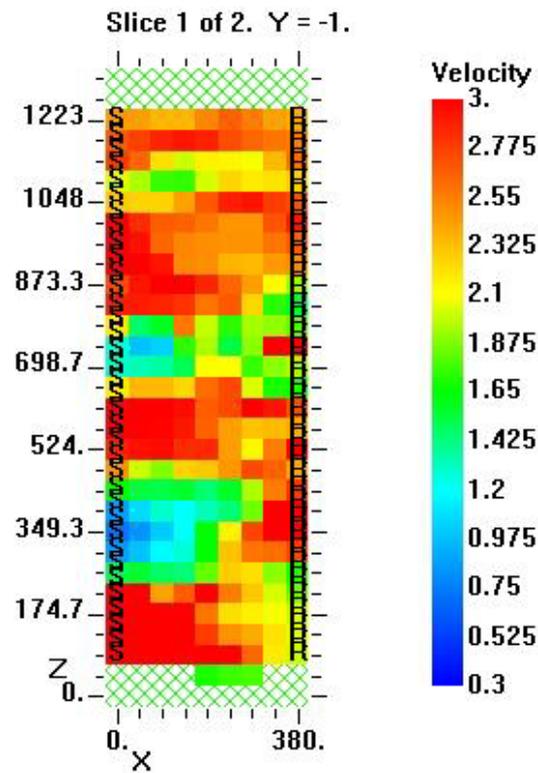


Figura 6.30 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertA_128

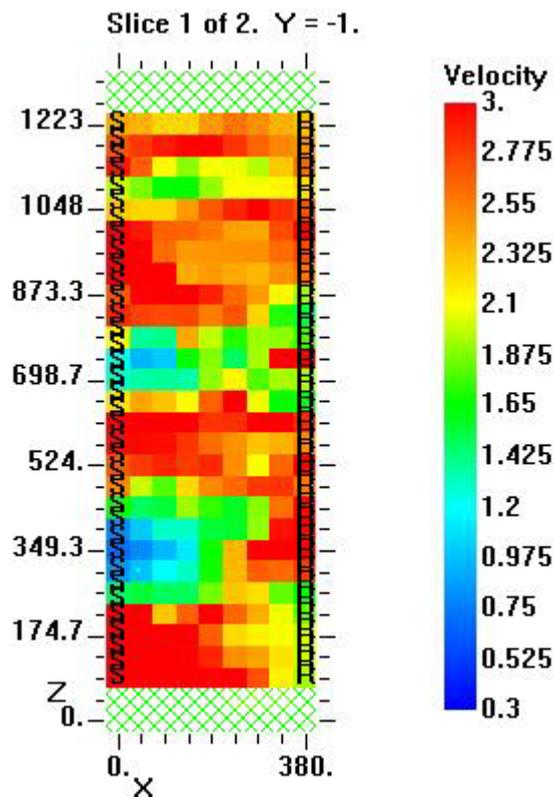


Figura 6.31 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertA_129

L'aumento delle dimensioni dei pixel non fornisce miglioramenti nell'individuazione dei difetti. I primi due difetti a partire dal basso risultano essere più superficiali rispetto alla posizione reale e il difetto in alto tra tutti è quello meno visibile. I residui (figura 6.32) iniziano da un valore pari a 75 circa fino a decrescere a 15. Quest'ultimo valore è simile a quello ottenuto nel caso di 19x33 pixel, nonostante il cambiamento di forma del pixel. Essendo le stazioni di misura distanziate di 3 cm e 3,5 cm si considera ora una dimensione dei pixel pari a 3,4 cm in modo che il lato sia quasi uguale all'interspazio fra le stazioni. La griglia che ne deriva è formata da 11 pixel per il lato orizzontale e 38 per il lato verticale. Si riepilogano le iterazioni curved più significative in tabella 6.8. Le mappe di velocità derivanti dai file output sono presentate nelle figure 6.33 - 6.37. In questo esempio, non si ottengono risultati notevolmente migliori rispetto ai casi precedenti nell'individuazione dei difetti. È interessante illustrare l'andamento dei percorsi nel caso siano considerati rettilinei o curvi. Il file output PNDEvertA_131ray (figura 6.38) riporta la copertura della sezione con i ventagli di percorsi come progettato preliminarmente. Il file output PNDEvertA_136ray (figura 6.39), riporta invece la traiettoria che percorre il segnale per poter aggirare l'ostacolo incontrato. Si vede come si creano delle zone non coperte dai raggi che definiscono appunto la presenza dei tre difetti inseriti.

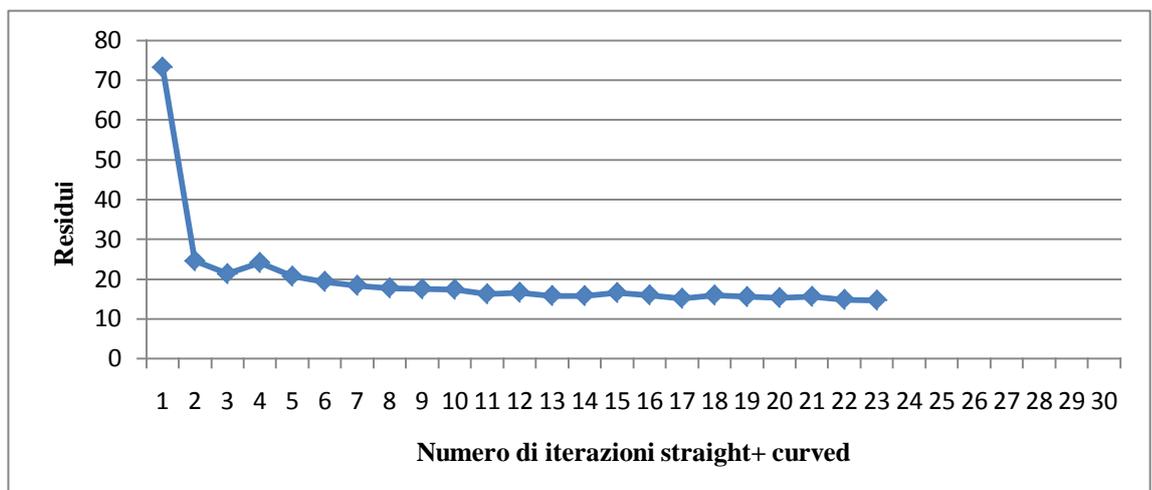


Figura 6.32 Muretto PNDE, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 9x31 pixel

Tabella 6.8 Muretto PNDE, sezione A-A', parametri di inversione per la griglia di 11x38 pixel

Pixel : 11x38		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertA_130	3	0	3	PNDEvertA_131	Figura 6.33
PNDEvertA_131	0	5	8	PNDEvertA_136	Figura 6.34
PNDEvertA_136	0	5	13	PNDEvertA_137	Figura 6.35
PNDEvertA_137	0	5	18	PNDEvertA_138	Figura 6.36
PNDEvertA_138	0	5	23	PNDEvertA_139	Figura 6.37

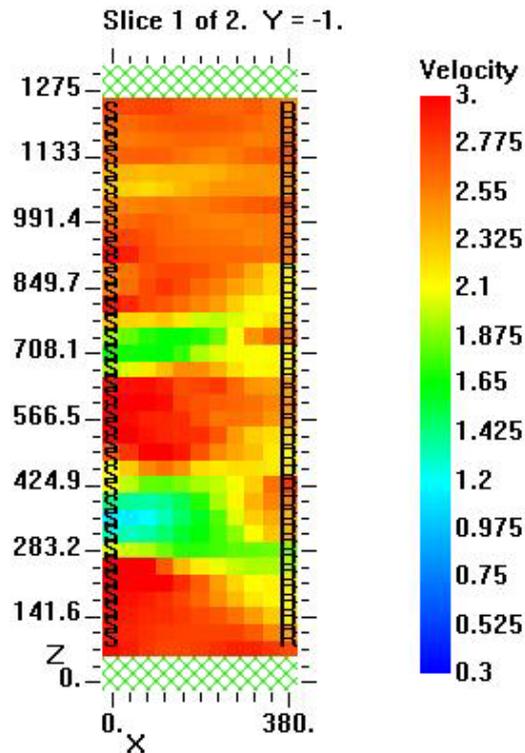


Figura 6.33 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa della velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertA_131

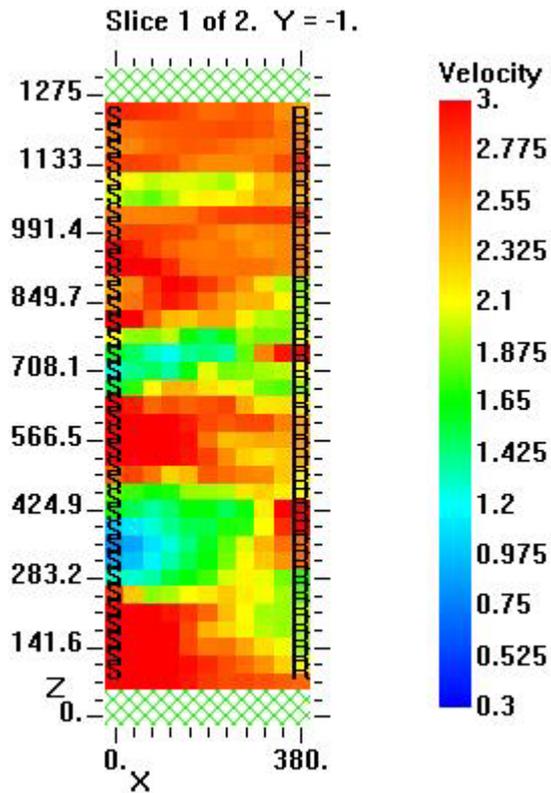


Figura 6.34 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertA_136

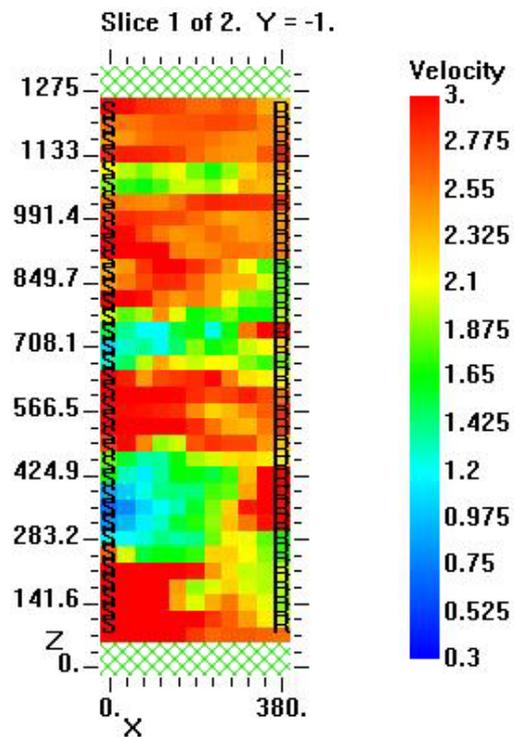


Figura 6.35 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertA_137

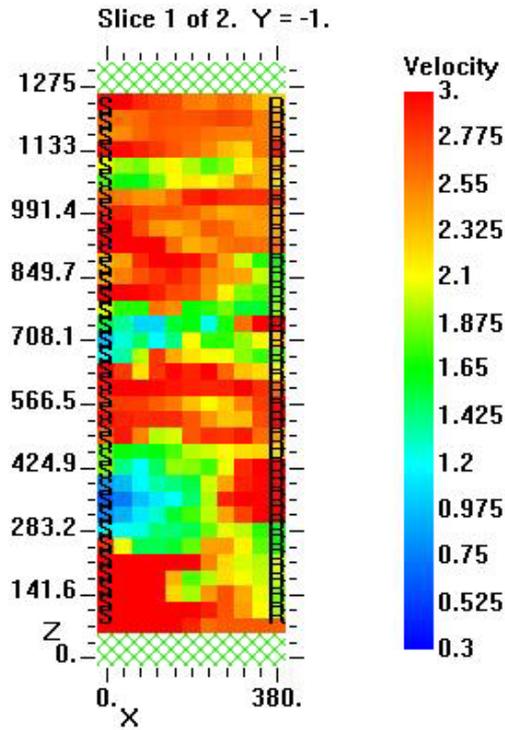


Figura 6.36 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertA_138

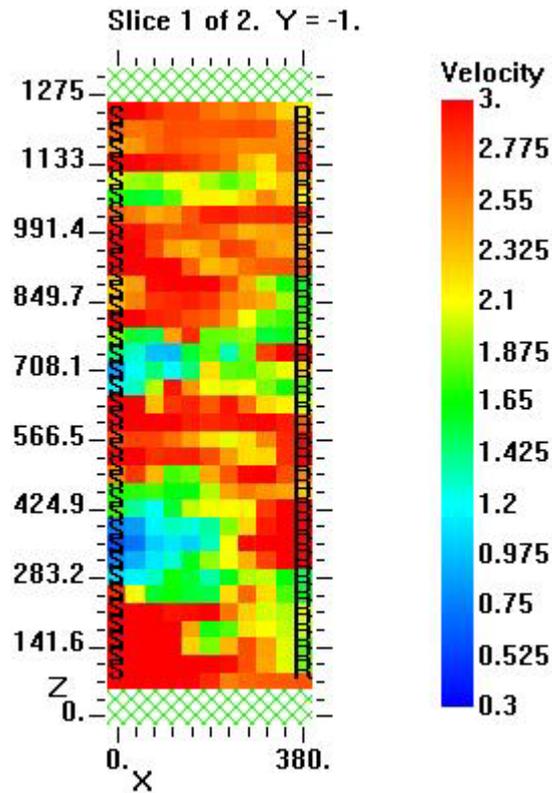


Figura 6.37 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertA_139

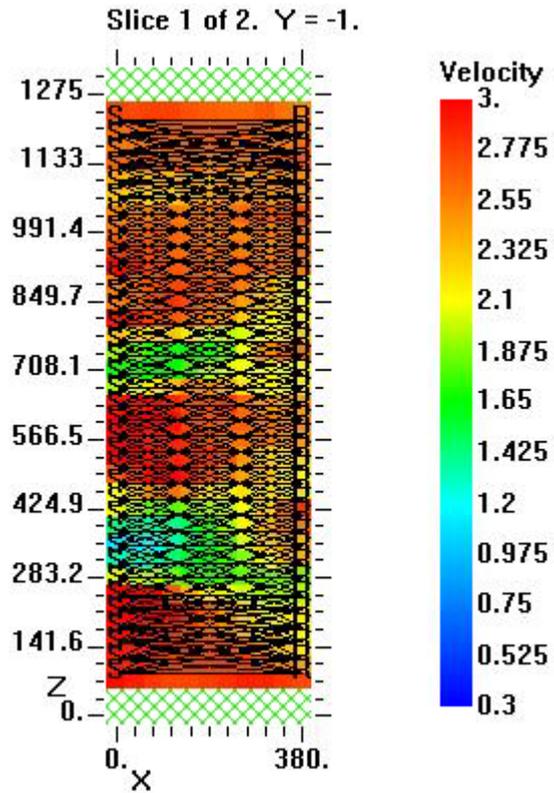


Figura 6.38 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità del file output PNDEvertA_131ray

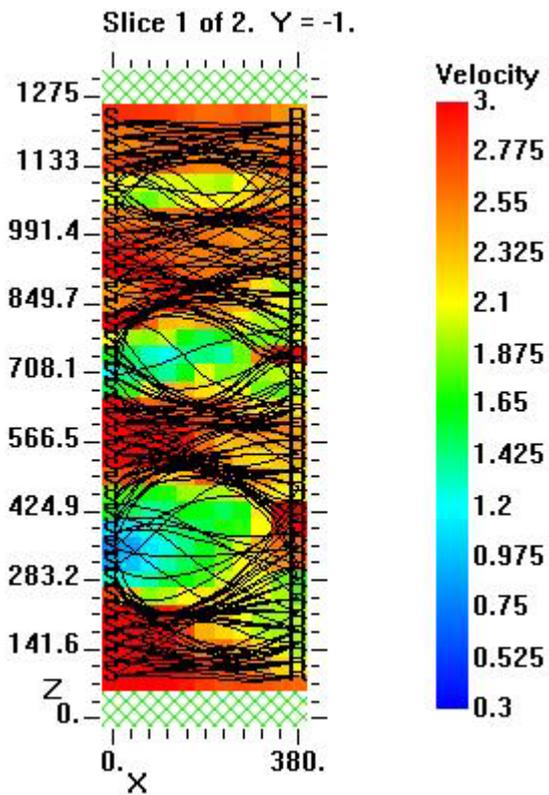


Figura 6.39 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa delle velocità del file output PNDEvertA_136ray

6.1.2 SEZIONE B-B': confronto tra griglia di 19x52 pixel, griglia di 19x33 pixel, griglia di 9x31 pixel e griglia di 11x38 pixel

La morfologia della sezione B-B' del muretto PNDE presenta sempre tre difetti lungo lo sviluppo in altezza del provino. In questa sezione, la loro posizione rispetto al lato frontale del muretto in questa sezione è diversa dalla sezione A-A'. I difetti superiori e inferiori si trovano in una zona centrale dello spessore del provino, mentre il difetto centrale è più vicino al retro del muretto PNDE. Sono state acquisiti i valori dei tempi di volo per i percorsi progettati e ricavate le velocità (tabella 6.9).

Tabella 6.9 Provino PNDE, sezione B-B': valori di analisi e elaborazione dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Difetto
PNDe_vertB	1	1	1	0.38	148	0.000148	2567.567568	N
PNDe_vertB	1	2	2	0.3812	172	0.000172	2216.27907	N
PNDe_vertB	1	3	3	0.3855	148	0.000148	2604.72973	N
PNDe_vertB	1	4	4	0.3917	142	0.000142	2758.450704	N
PNDe_vertB	1	7	5	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N
PNDe_vertB	2	1	6	0.3812	138	0.000138	2762.318841	N
PNDe_vertB	2	2	7	0.38	132	0.000132	2878.787879	N
PNDe_vertB	2	3	8	0.3816	148	0.000148	2578.378378	N
PNDe_vertB	2	4	9	0.3855	136	0.000136	2834.558824	N
PNDe_vertB	2	5	10	0.3929	140	0.00014	2806.428571	N
PNDe_vertB	2	8	11	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N
PNDe_vertB	3	1	12	0.3855	148	0.000148	2604.72973	N
PNDe_vertB	3	2	13	0.3816	142	0.000142	2687.323944	N
PNDe_vertB	3	3	14	0.38	138	0.000138	2753.623188	N
PNDe_vertB	3	4	15	0.3812	154	0.000154	2475.324675	N
PNDe_vertB	3	6	16	0.3917	144	0.000144	2720.138889	N

PNDe_vertB	3	9	17	0.4271	164	0.000164	2604.268293	S
PNDe_vertB	4	1	18	0.3917	150	0.00015	2611.333333	N
PNDe_vertB	4	2	19	0.3855	162	0.000162	2379.62963	N
PNDe_vertB	4	3	20	0.3812	138	0.000138	2762.318841	N
PNDe_vertB	4	4	21	0.38	138	0.000138	2753.623188	N
PNDe_vertB	4	5	22	0.3816	146	0.000146	2613.69863	N
PNDe_vertB	4	7	23	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDe_vertB	4	10	24	0.4271	164	0.000164	2604.268293	S
PNDe_vertB	5	2	25	0.3929	146	0.000146	2691.09589	N
PNDe_vertB	5	4	26	0.3816	148	0.000148	2578.378378	N
PNDe_vertB	5	5	27	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDe_vertB	5	6	28	0.3812	136	0.000136	2802.941176	N
PNDe_vertB	5	8	29	0.3917	148	0.000148	2646.621622	S
PNDe_vertB	5	11	30	0.4271	214	0.000214	1995.794393	S
PNDe_vertB	6	3	31	0.3917	146	0.000146	2682.876712	N
PNDe_vertB	6	5	32	0.3812	160	0.00016	2382.5	N
PNDe_vertB	6	6	33	0.38	178	0.000178	2134.831461	N
PNDe_vertB	6	9	34	0.3929	182	0.000182	2158.791209	S
PNDe_vertB	6	12	35	0.4271	234	0.000234	1825.213675	S
PNDe_vertB	7	1	36	0.4271	156	0.000156	2737.820513	N
PNDe_vertB	7	4	37	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDe_vertB	7	7	38	0.38	156	0.000156	2435.897436	S
PNDe_vertB	7	10	39	0.3917	230	0.00023	1703.043478	S
PNDe_vertB	7	13	40	0.4271	238	0.000238	1794.537815	S
PNDe_vertB	8	2	41	0.4271	158	0.000158	2703.164557	N
PNDe_vertB	8	5	42	0.3917	166	0.000166	2359.638554	S
PNDe_vertB	8	8	43	0.38	164	0.000164	2317.073171	S

PNDe_vertB	8	11	44	0.3929	202	0.000202	1945.049505	S
PNDe_vertB	8	14	45	0.4271	180	0.00018	2372.777778	S
PNDe_vertB	9	3	46	0.4271	154	0.000154	2773.376623	N
PNDe_vertB	9	6	47	0.3929	170	0.00017	2311.176471	S
PNDe_vertB	9	9	48	0.38	206	0.000206	1844.660194	S
PNDe_vertB	9	12	49	0.3917	224	0.000224	1748.660714	S
PNDe_vertB	9	15	50	0.4271	150	0.00015	2847.333333	S
PNDe_vertB	10	4	51	0.4271	226	0.000226	1889.823009	S
PNDe_vertB	10	7	52	0.3917	186	0.000186	2105.913978	S
PNDe_vertB	10	10	53	0.38	292	0.000292	1301.369863	S
PNDe_vertB	10	13	54	0.3929	214	0.000214	1835.981308	S
PNDe_vertB	10	16	55	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N
PNDe_vertB	11	5	56	0.4271	202	0.000202	2114.356436	S
PNDe_vertB	11	8	57	0.3929	204	0.000204	1925.980392	S
PNDe_vertB	11	11	58	0.38	174	0.000174	2183.908046	S
PNDe_vertB	11	14	59	0.3917	142	0.000142	2758.450704	S
PNDe_vertB	11	17	60	0.4271	170	0.00017	2512.352941	N
PNDe_vertB	12	6	61	0.4271	240	0.00024	1779.583333	S
PNDe_vertB	12	9	62	0.3917	208	0.000208	1883.173077	S
PNDe_vertB	12	12	63	0.38	152	0.000152	2500	S
PNDe_vertB	12	15	64	0.3929	140	0.00014	2806.428571	N
PNDe_vertB	12	18	65	0.4271	150	0.00015	2847.333333	N
PNDe_vertB	13	7	66	0.4271	222	0.000222	1923.873874	S
PNDe_vertB	13	10	67	0.3929	168	0.000168	2338.690476	S
PNDe_vertB	13	13	68	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDe_vertB	13	16	69	0.3917	140	0.00014	2797.857143	N
PNDe_vertB	13	19	70	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N

PNDe_vertB	14	8	71	0.4271	218	0.000218	1959.174312	S
PNDe_vertB	14	11	72	0.3917	150	0.00015	2611.333333	S
PNDe_vertB	14	14	73	0.38	136	0.000136	2794.117647	N
PNDe_vertB	14	17	74	0.3929	152	0.000152	2584.868421	N
PNDe_vertB	14	20	75	0.4271	170	0.00017	2512.352941	N
PNDe_vertB	15	9	76	0.4271	208	0.000208	2053.365385	S
PNDe_vertB	15	12	77	0.3929	156	0.000156	2518.589744	N
PNDe_vertB	15	15	78	0.38	148	0.000148	2567.567568	N
PNDe_vertB	15	18	79	0.3917	158	0.000158	2479.113924	N
PNDe_vertB	15	21	80	0.4271	278	0.000278	1536.330935	S
PNDe_vertB	16	10	81	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDe_vertB	16	13	82	0.3917	150	0.00015	2611.333333	N
PNDe_vertB	16	16	83	0.38	148	0.000148	2567.567568	N
PNDe_vertB	16	19	84	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDe_vertB	16	22	85	0.4271	232	0.000232	1840.948276	S
PNDe_vertB	17	11	86	0.4271	170	0.00017	2512.352941	N
PNDe_vertB	17	14	87	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDe_vertB	17	17	88	0.38	140	0.00014	2714.285714	N
PNDe_vertB	17	20	89	0.3917	162	0.000162	2417.901235	S
PNDe_vertB	17	23	90	0.4271	250	0.00025	1708.4	S
PNDe_vertB	18	12	91	0.4271	150	0.00015	2847.333333	N
PNDe_vertB	18	15	92	0.3917	142	0.000142	2758.450704	N
PNDe_vertB	18	18	93	0.38	136	0.000136	2794.117647	N
PNDe_vertB	18	21	94	0.3929	192	0.000192	2046.354167	S
PNDe_vertB	18	24	95	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDe_vertB	19	13	96	0.4271	168	0.000168	2542.261905	N
PNDe_vertB	19	16	97	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N

PNDe_ vertB	19	19	98	0.38	150	0.00015	2533.333333	S
PNDe_ vertB	19	22	99	0.3917	166	0.000166	2359.638554	S
PNDe_ vertB	19	25	100	0.4271	168	0.000168	2542.261905	N
PNDe_ vertB	20	14	101	0.4271	158	0.000158	2703.164557	N
PNDe_ vertB	20	17	102	0.3917	156	0.000156	2510.897436	N
PNDe_ vertB	20	20	103	0.38	162	0.000162	2345.679012	S
PNDe_ vertB	20	23	104	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDe_ vertB	20	26	105	0.4271	164	0.000164	2604.268293	N
PNDe_ vertB	21	15	106	0.4271	166	0.000166	2572.891566	N
PNDe_ vertB	21	18	107	0.3929	166	0.000166	2366.86747	S
PNDe_ vertB	21	21	108	0.38	222	0.000222	1711.711712	S
PNDe_ vertB	21	24	109	0.3917	182	0.000182	2152.197802	N
PNDe_ vertB	21	27	110	0.4271	182	0.000182	2346.703297	N
PNDe_ vertB	22	16	111	0.4271	170	0.00017	2512.352941	N
PNDe_ vertB	22	19	112	0.3917	166	0.000166	2359.638554	S
PNDe_ vertB	22	22	113	0.38	166	0.000166	2289.156627	S
PNDe_ vertB	22	25	114	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDe_ vertB	22	28	115	0.4271	166	0.000166	2572.891566	N
PNDe_ vertB	23	17	116	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDe_ vertB	23	20	117	0.3929	258	0.000258	1522.868217	S
PNDe_ vertB	23	23	118	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDe_ vertB	23	26	119	0.3917	152	0.000152	2576.973684	N
PNDe_ vertB	23	29	120	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PNDe_ vertB	24	18	121	0.4271	178	0.000178	2399.438202	S
PNDe_ vertB	24	21	122	0.3917	234	0.000234	1673.931624	S
PNDe_ vertB	24	24	123	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDe_ vertB	24	27	124	0.3929	158	0.000158	2486.708861	N

PNDe_vertB	24	30	125	0.4271	168	0.000168	2542.261905	N
PNDe_vertB	25	19	126	0.4271	250	0.00025	1708.4	S
PNDe_vertB	25	22	127	0.3929	162	0.000162	2425.308642	S
PNDe_vertB	25	25	128	0.38	138	0.000138	2753.623188	N
PNDe_vertB	25	28	129	0.3917	148	0.000148	2646.621622	N
PNDe_vertB	25	31	130	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PNDe_vertB	26	20	131	0.4271	206	0.000206	2073.300971	S
PNDe_vertB	26	23	132	0.3917	150	0.00015	2611.333333	N
PNDe_vertB	26	26	133	0.38	140	0.00014	2714.285714	N
PNDe_vertB	26	29	134	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDe_vertB	26	32	135	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N
PNDe_vertB	27	21	136	0.4271	208	0.000208	2053.365385	S
PNDe_vertB	27	24	137	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDe_vertB	27	27	138	0.38	152	0.000152	2500	N
PNDe_vertB	27	30	139	0.3917	170	0.00017	2304.117647	N
PNDe_vertB	27	33	140	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDe_vertB	28	22	141	0.4271	190	0.00019	2247.894737	N
PNDe_vertB	28	25	142	0.3917	172	0.000172	2277.325581	N
PNDe_vertB	28	28	143	0.38	150	0.00015	2533.333333	N
PNDe_vertB	28	31	144	0.3929	156	0.000156	2518.589744	N
PNDe_vertB	28	34	145	0.4271	188	0.000188	2271.808511	S
PNDe_vertB	29	23	146	0.4271	156	0.000156	2737.820513	N
PNDe_vertB	29	26	147	0.3929	178	0.000178	2207.303371	N
PNDe_vertB	29	29	148	0.38	156	0.000156	2435.897436	N
PNDe_vertB	29	32	149	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PNDe_vertB	29	35	150	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDe_vertB	30	24	151	0.4271	160	0.00016	2669.375	N

PNDe_ vertB	30	27	152	0.3917	136	0.000136	2880.147059	N
PNDe_ vertB	30	30	153	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDe_ vertB	30	33	154	0.3929	142	0.000142	2766.901408	S
PNDe_ vertB	30	36	155	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDe_ vertB	31	25	156	0.4271	190	0.00019	2247.894737	N
PNDe_ vertB	31	28	157	0.3929	170	0.00017	2311.176471	N
PNDe_ vertB	31	31	158	0.38	178	0.000178	2134.831461	S
PNDe_ vertB	31	32	159	0.3812	166	0.000166	2296.385542	S
PNDe_ vertB	31	34	160	0.3917	156	0.000156	2510.897436	S
PNDe_ vertB	32	26	161	0.4271	172	0.000172	2483.139535	N
PNDe_ vertB	32	29	162	0.3917	162	0.000162	2417.901235	S
PNDe_ vertB	32	31	163	0.3812	154	0.000154	2475.324675	S
PNDe_ vertB	32	32	164	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDe_ vertB	32	33	165	0.3816	166	0.000166	2298.795181	S
PNDe_ vertB	32	35	166	0.3929	142	0.000142	2766.901408	N
PNDe_ vertB	33	27	167	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDe_ vertB	33	30	168	0.3929	186	0.000186	2112.365591	S
PNDe_ vertB	33	32	169	0.3816	170	0.00017	2244.705882	S
PNDe_ vertB	33	33	170	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDe_ vertB	33	34	171	0.3812	150	0.00015	2541.333333	N
PNDe_ vertB	33	35	172	0.3855	148	0.000148	2604.72973	N
PNDe_ vertB	33	36	173	0.3917	206	0.000206	1901.456311	N
PNDe_ vertB	34	28	174	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDe_ vertB	34	31	175	0.3917	156	0.000156	2510.897436	S
PNDe_ vertB	34	33	176	0.3812	146	0.000146	2610.958904	N
PNDe_ vertB	34	34	177	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDe_ vertB	34	35	178	0.3816	136	0.000136	2805.882353	N

PNDe_ vertB	34	36	179	0.3855	138	0.000138	2793.478261	N
PNDe_ vertB	35	29	180	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDe_ vertB	35	32	181	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDe_ vertB	35	33	182	0.3855	156	0.000156	2471.153846	N
PNDe_ vertB	35	34	183	0.3816	150	0.00015	2544	N
PNDe_ vertB	35	35	184	0.38	138	0.000138	2753.623188	N
PNDe_ vertB	35	36	185	0.3812	146	0.000146	2610.958904	N
PNDe_ vertB	36	30	186	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDe_ vertB	36	33	187	0.3917	150	0.00015	2611.333333	N
PNDe_ vertB	36	34	188	0.3855	144	0.000144	2677.083333	N
PNDe_ vertB	36	35	189	0.3812	138	0.000138	2762.318841	N
PNDe_ vertB	36	36	190	0.38	142	0.000142	2676.056338	N

La velocità media della sezione è pari a 2.447 m/s, è un valore paragonabile con quello della sezione A-A'. In questo caso non ci sono particolari valori da segnalare, a parte qualche valore di velocità di circa 2.800 m/s. Queste alte velocità sono dovute forse allo stesso motivo suggerito precedentemente per quanto riguarda la posizione delle stazioni di misura oppure possono essere dovute all'attraversamento di una maggiore quantità di malta, visto che sembra sia la malta a far raggiungere al segnale velocità maggiori. L'istogramma dei tempi di volo (figura 6.40) evidenzia zone con valori più alti, rispetto alla sezione A-A', queste zone sono più diffuse e vi è meno delimitazione tra i valori che attraversano un difetto e quelli che non lo attraversano. In figura 6.41 sono illustrati nel dettaglio i percorsi che attraversano un difetto e quelli le cui stazioni emittenti si trovano proprio di fronte al difetto stesso. È interessante, anche per poter valutare la corretta acquisizione dei vari tempi di volo, plottare (figure 6.42, 6.43 e 6.44) solo i percorsi che partono da stazioni che non si trovano di fronte ad un difetto. Si ricava così anche il valore di velocità media nel caso di muratura costruita senza alcuna imperfezione. La velocità media per questa selezione di acquisizioni è pari a 2.438 m/s ed è molto simile al valore della velocità media di tutti i percorsi della sezione.

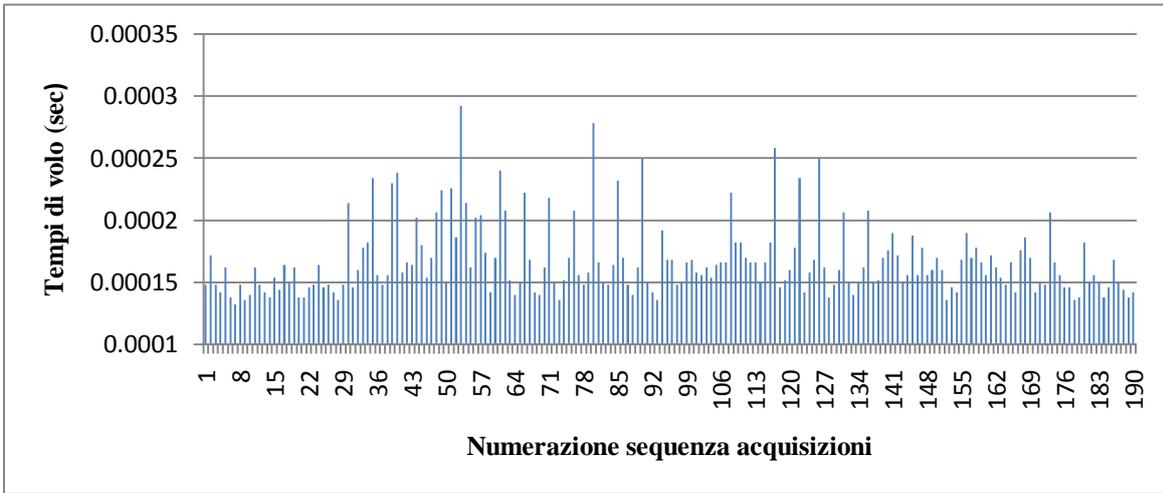


Figura 6.40 Muretto PNDE, sezione B-B', tempi di volo espressi in secondi

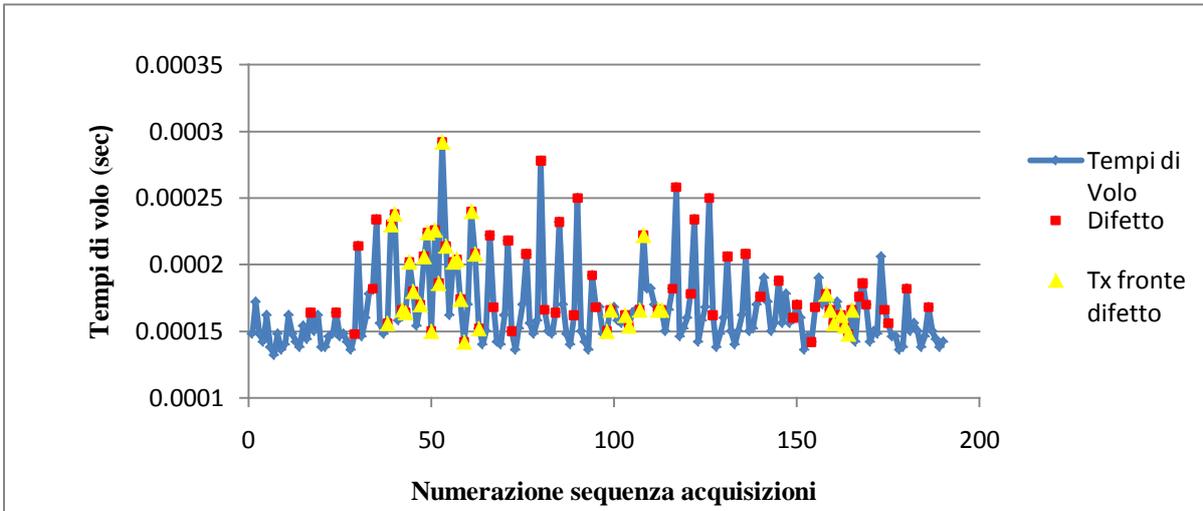


Figura 6.41 Muretto PNDE, sezione B-B', tempi di volo in secondi con dettaglio sui percorsi che incontrano un difetto

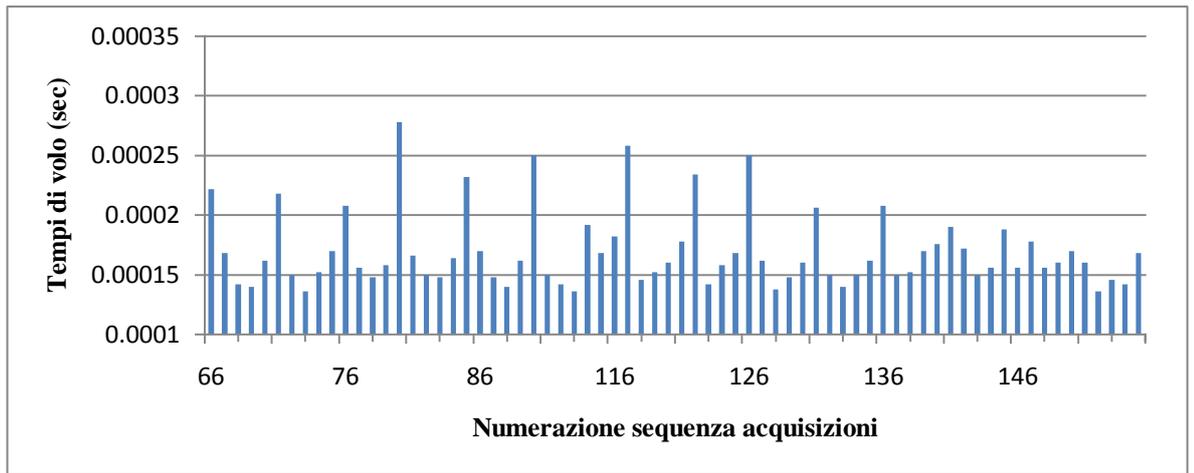


Figura 6.42 Muretto PNDE, sezione B-B', tempi di volo in secondi dei percorsi la cui stazione sorgente non si trova di fronte ad un difetto

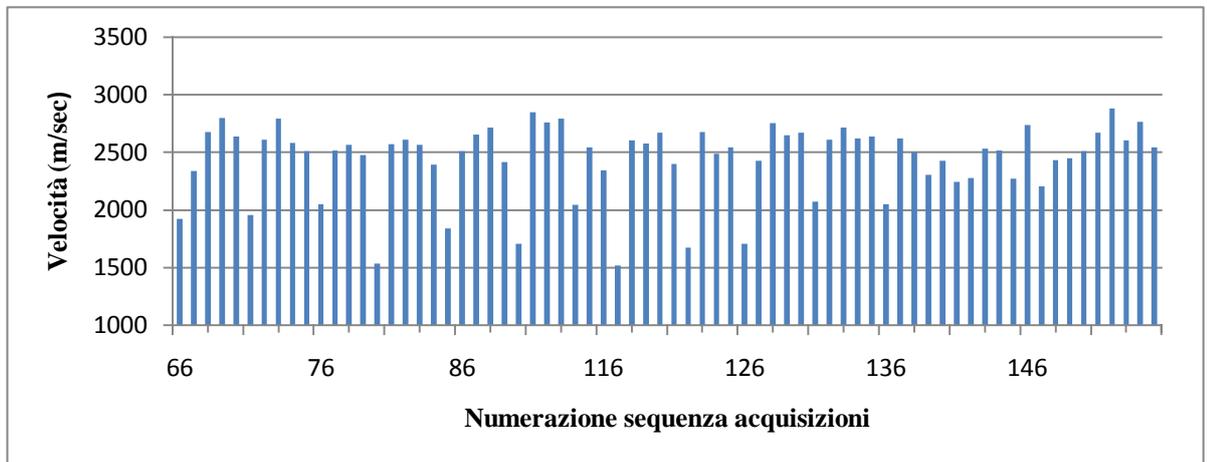


Figura 6.43 Muretto PNDE, sezione B-B', velocità in m/s dei percorsi la cui stazione sorgente non si trova di fronte ad un difetto

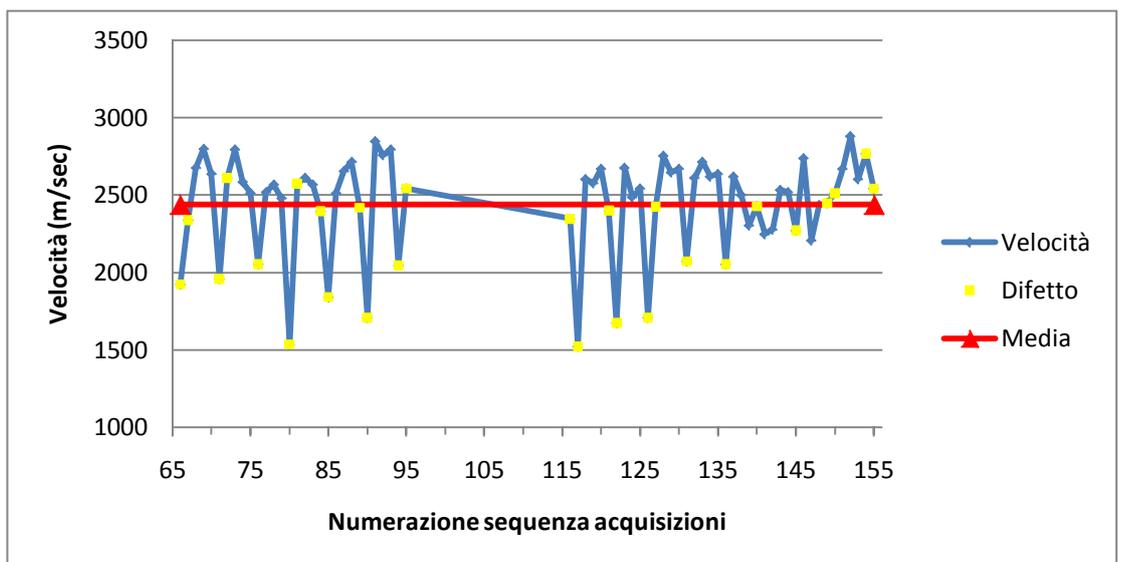


Figura 6.44 Muretto PNDE, sezione B-B', velocità in m/s dei percorsi la cui stazione sorgente non si trova di fronte ad un difetto e loro velocità media

In figura 6.44 si denota l'aumento dei percorsi che toccano un difetto rispetto all'analogo grafico per la sezione A-A'. È una spiegazione anche al fatto che la velocità media sia confrontabile con quella ottenuta per tutti i percorsi della sezione. Una volta conclusa questa prima analisi sui tempi di volo si imposta la tabella che deve essere fornita al software di inversione dei dati per ottenere le mappe di velocità della sezione. Prima di visualizzare i risultati si crea un grafico formato dalla velocità e dalla lunghezza del percorso delle acquisizioni per poter valutare l'anisotropia del materiale. Nella figura 6.45 si nota un andamento della retta lineare color nero non esattamente orizzontale. Si può ugualmente considerare il parametro di default all'interno del Geotom. I tipi di griglie di pixel utilizzati sono gli stessi già usati per le prove della sezione A-A'. Si inizia con una griglia di 19x52 pixel e iterazioni straight, in blocchi da 3 e da 5 (tabella 6.10).

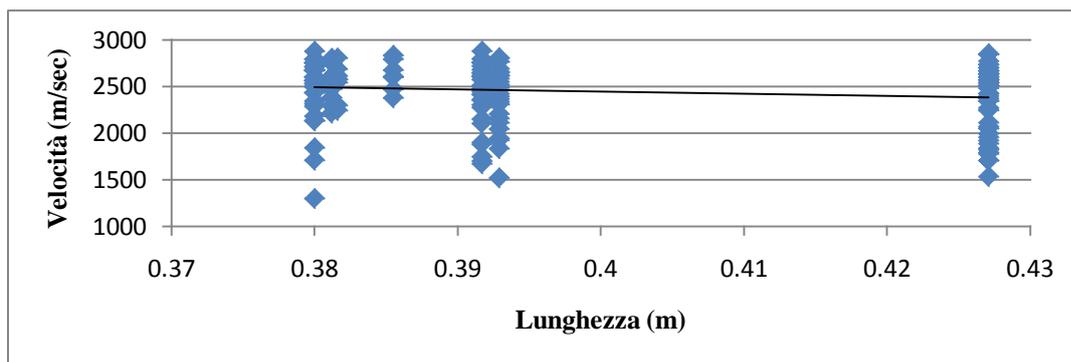


Figura 6.45 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico velocità-lunghezza del percorso

Tabella 6.10 Muretto PNDE, sezione B-B', parametri di inversione per la griglia di 19X52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertB_100	3	0	3	PNDEvertB_101	Figura 6.46
PNDEvertB_101	5	0	8	PNDEvertB_102	Figura 6.47
PNDEvertB_102	5	0	13	PNDEvertB_103	Figura 6.48
PNDEvertB_103	5	0	18	PNDEvertB_104	Figura 6.49
PNDEvertB_104	5	0	23	PNDEvertB_105	Figura 6.50

Le prime immagini che si ottengono (figure 6.46-6.50) confermano alcuni risultati già ottenuti nei casi precedenti sia orizzontali che verticali. Sicuramente l'uso di sole iterazioni straight non dà risultati così soddisfacenti, ma si ha già una prima visione d'insieme dove si nota che l'individuazione dei difetti è piuttosto nebulosa. Considerando dall'ottava iterazioni in avanti, la zona allungata sulla parte bassa del muretto dovrebbe rappresentare il difetto alto tre corsi; non si ha indicazione né della forma, poco della posizione e per niente delle dimensioni. È una conclusione che ci saremmo aspettati vista la posizione reale del difetto in prossimità di metà dello spessore. Il difetto centrale viene riprodotto all'incirca nella posizione in cui si trova, ma "schacciato" verso il retro del muretto, nonostante la sua posizione non sia così superficiale, ma pur sempre più vicina al retro. Il difetto più in alto viene rappresentato da un'area non ben definita di velocità medio-alta (color giallo-arancio); essendo in posizione centrale lungo lo spessore ed essendo alto un corso, è un risultato che non ci sorprende.

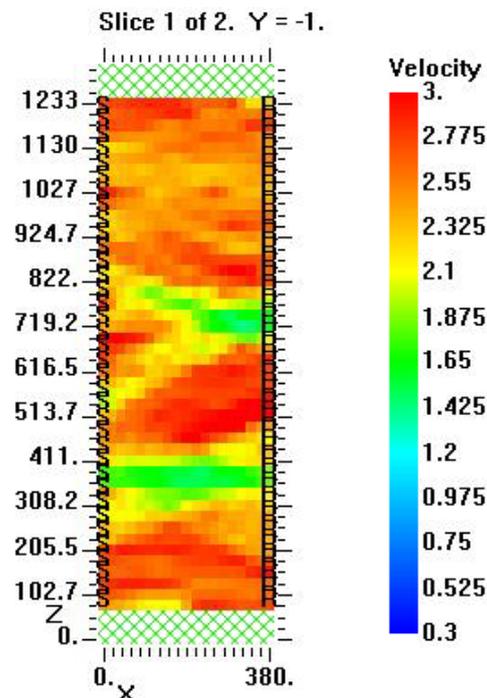


Figura 6.46 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_101

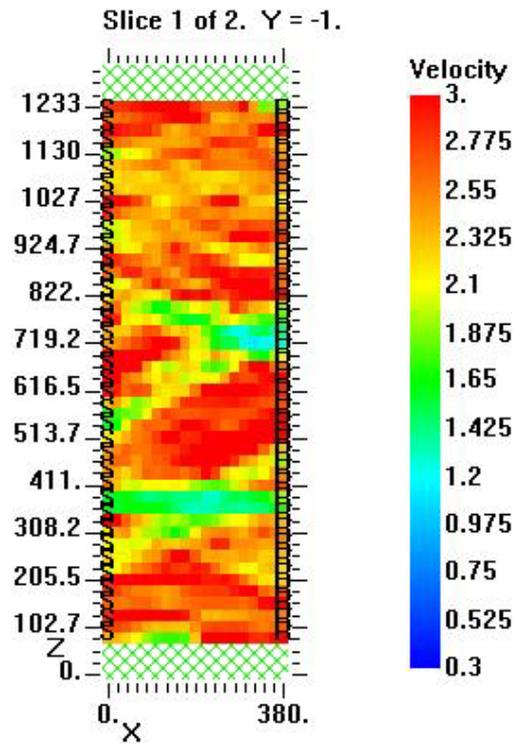


Figura 6.47 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 8 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_102

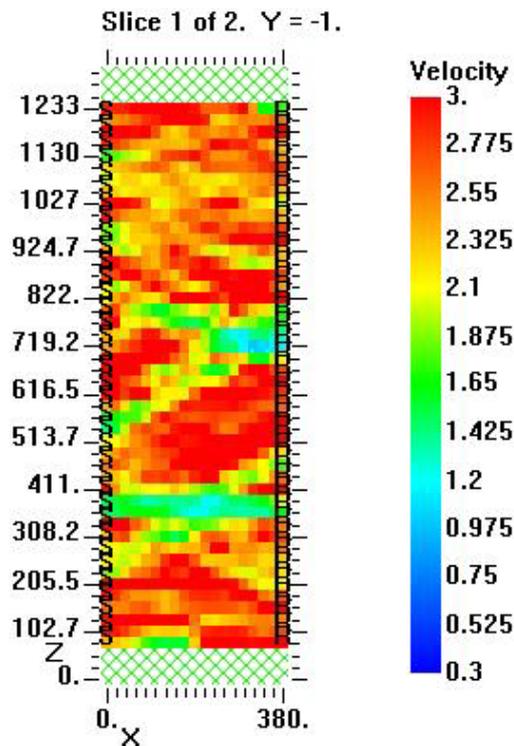


Figura 6.48 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 13 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_103

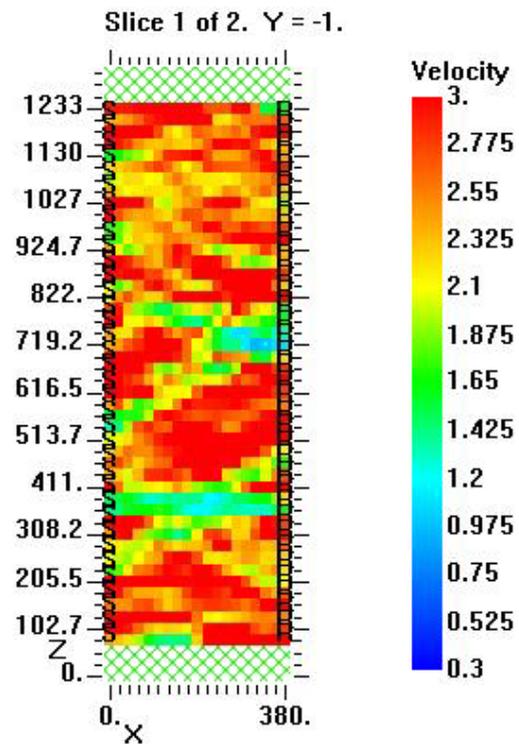


Figura 6.49 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 18 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_104

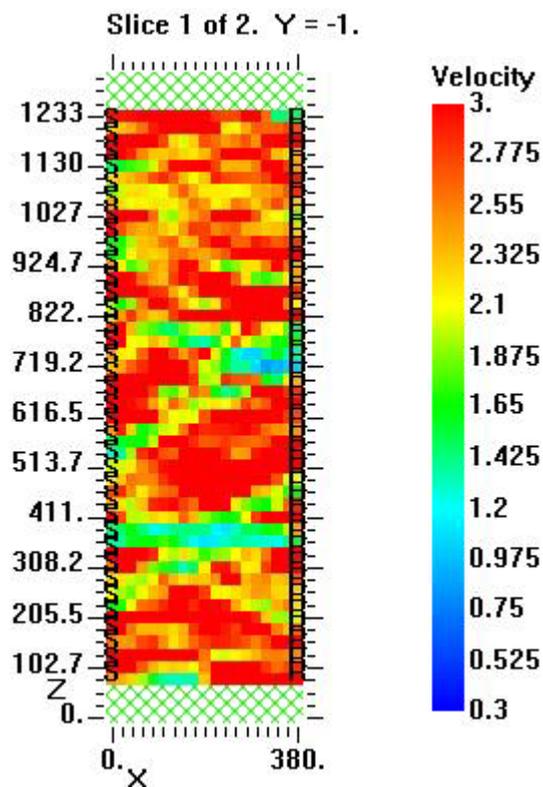


Figura 6.50 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 23 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_105

I valori dei residui (figura 6.51) iniziano da un valore intorno a 75 per poi calare e tendere ad un valore di 10. Il metodo converge già a partire dalla quinta iterazione, in quanto i valori successivi tendono asintoticamente a 10. Tra le immagini infatti la differenza si nota soprattutto tra la quella con 3 iterazioni e quella con 8 iterazione straight, mentre quelle con un numero di iterazioni maggiori non variano, se non di piccolissimi dettagli. Le iterazioni curved, eseguite in gruppi da 5 come quelle straight, sono riepilogate nella tabella 6.11 e le immagini tomografiche relative nelle figure 6.52 - 6.55.

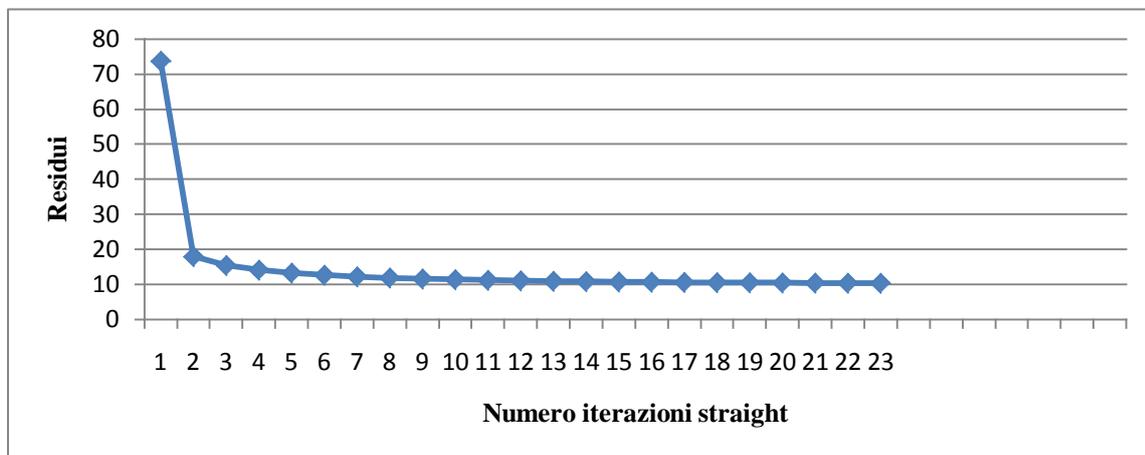


Figura 6.51 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight per una griglia di 19x52 pixel

Tabella 6.11 Muretto PNDE, sezione B-B', parametri di inversione per la griglia di 19x52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertB_100	3	0	3	PNDEvertB_101	Figura 6.46
PNDEvertB_101	0	5	8	PNDEvertB_106	Figura 6.52
PNDEvertB_106	0	5	13	PNDEvertB_107	Figura 6.53
PNDEvertB_107	0	5	18	PNDEvertB_108	Figura 6.54
PNDEvertB_108	0	5	23	PNDEvertB_109	Figura 6.55

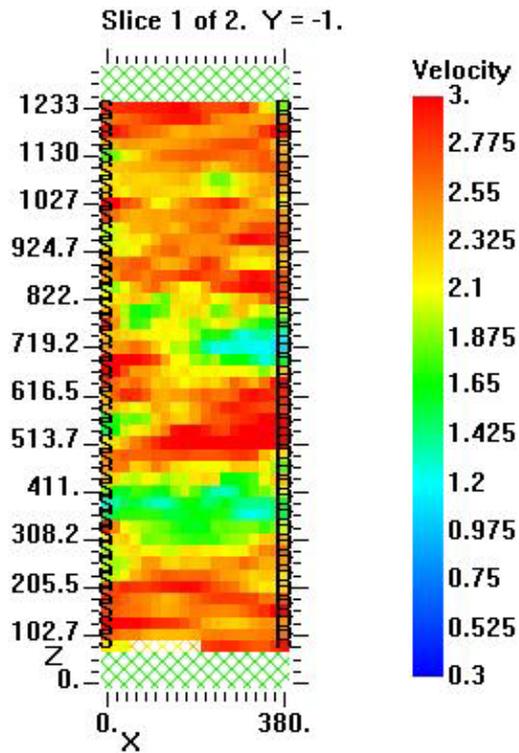


Figura 6.52 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_106

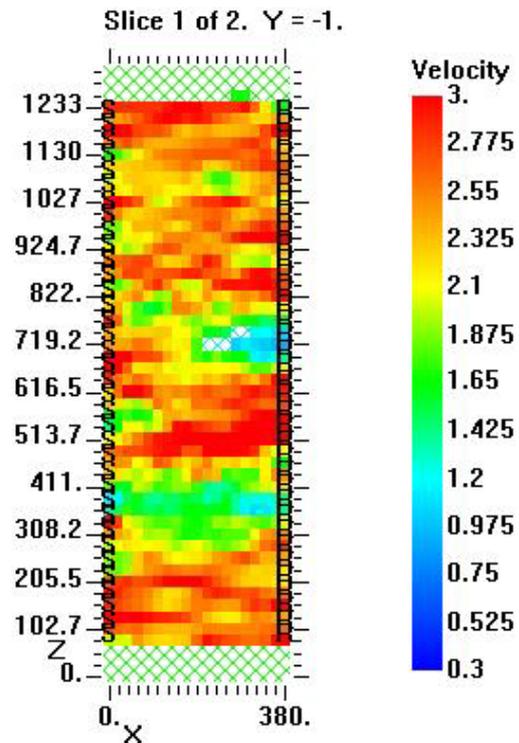


Figura 6.53 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_107

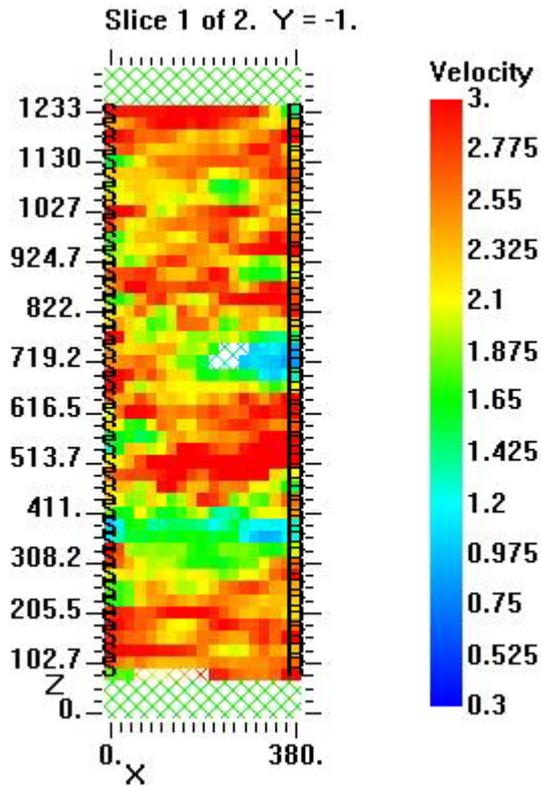


Figura 6.54 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 19x 52 pixel, file output PNDEvertB_108

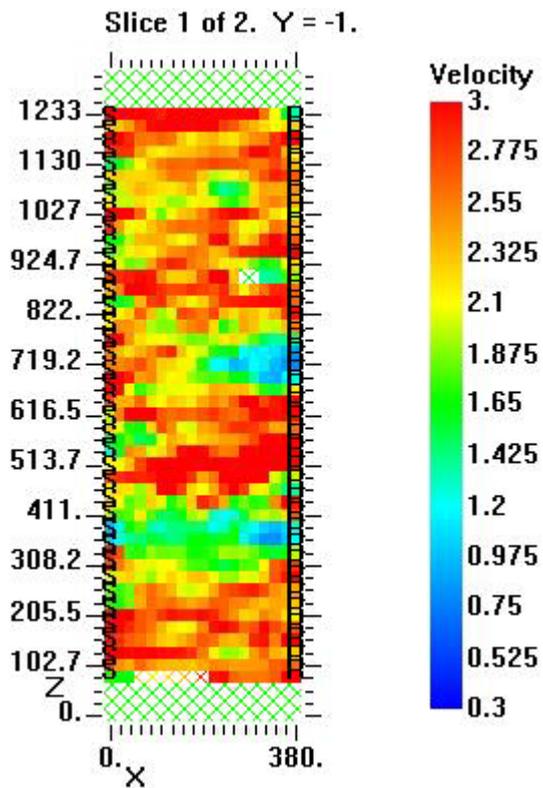


Figura 6.55 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDEvertB_109

Le immagini ottenute con iterazioni curved identificano meglio il difetto centrale, ma non danno ugualmente una definizione precisa in termini soprattutto di forma e dimensione. Il difetto più in basso corrisponde alla zona color verde nella parte inferiore del muretto; quest'ultima si estende per tutto lo spessore per cui non si riesce a definire la corretta ubicazione dell'imperfezione lungo lo spessore. Si individua solamente che vi è una zona in stato degradato, ma non si riesce a capire che c'è un unico difetto alto tre corsi. Nelle figure 6.53, 6.54 e 6.55 si notano delle aree non colorate che indicano che il programma in quello specifico punto è andato in loop. I residui (figura 6.56) delle iterazioni curved iniziano ovviamente dallo stesso valore di quelle straight, avendo le prime 3 iterazioni straight, poi decrescono fino ad un valore all'incirca di 12. La poca differenza fra le immagini ottenute dopo l'ottava iterazione viene confermato anche dal grafico dei residui, dove i valori dopo l'ottava iterazioni si stabilizzano intorno a 13-14, senza ulteriori picchi in crescendo e in diminuendo. Si prosegue aumentando le dimensioni dei pixel con una griglia di 19x33. Si fanno eseguire dal programma iterazioni curved, in quanto quelle straight non mostrano risultati migliori. Nella tabella 6.12 sono riepilogati i file input e output e di seguito le relative immagini tomografiche (figure 6.57 - 6.61).

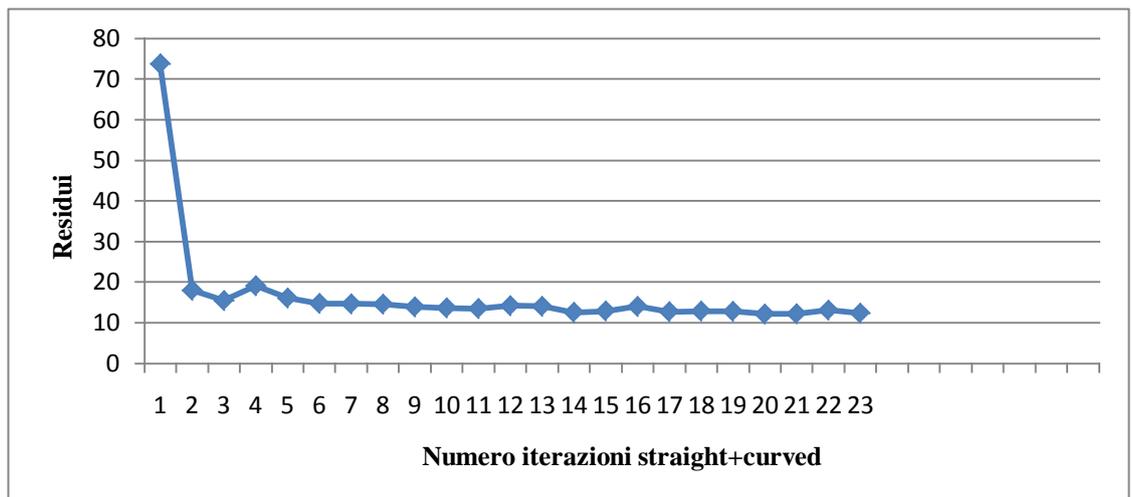


Figura 6.56 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 19x52 pixel

Tabella 6.12 Muretto PNDE, sezione B-B', parametri di inversione per una griglia di 19x33 pixel

Pixel : 19x33		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertB_110	3	0	3	PNDEvertB_111	Figura 6.57
PNDEvertB_111	0	5	8	PNDEvertB116	Figura 6.58
PNDEvertB_116	0	5	13	PNDEvertB117	Figura 6.59
PNDEvertB_117	0	5	18	PNDEvertB118	Figura 6.60
PNDEvertB_118	0	5	23	PNDEvertB119	Figura 6.61

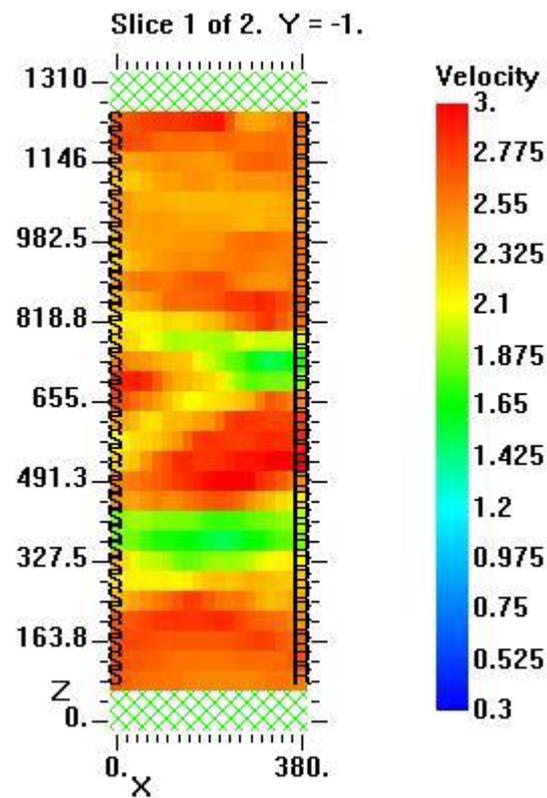


Figura 6.57 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertB_111

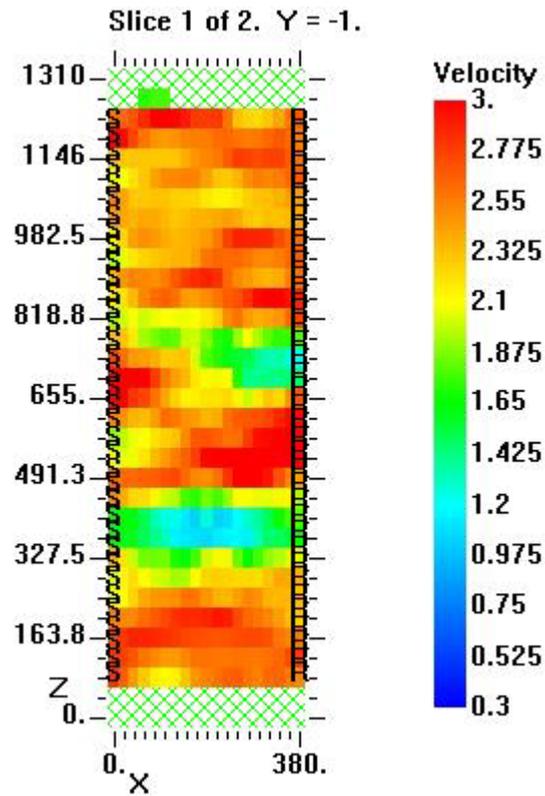


Figura 6.58 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertB_116

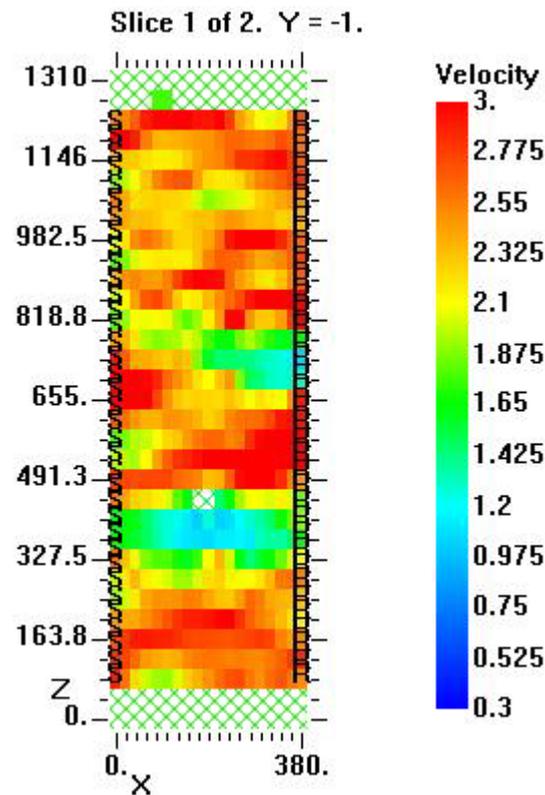


Figura 6.59 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertB_117

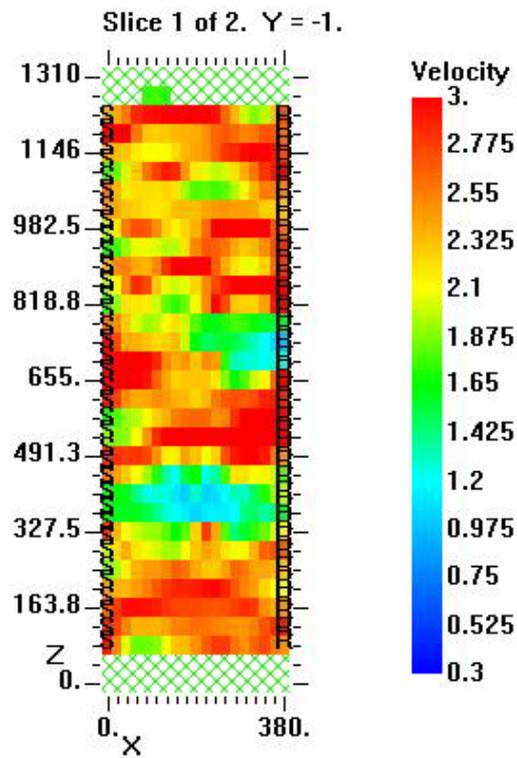


Figura 6.60 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazione straight e 15 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertB_118

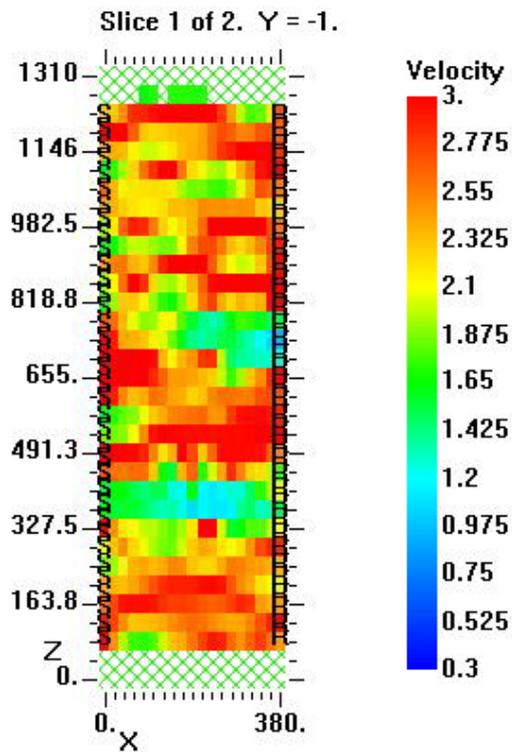


Figura 6.61 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x33 pixel, file output PNDEvertB_119

L'aumento della dimensione dei lati dei pixel non influisce di molto sul risultato, soprattutto, perchè la dimensione non è molto differente da quella presente. È curioso vedere che il difetto più in basso viene individuato da una zona color verde, ma più sottile dell'immagine analoga del caso con griglia 19x52 pixel. Il difetto centrale rimane quello visualizzato meglio e quello in alto risulta ancora "invisibile". Per quanto riguarda i valori dei residui (figura 6.62) già dalla quinta iterazioni si ha una convergenza del metodo. La griglia successiva è costituita da 9 pixel in orizzontale e 31 in verticale. Le iterazioni totali sono sempre 23, con un blocco da 3 straight e 20 curved in gruppi da 5 iterazioni ciascuno (tabella 6.13). Le mappe di velocità dei file output ottenuti sono visualizzati nelle immagini in figura 6.63 - 6.67.

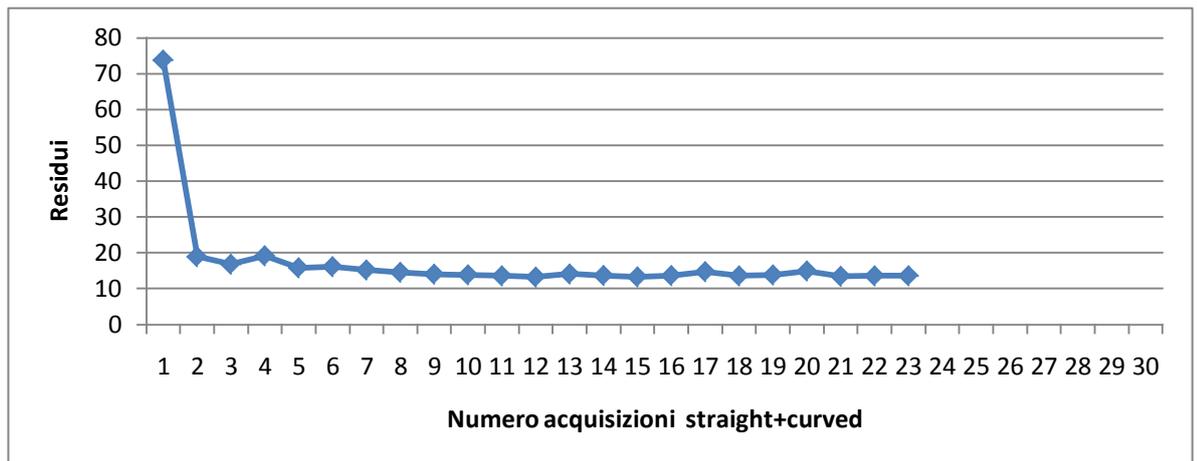


Figura 6.62 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved con griglia di 19x33 pixel

Tabella 6.13 Muretto PNDE, sezione B-B', parametri di inversione per una griglia di 9x31 pixel

Pixel : 9x31		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertB_120	3	0	3	PNDEvertB_121	Figura 6.63
PNDEvertB_121	0	5	8	PNDEvertB_126	Figura 6.64
PNDEvertB_126	0	5	13	PNDEvertB_127	Figura 6.65
PNDEvertB_127	0	5	18	PNDEvertB_128	Figura 6.66
PNDEvertB_128	0	5	23	PNDEvertB_129	Figura 6.67

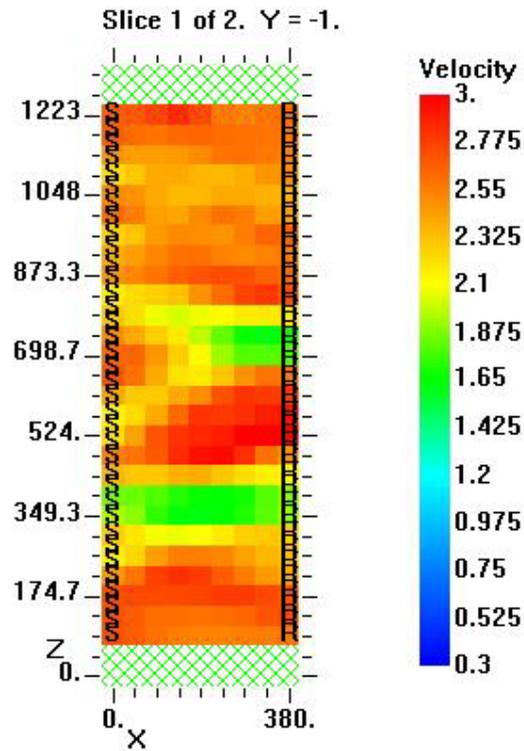


Figura 6.63 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertB_121

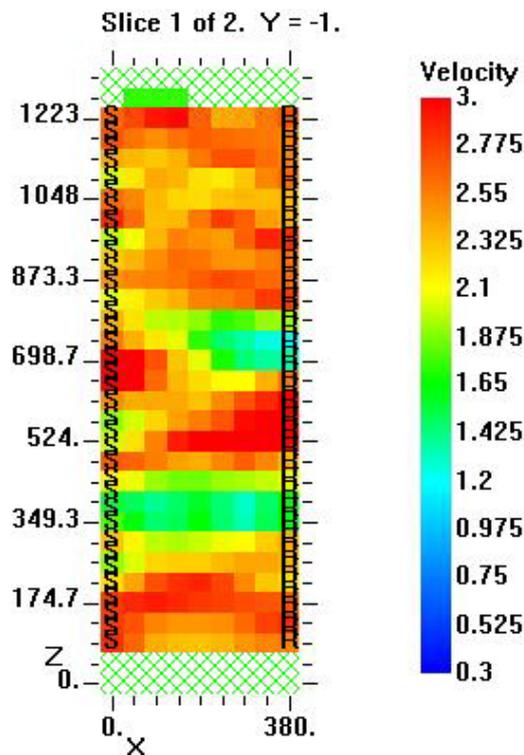


Figura 6.64 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertB_126

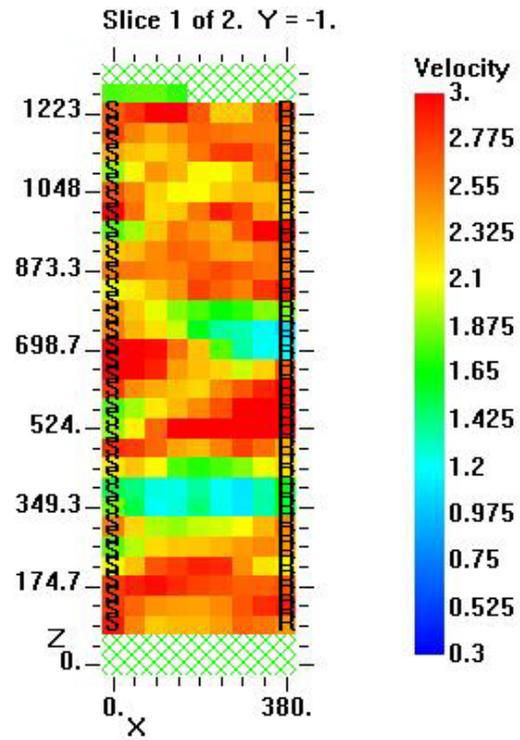


Figura 6.65 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertB_127

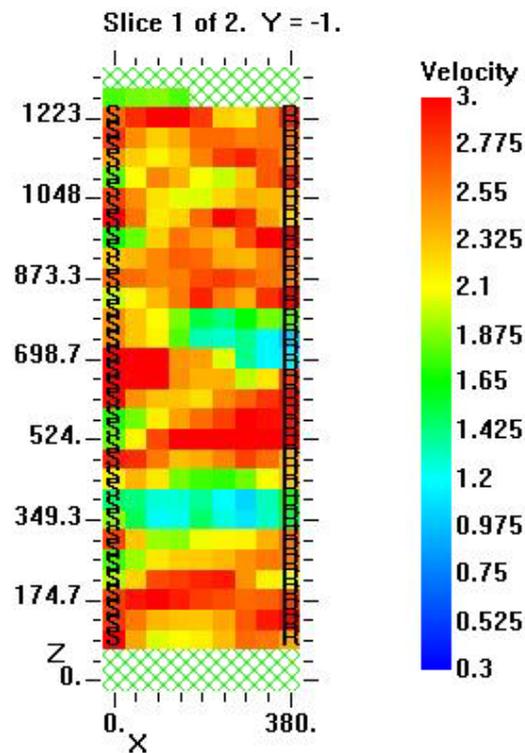


Figura 6.66 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertB_128

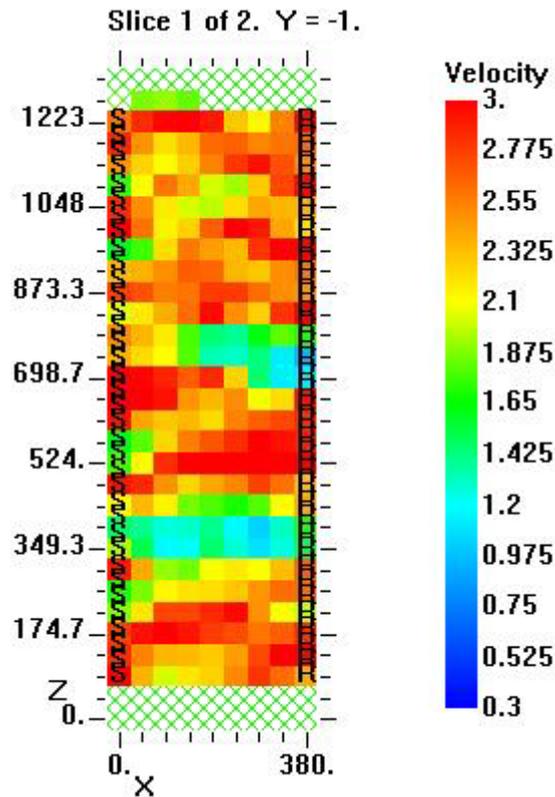


Figura 6.67 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 9x31 pixel, file output PNDEvertB_129

Le dimensioni di 4 cm di lato del pixel danno una campitura piuttosto sgranata, mettendo in evidenza i contorni dei pixel in cui è suddivisa la sezione. I difetti sono visualizzati nello stesso modo delle altre prove, anzi sembra che il difetto centrale in questo caso sia di forma più allungata nella direzione però sbagliata rispetto a quello reale. I residui (figura 6.68) tendono a valori finali leggermente più bassi rispetto ai casi precedenti. L'ultima prova effettuata è stata fatta con una griglia di 11x38 pixel. Nella tabella 6.14 e nelle figure 6.69-6.74 sono mostrati il riepilogo delle iterazioni, le immagini tomografiche ottenute e il grafico dei residui.

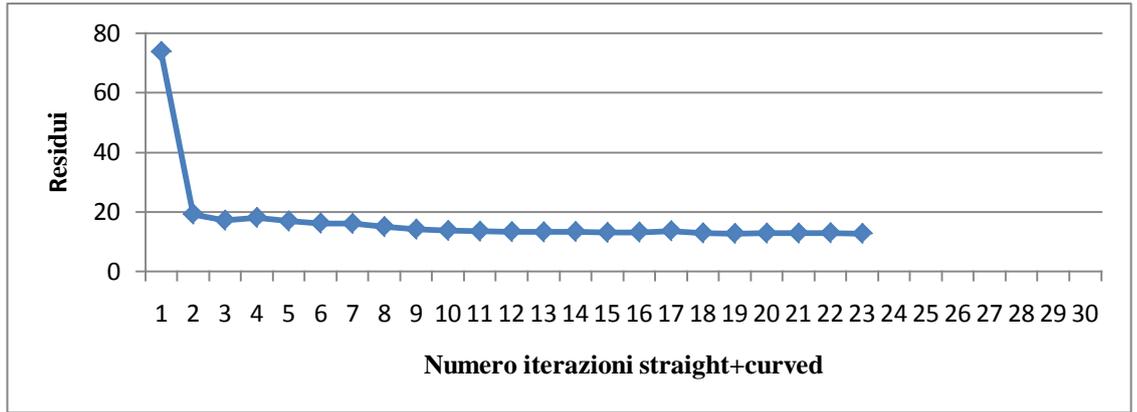


Figura 6.68 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved con griglia di 9x31 pixel

Tabella 6.13 Muretto PNDE, sezione B-B', parametri di inversione per una griglia di 11x38 pixel,

Pixel : 11x38		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDEvertB_130	3	0	3	PNDEvertB_131	Figura 6.69
PNDEvertB_131	0	5	8	PNDEvertB_136	Figura 6.70
PNDEvertB_136	0	5	13	PNDEvertB_137	Figura 6.71
PNDEvertB_137	0	5	18	PNDEvertB_138	Figura 6.72
PNDEvertB_138	0	5	23	PNDEvertB_139	Figura 6.73

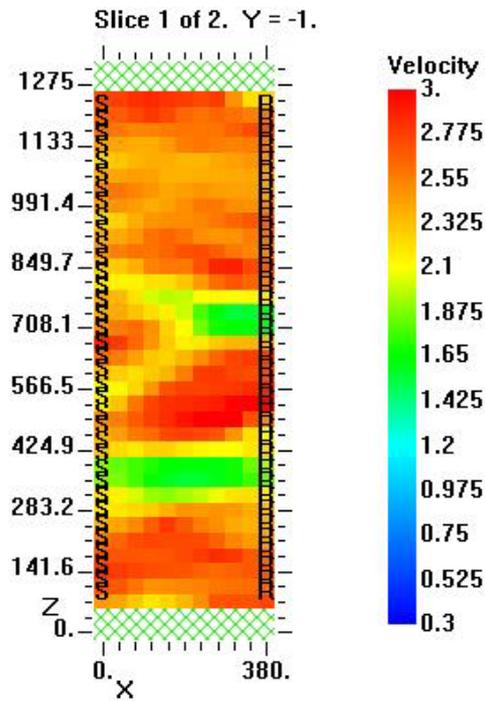


Figura 6.69 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertB_131

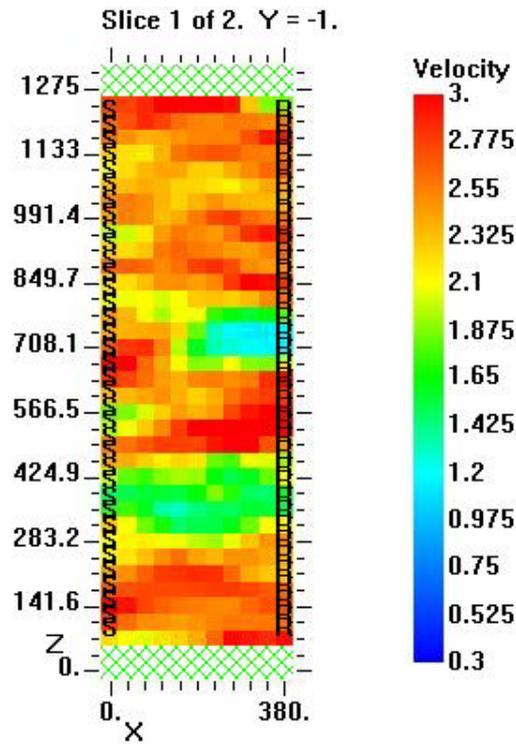


Figura 6.70 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertB_136

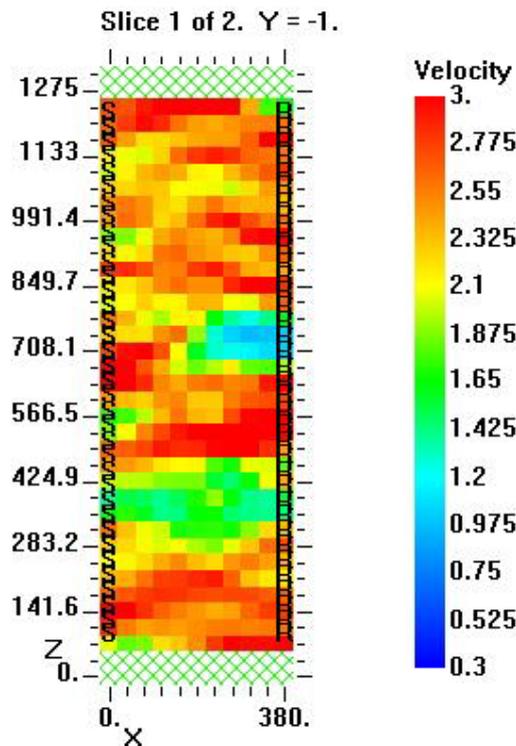


Figura 6.71 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertB_137

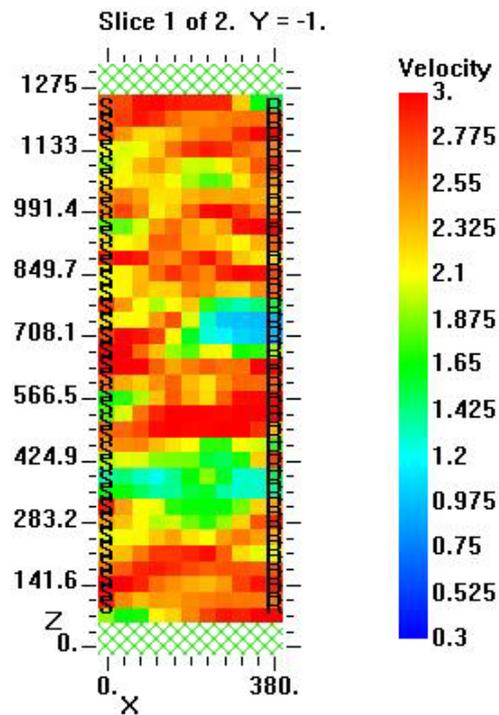


Figura 6.72 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertB_138

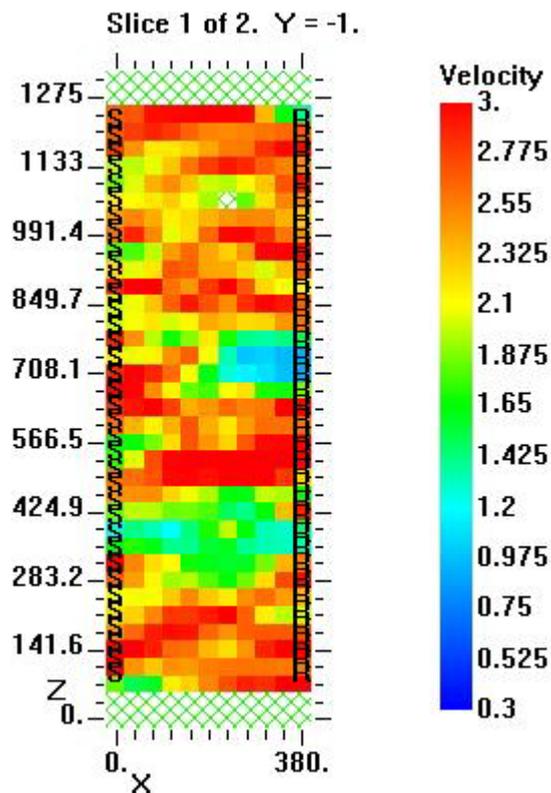


Figura 6.73 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDEvertB_139

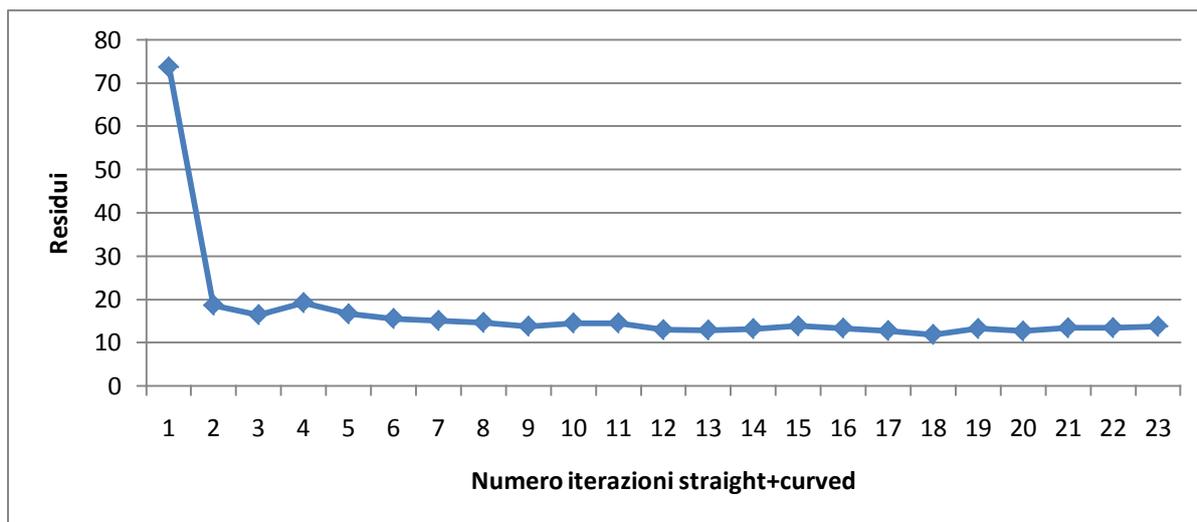


Figura 6.74 Muretto PNDE, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved con 11x38 pixel

Questo caso è più interessante rispetto agli altri in quanto si può notare qualche miglioramento nell'individuazione dei difetti. La zona verde nella parte inferiore dà un'idea della disposizione più verticale che orizzontale del difetto. Il difetto centrale è concentrato vicino al bordo retrostante del muretto e non si "allunga" lungo tutto lo spessore, mentre il difetto più in alto potrebbe essere associabile alla piccola area verde nella parte centrale superiore. I valori dei residui rispecchiano le considerazioni fatte, in quanto tendono asintoticamente già dalla quinta iterazione ad un valore più basso di 12. È interessante vedere l'andamento dei raggi mandati da ciascuna stazione sorgente nel caso di 8 iterazioni con griglia di 11x38. La figura 6.75 mostra due zone evitate dai raggi: una zona nella parte inferiore dove è presente il difetto alto tre corsi e una zona centrale spostata verso la sorgente ricevente R dove è collocato il difetto alto due corsi. Questa visualizzazione ci porta a pensare che il programma sia riuscito effettivamente ad invertire i dati in modo corretto, anche se poi la rappresentazione nelle immagini non è così entusiasmante. D'altronde si deve tener conto dei limiti della tecnica in fatto di risoluzione e di utilizzo di un numero di raggi per ventaglio non elevatissimo.

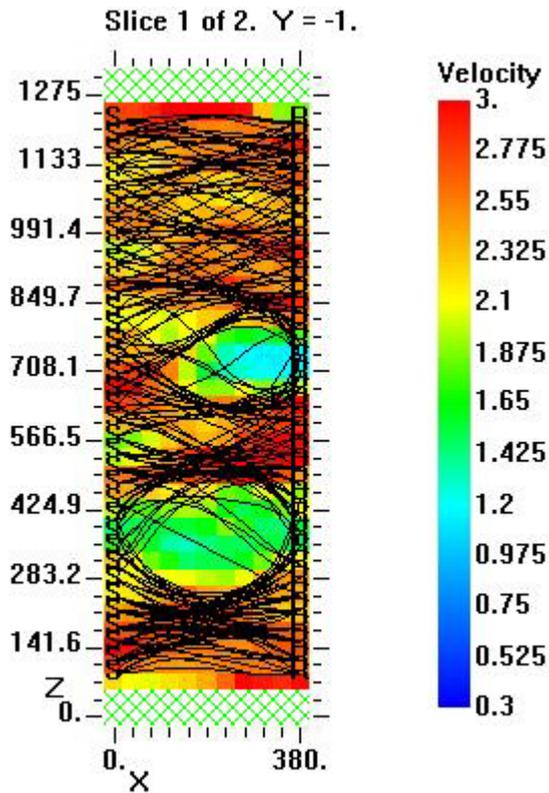


Figura 6.75 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità del file output PNDEvertB_136ray

6.2 Muretto PNDF

Il provino PNDF presenta dei corsi inferiori con tessitura standard di laterizi e malta e dal corso 9 la tessitura muraria diventa una muratura a sacco. I dettagli sulla costituzione del muretto PNDF si trovano nel capitolo 3, qui di seguito si riporta solamente il prospetto (figura 6.76) e le sezioni A-A' e B-B' (figura 6.77) per ricordare la morfologia della sezione. Le stazioni di misura anche in questo caso sono distanziate di 2 cm dalla linea mediana dei due difetti presenti nel corso 5 per poter ricevere il segnale su superfici lisce come quelle del mattone. Le linee rosse indicano le sezioni A-A' e B-B', mentre le linee blu indicano le posizioni dove sono state eseguite le acquisizioni.

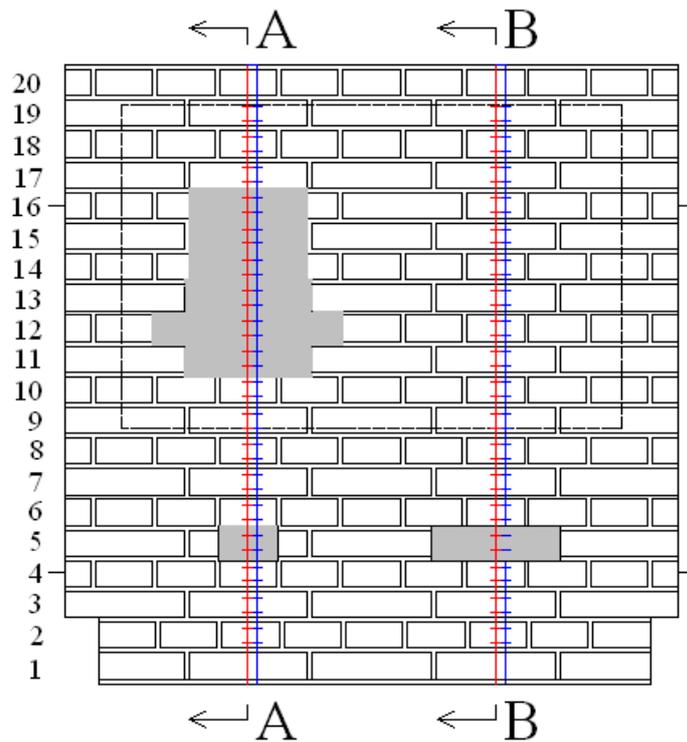


Figura 6.76 Muretto PPDF, sezione A-A', prospetto

Sezione A-A'

Sezione B-B'

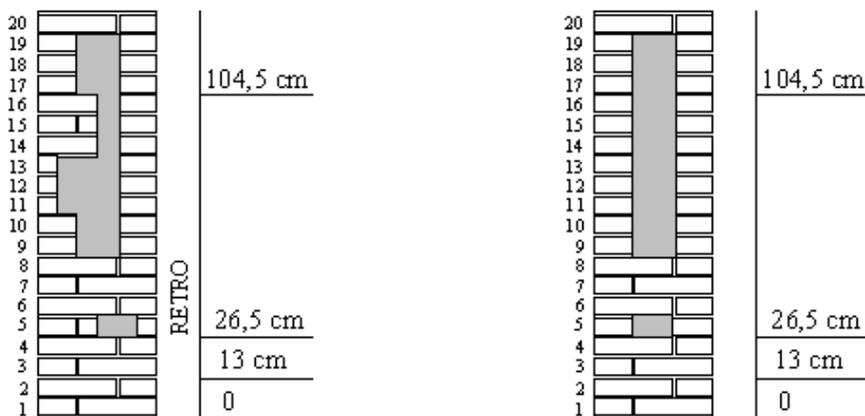


Figura 6.77 Muretto PPDF, sezioni A-A' e B-B'

6.2.1. SEZIONE A-A': confronto tra griglia di 19x52 pixel e griglia di 11x38 pixel

La sezione A-A' presenta un difetto distante 19 cm dal fronte del muretto in corrispondenza del corso 5 e dal corso 9 fino al 19 una zona di muratura a sacco.

La prima operazione eseguita, dopo aver riportato le stazioni sulla superficie del muretto, è stata quella di acquisire il tempo di volo che il segnale impiega per percorrere la distanza tra sorgente e ricevitore. Nella tabella 6.14 sono riportati i tempi di volo per ciascun percorso e sono calcolate le velocità, dopo aver calcolato con Autocad le lunghezze di ciascun percorso. La colonna più a destra indica se il segnale incontra un difetto o la zona di muratura a sacco.

Tabella 6.14 Provino PNDF, sezione A-A': valori di analisi e elaborazioni dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Difetto
PNDf_vertA	1	1	1	0.38	136	0.000136	2794.117647	N
PNDf_vertA	1	2	2	0.3812	144	0.000144	2647.222222	N
PNDf_vertA	1	3	3	0.3855	140	0.00014	2753.571429	N
PNDf_vertA	1	4	4	0.3917	148	0.000148	2646.621622	N
PNDf_vertA	1	7	5	0.4271	156	0.000156	2737.820513	N
PNDf_vertA	2	1	6	0.3812	164	0.000164	2324.390244	N
PNDf_vertA	2	2	7	0.38	140	0.00014	2714.285714	N
PNDf_vertA	2	3	8	0.3816	154	0.000154	2477.922078	N
PNDf_vertA	2	4	9	0.3855	184	0.000184	2095.108696	N
PNDf_vertA	2	5	10	0.3929	146	0.000146	2691.09589	N
PNDf_vertA	2	8	11	0.4271	224	0.000224	1906.696429	S
PNDf_vertA	3	1	12	0.3855	154	0.000154	2503.246753	N
PNDf_vertA	3	2	13	0.3816	144	0.000144	2650	N
PNDf_vertA	3	3	14	0.38	144	0.000144	2638.888889	N
PNDf_vertA	3	4	15	0.3812	150	0.00015	2541.333333	N
PNDf_vertA	3	6	16	0.3917	158	0.000158	2479.113924	N
PNDf_vertA	3	9	17	0.4271	192	0.000192	2224.479167	S
PNDf_vertA	4	1	18	0.3917	152	0.000152	2576.973684	N

PNDf_ vertA	4	2	19	0.3855	136	0.000136	2834.558824	N
PNDf_ vertA	4	3	20	0.3812	136	0.000136	2802.941176	N
PNDf_ vertA	4	4	21	0.38	138	0.000138	2753.623188	N
PNDf_ vertA	4	5	22	0.3816	140	0.00014	2725.714286	N
PNDf_ vertA	4	7	23	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertA	4	10	24	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertA	5	2	25	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDf_ vertA	5	4	26	0.3816	146	0.000146	2613.69863	N
PNDf_ vertA	5	5	27	0.38	140	0.00014	2714.285714	N
PNDf_ vertA	5	6	28	0.3812	150	0.00015	2541.333333	N
PNDf_ vertA	5	8	29	0.3917	180	0.00018	2176.111111	S
PNDf_ vertA	5	11	30	0.4271	164	0.000164	2604.268293	S
PNDf_ vertA	6	3	31	0.3917	140	0.00014	2797.857143	N
PNDf_ vertA	6	5	32	0.3812	146	0.000146	2610.958904	N
PNDf_ vertA	6	6	33	0.38	154	0.000154	2467.532468	N
PNDf_ vertA	6	9	34	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_ vertA	6	12	35	0.4271	158	0.000158	2703.164557	N
PNDf_ vertA	7	1	36	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PNDf_ vertA	7	4	37	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDf_ vertA	7	7	38	0.38	160	0.00016	2375	S
PNDf_ vertA	7	10	39	0.3917	150	0.00015	2611.333333	S
PNDf_ vertA	7	13	40	0.4271	156	0.000156	2737.820513	N
PNDf_ vertA	8	2	41	0.4271	162	0.000162	2636.419753	N
PNDf_ vertA	8	5	42	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertA	8	8	43	0.38	158	0.000158	2405.063291	S
PNDf_ vertA	8	11	44	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDf_ vertA	8	14	45	0.4271	160	0.00016	2669.375	N

PNDf_ vertA	9	3	46	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PNDf_ vertA	9	6	47	0.3929	168	0.000168	2338.690476	S
PNDf_ vertA	9	9	48	0.38	144	0.000144	2638.888889	N
PNDf_ vertA	9	12	49	0.3917	142	0.000142	2758.450704	N
PNDf_ vertA	9	15	50	0.4271	172	0.000172	2483.139535	N
PNDf_ vertA	10	4	51	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertA	10	7	52	0.3917	178	0.000178	2200.561798	S
PNDf_ vertA	10	10	53	0.38	136	0.000136	2794.117647	N
PNDf_ vertA	10	13	54	0.3929	154	0.000154	2551.298701	N
PNDf_ vertA	10	16	55	0.4271	164	0.000164	2604.268293	N
PNDf_ vertA	11	5	56	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertA	11	8	57	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_ vertA	11	11	58	0.38	144	0.000144	2638.888889	N
PNDf_ vertA	11	14	59	0.3917	156	0.000156	2510.897436	N
PNDf_ vertA	11	17	60	0.4271	184	0.000184	2321.195652	S
PNDf_ vertA	12	6	61	0.4271	184	0.000184	2321.195652	S
PNDf_ vertA	12	9	62	0.3917	148	0.000148	2646.621622	N
PNDf_ vertA	12	12	63	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDf_ vertA	12	15	64	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDf_ vertA	12	18	65	0.4271	190	0.00019	2247.894737	S
PNDf_ vertA	13	7	66	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDf_ vertA	13	10	67	0.3929	146	0.000146	2691.09589	N
PNDf_ vertA	13	13	68	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDf_ vertA	13	16	69	0.3917	156	0.000156	2510.897436	S
PNDf_ vertA	13	19	70	0.4271	184	0.000184	2321.195652	S
PNDf_ vertA	14	8	71	0.4271	180	0.00018	2372.777778	N
PNDf_ vertA	14	11	72	0.3917	144	0.000144	2720.138889	N

PNDf_vertA	14	14	73	0.38	150	0.00015	2533.333333	N
PNDf_vertA	14	17	74	0.3929	172	0.000172	2284.302326	S
PNDf_vertA	14	20	75	0.4271	186	0.000186	2296.236559	S
PNDf_vertA	15	9	76	0.4271	158	0.000158	2703.164557	N
PNDf_vertA	15	12	77	0.3929	144	0.000144	2728.472222	N
PNDf_vertA	15	15	78	0.38	158	0.000158	2405.063291	S
PNDf_vertA	15	18	79	0.3917	176	0.000176	2225.568182	S
PNDf_vertA	15	21	80	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDf_vertA	16	10	81	0.4271	160	0.00016	2669.375	N
PNDf_vertA	16	13	82	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_vertA	16	16	83	0.38	154	0.000154	2467.532468	S
PNDf_vertA	16	19	84	0.3929	168	0.000168	2338.690476	S
PNDf_vertA	16	22	85	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_vertA	17	11	86	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_vertA	17	14	87	0.3929	170	0.00017	2311.176471	S
PNDf_vertA	17	17	88	0.38	156	0.000156	2435.897436	S
PNDf_vertA	17	20	89	0.3917	164	0.000164	2388.414634	S
PNDf_vertA	17	23	90	0.4271	174	0.000174	2454.597701	S
PNDf_vertA	18	12	91	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_vertA	18	15	92	0.3917	164	0.000164	2388.414634	S
PNDf_vertA	18	18	93	0.38	160	0.00016	2375	S
PNDf_vertA	18	21	94	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_vertA	18	24	95	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDf_vertA	19	13	96	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDf_vertA	19	16	97	0.3929	178	0.000178	2207.303371	S
PNDf_vertA	19	19	98	0.38	190	0.00019	2000	S
PNDf_vertA	19	22	99	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S

PNDf_ vertA	19	25	100	0.4271	192	0.000192	2224.479167	S
PNDf_ vertA	20	14	101	0.4271	202	0.000202	2114.356436	S
PNDf_ vertA	20	17	102	0.3917	174	0.000174	2251.149425	S
PNDf_ vertA	20	20	103	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertA	20	23	104	0.3929	176	0.000176	2232.386364	S
PNDf_ vertA	20	26	105	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDf_ vertA	21	15	106	0.4271	178	0.000178	2399.438202	S
PNDf_ vertA	21	18	107	0.3929	148	0.000148	2654.72973	S
PNDf_ vertA	21	21	108	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertA	21	24	109	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertA	21	27	110	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDf_ vertA	22	16	111	0.4271	222	0.000222	1923.873874	S
PNDf_ vertA	22	19	112	0.3917	164	0.000164	2388.414634	S
PNDf_ vertA	22	22	113	0.38	168	0.000168	2261.904762	S
PNDf_ vertA	22	25	114	0.3929	200	0.0002	1964.5	S
PNDf_ vertA	22	28	115	0.4271	230	0.00023	1856.956522	S
PNDf_ vertA	23	17	116	0.4271	212	0.000212	2014.622642	S
PNDf_ vertA	23	20	117	0.3929	194	0.000194	2025.257732	S
PNDf_ vertA	23	23	118	0.38	170	0.00017	2235.294118	S
PNDf_ vertA	23	26	119	0.3917	180	0.00018	2176.111111	S
PNDf_ vertA	23	29	120	0.4271	186	0.000186	2296.236559	S
PNDf_ vertA	24	18	121	0.4271	188	0.000188	2271.808511	S
PNDf_ vertA	24	21	122	0.3917	180	0.00018	2176.111111	S
PNDf_ vertA	24	24	123	0.38	220	0.00022	1727.272727	S
PNDf_ vertA	24	27	124	0.3929	156	0.000156	2518.589744	S
PNDf_ vertA	24	30	125	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertA	25	19	126	0.4271	160	0.00016	2669.375	S

PNDf_ vertA	25	22	127	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertA	25	25	128	0.38	144	0.000144	2638.888889	S
PNDf_ vertA	25	28	129	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertA	25	31	130	0.4271	174	0.000174	2454.597701	S
PNDf_ vertA	26	20	131	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertA	26	23	132	0.3917	148	0.000148	2646.621622	S
PNDf_ vertA	26	26	133	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertA	26	29	134	0.3929	156	0.000156	2518.589744	S
PNDf_ vertA	26	32	135	0.4271	154	0.000154	2773.376623	S
PNDf_ vertA	27	21	136	0.4271	162	0.000162	2636.419753	S
PNDf_ vertA	27	24	137	0.3929	152	0.000152	2584.868421	S
PNDf_ vertA	27	27	138	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertA	27	30	139	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_ vertA	27	33	140	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertA	28	22	141	0.4271	164	0.000164	2604.268293	S
PNDf_ vertA	28	25	142	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_ vertA	28	28	143	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertA	28	31	144	0.3929	152	0.000152	2584.868421	S
PNDf_ vertA	28	34	145	0.4271	158	0.000158	2703.164557	S
PNDf_ vertA	29	23	146	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertA	29	26	147	0.3929	142	0.000142	2766.901408	S
PNDf_ vertA	29	29	148	0.38	142	0.000142	2676.056338	S
PNDf_ vertA	29	32	149	0.3917	140	0.00014	2797.857143	S
PNDf_ vertA	29	35	150	0.4271	148	0.000148	2885.810811	S
PNDf_ vertA	30	24	151	0.4271	174	0.000174	2454.597701	S
PNDf_ vertA	30	27	152	0.3917	148	0.000148	2646.621622	S
PNDf_ vertA	30	30	153	0.38	144	0.000144	2638.888889	S

PNDf_ vertA	30	33	154	0.3929	158	0.000158	2486.708861	S
PNDf_ vertA	30	36	155	0.4271	164	0.000164	2604.268293	S
PNDf_ vertA	31	25	156	0.4271	148	0.000148	2885.810811	S
PNDf_ vertA	31	28	157	0.3929	138	0.000138	2847.101449	S
PNDf_ vertA	31	31	158	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertA	31	32	159	0.3812	150	0.00015	2541.333333	S
PNDf_ vertA	31	34	160	0.3917	146	0.000146	2682.876712	S
PNDf_ vertA	32	26	161	0.4271	162	0.000162	2636.419753	S
PNDf_ vertA	32	29	162	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PNDf_ vertA	32	31	163	0.3812	154	0.000154	2475.324675	S
PNDf_ vertA	32	32	164	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertA	32	33	165	0.3816	146	0.000146	2613.69863	S
PNDf_ vertA	32	35	166	0.3929	142	0.000142	2766.901408	S
PNDf_ vertA	33	27	167	0.4271	154	0.000154	2773.376623	S
PNDf_ vertA	33	30	168	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertA	33	32	169	0.3816	150	0.00015	2544	S
PNDf_ vertA	33	33	170	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertA	33	34	171	0.3812	136	0.000136	2802.941176	S
PNDf_ vertA	33	35	172	0.3855	140	0.00014	2753.571429	S
PNDf_ vertA	33	36	173	0.3917	142	0.000142	2758.450704	S
PNDf_ vertA	34	28	174	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertA	34	31	175	0.3917	156	0.000156	2510.897436	S
PNDf_ vertA	34	33	176	0.3812	140	0.00014	2722.857143	S
PNDf_ vertA	34	34	177	0.38	142	0.000142	2676.056338	S
PNDf_ vertA	34	35	178	0.3816	142	0.000142	2687.323944	S
PNDf_ vertA	34	36	179	0.3855	156	0.000156	2471.153846	S
PNDf_ vertA	35	29	180	0.4271	174	0.000174	2454.597701	S

PNDf_ vertA	35	32	181	0.3929	148	0.000148	2654.72973	S
PNDf_ vertA	35	33	182	0.3855	154	0.000154	2503.246753	S
PNDf_ vertA	35	34	183	0.3816	150	0.00015	2544	S
PNDf_ vertA	35	35	184	0.38				S
PNDf_ vertA	35	36	185	0.3812	134	0.000134	2844.776119	S
PNDf_ vertA	36	30	186	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertA	36	33	187	0.3917	144	0.000144	2720.138889	S
PNDf_ vertA	36	34	188	0.3855	140	0.00014	2753.571429	S
PNDf_ vertA	36	35	189	0.3812	140	0.00014	2722.857143	S
PNDf_ vertA	36	36	190	0.38	144	0.000144	2638.888889	S

Il valore di velocità media della sezione è pari a 2.518 m/s. È un valore di velocità piuttosto alto considerando che la muratura presenta dei corsi dove la tessitura muraria non è omogenea. Si riscontrano però dei valori di velocità piuttosto alti anche in corrispondenza di percorsi che attraversano zone di muratura a sacco come ad esempio i valori delle acquisizioni 148, 149 e 150 dove la velocità arriva a valori di 2.885 m/s. La giustificazione può essere insita nella costituzione della malta che sembra far viaggiare il segnale più velocemente che nel mattone oppure può risiedere nel fatto che il contenuto del sacco sia così ben compattato da far diminuire il tempo di volo per i raggi che lo attraversano. È inoltre da evidenziare che l'acquisizione 184 non ha alcun valore poiché ci sono stati dei problemi nel rilevamento. L'istogramma dei tempi di volo e delle velocità (figura 6.78 e 6.79) mostrano un aumento dei tempi di volo e di conseguenza una diminuzione della velocità in corrispondenza dell'acquisizione numero 80 che collima con l'inizio delle traiettorie che incontrano la muratura a sacco.

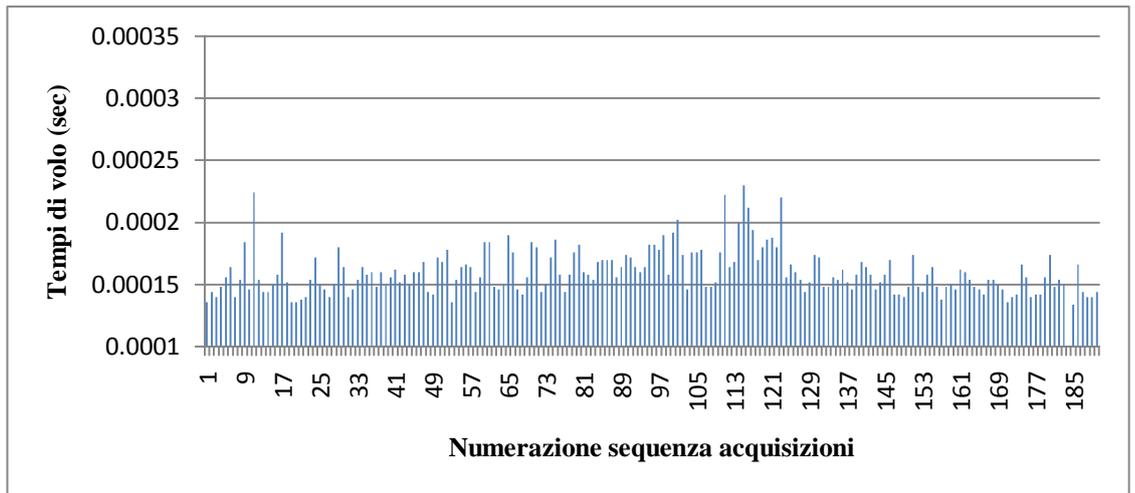


Figura 6.78 Muretto PNDF, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi

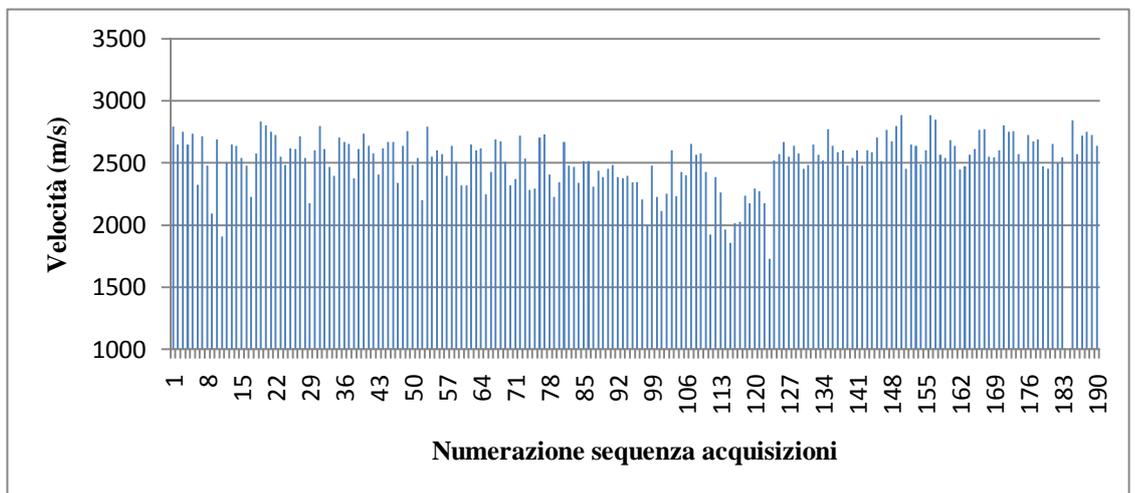


Figura 6.79 Muretto PNDF, sezione A-A', velocità in m/s

Il successivo step è quello di invertire i dati per ottenere le mappe di velocità del segnale della sezione B-B'. Prima si procede con la valutazione dell'isotropia del materiale, poi si imposta il modello nel software Geotom. In questo caso si riportano solo le prove ottenute mediante l'utilizzo di due griglie di pixel poiché da come è stato visto per le sezioni A-A' e B-B' del muretto PNDE non ci sono variazioni significative tra i quattro tipi di griglie di pixel inizialmente usati. Nella figura 6.80 è riportato il grafico delle velocità in funzione della lunghezza del percorso. La retta color nero è leggermente più inclinata rispetto ad una retta orizzontale. Per la sezione A-A' del muretto PNDF si inizia con una suddivisione della sezione in 19 pixel lungo il lato orizzontale e 52 pixel lungo il lato

verticale. Il processo iterativo parte da 3 iterazioni straight e segue con 20 iterazioni curved a gruppi di 5 iterazioni alla volta (tabella 6.15). Le immagini tomografiche ottenute sono presentate in figura 6.81, 6.82, 6.83, 6.84 e 6.85.

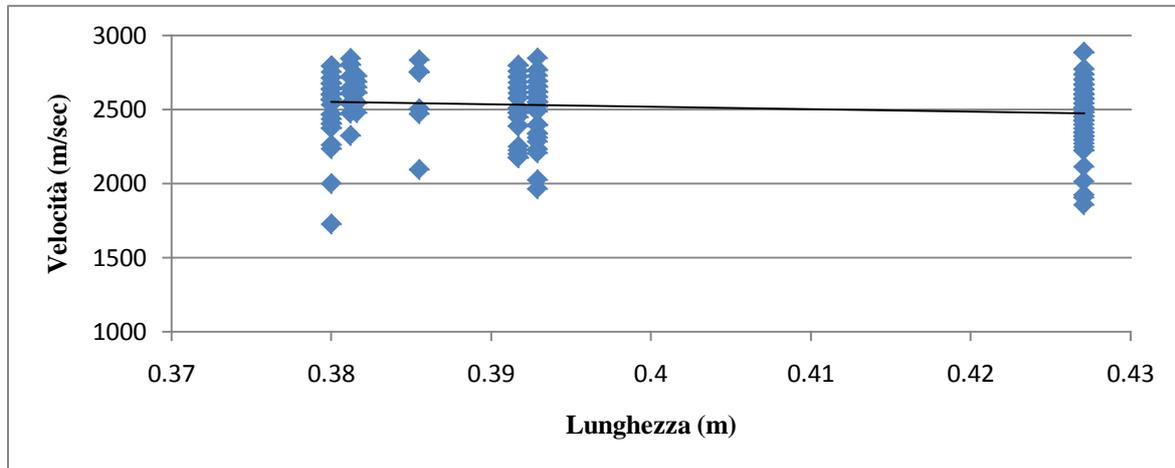


Figura 6.80 Muretto PNDF, sezione A-A', grafico velocità-lunghezza del percorso

Tabella 6.15 Muretto PNDF, sezione A-A', parametri di inversione per una griglia di 19x52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDfvertA_100	3	0	3	PNDfvertA_101	Figura 6.81
PNDfvertA_101	0	5	8	PNDfvertA_106	Figura 6.82
PNDfvertA_106	0	5	13	PNDfvertA_107	Figura 6.83
PNDfvertA_107	0	5	18	PNDfvertA_108	Figura 6.84
PNDfvertA_108	0	5	23	PNDfvertA_109	Figura 6.85

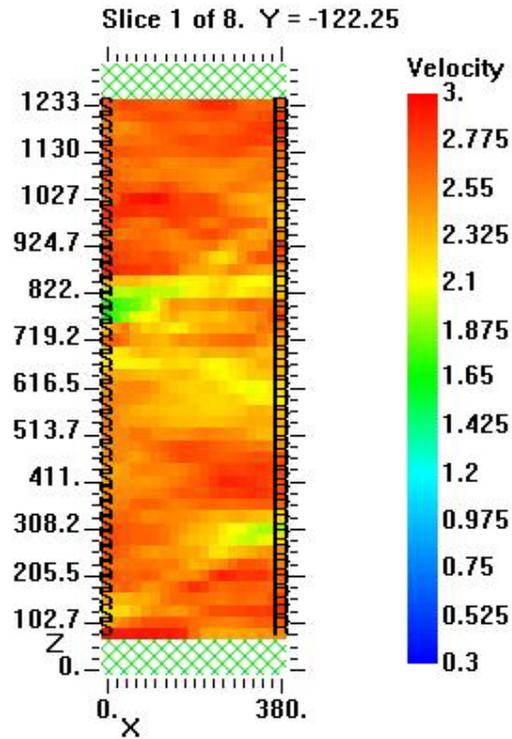


Figura 6.81 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_101

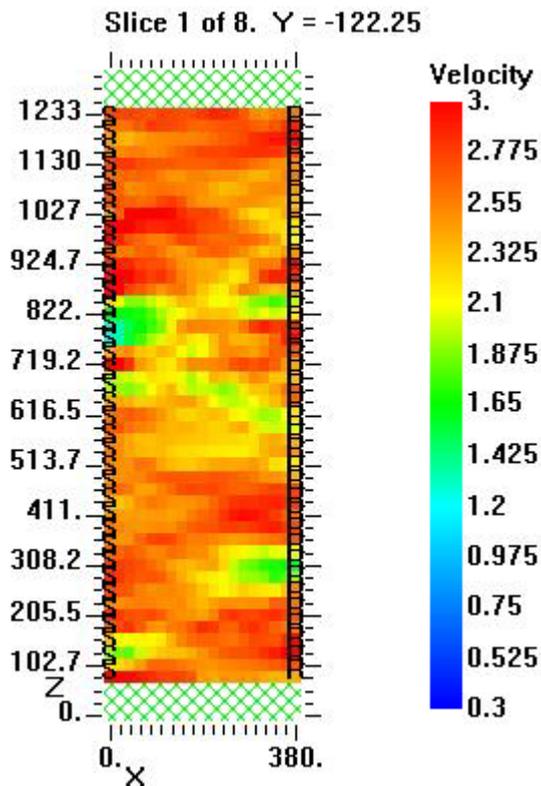


Figura 6.82 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_106

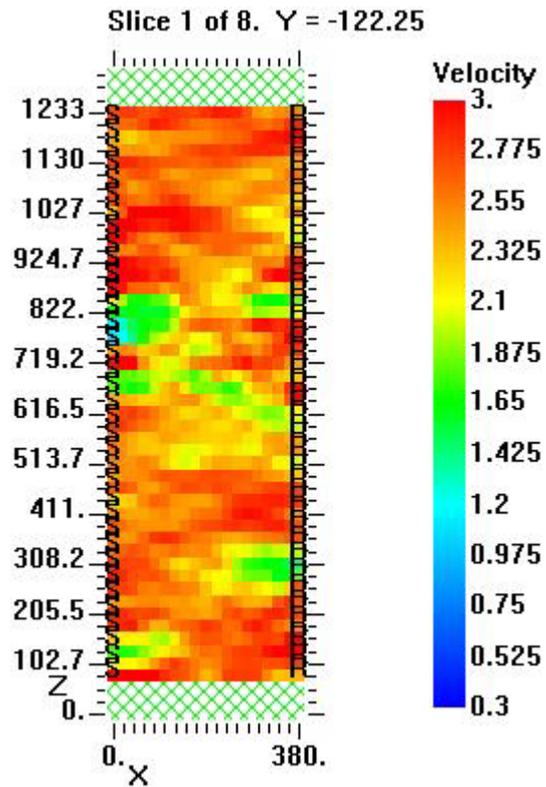


Figura 6.83 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x52, file output PNDFvertA_107

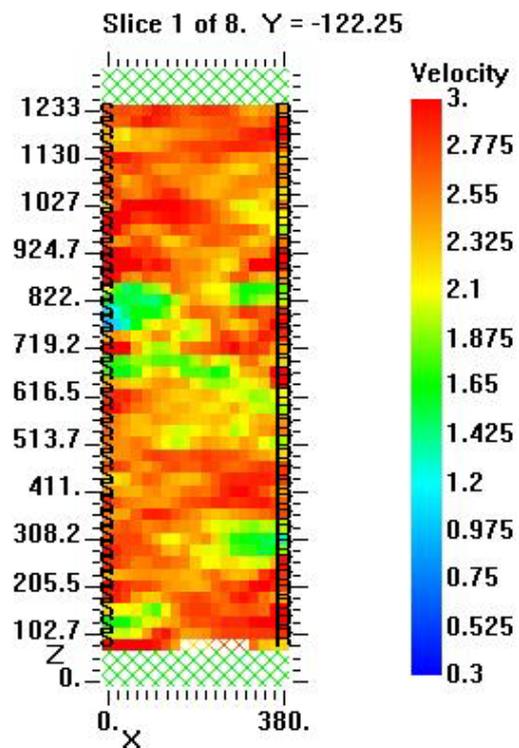


Figura 6.84 Muretto PNDF, sezione A-A' mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_108

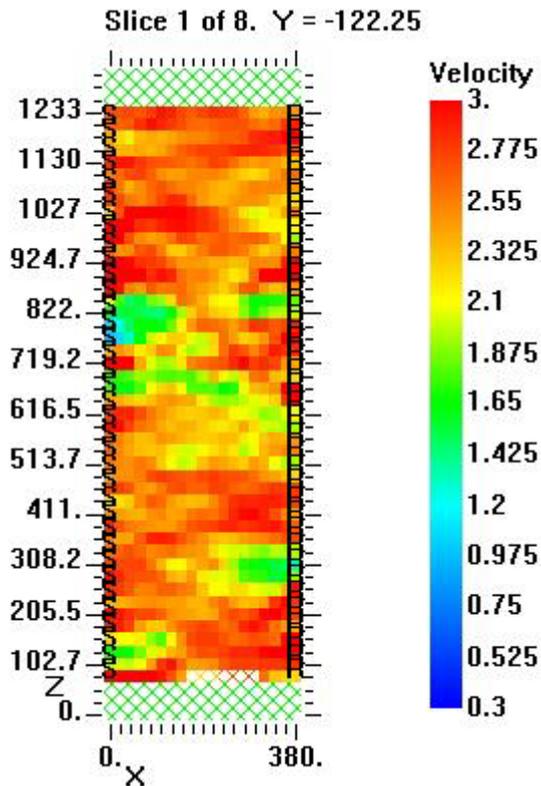


Figura 6.85 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_109

Le immagini mostrano una mappa di velocità piuttosto variegata. Le zone color verde- giallo nella parte inferiore della sezione indicano la presenza di due possibili anomalie, ma nella realtà in corrispondenza di quell'altezza del corso vi è un solo difetto. Esso potrebbe essere identificato con la zona di color verde nella parte destra inferiore, ma per un operatore che non ha già la conoscenza della posizione del difetto, potrebbe esserci il dubbio sulla presenza di due difetti e non di uno soltanto, viste le due zone a bassa velocità. La zona centrale di color verde porterebbe a pensare che anche in quell'area vi sia un'anomalia. In realtà potrebbe corrispondere invece alla protuberanza della zona a sacco, ma solo con la sovrapposizione della geometria del corso è possibile dirlo con certezza. Il resto della mappa è di color rosso-arancio, ad indicare che non vi sono particolari imperfezioni. Nel passaggio tra un file output e l'altro si nota soprattutto il cambiamento di colore verso toni più arancioni della zona superiore della sezione, mentre le aree a bassa velocità rimangono perlopiù inalterate.. L'andamento dei residui (figura 6.86) assomiglia a quello di un grafico di sole iterazioni straight. Dalla quinta iterazione in avanti, il metodo converge e il

valore dei residui si stabilizza al di sotto di 10. Il valore di partenza è 85, più alto del valore iniziale pari a 75 tipico dei precedenti residui. La leggera inflessione verso il basso nella parte finale della curva è indice di piccole variazioni anche nei file con più iterazioni. La seconda griglia presa in considerazione è quella di 11x38 pixel, dove le dimensioni del pixel sono simili all'interasse fra le stazioni e il procedimento consiste in 23 iterazioni (tabella 6.16). Le mappa tomografiche al variare del numero progressivo di iterazioni sono mostrate nelle figure 6.87, 6.88, 6.89, 6.90 e 6.91.

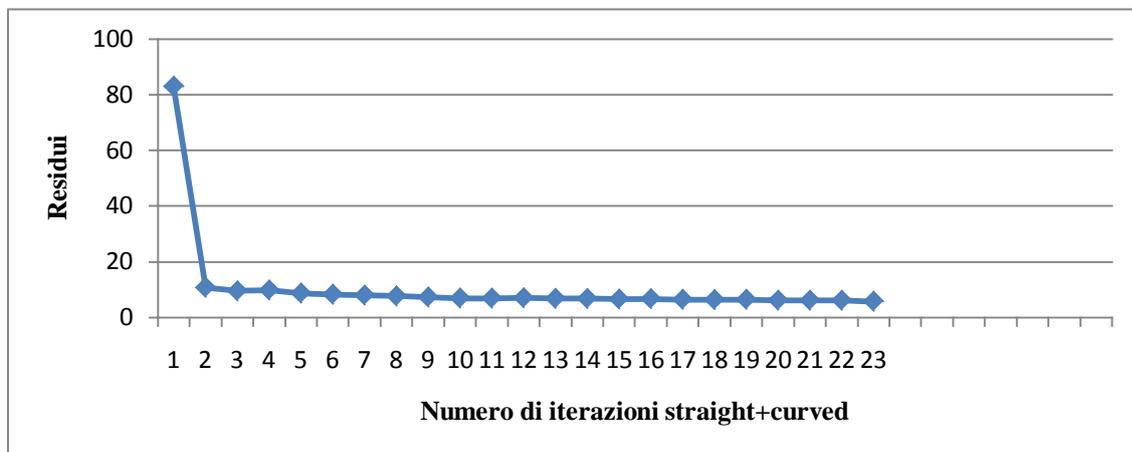


Figura 6.86 Muretto PNDF, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 19x52 pixel

Tabella 6.16 Muretto PNDF, sezione A-A', griglia di 11x38 pixel, file input e output per 23 iterazioni straight e curved

Pixel : 11x38		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDfvertA_130	3	0	3	PNDfvertA_131	Figura 6.87
PNDfvertA_131	0	5	8	PNDfvertA_136	Figura 6.88
PNDfvertA_136	0	5	13	PNDfvertA_137	Figura 6.89
PNDfvertA_137	0	5	18	PNDfvertA_138	Figura 6.90
PNDfvertA_138	0	5	23	PNDfvertA_139	Figura 6.91

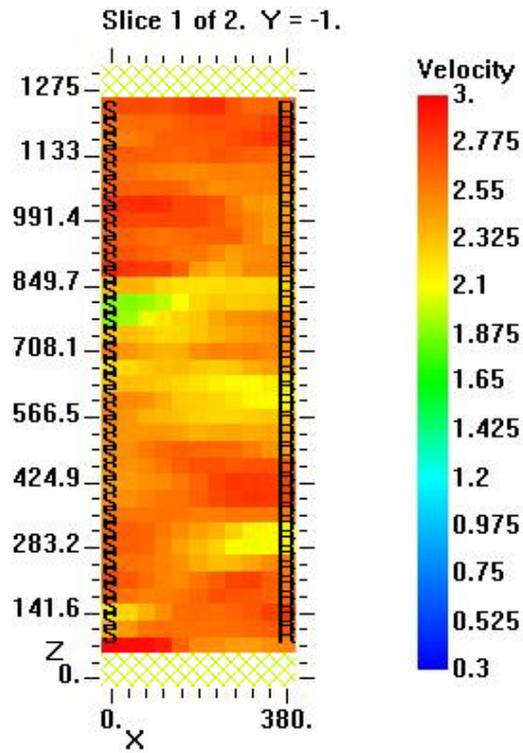


Figura 6.87 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 11x38 pixel, file output PNDFvertA_131

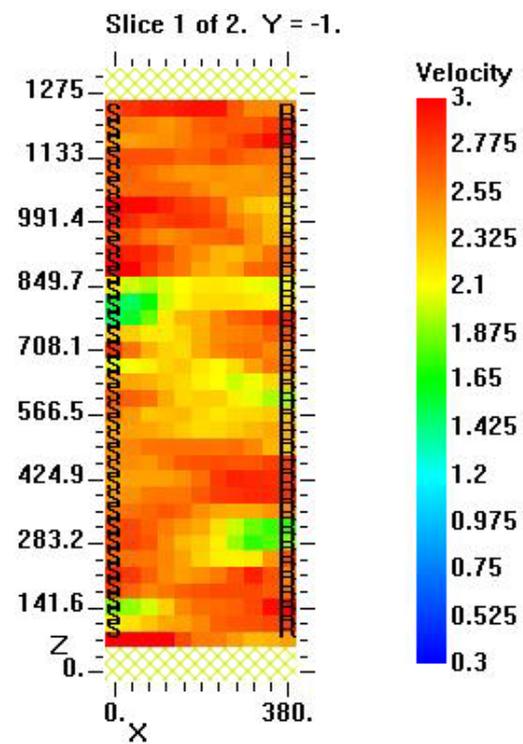


Figura 6.88 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDFvertA_136

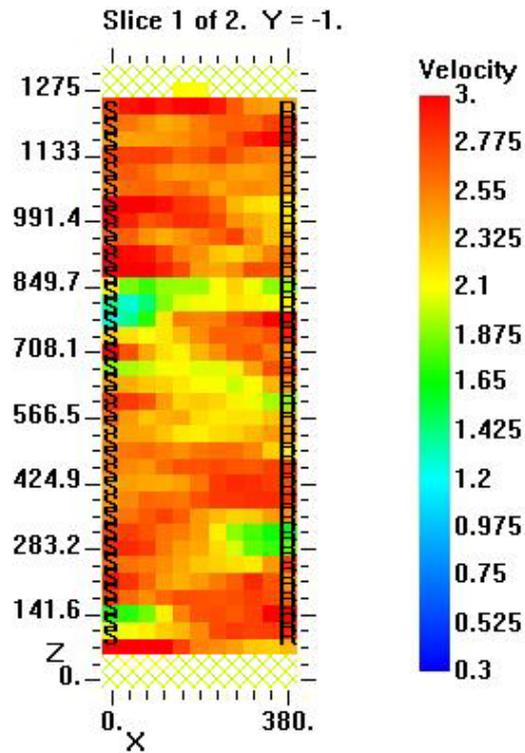


Figura 6.89 Muretto PNDf, sezione A-A', mappa delle velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDfvertA_137

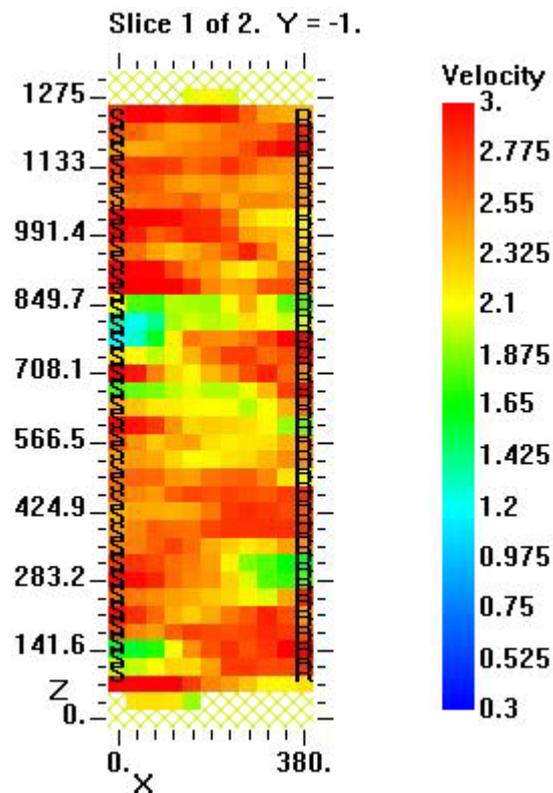


Figura 6.90 Muretto PNDf, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDfvertA_138

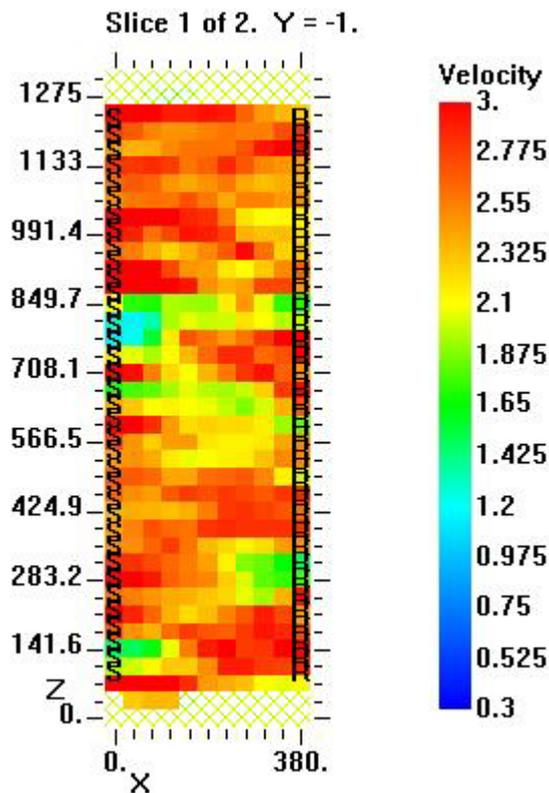


Figura 6.91 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDFvertA_139

Le immagini ottenute si differenziano da quelle ottenute con la griglia 19x52. Le zone colore verde nella parte inferiore permangono, non mostrando in maniera precisa la presenza del difetto in quell'area, ma anzi possono portare a interpretazioni errate se non si conosce la geometria interna del muretto. La zona centrale è costituita da un'area inizialmente omogenea, poi più frammentata di colore giallo con qualche inserto color blu-verde. Essa potrebbe essere riconducibile alla sporgenza della muratura a sacco. La restante parte della sezione è di color rosso-arancione. Il grafico dei residui risultante (figura 6.92) tende asintoticamente ad un valore di 5, in continua leggera decrescita. È interessante mostrare come sono distribuiti i raggi lungo la sezione (figura 6.93). Si nota un andamento caotico dei percorsi, senza definizione di precise aree affette da imperfezioni. D'altronde la muratura a sacco, a differenza dei difetti in polistirolo espanso, non costituisce un vuoto, ma solo una differenza di materiale all'interno del quale il segnale viaggia a velocità ridotte vista la disomogeneità

del composto. Il difetto vero e proprio si trova nella parte inferiore della sezione, ma come è evidenziato pure dall'andamento dei raggi, non è colto completamente.

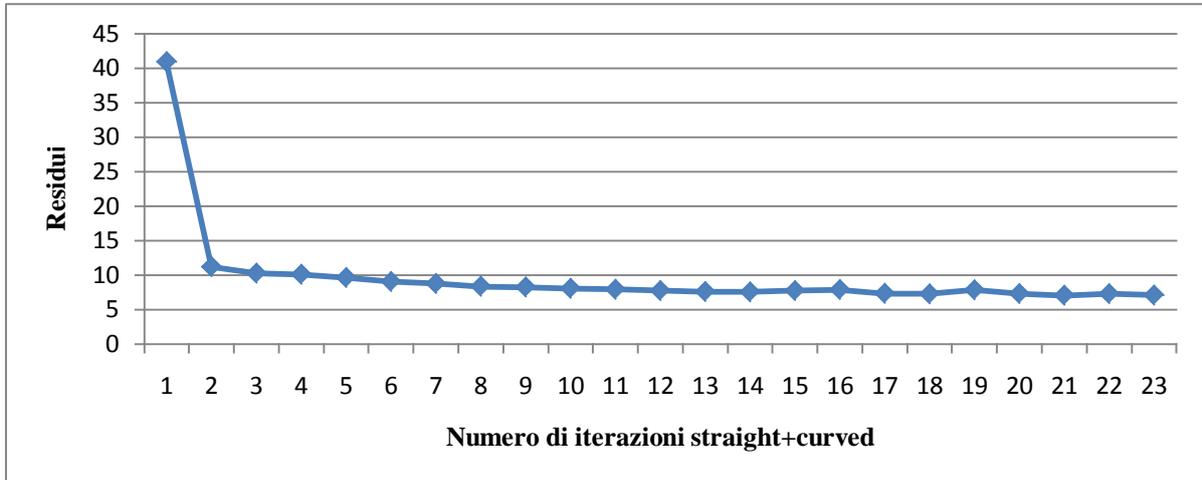


Figura 6.92 Muretto PNDF, sezione A-A', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 11x38 pixel

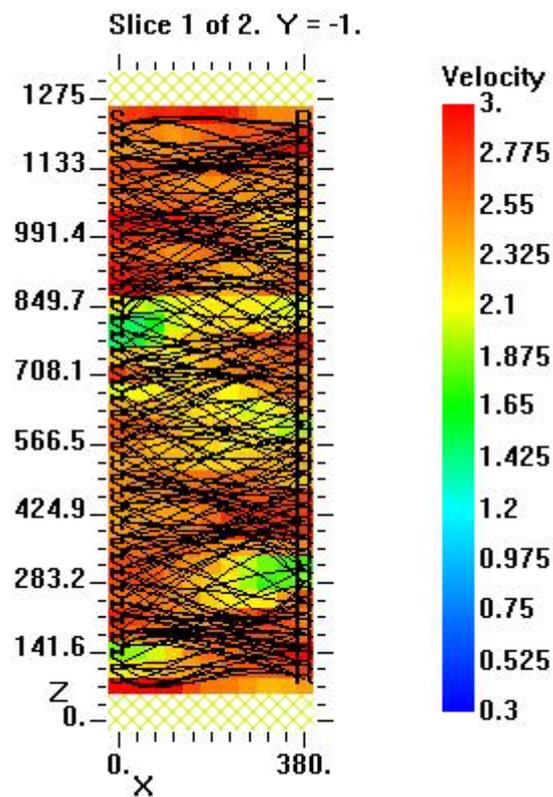


Figura 6.93 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità del file output PNDFvertA_136ray

6.2.2 SEZIONE B-B': confronto tra griglia di 19x52 pixel e griglia di 11x38 pixel

La sezione B-B' presenta un difetto in corrispondenza del corso 5 e dal corso 9 una zona di perimetro regolare di muratura a sacco. Le 190 stazioni sono state disposte a 2 cm dalla linea di mezzeria dei difetti del corso 5. I tempi di volo acquisiti sono presentati nella tabella 6.17.

Tabella 6.17 Provino PNDF, sezione B-B': valori di analisi ed elaborazioni dei dati

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Difetto
PNDf_vertB	1	1	1	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDf_vertB	1	2	2	0.3812	152	0.000152	2507.894737	N
PNDf_vertB	1	3	3	0.3855	142	0.000142	2714.788732	N
PNDf_vertB	1	4	4	0.3917	144	0.000144	2720.138889	N
PNDf_vertB	1	7	5	0.4271	154	0.000154	2773.376623	N
PNDf_vertB	2	1	6	0.3812	140	0.00014	2722.857143	N
PNDf_vertB	2	2	7	0.38	144	0.000144	2638.888889	N
PNDf_vertB	2	3	8	0.3816	146	0.000146	2613.69863	N
PNDf_vertB	2	4	9	0.3855	150	0.00015	2570	N
PNDf_vertB	2	5	10	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDf_vertB	2	8	11	0.4271	164	0.000164	2604.268293	N
PNDf_vertB	3	1	12	0.3855	150	0.00015	2570	N
PNDf_vertB	3	2	13	0.3816	156	0.000156	2446.153846	N
PNDf_vertB	3	3	14	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDf_vertB	3	4	15	0.3812	152	0.000152	2507.894737	N
PNDf_vertB	3	6	16	0.3917	152	0.000152	2576.973684	N
PNDf_vertB	3	9	17	0.4271	162	0.000162	2636.419753	S
PNDf_vertB	4	1	18	0.3917	154	0.000154	2543.506494	N

PNDf_ vertB	4	2	19	0.3855	152	0.000152	2536.184211	N
PNDf_ vertB	4	3	20	0.3812	144	0.000144	2647.222222	N
PNDf_ vertB	4	4	21	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
NPNDf_ vertB	4	5	22	0.3816	144	0.000144	2650	N
PNDf_ vertB	4	7	23	0.3929	154	0.000154	2551.298701	N
PNDf_ vertB	4	10	24	0.4271	220	0.00022	1941.363636	S
PNDf_ vertB	5	2	25	0.3929	144	0.000144	2728.472222	N
PNDf_ vertB	5	4	26	0.3816	144	0.000144	2650	N
PNDf_ vertB	5	5	27	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDf_ vertB	5	6	28	0.3812	154	0.000154	2475.324675	N
PNDf_ vertB	5	8	29	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertB	5	11	30	0.4271	186	0.000186	2296.236559	S
PNDf_ vertB	6	3	31	0.3917	152	0.000152	2576.973684	N
PNDf_ vertB	6	5	32	0.3812	146	0.000146	2610.958904	N
PNDf_ vertB	6	6	33	0.38	146	0.000146	2602.739726	N
PNDf_ vertB	6	9	34	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_ vertB	6	12	35	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	7	1	36	0.4271	156	0.000156	2737.820513	S
PNDf_ vertB	7	4	37	0.3929	150	0.00015	2619.333333	N
PNDf_ vertB	7	7	38	0.38	150	0.00015	2533.333333	S
PNDf_ vertB	7	10	39	0.3917	154	0.000154	2543.506494	S
PNDf_ vertB	7	13	40	0.4271	156	0.000156	2737.820513	N
PNDf_ vertB	8	2	41	0.4271	170	0.00017	2512.352941	N
PNDf_ vertB	8	5	42	0.3917	154	0.000154	2543.506494	S
PNDf_ vertB	8	8	43	0.38	194	0.000194	1958.762887	S
PNDf_ vertB	8	11	44	0.3929	140	0.00014	2806.428571	N
PNDf_ vertB	8	14	45	0.4271	154	0.000154	2773.376623	N

PNDf_ vertB	9	3	46	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertB	9	6	47	0.3929	160	0.00016	2455.625	S
PNDf_ vertB	9	9	48	0.38	158	0.000158	2405.063291	N
PNDf_ vertB	9	12	49	0.3917	148	0.000148	2646.621622	N
PNDf_ vertB	9	15	50	0.4271	166	0.000166	2572.891566	N
PNDf_ vertB	10	4	51	0.4271	182	0.000182	2346.703297	S
PNDf_ vertB	10	7	52	0.3917	202	0.000202	1939.108911	S
PNDf_ vertB	10	10	53	0.38	150	0.00015	2533.333333	N
PNDf_ vertB	10	13	54	0.3929	194	0.000194	2025.257732	N
PNDf_ vertB	10	16	55	0.4271	188	0.000188	2271.808511	N
PNDf_ vertB	11	5	56	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	11	8	57	0.3929	148	0.000148	2654.72973	N
PNDf_ vertB	11	11	58	0.38	144	0.000144	2638.888889	N
PNDf_ vertB	11	14	59	0.3917	154	0.000154	2543.506494	N
PNDf_ vertB	11	17	60	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertB	12	6	61	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDf_ vertB	12	9	62	0.3917	218	0.000218	1796.788991	N
PNDf_ vertB	12	12	63	0.38	150	0.00015	2533.333333	N
PNDf_ vertB	12	15	64	0.3929	142	0.000142	2766.901408	N
PNDf_ vertB	12	18	65	0.4271	176	0.000176	2426.704545	S
PNDf_ vertB	13	7	66	0.4271	190	0.00019	2247.894737	N
PNDf_ vertB	13	10	67	0.3929	176	0.000176	2232.386364	N
PNDf_ vertB	13	13	68	0.38	164	0.000164	2317.073171	N
PNDf_ vertB	13	16	69	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertB	13	19	70	0.4271	192	0.000192	2224.479167	S
PNDf_ vertB	14	8	71	0.4271	190	0.00019	2247.894737	N
PNDf_ vertB	14	11	72	0.3917	148	0.000148	2646.621622	N

PNDf_ vertB	14	14	73	0.38	142	0.000142	2676.056338	N
PNDf_ vertB	14	17	74	0.3929	252	0.000252	1559.126984	S
PNDf_ vertB	14	20	75	0.4271	232	0.000232	1840.948276	S
PNDf_ vertB	15	9	76	0.4271	184	0.000184	2321.195652	N
PNDf_ vertB	15	12	77	0.3929	144	0.000144	2728.472222	N
PNDf_ vertB	15	15	78	0.38	178	0.000178	2134.831461	S
PNDf_ vertB	15	18	79	0.3917	174	0.000174	2251.149425	S
PNDf_ vertB	15	21	80	0.4271	202	0.000202	2114.356436	S
PNDf_ vertB	16	10	81	0.4271	164	0.000164	2604.268293	N
PNDf_ vertB	16	13	82	0.3917	162	0.000162	2417.901235	S
PNDf_ vertB	16	16	83	0.38	172	0.000172	2209.302326	S
PNDf_ vertB	16	19	84	0.3929	172	0.000172	2284.302326	S
PNDf_ vertB	16	22	85	0.4271	190	0.00019	2247.894737	S
PNDf_ vertB	17	11	86	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertB	17	14	87	0.3929	166	0.000166	2366.86747	S
PNDf_ vertB	17	17	88	0.38	184	0.000184	2065.217391	S
PNDf_ vertB	17	20	89	0.3917	172	0.000172	2277.325581	S
PNDf_ vertB	17	23	90	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertB	18	12	91	0.4271	204	0.000204	2093.627451	S
PNDf_ vertB	18	15	92	0.3917	178	0.000178	2200.561798	S
PNDf_ vertB	18	18	93	0.38	198	0.000198	1919.191919	S
PNDf_ vertB	18	21	94	0.3929	166	0.000166	2366.86747	S
PNDf_ vertB	18	24	95	0.4271	188	0.000188	2271.808511	S
PNDf_ vertB	19	13	96	0.4271	194	0.000194	2201.546392	S
PNDf_ vertB	19	16	97	0.3929	190	0.00019	2067.894737	S
PNDf_ vertB	19	19	98	0.38	156	0.000156	2435.897436	S
PNDf_ vertB	19	22	99	0.3917	164	0.000164	2388.414634	S

PNDf_ vertB	19	25	100	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertB	20	14	101	0.4271	192	0.000192	2224.479167	S
PNDf_ vertB	20	17	102	0.3917	186	0.000186	2105.913978	S
PNDf_ vertB	20	20	103	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertB	20	23	104	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertB	20	26	105	0.4271	192	0.000192	2224.479167	S
PNDf_ vertB	21	15	106	0.4271	204	0.000204	2093.627451	S
PNDf_ vertB	21	18	107	0.3929	168	0.000168	2338.690476	S
PNDf_ vertB	21	21	108	0.38	154	0.000154	2467.532468	S
PNDf_ vertB	21	24	109	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_ vertB	21	27	110	0.4271	162	0.000162	2636.419753	S
PNDf_ vertB	22	16	111	0.4271	218	0.000218	1959.174312	S
PNDf_ vertB	22	19	112	0.3917	150	0.00015	2611.333333	S
PNDf_ vertB	22	22	113	0.38	150	0.00015	2533.333333	S
PNDf_ vertB	22	25	114	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertB	22	28	115	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertB	23	17	116	0.4271	184	0.000184	2321.195652	S
PNDf_ vertB	23	20	117	0.3929	160	0.00016	2455.625	S
PNDf_ vertB	23	23	118	0.38	148	0.000148	2567.567568	S
PNDf_ vertB	23	26	119	0.3917	186	0.000186	2105.913978	S
PNDf_ vertB	23	29	120	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	24	18	121	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	24	21	122	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_ vertB	24	24	123	0.38	144	0.000144	2638.888889	S
PNDf_ vertB	24	27	124	0.3929	154	0.000154	2551.298701	S
PNDf_ vertB	24	30	125	0.4271	168	0.000168	2542.261905	S
PNDf_ vertB	25	19	126	0.4271	160	0.00016	2669.375	S

PNDf_ vertB	25	22	127	0.3929	152	0.000152	2584.868421	S
PNDf_ vertB	25	25	128	0.38	168	0.000168	2261.904762	S
PNDf_ vertB	25	28	129	0.3917	160	0.00016	2448.125	S
PNDf_ vertB	25	31	130	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertB	26	20	131	0.4271	280	0.00028	1525.357143	S
PNDf_ vertB	26	23	132	0.3917	180	0.00018	2176.111111	S
PNDf_ vertB	26	26	133	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertB	26	29	134	0.3929	148	0.000148	2654.72973	S
PNDf_ vertB	26	32	135	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	27	21	136	0.4271	160	0.00016	2669.375	S
PNDf_ vertB	27	24	137	0.3929	166	0.000166	2366.86747	S
PNDf_ vertB	27	27	138	0.38	146	0.000146	2602.739726	S
PNDf_ vertB	27	30	139	0.3917	158	0.000158	2479.113924	S
PNDf_ vertB	27	33	140	0.4271	196	0.000196	2179.081633	S
PNDf_ vertB	28	22	141	0.4271	166	0.000166	2572.891566	S
PNDf_ vertB	28	25	142	0.3917	150	0.00015	2611.333333	S
PNDf_ vertB	28	28	143	0.38	140	0.00014	2714.285714	S
PNDf_ vertB	28	31	144	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_ vertB	28	34	145	0.4271	180	0.00018	2372.777778	S
PNDf_ vertB	29	23	146	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	29	26	147	0.3929	160	0.00016	2455.625	S
PNDf_ vertB	29	29	148	0.38	144	0.000144	2638.888889	S
PNDf_ vertB	29	32	149	0.3917	152	0.000152	2576.973684	S
PNDf_ vertB	29	35	150	0.4271	180	0.00018	2372.777778	S
PNDf_ vertB	30	24	151	0.4271	178	0.000178	2399.438202	S
PNDf_ vertB	30	27	152	0.3917	150	0.00015	2611.333333	S
PNDf_ vertB	30	30	153	0.38	158	0.000158	2405.063291	S

PNDf_ vertB	30	33	154	0.3929	160	0.00016	2455.625	S
PNDf_ vertB	30	36	155	0.4271	180	0.00018	2372.777778	S
PNDf_ vertB	31	25	156	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S
PNDf_ vertB	31	28	157	0.3929	164	0.000164	2395.731707	S
PNDf_ vertB	31	31	158	0.38	152	0.000152	2500	S
PNDf_ vertB	31	32	159	0.3812	160	0.00016	2382.5	S
PNDf_ vertB	31	34	160	0.3917	164	0.000164	2388.414634	S
PNDf_ vertB	32	26	161	0.4271	178	0.000178	2399.438202	S
PNDf_ vertB	32	29	162	0.3917	170	0.00017	2304.117647	S
PNDf_ vertB	32	31	163	0.3812	156	0.000156	2443.589744	S
PNDf_ vertB	32	32	164	0.38	164	0.000164	2317.073171	S
PNDf_ vertB	32	33	165	0.3816	150	0.00015	2544	S
PNDf_ vertB	32	35	166	0.3929	162	0.000162	2425.308642	S
PNDf_ vertB	33	27	167	0.4271	188	0.000188	2271.808511	S
PNDf_ vertB	33	30	168	0.3929	172	0.000172	2284.302326	S
PNDf_ vertB	33	32	169	0.3816	168	0.000168	2271.428571	S
PNDf_ vertB	33	33	170	0.38	154	0.000154	2467.532468	S
PNDf_ vertB	33	34	171	0.3812	154	0.000154	2475.324675	S
PNDf_ vertB	33	35	172	0.3855	144	0.000144	2677.083333	S
PNDf_ vertB	33	36	173	0.3917	146	0.000146	2682.876712	S
PNDf_ vertB	34	28	174	0.4271	170	0.00017	2512.352941	S
PNDf_ vertB	34	31	175	0.3917	190	0.00019	2061.578947	S
PNDf_ vertB	34	33	176	0.3812	144	0.000144	2647.222222	S
PNDf_ vertB	34	34	177	0.38	158	0.000158	2405.063291	S
PNDf_ vertB	34	35	178	0.3816	140	0.00014	2725.714286	S
PNDf_ vertB	34	36	179	0.3855	140	0.00014	2753.571429	S
PNDf_ vertB	35	29	180	0.4271	172	0.000172	2483.139535	S

PNDf_ vertB	35	32	181	0.3929	160	0.00016	2455.625	S
PNDf_ vertB	35	33	182	0.3855	150	0.00015	2570	S
PNDf_ vertB	35	34	183	0.3816				S
PNDf_ vertB	35	35	184	0.38	152	0.000152	2500	S
PNDf_ vertB	35	36	185	0.3812	142	0.000142	2684.507042	S
PNDf_ vertB	36	30	186	0.4271	186	0.000186	2296.236559	S
PNDf_ vertB	36	33	187	0.3917	174	0.000174	2251.149425	S
PNDf_ vertB	36	34	188	0.3855	144	0.000144	2677.083333	S
PNDf_ vertB	36	35	189	0.3812	148	0.000148	2575.675676	S
PNDf_ vertB	36	36	190	0.38	146	0.000146	2602.739726	S

L'acquisizione 183 non è stata rilevata. La velocità media di tutte le acquisizioni è pari a 2.447 m/s, un valore inferiore rispetto alla velocità di una muratura in laterizio senza imperfezioni pari circa a 2600m/s. La presenza di un nucleo di materiale composto da frattaglie di mattoni e compattato con malta ha attenuato il segnale. Per alcuni percorsi si rilevano velocità superiori a 2600m/s, come ad esempio l'acquisizione 179. I dati vengono riportati in due istogrammi rappresentanti il tempo di volo espresso in secondi in secondi (figura 6.94) e la velocità espressa in m/sec (figura 6.95). Il primo grafico mostra una serie di valori iniziali intorno a 150 microsecondi, poi nella parte centrale si ha un innalzamento dei tempi di volo con un valor medio al di sopra di 150 microsecondi. Qualche valore superiore a 200 microsecondi è sparso tra le varie acquisizioni. Nel secondo grafico i valori di velocità sono compresi tra 2000 m/s e 2500 m/s. I parametri per l'utilizzo del Geotom sono definiti, per quanto riguarda l'anisotropia, dal grafico in figura 6.96 e per quel che concerne la dimensione della griglia di pixel dall'uso di due griglie da 19x52 pixel e 11x38pixel. Le prime iterazioni sono state eseguite per una griglia di 19x52 pixel (tabella 6.18) con lato dei pixel di 2 cm x 2,5 cm.

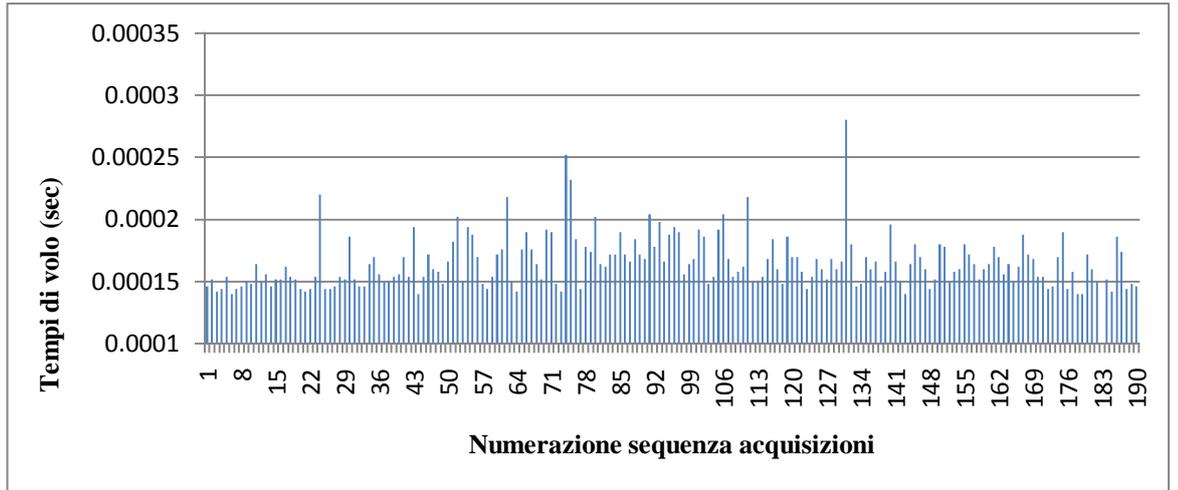


Figura 6.94 Muretto PNDP, sezione B-B', tempi di volo espressi in secondi

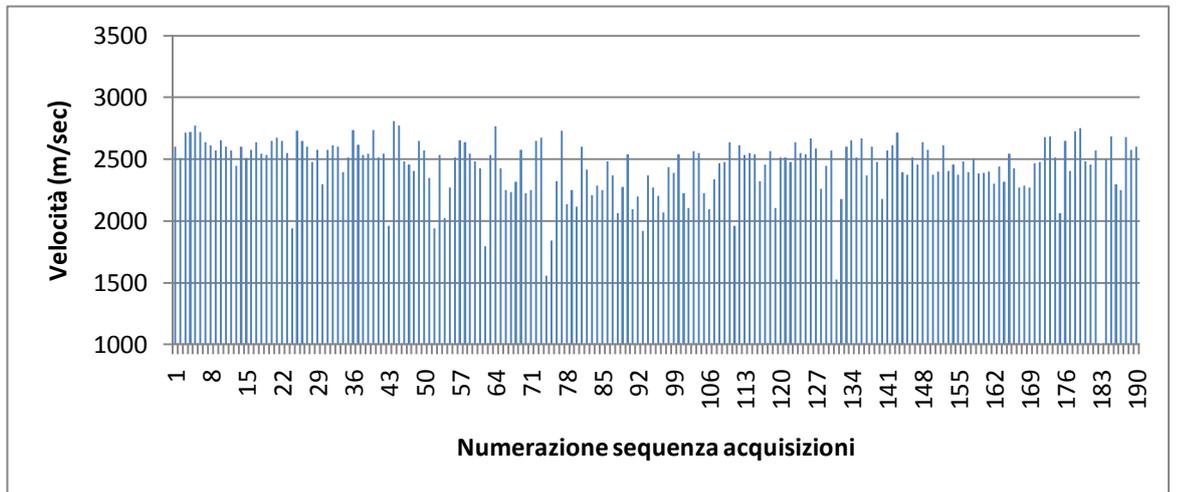


Figura 6.95 Muretto PNDP, sezione B-B', velocità in m/s

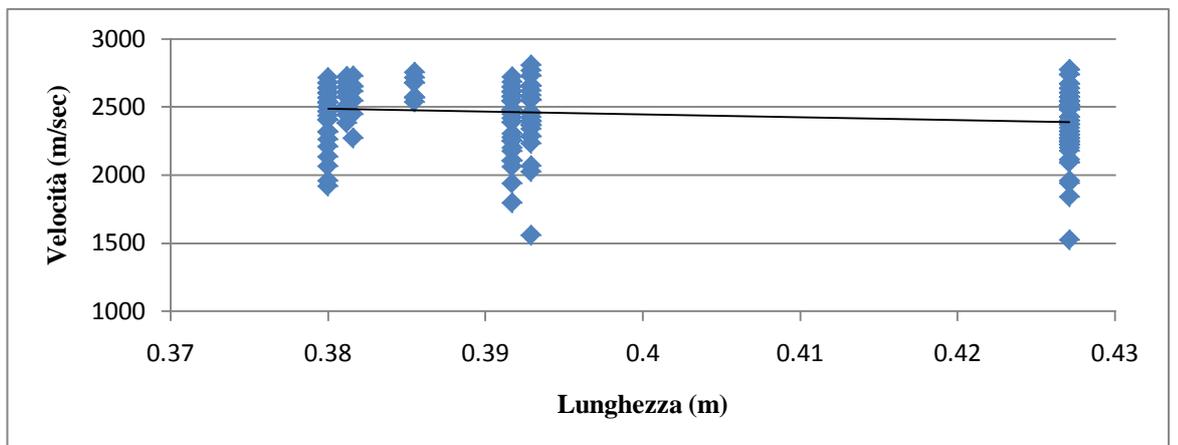


Figura 6.96 Muretto PNDP, sezione B-B', grafico velocità-lunghezza del percorso

Tabella 6.18 Muretto PNDF, sezione B-B', parametri di inversione per una griglia di 19X52 pixel

Pixel : 19x52		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDFvertB_100	3	0	3	PNDFvertB_101	Figura 6.97
PNDFvertB_101	0	5	8	PNDFvertB_106	Figura 6.98
PNDFvertB_106	0	5	13	PNDFvertB_107	Figura 6.99
PNDFvertB_107	0	5	18	PNDFvertB_108	Figura 6.100
PNDFvertB_108	0	5	23	PNDFvertB_109	Figura 6.101

Le immagini corrispondenti ai file output si trovano nelle figure 6.97 - 6.101. La prima immagine mostra una campitura omogenea del colore giallo-arancio. Proseguendo con il numero di iterazioni, la campitura diventa più disomogenea mostrando un aumento di aree verdi-azzurre a velocità più bassa. Da una prima analisi non si ottengono particolari raffronti tra la tessitura muraria reale e la mappa di velocità ottenuta. La zona comprendente il sacco mi può dare valori di velocità disomogenei vista la tessitura, ma non viene comunque identificato il perimetro reale dell'area con muratura a sacco. Il difetto nella zona inferiore della sezione non è rilevato. I residui (figura 6.102) partono da un valore pari a 55 (molto inferiore a 75-80 delle sezioni precedenti) e decresce fino a un valore di 10. Dalla ottava iterazioni in poi, il metodo tende già alla convergenza. Le successive iterazioni sono eseguite con una suddivisione della sezione in 11x38 pixel. Nella tabella 6.19 sono riepilogati i file output ottenuti e nelle figure 6.103 - 6.107 le corrispondenti immagini tomografiche.

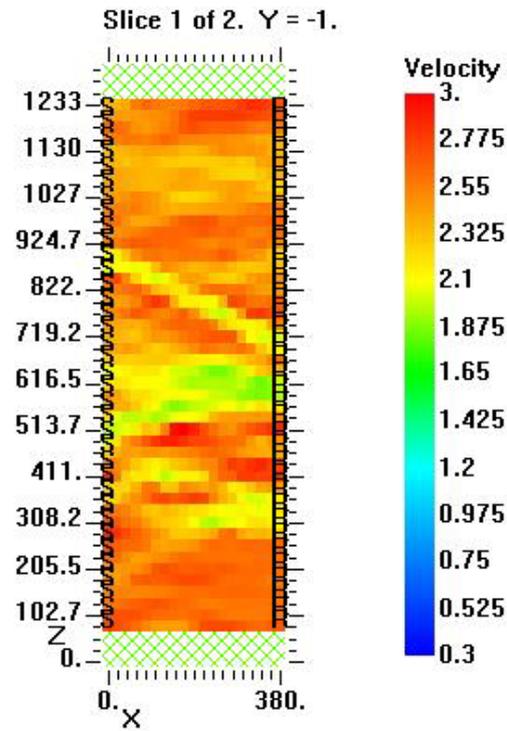


Figura 6.97 Muretto PPDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 19x52 pixel, file output PPDFvertA_101

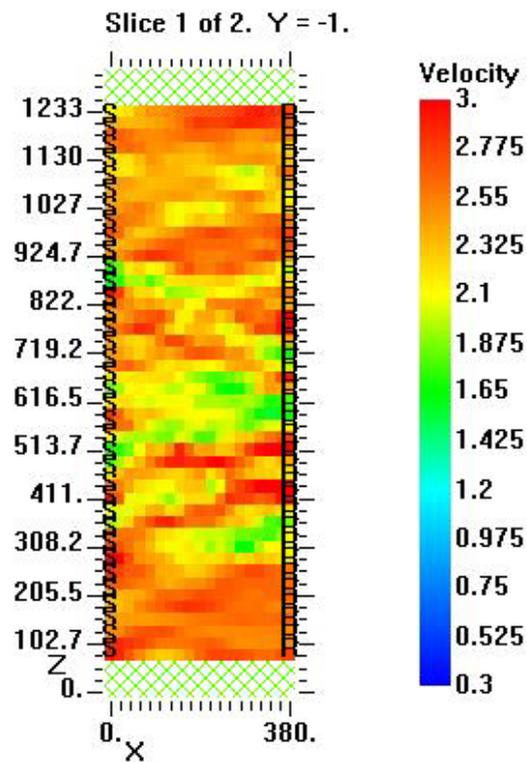


Figura 6.98 Muretto PPDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PPDFvertA_106

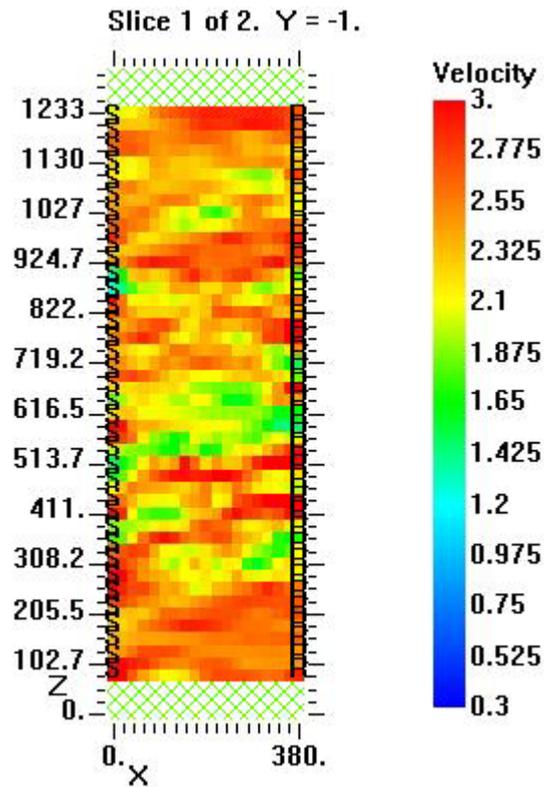


Figura 6.99 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_107

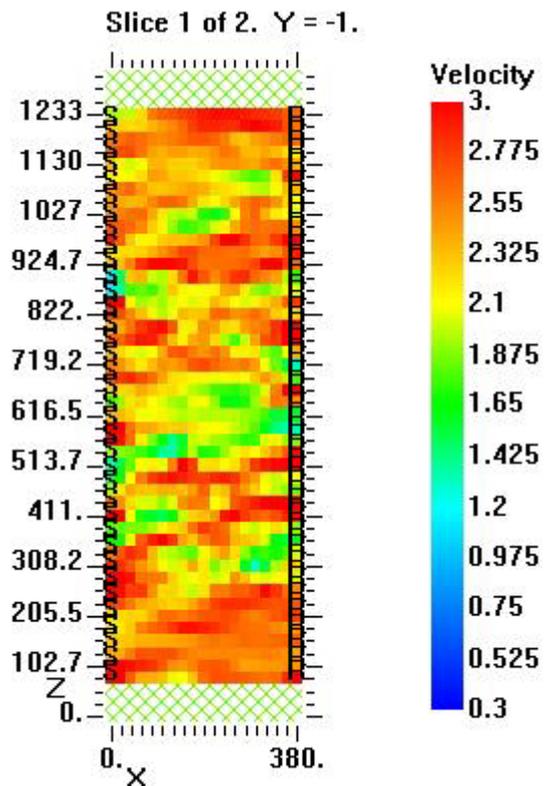


Figura 6.100 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDFvertA_108

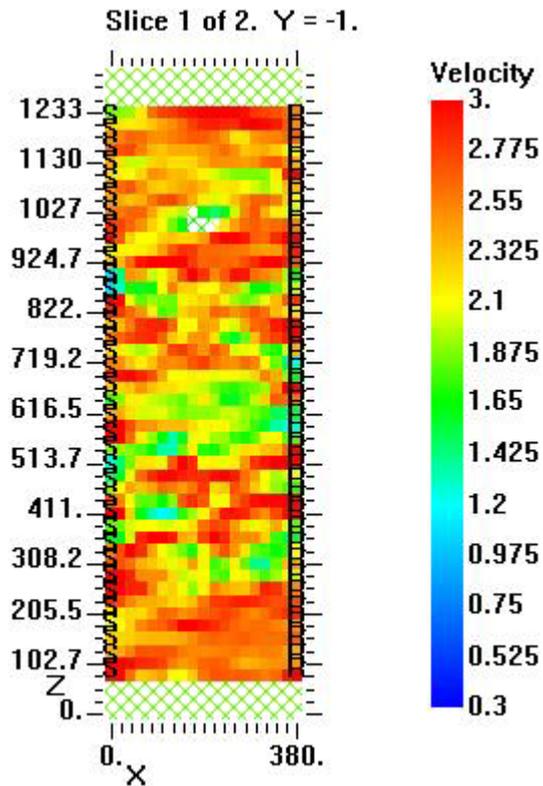


Figura 6.101 Muretto PNDf, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 20 curved, griglia di 19x52 pixel, file output PNDfvertA_109

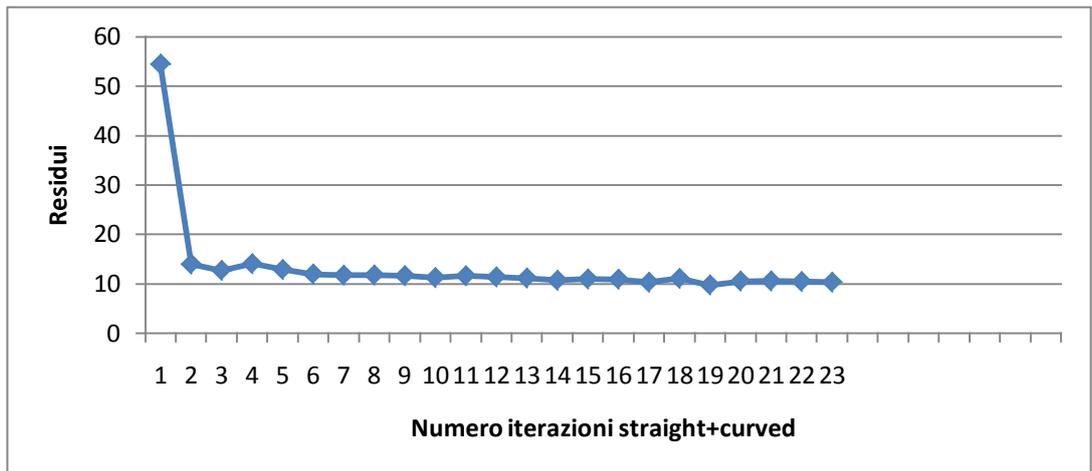


Figura 6.102 Muretto PNDf, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 19x 52

Tabella 6.19 Muretto PNDf, sezione B-B', parametri di inversione per una griglia di 11x38 pixel

Pixel : 11x38		Intervallo di velocità: 0,3 Km/sec- 3 Km/sec			
File input	Iterazioni straight	Iterazioni curved	Iterazioni totali	File output	Mappe di velocità
PNDfvertB_130	3	0	3	PNDfvertB_131	Figura 6.103
PNDfvertB_131	0	5	8	PNDfvertB_136	Figura 6.104
PNDfvertB_136	0	5	13	PNDfvertB_137	Figura 6.105
PNDfvertB_137	0	5	18	PNDfvertB_138	Figura 6.106
PNDfvertB_138	0	5	23	PNDfvertB_139	Figura 6.107

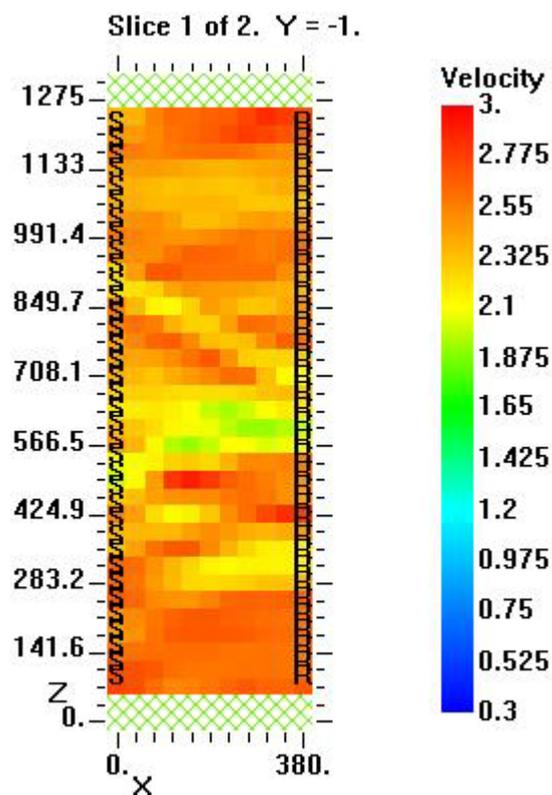


Figura 6.103 Muretto PNDf, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 11x38 pixel, file output PNDfvertA_131

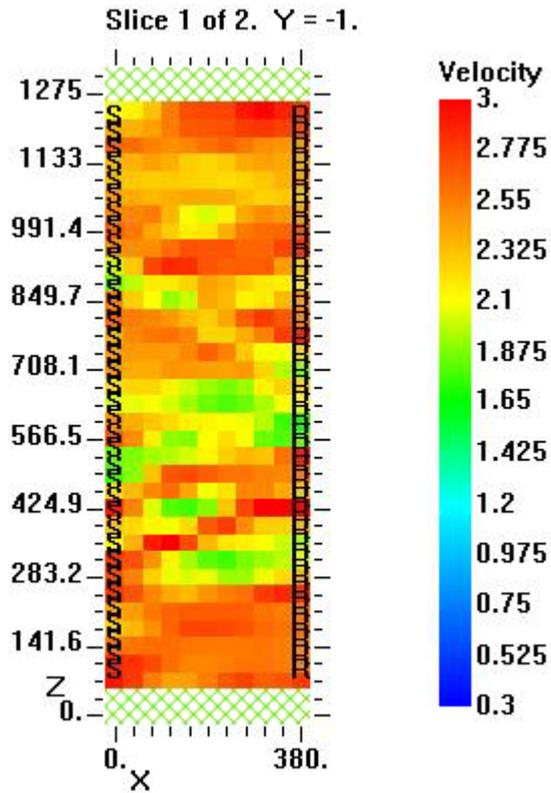


Figura 6.104 Muretto PPDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 5 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PPDFvertA_136

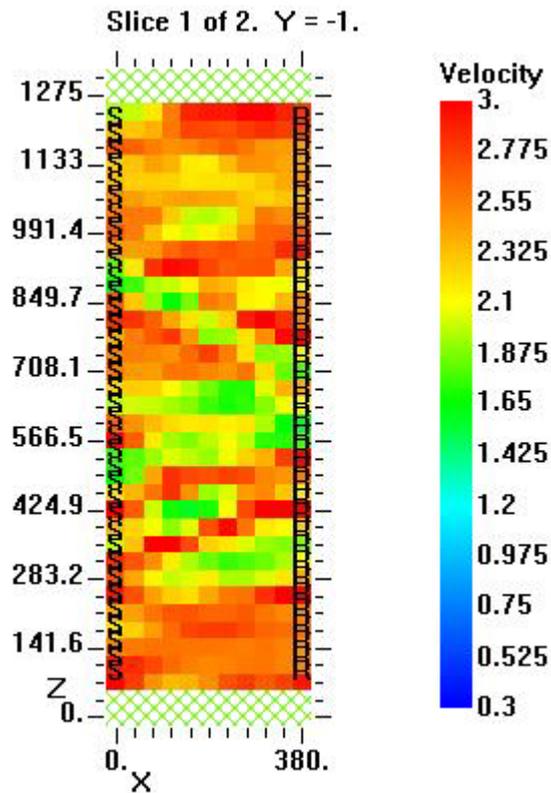


Figura 6.105 Muretto PPDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 10 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PPDFvertA_137

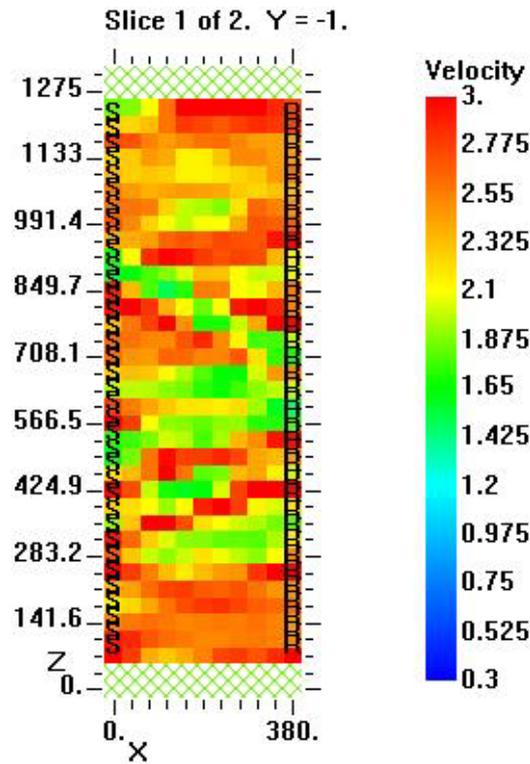


Figura 6.106 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight e 15 curved, griglia di 11x38 pixel, file output PNDFvertA_138

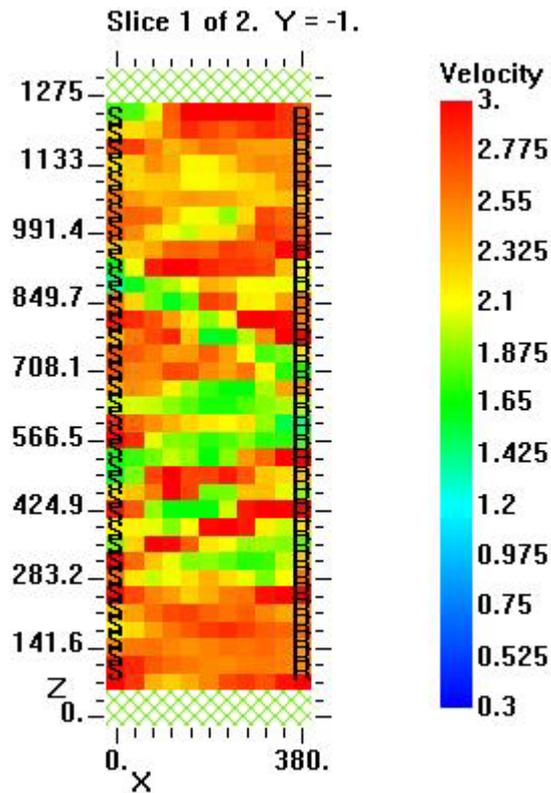


Figura 6.107 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità, 3 iterazioni straight, griglia di 11x38 pixel, file output PNDFvertA_139

Le immagini mostrano una mappa di velocità molto disomogenea. Il proseguimento con il numero di iterazioni non porta a sostanziali miglioramenti, se non all'allargamento progressivo dell'area centrale a bassa velocità. Soltanto una sovrapposizione della geometria della sezione mi dà una più chiara idea delle similitudini tra valori di bassa velocità e zone con muratura a sacco. Anche dall'immagine in figura 6.108 si nota una disposizione dei percorsi caotica, alternata da zone dove sono più affittiti a zone dove si aprono quasi ad indicare la presenza di un'anomalia. I residui (figura 6.109) iniziano da un valore di 54 e discendono fino a tendere asintoticamente a 10. La parte finale della curva mostra un innalzamento dei valori, che dovrebbe significare un'allontanamento dalla convergenza del metodo e un peggioramento nella definizione della mappa di velocità. In realtà non riusciamo a riscontrare ciò dalle immagini poiché le immagini non ci danno particolari informazioni sulla geometria della sezione.

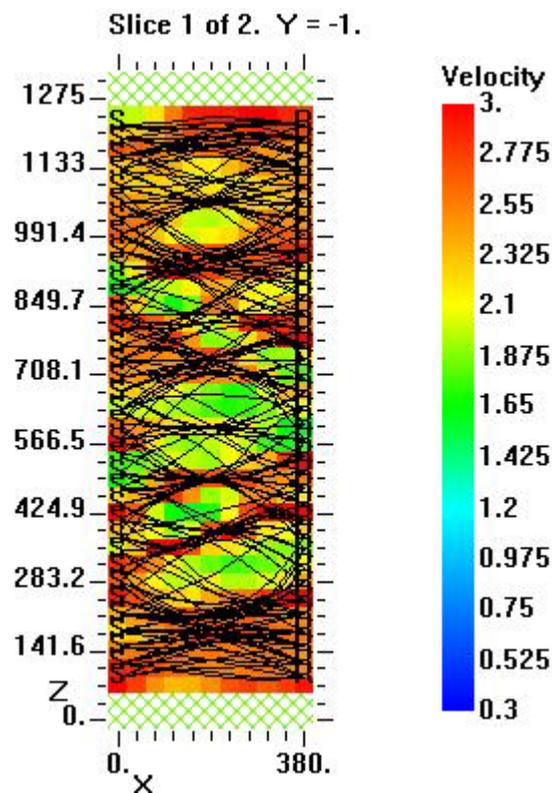


Figura 6.108 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità del file output PNDFvertA_137ray

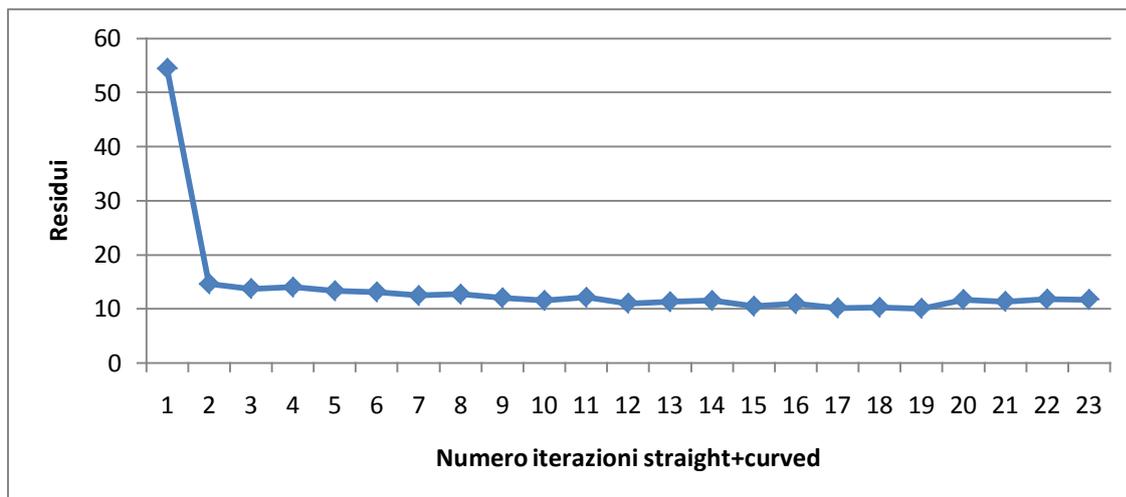


Figura 6.109 Muretto PNDF, sezione B-B', grafico dei residui di 23 iterazioni straight+curved per una griglia di 11x38 pixel

6.3 Confronti e osservazioni critiche

È interessante mettere a confronto i vari risultati ottenuti per poter osservare criticamente quali siano i pregi e i limiti delle acquisizioni tomografiche lungo le sezioni verticali. Riguardo alla velocità media, si nota che i valori delle 4 sezioni verticali hanno un valore di velocità media superiore ai 2400 m/s, in particolare le sezioni del muretto PNDE hanno velocità media nell'intorno di 2440 m/s mentre le rispettive del muretto PNDF hanno un valore medio tra 2447 m/s e 2500 m/s. Le sezioni orizzontali del muretto PNDE hanno valori medi di 2327 m/s (corso 6) e valori medi di 2589 m/s (corso 17); le velocità medie oscillano in un ampio range dovuto alla disposizione dei difetti, alla geometria del corso e alla posizione delle stazioni di misura. Ci saremmo aspettati valori quasi uguali, o forse per le sezioni verticali più bassi di quelle orizzontali perché lungo la tessitura muraria sono presenti tre zone con anomalie. Rispetto ad alcuni corsi orizzontali ciò si verifica, rispetto ad altre invece c'è un aumento della velocità. È stato anche notato che per percorsi verticali che non toccano difetti, la velocità del segnale ha valori superiori a 2600 m/s. Una giustificazione è data dalla posizione delle stazioni di misura, non più nel centro del mattone come quelle orizzontali, ma più vicine al giunto di malta. È stato osservato che sia in alcuni percorsi di corsi orizzontali che di sezioni verticali il segnale nell'attraversare la malta procede più velocemente, dovuta alla densità della malta. Per il muretto PNDF, i valori di velocità media delle sezioni verticali sono simili a quelle di un

corso orizzontale (corso 5) laddove sono presenti piccoli difetti, invece il valore di velocità media è inferiore, ma non di molto, rispetto al corso 7 dove la tessitura muraria non presenta imperfezioni. Nonostante la presenza di muratura a sacco per 10 corsi, la velocità media delle sezioni verticali rimane più alta di quella del corso 12 che presenza per tutta la lunghezza della sezione solo muratura a sacco e presenta una velocità di 2295 m/s.

Per la sezione A-A' del muretto PNDE, tra le immagini tomografiche ottenute, si sceglie la visualizzazione più simile alla reale geometria e si sovrappone alla stessa, per poter valutare più correttamente l'individuazione dei difetti. Nella figura 6.110 è riportato il file output PNDEvertA_117 con la sovrapposizione della geometria del corso,

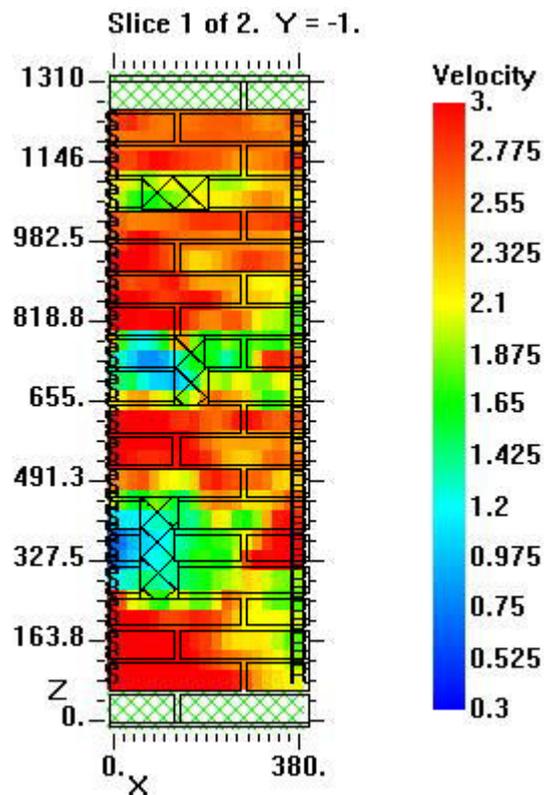


Figura 6.110 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità del file output PNDEvertA_117 con sovrapposizione della geometria

Nella figura 6.110 si vede nel dettaglio la visualizzazione di ciascuno dei tre difetti. La zona colore verde-blu in basso a sinistra identifica il difetto alto tre corsi, individuandone in maniera precisa l'altezza. La posizione è centrata anche se la zona in colore blu più scuro è posizionata più superficialmente rispetto alla reale collocazione del difetto. La forma dell'anomalia non è ricavata in maniera

chiara, anzi l'area a velocità più bassa è di dimensioni più vaste delle reali dimensioni. Il difetto nel suo complesso però è stato rilevato dalle immagini tomografiche prodotte. Il difetto centrale risulta essere spostato rispetto all'area di colore blu che lo dovrebbe identificare, mentre il difetto in alto viene rilevato in maniera abbastanza precisa per quanto riguarda la forma, le dimensioni e la posizione. La zona che lo identifica però mostra velocità più alte rispetto alle analoghe dei difetti inferiori. La stessa modalità di confronto è stata fatta per la sezione B-B' del muretto PNDE. In figura 6.111 è riportato il file output PNDEvertB_117 con la sovrapposizione della reale geometria del muretto

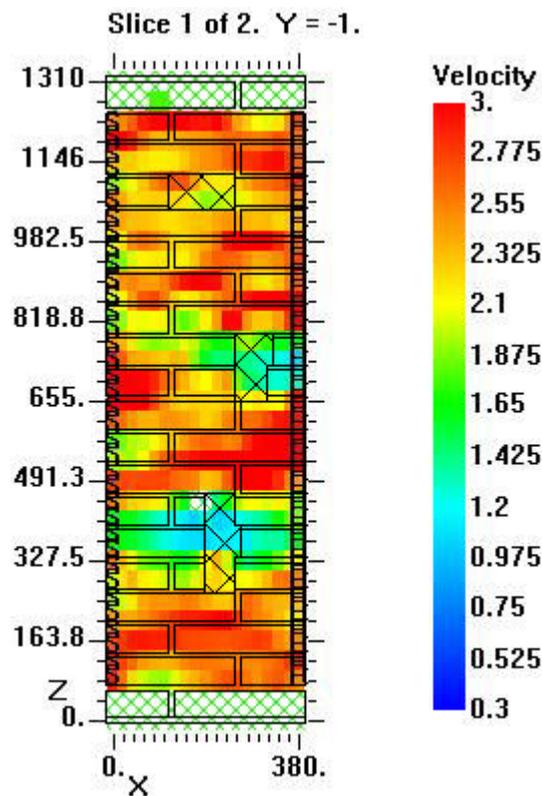


Figura 6.111 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità del file output PNDEvertB_117 con sovrapposizione della geometria

Per questa sezione, la visualizzazione dei difetti è meno definita rispetto alla sezione A-A'. Il difetto più basso è individuato solo per quando riguarda la generica altezza a cui si trova lungo il provino, ma l'area colorata che lo identifica non lo definisce nella forma, nelle dimensioni e nell'esatta posizione lungo lo spessore del muretto. Il difetto centrale alto due corsi viene localizzato da una zona in colore verde-blu di dimensione molto simili allo stesso, ma permane la problematica già vista che lo identifica in una posizione leggermente

più superficiale di quella reale. Il difetto in alto non è per nulla visualizzato nella sezione, si trova in una zona di colore arancio-giallo ma molto vasta. Passando al muretto PNDF, è interessante fare un confronto tra le sezioni di questo e quelle del muretto PNDE per quanto riguarda la diversa tessitura muraria e un confronto tra le stesse sezioni del provino. Per la sezione A-A' del muretto PNDF, si riporta il file output PNDFvertA_137 con la sovrapposizione della geometria del corso nelle figura 6.112.

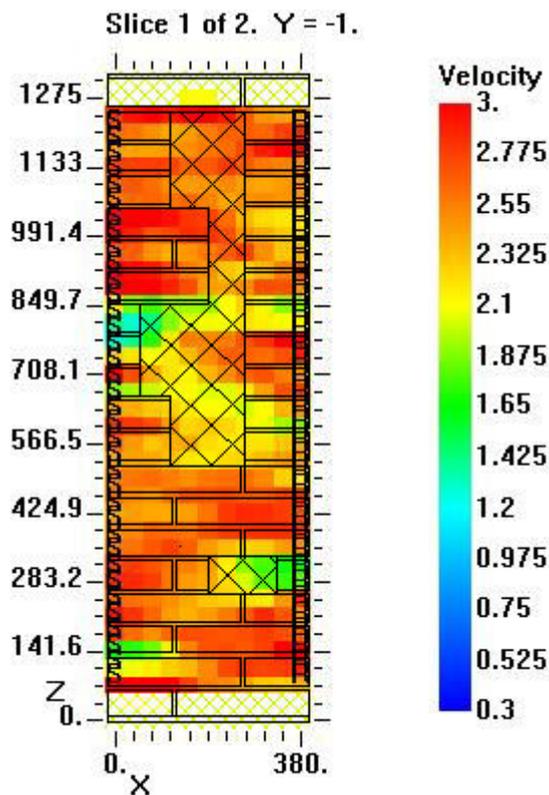


Figura 6.112 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità del file output PNDFvertA_137 con sovrapposizione della geometria

Nella figura 6.112 si osservano due zone a velocità più bassa, una in corrispondenza del difetto in basso e una in corrispondenza della zona con muratura a sacco di maggiore dimensioni. Il difetto viene individuato in maniera precisa sia in forma che in dimensioni e posizione, la zona invece in corrispondenza della muratura a sacco con dimensioni minori presenta una campitura di colore arancio-rosso a simboleggiare una velocità intorno ai 2400 m/sec. Per la sezione B-B' del muretto PNDF, viene presentata in figura 6.113 l'immagine tomografica ottenuta dal file output PNDFvertB_137.

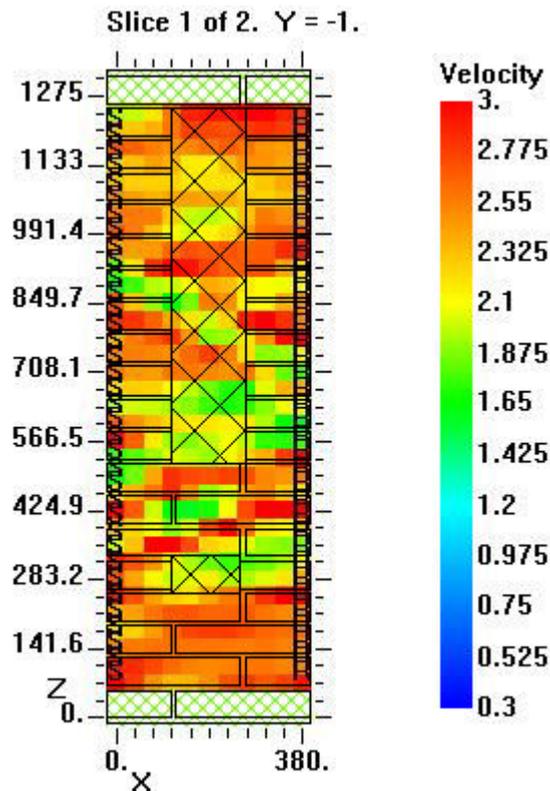


Figura 6.113 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità del file output PNDFvertB_137 con sovrapposizione della geometria

In questo caso non si nota nessuna corrispondenza tra i difetti e le tessiture murarie note e la distribuzione delle velocità; quest'ultima appare piuttosto caotica e disordinata senza alcuna relazione con la geometria. Tra le varie motivazioni che si possono trovare, sicuramente una risiede nella posizione delle anomalie. La mezzeria del difetto e dell'area di muratura a sacco coincidono all'incirca con la metà dello spessore e questo influenza come già visto nei casi precedenti la velocità rilevata. Per quanto riguarda un confronto fra le velocità medie, la sezione A-A' ha velocità pari a 2512 m/sec, mentre la sezione B-B' ha un valore pari a 2447 m/sec. Ciò è in contrapposizione a quanto ci aspetteremo poiché la sezione A-A' presenta più aree con anomalie.

In conclusione, si afferma che la posizione e le dimensioni del difetto influenzano i tempi di volo del segnale che li attraversa e di conseguenza le immagini tomografiche che si producono. La diversa tessitura muraria è rilevata solo nel caso in cui abbia una dimensione piuttosto ampia e si trovi in una posizione rilevabile dal segnale.

Capitolo 7

Prove soniche dirette: analisi dei corsi orizzontali

Le prove soniche dirette forniscono interessanti informazioni sulla presenza di difetti all'interno di un elemento. Le stazioni di misura considerate per l'applicazione della tomografia, sono utilizzate anche per acquisire il valore del tempo di volo impiegato dal segnale originato da una specifica stazione Tx a raggiungere la speculare stazione Rx. I corsi considerati sono il numero 5, 11, 12 e 17 per il muretto PNDE e il numero 5, 7 e 12 per il muretto PNDF. Dopo aver analizzato i tempi di volo si ricavano le relative velocità del segnale. Le stazioni di misura sono 28, distanziate di 4 cm l'una dall'altra. La prima e la ventottesima stazione si trovano a 10,5 cm dal bordo.

7.1 Muretto PNDE

7.1.1 Corso 6

Il corso 6 del muretto PNDE presenta due difetti di forma rettangolare, le cui dimensioni sono illustrate nel capitolo 3. I tempi di volo delle 28 stazioni a 4 cm di distanza l'una dall'altra (tabella 7.1) evidenziano i valori più alti per traiettorie che passano per il difetto. L'istogramma dei tempi di volo (figura 7.1 e 7.2) mostra tra la settima e la nona acquisizione i valori più alti, che derivano da stazioni Tx di fronte al primo difetto di sinistra. Allo stesso modo dalla ventesima alla ventiduesima acquisizione si hanno valori di tempo di volo maggiori rispetto ai valori circostanti, poiché sono derivati dalle stazioni emittenti di fronte al secondo difetto. Come già osservato dalle acquisizioni tomografiche, quest'ultimi tempi di volo hanno valori più bassi rispetto a quelli compresi fra la settima e la nona acquisizione. Le stazioni Tx che si trovano di fronte al difetto di sinistra (figura 7.4) sono comprese fra la quinta e l'undicesima, mentre per il difetto di destra tra la diciottesima e la ventiquattresima. Si osserva infatti che già dalla quinta acquisizione si ha un

progressivo innalzamento dei tempi di volo fino a raggiungere il culmine nelle stazioni che si trovano in prossimità della mezzeria del difetto, per poi decrescere fino alla undicesima acquisizione. Le stesse considerazioni si fanno per il difetto di destra. Le velocità del segnale per le 28 acquisizioni hanno un andamento speculare a quello dei tempi di volo (figura 7.3). Confrontando le velocità ottenute per le varie stazioni di misura con la geometria del corso (figura 7.4) si nota che le velocità inferiori sono corrispondenti alle stazioni di fronte ad un difetto; la lunghezza del difetto viene individuata in maniera piuttosto precisa.

Tabella 7.1 Provino PNDE, corso 6: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso6	1	1	1	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDe_corso6	2	2	8	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso6	3	3	16	0,38	142	0,000142	2676,056338	Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone. Posizione martello sul giunto di malta	N
PNDe_corso6	4	4	24	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDe_corso6	5	5	32	0,38	152	0,000152	2500		S
PNDe_corso6	6	6	41	0,38	172	0,000172	2209,302326	Parte finale del picco del martello non è lineare	S
PNDe_corso6	7	7	46	0,38	300	0,0003	1266,666667		S
PNDe_corso6	8	8	51	0,38	234	0,000234	1623,931624	Curva del martello con la finale del picco non lineare. Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_corso6	9	9	56	0,38	308	0,000308	1233,766234	Parte finale del picco del martello non lineare.	S
PNDe_corso6	10	10	61	0,38	182	0,000182	2087,912088	INCERTO	S
PNDe_corso6	11	11	66	0,38	162	0,000162	2345,679012		S

PNDe_ corso6	12	12	71	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ corso6	13	13	76	0,38	138	0,000138	2753,623188	Posizione martello su giunto di malta,battuta sull'angolo del mattone.	N
PNDe_ corso6	14	14	81	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_ corso6	15	15	86	0,38	134	0,000134	2835,820896		N
PNDe_ corso6	16	16	91	0,38	132	0,000132	2878,787879	Posizione martello su giunto di malta.Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso6	17	17	96	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_ corso6	18	18	101	0,38	144	0,000144	2638,888889		S
PNDe_ corso23	19	19	106	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDe_ corso6	20	20	111	0,38	216	0,000216	1759,259259	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	21	21	116	0,38	220	0,00022	1727,272727	Picco accelerometro pendenza negativa	S
PNDe_ corso6	22	22	121	0,38	208	0,000208	1826,923077	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_ corso6	23	23	126	0,38	176	0,000176	2159,090909		S
PNDe_ corso6	24	24	135	0,38	160	0,00016	2375		S
PNDe_ corso6	25	25	143	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ corso6	26	26	151	0,38	162	0,000162	2345,679012	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso6	27	27	159	0,38	154	0,000154	2467,532468		N
PNDe_ corso6	28	28	166	0,38	146	0,000146	2602,739726		N

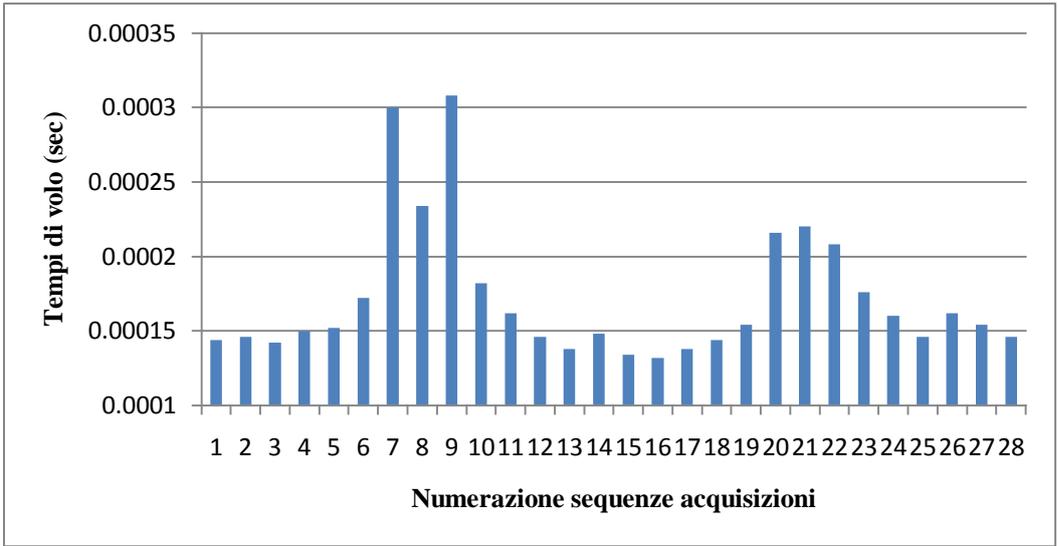


Figura 7.1 Muretto PNDE, corso 6, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

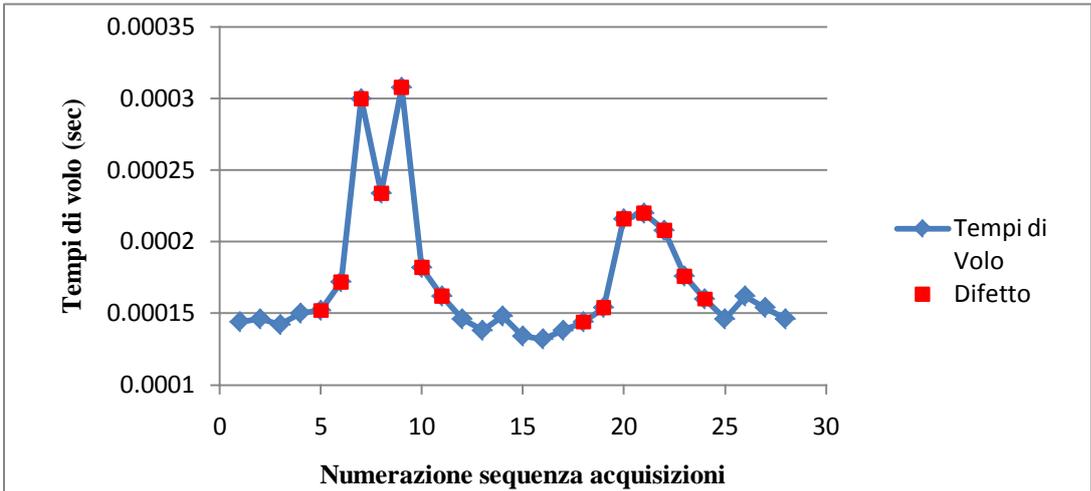


Figura 7.2 Muretto PNDE, corso 6, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che attraversano il difetto

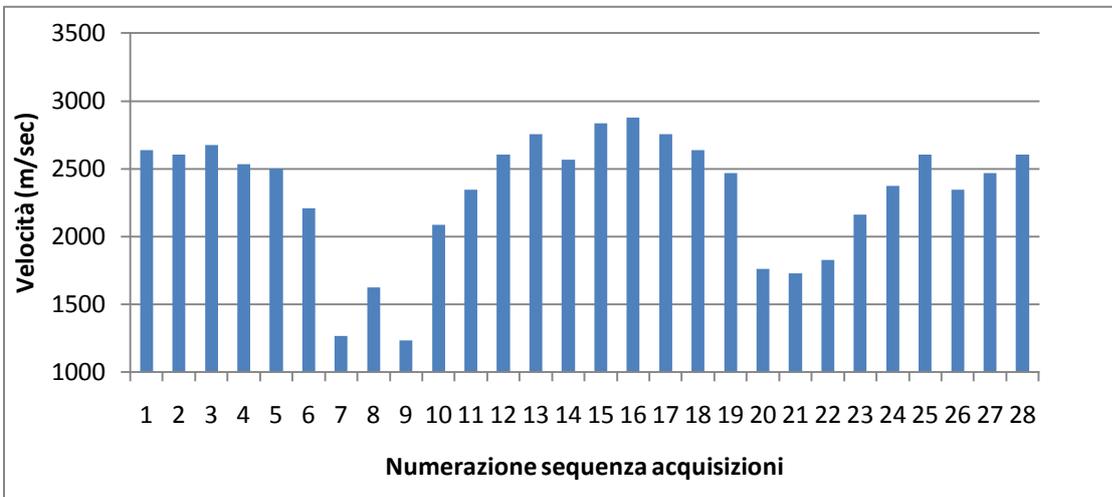


Figura 7.3 Muretto PNDE, corso 6, velocità espresse in m/s dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che attraversano il difetto

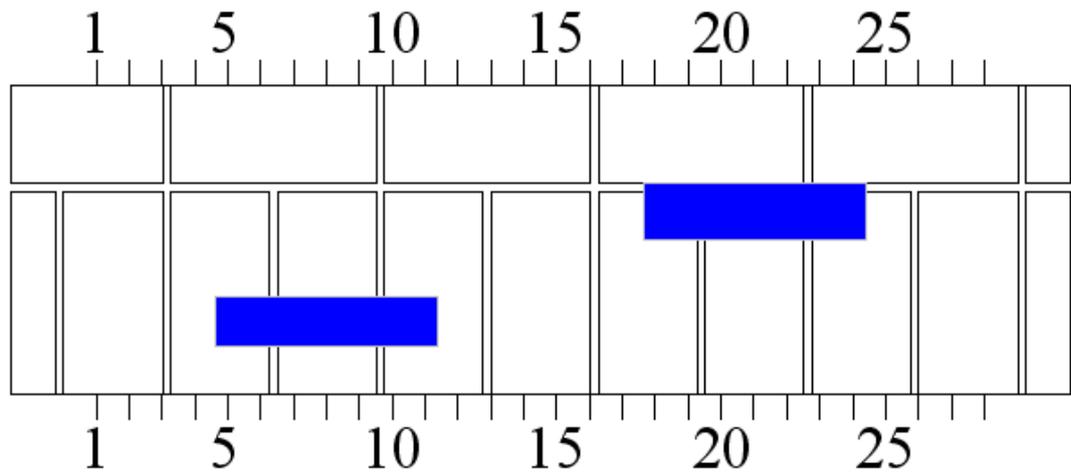


Figura 7.4 Muretto PNDE, corso 6, geometria della sezione

7.1.2 Corso 11

Il corso 11 del muretto PNDE presenta due difetti alti due soli corsi di muratura. Il percorso del segnale non si allunga di molto rispetto alla traiettoria rettilinea che si avrebbe se non vi fosse un'imperfezione che ne provoca una deviazione. Ci si aspettano quindi valori di tempi di volo in corrispondenza dei difetti non molto superiori alla media. I tempi di volo acquisiti per le 28 stazioni (tabella 7.2) non mostrano valori superiori ai 200 microsecondi come visti per il corso 6. Non si evidenziano (figura 7.5 e 7.6) neppure valori superiori alla media in corrispondenza dell'ottava stazione Tx o della ventunesima che sono le stazioni emittenti che sono collocate nella mezzera del difetto. Ciò ci porta a concludere che il fronte d'onda viaggia inferiormente al difetto, ovvero lungo il percorso di minore lunghezza, piuttosto che aggirarlo lateralmente. Le velocità, essendo ricavate direttamente dai tempi di volo, non mostrano risultati differenti da quelli ricavati dai tempi di volo (figura 7.7). Confrontando le velocità con la geometria del corso (figura 7.8), non si nota una corrispondenza fra i bassi valori di velocità e i difetti presenti. Alcuni valori di velocità inferiori appartengono a stazioni di misura di fronte ad un difetto, ma sono così dispersivi che non si riescono ad avere informazioni sulla lunghezza del difetto attraverso le prove soniche dirette.

**Tabella 7.2 Provino PNDE, corso 11: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove
soniche dirette**

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso11	1	1	1	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_corso11	2	2	8	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_corso11	3	3	16	0,38	170	0,00017	2235,294118	Strana curva martello	N
PNDe_corso11	4	4	24	0,38	152	0,000152	2500		N
PNDe_corso11	5	5	32	0,38	144	0,000144	2638,888889	Posizione martello sul bordo mattone.Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_corso11	6	6	41	0,38	164	0,000164	2317,073171		S
PNDe_corso11	7	7	46	0,38	162	0,000162	2345,679012		S
PNDe_corso11	8	8	51	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDe_corso11	9	9	56	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDe_corso11	10	10	61	0,38	146	0,000146	2602,739726		S
PNDe_corso11	11	11	66	0,38	160	0,00016	2375	Posizione martello vicino bordo mattone.	S
PNDe_corso11	12	12	71	0,38	156	0,000156	2435,897436		N
PNDe_corso11	13	13	76	0,38	172	0,000172	2209,302326		N
PNDe_corso11	14	14	81	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso11	15	15	86	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDe_corso11	16	16	91	0,38	162	0,000162	2345,679012		N
PNDe_corso11	17	17	96	0,38	182	0,000182	2087,912088		N
PNDe_corso11	18	18	101	0,38	152	0,000152	2500		S
PNDe_corso11	19	19	106	0,38	164	0,000164	2317,073171		S

PNDe_ corso11	20	20	111	0,38	172	0,000172	2209,302326		S
PNDe_ corso11	21	21	116	0,38	164	0,000164	2317,073171		S
PNDe_ corso11	22	22	121	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PNDe_ corso11	23	23	126	0,38	172	0,000172	2209,302326		S
PNDe_ corso11	24	24	135	0,38	142	0,000142	2676,056338	Posizione martello sul giunto di malta, battuto a sinistra.	S
PNDe_ corso11	25	25	143	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDe_ corso11	26	26	151	0,38	162	0,000162	2345,679012		N
PNDe_ corso11	27	27	159	0,38	152	0,000152	2500		N
PNDe_ corso11	28	28	166	0,38	150	0,00015	2533,333333		N

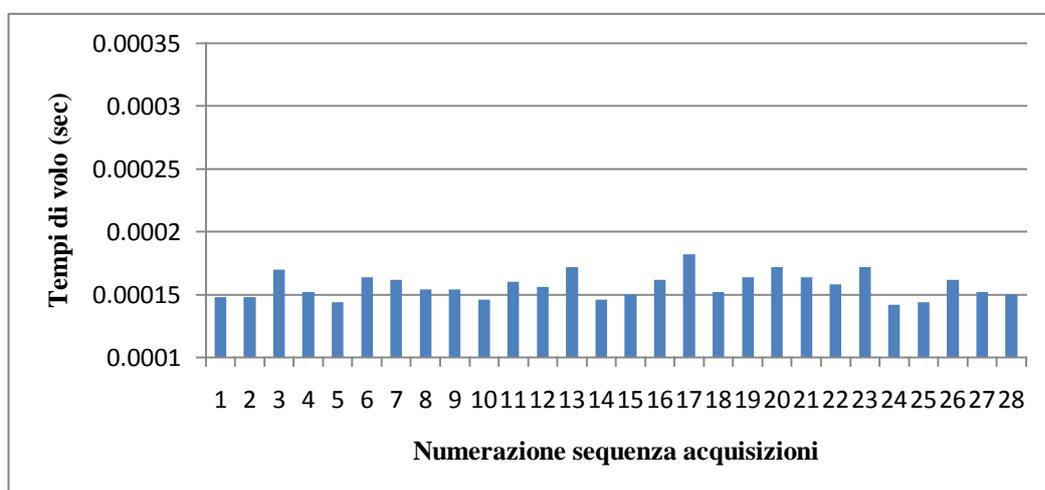


Figura 7.5 Muretto PNDE, corso 11, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

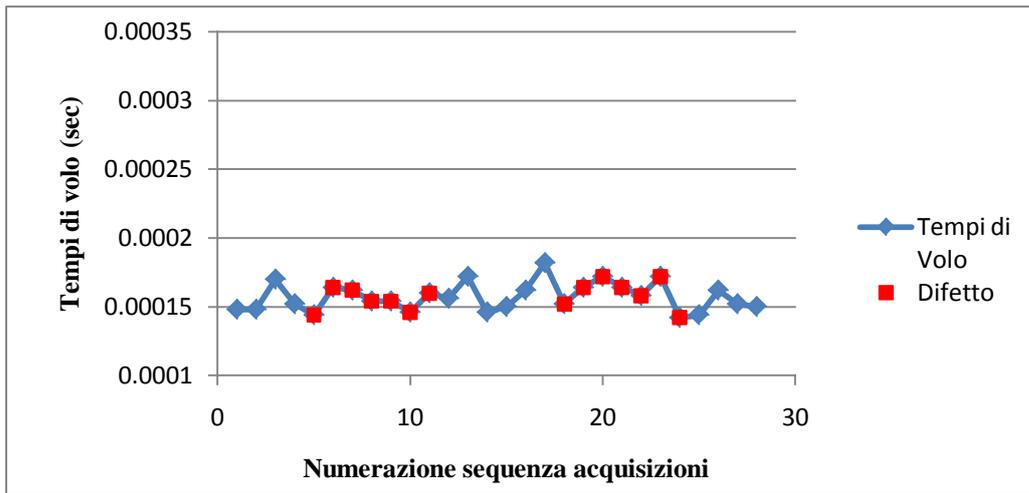


Figura 7.6 Muretto PNDE, corso 11, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che toccano il difetto

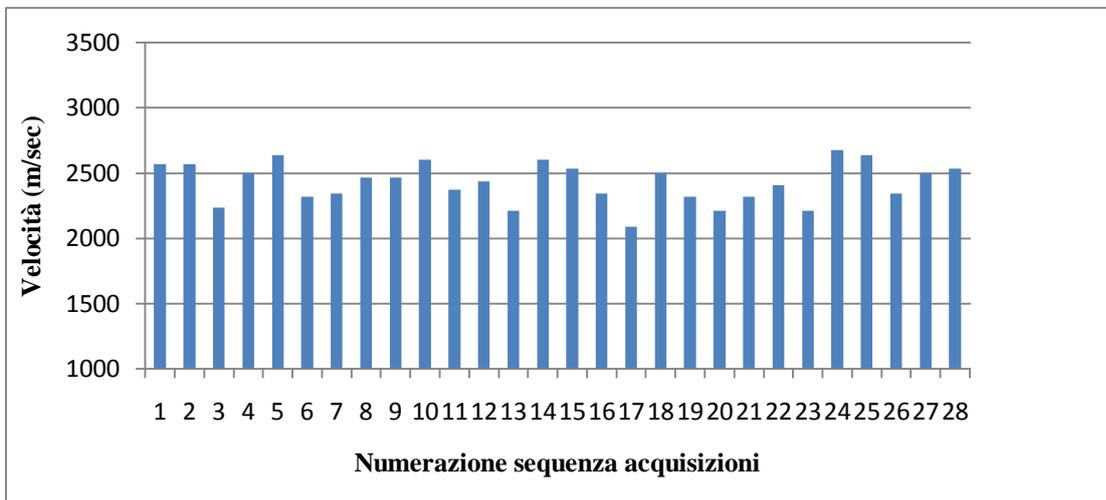


Figura 7.7 Muretto PNDE, corso 11, velocità espresse in m/s dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che toccano il difetto

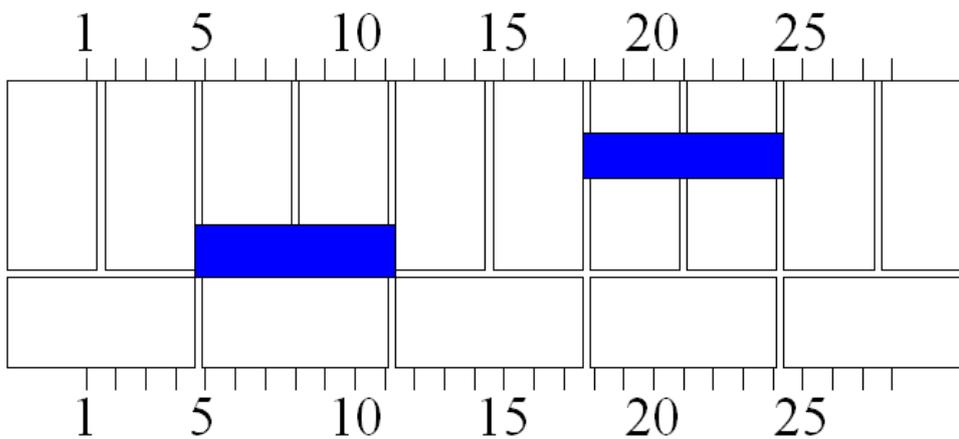


Figura 7.8 Muretto PNDE, corso 11, geometria della sezione

7.1.3 Corso 12

Il corso 12 del muretto PNDE presenta due difetti di altezza pari a due corsi di muratura. La geometria dei difetti è uguale al corso 11, ma varia la disposizione dei mattoni all'interno delle due sezioni. I tempi di volo acquisiti (tabella 7.3) mostrano dei valori superiori ai 200 microsecondi in corrispondenza di raggi uscenti tra la settima e l'ottava stazione emittente, che si trovano in prossimità della mezzeria del difetto di sinistra. L'istogramma dei tempi di volo (figura 7.9 e 7.10) evidenzia anche una seconda zona di tempi di volo compresi tra 150 microsecondi e 200 microsecondi (valori superiori alla media) tra la ventesima e ventitreesima acquisizione corrispondente alle prove dirette eseguite nelle relative stazioni Tx. Esse identificano il difetto collocato sulla destra rispetto al fronte del muretto. Le velocità (figura 7.11) mostra una decrescita a partire dalla quinta acquisizione fino circa alla decima, non in maniera simmetrica, ma sicuramente più evidente della decrescita dalla ventesima alla ventitreesima acquisizione, che corrisponde al difetto di destra. Le misure derivanti dalle prove dirette confermano per il corso 12 la presenza di due anomalie, che invece non sono rilevate nel corso 11. Le velocità raggiungono valori inferiori rispetto ai valori assunti nel corso 11 in corrispondenza delle medesime acquisizioni. Confrontando le velocità con la geometria del corso (figura 7.12), si nota che le velocità inferiori corrispondono alle stazioni che si trovano di fronte al difetto. Le lunghezze dei due difetti sono individuate in maniera abbastanza precisa.

Tabella 7.3 Provino PNDE, corso 12: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso12	1	1	1	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso12	2	2	8	0,38	132	0,000132	2878,787879		N

PNDDe_ corso12	3	3	16	0,38	134	0,000134	2835,820896	Posizione martello vicino al bordo del mattone.Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDDe_ corso12	4	4	24	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDDe_ corso12	5	5	32	0,38	144	0,000144	2638,888889		S
PNDDe_ corso12	6	6	41	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDDe_ corso12	7	7	46	0,38	200	0,0002	1900	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDDe_ corso12	8	8	51	0,38	204	0,000204	1862,745098	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDDe_ corso12	9	9	56	0,38	176	0,000176	2159,090909		S
PNDDe_ corso12	10	10	61	0,38	172	0,000172	2209,302326	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S
PNDDe_ corso12	11	11	66	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDDe_ corso12	12	12	71	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDDe_ corso12	13	13	76	0,38	146	0,000146	2602,739726	Posizione del martello vicino al bordo mattone.	N
PNDDe_ corso12	14	14	81	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDDe_ corso12	15	15	86	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDDe_ corso12	16	16	91	0,38	156	0,000156	2435,897436	Posizione martello su giunto di malta. Posizione accelerometro vicino al bordo del mattone.	N
PNDDe_ corso12	17	17	96	0,38	154	0,000154	2467,532468		N
PNDDe_ corso12	18	18	101	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDDe_ corso12	19	19	106	0,38	182	0,000182	2087,912088	Posizione martello vicino al bordo del mattone.	S
PNDDe_ corso12	20	20	111	0,38	194	0,000194	1958,762887		S
PNDDe_ corso12	21	21	116	0,38	188	0,000188	2021,276596		S
PNDDe_ corso12	22	22	121	0,38	196	0,000196	1938,77551		S
PNDDe_ corso12	23	23	126	0,38	176	0,000176	2159,090909	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.	S

PNDe_ corso12	24	24	135	0,38	142	0,000142	2676,056338		S
PNDe_ corso12	25	25	143	0,38	156	0,000156	2435,897436		N
PNDe_ corso12	26	26	151	0,38	150	0,00015	2533,333333	Posizione martello su giunto di malta, battuto a fianco sul bordo del mattone.	N
PNDe_ corso12	27	27	159	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDe_ corso12	28	28	166	0,38	144	0,000144	2638,888889		N

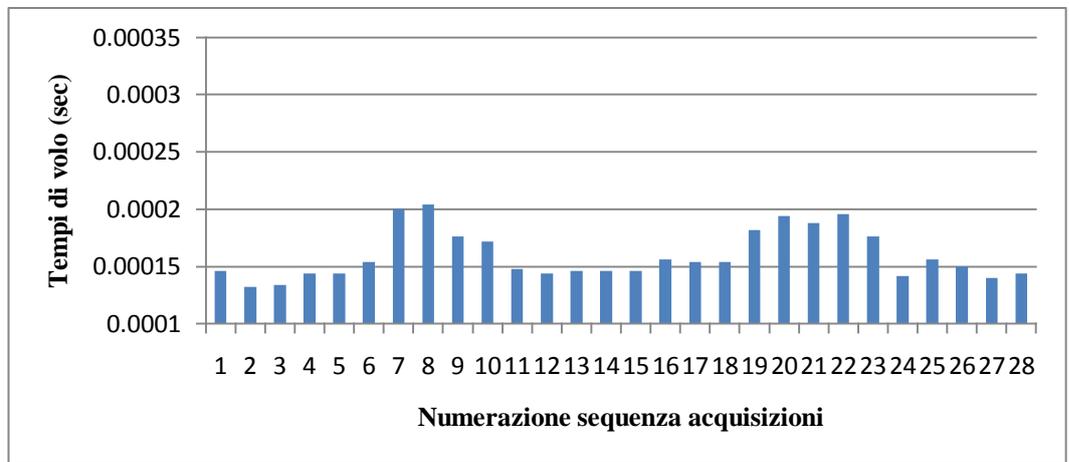


Figura 7.9 Muretto PNDE, corso 12, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

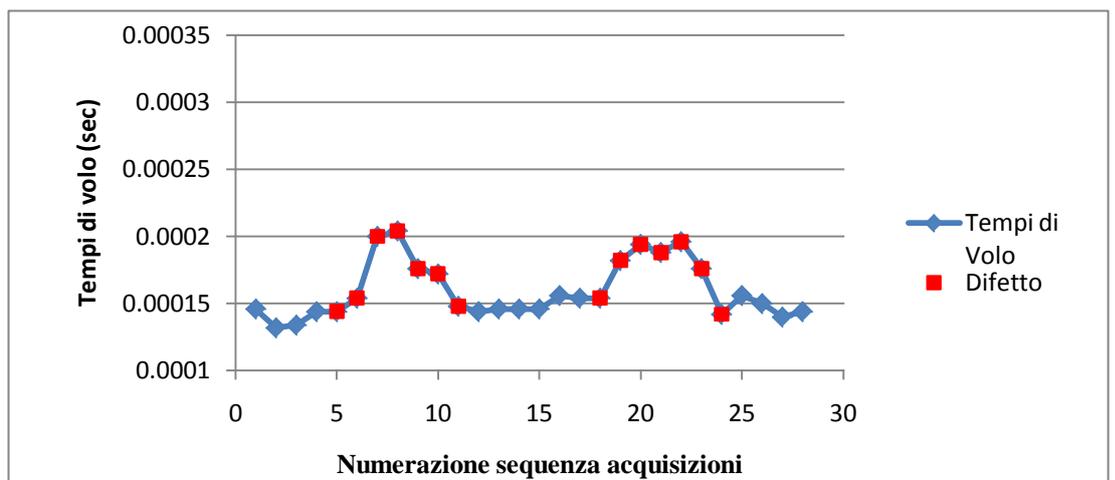


Figura 7.10 Muretto PNDE, corso 12, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che toccano un difetto

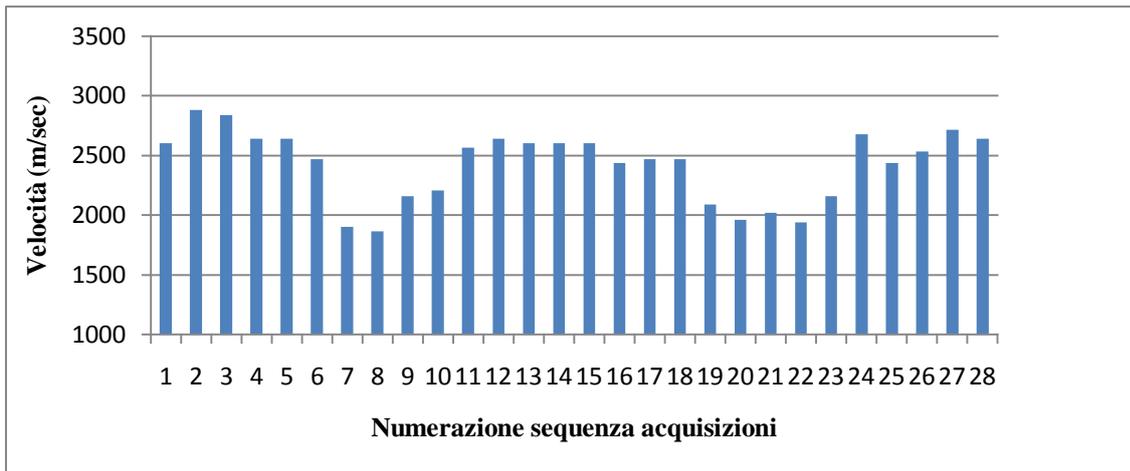


Figura 7.11 Muretto PNDE, corso 12, velocità espresse in m/se dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che toccano un difetto

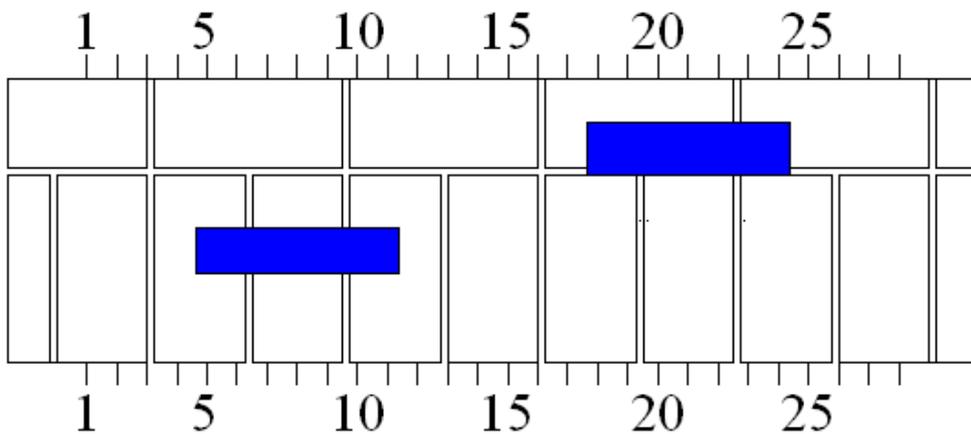


Figura 7.12 Muretto PNDE, corso 12, geometria della sezione

7.1.4 Corso 17

Il corso 17 del muretto PNDE presenta due difetti di forma quadrata alti solo un corso. Rispetto alle inversioni tomografiche già effettuate, l'analisi dei percorsi diretti non ci aggiunge particolari informazioni. I tempi di volo acquisiti (tabella 7.4) hanno quasi tutti valori inferiori ai 150 microsecondi. I tempi registrati in corrispondenza dell'ottava e ventunesima stazione Tx, che sono collocate in corrispondenza delle mezzerie dei due difetti non mostrano valori superiori alla media. Essendo i difetti alti solo un corso, il segnale percorre una distanza poco superiore rispetto al percorso rettilineo. L'istogramma dei tempi di volo (figura 7.13) non mostra particolari picchi con valori più alti di altri così come il grafico di figura 7.14 che sottolinea i percorsi diretti che partono da stazioni emittente di

fronte al difetto. Quest'ultimi coincidono con tempi di volo tra i più alti del grafico, ma ve ne sono altrettanti che non partono da stazioni frontali al difetto. Le velocità (figura 7.15) non scendono al di sotto dei 2500 m/sec, valore che denota una buona muratura, anche sono presenti dei difetti. Confrontando le velocità con la geometria (figura 7.16), non si evidenziano corrispondenze tra le basse velocità e la presenza dei difetti. Considerata anche la risoluzione delle prove soniche dirette, maggiore di 15 cm, la presenza dei difetti non è rilevata.

Tabella 7.4 Provino PNDE, corso 17: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_corso17	1	1	1	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso17	2	2	8	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_corso17	3	3	16	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDe_corso17	4	4	24	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso17	5	5	32	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_corso17	6	6	41	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDe_corso17	7	7	46	0,38	152	0,000152	2500		S
PNDe_corso17	8	8	51	0,38	144	0,000144	2638,888889	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_corso17	9	9	56	0,38	150	0,00015	2533,333333		S
PNDe_corso17	10	10	61	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_corso17	11	11	66	0,38	144	0,000144	2638,888889	Posizione martello vicino al bordo mattone. Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_corso17	12	12	71	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_corso17	13	13	76	0,38	148	0,000148	2567,567568		N

PNDe_ corso17	14	14	81	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ corso17	15	15	86	0,38	154	0,000154	2467,532468		N
PNDe_ corso17	16	16	91	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDe_ corso17	17	17	96	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_ corso17	18	18	101	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_ corso17	19	19	106	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_ corso17	20	20	111	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDe_ corso17	21	21	116	0,38	146	0,000146	2602,739726	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	S
PNDe_ corso17	22	22	121	0,38	142	0,000142	2676,056338		S
PNDe_ corso17	23	23	126	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_ corso17	24	24	135	0,38	144	0,000144	2638,888889	Posizione martello vicino al bordo del mattone. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.	N
PNDe_ corso17	25	25	143	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_ corso17	26	26	151	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_ corso17	27	27	159	0,38	136	0,000136	2794,117647	Posizione accelerometro vicino bordo mattone.	N
PNDe_ corso17	28	28	166	0,38	150	0,00015	2533,333333		N

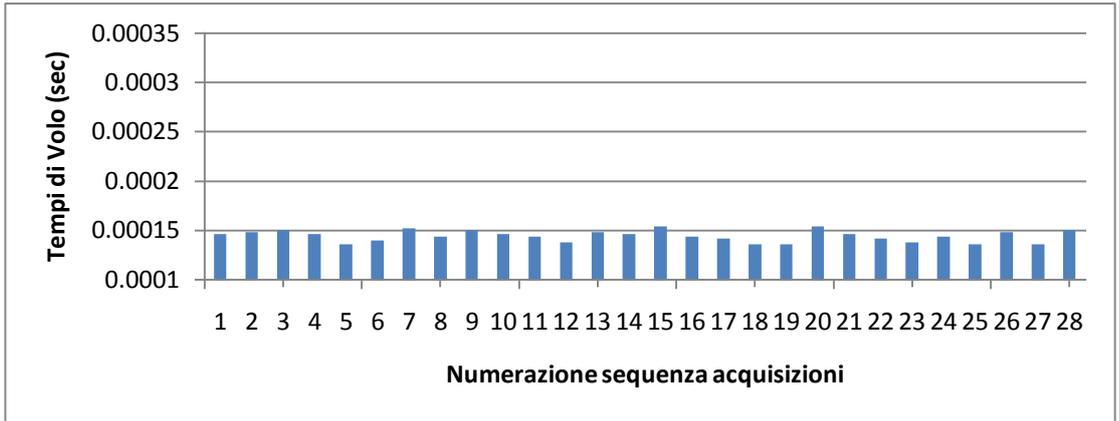


Figura 7.13 Muretto PNDE, corso 17, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

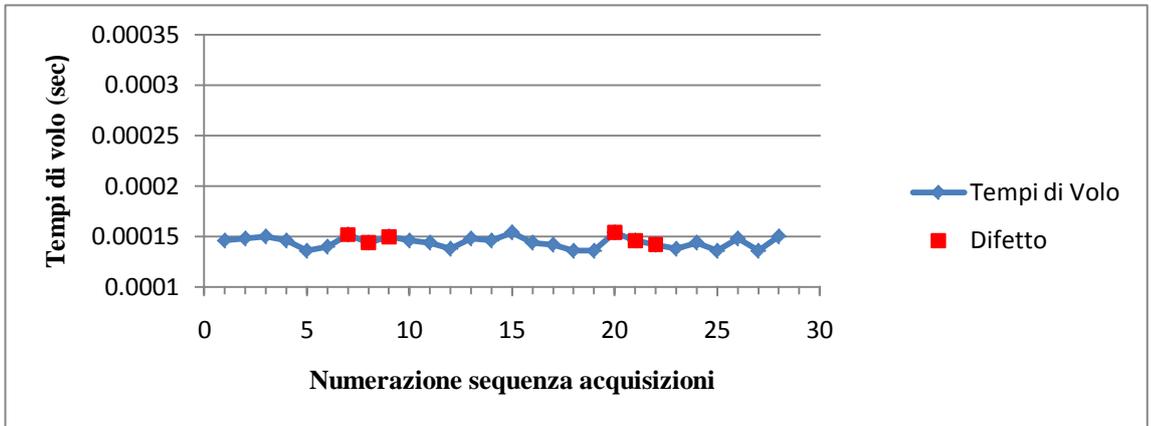


Figura 7.14 Muretto PNDE, corso 17, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti con dettaglio dei percorsi che attraversano un difetto

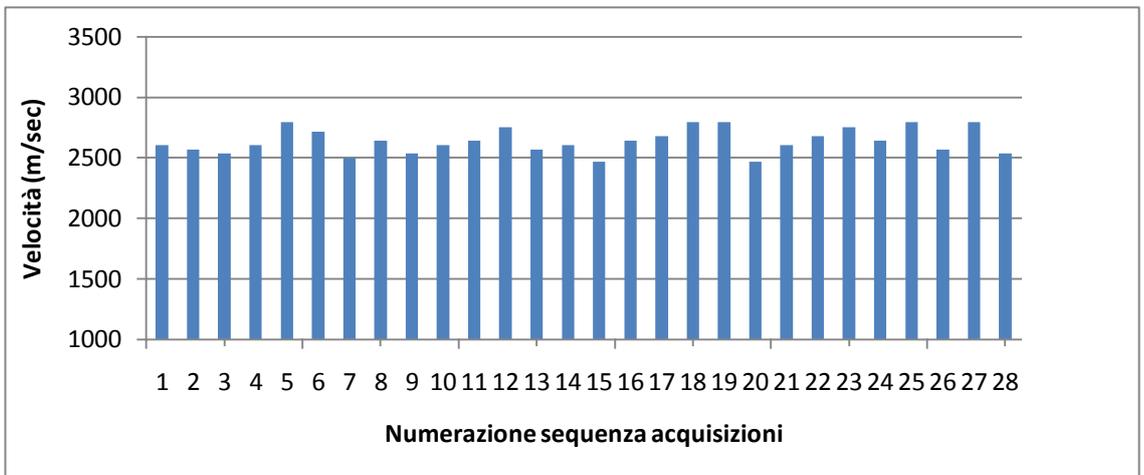


Figura 7.15 Muretto PNDE, corso 17, velocità espressa in m/s dei percorsi diretti

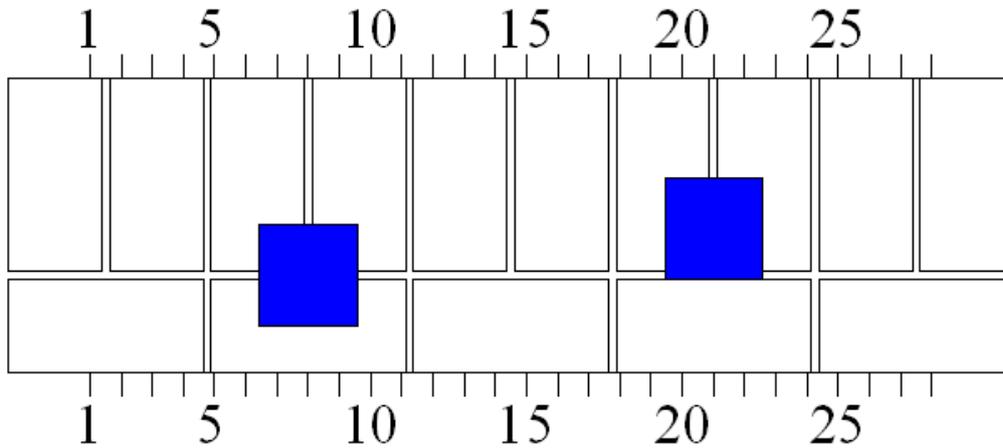


Figura 7.16 Muretto PNDE, corso 17, geometria della sezione

7.2 Muretto PNDF

7.2.1 Corso 5

Il corso 5 del muretto PNDF presenta due difetti, uno di forma quadrata e uno di forma rettangolare, di altezza pari ad un corso. I tempi di volo acquisiti (tabella 7.5) mostrano dei valori medi intorno ai 150 microsecondi, tranne un valore superiore ai 400 microsecondi in corrispondenza della quattordicesima acquisizione. Le misure ricavate dai percorsi diretti (figura 7.17) denotano tra la sesta e la nona acquisizione un innalzamento dei valori dei tempi di volo, in prossimità del primo difetto più a sinistra. La settima, l'ottava e la nona stazione Tx si trovano infatti in corrispondenza del difetto di sinistra. Il quattordicesimo percorso ha un tempo di volo superiore ai 400 microsecondi (figura 7.18), esso non corrisponde ad un raggio con origine in un stazione frontale al difetto. Le velocità (figura 7.19) rispecchiano gli stessi risultati ottenuti per i tempi di volo. Considerando la geometria del corso (figura 7.20), si nota che le basse velocità delle stazioni comprese tra la settima e la nona confermano la presenza del difetto di sinistra. La lunghezza di questo difetto viene visualizzata in maniera abbastanza precisa mentre il difetto di destra non si riesce ad identificare in maniera chiara.

Tabella 7.5 Provino PNDF, corso 5: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDf_corso5	1	1	1	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDf_corso5	2	2	8	0,38	184	0,000184	2065,217391		N
PNDf_corso5	3	3	16	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDf_corso5	4	4	24	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDf_corso5	5	5	32	0,38	136	0,000136	2794,117647	Posizione martello sul bordo mattone.	N
PNDf_corso5	6	6	41	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDf_corso5	7	7	46	0,38	180	0,00018	2111,111111		S
PNDf_corso5	8	8	51	0,38	170	0,00017	2235,294118		S
PNDf_corso5	9	9	56	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDf_corso5	10	10	61	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDf_corso5	11	11	66	0,38	138	0,000138	2753,623188	Posizione martello vicino bordo mattone.	N
PNDf_corso5	12	12	71	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDf_corso5	13	13	76	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDf_corso5	14	14	81	0,38	438	0,000438	867,5799087	Strana curva del martello.	N
PNDf_corso5	15	15	86	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDf_corso5	16	16	91	0,38	152	0,000152	2500		N
PNDf_corso5	17	17	96	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDf_corso5	18	18	101	0,38	160	0,00016	2375	Posizione martello sul bordo mattone.Posizione accelerometro su giunto/bordo mattone.	S

PNDf_corso5	19	19	106	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PNDf_corso5	20	20	111	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDf_corso5	21	21	116	0,38	148	0,000148	2567,567568	Posizione accelerometro su giunto di malta,accoppiato con plastilina.	S
PNDf_corso5	22	22	121	0,38	152	0,000152	2500		S
PNDf_corso5	23	23	126	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PNDf_corso5	24	24	135	0,38	140	0,00014	2714,285714	Posizione martello su bordo mattone.	S
PNDf_corso5	25	25	143	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDf_corso5	26	26	151	0,38	154	0,000154	2467,532468		N
PNDf_corso5	27	27	159	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDf_corso5	28	28	166	0,38	144	0,000144	2638,888889		N

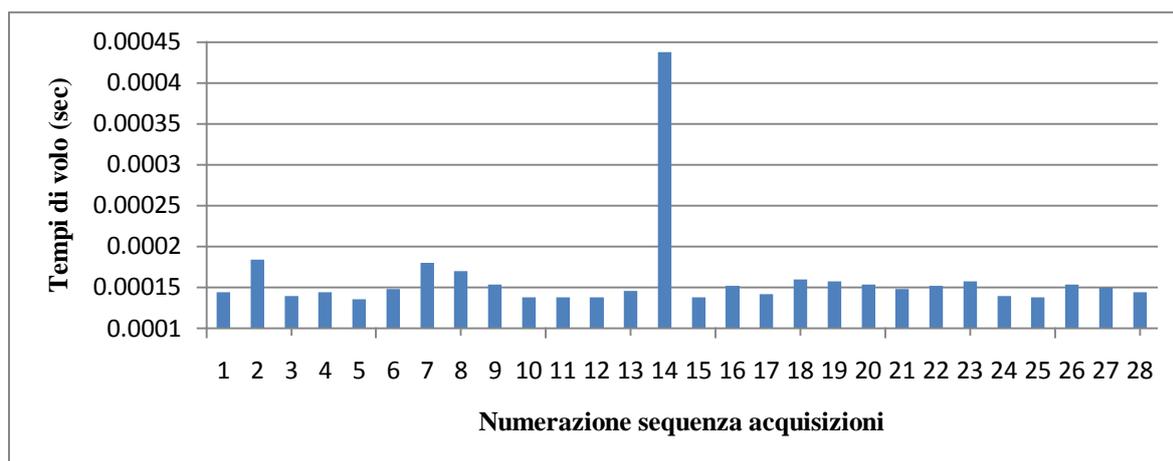


Figura 7.17 Muretto PNDE, corso 5, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

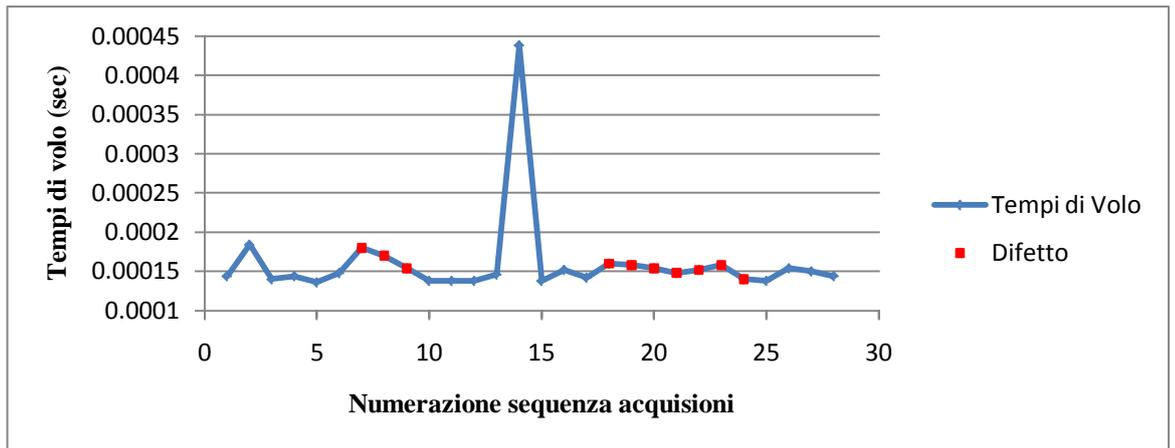


Figura 7.18 Muretto PNDE, corso 5, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti con dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto

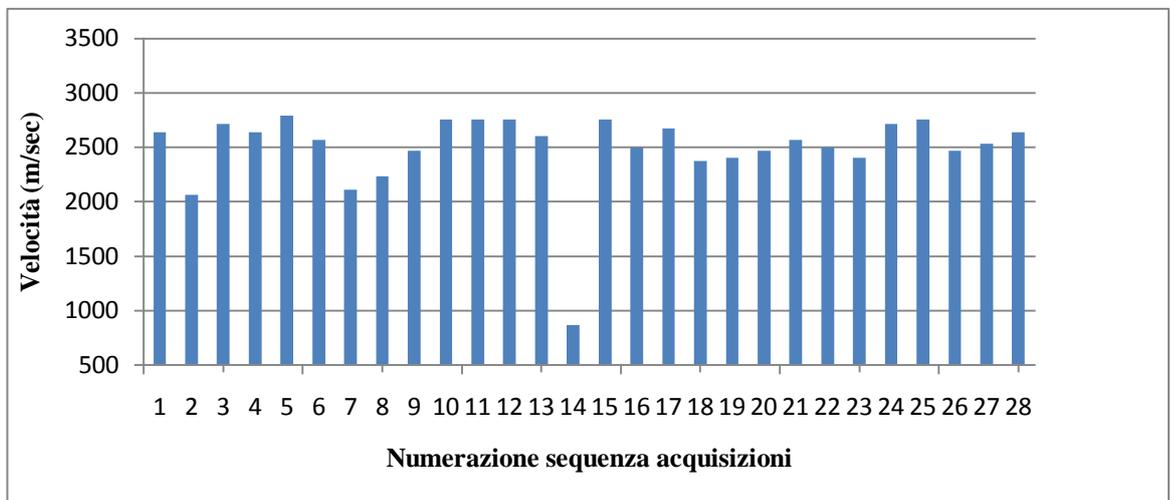


Figura 7.19 Muretto PNDE, corso 5, velocità espressa in m/s dei percorsi diretti

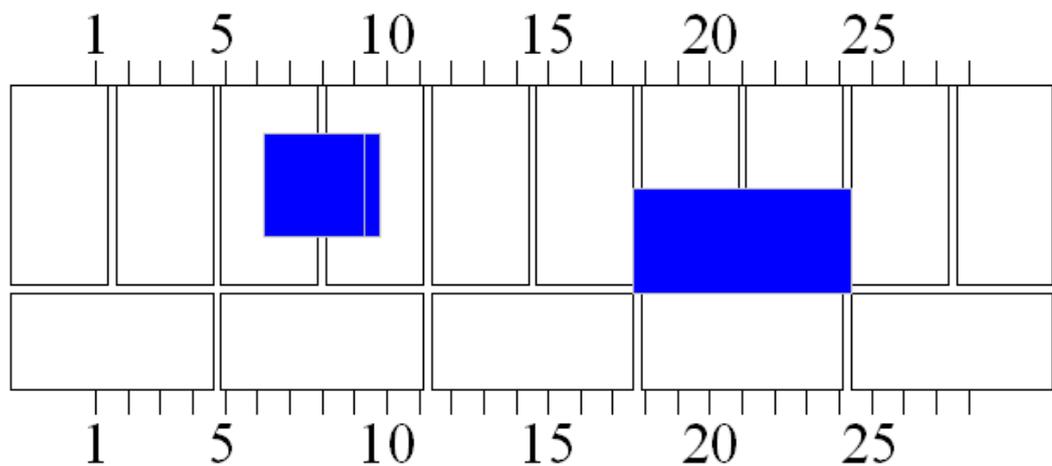


Figura 7.20 Muretto PNDE, corso 5, velocità espressa in m/sec dei percorsi diretti

7.2.2 Corso 7

Il corso 7 del muretto PNDF presenta una tessitura muraria senza imperfezioni. La sezione è composta da una fila di mattoni di lista e una fila di mattoni di testa. I tempi di volo (tabella 7.6) mostrano valori simili tra loro, non essendoci percorsi che attraversano anomalie. L'istogramma dei tempi di volo (figura 7.21) evidenzia un valore medio intorno ai 140 microsecondi. Le velocità (figura 7.22) hanno un valore medio attorno ai 2500 m/sec, che conferma la geometria del corso (figura 7.23) senza difetti.

Tabella 7.6 Provino PNDF, corso 7: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note
PNDf_corso7	1	1	1	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_corso7	2	2	8	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_corso7	3	3	16	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_corso7	4	4	24	0,38	152	0,000152	2500	
PNDf_corso7	5	5	32	0,38	132	0,000132	2878,787879	Posizione martello vicino bordo mattone.Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_corso7	6	6	41	0,38	144	0,000144	2638,888889	
PNDf_corso7	7	7	46	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_corso7	8	8	51	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_corso7	9	9	56	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_corso7	10	10	61	0,38	146	0,000146	2602,739726	
PNDf_corso7	11	11	66	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_corso7	12	12	71	0,38	146	0,000146	2602,739726	
PNDf_corso7	13	13	76	0,38	146	0,000146	2602,739726	

PNDf_ corso7	14	14	81	0,38	148	0,000148	2567,567568	
PNDf_ corso7	15	15	86	0,38	146	0,000146	2602,739726	
PNDf_ corso7	16	16	91	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_ corso7	17	17	96	0,38	140	0,00014	2714,285714	
PNDf_ corso7	18	18	101	0,38	148	0,000148	2567,567568	Posizione martello su bordo mattone/giunto. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	19	19	106	0,38	140	0,00014	2714,285714	
PNDf_ corso7	20	20	111	0,38	136	0,000136	2794,117647	
PNDf_ corso7	21	21	116	0,38	142	0,000142	2676,056338	Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.
PNDf_ corso7	22	22	121	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_ corso7	23	23	126	0,38	136	0,000136	2794,117647	
PNDf_ corso7	24	24	135	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_ corso7	25	25	143	0,38	144	0,000144	2638,888889	
PNDf_ corso7	26	26	151	0,38	144	0,000144	2638,888889	
PNDf_ corso7	27	27	159	0,38	142	0,000142	2676,056338	
PNDf_ corso7	28	28	166	0,38	160	0,00016	2375	Posizione accelerometro vicino al bordo mattone.

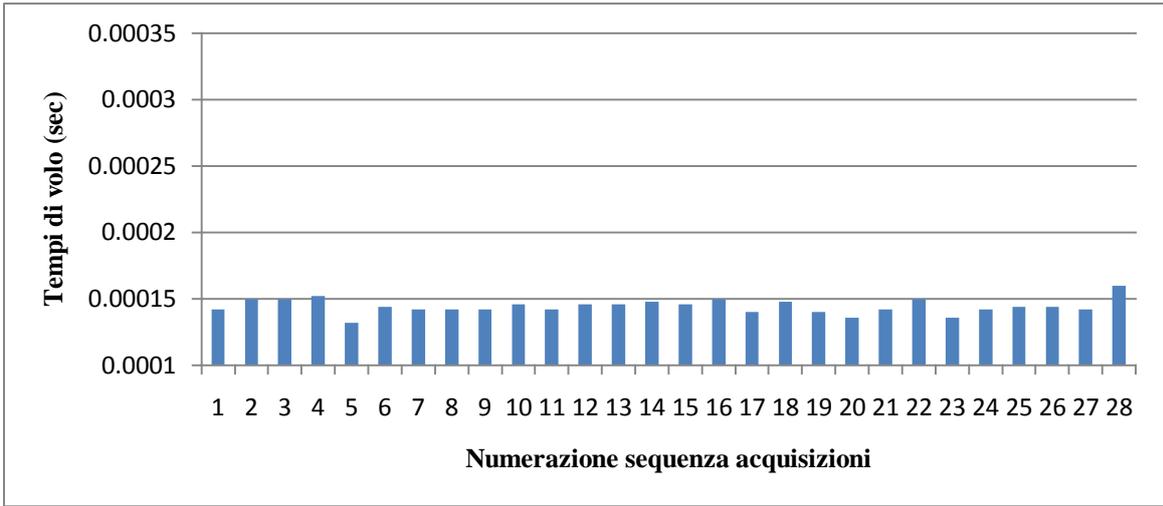


Figura 7.21 Muretto PNDF, corso 7, tempi di volo espressi in sec dei percorsi diretti

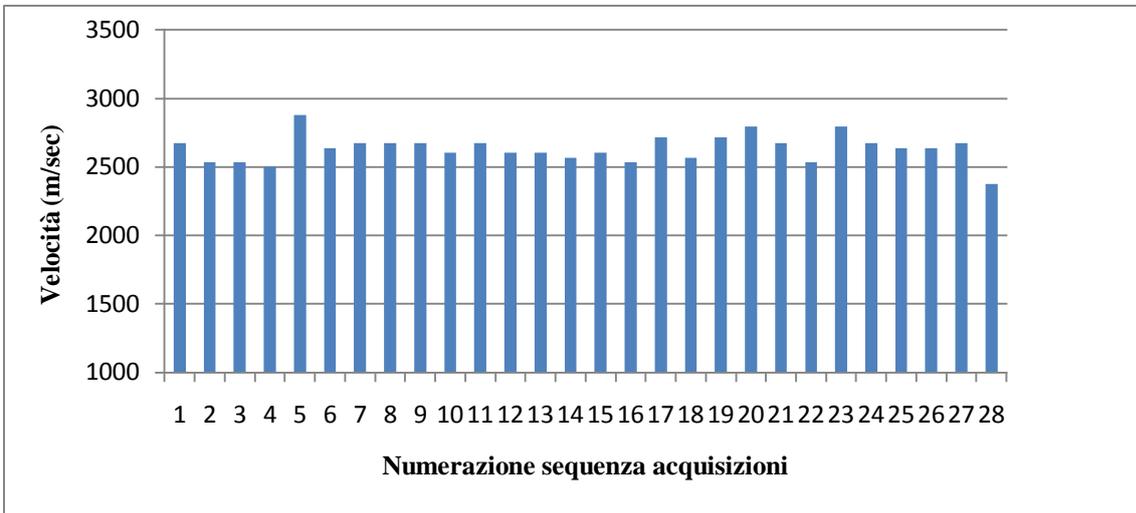


Figura 7.22 Muretto PNDF, corso 7, velocità espressa in m/sec dei percorsi diretti

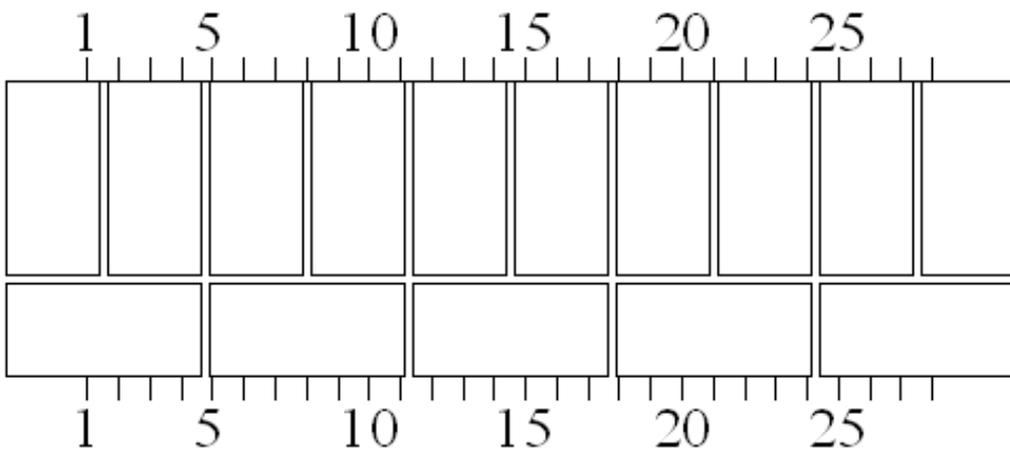


Figura 7.23 Muretto PNDF, corso 7, geometria della sezione

7.2.3 Corso 12

Il corso 12 del muretto PNDF presenta al suo interno una muratura a sacco. Un nocciolo interno di materiale frammentato, compattato con malta è circondato da una serie di mattoni che ne definiscono il perimetro. I tempi di volo acquisiti (tabella 7.7) sono piuttosto vari; il segnale percorre per ciascuna misura una diversa traiettoria a seconda della disomogeneità del nocciolo interno. L'istogramma dei tempi di volo (figura 7.24) mette in evidenza un valore superiore ai 200 microsecondi in corrispondenza della tredicesima acquisizione. Il segnale che nasce da questa stazione Tx incontra lo spigolo del nocciolo della muratura a sacco. Le velocità (figura 7.25) mostrano una prima zona a velocità più basse sulla parte di sinistra del provino, in corrispondenza della zona di muratura a sacco più spessa. La parte del grafico sulla destra evidenzia invece velocità più alte rispetto a quella di sinistra, con valori medi attorno ai 2400 m/sec. È interessante notare la differenza di valori di tempi e velocità ottenuti per sezioni con diverse tessiture murarie. I valori per una muratura tradizionale di laterizio sono pressoché costanti, mentre sono più variegati per la sezione con muratura a sacco, dovuto alla disomogeneità del nocciolo interno. Confrontando le velocità con la geometria del corso (figura 7.26), si nota che l'unico valore di velocità inferiore ai 2000 m/s, corrisponde la riduzione dello spessore della zona a sacco.

Tabella 7.7 Provino PNDF, corso 12: analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note
PNDf_corso12	1	1	1	0,38	186	0,000186	2043,010753	Inizio curva martello strano.
PNDf_corso12	2	2	8	0,38	178	0,000178	2134,831461	
PNDf_corso12	3	3	16	0,38	158	0,000158	2405,063291	Posizione martello su giunto di malta. Posizione accelerometro su giunto di malta, accoppiato con plastilina.

PNDf_ corso12	4	4	24	0,38	168	0,000168	2261,904762	
PNDf_ corso12	5	5	32	0,38	164	0,000164	2317,073171	
PNDf_ corso12	6	6	41	0,38	166	0,000166	2289,156627	Posizione martello vicino bordo mattone.
PNDf_ corso12	7	7	46	0,38	168	0,000168	2261,904762	
PNDf_ corso12	8	8	51	0,38	156	0,000156	2435,897436	
PNDf_ corso12	9	9	56	0,38	172	0,000172	2209,302326	
PNDf_ corso12	10	10	61	0,38	184	0,000184	2065,217391	Posizione martello su bordo mattone. Posizione accelerometro su bordo mattone.
PNDf_ corso12	11	11	66	0,38	170	0,00017	2235,294118	
PNDf_ corso12	12	12	71	0,38	170	0,00017	2235,294118	
PNDf_ corso12	13	13	76	0,38	218	0,000218	1743,119266	Posizione martello su bordo mattone/giunto di malta.
PNDf_ corso12	14	14	81	0,38	176	0,000176	2159,090909	
PNDf_ corso12	15	15	86	0,38	162	0,000162	2345,679012	
PNDf_ corso12	16	16	91	0,38	160	0,00016	2375	Posizione martello su bordo mattone.
PNDf_ corso12	17	17	96	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_ corso12	18	18	101	0,38	154	0,000154	2467,532468	
PNDf_ corso12	19	19	106	0,38	144	0,000144	2638,888889	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	20	20	111	0,38	150	0,00015	2533,333333	
PNDf_ corso12	21	21	116	0,38	146	0,000146	2602,739726	
PNDf_ corso12	22	22	121	0,38	146	0,000146	2602,739726	
PNDf_ corso12	23	23	126	0,38	158	0,000158	2405,063291	Posizione martello vicino al bordo mattone.
PNDf_ corso12	24	24	135	0,38	156	0,000156	2435,897436	
PNDf_ corso12	25	25	143	0,38	158	0,000158	2405,063291	
PNDf_ corso12	26	26	151	0,38	178	0,000178	2134,831461	Posizione martello su giunto di malta.

PNDf_ corso12	27	27	159	0,38	156	0,000156	2435,897436	
PNDf_ corso12	28	28	166	0,38	156	0,000156	2435,897436	

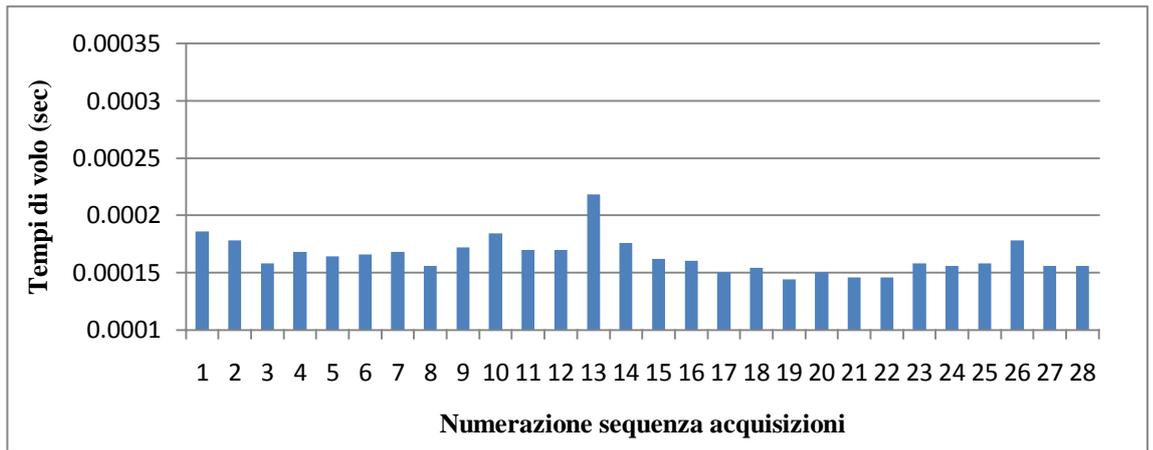


Figura 7.24 Muretto PNDf, corso 12, tempi di volo espressi in secondi dei percorsi diretti

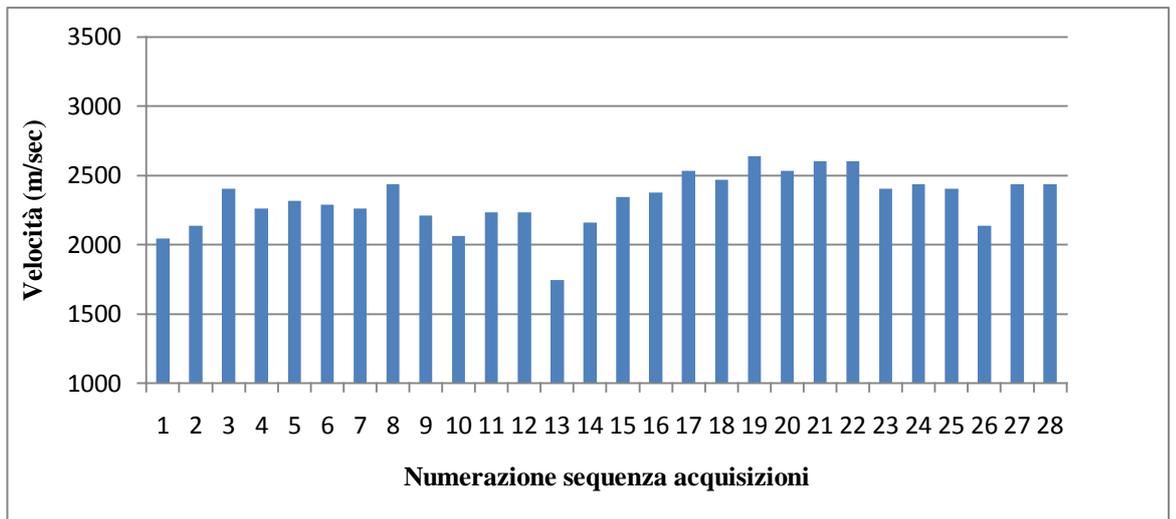


Figura 7.25 Muretto PNDf, corso 12, velocità espressa in m/s dei percorsi diretti

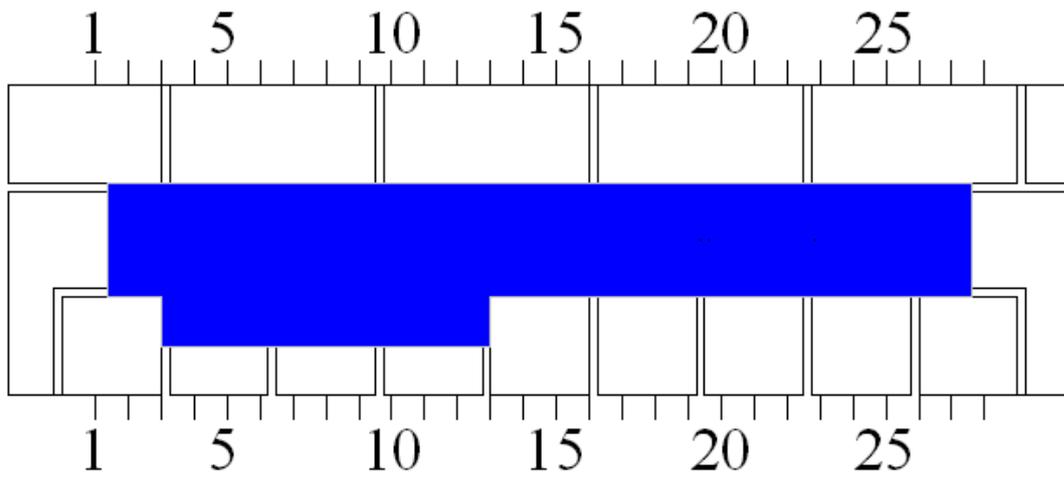


Figura 7.26 Muretto PNDF, corso 12, geometria della sezione

Capitolo 8

Prove soniche dirette: analisi delle sezioni verticali

Le prove soniche dirette sono state applicate sulle sezioni verticali dei muretti PNDE e PNDF. Le stazioni di misura considerate sono 36 e coincidono con quelle utilizzate per la tomografia sonora. La numerazione inizia dal basso, ovvero del corso 2 e termina al corso 19. Le stazioni di misura si trovano a distanza di 1,5 cm dalla metà altezza di ogni mattone; in questo modo si hanno due stazioni per mattone, a distanza di 3 cm l'una dall'altra.

8.1 Muretto PNDE

8.1.1 Sezione A-A'

La sezione A-A' del muretto PNDE presenta tre difetti in corrispondenza delle stazioni Tx comprese tra la settima e la dodicesima, tra la diciannovesima e la ventunesima e tra la trentunesima e la trentaduesima. I tempi di volo acquisiti (tabella 8.1) mostrano spesso valori superiori ai 190 microsecondi nel caso di percorsi che attraversano un difetto. Nella colonna dei difetti sono indicate quali delle 36 acquisizioni hanno percorsi che toccano delle anomalie. È interessante vedere l'andamento dei tempi (figura 8.1) dove si notano i picchi in corrispondenza dei tre difetti presenti. Si evidenzia così anche il difetto più piccolo in alto che nelle immagini tomografiche, è quello meno visibile. Nel grafico in figura 8.2 è evidenziato proprio la corrispondenza tra i valori di tempo più alti con la presenza del difetto nel percorso attraversato dal segnale; in rosso sono segnate le traiettorie che toccano le anomalie. Tra la settima e la dodicesima acquisizione si osserva che le velocità (figura 8.3) diminuiscono rispetto alle velocità delle zone circostanti superiori ai 2500 m/sec. Lo stesso abbassamento avviene per le acquisizioni comprese tra la ventesima e la

ventiduesima , in corrispondenza del difetto centrale della sezione. Il difetto superiore, alto solo un corso, viene individuato dalla misure dirette uscenti dalla trentunesima e trentaduesima stazione Tx. Le velocità relative mostrano valori inferiori ai 2500 m/sec. L'inflessione delle velocità corrisponde esattamente ai percorsi che attraversano dei difetti. Confrontando le velocità con la geometria del corso (figura 8.4) ruotata di 90° per avere una corrispondenza tra le stazioni, si nota la corrispondenza tra i valori di bassa velocità e la presenza dei difetti. Le lunghezze dei difetti sono individuata in maniera precisa.

Tabella 8.1 Provino PNDE, sezione A-A': analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_vertA	1	1	1	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_vertA	2	2	7	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_vertA	3	3	14	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDe_vertA	4	4	21	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_vertA	5	5	27	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_vertA	6	6	33	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_vertA	7	7	38	0,38	190	0,00019	2000	Strana curva accelerometro. Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PNDe_vertA	8	8	43	0,38	222	0,000222	1711,711712	Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PNDe_vertA	9	9	48	0,38	254	0,000254	1496,062992	Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PNDe_vertA	10	10	53	0,38	270	0,00027	1407,407407	Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PNDe_vertA	11	11	58	0,38	162	0,000162	2345,679012	Strana curva accelerometro. Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PNDe_vertA	12	12	63	0,38	164	0,000164	2317,073171		S
PNDe_vertA	13	13	68	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_vertA	14	14	73	0,38	138	0,000138	2753,623188		N

PND _e vertA	15	15	78	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PND _e vertA	16	16	83	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PND _e vertA	17	17	88	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PND _e vertA	18	18	93	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PND _e vertA	19	19	98	0,38	156	0,000156	2435,897436		S
PND _e vertA	20	20	103	0,38	232	0,000232	1637,931034		S
PND _e vertA	21	21	108	0,38	216	0,000216	1759,259259	Strana curva accelerometro. Picco accelerometro con pendenza negativa.	S
PND _e vertA	22	22	113	0,38	176	0,000176	2159,090909		S
PND _e vertA	23	23	118	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PND _e vertA	24	24	123	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PND _e vertA	25	25	128	0,38	172	0,000172	2209,302326		N
PND _e vertA	26	26	133	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PND _e vertA	27	27	138	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PND _e vertA	28	28	143	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PND _e vertA	29	29	148	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PND _e vertA	30	30	153	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PND _e vertA	31	31	158	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PND _e vertA	32	32	164	0,38	208	0,000208	1826,923077		S
PND _e vertA	33	33	170	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PND _e vertA	34	34	177	0,38	152	0,000152	2500		N
PND _e vertA	35	35	184	0,38	154	0,000154	2467,532468		N
PND _e vertA	36	36	190	0,38	142	0,000142	2676,056338		N

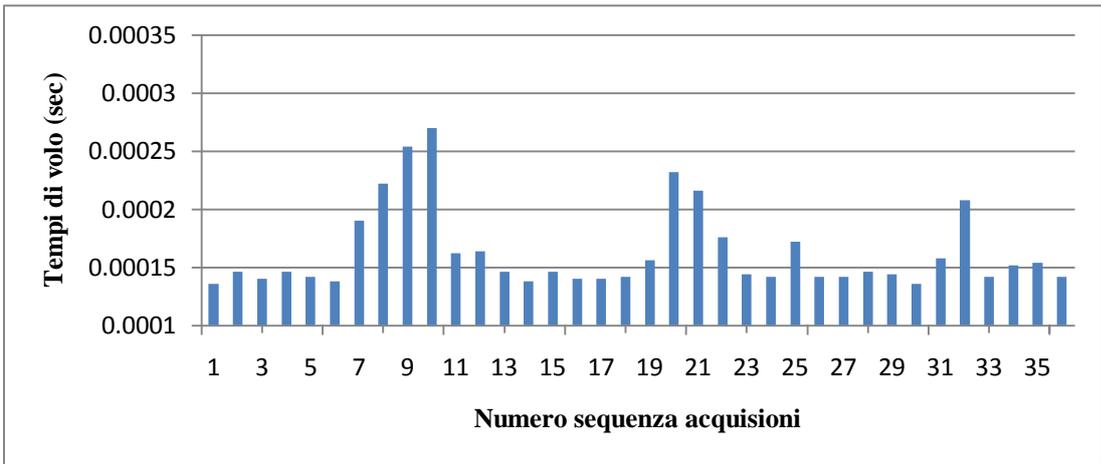


Figura 8.1 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi

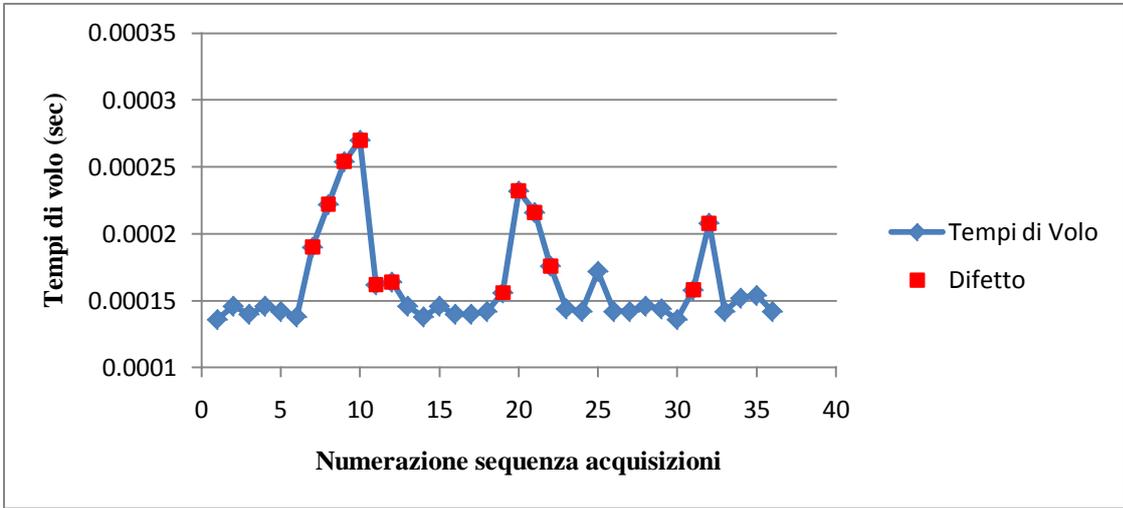


Figura 8.2 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi e dettaglio dei percorsi con difetti

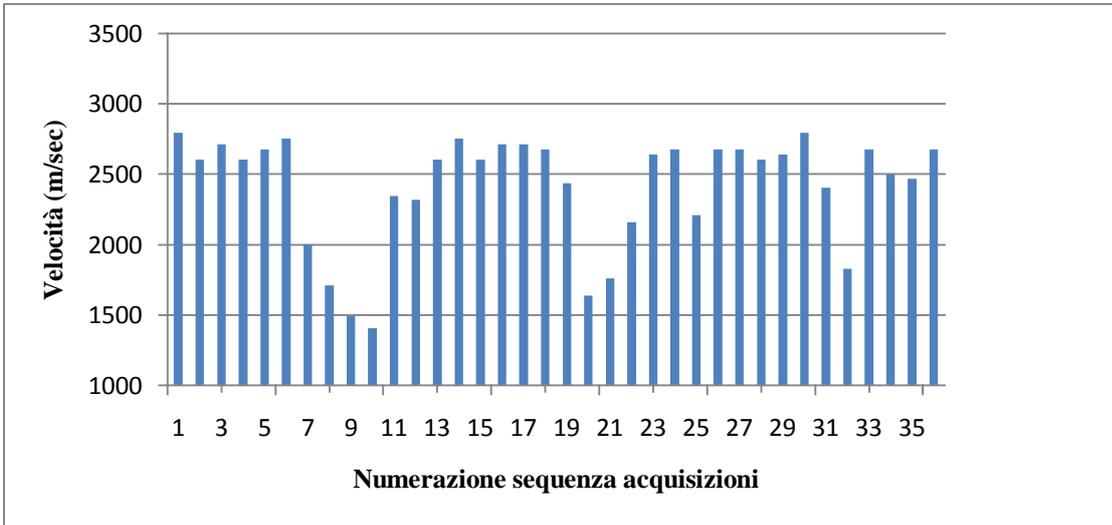


Figura 8.3 Muretto PNDE, sezione A-A', velocità espressa in m/s e dettaglio dei percorsi con difetti

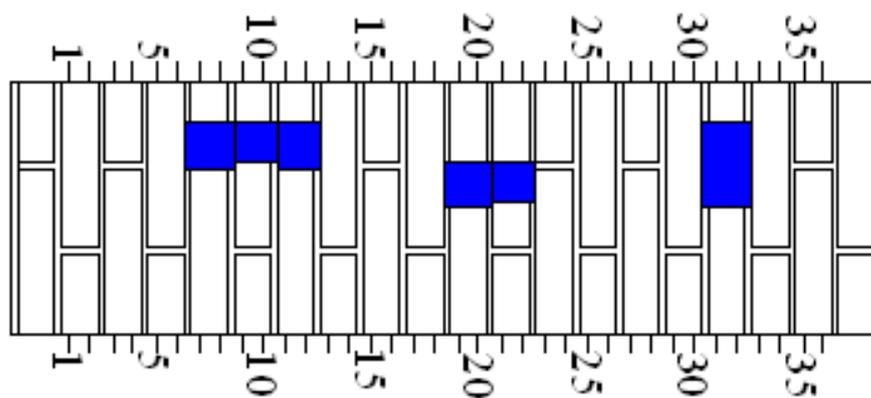


Figura 8.4 Muretto PNDE, sezione A-A', geometria del corso

8.1.2 Sezione B-B'

Le misure dei percorsi diretti ci danno un'informazione aggiuntiva della presenza di anomalie all'interno della sezione. Le stazioni di misura che si trovano di fronte ad un difetto sono le stesse della sezione A-A'. La sezione B-B' presenta tre difetti, alti rispettivamente tre corsi, due corsi e un solo corso. I tempi di volo acquisiti (tabella 8.2) per le 36 stazioni di misura evidenziano valori inferiori ai 150 microsecondi per i percorsi che non attraversano un difetto. I valori più alti dei tempi di volo corrispondono alle misure dirette delle stazioni Tx che si trovano alla stessa altezza di difetti presenti nella sezione (figura 8.5 e 8.6). Le velocità più basse sono registrate in corrispondenza delle acquisizioni rilevate per le stazioni Tx collocate in prossimità della mezzeria dei tre difetti (figura 8.7). Confrontando le velocità con la geometria del corso (figura 8.8), si nota la corrispondenza tra le stazioni con velocità inferiori e le stazioni di fronte ai difetti. Le lunghezze dei difetti sono rilevate, anche se non in maniera molto precisa; infatti i difetti dai risultati delle prove dirette sembrano di dimensioni inferiori.

Tabella 8.2 Provino PNDE, sezione B-B': analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDe_vertB	1	1	1	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_vertB	2	2	7	0,38	132	0,000132	2878,787879		N
PNDe_vertB	3	3	14	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_vertB	4	4	21	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_vertB	5	5	27	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_vertB	6	6	33	0,38	178	0,000178	2134,831461		N
PNDe_vertB	7	7	38	0,38	156	0,000156	2435,897436		S
PNDe_vertB	8	8	43	0,38	164	0,000164	2317,073171		S
PNDe_vertB	9	9	48	0,38	206	0,000206	1844,660194	Picco accelerometro pendenza negativa.	S
PNDe_vertB	10	10	53	0,38	292	0,000292	1301,369863		S
PNDe_vertB	11	11	58	0,38	174	0,000174	2183,908046		S
PNDe_vertB	12	12	63	0,38	152	0,000152	2500		S
PNDe_vertB	13	13	68	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_vertB	14	14	73	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_vertB	15	15	78	0,38	148	0,000148	2567,567568	Strana curva martello.	N
PNDe_vertB	16	16	83	0,38	148	0,000148	2567,567568		N
PNDe_vertB	17	17	88	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDe_vertB	18	18	93	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDe_vertB	19	19	98	0,38	150	0,00015	2533,333333		S
PNDe_vertB	20	20	103	0,38	162	0,000162	2345,679012		S
PNDe_vertB	21	21	108	0,38	222	0,000222	1711,711712	Picco accelerometro pendenza negativa.	S

PNDe_ vertB	22	22	113	0,38	166	0,000166	2289,156627		S
PNDe_ vertB	23	23	118	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ vertB	24	24	123	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_ vertB	25	25	128	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_ vertB	26	26	133	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDe_ vertB	27	27	138	0,38	152	0,000152	2500		N
PNDe_ vertB	28	28	143	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDe_ vertB	29	29	148	0,38	156	0,000156	2435,897436		N
PNDe_ vertB	30	30	153	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ vertB	31	31	158	0,38	178	0,000178	2134,831461		S
PNDe_ vertB	32	32	164	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDe_ vertB	33	33	170	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDe_ vertB	34	34	177	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDe_ vertB	35	35	184	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDe_ vertB	36	36	190	0,38	142	0,000142	2676,056338		N

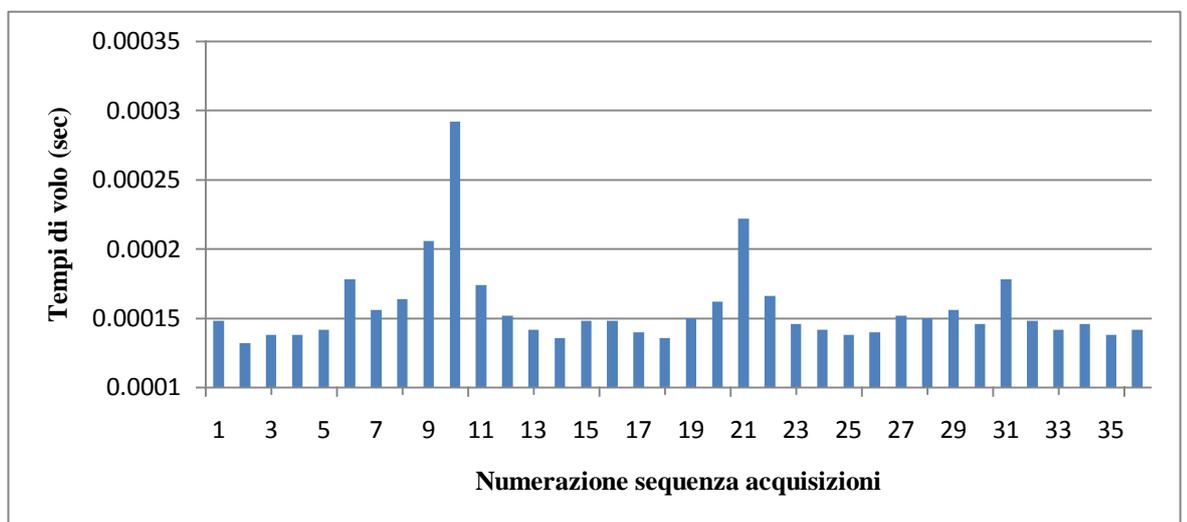


Figura 8.5 Muretto PNDE, sezione B-B', tempi di volo in secondi

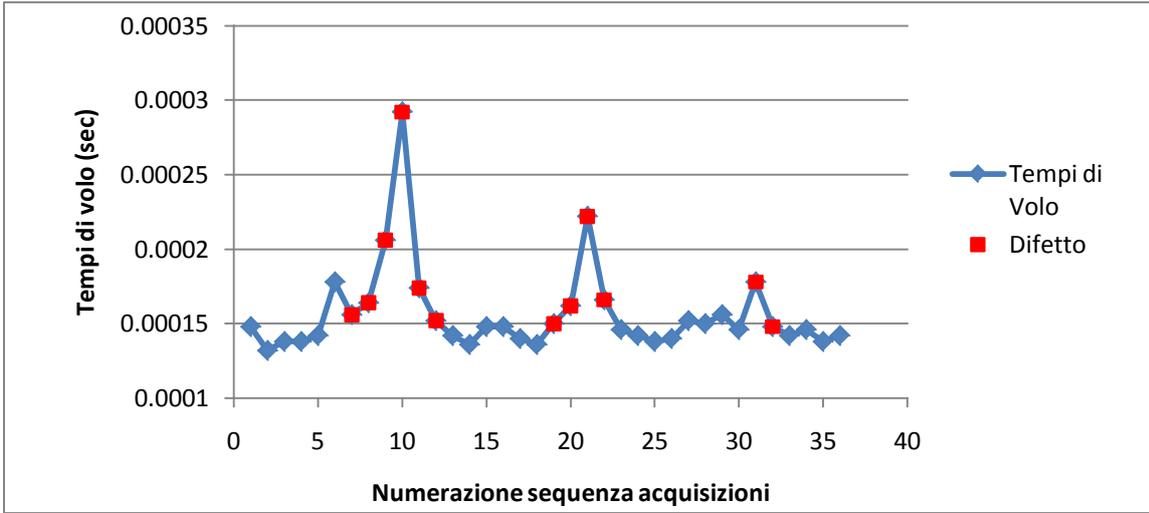


Figura 8.6 Muretto PNDE, sezione B-B', tempi di volo in secondi e dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto

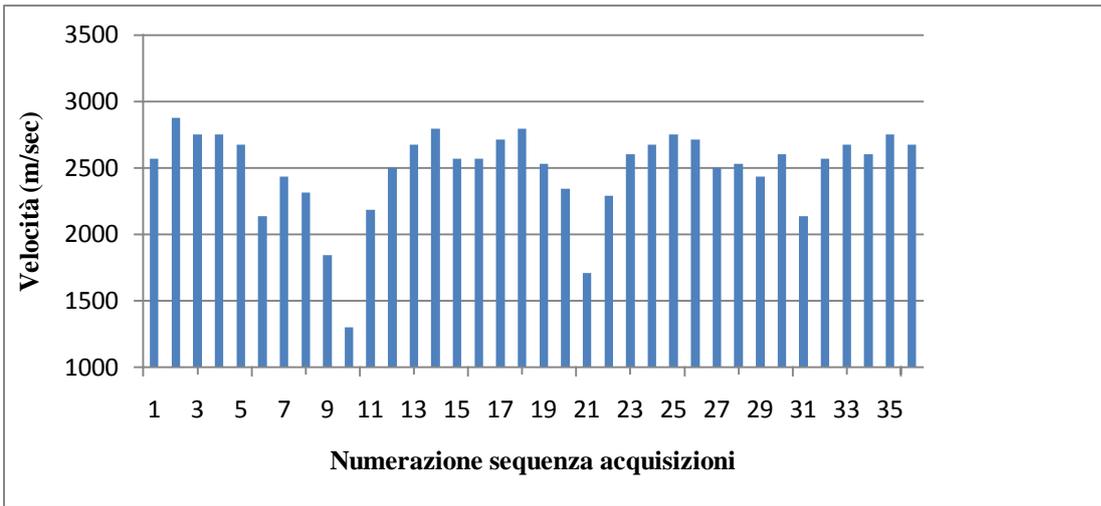


Figura 8.7 Muretto PNDE, sezione B-B', velocità in m/s e dettaglio sui percorsi che attraversano un difetto

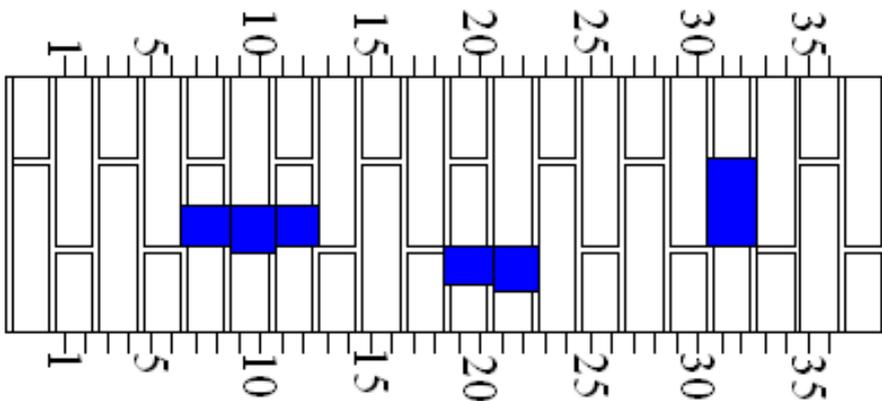


Figura 8.8 Muretto PNDE, sezione B-B', geometria della sezione

8.2 Muretto PNDF

8.2.1 Sezione A-A'

È interessante valutare l'andamento delle sole misure dirette per poter capire la variazione del tempo che il segnale impiega nell'attraversare sia il corso con il difetto sia la zona con muratura a sacco. I tempi di volo (tabella 8.3) sono acquisiti solo per 35 stazioni. Certamente i valori più alti corrispondono a traiettorie che si trovano a contatto con le anomalie. Il valore superiore ai 200 microsecondi è stato registrato in corrispondenza della stazione Tx che si trova in prossimità dello spigolo che differenzia una parte di muratura a sacco più spessa dell'altra (figura 8.9 e 8.10). Le velocità non evidenziano molti valori inferiori a 2500 m/sec (figura 8.11). Confrontando le velocità con la geometria della sezione (figura 8.12), si nota in corrispondenza del difetto una diminuzione delle velocità, mentre nella zona di muratura a sacco si osserva solo un valore di velocità molto bassa in corrispondenza del cambio di spessore del nocciolo del sacco. La lunghezza del primo difetto viene individuata, ma non le dimensioni della costruzione a sacco.

Tabella 8.3 Provino PNDF, sezione A-A': analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Note	Difetto
PNDf_vertA	1	1	1	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDf_vertA	2	2	7	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDf_vertA	3	3	14	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDf_vertA	4	4	21	0,38	138	0,000138	2753,623188		N
PNDf_vertA	5	5	27	0,38	140	0,00014	2714,285714		N
PNDf_vertA	6	6	33	0,38	154	0,000154	2467,532468		N

PNDf_ vertA	7	7	38	0,38	160	0,00016	2375		S
PNDf_ vertA	8	8	43	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PNDf_ vertA	9	9	48	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDf_ vertA	10	10	53	0,38	136	0,000136	2794,117647		N
PNDf_ vertA	11	11	58	0,38	144	0,000144	2638,888889		N
PNDf_ vertA	12	12	63	0,38	146	0,000146	2602,739726		N
PNDf_ vertA	13	13	68	0,38	142	0,000142	2676,056338		N
PNDf_ vertA	14	14	73	0,38	150	0,00015	2533,333333		N
PNDf_ vertA	15	15	78	0,38	158	0,000158	2405,063291		S
PNDf_ vertA	16	16	83	0,38	154	0,000154	2467,532468		S
PNDf_ vertA	17	17	88	0,38	156	0,000156	2435,897436		S
PNDf_ vertA	18	18	93	0,38	160	0,00016	2375		S
PNDf_ vertA	19	19	98	0,38	190	0,00019	2000		S
PNDf_ vertA	20	20	103	0,38	146	0,000146	2602,739726		S
PNDf_ vertA	21	21	108	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDf_ vertA	22	22	113	0,38	168	0,000168	2261,904762		S
PNDf_ vertA	23	23	118	0,38	170	0,00017	2235,294118		S
PNDf_ vertA	24	24	123	0,38	220	0,00022	1727,272727		S
PNDf_ vertA	25	25	128	0,38	144	0,000144	2638,888889		S
PNDf_ vertA	26	26	133	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDf_ vertA	27	27	138	0,38	146	0,000146	2602,739726		S
PNDf_ vertA	28	28	143	0,38	146	0,000146	2602,739726		S
PNDf_ vertA	29	29	148	0,38	142	0,000142	2676,056338		S
PNDf_ vertA	30	30	153	0,38	144	0,000144	2638,888889		S

PNDf_vertA	31	31	158	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDf_vertA	32	32	164	0,38	148	0,000148	2567,567568		S
PNDf_vertA	33	33	170	0,38	146	0,000146	2602,739726		S
PNDf_vertA	34	34	177	0,38	142	0,000142	2676,056338		S
PNDf_vertA	35	35	184	0,38				FILE VUOTO:NESSUN VALORE	S
PNDf_vertA	36	36	190	0,38	144	0,000144	2638,888889		S

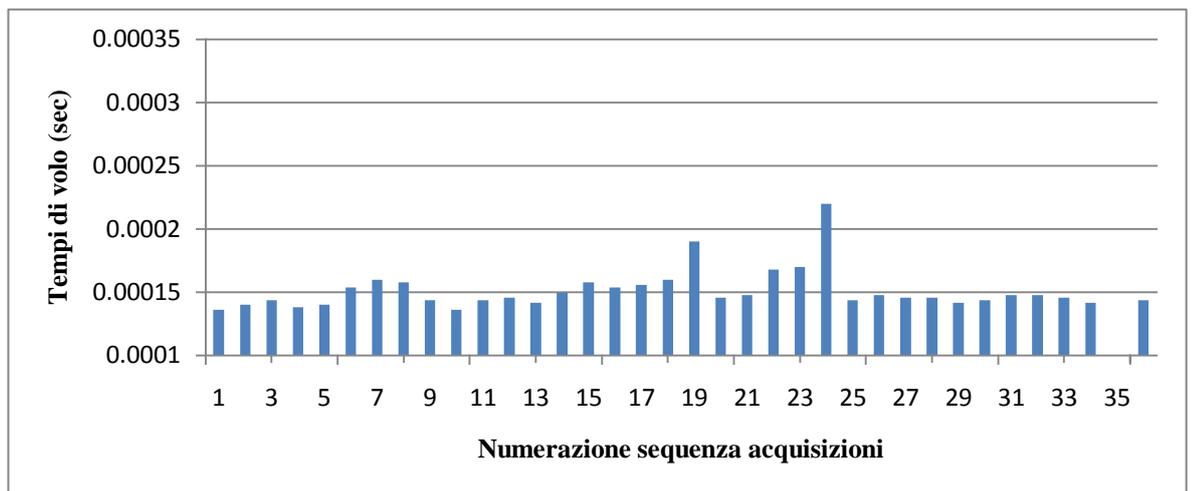


Figura 8.9 Muretto PNDE, sezione A-A', tempi di volo espressi in secondi

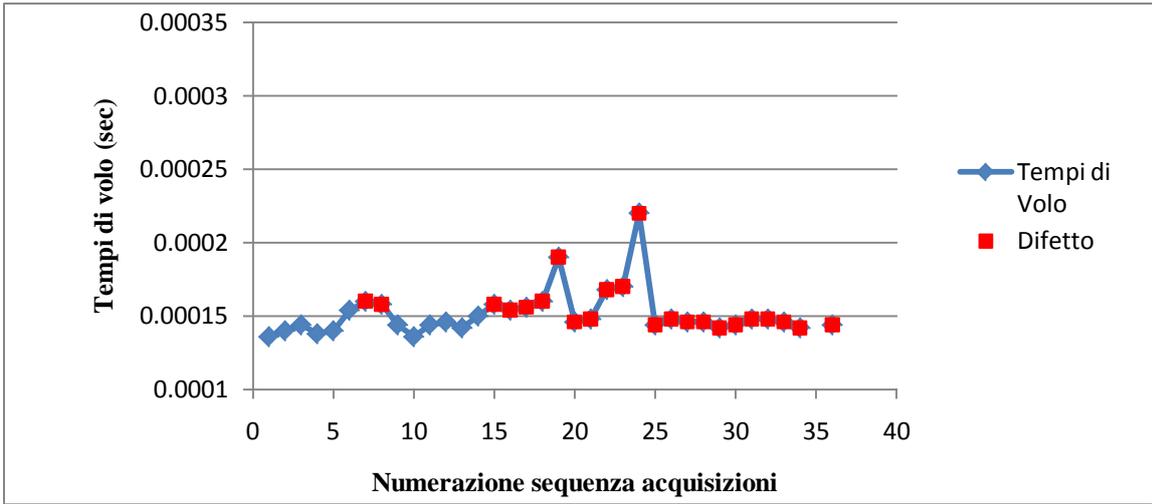


Figura 8.10 Muretto PNDF, sezione A-A', tempi di volo in secondi e dettaglio sui percorsi che attraverso un'anomalia

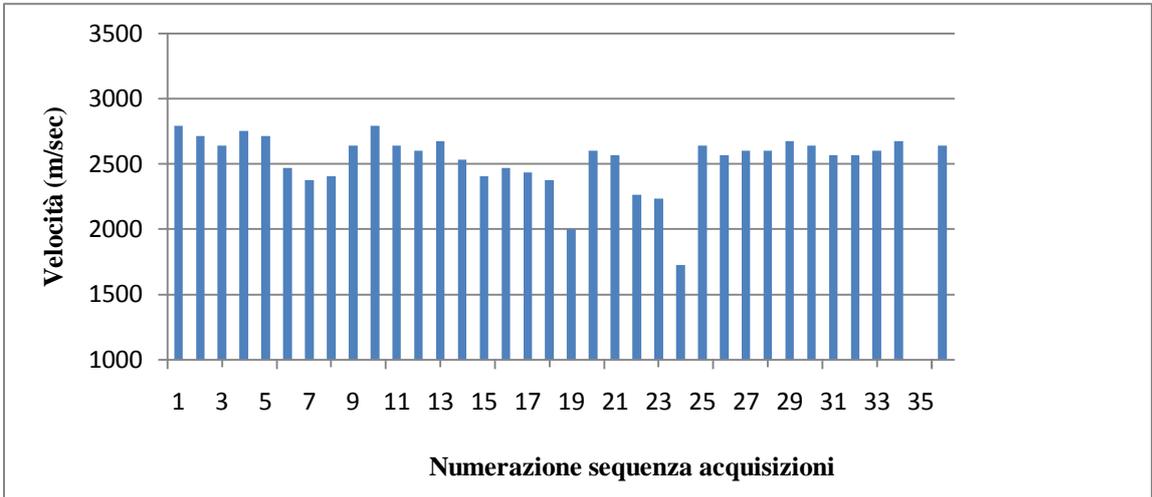


Figura 8.11 Muretto PNDF, sezione A-A', velocità espressa in m/s e dettaglio sui percorsi che attraverso un'anomalia

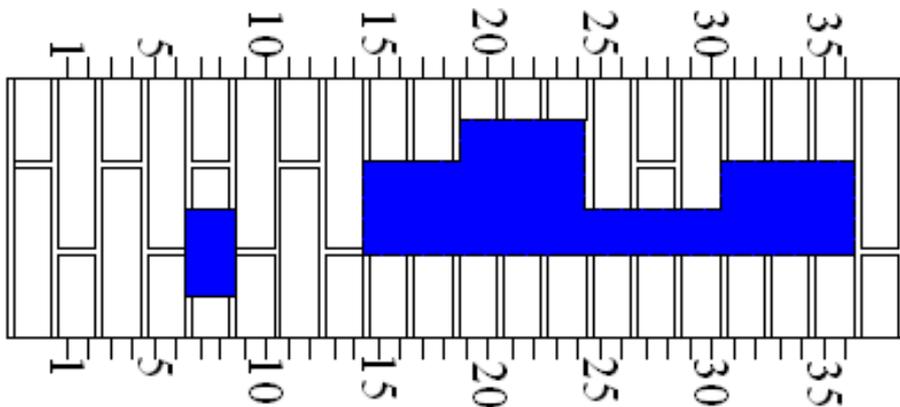


Figura 8.12 Muretto PNDF, sezione A-A', geometria della sezione

8.2.2 Sezione B-B'

La sezione B-B' del muretto PNDf presenta un difetto alto solo un corso in corrispondenza del corso 5 e dal corso 9 al 19 una muratura a sacco. I tempi di volo acquisiti (tabella 8.4) assumono valori piuttosto diversi tra loro. L'ottava acquisizione (figura 8.13 e 8.14) mostra un tempi di volo superiore ai 150 microsecondi dovuto alla presenza del difetto presente nel corso 5. Dalla quindicesima misura i valori si dispongono in maniera disomogenea, nonostante l'area della muratura a sacco sia regolare. Le velocità, a parte per qualche acquisizioni, assumono valori medi intorno ai 2500 m/sec (figura 8.15), senza evidenziare la zona di muratura a sacco. Confrontando le velocità con la geometria della sezione (figura 8.16) si osserva che solo il difetto viene rilevato per la sua lunghezza, mentre per la zona di muratura a sacco non si ha un'omogeneità di valori di bassa velocità.

Tabella 8.4 Provino PNDf, sezione B-B': analisi ed elaborazioni dei dati ricavati da prove soniche dirette

Nome file	Tx	Rx	Sequenza acquisizioni	l (m)	Δt (microsec)	Δt (sec)	v (m/sec)	Difetto
PNDf_vertB	1	1	1	0,38	146	0,000146	2602,739726	N
PNDf_vertB	2	2	7	0,38	144	0,000144	2638,888889	N
PNDf_vertB	3	3	14	0,38	146	0,000146	2602,739726	N
PNDf_vertB	4	4	21	0,38	142	0,000142	2676,056338	N
PNDf_vertB	5	5	27	0,38	146	0,000146	2602,739726	N
PNDf_vertB	6	6	33	0,38	146	0,000146	2602,739726	N
PNDf_vertB	7	7	38	0,38	150	0,00015	2533,333333	S
PNDf_vertB	8	8	43	0,38	194	0,000194	1958,762887	S
PNDf_vertB	9	9	48	0,38	158	0,000158	2405,063291	N

PNDf_ vertB	10	10	53	0,38	150	0,00015	2533,333333	N
PNDf_ vertB	11	11	58	0,38	144	0,000144	2638,888889	N
PNDf_ vertB	12	12	63	0,38	150	0,00015	2533,333333	N
PNDf_ vertB	13	13	68	0,38	164	0,000164	2317,073171	N
PNDf_ vertB	14	14	73	0,38	142	0,000142	2676,056338	N
PNDf_ vertB	15	15	78	0,38	178	0,000178	2134,831461	S
PNDf_ vertB	16	16	83	0,38	172	0,000172	2209,302326	S
PNDf_ vertB	17	17	88	0,38	184	0,000184	2065,217391	S
PNDf_ vertB	18	18	93	0,38	198	0,000198	1919,191919	S
PNDf_ vertB	19	19	98	0,38	156	0,000156	2435,897436	S
PNDf_ vertB	20	20	103	0,38	148	0,000148	2567,567568	S
PNDf_ vertB	21	21	108	0,38	154	0,000154	2467,532468	S
PNDf_ vertB	22	22	113	0,38	150	0,00015	2533,333333	S
PNDf_ vertB	23	23	118	0,38	148	0,000148	2567,567568	S
PNDf_ vertB	24	24	123	0,38	144	0,000144	2638,888889	S
PNDf_ vertB	25	25	128	0,38	168	0,000168	2261,904762	S
PNDf_ vertB	26	26	133	0,38	146	0,000146	2602,739726	S
PNDf_ vertB	27	27	138	0,38	146	0,000146	2602,739726	S
PNDf_ vertB	28	28	143	0,38	140	0,00014	2714,285714	S
PNDf_ vertB	29	29	148	0,38	144	0,000144	2638,888889	S
PNDf_ vertB	30	30	153	0,38	158	0,000158	2405,063291	S
PNDf_ vertB	31	31	158	0,38	152	0,000152	2500	S
PNDf_ vertB	32	32	164	0,38	164	0,000164	2317,073171	S

PNDf_ vertB	33	33	170	0,38	154	0,000154	2467,532468	S
PNDf_ vertB	34	34	177	0,38	158	0,000158	2405,063291	S
PNDf_ vertB	35	35	184	0,38	152	0,000152	2500	S
PNDf_ vertB	36	36	190	0,38	146	0,000146	2602,739726	S

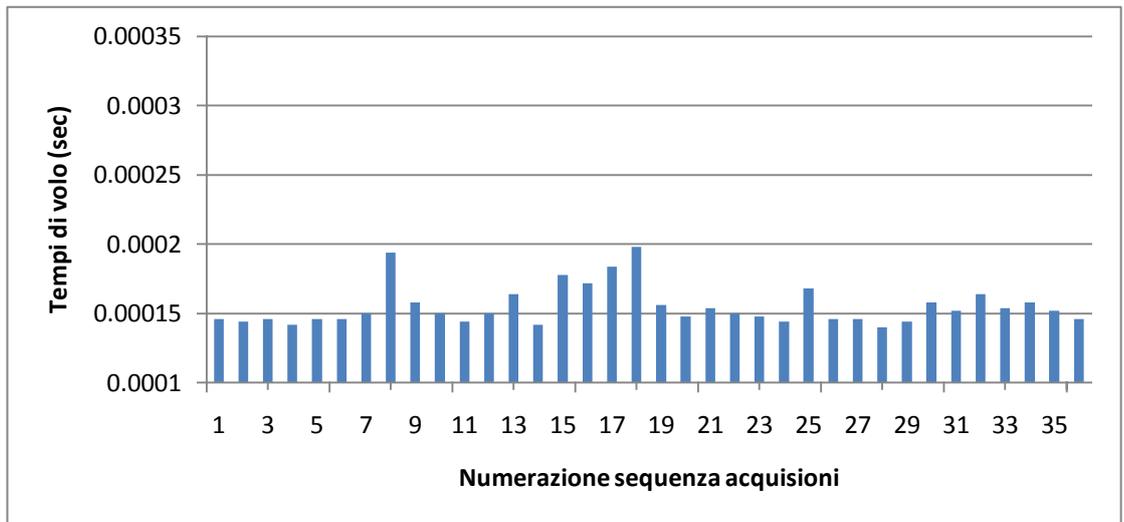


Figura 8.13 Muretto PNDF, sezione B-B', tempi di volo espressi in secondi

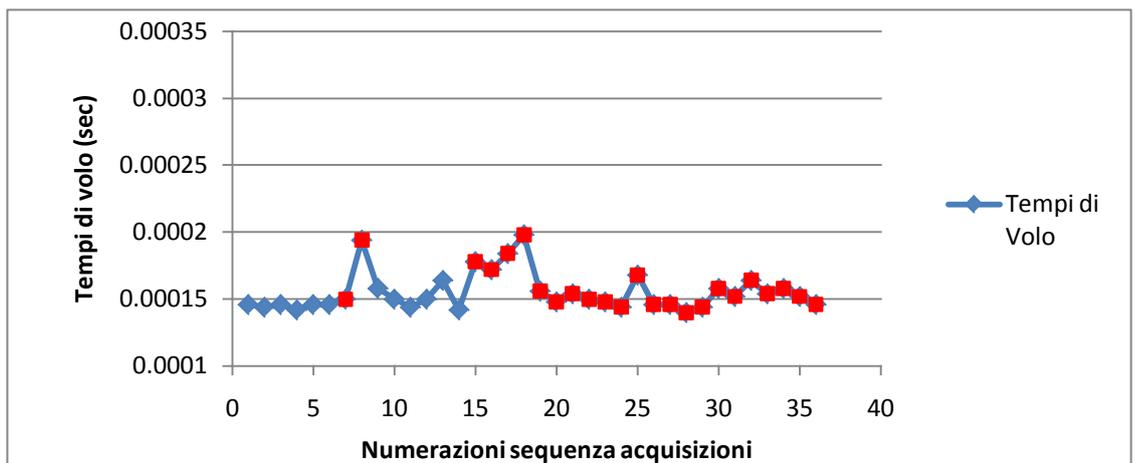


Figura 8.14 Muretto PNDF, sezione B-B', tempi di volo espressi in secondi e dettaglio dei percorsi che toccano l'anomalia

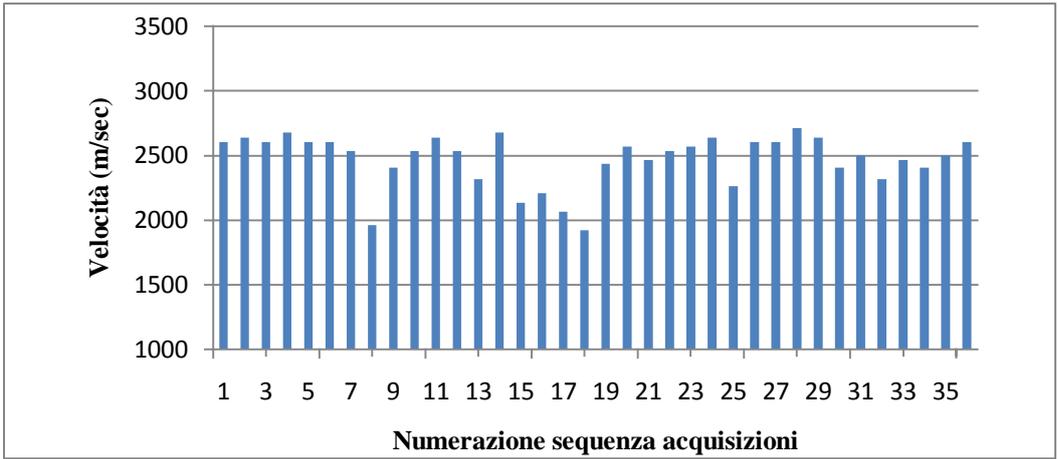


Figura 8.15 Muretto PPDF, sezione B-B', velocità espresse in m/s e dettaglio dei percorsi che toccano l'anomalia

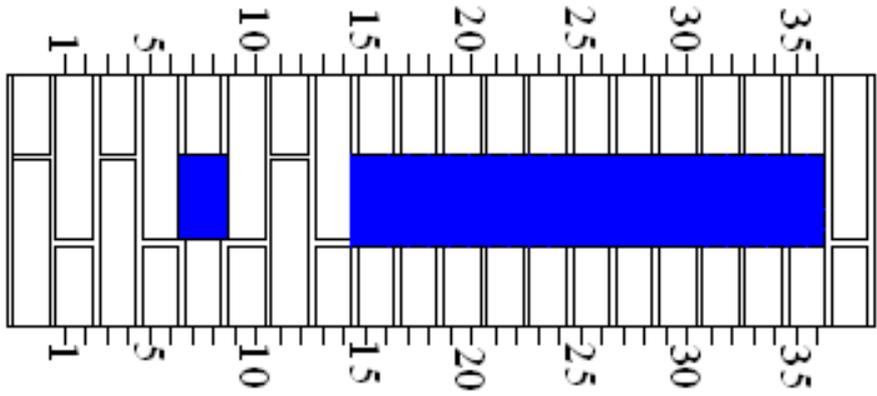


Figura 8.16 Muretto PPDF, sezione B-B', geometria della sezione

Capitolo 9

Confronto fra i risultati ottenuti dalle prove dirette e dalla tomografia

Le prove soniche dirette e la tomografia sonora, applicate sugli stessi corsi orizzontali e sezioni verticali, hanno prodotto dei risultati che possono essere confrontati, al fine di capire le qualità e le limitazioni nell'individuare difetti all'interno di una sezione di due metodologie diverse. Le prove soniche ci danno informazioni sulla lunghezza del difetto, ma non sullo spessore e la posizione all'interno della sezione. Quest'ultime informazioni si ricavano invece dalle mappe tomografiche, tenendo comunque conto dei limiti di questa tecnica. Per ciascuna sezione studiata verrà messa a paragone la mappa tomografia con sovrapposta la geometria e l'istogramma delle velocità delle prove dirette. Si ricorda che la legenda delle mappe tomografiche è espressa in Km/s, mentre l'istogramma delle velocità è espresso in m/s.

Iniziando dal corso 6 del muretto PNDE, la mappa tomografica scelta corrisponde al file output corso6_144 (figura 9.1). L'area a basse velocità sulla parte sinistra occupa dalla sesta all'undicesima stazione di misura, mentre la zona sulla destra è collocata tra la diciottesima e la ventiquattresima stazione. L'andamento delle velocità (figura 9.2) delle prove dirette mostra un'inflessione tra la sesta e l'undicesima stazione, in modo analogo all'area a bassa velocità della mappa tomografica. Il difetto di destra viene visualizzato dai bassi valori di velocità compresi fra la diciannovesima e ventiquattresima stazione. Le prove dirette ci indicano con discreta precisione una dimensione del difetto, che risulta essere rilevata anche dalla tomografica.

Il corso 11 del muretto PNDE viene rappresentato dalla mappa di velocità del file output corso11_117 (figura 9.3), dove non sono visibili in maniera chiara i difetti presenti all'interno della sezione. Dall'istogramma delle velocità (figura 9.4) non si evidenziano zone nette con velocità al di sotto dei 2000m/sec e questo viene ovviamente riflesso nell'immagine tomografica. Si notano però una

serie di valori di velocità inferiori ai 2500 m/sec in corrispondenza della stazione Tx numero 21 che rappresenta la mezzeria del difetto di destra.

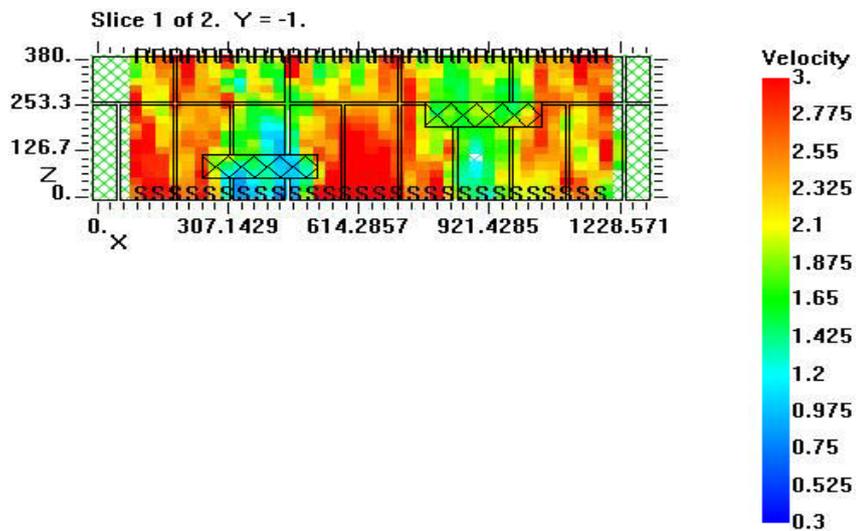


Figura 9.1 Muretto PNDE, corso 6, mappa delle velocità espressa in Km/s del file output corso6_144 con sovrapposizione della geometria

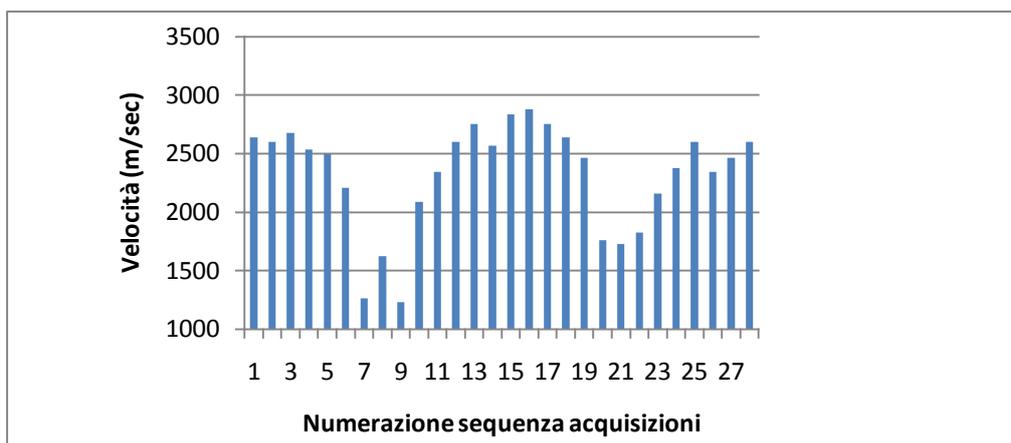


Figura 9.2 Muretto PNDE, corso 6, velocità espressa in m/s dei soli percorsi diretti

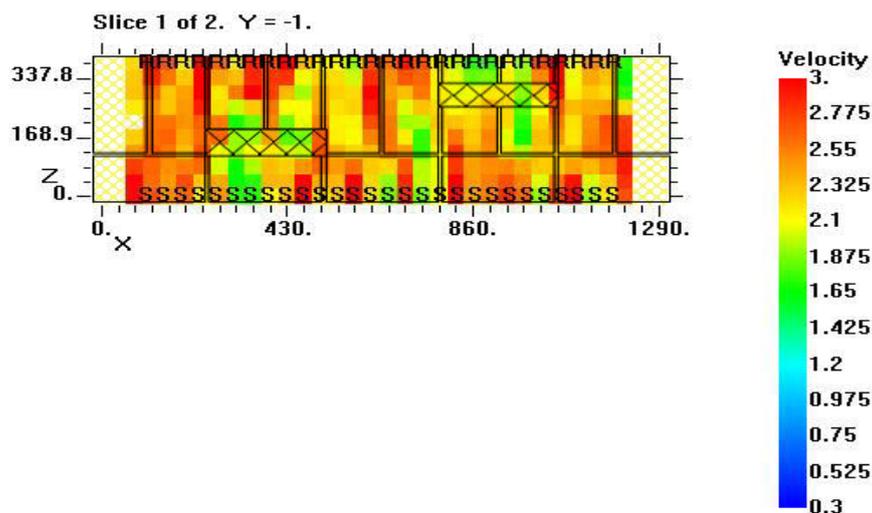


Figura 9.3 Muretto PNDE, corso 11, mappa delle velocità espressa in Km/sec del file output corso11_117 con sovrapposizione della geometria

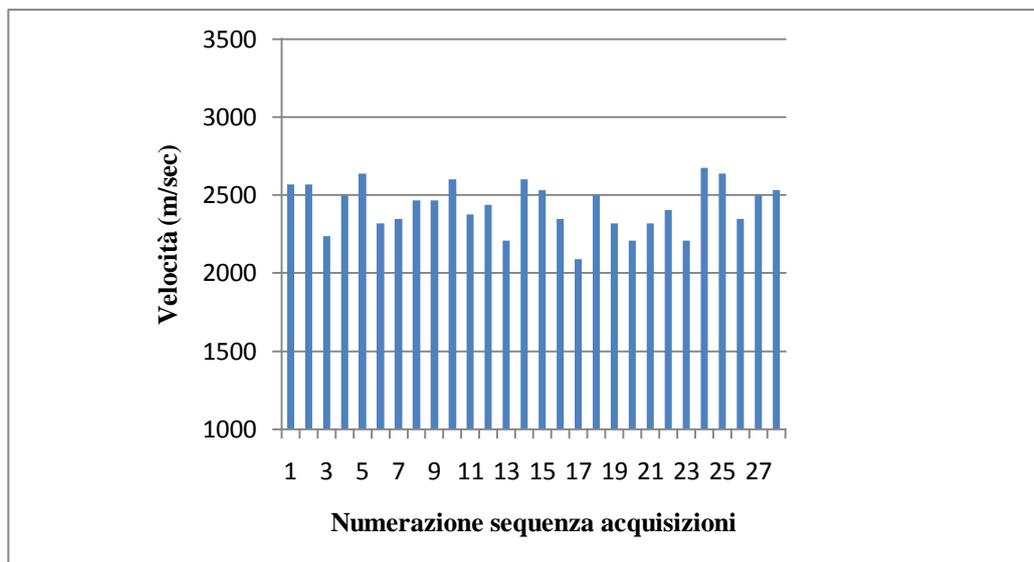


Figura 9.4 Muretto PNDE, corso 11, velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

Il corso 12 del muretto PNDE presenta la stessa dislocazione dei difetti del corso 11, ma la mappa di velocità del file output corso12_117 (figura 9.5) rileva due zone nella sezione a più bassa velocità in corrispondenza all'incirca dei difetti noti. Dall'istogramma delle velocità dei percorsi solo diretti (figura 9.6) si osservano due zone con velocità più basse rispetto alla media del corso. I valori più bassi di velocità, anche al di sotto dei 2000 m/sec sono presenti solo nella caratterizzazione del difetto più a sinistra, mentre i valori si innalzano un poco per il difetto di destra. Ciò però non si riscontra dalle immagini tomografiche in quanto le aree con colore blu più scuro sono in corrispondenza dell'anomalia di

destra che è profonda un cm in più rispetto quella di destra. Le prove soniche dirette indicano in maniera più precisa le dimensioni dei difetti: quello di sinistra è rilevato dalle basse velocità tra la sesta e la decima acquisizione e quello di destra è rilevato invece dai valori compresi fra la diciannovesima e la ventitreesima stazione di misura. Il corso 17 del muretto PNDE presenta i difetti di dimensione di più piccola, per questo meno visibili dalla mappa tomografica ottenuta dal file output corso17_107 (figura 9.7). L'istogramma delle velocità delle prove dirette (figura 9.8) presenta un andamento periodico di massimi e minimi senza delle zone a particolare convessità o concavità. Ciò si rileva anche nella mappa delle velocità, seppur vi siano due zone di colore verde a valori più bassi. In entrambi i casi la morfologia dei difetti non è individuata.

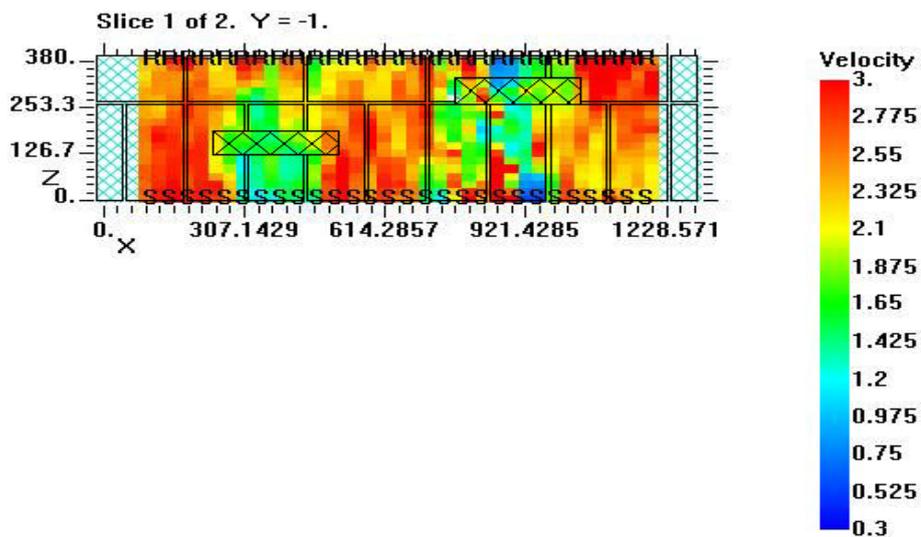


Figura 9.5 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità espressa in Km/sec del file output corso12_117 con sovrapposizione della geometria

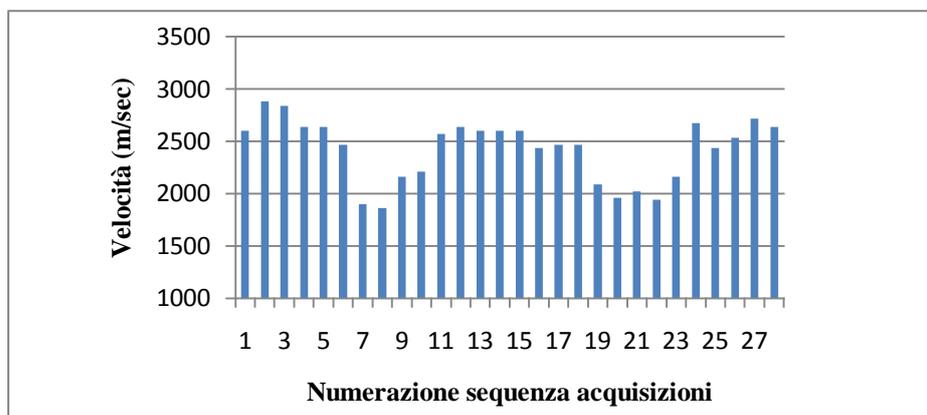


Figura 9.6 Muretto PNDE, corso 12, velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

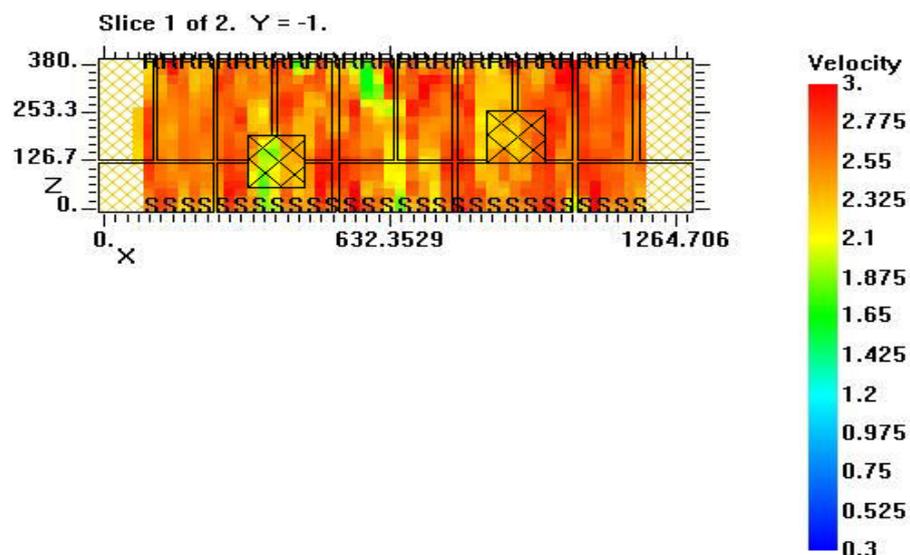


Figura 9.7 Muretto PNDE, corso 17, mappa delle velocità espressa in Km/sec del file output corso17_107 con sovrapposizione della geometria

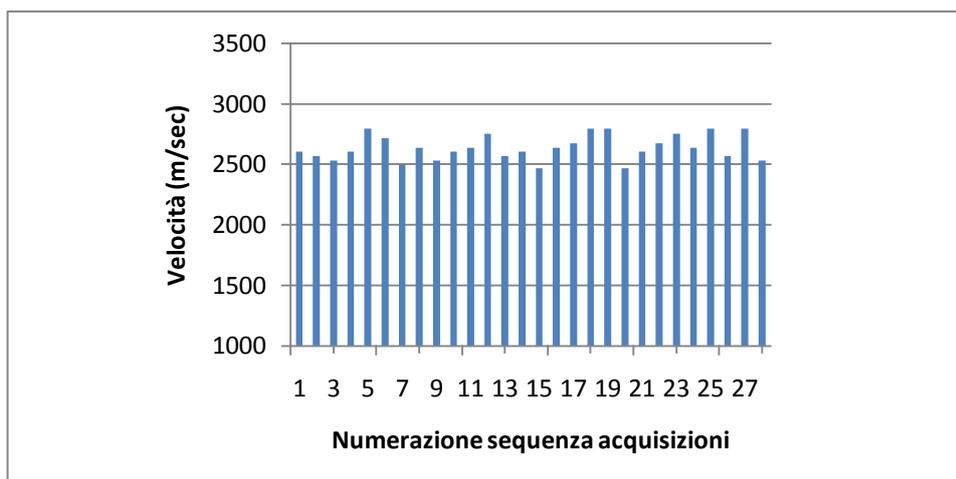


Figura 9.8 Muretto PNDE, corso 17, velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

Passando al muretto PNDF, il corso 5 è costituito da due difetti di dimensioni ridotte, circa simili al corso 17 del muretto PNDE. La mappa di velocità che si ricava dalle inversioni tomografiche (figura 9.9) non evidenzia zone di basse velocità che possano corrispondere ai difetti. Le velocità registrate dalle prove soniche dirette (figura 9.10) non evidenzia zone con basse velocità. Si riesce però ad individuare il difetto di sinistra, considerando le basse velocità in corrispondenza della settima e ottava stazione di misura. La mappa tomografica non riesce ad individuarlo, se non con una piccolissima zona a basse velocità nella zona superiore di sinistra. Il corso 7 del muretto PNDF non presenta alcun tipo di difetto e anche i risultati ottenuti rispecchiano l'omogeneità della sezione.

Il corso 12 del muretto PNDF contiene invece una muratura a secco. La mappa tomografica del file output corso12f_127 (figura 9.11) evidenzia una zona a più bassa velocità nella parte di sinistra dove il nocciolo di muratura a sacco è più spesso. Le velocità delle prove dirette (figura 9.12) rispecchiano questi risultati.

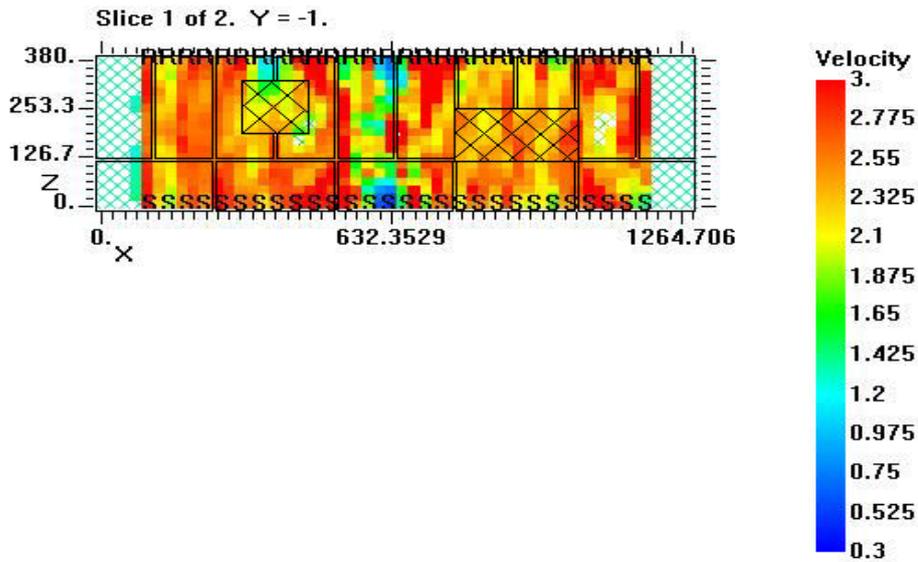


Figura 9.9 Muretto PNDF, corso 5, mappa delle velocità espressa in Km/sec del file output corso5_107 con sovrapposizione della geometria

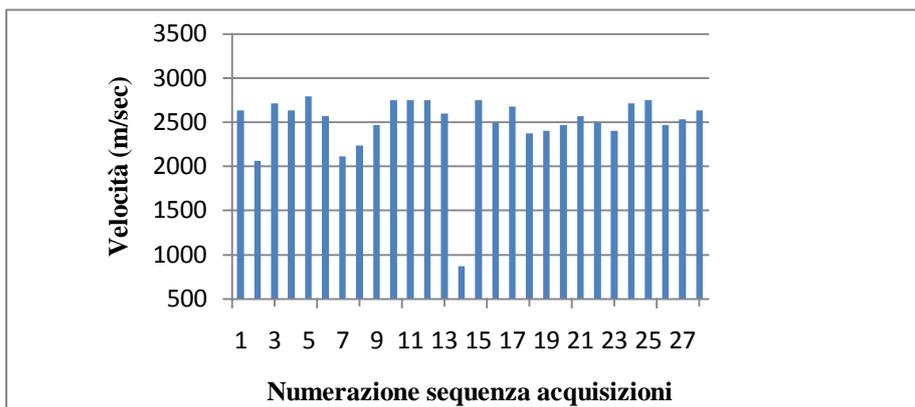


Figura 9.10 Muretto PNDF, corso 5, velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

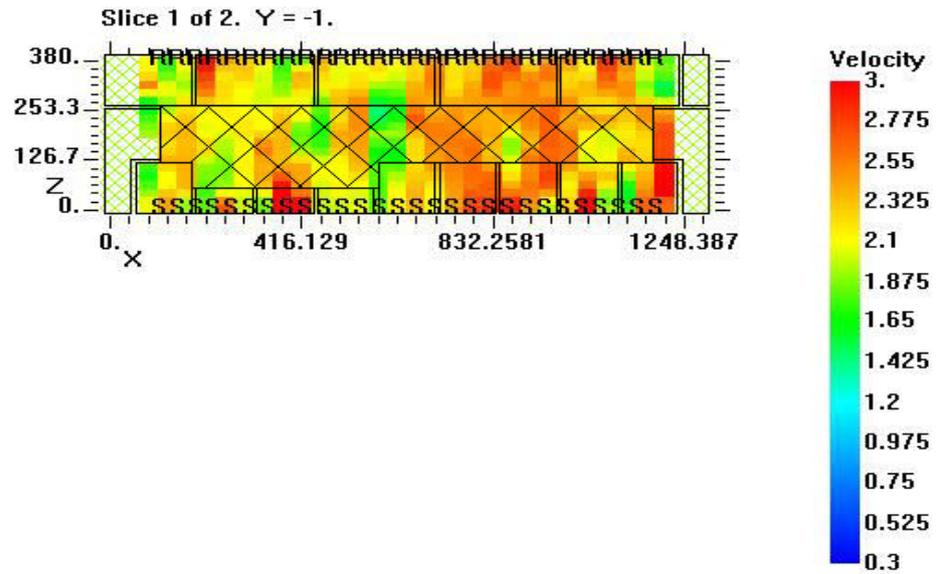


Figura 9.11 Muretto PNDE, corso 12, mappa delle velocità del file output corso12f_127 con sovrapposizione della geometria

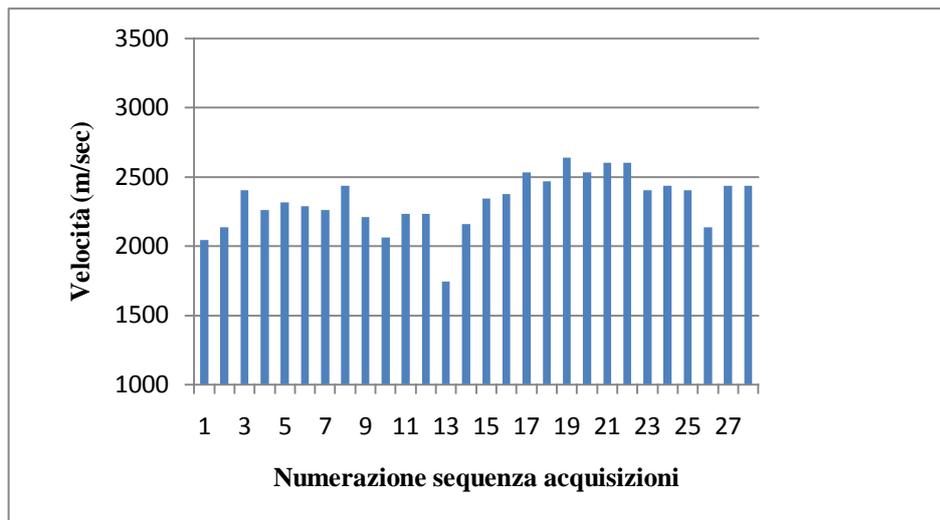


Figura 9.12 Muretto PNDE, corso 12, velocità espressa in m/sec dei percorsi diretti

Le sezione A-A' del muretto PNDE presenta tre difetti, così come la sezione B-B' dello stesso muretto. La mappa tomografica viene ruotata di 90° per permettere di avere una migliore visualizzazione del confronto fra i risultati tomografici e quelli derivanti dalle prove soniche dirette. L'immagine tomografica (figura 9.13) mostra tre zone a bassa velocità corrispondenti ai tre difetti presenti. Le velocità delle prove dirette (figura 9.14) presentano valori di

basse velocità in corrispondenza dei tre difetti. Considerando i valori inferiori nell'istogramma delle velocità dirette, il primo difetto è alto 20 cm, il secondo 12 cm e il terzo 8 cm. Nella realtà il primo difetto misura 20,5 cm, il secondo di 14 e il terzo di soli 6 cm. Si ottengono dei risultati molto precisi nell'individuazione dell'altezza dei difetti. Le legende non sono riportate, ma corrispondono a quelle dei corsi orizzontali. Nel confronto tra la figura 9.13 e figura 9.14, si osserva che le zone a velocità più bassa coincidono con le aree di colore blu. È importante ricordare che la velocità nell'immagine tomografica è espressa in Km/s mentre nel grafico è espressa in m/sec. Allo stesso modo la mappa tomografica della sezione B-B' (figura 9.15) viene ruotata per essere messa a confronto con l'istogramma delle velocità dei percorsi diretti (figura 9.16). Confrontando i valori di velocità tra la sezione A-A' e B-B' si nota come in corrispondenza di difetti con stesse caratteristiche, i valori siano inferiori nella sezione A-A'. Ad esempio nella sezione A-A', il primo difetto (quello localizzato in basso) è localizzato da quattro percorsi diretti con velocità inferiori a 2000m/sec, mentre nel grafico della sezione B-B' si osservano solo tre raggi, di cui solo due con valori inferiori a 2000 m/sec. Il secondo difetto (quello localizzato nella zona centrale della sezione) nella sezione A-A' ha ben tre percorsi intorno all'acquisizione numero 21 con velocità inferiore a 2000 m/sec, nel caso della sezione B-B' vi è solo un percorso con questi valori. Lo stesso vale per il percorso intorno all'acquisizione numero 32, che identifica il difetto più in alto nella sezione. Ciò ci porta a concludere che la distanza dal lato dove sono posizionate le stazioni emittenti influenza la visualizzazione dei difetti, i quali sono meno visibili, ovvero i percorsi che li attraversano hanno velocità maggiori, quando si trovano all'incirca in corrispondenza della mezzeria dello spessore della sezione. Se la posizione è vicino al lato di fronte del muretto o al lato di retro, il segnale lo riesce a rilevare in maniera più chiara. Considerando la velocità media delle due sezioni, esse sono piuttosto simili, pari a 2428,21 m/sec per la sezione A-A' e 2447,24 m/sec per la sezione B-B'.

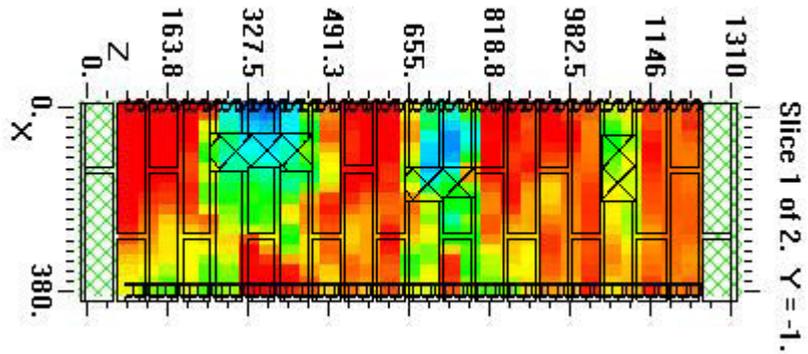


Figura 9.13 Muretto PNDE, sezione A-A', mappa di velocità espressa in Km/sec del file output PNDEvertA_117 con sovrapposizione della geometria ruotato di 90°

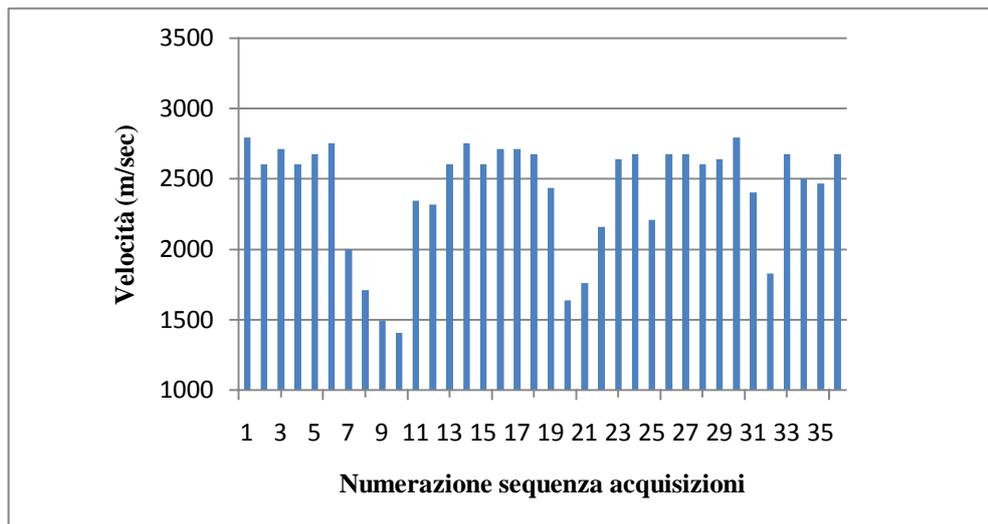


Figura 9.14 Muretto PNDE, sezione A-A', velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

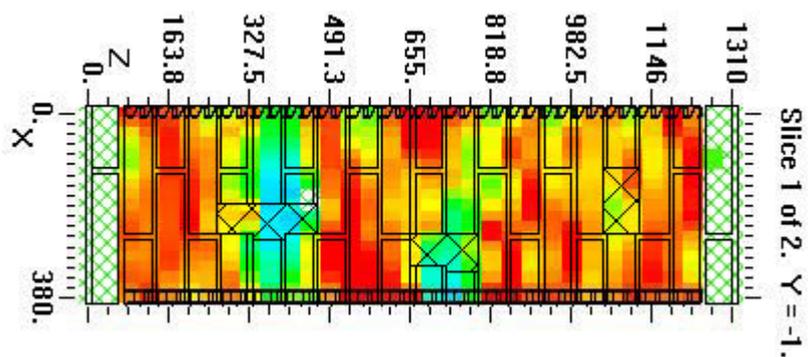


Figura 9.15 Muretto PNDE, sezione B-B', mappa di velocità espressa in Km/sec del file output PNDEvertB_117 con sovrapposizione della geometria ruotato di 90°

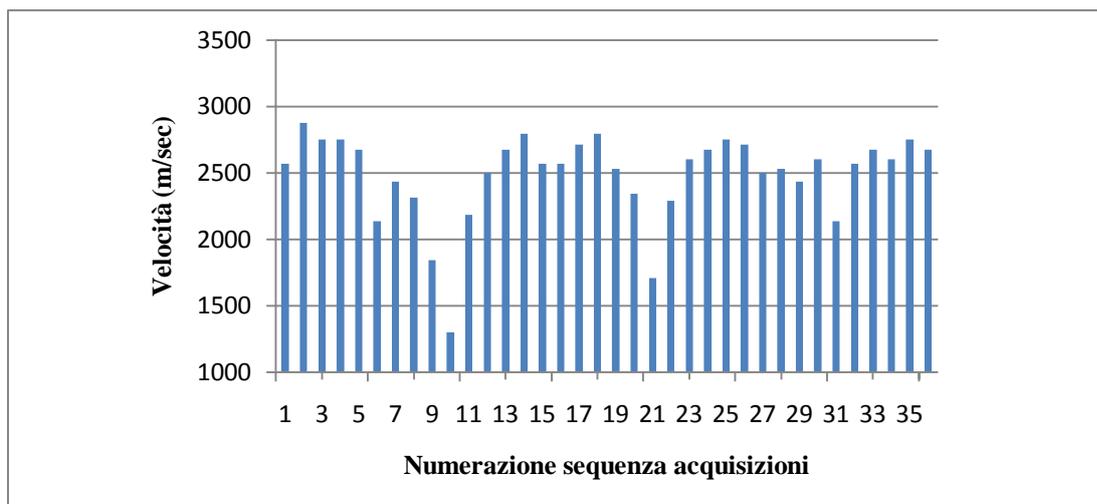


Figura 9.16 Muretto PNDE, sezione B-B', velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

Il muretto PNDF nelle sezioni verticali A-A' e B-B' presenta un solo corso con difetto e diversi corsi con muratura a sacco. L'immagine tomografica (figura 9.17) visualizza il difetto in corrispondenza del corso 5 e un'area a bassa velocità rappresenta la zona di muratura a sacco più spessa. Le velocità delle prove dirette (figura 9.18) evidenzia un abbassamento dei valori tra la settima e l'ottava stazione in corrispondenza del difetto nel corso 5. L'inflessione delle velocità si ha anche attorno all'acquisizione numero 24, che corrisponde alla restrizione dello spessore del nocciolo della muratura a sacco. L'altezza della zona con muratura a sacco non viene identificata in maniera precisa con le velocità dirette. La sezione B-B' del muretto PNDF presenta un zona di muratura a sacco con perimetro regolare. La mappa delle velocità è presentata in figura 9.19 e l'istogramma delle velocità dirette in figura 9.20. Il valore inferiore ai 2000 m/sec dell'ottava acquisizione corrisponde alla zona a bassa velocità in prossimità del difetto nel corso 5. Dalla quindicesima alla venticinquesima acquisizione i valori sono inferiori alla media e corrispondono alla zona di muratura a sacco, che nella mappa tomografica è visualizzata di colore giallo-verde.

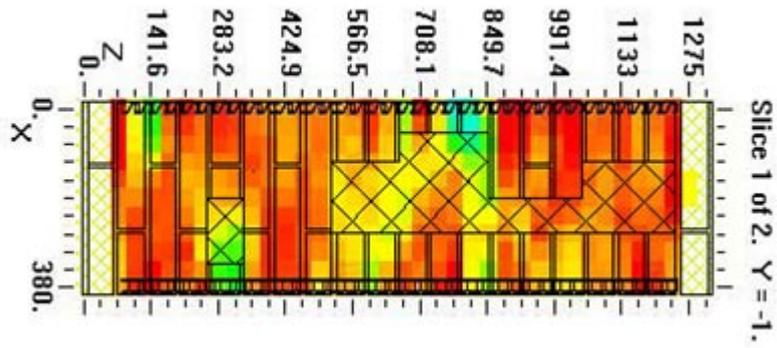


Figura 9.17 Muretto PNDF, sezione A-A', mappa di velocità espressa Km/sec del file output PNDFvertA_137 con sovrapposizione della geometria

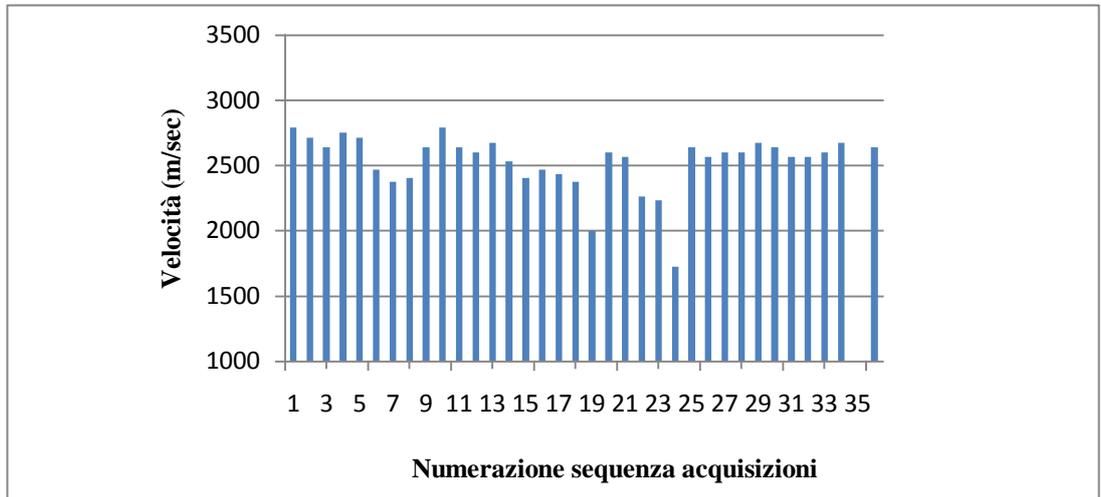


Figura 6.18 Muretto PNDF, sezione A-A', velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

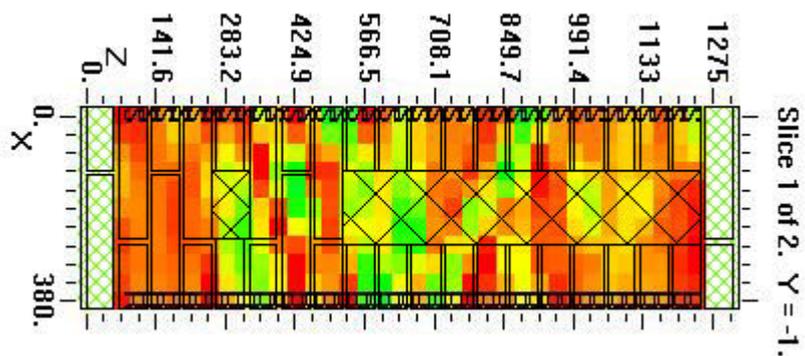


Figura 9.19 Muretto PNDF, sezione B-B', mappa di velocità espressa in Km/sec del file output PNDFvertB_137 con sovrapposizione della geometria

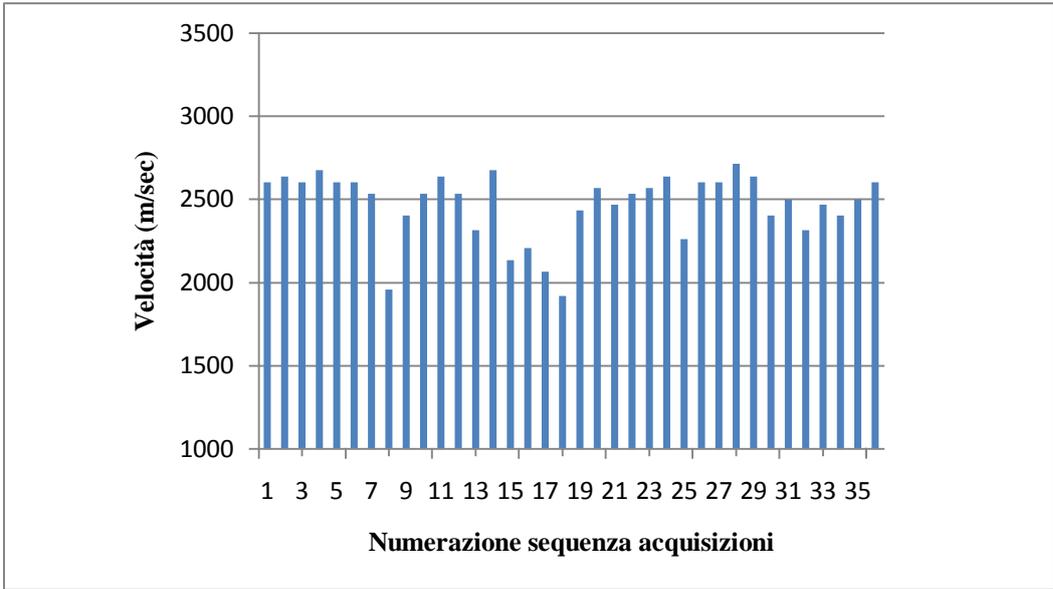


Figura 9.20 Muretto PNDF, sezione B-B', velocità espressa in m/sec dei soli percorsi diretti

Conclusioni

La richiesta di una più dettagliata conoscenza dei manufatti storici, al fine di salvaguardarne l'integrità e valutarne il degrado, ha portato ad un notevole sviluppo sia in termini di conoscenze, sia in termini di risvolti tecnologici delle tecniche non distruttive di diagnosi non invasiva. L'esperienza acquisita in ambito di ricerca ha evidenziato notevoli limitazioni nell'applicazione delle tecniche non distruttive, dovuto ai lunghi tempi di acquisizione e rielaborazione dei dati e alle carenze nell'individuazione di anomalie presenti nell'elemento. La tomografia sonica ha il potenziale per superare alcuni di questi limiti, come ad esempio incrementare il livello di risoluzione delle indagini effettuate. Lo studio svolto in questa tesi ha cercato di individuare i punti di forza della tomografia nell'identificazione di difetti e di diverse tessiture murarie all'interno di un elemento. Si è proceduto inizialmente con una corretta progettazione e svolgimento della campagna di acquisizione. I dati ottenuti, tramite prove soniche, sono stati rielaborati per mezzo di un software di inversione dei tempi di volo, che riproduce la distribuzione delle velocità nelle sezioni considerate. I parametri settati nel software sono stati scelti dopo un accurata sperimentazione, scegliendo opportuni valori di velocità massima e minima, il numero ottimale di iterazioni e le dimensioni dei pixel. Le acquisizioni tomografiche sul muretto PNDE, che contiene vuoti simulati di varie dimensioni sono state effettuate su 4 corsi orizzontali e 2 sezioni verticali. Le distribuzioni di velocità evidenziano aree a basse velocità in corrispondenza dei difetti. Le immagini tomografiche del corso 6 localizzano i difetti nelle loro reali posizioni, ma non ne identificano in maniera precisa la forma e le dimensioni. Nella figura 5.163 si nota che il difetto di sinistra è riprodotto in una posizione più superficiale, mentre l'area che identifica il difetto di destra ha un valore di velocità inferiore ed è più dispersiva di quella a sinistra. I corsi 11 e 12 hanno difetti alti solo due corsi murari, ma la distribuzione delle velocità non è simile (figure 5.164 e 5.165). La differente disposizione dei mattoni nei due corsi è probabilmente una delle cause di ciò. Il corso 17 presenta due difetti di dimensioni ridotta, i quali non sono ben visibili dalle immagini tomografiche prodotte (figura 5.166). Per quanto riguarda il muretto PNDF, che contiene due difetti di simili dimensioni, ma a differente

profondità e un'estesa area di costruzione a sacco, le acquisizioni sono state effettuate su 3 corsi orizzontali e 2 sezioni verticali. Il corso 5 dello stesso muretto, date le piccole dimensioni dei difetti e la loro posizione all'interno della sezione, non permette una facile individuazione degli stessi come si vede in figura 5.167. La distribuzione di velocità del corso 7 mostra una campitura piuttosto omogenea data dalla tessitura della sezione che non presenta difetti. Non si visualizzano i giunti di malta presenti poiché le loro dimensioni sono inferiori alla risoluzione della tecnica di circa 15 cm. La muratura a sacco presente nel corso 12 viene rappresentata (figura 5.169) da una distribuzione di velocità piuttosto disuniforme dovuta a valori di tempi di volo piuttosto variegati. La velocità media del corso in confronto con la stessa del corso 7 mostra un abbassamento causato probabilmente dal nocciolo centrale di materiale frammentato compattato da malta. Le sezioni verticali dei due muretti riportano le imperfezioni note con le stesse limitazioni trovate per i corsi orizzontali. Successivamente sono stati analizzati i risultati di prove soniche dirette applicate agli stessi corsi orizzontali e sezioni verticali, al fine di poter capire se possono fornire informazioni aggiuntive. Le velocità delle prove soniche dirette evidenziano bassi valori in corrispondenza dei difetti. Nel caso di anomalie di dimensioni maggiori alla risoluzione (come ad esempio il corso 6 del muretto PNDE) considerando le stazioni di misura che corrispondono a basse velocità, con discreta precisione si individua una dimensione del difetto. Confrontando le due metodologie di prova, le prove soniche danno informazione su una sola dimensione dei difetti, ma non sono in grado di definire la profondità e la forma degli stessi; al contrario la fitta distribuzione di percorsi della tomografia permette di definire le dimensioni, la posizione e la forma dei difetti. Si giunge alla conclusione che l'applicazione della tomografia sonica è valida, nel caso in cui si acquisisca solo su due lati dell'elemento, se i difetti presenti sono di dimensione maggiore della risoluzione e la loro posizione all'interno dello spessore della sezione si trova molto vicina al lato di battuta o al lato di ricezione del segnale. Essa è influenzata anche dalla disposizione dei mattoni nei corsi, infatti qualora il difetto si trovi dietro ad una fila di mattoni di lista, la sua visualizzazione è più difficoltosa. Le dimensioni delle anomalie non sono rilevate in maniera precisa, ma ciò è dovuto al fatto che il numero delle acquisizioni non è elevatissimo. La tecnica tomografica dà dei risultati

soddisfacenti nell'individuazione di difetti e diverse tessiture murarie, i quali potrebbero essere migliorati se si aumenta il numero di acquisizioni e le superfici di misura. Si deve tener conto però delle limitazioni dovute alla risoluzione del metodo e al tempo, piuttosto lungo per l'acquisizione e l'inversione dei dati.

Riferimenti bibliografici

L.Bertolini e P.Pedefferri, “Tecnologia dei materiali”, Edizioni Città degli studi, 2004

L.Binda e A.Saisi, “Non destructive testing applied to historic buildings: the case of some Sicilian Churches”, Proceeding of the 3rd International seminar “Possibilities of numerical and experimental technique” a cura di P.B.Lourenço e P.Roca, Guimarães, 7-9 Novembre 2001, Vol. I, pag. 29-46

G.A.Breymann, “Muri, costruzioni in mattoni ed in pietre artificiali e naturali”, Ed. Dedalo, 2003

C.Colla, A.Benedetti e G.Pascale, “Diagnosi di elementi strutturali lignei mediante tomografia sonica per la valutazione dello stato di conservazione”, XXV Convegno Internazionale Scienza e Beni Culturali “Conservare e restaurare il legno, conoscenze, esperienze, prospettive” a cura di G.Biscontin e G.Durini, Bressanone, 23-26 Giugno 2009, pag 677-688 Ed.Arcadia

C.Colla e E.Gabrielli, “D5.2 Report on laboratory and on site testing activities”, Internal report project SMooHS, Università di Bologna, 2009

C.Colla, S.de Miranda e F.Ubertini, “Indagini in sito per la diagnostica strutturale dell’elevato archeologico: La Casa del Tramezzo di Legno ad Ercolano”

G.Concu e B.De Nicolo, “Sonic tomography in ancient limestone masonry diagnosis and characterisation”, atti di Art’05, 8th International Conference on “Non destructive investigations and microanalysis for the diagnostic and conservation of the cultural and environmental heritage”, Lecce, 15-19 maggio 2005, pag. 1-15

G.Concu, “Indagine sonica e ultrasonica: evoluzione nel tempo e sviluppi future”, Atti del Convegno Nazionale “Sperimentazione su materiali e strutture” a cura di S.Russo e E.Saviero, Venezia, 6-7 dicembre 2006, Vol. I, pag 662-672

F.Da Porto, M.R.Valluzzi e C.Modena, “Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings”, International Symposium “Non destructive testing in Civil Engineering, 2003

S.Guscelli, “Esempi applicativi di tomografia sonica acustica finalizzata alla valutazione diagnostica di elementi strutturali di muratura”, Distart, Università di Bologna, Relatore: G.Pascale, Correlatore: C.Colla, SessioneII, Anno Accademico 2007-2008, pag.158

M.J.Jackson e D.R.Tweeton, “Migratom-Geophysical tomography using wavefront migration and fuzzy constraints”

E.Locatelli , “Diagnostica delle murature storiche con metodi non distruttivi: sperimentazione in laboratorio e applicazioni in sito”,Distart, Università di Bologna, Relatore: G.Pascale, Correlatori: C.Colla, G.Grillini, Sessione III, Anno Accademico 2006-2007, pag 360

V.Luprano e C.Colla, “Ultrasonic and Sonic Techniques applied to concrete and masonry structures”

G.Pascale, “Diagnostica ad ultrasuoni per l’edilizia”, Ed.Dario Flaccovio

S.Passini, “Tomografia sonica e ultrasonica: applicazioni su elementi strutturali in calcestruzzo, muratura e legno”, Distart, Università di Bologna, Relatore: G.Pascale, Correlatori: A.Benedetti e C.Colla, Sessione III, Anno Accademico 2006/2007, pag 414

K.Runggaldier, “Diagnosi del patrimonio architettonico: tomografia sonica e resistenza alla penetrazione di elementi strutturali lignei e murari”, Distart, Università di Bologna, Relatore: G.Pascale, Correlatori: A.Benedetti e C.Colla, Sessione II, Anno Accademico 2007-2008, pag 357.

D.Tweeton, “Installing and running the three dimensional tomography program, GeoTom CG”, 2008

Normativa: “Linee guida per l’applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all’Ordinanza PCM-3274”, 2005

Siti web: www.NDT.net

www.architetturaweb.it