

Programma di ricerca

Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo

Analisi automatica di misure ad ultrasuoni su percorsi a simmetria radiale

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti

Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo".

Rapporto tecnico marzo 2007

Sommario

Il lavoro riporta i risultati di un'ispezione ad ultrasuoni di oggetti cilindrici, contenenti anomalie indotte artificialmente. L'ispezione è stata fatta con la tecnica per trasmissione, impiegando una coppia di sonde non a contatto. La sonda emittente e quella ricevente sono state poste alle estremità di diametri o corde del cilindro, e per ciascuna posizione di misura sono state ricavati i parametri di velocità di propagazione dell'onda ultrasonora e di ampiezza del segnale ricevuto. Mediante il confronto coll'insieme di valori ricavati su percorsi di riferimento, i percorsi di misura sono stati classificati come normali, oppure contenenti anomalie: la mappa dei percorsi così classificati consente di determinare la posizione dell'anomalia nell'oggetto ispezionato.

Il lavoro riporta anche il confronto tra i risultati ottenuti mediante l'analisi automatica dei dati, coi risultati ottenuti mediante l'analisi soggettiva dei segnali di misura.

Indice

Introduzione	3
Materiali e metodi	4
Sistema per l'acquisizione US	4
Trasduttore.....	5
Setup per le misure in aria	5
Misure in trasmissione in aria	6
Misure in conduzione in aria.....	7
Setup per le misure in mezzo composito.....	8
Misure in trasmissione nel mezzo composito.....	9
Misure in conduzione nel mezzo composito	10
Analisi soggettiva dei segnali.....	10
Analisi automatica dei dati	11
Finestra di apprendimento	11
Finestra di analisi	12
Rappresentazione dei risultati	12
Risultati delle misure in aria.....	13
Analisi soggettiva.....	14
Misure sui diametri.....	14
Misure sulle corde.....	15
Analisi automatica	17
Misure sui diametri.....	17
Confronto tra i risultati delle misure in trasmissione in aria.....	18
Mappa dei percorsi in aria	20
Risultati delle misure in mezzo composito	22
Analisi soggettiva.....	23
Misure sui diametri.....	23
Misure sulle corde.....	24
Analisi automatica	26
Misure sui diametri.....	26
Misure sulle corde.....	27
Confronto tra i risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito	28
Mappa dei percorsi nel mezzo composito.....	31
Discussione e conclusioni	33
Riferimenti.....	36

Introduzione

L'ispezione ad ultrasuoni in trasmissione consente di rilevare la presenza di anomalie all'interno di un oggetto: questa determinazione è fatta confrontando due parametri caratteristici del segnale ricevuto, come il ritardo rispetto all'eccitazione della sonda e la sua ampiezza, coi valori ottenuti in una condizione di riferimento. Nelle misure in trasmissione è essenziale la definizione della finestra temporale entro la quale si determina l'ampiezza del segnale. Poiché la sonda ricevente è raggiunta in tempi diversi da onde ultrasonore che hanno subito riflessioni sulle varie interfacce presenti nell'oggetto in esame, è opportuno considerare soltanto il segnale di primo transito, prodotto dall'onda che incide sulla sonda ricevente dopo aver percorso il tragitto più breve tra le due sonde: considerando questo segnale, detto di primo transito, si ottiene il tempo di volo dell'onda ultrasonora e conseguentemente la sua velocità di propagazione nell'oggetto.

Una singola misura con la tecnica in trasmissione può rivelare la presenza di un'anomalia lungo il percorso esaminato, ma non dà indicazioni sulla posizione di essa: per localizzare l'anomalia si devono eseguire misure lungo percorsi che s'intersecano.

In questo lavoro si riportano i risultati ottenuti eseguendo misure a ultrasuoni mediante una coppia di sonde disposte su una guida circolare, mantenendo gli assi delle sonde orientati verso il centro della guida. In questo modo si ottengono percorsi di misura costituiti da diametri e da corde: questa procedura può essere impiegata per l'ispezione di oggetti cilindrici.

Questa soluzione è stata scelta in vista dell'esame di materiali lapidei e, in particolare, per l'individuazione di difetti all'interno di colonne di granito, con diametri di circa mezzo metro.

Il tipo e le dimensioni del materiale hanno portato all'impiego di sonde con frequenza di risonanza di 10^2 kHz, con elevato potere di penetrazione; l'opportunità di non usare mezzi di accoppiamento acustico, ha portato alla scelta di trasduttori di tipo "non-contact"[1]. L'andamento del lobo di emissione delle sonde limita l'escursione possibile dell'angolo tra gli assi delle sonde, e conseguentemente la procedura di acquisizione dei dati comporta un opportuno spostamento delle sonde lungo la guida.

I segnali ricevuti nelle varie posizioni di misura sono stati elaborati mediante un programma appositamente sviluppato [2] e provato in precedenza coi dati ricavati dall'ispezione di un oggetto con sezione rettangolare [3]. I risultati così ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati mediante l'analisi soggettiva dei segnali di misura.

Sono state eseguite misure in due condizioni: nel primo caso, la guida di supporto è stata poggiata su un banco in modo che il percorso tra le due sonde fosse costituito da aria, con eventuali ostacoli sistemati opportunamente; nel secondo caso la guida è stata bloccata intorno ad un recipiente cilindrico riempito d'acqua, con o senza ostacoli.

Materiali e metodi

Il sistema per l'ispezione a ultrasuoni in trasmissione è stato impiegato per esaminare un campione cilindrico, al fine di ricavare informazioni sulla sua funzionalità e per mettere a punto le componenti software.

Sistema per l'acquisizione US

La figura 1 mostra lo schema del sistema usato per l'ispezione US in trasmissione.

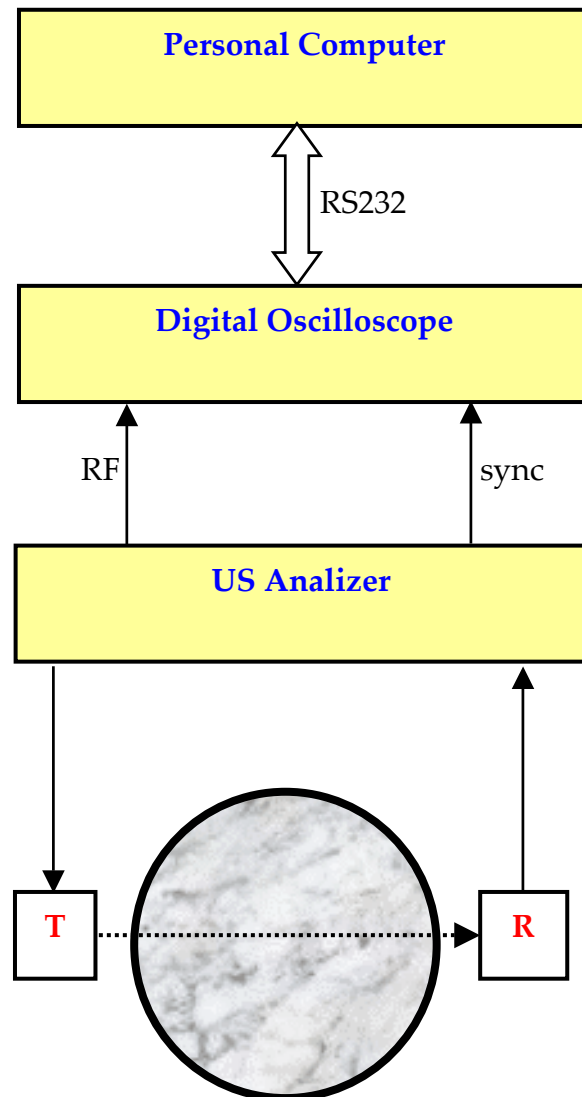


Figura 1. Componenti del sistema per l'ispezione US.

Nella figura s'individuano:

- uno strumento US Analyzer (Panametrics UA5058 PR), che pilota la sonda trasmittente con un impulso di tensione di ampiezza e cadenza controllate e amplifica il segnale prodotto dalla sonda ricevente con attenuazione e guadagno modificabili
- un oscilloscopio digitale (Tektronix TDS1012), che acquisisce in base all'impulso di sincronismo il segnale RF uscente dall'analizzatore e lo campiona con la cadenza selezionata
- un calcolatore, che riceve attraverso una porta seriale il vettore di dati generato dall'oscilloscopio, insieme con informazioni ausiliare, relative ai controlli di acquisizione.

Trasduttore

Le misure sono state eseguite impiegando una coppia di trasduttori Ultrason mod. NCT-101, con frequenza di risonanza $f = 100$ kHz.

Nel caso di trasmissione in aria, il segnale è costituito da due treni successivi d'impulsi (vedi figura 2), con durata complessiva di ≈ 130 μ s e pendenza di ≈ 0.1 V/ μ s.

Al variare dell'angolo tra le due sonde l'ampiezza del segnale diminuisce nel modo riportato in tabella 1.

Angolo °	V mV	Att dB
0	800	0
10	258	-9.8
15	186	-12.7
25	46	-24.8

Tabella 1. Segnale ricevuto con differenti angoli tra le sonde in aria.

Set-up per le misure in aria

La coppia di sonde è fissata su cavalieri in grado di scorrere lungo una guida circolare con diametro di 70 cm, graduata a intervalli di 15°; in ogni posizione di misura gli assi delle sonde sono nominalmente orientati in direzione del centro del cerchio.

Per ottenere percorsi contenenti un'anomalia si è impiegata una lastra di plexiglass con dimensioni 15 × 15 × 1.5 cm.

La figura 2 mostra il sistema di supporto per le sonde, il piano di riferimento con le indicazioni dei diametri di misura e la lastra di plexiglass.

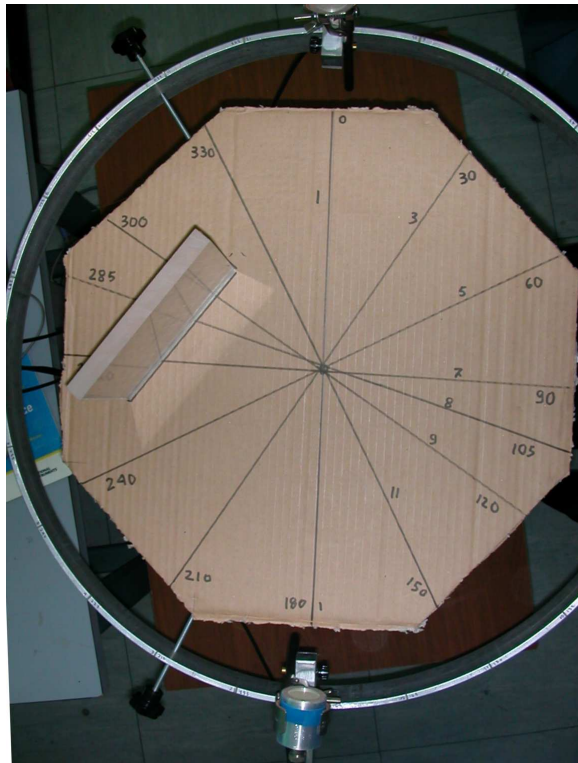


Figura 2. Vista dall'alto dell'apparato di rilevamento US.

Il generatore US è stato impostato alle seguenti condizioni:

- Pulse height 100 V
- Att 0 dB
- Gain 40 dB
- Aux preamp ON.

La base dei tempi dell'oscilloscopio digitale è stata impostata a $50 \mu\text{s}/\text{div}$; per ciascuna misura è stata ricavata la media temporale di 64 acquisizioni.

Misure in trasmissione in aria

In questo caso è stata eseguita una serie di misure con le sonde disposte alle estremità dei 12 diametri individuabili in figura 2, distanziati di un angolo di 15° .

La lastra di plexiglass interagisce coll'onda ultrasonora quando le sonde sono poste agli estremi dei diametri 6÷10. Si hanno quindi due tipi di percorso con le seguenti composizioni:

percorso	aria cm	plexiglass cm	tot cm
1	59		59
2	≈ 57.5	≈ 1.5	59

Per i percorsi di tipo 2 le lunghezze effettive in aria e plexiglass dipendono dall'angolo d'incidenza del diametro di misura sulla lastra.

Le velocità di propagazione dell'onda ultrasonora e le impedenze acustiche dei mezzi attraversati sono:

$$v_{aria}(20^\circ) = 0.034 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$v_{plexiglass} = 0.276 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$Z_{aria} \approx 0.0004 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Z_{plexiglass} \approx 3.5 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

Il coefficiente di trasmissione attraverso l'interfaccia aria-plexiglass è quindi $T \approx 0.0005$

In teoria, i tempi di volo, la velocità di propagazione e l'attenuazione dell'onda per i due tipi di percorso sono:

percorso	t_{aria} μs	$t_{plexiglass}$ μs	t_{tot} μs	v $\text{cm}/\mu\text{s}$	Att dB
1	1715		1715	0.0344	0
2	≈ 1671	≈ 5.4	≈ 1677	≈ 0.0350	≈ 132

Misure in conduzione in aria

In questo caso sono state eseguite coppie di misure lungo corde del supporto; per ciascuna coppia la sonda trasmittente è stata lasciata fissa all'estremità di un diametro e la sonda ricevente è stata all'estremità del diametro precedente (incremento angolare = -15°) e a quella successiva (incremento angolare = 15°).

La lunghezza nominale della corda è $l = 29.5\sqrt{2}\sqrt{1 + \cos 15^\circ} \text{ cm}$. Si hanno quindi due tipi di percorso con le seguenti composizioni:

percorso	aria cm	plexiglass cm	tot cm
1	58.5		58.5
2	≈ 57	≈ 1.5	58.5

In teoria, i tempi di volo, la velocità di propagazione e l'attenuazione dell'onda per i due tipi di percorso sono:

percorso	t_{aria} μs	$t_{plexiglass}$ μs	t_{tot} μs	v $\text{cm}/\mu\text{s}$	Att dB
1	1701		1701	0.0344	0
2	≈ 1657	≈ 5.4	≈ 1662	≈ 0.0352	≈ 132

Set-up per le misure in mezzo composito

In questa serie di misure il supporto per le sonde è stato sistemato all'esterno di un bidone metallico riempito d'acqua (vedi figura 3); le sonde sono state mantenute a circa 3 cm di distanza dalla parete del bidone mediante un apposito distanziatore, costituito da un anello di plastica, sagomato in modo che l'asse della sonda risulta perpendicolare alla superficie esterna del bidone (vedi figura 4).



Figura 3. Apparato per la misura in trasmissione attraverso il bidone.



Figura 4. Sonde con distanziatore sagomato di 3 cm.

Il generatore US è stato impostato alle seguenti condizioni:

- Pulse height 400 V
- Att 0 dB
- Gain 40 dB
- Aux preamp ON
- HP filter 0.3 MHz
- LP filter 0.5 MHz.

La base dei tempi dell'oscilloscopio digitale è stata impostata a 50 $\mu\text{s}/\text{div}$; per ciascuna misura è stata ricavata la media temporale di 64 acquisizioni.

Misure in trasmissione nel mezzo composito

Anche in questo caso è stata eseguita una serie di misure con le sonde disposte alle estremità dei 12 diametri, distanziati di un angolo di 15° .

Al fine di ottenere una situazione simile a quella delle misure in aria, si è immerso all'interno del bidone un blocco di marmo, con dimensioni $15 \times 30 \times 7.5$ cm (vedi figura 3). Il blocco è attraversato dai diametri di misura 7, 8, 9, 10 e 11. Si hanno dunque i seguenti tipi di percorso:

percorso	aria cm	acciaio cm	acqua cm	marmo cm	tot cm
1	6	0.15	44.5		50,6
2	6	0.15	≈ 37.0	≈ 7.5	50,6

Le velocità di propagazione dell'onda ultrasonora e le impedenze acustiche dei mezzi attraversati sono:

$$v_{\text{aria}} = 0.0344 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$v_{\text{acciaio}} = 0.589 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$v_{\text{acqua}} = 0.148 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$v_{\text{marmo}} = 0.472 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

$$Z_{\text{acqua}} \approx 1.54 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Z_{\text{marmo}} \approx 9.5 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

Il coefficiente di trasmissione attraverso l'interfaccia acqua-marmo è quindi $T \approx 0.48$.

In teoria, i tempi di volo, la velocità di propagazione e l'attenuazione dell'onda per i due tipi di percorso sono

percorso	t_{aria} μs	t_{acciaio} μs	t_{acqua} μs	t_{marmo} μs	t_{tot} μs	v $\text{cm}/\mu\text{s}$	Att dB
1	174.4	0.25	300.7		475.3	0.1066	0
2	174.4	0.25	≈ 250	≈ 23.6	448.2	0.1130	-12

Il valore di attenuazione dei percorsi di tipo 2 è valido solo per incidenza normale del fascio ultrasonoro sul blocco di marmo.

Misure in conduzione nel mezzo composito

In questo caso sono state eseguite coppie di misure lungo corde del supporto, con angoli di $\pm 15^\circ$ tra gli assi delle sonde. La lunghezza nominale della corda è $l = 25.4\sqrt{2}\sqrt{1+\cos 15^\circ} \text{ cm}$. Si hanno quindi due tipi di percorso con le seguenti composizioni:

percorso	aria cm	acciaio cm	acqua cm	marmo cm	tot cm
1	≈ 6	0.15	≈ 44.3		50.36
2	≈ 6	0.15	≈ 36.8	≈ 7.5	50.36

In teoria, i tempi di volo, la velocità di propagazione e l'attenuazione dell'onda per i due tipi di percorso sono:

percorso	t_{aria} μs	t_{acciaio} μs	t_{acqua} μs	t_{marmo} μs	t_{tot} μs	v cm/ μs	Att dB
1	174.4	0.25	299.3		473.9	0.1063	0
2	174.4	0.25	≈ 248.6	≈ 23.6	446.9	0.1127	-12

Analisi soggettiva dei segnali

I segnali ottenuti nei differenti modo d'ispezione sono stati esaminati per ricavare i seguenti parametri (vedi figura 5):

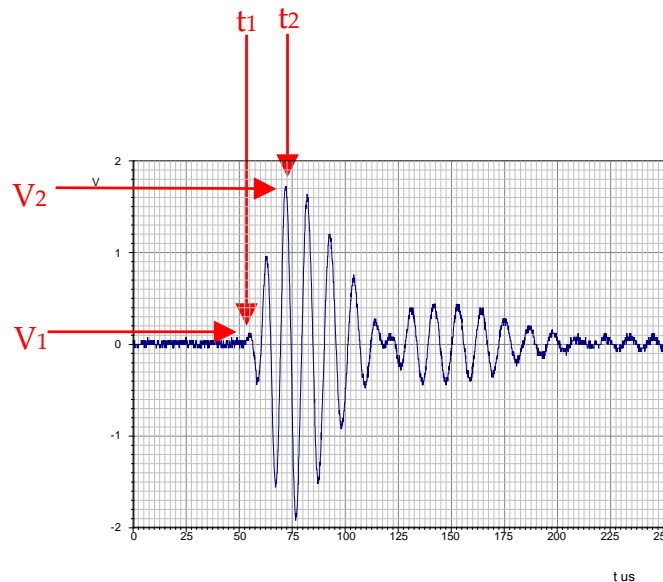


Figura 6. Parametri di misura sul segnale.

- t_1 = tempo di volo, in corrispondenza dell'inizio del segnale
- v = velocità dell'onda ultrasonora, data dal rapporto tra la distanza tra le sonde ed il tempo di volo
- V_{pp} = ampiezza picco del segnale
- S = pendenza del segnale, data dal rapporto tra il valore di picco v_2 e l'intervallo temporale $(t_2 - t_1)$, dove t_2 è il tempo associato a v_2 .

I parametri V_{pp} e v sono stati classificati in base alla statistica dei valori ottenuti sui percorsi di tipo 1. Per ciascun parametro p si sono calcolati il valore medio μ , la deviazione standard σ e le seguenti soglie:

$$s_D^- = (\mu - 2\sigma)$$

$$s_A^- = (\mu - 1.5\sigma)$$

$$s_A^+ = (\mu + 1.5\sigma)$$

$$s_D^+ = (\mu + 2\sigma)$$

Si è quindi adottata la seguente assegnazione:

- 1, se $s_A^- \leq p \leq s_A^+$
- 2, se $s_D^- \leq p < s_A^-$ oppure $s_D^+ \geq p > s_A^+$
- 3, se $p < s_D^-$ oppure $p > s_D^+$

Ciascun percorso di misura è stato assegnato ad una classe usando il seguente criterio:

- 1, se $V_{pp} \in 1$ e $v \in 1$
- 2, se $V_{pp} \in 2$ o $v \in 2$
- 3, se $V_{pp} \in 3$ o $v \in 3$

Analisi automatica dei dati

Sul calcolatore risiede il programma Decaseul, che provvede ad acquisire il vettore dei dati d'ingresso, ad elaborarlo secondo le specifiche fornite dall'utente ed a rappresentare i risultati in forma numerica e grafica.

Finestra di apprendimento

Il programma calcola il valor medio μ e la deviazione standard σ primi N_1 elementi del vettore di dati, costituiti dai campioni acquisiti prima dell'arrivo dell'impulso US trasmesso dall'oggetto in esame.

Finestra di analisi

Il programma legge la parte restante del vettore e determina il primo campione il cui valore supera la soglia $s = \mu + k\sigma$, con k prefissato: si ottengono così i valori t_1 (tempo d'inizio del segnale) e v_1 (ampiezza al tempo t_1) mostrati in figura 6.

Il programma esamina quindi un segmento di N_2 campioni, con N_2 scelto dall'utente, a partire da t_1 ; in questa finestra temporale il programma determina i seguenti parametri:

- V_{pp} : ampiezza picco-picco
- S : pendenza

Rappresentazione dei risultati

Il programma suddivide l'intervallo dei valori ottenuti per ciascun parametro in base a valori di soglia s_1 e s_2 scelti dall'utente, ottenendo una ripartizione in tre classi. Il programma produce quindi un grafico contenente i percorsi relativi alle misure (diametri o corde), colorati in base alla classificazione del parametro scelto.

Per il parametro ampiezza si ha la seguente rappresentazione:

- verde, se $V_{pp} \geq \max(V_{pp}) \times s_1$
- giallo, se $\max(V_{pp}) \times s_2 \geq V_{pp} < \max(V_{pp}) \times s_1$
- rosso, se $V_{pp} < \max(V_{pp}) \times s_2$

Per l'analisi dei dati sono stati selezionati i seguenti valori di lunghezza della finestra di apprendimento (N_1), coefficiente moltiplicativo della deviazione standard (k) e lunghezza della finestra di elaborazione (N_2):

	N_1 campioni	k	N_2 campioni
Aria	500	3	400
Mezzo composito	500	2	650

Risultati delle misure in aria

La figura 7 mostra il grafico del segnale ricevuto su un percorso di tipo 1, la figura 8 mostra il grafico del segnale ricevuto su un percorso di tipo 2.

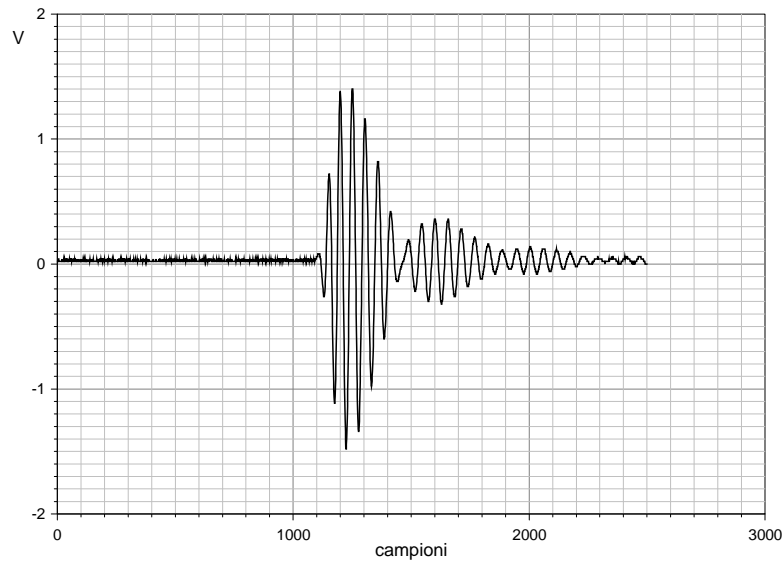


Figura 7. Misure in aria. Grafico del segnale ottenuto in trasmissione su un percorso di tipo 1.

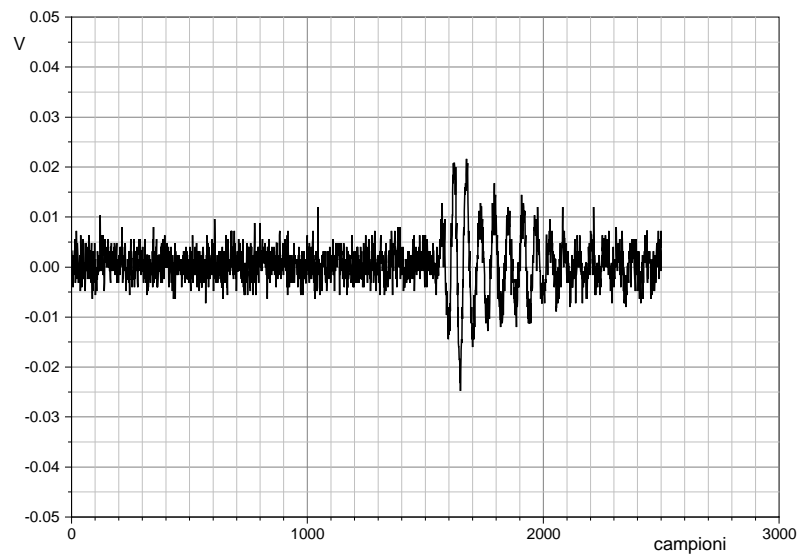


Figura 8. Misure in aria. Grafico del segnale ottenuto in trasmissione su un percorso di tipo 2.

Analisi soggettiva

Misure sui diametri

La tabella 2 riporta i risultati ottenuti con l'analisi soggettiva del segnale nelle dodici posizioni di misura. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 59 cm. I parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo i diametri 7÷10.

diametro	sonda di emissione	sonda di ricezione	t_1 μs	v $\text{cm}/\mu\text{s}$	V_{pp} V	S $\text{V}/\mu\text{s}$
1	0	180	1680	0.0351	2.280	0.033
2	15	195	1670	0.0353	2.800	0.047
3	30	210	1680	0.0351	2.760	0.043
4	45	225	1680	0.0351	2.600	0.041
5	60	240	1680	0.0351	2.720	0.043
6	75	255	1700	0.0347	2.360	0.036
7	90	270	1730	0.0341	0.056	0.001
8	105	285	1760	0.0335	0.042	0.001
9	120	300	1760	0.0335	0.102	0.002
10	135	315	1740	0.0339	0.800	0.007
11	150	330	1710	0.0345	2.760	0.073
12	165	345	1730	0.0341	2.080	0.033
Media			1691.2	0.0349	2.545	0.044
Stand dev			20.3	0.0004	0.27	0.01
C.V.			1.2	1.2	10.6	29.6

Tabella 2. Analisi soggettiva. Risultati delle misure in trasmissione in aria.

Prendendo l'insieme delle 8 misure ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 3.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	2.0042	2.1394	2.9506	3.0858
velocità $\text{cm}/\mu\text{s}$	0.0341	0.0343	0.0355	0.0357

Tabella 3. Analisi soggettiva. Soglie di classificazione per le misure in trasmissione in aria.

La tabella 4 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi soggettiva delle misure in trasmissione in aria.

diametro	velocità classe	ampiezza classe	percorso classe
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	2	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	3	3	3
11	1	1	1
12	2	2	2

Tabella 4. Analisi soggettiva . Classificazione dei risultati delle misure in trasmissione in aria.

Misure sulle corde

In questo caso le misure sono state eseguite ponendo la sonda trasmittente ad un'estremità dei diametri relativi ai percorsi di tipo 2 e quella ricevente in modo da ottenere tra gli assi delle sonde un angolo di $\pm 15^\circ$.

La tabella 5 riporta i valori di tempo di volo, velocità e ampiezza del segnale. I parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo le corde 2,3,5,8. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 58.5 cm.

corda	sonda di emissione	sonda di ricezione	t _i μs	v cm/μs	V _{pp} V
1	75°	240°	1626	0.0363	0.980
2	75°	270°	1634	0.0328	0.000
3	135°	300°	1700	0.0347	0.180
4	135°	330°	1660	0.0355	0.920
5	255°	60°	1630	0.0362	0.580
6	255°	90°	1628	0.0362	1.400
7	315°	120°	1670	0.0353	1.560
8	315°	150°	1680	0.0351	0.460
Media			1646.0	0.0358	1.215
Stand dev			22.3	0.0005	0.3
C.V.			1.4	1.4	25.8

Tabella 5. Risultati delle misure in conduzione in aria.

Considerando l'insieme delle 4 misure ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 6.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	0.5873	0.7442	1.6858	1.8427
velocità cm/μs	0.0348	0.0351	0.0366	0.0368

Tabella 6. Analisi soggettiva. Soglie di classificazione per le misure in conduzione in aria.

La tabella 7 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi soggettiva delle misure in conduzione in aria.

corda	velocità classe	ampiezza classe	percorso classe
1	1	1	1
2	3	3	3
3	3	3	3
4	1	1	1
5	1	3	3
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	3	3

Tabella 7. Analisi soggettiva. Classificazione dei risultati delle misure in conduzione in aria.

Analisi automatica

Misure sui diametri

La tabella 8 riporta i risultati dell'analisi automatica dei 12 segnali di misura. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 59 cm. I parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo i diametri 7÷10.

diametro	sonda di emissione	sonda di ricezione	soglia	t_1 μs	v $cm/\mu s$	V_{pp}	S $V/\mu s$
1	0	180	0.049	1686	0.0350	2.220	0.034
2	15	195	0.052	1674	0.0352	2.880	0.044
3	30	210	0.049	1680	0.0351	2.760	0.043
4	45	225	0.051	1684	0.0350	2.540	0.040
5	60	240	0.055	1688	0.0350	2.760	0.043
6	75	255	0.054	1699	0.0347	2.140	0.035
7	90	270	0.009	1749	0.0337	0.053	0.006
8	105	285	0.009	1777	0.0332	0.046	0.001
9	120	300	0.009	1765	0.0334	0.098	0.002
10	135	315	0.016	1739	0.0339	0.792	0.009
11	150	330	0.057	1713	0.0344	2.780	0.066
12	165	345	0.049	1726	0.0342	2.140	0.033
Media				1693.7	0.0348	2.527	0.042
Stand dev				17.7	0.0004	0.31	0.01
C.V.				1.0	1.0	12.4	24.9

Tabella 8. Analisi automatica. Risultati delle misure in trasmissione in aria.

Considerando l'insieme delle 8 misure ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 9.

parametro	statistica		soglia			
	m	σ	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	2.5275	0.3142	1.8991	2.0562	2.9988	3.1559
velocità $cm/\mu s$	0.0348	0.0004	0.0341	0.0343	0.0354	0.0356

Tabella 9. Analisi automatica. Soglie di classificazione per le misure in trasmissione in aria.

La tabella 10 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi automatica delle misure in trasmissione in aria.

diametro	v classe	A classe	percorso classe
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	3	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	3	3	3
11	1	1	1
12	2	1	2

Tabella 10. Analisi automatica. Classificazione dei risultati delle misure in trasmissione in aria.

Confronto tra i risultati delle misure in trasmissione in aria

La figura 9 mostra i valori di picco del segnale ottenuti nei due modi di analisi e riportati rispettivamente nelle tabelle 2 e 8; la figura 10 mostra i tempi di volo, la figura 11 i valori di pendenza.

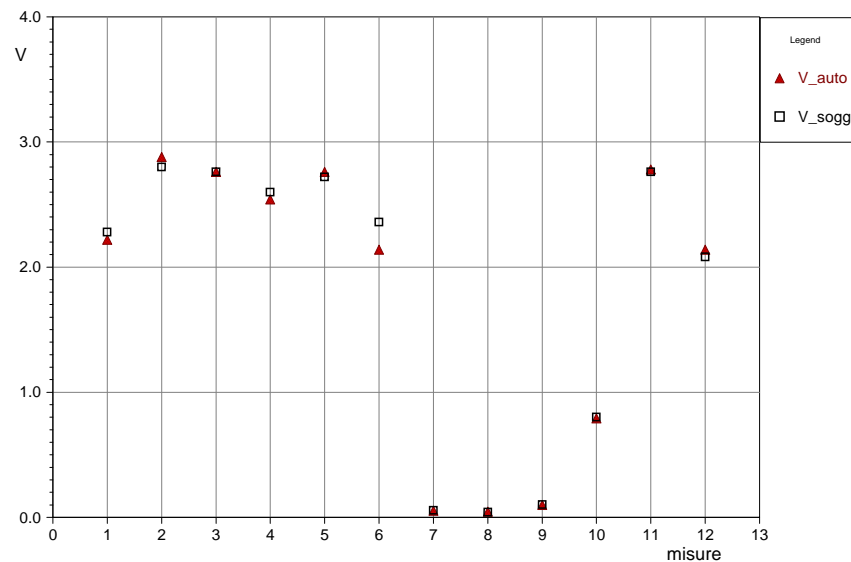


Figura 9. Ampiezza del segnale, determinata con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione in aria.

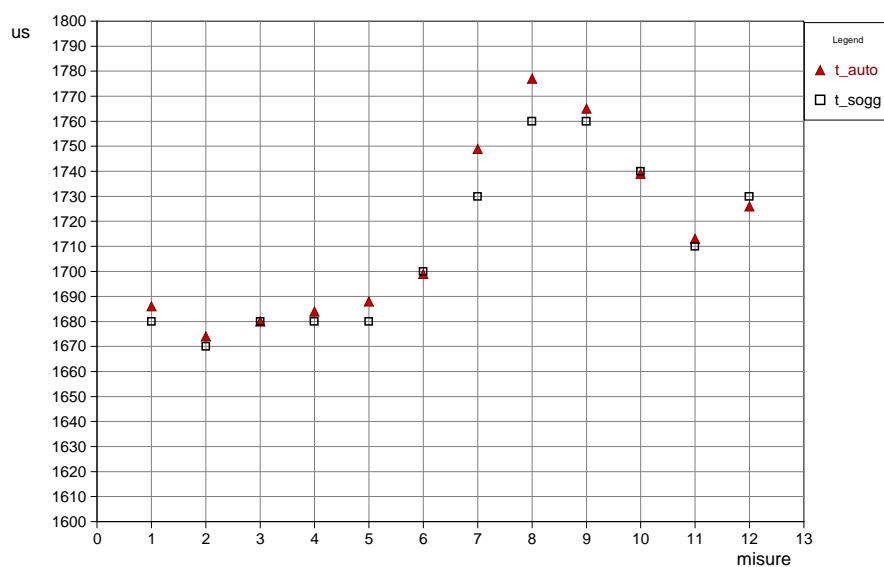


Figura 10. Tempo di volo, determinato con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione in aria.

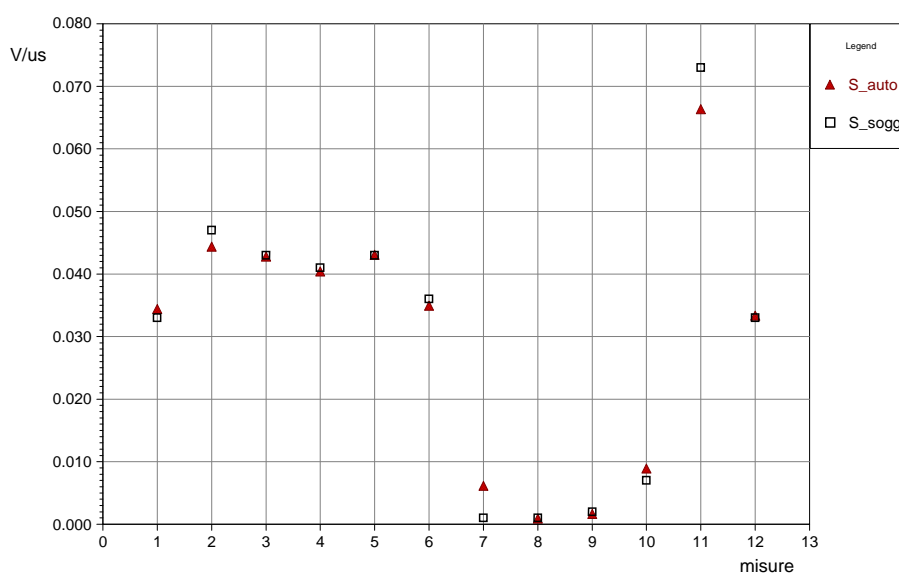


Figura 11. Pendenza del segnale, determinata con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione in aria.

La figura 12 mostra il grafico dei valori di ampiezza e di tempo di volo delle 12 misure riportate nelle tabelle 2 e 8.

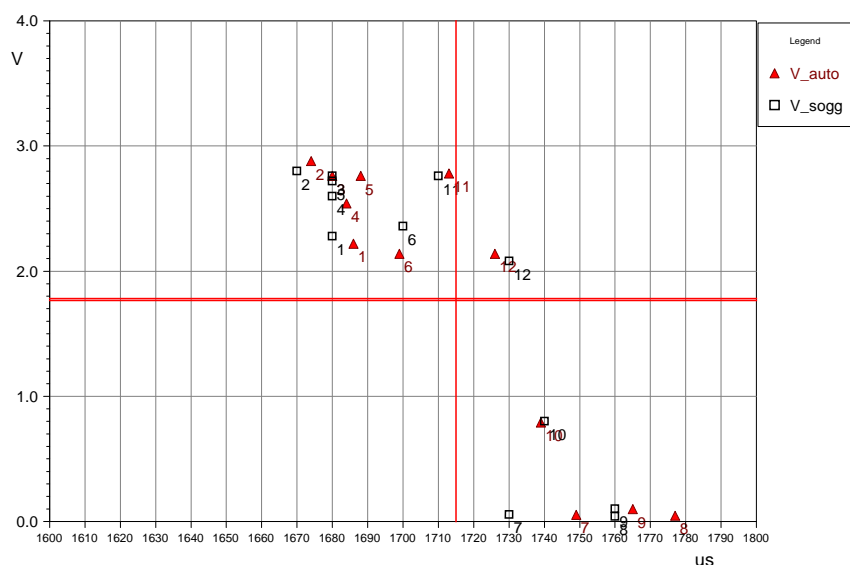


Figura 12. Diagramma ampiezza/tempo di volo dei risultati dell'analisi soggettiva e automatica delle misure in trasmissione in aria.

La tabella 11 riporta i risultati della regressione lineare eseguita tra i risultati dei due modi di analisi.

valore	Regression Coefficient	Y-Intercept	Adjusted R-Squared	Correlation Coefficient	Model Selection Criterion
t ₁	1.057	-91.900	0.961	0.982	3.000
V _{pp}	0.997	-0.008	0.995	0.998	5.094
S	0.907	0.003	0.991	0.996	4.529

Tabella 11. Risultati della regressione lineare tra i risultati dell'analisi soggettiva e quelli dell'analisi automatica delle misure in trasmissione in aria.

Mapa dei percorsi in aria

La figura 13 mostra la rappresentazione grafica dei percorsi in base alle classificazioni di velocità e ampiezza (vedi tabelle 4 e 7): i percorsi attribuiti alla classe 1 sono disegnati in verde, quelli della classe 2 in giallo e quelli della classe 3 in rosso.

La figura 14 mostra la rappresentazione grafica delle 12 misure di picco-picco in trasmissione, prodotta dal programma di analisi in base ai valori di soglia scelti. Nell'esempio riportato sono colorati in verde i diametri in corrispondenza dei quali si ha un segnale che differisce del valore massimo di meno del 60%, in giallo i diametri con diminuzioni tra il 60% e l'80%, e in rosso i diametri con diminuzioni superiori all'80%.

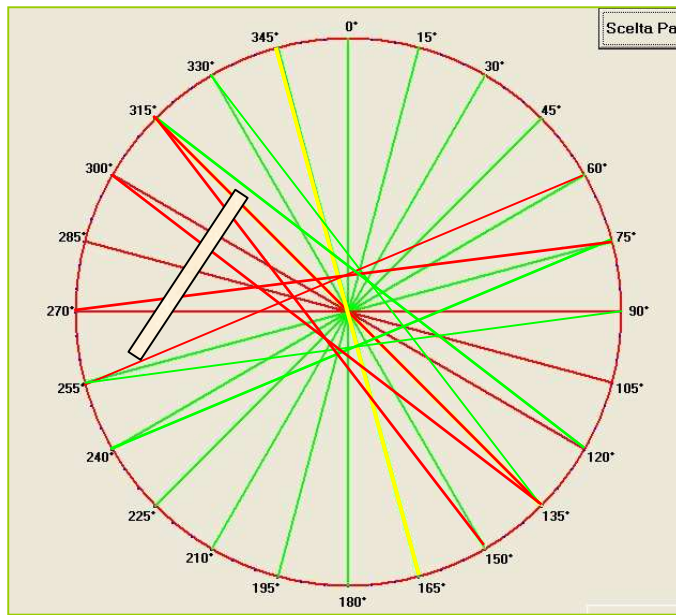


Figura 13. Analisi soggettiva. Mappa dei percorsi ottenuta con la classificazione dei risultati delle misure in aria.

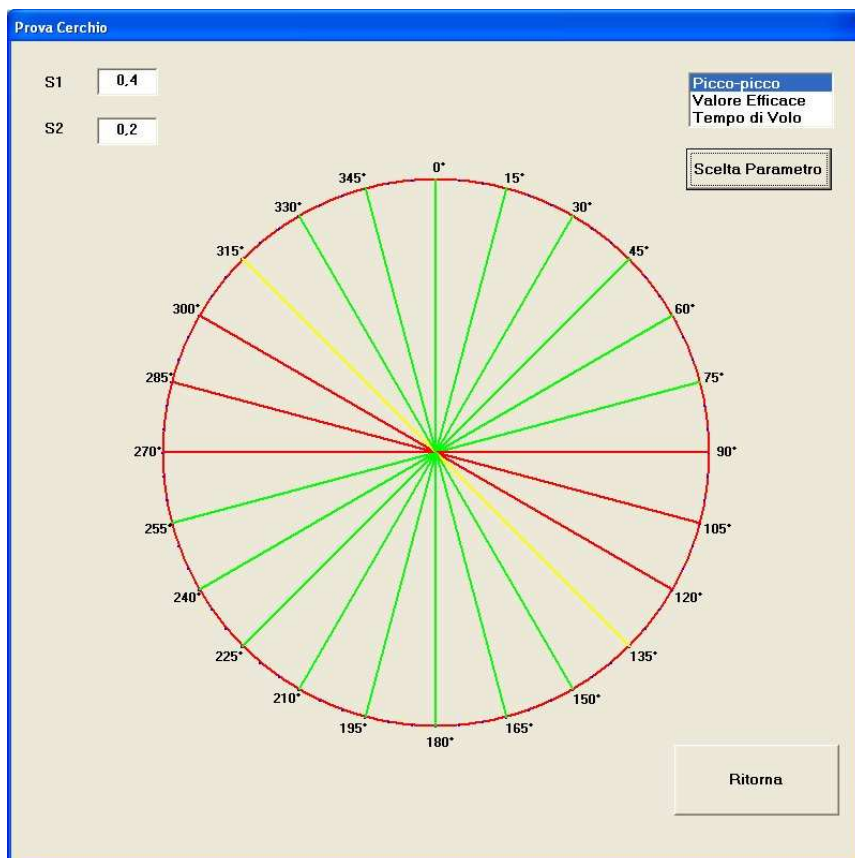


Figura 14. Analisi automatica. Mappa dei percorsi ottenuta con la quantizzazione delle ampiezze delle misure in trasmissione in aria, con $s_1 = 0.4$ e $s_2 = 0.2$.

Risultati delle misure in mezzo composito

La figura 7 mostra il grafico del segnale ricevuto su un percorso di tipo 1: si individuano chiaramente il primo treno d'impulsi, emesso dalla sonda in base all'eccitazione elettrica, ed il secondo treno, causato dalle riflessioni del primo treno sulla superficie del bidone e quindi sulla sonda emittente. La figura 8 mostra il grafico del segnale ricevuto su un percorso di tipo 2.

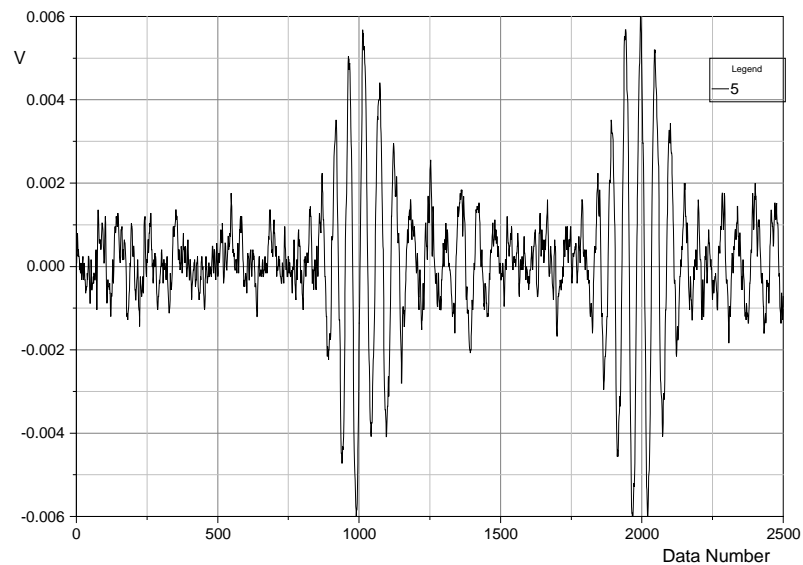


Figura 15. Misure nel mezzo composito. Grafico del segnale ottenuto su un percorso di tipo 1.

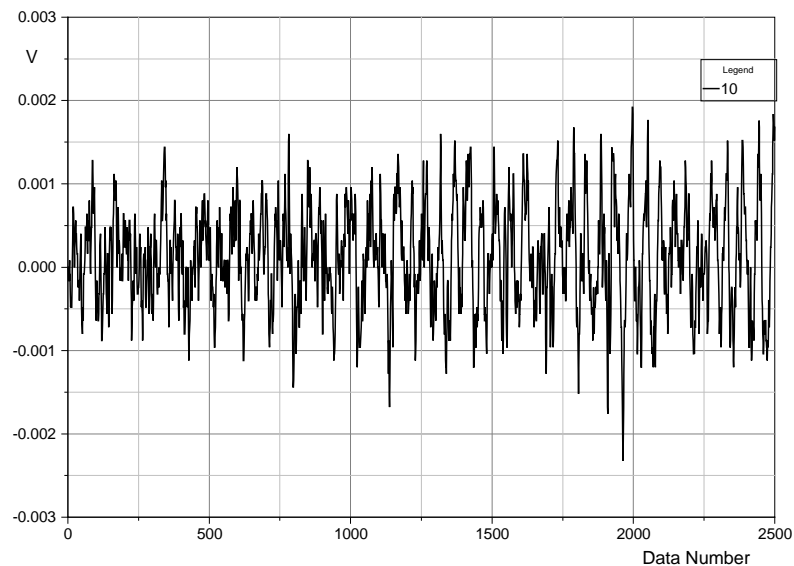


Figura 16. Misure nel mezzo composito. Grafico del segnale ottenuto su un percorso di tipo 2.

Analisi soggettiva

Misure sui diametri

La tabella 12 riporta i risultati ottenuti con l'analisi soggettiva del segnale nelle dodici posizioni di misura. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 50.6 cm. I parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo i diametri 8, 9 e 10.

diametro	sonda di emissione	sonda di ricezione	t_1 μs	v $\text{cm}/\mu\text{s}$	V_{PP} V	S $\text{V}/\mu\text{s}$
1	0	180	504.2	0.1004	0.0080	0.00012
2	15	195	510.2	0.0992	0.0086	0.00013
3	30	210	510.2	0.0992	0.0115	0.00017
4	45	225	510.2	0.0992	0.0098	0.00015
5	60	240	510.2	0.0992	0.0120	0.00018
6	75	255	510.2	0.0992	0.0073	0.00011
7	90	270	510.2	0.0992	0.0045	0.00009
8	105	285	680.2	0.0744	0.0048	0.00008
9	120	300	600.2	0.0843	0.0033	0.00007
10	135	315	560.2	0.0903	0.0027	0.000054
11	150	330	510.2	0.0992	0.0051	0.00008
12	165	345	504.2	0.1004	0.0097	0.00015
Media			508.9	0.0994	0.0085	0.0001
Stand dev			2.6	0.0005	0.0026	0.00004
C.V.			0.5	0.5	30.4	27.1

Tabella 12. Analisi soggettiva. Risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

Considerando l'insieme delle 9 misure ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 13.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	0.0033	0.0046	0.0124	0.0137
velocità $\text{cm}/\mu\text{s}$	0.0984	0.0987	0.1002	0.1005

Tabella 13. Analisi soggettiva. Soglie di classificazione per le misure in trasmissione nel mezzo composito.

La tabella 14 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi soggettiva delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

diametro	v classe	A classe	percorso classe
1	2	1	2
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	2	2
8	3	1	3
9	3	2	3
10	3	3	3
11	1	1	1
12	2	1	2

Tabella 14. Analisi soggettiva. Classificazione dei risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

Misure sulle corde

In modo analogo a quanto fatto con le misure in aria si sono eseguite ulteriori misure lungo le corde al fine di localizzare l'ostacolo; la tabella 15 riporta i risultati. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 50.36 cm; i parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo le corde 14,15,17,20)

corda	sonda di emissione	sonda di ricezione	t ₁ μs	v cm/μs	V _{pp} V	S V/μs
13	90	255	490.2	0.1032	0.0058	0.00006
14	90	285	510.2	0.0992	0.0030	0.00004
15	150	315	720.2	0.0703	0.0040	0.00005
16	150	345	492.2	0.1028	0.0070	0.00009
17	270	75	780.2	0.0649	0.0040	0.00005
18	270	105	500.2	0.1012	0.0060	0.00015
20	330	165	476.2	0.1063	0.0040	0.00010
21	330	135	500.2	0.1012	0.0050	0.00006
Media			495.7	0.1021	0.0059	0.0001
Stand dev			5.3	0.0011	0.0008	0.0000
C.V.			1.1	1.1	13.8	47.3

Tabella 15. Analisi soggettiva. Valori di misura ricavati lungo le corde.

Considerando l'insieme delle 4 misure, ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 16.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	0.0043	0.0047	0.0072	0.0076
velocità cm/μs	0.0999	0.1005	0.1037	0.1043

Tabella 16. Analisi soggettiva. Soglie di classificazione per le misure in conduzione nel mezzo composito.

La tabella 17 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi soggettiva delle misure in conduzione.

corda	v classe	A classe	percorso classe
13	1	1	1
14	3	3	3
15	3	3	3
16	1	1	1
17	3	3	3
18	1	1	1
20	3	3	3
21	1	1	1

Tabella 17. Analisi soggettiva. Classificazione dei risultati delle misure in conduzione nel mezzo composito.

Analisi automatica

Misure sui diametri

La tabella 18 riporta i risultati dell'analisi automatica dei 12 segnali di misura. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 50.6 cm. I parametri statistici riportati in tabella sono stati calcolati escludendo i diametri 8, 9 e 10.

diametro	sonda di emissione	sonda di ricezione	soglia V	t_1 μ s	v cm/ μ s	V_{pp} V	S V/ μ s
1	0	180	0.001	510	0.0991	0.008	0.00010
2	15	195	0.001	510	0.0991	0.009	0.00007
3	30	210	0.001	511	0.0989	0.012	0.00015
4	45	225	0.001	511	0.0989	0.010	0.00017
5	60	240	0.001	514	0.0985	0.012	0.00014
6	75	255	0.001	513	0.0986	0.008	0.00012
7	90	270	0.001	535	0.0946	0.004	0.00009
8	105	285	0.001	576	0.0878	0.004	0.00001
9	120	300	0.001	642	0.0788	0.004	0.00001
10	135	315	0.001	614	0.0824	0.004	0.00001
11	150	330	0.001	512	0.0989	0.005	0.00006
12	165	345	0.001	511	0.0991	0.009	0.00016
Media				514.2	0.0984	0.008	0.00012
Stand dev				7.8	0.0014	0.002	0.00004
C.V.				1.5	1.5	29.2	32.9

Tabella 18. Analisi automatica. Risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

Considerando l'insieme delle 9 misure ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 19.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	0.0035	0.0048	0.0122	0.0134
velocità cm/ μ s	0.0955	0.0963	0.1006	0.1013

Tabella 19. Analisi automatica. Soglie di classificazione per le misure in trasmissione nel mezzo composito.

La tabella 20 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

diametro	v classe	A classe	percorso classe
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	3	2	3
8	3	2	3
9	3	2	3
10	3	2	3
11	1	1	1
12	1	1	1

Tabella 20. Analisi automatica. Classificazione dei risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

Misure sulle corde

In modo analogo a quanto fatto con le misure in aria si sono eseguite ulteriori misure lungo le corde al fine di localizzare l'ostacolo; la tabella 21 riporta i risultati. La velocità è stata ricavata dalla misura di tempo di volo, assumendo che la distanza tra le sonde sia di 50.36 cm.

misura	sonda di emissione	sonda di ricezione	soglia V	t ₁ μ s	v cm/ μ s	V _{pp} V	S V/ μ s
13	90	255	0.001	514	0.0985	0.006	0.00016
14	90	285	0.001	602	0.0841	0.006	0.00001
15	150	315	0.002	655	0.0773	0.006	0.00008
16	150	345	0.001	510	0.0991	0.008	0.00119
17	270	75	0.001	513	0.0986	0.004	0.00003
18	270	105	0.001	512	0.0988	0.006	0.00086
20	330	165	0.001	538	0.0941	0.003	0.00047
21	330	135	0.001	514	0.0985	0.005	0.00011
Media				512.4	0.0988	0.0061	0.0006
Stand dev				1.5	0.0003	0.0012	0.0005
C.V.				0.3	0.299	19.5	91.6

Tabella 21. Analisi automatica. Valori di misura ricavati automaticamente lungo le corde.

Considerando l'insieme delle 4 misure, ricavate lungo i percorsi di tipo 1, si hanno le soglie di classificazione riportate in tabella 22.

parametro	soglia			
	s_D^-	s_A^-	s_A^+	s_D^+
ampiezza V	0.0037	0.0043	0.0079	0.0085
velocità cm/ μ s	0.0982	0.0983	0.0992	0.0993

Tabella 22. Analisi automatica. Soglie di classificazione per le misure in conduzione nel mezzo composito.

La tabella 23 riporta la classificazione dei risultati dell'analisi automatica delle misure in conduzione nel mezzo composito.

misura	v classe	A classe	B classe
13	1	1	1
14	3	1	3
15	3	1	3
16	1	1	1
17	1	2	2
18	1	1	1
20	3	3	3
21	1	1	1

Tabella 23. Analisi automatica. Classificazione delle corde di misura.

Confronto tra i risultati delle misure in trasmissione nel mezzo composito

La figura 17 mostra i valori di picco del segnale riportati nelle tabelle 9 e 11; la figura 18 mostra i tempi di volo, la figura 19 i valori di pendenza.

La figura 20 mostra il grafico dei valori di ampiezza e di tempo di volo ottenuti con l'analisi soggettiva e quella automatica.

La tabella 24 riporta i risultati della regressione lineare eseguita tra i risultati dei due modi di analisi.

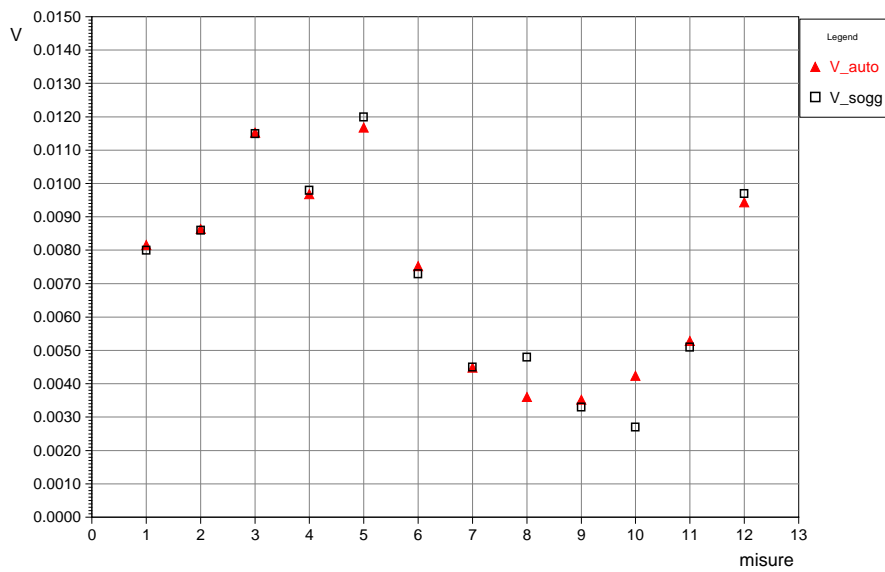


Figura 17. Ampiezza del segnale, ricavato con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

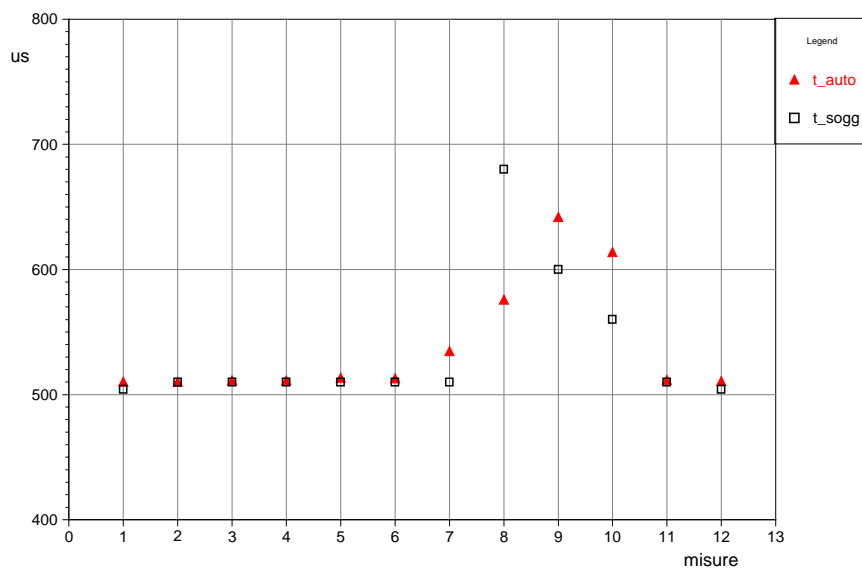


Figura 18. Tempo di volo, ricavato con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

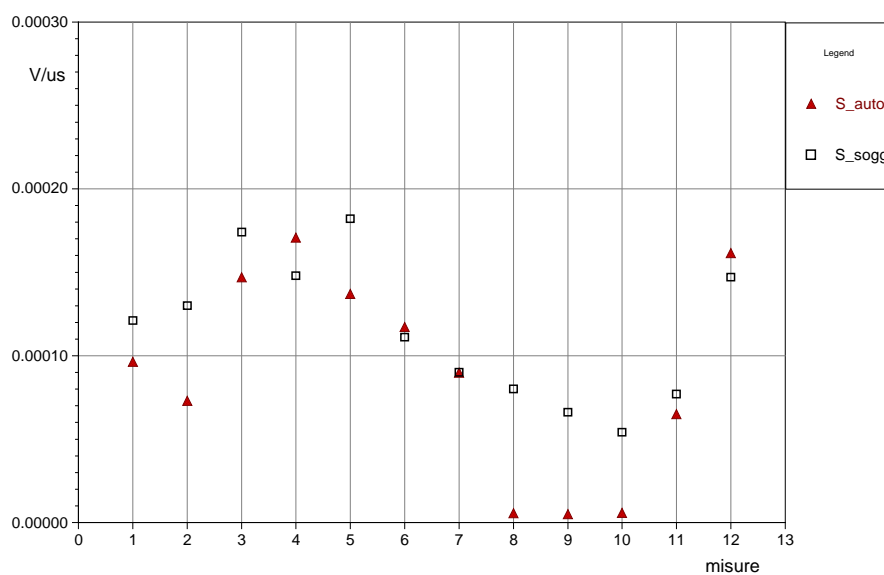


Figura 19. Pendenza del segnale, ricavata con l'analisi soggettiva e l'analisi automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

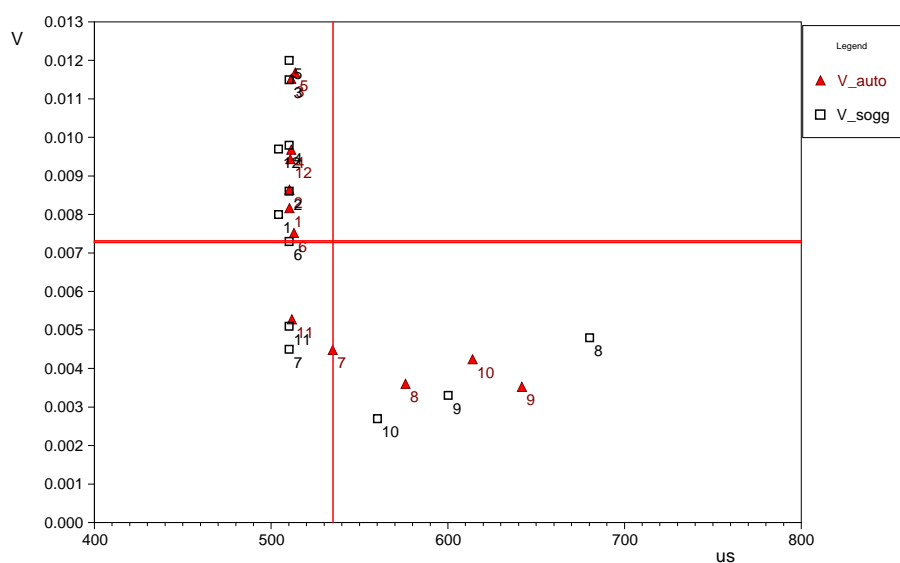


Figura 20. Diagramma ampiezza/tempo di volo dei risultati dell'analisi soggettiva e automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

valore	Regression Coefficient	Y-Intercept	Adjusted R-Squared	Correlation Coefficient	Model Selection Criterion
t ₁	0.617	208.027	0.471	0.720	0.398
V _{pp}	0.932	0.001	0.960	0.982	2.975
S	1.231	-0.000	0.720	0.863	1.035

Tabella 24. Risultati della regressione lineare tra i risultati dell'analisi soggettiva e quelli dell'analisi automatica delle misure in trasmissione nel mezzo composito.

Mappa dei percorsi nel mezzo composito

La figura 21 mostra la rappresentazione grafica dei percorsi in base alle classificazioni soggettive di velocità e ampiezza (vedi tabelle 14 e 17): i percorsi attribuiti alla classe 1 sono disegnati in verde, quelli della classe 2 in giallo e quelli della classe 3 in rosso.

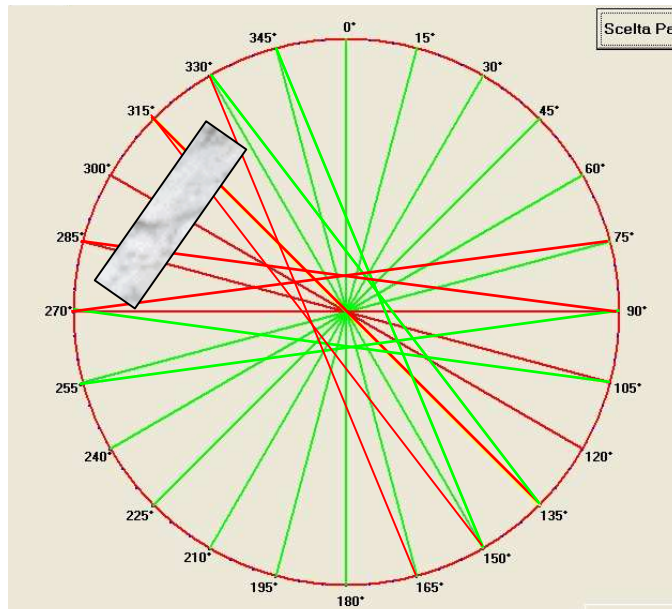


Figura 21. Analisi soggettiva. Mappa dei percorsi ottenuta con la classificazione dei risultati delle misure nel mezzo composito.

La figura 22 mostra la rappresentazione grafica dei percorsi in base alle classificazioni automatiche di velocità e ampiezza (vedi tabelle 20 e 23).

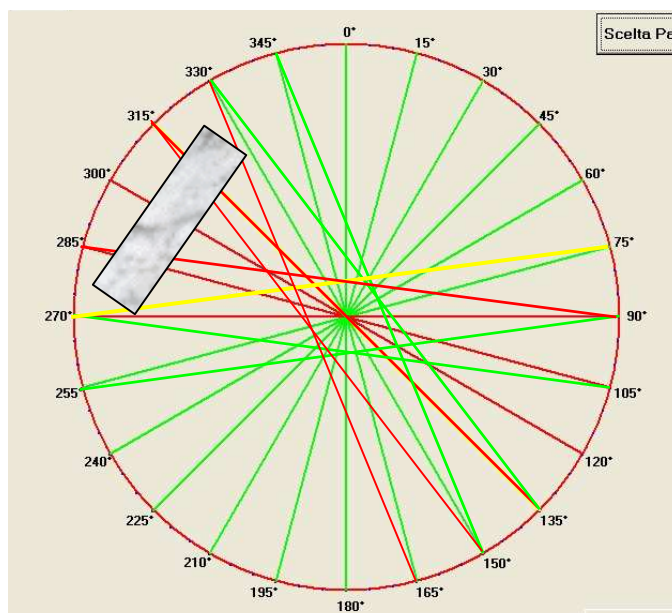


Figura 22. Analisi automatica. Mappa dei percorsi ottenuta con la classificazione dei risultati delle misure nel mezzo composito.

La figura 23 mostra la rappresentazione grafica delle 12 misure di picco-picco in trasmissione, prodotta dal programma di analisi.

Nell'esempio riportato sono colorati in verde i diametri in corrispondenza dei quali si ha un segnale che differisce del valore massimo di meno del 60%, in giallo i diametri con diminuzioni tra il 60% e l'80%, e in rosso i diametri con diminuzioni superiori all'80%.

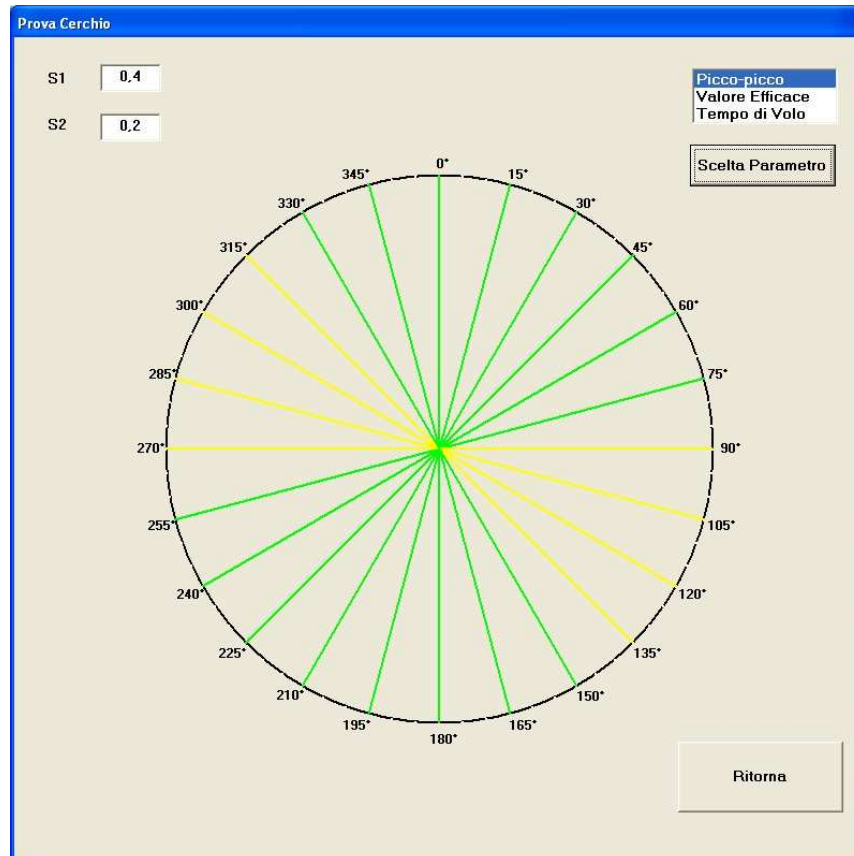


Figura 23. Analisi automatica. Mappa dei percorsi ottenuta con la quantizzazione delle ampiezze delle misure in trasmissione nel mezzo composito, con $s_1 = 0.4$ e $s_2 = 0.2$.

Discussione e conclusioni

Nel caso di trasmissione dell'onda ultrasonora in aria, in assenza di ostacoli sul percorso si ha un segnale ben definito (vedi figura 7). Il valore medio dell'ampiezza dei segnali è 2.5 V (vedi tabella 2) ed il rapporto segnale/rumore è di circa 60 dB. Di conseguenza, i parametri determinati mediante l'ispezione soggettiva dei segnali sono da ritenersi corretti e le variazioni del tempo di volo e dell'ampiezza dei segnali sugli otto diametri di tipo 1 sono da imputarsi alla imprecisione della struttura meccanica di supporto delle sonde, che non garantisce la costanza della distanza tra le sonde e la costanza degli orientamenti degli assi al variare delle posizioni di misura. Infatti, le distanze effettive tra le sonde poste alle estremità di tre differenti diametri sono 58, 56.5 e 59 cm, con uno scarto di 2.5 cm, che corrisponde ad una variazione del tempo di volo in aria di 75 μ s.

Si può assumere che la precisione di misura sia data dai valori di deviazione standard e di coefficiente di variazione riportati in tabella 2.

Il tempo di volo medio relativo ai diametri di misura per la trasmissione in aria è superiore a quello delle corde, a causa della variazione della lunghezza di percorso. Il tempo di volo e la conseguente velocità di propagazione dell'onda ultrasonora sono in accordo con le previsioni teoriche, considerando il fatto che la velocità impiegata per i calcoli è relativa a condizioni di temperatura e umidità, differenti da quelle al momento delle misure.

La lastra di plexiglass impiegata come ostacolo artificiale in pratica impedisce il passaggio diretto dell'onda ultrasonora, a causa della grande differenza tra l'impedenza acustica del plexiglass e quella dell'aria. Il segnale ricevuto sui percorsi di tipo 2 (vedi figura 8) è un artefatto, poiché il tempo di volo ad esso associato non è inferiore a quello ottenuto in assenza di ostacolo, bensì superiore: il segnale ricevuto non ha quindi attraversato direttamente la lastra. Il ritardo medio tra i tempi dei diametri di tipo 1 e quelli di tipo 2 è di 106 μ s, corrispondente ad un percorso in aria di circa 3.7 cm: questa differenza può essere giustificata supponendo una diffrazione del fascio ultrasonoro al bordo della lastra. Rispetto ai percorsi di tipo 1, per i diametri 7, 8 e 9, che intersecano la lastra, si ha una diminuzione dell'ampiezza del segnale di circa 30 dB, e per il diametro 10, tangente alla lastra, si ha una diminuzione di circa 10 dB.

Il criterio di classificazione su basi statistiche dei valori di ampiezza e velocità individua come anomali i diametri di misura 7,8,9,10, che effettivamente attraversano l'ostacolo; lo stesso criterio individua come anomali le corde 2,3,5,8, anch'esse intersecanti l'ostacolo (vedi figura 13).

L'analisi automatica dei dati ricavati con le misure in aria fornisce sostanzialmente gli stessi risultati ottenuti con l'analisi soggettiva dei segnali (vedi figure 9,10,11,12): come si può vedere in tabella 11, si ha un coefficiente di correlazione di circa 0.99 tra le misure di tempo di volo, ampiezza e pendenza del segnale ricavate nei due modi.

Applicando lo stesso criterio di classificazione ai risultati dell'analisi automatica si ha la stessa assegnazione dei diametri di misura (vedi tabelle 4 e 10). Invece, la quantizzazione del valore di ampiezza basata sui valori di soglia individua come anomali i diametri 7,8,9 e non il diametro 10, assegnato alla classe di attenzione.

Nel caso di trasmissione dell'onda ultrasonora nel mezzo composito, in assenza di ostacoli sul percorso l'ampiezza media dei segnali è 8.5 mV (vedi figura 15); considerando la diversa eccitazione della sonda, si ha una diminuzione dell'ampiezza di circa 60 dB rispetto al segnale in aria: ciò è dovuto alla grossa riflessione dell'onda ultrasonora sull'interfaccia aria-metallo.

Il rapporto segnale /rumore per i percorsi di tipo 1 è di circa 25 dB, ed il segnale è comunque ancora individuabile con l'ispezione visiva. Il tempo di volo medio sui diametri risulta superiore di circa 13 μ s rispetto a quello sulle corde (vedi tabelle 12 e 15), a causa del maggiore percorso; l'ampiezza media sui diametri è maggiore di circa 3 dB rispetto alle corde, poiché nel secondo caso le sonde non sono allineate.

Il blocco di marmo provoca un'attenuazione teorica del segnale ultrasonoro di 12 dB: a causa della bassa potenza dell'onda incidente sul blocco, il segnale di primo transito è difficilmente distinguibile dal rumore (vedi figura 16). Ai segnali individuati sui percorsi di tipo 2 sono associati tempi di volo superiori a quelli associati ai segnali nei percorsi di tipo 1: il segnale effettivamente rilevato non è quindi quello di primo transito attraverso il blocco. Comunque, la classificazione dei valori di velocità e ampiezza porta a individuare come anomali i percorsi che effettivamente intersecano il blocco (vedi tabella 14). Eguali risultati si ottengono per le corde (vedi tabella 17).

L'analisi automatica dei dati ricavati con le misure dei percorsi di tipo 1 nel mezzo composito fornisce sostanzialmente gli stessi risultati ottenuti con l'analisi soggettiva dei segnali; i valori medi di velocità e di ampiezza differiscono di meno dell'1%. Maggiori differenze si hanno invece sui percorsi di tipo 2 (vedi figure 17,18,19). A causa del basso rapporto segnale/rumore, nell'analisi automatica il tempo di volo determinato automaticamente può essere diverso da quello determinato in modo soggettivo: ciò comporta una differente finestra per la determinazione dell'ampiezza del segnale. I coefficienti di correlazione tra i risultati dell'analisi soggettiva e quelli dell'analisi automatica riportati in tabella 24 sono stati sui diametri di entrambi i tipi: il valore 0.720 relativo al tempo di volo è dovuto in realtà principalmente al confronto tra le misure relative ai percorsi di tipo 2, che non introducono grosse differenze nella classificazione dei percorsi (vedi tabelle 20 e 23).

L'analisi soggettiva dei diametri e delle corde di misura porta a classificare come anomali i percorsi che effettivamente intersecano il blocco di marmo (vedi figura 21): ciò consente quindi di stimare la posizione del blocco all'interno del quarto quadrante del bidone.

La classificazione dei risultati ottenuti con l'analisi automatica differisce solo per una corda tangente al blocco (vedi figura 22): anche in questo caso è possibile localizzare l'ostacolo nel quarto quadrante.

La quantizzazione dei diametri di misura in base a soglie fisse sui valori di ampiezza del segnale è invece meno efficace della classificazione statistica (vedi figura 23).

In conclusione, l'analisi automatica dei segnali a ultrasuoni propagatisi attraverso un mezzo consente di determinare con buona precisione il tempo di volo e l'ampiezza del segnale quando il rapporto segnale/rumore è di almeno 10 dB: nota la distanza tra le sonde, si possono quindi determinare due caratteristiche del mezzo esaminato, come la velocità di propagazione e l'attenuazione lungo i percorsi di misura.

Disponendo di un opportuno insieme di valori di riferimento, ottenuto lungo percorsi omogenei, la classificazione di tipo stitico impiegata consente di rivelare i percorsi contenenti anomalie o parzialmente diversi da quelli di riferimento.

La tecnica d'ispezione basata su un ridotto numero di percorsi costituiti da diametri e corde consente di localizzare un'anomalia all'interno di un oggetto con struttura cilindrica.

Riferimenti

- 1) E. Bozzi, M. Chimenti "Valutazione delle prestazioni di differenti sonde per l'ispezione a ultrasuoni" Rapporto tecnico ISTI, in stampa, gennaio 2007.
- 2) E. Bozzi, R. Bozzi, M. Chimenti "Un programma per l'analisi automatica di segnali ricavati in ispezione a ultrasuoni per trasmissione" Rapporto tecnico ISTI, 2007, in stampa, gennaio 2007.
- 3) E. Bozzi, R. Bozzi, M. Chimenti "Valutazione delle prestazioni di un programma per l'analisi di dati ottenuti con l'ispezione US non invasiva di un blocco di calcestruzzo" Rapporto tecnico ISTI, 2007, in stampa, febbraio 2007.