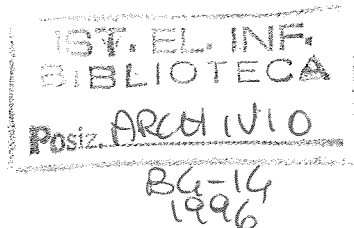


Velocità di propagazione e attenuazione di onde ultrasoniche all'interno di marmi: un'indagine sperimentale.

E.Bozzi, M.Bramanti, M.Chimenti.



Introduzione

E' stata misurata la velocità di propagazione e attenuazione nei più comuni tipi di marmo al fine di ricavare un insieme di dati utili per il progetto di strumentazione capace di diagnosticare la presenza di fessure, rotture o eventuali venature spurie in blocchi di tale materiale, e di determinarne la posizione. Le misure sono state effettuate sia con sonde a contatto, sia con campioni immersi in acqua.

Descrizione del banco di misura

Il banco, schematizzato in Fig. 1, è composto da un generatore Panametrics mod 5052ua, da un oscilloscopio digitale LeCroy 9310 con banda di 300 MHz, da una coppia di sonde Panametrics X1020 a 100 KHz , o da una coppia di sonde Harisonic a 500 KHz, da una vasca di piccole dimensioni dotata di supporti per le sonde per effettuare misure in immersione.

I campioni esaminati sono costituiti da undici blocchetti con forma prismatica di marmo di diverso tipo e con dimensioni determinate da una scelta di compromesso tra le frequenze del segnale di misura e la necessità che il segnale stesso non subisca un'attenuazione eccessiva.

Assumendo in prima approssimazione la velocità nel marmo pari a circa 3500 m/sec, per il segnale a 100 KHz si ha:

$$\lambda = V/f = 3,5/100 = 0.035 \text{ m}$$

per il segnale a 500 KHz si ha:

$$\lambda = V/f = 3,5/500 = 0.007 \text{ m}$$

imponendo che le dimensioni del campione siano maggiori o uguali di circa 2÷3 volte la lunghezza d'onda, tali dimensioni sono state fissate in 50x75x100 mm.

Ultrasonic analyzer mod 5 052ua digital oscilloscopes mod 9310

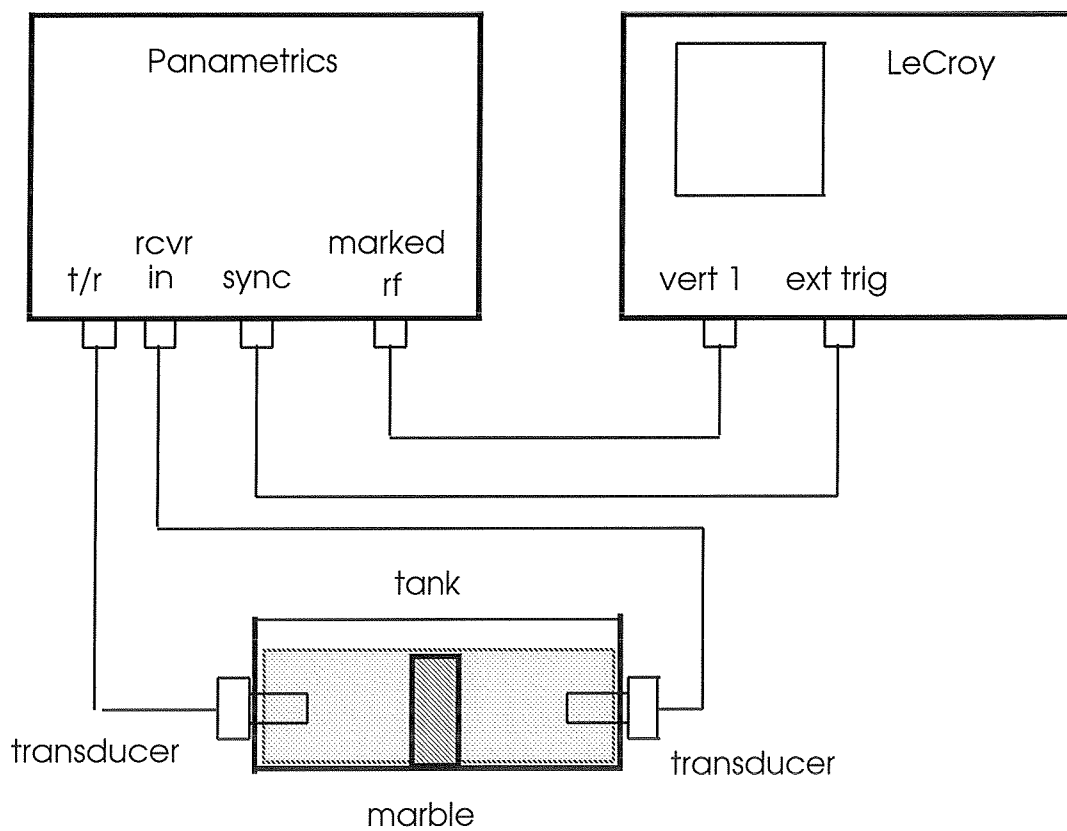


Fig. 1 Banco di misura.

In Tabella 1 sono riportate le denominazioni commerciali dei vari tipi di marmo e pietre esaminate.

| sample | type |
|--------|----------------------------|
| 1 | Bianco Statuario Veneto |
| 2 | Bianco Carrara C. |
| 3 | Rosa Aurora Portogallo |
| 4 | Botticino Classico |
| 5 | Pietra di Trani |
| 6 | Verde Cipollino |
| 7 | Pietra Serena |
| 8 | Pietra del Cardoso |
| 9 | Verde Aver |
| 10 | Granito Grigio di Sardegna |
| 11 | Nero Zimbabwe |

Tab. 1 Denominazione dei campioni esaminati

In Tabella 2 e con riferimento alla Fig.2 sono state riportate, per ogni campione, le misure dei lati, il peso, il volume e la densità.

| sample | l_A (mm) | l_B (mm) | l_C (mm) | W (g) | V (mm ³) | D (Kg/m ³) |
|--------|------------|------------|------------|--------|----------------------|------------------------|
| 1 | 100.1 | 74.8 | 50.2 | 1014.0 | 375871.4 | 2698 |
| 2 | 100.8 | 74.6 | 50.0 | 1013.5 | 375984.0 | 2696 |
| 3 | 101.0 | 75.0 | 50.2 | 1024.0 | 380265.0 | 2693 |
| 4 | 100.2 | 75.1 | 50.0 | 1007.5 | 376251.0 | 2678 |
| 5 | 101.0 | 74.6 | 50.1 | 1016.5 | 377483.4 | 2693 |
| 6 | 100.2 | 74.5 | 49.7 | 1015.5 | 371005.5 | 2737 |
| 7 | 100.5 | 74.9 | 49.7 | 898.5 | 374114.2 | 2402 |
| 8 | 100.6 | 74.7 | 49.7 | 1000.0 | 373672.1 | 2676 |
| 9 | 101.0 | 74.6 | 50.3 | 1016.0 | 379244.3 | 2679 |
| 10 | 100.5 | 75.8 | 49.5 | 957.0 | 377086.0 | 2538 |
| 11 | 100.8 | 74.6 | 50.3 | 1145.0 | 378239.9 | 3027 |

Tab. 2 Caratteristiche dei campioni esaminati.

Per cercare di mettere in evidenza la dipendenza della velocità di trasmissione e dell'attenuazione dalla trama del marmo, sono state effettuate le misure secondo i tre assi A, B, C del prisma, come è mostrato in figura 2.

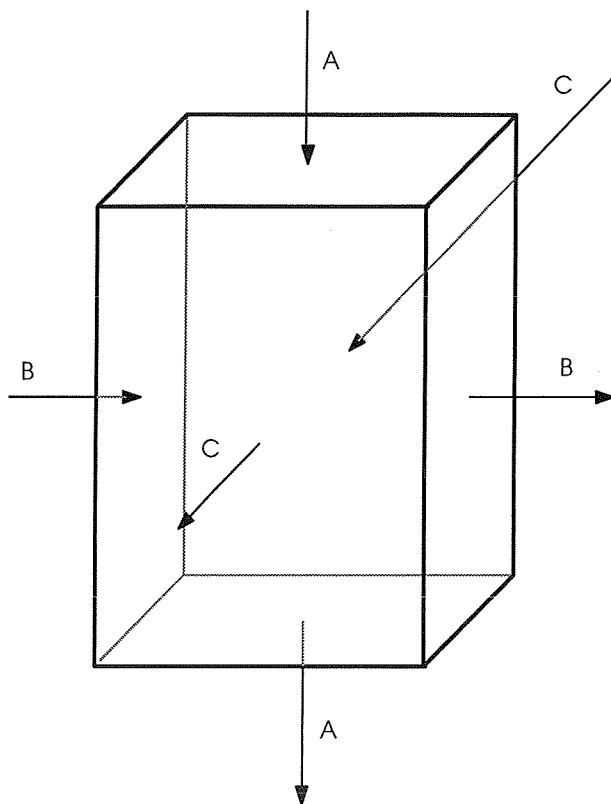


Fig. 2 Assi di esplorazione del campione di marmo.

Misura della velocità di propagazione nei campioni di marmo con sonde a contatto

La prima misura della velocità è stata effettuata in aria, con sonde a contatto, alla frequenza di 100 KHz, appoggiando le sonde medesime sulle facce del campione secondo i tre assi di esplorazione e spalmando sulla sonda una gelatina di adattamento.

La misura del tempo di transito nel marmo è stata mediata su 500 sweeps ed è stata ripetuta per ciascun asse di esplorazione.

La Tabella 3 riporta le velocità di propagazione nei diversi campioni di marmo secondo i tre assi.

| sample | V _A (m/sec) | V _B (m/sec) | V _C (m/sec) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 3717.66 | 3319.00 | 3644.66 |
| 2 | 5081.00 | 4570.00 | 4288.33 |
| 3 | 5108.00 | 4532.00 | 4481.33 |
| 4 | 5837.66 | 5236.33 | 4932.66 |
| 5 | 5593.00 | 5052.00 | 4937.66 |
| 6 | 4965.33 | 4562.00 | 3696.00 |
| 7 | 2799.33 | 1785.33 | 2456.66 |
| 8 | 4256.00 | 3966.33 | 1951.66 |
| 9 | 4869.66 | 4940.00 | 3799.33 |
| 10 | 4182.00 | 4170.66 | 3983.00 |
| 11 | 5347.66 | 5078.00 | 4727.33 |

Tab. 3 Velocità di trasmissione nei campioni misurata con sonde da 100 KHz a contatto.

La Fig.3 visualizza il confronto tra le velocità ricavate lungo i tre assi di esplorazione per ogni campione di marmo: si nota che le tre velocità, relative ad ogni campione,

hanno valori che differiscono fra loro di una quantità all'incirca costante. Solamente nel campione 10 (granito), le tre velocità sono quasi coincidenti.

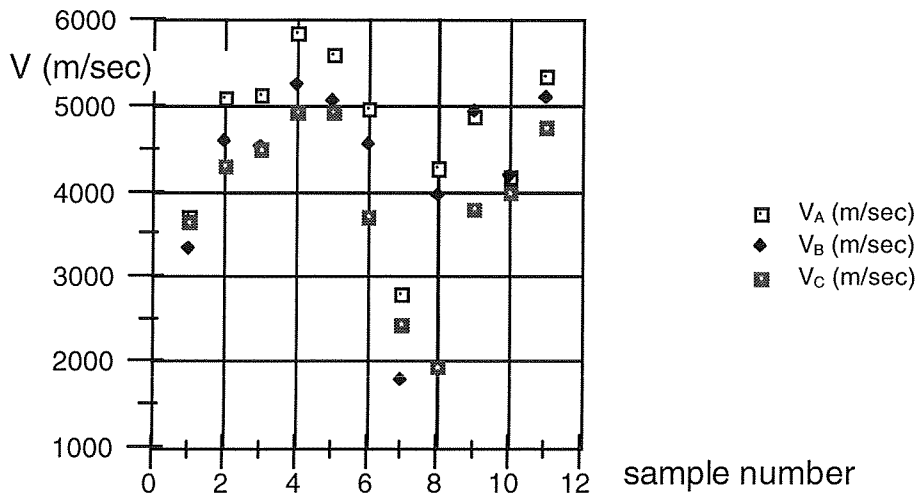


Fig. 3 Confronto tra le velocità lungo gli assi di misura con sonde da 100 KHz a contatto.

E' stata poi effettuata una seconda misura a contatto, impiegando sonde a 500 KHz secondo i tre assi di esplorazione, facendo ancora la media su 500 valori del tempo di transito.

La Tabella 4 riporta le velocità di propagazione nei diversi campioni, secondo i tre assi.

| sample | V_A (m/sec) | V_B (m/sec) | V_C (m/sec) |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 3910 | 3339 | 3803 |
| 2 | 5117 | 4782 | 4386 |
| 3 | 5101 | 4464 | 4523 |
| 4 | 5750 | 5542 | 5182 |
| 5 | 5627 | 5291 | 4829 |
| 6 | 5061 | 4656 | 3853 |
| 7 | 2835 | 1818 | 2562 |
| 8 | 4376 | 4038 | 2004 |
| 9 | 4988 | 5044 | 4056 |
| 10 | 4351 | 4211 | 4195 |
| 11 | 5508 | 5329 | 4980 |

Tab. 4 Velocità di propagazione nei campioni misurata con sonde da 500 KHz a contatto.

La Fig. 4 visualizza il confronto tra le velocità ricavate lungo i tre assi di esplorazione per ogni campione di marmo; le considerazioni da fare sono sostanzialmente le stesse della misura precedente.

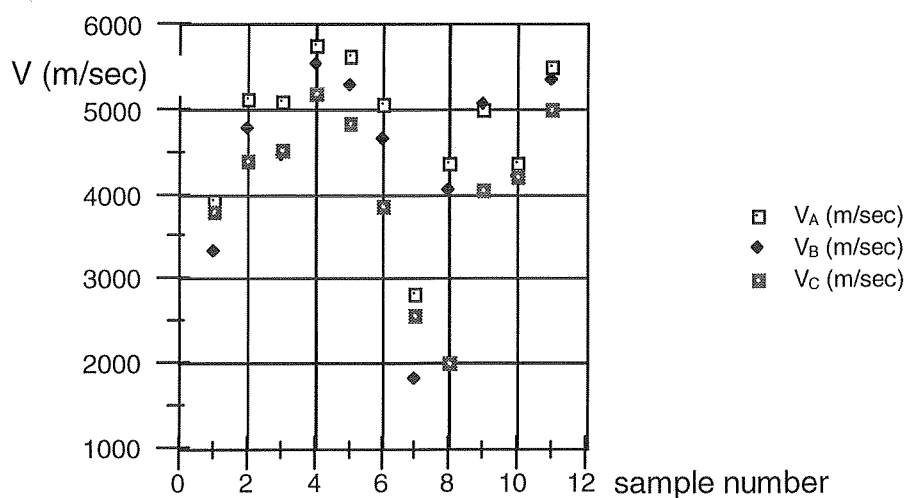


Fig. 4 Confronto tra le velocità lungo gli assi di scansione con sonde da 500 KHz a contatto.

Le figure 5, 6, 7 mostrano, per i tre assi di esplorazione, il confronto tra le rispettive velocità, utilizzando le sonde a 100 KHz e 500 KHz; si nota che le variazioni sono minime e che non superano il 5%.

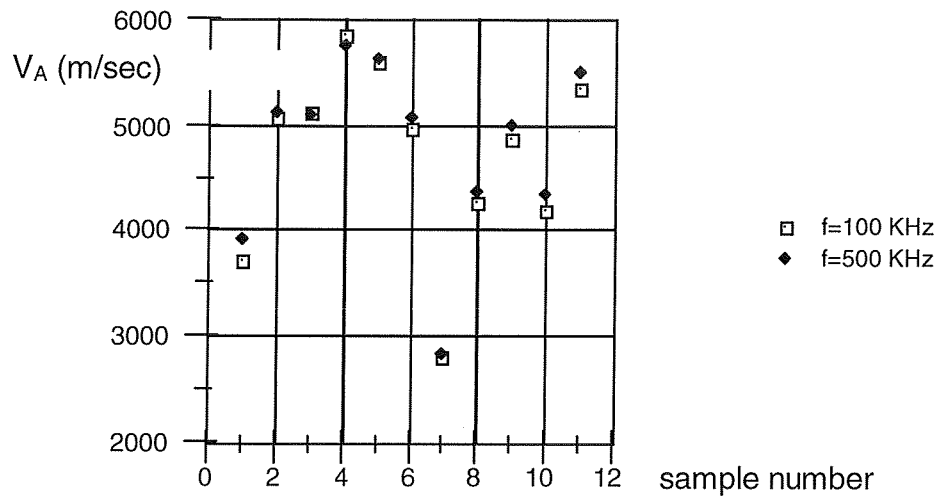


Fig. 5 Confronto delle velocità misurate lungo l'asse A con le due sonde.

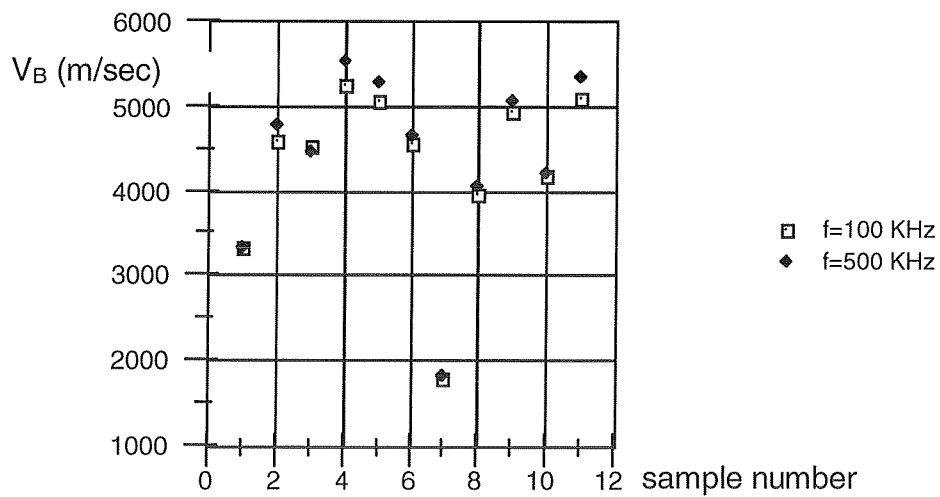


Fig. 6 Confronto delle velocità misurate lungo l'asse B con le due sonde.

Come considerazione generale si può dire che le misure eseguite hanno dato dei valori di velocità approssimate per difetto, in quanto applicando la tecnica descritta ad un campione di alluminio, di dimensioni identiche ai campioni di marmo, la

velocità misurata è stata di circa il 13% inferiore rispetto a quella nominale fornita in letteratura di 6350 m/sec.

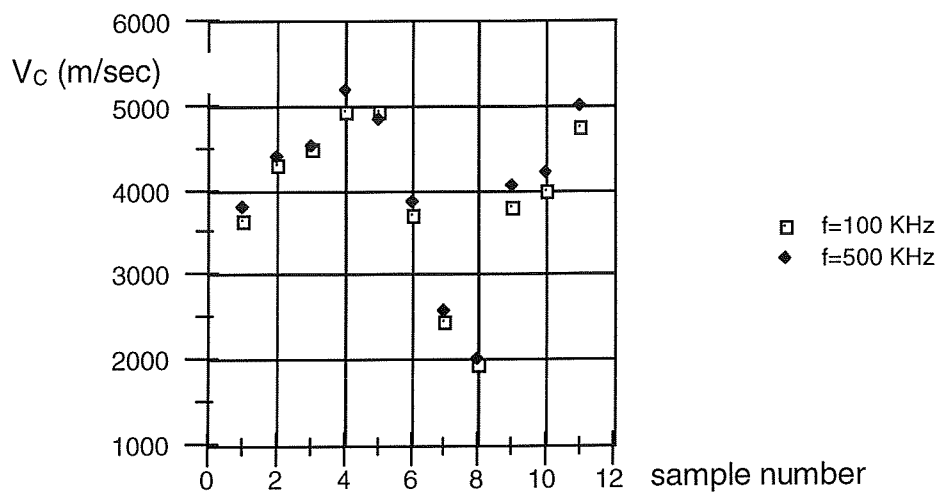


Fig. 7 Confronto delle velocità misurate lungo l'asse C con le due sonde.

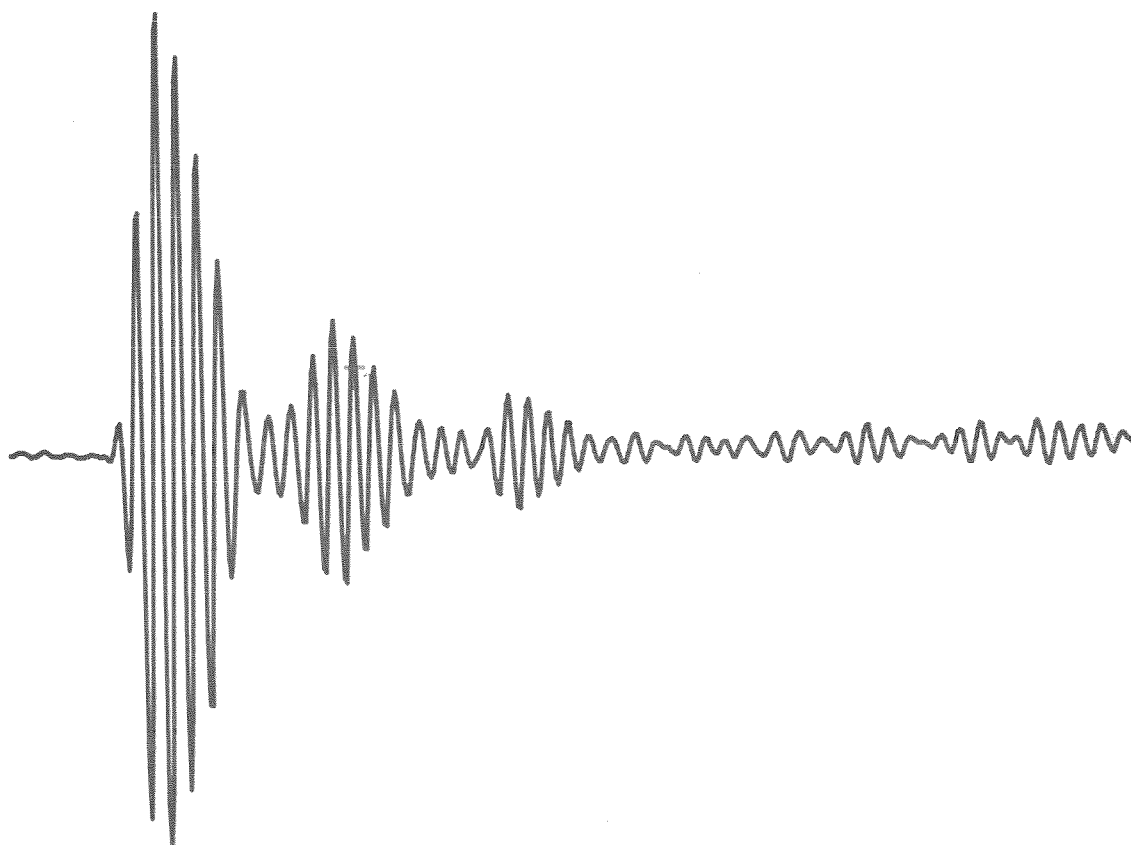


Fig. 8 Esempio dell'andamento del segnale ricevuto (campione di alluminio).

Con riferimento alla figura 9 il segnale ultrasonoro V , emesso dalla sonda trasmittente, quando incide sulla faccia del campione viene in parte riflesso e in parte vi penetra in funzione dei coefficienti di riflessione e di trasmissione. A sua volta il segnale che si propaga all'interno del campione, quando incide sulla seconda superficie esterna, viene a sua volta in parte riflesso e in parte trasmesso nel mezzo esterno; questo ultimo segnale viene rilevato dalla sonda ricevente ed è rappresentato in Fig. 8 dal primo treno di oscillazioni. Il segnale riflesso dalla superficie esterna del campione continua ad essere riflesso all'interno di esso e trasmesso nel mezzo esterno fino a quando l'attenuazione del materiale lo consente. Quando il segnale che si propaga all'interno del campione incide per la seconda volta sulla superficie esterna, la sonda ricevente ne rivela il segnale trasmesso nel mezzo che è rappresentato in Fig. 8 dal secondo treno di oscillazioni, la terza oscillazione rappresenta il segnale rilevato dalla sonda dalla terza riflessione all'interno del campione.

Con riferimento alla Fig. 8 la differenza temporale tra i primi due treni di oscillazioni ricevuti è dovuta al tempo di percorrenza delle onde ultrasonore all'interno del campione, infatti il segnale ricevuto di secondo transito deve percorrere due volte la distanza tra le superfici del campione (vedi Fig. 9); per tanto la velocità di propagazione nel campione può essere calcolata anche come il rapporto tra il doppio del suo spessore e il tempo trascorso tra il primo e il secondo segnale di transito.

Con le sonde a contatto non è stato possibile effettuare delle misure comparative tra la velocità misurata con il metodo usato per primo e quella ottenibile con la procedura sopra descritta, perché i segnali risultavano sovrapposti e difficilmente individuabili.

Si è pensato di effettuare le misure con i campioni di marmo immersi in acqua in modo che la distanza delle sonde fosse tale da non creare echi multipli sovrapposti.

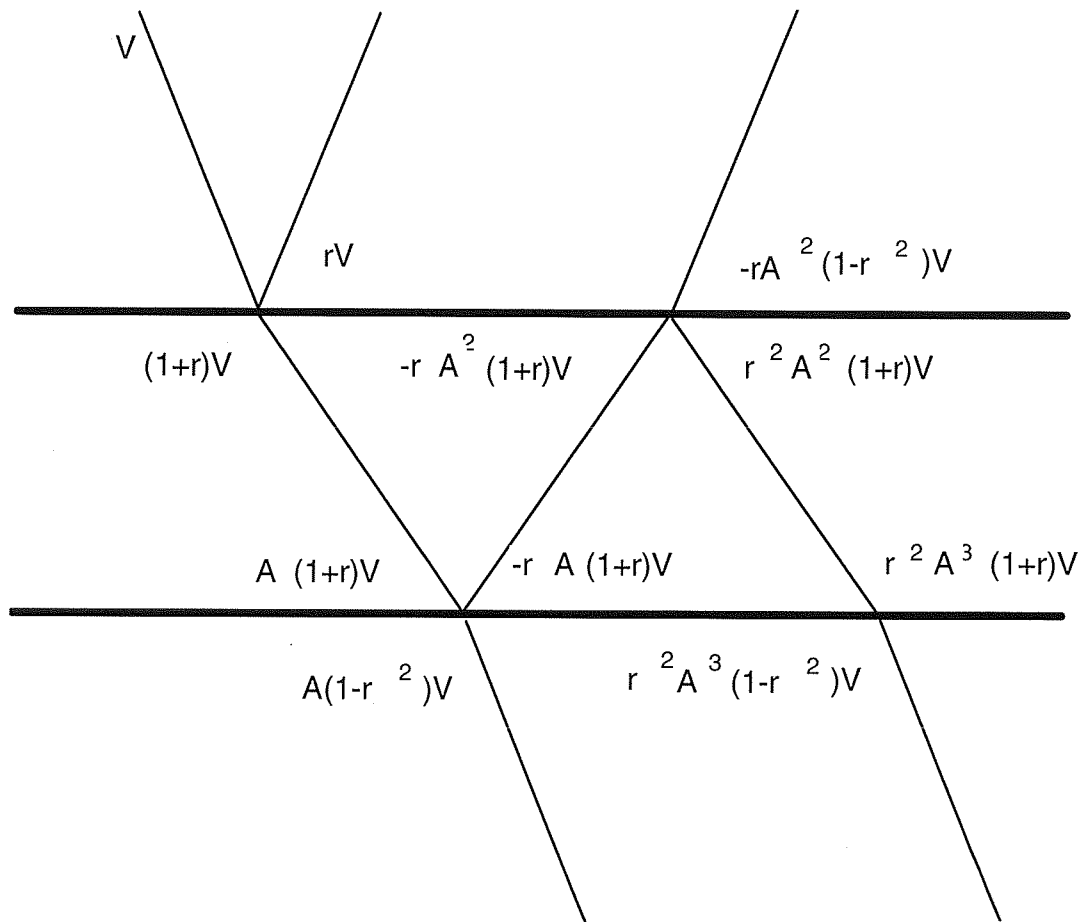


Fig. 9 Andamento dell'ampiezza del segnale nell'attraversamento di un campione.

Misura della velocità di propagazione in campioni di marmo immersi in acqua

Con questo sistema di misura la velocità di propagazione nel materiale viene calcolata confrontando il tempo di transito T_a in acqua in assenza di campione con il tempo di transito T_t in presenza di campione; tale tempo di transito varia in funzione della velocità di propagazione degli ultrasuoni nel campione in esame: il tempo diminuirà se la velocità di propagazione è superiore a quella nell'acqua, in caso contrario il tempo aumenterà.

Esiste una relazione che determina la velocità di propagazione dell'onda ultrasonora nel materiale in funzione della velocità di propagazione in acqua, della distanza tra le sonde e dello spessore del campione. Infatti se indichiamo con S_a la distanza tra le sonde e con V_a la velocità di propagazione in acqua, il tempo T_a di transito è dato da:

$$T_a = S_a/V_a \quad (1)$$

Quando si mette tra le sonde il campione di spessore S_c si ottiene un tempo di transito T_t che è ora la somma dei tempi di transito dell'onda nel campione e nello spessore rimanente S_{ar} , dell'acqua; si ha.

$$T_t = S_c/V_x + S_{ar}/V_a \quad (2)$$

dove V_x è la velocità di propagazione da determinare. La (2) si può anche scrivere come:

$$T_t = (S_c/V_x) + (S_a - S_c)/V_a \quad (3)$$

La differenza tra T_t e T_a , indicata con ΔT , è data da

$$\Delta T = T_t - T_a = (S_c/V_x) + (S_a - S_c)/V_a - S_a/V_a \quad (4)$$

ossia

$$\Delta T = S_c/V_x - S_c/V_a \quad (5)$$

da cui

$$V_x = V_a / (1 - V_a \Delta T / S_c) \quad (6)$$

Applicando questa formula per la valutazione della velocità di propagazione in un campione di alluminio e di ottone, usando sonde a 500 KHz, abbiamo ottenuto una velocità che differisce dal valore nominale per meno del 1%. Il risultato è stato ulteriormente convalidato dal calcolo della velocità di transito con il secondo metodo esposto nel paragrafo precedente, cioè come rapporto tra il doppio dello spessore del campione e il tempo misurato fra il primo e il secondo impulso di arrivo. La (6) mostra come la corretta determinazione della velocità V_x dipenda fortemente dal valore della velocità di propagazione in acqua V_a

Riportiamo in Tabella 5 i risultati della misura di tale velocità alla temperatura di 18°, ottenuti sia facendo riferimento al segnale di primo transito (tempo di propagazione T_a velocità V_a) sia al segnale di secondo transito ricevuto dopo un tempo T_{sec} . (velocità $V_{\Delta T}$.)

| | | | | |
|-------|------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| water | Ta (μsec) | Tsec. (μsec) | V _a (m/sec) | V _{ΔT} |
| | 206.8 | 612.7 | | 1475.2 |
| | 204.4 | | 1464.7 | |

Tab. 5 Valori dei tempi di transito e delle rispettive velocità di propagazione nell'acqua.

Per il calcolo della velocità nel campione di alluminio si è assunto come velocità di propagazione nell'acqua il valore corrispondente a V _{Δ T} in quanto, essendo questo ricavato come differenza temporale tra i due segnali, risulta più preciso perché non risente dell'eventuale indeterminazione nel riconoscimento della prima variazione del segnale.

La Tabella 6 mostra i risultati della misura dei tempi e il calcolo delle rispettive velocità di propagazione, lungo i tre assi del campione di alluminio già descritto, secondo i due sistemi sopra richiamati.

| aluminium | axis | Tt(μsec) | Tsec. (μsec) | V _{ΔT} (m/sec) | V _x (m/sec) |
|-----------|------|-----------------------|---------------------------|---|------------------------|
| | C | 180.745 | 196.435 | 6373.4 | 6378.6 |
| | B | 267.75 | 191.295 | 6370.4 | 6361.1 |
| | A | 154.72 | 186.11 | 6371.4 | 6366.4 |

Tab. 6 Valori dei tempi di transito e delle rispettive velocità di propagazione nell'alluminio.

Come si vede dalla Tabella 6 la variazione fra i valori di velocità ottenuti con le due procedure di calcolo è massima per l'asse B e pari a 9.3 m/sec, a cui corrisponde una

differenza percentuale dello 0.15%. I valori delle velocità calcolate si discostano, in ogni caso, dal valore nominale dichiarato in letteratura di 6350 m/sec per meno dello 0.5%, per cui si ritiene che il sistema di misura proposto sia affidabile.

In Tabella 7 sono riportati i risultati delle misure di velocità di propagazione lungo i tre assi di esplorazione, per campioni di marmo immersi in acqua e con sonde da 100 Khz utilizzando la (6).

| sample | V_A (m/sec) | V_B (m/sec) | V_C (m/sec) |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 4070 | 3902 | 4343 |
| 2 | 5791 | 5473 | 5540 |
| 3 | 5608 | 4901 | 5307 |
| 4 | 6472 | 6444 | 6433 |
| 5 | 6164 | 6302 | 6229 |
| 6 | 5837 | 5493 | 4960 |
| 7 | 2909 | 1965 | 2683 |
| 8 | 4718 | 4559 | 2455 |
| 9 | 5464 | 5714 | 4667 |
| 10 | 4648 | 4709 | 4655 |
| 11 | 6232 | 6100 | 6152 |

Tab. 7 Velocità di propagazione nei campioni con sonde da 100 KHz in acqua.

La Fig. 10 visualizza il confronto tra le velocità ricavate lungo i tre assi di esplorazione con campioni immersi in acqua utilizzando sonde da 100 KHz.

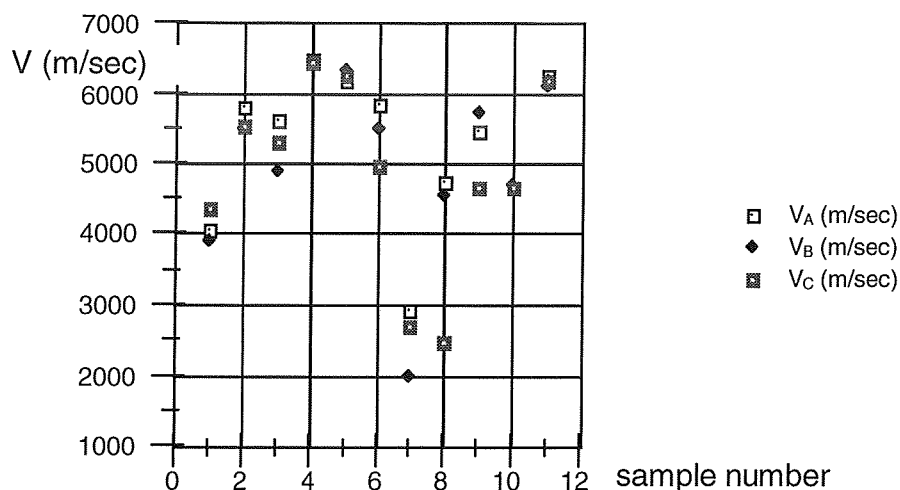


Fig. 10 Confronto tra le velocità lungo gli assi di scansione con sonde da 100 KHz in acqua.

In Tabella 8 sono riportati i risultati delle misure del calcolo della velocità lungo i tre assi di esplorazione, con campioni immersi in acqua e con sonde da 500 KHz

| sample | V _A (m/sec) | V _B (m/sec) | V _C (m/sec) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 4199 | 3951 | 4535 |
| 2 | 5861 | 5624 | 5650 |
| 3 | 5694 | 4932 | 5481 |
| 4 | 6477 | 6493 | 6515 |
| 5 | 6262 | 6410 | 6429 |
| 6 | 5865 | 5512 | 5025 |
| 7 | 2952 | 2107 | 2708 |
| 8 | 4758 | 4589 | 2439 |
| 9 | 5429 | 5803 | 4756 |
| 10 | 4653 | 4782 | 4854 |
| 11 | 6314 | 6246 | 6378 |

Tab. 8 Velocità di propagazione nei campioni con sonde da 500 KHz in acqua.

La Fig. 11 visualizza il confronto tra le velocità ricavate lungo i tre assi di esplorazione con campioni immersi in acqua utilizzando sonde da 500 KHz.

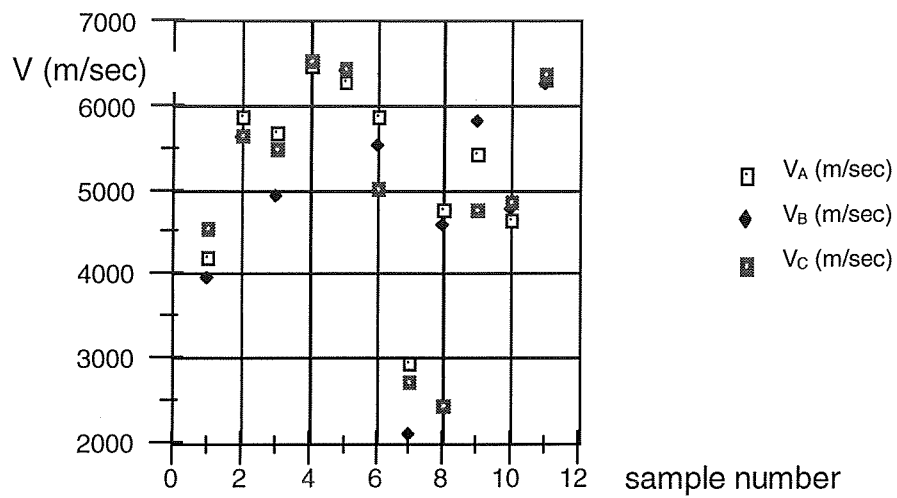


Fig. 11 Confronto tra le velocità lungo gli assi di scansione con sonde da 500 KHz in acqua.

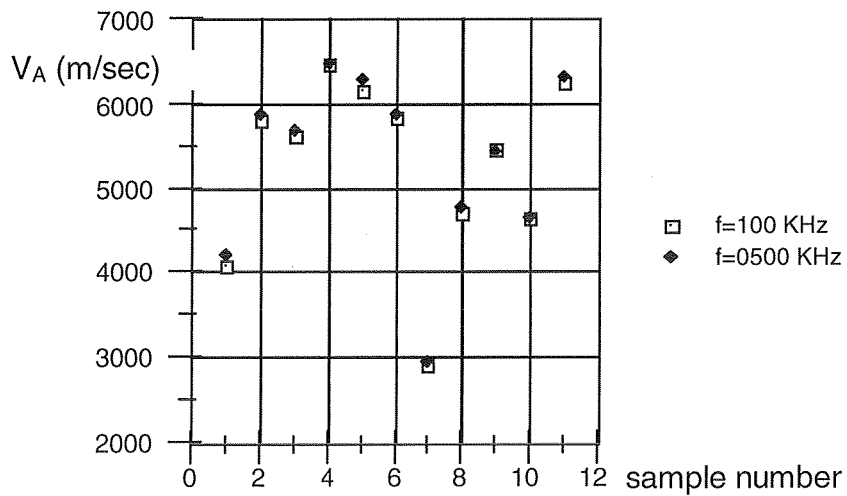


Fig. 12 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse A con le due sonde.

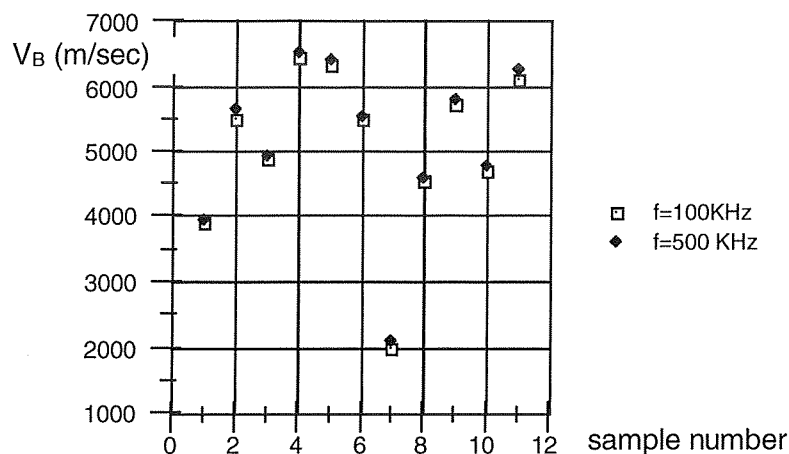


Fig. 13 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse B con le due sonde.

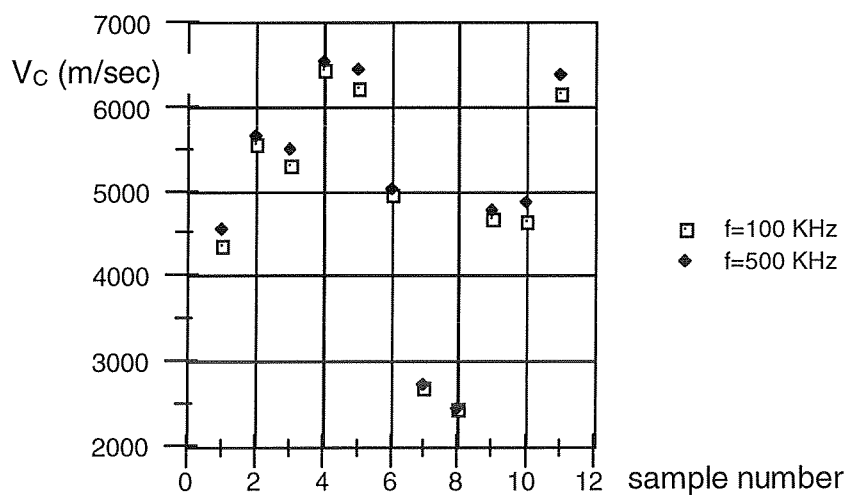


Fig. 14 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse C con le due sonde.

Le figure 12, 13, 14 mostrano il confronto tra le velocità di propagazione misurate in acqua, secondo i tre assi di esplorazione, utilizzando le sonde a 100 KHz e 500 KHz. La variazione di velocità più rilevante, dell'ordine di grandezza del $2\div 2.5\%$, si è ottenuta nei campioni di marmo 1, 3, 5, 11 ed è relativa all'asse di esplorazione C,

lungo gli altri assi di esplorazione la variazione di velocità è rimasta compresa, per tutti i tipi di marmo, intorno allo 1÷1.5%.

Misura della velocità di propagazione in campioni di marmo immersi sulla base del ritardo fra il segnale di primo e secondo transito.

Indubbiamente il calcolo della velocità di propagazione delle onde ultrasonore, sulla base del tempo trascorso tra fra i segnali di primo e secondo transito, costituisce un sistema di misura più preciso del precedente in quanto dipende esclusivamente dallo spessore del campione, non richiede la conoscenza della velocità di propagazione nell'acqua e della distanza tra le sonde

Non sempre però si può misurare la distanza temporale tra i due segnali suddetti perché il secondo può essere deformato dalla sovrapposizione di altri segnali relativi alla riflessione sulle superfici della vasca, oppure, se le sonde sono vicine, può essere coperto dal primo o infine può essere talmente attenuato da renderne difficoltoso il riconoscimento.

Con questo sistema di misura non è stato possibile utilizzare le sonde a 100 KHz perché il primo segnale si sovrapponeva al secondo e questo era estremamente rumoroso.

In Tabella 9 si riportano, per quei campioni per cui è stato possibile effettuare la misura, le velocità relative ai tre assi di indagine ottenute con le misure temporali tra il primo e il secondo segnale di transito e impiegando le sonde a 500 KHz.

| sample | V_A (m/sec) | V_B (m/sec) | V_C (m/sec) |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | | 3699 | 4573 |
| 2 | 5923 | 5655 | 5664 |
| 3 | 5638 | 5015 | 5595 |
| 4 | 6691 | 6551 | 6566 |
| 5 | 6325 | 6199 | 6394 |
| 6 | 5488 | 5595 | |
| 7 | | | |
| 8 | 4780 | 4603 | |
| 9 | 5555 | 5887 | |
| 10 | | | |
| 11 | 6218 | 6215 | 6326 |

Tab. 9 Velocità di propagazione nei campioni con sonde da 500 KHz in acqua con la misura del tempo tra il primo e il secondo segnale di transito.

La Fig. 15 visualizza il confronto tra le velocità ricavate lungo i tre assi di esplorazione, con campioni immersi in acqua, utilizzando sonde da 500 KHz, con il sistema di misura sopra descritto.

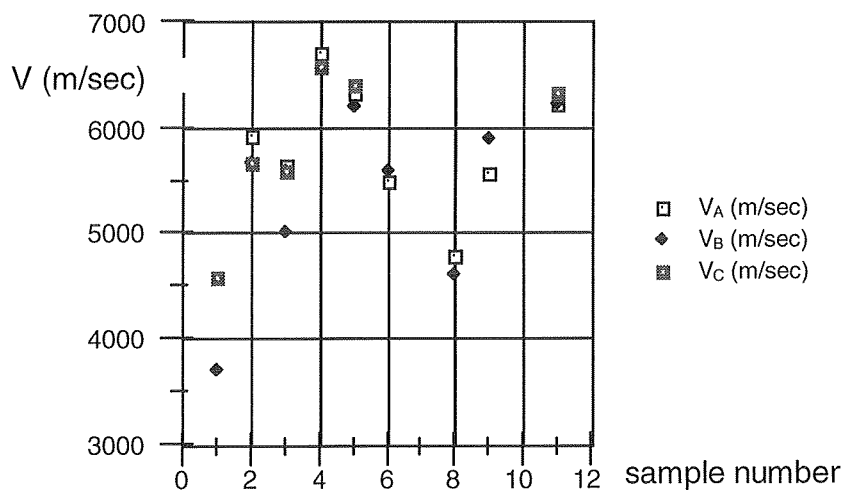


Fig. 15 Confronto tra le velocità lungo gli assi di scansione con sonde da 500 KHz.

Le figure 16, 17, 18 mostrano le differenze delle velocità ottenute lungo i tre assi di esplorazione A, B e C utilizzando il sistema ora in esame e quello del precedente paragrafo. Si nota che i due sistemi forniscono sostanzialmente gli stessi valori della velocità di propagazione nel caso di esplorazione lungo l'asse B; lungo gli altri assi di misura ci sono alcune differenze che nei casi peggiori sono quantificabili intorno al 3%.

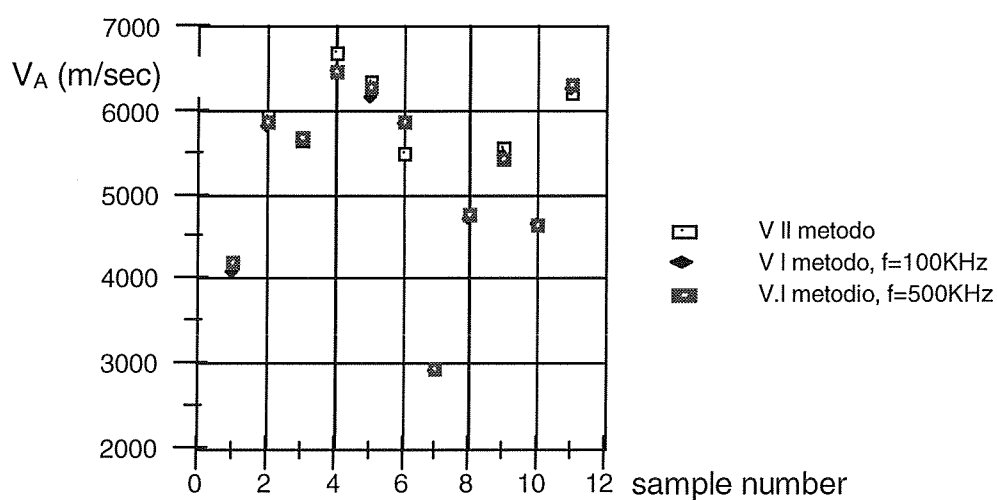


Fig. 16 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse A con i due metodi di misura.

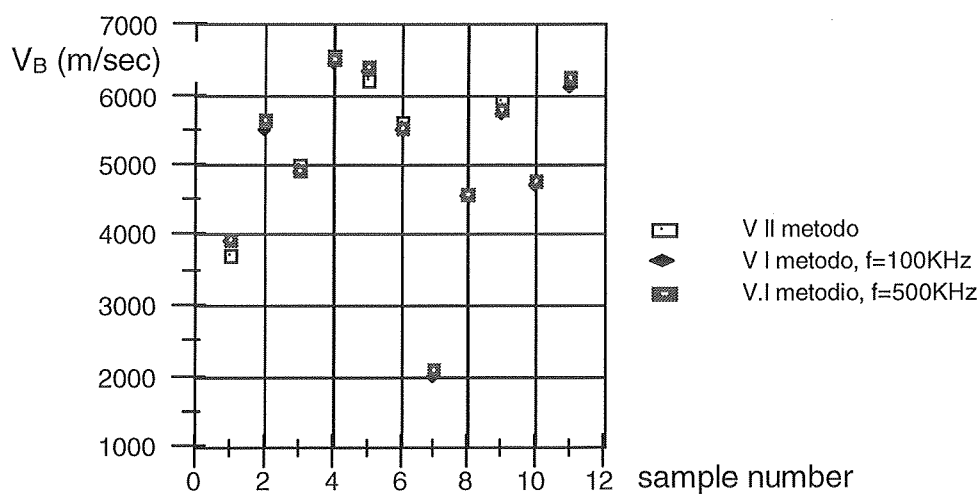


Fig. 17 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse B con i due metodi di misura.

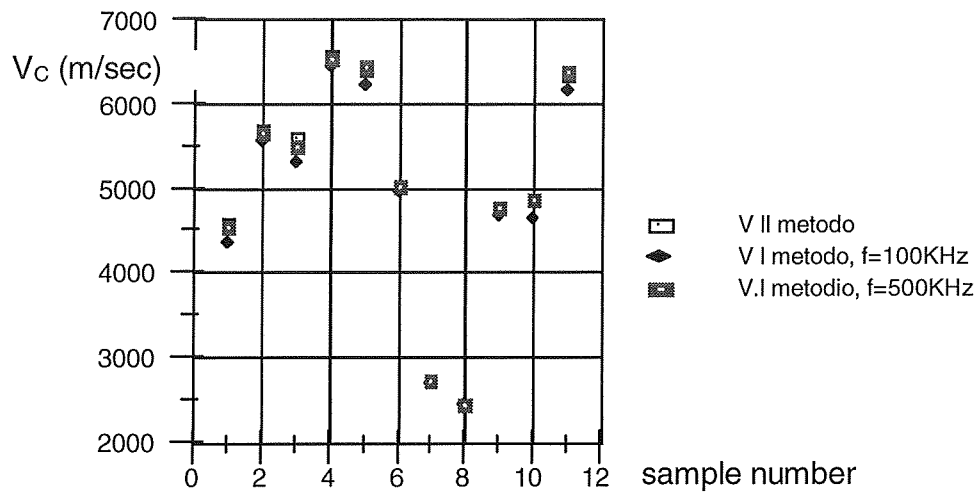


Fig. 18 Confronto delle velocità misurate in acqua lungo l'asse C con i due metodi di misura.

Stima dell'attenuazione

In tutti quei campioni in cui è possibile misurare il segnale di secondo transito è stata definita l'attenuazione di propagazione attraverso il campione, secondo la formula:

$$A_t = (20/2Sc) \text{Log } V_1/V_2 \quad (7)$$

dove V_1 e V_2 sono rispettivamente le ampiezze massime del primo e del secondo segnale di transito.

Con riferimento ancora alla figura 9 se indichiamo con V il segnale emesso dalla sonda trasmittente, il primo segnale ricevuto avrà la stessa fase e un'ampiezza data da:

$$V_1 = A(1-r^2)V$$

dove A è il fattore di riduzione dell'ampiezza dovuta alla propagazione attraverso il materiale e $(1+r)$ il coefficiente di trasmissione.

Il secondo segnale di transito avrà la stessa fase del primo e un'ampiezza data da:

$$V_2 = r^2 A^3 (1-r^2)V$$

Pertanto il rapporto tra i due segnali è dato da:

$$V_1/V_2 = 1/r^2 A^2$$

Perciò la (7) fornisce una stima per eccesso dell'attenuazione del materiale.

In Tabella 10 sono riportati i valori della (7) mediati ancora su 500 sweeps, lungo i tre assi di misura, ottenuti utilizzando le sonde a 500 KHz.

| sample | At _A (dB/m) | At _B (dB/m) | At _C (dB/m) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | .0044 | .0107 | .0142 |
| 2 | .0155 | .0132 | .0139 |
| 3 | .0162 | .0161 | .0167 |
| 4 | .0091 | .0063 | .0093 |
| 5 | .0111 | .0091 | .0149 |
| 6 | .0132 | .0149 | .0157 |
| 7 | | | |
| 8 | .0163 | .0136 | |
| 9 | .0126 | .0148 | .0165 |
| 10 | .0104 | .0126 | .0173 |
| 11 | .0114 | .0160 | .0115 |

Tab. 10 Valori delle attenuazioni misurate lungo i tre assi.

La Fig. 19 visualizza il confronto tra le attenuazioni ricavate lungo gli assi A, B e C di esplorazione con campioni immersi in acqua utilizzando sonde da 500 KHz.

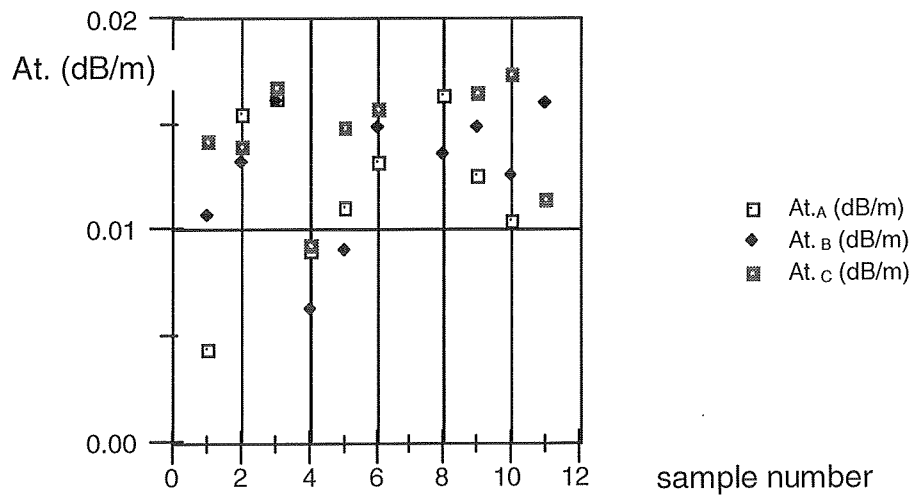


Fig. 19 Confronto dell'attenuazione lungo gli assi di misura.

Conclusioni

E' stata condotta un'indagine sperimentale volta a stimare i valori di velocità di propagazione e di attenuazione per onde ultrasoniche all'interno di vari tipi di marmo. Tale indagine è stata motivata dal fatto che in letteratura tecnica non risultano dati sufficienti sull'argomento e, in ogni caso, idonei ad una corretta progettazione di apparati per una diagnostica non distruttiva di manufatti o blocchi di tale materiale.

Si è visto che la velocità nel marmo può assumere valori che vanno dai 2500 m/sec per il campione 7, corrispondente alla Pietra Serena, ai 6500 m/sec del campione 4 corrispondente al Botticino Classico; per la maggior parte dei campioni rimanenti la velocità oscilla mediamente intorno a 5000 m/sec. Per ogni singolo campione la variazione di velocità lungo i tre assi di scansione dipende della struttura del materiale ed è mediamente pari a circa a 700, 800 m/sec, mentre si riduce enormemente nei campioni 4, 5, 10 e 11, che hanno una struttura molto uniforme e fine. L'attenuazione, definita dalla (7), varia anch'essa secondo gli assi di misura ed è mediamente pari a circa 0.01dB/m. Per il campione numero 7, corrispondente alla Pietra Serena, non è stato possibile effettuare la misura in quanto dotato di attenuazione eccessiva.