

MISURA SPERIMENTALE DELLA TORTUOSITA' DI MATERIALI A CELLA APERTA CON TECNICA AD ULTRASUONI

Paolo Bonfiglio, Francesco Pompoli

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

La determinazione dei parametri fisici dei mezzi porosi è di fondamentale importanza per la previsione del loro comportamento acustico. Tra queste quantità la tortuosità riveste un ruolo molto importante per la comprensione dei processi regolano la propagazione sonora in tali materiali; in particolare essa descrive la complessità del cammino dell'onda sonora che si propaga all'interno del materiale.

Diversi metodi sono stati proposti per la determinazione della tortuosità. Nel 1980 Brown [1] ha proposto una tecnica basata sulla misura della resistività elettrica, saturando il mezzo con un fluido conduttore (in genere acqua). Il metodo è stato successivamente ottimizzato da Champoux e Stinson [2].

Nel 1994 Allard *et al.* [3] ha sviluppato un metodo di misura basato sul limite ad alta frequenza della velocità di fase all'interno di un mezzo poroso. Il metodo si basa sulla misura della risposta all'impulso di un'onda acustica ultrasonica che attraversa un campione di materiale poroso. Dalla determinazione dello sfasamento, nel dominio della frequenza, tra l'onda che attraversa il materiale e la stessa onda che si propaga in aria, è possibile calcolare la velocità di fase all'interno del materiale e quindi la tortuosità del materiale stesso.

Recentemente sono state proposte tecniche basate sulla misura ad alta frequenza del coefficiente di riflessione e trasmissione (Attenborough *et al.* [4]) e del coefficiente di riflessione ad incidenza obliqua (Fellah *et al.* [5]).

Nel presente lavoro viene illustrata la realizzazione di un sistema per la misura della tortuosità basato sul metodo proposto da Allard [3]. Nell'articolo verrà descritta la teoria del metodo, l'apparecchiatura utilizzata, l'analisi dei risultati in frequenza ed i metodi per la determinazione di un unico valore di tortuosità come limite dei risultati per frequenze tendenti all'infinito.

2. Fondamenti teorici

Il metodo di misura [3] è basato sulla determinazione del limite ad alta frequenza della velocità di fase in aria all'interno di una struttura considerata rigida. Infatti, per frequenze che tendono all'infinito il mezzo poroso può essere considerato "non dispersivo", ovvero la velocità di fase complessa si può assumere indipendente dalla frequenza. In tali condizioni la relazione tra il numero d'onda complesso k_c e la tortuosità è data da:

$$(1) \quad k_c = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\alpha_\infty} \left[1 + \frac{\sqrt{2\eta/\omega\rho_0} (1-j)}{2} \left(\frac{1}{A} + \frac{\kappa-1}{\sqrt{N_{pr} A'}} \right) \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

dove:

- c_0 [m/s] è la velocità del suono in aria;
- η [Ns/m²] è la viscosità dell'aria;
- ρ_0 [kg/m³] la densità dell'aria;
- ω [rad/sec] la frequenza angolare;
- κ il rapporto dei calori specifici;
- N_{pr} il numero di Prandtl;
- A e A' [m] le lunghezze caratteristiche viscosa e termica.

La velocità di fase complessa all'interno del materiale si dimostra essere uguale a:

$$(2) \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{\alpha_\infty}} (1 - \varphi) \quad [\text{m/s}]$$

dove il "loss angle" φ è dato dalla seguente espressione:

$$(3) \quad \varphi = \frac{\sqrt{2\eta/\omega\rho_0}}{2} \left(\frac{1}{A} + \frac{\gamma-1}{\sqrt{N_{pr} A'}} \right) \quad [\text{rad}]$$

Dall'equazione (1) è possibile scrivere la seguente espressione per una curva di tortuosità, funzione della frequenza:

$$(4) \quad \alpha_\infty \Big|_\omega = \left(\frac{c_0}{c} \right)^2 (1 - \varphi)^2 \quad [-]$$

Al limite per frequenze che tendono all'infinito (od in maniera del tutto equivalente quando $\omega^{-1/2}$ tende a zero) il "loss angle" tende a zero; di conseguenza il valore della tortuosità può essere calcolato come:

$$(5) \quad \alpha_\infty = \left\{ \lim_{\omega^{-1/2} \rightarrow 0} \left(\frac{c}{c_0} \right) \right\}^{-2} \quad [-]$$

Il rapporto tra la velocità del suono in aria e la velocità di fase all'interno del mate-

riale è definito indice di rifrazione n . L'equazione (5) rappresenta una retta in funzione di $\omega^{-1/2}$ per cui il calcolo del precedente limite può essere operato per mezzo di una regressione lineare sui dati sperimentali dell'indice di rifrazione; l'intercetta di tale regressione è uguale alla radice quadrata della tortuosità.

In Figura 1 è mostrata una schematizzazione del set-up di misura. L'indice di rifrazione può essere calcolato dall'aumento del tempo di volo (che corrisponde ad un sfasamento nel dominio della frequenza) di un impulso ultrasonico tra due trasduttori, con e senza materiale da testare.

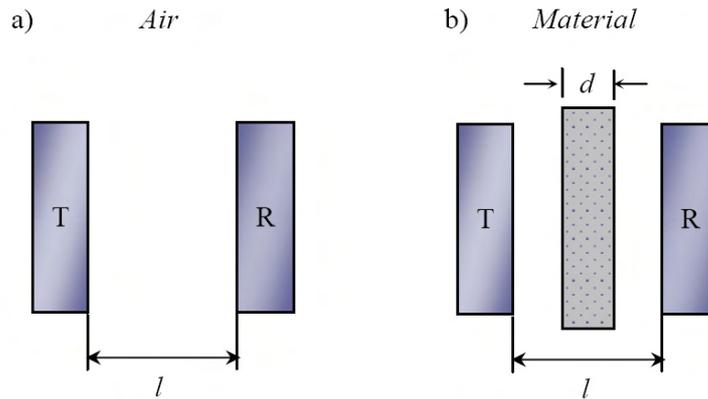


Figura 1. Schematizzazione del set-up di misura

La velocità di fase complessa si calcola per mezzo della seguente espressione:

$$(6) \quad c = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{\Delta\phi}{2\pi f \cdot d}} \quad [\text{m/s}]$$

essendo $\Delta\phi$ [rad] la differenza di fase misurata, f [Hz] la frequenza e d [m] lo spessore del provino. Lo sfasamento è determinato per mezzo di un'analisi FFT delle risposte all'impulso.

Riassumendo, dal calcolo dello sfasamento tra le due risposte all'impulso misurate con e senza materiale, si determina la velocità di fase. Per mezzo di una regressione lineare sui dati sperimentali dell'indice di rifrazione si determina la tortuosità dall'intercetta di detta regressione.

3. Materiali e Metodi

L'apparecchiatura è stata ideata e realizzata presso il Laboratorio di Acustica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara. Essa è costituita da:

- amplificatore di potenza GRAS 14AA;
- trasduttore elettrostatico ultrasonico (20-100KHz) utilizzato come sorgente e ricevitore;
- condizionatore di segnale MESA MUX10A;
- sistema mobile per il posizionamento dei trasduttori e/o del provino da testare;
- scheda audio ESI Wami Rack 192X (192 KHz sampling freq, 16bit)

Le risposte all'impulso sono generate determinate per mezzo della tecnica “*exponential sine sweep*” nel range di frequenza da 20 a 90 KHz. Per la generazione e ac-

quisizione dei segnali viene utilizzato Adobe Audition®; le operazioni di post-elaborazione vengono effettuate per mezzo di un software sviluppato in ambiente Labview 8®.

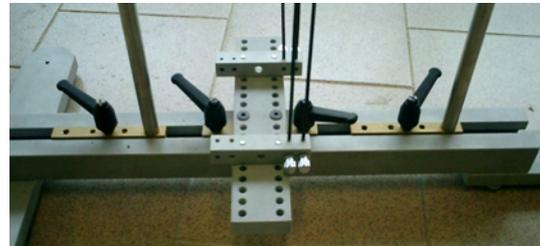
In Figura 2 è riportata l'apparecchiatura di misura insieme ad alcuni particolari.



Apparecchiatura per la misura della tortuosità, con e senza materiale di prova



Trasduttore elettrostatico



Sistema per il posizionamento del provino e/o dei trasduttori

Figura 2. Alcuni particolari del set-up di misura

4. Risultati sperimentali

4.1 Ottimizzazione della tecnica di misura

Inizialmente si è proceduto all'ottimizzazione della tecnica in termini di operazioni di post-elaborazione. Al fine di scartare riflessioni multiple tra i due trasduttori e di eliminare l'effetto di cross talk tra i canali della scheda audio è necessario selezionare un opportuno numero di campioni della risposta all'impulso; di conseguenza è necessario applicare finestre temporali per ridurre gli effetti di discontinuità al bordo. La procedura ottimizzata risultante prevede la selezione di 128 campioni attorno al picco della risposta all'impulso e l'applicazione di una speciale finestra temporale denominata 7 Term Blackmann-Harris.

In Figura 3 è mostrato l'effetto della finestra temporale sulla risposta all'impulso per un campione di poliuretano (spessore 20mm).

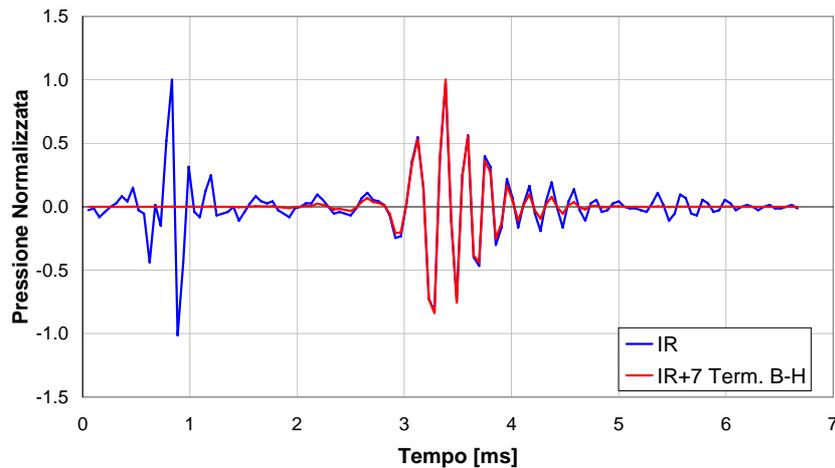


Figura 3. Effetto della finestra temporale sulla risposta all'impulso

Dalla precedente figura si può osservare come l'effetto del cross talk, evidente nei primi 2 ms, venga completamente ridotto dall'applicazione della finestra temporale.

In Figura 4 l'effetto della finestra temporale è mostrata in termini di indice di rifrazione.

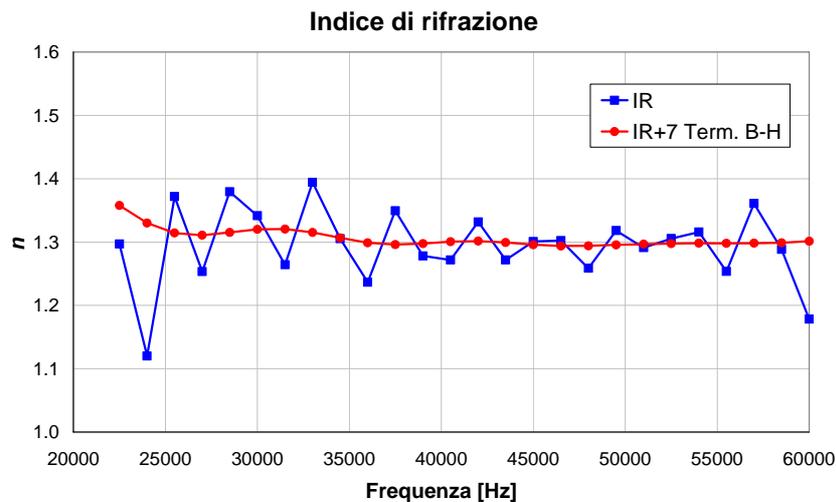


Figura 4. Effetto della finestra temporale sull'indice di rifrazione

Come riportato precedentemente il range di misura utilizzato è compreso tra 20 e 90 KHz. In realtà il limite ad alta frequenza potrebbe essere inferiore in quanto dipendente dal valore del valore tortuosità e dalle perdite energetiche all'interno del materiale in esame, che possono causare un limitato rapporto Segnale/Rumore al ricevitore. A tal fine sono stati testati 5 materiali porosi per i quali sono stati determinati, nel dominio della frequenza, l'*Insertion Loss* (calcolato dalla riduzione dell'ampiezza della risposta all'impulso relativa al materiale rispetto a quella in aria) e l'indice di rifrazione. La descrizione dei materiali, aventi diametro pari a 100mm, è riportata in Tabella 1. I confronti tra i suddetti parametri sono riportati nelle figure 5 e 6.

Tabella 1. Descrizione dei materiali testati

	<i>Materiale</i>	<i>Spessore [m]</i>	<i>Densità[Kg/m³]</i>	<i>Tipologia</i>
1	Armafoam Sound	0.024	64	Poroso
2	Poliuretano B	0.02	25	Poroso
3	Poliuretano E	0.02	25	Poroso
4	Lana di Vetro	0.025	20	Fibroso
5	Feltro	0.014	90	Feltro

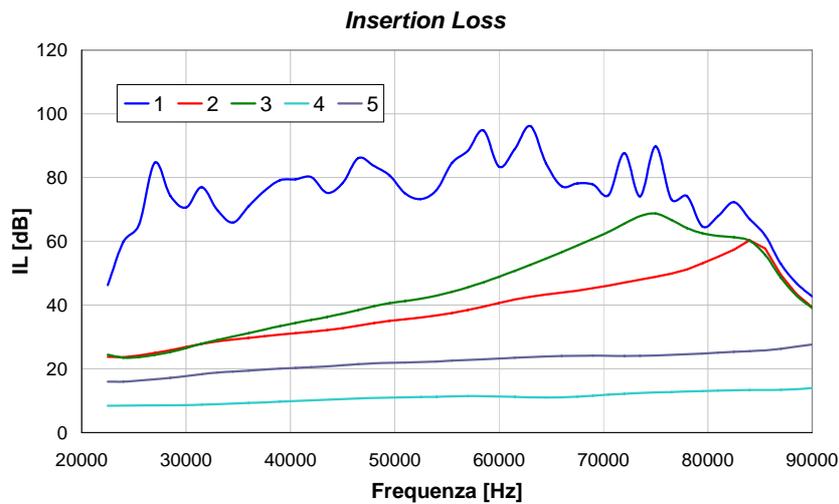
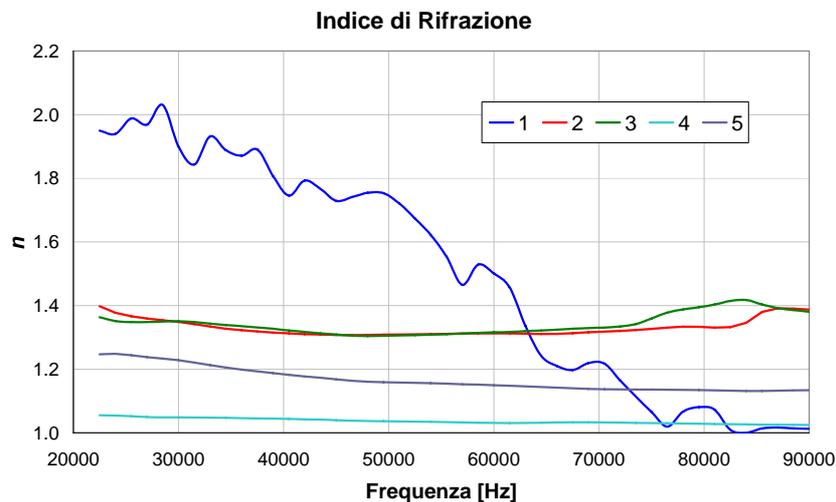
Figura 5. Curve di *Insertion Loss* per i materiali testati

Figura 6. Curve di indice di rifrazione per i materiali testati

L'analisi mostra una buona correlazione tra le perdite all'interno del materiale e l'affidabilità nel calcolo della tortuosità. In particolare è possibile osservare che per valori di *Insertion Loss* superiori a 50-60 dB, l'andamento dell'indice di rifrazione non segue l'andamento decrescente con la frequenza, previsto teoricamente. Ad esempio i

materiali 4 e 5 sono caratterizzati da valori di IL inferiori a 50 dB e l'indice di rifrazione decresce all'aumentare della frequenza. Per il materiale 2 l'andamento dell'indice di rifrazione è corretto fino a 80 KHz, dove il valore dell'*Insertion Loss* è inferiore al suddetto limite. Le stesse considerazioni possono essere applicate al materiale 3 per frequenze inferiori a 60 KHz. Infine l'*Insertion Loss* per il materiale 1 è maggiore di 60 dB in quasi tutto l'intervallo di frequenze e la curva dell'indice di rifrazione è completamente inattendibile.

Tale limitazione può essere superata utilizzando traduttori con maggiore potenza sonora e sensibilità oppure riducendo lo spessore del provino da testare.

Naturalmente l'analisi esaminata porta ad una stima approssimata del limite massimo in frequenza. Tuttavia essa può essere utilizzata come regola per la determinazione di un intervallo di misura affidabile.

4.2 Misure sperimentali su materiali porosi

Come descritto nel paragrafo 3, il valore della tortuosità è determinato per mezzo dell'intercetta della regressione lineare sui dati sperimentali dell'indice di rifrazione. In particolare la tortuosità è uguale al quadrato del valore di detta intercetta. A titolo di esempio in Figura 7 è riportato l'indice di rifrazione in funzione di $\omega^{-1/2}$ per un campione in fibra di poliestere (densità 40 kg/m³- spessore 30 mm). Nello stesso grafico viene riportata anche la retta di regressione.

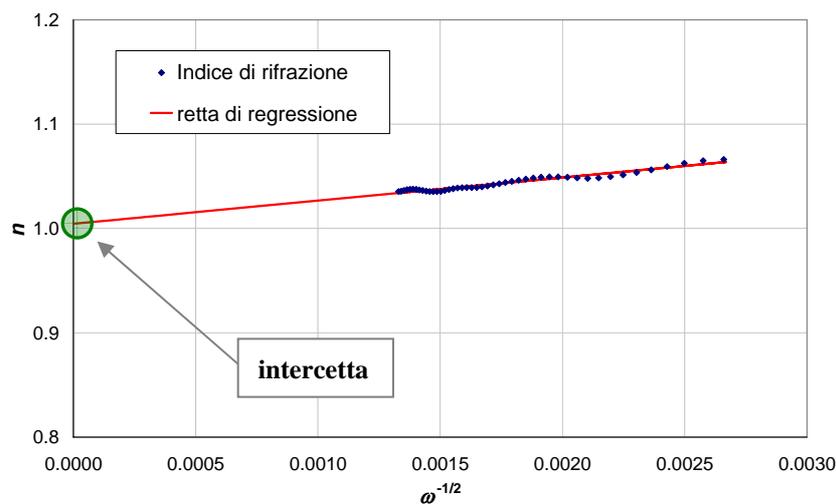


Figura 7. Indice di rifrazione e retta di regressione per il Materiale Mat1.

In Tabella 2 vengono riportati i valori della tortuosità di 13 materiali fibrosi e porosi, aventi diametro pari a 100mm. Nella stessa tabella vengono anche riportati i valori dell'incertezza di misura, ottenuta applicando la legge della propagazione degli errori all'espressione (6), e i valori del coefficiente di correlazione lineare. Per la determinazione dell'intervallo di frequenze utilizzate per la regressione lineare la regola descritta nel paragrafo precedente è stata utilizzata.

La tabella mostra che per quasi tutti i campioni testati il range utilizzato per la regressione lineare è compreso tra 30 e 70 KHz. È interessante notare che per materiali caratterizzati da valori di tortuosità prossimi a 1, valore che rappresenta il limite minimo fisicamente accettabile, la regressione lineare può portare a valori leggermente inferiori. Ciò potrebbe accadere se l'intervallo di frequenze utilizzato non è ancora suf-

ficiente a garantire l'andamento lineare previsto teoricamente. Di conseguenza per tali materiali il range dovrebbe essere esteso a frequenze ancora superiori.

Tabella 2. Descrizione dei materiali testati

<i>Materiali</i>	<i>Spessore [mm]</i>	<i>Range [KHz]</i>	α_{reg}	σ	R^2
Fibra di Poliestere	30	30-70	1.02	0.01	0.88
Fibra di Poliestere	40	30-70	1.01	0.004	0.93
Fibra di Poliestere	50	30-70	1.03	0.002	0.98
Lana di Vetro	25	30-70	0.98	0.004	0.95
Fibra di Canapa	25	30-70	1.05	0.002	0.99
Melamina	20	30-70	0.99	0.002	0.99
Feltro	14	30-70	1.01	0.01	0.98
Poliretano A	40	30-70	1.08	0.00	1.00
Poliretano B	20	30-50	1.41	0.03	0.90
Poliretano C	20	50-70	1.18	0.01	0.89
Poliretano D	20	50-70	1.18	0.00	0.98
Poliretano E	20	30-55	1.37	0.02	0.93
Intonaco fonoassorbente	23	40-60	1.52	0.02	0.99

4.3 Ripetibilità

La ripetibilità della tecnica è stata testata per mezzo di 5 misure ripetute su una campione di melamina e su un campione di poliuretano. I valori di tortuosità relativi a ciascuna prova insieme al valor medio e deviazione standard sono riportati in Tabella 3. Dalla Tabella si può osservare che l'errore relativo è inferiore al 2%.

Tabella 3. Ripetibilità della tecnica di misura

<i>Materiali</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	α_{∞}	σ	%
Melamina	0.99	0.98	0.97	0.96	0.98	0.97	0.01	1%
Poliuretano B	1.41	1.35	1.34	1.36	1.39	1.37	0.03	2%

4.4 Misura della distribuzione della tortuosità su campioni di grandi dimensioni

Dato che la misura della tortuosità prevede l'utilizzo di ultrasuoni, e di conseguenza lunghezze d'onda molto piccole, è interessante determinare la minima superficie richiesta per una corretta determinazione della tortuosità. A tal fine è stato testato un sistema costituito da materiale in fibra di poliestere e una membrana di alluminio. Sulla membrana sono stati effettuati quattro fori di diametro diverso (2, 15, 25 e 45 mm) e per ciascuna configurazione è stato determinato l'indice di rifrazione in funzione della frequenza. I risultati sono riportati in Figura 8.

Dal confronto è possibile osservare che l'apertura di 45 mm garantisce valori coincidenti ai risultati ottenuti senza membrana. E' interessante notare che tale area corrisponde a circa il diametro del trasduttore elettrostatico.

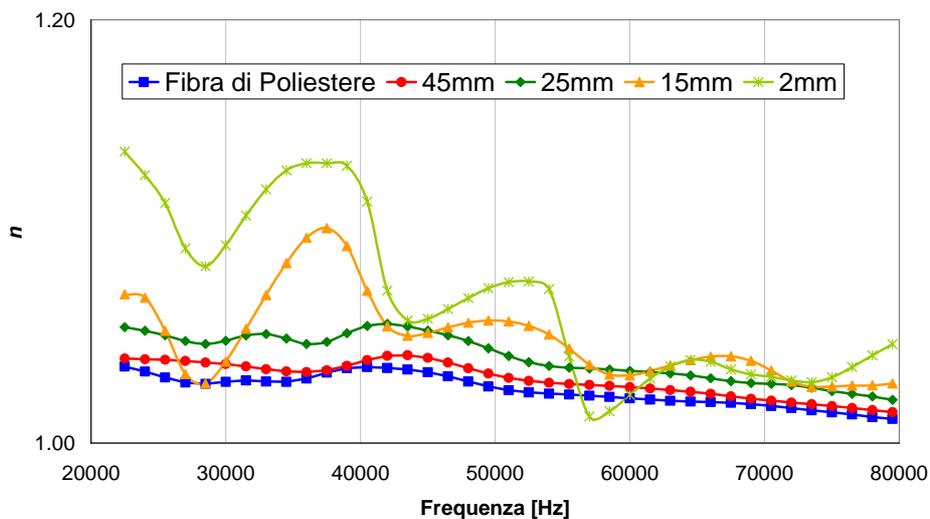


Figura 8. Indice di rifrazione per il sistema costituito da materiale in fibra di poliestere e membrana di alluminio

Successivamente si è proceduto alla misura della distribuzione di tortuosità di un campione di schiuma poliuretano avente area pari a $180 \times 180 \text{ mm}^2$. L'intera superficie è stata suddivisa in 9 regioni quadrate di lato pari a 6 cm ed in ciascuna di esse il valore di tortuosità è stato determinato per mezzo della procedura descritta nel paragrafo 4.2. Una immagine della sessione di misura è mostrata in Figura 9. Nella stessa figura viene riportata anche una mappa della distribuzione tortuosità che mette in evidenza una disomogeneità caratteristica di tale tipologia di materiali.

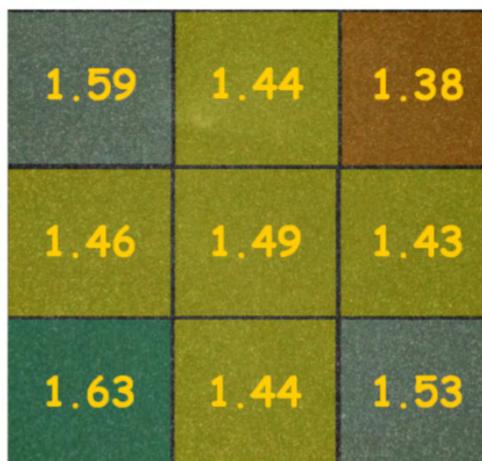
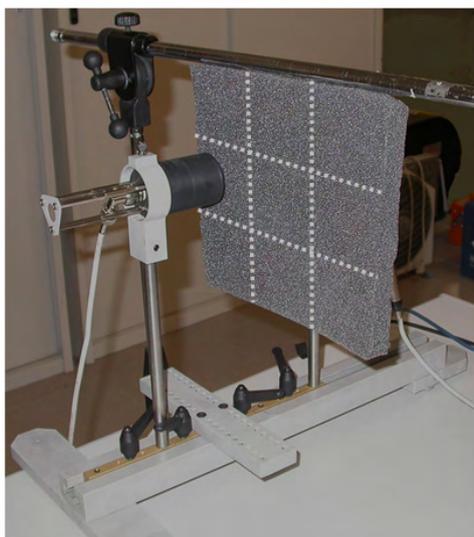


Figura 9. Determinazione della mappa di tortuosità per un materiale di poliuretano

5. Conclusioni

Nel presente articolo è stata presentata un'apparecchiatura di misura per la determinazione della tortuosità di materiali porosi e fibrosi basata sulla determinazione del limite ad alta frequenza della velocità di propagazione di un'onda sonora al loro interno. La tecnica di misura è stata ottimizzata in termini di operazioni di post-elaborazione; inoltre è stata individuata una correlazione tra limite ad alta frequenza e perdite interne del materiale testato. Quindi sono state effettuate misure su diversi campioni di materiali porosi e fibrosi ed è stato riscontrato che, per materiali caratterizzati da valori della tortuosità prossimi ad 1, la procedura di misura ha portato a valori leggermente inferiori a tale valore.

La ripetibilità della tecnica è stata analizzata riscontrando valori inferiori al 2%. Infine l'apparecchiatura è stata utilizzata per determinare la distribuzione di tortuosità di materiali di grandi dimensioni, permettendo la realizzazione di mappe di tale grandezza sull'intera superficie del materiale testato.

Gli sviluppi futuri di tale lavoro di ricerca prevedono l'estensione del range di misura a frequenze superiori a 100 KHz e l'incremento del range dinamico dei trasduttori.

Bibliografia

- [1] Brown R., "Connection between the formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factors in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media", *Geophysics* 45 pp.1269-1275 (1980).
- [2] Champoux Y., "Etude expérimentale du comportement acoustique des matériaux poreux à structure rigide", PhD thesis, Carlton University, Canada (1991).
- [3] Allard J. F., Castagnède B., Henry M. and Lauriks W., "Evaluation of the tortuosity in acoustic porous materials saturated by air", *Review of Scientific Instruments* 65 pp. 7654-755 (1994).
- [4] Umnova O., Attenborough K., Shin H. and Cummings A., "Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials", *Applied Acoustics* 66 pp.607-624 (2005)
- [5] Fella, Z. E. A., Berger, S., Lauriks, W., Depollier, C., Aristégui, C. and Chapelon, J. Y., "Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence", *Journal of Acoustical Society of America* 113(5) pp.2424-2433 (2003).

Ringraziamenti

Lavoro svolto nell'ambito del laboratorio di ricerca e trasferimento tecnologico LAV (Laboratorio di Acustica e Vibrazioni) realizzato con il contributo della Regione Emilia Romagna - Assessorato Attività Produttive, Sviluppo Economico, Piano telematico, PRRIIT misura 3.4 azione A - Obiettivo 2.

Gli autori ringraziano anche Paolo e Marcello per il fondamentale apporto nella progettazione e messa a punto del dispositivo.