

# SOFTWARE PREVISIONALE DELLE PROPRIETA' FISICO-ACUSTICHE DI MATERIALI IN LANA DI ROCCIA ROCKWOOL<sup>®</sup>

1. [Introduzione](#)
  2. [Requisiti di sistema](#)
  3. [Descrizione del software](#)
  4. [Fondamenti teorici](#)
  5. [Bibliografia](#)
- 

## 1. Introduzione

Questo software consente di prevedere le proprietà fisico-acustiche del materiale in lana di roccia prodotto da Rockwool<sup>®</sup>. Il modello su cui si basa il software è stato sviluppato e validato sulla base di misure sperimentali eseguite presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara, su una vasta tipologia di pannelli a densità e spessore variabile; tale software è in grado di prevedere la [resistività al flusso d'aria](#), l'[impedenza acustica specifica](#), la [costante di propagazione](#), l'[impedenza superficiale](#) e il [coefficiente di assorbimento acustico apparente per incidenza normale](#) e [abbattimento metrico](#) in funzione della densità e dello spessore del materiale.

## 2. Requisiti di sistema

I requisiti minimi del sistema sono:

- Intel Pentium II
- CPU 800 MHz
- 128 Mb RAM

I requisiti consigliati sono:

- Intel Pentium III
- CPU 1 GHz
- 256 Mb RAM

La risoluzione minima dello schermo è : 1024 x 768

## 3. Descrizione del software

Il software consente di prevedere, in funzione della densità e dello spessore del materiale, i seguenti parametri:

|  |                                    |                       |
|--|------------------------------------|-----------------------|
| - resistività al flusso d'aria                       | $r$                                | [N·s/m <sup>4</sup> ] |
| - impedenza acustica caratteristica normalizzata (*) | $Z_c = Re Z_c + i Im Z_c$          | [-]                   |
| - costante di propagazione                           | $\gamma = Re \gamma + i Im \gamma$ | [m <sup>-1</sup> ]    |
| - impedenza superficiale normalizzata (*)            | $Z = Re Z + i Im Z$                | [-]                   |

|   |            |        |
|---|------------|--------|
| - coefficiente di assorbimento acustico apparente per incidenza normale | $\alpha$   | [-]    |
| - abbattimento metrico  | $\Delta I$ | [dB/m] |

(\*) I valori delle impedenze sono normalizzati per l'impedenza caratteristica  $\rho_0 c_0$ .

**ATTENZIONE: Il software non consente di calcolare il coefficiente di assorbimento per campo riverberante ma solo quello per incidenza normale.**

Tutti i parametri vengono riportati in grafico e in forma tabellare.

E' possibile effettuare 2 differenti tipologie di analisi:

- [Prodotti commerciali](#)
- [Analisi teorica in funzione della densità o della resistività al flusso d'aria](#)

Inoltre è possibile salvare in formato dati i risultati delle analisi prima descritte.

In particolare è possibile salvare i seguenti parametri:

- Coefficiente di assorbimento per incidenza normale
- Impedenza caratteristica **Zc** e costante di propagazione  $\gamma$
- Tutti i parametri

nelle seguenti rappresentazioni in frequenza:

- bande a percentuale costante 1/1 o 1/3 di ottava

- banda ad ampiezza costante

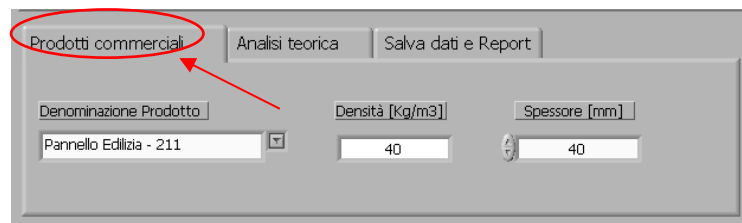
I valori dei parametri in banda a percentuale costante sono ottenuti dai valori a banda fine alle frequenze relative ai valori a centro banda.

Infine è possibile creare un report HTML e visualizzarlo in un Web Browser.

### 3.1 Analisi

#### 3.1.1 *Prodotti commerciali*

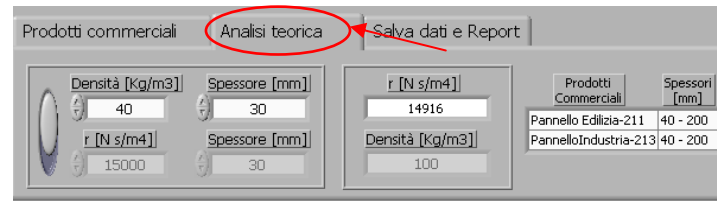
Questo tipo di analisi viene effettuato selezionando la pagina “Prodotti commerciali” nel Tab Control inferiore.



In tale analisi è possibile scegliere il tipo di materiale e lo spessore dei pannelli commercializzati da Rockwool®.

#### 3.1.2 *Analisi teorica in funzione della densità o della resistività al flusso d'aria*

Questo tipo di analisi viene effettuato selezionando la pagina “Analisi teorica” nel Tab Control inferiore.



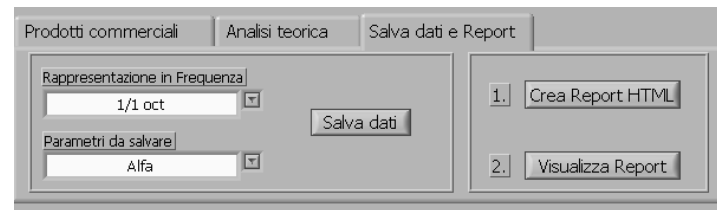
In tale analisi è possibile scegliere la densità o la resistività al flusso d'aria per mezzo del pulsante a sinistra nel Tab control. In entrambi i casi si può variare lo spessore del materiale.

Nella parte centrale del Tab Control vengono riportati la resistività al flusso d'aria e la densità calcolate rispettivamente nell'analisi in funzione della densità e nell'analisi in funzione della resistività al flusso d'aria.

Nella parte destra del Tab Control vengono riportati le denominazioni dei prodotti commerciali e i relativi spessori dei materiali le cui densità o resistività al flusso d'aria si avvicinano ai valori scelti nell'Analisi teorica.

### 3.2 Salvataggio dati e Report

Il salvataggio dei parametri in formato testo (\*.dat) viene effettuato selezionando la pagina "Salva dati e Report" nel Tab Control inferiore.



Questa opzione consente di salvare i seguenti parametri:

- Coefficiente di assorbimento per incidenza normale (Alfa)
- Impedenza caratteristica  $Z_c$  e costante di propagazione  $\gamma$
- Tutti i parametri

nelle seguenti rappresentazioni in frequenza:

- bande a percentuale costante 1/1 o 1/3 di ottava
- banda ad ampiezza costante

I valori dei parametri in banda a percentuale costante sono ottenuti dai valori a banda fine alle frequenze relative ai valori a centro banda.

**N.B Siconsiglia di importare il file salvato per mezzo di un foglio di calcolo (Excel).**

Nella stessa pagina è possibile prima creare un report relativo al grafico visualizzato nel Tab Control superiore e successivamente visualizzarlo per mezzo di un Web Browser (ad esempio Internet Explorer).

Per la stampa del Report si utilizzi la funzione "Stampa" del Web Browser; si raccomanda di scegliere un orientamento **orizzontale** della stampa.

#### **4. Fondamenti teorici**

Il software utilizza due modelli semi-empirici la cui struttura è ampiamente nota in letteratura. I coefficienti che compaiono in questi modelli sono stati ottimizzati sulla base di numerose misure sperimentali svolte su tutta la gamma di pannelli prodotti da Rockwool.

Utilizzando entrambe le relazioni e' pertanto possibile prevedere le caratteristiche fisico-acustiche del materiale Rockwool® in funzione dalla sua densità e dallo spessore del singolo pannello.

#### 4.1 Modello per la previsione della resistività al flusso d'aria

La resistività al flusso d'aria di un materiale fibroso dipende essenzialmente dalla dimensione delle fibre e dalla densità apparente del materiale stesso. Essa descrive la capacità del materiale di dissipare energia per attrito viscoso se attraversato da un flusso d'aria a bassa velocità (condizioni di prova: 0.5 mm/s) ed è correlata alla capacità di dissipazione dell'energia acustica che attraversa il materiale.

La resistività al flusso d'aria  $r$  è definita nella norma UNI EN 29053 come:

$$r = \frac{\Delta p}{v \cdot d} \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4]$$

dove :  $d$  è la lunghezza del provino in metri;

$v$  è la velocità dell'aria, in metri al secondo, immediatamente prima del provino;

□  $\Delta p$  è la differenza di pressione dell'aria, misurata in pascal, fra le due facce del provino.

I modelli semi-empirici [ 1 ] per materiali fibrosi hanno solitamente la seguente formulazione:

$$r = A \cdot \rho_m^B \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4]$$

essendo  $\rho_m$  la densità apparente del materiale (espressa in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e A e B due costanti tipiche di ciascun materiale e legate alla struttura delle fibre del materiale (principalmente al diametro delle fibre).

Sulla base dei risultati sperimentali (riportati in Figura 1), sono stati calcolati i parametri A e B per il materiale in lana di roccia Rockwool® con una procedura di minimizzazione dello scarto quadratico medio.

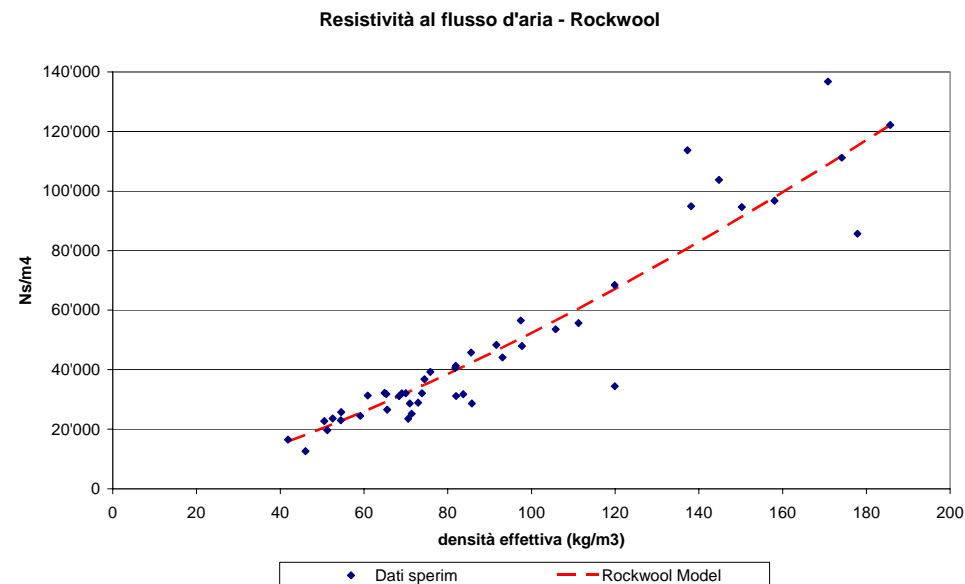
I parametri A e B risultanti sono pertanto:

$$A = 95.35$$

$$B = 1.37$$

ed il modello matematico risultante:

$$r = 95.35 \cdot \rho_m^{1.37} \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4]$$



**Figura 1: confronto tra la resistività al flusso sperimentale e la curva teorica derivante dal modello**

Come si può notare in Figura 1, il modello matematico è in grado di prevedere con buona approssimazione la resistività al flusso d'aria del materiale in lana di roccia Rockwool® in funzione della sua densità apparente. Per densità elevate i valori sperimentali di resistività al flusso hanno una elevata dispersione che dipende molto dalle irregolarità presenti nel campione prelevato dalla lastra di materiale.

Lo scostamento medio tra valori sperimentali e valori calcolati con il modello è pari all'11.7%. Tale precisione è inferiore alla riproducibilità della misura sperimentale di resistività al flusso (tra il 12.5% e il 16.5%) valutata durante un Inter-Laboratory Test tra diversi laboratori europei [ 2 ].

#### 4.2. Modello per la previsione delle caratteristiche acustiche

Il modello per la previsione dell'assorbimento acustico per incidenza normale deriva dal modello semi-empirico proposto da Delany-Bazley [ 3 ], successivamente ottimizzato per diverse tipologie di materiali da altri autori [ 4 ], [ 5 ].

Il modello permette di calcolare la parte reale ed immaginaria dell'impedenza acustica specifica  $Z_c = \text{Re } Z_c + j \text{ Im } Z_c$  e della costante di propagazione  $\gamma = \text{Re } \gamma + j \text{ Im } \gamma$ , in funzione della densità  $\rho_o$  dell'aria, della velocità  $c_o$  del suono nell'aria, della frequenza  $f$  dell'onda acustica e della resistività  $r$ .

$$\text{Re } Z_c = \left[ 1 + C1 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-C2} \right]$$

$$\text{Im } Z_c = - \left[ C3 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-C4} \right]$$

$$\operatorname{Re} \gamma = \left( \frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[ C5 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-C6} \right]$$

$$\operatorname{Im} \gamma = \left( \frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[ 1 + C7 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-C8} \right]$$

Gli otto coefficienti presenti nelle formule matematiche sono stati ottimizzati sulle misure sperimentali di impedenza acustica per minimizzazione della somma degli scarti quadratici ottenuti tra le impedenze superficiali calcolate dal modello matematico e quelle sperimentali.

In questo modo si è ottenuto un nuovo modello matematico ottimizzato su 12 campioni di Rockwool<sup>®</sup> con densità variabile tra 40 e 150 kg/m<sup>3</sup>.

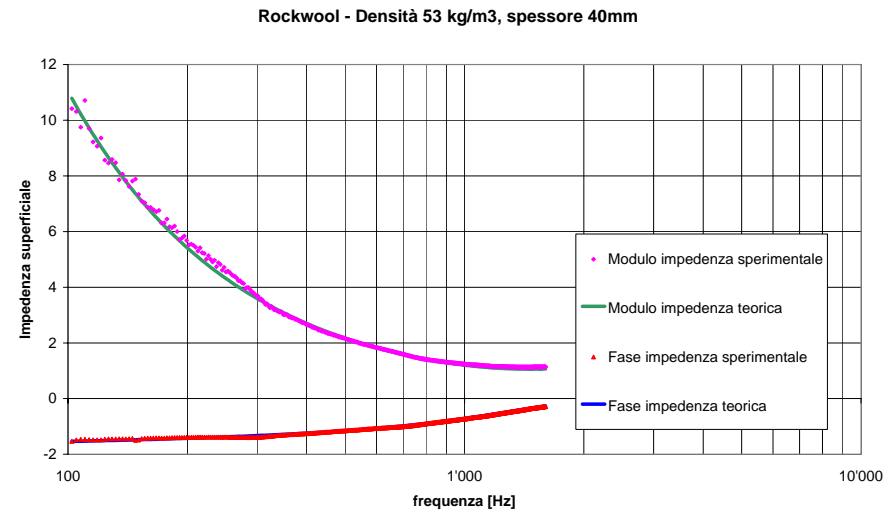
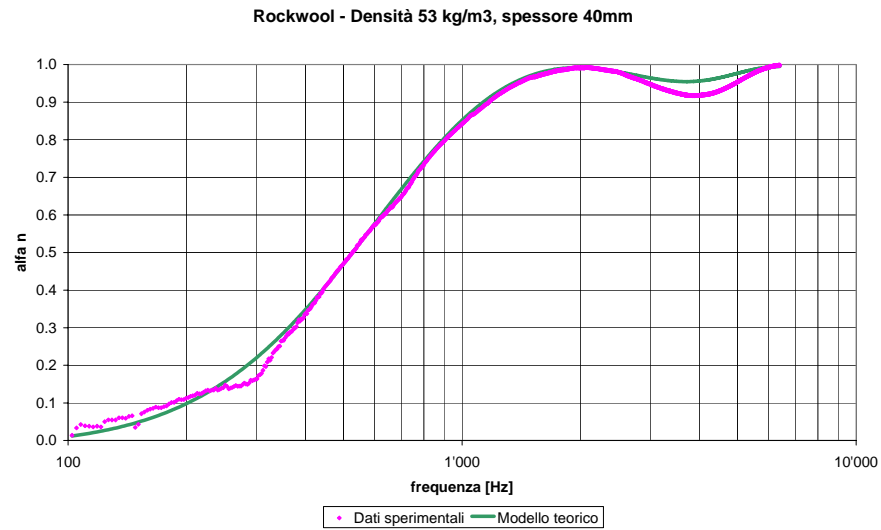
In tabella 1 si riportano i coefficienti del modello per Rockwool<sup>®</sup> confrontati con quelli presenti in letteratura [ 3 ].

| <b>Modello</b>      | <b>C1</b> | <b>C2</b> | <b>C3</b> | <b>C4</b> | <b>C5</b> | <b>C6</b> | <b>C7</b> | <b>C8</b> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Modello<br>Rockwool | 0.064     | 0.703     | 0.085     | 0.695     | 0.213     | 0.577     | 0.114     | 0.683     |
| Delany-Bazley       | 0.057     | 0.754     | 0.087     | 0.732     | 0.189     | 0.595     | 0.098     | 0.700     |

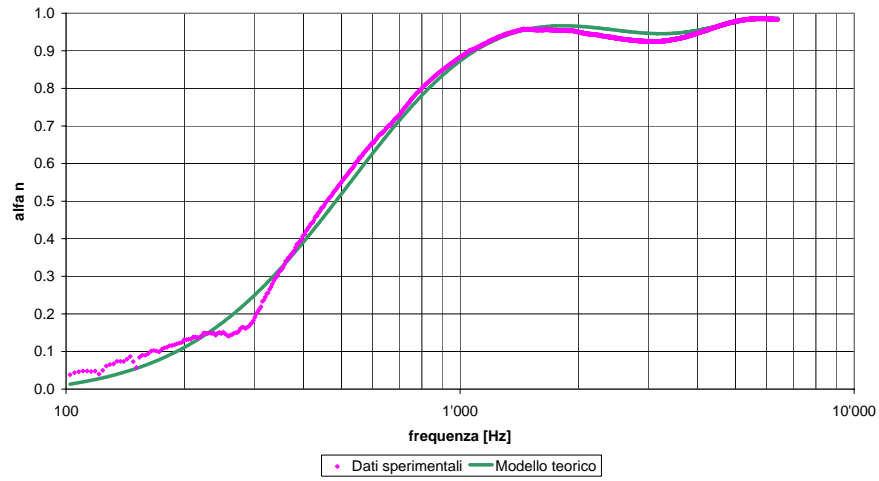
Tabella 1: coefficienti del nuovo modello confrontati con quelli del modello di Delany-Bazley [ 3 ]

Nei grafici successivi vengono riportati a titolo di esempio il confronto tra alcune curve sperimentali e quelle teoriche ottenute con il modello di previsione, sia per l'assorbimento acustico per incidenza normale che per l'impedenza acustica superficiale (modulo e fase).

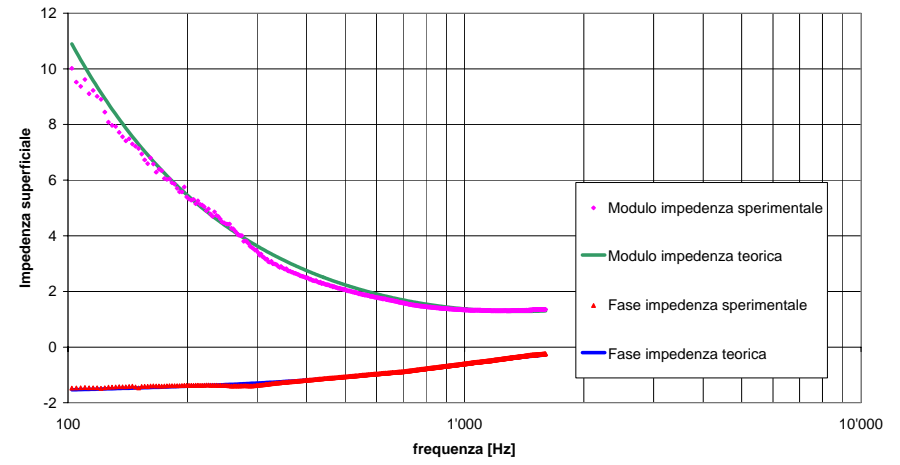
I grafici sono relativi a densità di materiale crescente.



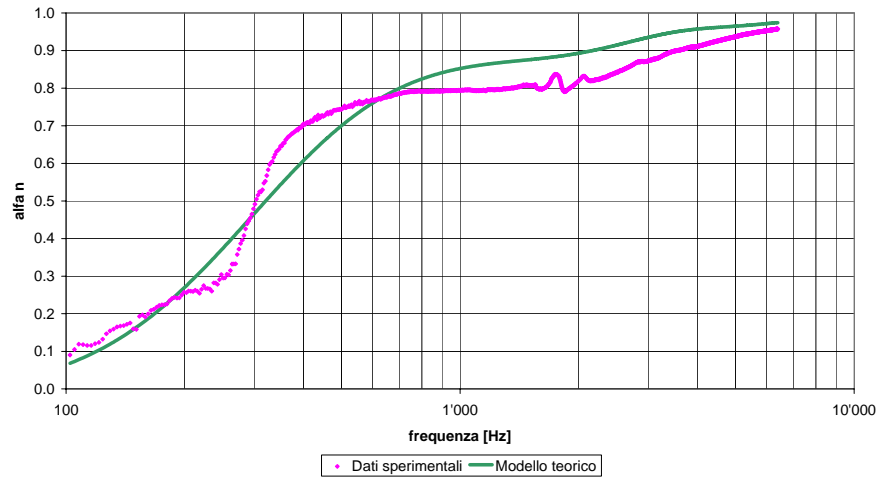
Rockwool - Densità 70 kg/m3, spessore 40mm



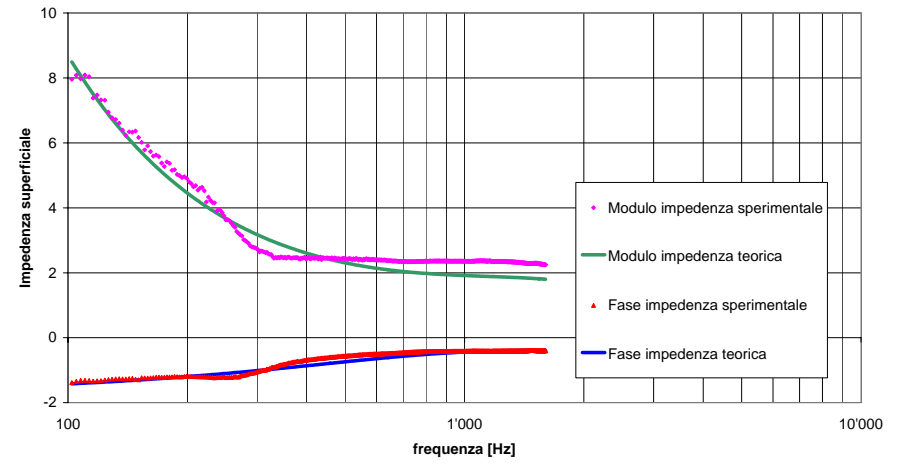
Rockwool - Densità 70 kg/m3, spessore 40mm



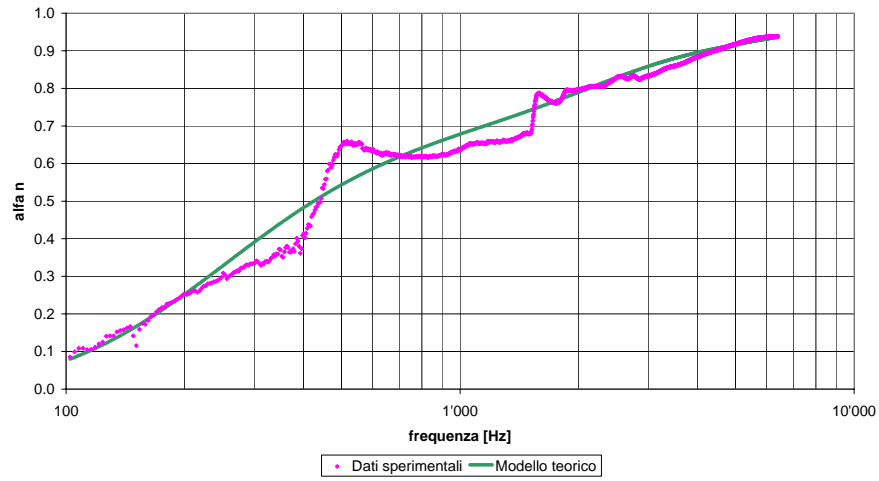
Rockwool - Densità 93 kg/m3, spessore 50mm



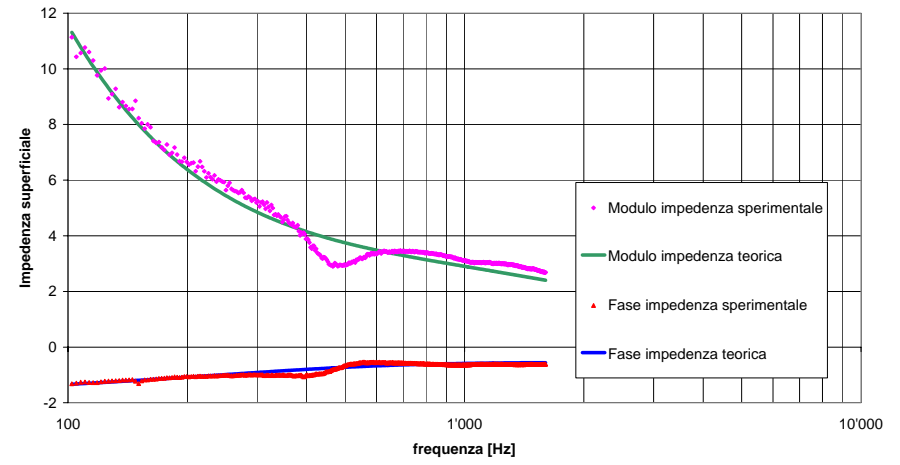
Rockwool - Densità 93 kg/m3, spessore 50mm



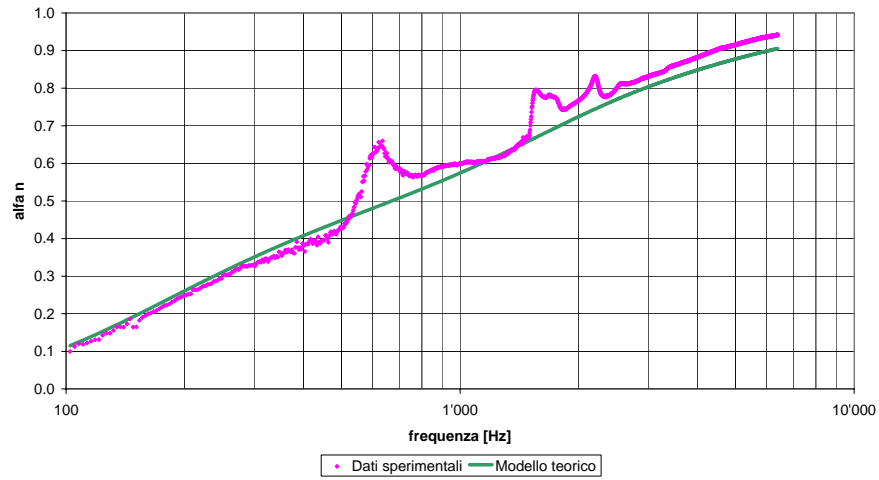
Rockwool - Densità 138 kg/m3, spessore 40mm



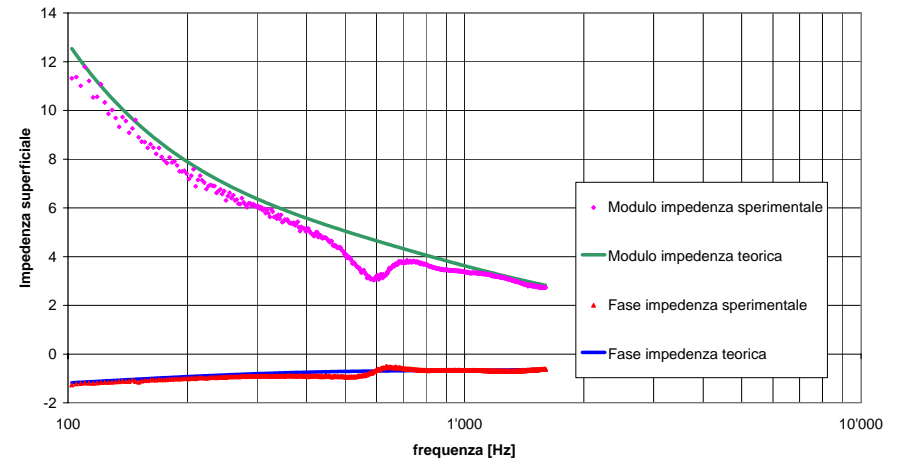
Rockwool - Densità 138 kg/m3, spessore 40mm



Rockwool - Densità 171 kg/m3, spessore 40mm



Rockwool - Densità 171 kg/m3, spessore 40mm



L'approssimazione rispetto alla curva sperimentale è ottima, soprattutto alle densità medio-basse. Al crescere della densità compaiono alcuni fenomeni dovuti alle condizioni di prova del campione, inserito con lieve compressione in un tubo circolare. Tali fenomeni, noti in letteratura, comportano ad alcune frequenze la comparsa di risonanze nella struttura del materiale che determinano curve sperimentali meno regolari. Anche in questo caso comunque si nota un'ottima corrispondenza tra gli andamenti teorici e sperimentali escludendo tali aree anomale.

In tabella 2 si riporta lo scarto medio risultante dal confronto con le 12 curve di assorbimento sperimentali e quelle ottenute dall'applicazione del modello e il confronto con quelle risultanti dall'applicazione del modello di Delany-Bazley [ 3 ]. Si può notare come da entrambi i modelli risulti uno scarto medio abbastanza contenuto, ma che percentualmente il modello studiato fornisce una precisione maggiore del 30% rispetto al modello di Delany-Bazley [ 3 ].

| <i>Modello</i>   | <i>Scarto medio<br/>del coefficiente di<br/>assorbimento alfa</i> |
|------------------|---|
| Modello Rockwool | 0.031   |
| Delany-Bazley    | 0.044   |

*Tabella 2: confronti tra gli scarti medi assoluti tra dati sperimentali e modellati.*

### **4.3. Modello complessivo**

A partire dai modelli matematici illustrati precedentemente, è possibile determinare in funzione di densità apparente e spessore del materiale tutte le caratteristiche fisico-acustiche del materiale (resistività al flusso d'aria  $r$ , impedenza caratteristica  $Z_c$ , costante di propagazione  $\gamma$ , impedenza superficiale  $Z$  e coefficiente di assorbimento per incidenza normale  $\alpha$ ). Il sistema di formule semplificate è il seguente:

$$r = 95.35 \cdot \rho_m^{1.37} \quad [\text{Ns/m}^4]$$

$$\text{Re } Zc = \left[ 1 + 0,057 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0,754} \right] \quad [-]$$

$$\text{Im } Zc = - \left[ 0,087 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0,732} \right] \quad [-]$$

$$\text{Re } \gamma = \left( \frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[ 0,189 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0,595} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$\text{Im } \gamma = \left( \frac{2\pi f}{c_o} \right) \left[ 1 + 0,098 \cdot \left( \frac{\rho_o f}{r} \right)^{-0,700} \right] \quad [\text{m}^{-1}]$$

$$Z = (\text{Re } Zc + j \text{Im } Zc) \cdot [\text{coth} (\text{Re } \gamma + j \text{Im } \gamma) \cdot l] \quad [-]$$

$$\alpha = \frac{4 \text{Re } Z}{|Z|^2 + 2 \text{Re } Z + 1} \quad [-]$$

La precisione del modello complessivo risulta addirittura migliore di quella del modello per le caratteristiche acustiche del materiale. La previsione della resistenza al flusso d'aria non porta dunque il modello ad una minore precisione ma corregge al contrario gli errori sperimentali della misura eliminando una fonte di incertezza.

In definitiva, con il modello complessivo si può prevedere la curva di assorbimento acustico con uno scarto medio pari a 0.028, oltre che ottenere la resistenza al flusso, l'impedenza caratteristica e la costante di propagazione del materiale.

#### 4.4 Abbattimento Metrico

La costante di attenuazione, o abbattimento metrico, di un materiale, espressa in dB/m, corrisponde alla attenuazione in dB per ogni metro che un'onda acustica piana subisce nel passaggio in un mezzo omogeneo dissipativo; tale costante è ricavabile dalla definizione:

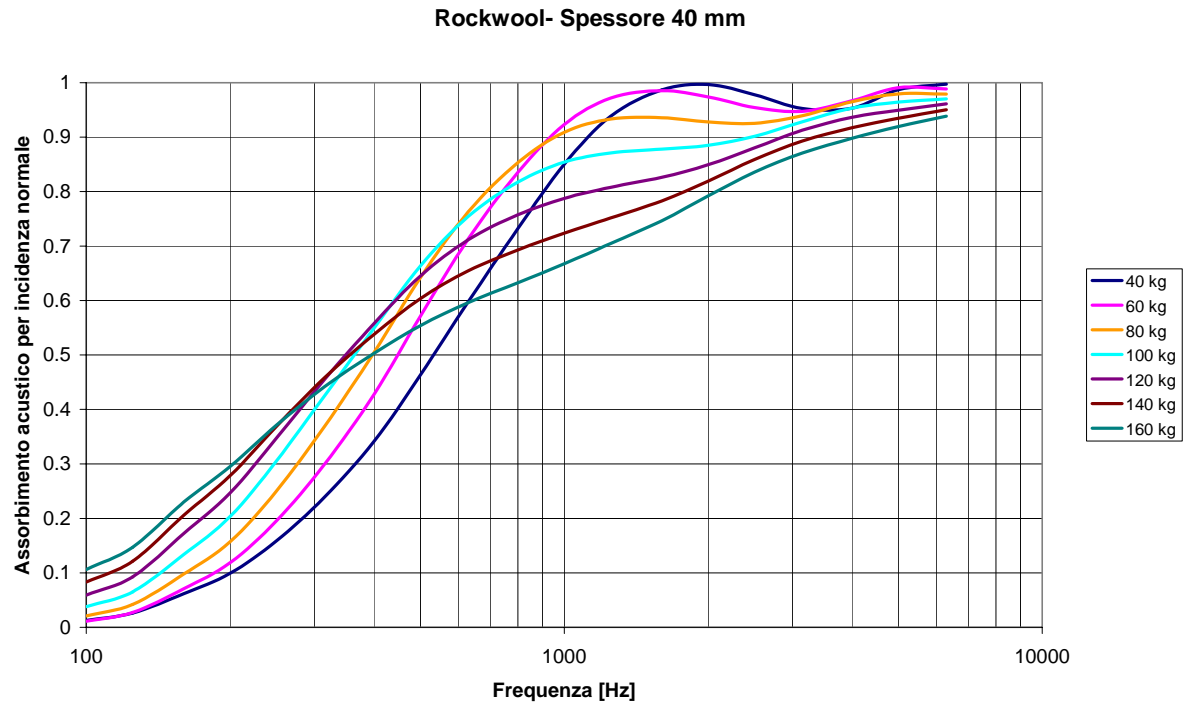
$$ATT = 20 \log \left( \frac{p(l)}{p(0)} \right)_{l=1m} = 20 \log \left( \frac{P_0 \cdot e^{-\text{Re} \gamma \cdot l}}{P_0} \right)_{l=1m} = 20 \log \left( e^{-\text{Re} \gamma} \right) \text{ [dB/m]}$$

#### 4.5. Applicazioni pratiche

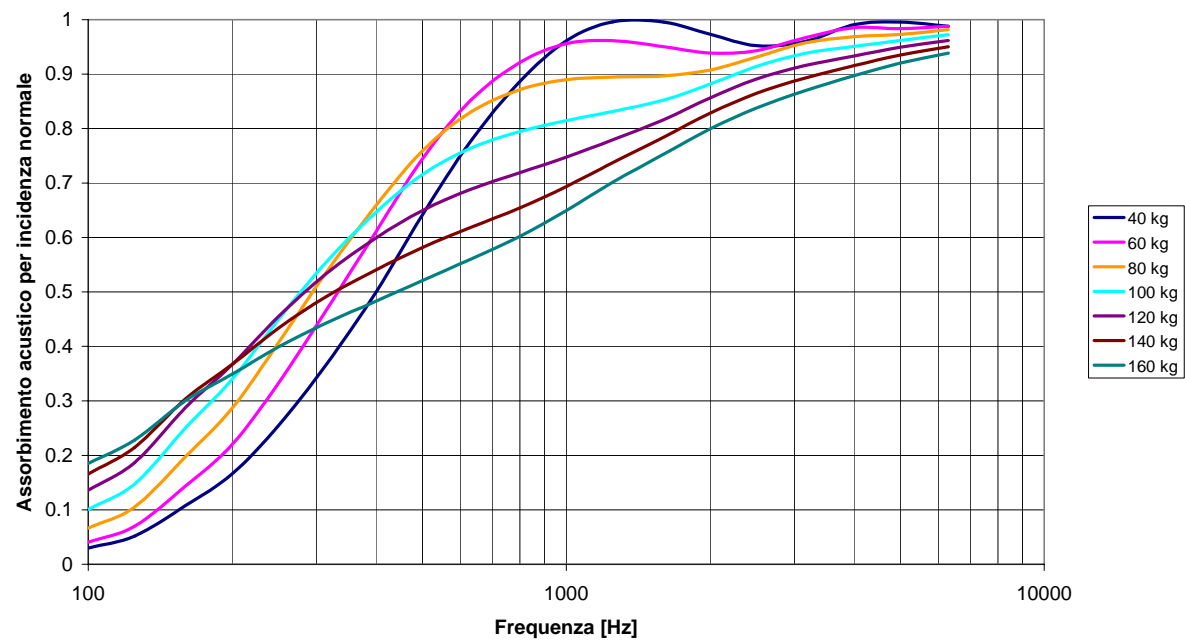
Il modello matematico consente di caratterizzare completamente il materiale in lana di roccia Rockwool® e rappresenta uno strumento semplice ed utilizzabile sia dal produttore del materiale che da progettisti in mancanza di dati sperimentali del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale e di resistività al flusso. Consente inoltre di calcolare i parametri acustici caratteristici del materiale, dati non misurabili con tecniche standardizzate ma richiesti da alcuni programmi di simulazione vibro-acustica.

E' ad esempio possibile scegliere la combinazione ottimale di spessore e densità per l'assorbimento acustico in funzione delle frequenze di interesse. Nelle figure successive sono illustrati gli effetti sull'assorbimento acustico della densità del materiale su

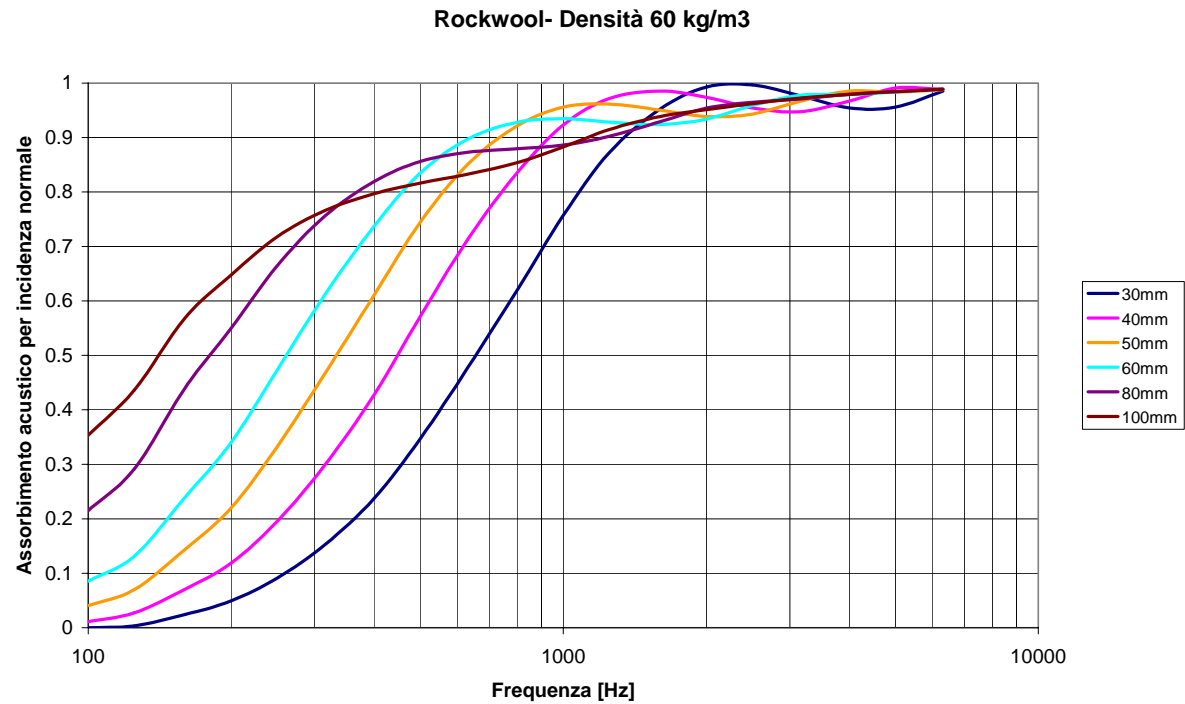
pannelli di due spessori diversi (40 mm e 50 mm); si può notare come nella zona delle basse frequenze sia più efficiente un materiale ad alta densità, alle frequenze medie esista un valore ottimale della densità variabile con la frequenza, alle alte frequenze siano più efficaci i materiali a bassa densità.



### Rockwool- Spessore 50 mm



A parità di densità si può invece notare come all'aumentare dello spessore si ottenga un aumento dell'assorbimento acustico alle frequenze medio-basse.



## 5. Bibliografia

- [1] D.A.Bies, C.H. Hansen, *Flow resistance information for acoustical design*, App.Acoust. **13** , 1980 , pp. 357-391.
- [2] M. Garai, F.Pompoli, *A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements*, Acustica-Acta Acustica Vol 89 (2003) pp. 471-478.
- [3] M.E. Delany , E.N. Bazley , *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, App.Acoust. , **3** , 1970 , pp. 105-116 .

- [4] I.P. Dunn, W.A. Davern, *Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers*, App.Acoust. , **19** , 1986 , pp. 321-334.
- [5] Q. Wu, *Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam*, App.Acoust. **25** , 1988 , pp. 141-148.