



**COMPORTAMENTO ACUSTICO DI  
PAVIMENTAZIONI A  
POROSITA' E SPESSORE VARIABILI**

**Umberto Bonvino**

Dipartimento di Vie e Trasporti  
Politecnico di Bari – Via Orabona n.4 – 70125 – Bari – Italy  
Tel: +39.080.5963382  
Fax: +39.080.5963329  
E-mail: [BONVINO@dvt005.poliba.it](mailto:BONVINO@dvt005.poliba.it)

# COMPORTAMENTO ACUSTICO DI PAVIMENTAZIONI A POROSITA' E SPESSORE VARIABILI

UMBERTO BONVINO - Dipartimento di Vie e Trasporti – Politecnico di Bari

## SOMMARIO

L'incremento della circolazione stradale rende sempre attuale il problema delle interazioni fra strada e ambiente dove è coinvolta quella fascia, talvolta molto estesa, nella quale tra l'uomo nel veicolo e la natura si intrecciano relazioni e interdipendenze del tutto distinte da quelle esistenti precedentemente alla costruzione dell'opera viaria. Tali relazioni sono a loro volta influenzate da molteplici variabili che richiedono conoscenze in diverse discipline scientifiche: resistenza dei materiali, acustica, idraulica, trasporti, meccanica della locomozione, chimica, ecc. L'inquinamento da rumore prodotto dal traffico delle infrastrutture viarie rappresenta certamente uno degli impatti maggiori; esso si presenta con variabili che, frequentemente interagenti tra di loro, sono correlate sia alle caratteristiche fisiche dell'ambiente nel quale la strada è inserita e dove si propagano le onde sonore, sia alle condizioni esistenti sulle superfici delimitanti l'ambiente stesso. In particolare si pensi, a solo scopo esemplificativo, all'eterogeneità della corrente veicolare, alla natura, allo stato di manutenzione e spessore della piattaforma stradale, alla presenza e forma di ostacoli, ivi compresi eventuali edifici, alle distanze tra sorgente e recettore, ecc. Anche i fenomeni che governano la vita utile della strada si presentano in forme diverse e complesse, certamente legati all'intensità e ai carichi di traffico, agli spessori degli strati costituenti la pavimentazione, alla qualità dei materiali impiegati, ecc. Tuttavia, mentre le correlazioni esistenti tra queste grandezze sono ben note al progettista stradale, le variabili acustiche e la loro dipendenza dal manto stradale lo sono meno.

## ABSTRACT

The continuous increase of the road flow always makes actual the problem of the interactions between road and environment. The term environment is not limited to that part interested by the construction of the road; it involves that whole band, very extensive, in which between the man, the vehicle and the nature are woven very different relationships by those existing before the construction of the road. Certain relationships are influenced by numerous variable that require knowledges in different scientific disciplines: resistance of the materials, acoustics, hydraulic, transports, mechanics of the locomotion, chemistry, etc. Noise is introduced with variable that interact among them and are correlated to: the physical characteristics of the environment in which the road is inserted and where the sonorous waves are propagated; to the existing conditions on the surfaces that of the same environment.

The phenomenons that rule the useful life of the road are shown in different and complex shapes, certainly tied to the intensity and the loads of traffic, to the thickness of the layers, to the quality of the materials, etc. Nevertheless, while the existing correlations between these greatness in action are notes to the road designer, the acoustic variable and their dependence from the road base and from the traffic are little notes.

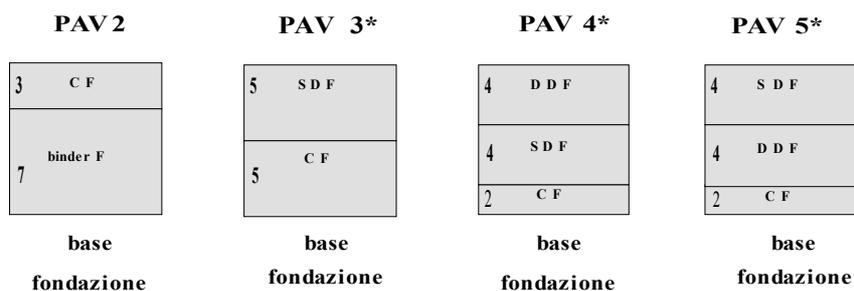
## 1. LA SPERIMENTAZIONE

Un autoveicolo in marcia su una strada costituisce una sorgente emissiva in movimento che produce inquinamento acustico; le strategie da attuare per contrastare tale inquinamento devono essere rivolte sia a ridurre i livelli di emissione sia a limitare la propagazione di energia sonora dalla sorgente al recettore. Ne consegue che il progettista di una pavimentazione deve contribuire alla riduzione della potenza sonora della sorgente associata ai fenomeni di contatto pavimentazione-pneumatico; cioè del rumore di rotolamento. Tale riduzione può essere accentuata attraverso l'ottimizzazione delle proprietà acustiche della pavimentazione sfruttando le capacità d'assorbimento della stessa. E' in questa direzione che si sviluppa la presente ricerca il cui principale obiettivo è di confrontare acusticamente alcune pavimentazioni; pertanto si sono trascurati parametri quali la qualità e quantità del flusso di traffico, la distribuzione temporale del rumore, concentrandosi su quelli che fossero più idonei per valutare in modo oggettivo il disturbo da rumore:

- il livello di rumore percepito istante per istante;
- lo spettro delle frequenze componenti il rumore;
- l'assorbimento acustico della superficie stradale.

In particolare la ricerca analizza il comportamento di quattro tipologie di pavimentazioni stradali flessibili differenti per le caratteristiche geometriche e meccaniche dei soli strati superficiali; quelle legate agli strati di base e di fondazione, invece, sono mantenute volutamente costanti: la prima pavimentazione è del tipo chiuso, la seconda è costituita da una drenante monostrato, la terza da un classico drenante bistrato ed infine la quarta da un drenante bistrato a porosità invertita. La Figura 1 mostra i relativi schemi con l'indicazione delle sigle e degli spessori adoperati nella sperimentazione. La pavimentazione PAV2 si riferisce ad una sovrastruttura chiusa, PAV3\* ad una drenante monostrato, PAV4\* ad una drenante bistrato, PAV5\* ad una drenante bistrato invertita.

**Figura 1 – Schema delle pavimentazioni**



In particolare si osserva che:

- l'intero pacchetto superficiale, legato a bitume presenta, pur nelle diverse combinazioni, il medesimo spessore (cm10);
- la pavimentazione PAV 2, di tipo tradizionale, impermeabile, è assunta quale riferimento per i successivi confronti;
- la pavimentazione PAV 3\*, presenta il manto d'usura (SDF) fibrorinforzato, drenante a permeabilità molto elevata (>25%) ed un sottostante binder (CF) in conglomerato chiuso; essa è inquadrabile nella tipologia delle pavimentazioni a singolo strato drenante;

- la pavimentazione PAV 4\* rientra nella tipologia delle pavimentazioni a doppio strato drenante caratterizzato dallo strato superiore (DDF) a minore porosità ( $n > 20\%$ ) rispetto a quello sottostante (SDF) ( $n > 25\%$ );
- la pavimentazione PAV 5\*, infine, è del tipo a doppio strato drenante nel quale lo strato superiore (SDF) presenta una più elevata porosità ( $n > 25\%$ ) rispetto a quello sottostante ( $n > 20\%$ ); ciò al fine di confrontare questa pavimentazione con quella classica contrassegnata dalla sigla PAV4\*.

## 2. I MATERIALI

Il bitume adoperato è del tipo hard con l'aggiunta di polimero SBS già premiscelato nella misura del 6% del peso del bitume (Tabella 1). Le caratteristiche delle fibre in poliestere sono riportate nella Tabella 2, mentre la tabella successiva mostra la tipologia, la località di provenienza e la percentuale delle frazioni granulometriche inserite in ciascuno strato.

**Tabella 1 - Caratteristiche del bitume (hard)**

Polimero modificante SBS	%	6
Penetrazione a 25°C	dmm	50±60
Punto di rammollimento minimo del bitume di base	°C	68
Incremento del punto di rammollimento	°C	5
Punto di rottura Frass	°C	<-15
Viscosità dinamica a 160°C	Pa s	<0,8
Ritorno elastico a 25°C	%	>70
Perdita per riscaldamento (volatilità) a 163°C	%	<0,8

**Tabella 2 - Caratteristiche delle fibre**

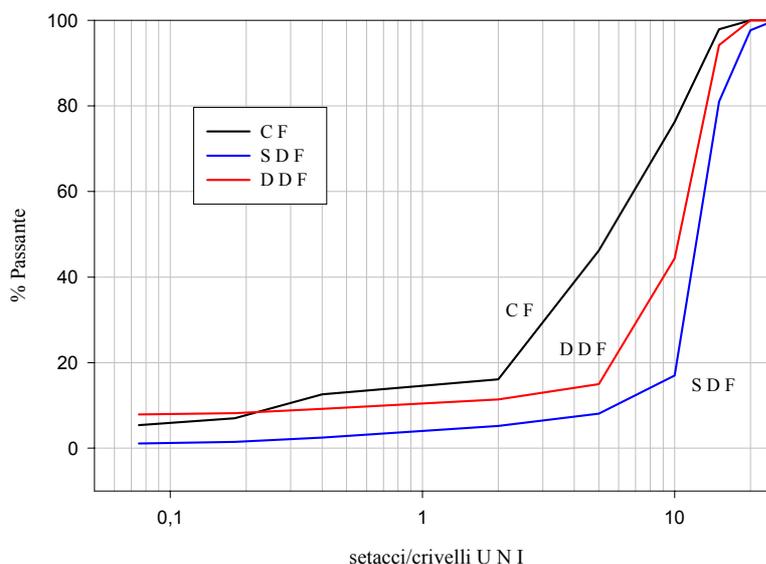
Diametro	mm	0,038±0,01
Lunghezza	mm	6,35
Densità (sciolta)	g/cmc	1,40
Temperatura di fusione	°C	~500
Temperatura di accensione	°C	~1000
Resistenza alla trazione	daN/cm <sup>2</sup>	5.000

**Tabella 3 - Aggregati**

$\Phi_{\min}/\Phi_{\max}$	origine	cava	località	CF	SDF	DDF
18/22	basaltica	Pennacchio	Roma	-	5%	-
12/20	basaltica	Tecnobeton	Cassino	7%	-	20%
12/18	basaltica	Pennacchio	Roma	-	70%	-
8/12	basaltica	Tecnobeton	Cassino	35%	17%	65%
3/10	dolomitica	Fices	Lecce	13%	-	-
0/3	calcarea	Lastrabi	Bitetto	45%	8%	7%
filler	cemento42.5			-	-	-
totale				100%	100%	100%

Al fine di accentuare il più possibile la porosità degli strati drenanti onde facilitare la definizione di correlazioni tra la dimensione massima degli aggregati, il diametro medio della rete di canalicoli presenti all'interno delle miscele porose e gli aspetti legati alla fonoassorbenza ed alla portanza della pavimentazione, si è ritenuto opportuno aggiungere alla sola miscela SDF un modesto quantitativo di materiale basaltico avente pezzatura leggermente più elevata rispetto a quella normalmente utilizzate in ambito stradale. Lo scheletro litico delle miscele drenanti SDF e DDF appare caratterizzato da una ridotta quantità di sabbia in linea, quindi, con quanto riportato nella corrente bibliografia. Sui materiali costituenti i singoli strati sono state effettuate diverse prove di laboratorio alcune delle quali sono riassunte nella Figura 2 e nella Tabella 4.

**Figura 2 – Analisi granulometrica delle miscele**



**Tabella 4 – Alcuni test di laboratorio sulle miscele**

		<b>CF</b>	<b>SDF</b>	<b>DDF</b>
vuoti	%	5,0	26,0	21,5
K (Darcy)	cm/sec	$1 \cdot 10^{-7}$	0,72	0,17
massa v. granuli	g/cmc	2,75	2,81	2,82
$\gamma$ Marshall	g/cmc	2,39	1,92	2,05
bitume/inerti	%	6,0	5,1	4,8
bitume/congl.	%	5,66	4,85	4,58
stabilità Marshall	Kg	1.342	511	660
scorrimento Marshall	mm	3,5	2,2	2,2

### 3. COMPORTAMENTO ACUSTICO DELLE PAVIMENTAZIONI

E' noto che un autoveicolo in marcia su una strada è una sorgente emissiva in movimento che produce inquinamento acustico; le strategie da attuare per contrastare tale inquinamento devono essere rivolte sia a ridurre i livelli di emissione sia a limitare la propagazione di energia sonora dalla sorgente al recettore. Ne consegue che il progettista di una pavimentazione deve contribuire alla riduzione della potenza sonora

della sorgente associata ai fenomeni di contatto pavimentazione-pneumatico; cioè del rumore di rotolamento. Tale riduzione può essere accentuata attraverso l'ottimizzazione delle proprietà acustiche della pavimentazione sfruttando le capacità d'assorbimento della stessa. Poiché tra gli obiettivi della ricerca vi è quello di confrontare acusticamente le pavimentazioni in esame, si sono trascurati parametri quali la qualità e quantità del flusso di traffico, la distribuzione temporale del rumore, concentrandosi su quelli che fossero più idonei per valutare il modo oggettivo il disturbo da rumore:

- il livello di rumore percepito istante per istante;
- lo spettro delle frequenze componenti il rumore;
- l'assorbimento acustico della superficie stradale.

Altri parametri quali ad esempio la caratterizzazione acustica dell'ambiente in cui il rumore viene immesso, cioè il cosiddetto rumore di fondo riscontrabile in assenza della sorgente disturbante, è stato volutamente trascurato in quanto alcune prove sono state compiute lontano da altre sorgenti inquinanti. Il coefficiente d'assorbimento acustico è certamente il parametro più usato per la certificazione delle proprietà assorbenti dei materiali; è quindi considerato, nonostante presenti alcuni inconvenienti, un riferimento di primaria importanza per tentare un confronto con le miscele tradizionali, chiuse.

Dai risultati sperimentali ottenuti, si sottolinea come l'efficacia acustica delle pavimentazioni fonoassorbenti, almeno nelle bande di frequenza osservate, sia da attribuire a due fenomeni:

- l'assorbimento locale di energia sonora;
- l'attenuazione sonora lungo la propagazione delle onde sonore.

### 3.1. Caratteristiche dei provini sottoposti al test di Kundt.

Le caratteristiche dei provini sottoposti al test di Kundt (Tabella 5) risultano praticamente coincidenti con quelle delle miscele oggetto della sperimentazione iniziale e contrassegnate con un asterisco.

**Tabella 5 – Caratteristiche dei provini sottoposti al test di Kundt**

Provino n.	Peso Volume (gr/cmc)			Porosità (%)		
	CF	SDF	DDF	CF	SDF	DDF
1	2,40	1,90	2,06	4,5	27,0	21,0
2	2,41	1,89	2,02	4,0	27,5	22,5
3	2,39	1,75	2,09	4,5	33,0	20,0
4	2,40	1,89	2,01	4,5	27,5	23,0
5	2,40	1,85	2,05	4,5	29,0	21,5
*	2,39	1,92	2,05	-	26,0	21,0

La Tabella 6 mostra per ciascun provino l'iter seguito per la determinazione della porosità efficace degli strati drenanti. Si è proceduto, infine, alla determinazione sperimentale dei diametri medi ( $\Phi$ ) dei canalicoli intergranulari facendo passare attraverso ciascun provino una quantità costante (50 grammi) di materiale fino, monogranulare, compreso in un ristretto intervallo definito dai setacci della serie ASTM 200 (0,074mm), 100 (0,149mm), 50 (0,297mm), 30 (0,590mm), 16 (1,19mm), 8 (2,38mm). I valori medi su due provini per ciascuno degli intervalli utilizzati sono riepilogati nella Tabella 7.

**Tabella 6 - Porosità efficace dei provini di Kundt.**

Miscela	Provino	H	$\Phi$	Peso	Volume	H <sub>2</sub> O di saturazione	Vuoti non comunicanti	Porosità Efficace
	n.	cm	cm	g	cmc	cmc	%	%
S D F	1	6,40	9,52	864,0	455,57	97,0	5,9	21,1
	2	6,36	9,57	865,6	457,25	92,5	7,4	20,1
	3	6,68	9,55	837,7	478,25	111,1	9,8	23,2
	4	6,24	9,60	854,7	451,43	89,0	7,9	19,6
	5	6,88	9,52	907,4	489,48	113,0	5,8	23,2
	media							
D D F	1	6,08	9,61	907,3	439,96	55,0	8,6	12,4
	2	6,20	9,61	909,0	449,48	70,0	7,0	15,5
	3	6,10	9,58	917,5	439,42	72,0	3,6	16,4
	4	6,37	9,64	933,0	464,69	74,0	7,1	15,9
	5	6,19	9,54	909,3	442,50	65,0	6,6	14,9
	media							

**Tabella 7 – Diametro medio canalicoli delle miscele drenanti SDF e DDF**

setacci	ASTM superiore	200	200	100	50	30	16
	ASTM inferiore		100	50	30	16	8
$\Phi$ medio (mm) canalicoli		0,074	0,111	0,223	0,443	0,890	1,785
S D F	valore medio (g)	50	50	48	39	33	2
	% media di passante	100	100	95	79	67	4
D D F	valore medio (g)	50	47	40	34	19	0
	% media di passante	100	94	80	68	18	0

Dall'esame della Tab.7 si osserva che:

- il diametro medio della rete di canalicoli presente nelle miscele SDF dei provini di Kundt è con buona approssimazione maggiore di 0,223 mm ed inferiore a 0,890 mm;
- il diametro medio della rete di canalicoli presente nella miscela DDF è certamente compreso nel range 0,111mm e 0,443 mm, con punte di 0,890 mm.

### 3.2. Analisi delle strutture spettrali delle pavimentazioni

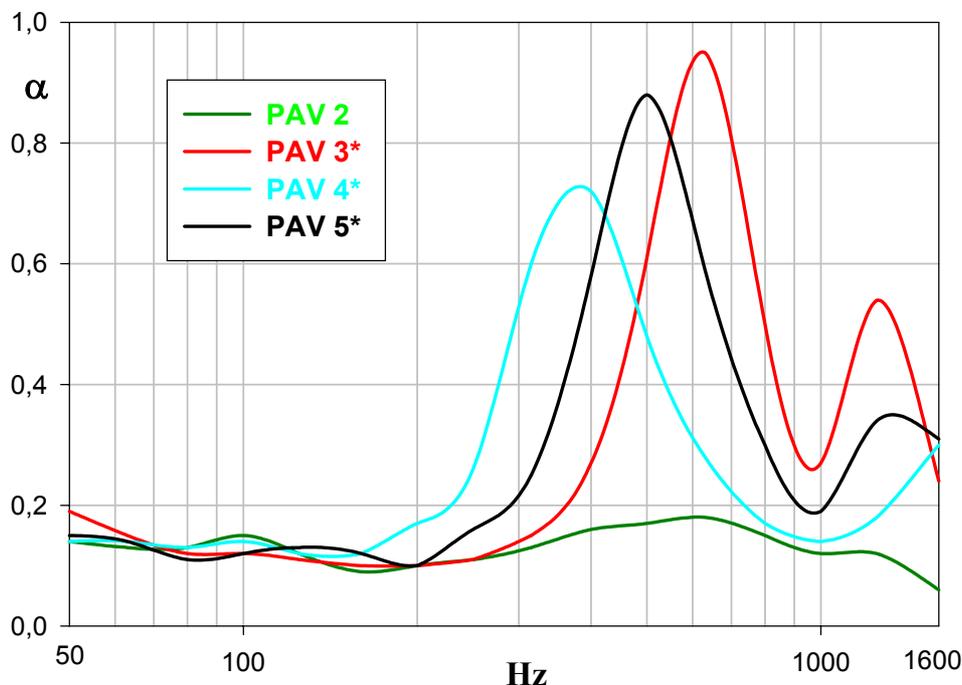
Si sono sottoposte al test di Kundt le pavimentazioni oggetto della presente ricerca con l'avvertenza di interporre tra due strati contigui un leggero film di bitume modificato.

Dall'esame della Figura 3 e della Tabella 8 sono emerse le seguenti considerazioni.

- Ad eccezione della pavimentazione tradizionale in conglomerato bituminoso impermeabile PAV 2, quelle drenanti PAV 3\*, PAV 4\*, PAV 5\*, mostrano numerosi e ripetuti massimi.
- I migliori risultati sono stati ottenuti dalla sperimentazione sulle pavimentazioni aventi un solo strato drenante PAV 3\*, seguite da quelle a doppio strato drenante invertito PAV 5\* e dalla classica pavimentazione a doppio strato drenante avente lo strato d'usura a permeabilità inferiore rispetto a quello sottostante, PAV 4\*.
- I max assoluti di  $\alpha_0$  si spostano verso sinistra passando da una pavimentazione ad un unico strato drenante a due strati drenanti.

- Appare evidente un massimo relativo di tutte le pavimentazioni drenanti, con gli strati comunque posizionati, intorno ai 1.300 ÷ 1.400 Hz.

**Figura 3 - Coefficienti d'assorbimento acustico delle pavimentazioni**



**Tabella 8 – Il coefficiente  $\alpha$  al variare della sovrastruttura**

Pavimentazione	PAV 2	PAV 3*	PAV 4*	PAV 5*
Spessore (cm)	3+7	5+5	4+4+2	4+4+2
$\alpha_{\max}$ assoluto - (Hz)	0,18 (600)	0,98 (600)	0,72 (400)	0,88 (500)
$\alpha_{\max}$ relativo - (Hz)	0,13 (1.200)	0,51 (1.300)	0,30 (1.600)	0,41 (1.400)

#### 4. CONFRONTO TRA LE PAVIMENTAZIONI

Le più elevate riduzioni in dB delle pavimentazioni drenanti possono essere comprese solo in termini di molteplicità delle riflessioni delle onde acustiche tra la superficie stradale ed il sottoscocca del veicolo, non già per alcuni valori elevati del coefficiente d'assorbimento acustico. Infatti, basandosi esclusivamente sui valori numerici di  $\alpha$ , nell'ipotesi che il campo sonoro nello spazio compreso tra la superficie stradale ed il sottoscocca, posto ad altezza  $h$  dalla sede stradale, sia di tipo diffuso, la densità d'energia sonora può essere scritta nella forma:

$$e = \frac{4W}{Sc\alpha} \quad (1)$$

dove:

- $W$  è la potenza acustica del rumore aerodinamico e del rumore del veicolo, quest'ultimo generato dal motore, dalla ventola di raffreddamento, dal tubo di scappamento, dal condotto di aspirazione;

- $c$  velocità del suono nell'aria;
- $S$  area della superficie stradale sottostante il sottoscocca del veicolo;
- $a$  coefficiente d'assorbimento acustico della pavimentazione (avendo assunto uguale a zero quello del sottoscocca del veicolo).

Mentre l'energia acustica riverberante entro lo spazio delimitato dal e dalla veicolo pavimentazione sarà espressa da:

$$E = e S h \quad (2)$$

Ipotizzando che la pressione acustica media quadratica, alla frequenza  $f$ , alla distanza  $d$  e ad un'altezza di  $h$ , sia proporzionale, tramite una costante  $k$ , all'energia acustica  $E$  si può scrivere:

$$p^2(f) = k E \quad (3)$$

Combinando opportunamente le (1), (2) e (3), valide per qualsivoglia tipo di pavimentazione, si ottiene per la sovrastruttura PAV2, di tipo chiuso:

$$[p^2(f)]_{chiuso} = k e S h = \frac{4 k W h}{c a_{chiuso}} \quad (4)$$

e, analogamente per la generica pavimentazione fonoassorbente:

$$[p^2(f)]_{drenante} = \frac{4 k W h}{c a_{drenante}} \quad (5)$$

Attraverso la nota espressione:

$$L[dB] = 10 \text{Log} \left( \frac{p^2}{p_{rif}^2} \right) \quad (6)$$

è quindi possibile calcolare, per ciascuna frequenza  $f$  dello spettro acustico, la corrispondente variazione del livello di pressione acustica:

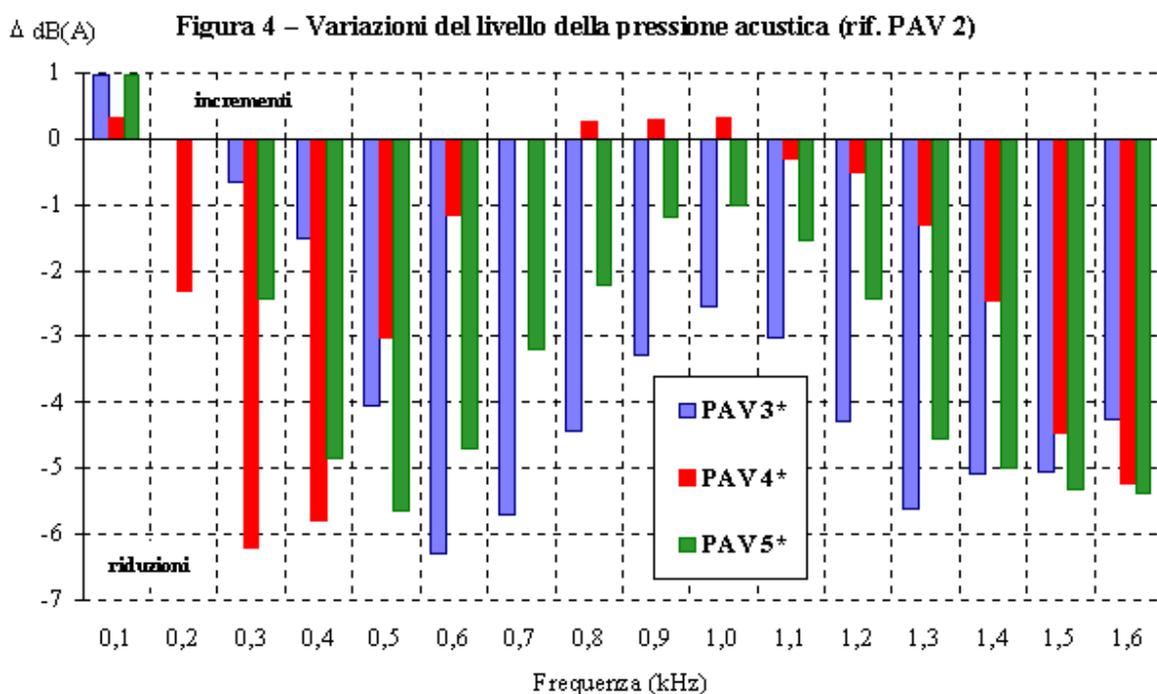
$$\Delta L[dB] = 10 \text{Log} \left( \frac{a_{chiuso}}{a_{drenante}} \right) \quad (7)$$

I segni + e - derivanti dall'applicazione della (7) indicano, rispettivamente, incrementi e riduzioni dei livelli di pressione acustica, espressi in dB, delle pavimentazioni fonoassorbenti rispetto a quella impermeabile PAV 2, assunta quale riferimento. Dall'applicazione della (7) si è elaborata la Figura 4 che confronta, a parità di spessore complessivo, le pavimentazioni PAV 3\* (monostrato drenante), PAV 4\* (bistrato drenante), PAV 5\* (bistrato drenante invertito). Si osserva che:

- fino ai 100 Hz, tutte e tre le pavimentazioni definite fonoassorbenti forniscono risultati peggiori rispetto alla pavimentazione di riferimento; l'incremento massimo del livello di pressione acustica è quasi 1 dB;

- dopo i 300 Hz e fino al termine delle frequenze esaminate, la pavimentazione PAV 3\* fornisce risultati migliori rispetto a quella di riferimento (il “guadagno” acustico raggiunge in corrispondenza di determinate frequenze picchi di 6 dB circa;
- osservazioni simili possono essere formulate per la PAV 5\*;
- la PAV 4\*, invece, manifesta un comportamento leggermente anomalo nel range 700÷1000 Hz in corrispondenza del quale non vi è alcuna riduzione del disturbo acustico; addirittura si riscontra in prossimità dei 1.000 Hz un leggero incremento valutabile in circa 0,3 dB.

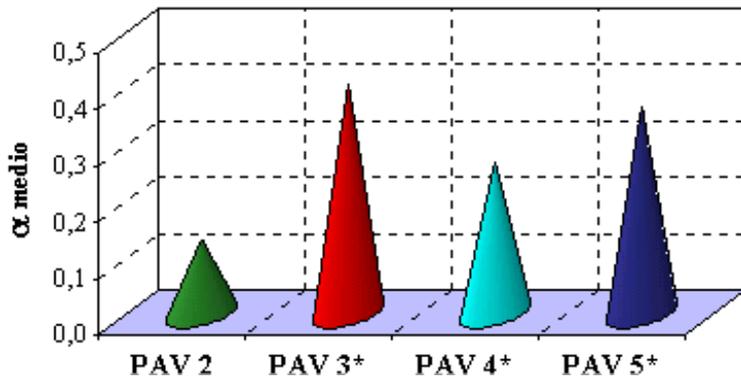
In definitiva il grafico chiarisce che nel progetto delle pavimentazioni cosiddette fonoassorbenti non si può prescindere da un attento esame delle frequenze acustiche.



## 5. CONCLUSIONI

Si è dimostrato che non esiste un ottimo assoluto del coefficiente d’assorbimento acustico di una manto stradale fonoassorbente; un corretto dimensionamento acustico della pavimentazione necessita della definizione dello spettro di emissione del rumore da attenuare che, a sua volta, dipende soprattutto dal tipo e dalla composizione del flusso veicolare. Così, ad esempio, la presenza di veicoli pesanti e modeste velocità di percorrenza esaltano le componenti associate alle basse frequenze, mentre sulle strade a scorrimento veloce avviene esattamente l’opposto. Ne consegue che l’approccio progettuale più corretto appare certamente quello di “calibrare” lo spettro del coefficiente d’assorbimento su quello di emissione (Figura 5); un percorso diverso porterebbe a conclusioni errate. Le miscele “drenanti” alle basse frequenze e per spessori ridotti, largamente utilizzati in questi ultimi anni, non generano eccessivi vantaggi acustici rispetto alle miscele chiuse. Se questo aspetto dovesse essere confermato da altri ricercatori, si potrebbe affermare che, ad esempio, è preferibile utilizzare i conglomerati drenanti solo lungo le strade a scorrimento veloce e non quali pavimentazioni di strade urbane.

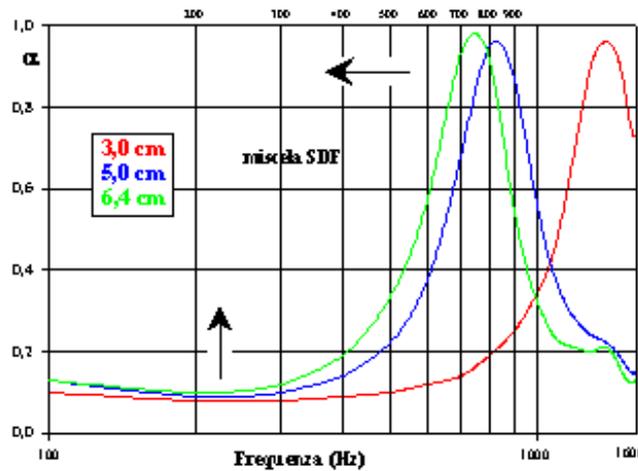
**Figura 5 – Il coefficiente d'assorbimento medio**



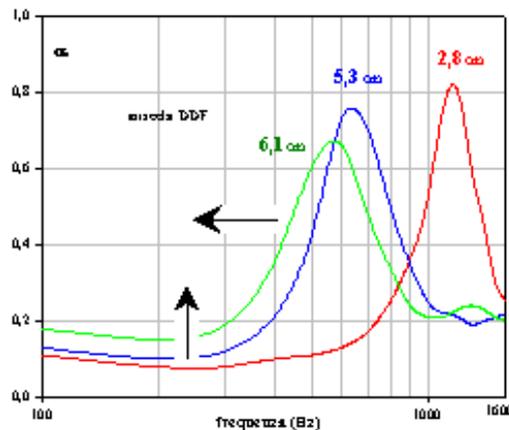
Dopo aver individuato la miscela drenante con il più elevato coefficiente di assorbimento, sorge per il progettista stradale il problema della definizione dello spessore ottimale da un punto di vista acustico dello strato d'usura. L'esigenza di conciliare le diverse funzioni svolte da questo strato,

infatti, non deve far trascurare un aspetto molto importante emerso durante la sperimentazione: il progetto acustico dello spessore dello strato d'usura è fortemente influenzato dalla porosità del conglomerato bituminoso che, a sua volta, si è dimostrato, condiziona l'assorbimento acustico della miscela stessa. Le Figure 6 e 7 mostrano l'andamento degli spettri acustici delle due miscele drenanti a diversa porosità e per spessori variabili dello strato superficiale.

**Figura 6 - Influenza dello spessore (miscela SDF)**

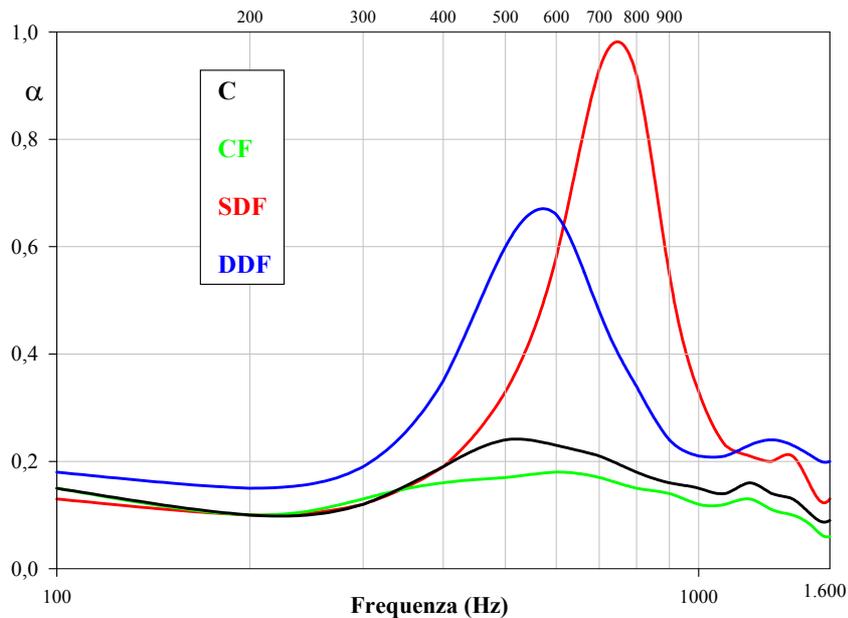


**Figura 7 - Influenza dello spessore (miscela DDF)**



Comune ai due grafici e la traslazione verso le basse frequenze degli spettri acustici al diminuire dello spessore dello strato superficiale; mentre si osserva che solo per le miscele ad elevatissima porosità (>25%) il valore del coefficiente d'assorbimento acustico rimane costante. Infine il grafico di Figura 8 evidenzia a parità di spessore dello strato d'usura la necessità di raggiungere un'elevata porosità dello strato superficiale solo per particolari valori delle frequenze.

**Figura 8 – Il coefficiente  $\alpha$  a parità di spessore della miscela**



### Ringraziamenti

Si desidera ringraziare per la collaborazione ricevuta e per la fornitura dei materiali:

- I Tecnici del Laboratorio prove della 01 dB di Torino
- I Tecnici del Laboratorio prove del DVT – Politecnico di Bari.