

# PROPIEDADES ACÚSTICAS INTRÍNSECAS DE LOS ASFALTOS POROSOS: POROSIDAD, TORTUOSIDAD Y RESISTIVIDAD AL FLUJO ESTÁTICO DE AIRE. DISEÑO ÓPTIMO DE UN ASFALTO

J. A. González Ganso<sup>1</sup>, C. García Serrada<sup>2</sup>, M. A. Morcillo López<sup>3</sup>, M<sup>a</sup> J. Hernández Echegaray<sup>4</sup>

<sup>1 3 4</sup> Fundación CIDAUT, Boecillo, Valladolid, SPAIN

<sup>2</sup> Construcciones y Obras Llorente, S.A. (COLLOSA), Valladolid, SPAIN

<sup>1</sup> [josgon@cidaut.es](mailto:josggon@cidaut.es), <sup>2</sup> [laboratorio@collosa.es](mailto:laboratorio@collosa.es), <sup>3</sup> [migmor@cidaut.es](mailto:migmor@cidaut.es), <sup>4</sup> [marher@cidaut.es](mailto:marher@cidaut.es)

## Resumen

El objetivo principal es el diseño de un asfalto poroso que reduzca la contaminación acústica, mediante el empleo de programas que permitan predecir el comportamiento vibroacústico.

La metodología de diseño consiste, en primer lugar, en la determinación, mediante el método indirecto, de las propiedades acústicas intrínsecas (porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo estático de aire) de diferentes tipos de asfaltos porosos realizados en el laboratorio de COLLOSA modificando la granulometría, el porcentaje y tipo de ligante y de betún. Este método está basado en el empleo de las medidas experimentales del coeficiente de absorción acústica de los materiales a caracterizar y de las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento acústico de materiales porosos, implementadas en el programa **CARAM**. A partir de las propiedades intrínsecas, del análisis de la relación que existe entre estas propiedades con los parámetros constructivos, y del espesor de la capa de rodadura se hizo el diseño óptimo de un asfalto, mediante un programa de predicción del comportamiento vibroacústico, **SIMAM**.

**Palabras-clave:** Asfalto, porosidad, resistividad, tortuosidad, modelo matemático.

## Abstract

One of the main objectives is the design of porous asphalt to reduce the acoustic contamination, using simulation tools to predict vibroacoustic behaviour.

The design methodology consists of determining the acoustic intrinsic properties (porosity, tortuosity and static flow resistivity) of different types of porous asphalts realized in COLLOSA laboratory modifying the granulometry, and the percentage and type of bitumen, by an indirect method. This method uses the acoustic absorption coefficient measurements and the mathematical equations that describe the acoustic behaviour of porous materials, implemented in the software **CARAM**.

Optimized asphalt was designed by means of the analysis of the relation between the intrinsic properties and the constructive parameters, and the vibroacoustic behaviour simulation software, **SIMAM**. The inputs for this software are these properties and the thickness of the asphalt layers.

**Keywords:** Asphalt, porosity, resistivity, tortuosity, mathematical model.

## 1 Introducción

En esta comunicación se presentan algunos resultados del proyecto de investigación sobre el estudio de las propiedades acústicas intrínsecas de asfaltos fabricados con y sin polvo de neumáticos usados que la empresa COLLOSA (Construcciones y Obras Llorente, S.A.) ha realizado junto con la Fundación CIDAUT. El proyecto surgió de la necesidad de mejorar la metodología de diseño de asfaltos, mediante el empleo de programas de simulación que permitan predecir su comportamiento acústico, optimizando tanto su composición, como el número ensayos, para conseguir una mejora en las acciones de reducción de la contaminación sonora debida al ruido de rodadura.

En este artículo se describe la metodología de diseño de un asfalto poroso optimizado acústicamente [4], manteniendo el resto de propiedades funcionales (seguridad, etc.), gracias al estudio de la relación que existe entre las propiedades acústicas intrínsecas (porosidad, tortuosidad, resistividad) y los parámetros constructivos (granulometría, huecos,...) y mediante un programa de predicción del comportamiento vibroacústico [3], SIMAM, a partir del espesor de la capa de rodadura y de las propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos realizados por COLLOSA, determinadas mediante el programa CARAM [2].

Una vez diseñado acústicamente el asfalto bicapa, se comprobó el buen comportamiento mecánico y funcional del asfalto antes de pavimentar un tramo experimental de carretera sobre el que se realizaron varios ensayos experimentales in-situ (absorción acústica, CPX y CPB) para determinar la mejora acústica de este tipo de asfaltos porosos bicapa.

## 2 Tipos de asfaltos porosos estudiados

Para poder diseñar un asfalto es necesario disponer de una base de datos de las propiedades acústicas de diferentes tipos de asfaltos y conocer la relación de estas propiedades con los parámetros de construcción. Esta es la razón de que el estudio comenzase con la fabricación en el laboratorio de COLLOSA de varias probetas de aglomerado, variando en cada una de ellas algunos de los parámetros de construcción: porcentaje y tamaño de áridos, lo que implica a su vez una variación en el porcentaje, tamaños y conectividad de los huecos en mezcla, y porcentaje de ligante. Igualmente, se ha cambiado el tipo de ligante empleado, comparando betunes normales con betunes modificados con polvo de neumáticos usados mediante vía húmeda [4].

Para estudiar estos factores se decidió fabricar 29 muestras de asfaltos porosos en dos tipos de mezclas, tipo S-12 y tipo PA-12, comprobando que los áridos empleados se encontraban dentro de los límites de los dos husos granulométricos. En primer lugar, se muestran las 15 probetas de asfaltos, en las que se ha variado principalmente el tipo de betún y el porcentaje del mismo respecto al porcentaje de áridos:



Figura 1. Muestras de PA12 con betún BM-3c, betún caucho 13% y S12 con betún normal 60/70

Típos de Betún	Nomenclatura	Tipo de mezcla	% Betun sobre Arido	% Betun sobre Mezcla	Arido 11/16	Arido 5/11	Arena 0/5	Filler	Suma	Relación Filler-Betún %
Betun + polímeros BMC3c	A11	PA-12	4	3.85	20	60	17	3	100	1.2
	A12	PA-12	4.5	4.31	20	60	16.5	3.5	100	1.2
	A13	PA-12	4.9	4.67	20	60	16	4	100	1.2
	A14	PA-12	5.5	5.21	20	58	17.5	4.5	100	1.2
	A15	PA-12	6	5.66	20	56	19	5	100	1.2
Betun + caucho al 13%	A21	PA-12	4	3.85	20	60	17	3	100	1.2
	A22	PA-12	4.5	4.31	20	60	16.5	3.5	100	1.2
	A23	PA-12	4.9	4.67	20	60	16	4	100	1.2
	A24	PA-12	5.5	5.21	20	58	17.5	4.5	100	1.2
	A25	PA-12	6	5.66	20	56	19	5	100	1.2
Betun normal 60/70	A31	S-12	4	3.85	20	34	45	1	100	1.2
	A32	S-12	4.5	4.31	23	35	40	2	100	1.2
	A33	S-12	5	4.76	20	32	46	2	100	1.2
	A34	S-12	5.5	5.21	21	35	41	3	100	1.2
	A35	S-12	6	5.66	17	32	48	3	100	1.2

Tabla 1. Probetas de asfaltos para realizar el estudio de la variación de betún

A continuación, se presentan las 14 muestras de asfalto, que se diferencian principalmente en los porcentajes de árido, para estudiar la influencia del porcentaje, tamaño y conectividad de huecos:



Figura 2. Muestras de PA12 con betún caucho 13% y S12 con betún normal 60/70

Típos de Betún	Nomenclatura	Tipo de mezcla	% Betun sobre Arido	% Betun sobre Mezcla	Arido 11/16	Arido 5/11	Arena 0/5	Filler	Suma	Relación Filler-Betún %
Betun + caucho al 13%	B11	PA-12	5.5	5.23	20	65	10.5	4.5	100	1.09
Betún normal 60/70	B12	S-12	5.0	4.79	20	65	13	2	100	0.71
Betun + caucho al 13%	A24	PA-12	5.5	5.21	20	58	17.5	4.5	100	1.2
Betun + caucho al 13%	B21	PA-12	5.5	5.19	20	50	25.5	4.5	100	1.29
Betún normal 60/70	B22	S-12	5.0	4.78	20	50	28	2	100	0.92
Betun + caucho al 13%	B31	PA-12	5.5	5.21	20	40	35.5	4.5	100	1.42
Betún normal 60/70	B32	S-12	5.0	5.20	20	40	38	2	100	0.98
Betun + caucho al 13%	B41	PA-12	5.5	5.20	20	35	40.5	4.5	100	1.5
Betún normal 60/70	B42	S-12	5.0	4.78	20	35	43	2	100	1.15
Betún normal 60/70	A33	S-12	5.0	4.76	20	32	46	2	100	1.2
Betun + caucho al 13%	B51	PA-12	5.5	5.22	20	25	50.5	4.5	100	1.61
Betún normal 60/70	B52	S-12	5.0	4.77	20	25	53	2	100	1.28
Betun + caucho al 13%	B61	PA-12	5.5	5.23	45	40	10.5	4.5	100	1.07
Betún normal 60/70	B62	S-12	5.0	4.78	45	40	13	2	100	0.69
Betun + caucho al 13%	B71	PA-12	5.5	5.19	30	40	25.5	4.5	100	1.29
Betún normal 60/70	B72	S-12	5.0	4.78	30	40	28	2	100	0.92

Tabla 2. Probetas de asfaltos para realizar el estudio de la variación del porcentaje de áridos

### 3 Propiedades acústicas de los asfaltos porosos

El comportamiento acústico de los materiales (propiedades acústicas extrínsecas como el aislamiento y la absorción acústica) es función de su estructura macroscópica, la cual puede determinarse a partir de las propiedades intrínsecas de un material (porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo estático de aire, densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson y amortiguamiento) [2].

Para diseñar un asfalto con un comportamiento acústico optimizado, se emplean programas de simulación basados en complejos modelos matemáticos de comportamiento que utilizan las propiedades intrínsecas de los asfaltos.

### 3.1 Coeficiente de absorción acústica a incidencia normal

En primer lugar se midió el coeficiente de absorción acústica,  $\alpha$ , a incidencia normal de todas las muestras de asfaltos, mediante el tubo de kundt de 100 mm de diámetro (rango 50 - 1600 Hz) y bajo la norma EN ISO 10534-2:2001 [14]. Es una propiedad extrínseca que depende del espesor y la frecuencia, y que es función de las propiedades intrínsecas del material (porosidad, densidad, etc.).

A continuación, se presentan las curvas de coeficientes de absorción acústica experimentales tanto de las 15 muestras realizadas para el estudio del tipo y del porcentaje de betún (Tabla 1), representándose en gráficas separadas según el tipo de betún empleado, como de las 14 muestras para el estudio de los huecos (Tabla 2). Las medidas se han llevado a cabo por las dos caras de las probetas (punto 1 y punto 2), por lo que se presentan datos correspondientes a 58 medidas:

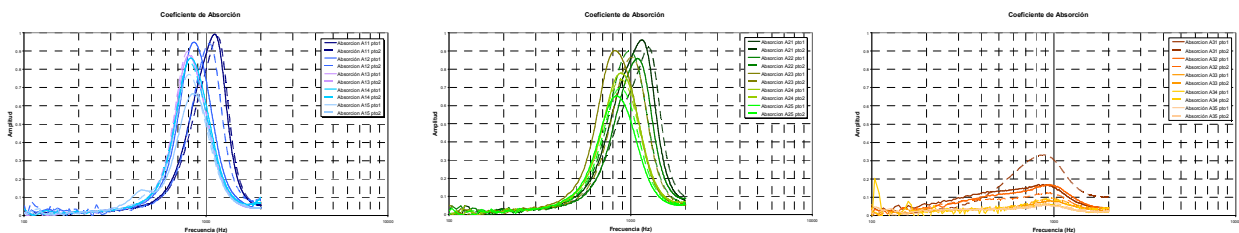


Figura 3. Coeficiente de absorción acústica de las muestras de la Tabla 1



Figura 4. Coeficiente de absorción acústica de las muestras de la Tabla 2

### 3.2 Propiedades intrínsecas Acústicas: Porosidad, Tortuosidad y Resistividad

Las propiedades intrínsecas acústicas de un material poroso, material con una parte sólida (estructura) y otra fluida como es el caso de los asfaltos porosos, determinan el comportamiento acústico de los materiales. Estas propiedades son inherentes al material, es decir, no dependen de la geometría, ni de la frecuencia, ni del espesor, y están condicionadas por los parámetros de fabricación.

Los materiales porosos se pueden clasificar, de forma general, según su comportamiento en: porosos elásticos, porosos ligeros, porosos rígidos. Existen multitud de modelos matemáticos que describen el comportamiento acústico de estos materiales, modelo de Delany Bazley, modelo de Mechel, modelo de Johnson-Champoux-Allard, modelo de Biot-Allard, etc., de todos ellos se escogió el modelo fenomenológico de Hamet por ser un modelo que predice bien el comportamiento acústico de los materiales porosos de estructura rígida (no depende de las propiedades intrínsecas mecánicas), como son en general los asfaltos, y que es función de sólo tres propiedades intrínsecas acústicas (no incluye la longitud característica térmica ni viscosa) [1] [2] [3] [6]:

- La **porosidad**,  $\phi$ , (adimensional): es la fracción de volumen de material ocupada por aire (huecos por dónde puede circular el aire).

- La **tortuosidad**,  $\alpha_\infty$ , (adimensional): es una medida geométrica de la desviación entre el camino seguido por la onda acústica y el camino directo (espesor).
- La **resistividad estática al flujo de aire**,  $\sigma$ , (Rayls/m o Ns/m<sup>4</sup>): es la resistencia al flujo de aire cuasi-estático a través de los poros del material, es decir, el retraso por fricción entre el aire y el esqueleto del material.

El modelo de Hamet [5] [12] [7] está definido por las ecuaciones del número de onda complejo,  $k$ , y de densidad compleja,  $\rho$ :

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0} \sqrt{\alpha_\infty \cdot F_\mu \cdot \left( \gamma - \frac{\gamma - 1}{F_\theta} \right)} \quad (1)$$

$$\rho = k \cdot \frac{\rho_0 \cdot c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \phi} \sqrt{\frac{\alpha_\infty \cdot F_\mu}{\gamma - \frac{\gamma - 1}{F_\theta}}} \quad (2)$$

donde  $f$  es la frecuencia,  $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire,  $\rho_0$  es la densidad del aire,  $\gamma$  es el coeficiente adiabático, y  $F_\mu$  y  $F_\theta$ :

$$F_\mu = 1 - j \frac{f_\mu}{f} \quad (3)$$

$$F_\theta = 1 - j \frac{f_\theta}{f} \quad (4)$$

donde  $f_\mu$  y  $f_\theta$  describen las dependencia de tipo viscoso y térmico respectivamente, siendo:

$$f_\mu = \frac{\phi \cdot \sigma}{2 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot \alpha_\infty} \quad (5)$$

$$f_\theta = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot N_{Pr}} \quad (6)$$

donde  $N_{Pr}$  es el número de Prandtl.

Cada una de las tres propiedades intrínsecas acústicas se puede medir experimentalmente [6] o se pueden calcular con un método indirecto [1] [2] [7], que consiste en primer lugar en medir la absorción acústica del asfalto monocapa mediante el tubo de kundt bajo la norma EN ISO 10534-2:2001 [14] y en segundo lugar, mediante el programa CARAM (CARacterización Acústica de Materiales), desarrollado en la Fundación CIDAUT, obtener las propiedades acústicas intrínsecas.

Este programa, basado en el método de las matrices de transferencia, consiste en la minimización de funciones, que incluyen las ecuaciones de los modelos matemáticos de predicción del comportamiento acústico de materiales porosos (modelo acústico de fluido equivalente de Johnson-Champoux-Allard y modelo de Hamet) y los valores de las curvas de absorción acústica medidas experimentalmente, además de la presión y temperatura a las que se realizaron las medidas.

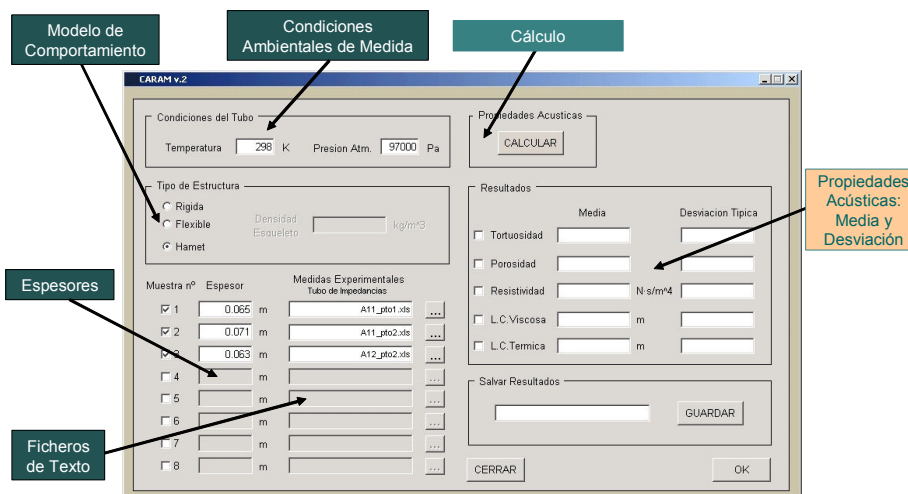


Figura 5. Interfase del programa CARAM

En las dos tablas siguientes se resumen los resultados obtenidos de las caracterizaciones de todas las probetas de asfaltos fabricadas: el porcentaje de huecos, el valor máximo del coeficiente de absorción acústica y su frecuencia, y las propiedades intrínsecas acústicas:

Tipos de Betún	Código	% Huecos en mezcla	Densidad	Espesor (mm)	Frecuencia (Hz)	Absorción Máxima	Tortuosidad		Porosidad		Resistividad	
							Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Betún + polímeros BMC3c	A11	22.41	1.932	65.6	1117	0.99	1.305	0.054	0.1628	0.0067	2903	60
	A12	19.64	2.001	64.0	861	0.95	1.742	0.338	0.1530	0.0205	3567	24
	A13	20.8	1.972	63.8	806	0.88	1.957	0.028	0.1282	0.0068	19311	1369
	A14	21.4	1.957	63.8	824	0.86	1.897	0.031	0.1233	0.0039	21620	1720
	A15	19.19	2.012	63.3	848	0.67	1.897	0.105	0.0969	0.0121	33991	6495
Betún + caucho al 13%	A21	25.54	1.854	68.5	1154	0.96	1.113	0.100	0.2018	0.0061	2715	593
	A22	21	1.967	62.5	1093	0.86	1.486	0.289	0.1525	0.0465	11033	10418
	A23	21.68	1.95	61.7	824	0.90	1.734	0.367	0.1430	0.0244	18257	404
	A24	20.44	1.981	61.4	885	0.78	1.828	0.010	0.1186	0.0052	29775	2446
	A25	18.43	2.031	60.3	830	0.65	1.991	0.105	0.1036	0.0010	39987	3818
Betún normal 60/70	A31	12.55	2.141	65.3	873	0.17	1.876	0.122	0.0528	0.0220	181245	95297
	A32	10.59	2.189	64.4	952	0.17	1.868	0.061	0.0311	0.0067	313435	72570
	A33	8.26	2.246	63.1	1007	0.08	1.660	0.052	0.0180	0.0022	586470	58789
	A34	7.45	2.266	61.2	916	0.06	1.976	0.089	0.0160	0.0046	709115	180362
	A35	6.79	2.282	61.5	928	0.06	2.008	0.047	0.0139	0.0017	847850	105104

Tabla 3. Absorción acústica máxima, y su frecuencia, Tortuosidad, Porosidad, Resistividad al flujo estático de aire de las probetas de la Tabla 1

Tipos de Betún	Código	% Huecos en mezcla	Densidad	Espesor (mm)	Frecuencia (Hz)	Absorción Máxima	Tortuosidad		Porosidad		Resistividad	
							Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Betún + caucho al 13%	B11	22.11	1.93	64.2	1013	0.94	1.569	0.009	0.1698	0.0029	3267	15
Betún normal 60/70	B12	23.84	1.887	67.1	1154	0.99	1.258	0.046	0.1604	0.0009	2790	4
Betún + caucho al 13%	A24	20.44	1.981	61.4	891	0.78	1.828	0.010	0.1186	0.0052	29775	2446
Betún + caucho al 13%	B21	18.34	2.024	62.2	684	0.45	2.031	0.411	0.0874	0.0083	60327	21958
Betún normal 60/70	B22	16.91	2.061	59.4	702	0.49	2.472	0.167	0.0892	0.0047	65279	12185
Betún + caucho al 13%	B31	10.89	2.211	59.5	946	0.17	1.930	0.017	0.0180	0.0185	370960	188749
Betún normal 60/70	B32	12.86	2.162	60.4	922	0.11	2.199	0.075	0.0363	0.0126	336330	124932
Betún + caucho al 13%	B41	11.92	2.171	65	908	0.16	1.807	0.020	0.0352	0.0021	263930	11059
Betún normal 60/70	B42	13.85	2.137	65.4	830	0.30	1.940	0.056	0.0488	0.0194	190330	100140
Betún normal 60/70	A33	8.26	2.246	63.1	1007	0.08	1.660	0.052	0.0180	0.0022	586470	58789
Betún + caucho al 13%	B51	12.65	2.153	63	952	0.08	1.768	0.005	0.0166	0.0015	527030	46330
Betún normal 60/70	B52	13.36	2.149	65	903	0.16	1.874	0.039	0.0340	0.0033	284945	22620
Betún + caucho al 13%	B61	24.56	1.857	66.8	1074	0.99	1.184	0.260	0.1445	0.0594	16542	18955
Betún normal 60/70	B62	24.92	1.86	66.3	1160	1.00	1.197	0.067	0.1549	0.0078	2614	186
Betún + caucho al 13%	B71	19.02	1.992	62.7	854	0.75	1.665	0.258	0.1148	0.0103	28872	1662
Betún normal 60/70	B72	18.32	2.022	60.8	848	0.72	2.156	0.282	0.1025	0.0032	40533	8445

Tabla 4. Absorción acústica máxima, y su frecuencia, Tortuosidad, Porosidad, Resistividad al flujo estático de aire de las probetas de la Tabla 2

Una vez obtenidas las propiedades intrínsecas, se pueden llevar a cabo las simulaciones acústicas mediante programas de elementos finitos, elementos de contorno o programas analíticos como el SIMAM (SIMulación Acústica de materiales Multicapa), desarrollado en la Fundación CIDAUT [3]. Este programa, basado en el método de las matrices de transferencia, tiene implementados multitud de modelos matemáticos para predecir el comportamiento vibroacústico (absorción y aislamiento acústico) de materiales multicapa. Este programa permite introducir diferentes tipos de materiales (porosos, sólidos y fluidos), distintas configuraciones de capas de materiales, espesores, ángulos de incidencia... Las hipótesis en las que se basa este programa son: resolución de problemas bidimensionales (materiales con dimensiones laterales infinitas), las capas del material son homogéneas e isotrópicas transversalmente y la onda de incidencia es plana (con un ángulo de incidencia cualquiera, incluso campo difuso).

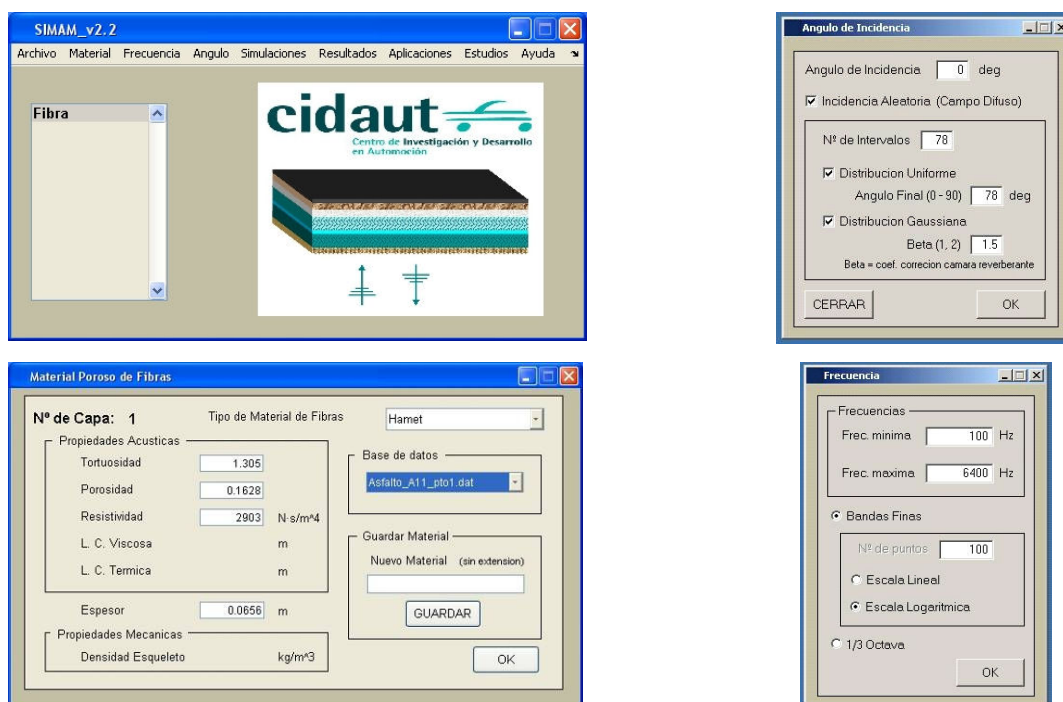


Figura 6. Interfase del SIMAM

En los siguientes gráficos se muestran, a modo de ejemplo, las curvas de absorción acústica experimentales de las dos caras de dos de las 29 muestras medidas y calculadas con el SIMAM aplicando el modelo de Hamet y utilizando las propiedades intrínsecas (porosidad, tortuosidad, y resistividad) obtenidas en la caracterización. Se observa que los valores medidos y los obtenidos mediante simulación son muy semejantes, tanto en frecuencias como en niveles de absorción.

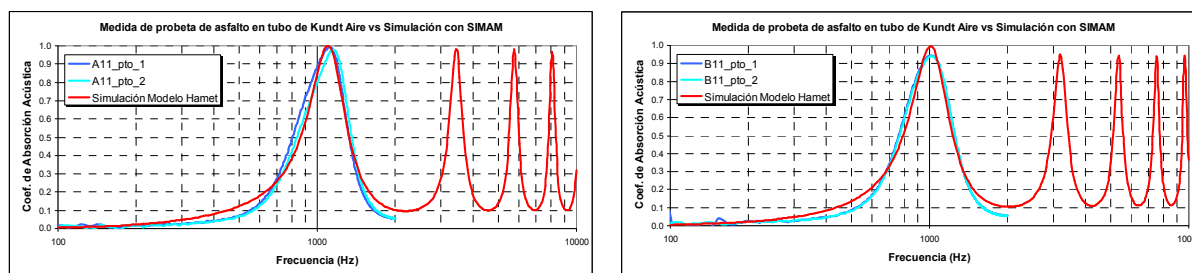


Figura 7. Comparativa de medida en tubo de kundt versus simulación de las muestra A11 y B11

Del análisis de las todas las curvas de absorción acústica y de las propiedades intrínsecas (porosidad, tortuosidad y resistividad estática del flujo de aire) se han extraído las siguientes conclusiones:

- Los porcentajes de los diferentes tamaños de áridos influyen en las dimensiones, porcentaje y conectividad de los huecos, y en la forma de los caminos recorridos por la onda acústica durante su propagación, y éstos a su vez a la porosidad, a la tortuosidad y a la resistividad.
- Al aumentar el porcentaje de áridos de menor tamaño existen menos huecos en la mezcla debido a que se introducen en los espacios de los áridos grandes. Cuanto mayor es el porcentaje de huecos en mezcla mayor es el coeficiente de absorción acústica.
- El tipo de betún tiene poca influencia en la absorción acústica, pero al aumentar el porcentaje de betún, hasta un valor límite, se reduce la absorción acústica y la frecuencia de máxima absorción ya que se reduce el porcentaje de huecos.
- Cuanto mayor sea el espesor del asfalto, menores son las frecuencias de los picos de absorción acústica.
- La porosidad está muy relacionada con el porcentaje de huecos de las muestras, cuanto mayor es el porcentaje de huecos mayor es la porosidad. La porosidad no influye sobre la frecuencia de máxima absorción, pero en cambio cuanto mayor sea la porosidad mayor es el nivel de absorción acústica para cualquier frecuencia y mayor es el ancho de pico.
- La tortuosidad influye en la absorción acústica máxima, reduciéndose la frecuencia y la absorción acústica máxima (en menor medida) cuanto mayor es el valor de la tortuosidad. En cambio, los valores mínimos de absorción acústica son independientes de la tortuosidad. La tortuosidad es menor cuanto mayor es el porcentaje de huecos de las muestras. Al aumentar el porcentaje de betún se aumenta la tortuosidad.
- La resistividad influye en el nivel de absorción acústica para cualquier frecuencia, en el ancho de pico, y en la frecuencia de máxima absorción acústica. Para valores pequeños de resistividad, la absorción acústica es mayor en los picos y menor en los valles, tendiendo a igualarse estos valores cuando se aumenta la resistividad. Al aumentar la resistividad, la frecuencia de los picos de absorción acústica máxima se reduce. En el caso de mezclas con bajo porcentaje de huecos, la resistividad es muy alta, y en general decrece al aumentar el porcentaje de huecos. Al aumentar el porcentaje de betún se aumenta la resistividad.

#### **4 Diseño de un asfalto poroso acústicamente optimizado**

El fin del diseño de asfaltos acústicos, es conseguir un asfalto que tenga las mejores propiedades acústicas posibles, en función de los requerimientos de los sistemas que influyen en el ruido de una carretera, como son el tipo de vehículos (pesados o ligeros), las velocidades de circulación (altas o bajas), las condiciones meteorológicas..., mediante el control de los parámetros iniciales de fabricación (tamaño y porcentaje de áridos, tipo y porcentaje de betún, tamaño y porcentaje de huecos, espesor de las capas de asfalto, etc.) [4] [8] [9] [10] [11] [12].

En el diseño se ha tenido en cuenta la relación que existe entre los parámetros de fabricación y las propiedades intrínsecas acústicas, y otra serie de factores como son, el rango de frecuencias donde se desee absorber el ruido, además de:



- (i) **Macrotextura.** La macrotextura debe ser suficientemente profunda (mayor de 0.5 mm), utilizando áridos de tamaño pequeño y medio (menor de 10 mm).
- (ii) **Huecos.** A mayor porcentaje de huecos (15 - 25%) y conexión de huecos con la superficie y entre sí (más del 15%), mejor para la reducción de ruido de rodadura, por tanto el asfalto debe tener un bajo porcentaje de áridos de 4 - 10 mm, arena 0/5 y filler.
- (iii) **Megatextura:** minimizarla asegurando que la macrotextura sea homogénea.
- (iv) **Resistencia y rigidez.** Son función de la relación que existe entre el árido de tamaño grande y pequeño. Si se aumenta mucho el porcentaje de árido de gran tamaño causa una reducción de la rigidez a flexión debido a que aumenta el tamaño y porcentaje de huecos.
- (v) **Propiedades superficiales adecuadas** para proporcionar una circulación segura (resistencia al deslizamiento, resistencia a la rodadura, evacuación de agua...).
- (vi) **Durabilidad.** Resistencia de helada/deshielo, vida de servicio suficiente, pérdida a largo plazo de la reducción del ruido debido a la obstrucción de los poros.
- (vii) **Coste comparable** con los pavimentos convencionales.

La metodología de diseño ha consistido en la realización de multitud de simulaciones del comportamiento acústico de asfaltos con el programa SIMAM modificando, tanto el número de capas como sus espesores, y sus propiedades intrínsecas, hasta conseguir un asfalto poroso con un buen comportamiento acústico. En el apartado 5 se muestran los resultados acústicos que se han obtenido al pavimentar con dicho asfalto un tramo de carretera.

Se eligió un asfalto con caucho debido a que se mejora la interacción neumático - asfalto, reduciendo las vibraciones, lo cual a su vez genera un menor ruido de rodadura, y poroso bicapa puesto que, en general, tienen un buen comportamiento acústico en un rango de frecuencia más amplio de 800 - 3000 Hz, manteniendo el resto de los requerimientos anteriormente mencionados. En este sistema la capa inferior debe tener un espesor de 30 a 50 mm, formada por áridos de gran tamaño con una dimensión máxima de 10 - 16 mm para tener muchos huecos, en cambio la capa superior debe tener un espesor de 20 a 40 mm con áridos de pequeño tamaño de 5 a 7 mm, de forma que se comporte como tamiz, para proteger la capa inferior de la obstrucción con gravilla de gran tamaño y facilitar su limpieza, y conseguir fácilmente una megatextura lisa, produciendo una reducción del ruido de rodadura.

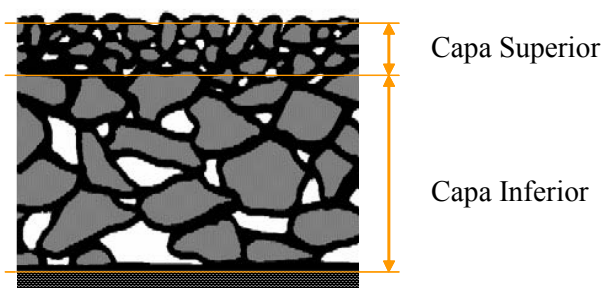


Figura 8. Asfalto poroso con dos capas muy diferenciadas de áridos

Una vez analizados los resultados de todas las simulaciones, y las posibilidades de fabricación de COLLOSA, se escogió un asfalto poroso bicapa con la siguiente composición:

Tipos de Betún	Tipo de Capa	Tipo de mezcla	% Betun sobre Arido	% Betun sobre Mezcla	Arido 11/16	Arido 5/11	Arena 0/5	Filler	Suma	Relación Filler-Betún %	% Filler TOTAL
Betun + caucho al 16%	Superior	PA-12	6.46	6.07	0	85	10	5	100	0.9	5.46
Betun + caucho al 16%	Inferior	PA-12	6.49	6.1	45	40	10	5	100	0.87	5.31

Tabla 5. Composición de cada una de las capas del asfalto poroso bicapa

## 5 Puesta en obra del asfalto diseñado. Validación experimental

Una vez diseñado acústicamente el asfalto y comprobado que cumplía con el resto de requerimientos funcionales, se implantó en un tramo de carretera. La puesta en obra en cuestión, llevada a cabo por COLLOSA, se trataba de una mejora de plataforma y firme de la carretera P-230 en el tramo entre Herrera de Pisuegra y Saldaña en la provincia de Palencia. Los trabajos consistieron en un reciclado in situ con cemento, extensión de una capa de base de aglomerado tipo S-20 y la extensión de la capa de rodadura tipo S-12 (asfalto de referencia). En el tramo de ensayo, de unos 1.5 kilómetros, sobre la mezcla base tipo S-20 se extendió la capa de rodadura del asfalto poroso bicapa diseñado, es decir, dos mezclas tipo PA-12 (la inferior más gruesa con un espesor de 4 cm y la superior más fina con un espesor de 3 cm) fabricadas con betún-caucho por vía húmeda con el 16% de polvo de neumáticos usados.

Tras la pavimentación del tramo con asfalto de referencia y el asfalto poroso bicapa, se realizó la caracterización “in situ” de la absorción acústica por parte de la Fundación CIDAUT, mediante el empleo de dos métodos de ensayo complementarios (tubo de impedancia [14] y señal MLS [13]). En la Figura 9 y Figura 10 se muestran las curvas de absorción acústica medidas con el tubo de kundt de los dos asfaltos, en las que se observa que los valores de los coeficientes de absorción del asfalto poroso bicapa son mucho mayores que los del asfalto de referencia.

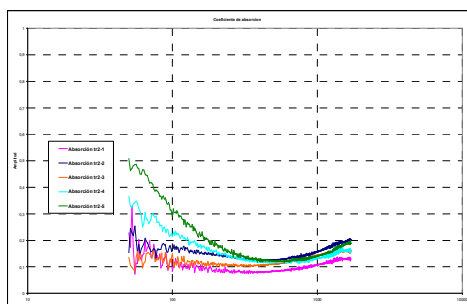


Figura 9. Coeficiente de Absorción del asfalto de referencia.

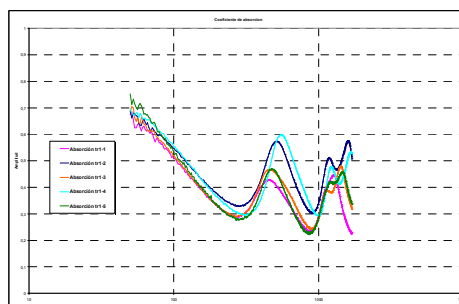


Figura 10. Coeficiente de Absorción del asfalto poroso bicapa.

Por último, el estudio se ha completado con otros ensayos de validación del ruido de rodadura generado por la carretera: Medida del ruido de rodadura mediante métodos de proximidad (método Close Proximity o método CPX) y Ensayos de pass-by para determinar el ruido de rodadura a una distancia específica (método Controlled Pass-By o método CPB). Los resultados obtenidos tras el ensayo CPX establecen diferencias promedio del orden de 3 dB(A) entre ambos asfaltos para velocidades de ensayo de 80 Km/h; mientras que para velocidades de referencia de 110 Km/h, las diferencias promedio son del orden de casi 4 dB(A). En el ensayo CPB se pueden apreciar diferencias promedio que están entorno a 4 dB(A) para cada una de las diferentes configuraciones ensayadas.

## 6 Conclusiones

Se ha descrito una metodología de diseño de asfaltos porosos optimizados acústicamente, manteniendo el resto de propiedades funcionales (seguridad, etc.), consistente en la simulación de diferentes tipos de asfaltos (granulometrías, número de capas, espesores, etc.), con un programa de predicción del comportamiento vibroacústico, SIMAM, a partir de las propiedades acústicas intrínsecas (porosidad,

tortuosidad y resistividad al flujo estático de aire). Dichas propiedades se pueden conseguir de una base de datos o por medio de la caracterización de asfaltos mediante la medida del coeficiente de absorción con un tubo de kundt y el empleo del programa CARAM.

Se ha evaluado y descrito como varía la absorción acústica (el nivel y la frecuencia), por medio del análisis de multitud de probetas de asfaltos porosos en las que se ha variado la composición de áridos para obtener asfaltos con diferente porcentaje y tamaños de huecos, además del tipo y el porcentaje de betún.

Se ha analizado la relación que existe entre las diferentes propiedades intrínsecas acústicas y los parámetros de construcción de los asfaltos: espesor, porcentaje y tamaño de huecos, tipo de betún y porcentaje de betún, tamaño de áridos...

Se ha diseñado un asfalto poroso bicapa, siendo cada capa mezclas tipo PA-12 pero con diferentes granulometrías, fabricadas con betún modificado con polvo de neumáticos usados a una concentración del 16% sobre el betún de penetración de partida, con un buen comportamiento acústico, capaz de reducir el ruido de rodadura. Posteriormente se ha pavimentado un tramo de carretera, sobre el que se han realizado varios ensayos experimentales in-situ (absorción acústica, CPX y CPB) para determinar la mejora acústica de este asfalto poroso bicapa, obteniendo muy buenos resultados.

## Agradecimientos

El presente trabajo se enmarca dentro de un proyecto de investigación que está siendo subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente a través de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 (A045/2007/1-05.2).

También agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia y del Fondo Social Europeo, debido a que parte del trabajo que se muestra en este artículo ha sido realizado por Jose Andrés González Ganso, Tecnólogo que trabaja en la Fundación CIDAUT.

## Referencias

- [1] Allard, J.F. Propagation of sound in porous media: *Modelling Sound Absorbing Materials*. Elsevier Applied Science, Belfast (UK), 1993.
- [2] González, J.A.; Cesteros, B.; Cordero, R. Caracterización de propiedades intrínsecas acústicas de materiales porosos mediante métodos indirectos. *37º Congreso Nacional de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica - Tecniacústica 2006*. Gandía, 18 a 20 de Octubre de 2006.
- [3] González, J.A.; Martín, J.S.; Sánchez, A. Método para la simulación acústica de las medidas con tubo de impedancia y cabina alpha de materiales multicapa. *36º Congreso Nacional de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica - Tecniacústica 2005*. Terrassa, 19 a 21 de Octubre de 2005.
- [4] García, C.; del Cerro, J.; González, J.A.; Morcillo, M.A. Propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos. Comparación de los aglomerados fabricados con y sin polvo de neumático. *ASEFMA 2008 - III Jornada Nacional - "ASEFMA más de 100 razones"*, Madrid, 24 de Enero de 2008.
- [5] Pfretzschner, J.; Rodríguez, R.M.; De la Colina, C.; Simón, F.; Moreno, A. Estudio teórico experimental de materiales granulares absorbentes preparados con granza de caucho. *28º*

- Congreso Nacional de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica - Tecniacústica 1997*. Oviedo, 5 a 7 de Noviembre de 1997.
- [6] Rodriguez, R.M.; Pfrezschner, J.; C. De la Colina, C.; Moreno, A.; Simón, F.; Determinación de los parámetros acústicos característicos de materiales porosos de diseño. *28º Congreso Nacional de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica - Tecniacústica 1997*. Oviedo, 5 a 7 de Noviembre de 1997.
- [7] Hübelt, J.; Boehm, M.; Hoffmann, R. Using an extended impedance measurement method for the estimation of porosity and flow resistance of porous material. *Twelfth International Congress on sound and Vibration*, ICSV Lisbon, July 11-14, 2005.
- [8] Hübelt, J.; Sarradj, E. A model for the acoustical optimisation of porous road surfaces. *Proceedings Internoise 2002*, Dearborn, MI, USA, August 19 -21, 2002.
- [9] Hübelt, J.; Lerch, T.; Sarradj, E. Porous road surfaces: Acoustical characteristics, models and measurements. *Proceedings 17th International Congress on Acoustics 2001*, Rom, September 2-7, 2001.
- [10] Bérengier, M.C.; Stinson, M.R.; Daigle, G.A.; Hamet, J.F. Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 101, 1997, pp. 155-162.
- [11] Malcolm, J.; Crocker, Zhuang Li and Jorge P. Arenas. Measurements of Tyre/Road Noise and of Acoustical Properties of Porous Road Surfaces. *International Journal of Acoustics and Vibration* Vol. 10 (2). June 2005.
- [12] Wai Keung lui; KaiMing Li. A theoretical study for the propagation of rolling noise over a porous road pavement. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116 (1), July 2004, pp. 313-322.
- [13] Garai, M.; Bérengier, M.C.; Guidorzi, P., L'Hermite, Ph. Procedure for measuring the sound absorption of road surfaces in-situ. *Euro-Noise 1998 Conference*, Munich, October 4-7 1998
- [14] UNE-EN ISO 10534-2:2002: Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.