

CARACTERIZACIÓN DE LA ABSORCIÓN SONORA DE CELULOSA SIN BLANQUEAR

PACS 43.55.Ev

Arenas, Jorge P.¹; Rebolledo, Juan¹; del Rey, Romina²; Alba, Jesús² ¹ Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile, Campus Miraflores, Casilla 567, Valdivia (Chile). Email: jparenas@uach.cl ² Escuela Politécnica Superior de Gandia. Universitat Politècnica de València. C/ Paraninfo nº1, 46730. Grao de Gandia (Spain).

ABSTRACT

Unbleached cellulose is composed by small fibrous crumbs that form a recyclable porous medium. Although this material has been used as sound absorber in a number of applications, few studies has been aimed to characterize its absorbing properties by an empirical model. In this work different samples of a layer of unbleached loose-fill cellulose were experimentally analyzed in their normal application conditions. The regression coefficients of an empirical model were calculated using numerical optimization. The model predicts the acoustical performance of this material well. In addition, the sound absorption of the cellulose is similar to a mineral fiber-based material.

RESUMEN

La celulosa sin blanquear está formada por pequeños gránulos fibrosos conformando un medio poroso reciclable. Aunque este material se usa como absorbente acústico en varias aplicaciones, pocos estudios se han enfocado en caracterizar sus propiedades absorbentes por un modelo empírico. En este trabajo, diferentes muestras de una capa de celulosa a granel sin blanquear fueron analizadas experimentalmente, en las condiciones normales de aplicación. Se calcularon los coeficientes de regresión de un modelo empírico usando optimización numérica. El modelo predice con buena precisión la absorción acústica. Además, la absorción sonora de la celulosa es similar a las obtenidas en fibras minerales.

1. INTRODUCCION

Es bien sabido que a las exigencias acústicas de los materiales tradicionales usados para el control de ruido, se han sumado el uso de materiales reciclados y/o amigables con el medio ambiente. Las fibras vegetales en distintas formas constituyen una buena alternativa.

Chile cuenta con una fuente importante de recursos de biomasa, tanto nativo como de plantaciones. El proceso industrial llamado Kraft, permite la generación de energía usando como combustible la lignina presente en la biomasa y el uso de la fibra como celulosa. Previo al proceso de blanqueo, el proceso no genera contaminación con elementos clorados, por lo tanto, se podría usar esta celulosa como elemento de aislación acústica, como una alternativa a las fibras minerales actualmente en uso. Sin embargo, las propiedades acústicas de la celulosa sin blanquear no han sido estudiadas previamente, lo cual representa la principal motivación de este trabajo.

En este estudio se determinó, mediante ensayos de laboratorio, el comportamiento como absorbente acústico de la fibra natural de pino (*Pinus radiata*), proveniente de la fabricación de celulosa, mediante el proceso Kraft. Estos resultados experimentales se comparan con los



resultados obtenidos con un modelo teórico desarrollado para explicar el comportamiento acústico de los materiales fibrosos.

2. FIBRA DE CELULOSA

La celulosa de madera es una fibra natural, que forma parte de la composición de las células de los árboles y que se usa principalmente para la fabricación de papel y sus derivados. Desde el punto de vista químico, es un polímero formado por una cadena de carbohidratos polisacáridos, siendo muy resistente e indisoluble en agua. La producción de fibra de celulosa, se puede realizar, mediante:

a) Proceso mecánico: La fibra se produce desfibrando los rollizos de madera mediante un proceso abrasivo que genera un aumento significativo de la temperatura, facilitando la separación de las fibras. Es un proceso muy eficiente pero produce un papel con restos de resinas, compuestos químicos y lignina, que le confiere el color café característico.

b) Proceso químico o Kraft: el cual básicamente consiste en someter a un proceso de cocción en grandes estanques, llamados digestores, de trozos de madera mezclada con agua y licor blanco, que es un compuesto formado por hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio Na₂S, compuestos químicos que ayudan en la extracción de la lignina. Este proceso es muy eficiente desde el punto de vista económico, ya que producto de esta cocción se logra el licor negro (mezcla de licor blanco y lignina), el que es usado como combustible. Se genera un residuo llamado licor verde, el cual es posteriormente tratado con cal y es transformado en licor blanco, generando así un proceso cerrado. Este proceso también es eficiente desde el punto de vista del producto ya que elimina gran parte de la lignina presente en la madera.

Para su comercialización se procede a blanquear la celulosa, siendo este un proceso generalmente muy contaminante, en el cual se le extrae la lignina residual, para lo cual se aplican reactivos químicos, tales como cloro puro (CI_2) , dióxido de cloro (CIO_2) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) .

En este trabajo se evalúa el uso de celulosa como elemento de aislación acústica, para lo cual se ha usado la fibra de celulosa sin blanquear, para evitar el efecto contaminante del proceso de blanqueado. El material se ha evaluado a granel, es decir, en la disposición física más común para usar este tipo de material en la práctica y se midieron sus características acústicas con diferentes espesores y para muestras completamente secas.

Como se puede observar, la celulosa a granel presenta características macroscópicas de tipo granular (ver Figura 1), mientras que en forma microscópica es una estructura de fibras (ver Figura 2). Por lo tanto, en rigor el mecanismo de absorción acústica es una combinación del comportamiento de un material fibroso y uno granular.

3. MODELO SEMIEMPIRICO

Para materiales fibrosos, homogéneos e isotrópicos, Delany y Bazley [1], establecieron que para una frecuencia dada, la impedancia característica (*Z*) y la constante de propagación (Γ) están dadas, respectivamente, por

$$Z = Z_0 \left(1 + C_1 \chi^{-C_2} - j C_3 \chi^{-C_4} \right)$$
⁽¹⁾

$$\Gamma = k \Big(C_5 \chi^{-C_6} - j \Big(1 + C_7 \chi^{-C_8} \Big) \Big)$$
(2)

donde $k=2\pi f/c$ es el número de onda de campo libre, *f* es la frecuencia del sonido, *c* es la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente, $\chi=\rho f/\sigma$ es un número adimensional, σ



es la resistividad al flujo, ρ es la densidad del aire a temperatura ambiente y $Z_0 = \rho c$ es la impedancia característica del aire.





200µm

Figura 1: Muestra de celulosa a granel no blanqueada.

Figura 2: Estructura microscópica de fibra de celulosa (fuente: Renewable Bioproducts Institute, Georgia Tech).

Del Rey et al. [2], establecen que el coeficiente de absorción a incidencia normal, se puede calcular, como

$$\alpha = \frac{4Z_0 Z_{dR}}{\left|Z_d\right|^2 + 2Z_0 Z_{dR} + Z_0^2} \tag{3}$$

donde la impedancia específica para una pared rígida, está dada por

$$Z_d = Z_0 \operatorname{coth}(\Gamma d) = Z_{dR} + j Z_{dI}.$$
(4)

En la ecuación anterior, *d* es el espesor de la muestra a ensayar y Z_{dR} y Z_{dL} son la parte real e imaginaria de la impedancia específica, respectivamente.

Los coeficientes de regresión, se obtienen minimizando, para cada frecuencia, una función de error cuadrático aplicada al coeficiente de absorción a incidencia normal calculado según la ecuación (3) [2], con respecto al obtenido según las ecuaciones (1) y (2) del modelo de Delany y Bazley [1]. Esta función de error cuadrático se define como

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \hat{a}_i)^2 \tag{5}$$

donde α_i es el coeficiente de absorción sonora medido a incidencia normal para una muestra de material en la *i*-ésima frecuencia y \hat{a}_i es el correspondiente valor estimado usando las ecuaciones (1) y (2).

El sistema de ecuaciones a resolver en el proceso de minimización es

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C_i} = 2\sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \hat{a}_i) \frac{\partial \hat{a}_i}{\partial C_i} = 0 \quad \text{para } i=1,\dots,8.$$
(6)



4. RESULTADOS

En particular se midieron como constantes físicas del material su resistividad al flujo de aire (mediante el método de flujo de aire) y su porosidad. Además, se estimó la tortuosidad de las muestras a partir de la fórmula empírica propuesta en el trabajo de Fatima and Mohanty [3]. Luego, se realizaron medidas en el tubo de impedancia para muestras del material con diferentes espesores (25, 50, 75 y 100 mm). Se consideró muestras de celulosa a granel con 0% de humedad las cuales fueron secadas en horno eléctrico durante 24 horas, a una temperatura de 105 °C. Usando una pesa electrónica y para un volumen conocido, se obtuvo un valor promedio de densidad igual a 96.4 kg/m³.

Se midió la resistividad al flujo de aire mediante un dispositivo construido en base a una modificación del trabajo de lannace et al. [4], para cuatro valores de espesor del material. El valor promedio obtenido para la resistividad al flujo de aire de la celulosa seca a granel es de 3786±375 Ns/m⁴.

Usando un porosímetro de Champoux [5], se midieron los valores de porosidad ϕ para 4 muestras de celulosa seca, obteniendo que el valor promedio de la porosidad para la celulosa a granel seca es 0,98±0,012. La tortuosidad estimada es de 1.01.

El coeficiente de absorción sonora a incidencia normal se obtuvo de acuerdo al método de ensayo descrito por la norma ISO 10534-2 [6]. Este método se basa en la medición de la función de transferencia entre dos micrófonos, ubicados a una distancia fija entre ellos, y montados al ras en las paredes del tubo. Para el ensayo se generó una onda de incidencia normal de características aleatorias mediante un altavoz y se midieron las presiones acústicas mediante los dos micrófonos. Las señales fueron procesadas mediante un sistema digital de análisis de señal. Se utilizó metacrilato transparente para construir el tubo de impedancia, de diámetro 50 mm. Por tratarse de una muestra a granel, fue necesario montar el tubo de impedancia en forma vertical, con la fuente de excitación puesta en la parte superior del tubo. Además, se diseñó un dispositivo porta muestra, el que va montado en voladizo en la parte inferior del tubo. Se realizaron cinco medidas para cada espesor y los resultados experimentales promediados se muestran en la Figura 3.



Figura 3: Resultados experimentales del coeficiente de absorción sonora a incidencia normal en función de la frecuencia, para muestras de celulosa seca a granel sin blanquear para diferentes espesores.



Observando los resultados de los coeficientes de absorción sonora se puede apreciar la típica forma de los gráficos para un material absorbente apoyado en una pared rígida y bajo la acción de una onda de presión sonora plana. Las curvas de absorción sonora versus la frecuencia presentan un claro aumento a medida que aumenta la frecuencia de excitación, presentándose una cierta inestabilidad a altas frecuencias con presencia de picos y valles. Se observa también que a medida que aumenta el espesor de la muestra, se logra un incremento de la absorción del sonido a bajas frecuencias.

Se implementó un programa computacional en MATLAB, con el cual se calcularon los coeficientes de regresión para las muestras ensayadas usando un método numérico de optimización para resolver el sistema de ecuaciones no lineales (6). La Figura 4 muestra la comparación entre los resultados experimentales y los del modelo. De esta forma, las ecuaciones para el cálculo de la impedancia característica y la constante de propagación quedan de la siguiente manera

$$Z = Z_0 \left(1 + 0.6224 \chi^{-0.0892} - j0.4816 \chi^{0.6147} \right)$$
⁽⁷⁾

$$\Gamma = k \Big(0.3952 \chi^{0.1273} - j \Big(1 + 0.5823 \chi^{0.0872} \Big) \Big)$$
(8)



Figura 4: Comparación de los valores predichos y medidos del coeficiente de absorción sonora a incidencia normal de celulosa seca a granel sin blanquear para diferentes espesores; — valores predichos, O resultados experimentales

Para describir cuantitativamente el grado de aproximación del modelo empírico, el error relativo de predicción se calculó usando la siguiente ecuación [7]

$$\overline{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| \hat{a}_i - \alpha_i \right|}{\alpha_i} , \qquad (9)$$



donde α_i es el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal medido, $\hat{a_i}$ es el correspondiente valor estimado a partir del modelo empírico y N es el número de medidas (10 mediciones para cada una de las cuatro espesores, esto es N=40). Los resultados para el error de predicción del coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia se muestran en la Figura 5.



Figura 5: Error relativo de predicción del coeficiente de absorción sonora para el método de predicción usado para la celulosa seca a granel

Se observa que el error relativo de predicción es grande para frecuencias bajas, con valores sobre el 35% a 100 Hz. A frecuencias más altas este error se reduce a menos del 10%. El error relativo de predicción promedio es de 4.17%, considerando el rango de frecuencias entre 300 y 3000 Hz. El error promedio para todos los datos es de 4.85%. Estos valores de error son comunes para este tipo de métodos empíricos y los resultados están de acuerdo a las observaciones realizadas recientemente por otros autores en el desarrollo de modelos para predecir la absorción de lanas minerales típicas [7]. Por lo tanto, los coeficientes de regresión calculados pueden ser aplicados con suficiente confianza en el modelo, para predecir el comportamiento acústico de la celulosa a granel.

5. CONCLUSIONES

A través del trabajo realizado, se puede concluir que se ha cumplido el objetivo general que era caracterizar el comportamiento de la fibra de celulosa de pino no blanqueada como material absorbente acústico. Para esta fibra de biomasa, se logró medir la resistencia al flujo, la porosidad y la absorción acústica, bajo diferentes condiciones de espesor.

La fibra de celulosa, que es un material renovable, presenta un comportamiento similar al de otros materiales aislantes provenientes de fibras naturales, con lo cual se puede considerar su uso como un material alternativo. Para esto faltaría hacer una evaluación económica, lo cual podría ser un desarrollo a futuro.

La determinación de las propiedades físicas del material permitió establecer nuevos coeficientes de regresión para las ecuaciones de Delany y Bazley. El error de aproximación total del método de predicción resultó ser menor al 5%, por lo cual se puede considerar una buena aproximación.



Se puede concluir que el material formado por celulosa a granel sin blanquear tiene un comportamiento de absorción sonora similar al de la fibra de vidrio y otros materiales manufacturados en base a fibras minerales, con la ventaja de ser un material reciclable, natural y amigable con el medioambiente. Este material tiene excelentes características para ser usado como aislante en aquellos lugares donde existen intersticios, ranuras y superficies irregulares, tales como áticos, subsuelos y cavidades de paredes.

Como trabajo futuro, se plantea medir un mayor número de muestras y caracterizar el material con algunos agregados, en particular aditivos no-tóxicos que añadan resistencia al fuego y a los insectos, para su uso como material de construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CONICYT-FONDECYT No. 1110605, y el BIA2013-41537-R que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Delany, M. E., and Bazley, E. N. (1970). "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," Appl. Acoust. 3(2), 105-116.
- [2] del Rey, R., Alba, J., Arenas, J. P., and Sanchis, V. (2012). "An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam," Appl. Acoust. 73(6-7), 604-609.
- [3] Fatima, S., and Mohanty, A. R. (2011). "Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials," Appl. Acoust. 72(2-3), 108-114.
- [4] Iannace, G., Ianniello, C., Maffei, L., and Romano, R. (1999). "Steady-state airflow and acoustic measurement of the resistivity of loose granular materials," J. Acoust. Soc. Am. 106(3), 1416-1419.
- [5] Champoux, Y., Stinson, M. R., and Daigle, G. A. (1991). "Air-based system for the measurement of porosity," J. Acoust. Soc. Am. 89(2), 910-916.
- [6] ISO 10534-2. (2001). "Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [7] Oliva, D., and Hongisto, V. (2013). "Sound absorption of porous materials Accuracy of prediction methods," Appl. Acoust. 74(12), 1473-1479.

