

Modelización matemática del proceso de compactación de residuos elastoméricos

M. Boix⁽¹⁾, A.V. Nadal-Gisbert⁽²⁾, F. Parres⁽²⁾, L. Agud⁽¹⁾, J.E. Crespo⁽²⁾,
A. Macías-García⁽³⁾

(1) *Departamento de Matemática Aplicada, Escola Politècnica Superior d'Alcoi. Universitat Politècnica de València, Plaça Ferrandis i Carbonell, 1, 03801, Alcoi, Alicante (Spain); mboix@mat.upv.es; lagudal@mat.upv.es*

(2) *ITM(Institut de Tecnologia de Materials), Escola Politècnica Superior d'Alcoi. Universitat Politècnica de València, Plaça Ferrandis i Carbonell, 1, 03801, Alcoi, Alicante (Spain); anadal@mcm.upv.es; fraparga@dimm.upv.es; jocream@dimm.upv.es*

(3) *Departamento de Electrónica e Ingeniería Electromecánica, Universidad de Extremadura, Avda. Elvas, 06071, Badajoz (Spain); amacias@materiales.unex.es*

RESUMEN

El propósito de este trabajo es estudiar el residuo elastomérico (Ground Tire Rubber: GTR, Crumb Tire Rubber: CTR) procedente del triturado de neumáticos fuera de uso (NFUs). El principal objetivo es obtener un modelo de comportamiento del GTR y CTR a lo largo de las diferentes presiones de compactación a fin de lograr la variación de densidad y con el objetivo de predecir la presión de compactación óptima para diferentes tipos de productos con diferentes aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

El volumen de neumáticos usados al año aumenta constantemente. La mayor parte son simplemente arrojados al aire libre o en los vertederos. Existen varios métodos de reciclaje; los neumáticos, una vez triturados y molidos, se pueden utilizar en aplicaciones de ingeniería civil, por ejemplo, como un aditivo en el pavimento de carreteras, superficies de zona de juegos, sistemas de drenaje, alfombrillas, etc. Una solución para el problema generado por los NFUs es reducir este volumen por medio de un proceso de triturado y molido seguido de una separación de los diferentes componentes de los neumáticos. En segundo lugar, una solución simple y económica es reciclar el GTR y CTR de diferentes tamaños, para obtener productos de características elastoméricas por medio de un proceso de compresión térmica.

En este trabajo, se propone un modelo de evolución de densidad frente a presiones de compactación con el objetivo de predecir la presión de compactación óptima [1]. Otros autores han propuesto previamente modelos de densificación. El modelo proporcionado por Coble [2-3] utiliza microfotografías de estructuras de poros y de contorno de grano en productos sinterizados y proporciona una relación entre la densidad relativa y dos parámetros: temperatura y tiempo. Los autores Nadal et al. [4] analizan el efecto de la temperatura, la presión y el tamaño de partícula del GTR y el CTR sobre las propiedades mecánicas de los productos obtenidos por compresión y sinterización.

El modelo propuesto tiene como objetivo desarrollar un modelo de compactación para el GTR y CTR que también se puede utilizar para la determinación de las presiones de

compactación necesarias para obtener diferentes grados de densificación lo que llevaría a obtener diferentes propiedades mecánicas y acústicas.

MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

En este trabajo se utilizó como materia prima GTR y CTR suministrados por INSATURBO S.A. (Aspe, España). Ambos fueron obtenidos de NFUs con diferente tamaño de grano. Se realizó un análisis de tamaño de grano de los GTR y CTR, así como una identificación del tipo de grano. Las muestras se pasaron a través de un conjunto de tamices CISA RP.09 (ASTM D-5603-96). Seguidamente se determinó la densidad de una muestra de la banda de rodadura del neumático (25 mm x 20 mm), obteniéndose el valor de densidad, $\rho_p=1.15 \text{ g/cm}^3$. A continuación, se realizó un proceso de compactación con la ayuda de una máquina de ensayo universal IBERTEST ELIB-50/W. Para este fin, un volumen del molde, V_a , se llenó con una masa M , en gramos de GTR o CTR. A partir de los valores de V_a y M la densidad aparente, ρ_a , se puede definir para una presión inicial de compactación $P = 0$. La densidad aparente es menor que la densidad intrínseca del material constitutivo del polvo, ρ_p .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los diferentes tamaños de grano, se compactaron muestras. En vista de los resultados experimentales, se propone un modelo para describir la evolución de la densidad del elastómero compactado.

Cuando comienza el proceso, aparecen mecanismos de acoplamiento. La primera etapa de acoplamiento y coordinación entre las partículas tiene lugar debido a la acción de presiones externas, P , y determina una reducción de volumen de huecos, V_h . El aumento de la densidad es una función directa del deslizamiento de las partículas con respecto a sus vecinos por la acción de presiones de compresión externas transmitidas P . Este deslizamiento es controlado por la fricción entre las partículas. El acoplamiento se ve obstaculizado por la fricción que se produce entre las propias partículas y entre las partículas y las paredes del molde. Planteamos la hipótesis de que el proceso de disminución de huecos es una función creciente con las presiones se muestra en la Figura 1.

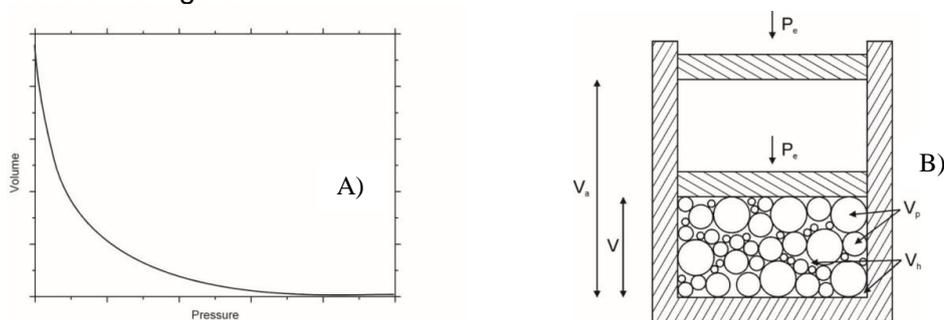


Figura 1. A) Relación entre el volumen de huecos y la presión aplicada. B) Distribución de volumen: V_a , V , volumen de huecos V_h

Una vez completado el deslizamiento, se producen deformaciones elásticas disminuyendo los mecanismos de deslizamiento. De acuerdo con la descripción de las etapas de acoplamiento y las deformaciones elásticas consolidadas, puede darse la hipótesis de que existe una correlación inversa entre los cambios en el volumen de huecos, V_h , y la presión aplicada P , ya que los mecanismos descritos son

complementarios. Con el fin de proporcionar una primera aproximación al fenómeno de compactación, se usan dos variables (llamadas K y n) y después de analizar varios modelos para la variación de volumen de huecos con la presión de compactación, se propone la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dV_h}{dP_c} = -K \cdot n \cdot P_c^{n-1} \cdot V_h \quad (1)$$

cuya solución es:
$$V_h = V_{h0} \cdot e^{-KP_c^n} \quad (2)$$

Siendo V_{h0} el volumen de huecos inicial y K y n dos parámetros, V_h el volumen de los huecos y P_c la presión de compactación.

Por otro lado, a fin de encontrar la correlación entre la densidad del material durante el proceso, ρ , y la presión de compactación, el volumen de huecos, V_h , debe ser correlacionado con la densidad del material, ρ . Aplicando el principio de conservación de la masa compactada, M :

$$M = V_a \cdot \rho_a = V_p \cdot \rho_p \quad (3)$$

Dónde: V_a = Volumen aparente del material antes del proceso de compactación. V_p = Volumen del material de la densidad ρ_p . ρ_a = Densidad aparente del material antes del proceso de compactación. ρ_p = Densidad del material.

Con la ecuación
$$\rho = \rho_p \cdot \left[\left[\frac{\rho_p}{\rho_a} - 1 \right] \cdot e^{-KP_c^n} + 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

proponemos un modelo para predecir la evolución de la densidad de un polvo de elastómero. Con el fin de obtener los valores de K y n , aplicamos logaritmos naturales dobles.

$$\ln K + n \cdot \ln P_c = \left[\ln \left[\ln \left(\frac{1}{t} \right) \right] \right] \quad \text{donde: } t = \frac{\left(\frac{\rho_p}{\rho} \right) - 1}{\left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right) - 1} \quad (5)$$

Por lo tanto, se verifica que el modelo sigue la ecuación: $y = nx + b \quad (6)$

Dónde:
$$x = \ln P_c, \quad y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{t} \right) \right), \quad b = \ln K \quad (7)$$

La representación de la ecuación (6) se muestra en la Figura 2A) para un tamaño de grano igual a 0.2 mm. A partir de la ecuación se obtienen valores de $n=0.66$ y $K=2.20$. La gráfica de la densidad frente a la presión de compactación correspondiente a polvos de elastómeros de diferentes tamaños de grano se muestran en la Figura 2B). Se puede observar una buena correlación entre los datos experimentales y los predichos. El valor del parámetro n permanece prácticamente constante independientemente del tamaño de grano y con un valor promedio alrededor de 0.665. Sin embargo, el parámetro K muestra una dependencia que es inversamente

proporcional al tamaño medio de las partículas del material utilizado, siguiendo una ecuación del tipo:

$$K = K_0 + A_1 e^{-BX} \quad (8)$$

Donde X es la granulometría utilizada. De este ajuste obtenemos un valor límite asintótico de $K_0 = 172.3$, para grandes tamaños de partículas, un factor preexponencial $A_1 = 48.8$ y un valor de $B = 0.489$.

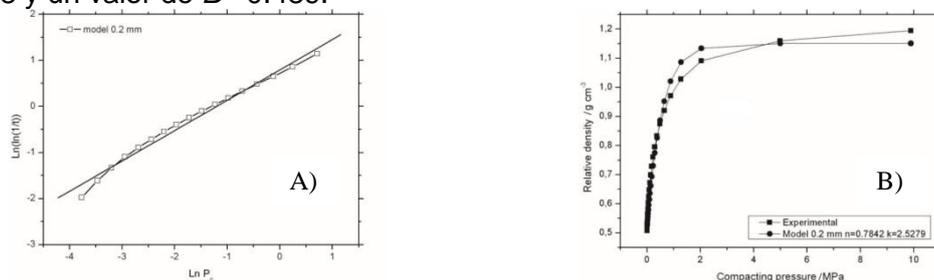


Figura 2. A) Representación de la función $\ln(\ln(1/t)) = \ln K + n \ln P_c$ (tamaño de grano 0.2 mm). B) Representación de la densidad relativa en función de la presión de compactación de los valores experimentales y modelo 0.2 mm.

Según la ecuación (1), se puede concluir que el producto Kn determina la tasa de compactación. Tamaños de granulometría fina resultan en mayores valores de las propiedades mecánicas [4] mientras que los productos que muestran los tamaños más grandes serán más porosos y más capaces de absorber acústicamente [5].

El siguiente paso de este trabajo de investigación será desarrollar otro modelo de dos o tres parámetros más, que podría estar asociado a la distribución estadística de grano y morfología superficial de las partículas.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio se pueden resumir en:

- El modelo obtenido es adecuado para el control del proceso de compactación. Es simple y práctico. Esto hace que sea posible determinar las presiones de compactación necesarias para obtener productos con mayor o menor densidad en función de sus aplicaciones.
- El modelo propuesto es también aplicable a los metales y cerámicas, especialmente durante los procesos iniciales de la compactación.

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo se presentan resultados del proyecto BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT, Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables) que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER, dentro del Programa Estatal I+D+I orientada a los Retos de la Sociedad 2013.

REFERENCIAS

- [1] Nadal A. Phd Dissertation, Universidad Politécnica de Valencia. 397 (2003).
- [2] Coble R.L. J Appl Phys. 32:5, 787-792 (1961).
- [3] Coble R.L. J Appl Phys. ;32 :5, 793-799 (1961).
- [4] Nadal A., Ferrer C., Monzo M., Lopez J., Ann Chim-SciMat.;33:3, 179-188 (2008).
- [5] Sobral M., Samagaio A.J.B., Ferreira J.M.F., Labrincha, J.A., J Mater Process Tech., 142:2, 427-433 (2003).