

Modelación matemática del proceso de compactación en prensas de rodillos

A. Hernández Battez, J. J. Cabello Eras, R. Goytisol Espinosa

Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Cienfuegos

Carretera a Rodas km 2. Cienfuegos

Email: jcabello@ucfinfo.ucf.edu.cu ó jcabello@ucf.cfg.sld.cu

(Recibido el 10 de julio de 1998; aceptado el 11 de agosto de 1998)

Resumen

El carbón obtenido a partir de la paja de caña posee bajas propiedades mecánicas, debido a esto es indispensable su compactación para utilizarlo en cocinas domésticas, calentadores de pollos, etc. La técnica de compactación más difundida, por su rendimiento y bajo costo, es la compactación en prensas de rodillos. El Centro de Estudios y Desarrollo de la Oleohidráulica y la Neumática de la Universidad de Cienfuegos elaboró un modelo matemático para caracterizar el proceso de compactación en prensas de este tipo. Con dicho modelo se determina la reacción sobre los rodillos, la potencia consumida en el proceso de compactación y la relación existente entre la geometría de los rodillos y la compactación teórica máxima.

1. Introducción

La utilización de la biomasa vegetal es una de las fuentes renovables de energía más prometedoras y de hecho ya tiene un gran auge en Europa, donde prácticamente se aprovechan energéticamente todos los residuos de las cosechas de cereales. Aprovechar los residuos de la cosecha cañera y en particular la paja es una necesidad y una posibilidad para los países que realizan este cultivo. El aprovechamiento de la paja de caña como combustible puede hacerse por dos vías: compactación y consumo directo en instalaciones industriales y cocinas sociales, y compactación y pirolización para utilizar el carbón. En esta segunda variante, debido a las bajas propiedades mecánicas del carbón, que se obtiene en forma de polvo, se hace necesario la compactación de éste en forma de briquetas, con ayuda de un aglutinante, lo cual facilita su transportación y uso.

Para la compactación de polvos con características similares al carbón de paja de caña se pueden utilizar diferentes tecnologías, pero la más usualmente utilizada es la prensa de rodillos. En el diseño de estos equipos tiene una singular importancia las características y relaciones geométricas de los rodillos y las cavidades donde se forman las briquetas, así como las propiedades específicas del material a compactar.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático que describe el proceso de compactación en prensas de rodillos y permite a los diseñadores establecer las dimensiones fundamentales de los rodillos y cavidades,

también se obtienen los datos necesarios para la selección del motor del accionamiento.

2. Desarrollo

La prensa de rodillos consta de dos rodillos de igual diámetro que rotan en direcciones opuestas a la misma velocidad periférica. En la superficie de cada rodillo una serie de cavidades aseguran que las briquetas sean formadas durante la rotación, debido a la disminución sucesiva del volumen que ocupa la mezcla. Los rodillos están contenidos dentro de una cámara hermética.

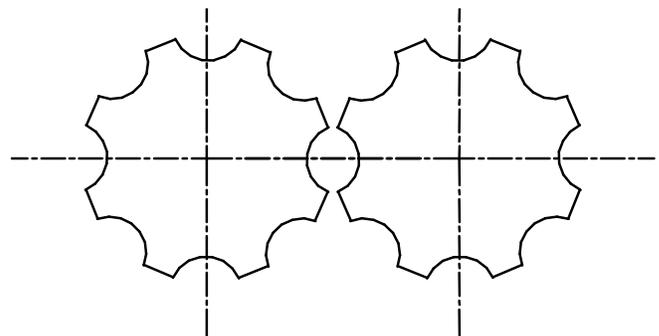


Fig. 1: Prensa de Rodillos

Los moldes de briqueta de uso más común son los cilíndricos y los lenticulares, prefiriéndose los primeros dado que las briquetas de sección transversal cilíndrica son varias veces más resistentes que las de sección lenticular. Cada cavidad debe asegurar un ángulo de salida para la briqueta; dicho ángulo dependerá de la rugosidad de la cavidad, del efecto dinámico, y del poder de adherencia del material.

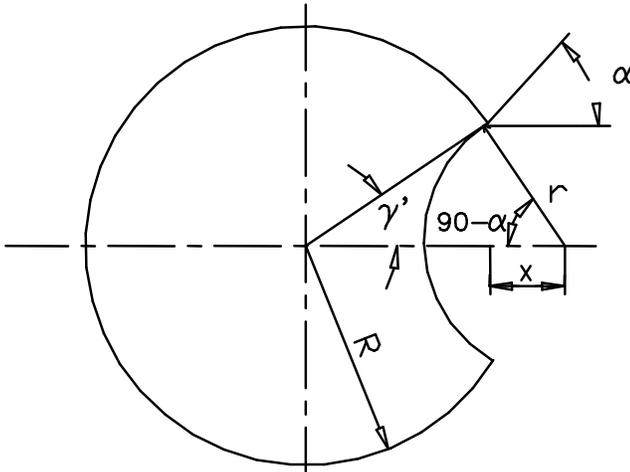


Fig. 2: Geometría de las Cavidades

donde:

r - Radio de la cavidad.

R - Radio del rodillo.

α - Ángulo de salida.

x - Desplazamiento del centro de la cavidad.

Para el desarrollo del modelo se hicieron las siguientes consideraciones:

El material a compactar desciende uniformemente entre los rodillos.

Utilizar los conceptos de grado de compactación y presión, para expresar la dependencia entre el aumento de la densidad del material al briquetearse y la carga aplicada, respectivamente.

Aplicar para el cálculo de la reacción sobre los rodillos y la potencia consumida, el modelo desarrollado por Hugot para el estudio del proceso de compresión del bagazo.

Utilizar como medida del grado de compactación, la relación entre el área de la sección transversal del volumen que ocupa el material al comienzo de su compresión y la final de la misma.

Veamos a continuación el área de la sección transversal del volumen a partir del cual se conformará una briqueta, aprovechemos a su vez la simetría de la misma.

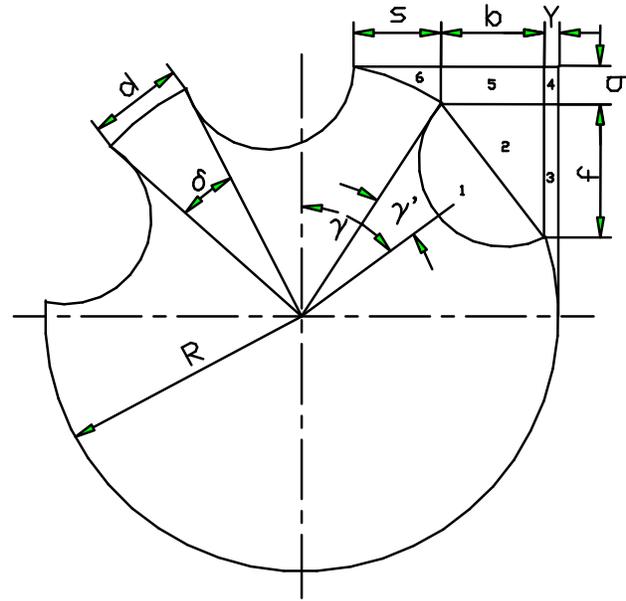


Fig. 3: Área entre Rodillos

$$A_2 = \frac{1}{2}bf = R^2 \operatorname{sen} 2\gamma \cdot \operatorname{sen}^2 \gamma'$$

$$A_3 = yf$$

$$A_3 = 2R^2 \operatorname{sen} \gamma \cdot \operatorname{sen} \gamma' \cdot \begin{bmatrix} 1 - \operatorname{sen} \gamma \cdot \cos \gamma' - \\ - \cos \gamma \cdot \operatorname{sen} \gamma' \end{bmatrix}$$

$$A_4 = yq$$

$$A_4 = 2R^2 \begin{bmatrix} \operatorname{sen} \left(\gamma - \gamma' - \frac{1}{2}\delta \right) \cdot \\ \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{1}{2}\delta \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \operatorname{sen} \gamma \cdot \\ \cdot \cos \gamma' - \\ - \cos \gamma \cdot \\ \cdot \operatorname{sen} \gamma' \end{bmatrix}$$

$$A_5 = qb$$

$$A_5 = 4R^2 \cos \gamma \cdot \operatorname{sen} \gamma' \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{1}{2}\delta \right) \cdot \operatorname{sen} \left(\gamma - \gamma' - \frac{1}{2}\delta \right)$$

$$A_6 \approx \frac{1}{2}qs = R^2 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{1}{2}\delta \right) \cdot \operatorname{sen} (2\gamma - 2\gamma' - \delta)$$

Volviendo a la Fig. 2 se deduce que:

$$A_1 = \frac{\pi r^2 \beta}{360^\circ} - \frac{r^2 \operatorname{sen} \beta}{2} \quad ; \quad \beta = 180^\circ - 2\alpha$$

$$A_t = 2 \sum_{i=1}^6 A_i$$

Esta última relación es la función objetivo, la cual caracteriza la variación del área frontal del volumen entre los rodillos en el intervalo en que se conforma la briqueta ($0 < \gamma \leq 90^\circ$), para diferentes conjuntos r, R, γ', δ . Mediante un programa de computación exploramos el comportamiento de la función en dicho intervalo y el de la compactación teórica máxima. Antes de esto tuvimos en cuenta los siguientes elementos:

- la relación entre el desplazamiento del centro de curvatura de las cavidades y el ángulo de salida es:

$$x = R \left[\frac{\text{sen}(90^\circ + \alpha - \gamma')}{\text{sen}(90^\circ - \alpha)} - 1 \right]$$

- denominamos como “k” a la relación $\frac{R}{r}$.
- el algoritmo para la selección de los parámetros sería el siguiente:

1. R, r, d - lo decide el diseñador.

$$2. \delta \approx 2 \text{sen}^{-1} \left(\frac{d}{2R} \right)$$

$$3. \gamma' = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\cos \alpha}{k} \right)$$

$$4. z = \frac{360^\circ}{\delta + 2\gamma'} ; z - \text{cantidad de cavidades}$$

En caso que “z” no sea entero, tomamos su parte entera y recalculamos δ utilizando el nuevo valor de “z”.

Como resultado se obtuvo que:

- la función objetivo posee un máximo en el intervalo estudiado; este ángulo a partir del cual comienza la compactación lo denominamos φ y es aproximadamente 31° , independientemente del tamaño de los rodillos.
- el grado de compactación teórico máximo (E)

$$\left[E = \frac{A_t(\gamma = \varphi)}{A_t(\gamma = 90^\circ)} \right] \text{ es directamente proporcional a "k".}$$

Tanto para el cálculo de la reacción en los rodillos como la potencia consumida, es necesario la relación:

$$p = f(e)$$

p - presión
e - grado de compactación

Consideremos, según Hugot, dos cilindros cualesquiera dispuestos de la siguiente manera:

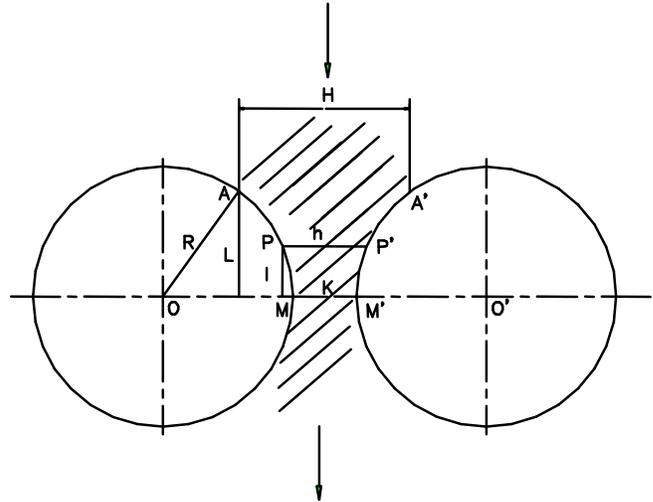


Fig. 4: Presión en los Cilindros

donde:

R - radio de los cilindros, cm.

H - ancho del colchón de carbón suelto, cm.

K - distancia entre las superficies de los dos cilindros tomada en su plano axial común, cm.

L - distancia desde el punto A, en el que el carbón encuentra al cilindro, al plano axial entre los dos cilindros, cm.

Llegamos a que la reacción resultante es :

$$F = S \cdot F_1 = S \cdot \int_0^L p dl$$

p - presión en el punto P sobre el elemento de superficie dl (de longitud dl y 1 cm de profundidad), kg/cm².

S - ancho del cilindro, cm.

$$L = \sqrt{H \left(1 - \frac{1}{E} \right) \left[R - \frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{E} \right) \right]}$$

F₁ - reacción para una sección de cilindro de 1 cm, kg.

F - reacción total sobre los cilindros, kg.

Para lograr que la figura utilizada en el análisis sea compatible con la prensa de rodillos, debe cumplirse que:

$$K = 2 \cdot (r - x)$$

$$H = K \cdot E = 2E \cdot (r - x)$$

$$S = Sr$$

Sr - ancho de los rodillos de la prensa.

$$R = Rr - (r - x)$$

Rr - radio de los rodillos de la prensa.

La potencia que se consume durante el proceso calcula mediante la expresión siguiente:

$$T = -SV \cdot \int_H^K pdh \cdot$$

T - potencia consumida en la compresión, 10^{-4} kW.

V - velocidad periférica de los rodillos, cm/s.

Si aplicamos este modelo a una prensa de rodillos que existió en nuestra facultad con las dimensiones siguientes:

r = 1.6 cm	E = 5.0
R = 16 cm	x = 0.2 cm
Sr = 6.0 cm	z = 29
V = 16.75 cm/s	n = 10 r.p.m.

y utilizamos una mezcla de 64 % (en masa) de carbón de paja de caña, 16 % de aglutinante (miel) y 20 % de agua, que posee una relación presión - grado de compactación

$$p = \frac{634}{10^3} \cdot e^{6.3}; \text{ el resultado sería :}$$

$$F = 12.26 \text{ kN}$$

$$T = 2.6 \text{ kW}$$

Para simplificar el cálculo y poseer un margen de seguridad, utilizamos el valor 7 como potencia en vez de 6.3 ; además se tomó como grado de compactación máximo no el teórico sino el mínimo necesario, según estudios realizados para dicho carbón, para la adecuada conformación de la briqueta (E = 2).

3. Conclusiones

El grado máximo teórico de compactación (E) es directamente proporcional a la relación entre el radio del rodillo y el de la cavidad ("k").

La reacción sobre los rodillos es función del ancho y diámetro de los mismos, del grado de compactación (E) empleado, de la distancia entre la superficie de los dos cilindros tomada en su plano axial común (K), y de la relación presión - grado de compactación del material a briquetear.

La potencia consumida en la compresión del material depende del grado de compactación empleado, de la distancia entre la superficie de los dos cilindros tomada en su plano axial común (K), del ancho y velocidad periférica de los rodillos, y de la relación presión - grado de compactación del material.

4. Recomendaciones

1. Indagar para diferentes mezclas carbón - miel - agua, cuál es el ángulo de salida recomendado, teniendo en cuenta el efecto dinámico y la rugosidad en las cavidades.
2. Determinar para dichas mezclas la relación presión - grado de compactación.
3. Verificar este modelo en la práctica y hacerle las correcciones pertinentes.

Bibliografía

1. Cuba. Instituto Cubano de Investigaciones del Azúcar. Informe Final sobre la Investigación "Obtención de Carbón y Otros Derivados a Partir de la Paja de Caña"/ ICINAZ.-- La Habana, 1993.-- 54 p.
2. Feasibility Study for the Replacement of Lump Coke by Coke Briquettes.-- Netherlands: Biomass Technology Group. University of Twente, 1994.-- 26 p.
3. Hugot, E. Manual para Ingenieros Azucareros./ E Hugot.-- México: Editorial Continental, 1974. -- 784 p.
4. Stemons, Roland. Carbonization of Fresh Bagasse./ Roland Stemons.-- Khartoum: [s.n], 1993. -- 39 p.

A mathematical model for the process of compaction in rolling mills

Abstract

The carbon obtaining from the cane straw possesses low mechanic properties, due to this is indispensable their compaction in order to utilize it in domestic kitchens, heaters of chickens, etc. The technique of compaction more diffused, for efficiency and low cost, it is the compression in presses of rollers. The R&D Center for Fluid Power and Pneumatic of the University of Cienfuegos elaborated a mathematical model in order to characterize the process of compression in presses of this type. With mentioning model are determined the reaction on the rollers, the consumed power in the process of compaction and the existent relation between the Rollers geometry and the maximum theoretical compaction.