

Determinación experimental del coeficiente de rigidez del bagazo

Experimental determination of bagasse stiffness coefficient

Nelson Arzola de la Peña¹

RESUMEN

En el artículo se determina experimentalmente el coeficiente de rigidez del bagazo comprimido. Esta propiedad define el comportamiento de la reacción que ejerce el colchón de bagazo a su paso por los molinos de caña de azúcar en el proceso de extracción de los jugos, siendo de importancia para un correcto análisis del funcionamiento y el diseño de los molinos. En la obtención del coeficiente de rigidez se empleó un dispositivo experimental compuesto por un pistón, camisa, prensa hidráulica e instrumentación para el registro de las presiones generadas, y la posición del pistón en función del tiempo. Los factores experimentales tenidos en cuenta en el diseño experimental son: relación de compresión, porcentaje de humedad y grado de fragmentación del bagazo. Se experimentó con un porcentaje de humedad entre el 40% y el 80%, y se alcanzaron relaciones de compresión de hasta 0,06. Se obtuvo un modelo experimental para el coeficiente de rigidez del bagazo donde todos los factores experimentales resultaron estadísticamente significativos. Se concluye que el bagazo se comporta como una fundación elástica muy rígida bajo las condiciones de presión existentes en un molino de caña, con valores del coeficiente de rigidez en el rango de 50 MPa a 20.000 MPa.

Palabras clave: coeficiente de rigidez, bagazo, razón de compresión.

ABSTRACT

The experimentally determined stiffness coefficient of bagasse is described in this paper. This property defines the behaviour of the reaction forces exerted upon the bagasse layer when being compressed during juice-extraction in a sugar-cane mill. This information is important for correctly analysing sugar-cane mill operation and design. An experimental device was used for obtaining the stiffness coefficient; it consisted of a piston, a piston-skirt, a hydraulic press and instrumentation for measuring the pressures so produced and piston position at different times. Compression rate, humidity level and degree of bagasse fragmentation were the experimental factors taken into account in the experimental design. The investigation was carried out with 40%-80% humidity level and up to 0.06 compression rates. All experimental factors proved statistically significant in the bagasse stiffness coefficient experimental model so obtained. Bagasse was seen to behave as a very rigid elastic material under normal sugar-mill pressure operating conditions, having 50 MPa to 20,000 MPa stiffness coefficient values.

Keywords: stiffness coefficient, bagasse, compression rate.

Recibido: enero 13 de 2006

Aceptado: mayo 31 de 2007

Introducción

En un ingenio azucarero los molinos son los encargados de la compresión de la caña de azúcar para la extracción de su jugo. En su trayecto hacia el molino la caña es preparada por las cuchillas picadoras, que abren las células para facilitar la operación. La caña se muele en un tándem, que consta típicamente de entre cinco y seis molinos, de tres a cuatro mazas o rodillos cada uno. El colchón de caña preparada pasa a través de cada molino y por presión sobre este se le extrae el jugo. Para lograr sustraer la mayor cantidad posible de sacarosa de la caña, al material que sale de cada molino se le adiciona jugo o agua. A la salida del último molino se

obtiene el bagazo. Este, con un bajo contenido de sacarosa, se envía a las calderas, donde se utiliza como combustible principal para la producción de vapor. Cada molino está equipado con una turbina accionada con vapor de alta presión o un motor eléctrico, un sistema de transmisión y reductores de velocidad. Las mazas inferiores rotan en posición fija, mientras que la superior se desplaza verticalmente en dependencia del espesor del colchón de caña.

La verdadera distribución de la reacción del colchón de bagazo sobre las mazas de los molinos de caña de azúcar

¹ Ingeniero mecánico, Universidad de Cienfuegos, Cuba. Doctor, Ciencias Técnicas, Universidad Central de las Villas, Cuba. Codirector, grupo de investigación en Diseño Óptimo Multidisciplinario - OptimUN. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. narzola@unal.edu.co.

siempre ha sido un interrogante para los investigadores dedicados a perfeccionar el esquema de análisis empleado para esta maquinaria azucarera. Los primeros intentos por comprender la ley de compresión del bagazo y las presiones necesarias para lograrlo fue realizado por Noel Deer con un dispositivo de cilindro-émbolo (Hugott, 1988). El mencionado investigador dedujo la relación existente entre la presión requerida sobre el colchón de bagazo y la compresibilidad del mismo para condiciones estáticas, la cual se expresa según la Ecuación (1),

$$p = \frac{70}{(10 \cdot C')^6} \quad (1)$$

donde:

p – Presión ejercida sobre el bagazo (MPa).

C' - Relación de compresión instantánea del bagazo (adimensional).

En el año 1956 se demostró que la presión necesaria en un molino para obtener una compresión dada es sensiblemente mayor que la presión estática encontrada por Noel Deer (Jenkins, 1987). Esto se debe a que en el trabajo total sobre el bagazo se emplea una parte en la propia compresión y la restante en extraer su jugo. Poco después se continuaron los estudios sobre la compresión del bagazo para regímenes dinámicos, encontrándose modelos matemáticos que describen el comportamiento de forma general.

Todos estos estudios tratan de explicar la distribución de la reacción del bagazo a su paso por el molino en el plano axial. Sin embargo, poco se ha hecho para determinar el comportamiento de la reacción del bagazo a lo largo de la longitud de las mazas, lo cual es de suma importancia para conocer el estado de esfuerzos sobre los distintos componentes del molino y poder realizar un diseño racional, confiable y de alto desempeño (Satyanarayana, 1986; Shewale, 1987; Shields, 1986). Adicionalmente, la eficiencia de la extracción del jugo de caña está relacionada con el modo de distribución de la reacción del colchón de bagazo, por lo que es necesario conocer el comportamiento de la rigidez del bagazo para un correcto modelamiento del proceso de extracción (Arzola, 2005).

La suposición de que el bagazo se comporta de igual manera a lo largo de la longitud de la maza conduce a que la reacción de este sobre la maza superior deba ser uniformemente distribuida, pero esto es erróneo, pues las distintas cargas que actúan sobre el árbol no estarían equilibradas. Veloz calcula la reacción del bagazo sobre la maza superior considerándola como una carga linealmente distribuida, para evitar que la reacción concentrada resultante del colchón de bagazo se encuentre ubicada en la sección media de la maza (Veloz, 1996). En muchas otras publicaciones técnicas y trabajos de investigación sobre molinos de caña de azúcar no se define cómo es esta distribución, definiéndola como una fuerza concentrada en el centro de la maza o como

una fuerza uniformemente distribuida (Fernández, 1982). En otra investigación más reciente, se emplea el modelo de viga sobre fundación elástica para el rodillo superior del molino, obteniéndose un resultado mucho más real sobre la distribución de la reacción del colchón de bagazo (Arzola, 2003). Para la utilización de este modelo es necesario contar con el comportamiento del coeficiente de rigidez de la fundación elástica (bagazo) en función de la presión que se ejerce, el grado de humedad y la posición que ocupa el molino en el tándem.

El propósito del presente estudio es presentar la metodología de obtención del coeficiente de rigidez del bagazo, los experimentos llevados a cabo para tal fin y un modelo de comportamiento para este parámetro.

Desarrollo experimental

La reacción del colchón de bagazo sobre el rodillo superior es una carga de tipo reactiva y posee un valor desconocido, por lo que debe ser determinada utilizando el resto de las que actúan sobre el árbol. La misma se establece considerando al árbol como una viga sobre fundación elástica, de modo que la reacción del colchón de bagazo es proporcional a la flecha del árbol para cada posición (Pisarenko, 1985):

$$q_{R(z)} = -\alpha \cdot y_{(z)} \quad (2)$$

donde:

$q_{R(z)}$ – Intensidad de la reacción del colchón de bagazo a la distancia z del extremo izquierdo de la maza (kN/m).

α - Coeficiente de rigidez de la fundación (MPa).

$y_{(z)}$ – Flecha del árbol a la distancia z del extremo izquierdo de la maza (mm).

Para usar la Ecuación (2) es necesario determinar experimentalmente el coeficiente de rigidez de la fundación elástica, que en este caso, es bagazo compactado.

En ingeniería civil existen varios procedimientos para la determinación, tanto en campo como en laboratorio, del coeficiente de rigidez de los suelos. Este parámetro es de vital importancia para el diseño de las fundaciones. Todos los métodos empleados se basan en la aplicación de cierta presión por medio de una superficie rígida y la deformación del terreno, existiendo un amplio rango de valores en dependencia del tipo de suelo, humedad y condiciones específicas.

El coeficiente de rigidez para el bagazo no ha sido determinado con anterioridad, debido a esto, es necesaria la confección de un diseño experimental. El dispositivo diseñado y construido para estipularlo se muestra en la Figura 1; el mismo consta de una base (1), una camisa (2) sujeta por una brida (3) atornillada a la base, y un transductor resistivo (4), cuyo cursor está conectado al pistón (5), que se desplaza por dentro de la camisa por medio de la guía (6). La camisa presenta en su parte inferior una serie de agujeros dispuestos al tresbolillo para facilitar la salida del agua presente en el

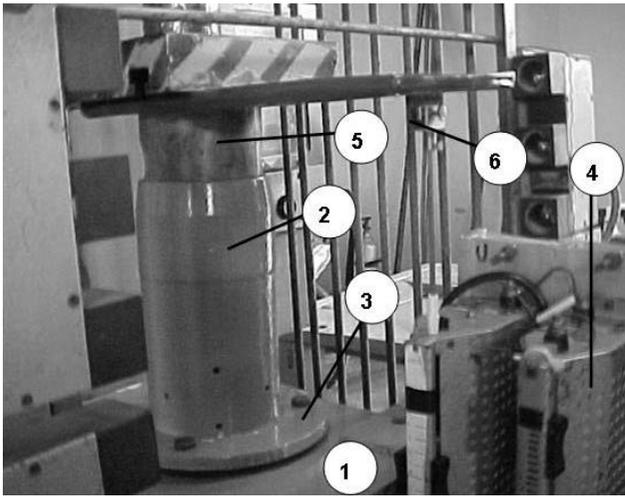


Figura 1. Fotografía de la instalación experimental

bagazo. El bagazo a compactar es colocado en el interior de la camisa, y el dispositivo en una prensa hidráulica. Una tarjeta de adquisición de datos (PCL – 812 PG), acoplada a un computador personal, es la encargada de recibir las señales provenientes de los transductores resistivo e inductivo conectado a la prensa con el propósito de medir la presión hidráulica.

El modelo matemático seleccionado para describir la variación de la presión con la relación a la compresión es el siguiente:

$$p = A \cdot \left(\frac{H_0}{h} \right)^n \quad (3)$$

Donde:

A - Coeficiente del modelo de compactación del bagazo (MPa).

n - Exponente del modelo de compactación del bagazo (adimensional).

h - Altura del bagazo en el dispositivo durante su compresión (mm).

H_0 - Altura inicial del bagazo en el dispositivo (mm).

Con el diseño experimental se pretende observar la influencia que posee el porcentaje de humedad del bagazo y su nivel de fragmentación en el fenómeno de compactación.

Se conoce que la velocidad de compactación es otro factor que influye en las presiones necesarias para compactar el bagazo. Lamentablemente, no fue posible introducir este factor en el diseño experimental dada la imposibilidad de controlar el flujo de aceite hidráulico y por tanto la velocidad con que se desplaza el pistón. La prensa hidráulica fue escogida de tal modo que no solamente garantizara la presión hidráulica necesaria, sino que también brindara una velocidad de compresión en el rango con que ocurre en los molinos.

En la Figura 2 se muestra un gráfico sobre el proceso de compactación del colchón de bagazo en un molino para

velocidades de rotación de las mazas de tres rpm y seis rpm, respectivamente, y los límites alcanzados en el dispositivo experimental. Es necesario aclarar que la velocidad de rotación de las mazas de un molino típico se encuentra dentro de este rango representado. Como puede apreciarse, las velocidades desarrolladas en los experimentos están dentro del rango de las de compactación normalmente alcanzadas por un molino.

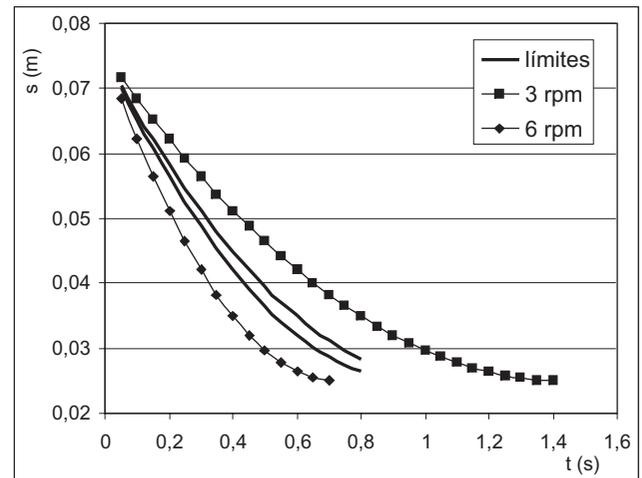


Figura 2. Rapidez de compactación del bagazo en los molinos y en el dispositivo

En todo tiempo t y despreciando cualquier fenómeno de deslizamiento, la relación de compresión instantánea del bagazo entre un par de mazas se determina por:

$$C^n = \frac{e + D_e \cdot \left[1 - \cos \left(\theta_0 - \frac{\pi \cdot n_s \cdot t}{30} \right) \right]}{h_c} \quad (4)$$

Siendo:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(1 + \frac{e - h_c}{D_e} \right) \quad (5)$$

donde:

h_c - Altura del colchón de bagazo (m).

D_e - Diámetro medio de la maza (m).

e - Abertura entre dos mazas en el plano axial (m).

n_s - Velocidad angular de las mazas (rpm).

La velocidad de compactación para un molino es hallada por:

$$\dot{C}^n = \left(\frac{\pi \cdot n_s}{30} \right) \cdot \left(\frac{D_e}{h_c} \right) \cdot \text{sen} \left(\theta_0 - \frac{\pi \cdot n_s \cdot t}{30} \right) \quad (6)$$

donde:

\dot{C}^n - Velocidad de compresión del bagazo (s^{-1}).

El coeficiente A varía dependiendo de las condiciones físicas del bagazo, principalmente del porcentaje de humedad que posea y de la preparación que tenga (granulometría). Por ello, se hizo un diseño factorial experimental completo a tres niveles para los dos factores mencionados.

El grado de preparación del bagazo depende del número de veces que sea comprimido entre las mazas de los molinos. En un tándem de ingenio azucarero existen normalmente cinco molinos, y el bagazo pasa sucesivamente por ellos. Por lo anterior, las muestras fueron tomadas a la entrada del primer, tercer y quinto molinos para los niveles inferior, medio y alto, respectivamente. Estas fueron deshidratadas en una mufla a la temperatura de 120 °C durante dos horas. La diferencia de peso antes y después de realizada tal operación fue medida con una balanza de precisión ($\Delta W = 0,1$ g). Luego se introdujo nuevamente durante media hora. Si el peso después de este segundo estadio no se diferencia en más de 1%, el bagazo es considerado deshidratado y listo para ser humedecido en la cantidad que corresponda según el diseño de experimento. De lo contrario se repite la operación de secado hasta que la condición sea cumplida. Posteriormente, se pesaron iguales muestras de bagazo, con una masa de 250 g, y se procedió a humedecerlas hasta alcanzar un 40%, 60% y 80% de humedad para los niveles inferior, medio y alto del experimento. En la Figura 3 se registra una de las curvas de compactación del bagazo obtenidas en las corridas experimentales.

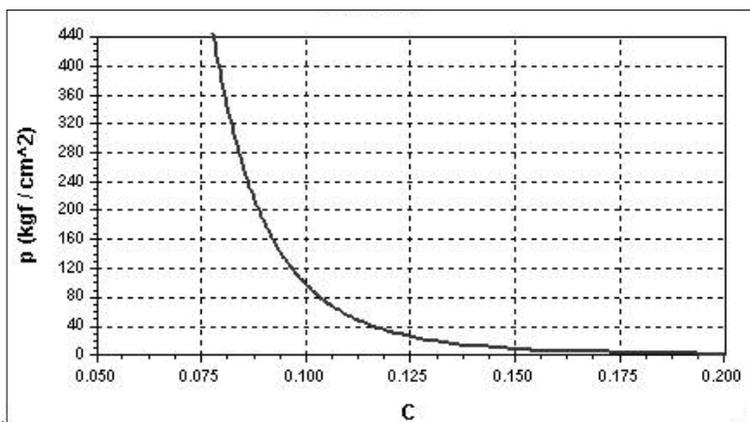


Figura 3. Compactación del bagazo del quinto molino con 60% de humedad

Las muestras de bagazo fueron recogidas de cuatro ingenios, los cuales se encontraban moliendo, dos de ellos con igual variedad de caña, y los restantes con dos variedades. Las corridas experimentales se agruparon en cuatro bloques según su procedencia y se hicieron tres ensayos para cada réplica.

El valor del coeficiente elástico de la fundación, para una relación de compresión determinada, es igual a la pendiente de la curva de compactación. Derivando la Ecuación (3) y omitiendo el signo negativo por ser irrelevante, se obtiene:

$$\alpha = \frac{dp}{dC'} = \frac{n \cdot A}{(C')^{n+1}} ; C' = \frac{h}{H_0} \quad (7)$$

En los molinos de caña de azúcar resulta inapropiado el cálculo de la relación de compresión utilizando la altura del colchón de bagazo. Se recomienda el uso de la Ecuación (8) para su determinación (Hugott, 1988).

$$C' = 0,93 \cdot \frac{K' \cdot F}{q} \quad (8)$$

donde:

K' – Espesor del colchón de bagazo en el plano axial entre dos cilindros del molino (cm).

F – Fibra del bagazo comprimido con relación a la unidad (adimensional).

q – Carga fibrosa (kg/m²).

La maza superior está apoyada sobre tres elementos: la maza cañera, la maza bagacera y la cuchilla central. Las aberturas que existen entre ellos y la maza superior poseen valores diferentes, de modo que resulta insuficiente por sí sola la Ecuación (8) para calcular una relación de compresión total o equivalente para un molino. Por lo anterior, se hace necesario establecer una media ponderada de la relación de compresión del molino en función de la carga relativa que soporta cada uno de estos elementos. La relación de compresión equivalente se define por:

$$C'_{eq} = \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_c + \lambda_b + \delta} \right) \cdot C'_{sal} + \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_b + \delta} \right) \cdot C'_{ent} + \left(\frac{\delta}{\lambda_c + \lambda_b + \delta} \right) \cdot C'_{cc} \quad (9)$$

donde:

C'_{eq} – Relación de compresión equivalente del bagazo en el molino (adimensional).

λ_b – Razón entre la reacción normal del bagazo sobre la maza bagacera y la reacción normal sobre la maza superior (adimensional).

λ_c – Razón entre la reacción normal del bagazo sobre la maza cañera y la reacción normal sobre la maza superior (adimensional).

δ – Razón entre la carga soportada por la cuchilla central y la carga total sobre el colchón de bagazo (adimensional).

C'_{sal} , C'_{ent} , C'_{cc} – Relación de compresión en las aberturas de salida y entrada, y en la cuchilla central, respectivamente (adimensional).

De esta forma, se tiene en cuenta la influencia relativa que posee la carga que soporta cada elemento inferior en la compresión que sufre el colchón de bagazo a su paso a través de los mismos.

Resultados

Como resultado del diseño experimental desarrollado se obtiene el valor medio del coeficiente A , así como el coeficiente de correlación y el error estándar para el modelo, como se muestra en la Tabla 1. Además, en la Tabla 2 se ofrecen los

valores medios del coeficiente de rigidez para tres valores de relación de compresión y para los distintos niveles de los factores experimentales. El exponente n resultó igual a seis, valor que está en correspondencia con los resultados reportados (Jenkins, 1987).

Tabla 1. Valores medios obtenidos en las corridas experimentales.

Coeficiente A , correlación y Desv. estándar	Molino 1			Molino 3			Molino 5		
	Porcentaje de humedad (%):								
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
A	81,605	84,885	95,273	89,326	93,330	101,176	92,399	98,105	107,690
r	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999
S	5,201	2,141	1,530	1,915	0,853	1,801	1,981	1,740	2,864

Tabla 2. Valores medios de α para cada una de las corridas experimentales (MPa).

C'	Molino 1			Molino 3			Molino 5		
	Porcentaje de humedad (%):								
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0,06	17 141	17 830	20 012	18 763	19 604	21 252	19 408	20 607	22 620
0,10	480	499	560	525	549	595	543	577	633
0,14	46	47	53	50	52	56	52	55	60

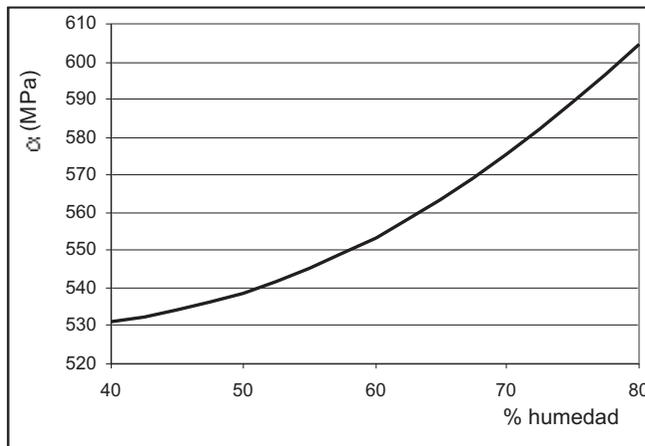


Figura 4. Variación del coeficiente de rigidez con la humedad para $C' = 0,10$ y molino 3

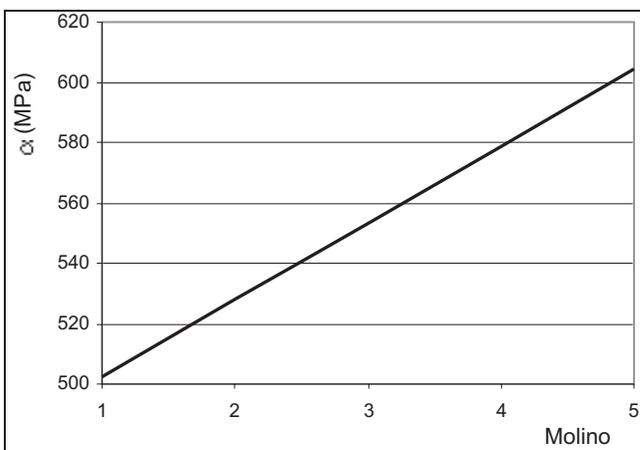


Figura 5. Variación del coeficiente de rigidez con el grado de preparación (para $C' = 0,1$ y 60% de humedad)

El modelo matemático obtenido para el coeficiente A es el siguiente:

$$A = 84,63 - 0,4318 \cdot W + 0,0062 \cdot W^2 + 4,354 \cdot M \quad (10)$$

donde:

W – Porcentaje de humedad en el bagazo que entra al molino (adimensional).

M – Posición del molino en la batería [1, 2,,5] (adimensional).

Los factores que aparecen en la Ecuación (10) son estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95%; el coeficiente de correlación ajustado del modelo es igual a 94,4%; y la desviación estándar de la estimación, a 1,97.

Finalmente, el coeficiente de rigidez de la fundación es determinado por la Ecuación (11).

$$\alpha = \frac{5,88 \cdot 10^{-7} \cdot (84,63 - 0,4318 \cdot W + 0,0062 \cdot W^2 + 4,354 \cdot M) [MPa]}{C'_{eq}{}^7} \quad (11)$$

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestra el comportamiento que posee el coeficiente de rigidez del bagazo dentro de la región experimental. Su valor fluctúa dentro de amplios límites, fundamentalmente con la variación de la relación de compresión.

Es por ello necesario definir las condiciones en que se encuentra el bagazo antes de poder conocer cuál es el comportamiento de la reacción del bagazo sobre las mazas de los molinos de caña de azúcar.

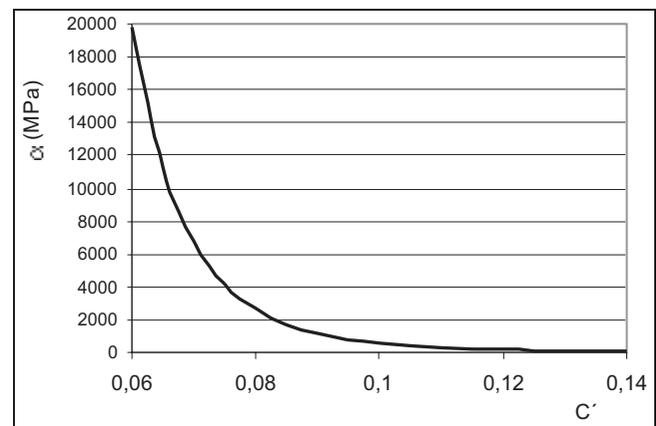


Figura 6. Variación del coeficiente de rigidez con la relación de compresión (para el molino 3 y 60% de humedad)

Conclusiones

La constante de rigidez de la fundación (α) depende de las propiedades físicas del bagazo, y su valor pudo ser obtenido de forma experimental. En la investigación se obtuvo una expresión que relaciona este parámetro con el porcentaje de humedad del bagazo, posición del molino en el tándem (que caracteriza el grado de preparación del bagazo) y la relación de compresión. El modelo obtenido es el siguiente:

$$\alpha = \frac{5,88 \cdot 10^{-7} \cdot (84,63 - 0,4318 \cdot W + 0,0062 \cdot W^2 + 4,354 \cdot M)}{C_{eq}^{17}} [MPa]$$

Debido a los valores tan pequeños de relación de compresión empleados en los molinos de caña de azúcar, el colchón de bagazo compactado se comporta como un material altamente rígido, con valores medios del coeficiente de rigidez que fluctúan entre 50 MPa y 20.000 MPa.

Nomenclatura

- \dot{C} - Velocidad de compresión del bagazo (s^{-1}).
- α - Coeficiente de rigidez de la fundación (MPa).
- δ - Razón entre la carga soportada por la cuchilla central y la carga total sobre el colchón de bagazo (adimensional).
- λ_b - Razón entre la reacción normal del bagazo sobre la maza bagacera y la reacción normal sobre la maza superior (adimensional).
- λ_c - Razón entre la reacción normal del bagazo sobre la maza cañera y la reacción normal sobre la maza superior (adimensional).
- A - Coeficiente del modelo de compactación del bagazo (MPa).
- C' - Relación de compresión instantánea del bagazo (adimensional).
- C'_{sal} , C'_{ent} , C'_{cc} - Relación de compresión en las aberturas de salida y entrada, y en la cuchilla central, respectivamente (adimensional).
- C'_{eq} - Relación de compresión equivalente del bagazo en el molino (adimensional).
- D_e - Diámetro medio de la maza (m).
- e - Abertura entre dos mazas en el plano axial (m).
- F - Fibra del bagazo comprimido con relación a la unidad (adimensional).
- h - Altura del bagazo en el dispositivo durante su compresión (mm).
- h_c - Altura del colchón de bagazo (m).
- H_o - Altura inicial del bagazo en el dispositivo (mm).
- K' - Espesor del colchón de bagazo en el plano axial entre dos cilindros del molino (cm).

M - Posición del molino en la batería [1, 2,,5] (adimensional).

n - Exponente del modelo de compactación del bagazo (adimensional).

n_s - Velocidad angular de las mazas (rpm).

p - Presión ejercida sobre el bagazo (MPa).

q - Carga fibrosa (kg/m^2).

$q_{R(z)}$ - Intensidad de la reacción del colchón de bagazo a la distancia z del extremo izquierdo de la maza (kN/m).

W - Porcentaje de humedad en el bagazo que entra al molino (adimensional).

$y_{(z)}$ - Flecha del árbol a la distancia z del extremo izquierdo de la maza (mm).

Bibliografía

Arzola, N., Esquema de análisis para los árboles de los molinos de caña de azúcar y aplicación de la Mecánica de la Fractura en la evaluación de la falla por fatiga., tesis presentada a la Universidad Central de las Villas para optar al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, CEDON, 2003.

Arzola, N., Goytisolo, R., Suárez, L. and Fernández, A., Efficiency increase in the extraction of sugar cane juice in the sugar cane mills by means of the regulation of hydraulic pressures., International Mechanical Engineering Congress & Exposition, ASME, Florida, USA, noviembre de 2005, pp. 1-5.

Fernández, G. S., Investigación sobre el origen y desarrollo de la falla en árboles de molinos de centrales azucareros., tesis presentada a la Universidad Central de las Villas para optar al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, UCLV, 1982.

Hugott, E., Manual para ingeniero Azucareros., México, Compañía Editorial Continental, S.A, 1988, pp. 803.

Jenkins, G. H., Introducción a la tecnología del azúcar de caña., La Habana, Editorial Ciencia y Técnica, 1987, pp. 568.

Pisarenko, G. S., Manual de Resistencia de Materiales., Moscú, Editorial MIR, 1985, pp. 695.

Satyanarayana, K., Methods of improving mill extraction., International Sugar Journal, Vol. 11, No. 4, 1986, pp. 9-11.

Shewale, P. K., Patil, A. R., Some aspects relating to reduction in the moisture content of bagasse by efficient milling operation., International Sugar Journal, Vol. 12, No. 9, 1987, pp. 9-11.

Shields, J. B., Some recent developments in sugar cane mills., International Sugar Journal, Vol. 10, No. 4, 1986, pp.8-12.

Veloz, Y., Esquema de análisis del Guijo Superior del Molino de Caña de Azúcar., Proyecto de Grado, Universidad de Cienfuegos, 1996.