

REQUERIMIENTOS PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO EN MOLINOS DE LA SEMILLA DE VITABOSA

Size reduction requirements in milling of vitabosa seed

RESUMEN

Se presentan recomendaciones para aprovechar tecnológicamente la semilla de vitabosa y algunas investigaciones para casos similares sobre la pertinencia de determinar sus propiedades físicas (peso, densidad, tamaño medio, dureza) y mecánicas (módulo de elasticidad, máximo esfuerzo de compresión, fuerza de relajación) para relacionarlas con el desempeño de los equipos utilizados para la reducción de tamaño. Teniéndose como referencia el sistema semilla de vitabosa (materia prima) – molino (sistema mecánico) – harinas (producto procesado), se realizó la búsqueda de investigaciones similares que potencialmente se puedan adaptar total o parcialmente para el caso de interés. Terminando con algunas recomendaciones para determinar la calidad del producto obtenido en la molienda, en aspectos como distribución y tamaño de las partículas.

PALABRAS CLAVES: vitabosa (*Mucuna deeringiana*), molinos, pulverización, alimento concentrado.

ABSTRACT.

Recommendations are presented to take advantage of the vitabosa seed technologically and some investigations for similar cases on the relevancy of determining their physical properties (weigh, density, mean size, hardness) and mechanical (module of elasticity, maximum compression strain, relaxation force) to relate them with the acting of the utilized equipments for the size reduction. Having like reference the system vitabosa seed (raw material)- mill (mechanical system)-flours (procedural product), it was carried out the search of similar investigations that potentially can adapt total or partially for the case of interest. . Finishing with some recommendations to determine the quality of the product obtained in the mill, in aspects like distribution for size of the particles.

KEYWORDS: vitabosa (*Mucuna deeringiana*), mill, pulverization, concentrated food.

1. INTRODUCCIÓN

La semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*) es una leguminosa de la familia del fríjol que posee un alto contenido de proteínas y se reporta en la literatura que contiene sustancias químicas con potencial uso en la industria farmacéutica y de los biopesticidas.

El objetivo del presente trabajo será hacer un estudio teórico que permita establecer principios de correlación entre las propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa con los requerimientos energéticos de molinos (de martillos o rodillos), los cuales tienen como función principal la transformación de las semillas en harinas (reducción de tamaño), y luego proponer una metodología para determinar la calidad física de las

harinas obtenidas, desde el punto de vista de la distribución de partículas.

Hasta la fecha no ha sido posible encontrar referencias que reporten investigaciones específicas para el caso de interés: semilla de vitabosa (materia prima) – molino (sistema mecánico) – harinas (producto procesado). Por lo que se ha considerado el estudio de casos similares, teniéndose la posibilidad de recurrir en etapas posteriores de la investigación, a la teoría adaptativa del modelamiento.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Según Villamizar [1] es poco el conocimiento de las características físicas y propiedades asociadas a los

HUGO GONZÁLEZ S.

Ingeniero Agrícola, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Nacional de Colombia
– Sede Medellín.
hagonzal@unal.edu.co

ALEJANDRO TORO B.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
– Sede Medellín.
atoro@unal.edu.co

ELKIN CORTES M.

Ingeniero Agrícola, Esp.
Profesor Titular
Universidad Nacional de Colombia
– Sede Medellín.
ecortes@unalmed.edu.co

productos de origen vegetal. Estas propiedades constituyen información básica de ingeniería, esencial en el diseño de máquinas y procesos. Saucedo [2] corrobora la afirmación anterior de la siguiente manera: “Normalmente en los planes nacionales no se tiene en cuenta el factor energético, siendo éste vital para lograr mayor productividad y competitividad”.

En el sector agroindustrial Colombiano es muy común que se trabaje con máquinas importadas y/o fabricadas con base en modelos empíricos. Ejemplos muy comunes son los molinos, despulpadoras, mezcladoras, etc. Por lo anterior se hace necesario diseñar modelos que contemplen aspectos físicos, mecánicos, químicos, dimensiones de máquinas, mecanismos, características del producto procesado, entre otros. En síntesis, los modelos deben considerar: la materia prima – el sistema mecánico – el producto procesado.

En la figura 1 se delimita de manera simplificada el objeto de estudio; donde interesa modelar un molino (de martillos o rodillos) relacionando la potencia consumida con las propiedades físico - mecánicas de la semilla de vitabosa y con las características dimensionales del producto entregado (harina). Obsérvese en la figura que el ambiente es un factor a tener muy presente, pues condiciones determinadas de humedad, temperatura, presión, entre otras, pueden ser el origen de diferencias importantes en los resultados obtenidos.

3. VARIABLES QUE AFECTAN LA MOLIENDA

La materia prima

Es posible utilizar las semillas de vitabosa para la elaboración de concentrados por su alto contenido de proteína y otros elementos aprovechables que hace que se constituya en una alternativa factible para el establecimiento de cultivos comerciales para la producción de alimentos balanceados (concentrados) para animales [3].

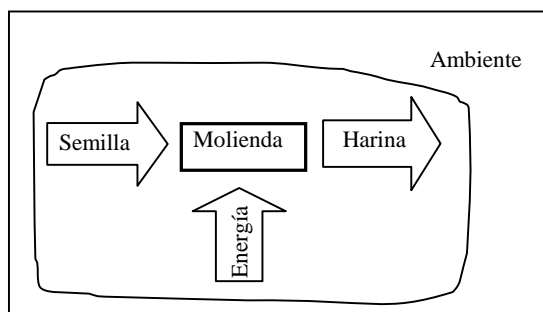


Figura 1. Delimitación del objeto de estudio.

Al consultar casos similares de investigaciones realizadas en otros productos agrícolas, se reporta el módulo de elasticidad (MOE), el máximo esfuerzo de compresión (EC) y el comportamiento de la fuerza de relajación (FR)

de las semillas de trigo y canola [4]. Los resultados indicaron que el MOE y EC decrecen linealmente con el incremento del contenido de humedad. Además se emplea el modelo de Maxwell para describir la fuerza de relajación de ambos granos, la cual disminuye significativamente con el incremento en el contenido de humedad.

Según Husain et al (1971) y Pappas *et al.* (1988) citados por [4], es común que los materiales agrícolas posean comportamiento viscoelásticos, donde los fenómenos de relajación son uno de los más importantes factores en la caracterización de estos materiales. El tiempo de relajación muestra que tan rápido un material puede disipar el esfuerzo después de recibir una deformación súbita.

Zoerb y Hall (1960) citados por [4], encontraron que el esfuerzo último de compresión y el módulo de elasticidad generalmente decrecen con el incremento de la humedad en semillas de frijol, maíz y trigo.

Shelef y Mohsenin (1967) citados [4], para la determinación del módulo de elasticidad (E) aplicaron la solución de Hertz para la compresión de un cuerpo convexo y la solución de Boussinesq para un cuerpo semi-infinito. El máximo esfuerzo ocurre en el centro de la superficie de contacto (el primer punto de contacto entre el plato de compresión y la muestra) y es obtenido de la teoría de Hertz por la ecuación 1.

$$\sigma_{max} = 1,5 (F/\pi ab) \quad (1)$$

Donde, σ_{max} es el máximo esfuerzo de compresión en la superficie de contacto, a es el eje semi mayor y b es el eje semi-menor del área elíptica de contacto.

Típicas curvas de fuerza deformación para la canola se presentan en la figura 2. Donde L denota el límite lineal (rango elástico), mientras R identifica el punto en el cual la semilla experimenta ruptura total [4].

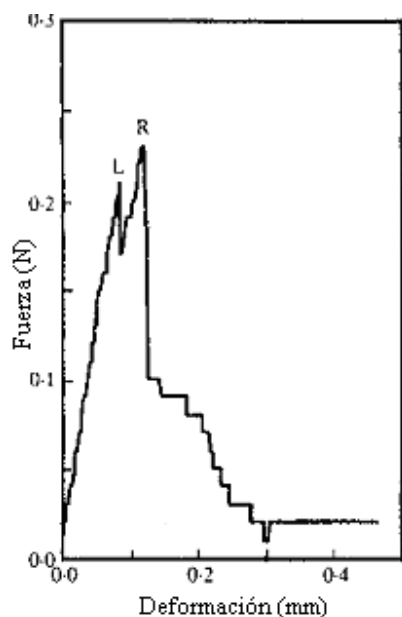


Figura 2. Curva típica fuerza – deformación para la semilla de canola con un contenido de humedad entre 5 – 8 % b.s. (base seca) y una velocidad de deformación de 0,1 mm/s (L, límite lineal; R, punto de ruptura) [4].

En la figura 3 se observa como al incrementarse el contenido de humedad disminuye el esfuerzo de compresión en la canola. Y en la figura 4 la fuerza típica de relajación de la canola a diferente contenido de humedad [4].

En el desarrollo del modelamiento de un molino de rodillos para moler trigo, Fang *et al.* [5] recomiendan determinar las siguientes propiedades físicas de la semilla: peso, densidad, tamaño medio, peso de 1000 semillas, dureza, dureza de un volumen de harina y humedad de las muestras de trigo.

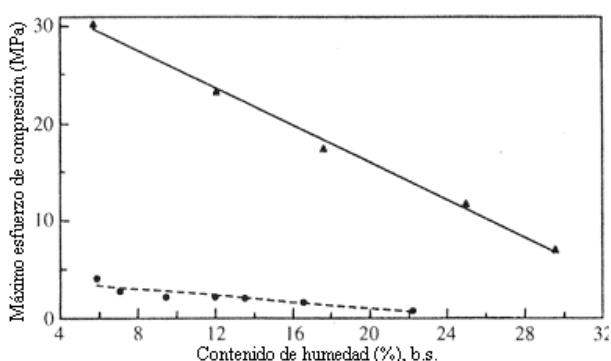


Figura 3. Efecto del contenido de humedad (bases seca) con el máximo esfuerzo de compresión de canola (●, experimental; -----, línea trazada) y trigo (▶, experimental; _____, línea trazada) [4].

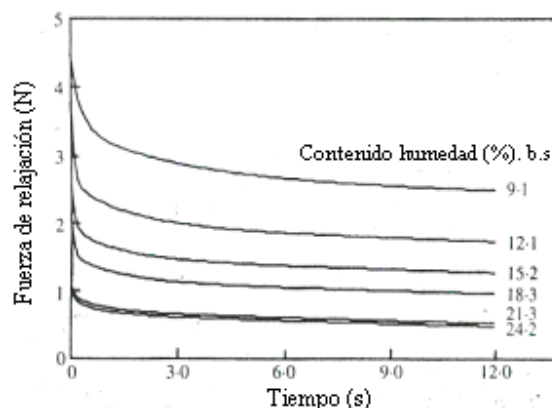


Figura 4. Efecto del contenido de humedad (bases seca) en la fuerza de relajación (velocidad de deformación de 0,1 mm/s) [4].

El conocimiento de las propiedades físicas, la magnitud de las fuerzas de relajación (función del contenido de humedad), la velocidad de deformación y los niveles de esfuerzo se deben tener muy presentes para la optimización de los diferentes parámetros (entre los que se incluye la humedad apropiada para iniciar la molienda de una materia prima).

Requerimientos de potencia

Durante la reducción de tamaño, las partículas se someten a esfuerzos de tensión; luego se deforman y repentinamente se rompen en fragmentos. Todo exceso de energía de tensión sobre la nueva energía superficial creada debe aparecer como calor [6].

La ley de Bond (ecuación 2) se utiliza para modelar los procesos de molienda de minerales y determinar el consumo de energía cuando se reducen las partículas. Será pertinente investigar qué tan aproximado puede llegar a ser el modelo planteado por Bond para el caso particular de molienda de productos agropecuarios.

$$P = 0,3162 Wi M ((1 / Db^{1/2}) - (1/Da^{1/2})) \quad (2)$$

Donde:

- P*: Potencia necesaria para triturar (kW).
- Wi*: Índice de trabajo (kWh / ton)
- M*: Velocidad de alimentación (ton / hora)
- Db*: Tamaño final del producto (mm)
- Da*: Tamaño inicial del producto (mm)

Uno de los factores principales que deben ser tenidos en cuenta en el diseño de una máquina es el consumo de potencia, que depende de la capacidad de extracción, de la potencia consumida por sus componentes y de las características del producto que se procesa. El desconocimiento de la incidencia de estos factores puede ocasionar selección inadecuada de la fuente de potencia,

con subutilización del molino o fallas de sus componentes [7].

En los molinos de martillos (figura 5), con velocidades entre 1.800 – 3.000 rpm se obtiene un molido de regular tamaño y el grano obtenido posee las características ideales para la elaboración de concentrados (Perry, 1977; citado por [9]). La velocidad periférica varía entre 70 y 100 m/s según la capacidad del molino (Simmons, 1965; citado por [9]). La relación de reducción de tamaño del producto obtenido es directamente proporcional a la potencia consumida y a la capacidad del molino (Perry, 1977; citado por [9]).

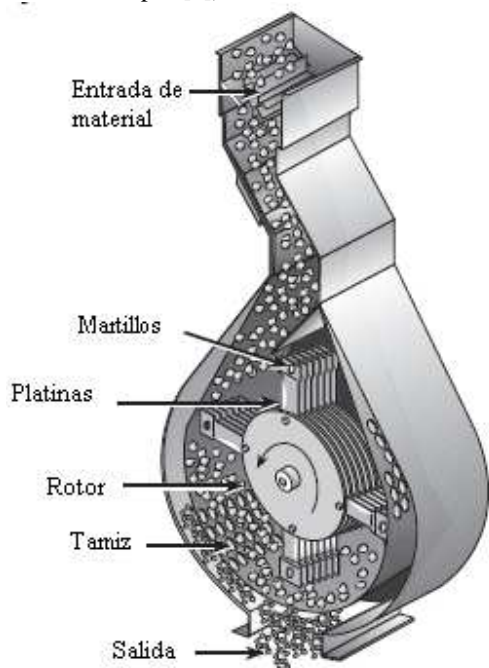


Figura 5. Molino de martillos [8].

El trabajo de los molinos de martillos oscilantes puede controlarse ajustando la distancia entre los martillos y el tamiz, la cual varía entre 6 y 32 mm de acuerdo a las necesidades [9].

Fang *et al.* [5] investigaron el efecto de las propiedades físicas de semillas de trigo con los parámetros operacionales de la primera molienda en un molino de rodillos (ver figura 6) y los requerimientos de energía en la reducción del tamaño de las partículas; luego desarrollaron un modelo para los requerimientos de potencia y energía, para moler trigo conociendo sus características físicas.

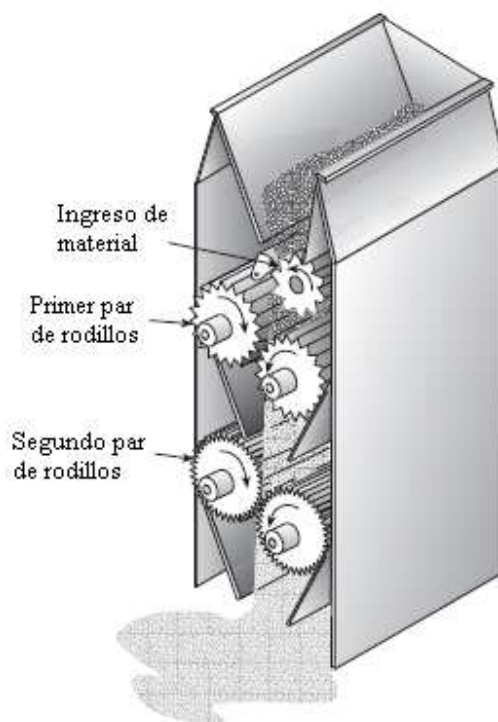


Figura 6. Molino de rodillos [8].

El modelo de predicción de Fang *et al.* [5] se basó en un método estadístico de regresión lineal; plantearon las siguientes seis variables independientes: variedad de trigo, humedad, cantidad de alimentación, velocidad del rodillo, relación de transmisión de frecuencia del rodillo y espacio entre rodillos; cada una con tres niveles. Usando el software estadístico SAS se analizó la regresión, donde algunas de las propiedades físicas se incluyeron en las covarianzas. La forma general del modelo de predicción se observa en la ecuación 3.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 W + \beta_3 M + \beta_4 F + \beta_5 R + \beta_6 D + \beta_7 G + \varepsilon \quad (3)$$

Donde,

Y = variable respuesta – potencia del rodillo rápido (kW/m), o potencia del rodillo lento (kW/m), o potencia neta (kW/m), o energía por unidad de masa (kJ/kg), o energía específica (kJ/m²),

β_0 = intercepto,

β_i = coeficiente para la covarianza correspondiente o variable independiente, $i = 1, 2, \dots, 7$,

H = dureza de una semilla (adimensional),

W = peso de una semilla (mg),

M = contenido de humedad (% base húmeda),

F = cantidad de alimentación (kg m⁻¹ min⁻¹),

R = velocidad del rodillo rápido (rpm),

D = velocidad diferencial del rodillo (m/s),

G = Espacio en el rodillo (mm), y

ε = error debido al azar

Luego de diez verificaciones, los autores concluyeron que el modelo tiene potencial uso para predecir los requerimientos de potencia y energía para la molienda de trigo en molinos de rodillos.

Modelos similares al propuesta por Fang *et al.* [5], permitirán determinar consumos de potencia en función de las principales propiedades físicas y mecánicas de la semilla de vitabosa, para una reducción y distribución de tamaños deseados de partículas de semillas (la harina).

El producto procesado: la harina

El análisis de tamices es la operación más antigua usada para separar fracciones de partículas por diferencia de tamaño; es muy empleada por su simplicidad y bajo costo. El tamizado es confiable para tamaño de partículas mayor de 44 micras; por debajo de esta se recomienda el uso de tamices de precisión, que permiten separar partículas hasta de 10 micras [10].

Fang *et al.* [5] recomiendan determinar el tamaño medio de las partículas molidas mediante la norma de tamizado publicada en la ASAE Standard (S319.2 – 1995).

Guevara y Castaño [11], para determinar la distribución de las partículas de café molido utilizaron el modelo matemático conocido como ecuación linealizada de Rosin – Rammler (ver ecuación 4):

$$\ln(\ln(100/\%R)) = n \ln(D) + \ln(b) \quad (4)$$

Donde,

n : coeficiente de uniformidad

b : constante

D : diámetro promedio.

Guevara y Castaño [11] luego compararon la técnica de tamizado con la difracción de rayos láser y estudiaron entre otros aspectos, el comportamiento del modelo matemático usado para ajustar la distribución obtenida. Los autores determinaron que la ecuación de Rosin-Rammler ajustaba bien la distribución, pero con partículas pequeñas tuvo problemas por obstrucción, por lo que recomendó la adición de por lo menos dos tamices más con una abertura mayor a la del tamiz 20 (850 μm).

Se debe también tener muy presente las condiciones ambientales, por su incidencia en el cambio de la humedad del producto entregado (harinas), y además de acuerdo a autores como Praveen *et al* [4], causa variaciones significativas en propiedades mecánicas de las materias primas (módulo de elasticidad, máximo esfuerzo de compresión y comportamiento de la fuerza de relajación de las semillas).

Finalmente, se considera que el modelo que se recomienda aplicar en este tipo de investigación, es un modelo de fase experimental, en el cual se buscará utilizar principios de dualidad con modelos más elaborados, pero se debe tener especial cuidado con el entorno, pues los factores ambientales tienen alta incidencia en las propiedades iniciales de las materias primas y en las propiedades finales de los productos procesados.

4. CONCLUSIONES

Con el incremento en el contenido de humedad se presenta reducción en los valores del módulo de elasticidad (MOE), máximo esfuerzo de compresión (EC) y fuerzas de relajación (FR), en las semillas de trigo y canola.

Las semillas que se reportan en este artículo, en la curva esfuerzo deformación, presentan un límite lineal bien definido (rango elástico).

Las perspectivas de uso actuales del modelo del “molino de rodillos” son buenas, pues su nivel de correlación es aceptable (0,88) y considera aspectos físicos de la materia prima y factores de diseño del molino.

5. RECONOCIMIENTOS

Al DIME de la Universidad Nacional Sede Medellín que financió el proyecto de investigación: “Caracterización de la semilla de vitabosa (*Mucuna deeringiana*).”

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Villamizar, F. *et al.* 2004. Inventario de las investigaciones realizadas en poscosecha de productos agrícolas en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Grupo de poscosecha. Bogotá. 317 p.
- [2] Saucedo B. Juan. 2001. Energía. En: La República, Bogotá. p. 5B.
- [3] Echeverri, c. y Rodríguez, H. 1999. La Vitabosa (*Mucuna deeringiana*). SENA. Rionegro.
- [4] Praveen C., B., Irudayaraj, J. y Marquis, B. 1995. Studies on rheological behavior of canola and wheat. En: Journal agricultural engineering research. 61, 267 – 274.
- [5] Fang, Q., Haque, E., Spillman, K., Reddy, P. y Steel, J. 1998. Energy requirements for size reduction of wheat using a roller mill. En: Transactions of the ASAE. Vol. 41 (6: 1713 – 1720

- [6] McCabe, J., Smith, C. y Harriott, P. 2002. Operaciones unitarias en ingeniería química. 6. ed., México, D.F. : McGraw-Hill. 1199 p.
- [7] García B., H.; Abarca, J. y Moreno, F. 1985. Factores que determinan el consumo de potencia en los molinos. En: Revista ICA. Volumen 20, No. 3. Septiembre. p. 168.
- [8] Koch, Kim. 2002. Hammermills and Roller Mills. Kansas State University. MF-2048. Disponible en internet:
<http://www.oznet.ksu.edu/library/GRSCI2/MF2048.pdf>.
[Consultada: 21 Jun. 2008].
- [9] Londoño G., L.; William C., R. 1983. Diseño de un molino de martillos para concentrados. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- [10] Bocanegra, M. 1974. Clasificación neumática de harinas, y métodos para medida de tamaño de partículas. En: IIT tecnología. No 87. Bogotá. Enero - febrero. Vol. XVI. p. 35.