

JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y DE LA FUERZA DE APLASTAMIENTO DE LOS RODILLOS DE UN LAMINADOR DE MAÍZ PARA LA FABRICACIÓN DE HARINA PRECOCIDA

Arcenio Gutierrez¹, Santiago Hernández¹ y Pedro Viggiani^{1*}

¹ *Departamento de Ingeniería Mecánica UNEXPO-LCM*

*pedro.viggiani@gmail.com

RESUMEN

El proceso de elaboración de harina precocida está conformado por múltiples etapas, una de ellas corresponde a la laminación del grano de maíz en estado de cocción, por medio de rodillos. Para estimar las fuerzas que se generan durante el aplastamiento, es necesario analizar la interacción entre los granos y los rodillos, tanto desde el punto de vista geométrico como desde la perspectiva de la naturaleza de los materiales involucrados. Con este objetivo en mente, se han propuesto dos experimentos muy sencillos de implementar. El primero, para determinar el coeficiente de roce dinámico entre el maíz y el acero del que están elaborados los rodillos. El segundo, para estimar la fuerza necesaria para el aplastamiento de los granos de maíz ya cocinados. Estos dos parámetros son la base para emprender los cálculos involucrados en el diseño del laminador. Se describen con detalle la aplicación de los experimentos propuestos y sus resultados.

Palabras claves: Laminación, aplastamiento, roce, maíz.

ABSTRACT

The process of production of pre-cooked flour is shaped by multiple stages, one of them corresponds to the lamination of the grain of corn already boiled, by means of rollers. To estimate the forces generated during the crushing, it is necessary to analyze the interaction between the grains and the rollers, from the geometric point of view as well as from the perspective of the nature of the involved materials. With this aim in mind, it has been proposed two simple experiments very easy to implement. The first one, to determine the dynamic friction coefficient between the corn and the steel from the rollers. The second one, to estimate the force necessary for the crushing of the grains. These two parameters are the base to undertake all the calculations involved in the design of the rolling mill. The application of the proposed experiments and their results are described with detail.

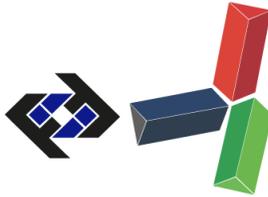
Keywords: Lamination, dehydration, corn, leaves

INTRODUCCIÓN

La harina de maíz precocida es un producto ampliamente utilizado en la sociedad moderna (sobre todo en Latinoamérica) por sus múltiples beneficios en cuanto a conservación, transporte y versatilidad en la preparación de una variada gama de platos. Desde la recolección del grano en campo hasta la presentación final, intervienen en su preparación varios procesos, tales como:

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación. Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
Telf.: +58 212-605 1644| <http://www.ing.ucv.ve>



Trillado, desgerminado, precocción, laminación, deshidratación y molienda.

Este trabajo se ha enfocado en la determinación experimental del coeficiente de roce dinámico entre los rodillos y el grano, así como de la fuerza de aplastamiento necesaria romper el grano de maíz, ambos parámetros de vital importancia para el diseño del laminador. Con esta información a disposición, aquellas comunidades apartadas, en donde la red de distribución comercial tiene dificultades para llegar, podrían dar los primeros pasos para implementar la fabricación de harina precocida a escala artesanal. Esto mejoraría no sólo el aspecto alimenticio y nutricional de tales comunidades, sino que también podría convertirse en una fuente generadora de empleo y por tanto de ingresos.

METODOLOGÍA

Para la determinación del coeficiente de roce dinámico entre los granos de maíz se procede de la siguiente manera:

1. Se coloca un grano de maíz cocinado, sobre una plancha en posición horizontal de acero inoxidable 304, el cual es el material del que estarán hechos los rodillos del laminador.
2. Se incrementa progresivamente el ángulo de inclinación de la plancha hasta conseguir el inicio del movimiento cuesta abajo del grano de maíz (por deslizamiento, "no" por rodadura).
3. Se fija una "distancia" sobre el plano (la plancha) inclinado y se mide el "tiempo" en que el grano en deslizamiento la recorre. Haciendo uso de las ecuaciones del movimiento rectilíneo acelerado (ver Resultados y Discusión), y de las distancias y tiempos previamente medidos, se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (aceleración y velocidad final).
4. De la aplicación de la Segunda Ley de Newton al grano de maíz en movimiento acelerado, y con su aceleración (determinada en el paso 3), se puede hallar el coeficiente de roce dinámico (μ_k).

Para la determinación de la fuerza de aplastamiento necesaria que los rodillos deben ejercer sobre el grano de maíz:

1. Se coloca un grano de maíz cocinado, sobre un plano horizontal.
2. Haciendo uso de un recipiente cilíndrico (frasco) de vidrio con tapa, se vierte un cierto volumen de líquido en su interior.
3. Se mide el peso de todo el conjunto (recipiente más agua).
4. Se varía el volumen del líquido hasta lograr la deformación deseada (inspección visual) del grano de maíz cocido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coeficiente de Roce Dinámico

Al entrar en contacto los rodillos de laminación con los granos de maíz, aparecen fuerzas de roce de naturaleza dinámica, la determinación del coeficiente de roce dinámico puede llevarse a cabo mediante procedimientos experimentales en conjunto con la segunda ley de Newton (Figura 1), estudiando la interacción entre el maíz y el acero inoxidable 304, material del que se diseñan los

utensilios de manipulación de alimentos.

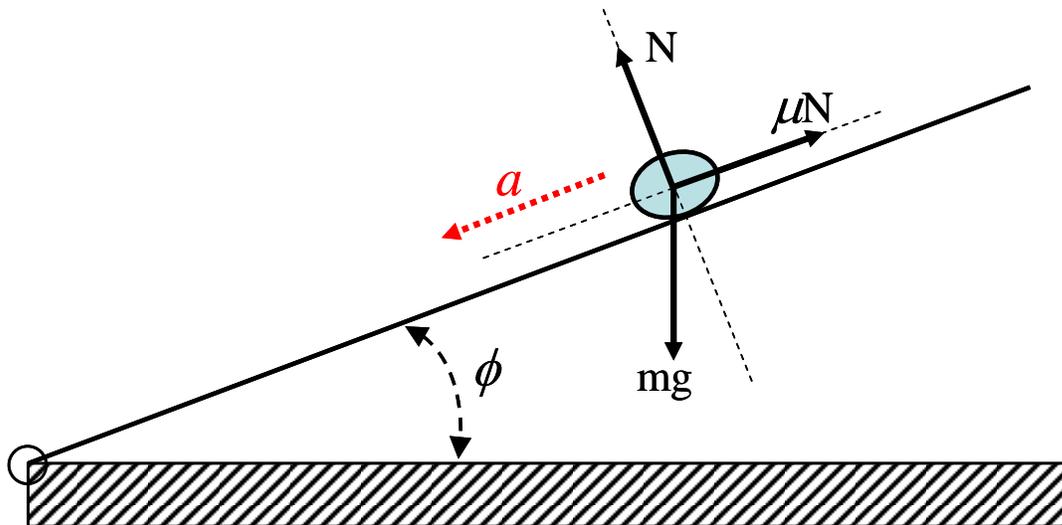


Figura 1. Fuerzas sobre el grano al deslizarse por el plano inclinado

Haciendo sumatoria de fuerzas en la dirección paralela al plano inclinado, se tiene que:

$$mg \sin \varphi - \mu_k N = ma \quad (1)$$

Tomando la sumatoria de fuerzas en la dirección perpendicular al plano inclinado, se obtiene:

$$N - mg \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

Introduciendo (2) en (1), se puede despejar el valor del coeficiente de roce dinámico (μ_k):

$$\mu_k = \frac{g \sin \varphi - a}{g \cos \varphi} \quad (3)$$

La aceleración del grano deslizándose cuesta abajo por el plano inclinado, se determina fijando una cierta distancia de recorrido (d), midiendo el tiempo en que el grano efectúa tal recorrido (t), y evaluando estos parámetros en las ecuaciones (4 y 5) del movimiento rectilíneo acelerado.

$$X = V_o t + \frac{at^2}{2} \quad (4)$$

Considerando que el grano parte del reposo ($V_o=0$), y despejando la aceleración (a) de la ecuación (4), se tiene que:

$$a = \frac{2X}{t^2} \quad (5)$$

Utilizando la aceleración (a) para evaluar la ecuación (3) se puede obtener finalmente el

coeficiente de roce dinámico (μ_k), el valor de la aceleración de gravedad fue 9.81 m/s^2 . En la Tabla 1, se muestra el resultado de las mediciones.

Tabla 1. Resultado de las mediciones del coeficiente de roce dinámico (μ_k)

Ensayo	X (m)	t (s)	ϕ (grados)	a (m/s ²)	μ_k
1	0.1503	0.6110	22.3525	0.8050	0.2758
2	0.1532	0.6165	22.3549	0.8061	0.2757
3	0.1533	0.6163	22.3570	0.8072	0.2756
<i>medidos</i>				<i>calculados</i>	

Por tanto el valor (promedio) del coeficiente de roce dinámico fue $\mu_k = 0.2757$.

Fuerza de Aplastamiento

Antes de determinar la fuerza de aplastamiento, se hace necesario estimar el diámetro de los rodillos, lo cual se hace considerando la reducción necesaria (ver Figura 2) para laminar los granos, tomando en cuenta la fricción dinámica para evitar el rebote de los granos cuando estos son presionados por los rodillos.

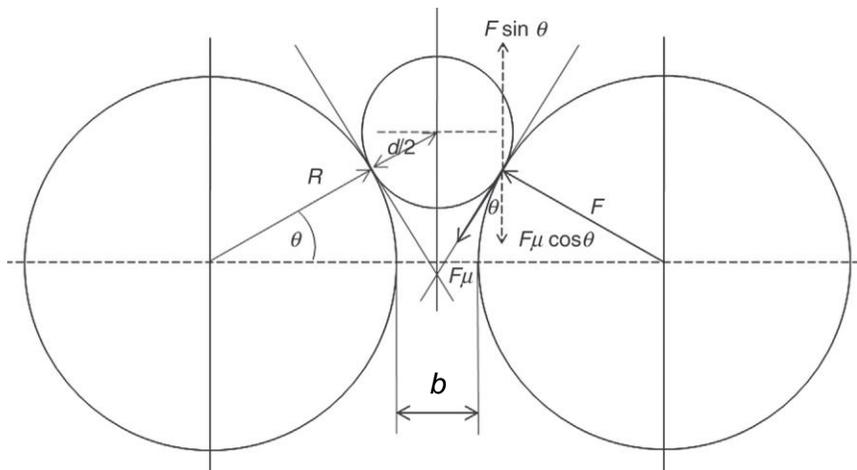


Figura 2. Reducción del tamaño de grano [1]

Considerando el tamaño inicial (d) y final (b) promedio del grano, conocido el coeficiente de roce dinámico, se puede obtener el diámetro del rodillo necesario para la laminación [1] utilizando la ecuación (2).

$$R = \frac{b - d \cos \theta}{2(\cos \theta - 1)} \quad (6)$$

Donde,

$$\theta = \arctan(\mu_k) \quad (7)$$

Tomando como mediciones promedio del tamaño inicial y final de grano, $d = 4$ mm y $b = 1$ mm respectivamente, y evaluando la ecuación (6), se obtiene el diámetro (mínimo) del rodillo $D = 265.7$ mm.

La fuerza de aplastamiento (f_a) del grano de maíz en estado de cocción, se determinó experimentalmente utilizando un recipiente cilíndrico (frasco con tapa de rosca) con un diámetro similar al anteriormente calculado para el rodillo. Este se fue llenando con agua y se colocó sobre del cereal precocido, hasta que el espesor del grano experimentase la reducción deseada (espesor final 1 mm), lo cual sucedió al ser llenado el frasco con un volumen de 0.0087674 m³ de agua. Al multiplicar este volumen por la densidad del agua (1000 kg/m³) se obtuvo la fuerza mínima que debía ser ejercida por el rodillo para conseguir la reducción deseada, la cual fue de 8.767 kgf, se decidió incluir un margen de seguridad y se tomó como valor de la fuerza de aplastamiento $f_a = 10$ kgf

Cargas sobre los Rodillos

Los rodillos de laminación están sometidos a cargas de flexión y torsión, las cuales son generadas por las fuerzas de aplastamiento, que por acción y reacción, el grano que está siendo laminado aplica sobre los rodillos (ver Figura 3).

Una vez que la fuerza de aplastamiento fue determinada a través de las mediciones experimentales ya descritas, y estimando (experimentalmente) que luego de laminado el grano se formará una hojuela (lámina) de longitud $L_h = 1$ cm, entonces las ecuaciones (8) y (9) pueden ser evaluadas y las cargas normal (F_N) y tangencial (F_T) que actúan sobre los rodillos por unidad de longitud (ver Figura 4) pueden ser determinadas.

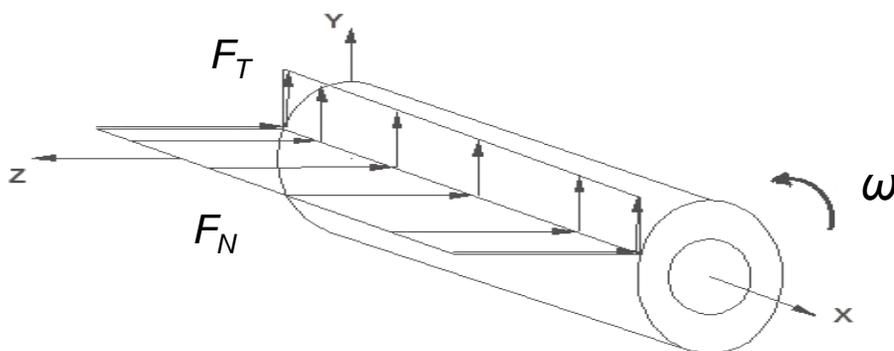
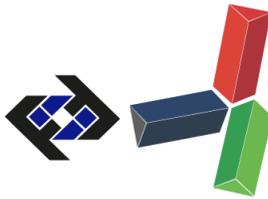


Figura 4. Cargas en los rodillos



$$F_N = \frac{\text{Fuerza de aplastamiento}}{\text{longitud de la hojuela}} = \frac{f_a}{L_h} \quad (8)$$

Por tanto, $F_N = 10 \text{ kg/1 cm} = 10 \text{ kg/cm}$.

$$F_T = F_N \mu_k = \frac{f_a \mu_k}{L_h} \quad (9)$$

De manera que, $F_T = (10)(0.2757) = 2.75 \text{ kg/cm}$.

El torque necesario para la laminación, puede obtenerse:

$$T = F_T L \frac{D}{2} \quad (10)$$

Donde:

T : Torque para laminación (N.m)

F_T : Fuerza tangencial por unidad de longitud sobre los rodillos (N/m)

L : Longitud de los rodillos (m)

D : Diámetro de los rodillos (m)

Para el cálculo de la longitud de los rodillos (L), primero se debe determinar el caudal de material laminado a producir. Partiendo del flujo másico de maíz laminado, el cual es de $m = 5.2 \text{ kg/min}$ (condición de diseño) y dividiendo este valor entre la densidad del maíz cocido $\rho = 720 \text{ kg/m}^3$, se obtiene el caudal de material laminado que se desea producir $Q = 0.0072 \text{ m}^3/\text{min} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

El caudal de material laminado también puede ser calculado como [2]:

$$Q = RL\bar{c} \quad (11)$$

Donde:

Q : caudal de material laminado (m^3/min)

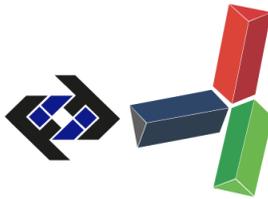
R : Radio de los rodillos (m)

L : Longitud de los rodillos (m)

\bar{c} : Velocidad periférica de los rodillos (m/min)

La longitud de los rodillos puede ser despejada de la ecuación (11):

$$L = \frac{Q}{R\bar{c}} \quad (12)$$



Definiendo la velocidad periférica de los rodillos como $\bar{c} = 5.5$ m/s (criterio de diseño), utilizando el caudal de material laminado que se desea producir $Q = 0.0072$ m³/min, y el radio de los rodillos como $R = 265.7/2$ mm = 132.85 mm, se obtiene una longitud "mínima" para los rodillos de $L = 9.85 \times 10^{-3}$ m. Como esta longitud es muy pequeña e impráctica de implementar, se ha escogido una longitud para los rodillos de $L = 0.08$ m = 8 cm.

Una vez determinada la longitud de los rodillos, la ecuación (10) puede ser retomada para calcular el torque requerido para la laminación.

$$T = (2.75 \text{ kgf/cm})(8 \text{ cm})(132.85 \times 10^{-3} \text{ m}) = 2.92 \text{ kgf.m} = 28.64 \text{ N.m}$$

La potencia necesaria para la laminación puede ser estimada como,

$$P = T\omega = T \frac{\bar{c}}{R} \quad (13)$$

$$P = (28.64 \text{ N.m})(5.5 \text{ m/s}) / 132.85 \times 10^{-3} \text{ m} = 1185.7 \text{ Watts}$$

Habiendo calculado las cargas que actúan sobre el rodillo (F_N , F_T), el torque (T) y la potencia necesaria (P) para la laminación, se puede emprender el proceso de diseño del laminador.

CONCLUSIONES

Se han descrito dos experimentos fáciles de implementar y ejecutar, por medio de los cuales se han podido determinar parámetros de vital importancia para el proceso de diseño de un laminador para la fabricación de harina precocida, como lo son: el coeficiente de roce dinámico (μ_k) y la fuerza de aplastamiento (f_a) del grano de maíz en estado de cocción.

Se ha evidenciado que las cargas que actúan sobre los rodillos así como la potencia necesaria para realizar la operación de laminación, pudieron ser estimadas partiendo de tales parámetros, y por tanto, se ha establecido su importancia para desarrollar y llevar a buen término el diseño aquí abordado.

REFERENCIAS

- [1] Gupta, A. y Yan, D. (2016). "Mineral Processing Design and Operations". 2nd Edition. Elsevier. Chapter 6.
- [2] Perry, R. H., Green D. H. y Maloney J.O. (1992). "Manual del Ingeniero Químico". 6^{ta} Edición. McGraw-Hill. México, Tomo II, capítulo 8.