

Fig. 1. Special shear device for fibrous agricultural materials
 Fig. 1. Dispositivo de corte directo modificado, [7].

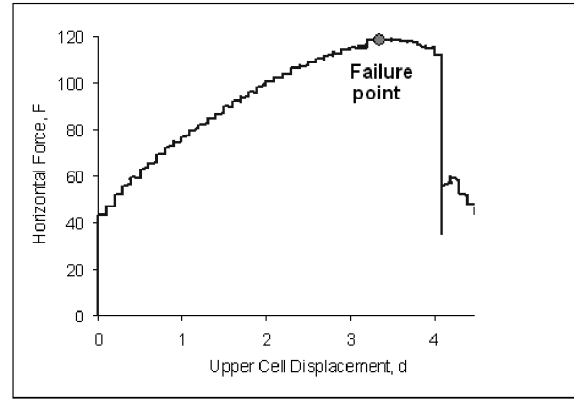


Fig. 2. Typical shear cell data for sugarcane bagasse
 Fig. 2. Curva típica de comportamiento de la fuerza horizontal durante el corte, [7].

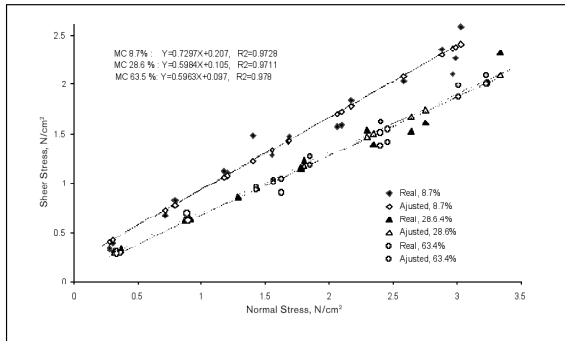


Figure 3. Mohr envelope for sugarcane bagasse at three moisture content levels
 Fig. 3. Envolvente de Mohr para bagazo de caña a tres contenidos de humedad, [7]

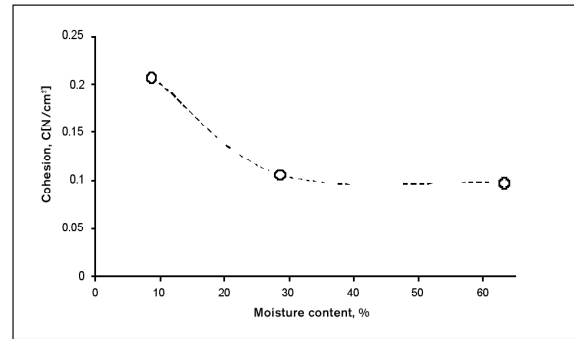


Figure 4. Relationship between moisture content and cohesion
 Fig. 4. Relación entre el contenido de humedad y la cohesión en bagazo de caña, [8].

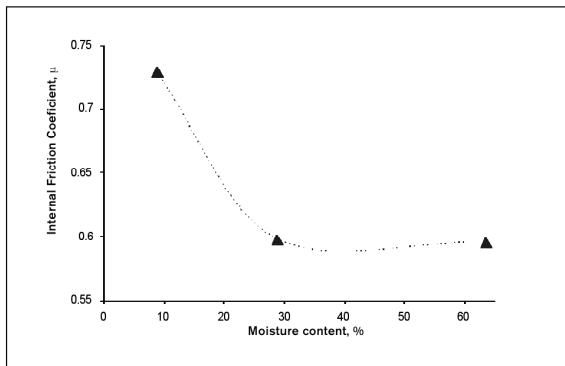


Figure 5. Relationship between moisture content and internal friction coefficient
 Fig. 5. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de fricción interno en bagazo de caña, [8].

Sign up for
Sugar & Energy
Notes
Sugar Journal's
 new FREE newsletter
www.sugarjournal.com

Esfuerzos de Corte Interno en Bagazo de Caña

Resumen

Se presentan los resultados de pruebas de corte interno en condiciones de precorte para bagazo de caña de azúcar, utilizando un dispositivo modificado de corte directo. Se determinó la relación entre los esfuerzos normales y los esfuerzos de corte en muestras de bagazo de caña a tres contenidos de humedad. El análisis estadístico mostró que la envolvente de Mohr tiene un comportamiento lineal con coeficiente de correlación R^2 de 0.97, obteniendo altos valores de cohesión (C) y coeficiente de resistencia al corte (μ) al más bajo nivel de humedad respecto a altos contenidos de humedad: $C = 0.207$ N/cm² y $\mu = 0.729$ para 8.7%; $C = 0.105$ N/cm² y $\mu = 0.598$ para 28.6% de humedad; $C = 0.097$ N/cm² y $\mu = 0.596$ para 63.5% de humedad.

Lista de Símbolos

A_R	Área al momento de falla
d	Desplazamiento de la celda superior
C	Cohesión
F	Fuerza horizontal
F_f	Fuerza de fricción entre celdas
L_r	Longitud del plano de falla
S	Separación entre celdas
W	Carga normal
ϕ	Ángulo de resistencia al corte
σ	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo de corte
μ	Coefficiente de Resistencia al corte

Introducción

El bagazo de caña es una fibra lignocelulósica que se produce como un residuo en fábricas de azúcar. Es un material a granel compuesto de partículas individuales, cada una delgada, alargada y de diferentes diámetros en su sección transversal. El material a granel tiene baja densidad, es altamente compresible y las partículas tienden a entrelazarse entre

ellas, dificultando su movimiento. En años recientes ha crecido el interés por el aprovechamiento de este subproducto como combustible o también como alimento para el ganado, razón por la cual es importante conocer sus propiedades físicas y mecánicas. Una característica básica a ser determinada es la función límite de esfuerzos que define a la cohesión, C, y al ángulo interno de fricción, μ . Estas características son útiles para determinar lo que se denomina las *propiedades de flujo* para el diseño de tolvas para flujo libre, tal como lo describió A. Jenike [1].

La función límite de esfuerzo en geomecánica para materiales rígido-plásticos fue definida por Mohr Coulomb, y esta aceptada como una función lineal:

$$\tau = \mu\sigma + C, \text{ ó } \tau_f = \text{Tan}\phi \cdot \sigma + C \quad (1)$$

Donde τ denota la resistencia al corte en el plano de falla de una muestra de material sometida a una carga de compresión y otra de cortante; μ denota el coeficiente de resistencia al corte; C

denota la cohesión del material; ϕ denota el ángulo de resistencia al corte, y σ denota el esfuerzo normal sobre el plano de falla.

Existe escasa investigación en la determinación de la envolvente de Mohr en materiales fibrosos agrícolas tales como el bagazo de caña. Esto se debe a problemas mecánicos de obstrucción para el desarrollo de pruebas utilizando dispositivos convencionales para materiales granulares tales como las celdas de Jenike, Schulze, o Peschel [3]. Algunos parámetros de materiales agrícolas desfibrados se han reportado por Ussrey [4] en tallos de arroz semienteros acomodados en forma paralela; Negi [5] reporta pruebas de corte interno en maíz picado; Berhardt [6] reporta pruebas al corte en bagazo de caña logrando medir solamente valores de resistencia a tensión de 0.05-0.068 N/cm². En la Tabla 1 se muestran los diferentes resultados.

Como lo describió Escamilla-Martínez [7] y Berhardt [6], no existe una forma fácil de medir las

Tabla 1. Pruebas de corte interno en algunos materiales agrícolas fibrosos

Author/ bulk material	Moisture Content, % w.b.	Normal stress, N/cm ²	μ	C, N/cm ²
Ussrey: Rice stalks residues	68.5	0.7182	0.55	0.04
	60.5	1.436	0.41	0.06
	67.2	2.154	0.41	0.09
Negi: Silage Corn	67.7	0.754- 1.885	0.46	0.0731
	68.2	0.754- 1.885	0.50	0.0807
Berhardt: Sugarcane bagasse	10.0	0	Fail	Fail

propiedades mecánicas de materiales fibrosos a granel utilizando dispositivos convencionales. Por esta razón se desarrolló un dispositivo de corte directo modificado con el propósito de medir la resistencia interna al corte de bagazo de caña de azúcar.

Materiales y Métodos

Se utilizó como material de prueba bagazo de caña proveniente de una fábrica de azúcar en México (Tamazula, Jal), con contenido de humedad de 55% y longitud promedio de partículas de 12.34 mm. El material fue secado naturalmente al sol para su conservación y uso posterior. Las pruebas se realizaron a tres contenidos de humedad, donde cada uno de ellos se obtuvo artificialmente agregando agua; el contenido de humedad se determinó de acuerdo a la norma ASAE-S358.2 en los siguientes niveles: 8.7, 28.6 y 63.4 % base humedad. La densidad a granel asociada a cada contenido de humedad fue de 70, 100, 120 kg/m³. El dispositivo de pruebas utilizado consistió de dos cajas cuadradas de 16x16 cm y 5 cm de profundidad, [7], Fig. 1; la caja superior es móvil y desliza sobre la caja inferior. En la dirección de corte y sobre el plano de deslizamiento tiene una separación entre ambas cajas (S, Figure 1). El sistema también incluye un sistema de adquisición de datos utilizado para capturar en tiempo real el desplazamiento de la caja superior y la correspondiente fuerza de corte horizontal que tiene lugar en el plano de falla. Se midieron siete puntos (τ , σ): para 8.3% de contenido de humedad, cada punto se replicó tres veces; para los otros niveles, solamente se replicaron dos veces. La carga normal W probada fue de: 59.8, 151.0, 243.3, 335.5, 448.3, 535.6 y 618.0 N.

Procedimiento de prueba. Primero se determinó la fuerza de fricción, F_f , entre la caja superior e inferior, sin cargar material de prueba. Después se alinearon la caja superior e inferior una sobre la otra y se cargó manualmente la muestra de bagazo de caña dentro de ambas cajas. Enseguida se colocó una

carga normal W sobre la muestra y se inició la aplicación de la fuerza horizontal de corte para desplazar la celda superior y producir el esfuerzo de corte (ver la Figura 1). El sistema de adquisición de datos capturó en tiempo real el desplazamiento de la caja superior (eje X) contra la fuerza horizontal (eje Y), Figura 2. La prueba se detuvo cuando se observó el máximo valor de fuerza horizontal, caracterizado por que la curva inicia su descenso.

Procedimiento de cálculo. El esfuerzo normal y el esfuerzo de corte se calcularon como sigue:

$$\sigma = \frac{W}{A_R} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{(F - F_f)}{A_R} \quad (3)$$

Donde W es la carga normal sobre la muestra, F es la fuerza horizontal, F_f es la fuerza de fricción entre la celda

superior e inferior y, A_R es el área en el momento de la falla.

Resultados

El área A_R al momento de la falla fue determinada por la ecuación:

$$A_R = 16Lr = 16(22.5 - d) \quad (4)$$

Donde d es el desplazamiento de la caja superior y 22.5 es una longitud medida durante las pruebas que está relacionada al espesor de pared de la caja y a la influencia del entrelazamiento de las fibras en los puntos A y B mostrados (refiérase a la Figura 1).

Como se esperaba para materiales fibrosos a granel, la falla ocurrió a una distancia grande desde el punto inicial de movimiento de la caja superior. La falla tuvo lugar dentro de un rango definido; para este grupo de pruebas, los valores de desplazamiento d estuvieron entre 4.7 - 7.2 cm, como se muestra en la Figura 2.

La Figura 3 muestra los resultados de resistencia al corte para bagazo de

Mechanical Engineer

Taking applications immediately for permanent position in a progressive, privately owned sugar mill in Louisiana, USA.

Highly qualified individual must be fluent in English and Spanish and have strong management skills and experience. Candidate must possess a minimum of 10 years experience in raw sugar factory operations with a proven track record in achieving excellent mill work and have a firm working knowledge of bagasse boiler operations.

Company offers highly competitive compensation, complete benefits package, challenging opportunities and career development with potential for advancement. Foreign inquiries welcome. Company is an equal opportunity employer with a drug-free work place policy.

**Send detailed CV and references to
alresume@bellsouth.net**

caña a 8.7, 28.6 y 63.4 % de humedad. Un análisis de regresión lineal simple para la relación de carga normal σ , y esfuerzo de corte τ , muestran una fuerte relación lineal R^2 mayor a 0.97 para 8.7% de humedad. Se muestra también un comportamiento similar entre 28.6 y 63.5% de humedad.

Como se muestra en la Figura 4, en general existe una relación inversa entre el contenido de humedad y la cohesión; el más alto valor de cohesión (C) ocurre al nivel más bajo de humedad. La Figura 5 ilustra los resultados del coeficiente de fricción interno (μ) en cada uno de los niveles de humedad; el valor más alto ocurre al nivel más bajo contenido de humedad.

Discusión

Los resultados de esta investigación indican que la evolvente de Mohr mantiene una relación lineal para el caso particular de bagazo de caña a granel, en el rango de 8.7 a 63.7 % de humedad, b.h. Esta tendencia en el comportamiento es también reportada por Negi [5] en pruebas con maíz ensilado y por Ussrey [4] en tallos de arroz a altos contenidos de humedad (60.5 a 67.2 %). Los valores medidos para el coeficiente de fricción interno (μ), a alto contenido de humedad son más grandes en bagazo de caña que en tallos de arroz o maíz ensilado; esto se puede atribuir a la mayor área de contacto entre partículas en bagazo de caña. Los valores de cohesión (C) reportados por Ussrey [4] y Negi [5] son más altos que los obtenidos en bagazo de caña. Esto se puede atribuir

a la obstrucción sobre la línea de falla producida por el desplazamiento de las cajas del dispositivo y por el entrelazamiento de partículas durante la prueba. A altos contenidos de humedad las fibras son más flexibles y la resistencia al corte se reduce; esto se verificó en bagazo de caña donde el contenido de humedad más bajo mostró los valores más altos de resistencia al corte (t).

Conclusiones

La pruebas de corte interno en bagazo de caña de azúcar a tres contenidos de humedad, mostraron que para cada uno de ellos, existe una relación lineal entre el esfuerzo normal y de corte, tal como los describe la ecuación de Mohr-Coulomb. Las funciones obtenidas están descritas por las siguientes relaciones: $\tau=0.729\sigma+0.207$ [N/cm²] con $R^2=0.9728$ para 8.7% de humedad; $\tau=0.5984\sigma+0.105$ [N/cm²] con $R^2=0.9711$ para 28.67% de humedad; y $\tau=0.5963\sigma+0.097$ [N/cm²] con $R^2=0.978$ para 63.4% de humedad. El comportamiento general indica que la cohesión decrece a medida que la humedad se incrementa; el mismo comportamiento se observa para el coeficiente de fricción interno. Este estudio también demuestra que existe menos resistencia al corte a altos contenidos de humedad en bagazo de caña de azúcar.

Referencias Bibliográficas

[1]. Jenike A., 1958. A Flow no Flow Criteria in gravity flow of powder in converging channels. IV

International Congress on Rheology, Brown University, Part 3, Interscience pp-125-141.

- [2]. Schulze, D. 2001. Understanding and measuring powder flowability. Schuttgutmeetchnik, Am Fort 20. d-38302 Wolfenbuttel, Germany.
- [3]. Peschel & Coljin. 1976. New rotational shear testing technique. International Powder and Bulk Solid Handling and Silage. Canadian Agricultural Engineering, Vol 29, No. 1. Processing Conference. Chicago, IL. USA.
- [4]. Ussrey & Walkers. 1991. Physical characterization of rice straw for harvesting simulation. ASAE PAPER NO. 91-7036,2950 St. Joseph Michigan, 49085-9659 USA.
- [5]. Negi, Ogilvie and Jofriet. 1987. Some Mechanical and Rheological Properties of
- [6]. Bernhardt, W. 1999. Handling Properties of Sugarcane Bagasse. Part II: Bulk Properties. Zuckerindustries 124 (1999) Nr. 2, 141-148.
- [7]. Escamilla-Martínez, A., & De la Torre-Alcocer A. 2001. Dispositivo para la determinación de las propiedades mecánicas de residuos agrícolas desfibrados a granel. ISSN 968-5402-06-X.
- [8]. Escamilla-Martínez, A., 2002. Caracterización de las propiedades de flujo de materiales fibrosos a granel y su aplicación al diseño de tolvas. Tesis Doctoral, Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, PICYT-CIDESI. Santiago de Querétaro, Qro.

Vea la página 11 para los cuadros 1-5

Agustín Escamilla-Martínez and Jorge Corona-Castuera: CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Qro., Méx. e-mail: aguesc@ciateq.mx

Hermes Sánchez-Cortés: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola Carretera México-Texcoco, Edo. Méx.



Sugar Industry Equipment, Inc.

Post Office Box 40962 • Baton Rouge, LA 70835-0962
 Telephone: 225-298-5519 E-Mail: sugar@sugarandpower.com
 Fax: 225-298-0863 <http://www.sugarandpower.com>

We sell/buy the equipment listed below:
 Complete Power Plants
 Non-Condensing and Condensing Turbine Generators
 Gas Turbine Generators • Field Erected and Packaged Boilers
 Raw Factory and Refinery Equipment • Machine Shop Tools and Cranes