

EFFECTO DE LA BROCA DEL CAFÉ EN LA FIRMEZA DEL GRANO EN LOS ESTADOS DE CEREZA, PERGAMINO HÚMEDO Y PERGAMINO SECO

Carlos E. Oliveros-Tascón*; Esther Cecilia Montoya-Restrepo*; Alfredo Ayala-A**

RESUMEN

OLIVEROS T., CE.; MONTOYA R., EC.; AYALA A., A. Efecto de la broca del café en la firmeza del grano en los estados de cereza, pergamino húmedo y pergamino seco. Cenicafé 53(1):25-33.2002

Se determinó experimentalmente la firmeza (propiedad de textura importante en los materiales biológicos, utilizada para determinar su estado de maduración y su calidad para comercialización), de frutos de café pergamino sanos y atacados por la broca (*Hypothenemus hampei*). Se consideraron dos estados de madurez (pintón y maduro), dos niveles de humedad para el café pergamino (53,0% y 11,0% b.h.) y dos direcciones de deformación (ecuatorial y polar). En los ensayos se utilizó una máquina INSTRON modelo 1011, a una tasa de deformación de 100mm/min. Los mayores valores de F se obtuvieron en cerezas pintonas (29,93 a 46,01N/mm) y los menores correspondieron a cerezas maduras (13,42 a 17,64N/mm). En las cerezas maduras no se observó efecto de la dirección de la carga ni del ataque de la broca en F . En café húmedo, los valores más altos de F se obtuvieron con granos maduros cargados en su plano ecuatorial (72,76 y 74, 29N/mm, para el café brocado y sano, respectivamente). Las semillas secas provenientes de cerezas maduras y pintonas, cargadas en su plano ecuatorial, presentaron los mayores valores de F . Contrario a lo esperado, los valores más altos de F se obtuvieron con semillas dañadas por la broca cargadas en su plano ecuatorial (136,72N/mm).

Palabras claves: Café, propiedades viscoelásticas, firmeza, broca del café, *Hypothenemus hampei*

ABSTRACT

Firmness, an important textural property of biological products used to evaluate their degree of maturation and market quality, was experimentally determined in parchment coffee beans, healthy and attacked by coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). Two maturity degrees (partially ripen and fully ripen), two humidity levels for parchment coffee (53.0% and 11.0% w.b.) and two deformation directions (equatorial and polar) were considered. To determine F , we used an INSTRON 1011 universal-testing machine to compress the specimens between parallel plates at a deformation rate of 100 mm/min. The highest F values were obtained in partially ripen berries (from 29.93 to 46.01 N/mm) and the lowest values in fully ripen cherries (from 13.42 to 17.64 N/mm). No effects on F due to load direction or coffee borer attack were detected in ripe cherries. The highest values of F in wet parchment coffee were obtained with fully ripen beans, loaded on their equatorial plane (72.76 and 74.29 N/mm, in bored and sound beans, respectively). Dry seeds (11.0 %), obtained from partially and fully ripen cherries, exhibited the highest F values, when loaded on their equatorial plane. Contrary to what was expected, highest values of F were obtained in bored beans loaded on their equatorial plane (136.72 N/mm).

Keywords: Coffee, viscoelastic properties, firmness, coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*.

* Investigador Principal I e Investigador Científico I. Ingeniería Agrícola y Biometría, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Profesor Auxiliar, Departamento de Procesos Químicos y Biológicos, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Las propiedades mecánicas de los materiales biológicos son importantes para el diseño adecuado de los equipos utilizados en su manejo (2,3,5,6,7). En el procesamiento del café por vía húmeda se le retira a los frutos maduros la pulpa y el mucílago mediante la aplicación de fuerzas que dan origen a esfuerzos principalmente de compresión y cortantes. Dependiendo principalmente de la magnitud de estos esfuerzos puede ocasionarse daños a la estructura de los granos, que se manifiestan inmediatamente en los defectos conocidos como granos trillados, granos mordidos, granos cortados y granos aplastados. Otros defectos que se observan posteriormente en el café seco, como los granos decolorados y veteados, podrían ser originados durante el despulpado al someter las semillas a esfuerzos superiores a su límite de fluencia biológico.

En la trilla del café los granos se someten a esfuerzos de origen mecánico y térmico para retirarles el pergamino y la película plateada. En este proceso pueden causarse también daños en las almendras dando origen, principalmente, a los granos partidos y decolorados.

El objetivo de este estudio fue determinar propiedades mecánicas básicas necesarias para el diseño racional de equipos para el manejo y el procesamiento del café en los estados de cereza, pergamino húmedo (53-54% b.h.) y pergamino seco (11,0% b.h.), considerando dos direcciones de aplicación de la carga (ecuatorial y polar) y dos estados de los frutos y granos (sanos y atacados por la broca). La información obtenida es útil para el estudio de métodos para separar los granos brocados o con otros defectos (inmaduros, principalmente).

Los materiales biológicos presentan un comportamiento viscoelástico, es decir, dependiendo de las condiciones de carga a que sean sometidos pueden exhibir un comportamiento de líquido, de sólido y/o más

frecuentemente, una combinación de líquido y sólido (1,4,8,9,11).

Las propiedades mecánicas de un material se pueden relacionar como una combinación del módulo de Young (E), de la relación de Poisson (ν) y del módulo de cortante (G), como se muestra en la ecuación 1:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

<<1>>

En el caso de los materiales biológicos no es fácil determinar el módulo de elasticidad E, aún con pequeñas deformaciones (8). En su lugar, Mohsenin (8) propone un módulo de deformabilidad obtenido a partir de ensayos de compresión, tracción y flexión y la aplicación de la teoría existente de resistencia de materiales. Para la determinación del límite de fluencia biológico (LFB) los especímenes se deforman hasta la ruptura. Para cada material existe una zona a partir de la cual se da inicio a las deformaciones plásticas. El LFB se define como el punto en el cual un incremento en la deformación da como resultado una disminución ó estabilización de la fuerza. Algunos materiales no presentan el punto de inflexión característico del inicio de la etapa de fluencia.

La firmeza es un atributo de la textura de las frutas y vegetales que está relacionado con el punto de cosecha, la calidad para su comercialización y el procesamiento. La firmeza está relacionada con los cambios físico-químicos y estructurales del material biológico (8). La firmeza en frutas se determina en muchos casos utilizando métodos destructivos, como el medidor desarrollado por Magness-Taylor en 1925 (8), que consta de un punzón de 11,11mm (7/16") ó 7,94mm (5/16") de diámetro fijado a un resorte calibrado, el cual se introduce en el material en evaluación hasta una profundidad

de 7,94mm (5/16”). La fuerza de penetración está relacionada con el estado de maduración del material.

En la literatura consultada se registran varias definiciones y métodos para determinar la firmeza. Ang *et al.*, citados por Mohsenin (8), utilizaron como criterio de firmeza la relación entre la fuerza (F) y la deformación en el punto de ruptura (D) para clasificar cebollas. Parker *et al.*, citados por Mohsenin (24) determinaron la firmeza de cerezas sometiénolas a fluencia, “creep”. La densidad aparente (peso/volumen total) se ha propuesto como una medida de la firmeza en algunos alimentos (8). Schmidt, citado por Mohsenin (8) presenta información detallada sobre métodos para medir la firmeza en manzanas y el efecto del estado de las sustancias pécticas y otros componentes químicos, la variedad, el estado de maduración, clima, localidad y otros factores en el valor de la firmeza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad del Valle (Cali). Se emplearon cerezas y granos de café variedad Colombia, provenientes de la subestación de Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas). Las unidades experimentales para los tratamientos presentados en la Tabla 1 se obtuvieron de lotes de café en cereza a los cuales se les retiró el material de inferior calidad (principalmente los flotes, frutos atacados por la mancha de hierro, inmaduros, etc), utilizando la clasificación hidráulica y la selección manual. En cada tratamiento se realizaron veinticinco repeticiones.

Para cada estado del grano se evaluó el efecto del tratamiento bajo un modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorizado en arreglo factorial 2x2x2 (2 estados

de madurez, 2 condiciones de carga y 2 estados sanitarios), en la variable firmeza.

Determinación de la Firmeza del café, F. Los granos de café en los estados de cereza, lavado y seco se colocaron entre placas paralelas, cargándolos hasta la ruptura en una máquina Instron® modelo 1011 con “software” IX para su operación y para la captura de la información (fuerza y desplazamiento). En cada ensayo se determinó el Límite de Fluencia Biológico (LFB). A partir de los valores de fuerza y deformación en el LFB (F_{LFB} y D_{LFB} , respectivamente) se calculó la Firmeza ($F = F_{LFB}/D_{LFB}$). La máquina se calibró antes de cada ensayo siguiendo el procedimiento establecido por los fabricantes.

Las pruebas se realizaron a una velocidad de deformación de 100mm/min. Para los ensayos de café en cereza se utilizó material recolectado el día anterior, conservándolo en bolsas plásticas selladas a 5°C. Antes de cada ensayo las cerezas se dejaron durante un mínimo de una hora hasta alcanzar la temperatura del laboratorio (25°C).

Para los ensayos en los estados de pergamino húmedo y pergamino seco se utilizaron semillas almacenadas a 5°C, guardadas en bolsas plásticas selladas (hasta 15 días para café húmedo y un máximo de 2 meses para el café seco). Al igual que en el caso anterior, antes de cada ensayo se expuso el material a condiciones ambientales hasta alcanzar la temperatura promedio del laboratorio. Las dimensiones ortogonales de los granos se

Tabla 1. Fuentes de variación y niveles propuestos en la determinación de la Firmeza del café en cereza y en pergamino húmedo (53,0% b.h.) y seco (11,0% b.h.)

Factores de Variación	Nivel
Grado de madurez	Maduro y pintón
Condición de carga	Ecuatorial y polar
Estado sanitario	Sano y brocado



Figura 1. Condiciones de carga para el café en cereza y en pergamino lavado y seco: ecuatorial (a y c) y polar (b y d).

midieron antes de cada ensayo utilizando un calibrador pie de rey, con resolución de 0,01mm.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 3 se muestra el daño que la broca ocasiona a la estructura del café en los estados de cereza y trillado.

La broca entra a las cerezas del café a través del ombligo y ataca inicialmente las áreas próximas a éste (Figura 3a). En las primeras etapas del ataque es posible que el insecto perfora únicamente una semilla, originando los granos denominados picados¹ (Figura 3b). En ausencia de control químico y/o biológico el insecto llega a atacar las dos semillas dando finalmente origen a granos con densidad inferior a la del agua, denominados flotes o espumas (Figura 3c)



Figura 2 . Máquina Instron® en la cual se somete el grano de café a deformación

Límite de fluencia Biológico (LFB). En la Figura 4 se observan curvas características de fuerza vs. deformación de las cerezas maduras, sanas y perforadas por la broca del café, sometidas a compresión en sus planos ecuatoriales. En

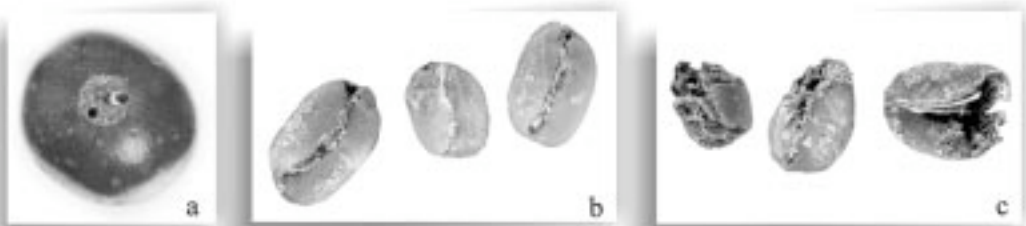


Figura 3 Granos de café atacados por la Broca. En cereza (a); en almendra, ligeramente perforados (b) y muy perforados (c)

¹Los granos picados tienen una densidad en promedio, similar a la de los granos sanos ($1,147\text{g/cm}^3$). De acuerdo a lo observado por Villabona en Cenicafé (10), utilizando el mejor clasificado disponible en el beneficio del café, el canal de correteo, los granos picados no se pueden retirar eficazmente del café sano.

el proceso de compresión de las cerezas de café hasta su ruptura se distinguen dos etapas. En la primera, la pulpa de la cereza se deforma considerablemente hasta romperse. En la segunda etapa, continúa la deformación hasta expulsar completamente las semillas. En esta fase se observa un “aparente” incremento en la rigidez del material debido posiblemente a la compresión de las semillas.

Cuando la carga se aplica en el plano polar de las cerezas, el comportamiento, con relación al caso anterior, es diferente. Las cerezas se deforman hasta que la pulpa se rompe, sin que se observe compresión de las semillas (Figura 5). Este comportamiento podría ser aprovechado para el diseño de máquinas despulpadoras en las cuales se expulsan las semillas sin ocasionarles daño mecánico.

Las cerezas pintonas, sanas y brocadas, son materiales más rígidos que las cerezas maduras. El comportamiento observado al comprimir las en los planos considerados fue similar al de las cerezas maduras. Sin embargo, los valores de fuerza de rompimiento de la pulpa fueron ligeramente superiores a los observados en cerezas maduras.

Las cerezas verdes están presentes en el café cosechado entre un 2% y hasta un máximo del 10%. Debido al poco mucílago presente en el espacio entre la pulpa y el pergamino del grano, estos materiales generalmente sufren daño mecánico en el proceso de despulpado. Como se muestra en la Figura 6, la fuerza para romper su estructura (200N) es notablemente superior a la requerida para cerezas maduras o pintonas (menos de 100N).

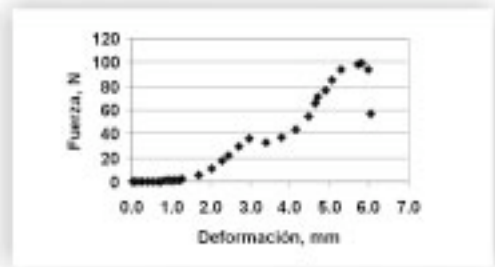
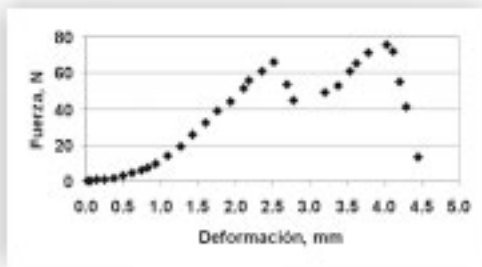


Figura 4. Comportamiento de cerezas maduras, sanas y afectadas por la broca del café, cargadas en su plano ecuatorial (CMSE y CMBE, izquierda y derecha, respectivamente)

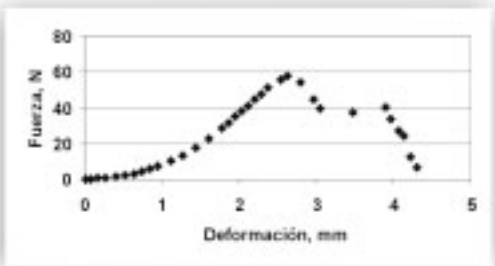
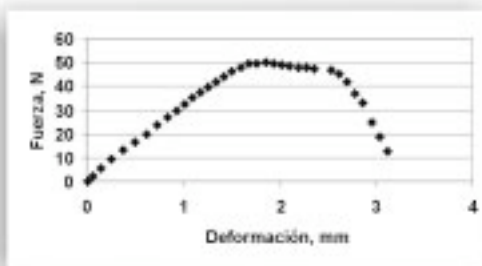


Figura 5. Comportamiento de las cerezas maduras, sanas y brocadas, sometidas a compresión en su plano polar (CMSP y CMBP, izquierda y derecha, respectivamente)

Considerando las curvas de fuerza vs. deformación para cerezas sometidas a compresión en su plano ecuatorial y el tiempo transcurrido en este proceso, se estimaron la potencia promedio y la máxima, requeridas para despulpar una cereza madura (0,0469W y 0,0619W, respectivamente). Este valor es una pequeña fracción (menor del 5%) de la potencia suministrada a las despulpadoras utilizadas actualmente.

Curvas de fuerza vs. deformación para café pergamino húmedo (53% b.h.) y seco (11,0% b.h.), obtenido de cerezas maduras, sanas y brocadas, sometido a compresión en los planos ecuatorial y polar, se presentan en la Figura 7.

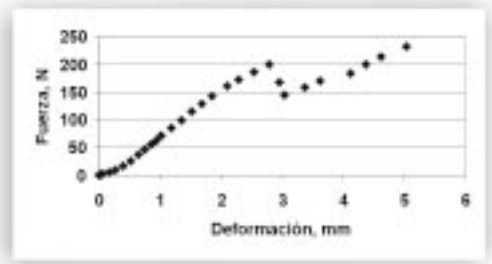


Figura 6. Comportamiento de las cerezas verdes sanas sometidas a carga compresiva en su plano ecuatorial.

FIRMEZA. Café en cereza. El análisis de varianza mostró que la firmeza de los frutos de café depende del grado de madurez y de la condición de carga, obteniéndose el mayor

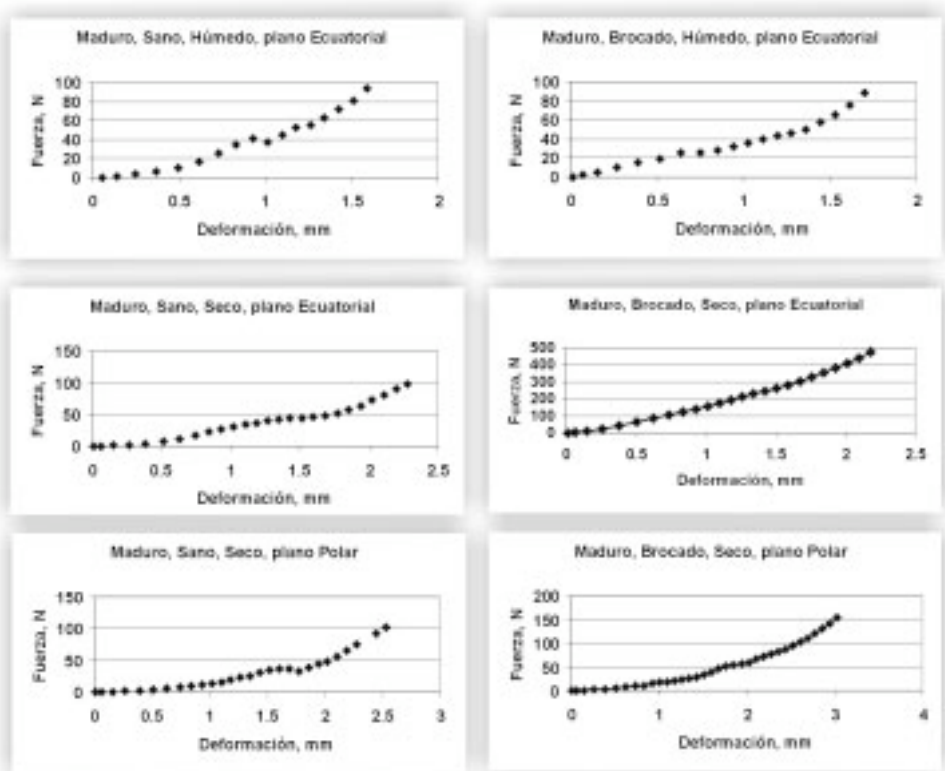


Figura 7. Comportamiento en compresión de granos de café pergamino húmedo (53% b.h.) y seco (11,0%) obtenidos de cerezas maduras, sanas y brocadas, y sometidos a compresión en los planos ecuatorial y polar.

valor promedio para los frutos pintones sometidos a carga en la dirección ecuatorial, según la prueba de contraste al nivel del 5% (Tabla 2).

La firmeza fue igual estadísticamente tanto en frutos sanos como en brocados (Tabla 3).

Café pergamino húmedo (53% b.h.). El análisis no mostró efecto de la interacción doble, pero sí de la interacción grado de madurez y condición de carga. La prueba de contraste al 5% mostró diferencia a favor de la combinación granos maduros en la condición de carga ecuatorial (Tabla 4). El análisis de varianza también mostró efecto del estado sanitario en la variable firmeza y la prueba de DMS al nivel del 5% mostró diferencia a favor de los granos sanos (Tabla 5).

Café pergamino seco (11,0% b.h.). En el café seco la firmeza depende del grado de madurez y el estado sanitario. El análisis de contraste al 5%, mostró diferencias a favor de los granos maduros y pintones perforados por la broca (Tabla 6). Adicionalmente, el análisis de varianza mostró efecto de la condición de carga a favor de la dirección ecuatorial, según prueba de DMS, al 5% (Tabla 7).

Aplicación de resultados. Los resultados obtenidos en la determinación del LFB del café en cereza, en pergamino húmedo y seco, son útiles para el diseño de tecnologías para despulpar y para trillar café con las cuales se eviten

Tabla 2. Promedios y variación de la firmeza según el grado de madurez y la condición de carga en café cereza

Grado de madurez Condición de carga	MADURO		PINTÓN	
	\bar{X} (N/mm)	CV (%)	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Ecuatorial	17,2	47,6	45,6	30,5
Polar	14,7	40,5	33,3	38,1

Tabla 3. Promedios y variación de la firmeza, según el estado sanitario del fruto de café cereza

Estado sanitario	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Sano	27,2	56,3
Brocado	28,2	62,5

Tabla 4. Promedios y variación de la firmeza, según el grado de madurez y condición de carga en café pergamino húmedo (53,0% b.h.)

Grado de madurez Condición de carga	MADURO		PINTÓN	
	\bar{X} (N/mm)	CV (%)	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Ecuatorial	73,5	36,9	49,1	44,4
Polar	31,4	47,5	32,2	49,3

Tabla 5. Promedio y variación de la firmeza para café pergamino húmedo (53,0% b.h.), según el estado sanitario

Estado sanitario	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Sano	50,2 A	49,6
Brocado	42,9 B	65,1

Tabla 6. Promedio y variación de la firmeza del café pergamino seco (11,0% b.h.) según el grado de madurez y el estado sanitario

Grado de madurez Estado sanitario	MADURO		PINTÓN	
	\bar{X} (N/mm)	CV (%)	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Brocado	122,3	51,5	104,5	47,9
Sano	47,2	79,8	74,0	58,5

Tabla 7. Promedios y variación de la firmeza, según la condición de carga para café pergamino seco (11,0% b.h.)

Condición de carga	\bar{X} (N/mm)	CV (%)
Ecuatorial	102,7 A	45,6
Polar	68,9 B	89,6

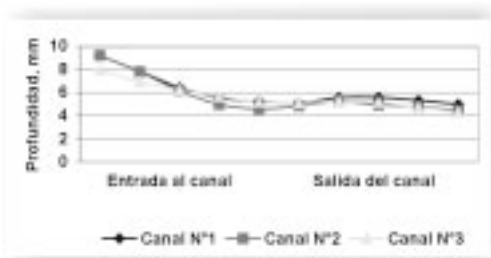


Figura 8. Variaciones en las profundidades de los canales de un pechero de una despulpadora de cilindro horizontal. Supervencedora referencia 4 ½

daños en su estructura que posteriormente pueden afectar su valor comercial.

En el despulpado en las máquinas tradicionales las cerezas se someten a esfuerzos de compresión y cortante para expulsar las semillas contenidas en su interior. Una vez expulsadas, éstas inician su recorrido por los canales de los pecheros hasta alcanzar los sitios de salida (Figura 8). En este trayecto pueden ser comprimidas por el diente de la camisa de la despulpadora más allá del valor permisible obtenido en este estudio para el café húmedo (0,89mm para café maduro, en el estado de pergamino húmedo sometido a carga en su plano ecuatorial-HMBE), dando origen posiblemente a los granos decolorados o veteados debido a daños en la estructura.

La potencia requerida para despulpar café se puede estimar a partir de la información obtenida en este estudio. Un balance para la potencia suministrada en una despulpadora de café de cilindro horizontal o vertical (P), se puede presentar en la forma siguiente:

$$P = P_d + P_c + P_t + P_{\varphi}$$

<< 2 >>

En la ecuación, P_d es la potencia para despulpar el café. Con los valores obtenidos en este estudio para despulpar una cereza de café maduro o pintón, a una velocidad de deformación de 100mm/min, se requeriría una

potencia máxima de 0,0619W. Esto significa que en el caso de una máquina de 1.000kg de cereza/h se requeriría solamente de 10,11W para despulpar las cerezas maduras y pintonas.

La potencia para despulpar las cerezas verdes es muy superior a P_d , aproximadamente, 0,25W/cereza a 100mm/min. En la eventualidad de que un lote de café contenga un 10% de cerezas (valor muy alto aunque observable en la práctica), la potencia para despulpar las cerezas verdes sería 4,08W. Sin considerar la potencia para despulpar las cerezas secas, la potencia efectiva ó neta sólo para despulpar 1.000kg de cereza/h sería de 14,19W.

Por su mayor espesor, un porcentaje importante de los granos monstruos, caracoles y plano-convexos se comprimen en su paso por los canales del pechero.

La potencia para comprimirlos, P_c , depende de la magnitud de la deformación, la velocidad de la deformación y de la rigidez del material, la cual de acuerdo a lo obtenido en este estudio depende de la dirección de carga. De la información obtenida para deformar una semilla de 2,0mm, con una tasa de deformación de 100mm/min se requiere una fuerza de 100N. En este caso, asumiendo un comportamiento lineal de la curva fuerza vs. deformación, hasta un valor de 2mm, la potencia estimada sería 0,083W. En el caso del ejemplo considerado, 1.000kg de cereza/h, si el 50% de los granos fueran

deformados 2,0mm, altamente improbable, la potencia utilizada sería 6,78 W.

Las pérdidas en la transmisión de potencia utilizada para accionar las despulpadoras, P_{tp} , utilizando poleas y banda tipo B, son del orden del 15% de la potencia en el eje del motor.

El análisis anterior muestra que posiblemente un alto porcentaje de la potencia suministrada a una despulpadora es empleada para transportar la pulpa por los espacios dejados entre las venas de los canales de pechero y los botones de la camisa (aberturas generalmente con altura cercana a 2mm). Posiblemente, mediante reformas relativamente simples en la zona de despulpado y en las venas de los canales del pechero (de menor grosor y utilizando plásticos de ingeniería para disminuir la fricción) se pueda despulpar con potencias muy inferiores a las utilizadas actualmente (menos de 100W para un modelo con rendimiento de 1.000kg/h).

Con relación a la posible separación de los granos brocados basados en la diferencia en el LFB entre los materiales sanos y los atacados por la broca del café (objetivo de esta investigación), se encontró que en el estado de cereza es posible la separación de estos materiales. Las cerezas brocadas hay que deformarlas más que las sanas para lograr la expulsión completa de las semillas. Esta diferencia también podría ser utilizada para diseñar máquinas que permiten separar las cerezas verdes de las pintonas y maduras. Utilizando la diferencia en propiedades mecánicas se ha desarrollado tecnología, principalmente en Brasil, para retirar cerezas verdes de maduras.

Los valores obtenidos del LFB para el café en cereza indican que desde el punto de vista energético se podría obtener un importante ahorro si las cerezas fueran deformadas en su plano polar. Adicionalmente, en esta dirección de carga se evitarían daños en el endospermo

de las semillas ya que para conseguir el despulpado del café (expulsión de las semillas) no es necesario deformar las semillas más allá de su LFB.

LITERATURA CITADA

1. CHEN, P. Viscoelastic response of fruits to high strain rates. Paper 84-3555 ASAE, St. Joseph, MI 49085.1984.
2. DIEHL, K.C.; HAMMAN, D.D.; WHITFIELD, J.K. Structural failure in selected fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies* 10:371-400.1980.
3. FINNEY, E.E.; HALL, C.W. Elastic properties of potatoes. *Transactions of the ASAE* 10 (1):4-8. 1967
4. FLUCK, R.C.; WRIGHT, F.S.; SPLINTER, W.E. Compression plunger, skinning and friction properties of sweet potatoes. *Transactions of the ASAE* 11 (2):167-170,174. 1968.
5. GARCÍA, C.; RUIZ, M.; CHEN, P. Impact parameters related to bruising in selected fruits. Paper 88-6020 ASAE, St. Joseph, MI 49085. 1988.
6. HUNG, Y.C.; S.E. PRUSSIA. Determining bruise susceptibility of peaches. ASAE paper 88-6026. 1988.
7. HOLT, J.E.; SCHOORL, D. Mechanics of failure in fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies* 13:83. 1982.
8. MOHSENIN, N.N. *Properties of Plant and Animal Materials*, 2a ed. Gordon & Breach Science Publishers. 1986.
9. SOMMERS, G.F. Viscoelastic properties of storage tissues from potato, apple and pear. *Journal of Food Science* 30 (6):922-929. 1965.
10. VILLABONA G., S. Estudio del desempeño del canal de correteo en la separación del café brocado. Informe Científico. Cenicafé. 1995.
11. ZOERB, G. C.; HALL, C.W. Some mechanical and rheological properties of grains. *Journal of Agricultural Engineering Research* 5 (1):83-92. 1960.