

Análisis comparativo de chumaceras de eje de maza superior de molino de caña de azúcar

Comparative analysis of top bearing boxes of a sugar cane crushing mill

SARA RODRÍGUEZ PULECIO

Estudiante de último año de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle (Colombia)
saropu@telesat.com.co

JOHN JAIRO CORONADO MARÍN

Ingeniero mecánico, Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico, profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle (Colombia).
johncoro@petecuy.univalle.edu.co

CARLOS ARTURO VÉLEZ

Ingeniero mecánico, jefe del área de molienda del Ingenio Manuelita S.A.
cvelez@manuelita.com

Fecha de recepción: diciembre 14 de 2003.

Clasificación del artículo: Investigación.
Fecha de aceptación: junio 30 de 2004

Palabras clave: chumacera, metodología de diseño, elemento finito, transferencia de calor
Key words: bronze plain bearings, design methodology, finite element, heat transfer

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de los análisis de comportamiento estructural y térmico de las chumaceras de los ejes de maza superior de un molino de 1,1*2,13 m (43*84") del Ingenio Manuelita SA. Se establecieron las causas de las fallas que éstas presentan, provenientes de fuentes diversas como diseño, material, manufactura, montaje y operación, y se elaboró una metodología de diseño y comparación de nuevos prototipos de chumaceras donde se incluyen aspectos como confiabilidad estructural y transferencia de calor. Así, se parte del análisis de falla de las chumaceras convencionales para crear parámetros comparativos que permitan proponer, evaluar y mejorar nuevos diseños.

ABSTRACT

This paper presents the results of the strength and heat transfer analysis for the top bearing box of a 43x84" sugar cane crushing mill of Manuelita S.A. The causes of the fails they present were determined; they come from sources as diverse as design, bearing material, manufacturing, assembly and operation. A design and benchmarking methodology was developed to compare new designs using criteria like structural strength and heat transfer. In this way we started from the conventional bearing boxes fail analysis to create comparative parameters that permit proposing, assessing and improving new designs.

1. Introducción

La solución clásica de diseño del sistema de apoyo de los ejes de maza superior de un molino de caña convencional se desarrolló dentro de un marco de restricciones geométricas y de cargas que históricamente han señalado un punto crítico en cuanto a demanda de atención y mantenimiento. Tradicionalmente las cajas de las chumaceras de los ejes de maza superior de molino de caña han sido fabricadas en bronce, presentando fallas estructurales y de servicio que obligan a su reposición (desgaste y fisuración) y generan altos costos. Como

alternativa surgió el uso de cajas de acero, reduciendo el uso del bronce sólo a un elemento semicircunferencial de poco espesor que se apoya sobre la superficie de la caja, conocido como teja; este diseño reduce costos, dado el remplazo único de la teja, cuando ésta presenta fallas.

En Colombia se ha empezado a adoptar esta solución, comprando la tecnología desarrollada en otros países. El uso de la caja de acero como solución genera condiciones de resistencia mecánica y extracción de calor diferentes respecto a la caja tradicional de bronce, dado que la conductividad térmica y las propiedades mecánicas de los dos materiales son diferentes. En este artículo se parte del análisis de falla de las chumaceras convencionales para crear parámetros comparativos que permitan proponer, evaluar y mejorar nuevos diseños.

2. Justificación y antecedentes

El peso relativo del proceso de extracción en la eficiencia de las fábricas de azúcar, y las significativas demandas de energía y mantenimiento cuando se emplean molinos han motivado numerosos esfuerzos para hacer que los equipos de molienda sean más confiables y eficientes.

El diseño de molinos ha permanecido relativamente estable por casi dos siglos, manteniendo el principio de aplicar grandes presiones a bajas velocidades de rotación; estas presiones son aplicadas a través de actuadores con sistema óleo-neumático en las chumaceras de los ejes de maza superior, creando efectos mecánicos (esfuerzos y desgaste) sobre todos los componentes. Se espera de todo cojinete de contacto plano transforme en calor tan poca potencia como sea posible, se desgaste lentamente, no genere desgaste en el eje y tenga bajo costo; sin embargo, las chumaceras de molino presentan fallas recurrentes: desgaste, rayado, fractura y quemaduras; además, sobrecalentamiento frecuente y exigencia de enfriamiento externo del sistema para evitar su colapso, generando impacto ambiental por el arrastre de lubricantes con el agua de enfriamiento.

Las restricciones del diseño de tipo geométrico comienzan por la necesidad de introducir la potencia al eje de la maza superior a través de un sistema de acople de alta capacidad de torque, capaz de absorber desalineaciones paralelas y angulares importantes y, en consecuencia, tener capacidad de absorber desplazamiento telescópico por la flotación del molino. La solución clásica es el empleo de la sección cuadrada en el extremo del eje que acople con elementos compatibles (acoples de cuadrante); esta solución introduce esfuerzos de torsión que exigen un tamaño mínimo cuya diagonal excede lo requerido para un comportamiento tribológico

aceptable en la superficie del eje que está en contacto con la chumacera conocida como guijo. Al no poderse usar un bronce integral de 360°, el cojinete partido permite el ingreso eventual de partículas abrasivas y exige además una lubricación a pérdida bastante costosa. El desgaste adhesivo que se presenta entre las superficies de bronce y acero de los ejes, y el producido por el ingreso de materia mineral extraña producen rayaduras y pérdida de material del guijo, disminuyendo la vida en servicio de los ejes; estos últimos son elementos críticos del sistema, especialmente cuando se usan mazas de acero.

Gran inversión de capital, elevados consumos energéticos, altos costos de mantenimiento, efectos económicos y ambientales de las disfunciones, todo dentro de un marco de difícil competencia internacional, hacen necesario el adecuado tratamiento del problema de desgaste, sellado y resistencia mecánica de las chumaceras de molino de caña.

Como solución a la falta de confiabilidad estructural y alto costo de reposición, se hace necesario construir chumaceras con sistemas de sellado, que impidan el ingreso de materia extraña (véase figura 1). A continuación se presentan tres propuestas de diseño para las chumaceras:

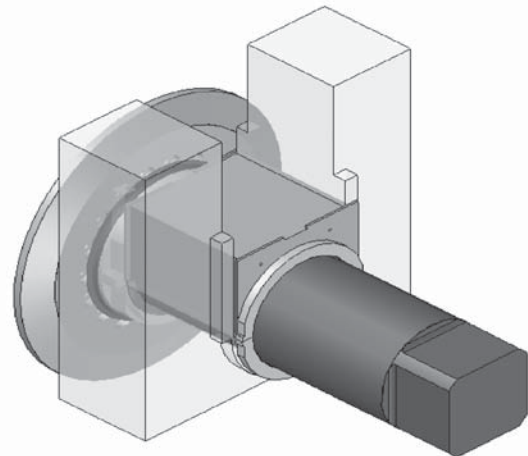


Figura 1. Esquema del montaje del sistema de sellado

- *Chumacera refrigerada en la caja y sello tipo O-ring.* Está compuesta por una caja de acero inundada y una teja de bronce sencilla y económica, en contacto con el agua de refrigeración. Las dos superficies son selladas usando un O-ring, como se muestra en la figura 2.

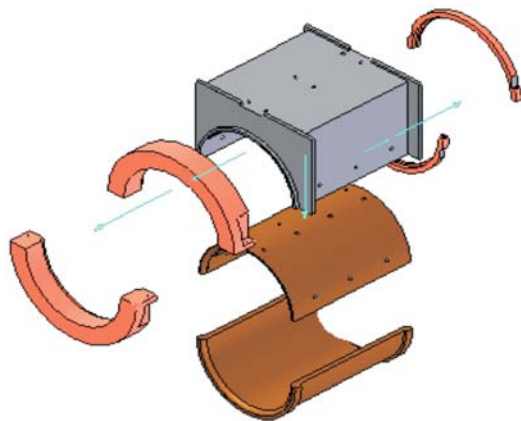


Figura 2. Vista explosionada de chumacera refrigerada en caja y sello tipo O-ring

- *Chumacera refrigerada en la teja.* Está compuesta por una caja de acero y una teja de bronce refrigerada; en esta propuesta la teja de bronce debe ser mucho más gruesa, para alojar los canales de refrigeración (véase figura 3).

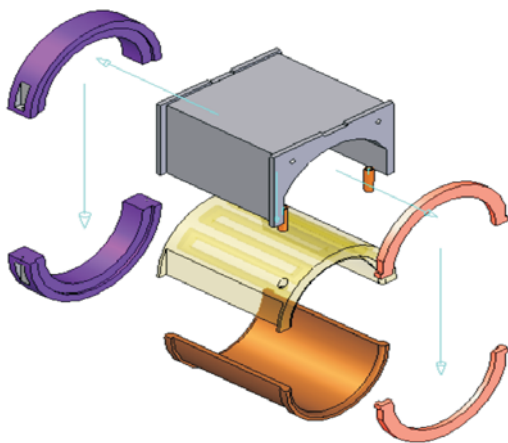


Figura 3. Esquema explosionado de chumacera refrigerada en la teja

- *Chumacera refrigerada en la caja.* La caja de acero se inunda, pero el agua de refrigeración no entra en contacto con el bronce; esto genera una resistencia a la transferencia de calor mayor, pero elimina el uso del sello tipo O-ring entre la caja y la teja. En el modelamiento de esta alternativa debe tenerse en cuenta una resistencia a la transferencia de calor adicional por el contacto acero-bronce, como se muestra en la figura 4.

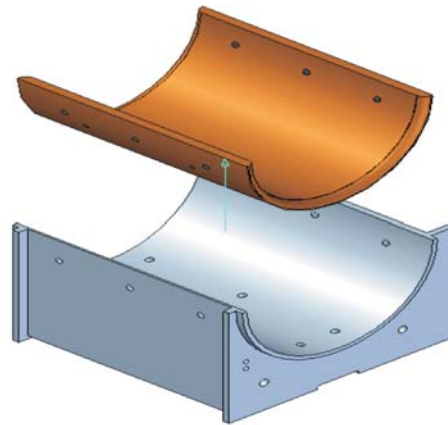


Figura 4. Esquema del conjunto caja teja superior, chumacera refrigerada en la caja

Como posible solución al problema de desgaste, la industria metalmeccánica brasileña ha desarrollado una caja de acero con teja de bronce y sistema de sellado tipo labio, que impide la entrada de materia extraña contenida en el jugo sellando la chumacera contra una placa en las regolas de la maza. Para permitir el sellado, en este diseño se sujeta la teja inferior a la caja impidiendo que la teja inferior se quede sobre la cureña cuando ocurre la flotación del eje (esto sucede en las chumaceras convencionales, permitiendo la entrada de jugo al guijo).

3. Materiales y métodos

3.1 Diagnóstico del problema

Las chumaceras de los ejes de maza superior de los molinos del Ingenio Manuelita S.A.¹ presentan varios tipos de falla:

- *Desgaste por empuje axial:* falla encontrada en 14% de las chumaceras evaluadas en el marco de este diagnóstico.
- *Fusión del bronce en contacto con el eje, eliminando parcialmente la ranura de entrada de lubricante:* encontrada en el 66% de las chumaceras evaluadas.
- *Fracturas longitudinales, sin poderse evaluar su punto de origen ni la dinámica de crecimiento:* encontrada en el 75% de las chumaceras evaluadas.
- *Quemaduras sobre la superficie en contacto con el eje:* falla encontrada en el 33% de las chumaceras evaluadas.

¹ Se denominan ingenios azucareros a las empresas colombianas productoras de azúcar que han superado el nivel artesanal. Manuelita es un grupo empresarial colombiano creado el 21 de abril de 1864, con la fundación de la primera fábrica de azúcar de Colombia. En: <http://www.manuelita.com>

Tabla 1. Composición química del bronce SAE 67

Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	P	Sb	S	Si	Al
----	----	----	----	----	----	---	----	---	----	----

Tabla 2. Resultados de análisis químico de una muestra de bronce empleados en chumaceras del Ingenio Manuelita S.A.

Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	P	Sb	S	Si	Al
67,58%	5,13%	25,3%	1,53%	0,3%	0,035%	0%	0%	0,051%	0,027%	0%

Tabla 3. Composición química del bronce UNS C94300 (norma UNS).

Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	P	Sb	S	Si	Al
67-72%	4,5-6%	23-27%	0,8% máx	1% máx	0,15% máx	0,08% máx	0,8% máx	0,08% máx	0,005% máx	0,005% máx

- *Fisuración sobre las caras que se apoyan en la cuña; posición de fallas coincidente con la zona que debe ser soldada durante la construcción: falla encontrada en el 85% de las chumaceras evaluadas.*

3.2 Material

De acuerdo con la Norma de recepción de bronce del Ingenio Manuelita S.A. (1999), el material de las chumaceras de los molinos debe ser bronce SAE 67, cuya composición química se presenta en la tabla 1.

Las propiedades mecánicas deben ser las siguientes: resistencia a la tracción: 30 Ksi; porcentaje de alargamiento: 18%; dureza: 55 HBN, y límite de fluencia: 16 Ksi.

Luego de realizar el análisis químico a una muestra de los bronce evaluados, se encontraron los resultados que se presentan en la tabla 2.

Las diferencias entre la composición real determinada y la definición del bronce SAE 67 son importantes: contenido de Cu 10% menor; de Sn 1,8% menor; de Pb 10,8% mayor; de Zn 0,73% mayor; de Si 0,022% mayor; los demás elementos no superan el valor máximo establecido por la norma UNS.

Los resultados permiten afirmar que no se trata de un bronce SAE 67 contaminado, sino de un bronce completamente diferente. De acuerdo con la norma UNS, el bronce de composición química más cercana a la obtenida de la muestra es el UNS C94300, catalogado como un bronce suave, cuya composición química se presenta en la tabla 3.

Con valores nominales de Cu, Sn y Pb en 69,5%, 5,3% y 25%, respectivamente, las propiedades mecánicas de este bronce son: resistencia a la tracción: 27 Ksi; porcentaje de alargamiento: 15%; dureza: 48 HBN, y límite de fluencia: 13 Ksi. Es recomendado para cojinetes de alta velocidad y baja carga, condición opuesta a la de las chumaceras de los ejes de maza de molinos azucareros.

La comparación de las composiciones del UNS C94300 y la muestra tomada lleva a concluir que se trata del mismo material, contaminado de Zn y Si (contenidos superiores a la norma en 0,78% y 0,022%, respectivamente). Las menores propiedades mecánicas de este bronce frente a las del SAE 67 se deben al mayor contenido de plomo y el menor contenido de estaño; aunque la adición de zinc mejora la resistencia mecánica (tiene un efecto similar al estaño), cuando su contenido es mayor al 4% se reducen las propiedades antifricción ganadas por el efecto del plomo².

3.3 Magnitud y dirección de las cargas

La presión que permite extraer el jugo contenido en la caña de azúcar es aplicada por medio de las chumaceras de los ejes de maza superior, por medio de un cilindro hidráulico de forma vertical. Conociendo la presión y el área del actuador puede conocerse la reacción vertical (véase tabla 4). Teóricamente aparece una reacción horizontal causada por la diferencia de apertura entre la maza superior y la maza cañera, y entre la maza superior

² En: Selecting Bronze Bearings Materials. http://www.copper.org/industrial/bronze_bearing.html

y la maza bagacera. Usando relaciones de ajuste entrada/salida para los seis molinos (M1: 2.27; M2:1.9; M3: 1.87; M4: 1.87; M5: 1.85; M6: 1.85), se encuentra que el ángulo en que actúa la reacción respecto a la vertical es: M1: 7.27°; M2: 9.55°; M3: 11.16°; M4:12.35°; M5: 13.27°; M6: 13.99°³.

Tabla 4. Condiciones de operación de las chumaceras de eje de maza superior de molino de caña

	Magnitud	Unidad de medida
Potencia nominal de entrada al molino	1000	HP
Diámetro del eje	19	Pulg
Diámetro de la chumacera	19.031	Pulg
Longitud	24.313	Pulg
Presión cilindro	3000	Psi
Diámetro cilindro	16	Pulg
Reacción vertical	603185.7895	Lb
RPM	4	
Velocidad periférica del eje	3.98	Pulg/s

Si no se conoce el molino en el que trabajó la chumacera, se espera que la dirección en que aparece su mayor desgaste radial se encuentre entre 7° y 14° grados respecto a la vertical, en el lado opuesto a la maza bagacera. En las chumaceras evaluadas, el desgaste radial fue medido con un dispositivo como el mostrado en la figura 5, encontrándose el perfil de desgaste mostrado en la figura 6; puede observarse que el desgaste en el lado maza es mucho mayor; esto se explicaría por la presencia de un desgaste abrasivo producido por el jugo con gran contenido de materia extraña mineral y que la deflexión del eje produzca una concentración de la carga en esa zona; sin embargo, el desgaste máximo se presenta a un ángulo de 90°, esto indica que la porción horizontal de la carga es pequeña y deben realizarse mediciones menos discretas en la zona teórica donde debe aparecer el mayor desgaste.

3.4 Lubricación y fuerza de fricción

La lubricación se realiza con grasa a pérdida usando un sistema tipo Farval, que bombea cada 21 minutos. La fuerza de fricción se calculó empleando el coeficiente de fricción encontrado por Álvarez *et al.* (1998).

³ Ángulo calculado empleando hoja de cálculo desarrollada por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (GENICAÑA), en el año 2002

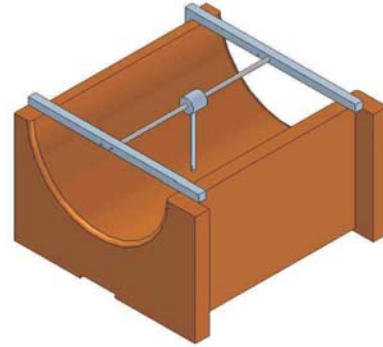


Figura 5. Sistema de medición de desgaste empleado

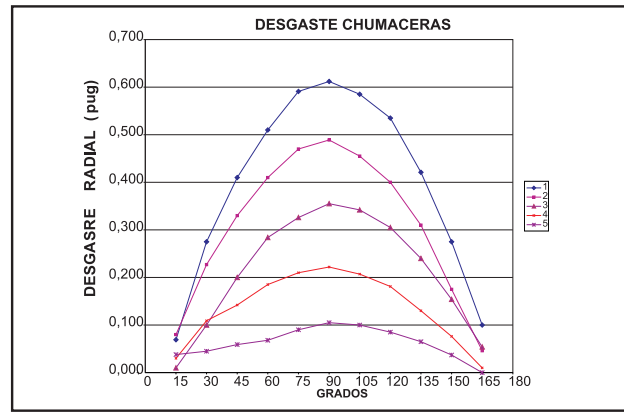


Figura 6. Perfil de desgaste presente en las chumaceras convencionales tipo Farrel del tandem 2 del Ingenio Manuelita S.A. (línea 1 lado maza, línea 5 lado corona)

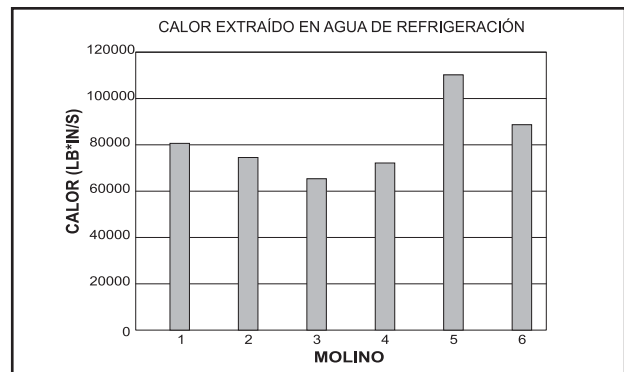


Figura 7. Calor extraído en el agua de refrigeración de los molinos del tandem 2 del Ingenio Manuelita S.A.

3.5 Carga térmica generada por pérdidas de potencia por fricción

Datos tomados del agua de refrigeración de los molinos de las chumaceras del tandem 2, para obtener el calor extraído en ella, mostraron que el molino 5 produce el mayor calor en sus chumaceras (véase figura 7). Usando

la fuerza de fricción calculada para el análisis mecánico y la velocidad periférica del eje, se estimó la potencia perdida por la fricción en una chumacera: 150.608 lb*in/s. Este valor es superior al obtenido midiendo calor en el agua de refrigeración.

Lo anterior no implica que el valor usado como fuerza de fricción sea conservativo, pues el registro de calor extraído muestra máximos de 289.387 lb*in/s en el molino 3, y no pueden descartarse otras superficies por las cuales se disipe el calor producido. Como puede apreciarse en la figura 8, el promedio de calor extraído en las chumaceras del lado libre es muy superior al extraído en las chumaceras del lado corona; esto puede ser explicado por un error de alineación entre las cureñas, o por el efecto de la flotación desigual de los ejes de maza superior.

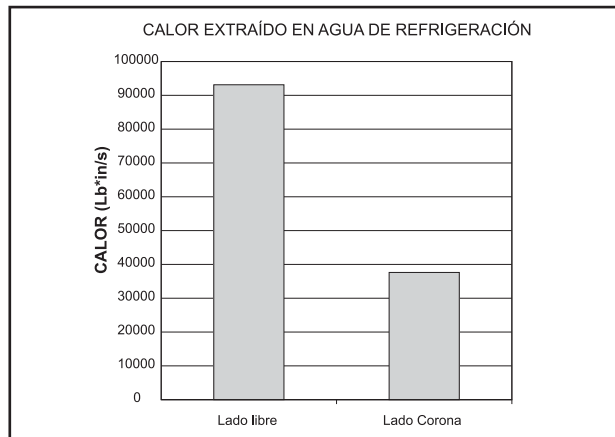


Figura 8. Promedio de calor extraído en agua de refrigeración de las chumaceras de eje de maza superior del *tandem 2* de Manuelita S.A.

4. Resultados y discusión

Con el estado de carga descrito anteriormente, se modeló el estado de esfuerzos para una chumacera perfectamente asentada, en la cual el 100% de la longitud de la chumacera está en contacto con el eje. Se encontró un esfuerzo máximo de 12.573 psi (figura 9). Empleando el modelo de elementos finitos se halló que los esfuerzos máximos se encuentran en los tabiques internos de la chumacera (figura 10), y tienen dos componentes importantes: la compresión causada por la reacción vertical y la tensión causada por el momento que produce la fricción y la componente horizontal de la fuerza de empuje del colchón de caña sobre el eje. Al comparar estos esfuerzos con el esfuerzo a la fluencia del bronce SAE 67 ($S_y = 15.954$ psi), el factor de seguridad de esta chumacera es de 1.268; con el esfuerzo de fluencia del bronce UNS C94300 ($S_y = 13.053$ psi) es de 1.038.

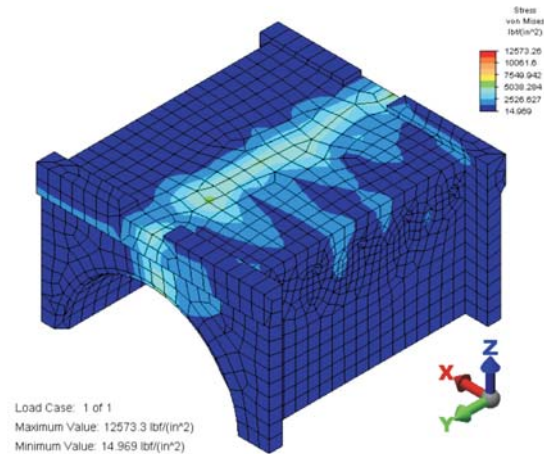


Figura 9. Esfuerzos usando elementos finitos de una chumacera convencional tipo farrel

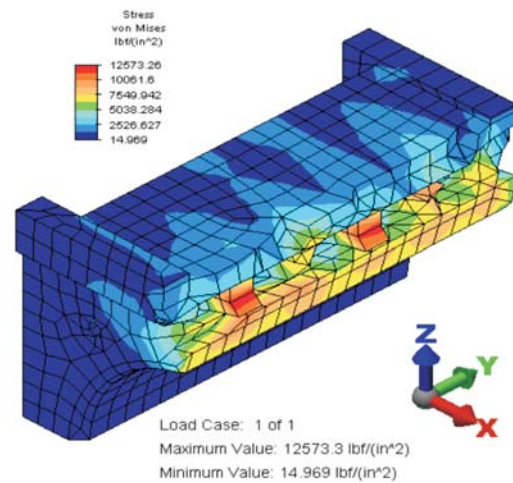


Figura 10. Corte longitudinal al modelo usando elementos finitos de la chumacera convencional tipo Farrel

El perfil de desgaste de las chumaceras mostró que el desgaste se presenta más en uno de sus lados, y que el área de contacto podría verse reducida en forma considerable; por esto se modeló nuevamente la chumacera aplicando las fuerzas en el 60% del área, encontrándose esfuerzos máximos de 20.581 psi (figura 11). En este modelo, los puntos de máximo esfuerzo también se presentan en los tabiques internos (véase figura 12), pero su magnitud se eleva considerablemente, de tal forma que el factor de seguridad a fluencia se reduce a 0,7 para el bronce SAE 67, y a 0,63 para el bronce UNS C94300.

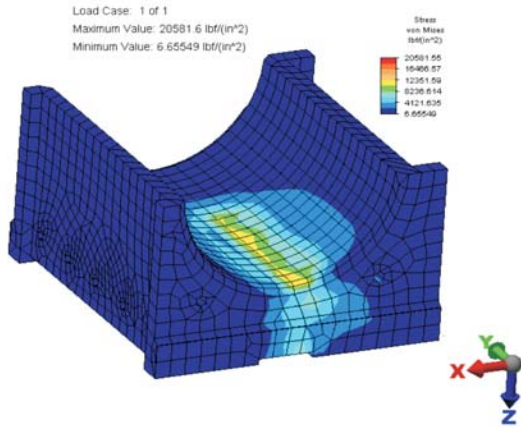


Figura 11. Modelo de elementos finitos con área de aplicación de la carga reducida en un 40%

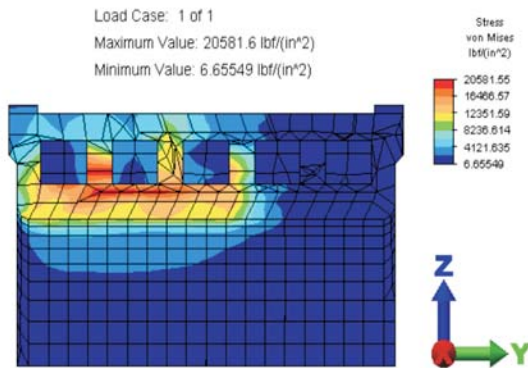


Figura 12. Corte del modelo de una chumacera convencional tipo Farrel con carga aplicada en el 60% del

Efectuando una comparación con datos básicos de varios ingenios azucareros, se encontró que la chumacera analizada opera con presiones nominales (1.223 Psi) más altas que otras analizadas (véase figura 13).

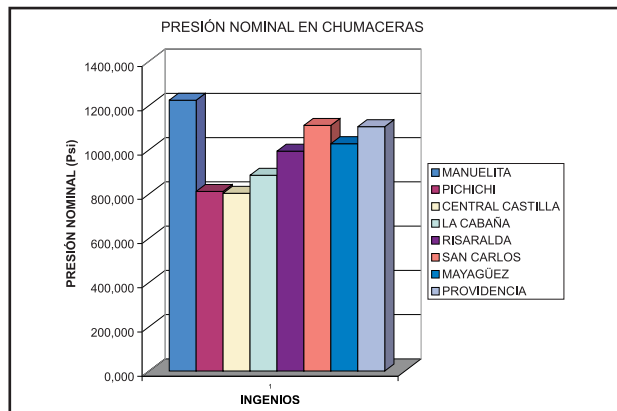


Figura 13. Presión nominal en chumaceras de molino de caña de los diferentes ingenios de la región

El modelamiento de la transferencia de calor de la chumacera se alimentó con un flujo de calor de 200.000 lb-in a través de la superficie de contacto con el eje, asumiendo un coeficiente de convección de 4 lb in/(s °F in²) en las superficies en contacto con el agua de refrigeración, y temperatura del agua de refrigeración de 80°F.

Se encontró una temperatura máxima de 203°F (véase figura 14), que no corresponde a lo que sucede en la realidad, pues se desprecian los siguientes aspectos: pérdidas de calor por convección a través de las superficies expuestas al aire, concentración del calor transferido por la zona real de contacto entre el eje y la chumacera, e influencia de la temperatura del ambiente, que cambia en función de la temperatura del agua de maceración. Sin embargo, el modelo se considera suficientemente sensible para usarse con fines de comparación y evaluación de nuevos diseños de chumacera.

Los análisis de resistencia mecánica y de transferencia de calor empleando elementos finitos pueden ser usados para garantizar que las chumaceras diseñadas satisfagan los requerimientos mecánicos de los molinos, y para comparar diferentes alternativas a bajo costo.

La transferencia de calor de la chumacera convencional de bronce se comparó con una chumacera de las mismas dimensiones exteriores, pero con caja de acero y teja de bronce. La caja de acero se inunda, pero el agua de refrigeración no entra en contacto con el bronce; esto genera una mayor resistencia a la transferencia de calor. El análisis presentó una temperatura máxima de 313°F (véase figura 15). La presencia del acero, con una conductividad menor, aumenta la resistencia a la transferencia de calor, obteniéndose temperaturas 54% más altas. En el análisis de esta alternativa debe tenerse en cuenta que el contacto entre bronce y acero impone una resistencia adicional a la transferencia de calor por contacto, que no se tuvo en cuenta en este trabajo.

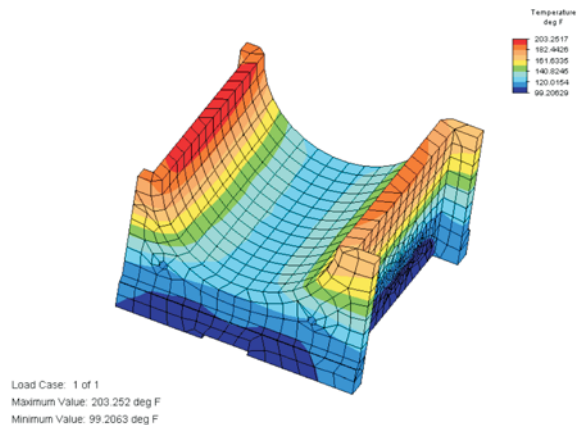


Figura 14. Modelamiento de transferencia de calor en chumacera de maza superior de molino de caña

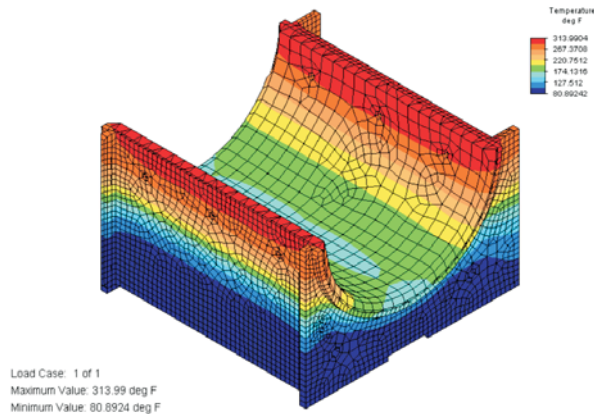


Figura 15. Modelo de la transferencia de calor de una chumacera con caja de acero

5. Conclusiones y recomendaciones

- Los ingenios azucareros deben exigir, a las empresas que las producen, el análisis químico de las chumaceras; cuando el material empleado en su fabricación no es el esperado, el factor de seguridad puede ser bajo, provocando fallas en su operación.
- El uso de chumaceras que presenten excesivo desgaste, o con errores en el asentamiento, produce concentración de la carga; esta condición genera esfuerzos que podrían exceder los valores críticos del material.
- Los ingenios azucareros deben considerar la adopción de diseños que incorporen sistemas de sellado que eviten la entrada de jugo y materia mineral extraña al guijo.
- En comparación con las chumaceras convencionales de bronce, las chumaceras con caja de acero presentan menor transferencia de calor; la adopción de esta alternativa requiere, por tanto, un análisis de la transferencia de calor del sistema, con el fin de evitar el sobrecalentamiento.
- Las chumaceras refrigeradas en la caja de acero sellada, con teja de bronce sólida, son sistemas que incrementan la resistencia a la transferencia de calor, dado que el agua se encuentra confinada en la caja de acero, cuyo material es menos conductor de calor que el bronce.
- En las chumaceras refrigeradas en la teja, el agua se confina en circuitos obtenidos por fundición en la teja de bronce; estos circuitos reducen la resistencia mecánica de las tejas y pueden ser fácilmente obstruidos por material sólido contenido en el agua de refrigeración; adicionalmente, la reposición de las tejas es más costosa que el remplazo de toda la alternativa anterior.

- Cuando se emplea el sistema de chumaceras refrigeradas en la caja, en el cual el agua entra en contacto directo con la teja de bronce y se sellan las dos superficies mediante sello tipo O-ring, se requiere un cuidado especial; cualquier falla del sello por mal montaje o elevada temperatura puede producir escapes indeseados de agua.

AGRADECIMIENTO

El Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Universidad del Valle, Colombia), en el marco del “Proyecto Cooperativo agroindustrial para reducir el desgaste en equipos de preparación y molienda” que se lleva a cabo en el Ingenio Manuelita S.A., con la participación de Cenicña, agradece los aportes del personal de estas organizaciones y el apoyo financiero de colciencias, que con dinero del BID ha posibilitado este trabajo.

Referencias bibliográficas

- [1] ÁLVAREZ, E. C., RODRÍGUEZ, Y., AGUILAR, (1998). “Comportamiento de la fricción de las chumaceras de las plantas molidoras de caña al ser lubricadas con grasa Lisa 3M”. Congreso ATAC.
- [2] IGLESIAS, A. (1994). “Nueva grasa suplanta aceites en la lubricación de las chumaceras”. En: *International Sugar Journal*, 96, (1146).
- [3] LIMA, B. D. (1994). “Cane mill brass lubrication”. En: *International Sugar Journal*, 96, 1146.
- [4] Norma de recepción de bronce del Ingenio Manuelita S.A. (1999)
- [5] RODRÍGUEZ, M. C. (1991). “Empleo de grasas lubricantes en las chumaceras de las plantas molidoras de caña”. Ponencia VI Forum de Ciencia y Técnica
- [6] Selecting Bronze Bearings Materials. En: http://www.copper.org/industrial/bronze_bearing.html