

# EFFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LOS DEPÓSITOS DE SOLDADURA EN EL DESGASTE DE UN ACERO DE BAJO CARBONO RECUBIERTO CON ACERO INOXIDABLE Y UN RECUBRIMIENTO HIPOEUTÉCTICO DEL TIPO Fe-C-Cr.

L.D. DURÁN <sup>(1)</sup>, Y. AGUILAR <sup>(2)</sup>, O. HERNANDEZ <sup>(2)</sup>, R. VICTORIA <sup>(2)</sup>, F. CASANOVA <sup>(1)</sup>

(1) Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, COLOMBIA

(2) Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, COLOMBIA

E-mail (1): david01d@hotmail.com

## RESUMEN

*Esta investigación fue realizada con el fin de determinar el efecto de la geometría de los depósitos de soldadura en el desgaste de las mazas de molinos de caña construidas de acero, recubiertas con una capa de soldadura de acero inoxidable y pepas de fundición blanca de alto cromo. Para ello se diseñó y construyó una máquina basada en la descrita por la norma ASTM G-65, la cual permite desgastar aros de acero deslizándolos contra bagazo con jugo y materia extraña mineral, en condiciones similares a las que se presentan en un molino de caña. Como geometría de depósitos de soldadura se evaluaron pepas radiales variando la distancia entre ellas (paso). Como materia extraña mineral se empleó sílice con granulometría AFS 50/70. El desgaste fue medido como la pérdida de peso de las probetas. Se utilizó microscopía electrónica de barrido para analizar las superficies desgastadas. Se encontró que el desgaste aumenta rápidamente en tempranas distancias de deslizamiento, pero tiende a amortiguarse y ser constante a medida que aumenta el recorrido. Se encontró que la geometría ejerce un efecto en el desgaste. El principal mecanismo de desgaste encontrado en las superficies fue microdeformación plástica o ploughing y microcorte o cutting por parte de las partículas de sílice.*

**Tópico:** 2. Materiales metálicos.

**Palabras claves:** Desgaste, molinos de caña, mecanismos de desgaste.

## 1. INTRODUCCIÓN

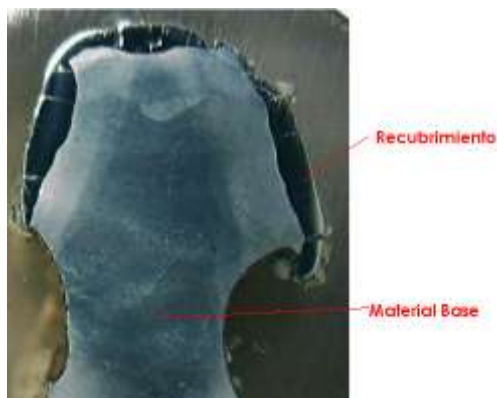
Una de las etapas del proceso de producción de azúcar es la extracción de jugo, es decir, la separación de la sacarosa y la fibra de la caña a través de la molienda. No obstante el proceso de molienda se ve afectado por el desgaste que se presenta en las mazas de los molinos, generando así una extracción insuficiente de jugo de la caña y pérdida de agarre en las mazas lo que dificulta la alimentación en los molinos.

El desgaste de la superficie de la maza es un problema de abrasión y se debe principalmente al contenido de materia extraña mineral en la caña [1-3]. El desgaste hace que la superficie de la maza disminuya su rugosidad ocasionando la disminución del agarre [3], acelerando así el proceso de desgaste y disminuyendo el desempeño del molino.

En la mayoría de ingenios del mundo, las mazas son construidas de fundición gris. Sin embargo en algunos ingenios, estas mazas se construyen de acero de medio carbono para aprovechar la alta tenacidad de este material y poder hacer un rayado más fino sin que los dientes de la maza se fracturen. La mayor soldabilidad del acero permite también realizar la recuperación de los dientes gastados por medio de soldadura.

Aunque hasta el momento se ha mejorado en las técnicas de aplicación de soldaduras de recubrimiento, aun se presentan defectos que hacen que zonas del diente queden sin recubrir o que los depósitos se desprendan fácilmente acelerando así el fenómeno del desgaste.

Cuando alguna zona del diente de maza se encuentra desprotegida de depósitos de soldadura porque no se han aplicado o porque se han desprendido, sobre esa zona desprotegida se genera desgaste intensivo, produciendo socavamientos en la parte lateral y superior del diente de maza como indican las Figuras 1 y 2.



**Figura 1.** Diente de maza con socavamiento.



**Figura 2.** Cresta socavada

El material comúnmente utilizado para recubrir las mazas son fundiciones blancas del tipo Fe-Cr-C aplicadas por soldadura sobre crestas y los flancos de los dientes de maza.

Con respecto a los materiales de recubrimiento de mazas, Buchanan y Shipway. [1] quienes utilizando una versión modificada de la *TE56 multi-station block-on-ring machine*, realizaron un estudio de desgaste en condiciones similares a las que se presentan en mazas de molinos de caña utilizando dos tipos de fundiciones blancas una hipoeutéctica y una hipereutéctica. En este estudio encontraron que aunque la resistencia al desgaste de las dos aleaciones no fue muy diferente si existen diferencias en el mecanismo de desgaste. Igualmente comprobaron que la resistencia al desgaste depende de los parámetros microestructurales como la cantidad y el tamaño de los carburos, la dureza y el tipo de fase. La mejor resistencia al desgaste fue encontrada en la fundición con mayor cantidad de carburos primarios.

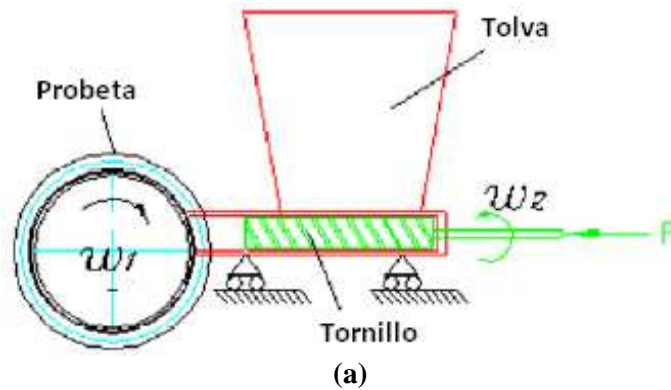
Con respecto al agarre entre la caña y la superficie de la maza Plaza et al. [6] realizaron un estudio comprimiendo caña preparada entre placas ranuradas y midieron la fuerza necesaria para desplazar una de las placas con respecto a la otra. Las placas tenían varios niveles de rugosidad. Encontraron que un pequeño nivel de rugosidad era suficiente para evitar deslizamiento entre la caña y la placa. En este caso el deslizamiento se daba por corte interno en la caña.

Casanova y Aguilar [3] utilizando una máquina modificada de la norma G-65, estudiaron el desgaste causado por el par tribológico bagazo – acero, bajo condiciones de laboratorio. En su estudio determinaron que el problema principal de pérdida de material se debe al problema de la abrasión. En su investigación variaron la presión de trabajo, la velocidad de las muestras y el contenido de materia mineral extraña. Reportaron que el desgaste aumentaba a medida que se incrementaba la carga y la materia extraña. Los mecanismos de desgaste encontrados fueron *cutting* y *ploughing*.

La presente investigación va dirigida a evaluar la influencia de la geometría de los depósitos de recubrimiento en el desgaste de los dientes de maza de molino de caña de azúcar. Para ello se utilizó un banco de pruebas que permite someter probetas a desgaste, bajo condiciones similares a las que se presentan en las mazas de los molinos de caña. El desgaste fue medido como la pérdida de peso de las probetas en función de la distancia lineal recorrida por las probetas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las pruebas de desgaste fueron realizadas en una máquina basada en el prototipo de la prueba estándar ASTM-G65 similar a la desarrollada por Casanova y Aguilar [3], pero con mayor capacidad de alimentación de bagazo y mayor carga aplicada. Esta máquina usa bagazo con jugo y materia mineral extraña como material abrasivo. Consta de un tornillo de transporte el cual toma bagazo de una tolva y lo comprime a través de un tubo contra un aro que se encuentra girando en su extremo. Sobre el tornillo se aplica una carga controlada mediante un peso. En la Figura 3 se muestra un esquema y una fotografía de la máquina.



**Figura 3. (a)** Esquema máquina para medir desgaste. **(b)** Máquina para medir desgaste.

Al presentarse deslizamiento de la rueda con respecto al bagazo, se presenta también desgaste. El deslizamiento presentado en esta máquina es similar al deslizamiento que se da en una maza cuando la alimentación es deficiente o debido a la acción del raspador sobre la maza. El diámetro de la rueda es similar a la rueda de caucho de la máquina ASTM G-65 con un valor de 282mm.

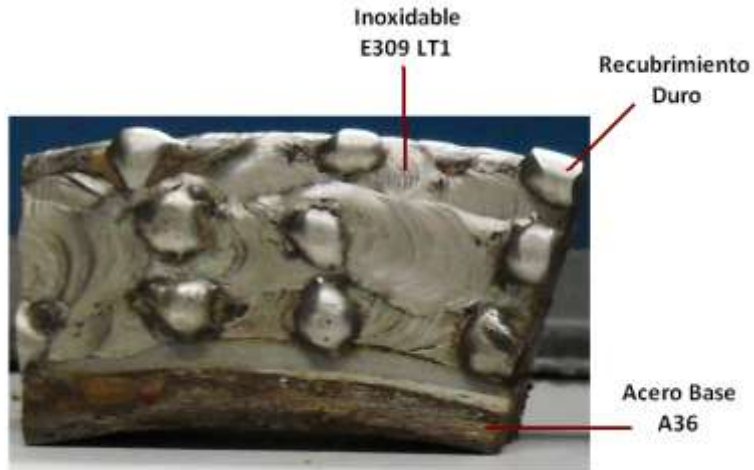
El tornillo tiene un diámetro de 74.9 mm, los motores de accionamiento tienen una potencia de 1,5 HP y sus revoluciones son controladas por variadores de velocidad. La velocidad de giro del tornillo para una óptima alimentación de bagazo es fue de 22.04 rpm.

El valor de la carga evaluada correspondió a 400 N (P en la Figura 3a). Esta carga se controla colocando un peso sobre un mecanismo amplificador y se aplica sobre el tornillo el cual a su vez la aplica al bagazo. De esta manera se simula la carga que realiza la maza superior sobre la maza cañera y la maza bagacera.

Las probetas fueron extraídas de aros los cuales están constituidos por tres materiales distintos (La Figura 4 indica la posición de los materiales de los cuales se conforma la probeta): Acero A-36 sobre el cual se aplicó un recubrimiento de Acero Inoxidable E 309 LT1 mediante el proceso de Flux Cored Arc Welding (FCAW), sobre el acero inoxidable se aplicó un recubrimiento duro (fundición blanca hipoeutéctica) en forma de pepas radiales mediante el proceso SMAW. En la Tabla 1 se muestra la composición nominal de los materiales de la probeta. La velocidad de giro de la probeta fue de 20.28 rpm que corresponde a una velocidad lineal 300mm/s en el perímetro.

**Tabla 1.** Composición química de los materiales de la probeta.

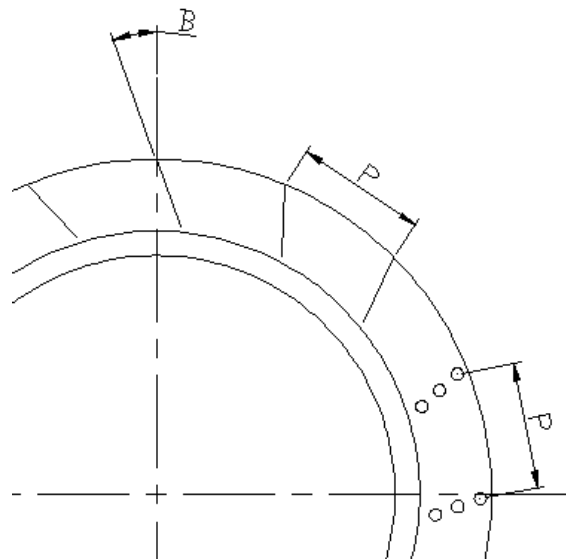
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Fe	Cr	Ni	Mo	V
Acero	0.26	0.75	0.40	0.04	0.05	0.20	Bal.	-	-	-	-
Inoxidable	0.03	1.63	0.65	0.01	0.01	0.25	-	23.80	12.97	0.14	0.07
Fe-Cr-C	2.88	1.81	2.36	-	-	-	-	18.49	0.021	0.002	-



**Figura 4.** Probeta de ensayo

El factor que interviene en el desgaste y fue evaluado en este estudio es la geometría de los depósitos de soldadura.

Como geometría de depósitos se evaluaron pepas radiales. A esta geometría se le varió el paso y se fijó el ángulo con respecto al radio. El paso corresponde a la distancia entre pepas medido sobre el diámetro exterior. El ángulo de inclinación corresponde a la distancia angular medida entre las pepas y un plano formado por el eje central de la maza y un vector radial que pase por el inicio del cordón en la cresta del diente. En la Figura 5 se muestran esquemáticamente el paso (P) y el ángulo de inclinación (B)



**Figura 5.** Esquema de los parámetros geométricos.

Los valores de cada parámetro ensayado fueron: el paso se evaluó en los valores de 0.5 - 0.75 y 1 pulg. y el ángulo de inclinación evaluado fue 10°. Las probetas tenían un rango de peso de 140-180 gr.

Una vez seleccionadas las probetas fueron marcadas para su posterior diferenciación y pesadas en una balanza con precisión de 0.001gr. Posteriormente las probetas se ensamblan al porta-probetas de la siguiente forma: se toman todas las probetas correspondientes al ángulo y se proceden a agrupar de acuerdo al respectivo valor del paso, se coloca una probeta de relleno que sirve de separación entre los grupos de probetas mencionadas. De esta manera sobre el porta-probetas estarán todas las probetas para un total de 9 muestras para el experimento. Sobre las regiones de ajuste en el porta-probetas se aplica silicona a fin de evitar la filtración del jugo. Para la realización del experimento se toma bagazo limpio al cual se le adiciona una cantidad determinada de materia extraña mineral correspondiente a sílice AFS 50/70 (tamaño de la partícula 212-300 μm). La cantidad de sílice se determina con la relación de arena a fibra de bagazo (DFR) [3] la cual está dada por:

$$DFR = \frac{W_{ARENA}}{W_{FIBRA}}$$

Donde W corresponde al peso de arena y fibra respectivamente

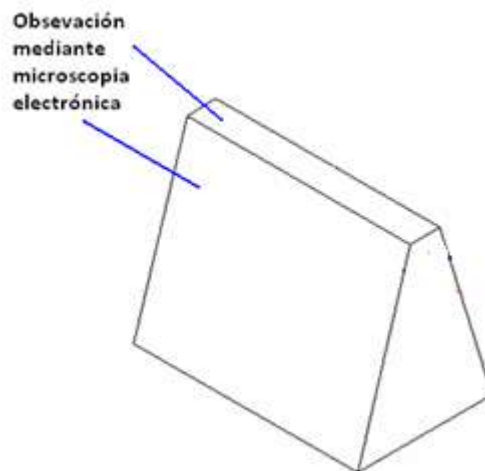
Para este estudio se utilizó un valor DFR de 0.5 que corresponde a caña altamente contaminada.

Una vez adicionada la materia mineral se procede a agregar jugo de caña correspondiente a un 24.29% de la fibra de bagazo y agua correspondiente a un 35.2% de la fibra de bagazo.

La duración total de cada ensayo es de 41 horas 39 minutos que corresponde a un recorrido lineal de 45 Km del diámetro externo de la rueda.

Una vez finaliza la prueba las probetas se lavan con acetona, se secan y se pesan. La diferencia entre el peso inicial y el peso final corresponde la pérdida de peso. Durante el experimento se realizaron paradas cada 15 km de recorrido lineal del diámetro externo de la rueda, hasta completar 45 km de recorrido total.

Las superficies de desgaste fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica. En la Figura 6 se muestra esquemáticamente las zonas donde se realizaron las observaciones.

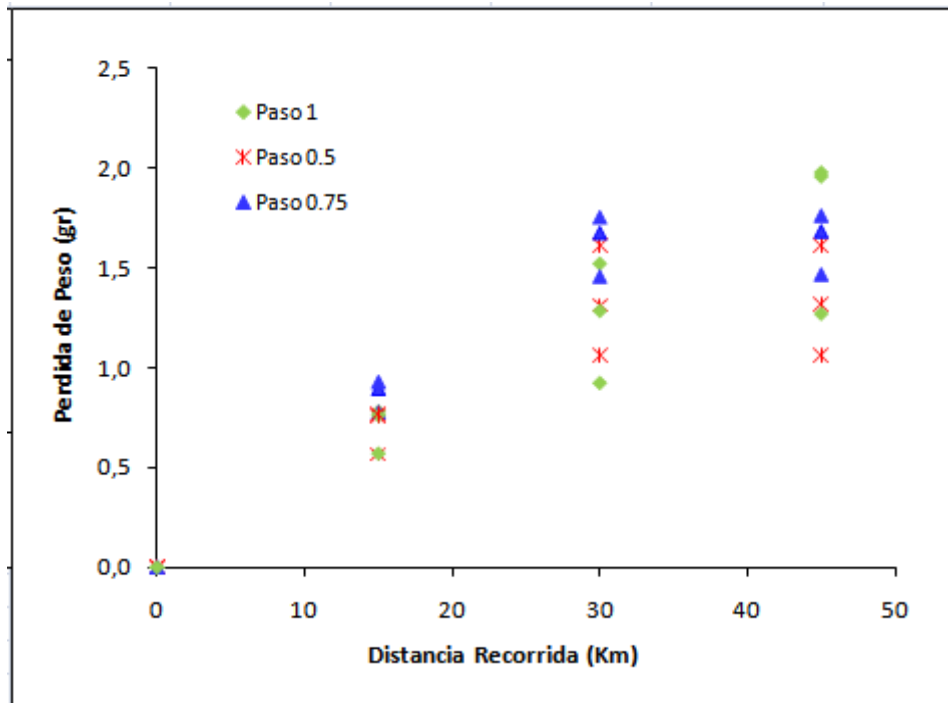


**Figura 6.** Zonas de observación mediante microscopía electrónica.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección indica los resultados conseguidos en las pruebas realizadas. Presentan los valores obtenidos de desgaste de las probetas en función de la distancia de deslizamiento. Se indica cual es la configuración de soldadura que mejor comportamiento presenta frente al desgaste.

La Figura 6 muestra los valores de desgaste en función del recorrido lineal, a una velocidad de deslizamiento de 300mm/s. Se observa un aumento en la pérdida de peso a medida que avanza el recorrido lineal.

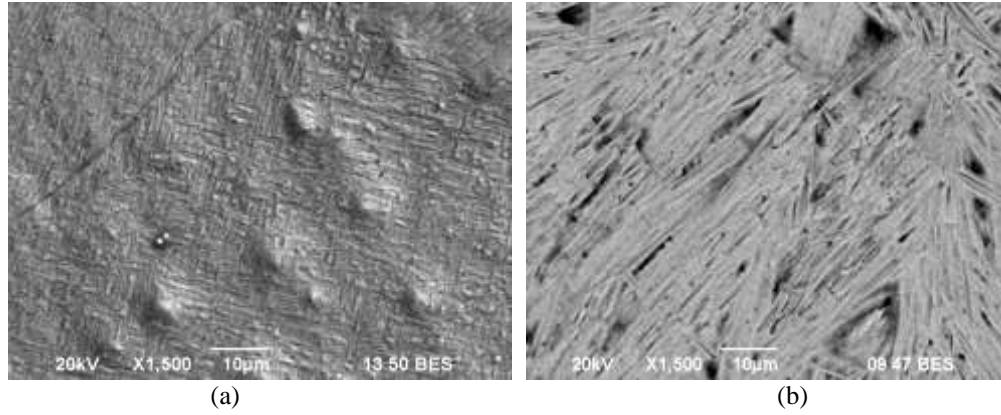


**Figura 6.** Desgaste en función del recorrido

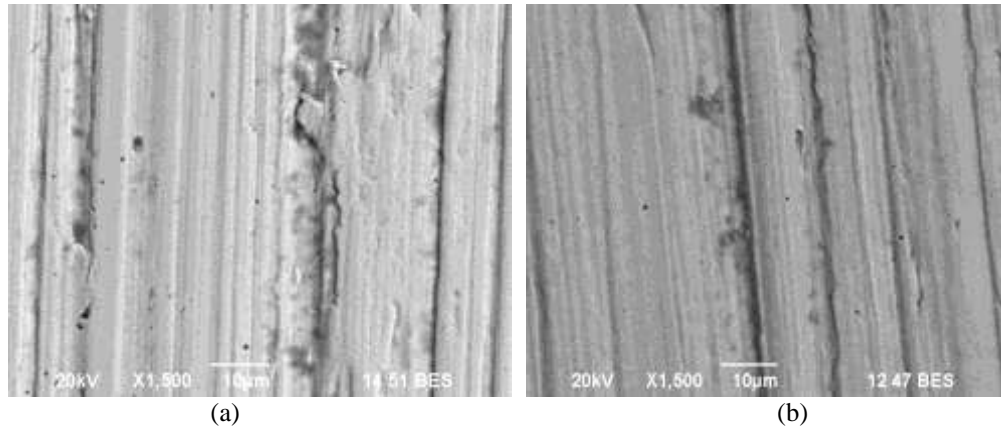
La variación de la pérdida de peso con la distancia de deslizamiento presenta un aumento lineal durante las primeras distancias de deslizamiento, pero manifiesta un crecimiento amortiguado en distancias de deslizamiento mayores, indicando así que el desgaste tiende a ser asintótico una vez se sobrepasa los 45 km de recorrido lineal. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Aguilar [5] en el par caña – partículas minerales – acero al carbono, en la estaciones de preparación de caña y azúcar. Bezer y Boada [4] igualmente reportan un comportamiento potencial amortiguado en el desgaste de mazas de fundición gris para el par caña – partículas minerales – mazas. De la misma forma Buchanan [1] reporta un crecimiento lineal y amortiguado de la pérdida de masa en función de la distancia de deslizamiento para dos tipos de fundiciones blancas una hipoeutéctica y una hipereutéctica, en el par bagazo – arena - mazas.

De la gráfica de desgaste presentada se puede extraer la configuración que menor desgaste presento la cual corresponde a la de un paso de 0.5 pulg. Ya que este fue el menor paso de los evaluados, se puede afirmar que el menor desgaste se debe a una mayor concentración del recubrimiento duro el cual es más resistente al desgaste que el acero inoxidable. Al estar más cerca los depósitos de recubrimiento duro, dejan menos espacios de acero inoxidable descubierto evitando así su desgaste. Además, cuando la proximidad de los depósitos disminuye, tienden a formar una superficie plana provocando menor resistencia al deslizamiento. Por lo anterior, si bien con la configuración más compacta (0.5 pulg. de paso) se obtuvo menor desgaste, también es probable que esta configuración tenga menor agarre que una con mayor paso y por lo tanto haya procesado menor cantidad de bagazo. Por lo tanto un factor importante que queda por evaluar es la influencia de la geometría de los depósitos en el agarre sobre el bagazo.

A continuación se analizan las superficies de las diferentes probetas a fin de determinar los mecanismos de desgaste presentes. Para lograr este objetivo se toma como referencia una probeta que no se sometió a las pruebas de abrasión. Las superficies estudiadas corresponden a la cresta y flancos sobre la cual se observo el recubrimiento en acero inoxidable y las pepas del recubrimiento duro. La Figura 7 muestra la superficie del material soldado, tanto inoxidable (a) como fundición blanca (b), que no ha sido sometido a desgaste. Se observa la rugosidad inicial de las superficies con una orientación no claramente preferencial como las que fueron sometidas a desgaste. Las micrografías fueron tomadas a 1500X.

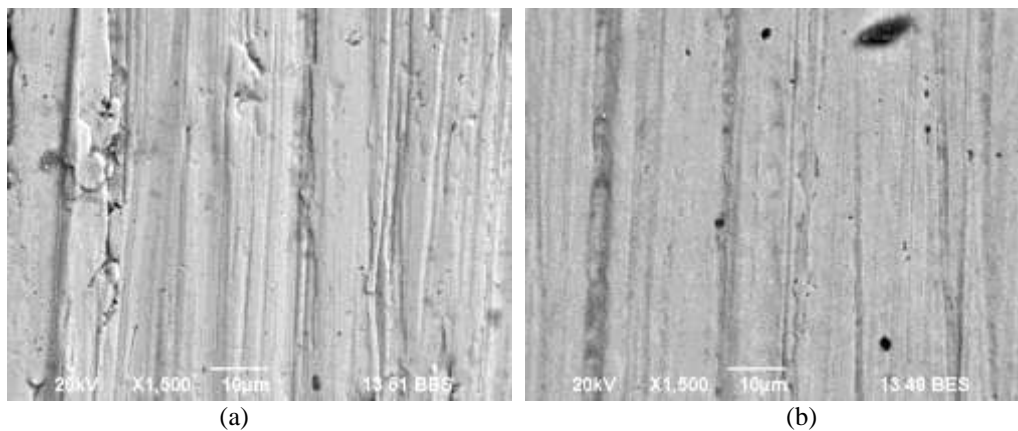


**Figura 7.** Micrografías de una probeta sin ensayar

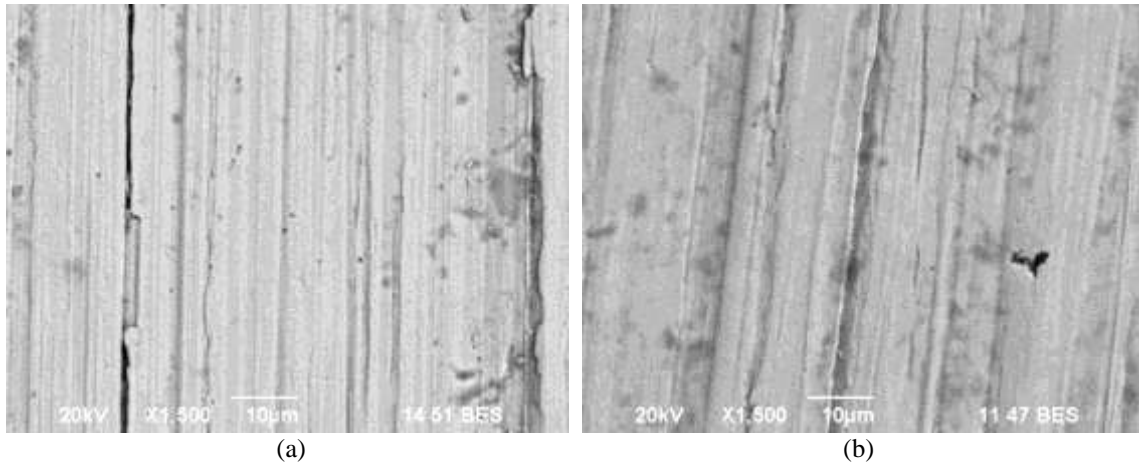


**Figura 8.** Micrografías de la cresta y flancos de una probeta ángulo 10 – paso 0.5

La Figura 8 corresponde a la configuración de ángulo 10-paso 0.5. La Figura (a) indica surcos continuos en la superficie del acero inoxidable en la dirección de deslizamiento con el bagazo, la aparición de estos se debe a los mecanismos de *ploughing* y *cutting*. La Figura (b) corresponde a la superficie del recubrimiento duro, la cual presenta surcos menos profundos que el inoxidable debido a su mayor dureza. Similar topografía y mecanismos de desgaste fueron encontrados en las probetas correspondientes a paso 0.75 pulg. y 1 pulg., cuyas superficies de desgaste se muestran en la Figura 9 y 10. Las Figuras (a) corresponden al acero inoxidable y las Figuras (b) al recubrimiento duro. Las micrografías fueron tomadas a 1500X.



**Figura 9.** Micrografías de la cresta y flancos de una probeta ángulo 10 – paso 0.75



**Figura 10.** Micrografías de la cresta y flancos de una probeta ángulo 10 – paso 1

#### 4. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas indicaron que el desgaste aumenta rápidamente en tempranas distancias de deslizamiento, pero tiende a amortiguarse y ser constante a medida que aumenta el recorrido, lo que indica un periodo de asentamiento de las superficies soldadas con respecto al bagazo.

La geometría de los depósitos de soldadura influye en el desgaste de las mazas; por lo tanto se puede buscar una configuración adecuada para aumentar la vida útil de las mazas de molino y de esta manera disminuir los costos de mantenimiento.

Los principales mecanismos de desgaste encontrados en las superficies de las diferentes configuraciones geométricas en las probetas fueron microdeformación plástica o *ploughing* y microcorte o *cutting* por parte de las partículas de sílice.

#### 5. REFERENCIAS

1. BUCHANAN, V.E; SHIPWAY, P.H Y MCCARTNEY, D.G. Microstructure and abrasive wear behavior of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear* 263 (2007) 99-110.
2. BUCHANAN, V.E; SHIPWAY, P.H Y MCCARTNEY, D.G. A comparison of the abrasive wear behaviour of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying, *wear* 264 (2008) 542-549.
3. CASANOVA, F Y AGUILAR Y. A study on the wear of sugar cane rolls, *Wear* 265 (2008) 236-243
4. BEZER, V y BOADA, O. Investigaciones naturales de la dinámica del desgaste en las piezas de la planta de moler de las centrales azucareras. En: Cuba, Azúcar, 1976.
5. AGUILAR, Y y FERRER, C. Influencia de los Recubrimientos de Fe-C-Cr y Fe-C-V-W Aplicados sobre el sustrato de acero al carbono en los mecanismos de desgaste en las cuchillas picadoras de caña de azúcar contaminada por sílice. III Congreso Ibérico de Tribología 2005.
6. PLAZA F.; HARRIS, H.D. Y KIRBY, J.M. Modelling the compression, shear and volume behaviour of final bagasse, *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* 23 (2001) 428-436.