

Caracterización de las propiedades mecánicas y microestructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes

*César Cerón Bolaños, John Sandro Rivas, John Jairo Coronado**

(Recibido el 21 de abril de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial. Escuela Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle. A. A. 25360, Cali, Colombia.

Resumen

Se analizaron las propiedades mecánicas y las características microestructurales de los materiales de aporte y la zona afectada térmicamente (ZAT) de tres procedimientos de soldadura de arco eléctrico, usados para la recuperación de ejes desgastados de molinos de caña de azúcar. En dos procedimientos se identificó que en la ZAT había ferrita en bordes de grano, mayor crecimiento de grano y la estructura Widmanstaetten, lo cual reduce la tenacidad del acero. Las soldaduras se compararon partiendo de sus propiedades mecánicas por medio de ensayos de tensión y de impacto Charpy.

----- *Palabras clave:* ejes de molino azucarero, recuperación por soldadura, propiedades mecánicas de soldaduras, propiedades microestructurales de soldaduras.

Characterization of mechanical properties and micro-structural features of welds used for rebuilding shafts

Abstract

Mechanical properties and micro-structural features of welded metal and heat-affected zone (HAZ) of three welding processes used to rebuild worn shafts in sugar cane mills were analyzed. For two welding processes the following characteristics were observed in the HAZ: presence of ferrite in the grain boundary, higher grain growth and Widmanstaetten structure, features that reduce steel toughness. A weld ranking was established from mechanical properties obtained by both tension and Charpy impact tests.

----- *Key words:* sugar mill shaft, rebuild by welding, mechanical properties of welds, micro-structural features of welds.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+7+321 21 33, fax: +57+4+333 48 99, Correos electrónicos: johnjairocoronado@yahoo.com, johncoro@univalle.edu.co (J. J. Coronado).

Introducción

El diseño de los molinos de caña ha permanecido relativamente estable por casi dos siglos, manteniendo el principio de aplicar grandes presiones a bajas frecuencias de rotación sobre un colchón de caña con el objetivo de separar el jugo y la fibra que componen la caña [1]. Los molinos están constituidos, básicamente, por cuatro rodillos que son conocidos como mazas, estas reciben los nombres de superior, cañera, bagacera y cuarta maza (MS, MC, MB y CM), dos elementos sirven de soporte a los ejes de las mazas (son conocidos como cureñas) y una tolva vertical es usada para alimentar la caña al molino (conocida como chute). Las mazas superior, cañera y bagacera están dispuestas en los vértices de un triángulo imaginario con la MC del lado de la entrada de caña, la MB del lado de la salida de la caña y la MS arriba de las anteriores (figura 1). La extracción de jugo se realiza durante el tránsito de la caña entre las parejas formadas por las MS-MC y MS-MB. La CM se utiliza para ayudar a alimentar la caña a la pareja MS-MC (por esto también se conoce como maza alimentadora).

Las mazas son cilindros huecos de pared gruesa de acero o de fundición gris, los cuales están encabados en ejes de acero (usualmente AISI

1045) y son apoyados en chumaceras de bronce ubicadas en las cureñas (figura 2). El paso de la caña por la abertura entre las parejas MS-MC y MS-MB hace que estas tiendan a separarse. Los ejes de las MC y MB están apoyados de modo que no puedan desplazarse; pero al eje de la MS le es permitido desplazarse verticalmente (por medio de un diseño especial de chumacera). Para garantizar la extracción de jugo se aplica fuerza al eje de la maza superior, a través de dos cilindros hidráulicos dispuestos sobre las dos chumaceras del eje. Esta fuerza es del orden de 2,863 MN por cada metro de longitud de la maza (en el entorno de los ingenios azucareros de Colombia esta carga es expresada como 90 ton por pie maza) y contrarresta el empuje realizado por el colchón de caña que pasa por el molino. La entrada de potencia al molino se realiza a través del eje de la MS y es distribuida a los otros ejes de maza por medio de coronas. La potencia instalada en un molino es del orden de los 746 KW (1.000 hp), de la cual 45% se consume en el eje de la MS y el 55% restante se transmite a los otros ejes [2]. Su velocidad de rotación varía entre 4 y 6 rpm.

Causas frecuentes de las fallas ha sido el desgaste producido por la adhesión del eje y el cojinete y el rayado producido por el ingreso de materia extraña al guijo (jugo y bagazo con partículas

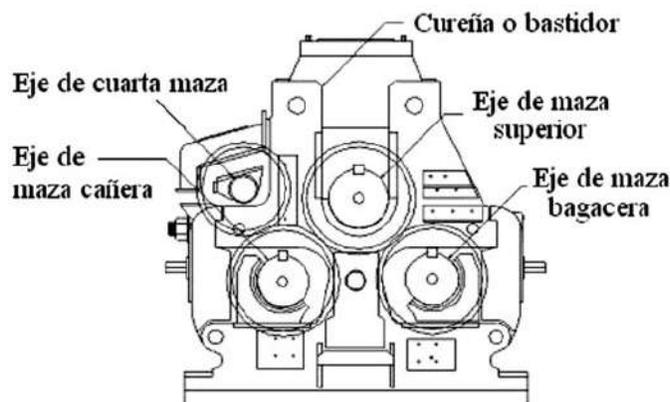


Figura 1 Molino de caña de azúcar

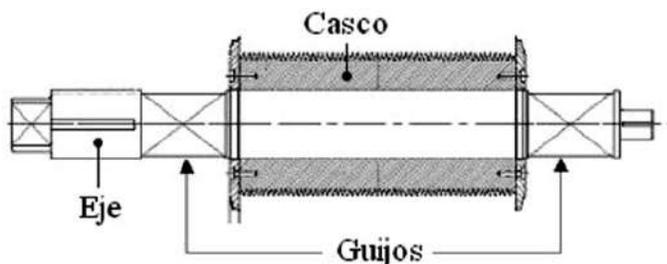


Figura 2 Eje y casco de molino de caña

abrasivas) durante la flotación del eje [3]. El ingreso de materia extraña degrada las propiedades del lubricante lo cual acelera el proceso de pérdida de material en la superficie del eje; esto hace que el área de contacto efectiva entre el eje y el cojinete se reduzca lo cual incrementa la presión específica sobre el lubricante facilitando el contacto metal-metal, lo que produce mayor desgaste tanto en el eje como en la chumacera. Como el desgaste se presenta principalmente en la zona del eje más cercana a la maza el punto de concentración teórico de la fuerza aplicada por el sistema hidráulico se traslada hacia fuera del eje aumentando el ya importante momento flector sobre zonas críticas del eje [4]. Además, se genera calor excesivo en las áreas que aún mantienen contacto y deteriorándose aún más la lubricación y las propiedades del sistema.

Las condiciones mencionadas favorecen la generación de fisuras en los ejes por esto los ingenios azucareros han adoptado la aplicación de soldadura para recuperar las dimensiones de los guijos desgastados o con fisuras. Este proyecto busca ayudar a la industria azucarera en la selección de los mejores procedimientos de recuperación de ejes a través de la caracterización de las propiedades mecánicas y microestructurales de tres de las soldaduras usualmente aplicadas en la región.

Metodología

Para caracterizar mecánica y microestructuralmente las soldaduras utilizadas usualmente en ejes fisurados o desgastados se aplicaron tres

procedimientos de soldadura en un eje de 0,406 m de diámetro (16 in), dos procedimientos de soldadura de arco sumergido (SAW) y un procedimiento de soldadura de arco con núcleo de fundente (FCAW). Estos procedimientos se designaron bajo los siguientes nombres:

Procedimiento de recuperación A

Proceso SAW, materiales depositados: material de aporte 1 (A-MA 1) y material de aporte 2 (A-MA 2) (véase figura 4), alambre tubular de 3/32" de diámetro, velocidad periférica de 65 cm/min, 490A, 29 V y *stick out* de 3,8 cm.

Información suministrada por el fabricante:

A-MA 1. Composición química: %C = 0,08, %Mn = 0,8, %Cr = 12,5, %Si = 0,4. Dureza esperada del depósito: 265-303 BHN (27-32 HRC).

A-MA 2. Composición química: %C = 0,09, %Mn = 0,8, %Cr = 0,45, %Ni = 0,55, %Mo = 0,15, %Si = 0,3. Dureza esperada del depósito: 219-228 BHN (18-20 HRC).

Procedimiento de recuperación B

Proceso SAW, materiales depositados: material de aporte 1 (B-MA 1) y material de aporte 2 (B-MA 2), alambre tubular de 3/32" de diámetro, velocidad periférica de 31,75 cm/min, 400A, 30 V y *stick out* de 3,8 cm.

Información suministrada por el fabricante:

B-MA 1. Composición química: %C = 0,04 - 0,14, %Si = 0,1, %S = 0,03, %Mn = 0,25-0,6,

%P = 0,03, %Cu = 0,035. Dureza esperada no suministrada.

B-MA 2. Composición química: %Mn = 0,5-2,0, %Si = 0,5-2,0, %V = 0-1, %Cr = 0,5-0,9, %Mo = 0-5,0, %Ni = 0-5, W = 0-1,5. Dureza esperada: 280 BHN (29 HRC).

Procedimiento de recuperación C

Proceso FCAW, material depositado: material de aporte (C-MA 1), alambre tubular de 3/32" de diámetro, velocidad periférica de 14,5 cm/seg, 290A, 24 V y *stick out* de 2,54 cm. Información suministrada por el fabricante:

Composición química: %C = 0,15-0,17, %Mn = 2,3-2,5, %Cr = 1,5-1,7, %Ni = 1,3-1,4, %Al = 0,4-0,5, %P = 0,01, %S = 0,004. Dureza esperada del depósito: 303-341 HBN (36-36 HRC).

Se maquinaron ranuras en el guiño del eje para aplicar las soldaduras, separados una distancia de 38,1 mm (1 1/2 in), esta longitud evita que las temperaturas que se alcanzan al recuperar una sección con soldadura afecten las propiedades de los materiales de aporte de los canales recuperados con anterioridad. Los canales fueron mecanizados con una profundidad de 25,4 mm (1 in) y se dejó un ángulo de 60° en los cambios de sección. El primer canal fue cilindrado a una distancia de 103 mm (4 1/16 in) desde la parte lateral del casco de la maza. Se rellenó cada canal con las soldaduras ya mencionados hasta

las dimensiones originales del eje. La figura 3 muestra el guiño. El calentamiento del eje se realizó a una temperatura superior a 250 °C en el área del guiño, para lo cual el ingenio colaborador del proyecto, responsable de la aplicación de las soldaduras, construyó un horno de gas propano con el cual además se garantizó el enfriamiento lento y el recocido de alivio de tensiones del guiño después de soldado.

En el eje recuperado se hicieron 4 cortes primarios con el propósito de separar cada procedimiento de soldadura en secciones independientes (figura 4). Después cada una de las secciones fue cortada en tramos más pequeños, para que pudieran luego ser manipuladas por una segueta mecánica pequeña. La figura 4 muestra los cortes principales que se le hicieron a un procedimiento y el despiece de la sección central al realizar los cortes.

De acuerdo con esta secuencia de cortes se obtuvo una pieza útil por fracción lateral, en general por procedimiento de recuperación se obtuvieron cuatro piezas útiles para hacer probetas, dos por fracción central y dos de las fracciones laterales (figura 5). La separación de los diferentes tipos de probetas tiene lugar en las piezas útiles que se han alcanzado con los cortes descritos anteriormente. Se posicionaron las piezas en la segueta con las caras de acero paralelas a las caras planas de agarre de la prensa, desarrollándose cinco cortes en cada pieza útil, separados a una distancia de 17 mm como lo muestra la figura 5.

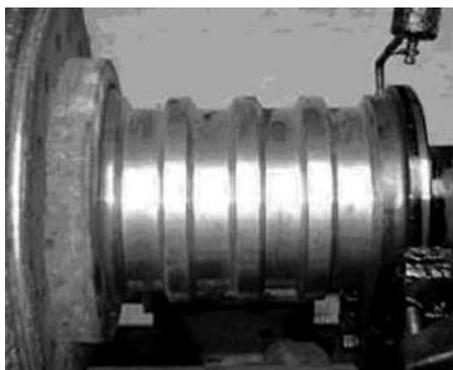


Figura 3 Guiño del eje de maza superior maquinado y recuperado por soldadura

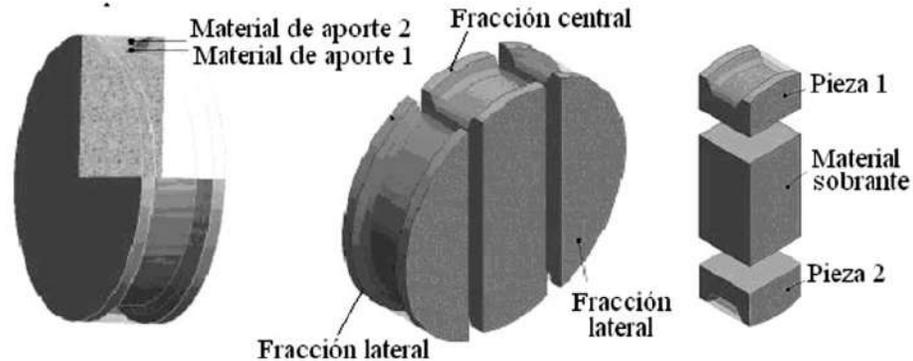


Figura 4 Vista en 3D de los cortes principales, secundarios y cortes de las fracciones laterales

Para producir todos los tipos de probetas fue necesario obtener de cada segmento un corte que tuviera únicamente el material de aporte de interés, con unas dimensiones de sección transversal cercanas a las de las secciones transversales de las probetas con el propósito de reducir el tiempo de mecanizado posterior. El tipo de probetas para ensayos de tensión fue el de sección circular [5] y se seleccionó la probeta de viga simple tipo A para ensayos de impacto Charpy [6]. La figura 6 muestra la secuencia de cortes para la obtención de las probetas de tracción e impacto Charpy. Se realizaron cuatro cortes, los dos primeros para separar el material de aporte 1, y los dos últimos para acercar la longitud del segmento minimizado a la longitud que finalmente tendrá la probeta.

Para obtener las probetas de impacto Charpy de la ZAT se realizaron cortes como se muestra en la

figura 7, luego se lijó y pulió una de las caras hasta obtener un acabado metalográfico, se atacó químicamente para revelar la ZAT en el metal base. Posteriormente se montó la pieza en la fresadora vertical con su cabezal movido a $22,5^\circ$ y con una fresa de cola de milano de ángulo de diente de 45° se mecanizó la muesca tipo “V” en la ZAT identificada. La literatura reporta que las zonas de menor tenacidad en la ZAT de una soldadura se presentan en la región de grano recrecido y en la línea de fusión [7, 8]; pero debido al tamaño muy pequeño de la ZAT en las soldaduras estudiadas no fue posible ubicar la entalla en dichas zonas, solo se pudo garantizar que estaba en ella.

Resultados y discusión

La tabla 1 presenta los datos de resistencia de fluencia (S_y) y resistencia última de tensión (S_u) para cada material en análisis. Las curvas típicas

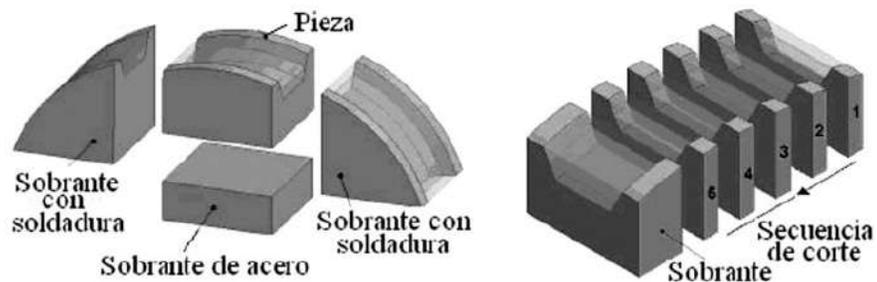


Figura 5 Cortes de la fracción central y segmentos cortados de la pieza útil

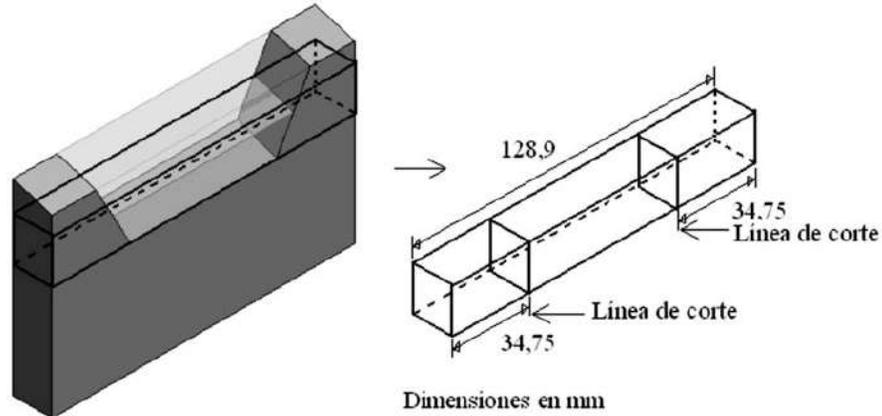


Figura 6 Secuencia de corte para mecanizar probetas

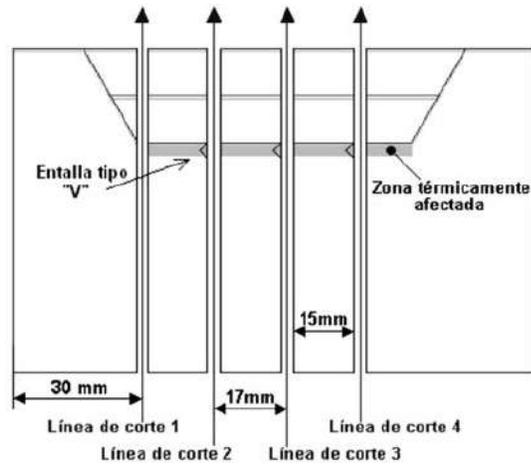


Figura 7 Secuencia de cortes para obtener probetas Charpy de la ZAT

de esfuerzo deformación de las probetas son mostradas en la figura 8, y la figura 9 presenta las probetas usadas en el ensayo de tracción. El material que presenta mayor esfuerzo a la fluencia es el material de aporte 2 del procedimiento A-MA 2, con una magnitud de 415 MPa, y el que tiene mayor resistencia última de tensión es el material de aporte del procedimiento C-MA 1 con 714 MPa. El material que presentó mayor ductilidad resultó ser el material base con 20,93%, seguido del procedimiento B-MA 1 con 19,86% y el material que presentó menor ductilidad fue el procedimiento A-MA2 con 9,38%.

La tabla 2 muestra la energía de impacto promedio de los materiales en estudio. Los materiales que presentaron mayor energía de Impacto Charpy son los materiales de aporte 1 de los procedimientos A-MA 1 y B-MA 1, cada uno con 118,21 Nm.

Tabla 1 Resistencia de fluencia, última de tensión y ductilidad

Procedimiento	Acero SAE 1045	A		B		C
		Material de aporte 1	Material de aporte 2	Material de aporte 1	Material de aporte 2	Material de aporte 1
Sy (MPa)	283,333	280,000	415,000	253,333	241,500	324,000
Su (MPa)	645,000	550,000	609,000	529,000	710,750	714,000
Ductilidad %	20,930	15,410	9,380	19,860	15,970	16,150

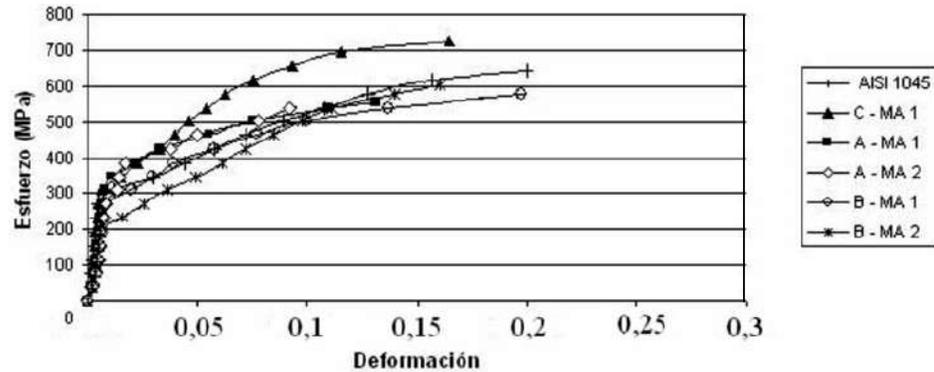


Figura 8 Gráfica esfuerzo deformación para cada procedimiento de soldadura

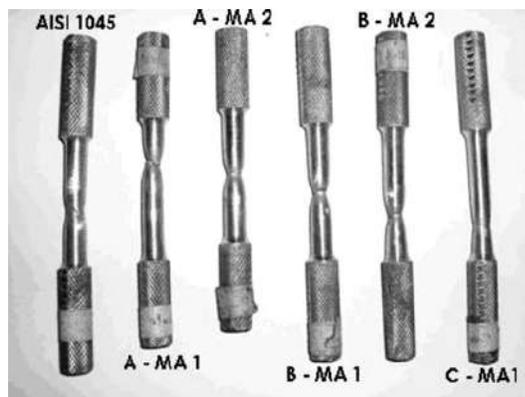


Figura 9 Probetas de tracción después del ensayo

La tabla 3 muestra la energía de impacto CVN absorbida en la ZAT en cada procedimiento de soldadura. La ZAT que presenta mayor CVN es la del procedimiento A con una magnitud de 47,58 Nm.

Microestructura de las soldaduras

Las micro-fotografías se realizaron en los depósitos de soldadura y en la ZAT para conocer

las características y las transformaciones de su microestructura. Las probetas fueron pulidas con óxido de aluminio de 0,3 μ, atacadas con nital al 2% y observadas en un microscopio óptico marca Advanced Optical Microscope. La microestructura cerca de la superficie del material A-MA 2 (figura 10) presenta regiones de martensita y zonas de ferrita. El procedimiento A-MA 1 presenta una microestructura ferrítica con perlita disgregada de tamaño pequeño. La microestructura de la ZAT (figura 11) presenta regiones de ferrita y el comienzo de formación de la estructura de Widmanstaetten en algunas regiones del metal base.

La microestructura del material B-MA 2 presenta una matriz ferrítica con algunas trazas de perlita (figura 12). La microestructura del material B-MA 1 presenta perlita y una matriz ferrítica.

En la zona cerca de la línea de fusión en la ZAT (figura 13) los granos equiaxiales en la parte inferior (metal base) son de ferrita y perlita. Los granos columnares de la parte superior (soldadura) son de ferrita en bordes de grano (ferrita

Tabla 2 Energía de impacto Charpy para los depósitos de soldadura y metal base

Procedimiento	Acero 1045	A		B		C
		Material de aporte 1	Material de aporte 2	Material de aporte 1	Material de aporte 2	Material de aporte 1
CVN (Nm)	15,369	118,2105	35,4141	118,2105	10,54575	22,51395

Tabla 3 Energía de impacto Charpy para la zona afectada por el calor

<i>Zona térmicamente afectada (ZAT)</i>			
Procedimiento	A	B	C
CVN (Nm)	47,578	34,008	38,586

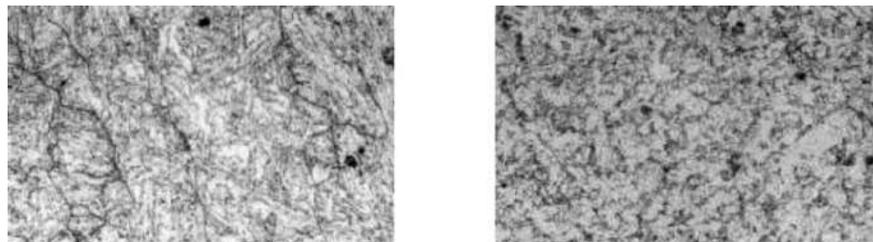


Figura 10 Procedimiento A: material de aporte 2 y material de aporte 1 a 200X

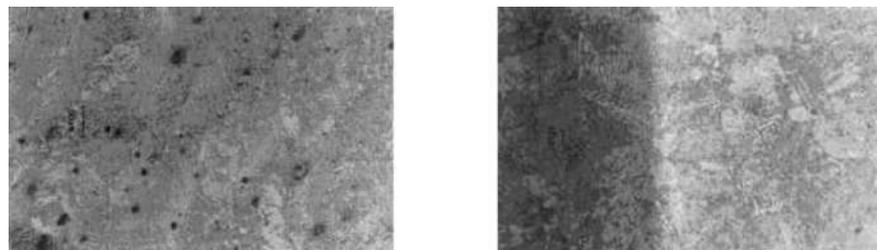


Figura 11 Procedimiento A: zona térmicamente afectada a 200X y 500X

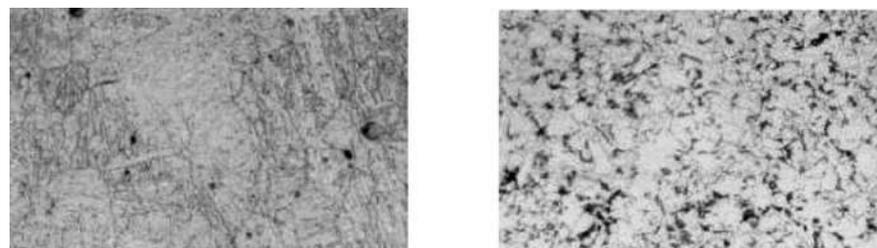


Figura 12 Procedimiento B: material de aporte 2 y material de aporte 1 a 200X

allotriomórfica), que disminuye la tenacidad del depósito [9], además, hay comienzo de formación de la estructura de Widmanstaetten, que es una estructura de fragilidad en los aceros, que se caracteriza por depósitos paralelos a los planos de deslizamiento [10].

En la microestructura del material C-MA 1 presenta una matriz ferrítica con algunas zonas de perlita (figura 14). Los puntos negros son poros

generados en la preparación de las probetas, en la etapa del lijado y del pulido. La figura 15 muestra la microestructura de la línea de fusión entre la primera pasada de la soldadura (superior) y la ZAT (inferior). Se observa en la parte inferior una zona de grano recrecido con ferrita en bordes de grano. La microestructura de la ZAT a 500X (figura 15) presenta el comienzo de formación de la estructura de Widmanstaetten.

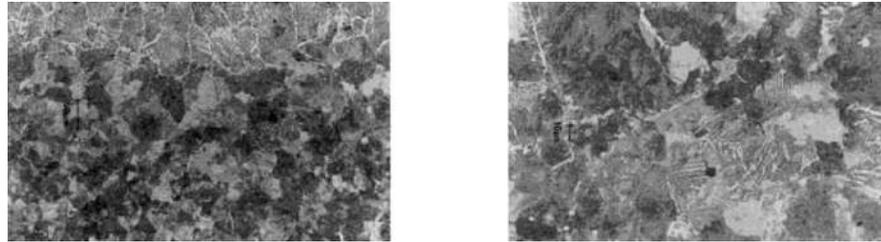


Figura 13 Procedimiento B: zona térmicamente afectada a 200 y 500X

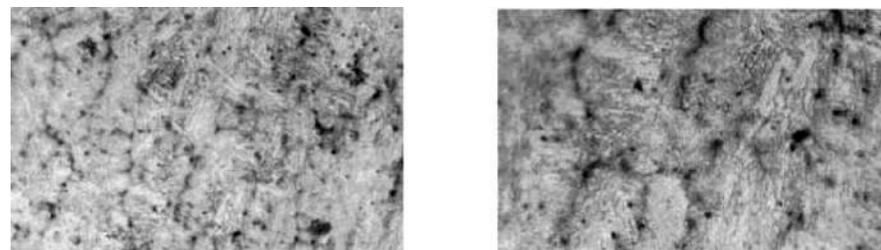


Figura 14 Procedimiento C: material de aporte 1 a 100 y 200X

En la figura 16 se muestra la línea de fusión entre la primera pasada de la soldadura del procedimiento C (superior) y la ZAT (inferior) a 50X. Se observa un defecto (poro de 250 μm de ancho) en línea de fusión. La microestructura del metal base a 200X (figura 16), presenta granos de perlita acompañada de ferrita y contiene 0,52% de carbono.

Dureza y composición química de los depósitos

Las zonas donde se tomaron las durezas para cada depósito de soldadura, son mostradas en la figura 17. La tabla 4 muestra las durezas alcanzadas en las zonas antes descritas para las soldaduras en evaluación. La mayor dureza

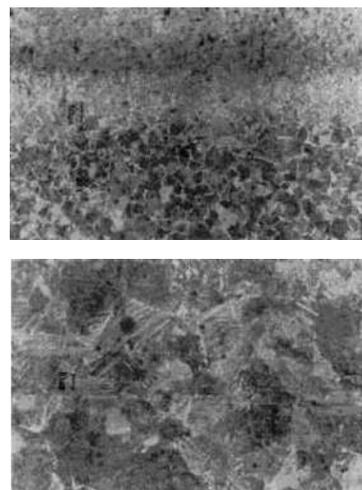


Figura 15 Procedimiento C: zona térmicamente afectada a 200 y 500X

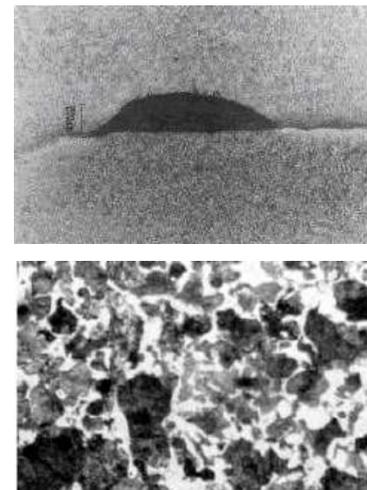


Figura 16 Procedimiento C: zona térmicamente afectada a 50X y acero AISI 1045 a 200X

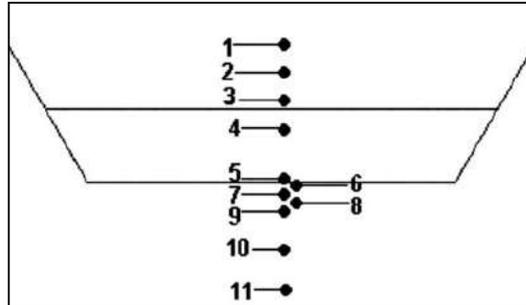


Figura 17 Dureza en las soldaduras: 1. superficie, 2. Material centro del material superior, 3 y 4. Centro de la aplicación arriba y debajo de la línea de fusión cuando son dos materiales, 5 y 6. Línea de fusión, arriba y abajo entre la soldadura y el material base, 7 y 8. Haz grano grueso, 9. Haz grano fino, 10 y 11. Material base no afectado

Tabla 4 Durezas BHN para las zonas de los procedimientos de las soldaduras

Zona	Procedimiento C	Procedimiento A	Procedimiento B
1	246	251	232
2	246	263	244
3	236	212	160
4	227	206	177
5	240	229	204
6	261	218	216
7	232	226	249
8	238	235	244
9	216	200	224
10	216	223	220
11	216	226	206

obtenida superficialmente fue del procedimiento A con 251 BHN, seguida del procedimiento C con 246 BHN y finalmente el procedimiento B con 232 BHN. Es conveniente tener un procedimiento de recuperación con alta dureza para aumentar su resistencia al desgaste, al estar el eje en contacto con la chumacera de bronce. Los valores de dureza son de orden semejante, todos se encuentran en valores bajos, lo cual significa que los materiales empleados no generan estructuras duras y de baja tenacidad. Así mismo la dureza de la zona de grano grueso en la ZAT de todos los procedimientos no es alta, lo cual es conveniente para la recuperación. Aunque las mediciones de dureza indicaron que los valores alcanzados no corresponden a estructuras de baja tenacidad, si se presentan algunas pequeñas zonas aciculares en la ZAT de todos los procedimientos; pero ésta es pequeña y no compromete la resistencia del eje.

Conclusiones

- El material que presenta mayor esfuerzo a la fluencia es el material de aporte 2 del procedimiento A-MA 2, con una magnitud de 415 MPa, y el que tiene mayor resistencia última de tensión es el material de aporte del procedimiento C-MA 1, con 714 MPa.

- Los materiales que tiene mayor energía de impacto Charpy son los materiales de aporte 1 de los procedimientos A-MA 1 y B-MA 1, cada uno con 118,21 Nm. La ZAT que presenta mayor CVN es la del procedimiento A con una magnitud de 47,58 Nm.
- El depósito exterior del procedimiento A (A-MA 2) fue de martensita y ferrita con una dureza de 251 BHN, los depósitos exteriores de los procedimientos B-MA 2 y C-MA 2 fueron ferríticos cuyas durezas fueron de 232 y 246 BHN respectivamente.
- Para los colchones de los procedimientos A-MA 1 y B-MA la estructura que se encontró fue la de ferrita con disgregación de perlita de grano pequeño.
- Se encontró en la ZAT del procedimiento B y C ferrita en bordes de grano, mayor crecimiento de grano y estructura Widmanstaetten, que disminuye la tenacidad del acero, mientras que en el procedimiento A sólo se encontró crecimiento de grano y pequeños inicios de la estructura Widmanstaetten, en proporciones menores a los de las ZAT de los dos procedimientos anteriores, debido a esto presentó mayor energía de impacto CVN (47,58 J).

- El procedimiento de soldadura A es el recomendado para realizar la recuperación de los guijos de los ejes de molino de caña, ya que posee las mejores propiedades mecánicas y microestructurales.

Agradecimientos

El Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, desarrolló este trabajo en el marco del “Proyecto Cooperativo Agroindustrial para Reducir el Desgaste en Equipos de Preparación y Molienda” con la colaboración del personal del Ingenio Manuelita S. A., el Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) y con el apoyo financiero del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias). A todos ellos les debemos mucho por su apoyo.

Referencias

1. E. Hugot. *Handbook of sugar cane engineering*. Elsevier Publishing Company. 1960.
2. A. Gómez, J. Ortiz, M. Reyes. “Measurements of power sharing in a conventional three roller mill”. En: *XXII Congress of International Society of Sugar Cane Technologists*. 1995. pp. 336-341.
3. J. Coronado, S. Rivas, A. Gómez. “Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña de azúcar” *Dyna*. No 144. 2004. pp. 1-8.
4. J. Rivas, W. Mora, A. Gómez, J. Coronado, C. Velez, “Wear on Top Roll Shaft Journals”. En: *International Society of Sugar Cane Technologists*. Guatemala. 2005. pp. 295-302.
5. ASTM E 8-90a. *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*. 1984. pp. 130-145.
6. ASTM E 23-91. *Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. 1984. pp. 197-212.
7. H. Lee “Fracture resistance of steel weld joint under fatigue loading”. En: *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 66. 2000. pp. 403-419.
8. V. Tvergaard “Analysis of the Charpy V notch test for welds”. En: *Fracture Mechanics* Vol. 65. 2000. pp. 627-643.
9. M. Solari. *Metalurgia del metal de soldadura*. Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, República de Argentina. 1986. p. 24.
10. D. Seferian *Metalurgia de la Soldadura*. Edición Revolucionaria. La Habana, Cuba. 1979. p. 14.