

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**COMPARACIÓN EXPERIMENTAL Y ECONÓMICA DE
PARÁMETROS DE RECUBRIMIENTOS DUROS EN MAZAS DE
MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

PRESENTADO POR:

**DOUGLAS ENRIQUE PÉREZ FIGUEROA
RIGOBERTO JOSÉ VÁSQUEZ ZALDAÑA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

M.Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**COMPARACIÓN EXPERIMENTAL Y ECONÓMICA DE
PARÁMETROS DE RECUBRIMIENTOS DUROS EN MAZAS DE
MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

Presentado por :

**DOUGLAS ENRIQUE PÉREZ FIGUEROA
RIGOBERTO JOSÉ VÁSQUEZ ZALDAÑA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. E ING. LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

San Salvador, mayo de 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. E ING. LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que de alguna forma me brindaron su apoyo, sabiduría, conocimientos y consejos para la consecución de mis metas.

Rigoberto Vásquez

DEDICATORIA

Primeramente, quiero dar gracias a Dios por la vida, por haberme brindado el conocimiento y la perseverancia de llegar hasta acá.

A mis padres, Jaqueline Figueroa y Carlos Pérez, por haber creído en mí, por darme su apoyo y amor incondicional, amor que me han sabido demostrar de todas las formas posibles a lo largo de mi vida.

A mi hermano Carlos Alejandro que gracias a su sacrificio me facilitó de gran forma el desarrollo de mis estudios.

A mi abuelo Víctor Tulio que me orientó en conocimientos técnicos aplicables en la carrera.

A mi abuela Berta Alicia (Q.E.P.D), que me enseñó de la mejor manera posible lo bello de la vida, a disfrutarla y a siempre amar al prójimo.

A mi novia Elisa Margarita, que me ha apoyado de mil maneras en los buenos y en los malos momentos que he tenido que vivir en este proceso que ahora culmino, ¡gracias por todo!

A toda mi familia y amigos, en especial a mi querido amigo Luis Menjívar, una persona sin igual e invaluable, con el que tuve el honor de coincidir en vida y que tristemente fue desaparecido, aún me falta mucho de aprender de ti, ¡tu familia y amigos esperamos tu regreso!

Y a todas las personas que conocí en mi paso por la universidad, pues todas las vivencias han sido momentos únicos que aprecio mucho y que me han construido como la persona que soy hasta el día de hoy.

Douglas Pérez

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la sabiduría e inteligencia necesarias para culminar con nuestra formación académica y por ponernos en el camino a personas maravillosas que nos apoyaron y aconsejaron durante todo el proceso.

A nuestras familias por brindarnos su apoyo incondicional y esfuerzo, y por motivarnos a culminar nuestros metas.

Al Ingenio El Ángel por brindarnos la oportunidad de realizar este estudio en sus instalaciones, por proporcionarnos muchos de los datos que necesitábamos, por solventar todas nuestras dudas con respecto a los procesos de blindaje de mazas y por recibirnos cálidamente en cada visita que realizamos al ingenio.

Al Grupo Sarti por permitirnos utilizar su espectrómetro óptico de emisión por chispa para la obtención de las composiciones químicas de las muestras necesarias para cumplir con los objetivos de este trabajo, y también por prestarnos su durómetro.

A nuestra asesora Ing. Leyla Jiménez por brindarnos todo su apoyo, conocimientos y experiencia a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado.

A todos los profesores que compartieron su conocimiento y que dejaron una huella positiva en nosotros.

Douglas Pérez y Rigoberto Vásquez

COMPARACIÓN EXPERIMENTAL Y ECONÓMICA DE PARÁMETROS DE RECUBRIMIENTOS DUROS EN MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR

Estudiantes: Brs: Douglas Enrique Pérez Figueroa & Rigoberto José Vásquez
Zaldaña

Docente asesora: M.Sc.e Ing. Leyla Marina Jiménez Monroy
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se realizó un estudio de comparación experimental y económica de distintos parámetros de recubrimientos duros que son aplicados en mazas de molinos de caña con el objetivo de reducir el desgaste y la posterior pérdida de rugosidad que estas sufren. Se estudiaron 4 recubrimientos: dos varillas para un proceso SMAW y dos alambres para un proceso semiautomático FCAW. Para determinar el recubrimiento más adecuado para disminuir el desgaste se compararon los parámetros de dureza, microestructura y composición química obtenida por espectrometría de emisión óptica. La comparación económica se ejecutó a través de un estudio de costos de soldadura. Los costos principales del análisis fueron los costos de los consumibles y los costos de la mano de obra. También se caracterizó el material del que es fabricada una maza del Ingenio El Ángel y finalmente se propone un método de verificación del desgaste progresivo en las mazas de molinos.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
SIMBOLOGÍA	xvi
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. Proceso y maquinaria de preparación y molienda de caña de azúcar	19
1.1.1. Procesos de preparación de la caña de azúcar y molienda	19
1.1.2. Maquinaria utilizada en procesos de preparación de la caña de azúcar y molienda	24
1.2. Características de las mazas de los molinos de caña de azúcar	28
1.2.1. Dientes de las mazas	29
1.2.2. Rugosidad en las mazas	31
1.3. Mecanismos de desgaste en las mazas de molinos de caña	33
1.3.1. Desgaste adhesivo	34
1.3.2. Desgaste por abrasión	36
1.3.3. Desgaste por corrosión	37
1.3.4. Pérdida de rugosidad de las mazas debida al desgaste	38
1.4. Características de los recubrimientos aplicados en las mazas de molinos de caña.....	41
1.5. Procesos de aplicación de recubrimientos duros en mazas de molinos de caña.....	42
1.5.1. El hierro fundido	44
1.5.2. Métodos para la soldadura del hierro fundido gris.....	46
1.5.3. Clasificación de recubrimientos duros protectores.	47
1.5.4. Blindaje de mazas	49
1.5.5. Aplicación de recubrimientos duros en las mazas.....	50
1.5.6. Procedimiento para la aplicación del blindaje.....	50

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	54
2.1. Caracterización del material base y recubrimientos duros.....	54
2.1.1. Proceso de obtención de las muestras.....	55
2.1.2. Análisis químico por espectrometría de emisión óptica por chispa ..	57
2.1.3. Resultados del Análisis químico por espectrometría de emisión óptica por chispa.....	63
2.1.4. Ensayo de metalografía de material base y recubrimientos	66
2.1.5. Ensayo de dureza del material base y recubrimientos	70
2.2. Costos de soldadura para los procesos de recubrimiento de mazas de molinos.....	73
2.2.1. Indicadores de productividad.....	74
2.2.2. Indicadores de productividad in situ	77
2.2.3. Costos de soldadura.....	85
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
3.1. Caracterización del material base (maza del molino)	88
3.2. Costos de soldadura de los procesos de recubrimiento.	91
3.3. caracterización de los electrodos depositados.....	93
3.3.1. Electrodo A.....	95
3.3.2. Electrodo B.....	99
3.3.3. Electrodo C.....	102
3.3.4. Electrodo D.....	105
3.4. Resumen de resultados.	108
3.5. Método de verificación del desgaste de los dientes.....	112
CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES	132
GLOSARIO	133
BIBLIOGRAFÍA.....	136
ANEXOS	140

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Esquema general de recorrido de la caña en el proceso de preparación y extracción. Fuente propia.....	20
Fig. 1.2. Diagrama de proceso de preparación y molienda. Fuente propia. ...	21
Fig. 1.3. Aspecto de caña preparada antes de entrar a molinos (O’neal, 2017).....	22
Fig. 1.4. Extracción del jugo por molinos (Oliverio, 2011).....	23
Fig. 1.5. Desfibrador COP 5 (Rein, 2012).....	26
Fig. 1.6. Molino convencional de tres mazas (Rein, 2012)	27
Fig. 1.7. Rayado típico de maza de molino de caña. Fotografía tomada de una maza maquinada del Ingenio El Ángel.....	30
Fig. 1.8. Fuerzas ejercidas por la superficie de las mazas sobre el bagazo (Rein, 2012).	31
Fig. 1.9. Desviaciones de la superficie nominal según la definición de rugosidad (Groover, 2007).....	32
Fig. 1.10. Rugosidad típica deseada en los laterales de los dientes de las mazas. Fotografía tomada de una maza del Ingenio El Ángel.....	33
Fig. 1.11. Corte transversal de un molino de caña. Fuente propia.	35
Fig. 1.12. Esquema del blindaje del diente de un molino (Eutectic Castolin, 2013).....	51
Fig. 1.13. Blindaje básico (Eutectic Castolin, 2013).....	52
Fig. 2.1. a) Proceso de corte de un diente de la maza de un molino con un disco de corte, b) Diente cortado	56
Fig. 2.2. Ilustración esquemática de la emisión de un fotón debido a la excitación de un átomo, (Charles Boss, 1997)	58
Fig. 2.3. Fotografía del espectrómetro de emisión óptica por chispa modelo Angstrom V-950 del laboratorio de espectrometría de metalúrgica Sarti.	59
Fig. 2.4. Tablero de control del espectrómetro del laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti	60
Fig. 2.5. Electrodo de chispeo. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.	61
Fig. 2.6. Muestra colocada sobre el electrodo de chispeo. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.....	61

Fig. 2.7. Posicionamiento del brazo orientable sobre la muestra a analizar. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.	62
Fig. 2.8. Sujeción de la muestra mediante la palanca de fijación del contacto. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.	62
Fig. 2.9. Ilustración esquemática de la apariencia microscópica de los límites de granos como líneas oscuras b) Micrografía de hierro puro. (Avner S. H., 1988)	66
Fig. 2.10. Una de las muestras en estudio cortada, lijada y pulida de la cara inferior.	67
Fig. 2.11. Microscopio Óptico Metallovert Leitz de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador. Fuente propia.	67
Fig. 2.12. Microestructura de la muestra extraída de una maza del Ingenio El Ángel ampliación a X100 atacada con nital 2%. Fuente propia.	68
Fig. 2.13. Microestructura del Electrodo A alambre depositado con proceso FCAW en una muestra de maza del Ingenio el Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.	68
Fig. 2.14. Microestructura del Electrodo B 1000 varilla depositado con proceso SMAW en una muestra de maza del Ingenio el Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.	69
Fig. 2.15. Microestructura del Electrodo C varilla depositado con proceso SMAW en una muestra de maza del Ingenio el Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.	69
Fig. 2.16. Microestructura del Electrodo D alambre depositado con proceso FCAW en una muestra de maza del Ingenio el Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.	70
Fig. 2.17. Máquina de ensayo de dureza Rockwell de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.	73
Fig. 2.18. Velocidades típicas de deposición para diversos procesos de soldadura en función de la corriente de soldadura (American Welding Society, 1987).	76
Fig. 2.19. Muestras tomadas de una de las mazas del ingenio. Fuente propia.	77
Fig. 2.20. Balanza Mettler Toledo con que se pesaron las muestras. Fuente propia.	78
Fig. 3.1. Diagrama Fe-C estable (línea de rayas alternas) y diagrama Fe-Fe ₃ C metaestable (líneas continuas) tomada de (Apraiz, 1963), y microestructura de la fundición.	90

Fig. 3.2.	Microestructura de hierro gris fundido. Hojuelas grafiticas en una matriz perlítica con una pequeña cantidad de ferrita (áreas blancas) atacada químicamente con nital al 2%	91
Fig. 3.3.	Microestructura del Electrodo A alambre a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%	96
Fig. 3.4.	Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 20.067% Cr (composición obtenida con el Electrodo A alambre), calculado por el software Thermo-Calc-Academic	97
Fig. 3.5.	Microestructura del Electrodo B varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%.....	100
Fig. 3.6.	Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 19.293% Cr (composición obtenida con el Electrodo B varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic.....	101
Fig. 3.7.	Microestructura del Electrodo C varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%.....	103
Fig. 3.8.	Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 11.117% Cr (composición obtenida con el Electrodo C varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic.....	104
Fig. 3.9.	Microestructura del Electrodo D varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%.....	106
Fig. 3.10.	Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 4.46% Cr (composición obtenida con el Electrodo D varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic	107
Fig. 3.11.	Comparación de los costos de soldadura por libra de material depositado para cada recubrimiento.....	110
Fig. 3.12.	Influencia del contenido y tipo de carburos con la dureza de los electrodos.	111
Fig. 3.13.	Plantilla verificadora de desgaste en maza superior del molino 6...	113

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Composición química en % de una maza de molino del Ingenio El Ángel	64
Tabla 2.2. Composición química en % del Electrodo A alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel.	64
Tabla 2.3. Composición química en % del Electrodo B varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel.	64
Tabla 2.4. Composición química en % del Electrodo C varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel	65
Tabla 2.5. Composición química en % del Electrodo D alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel	65
Tabla 2.6. Resultados del ensayo de dureza de la maza y los recubrimientos	72
Tabla 2.7. Eficiencia de deposición para varios procesos de soldadura y materiales de aporte (American Welding Society, 1987).	75
Tabla 2.8. Factor de operación para varios métodos de soldadura (American Welding Society, 1987).	75
Tabla 2.9. Resultados obtenidos de las mediciones de masa para el proceso SMAW tanto de las muestras de la maza del molino como del electrodo.	78
Tabla 2.10. Resultados obtenidos de las mediciones de masa de las muestras de las mazas del molino para el proceso FCAW.	80
Tabla 2.11. Valores obtenidos de velocidad lineal, masa por metro lineal de alambre, tiempo y cantidad de material de aporte de deposición para los recubrimientos aplicados con Electrodo A y D mediante proceso FCAW.	81
Tabla 2.12. Tiempo de arco y masa de recubrimiento depositado de los electrodos	83
Tabla 2.13. Indicadores de productividad obtenidos en el Ingenio El Ángel	85
Tabla 2.14. Evaluación de los costos de los consumibles.....	86
Tabla 2.15. Evaluación de los costos de la mano de obra	86
Tabla 2.16. Costo total por cada electrodo y método.....	87
Tabla 3.1. Composición química y dureza de la maza del molino	88
Tabla 3.2. Resumen del cálculo de los costos de soldadura para los recubrimientos duros	93

Tabla 3.3.	Composición química y dureza del Electrodo A depositado en una muestra de maza.....	95
Tabla 3.4.	Composición química del Electrodo B varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel	100
Tabla 3.5.	Composición química del Electrodo C varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel	103
Tabla 3.6.	Composición química del Electrodo D alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel	106
Tabla 3.7.	Resumen de los resultados obtenidos para cada electrodo.	109
Tabla 3.8.	Resumen de los resultados obtenidos para cada electrodo	109

SIMBOLOGÍA

SMAW: Soldadura de arco de metal protegido

FCAW: Soldadura con arco de núcleo fundente

M₇C₃: Tipo de carburo donde M puede representar varios elementos, en este caso cromo y hierro. C representa carbono.

Fe₃C: Tipo de carburo de hierro que recibe el nombre de cementita.

L: Líquido

γ: Austenita

α: Ferrita

δ: Hierro delta

HRC: Dureza Rockwell C

HRB: Dureza Rockwell B

HK: Dureza Knoop

CVF: Fracción volumétrica de carburos

t: tiempo

W: Peso

\$: Dólar americano

E.D: Eficiencia de deposición

F.O.: Factor de operación

V.D.: Velocidad de deposición

P.C.: Precio del consumible

C.L. Carga laboral

C.M.O.: Costo de la mano de obra

C.C.: Costo del consumible

C.T.: Costo total

F_N : Fuerza normal

F_{rad} : Fuerza radial

INTRODUCCIÓN

Las mazas de los molinos de caña de azúcar están expuestas a desgaste excesivo debido a las condiciones que se desarrollan en el área de molienda. La caña que se recibe en los ingenios está comúnmente acompañada de agentes abrasivos que se acarrean desde los campos cosechadores de caña, además de piedras y otra serie de cuerpos extraños evidenciados en la descarga de las rastras de transporte de caña, por lo que uno de los principales requerimientos del material de los molinos de caña de azúcar es que deben tener una buena resistencia al desgaste y los recubrimientos duros son un método relativamente económico para lograrlo.

Actualmente se emplean diferentes tipos de blindaje en las mazas, con diferentes configuraciones de electrodos desarrollados y usados especialmente para la industria. Además, recientemente se ha comenzado a innovar en la automatización de este proceso de blindaje de las mazas con robots soldadores diseñados particularmente para esta aplicación en el área de molienda.

La investigación de este proyecto se llevará a cabo en el Ingenio El Ángel, ubicado en el municipio de Apopa y pretende demostrar las ventajas de un proceso de aplicación con soldadura con arco de núcleo fundente (FCAW) frente a uno de soldadura con arco de metal protegido (SMAW), y además se desea analizar distintos materiales de aporte tanto en electrodo como en alambre.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. PROCESO Y MAQUINARIA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA DE CAÑA DE AZÚCAR

La materia prima con la que trabajan los ingenios es la caña de azúcar, de la cual se extrae el jugo a través del paso en los molinos cañeros. El proceso de preparación es una tarea ciertamente compleja, conlleva desde el recibimiento, la descarga y la adecuada preparación de la caña con el objetivo de obtener un índice de preparación conveniente para la posterior extracción del jugo de caña a través del paso por los molinos.

Es de especial importancia conocer los procesos de preparación y molienda de caña para comprender como es que ocurre el fenómeno de desgaste en las mazas de los molinos.

1.1.1. PROCESOS DE PREPARACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y MOLIENDA

En un ingenio azucarero, los procesos de preparación de la caña y molienda son todos aquellos que se realizan antes de la separación del jugo de caña y el bagazo dado que la preparación de la caña es de vital importancia para lograr una buena extracción en el proceso de molienda. En la Fig. 1.1 se muestra el esquema general del recorrido de la caña en el proceso de preparación y extracción.

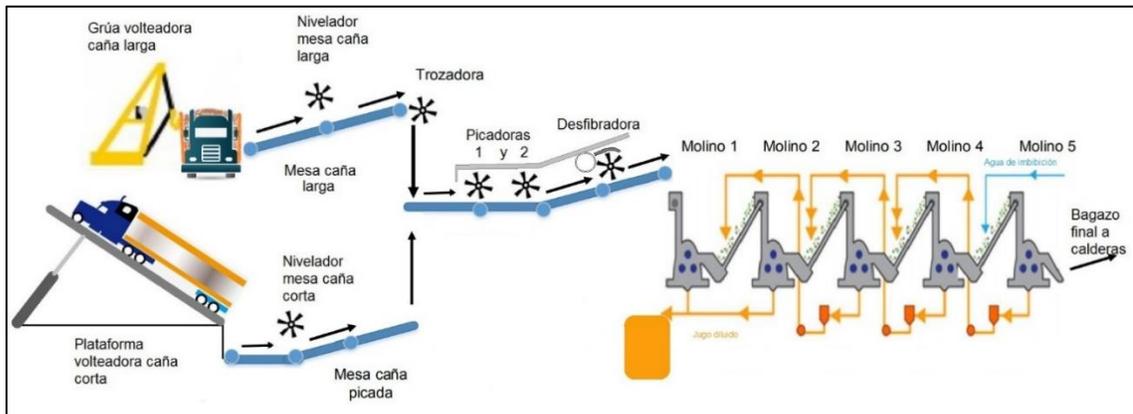


Fig. 1.1. Esquema general de recorrido de la caña en el proceso de preparación y extracción. Fuente propia.

Proceso de preparación de caña de azúcar

La preparación de la caña tiene el único objetivo de que sea apta para la extracción en los molinos. Existen diversos métodos aplicados en los ingenios alrededor del mundo para alcanzar este objetivo. A los ingenios llegan dos tipos de caña clasificadas de acuerdo a su tamaño como caña larga y caña corta.

Los sistemas de cosecha mecánicos pueden comprender cosechadoras de tallo entero o cosechadoras trozadoras. Las cosechadoras de tallo entero generalmente cortan los tallos por la base y arriba cerca del último entrenudo maduro, apilando la caña en el suelo para su posterior recolección con equipos cargadores. Las cosechadoras combinadas cortan la caña en trozos de 150 a 300 mm de longitud (caña corta) que son depositados directamente en los camiones de carga.

Generalmente en la preparación se emplean picadoras que se encuentran en el recorrido de la caña lo que permite reducir el tamaño de los tallos de la caña

que posteriormente se abrirá paso hacia una desfibradora con martillos basculantes.

El diagrama de proceso de preparación de la caña de azúcar desde la etapa de descarga hasta la extracción es como se muestra en la Fig. 1.2.

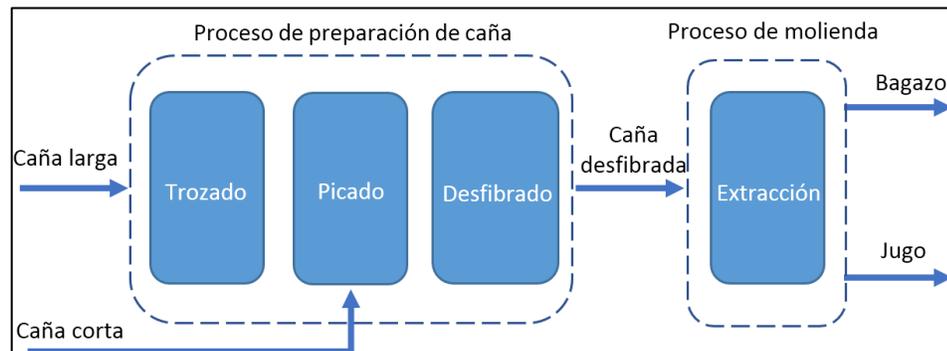


Fig. 1.2. Diagrama de proceso de preparación y molienda. Fuente propia.

Efecto de preparación de caña en el proceso de extracción

Según Rein (2012) los objetivos de preparar la caña son:

- Reducir el tamaño de las partículas de caña hasta un tamaño adecuado para su manipulación en el proceso de extracción.
- Romper tantas células portadoras de azúcar de la caña, como sea posible, para facilitar la extracción de azúcar.
- Producir un material que tenga las características apropiadas para la molienda o difusión.

El método más empleado alrededor del mundo para cuantificar la preparación de la caña es la medición del índice de preparación (PI), este método cuantifica el grado de rompimiento de celdas y se expresa en términos de porcentaje. A mayor índice de preparación se espera una extracción del tándem más alta. En la Fig. 1.3 se muestra el aspecto de la caña de azúcar al final del proceso de preparación cuando se usa una desfibradora.



Fig. 1.3. Aspecto de caña preparada antes de entrar a molinos (O'neal, 2017)

Proceso de molienda: Extracción

El objetivo de la molienda de caña es separar el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, constituido principalmente por fibra. El término extracción se utiliza para expresar el porcentaje de sacarosa que ha sido extraído de la caña en los molinos y es igual a la sacarosa en el jugo crudo o diluido, expresado como porcentaje de la sacarosa en caña.

La extracción del jugo de caña de azúcar es la operación del molino que tiene lugar después de la recepción y preparación de la caña, en la cual se extraen el agua y los azúcares contenidos en la caña. Una de las maneras de realizar esta operación comercialmente es por preparación de caña y compresión mecánica.

La Fig. 1.4 muestra cómo las unidades de molienda realizan la extracción en etapas de compresiones sucesivas y graduales. La combinación de una serie de molinos forma lo que llamamos "molino de tándem" o "tren de molienda".

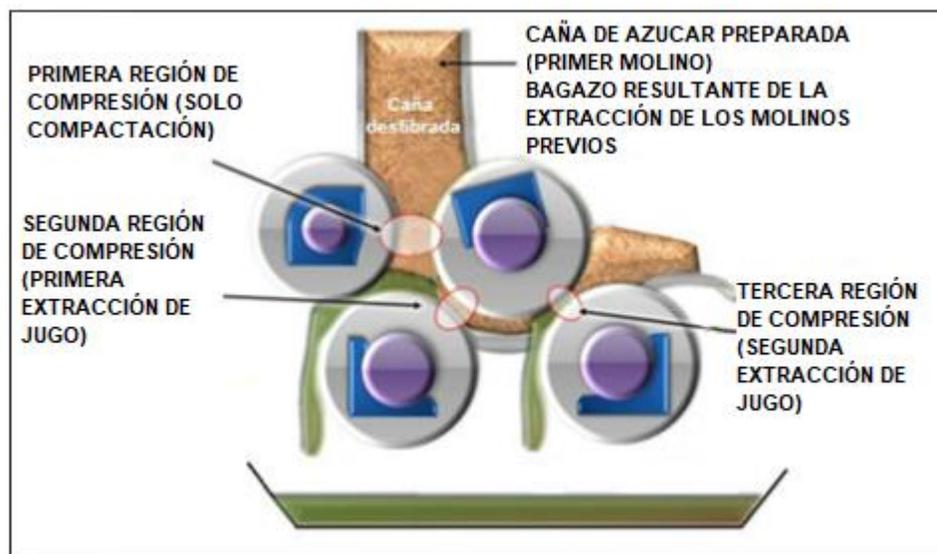


Fig. 1.4. Extracción del jugo por molinos (Oliverio, 2011)

En los molinos la caña es exprimida utilizando elevadas presiones entre pares de mazas o rodillos consecutivos. Estos están diseñados para extraer tanto jugo (agua disponible + sacarosa + no-azúcares) como sea posible de la fibra insoluble. El residuo de la caña después de que se ha extraído el jugo se denomina bagazo.

1.1.2. MAQUINARIA UTILIZADA EN PROCESOS DE PREPARACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y MOLIENDA

Picadoras de caña

Las picadoras son las encargadas de adecuar el tamaño de la caña para el desfibrado final, normalmente se utilizan dos picadoras de caña en serie y con holguras diferentes entre la punta de las cuchillas y los rodillos de los yunques.

En ingenios donde se utilizan solo picadoras para preparar la caña normalmente emplean dos picadoras, denominadas como primera y segunda picadoras, con una holgura de 200 mm para la primera picadora y 50 mm para la segunda, a velocidades periféricas de las cuchillas de 60 m/s comúnmente.

Las picadoras empleadas en el ingenio son de cuchillas basculantes, el uso de este tipo de picadora se justifica por el tipo de caña que se recibe, pues muchas veces la caña al ser descargada puede acarrear cuerpos extraños y duros como rocas. Si las cuchillas fueran rígidas correrían el peligro inminente de falla debido al impacto generado por este tipo de cuerpos duros.

Cabe mencionar que el dúo de picadoras empleado por sí solas no podrían entregar una caña con un índice de preparación alto como cuando se usa en conjunto con una desfibradora, el uso exclusivamente de picadoras proporciona un rango del índice de preparación de 65 a 79 por ciento.

Desfibradoras de caña

Las desfibradoras de caña constan de martillos basculantes montados a lo largo de un rotor que se instalan con el fin de dejar una holgura entre la punta del martillo y la placa desfibradora o yunque, ésta posee ranuras perpendiculares al movimiento rotacional de los martillos. El acercamiento de los martillos con el yunque desfibra los pedazos de caña previamente picados; de la holgura entre los martillos y la placa desfibradora depende que tan fina será la preparación de la caña, traducido así a un índice de preparación alto (mayor del 79%).

Hugot (1986) menciona que la desfibradora cumple un rol que ni las picadoras ni los molinos pueden realizar, estableciendo un estado de subdivisión que facilita enormemente el trabajo de los molinos.

Tanto los martillos como la placa desfibradora están expuestos a desgaste, debido al rozamiento y el impacto que se genera con materia extraña e indeseable en la caña que pasa a través de esta maquinaria. Todo este material desprendido de los martillos y la placa se suma al problema de desgaste que se sufre en el proceso de molienda, pues se trata de recubrimientos duros protectores que se convierten en materia abrasiva y desgasta a los dientes de las mazas.

Es de mucha importancia que la alimentación de la desfibradora sea estable para obtener resultados positivos en preparación además de que se anulan los picos de demanda de potencia debidos a un colchón de caña demasiado alto.

Actualmente en el ingenio se utiliza una Desfibradora COP 5 con una rotación de 630 rpm, este modelo de desfibradora prevé un índice de preparación de 80/85 %, el diseño de esta máquina se muestra en la Fig. 1.5

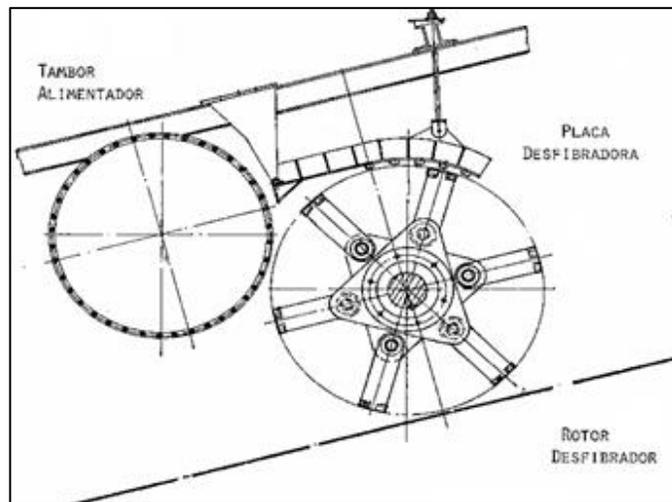


Fig. 1.5. Desfibrador COP 5 (Rein, 2012)

Molinos de caña

La Fig. 1.6 muestra el esquema de un molino convencional de tres mazas, entendiéndose por molino básico aquel donde la maza cañera y bagacera están sobre un mismo nivel, mientras que la maza superior es flotante.

Una cuarta maza es adicionada frecuentemente al molino básico de tres mazas. Esta puede ser:

- Una maza alimentadora ligera, frecuentemente adicionada a molinos existentes de tres mazas para redirigir la caña y asistir la alimentación cuando se instala una tolva Donnell.

- Una cuarta maza adicional de igual tamaño que las otras mazas, integral al molino original, diseñada para efectuar extracción y también alimentación.

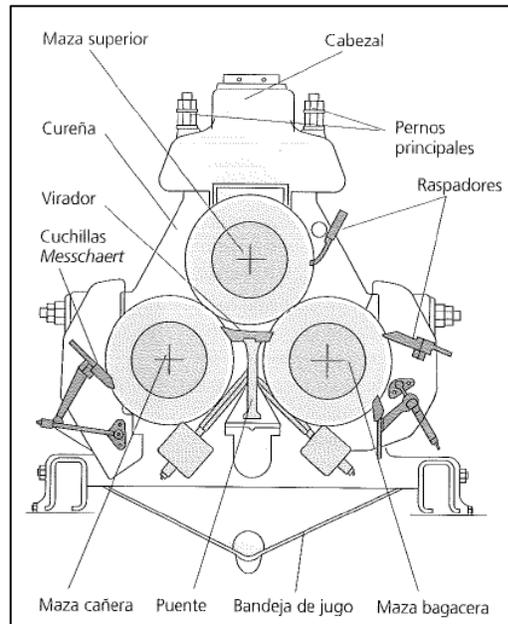


Fig. 1.6. Molino convencional de tres mazas (Rein, 2012)

Las mazas de los molinos son piezas que constan de un eje de acero sobre el cual está acoplado por contracción térmica un casco de hierro fundido, este casco posee numerosas ranuras en forma de "v", a las cuales comúnmente se les llama dientes o rayado de las mazas

Los primeros diseños de molinos tenían todas las mazas montadas sobre ejes fijos. Sin embargo, para ganar el beneficio de una presión constante, es necesario permitir que al menos una de las mazas "flote". Esta es usualmente la maza superior. Para lograr aplicar la carga necesaria sobre el molino se han utilizado resortes y pesas operando a través de palancas, pero actualmente el empleo de pistones hidráulicos es prácticamente universal.

La mayoría de molinos de tres y cuatro mazas tienen pistones hidráulicos montados sobre las cureñas que actúan verticalmente hacia abajo sobre los cojinetes de la maza superior. La presión en estos accionamientos hidráulicos se proporciona con aceite desde una bomba de alta presión. El sistema de aceite necesita absorber cambios de volumen a medida que los hidráulicos se mueven con la flotación de la maza superior. Para este propósito, generalmente se incorpora un acumulador hidráulico. Típicamente, los sistemas hidráulicos operan a presiones de 18 MPa hasta 30 MPa.

Para un determinado desempeño, la carga total requerida de los hidráulicos es proporcional a la proyección del área de la maza superior. La mayoría de molinos utilizan pistones hidráulicos que pueden aplicar una fuerza de 2.2 a 3.5 MN por m² de área proyectada por la maza superior.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MAZAS DE LOS MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR

Usualmente las mazas de los molinos son construidas como un eje de acero, sobre el cual se ajusta por contracción térmica un casco de hierro fundido. Las fallas de mazas de molinos son bastante comunes e invariablemente costosas no sólo por el reemplazo de la maza, sino por el tiempo perdido y frecuentemente por el daño secundario causado a chumaceras y cureñas.

La especificación preferida para cascos de maza acostumbraba a ser "hierro fundido de grano grueso", dado que éste brinda un acabado superficial

rugoso que favorece la alimentación. Sin embargo, con mayores cargas y esfuerzos y el desarrollo de técnicas para dar rugosidad a la superficie (como la soldadura por arco con electrodos de carbón y posteriormente los recubrimientos duros), en la actualidad se prefiere utilizar materiales con grano más fino de mejor resistencia a la tensión. El material debe estar libre de poros o grietas.

La falla de las mazas de molinos se puede minimizar tomando precauciones para evitar concentradores de esfuerzos, realizando un tratamiento de liberación de esfuerzos adecuado, así como pruebas magnéticas y ultrasónicas de los ejes para detectar defectos como poros o grietas. De estar disponible, es recomendable emplear una autoridad de inspección independiente que supervise la fabricación, reparación y reposición de cascos de las mazas.

1.2.1. DIENTES DE LAS MAZAS

En la Fig. 1.7 se muestra los dientes de una maza del Ingenio El Ángel. Existen varias razones para el uso de rayado o dientes en los molinos:

- El rayado ayuda a romper la caña. Esta es una función relativamente poco importante cuando la caña se ha preparado bien con desfibradoras antes de la molienda.
- Las mazas rayadas presentan una mayor área superficial de contacto con la caña y por lo tanto mejor tracción.
- La caña no alcanza a penetrar el fondo de la "V" del rayado, proporcionando por lo tanto un conducto de drenaje natural para el jugo exprimido.

- Las caras inclinadas de los dientes del rayado proporcionan una fuerza adicional de extracción sobre la caña sin incrementar la carga hidráulica (u otra) sobre las mazas, es decir sin incrementar los esfuerzos de flexión sobre la maza y su eje.



Fig. 1.7. Rayado típico de maza de molino de caña. Fotografía tomada de una maza maquinada del Ingenio El Ángel.

En la Fig. 1.8 los cabezotes hidráulicos del molino aplican una fuerza radial F_{rad} a través del eje sobre la maza superior. Si el ángulo de rayado es θ , esto permitirá a la superficie de la maza aplicar una fuerza de compresión normal al diente $F_N = F_{rad} \operatorname{cosec} (\theta/2)$. Por lo tanto, si $\theta = 45^\circ$, $F_N = 2.61 \cdot F_{rad}$ Esta fuerza adicional es aplicada por esfuerzos contenidos en su totalidad dentro del material de la maza (entre dientes consecutivos).

Las mayores desventajas del rayado de mazas son:

- Las raíces del rayado constituyen "concentradores de esfuerzo" que pueden llevar a fallas por fatiga del casco y del eje.

- Para una misma abertura de trabajo entre dos mazas, la holgura libre para el paso de cualquier objeto extraño sólido tal como un pedazo de hierro o roca se reduce, incrementando la probabilidad de daño de la maza.
- Facilidad de corrosión en la raíz del diente.

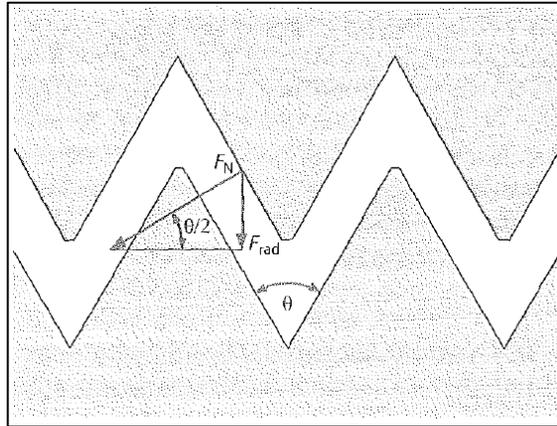


Fig. 1.8. Fuerzas ejercidas por la superficie de las mazas sobre el bagazo (Rein, 2012).

1.2.2. RUGOSIDAD EN LAS MAZAS

La rugosidad se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie. (Groover, 2007)

La rugosidad es una propiedad que tienen las superficies que se mide en base a las desviaciones verticales a partir de la superficie nominal en una longitud determinada de la superficie (Fig. 1.9).

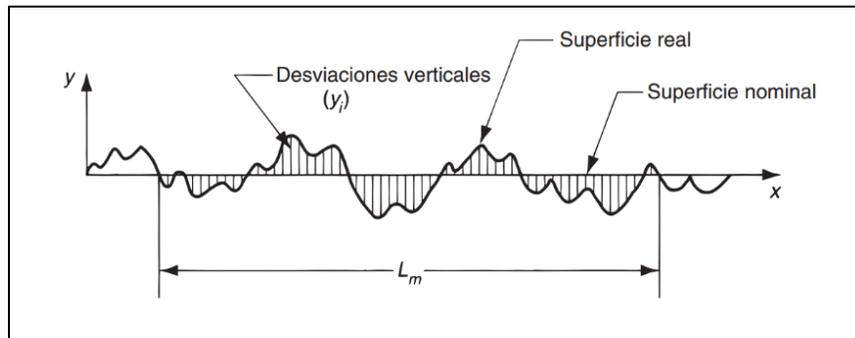


Fig. 1.9. Desviaciones de la superficie nominal según la definición de rugosidad (Groover, 2007).

Actualmente no se encuentran estudios que identifiquen un rango en concreto en el que podría variar la rugosidad adecuada en las mazas de caña para una molida estable, sin embargo, esta propiedad es mayormente medible cualitativamente mediante la experiencia que se tiene en el área de molienda.

La Fig. 1.10 muestra una maza reparada en el Ingenio El Ángel, en ella se puede notar la rugosidad presente en los laterales de los dientes de las mazas. Esta tecnología es llamada comúnmente con el nombre de chapisco, la cual es un recubrimiento por soldadura eléctrica que es el encargado de dar el agarre y evitar el deslizamiento de la caña con la superficie de la maza.

Para mantener una extracción eficiente en los molinos es necesario que éstos presenten una rugosidad adecuada en las superficies de los dientes de las mazas, con la finalidad de mejorar el agarre entre éstos y la caña desfibrada. El hecho de que los dientes se encuentren lisos se traduce en una extracción fallida con lo que se produce una molida baja y costosa en el ingenio. Como se mencionó anteriormente, una de las funciones de los recubrimientos duros es proporcionar rugosidad a las mazas de los molinos, sin embargo, debido al

desgaste, esta rugosidad se pierde durante el funcionamiento de los molinos durante zafra, por lo que es necesario aplicar soldadura durante este período para evitar que la extracción caiga. El descuido de la rugosidad de las mazas con su consecuente pérdida de extracción ya ha ocurrido anteriormente en el Ingenio El Ángel (Pérez Figueroa & Vásquez Zaldaña, 2018).



Fig. 1.10. Rugosidad típica deseada en los laterales de los dientes de las mazas. Fotografía tomada de una maza del Ingenio El Ángel.

1.3. MECANISMOS DE DESGASTE EN LAS MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA

El desgaste se puede definir como el deterioro no intencional resultante del empleo o del ambiente; puede considerarse esencialmente como un fenómeno de superficie. El desgaste es una de las influencias más destructivas a que están expuestas los metales y/o materiales que de alguna u otra forma interactúan entre ellos.

El desplazamiento y la separación de las partículas metálicas de una superficie mecánica puede producirse por contacto con: a) otro metal (desgaste adhesivo metálico), b) un abrasivo metálico o uno no metálico (abrasión), o c) líquidos o gases en movimiento (erosión). La erosión se acompaña generalmente por alguna forma de corrosión. Los tipos de desgaste mencionados pueden subdividirse en desgaste por fricción rodante o por fricción deslizante y, además, de acuerdo con si puede utilizarse o no la lubricación (Avner S. H., 1988)

1.3.1. DESGASTE ADHESIVO

El desgaste adhesivo se conoce también como rayado, erosión, prendimiento y ludimiento de las superficies, pequeñísimas salientes producen fricción por interferencia mecánica, con movimiento relativo de las superficies en contacto que incrementan la resistencia para movimiento ulterior (Avner S. H., 1988). El mecanismo de desgaste adhesivo está presente en los molinos, ocurre en el movimiento relativo entre el virador o cuchilla central y los dientes de la maza cañera. El virador tiene por objetivo limpiar el bagazo de los fondos de los dientes de la maza cañera (ver Fig. 1.11) por lo que la distancia entre estas dos superficies es necesariamente pequeña, por lo tanto, este ajuste es diseñado especialmente en el “setting” de operación de molino, pues la chuchilla no debe de tener contacto alguno a la maza, para evitar el rozamiento entre las superficies puesto que esto desgasta tanto al virador como a la periferia de los dientes de las mazas.

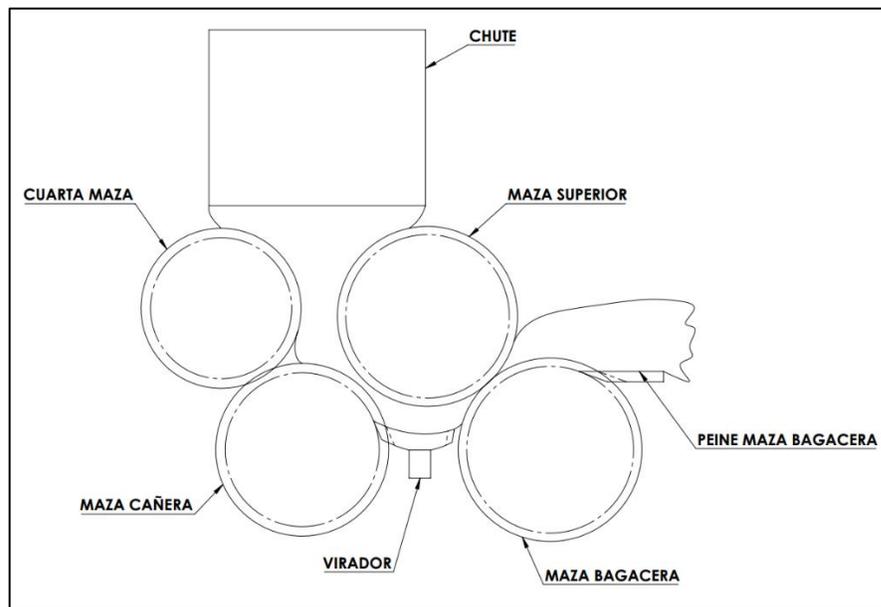


Fig. 1.11. Corte transversal de un molino de caña. Fuente propia.

Este desgaste no solo se presenta entre la cuchilla central y la maza cañera, en el Ingenio El Ángel también se utiliza una cuchilla para la limpieza de la maza bagacera, a esta pieza se le conoce como “peine” y así como la cuchilla central se ajusta de forma en que no ocurra contacto entre el peine y las mazas. Además, frecuentemente ocurre contacto entre las mazas, debido a que la maza superior flota a una presión específica en el cabezote del molino y, en tramos en que la molienda tenga una baja de alimentación, ésta puede llegar a tener contacto con la maza bagacera y también con la cañera. Como resultado de este contacto hay desprendimiento de las superficies de ambas mazas por el impacto generado entre la fricción de las superficies.

El principio para mejorar la resistencia al desgaste adhesivo es evitar el contacto entre ambas superficies e incrementar la dureza para resistir el mellado inicial. También se busca mejorar la tenacidad para resistir impactos que produzcan la separación violenta de partículas.

1.3.2. DESGASTE POR ABRASIÓN

Casanova y Aguilar (2008) utilizando una máquina modificada de la norma ASTM G65, 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 a la abrasión.

El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas duras se deslizan o ruedan bajo presión a través de una superficie, o cuando una superficie dura se frota a través de otra. Las partículas desgastadas por rozamiento del objeto más duro tienden a rasguñar o acanalar al material más suave. Estas partículas duras también pueden penetrar al metal más suave y producir la violenta separación de las partículas metálicas (Avner S. H., 1988). El desgaste hace que la superficie de la maza pierda su rugosidad y que así, disminuya el agarre del bagazo con respecto a los dientes.

En los molinos de caña de azúcar el desgaste abrasivo ocurre cuando partículas de piedra, arena, tierra y otros materiales no metálicos como el bagazo están en constante fricción, se deslizan o ruedan bajo presión a través de una superficie, se caracteriza por la presencia de superficies rayadas y pulidas (Aroca Delhi, 2010).

La facilidad con que el metal deformado puede arrancarse violentamente depende de la tenacidad; por tanto, la dureza y la tenacidad determinan el desgaste abrasivo. De estos dos factores la dureza es probablemente el más importante.

La deposición de recubrimientos mediante soldadura o técnicas de pulverización térmica se emplea frecuentemente (ya sea durante el mantenimiento o en la fabricación de nuevos componentes) en una amplia gama de industrias para mejorar la resistencia al desgaste de las superficies en contacto. En la industria azucarera, el revestimiento duro se lleva a cabo en rodillos de molino de fundición gris para reducir el desgaste, para permitir el uso de mayores cargas de extracción y para ayudar al movimiento de la caña triturada a través de los rodillos (Buchanan, Shipway, & McCartney, 2017)

1.3.3. DESGASTE POR CORROSIÓN

La corrosión es esencialmente un proceso electroquímico que origina parte o el total del metal que está transformándose del estado metálico al iónico. La corrosión requiere un flujo de electricidad entre ciertas áreas de la superficie de un metal a través de un electrólito, el cual es cualquier solución que contiene iones (átomos o grupos de átomos eléctricamente cargados) como el agua pura, agua salada, soluciones ácidas o soluciones alcalinas de cualquier concentración (Avner S. H., 1988).

La principal causa de la corrosión es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas (Avner S. H., 1988), desde el punto de vista termodinámico, significa que los metales están en un estado de energía alto por lo que son inestables respecto a la mayoría de los ambientes y debido a ello, tienen una tendencia natural para regresar a su bajo estado energético a través de procesos de corrosión, es decir, óxidos, tal como se encuentran originalmente en la naturaleza.

El jugo de caña posee un alto índice de acidez y alta conductividad eléctrica, y al entrar en contacto con el metal influye de manera negativa sobre él, presentando problemas de corrosión en sus diferentes manifestaciones. (Benavides Segura, 2011).

1.3.4. PÉRDIDA DE RUGOSIDAD DE LAS MAZAS DEBIDA AL DESGASTE

Para mantener la rugosidad en los dientes de las mazas actualmente se emplean métodos de recubrimiento por soldadura, éstos se aplican en los perfiles de los dientes y en las crestas, con el objetivo de proteger a las mazas contra el desgaste. Estos recubrimientos son el chapisco y el picote, que proporciona la rugosidad y el agarre necesario entre los dientes y la caña, dado en los laterales y en las crestas respectivamente.

En el Ingenio El Ángel actualmente recargan a las mazas con recubrimientos duros por medio de soldadura por arco eléctrico, con materiales de aporte especiales desarrollados para la aplicación en la industria. Estos recubrimientos duros presentan buena resistencia al desgaste y al ambiente corrosivo producido por el jugo de caña, además tienden a desgastarse progresivamente por el paso de la caña desfibrada y de materiales abrasivos en ella, que según estudios realizados por Castro, García, Prado, Guerrero y Restrepo (2011), presenta alto contenido de sílice, el cual es el principal agente abrasivo presente en la extracción.

La Sílice (SiO_2) en varias de sus formas posee estructura cristalina cerámica parte covalente y parte iónica. El cuarzo SiO_2 es el principal

constituyente de las arenas de sílice y tiene una dureza de 7 en escala de Mohs (41 ~ 100 en escala HRC aproximadamente) de lo que se puede concluir que es un agente abrasivo por su alta dureza.

La sílice es el principal componente de la corteza terrestre y, además, es esencial para la planta de caña de azúcar, por lo que su presencia en el jugo es algo inherente. Según Sakhawy y Hassan (2007) el desgaste producido por la caña se explica por el contenido de sílice, que es el componente interno de la caña.

Los autores Castro et al. (2011) concluyeron en su estudio que el contenido de sílice en el bagazo es el factor más importante en el desgaste en un sistema tribológico acero-bagazo-sílice-jugo. El bagazo, por sí solo, se limita a desprender partículas que con anterioridad se habían deformado plásticamente. La contribución del jugo al desgaste es significativa para todas las concentraciones de contenido de sílice. Además, rastros de corrosión se encontraron sobre todas las superficies ensayadas por los autores en presencia de jugo, lo cual indica la presencia de sinergia entre abrasión y corrosión. El principal mecanismo de desgaste encontrado en las pruebas realizadas en las superficies de desgaste fue microcorte y microdeformación plástica.

En cuanto Hugot (1986) menciona causas de desgaste en las mazas en general, las cuales son:

- a. Corrosión de las mazas por el jugo de caña ácido
- b. Contacto deslizante de raspadores y el virador

c. Fricción del bagazo y materia extraña mineral contra la superficie del rodillo

La materia extraña mineral produce desgaste porque está constituida en su mayoría por materiales duros como sílice. Es el caso de la materia proveniente del campo o partículas metálicas que se desprenden de máquinas ubicadas en etapas previas en el proceso, como máquinas de preparación (picadoras y desfibradoras descritas en el capítulo anterior) y de igual manera de partículas desprendidas en los molinos. La materia extraña proveniente del campo depende del estado del clima y del tipo de cosecha utilizada, siendo mayor en épocas lluviosas y con cosechas mecánicas. (Castro et al., 2011).

Además, el desgaste adhesivo tiene lugar en el movimiento relativo entre las mazas, por el contacto que se da debido a las bajas de alimentación repentina de la caña, ya que a la maza superior se le aplica una presión constante ejercida por el cabezote del molino y tiene cierta libertad de movimiento, puede ocurrir contacto con la maza bagacera y la cañera, ocasionando desprendimiento de los recubrimientos de las mazas, dientes quebrados y en ocasiones fallas mayores que podrían dejar inutilizable a una maza. También ocurre desgaste adhesivo entre el virador y la maza cañera que al entrar en contacto las superficies de éstas frecuentemente tienden a romperse, dando lugar a dientes quebrados en las mazas; este tipo de desgaste también es evidente entre el peine raspador y la maza bagacera.

1.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS APLICADOS EN LAS MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA

Las fundiciones blancas de alto cromo (Aleaciones metal-tierra) depositadas por soldadura son el recubrimiento duro más utilizado para combatir el desgaste en mazas de molinos de caña de azúcar. Para la fundición blanca aleada con cromo se pueden presentar carburos del tipo M_3C , M_7C_3 y $M_{23}C_{26}$, donde M representa varios elementos, en este caso Fe y Cr. Los carburos que por lo general se encuentran en los recubrimientos duros de maza de molinos azucareros y en muchas otras aplicaciones de recubrimiento duro por soldadura son los del tipo M_7C_3 . (Aroca Delhi, 2010)

De acuerdo con (Apraiz, 1963) las fundiciones con alto porcentaje de cromo se pueden clasificar en dos familias:

- Fundiciones con 6 a 25% de cromo, que son fundiciones blancas con muy elevada dureza: 400 a 550 Brinell
- Fundiciones de 33% de cromo, que son de estructura ferrítica.

Las primeras son de gran resistencia al desgaste y buena resistencia al calor, y las segundas tienen muy buena resistencia a la oxidación a temperaturas muy elevadas.

El mismo autor señala la microestructura y características que se obtienen con distintas cantidades de cromo en el hierro fundido:

- El cromo con porcentajes de 0.10 a 0.20% afina la perlita y el grafito de las fundiciones ordinarias.
- Con 1% de cromo se provoca ya la aparición de carburos de gran dureza, que, además son muy estables a altas temperaturas.
- Con 2% de cromo desaparece el grafito. La fundición gris entonces se convierte en blanca y la proporción de carburos de cromo aumenta.
- Con 6% la matriz es perlítica y la cantidad de carburos que aparecen en la microestructura es ya muy importante.
- A partir de 12% de cromo, los carburos se afinan y se disponen en red apareciendo austenita en la microestructura.
- Cuando se llega a 30% de cromo, se observa que la matriz es ya ferrítica y que en ellas hay pequeñas cantidades del eutéctico ferrita - carburo de cromo. Estas fundiciones no tienen ya puntos de transformación en el calentamiento y en su estructura aparecen carburos de cromo finos incrustados en la matriz.

1.5. PROCESOS DE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DUROS EN MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA

Como se mencionó anteriormente, las mazas de los molinos son construidas usualmente con un eje de acero sobre el cual se ajusta por contracción térmica un casco de hierro fundido, por tanto, es este casco de hierro fundido el que ejecuta la acción de molienda.

Cuando una pieza de hierro fundido requiere una superficie inusualmente dura y resistente al desgaste, como es el caso en las mazas de molinos en los

ingenios azucareros, y cuando no es práctico producir una superficie dura en el proceso de fundición o por tratamiento térmico selectivo, se puede usar un recubrimiento duro. Con frecuencia, los recubrimientos duros se utilizan para reparar piezas fundidas desgastadas mediante la construcción de una cubierta de material nuevo (American Society for Metals Surface Engineering Vol. 5, 1994).

Algunas de las ventajas de los recubrimientos duros son (Falcón Ortega, 2002):

- Se pueden usar metales más baratos y más suaves como metal base y aplicarles una superficie dura.
- Debido a las cualidades de mayor resistencia al desgaste del material para recubrimiento, las piezas de un equipo durarán más.
- Se pueden restaurar muchas piezas de equipos sin necesidad de desmontarlas.

El recubrimiento duro es básicamente una operación de soldadura en la que una aleación se fusiona al metal base mediante soldadura oxiacetilénica, soldadura por arco, soldadura láser o procesos de pulverización térmica. Los materiales de revestimiento duro incluyen una amplia variedad de aleaciones, carburos y combinaciones de estos materiales (American Society for Metals Surface Engineering Vol. 5, 1994).

Dependiendo del proceso de aplicación del recubrimiento duro, las aleaciones generalmente están disponibles como varilla sin recubrimiento, varilla recubierta con fundente, alambres sólidos de longitud larga, alambres de tubo de

longitud larga (con y sin fundente) o polvos (American Society for Metals Surface Engineering Vol. 5, 1994).

1.5.1. EL HIERRO FUNDIDO

Es necesario hablar sobre el hierro fundido y su soldabilidad, dado que en la actualidad es el material del que generalmente están fabricadas las mazas de los molinos de caña. Los materiales utilizados para elaborar las mazas de los molinos requieren cumplir con ciertas propiedades que benefician el correcto funcionamiento de dichas piezas a lo largo del tiempo de zafra. Las principales propiedades por cumplir son:

- Buena tenacidad
- Muy buena maquinabilidad
- Buena soldabilidad
- Resistencia a la tracción y la dureza

Los hierros fundidos son aleaciones de hierro, carbono y silicio, y que también contienen presencia de ciertos elementos como fósforo, azufre, manganeso, etc. Su contenido de carbono normalmente es mayor al 2%, comprendido entre 2.5 a 4.5%. Estos materiales se caracterizan por la facilidad de adquirir su forma por colada.

El hierro fundido gris es el más empleado para la fabricación de las mazas de molinos cañeros, debido a sus buenas propiedades contra el desgaste y porque el reemplazo de una maza es menos costosa comparada con una de acero, además es un material fácil de producir por colada bajo la norma ASTM

A48, la cual se clasifican en siete clases (20, 25, 30, 35, 40, 50 y 60). Esta diferenciación numérica de las clases indica la mínima resistencia a la tracción en miles de libras por pulgada cuadrada. En el caso de las mazas de los molinos es posible emplear fundiciones grises clase 30, 35 y 40. La razón de no utilizar clases mayores como la clase 50 y 60 es que el núcleo de estas fundiciones es considerablemente menos tenaz que el de las clases mencionadas anteriormente.

Recientemente se está comenzando a emplear el uso de mazas de fundición nodular para las mazas de molinos, este tipo de fundición se utiliza para la fabricación de mazas perforadas, que permiten aumentar la extracción de sacarosa reduciendo notablemente la humedad en el bagazo. El hierro dúctil resultó la alternativa apropiada para resolver los problemas de fragilidad dado por el diseño de las mazas perforadas, ya que presenta mejores propiedades físicas y mecánicas que el hierro laminar gris; la forma esferoidal de los carburos presentes favorece a que la fundición gris conserve una matriz (ferrítica o perlítica) con mayor continuidad que con una matriz laminar, además este tipo de fundición tiene mejor penetración de soldadura en comparación de la fundición laminar gris. Cabe destacar que las mazas de fundición nodular son más costosas de fabricar en términos económicos.

Las mazas de los molinos que trabajan en el Ingenio El Ángel son fabricadas de hierro fundido gris y son muy populares en la industria debido a su facilidad de fusión y vertido, maquinado y costo relativamente bajo comparado con otros materiales. Son capaces de soportar fuertes cargas de compresión y presentan una soldabilidad aceptable. El hierro fundido gris presenta baja dureza,

el desgaste en estos elementos es considerable y sobre todo en dependencia del tipo de caña y suelo. Con el objetivo de mejorar su trabajo y prolongar la vida útil se utilizan aleaciones diseñadas para resistir el desgaste fundamentalmente por abrasión y corrosión

1.5.2. MÉTODOS PARA LA SOLDADURA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS

En la soldadura del hierro fundido gris los procedimientos más usuales son:

- Soldadura oxiacetilénica
- Soldadura al arco eléctrico con precalentamiento
- Soldadura al arco eléctrico sin precalentamiento

En el caso de las mazas de los molinos del Ingenio El Ángel, se utiliza soldadura de arco eléctrico sin precalentamiento y, para dicho procedimiento deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Utilizar electrodos de poco diámetro y corriente lo más baja posible, pero suficiente para producir una buena fusión.
- Hacer soldaduras cortas de no más de 50 a 75 mm de longitud.
- Es aconsejable el depósito de cordones delgados, en lugar de cordones anchos y oscilados.

Estas recomendaciones se deben a que el hierro fundido es frágil y no se puede doblar o estirar como el acero y consecuentemente si se produce un sobrecalentamiento durante la soldadura, las contracciones durante el enfriamiento pueden causar grietas en la soldadura misma o en las zonas térmicamente afectadas entre ésta y el metal base.

1.5.3. CLASIFICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DUROS PROTECTORES.

Según la American Society for Metals Surface Engineering Vol. 5 (1994), los materiales para revestimiento duro se dividen en 6 categorías, las cuales son:

- Aleaciones de reconstrucción: los cuales no están diseñados para resistir el desgaste, sino para devolver una parte desgastada a sus dimensiones originales o cerca de ellas, y para proporcionar un soporte adecuado para capas subsiguientes de material verdadero de recubrimiento duro. Sin embargo, estas aleaciones son usadas algunas veces como materiales resistentes al desgaste bajo condiciones de desgaste moderados.
- Aleaciones de desgaste metal a metal: son aceros martensíticos de endurecimiento por aire que se pueden aplicar con varias capas de espesor y se pueden mecanizar con acabado (aunque con alguna dificultad) si se utiliza el equipo adecuado. Son recomendados para el desgaste, la industria, el servicio pesado y las partes no lubricadas.
- Aleaciones de abrasión metal a tierra: Estas aleaciones, al igual que las categorías de carburos y de aleaciones no ferrosas, consisten en partículas duras en una matriz metálica, que, por mucho, es el componente duro que proporciona resistencia al desgaste. La función principal de las aleaciones de abrasión metal a tierra y los carburos de

tungsteno es la resistencia a la abrasión. Las aleaciones de abrasión metal a tierra son hierros blancos con alto contenido de cromo en el que se forman carburos de cromo durante la solidificación de la aleación.

- Carburos de tungsteno: Su principal función es proveer resistencia a la abrasión, Los carburos de tungsteno son en realidad materiales compuestos, y su uso implica la transferencia de partículas discretas de carburo de tungsteno (que en las formas de los consumibles de soldadura están encerradas en un tubo de acero) a través del arco de soldadura y en el baño de soldadura fundida, donde posteriormente se "congelan" en la estructura de recubrimiento mediante la matriz formada por la fusión del tubo de acero.
- Aleaciones no ferrosas: Los recubrimientos de aleaciones no ferrosas son utilizados en entornos que son demasiado agresivos para las aleaciones de revestimiento duro ferroso o donde se requiere una alta resistencia a un tipo específico de desgaste (que no sea la abrasión).
- Aceros inoxidables: Son utilizados donde se requiere resistencia a la corrosión. Las capas de soldadura de aceros inoxidables incluyen aceros inoxidables austeníticos con cobalto y libres de cobalto.

1.5.4. BLINDAJE DE MAZAS

La tecnología de blindaje de las mazas tiene un doble objetivo:

- Proteger la maza contra el desgaste.
- Mejorar el agarre de la caña en la alimentación del molino.

La aplicación de esta tecnología llega a sustituir la aspereza transversal utilizada anteriormente en la industria. La especificación preferida para cascos de maza acostumbraba a ser “hierro fundido de grano grueso”, dado que este brinda un acabado superficial rugoso que favorece la alimentación (Rein, 2012).

Los recubrimientos garantizan un sistema de mantenimiento preventivo a las mazas de molinos, utilizando la soldadura con revestimientos duros protectores se evita el desgaste de éstas, existiendo dos tipos de recubrimiento duro empleados en los cascos de fundición de las mazas conocidos como chapisco y picote (Fig. 1.12).

Chapisco

Este proporciona la rugosidad y por lo tanto el agarre deseado en las superficies laterales de los dientes, es el que transfiere la alimentación continua de la caña en el molino. El chapisco también evita el desgaste de los flancos de los dientes pues el material aplicado es un material de aporte resistente al desgaste con una alta dureza del depósito

Picote o cresta

Este blindaje o recubrimiento prolonga la vida útil de la parte superior del diente, este mantiene tanto el perfil del diente como el diámetro de la maza lo

más cerca de sus medidas originales, este al igual que el chapisco utiliza un material de aporte con buena resistencia al desgaste y por lo tanto un material duro, con frecuencia se utiliza el mismo material que el empleado para el chapisco en los laterales.

El picote está expuesto a posibles impactos que podrían dar a lugar debido al contacto con el virador, peines y con los fondos de dientes de otras mazas, por lo tanto, este debe de ser aplicado sobre una base no tan dura, que absorba el impacto producido por las contrariedades que se mencionaron anteriormente.

1.5.5. APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DUROS EN LAS MAZAS

Actualmente la aplicación de recubrimientos duros protectores en las mazas de los molinos se hacen de manera manual y automática, la tecnología de los robot soldadores busca una mejor adherencia del cordón, con mejoras en tiempos y en la calidad de la soldadura, lo que debería de traducirse en menos costos en mantenimiento y consecuentemente una mejora en la extracción del tándem de molinos, por lo tanto es una alternativa atractiva a implementar en la industria azucarera en especial en el área de molinos.

1.5.6. PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL BLINDAJE

Las mazas están sometidas a desgaste por abrasión con alto esfuerzo; para mantener una rugosidad suficiente que asegure una efectiva alimentación de caña y una efectiva extracción se requiere un recubrimiento protector con soldadura denominado Blindaje, el cual tiene 2 objetivos:

- Protege y prolonga la vida útil de la parte superior del diente de la maza, manteniendo el perfil del diente, como también el diámetro de la maza; gracias a las características sobresalientes de las aleaciones de soldadura contra el desgaste.
- Transfiere alimentación y agarre, como también evita el desgaste de los flancos de los dientes, con un material de aporte que se sacrifica.

En la Fig 1.12 se muestra una figura del blindaje del diente de una maza cañera y el nombre dado a cada parte del blindaje. Tanto el picote como el chapisco se hacen de recubrimiento duro ya que son las partes expuestas a desgaste abrasivo, y ayudan a mejorar la alimentación de los molinos, los laterales deben tener cierta rugosidad para cumplir con esta función. La sobre base y los laterales se hacen por lo general con un material que brinde protección contra la corrosión de las mazas, y la base debe ser de un material más suave que ayude a absorber los impactos causados por rocas o cualquier otro material duro que pase por los molinos junto con la caña.

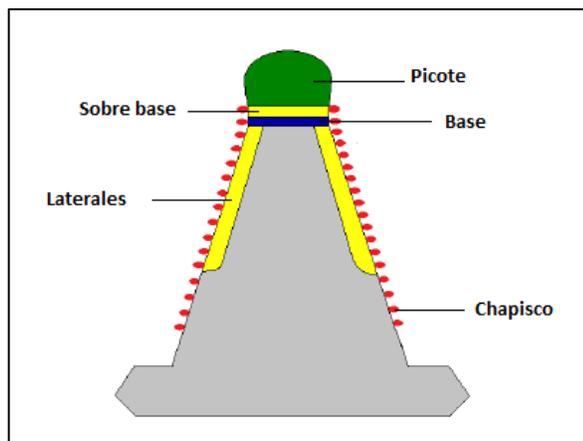


Fig. 1.12. Esquema del blindaje del diente de un molino (Eutectic Castolin, 2013).

Existen ingenios (el Ingenio El Ángel incluido) que utilizan un blindaje básico (Fig. 1.13) en el que todo el blindaje se usa el mismo material, el cual es un material duro que le brinda resistencia contra el desgaste.

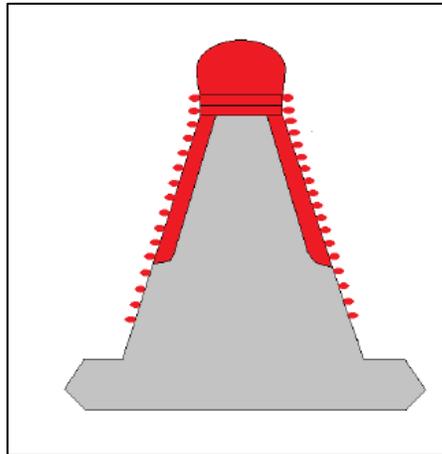


Fig. 1.13. Blindaje básico (Eutectic Castolin, 2013).

A continuación, se explica el procedimiento para el blindaje de mazas:

- Maquinado: Primero debe maquinarse la forma de los dientes hasta las dimensiones especificadas por el ingenio. En el caso de que la maza haya sido utilizada anteriormente en una zafra, primero debe removerse la soldadura remanente y, si es necesario, deben calzarse los dientes que hayan sido quebrados.
- Pre calentamiento: Se utilizan calentadores de gas propano, y se calienta en un rango de entre los 150 y 200 °C.
- Aplicación del blindaje: Por lo general primero se hace la base, luego los laterales, la sobre-base, el picote y por último el chapisco.

- Rectificado: Esto nos permite ajustes más cerrados que nos ayuda a aumentar la extracción sobre todo en los últimos molinos.

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BASE Y RECUBRIMIENTOS DUROS.

Como se mencionó en la sección 1.5.1, las mazas de los molinos de caña de azúcar están fabricadas generalmente de hierro fundido gris, pero estas presentan el inconveniente de que su dureza y resistencia al desgaste son relativamente bajas, por lo que es necesario el uso de recubrimientos duros protectores en los dientes de las mazas, además, en la sección 1.4 se mencionó que las fundiciones blancas con alto contenido de cromo depositadas por soldadura son el recubrimiento duro más utilizado para combatir el desgaste en mazas de molinos de caña de azúcar, por lo cual se analizarán 4 recubrimientos con esa característica.

Se sometieron a prueba cuatro tipos de recubrimientos duros, los cuales se identifican por las letras A, B, C y D. El recubrimiento A es un electrodo en alambre del cual no se brinda ninguna información por parte del fabricante sobre su clasificación, sin embargo, según la tabla de equivalencias de electrodos presentada por STOODY (2018) este electrodo tendría una clasificación DIN 8555: MF 10-GF-60-G. El recubrimiento B es un electrodo en varilla aleado altamente con cromo, del cual no se tuvo acceso a la información sobre su clasificación. El recubrimiento C es un electrodo en varilla que según su fabricante tiene una clasificación DIN 8555: E 10 UM-60-G. El recubrimiento D es un electrodo en alambre de aleación cromo/vanadio que según información de su fabricante no está estandarizado.

El material base se trata de una fundición gris, típicamente fabricada bajo la norma ASTM A48 en clase 30, 35 o 40, no obstante, la maza de la cual se extrajo la muestra no se tenía identificada bajo ninguna de estas clasificaciones y se trataba de un material no estandarizado. La maza sometida a análisis se encontraba fuera de operación. Todos los recubrimientos fueron depositados sobre muestras de esta misma maza

Para conocer la composición química de las muestras, tanto del material base como de los recubrimientos, se emplearon ensayos de espectrometría de emisión óptica por chispa, del cual el procedimiento y resultados obtenidos se detallan en las secciones 2.1.2 y 2.1.3 respectivamente. A su vez, para identificar la microestructura de cada una de las muestras se desarrollaron distintos ensayos metalográficos en muestras previamente preparadas para su observación en un microscopio metalúrgico.

Finalmente se determinó la dureza de cada una de las muestras, tanto de los recubrimientos duros como del material extraído de la maza de molino de caña, estos ensayos se produjeron bajo una prueba regular de dureza Rockwell.

2.1.1. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la obtención de las muestras que se sometieron a estudio se cortaron con un disco de corte 5 fragmentos de los dientes de una maza de molino (Fig. 2.1). Uno de los fragmentos se ocupó para el estudio de la maza y sobre los cuatro restantes se aplicaron los recubrimientos duros para su posterior estudio.

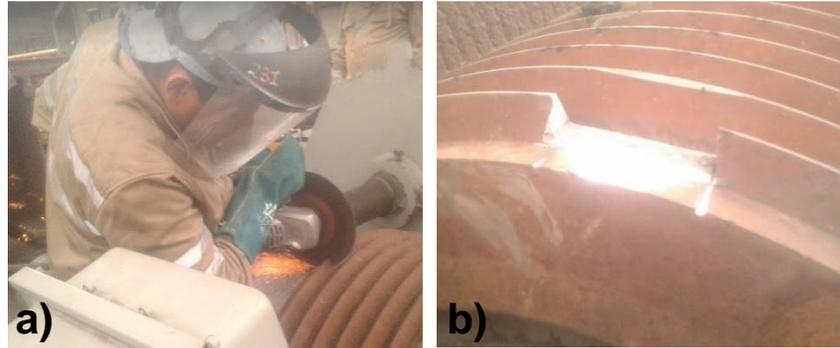


Fig. 2.1. a) Proceso de corte de un diente de la maza de un molino con un disco de corte, b) Diente cortado

Los recubrimientos fueron depositados sobre la muestra de los dientes por los operarios de soldadura del Ingenio El Ángel, los cuales configuraron el valor de corriente o voltaje para cada electrodo (dependiendo del proceso) que les permitiera obtener una superficie con rugosidad similar a la que producen en la maza de los molinos ya recubiertos. Es importante mencionar que ninguno de los soldadores del Ingenio El Ángel se encuentra certificado, sin embargo, se les imparten cursos técnicos de soldadura para que puedan adquirir habilidades, conocimientos y técnicas que los hagan poseedores de las competencias necesarias para desempeñarse en su puesto de trabajo.

Para el proceso SMAW se configura la corriente deseada en la máquina soldadora, para el caso de los Electrodo B y C que se aplican mediante este proceso se configuró una corriente de 270 A. Para el proceso FCAW se configura un voltaje de 23V para los electrodos A y D. En el electrodo A, la corriente fluctuaba entre 220 y 300 A, mientras que en el electrodo D, lo hacía entre 160 y 400 A.

2.1.2. ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA

Las técnicas más utilizadas para la determinación de concentraciones de elementos en la muestra se basan en la espectrometría atómica. Como el nombre de espectrometría atómica implica, estas técnicas involucran radiación electromagnética (luz) que es absorbida por y / o emitida por los átomos de una muestra. Al utilizar técnicas de espectrometría atómica, se puede obtener información cuantitativa y cualitativa significativa sobre una muestra. En general, la información cuantitativa (concentración) se relaciona con la cantidad de radiación electromagnética que se emite o absorbe, mientras que la información cualitativa (qué elementos están presentes) se relaciona con las longitudes de onda a las que se absorben o emiten la radiación.

En las técnicas de espectrometría atómica se agrega energía a los átomos como resultado de la absorción de radiación electromagnética o de una colisión con otra partícula (electrón, átomo, ion o molécula) hasta lograr la excitación del átomo. Cuando un átomo se excita, un electrón de ese átomo se promueve desde su orbital en estado fundamental a un orbital más alejado del núcleo y con un nivel de energía más alto. Un átomo es menos estable en su estado excitado y, por lo tanto, regresará a un estado menos excitado al perder energía a través de una colisión con otra partícula o por la emisión de una "partícula" de radiación electromagnética, conocida como fotón. Como resultado de esta pérdida de energía, el electrón regresa a un orbital más cercano al núcleo (Fig. 2.2).

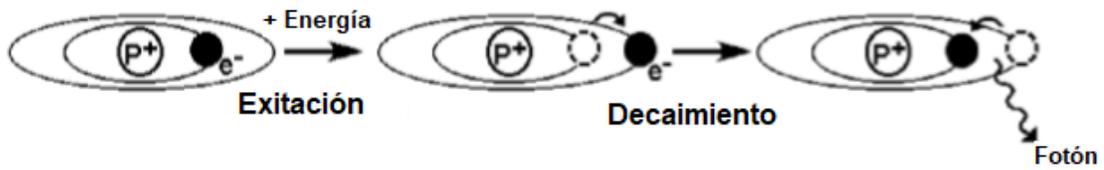


Fig. 2.2. Ilustración esquemática de la emisión de un fotón debido a la excitación de un átomo, (Charles Boss, 1997)

En la espectrometría de emisión óptica (OES por sus siglas en ingles), la muestra se somete a temperaturas lo suficientemente altas (por medio de llama, plasma, arco o chispa) como para que se produzcan importantes cantidades de excitación de los átomos de la muestra. Una vez que los átomos están en sus estados excitados, pueden decaer a estados más bajos a través de transiciones de energía térmica o radiactiva (emisión). En OES, la intensidad de la luz emitida en longitudes de onda específicas se mide y se usa para determinar las concentraciones de los elementos de interés.

Para obtener la composición química de la maza y los recubrimientos se utilizó un espectrómetro óptico por chispa Angstrom V-950 (Fig. 2.3), instalado en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.

Características de las muestras a analizar

- Las muestras deben de poseer una superficie de al menos 3x3 cm para ser analizadas de modo que el espacio sea suficiente para que la quema sea efectiva

- La superficie de la muestra a analizar debe estar previamente preparada para el análisis, esta debe de ser una superficie plana, desbastada con un papel lija al agua de grano 80.
- Los especímenes en ensayo deben de poseer una superficie posterior que sea paralela al lado a analizar para que la pieza esté correctamente colocada y bien acoplada al brazo orientable para la sujeción de la muestra.



Fig. 2.3. Fotografía del espectrómetro de emisión óptica por chispa modelo Angstrom V-950 del laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.

Procedimiento para el ensayo de espectrometría de emisión óptica

1. Cortar especímenes con dos superficies paralelas de al menos 3x3cm cada una.
2. Lijar la superficie a analizar con un papel de desbaste de grano 80.
3. Es necesario verificar que la presión de vacío en el espectrómetro haya alcanzado los 0.040 TORR, cuando el vacío está por debajo de estos valores se puede realizar el “chispeo” de las muestras. Esto se verifica en el tablero de control del espectrómetro (ver Fig. 2.4).



Fig. 2.4. Tablero de control del espectrómetro del laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti

4. Abrir la compuerta de la plataforma y colocar la muestra por encima del electrodo de chispeo con el fin de que el agujero quede completamente cubierto, Ver Fig. 2.5 y 2.6.

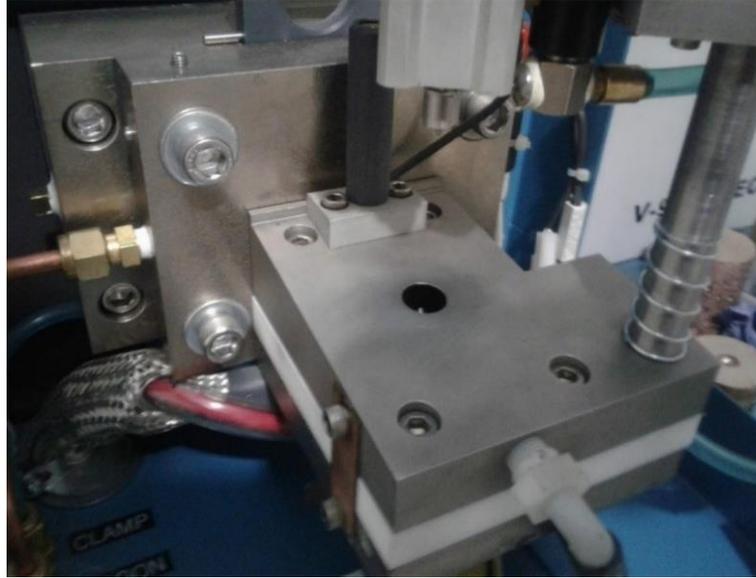


Fig. 2.5. Electrodo de chispeo. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.



Fig. 2.6. Muestra colocada sobre el electrodo de chispeo. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.

5. Bajar el brazo orientable, a modo de que el espécimen toque el contacto del brazo, (ver Fig. 2.7)



Fig. 2.7. Posicionamiento del brazo orientable sobre la muestra a analizar. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.

6. Sujetar la muestra, mediante la palanca para fijar el contacto, (Fig. 2.8).



Fig. 2.8. Sujeción de la muestra mediante la palanca de fijación del contacto. Fotografía tomada en el laboratorio de espectrometría de Metalúrgica Sarti.

7. Cerrar la compuerta de la plataforma de chispeo y realizar la medida desde el servidor.
8. Una vez realizada la medida (chispeo), se verifica que los resultados arrojados en el servidor no presenten anomalías señaladas por el software.
9. Repetir los pasos del 2 al 8, hasta tener un total de tres medidas, para obtener un resultado promedio garante de la composición química real de la muestra analizada.

Los resultados de la concentración elemental de cada medida independiente son expresados en términos de % en masa, el número de medidas realizadas deben de ser un mínimo de 3 pruebas, sobre la cual el valor de la desviación estándar debe de ser menor a 1 para obtener una medición promedio confiable.

2.1.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA POR CHISPA

De la Tabla 2.1 a la Tabla 2.5 se muestran los resultados del análisis químico por espectrometría de emisión óptica por chispa para los 4 electrodos de ambos procesos (SMAW y FCAW) en estudio y la muestra del material de la maza.

Tabla 2.1. Composición química en % de una maza de molino del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
92.431	6.011	0.181	0.637	0.489	0.005	0.136
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.036	0.038	<0.001	<0.001	0.010	0.010	<0.001
Sn	Co	W	Nb	Pb		
0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.013		

Tabla 2.2. Composición química en % del Electrodo A alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel.

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
73.541	3.849	20.067	0.962	0.846	0.013	0.033
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.077	0.046	<0.001	0.462	0.064	0.013	0.006
Sn	Co	W	Nb	Pb		
0.003	0.016	<0.001	0.002	<0.001		

Tabla 2.3. Composición química en % del Electrodo B varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel.

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
75.545	3.556	19.293	0.867	0.254	0.007	0.016
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.059	0.079	<0.001	0.033	0.074	0.035	0.003
Sn	Co	W	Nb	Pb		
0.009	0.007	0.052	0.019	0.094		

Tabla 2.4. Composición química en % del Electrodo C varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
82.844	4.085	11.117	0.972	0.335	0.025	0.016
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.096	0.121	<0.001	0.336	0.009	0.011	0.006
Sn	Co	W	Nb	Pb		
0.011	0.012	0.005	0.003	<0.001		

Tabla 2.5. Composición química en % del Electrodo D alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
90.333	3.175	4.463	1.055	0.500	0.005	0.039
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.025	0.047	<0.001	0.204	0.021	0.033	<0.001
Sn	Co	W	Nb	Pb		
<0.001	0.003	0.022	0.009	0.071		

2.1.4. ENSAYO DE METALOGRAFÍA DE MATERIAL BASE Y RECUBRIMIENTOS

En un microscopio óptico los contrastes en la imagen producida resultan de diferencias en la reflectividad de las diversas regiones de la microestructura (Callister, 2007). Para revelar la microestructura de una muestra, el material se debe cortar, lijar y pulir hasta obtener un acabado similar al de un espejo. Luego, la superficie se expone a un ataque químico, siendo los límites de grano atacados más agresivamente que el resto del grano. La luz de un microscopio óptico se refleja o dispersa desde la superficie de la muestra, dependiendo de la forma en que esté atacada la superficie. Cuando es mucha la luz que se dispersa en áreas donde el ataque químico es más intenso, como los límites de grano, estas áreas aparecen oscuras (Askeland, Fulay, & Wright, 2010) como se muestra en la Fig. 2.9.

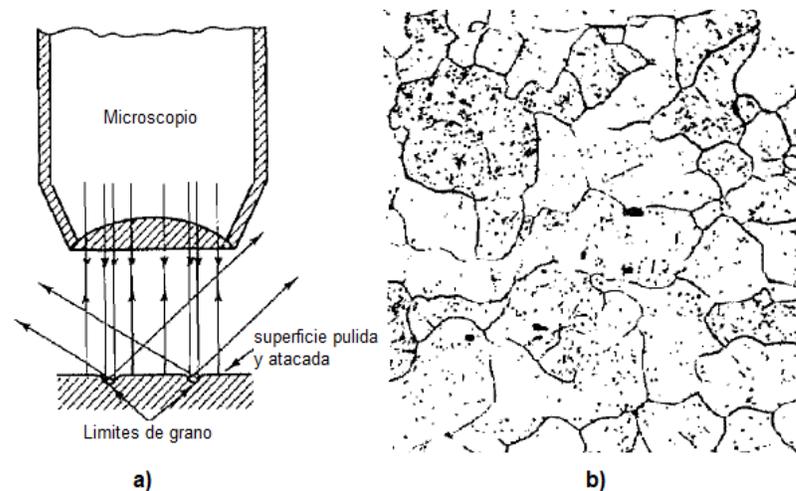


Fig. 2.9. Ilustración esquemática de la apariencia microscópica de los límites de granos como líneas oscuras b) Micrografía de hierro puro. (Avner S. H., 1988)

Para obtener el acabado tipo espejo requerido para la observación de la microestructura todas las muestras fueron cortadas, luego se lijaron con lijas de óxido de aluminio de grano 100, 220, 320, 600, 1000 y 1200 para posteriormente pulirlas con alúmina (Fig. 2.10). De la Fig. 2.12 hasta la Fig. 2.16 se muestra la microestructura de las muestras obtenidas con el microscopio óptico de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador (Fig. 2.11).



Fig. 2.10. Una de las muestras en estudio cortada, lijada y pulida de la cara inferior.



Fig. 2.11. Microscopio Óptico Metallovert Leitz de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador. Fuente propia.

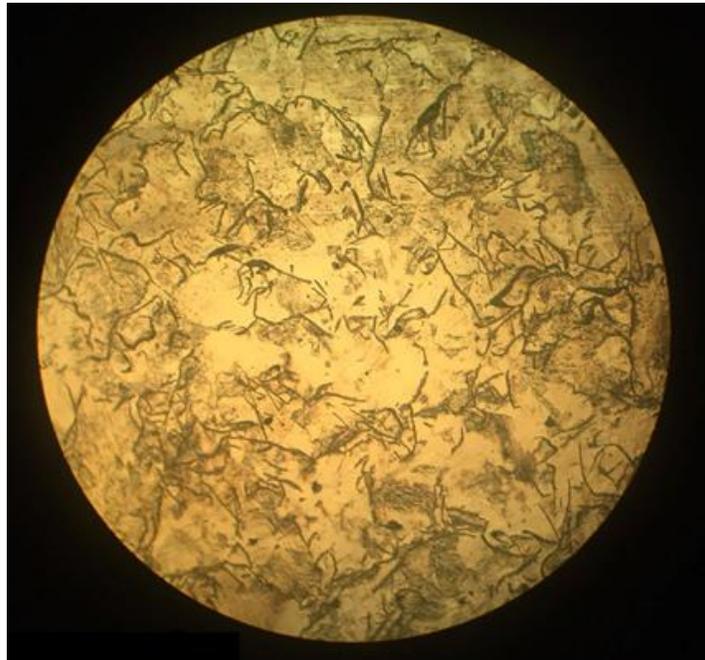


Fig. 2.12. Microestructura de la muestra extraída de una maza del Ingenio El Ángel ampliación X100 atacada con nital 2%. Fuente propia.

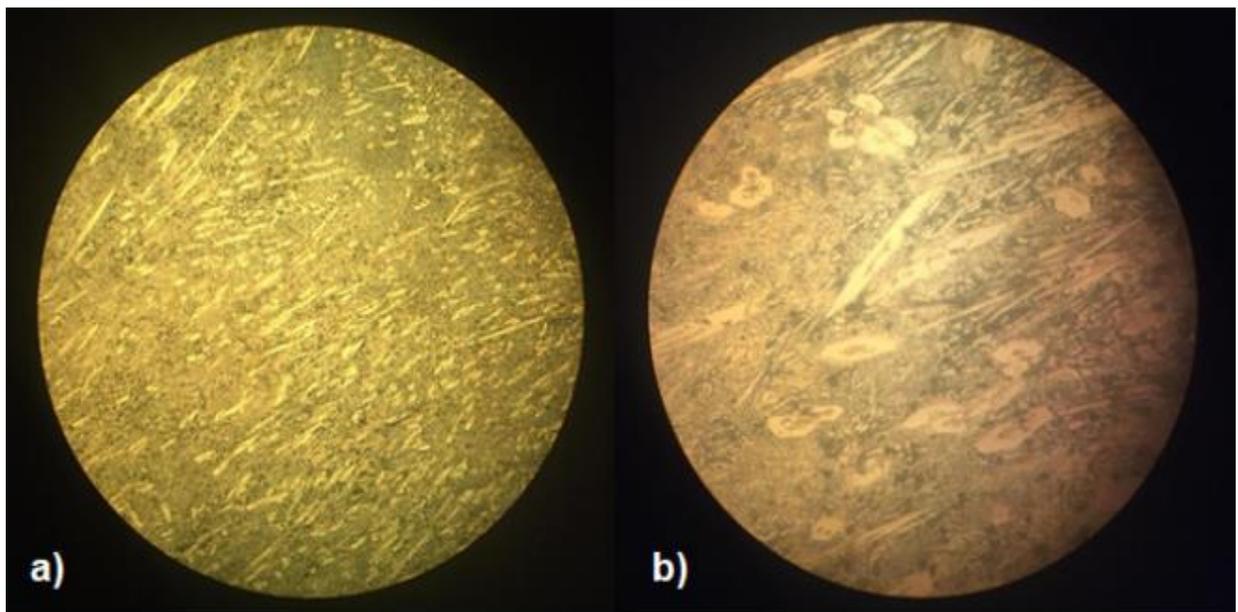


Fig. 2.13. Microestructura del Electrodo A, alambre, depositado con proceso FCAW en una muestra de maza del Ingenio El Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.

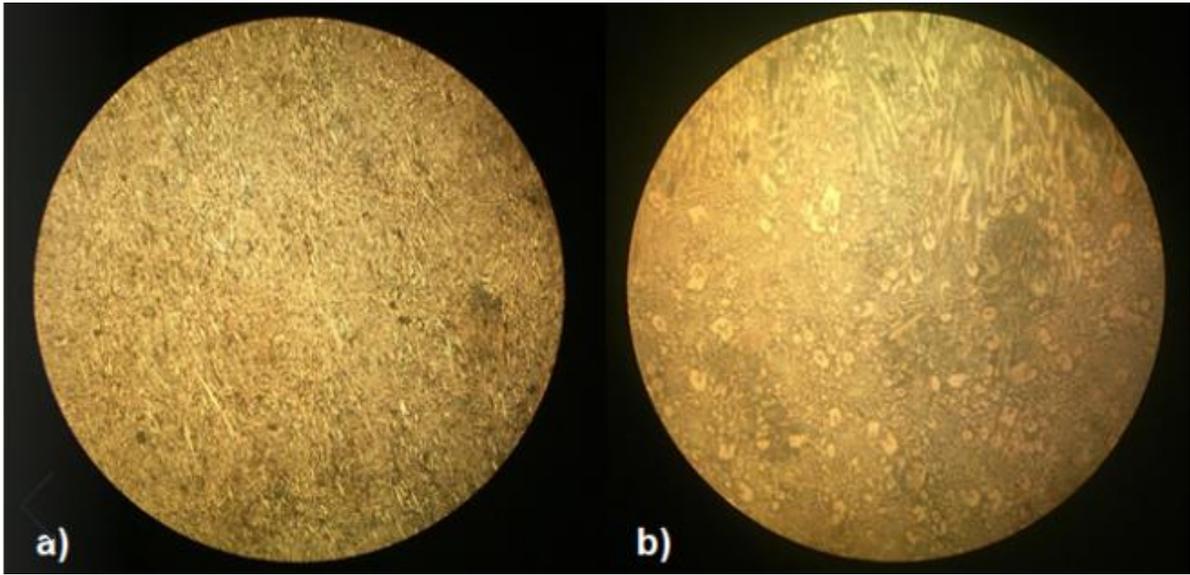


Fig. 2.14. Microestructura del Electrodo B, varilla, depositado con proceso SMAW en una muestra de maza del Ingenio El Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.

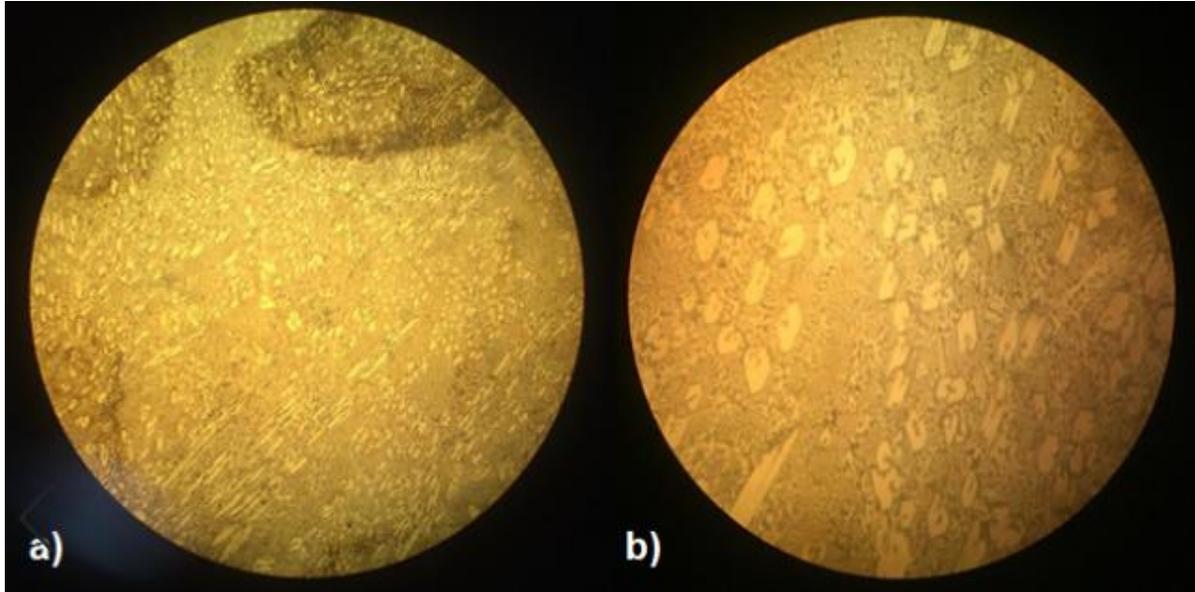


Fig. 2.15. Microestructura del Electrodo C, varilla, depositado con proceso SMAW en una muestra de maza del Ingenio El Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.

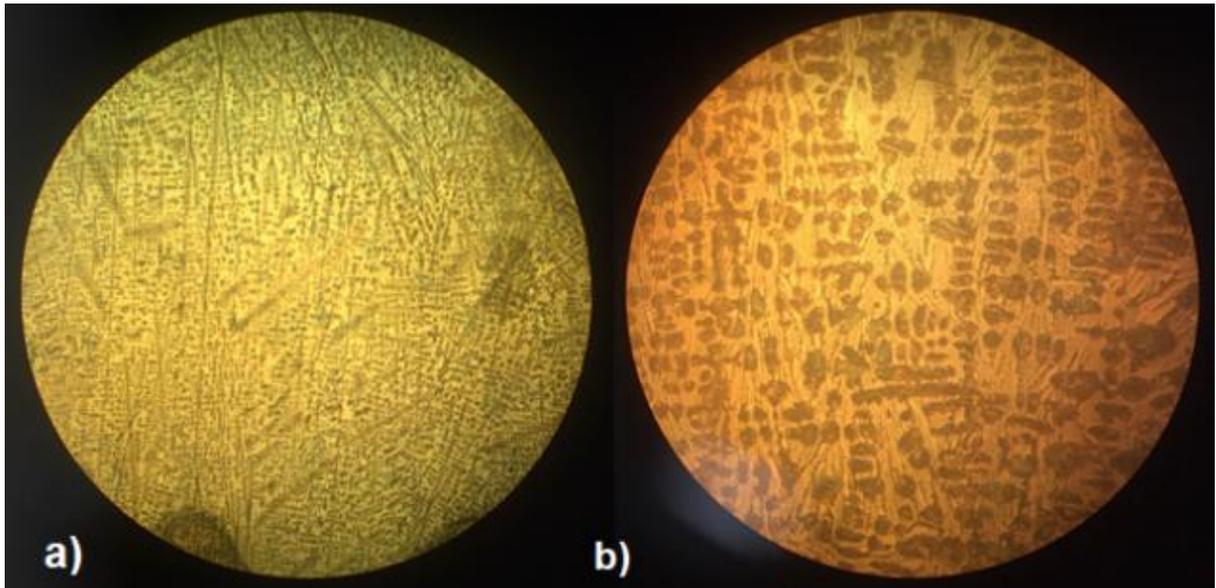


Fig. 2.16. Microestructura del Electrodo D, alambre, depositado con proceso FCAW en una muestra de maza del Ingenio El Ángel a) X100 b) X500 atacada con nital 2%. Fuente propia.

Estas microestructuras se analizarán con mayor detalle en el siguiente capítulo, sin embargo, como una primera inspección podemos observar que la muestra de la maza (Fig. 2.12) es una fundición gris ordinaria hipereutética, también se puede observar la típica microestructura dendrítica de una fundición blanca en la muestra recubierta Electrodo D alambre, y por último también es apreciable la microestructura hexagonal típica de los carburos de cromo en las demás microestructuras.

2.1.5. ENSAYO DE DUREZA DEL MATERIAL BASE Y RECUBRIMIENTOS

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, por ejemplo, una pequeña abolladura o un rasguño (Callister, 2007). Las ventajas de este ensayo es que es fácil de llevar a cabo, es un ensayo no destructivo y sobre todo porque se relaciona con otras propiedades como la

resistencia a la tracción y, según algunos autores, a la resistencia al desgaste. Existen diversas pruebas de dureza, pero las más utilizadas son la prueba Rockwell (la cual es la que se utilizó para este trabajo) y la prueba de Brinell.

El ensayo de dureza Rockwell se lleva a cabo al elevar una muestra lentamente contra un marcador (una bola de acero de diámetro pequeño o un cono con punta de diamante) hasta que se ha aplicado una carga determinada la cual se indica en el disco medidor, luego se aplica una carga mayor a través de sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco medidor llega al reposo, se quita la carga mayor y, con la carga menor todavía en acción, se obtiene el número de dureza Rockwell como resultado del ensayo de dureza.

Existen diversas escalas del ensayo Rockwell, pero las más empleadas comúnmente son la B, en la que se usa un “marcador” o “identador” de bola de acero con un diámetro de 1/16 de pulgada y 100 kg de carga mayor, y la escala C, con un marcador cónico de diamante de 120° y 150 kg de carga mayor. La escala C se ocupa para los materiales más duros, y es justamente esta la que se utilizó para obtener las durezas de la maza y los recubrimientos.

En la Fig. 2.17 se muestra la máquina de ensayo de dureza Rockwell de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, la cual fue utilizada para obtener los resultados de dureza de la maza y los recubrimientos y los cuales se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Resultados del ensayo de dureza de la maza y los recubrimientos

Material	Ensayo	Zona	Resultado
Electrodo A (FCAW)	1	ext. lzq.	60 HRC
	2	centro	61 HRC
	3	ext. Der.	59 HRC
	PROMEDIO		60
Material	Ensayo	Zona	Resultado
Electrodo B (SMAW)	1	ext. lzq.	58 HRC
	2	centro	58 HRC
	3	ext. Der.	60 HRC
	PROMEDIO		58.667
Material	Ensayo	Zona	Resultado
Electrodo C (SMAW)	1	ext. lzq.	60 HRC
	2	centro	60 HRC
	3	ext. Der.	59 HRC
	PROMEDIO		59.67
Material	Ensayo	Zona	Resultado
Electrodo D (FCAW)	1	ext. lzq.	56 HRC
	2	centro	57 HRC
	3	ext. Der.	58 HRC
	PROMEDIO		57
Material	Ensayo	Zona	Resultado
Fundición gris*	1	ext. lzq.	81 HRB
	2	centro	80.5 HRB
	3	ext. Der.	82.2 HRB
	PROMEDIO		81.23
*Debido a la baja dureza de la fundiciones grises y a que en el durómetro de la Escuela de Ingeniería Mecánica solo se puede medir dureza Rockwell C, para obtener la dureza de la muestra de la maza se utilizó el durómetro phase II pht-1700 con que cuenta el Grupo Sarti, S.A de C.V en su planta metalúrgica.			

De los resultados se aprecia claramente que los recubrimientos aplicados con los Electrodo A y C son los que mejor dureza poseen.



Fig. 2.17. Máquina de ensayo de dureza Rockwell de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

2.2. COSTOS DE SOLDADURA PARA LOS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO DE MAZAS DE MOLINOS

Los factores básicos que hay que tomar en cuenta para calcular los costos de soldadura son los siguientes (Kobe Steel, LTD., 2015):

- Costo de la mano de obra
- Costo de los electrodos
- Costo de la energía eléctrica
- Costo de depreciación del equipo
- Otros costos (Ensayos, pruebas, tratamientos térmicos, acabados, costos de control de calidad, etc.).

Sin embargo, los costos de mano de obra y los costos de los consumibles de soldadura son los factores gobernantes que afectan los costos totales de soldadura y que dependen del proceso de soldadura (Kobe Steel, LTD., 2015). Por lo tanto, únicamente estos dos costos serán tomados en cuenta para comparar los distintos procesos.

2.2.1. INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD

Antes de comenzar a calcular los costos de soldadura se definirán los términos eficiencia de deposición, factor de operación y velocidad de deposición, para lo cual se utilizarán las definiciones presentadas por la American Welding Society Welding Handbook Vol. 1 (1987).

Eficiencia de deposición

Es la relación del peso del material depositado al peso del electrodo o el alambre consumido para hacer una soldadura. Para electrodos revestidos la eficiencia de deposición tal como es definida por la Asociación Americana de Soldadura (AWS) y la que se reporta en la literatura no considera la pérdida de la colilla, lo cual es entendible si se tiene en cuenta que el tamaño de la colilla puede ser variable. Sin embargo, desde el punto de vista de los costos de soldadura es necesario considerar para la eficiencia de deposición las pérdidas en las colillas ya que éstas constituyen un desperdicio real de material que tiene un costo que puede llegar a ser significativo. Los rangos de eficiencia de deposición para diversos procesos de soldadura y materiales de aporte se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Eficiencia de deposición para varios procesos de soldadura y materiales de aporte (American Welding Society Welding Handbook Vol. 1, 1987).

Proceso de soldadura y tipo de material de aporte	Eficiencia de deposición (%)
Electrodo revestido (SMAW) 14" de largo 18" de largo 28" de largo	55-65* 60-70* 65-75*
Alambre sólido desnudo Soldadura con arco sumergido (SAW) Soldadura con arco de metal y gas (GMAW)	95-99 90-97
Electrodo con núcleo de fundente (FCAW)	80-90
*Perdidas por colilla incluidas.	

Factor de operación

Es el porcentaje del tiempo total de trabajo de un soldador que realmente se utiliza para soldar. En otras palabras, es el tiempo de arco dividido por el tiempo total trabajado. Los rangos de factor de operación para diversos métodos de soldadura y materiales de aporte se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Factor de operación para varios métodos de soldadura (American Welding Society Welding Handbook Vol. 1, 1987).

Método de soldadura	Rango de factor de operación (%)
Manual	5-30
Semiautomática	10-60
Mecanizada	40-90
Automática	50-100

Velocidad de deposición

Es la cantidad de metal de aporte que puede ser depositado por un electrodo o un alambre por unidad de tiempo, generalmente es expresado en kilogramos por hora. Esta medición se calcula con base en el tiempo de arco, es decir, sin incluir paros para cambio de electrodo, limpieza de escoria, finalización de la soldadura u otras actividades. En la Fig. 2.18 se muestran velocidades de deposición típicas de diversos procesos de soldadura en función de la corriente de soldadura.

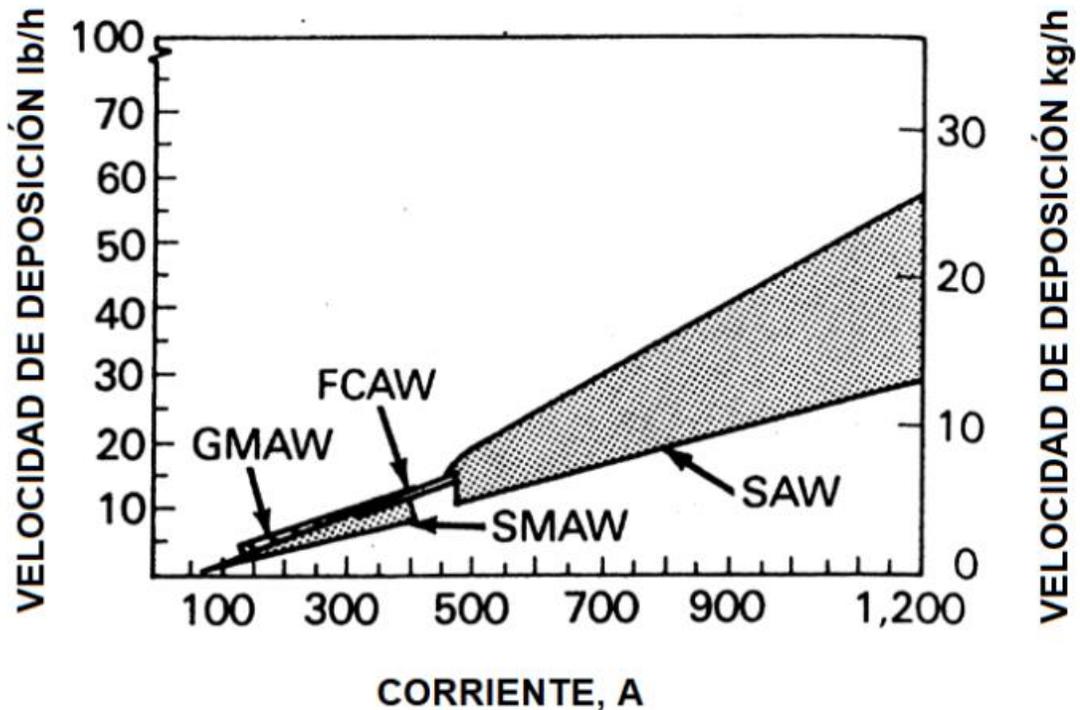


Fig. 2.18. Velocidades típicas de deposición para diversos procesos de soldadura en función de la corriente de soldadura (American Welding Society, 1987).

2.2.2. INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD IN SITU

Estimación de la eficiencia de deposición para los distintos electrodos y procesos de soldadura.

La eficiencia de deposición es la relación del peso del material depositado al peso del electrodo o el alambre consumido para hacer una soldadura (Ecuación 2.1)

$$\text{Eficiencia de deposición} = \frac{W_{\text{material depositado}}}{W_{\text{electrodo consumido}}} * 100\% \text{ (Ec. 2.1)}$$

Para obtener la eficiencia de deposición se prepararon cuatro muestras de fundición de hierro obtenidas directamente de una masa del Ingenio El Ángel, sobre las cuales se depositaron las soldaduras para la toma de datos, en la Fig. 2.19 se presentan las muestras que se tomaron de una de las mazas, identificándolas con los números del 1 al 4.



Fig. 2.19. Muestras tomadas de una de las mazas del ingenio. Fuente propia.

Se explicará por separado el procedimiento realizado para los dos procesos (SMAW y FCAW) para calcular la eficiencia de deposición.

Proceso SMAW

Para obtener el peso del material depositado se pesaron las muestras, con una balanza Mettler Toledo (Fig. 2.20), antes y después de aplicada la soldadura, la diferencia de ambas es el peso del material depositado. En el caso del peso del electrodo consumido, de igual forma, se pesaron los electrodos utilizados antes y después de haber sido depositados y la diferencia entre ambas es el peso del electrodo consumido. Los resultados de la medición de masas se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Resultados obtenidos de las mediciones de masa para el proceso SMAW tanto de las muestras de la maza del molino como del electrodo.

Electrodo	Muestra		Electrodo	
	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Masa inicial (g)	Masa final (g)
Electrodo B	256.26	269.03	107.65	84.89
Electrodo C	411.73	446.65	105.52	65.17



Fig. 2.20. Balanza Mettler Toledo con que se pesaron las muestras. Fuente propia.

Para tomar en cuenta el desperdicio por colillas y dado que las muestras no eran lo suficientemente grandes para terminar más de un electrodo en cada muestra, se sustrajo a la eficiencia de deposición un porcentaje por colillas, para la cual se midió el tamaño de un grupo de colillas de electrodos utilizados para recubrir las mazas de los molinos. Posteriormente se calculó el promedio de esas colillas cuyo resultado fue un promedio de 4" de largo lo cual es equivalente al 22.22% del electrodo ya que el tamaño del electrodo es de 18". Por tanto, la eficiencia de deposición la podemos escribir como:

$$\begin{aligned}
 \text{Eficiencia de deposición} &= \frac{W_{\text{material depositado}}}{W_{\text{electrodo consumido}}} * 100 \\
 &= \frac{W_{\text{muestra final}} - W_{\text{muestra inicial}}}{W_{\text{electrodo final}} - W_{\text{electrodo inicial}}} * 100\% - \% \text{Colillas} \quad (\text{Ec. 2.2})
 \end{aligned}$$

Para los dos electrodos que se utilizaron para el proceso SMAW los resultados de utilizar la Ecuación 2.2 son:

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo B}} = \frac{269.03g - 256.26g}{107.65g - 84.89g} * 100\% - 22.22\%$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo B}} = \mathbf{33.88\%}$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo C}} = \frac{446.65g - 411.73g}{105.52g - 65.17g} * 100\% - 22.22\%$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo C}} = \mathbf{64.32\%}$$

Para corroborar que los resultados de eficiencia de deposición obtenidos en las muestras se apegan a la realidad, se calculó la eficiencia de deposición en una maza entera recubierta con el Electrodo B. Para obtener el peso del material

depositado se pesó, con la báscula con que pesan los camiones con caña, la maza del molino antes y después de recubrirlo, dando como resultado 16683.13 y 16701.28 kg respectivamente. En el caso del peso del electrodo consumido, se utilizaron 493 electrodos con un peso de 0.11136 kg cada uno, dando como resultado un peso total de 54.9 kg. Al utilizar la Ecuación 1 da como resultado:

$$Eficiencia\ de\ deposición = \frac{W_{material\ depositado}}{W_{electrodo\ consumido}} * 100\%$$

$$Eficiencia\ de\ deposición = \frac{16701.28 - 16683.13}{54.9} * 100\% = 33.06\%$$

La eficiencia de deposición para el Electrodo B así calculada es de 33.06%, siendo un valor bastante cercano al obtenido en la eficiencia de deposición calculada para la muestra que fue de 33.88%, por lo que se valida el tamaño de la muestra utilizada y el uso de la Ecuación 2.2

Proceso FCAW

Para calcular el peso del material depositado se procedió de la misma manera que para el proceso SMAW, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Resultados obtenidos de las mediciones de masa de las muestras de las mazas del molino para el proceso FCAW.

Electrodo	Muestra	
	Masa inicial (g)	Masa final (g)
Electrodo A	393.49	439.88
Electrodo D	451.19	495.65

Debido a que las muestras eran muy pequeñas y no se utilizaba una cantidad significativa de recubrimiento comparado con la cantidad total del carrete de alambre de electrodo, se calculó la cantidad de electrodo consumido utilizando la velocidad lineal (m/s) marcada por la máquina soldadora multiplicada por la masa por metro lineal de alambre (g/m) para obtener la cantidad de masa por segundo que depositó la máquina soldadora, a continuación se multiplicó por el tiempo en que duró la deposición (s) para obtener la cantidad de electrodo consumido. Expresado en forma de ecuación:

$$\text{Cantidad de electrodo consumido (g)} = \text{Velocidad lineal } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * \text{Masa por metro lineal de alambre } \left(\frac{\text{g}}{\text{m}}\right) * \text{Tiempo de deposición (s)} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Los valores obtenidos de velocidad lineal, masa por metro lineal de alambre, tiempo y cantidad de electrodo consumido para los distintos alambres empleados se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Valores obtenidos de velocidad lineal, masa por metro lineal de alambre, tiempo y cantidad de material de aporte de deposición para los recubrimientos aplicados con Electrodo A y D mediante proceso FCAW.

Alambre	Velocidad lineal (m/s)	Masa por metro lineal (g/m)	Tiempo de deposición (s)	Cantidad de electrodo consumido (g)
Electrodo A	0.0478	31.55	41.54	62.69
Electrodo D	0.0469	28.69	41.97	56.58

Por tanto, utilizando la ecuación 2.1 y sin tomar en cuenta las pérdidas por colillas ya que es una cantidad insignificante, los valores de eficiencia para los alambres utilizados con proceso FCAW son los siguientes:

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo D}} = \frac{495.65g - 451.19g}{56.58g} * 100\%$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo D}} = 78.58\%$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo A}} = \frac{439.88g - 393.49g}{62.69g} * 100\%$$

$$\text{Eficiencia de deposición}_{\text{Electrodo A}} = 73.99\%$$

Estimación de la velocidad de deposición para los distintos electrodos y procesos de soldadura

La velocidad de deposición es la cantidad de metal de aporte que puede ser depositado por un electrodo por unidad de tiempo sin considerar paro alguno en la operación, generalmente es expresado en kilogramos por hora, la ecuación con la que se calcula la velocidad de deposición es:

$$\text{Velocidad de deposición} = \frac{W_{\text{material depositado}}}{t_{\text{arco}}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Para obtener la velocidad de deposición se pesaron las muestras antes y después de la aplicación de la soldadura, obteniendo así la masa de material depositado, los valores de la masa inicial y final de cada electrodo se muestran las Tablas 2.9 y 2.10.

En la obtención del tiempo de arco se midió directamente el tiempo en que este permaneció activo en la deposición del material, este procedimiento fue realizado para ambos procesos (SMAW y FCAW) y también para todos los

materiales de aporte utilizados. El tiempo de arco y la cantidad de material depositado se muestran en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Tiempo de arco y masa de recubrimiento depositado de los electrodos

Electrodo	Tiempo de arco (h)	Masa de Recubrimiento depositado (kg)
Electrodo A	0.01154	0.04639
Electrodo B	0.01258	0.01277
Electrodo C	0.01538	0.03492
Electrodo D	0.01166	0.04446

Por lo tanto, utilizando la ecuación 2.4, los resultados para la velocidad de deposición se calcularon así:

$$Velocidad\ de\ deposición_{Electrodo\ A} = \frac{0.04639}{0.01154} = 4.02\ kg/h$$

$$Velocidad\ de\ deposición_{Electrodo\ B} = \frac{0.01277}{0.01258} = 1.02\ kg/h$$

$$Velocidad\ de\ deposición_{Electrodo\ C} = \frac{0.03492}{0.01538} = 2.27\ kg/h$$

$$Velocidad\ de\ deposición_{Electrodo\ D} = \frac{0.04446}{0.01166} = 3.81\ kg/h$$

Estimación del factor de operación.

Es el porcentaje del tiempo total de trabajo de un soldador que realmente se utiliza para soldar. Para los electrodos de varilla se utilizó el mismo factor de operación, dado que en ambos casos se realiza mediante el proceso SMAW, con el mismo equipo, misma técnica e incluso la mano de obra que interviene. El factor de operación se calcula con la Ecuación 2.5.

$$\text{Factor de operación} = \frac{t_{\text{arco}}}{t_{\text{total trabajado}}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para el cálculo del factor de operación se realizó la medición del tiempo de arco en una hora de trabajo de un operario en el período de mantenimiento, en la actividad de recubrimiento de una maza con chapisco, del cual los resultados de los tiempos registrados fueron los siguientes: 2,697 segundos para el tiempo de arco total, y 906 segundos en tiempos muertos, de un total de 3,603 segundos. Entonces el factor de operación para el proceso SMAW es:

$$\text{Factor de operación}_{SMAW} = \frac{2697}{3603} \times 100\% = 74.9\%$$

El factor de operación para el proceso de recubrimiento FCAW con el robot soldador se midió directamente con un robot soldador en la operación de chapisco, bajo las mismas condiciones que en el proceso SMAW. El estudio de tiempos se realizó en una hora dando como resultado un tiempo de arco total de 3451 segundos, y un total de tiempos muertos de 144 segundos, por lo tanto, el factor de operación para el proceso FCAW realizado con robot soldador es de:

$$\text{Factor de operación}_{SMAW} = \frac{3451}{3600} \times 100\% = 95.9\%$$

En la Tabla 2.13 se resumen resultados obtenidos para los indicadores de productividad obtenidos en el Ingenio El Ángel para los diversos electrodos y procesos de soldadura.

Tabla 2.13. Indicadores de productividad obtenidos en el Ingenio El Ángel

Electrodo	Método de soldadura	Eficiencia de deposición	Factor de operación	Velocidad de deposición
Electrodo A	FCAW	73.99 %	95.9%	4.02 kg/h
Electrodo B	SMAW	33.88 %	74.9%	1.02 kg/h
Electrodo C	SMAW	64.32 %	74.9%	2.27 kg/h
Electrodo D	FCAW	78.58 %	95.9%	3.81 kg/h

El elevado factor de operación obtenido comparado con los bajos valores presentados en la Tabla 2.8 se pueden explicar, teniendo en cuenta el hecho de que en esos valores promedios se consideran los tiempos para preparar la junta a soldar, lo cual no es necesario para aplicar el recubrimiento en las mazas de los molinos, por lo cual se considera una operación continua, con bajos tiempos de instrumentación y preparación.

2.2.3. COSTOS DE SOLDADURA.

Para obtener los costos de soldadura, se utilizarán las fórmulas presentadas por (POSTLE INDUSTRIES, INC.).

- Costos de los consumibles (por libra de metal depositado):
(Precio del electrodo (\$/lb))/(Eficiencia de deposición (%))
- Costo de la mano de obra (por libra de metal depositado):
*(Carga laboral (\$/h)) / (Velocidad de deposición (lb/h) * factor de operación (%))*

En las tablas 2.14 y 2.15 se muestran los resultados de las evaluaciones de estas ecuaciones.

Tabla 2.14. Evaluación de los costos de los consumibles

Electrodo	Precio del consumible (\$/lb)	Eficiencia de deposición (%)	Costo del consumible (\$/lb)
Electrodo A (FCAW)	6.80	73.99	9.19
Electrodo B (SMAW)	3.83	33.88	11.30
Electrodo C (SMAW)	4.16	64.32	6.47
Electrodo D (FCAW)	10.30	78.58	13.11

Tabla 2.15. Evaluación de los costos de la mano de obra

Electrodo	Carga laboral (\$/h)	Velocidad de deposición (lb/h) *	Factor de operación (%)	Costo de la mano de obra (\$/lb)
Electrodo A (FCAW)	3.50	8.86	95.9%	0.41
Electrodo B (SMAW)	3.50	2.25	74.9%	2.08
Electrodo C (SMAW)	3.50	5.00	74.9%	0.93
Electrodo D (FCAW)	3.50	8.40	95.9%	0.43

*Se convirtieron las unidades de los resultados presentados en la Tabla 2.13 (kg/h) a lb/h, para tener un sistema consistente de unidades.

Durante el mantenimiento general, se paga el recubrimiento de las mazas por proyecto, por lo que los \$3.50 que aparecen en la Tabla 2.15 es lo que se les paga a los soldadores en zafra.

El costo total de cada opción es la suma de los costos del consumible y los costos de la mano de obra, en la Tabla 2.16 se muestran los resultados.

Tabla 2.16. Costo total por cada electrodo y método.

Electrodo	Costo del consumible (\$/lb)	Costo de la mano de obra (\$/lb)	Costo total por libra de material depositado (\$/lb)
Electrodo A (FCAW)	9.19	0.41	9.60
Electrodo B (SMAW)	11.30	2.08	13.38
Electrodo C (SMAW)	6.47	0.93	7.40
Electrodo D (FCAW)	13.11	0.43	13.54

De los resultados obtenidos se ve claramente que el Electrodo C varilla aplicado por el proceso SMAW es la opción más económica por cantidad de material depositado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se analizarán con mayor profundidad los resultados de los ensayos presentados en el capítulo 2, se analizará primero los resultados obtenidos de composición química y microestructura de la maza del molino, posteriormente se realizará un análisis económico de los procesos de soldadura, luego se analizarán los ensayos de composición química y dureza de los electrodos depositados en las muestras de la maza; y su relación con la microestructura obtenida, y por último se presentará el método propuesto de comparación del perfil de los dientes de las mazas de los molinos.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BASE (MAZA DEL MOLINO)

Como se mencionó en la sección 1.5.1, el hierro fundido gris es el material más empleado para la fabricación de las mazas de molinos cañeros, por lo que se esperaba que de este material sean las mazas que se ocupan en el Ingenio El Ángel. En la tabla 3.1 se muestra el valor de dureza y la composición química obtenida para la muestra de la maza del molino en estudio.

Tabla 3.1. Composición química y dureza de la maza del molino

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
92.431	6.011	0.181	0.637	0.489	0.005	0.136
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.036	0.038	<0.001	<0.001	0.010	0.010	<0.001
Sn	Co	W	Nb	Pb	Dureza	
0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.013	81 HRB	
Valores de la composición química en %						

En la Fig. 3.1 se muestran la microestructura de la fundición de la maza del molino y su respectivo diagrama de fases. La microestructura está constituida por 3 fases; grafito, perlita y ferrita. En el microscopio óptico tanto la ferrita como la cementita observan blancas, pero se sabe que la matriz de esta muestra es ferrítica debido a la baja dureza obtenida en el ensayo de dureza (81 HRB), por lo tanto tenemos una fundición gris ordinaria.

La solidificación de esta estructura sigue tanto el diagrama estable Fe-C como el diagrama metaestable Fe-Fe₃C, y se describe a continuación. El contenido de carbono es de 6.011% por lo que estamos ante una fundición ordinaria gris hipereutética.

Partiendo del estado líquido y al descender la temperatura la muestra sigue el diagrama estable (líneas de rayas alternas) y al tocar la línea líquidus se comienza a formar grafito primario. Conforme la temperatura disminuye se sigue formando grafito hasta que la muestra alcanza la temperatura eutética (unos 1150 °C) a la cual la reacción eutética ($L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) tiene lugar, todo el líquido remanente hasta este punto sufre la reacción eutética isotérmica para formar grafito y austenita. Con el enfriamiento posterior disminuye la solubilidad del carbono en la austenita, dando lugar a la precipitación de grafito proeutectoide. Aproximadamente a los 850 °C parte de la austenita sigue el diagrama metaestable y la otra parte continúa siguiendo el diagrama estable. Como se observa en la Fig. 3.1 la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción eutectoide ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) isotérmica para el diagrama estable y el diagrama metaestable difieren, siendo el primero en alcanzarla (a unos 740 °C) la parte de la austenita que sigue el diagrama estable, formando así grafito y la matriz blanca

de ferrita que se observa en la microestructura, la austenita remanente sigue disminuyendo la temperatura conforme el diagrama metaestable hasta alcanzar la temperatura de reacción eutectoide (unos 725 °C), donde la austenita se transforma en perlita (estructura laminar de cementita y ferrita).

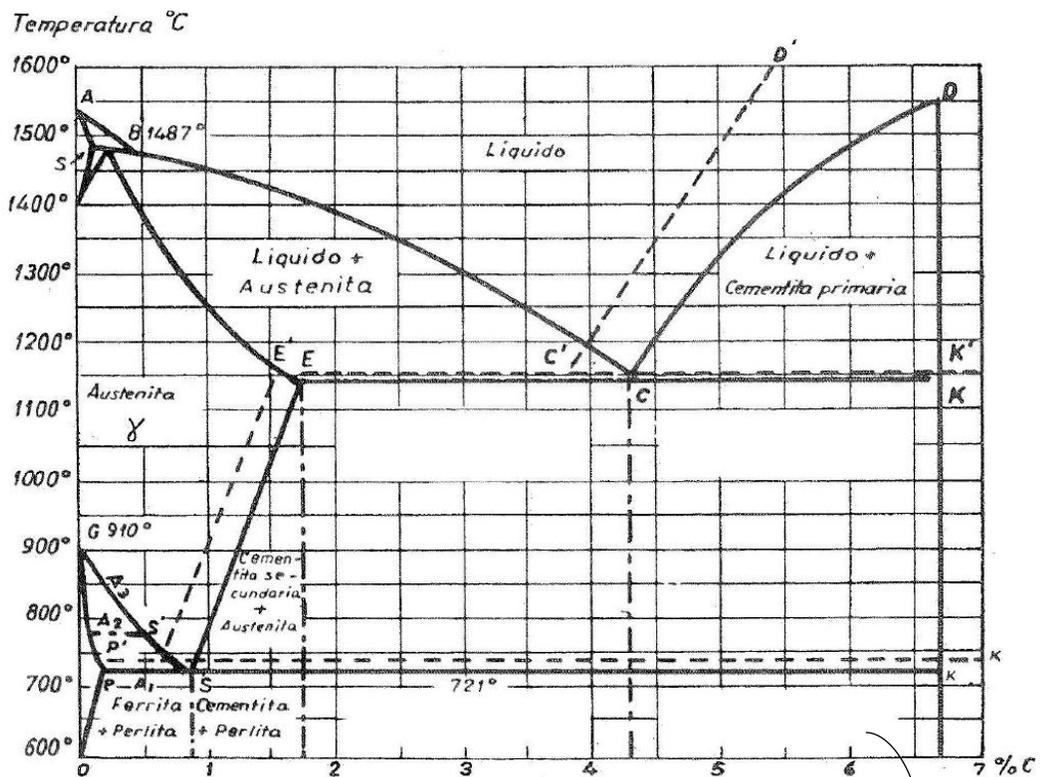


Fig. 3.1. Diagrama Fe-C estable (línea de rayas alternas) y diagrama Fe-Fe₃C metaestable (líneas continuas) tomada de (Apraiz, 1963) y microestructura de la fundición x100.

En la Fig. 3.2 se muestra la microestructura de un hierro fundido gris (x500) presentada por Avner (1988) en la que se puede apreciar la semejanza con la microestructura obtenida de la muestra de la maza del molino con la única diferencia que en la microestructura presentada por Avner (1988) la fase perlítica se encuentra más extendida a tal punto que la matriz es perlítica.



Fig. 3.2. Microestructura de hierro gris fundido x500. Hojuelas gráficas en una matriz perlítica con una pequeña cantidad de ferrita (áreas blancas) atacada químicamente con nital al 2%. Tomada de (Avner,1988)

3.2. COSTOS DE SOLDADURA DE LOS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO.

En la Tabla 3.2 se muestra un resumen del cálculo de los costos de soldadura para cada recubrimiento. Puede observarse que el costo total del Electrodo C en varilla depositado por el método SMAW es más bajo que el de los demás, debido a las siguientes razones:

- El precio de los consumibles en varilla (usados en el método SMAW) es relativamente bastante más bajo que los precios de los consumibles en alambre (usados en el método FCAW). El aumento en la eficiencia de estos últimos no es suficiente para disminuir el costo de los consumibles en alambre. En el caso del Electrodo B en varilla que tiene el precio más bajo, su baja eficiencia de deposición comparado con los otros incrementa significativamente los costos.
- Aunque el costo de la mano de obra de los electrodos depositados por el método FCAW es más bajo que el de los electrodos depositados por el método SMAW (menos de la mitad comparado con Electrodo C), en general el costo de la mano de obra no ejerce una influencia muy significativa en el costo total debido, en gran medida, al bajo salario pagado a los operarios de soldadura en nuestro país comparado con los salarios pagados en otros países, por ejemplo, el salario promedio de un soldador con 5 años de experiencia en El Salvador es de \$633.00 mientras que en Estados Unidos es de \$3549.00 (WageIndicator Foundation, 2019).

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar la ventaja económica de un proceso de aplicación de recubrimientos duros por el método FCAW en comparación con el método SMAW que actualmente se utiliza en el Ingenio El Ángel, lo que permitiría calcular el tiempo en que se recuperaría la inversión de un robot soldador para aplicar los recubrimientos mediante el método FCAW. Sin embargo, debido a que el menor costo se obtuvo mediante un electrodo que ya

se utiliza en zafra aplicado con el método SMAW, no existe ninguna ventaja económica, por lo que considerando solamente los costos de la soldadura por libra de recubrimiento depositado es mejor mantenerse con el método SMAW.

Tabla 3.2. Resumen del cálculo de los costos de soldadura para los recubrimientos duros

Electrodo	E.D.	F.O.	V.D.	P.C.	C.L.	C.M.O.	C.C.	C.T.
Electrodo A (FCAW)	73.99	95.90	8.86	6.80	3.50	0.41	9.19	9.60
Electrodo B (SMAW)	33.88	74.90	2.25	3.83	3.50	2.08	11.30	13.38
Electrodo C (SMAW)	64.32	74.90	5.00	4.16	3.50	0.93	6.47	7.40
Electrodo D (FCAW)	78.58	95.90	8.40	10.30	3.50	0.43	13.11	13.54
E.D.: Eficiencia de deposición (%) F.O.: Factor de operación (%) V.D.: Velocidad de deposición (lb/h) P.C.: Precio del consumible (\$/lb) C.L. Carga laboral (\$/h) C.M.O.: Costo de la mano de obra (\$/lb) = C.L./(V.D.*F.O.) C.C.: Costo del consumible (\$/lb) = P.C./E.D. C.T.: Costo total (\$/lb)								

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS DEPOSITADOS.

En esta sección se analizará la microestructura y composición química de los recubrimientos duros y su posible relación con la dureza y resistencia al desgaste, identificando las fases que están presentes en la microestructura.

En el análisis de los recubrimientos se recurrirá a secciones con cantidades de cromo constante de diagramas ternarios Fe-C-Cr, para lo cual se calcularán los diagramas con el software Thermo-Calc-Academic, que según un experimento realizado por (Li, et al., 2009) para una fundición con 15% de cromo, considerada como una fundición con alto contenido de cromo, arroja datos válidos y confiables, por lo tanto será útil en el análisis presentado en esta sección.

Es importante mencionar algunos aspectos de la solidificación de las fundiciones blancas con alto contenido de cromo. Según (Tabrett, 1997), aunque la austenita que se forma en la solidificación de las fundiciones blancas con alto contenido de cromo no es estable a temperatura ambiente, una matriz austenítica metaestable se retiene comúnmente en la estructura a temperatura ambiente.

Más comúnmente, la temperatura de comienzo de transformación martensítica M_s está ligeramente por encima de la temperatura ambiente, mientras que la temperatura de acabado de transformación martensítica, M_f , está por debajo. Esto produce una cierta transformación en el enfriamiento, de modo que la martensita puede estar presente en la estructura de fundición predominantemente austenítica. En el caso de los recubrimientos analizados en este trabajo (a excepción del Electrodo D que contiene relativamente bajo cromo y forma una microestructura diferente), la matriz es predominantemente austenítica, ya que las durezas de los recubrimientos rondan los 57-60 HRC, y la dureza de la martensita con alto contenido de carbono (como es el caso) puede alcanzar más de 60 HRC y siendo los carburos de cromo el componente más duro, se obtendría una dureza mayor si la matriz fuese martensítica.

Las fundiciones blancas con alto contenido de cromo se pueden describir como compuestos con carburos M_7C_3 eutécticos y/o proeutécticos duros en una matriz más suave (austenita, martensita, ferrita, perlita o bainita). La estructura de la matriz que se observa con mayor frecuencia en los hierros blancos de alto contenido de cromo bajo colada es austenita. Aunque dependen de la composición específica del hierro blanco con alto contenido de cromo, los carburos son típicamente del tipo M_7C_3 , donde M incluye Fe, Cr y otros elementos formadores de carburo. Los carburos M_7C_3 crecen como barras y cuchillas con sus ejes largos paralelos a la dirección del flujo de calor en el molde (Dogan, Hawk, & Laird II, 1997) y como lo demuestra el trabajo de (Liu, et al., 2016) tienden a ser hexagonales.

3.3.1. ELECTRODO A.

En la Tabla 3.3 se muestra la composición química y la dureza del Electrodo A depositado en una muestra de maza, y en la Fig. 3.3 se muestra la microestructura obtenida con el microscopio óptico.

Tabla 3.3. Composición química y dureza del Electrodo A depositado en una muestra de maza

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
73.541	3.849	20.067	0.962	0.846	0.013	0.033
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.077	0.046	<0.001	0.462	0.064	0.013	0.006
Sn	Co	W	Nb	Pb	Dureza	
0.003	0.016	<0.001	0.002	<0.001	60 HRC	
Valores de la composición química en %						

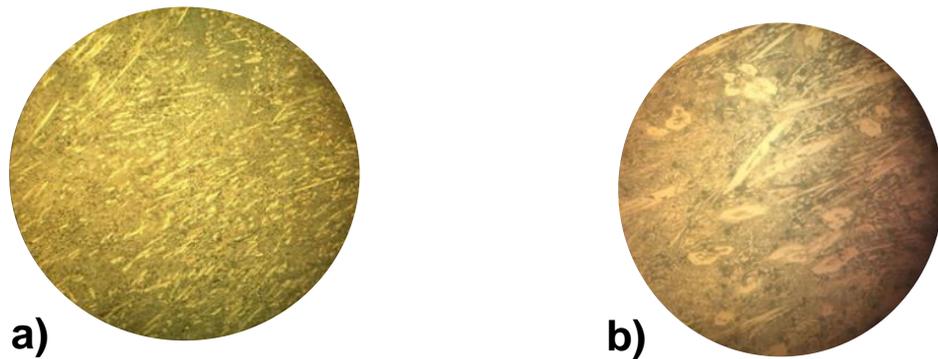


Fig. 3.3. Microestructura del Electrodo A alambre a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%

En la Fig. 3.4 se muestra una sección del diagrama de fases correspondiente al Electrodo A alambre. El punto eutéctico se encuentra a unos 1270 °C y 3.45% C. Para una fundición con 3.85% C, los carburos M_7C_3 primarios comienzan a formarse cuando la temperatura disminuye a unos 1290 °C. A medida que disminuye la temperatura el contenido de carbono de la fase líquida excedente se aproxima gradualmente a la composición eutéctica (aproximadamente 3.45% C). Al alcanzar aproximadamente los 1265 °C comienza la reacción eutéctica ($L \rightarrow \gamma + M_7C_3$), que dicho sea de paso no se completa a temperatura constante como en el diagrama binario Fe-C, y termina al alcanzar los 1245 °C.

En el rango de temperatura de 770 °C a 1245 °C, el área de dos fases de austenita y carburo M_7C_3 existe en el diagrama de fase. Carburos secundarios se precipitan constantemente con la disminución de temperatura, por lo que la cantidad de austenita decrece mientras que la cantidad de carburos aumenta. Si disminuimos más la temperatura la reacción eutectoide tiene lugar ($\gamma \rightarrow \alpha +$

M_7C_3), pero, como se mencionó anteriormente, una matriz austenítica metaestable en la estructura se mantiene a temperatura ambiente, por tanto, las transformaciones se detienen en algún punto entre los 770°C y los 1245 °C. Por tanto, la microestructura de este electrodo consiste de carburos M_7C_3 primarios rodeados de un eutéctico austenita-carburos, con la austenita como matriz.

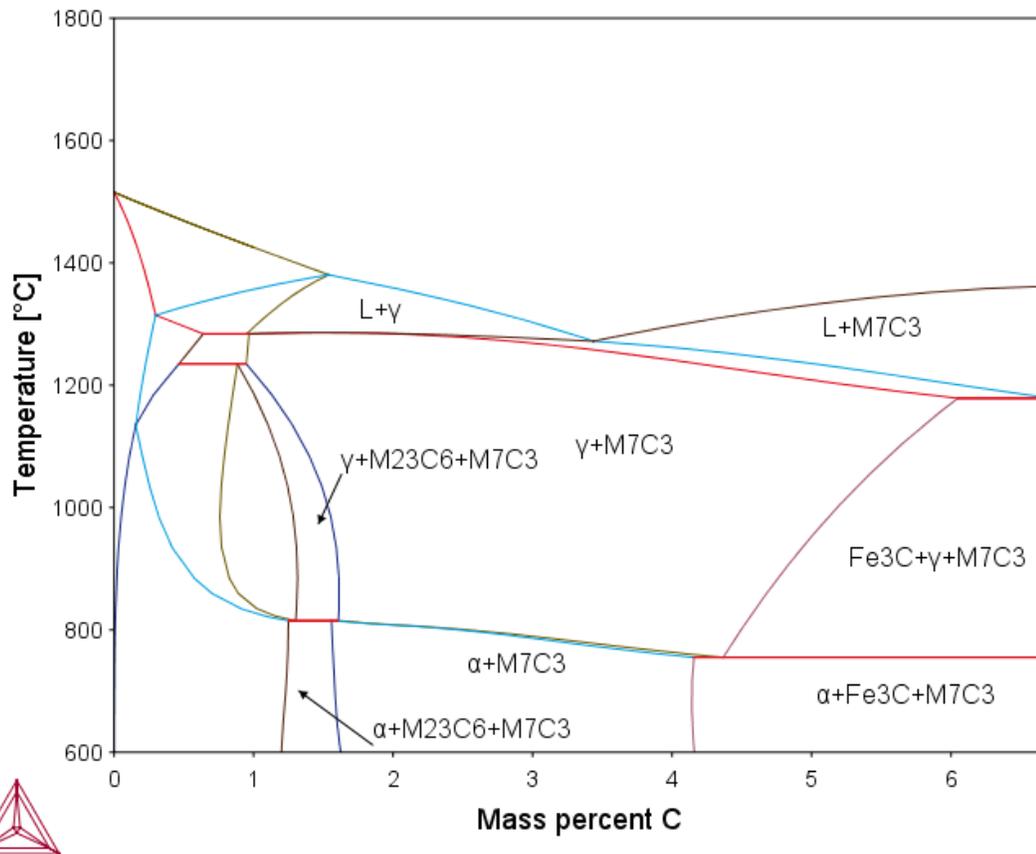


Fig. 3.4. Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 20.067% Cr (composición obtenida con el Electrodo A alambre), calculado por el software Thermo-Calc-Academic

La dureza de la austenita es de aproximadamente 40 HRC (Avner, 1988), mientras los carburos de cromo M_7C_3 tienen una dureza Knoop de aproximadamente 1820 HK (Roberts, Krauss, & Kennedy, 1998), que es la fase que proporciona la alta dureza (60 HRC) del Electrodo A. Para efectos de

comparación 1000 HK equivalen aproximadamente a unos 70 HRC (Callister, 2007),

Autores como KenchiReddy & Jayadeva (2012) y Kumar, Mondal, y Jha (2000), sugieren que la resistencia al desgaste de recubrimientos duros aumenta con la dureza del material, mientras que Askeland, Fulay, & Wright (2010) menciona que la dureza de un material se correlaciona bien su con resistencia al desgaste. Sin embargo, otros autores como Gutierrez Pineda, León Sevilla, & Toro (2004) y Tabrett (1997) mencionan que hay otros factores en la microestructura que debemos tomar en cuenta, este último menciona los siguientes factores:

- Tipo de carburos: Tabrett (1997) menciona que los carburos M_7C_3 son el constituyente que, debido a su alta dureza, proporciona la buena resistencia al desgaste de las aleaciones de hierro fundido con alto contenido de cromo. Estos poseen una dureza mayor que el cuarzo y el granate y por lo tanto se espera que muestren una excelente resistencia contra el desgaste abrasivo. Como se observa en la microestructura y en el diagrama de fases, este tipo de carburos es el encontrado en el Electrodo A.
- Fracción de volumen de carburos (CVF por sus siglas en inglés): Tiene una fuerte influencia en la resistencia al desgaste abrasivo de las aleaciones de cromo con alto contenido de carbono. Bajo abrasión con grandes esfuerzos (como el encontrado en los molinos de caña de azúcar), si se utilizan granate o sílice (que es de los

agentes que más intervienen en el desgaste en los molinos de caña de azúcar y que son más suaves que los carburos M_7C_3) como material abrasivo, la resistencia al desgaste aumenta con la CVF. Para el Electrodo A según el software Thermo-Calc-Academic justo después de la reacción eutéctica la fracción de volumen de carburos de cromo es de 33.54%

- Orientación cristalográfica: El trabajo de Tabrett (1997) menciona que en investigaciones hechas por Dogan, Laird, y Hawk (1995) se encontró que los carburos alineados en paralelo a la superficie de desgaste produjeron una resistencia superior al desgaste en una prueba de abrasión de alta esfuerzo, para el electrodo A no se observa una dirección preferencial.
- Efecto de la matriz: Muchos estudios se han realizado sobre el efecto de la matriz en la resistencia al desgaste, en especialmente comparando una matriz martensítica con una matriz austenítica, y han arrojado resultados muy diversos para condiciones específicas en los ensayos, pero como se mencionó anteriormente todos los recubrimientos poseen una matriz predominantemente austenítica.

3.3.2. ELECTRODO B.

En la Tabla 3.4 se muestra la composición química y la dureza del Electrodo B depositado en una muestra de maza, y en la Fig. 3.5 se muestra la microestructura obtenida con el microscopio óptico.

Tabla 3.4. Composición química del Electrodo B varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
75.545	3.556	19.293	0.867	0.254	0.007	0.016
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.059	0.079	<0.001	0.033	0.074	0.035	0.003
Sn	Co	W	Nb	Pb	Dureza	
0.009	0.007	0.052	0.019	0.094	58.67 HRC	
Valores de la composición química en %						

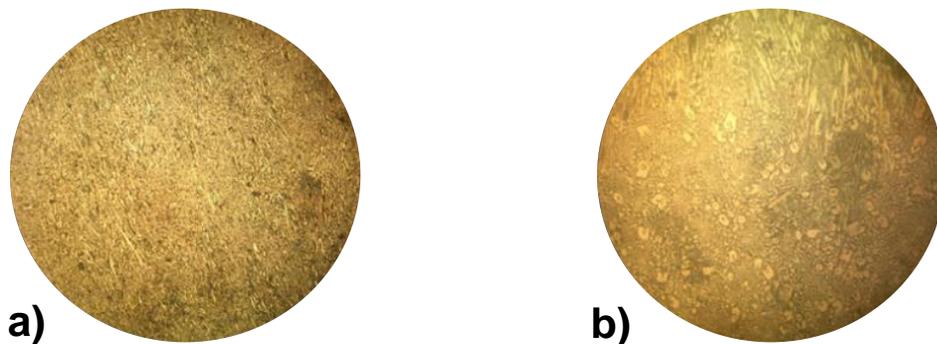


Fig. 3.5. Microestructura del Electrodo B varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%

Como se puede apreciar en la Fig. 3.6 (el diagrama correspondiente al Electrodo B) el punto eutéctico se encuentra a unos 1270 °C y 3.50% C. Para una fundición con 3.56% C, los carburos M_7C_3 primarios comienzan a formarse cuando la temperatura disminuye a unos 1273 °C. A medida que disminuye la temperatura el contenido de carbono de la fase líquida excedente se aproxima gradualmente a la composición eutéctica (aproximadamente 3.50% C). Al alcanzar aproximadamente los 1268 °C comienza la reacción eutéctica ($L \rightarrow \gamma +$

M_7C_3), que dicho sea de paso no se completa a temperatura constante como en el diagrama binario Fe-C, y termina al alcanzar los 1250 °C.

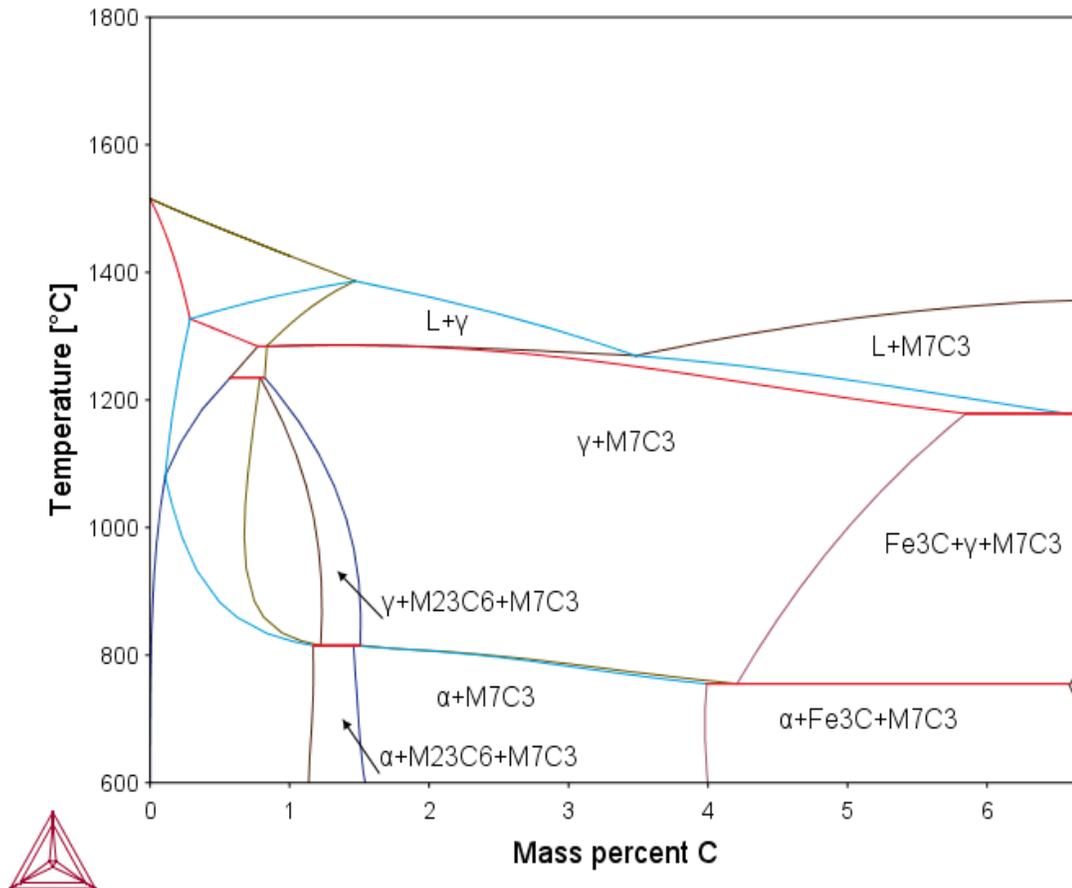


Fig. 3.6. Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 19.293% Cr (composición obtenida con el Electrodo B varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic

En el rango de temperatura de 770 °C a 1250 °C, el área de dos fases de austenita y carburo M_7C_3 existe en el diagrama de fase. Carburos secundarios se precipitan constantemente con la disminución de temperatura, por lo que la cantidad de austenita decrece mientras que la cantidad de carburos aumenta. Si disminuimos más la temperatura la reacción eutéctode tiene lugar ($\gamma \rightarrow \alpha +$

M_7C_3), pero, como se mencionó anteriormente, una matriz austenítica metaestable en la estructura se mantiene a temperatura ambiente, por tanto, las transformaciones se detienen en algún punto entre los 770°C y los 1250 °C.

Al igual que el Electrodo A, el Electrodo B, posee alta dureza (58.67 HRC) debido a la combinación de carburos de cromo (1820 HK) en una matriz austenítica (40 HRC). Para efectos de comparación 1000 HK equivalen aproximadamente a unos 70 HRC (Callister, 2007).

Factores que intervienen en la resistencia al desgaste según Tabrett (1997):

- Tipo de carburos: Carburos de cromo M_7C_3
- Fracción de volumen de carburos: Según el software Thermo-Calc-Academic, justo después de la reacción eutéctica el Electrodo B posee una fracción de volumen de carburos de cromo de 29.86%
- Orientación metalográfica: no presenta ninguna orientación preferencial.

3.3.3. ELECTRODO C

En la Tabla 3.5 se muestra la composición química y la dureza del Electrodo C depositado en una muestra de maza y en la Fig. 3.7 se muestra la microestructura obtenida con el microscopio óptico.

Tabla 3.5. Composición química del Electrodo C varilla aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
82.844	4.085	11.117	0.972	0.335	0.025	0.016
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.096	0.121	<0.001	0.336	0.009	0.011	0.006
Sn	Co	W	Nb	Pb	Dureza	
0.011	0.012	0.005	0.003	<0.001	59.67 HRC	
Valores de la composición química en %						

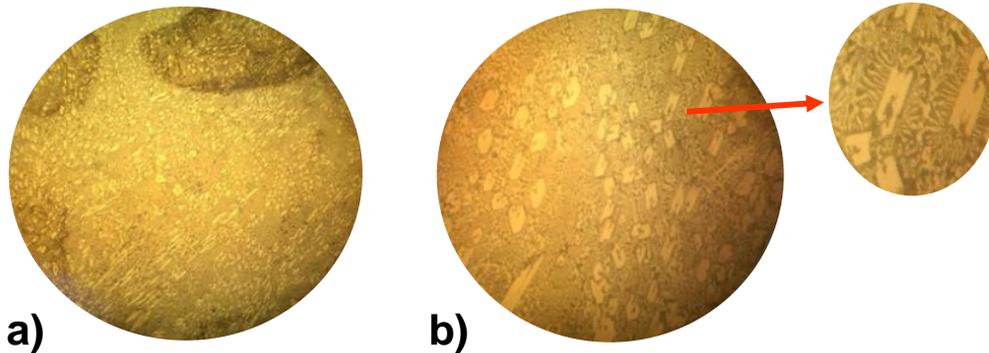


Fig. 3.7. Microestructura del Electrodo C varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%. En la sección ampliada de la figura b) se muestra una microestructura laminar típica de un eutéctico como la ledeburita.

En la Fig. 3.8 se muestra la sección del diagrama ternario con 11.117% Cr (correspondiente al Electrodo C varilla). el punto eutéctico se encuentra a unos 1218 °C y 4.0% C. Para una fundición con 4.085% C, los carburos M_7C_3 primarios comienzan a formarse cuando la temperatura disminuye a unos 1220 °C. A medida que disminuye la temperatura el contenido de carbono de la fase líquida excedente se aproxima gradualmente a la composición eutéctica (aproximadamente 4.00% C). Al alcanzar aproximadamente los 1217 °C comienza la reacción eutéctica ($L \rightarrow \gamma + M_7C_3$), que no se termina de completar,

ya que al alcanzar los 1178 °C una segunda reacción eutéctica ($L \rightarrow \gamma + (Fe,Cr)_3C$) tiene lugar con el líquido restante.

Con el enfriamiento subsecuente cementita secundaria se precipita constantemente, por lo que la cantidad de austenita y carburos M_7C_3 decrece mientras que la cantidad de cementita aumenta. Por lo que a temperatura ambiente se obtiene una microestructura de carburos M_7C_3 primarios en una matriz austenítica con algún agregado eutéctica ($L \rightarrow \gamma + (Fe,Cr)_3C$).

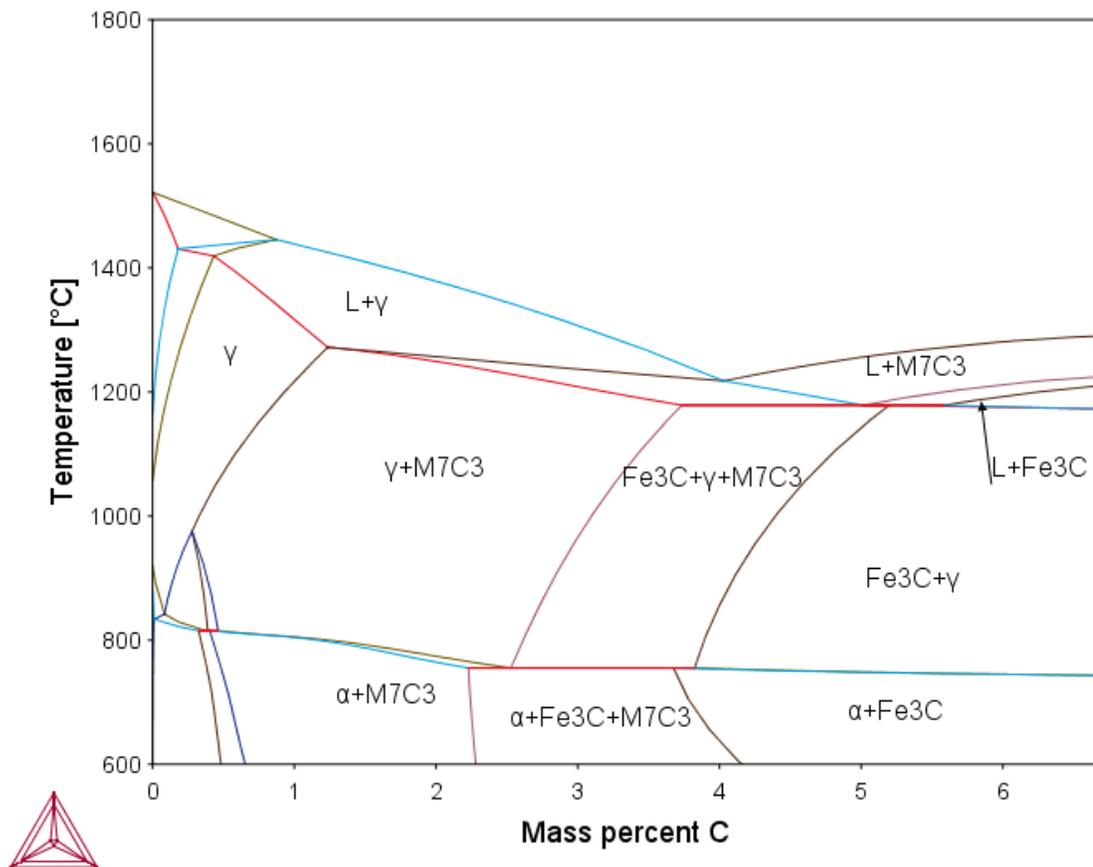


Fig. 3.8. Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 11.117% Cr (composición obtenida con el Electrodo C varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic

La dureza de este electrodo proviene de los carburos de cromo (1820 HK) el eutéctico austenita-cementita conocido como ledeburita y la matriz de austenita (40 HRC). Es importante observar que este electrodo posee una dureza superior al del Electrodo B a pesar de que su contenido de cromo es considerablemente inferior, lo cual puede atribuirse a la presencia de ledeburita, que es un compuesto laminar formado por austenita y cementita, que aportaría dureza a la aleación.

Factores que intervienen en la resistencia al desgaste según (Tabrett, 1997):

- Tipo de carburos: Carburos de cromo M_7C_3 y cementita
- Fracción de volumen de carburos: Según el software Thermo-Calc-Academic, justo después de la reacción eutéctica el Electrodo C posee una fracción de volumen de carburos de cromo de 20.35% y una fracción de volumen de cementita de 17.12%
- Orientación metalográfica: no presenta ninguna orientación preferencial.

3.3.4. ELECTRODO D

En la Tabla 3.6 se muestra la composición química y la dureza del Electrodo D alambre depositado en una muestra de maza y en la Fig. 3.9 se muestra la microestructura obtenida con el microscopio óptico.

Tabla 3.6. Composición química del Electrodo D alambre aplicado en una muestra de una maza del Ingenio El Ángel

Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S
90.333	3.175	4.463	1.055	0.500	0.005	0.039
Ni	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg
0.025	0.047	<0.001	0.204	0.021	0.033	<0.001
Sn	Co	W	Nb	Pb	Dureza	
<0.001	0.003	0.022	0.009	0.071	57 HRC	
Valores de la composición química en %						

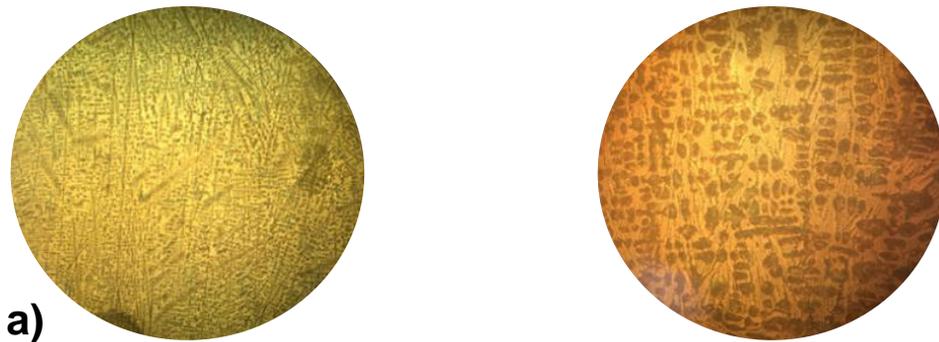


Fig. 3.9. Microestructura del Electrodo D varilla a) x100 b) x500 depositado sobre una muestra de maza de molino, atacado con nital 2%

En la Fig. 3.10 se muestra la sección del diagrama ternario con 4.463% Cr (correspondiente al Electrodo D alambre). Para un contenido de carbono de 3.175% C la muestra solidifica como una fundición blanca. El punto eutéctico se encuentra a 1170 °C y 4.3% C. Austenita primaria comienza a formarse cuando la temperatura disminuye a unos 1288 °C. A medida que disminuye la temperatura aumenta la cantidad de austenita primaria en forma de dendritas y el contenido de carbono de la fase líquida excedente se aproxima gradualmente a la composición eutéctica (aproximadamente 4.3% C). Al alcanzar aproximadamente los 1170 °C ocurre la reacción eutéctica ($L \rightarrow \gamma + Fe_3C$) y la

mayor parte de la austenita formada de esta reacción se deposita en las dendritas ya existentes de austenita primaria, dejando atrás capas macizas de cementita como constituyente separado.

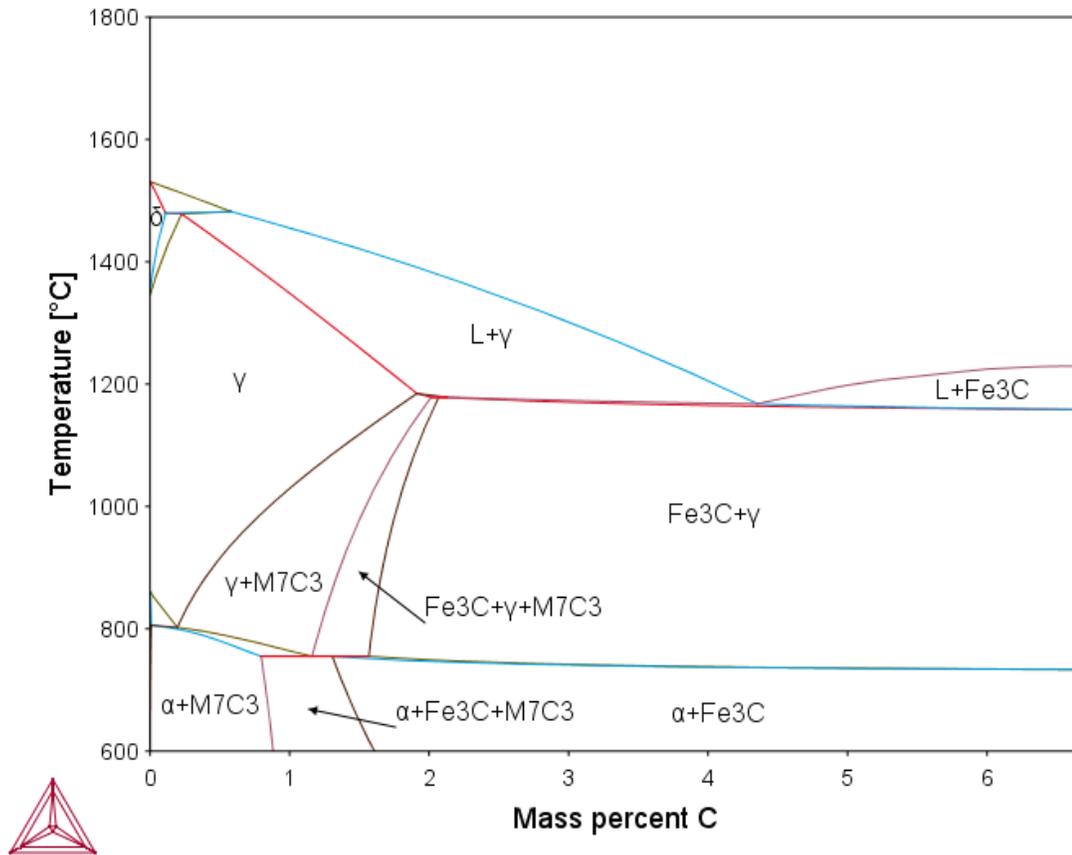


Fig. 3.10 Sección del diagrama ternario Fe-C-Cr con 4.46% Cr (composición obtenida con el Electrodo D varilla), calculado por el software Thermo-Calc-Academic

Entre los 745 °C y los 1170 °C se encuentra la parte del diagrama en que coexisten la austenita y la cementita, a medida que disminuye la temperatura en esta zona, la solubilidad del carbono en austenita decrece, lo que origina la precipitación de cementita proeutectoide, la mayoría de la cual se deposita en la cementita presente. Al alcanzar los 745°C la austenita restante, con 0.8% C sufre la reacción eutectoide para formar perlita.

Con el enfriamiento subsecuente la microestructura permanece inalterada. Por lo tanto a temperatura ambiente tenemos áreas oscuras de austenita transformada en una matriz de cementita.

La alta dureza de este material se debe a la matriz de cementita que tiene una dureza de unos 1150 HK (Roberts, Krauss, & Kennedy, 1998) y a la perlita que posee una dureza entre los 20 y 40 HRC (Avner S. H., 1988). Para efectos de comparación 1000 HK equivalen aproximadamente a unos 70 HRC (Callister, 2007).

Factores que intervienen en la resistencia al desgaste según (Tabrett, 1997):

- Tipo de carburos: Cementita
- Fracción de volumen de carburos: Según el software Thermo-Calc-Academic, justo después de la reacción eutéctica el Electrodo D posee una fracción de volumen de cementita de 47.73%
- Orientación metalográfica: no presenta ninguna orientación preferencial.

3.4. RESUMEN DE RESULTADOS.

En las Tabla 3.7 y 3.8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada electrodo, se puede observar que el electrodo más económico por libra de material depositado es el Electrodo C varilla depositado mediante el método SMAW (Fig. 3.11), sin embargo según el análisis del apartado 3.3, el Electrodo A

alambre depositado mediante el método FCAW, que es el segundo más económico, parece tener una dureza levemente mayor y una microestructura más conveniente para una adecuada resistencia al desgaste, debido a su mayor fracción de carburos de cromo.

Tabla 3.7. Resumen de los resultados obtenidos para cada electrodo.

Material	Costo (\$/lb)	Composición química (%)			Dureza (HRC)
		Fe	C	Cr	
Electrodo A (alambre)	9.60	73.541	3.849	20.067	60.00
Electrodo B (varilla)	13.38	75.545	3.566	19.593	58.67
Electrodo C (varilla)	7.40	82.844	4.085	11.117	59.57
Electrodo D (alambre)	13.54	90.333	3.175	4.463	57.00

Tabla 3.8. Resumen de los resultados obtenidos para cada electrodo

Material	Microestructura	% CVF	Orientación cristalográfica
Electrodo A (alambre)	Carburos M_7C_3 primario rodeado de un eutéctico y + M_7C_3 con la austenita como matriz	M_7C_3 : 33.54	Sin orientación preferencial
Electrodo B (varilla)	Carburos M_7C_3 primario rodeado de un eutéctico y + M_7C_3 con la austenita como matriz	M_7C_3 : 29.86	Sin orientación preferencial
Electrodo C (varilla)	Carburos M_7C_3 primario y un eutéctico y + Fe_3C con una matriz austenítica.	M_7C_3 : 20.35 Fe_3C : 17.12	Sin orientación preferencial
Electrodo D (alambre)	Dendritas de perlita en una matriz de cementita.	Fe_3C : 47.73	Sin orientación preferencial

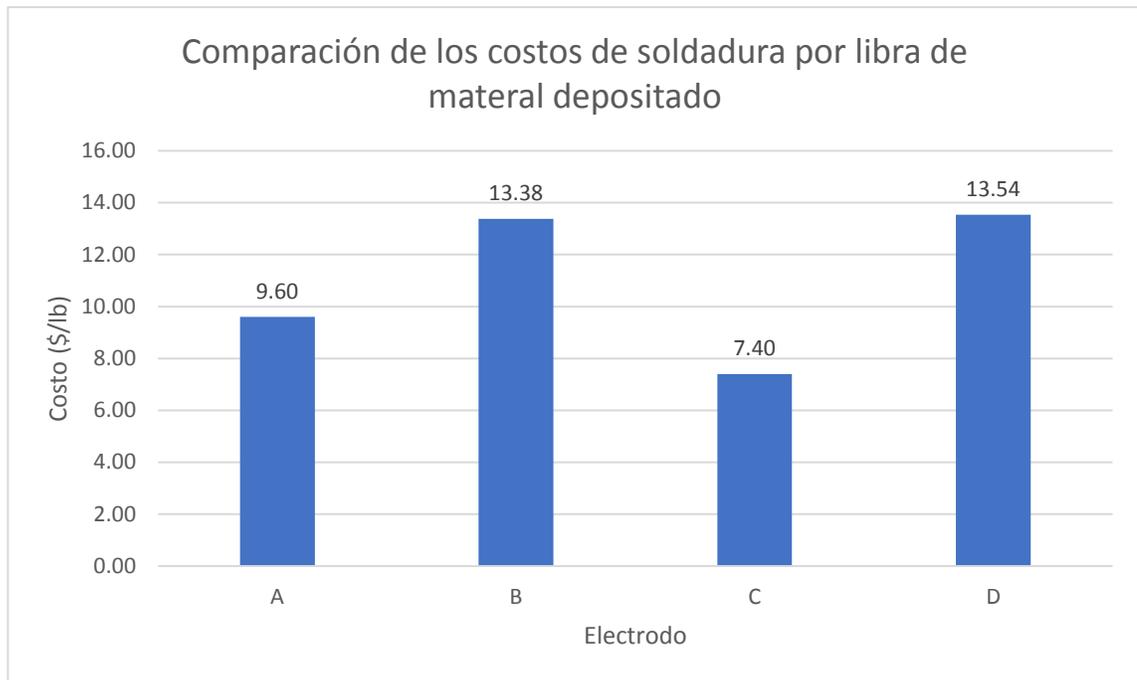


Fig. 3.11 Comparación de los costos de soldadura por libra de material depositado para cada recubrimiento.

En la Fig. 3.12 se puede apreciar la relación del contenido y tipo de carburos que forma cada recubrimiento con su respectiva dureza. El Electrodo A que posee la mayor fracción volumétrica de carburos M7C3 (33.54%) es el recubrimiento que posee la mayor dureza (60 HRC). El Electrodo C posee menor fracción volumétrica de carburos M7C3 (20.35%) que el Electrodo B (29.86%), sin embargo, el primero posee mayor dureza (59.57 HRC) que el segundo (58.67 HRC) debido a que tiene una cantidad significativa de carburos de hierro que también poseen alta dureza y que junto a la austenita forman una fase dura llamada ledeburita. El Electrodo D es el recubrimiento que menor dureza presenta, debido a que solo forma carburos de hierro cuya dureza es inferior a la de los carburos M7C3. Sin embargo, presenta un valor de dureza comparable

con la de los electrodos B y C debido a la gran cantidad de carburo de hierro presente en su microestructura (CVF = 47.73%).

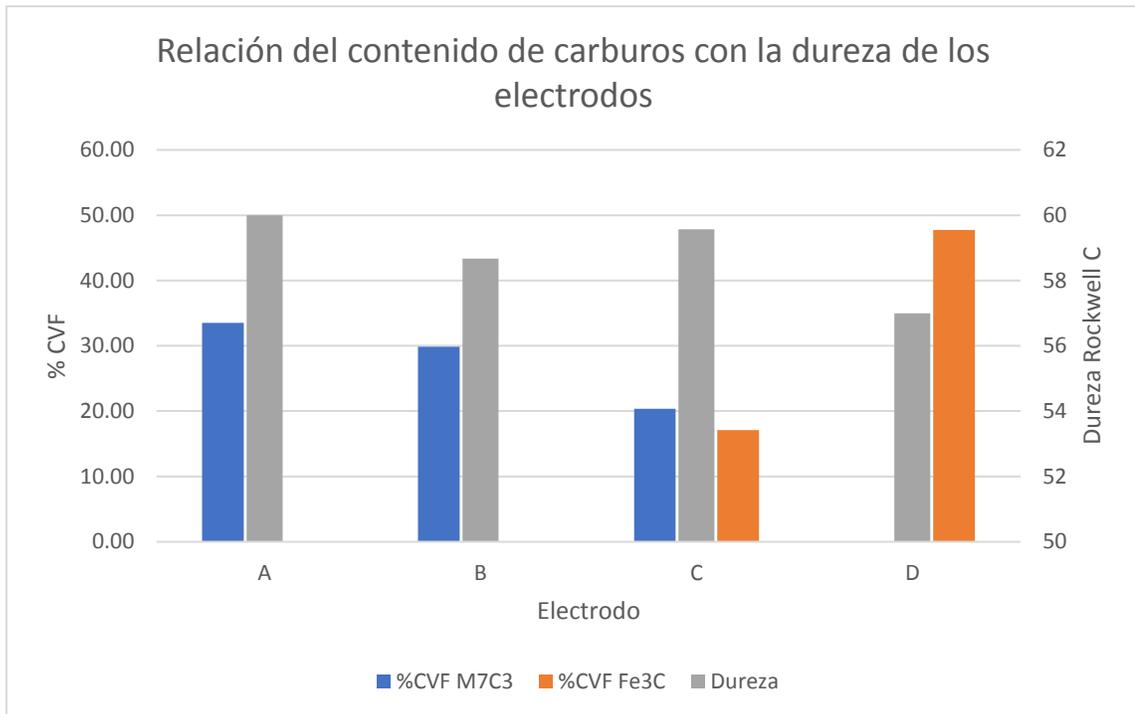


Fig. 3.12 Influencia del contenido y tipo de carburos con la dureza de los electrodos.

3.5. MÉTODO DE VERIFICACIÓN DEL DESGASTE DE LOS DIENTES

Se ha trabajado en descubrir cómo reducir el desgaste en las mazas de los molinos mediante la aplicación del recubrimiento duro más adecuado y que este represente una ventaja económica por encima de otras opciones, pero también es necesario realizar un control del desgaste progresivo con el fin de obtener una mejora en la extracción, lo cual será posible controlando diferentes parámetros que afectan la molienda.

Actualmente el ingenio realiza una verificación del desgaste de los laterales de los dientes de las mazas por medio de plantillas comparativas (Fig. 3.13), verificando así la integridad del recubrimiento frente al desgaste abrasivo que se sufre en la superficie. Existen diferentes plantillas, dependiendo del diseño de rayado de la maza, pudiendo existir distintas configuraciones con respecto a las variables que son el paso, ángulo, punta y fondo del diente.

El método propuesto toma como base la práctica actual de verificación del desgaste, pero teniendo como objetivo llevar un control más exhaustivo tomando indicadores de desempeño del molino, que su vez permita generar una base de datos que puedan utilizarse para prevenir y prever una falla en el recubrimiento duro.



Fig. 3.13. Plantilla verificadora de desgaste en maza superior del molino 6. Fuente: Ingenio El Ángel

Se presenta el método con la recomendación de que sea un documento validado por la superintendencia del ingenio, con el objetivo de estandarizar el procedimiento y que sirva de manual a las personas que lo ejecutarán; además de que servirá para sentar las bases del control de desgaste

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

VERIFICACIÓN DEL DESGASTE EN

MAZAS DE MOLINO DE AZUCAR

ELABORÓ:
RIGOBERTO VÁSQUEZ
DOUGLAS PÉREZ





**MANUAL DE
PROCEDIMIENTOS**

GRUPO EL ÁNGEL

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 1 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. OBJETIVOS.....	3
3. DEFINICIONES.....	4
4. INSTRUMENTOS A UTILIZAR.....	4
5. PROCESO DE VERIFICACIÓN DE DESGASTE EN MAZAS DE MOLINOS.....	5
5.1. Procedimiento de verificación de desgaste en laterales de dientes de maza superior y medición de abertura entre maza superior y bagacera.....	6
5.2. Procedimiento de verificación de desgaste en laterales de dientes de mazas bagacera, cañera y cuarta.....	8
5.3. Formularios de registro del estado de blindaje de mazas de molinos.....	9
5.4. Formulario de recolección de datos de abertura superior-bagacera.....	13

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 2 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

1. INTRODUCCIÓN

Las mazas de los molinos de caña están expuestas a desgaste excesivo debido a las condiciones que se desarrollan en el trabajo generado en el área de molienda. Para entender el desgaste producido en estas piezas de los molinos es necesario conocer los procesos anteriores a la molienda como lo es la preparación de caña. La caña que se recibe en el ingenio está comúnmente acompañada de agentes abrasivos que se acarrearán desde los campos cosechadores de caña, además de piedras y otra serie de cuerpos extraños que se pueden visualizar en la descarga de las rastras.

Siendo sabedores del desgaste producido en las mazas de molinos, el ingenio se ha visto en la necesidad de reducirlo en lo máximo posible, pues al no mantener a las mazas con una rugosidad adecuada se generan pérdidas en producción muy altas, debido a la baja en la eficiencia de la extracción de sacarosa en el tándem de molinos, es por ello que se ha desarrollado la aplicación de recubrimientos duros especiales para la protección y mantenimiento de la superficie de las mazas de caña y que este mantenimiento pueda ser reproducido en el período de zafra.

Se pretende que este manual de procedimientos sea una herramienta que describa en forma lógica, sistemática y detallada las actividades a realizarse para verificar el desgaste en las mazas de molino de caña, es de primordial importancia que se lleve a cabo el monitoreo del desgaste progresivo en los molinos en la temporada de zafra ya que esto permitirá crear rutinas de control, que permitirán prevenir fallas del blindaje de las mazas, permitiendo tener una molidura continua y eficiente en términos de extracción.

Por ello, con fin de implementar un registro histórico, será necesario que se lleve un control de:

- Desgaste evidenciado en el perfil del diente, verificado por plantillas comparadoras.
- Registro de %pol en bagazo y extracción reducida como parámetros de eficiencia e indicadores que podrían señalar desgaste en la maza.
- Toneladas de caña molidas como parámetro histórico de control progresivo del desgaste.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 3 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

2. OBJETIVOS

Objetivos del manual de procedimientos:

- Crear una herramienta que genere un registro histórico del desgaste progresivo que sufren las mazas de molinos de caña, permitiendo así su uso para disminuir problemas futuros en la extracción, teniendo en cuenta diferentes parámetros para predecir el comportamiento del desgaste.
- Describir detalladamente la secuencia en que se realizan las operaciones de los procedimientos para facilitar su comprensión.
- Identificar de manera sencilla el equipo y recursos que se deben utilizar en el desarrollo de procedimientos.
- Evitar la duplicidad de trabajo a través del establecimiento de las responsabilidades, tareas y funciones asignadas a cada procedimiento.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 4 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

3. DEFINICIONES

- Setting:**
 El conjunto de condiciones y medidas que determinan los centros de giro de las mazas y el trazado de la cuchilla central, se denomina ajuste del molino o SETTING.
- Plantilla comparativa:**
 Instrumento de verificación de la integridad del perfil del diente de la maza, contiene el paso, ángulo, altura del rayado, ancho de punta de diente y fondo de diente.
- Compás de interiores:**
 Instrumento para tomar distancias en piezas o ensambles de difícil acceso para un calibrador.
- %pol en bagazo:**
 Esta es una medida obvia del desempeño de un tren de molinos, pero está influenciada por la humedad del bagazo y el contenido de sacarosa en caña.
- Extracción reducida:**
 La sacarosa que no es extraída es aquella que permanece en el bagazo final, Puede esperarse que esta sea proporcional a la cantidad de bagazo, que a su vez es proporcional al contenido de fibra en caña, brinda una mejor medición del desempeño de los molinos.
- Toneladas de caña molida:**
 Toneladas de caña molida hasta el momento en que se realiza el procedimiento de control de desgaste, médase en toneladas cortas.

4. INSTRUMENTOS A UTILIZAR

- Plantillas comparativas de las distintas mazas en el tándem de molinos
- Compás de interiores
- Cámara fotográfica
- Cinta métrica
- Lámpara de mano
- Formularios CDMS01, CDMB01, CDMC01. CDM401 y CAMSB01.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 5 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA

5. PROCESO DE VERIFICACIÓN DE DESGASTE EN MAZAS DE MOLINOS

Objetivo

Proporcionar un método de verificación y medición del perfil de los dientes para evidenciar el desgaste producido en las mazas de los molinos de caña.

Área de aplicación o alcance

El procedimiento se ejecutará en el período que dure el mantenimiento programado en la planta, tendrá lugar en los molinos 1, 2, 3, 4 y 5.

Responsable

Asistente de preparación de caña y molienda.

Supervisor de molinos

Normas de operación

- El responsable debe de estar previamente informado de las medidas y dimensiones de los dientes de cada maza a verificar el desgaste.
- El encargado debe contar con las diferentes plantillas de cada configuración de dientes de todas las mazas a verificar el desgaste.
- El encargado de realizar la verificación por plantilla debe de tener a la mano el formulario para la recolección de datos.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:

MES

AÑO

11

2018

Revisado por:

N° de revisión:

1

Página 6 de 15

5.1. Procedimiento de verificación de desgaste en laterales de dientes de maza superior y medición de abertura entre maza superior y bagacera

No. de operación	Responsable	Descripción
1	Asistente de preparación de caña y molienda y supervisor de molienda	Dirigirse a la salida del molino a verificar medidas, es decir, los encargados de realizar la medición deben estar de pie sobre la maza bagacera del molino.
2	Asistente de preparación de caña y molienda	Seleccionar la plantilla correspondiente al rayado de la maza superior del molino (tener en cuenta el paso, altura del diente y ángulo tanto de la maza como de la plantilla comparativa) y colocarla cuatro dientes después del extremo izquierdo de la maza superior, para realizar la primera verificación.
3	Asistente de preparación de caña y molienda	Identificar visualmente la sección del perfil del diente en que se evidencia más el desgaste y documentarlo mediante fotografías y observaciones escritas en el formulario CDMS01 que describan el estado u alguna anomalía en el blindaje de la maza.
4	Asistente de preparación de caña y molienda	Repetir las operaciones 2 y 3 para el centro de la maza y cuatro dientes antes del extremo derecho de la maza.
5	Supervisor de molienda	Con el compás de interiores, verificar la abertura entre la maza superior y la bagacera cuatro dientes después del extremo izquierdo de las mazas, introduciendo los extremos del compás entre la punta de diente de la maza superior y el fondo de la maza bagacera.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 7 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

No. de operación	Responsable	Descripción
6	Asistente de preparación de caña y molienda y supervisor de molienda	Extraer el compás de interiores y medir la distancia entre las puntas y documentar esta medición en el formulario CAMSB01 de recolección de datos abertura superior-bagacera, en la casilla que corresponda.
7	Asistente de preparación de caña y molienda y supervisor de molienda	En la misma zona izquierda, verificar la abertura entre la punta de diente de la maza bagacera y el fondo de la superior y registrar esta medida en el formulario CAMSB01 , en la casilla que le corresponda.
8	Asistente de preparación de caña y molienda y supervisor de molienda	Repetir las operaciones 5, 6 y 7 para la zona central y 4 dientes antes del extremo derecho de las mazas, tomar de referencia la maza superior.
9	Asistente de preparación de caña y molienda	Determinar el promedio de estas mediciones y con esto calcular el acercamiento que se dará a la maza bagacera, para compensar el desajuste, si es que es requerido.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 8 de 15
11	2018		
Revisado por:			
N° de revisión:	1		

5.2. Procedimiento de verificación de desgaste en laterales de dientes de mazas bagacera, cañera y cuarta

No. de operación	Responsable	Descripción
1	Asistente de preparación de caña y molienda, supervisor de molienda	Dirigirse a la salida del molino a verificar medidas, el encargado deberá de estar en una posición que se le facilite realizar la comparación con la plantilla.
2	Asistente de preparación de caña y molienda, supervisor de molienda	Seleccionar la plantilla correspondiente al rayado de la maza en cuestión (tener en cuenta el paso, alto del diente y ángulo tanto de la maza como de la plantilla comparativa) y colocarla cuatro dientes después del extremo izquierdo de la maza, para realizar la primera verificación.
3	Asistente de preparación de caña y molienda	Identificar visualmente la sección que se evidencia más el desgaste y documentarlo mediante fotografías y de ser necesario se realicen observaciones escritas que describan alguna anomalía en el estado del blindaje en el formulario de observaciones del estado de blindaje de la maza.
4	Asistente de preparación de caña y molienda, supervisor de molienda	Repetir las operaciones 2 y 3 para el centro de la maza y cuatro dientes antes del extremo derecho de la maza.

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	GRUPO EL ÁNGEL	
		FECHA DE ELABORACION	
CODIGO:	MES	AÑO	Página 9 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

5.3. Formularios de registro del estado de blindaje de mazas de molinos

	DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA	
	FORMULARIO DE OBSERVACIONES DEL ESTADO DEL BLINDAJE DE LOS DIENTES DE MAZAS SUPERIORES	
	Zafra 18/19	Fecha
	CDMS01	
MOLINO	OBSERVACIÓN	¿NECESITA RECARGUE?
1		
2		
3		
4		
5		
CAÑA MOLIDA T.C.	%POL BAGAZO	EXTRACCIÓN REDUCIDA 12.5F
<ul style="list-style-type: none"> •Colocar total de caña molida hasta la fecha en que se realiza la inspección. •%pol bagazo y extracción reducida deben estimarse según la tendencia obtenida mediante corridas realizadas hasta la fecha 		

Elaboró: Douglas Pérez, Rigoberto Vasquez	Revisó:	Autorizó:
--	---------	-----------

CODIGO:	FECHA DE ELABORACION		No. PAGINA
	MES	AÑO	Página 10 de 15
11	2018		
Revisado por:			
	N° de revisión:	1	

 Grupo EL ÁNGEL INGENIO EL ÁNGEL	DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA	
	FORMULARIO DE OBSERVACIONES DEL ESTADO DEL BLINDAJE DE MAZAS BAGACERAS	
	CDMB01	Zafra 18/19
		Fecha
MOLINO	OBSERVACIÓN	¿NECESITA RECARGUE?
1		
2		
3		
4		
5		

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	GRUPO EL ÁNGEL	
		FECHA DE ELABORACION	
CODIGO:	MES	AÑO	Página 11 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

	DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA	
	FORMULARIO DE OBSERVACIONES DEL ESTADO DEL BLINDAJE DE MAZAS CAÑERAS	Zafra 18/19
	CDMC01	Fecha
MOLINO	OBSERVACIÓN	¿NECESITA RECARGUE?
1		
2		
3		
4		
5		

Elaboró: Douglas Pérez, Rigoberto Vasquez	Revisó:	Autorizó:
--	---------	-----------

	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	GRUPO EL ÁNGEL	
		FECHA DE ELABORACION	
CODIGO:	MES	AÑO	Página 12 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

	DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA	
	FORMULARIO DE OBSERVACIONES DEL ESTADO DEL BLINDAJE DE CUARTAS MAZAS	Zafra 18/19
	CDM401	Fecha
MOLINO	OBSERVACIÓN	¿NECESITA RECARGUE?
1		
2		
3		
4		
5		

Elaboró: Douglas Pérez, Rigoberto Vasquez	Revisó:	Autorizó:
--	---------	-----------

CODIGO:

MES

AÑO

11

2018

Revisado por:

N° de revisión:

1

Página 13 de 15

5.4. Formulario de recolección de datos abertura superior-bagacera

		DEPARTAMENTO DE MOLIENDA Y PREPARACIÓN DE CAÑA			
		FORMULARIO DE RECOLECCIÓN DE DATOS ABERTURA SUPERIOR-BAGACERA			
		CAMSB01			
MOLINO	MEDICIÓN	Zona	PUNTA SUPERIOR-FONDO BAGACERA	PUNTA BAGACERA-FONDO SUPERIOR	PROMEDIO POR ZONA
1	1	ext. lzq.			
	2	centro			
	3	ext. Der.			
	Promedio				
ABERTURA SUPERIOR BAGACERA SEGÚN SETTING MOL1					
2	1	ext. lzq.			
	2	centro			
	3	ext. Der.			
	Promedio				
ABERTURA SUPERIOR BAGACERA SEGÚN SETTING MOL2					
3	1	ext. lzq.			
	2	centro			
	3	ext. Der.			
	Promedio				
ABERTURA SUPERIOR BAGACERA SEGÚN SETTING MOL3					
4	1	ext. lzq.			
	2	centro			
	3	ext. Der.			
	Promedio				
ABERTURA SUPERIOR BAGACERA SEGÚN SETTING MOL4					
5	1	ext. lzq.			
	2	centro			
	3	ext. Der.			
	Promedio				
ABERTURA SUPERIOR BAGACERA SEGÚN SETTING MOL5					

Elaboró: Douglas Pérez,
Rigoberto Vasquez

Revisó:

Autorizó:

	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS	GRUPO EL ÁNGEL	
		FECHA DE ELABORACION	
CODIGO:	MES	AÑO	Página 14 de 15
	11	2018	
	Revisado por:		
	N° de revisión:	1	

6. NOTAS

- Con las 3 mediciones registradas en el formulario de recolección de datos abertura superior-bagacera en las zonas izquierda, centro y derecha, se pretende que el ajuste del setting del molino sea más objetivo, pues el desajuste puede deberse primeramente al desgaste producido en las mazas que hace que la abertura entre superior y bagacera aumente. A su vez, también puede ser producto de que los pernos de acercamiento de la maza bagacera se aflojen debido a las vibraciones y las altas presiones que tienen lugar en la operación del molino.
- En el formulario de observaciones del estado de blindaje se toman en cuenta 3 parámetros de molienda, los cuales son: Toneladas de caña molida, extracción reducida y %pol en bagazo, esto es porque es necesario llevar el registro de desgaste por tonelada de caña molida, con lo cual se pretende que en un futuro se pueda predecir de una manera práctica el momento en que se debe de comenzar la inspección y el recargue a las mazas. Los parámetros de extracción reducida y el %pol en bagazo son parámetros que miden la eficiencia de la molienda, y podrían verse afectados por el desgaste de las mazas, por ende, es preciso llevar un seguimiento de estos dos parámetros y tomarse como indicadores de referencia de un posible desgaste en las mazas.
- Los datos recabados en cada mantenimiento deberán ser procesados para generar un registro histórico del desgaste que sufren las mazas, permitiendo así su uso para disminuir problemas futuros en la extracción, esto será; relacionando el %pol en bagazo, extracción reducida, toneladas de caña molidas y el desgaste evidenciado en cada maza superior de cada molino. Todo esto servirá de partida para la toma de decisiones y prevención del desgaste excesivo de los recubrimientos en futuras zafras.

Elaboró: Douglas Pérez, Rigoberto Vasquez	Revisó:	Autorizó:
--	---------	-----------

CONCLUSIONES

- La maza de los molinos estudiada en esta investigación está hecha de una fundición gris ordinaria hipereutética (92.431% Fe, 6.011% C, 0.181% Cr 0.637% Si, 0.489% Mn, 0.005% P, 0.036% Ni, 0.038% Cu, 0.010% Ti, 0.010% Al, 0.013% Pb, 0.002 Sn), con una dureza de 81 HRB y una microestructura compuesta por perlita y hojuelas de grafito en una matriz ferrítica.
- El usar el proceso semiautomático FCAW por robot soldador no representa una ventaja económica ya que el precio de los electrodos en alambre es considerablemente mayor que el de los electrodos en varilla. Si bien el costo la mano de obra se reduce apreciablemente en los procesos FCAW, este costo representa, de acuerdo con el salario para los operarios en soldadura pagado en el país, un bajo porcentaje del costo total.
- El electrodo A, que se aplica mediante el proceso FCAW, parece tener la mejor microestructura y dureza para una adecuada resistencia al desgaste de entre todos los electrodos analizados, lo que podría reducir la frecuencia de aplicación del recubrimiento y producir un menor costo.
- La principal ventaja de la implementación del método de verificación de desgaste propuesto sobre el actual es que el primero permitirá

crear un registro histórico del desgaste progresivo de los dientes de las mazas, lo que les ayudará anticipar el momento adecuado para recargarlas con soldadura, evitando bajas en la extracción debido a la pérdida de rugosidad producida por el desgaste como ha sucedido en zafras anteriores

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de desgaste para estimar de mejor manera el desempeño de cada tipo de recubrimiento y su impacto en el costo.
- Realizar una prueba durante zafra recubriendo una maza con el electrodo A, realizando el control de verificación del desgaste con el objeto de ejecutar una cuantificación más objetiva de la variación de los costos que conlleva la implementación de este electrodo.
- Implementar el proceso de verificación de los dientes de las mazas ya que permite crear un registro histórico del desgaste progresivo y ayudará a anticipar el momento adecuado para recargar las mazas con soldadura, evitando bajas en la extracción debido a la pérdida de rugosidad producida por el desgaste.
- Certificar a los operarios que realizan el recubrimiento, pues es de importancia que el personal sea capacitado para que la deposición tenga las propiedades adecuadas mediante su correcta aplicación.

GLOSARIO

Austenita: Es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en hierro gamma (f.c.c.).

Bagazo de caña: Residuo lignocelulósico, fibroso, obtenido a la salida del último molino del tándem, que, en la fábrica de azúcar, extrae el jugo de la caña.

Blindaje de maza: Proceso de recubrimiento por soldadura de las mazas de molinos de caña.

Caña desfibrada: Caña de azúcar preparada para el proceso de molienda.

Carburo: Compuesto de carbono y otro elemento químico, generalmente metálico.

Cementita: Compuesto intersticial típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil, pero de alta resistencia compresiva.

Chapisco: Tecnología de blindaje de maza en la que se le otorga rugosidad y resistencia al desgaste a los laterales de los dientes de las mazas.

Consumibles: Electrodo en varilla o alambre para el proceso de soldadura.

Cureña: Soportes del conjunto de las mazas que sostienen y dan fortaleza al molino para llevar a cabo su función de exprimido.

Desfibradora: Máquina que desfibra la caña para el proceso de molienda, consta de martillos basculantes montadas a lo largo de un rotor que se instalan con el fin de dejar una holgura entre la punta del martillo y la placa desfibradora, esta posee ranuras perpendiculares al movimiento rotacional de los martillos

Dureza: Resistencia de un material a ser penetrado o rayado.

Espectrometría de emisión óptica: Es una técnica espectroscópica que analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas durante su transición desde un estado excitado a un estado de inferior energía.

Extracción: Proceso en el que se da la separación del jugo y el bagazo de caña en un tandém de molinos.

Ferrita: Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro alfa.

Índice de preparación de caña: Método empleado para cuantificar la preparación de la caña para el proceso de molienda o extracción.

Ledeburita: Es una mezcla eutéctica de austenita y cementita; contiene 4.3% de C y se forma a 2035 °F.

Maza de molino de caña: Rodillo generalmente de fundición gris que comprime la caña en el proceso de extracción.

Metalografía: La metalografía o microscopía estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación.

Molino de caña: Máquina compuesta por rodillos surcados (mazas) que presan la caña de azúcar previamente desfibrada y extraen su jugo en el proceso de extracción

Perlita: Es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de C y se forma a 1333 °F a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita.

Picadora: Máquina encargada de adecuar el tamaño de la caña para el desfibrado final, normalmente se utilizan dos picadoras de caña en serie y con holguras diferentes entre la punta de las cuchillas y los rodillos de los yunques.

Picote: Tecnología de blindaje de mazas, que proporciona agarre en la punta de los dientes al colchón de caña. Se aplica un recubrimiento duro sobre una base de un material más tenaz que pueda absorber posibles impactos generados en el proceso de molienda.

Recubrimiento duro: Consiste en la aplicación de un material de aleación especial sobre una pieza metálica mediante diversos procesos de soldadura, con el fin de mejorar la resistencia al desgaste.

Soldabilidad: Mayor o menor facilidad que ofrecen los materiales para unirse por medio de la soldadura.

Tandém de molinos: Conjunto de molinos en una línea de extracción continua.

BIBLIOGRAFÍA

- American Welding Society. (1987). *Welding handbook* (8 ed., Vol. I). Miami.
- American Society for Metals. (1994). *Surface Engineering* (Vol. 5). United States of América.
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2010). *The Science and Engineering of Materials*. Stamford: CENGAGE LEARNING.
- Apraiz, J. (1963). *Fundiciones*. Madrid: Dossat.
- Aroca Delhi, R. C. (2010). *Análisis de Recubrimientos Duros para Molinos de Caña de Azucar*. Guayaquil.
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. México, D.F., Mexico: McGraw-Hill.
- Benavides Segura, W. M. (2011). *Estudio de la Corrosividad del Jugo de Caña en los Puntos más Criticos del Proceso de Elaboración de Azúcar en el Micro Ingenio de ASPROCA*. Riobamba.
- Boss, C., & Fredeen, K. (1997). *Concepts, Instrumentation, and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. U.S.A: PERKIN ELMER.
- Buchanan, V., Shipway, P., & McCartney, D. (2017). Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*, 263, 99-110. doi:10.1016/j.wear.2006.12.053
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering an introduction*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc
- Casanova, F., & Aguilar, Y. (2008). A study on the wear of sugar cane rolls. *Wear*, 265, 236-243.

- Castro, Y., Casanova, F., Victoria, R., Guerrero, D., & Restrepo, B. (2011). (2011).
Desgaste en acero de bajo carbono debido a la acción de bagazo limpio o
contaminado con sílice y jugo de caña. *Ingeniería y universidad*, 15(2).
- Dogan, O., Hawk, J., & Laird II, G. (1997). Solidification Structure and Abrasion
Resistance of High Chromium White Irons. *Metallurgical and Materials
Transactions A*, 28A, 1315-1328
- Dogan, O., Laird, G. I., & Hawk, J. (1995). Abrasion resistance of the columnar
zone in high Cr white cast irons. *Wear*, 181(183), 342-349.
- Eutectic Castolin. (2013). *Propuesta blindaje de mazas Trapiche Lucerna*
[Archivo PDF].
- Falcón Ortega, A. B. (2002). Aplicación de Recubrimientos Duros - Protectores
por Arco Eléctrico - Electrodo Revestido en las Cuchillas Centrales de
Molinos de Caña. Guayaquil.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: McGraw-
Hill International.
- Gutierrez Pineda, J. C., León Sevilla, L. M., & Toro, A. (2004). Relación
microestructura resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en
cromo y tungsteno aplicados por soldadura electrica (SMAW). *Dyna*,
71(144), 165-171.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of cane sugar engineering*. St. Lucia, Brisbane:
Elsevier science publishers B.V.
- KenchiReddy, K., & Jayadeva, C. (2012). The Effects of Welding Processes on
Microstructure and Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits.
*Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management
Science*, 2(2), 28-34.
- Kobe Steel, LTD. (2015). *The ABC's of the Arc Welding and Inspection*. Tokyo.

- Kumar, S., Mondal, D., & Jha, A. (2000). Effect of Microstructure and Chemical Composition of Hardfacing Alloy on Abrasive Wear Behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 9(6), 649-655.
- Metals Handbook. (1993). *Welding, Brazing, and Soldering (Vol. 6)*. Ohio: ASM international.
- Li, D., Liu, L., Zhang, Y., Ye, C., Ren, X., Yang, Y., & Yang, Q. (2009). Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition. *Materials and Design*, 30, 340-345
- Liu, S., Zhou, Y., Xing, X., Wang, J., Ren, X., & Yang, Q. (2016). Growth characteristics of primary M₇C₃ carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy. *Sci. Rep*, 6. doi:10.103
- Pérez Figueroa, D. E., & Vásquez Zaldaña, R. J. (2018). *Estudio comparativo de los distintos métodos tradicionales, actuales y últimas tendencias en recubrimiento de mazas para mejorar la extracción de jugo de caña del tándem del molino en ingenios azucareros*. San Salvador.
- Oliverio, J. y. (2011). JUICE EXTRACTION SYSTEMS: Mills and Diffusers - The Brazilian Experience. FE11 (pág. 5). São Paulo : DEDINI S/A Indústrias de Base.
- O'neal Coto, K. (17 de Octubre de 2017). Cañeros incursionan en alimentación para ganado. Noticias UCR. Obtenido de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/>
- POSTLE INDUSTRIES, INC. (s.f.). THE ECONOMICS OF HARDFACING. Cleveland.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Berlín, Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG.

- Sakhawy, M., & Hassan, M. (2007). Physical and mechanical properties of micro-crystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers*, 10.
- STOODY. (2018). *HARDFACING ALLOYS For Sugar Mill Applications, Rebuilding & Overlay*. Obtenido de https://www.esabna.com/shared/documents/litdownloads/62-1800_stoodyaeb_sugarindustry_bro_na_eu_10-13-18.pdf
- Roberts, G., Krauss, G., & Kennedy, R. (1998). *Tool Steels*. Material Park, OH: ASM International.
- Tabrett, C. (1997). *Microstructure-Property Relationships in High Chromium White Irons* (Tesis doctoral). South Australia: University of South Australia.
- WageIndicator Foundation. (2019). *Tusalario.org*. Recuperado el 8 de Abril de 2019, de <https://tusalario.org/elsalvador/salario/comparador-salarial#/>

ANEXOS

Anexo A. Peso de una maza de molino antes y después de aplicar recubrimiento duro con el Electrodo B.

En las Figuras A1 y A2 se muestran los resultados del peso de una maza antes y después de aplicarle el recubrimiento duro con el Electrodo B. Estas medidas se utilizaron para validar el valor de eficiencia de deposición obtenida en la muestra para dicho electrodo. El peso BRUTO es el peso de la maza más el peso del camión que se usó para transportar la maza, el peso TARA es el peso del camión y el peso Neto es el peso de la maza, las medidas se encuentran en quintales cortos (un quintal corto equivale a 45,359237 kg) al realizar la conversión se obtienen los valores de 16683.13 y 16701.28 kg que fueron los que se utilizaron en la sección 2.2.2

CLIENTE		GRUPO EL ANGEL		INGRESO / EGRESO	
TIPO DE CUENTA		EGRESO			
TIPO DE COMPROBANTE	PRODUCTO	TIPO DE PRODUCTO	BODEGA No.		
ENVIO	1	MATERIALES VARIOS			
PLACA:	MOTORISTA:	LICENCIA:	RASTRA:		
17	MANUEL NOIASCO				
PESOS	FECHA	HORA	GALONES / SACOS		
PESO BRUTO:	550.60	29/05/2018	13:49:57		
PESO TARA:	182.80	29/05/2018	13:00:49		
PESO NETO:	367.80				
OBSERVACIONES:		MARCHAMOS			
PESA DE MAZA				 	

- TRIPLICADO - TRANSPORTISTA -

Fig. A1 Peso de la maza antes de la aplicación del recubrimiento con el Electrodo B

CLIENTE		GRUPO EL ANGEL		INGRESO / EGRESO	
TIPO DE CUENTA		EGRESO			
TIPO DE COMPROBANTE	PRODUCTO	TIPO DE PRODUCTO	BODEGA No.		
ENVIO	2	MATERIALES VARIOS			
PLACA:	MOTORISTA:	LICENCIA:	RASTRA:		
17	JUAN RODRIGUEZ				
PESOS	FECHA	HORA	GALONES / SACOS		
PESO BRUTO:	552.40	31/05/2018	13:37:36		
PESO TARA:	184.20	31/05/2018	13:26:27		
PESO NETO:	368.20				
OBSERVACIONES:		MARCHAMOS		F. BASCULA	
PESA DE MAZA				INGENIO EL ANGEL, S.A. DE C.V. APOPA	

- TRIPLICADO - TRANSPORTISTA -

Fig. A2 Peso de la maza después de recubrirla con el Electrodo B

Anexo B. Composición química de las muestras proporcionada por el espectrómetro Angstrom V-950 de la planta metalúrgica de Sarti

C:\Angstrom Readout\Cast_Iron.cmtx
12/10/2018

MUESTRA	Fe	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Maza								
Average	92.431	6.011	0.489	0.637	0.005	0.136	0.036	0.181

MUESTRA	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg	Sn	Pb
Average	0.038	<0.001	<0.001	0.010	0.010	<0.001	0.002	0.013

MUESTRA	Co	W	Nb					
Average	<0.001	<0.001	<0.001					

Average	0.003	0.022	0.009					
---------	-------	-------	-------	--	--	--	--	--

Fig. A3 Composición química de la maza en %

C:\Angstrom Readout\Cast_Iron.cmtx
19/10/2018

MUESTRA	Fe	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Electrodo A								
Average	73.541	3.849	0.846	0.962	0.013	0.033	0.077	20.067

MUESTRA	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg	Sn	Pb
Average	0.046	<0.001	0.462	0.064	0.013	0.006	0.003	<0.001

MUESTRA	Co	W	Nb					
Average	0.016	<0.001	0.002					

Fig. A4 Composición química del Electrodo A en %

C:\Angstrom Readout\Cast_Iron.cmtx

18/10/2018

MUESTRA	Fe	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Electrodo B								
Average	75.545	3.556	0.254	0.867	0.007	0.016	0.059	19.293

MUESTRA	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg	Sn	Pb
Electrodo B								
Average	0.079	<0.001	0.033	0.074	0.035	0.003	0.009	0.094

MUESTRA	Co	W	Nb					
Electrodo B								
Average	0.007	0.052	0.019					

Fig. A5 Composición química del Electrodo B en %

C:\Angstrom Readout\Cast_Iron.cmtx

20/10/2018

MUESTRA	Fe	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Electrodo C								
Average	82.844	4.085	0.335	0.972	0.025	0.016	0.096	11.117

MUESTRA	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg	Sn	Pb
Electrodo C								
Average	0.121	<0.001	0.336	0.009	0.011	0.006	0.011	<0.001

MUESTRA	Co	W	Nb					
Electrodo C								
Average	0.012	0.005	0.003					

Fig. A 6 Composición química del Electrodo C en %

C:\Angstrom Readout\Cast_Iron.cmtx

20/10/2018

MUESTRA	Fe	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Electrodo D								
Average	90.333	3.175	0.500	1.055	0.005	0.039	0.025	4.463

MUESTRA	Cu	Mo	V	Ti	Al	Mg	Sn	Pb
Electrodo D								
Average	0.047	<0.001	0.204	0.021	0.033	<0.001	<0.001	0.071

MUESTRA	Co	W	Nb					
Electrodo D								
Average	0.003	0.022	0.009					

Fig. A7 Composición química del Electrodo D en %

Anexo C. Comparación de diversas escalas de dureza

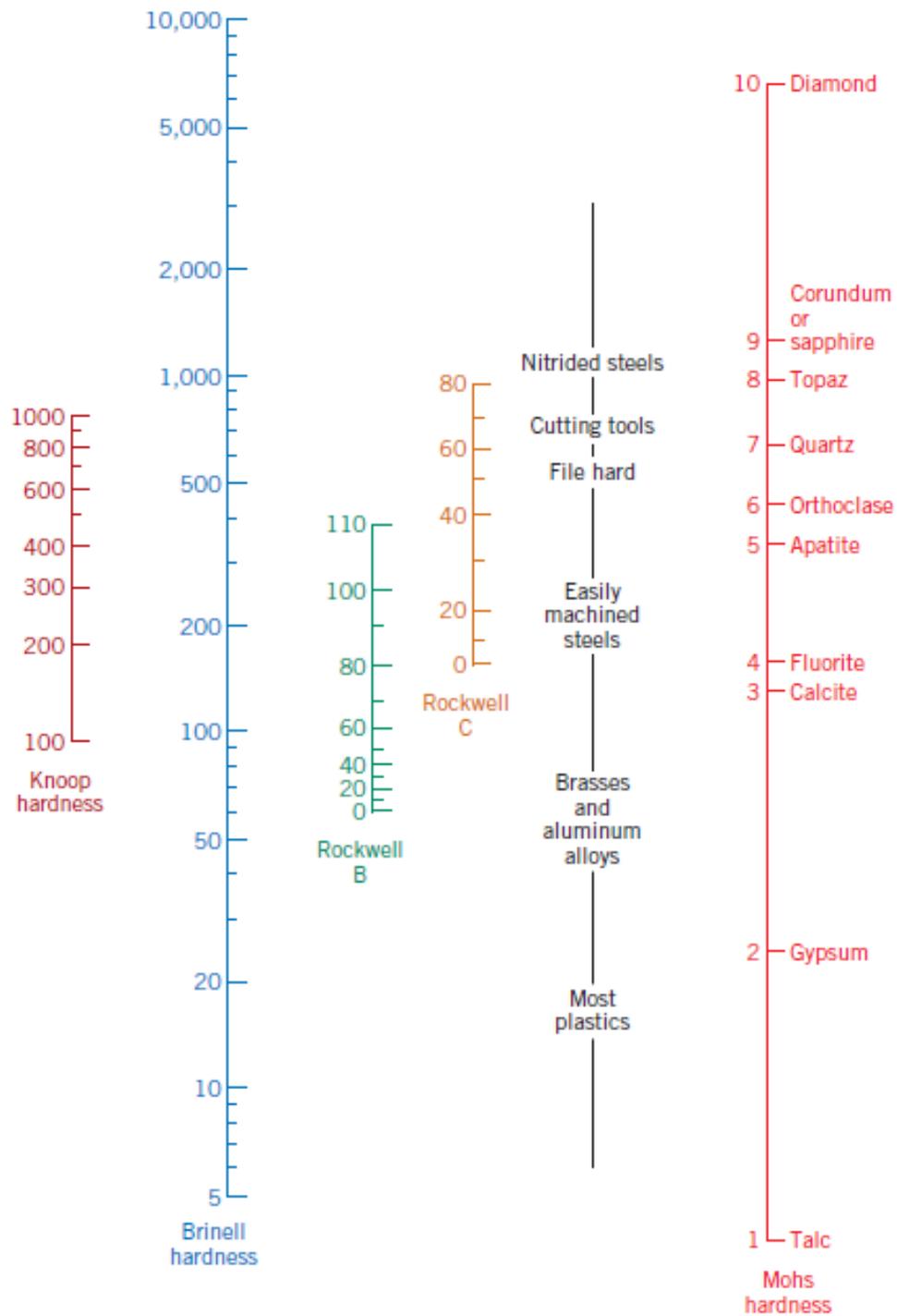


Fig. A4 Comparación de diversas escalas de dureza. Obtenida de (Callister, 2007)

Anexo D. Medidas de dureza tomadas directamente de los durómetros.

Tabla de resultados de ensayo de dureza para muestras de molinos de caña
Operador: Douglas Enrique Pérez Figueroa

Material	Ensayo	Zona	Resultado	Observaciones
Electrodo A	1	ext. Izq.	60 HRC	
	2	centro	61 HRC	
	3	ext. Der.	59 HRC	
	Promedio		60	
Material	Ensayo	Zona	Resultado	Observaciones
Electrodo B	1	ext. Izq.	58 HRC	
	2	centro	58 HRC	
	3	ext. Der.	60 HRC	
	Promedio		58.667	
Material	Ensayo	Zona	Resultado	Observaciones
Electrodo C	1	ext. Izq.	60 HRC	
	2	centro	60 HRC	
	3	ext. Der.	59 HRC	
	Promedio		59.67	
Material	Ensayo	Zona	Resultado	Observaciones
Electrodo D	1	ext. Izq.	56 HRC	
	2	centro	57 HRC	
	3	ext. Der.	58 HRC	
	Promedio		57	
Material	Ensayo	Zona	Resultado	Observaciones
Fundición	1	ext. Izq.	81 HRB	
	2	centro	80.5 HRB	
	3	ext. Der.	82.2 HRB	
	Promedio		81.23	