

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Análisis de Recubrimientos Duros para Molinos de Caña de
Azúcar.

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Ronny Cristóbal Aroca Delhi

GUAYAQUIL-ECUADOR

AÑO: 2010

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme y darme fuerzas para seguir siempre adelante ante cualquier adversidad.

A mis padres por todo el amor, confianza que siempre me han ofrecido y su apoyo incondicional en todas mis metas propuestas.

Al Ingeniero Julián Peña por haber sido mi guía en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

MIS PADRES

A MIS HERMANOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marcelo Espinosa L.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITOTAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

Ronny Cristóbal Aroca Delhi

RESUMEN

En la industria azucarera un componente importante de los costos de producción es el costo por mantenimiento de los equipos que intervienen en los procesos. A partir de la caña, fenómenos como el desgaste están presentes en varios de los procesos, en especial en la preparación y en la molienda.

Este tipo de industria tiene la particularidad que deben aprovechar al máximo el tiempo de zafra, la cual es la temporada del año en la que se realiza la cosecha de la caña de azúcar, es por este motivo que se debe asegurar el funcionamiento óptimo de los equipos, el área de extracción compuesta por los molinos es bastante crítica, debido a que deben asegurar al máximo la extracción del jugo de caña.

Debido al elevado costo que genera una parada de producción, además de los costos muy representativos que se generan por mantenimiento de los molinos, siempre se está tratando de buscar nuevas alternativas para disminuir estos costos.

El objetivo de esta tesis es hacer un análisis del recubrimiento duro comúnmente utilizado en los molinos para combatir el desgaste, verificar que

tan eficiente es este proceso y hacer un estudio de alternativas para mejorar el proceso de blindaje.

En el capítulo 1, se hace referencia a las particularidades que se presentan en la etapa de extracción del jugo de caña de azúcar, al material del cual están fabricados los molinos, los tipos de desgaste y sus consecuencias, y los diferentes recubrimientos a analizar.

En el capítulo 2, se describe la metodología de trabajo que se llevo a cabo durante esta investigación y se detalla cada uno de los ensayos a los cuales van a ser sometidos las probetas, y obtener resultados para su posterior análisis.

En el capítulo 3, se presenta un análisis tanto técnico como económico sobre el proceso de blindaje de los molinos, en el cual se puede apreciar los beneficios que generan una adecuada aplicación, y las ventajas que se pudiera presentar un procedimiento frente a otro.

En el capítulo 4, se emiten las conclusiones y recomendaciones a considerar en el blindaje de los molinos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
INTRODUCCIÒN	1

CAPÍTULO 1

1. DESGASTE EN MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR ...	3
1.1 Proceso de extracción	3
1.1.1 Particularidades	4
1.1.2 Mazas de Molinos	7
1.1.3 Desgaste de molinos de caña de azúcar	8
1.2 Uso de mazas de fundición	11

1.2.1 Ventajas y desventajas.....	12
1.2.2 Propiedades de la fundición gris	13
1.2.3 Preparación de los molinos	15
1.3 Mecanismos de desgaste	17
1.3.1 Abrasión	17
1.3.2 Fricción	18
1.3.3 Corrosión	19
1.4 Recubrimientos Duros	20
1.4.1 Recubrimientos duros resultantes	21
1.4.2 Descripción de los recubrimientos a analizar	22

CAPÍTULO 2

2. PRUEBAS DE LABORATORIO	24
2.1 Metodología de la investigación	24
2.2 Metalografía	28
2.3 Barrido de Dureza	42
2.4 Análisis Químico	44

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
3.1 Análisis Técnico	54
3.2 Análisis Económico	61

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
---	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

T.C	Toneladas de caña
Sac.	Sacarosa
Ef.	Eficiencia
Perd.	Perdida
ZA	Zona de aporte
ZF	Zona de fusión
ZAT	Zona Afectada Térmicamente
HH	Horas Hombre

SIMBOLOGÍA

HRc Dureza Rockwell C

Kg kilogramo

m Metro

° Grado

Ton Tonelada

Rpm Revoluciones por minuto

\$ Dólares

C Carbono

Cr Cromo

Fe Hierro

Ti Titanio

Mo Molibdeno

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Recepción de caña de azucar	4
Figura 1.2 Tándem de Molinos,.....	5
Figura 1.3 Vista de un Molino en Operación	6
Figura 1.4 Componentes de un Molino	6
Figura 1.5 Vista de una Maza de Molino	7
Figura 1.6 Descripción de los dientes de las mazas	8
Figura 1.7 Vista Frontal de mazas desgastadas	9
Figura 1.8 Vista lateral de mazas desgastadas	10
Figura 1.9 Clasificación de las láminas de grafito según la forma, Tamaño y distribución	13
Figura 1.10 Microestructura del hierro gris (ferrita y perlita)	14
Figura 1.11 Detalle dientes previo a blindaje	16
Figura 1.12 Detalle aplicación recubrimiento	16
Figura 1.13 Fotografía durante aplicación de recubrimiento	21
Figura 2.1 Vista del Material base con recubrimiento aplicado	25
Figura 2.2 Material base 100X sin ataque	29
Figura 2.3 Material base 100x con ataque	29
Figura 2.4 Material base 400x con ataque	30
Figura 2.5 Material base 500x con ataque	30
Figura 2.6 ZA Producto A-400X	31
Figura 2.7 ZA 400X Producto B-1	32
Figura 2.8 ZA 400X Producto C	32
Figura 2.9 ZF 50X producto A-1	33
Figura 2.10 ZF 50X producto A-2	33
Figura 2.11 ZF 100X producto A-1	34
Figura 2.12 ZF 100X producto A-2	34
Figura 2.13 ZF 400X producto A-1	34
Figura 2.14ZF 400X producto A-2	35
Figura 2.15 ZF 50X producto B-1	35
Figura 2.16 ZF 50X producto B-2	36
Figura 2.17 ZF 100X producto B-1.....	36
Figura 2.18 ZF 100X producto B-2	36
Figura 2.19 ZF 400X producto B-1.....	36

Figura 2.20 ZF 400X producto B-2	36
Figura 2.21 ZF 50X producto C	37
Figura 2.22 ZF 100X producto C	37
Figura 2.23 ZF 400X producto C	38
Figura 2.24 ZAT 50X producto A-1	38
Figura 2.25 ZAT 50X producto A-2	38
Figura 2.26 ZAT 400X producto A-1.....	39
Figura 2.27 ZAT 400X producto A-2	39
Figura 2.28 ZAT 500X producto A-1.....	39
Figura 2.29 ZAT 500X producto A-2	39
Figura 2.30 ZAT 50X producto B-1.....	40
Figura 2.31 ZAT 50X producto B-2	40
Figura 2.32 ZAT 400X producto B-1.....	40
Figura 2.33 ZAT 400X producto B-2	41
Figura 2.34 ZAT 500X producto B-1.....	41
Figura 2.35 ZAT 500X producto B-2	41
Figura 2.36 ZAT 50X producto C	42
Figura 2.37 ZAT 500X producto C	42
Figura 2.38 Distribución barrido de dureza	42
Figura 2.39 C Equivalente Probeta A	45
Figura 2.40 Cr Equivalente Probeta A	45
Figura 2.41 Mn Equivalente Probeta A	45
Figura 2.42 Si Equivalente Probeta A	46
Figura 2.43 Fe Equivalente Probeta A	46
Figura 2.44 C Equivalente Probeta B	48
Figura 2.45 Cr Equivalente Probeta B	48
Figura 2.46 Fe equivalente Probeta B	48
Figura 2.47 Cr Equivalente Probeta C	49
Figura 2.48 Fe Equivalente Probeta C	49
Figura 2.49 Mn Equivalente Probeta C	50
Figura 2.50 Mo Equivalente Probeta C	50
Figura 2.51 Ti Equivalente Probeta C	50
Figura 2.52 Fotografía de Microscopio utilizado	51
Figura 2.53 Fotografía durante medición dureza	52
Figura 2.54 Fotografía durante microscopia electrónica de barrido	52
Figura 2.55 Fotografía durante análisis microscopia electrónica	53
Figura 3.1 Grafico Velocidad turbinas versus semanas de Operación	55

Figura 3.2 Zona de Fusión de los recubrimientos utilizados	56
Figura 3.3 Variación de valores de dureza en Producto A	57
Figura 3.4 Variación de valores de dureza en Producto B	58
Figura 3.5 Variación de valores de dureza en Producto C	58
Figura 3.6 Valores de dureza y abrasión de varios depósitos de Recubrimientos duros	60
Figura 3.7 Pérdida dinero por pérdida en eficiencia	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48-41	14
Tabla 2	Clasificación y denominación de las probetas	26
Tabla 3	Mediciones de dureza Probeta A-1	43
Tabla 4	Mediciones de dureza Probeta A-2	43
Tabla 5	Mediciones de dureza Probeta B-1	43
Tabla 6	Mediciones de dureza Probeta B-2	44
Tabla 7	Mediciones de dureza Probeta C	44
Tabla 8	Equivalente porcentual de elementos presentes en el Producto A	47
Tabla 9	Equivalente porcentual de elementos presentes en el Producto B.....	49
Tabla 10	Porcentaje de Elementos en el Producto C	50
Tabla 11	Consumo de soldadura por año	62
Tabla 12	Costo anual por recubrimiento del Tándem de molinos	62
Tabla 13	Calculo de extracción con 1,7 % Pol en bagazo	64
Tabla 14	Calculo de extracción con 2 % Pol en bagazo	64
Tabla 15	Calculo de extracción con 2,5 % Pol en bagazo	65
Tabla 16	Calculo de extracción con 3 % Pol en bagazo	65
Tabla 17	Calculo de extracción con 4 % Pol en bagazo	66
Tabla 18	Calculo de extracción con 5 % Pol en bagazo	66
Tabla 19	Perdida de eficiencia en la extracción como consecuencia del desgaste	67
Tabla 20	Azúcar no aprovechada por pérdida de eficiencia	68
Tabla 21	Costo por pérdida en extracción	68

INTRODUCCIÓN

Todo el estudio para generar este trabajo de Tesis de grado se realizó en un ingenio azucarero, pero para esto se analizó una sección específica, el área de molienda, en la cual se estudió el comportamiento de un tándem de molinos que tiene una capacidad de molienda de 380 Ton/h, el cual fue monitoreado para identificar que fenómenos se presentan.

En la industria azucarera y en cualquier tipo de industria, un costo muy importante es el que se genera por mantenimiento de los equipos de trabajo pesado que se utilizan para producir, y al realizar una inversión en estos, siempre se espera que el equipo tenga una alta confiabilidad con una buena eficiencia, y no ocasione paradas de producción, lo cual se contrasta con pérdidas de dinero.

La durabilidad de una maza es aproximadamente 3 años, el objetivo en particular es asegurar la conservación con los recubrimientos protectores usados para dicho fin, y analizar los métodos tradicionales que suelen realizarse en torno al mantenimiento de estos componentes durante la parada del trapiche.

En el monitoreo realizado, se identificó que según transcurría el tiempo la extracción de sacarosa en los molinos variaba, y uno de los pilares en los que se fundamenta una buena extracción es la protección contra el desgaste que se le da a los componentes del tándem, para este caso el estudio se baso en el análisis de uno de los componentes primordiales de un molino que son las mazas.

Idealmente todas las mazas de un molino deberían conservar sus dimensiones originales durante toda la época de molienda, pero en realidad esto no ocurre, estas sufren un gran desgaste, lo cual se traduce a pérdida en eficiencia.

Esto ha llevado a una constante búsqueda de nuevos productos para asegurar una buena protección y evitar un desgaste prematuro, para ello se realiza un proceso conocido como blindaje, que consiste en la aplicación de soldadura dura.

Es por ello que se estudio este proceso, con el objetivo de encontrar una mejoría y conocer de manera clara las ventajas que le representa a este tipo de industrias les trae controlar este parámetro tan importante como es el desgaste.

CAPÍTULO 1

1. DESGASTE EN MAZAS DE MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR

1.1 Proceso de extracción

En el proceso de extracción de sacarosa, los resultados dependen principalmente del ajuste de las partes del molino. El desgaste sufrido por los componentes origina un aumento de las tolerancias entre ellos, originando una pérdida de eficiencia en la extracción.

Idealmente todas las piezas del molino deberían conservar sus dimensiones durante todo el periodo de molienda.

El mantenimiento preventivo permite conservar las dimensiones de componentes de molinos por más tiempo, incluso a velocidades más altas y con mayores cargas.

1.1.1 Particularidades

En la extracción por molienda la configuración del equipamiento principal se muestra dos áreas bastante diferenciadas: el área de preparación y el área de extracción (molinos). En el área de preparación, como su nombre lo indica, se crea las condiciones en la materia prima (caña) para que en los molinos se realice la extracción de forma óptima, un mínimo de potencia requerida en las máquinas que mueven el equipamiento, y un mínimo de desgaste de los molinos, en la figura 1.1 se muestra una vista panorámica de la recepción de la caña de azúcar.



Figura 1.1 RECEPCION DE CAÑA DE AZUCAR

El tren de molinos conocido como tándem, está conformado generalmente por un conjunto de 4 a 7 unidades, en la Figura 1.2 se muestra un esquema de un tándem de molienda típico de 6 unidades, cada uno dotado de 4 mazas, el cual está más detallado en la figura 1.4. Entre cada pareja de mazas se hace pasar el colchón fibroso, comprimiéndolo y se envía su jugo a lavar, el bagazo en la entrada del molino anterior, conformándose en un sistema de extracción compuesto por compresión mecánica y lixiviación a contraflujos.

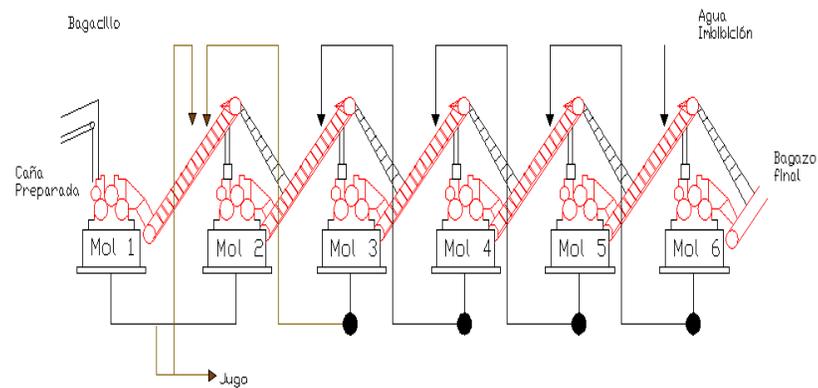


Figura 1.2 TÁNDEM DE MOLINOS

A simple vista parece algo extraño tener 4, 5 o 7 molinos si de todas maneras se está pasando una misma cantidad de bagazo por cada uno de ellos, pero todo tiene su explicación, y la respuesta a esto la da la mínima extracción permisible, en un tándem corto el grueso del colchón de bagazo debe reducirse

para obtener una extracción satisfactoria, mientras en uno más largo puede aumentarse en proporción al largo de ellos.



Figura 1.3 VISTA DE UN MOLINO EN OPERACIÓN

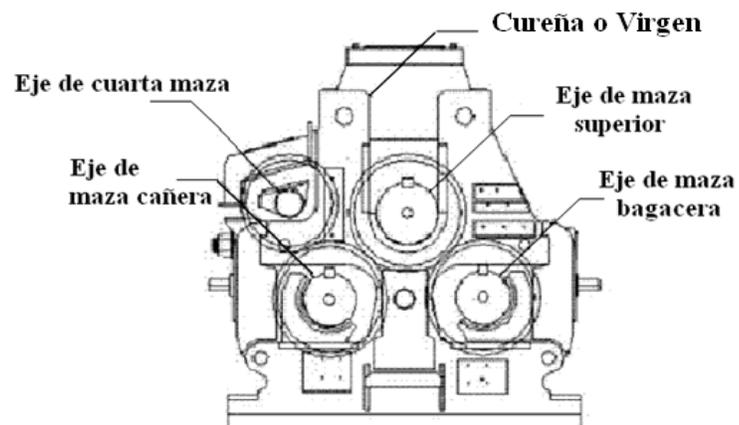


Figura 1.4 COMPONENTES DE UN MOLINO

La capacidad de un tándem de molinos está dada por la cantidad de caña que este es capaz de pasar por unidad de

tiempo. Se expresa generalmente en Toneladas de caña (T.C) por hora.

1.1.2 Mazas de molinos

Se llama así a los rodillos ranurados que comprimen el bagazo extrayendo el jugo, con camisas de hierro fundido montadas sobre los ejes de acero SAE 1045 forjados y normalizados, tal como se puede apreciar en la figura 1.5.

A las ranuras de las mazas se les da el nombre de dientes y al comprimir el colchón de bagazo lo divide facilitando la extracción del jugo, la sección de los dientes es un triángulo isósceles cuyo ángulo superior es de 45° .



Figura 1.5 VISTA DE UNA MAZA DE MOLINO

Los dientes se caracterizan por su altura h y su paso p , tal como se muestra en la figura 1.6. Se les designa por estos 2 números

citándolos por el orden indicado, “ranuras 10x13”, por ejemplo lo que significa: ranuras de 10 mm de alto por 13 mm de paso.

El paso es la distancia que separa a los ejes de 2 dientes sucesivos.

La altura o profundidad es la distancia que separa al plano de la punta del fondo de los dientes, medida perpendicularmente al eje. El ranurado de las cuatro mazas se realiza de manera que engranen entre sí.

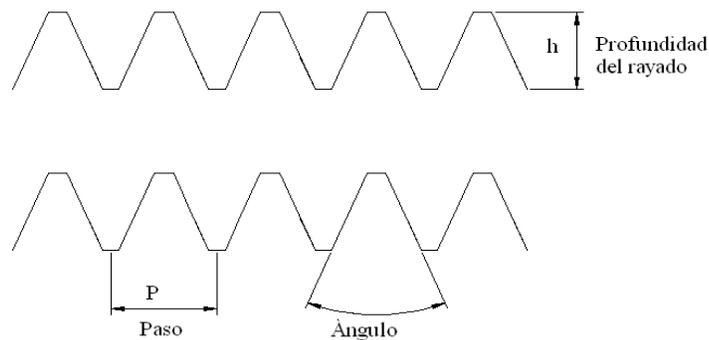


Figura 1.6 DESCRIPCIÓN DE LOS DIENTES DE LAS MAZAS

1.1.3 Desgaste de molinos de caña de azúcar

Entre la caña que llega a las fábricas también se encuentra una importante cantidad de materia extraña, mineral que se incorpora a la caña en el proceso de cosecha, sobre todo en el

levantamiento si éste es realizado mecánicamente, debido a que las alzadoras al recoger la caña incorporan restos de suelo. Este contenido de materia extraña aumenta significativamente en épocas lluviosas.

Las altas presiones que se dan, el movimiento relativo entre la maza y la caña, y la presencia de materia extraña mineral generan altas tasas de desgaste en la superficie de la maza. Se piensa que además del bagazo, la materia extraña es responsable del desgaste dada la presencia de rayaduras en la superficie de los dientes, algunas observables a simple vista y que no pueden culparse solamente al rozamiento entre la maza y el bagazo.



Figura 1.7 VISTA FRONTAL DE MAZAS DESGASTADAS



Figura 1.8 VISTA LATERAL DE MAZAS DESGASTADAS

El desgaste en una maza de molino se evidencia por la deficiente alimentación de la caña y la caída en la extracción, y también visualmente cuando es muy intensivo, tal como se presenta en las figuras 1.7 y 1.8. Se considera que en una maza ocurre tres tipos de desgaste: el desgaste erosivo, el corrosivo y el abrasivo.

Consecuencias del desgaste

El desgaste de cascos de maza representa uno de los costos de mantenimiento por equipo más altos de la industria azucarera, y por esto los ingenios azucareros realizan esfuerzos por controlarlo evaluando permanentemente nuevas tecnologías que involucran combinaciones de materiales de recubrimiento y topografías. En estas evaluaciones se ha

puesto atención en el costo de aplicarla tecnología durante el cambio de molino en óptimas condiciones.

Sin embargo, si se reconoce que el desgaste de cascotes de maza tiene otros efectos implícitos como lo son el aumento de consumo energético, la disminución en la extracción de sacarosa y el aumento de tiempo perdido.

1.2 Uso de mazas de fundición

La preferencia por la fundición gris se sustenta en que es un material de fácil colada, por sus buenas propiedades contra el desgaste y además por que el reemplazo de una maza gastada es menos costoso comparada con una de acero.

Con el fin de proteger las mazas contra el desgaste se aplica un recubrimiento duro sobre la cresta y los flancos de los dientes con materiales que generalmente son fundiciones blancas con alto contenido de cromo.

Debido a la baja soldabilidad de la fundición se hace necesario la aplicación de una capa intermedia de acero dúctil (colchón) entre el material base (fundición gris) y el recubrimiento para absorber las tensiones internas que resultan a causa de los gradientes térmicos, de

las diferencias en tasas de contracción y de las diferencias en módulo de elasticidad entre el material base y el recubrimiento.

1.2.1 Ventajas y desventajas.

Una de las ventajas principales del acero frente a la fundición gris es su buena soldabilidad, lo cual permite que una maza pueda ser recuperada con soldadura cuando ha perdido demasiado material producto del desgaste. Al poder recuperar la maza por medio de soldadura se evita tener que sustituirla por una nueva. Sin embargo, los costos de recubrimiento duro y la reconstrucción de mazas desgastadas pueden resultar también muy altos.

En contraste a lo mencionado, en las mazas de acero se hace blindar la mayor área posible del diente, ya que a diferencia de la fundición de acero, debido al desgaste, se pule, pierde agarre sobre la fibra y permite que haya mayor movimiento relativo entre la caña y maza, lo que acelera el desgaste.

1.2.2 Propiedades de la fundición gris

La mayor parte del contenido de carbono en el hierro gris se da en forma de escamas o láminas de grafito, las cuales dan al hierro su color y sus propiedades deseables.

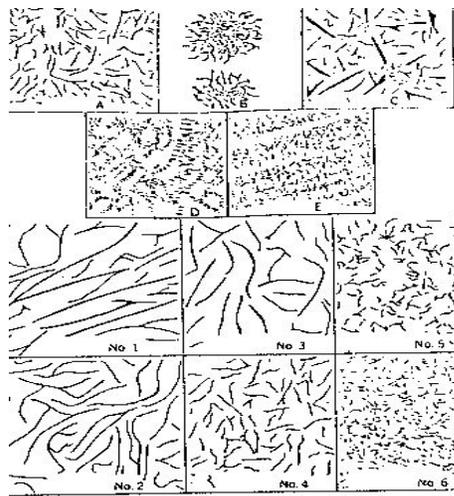
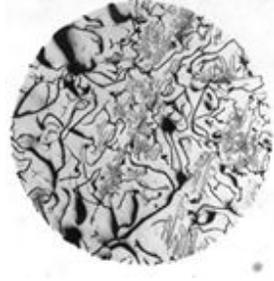


Figura 1.9 CLASIFICACIÓN DE LAS LÁMINAS DE GRAFITO SEGÚN LA FORMA, TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN

El hierro gris es fácil de maquinar, tiene alta capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción.



**Figura 1.10 MICROESTRUCTURA DEL HIERRO GRIS
(FERRITA Y PERLITA)**

El hierro gris se utiliza bastante en aplicaciones como bases o pedestales para máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada, y bloques de cilindros para motores de vehículos, discos de frenos, herramientas agrícolas entre otras.

**Tabla 1
CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES GRISES SEGÚN LA
NORMA ASTM A48-41.**

Clase	Resistencia a la tracción-psi	Dureza Brinell	Estructura
20	24000	130-180	F,P
30	34000	170-210	F,P,G
40	44000	210-260	P,G
50	54000	240-280	P,G
60	64000	260-300	B,G

Particularmente se hará énfasis a la fundición gris clase 30 de la norma ASTM A48, debido a que esta fundición es la usada para la fabricación de las mazas de los molinos de caña de azúcar.

1.2.3 Preparación de los molinos

La preparación de los molinos para el proceso de blindaje, consiste en la adecuación de sus mazas para dicha acción.

Debido a que las mayores presiones y velocidades tangenciales en un diente se presentan en las crestas y en la parte superior de los flancos, son estas regiones las que generalmente se blindan con soldadura resistente al desgaste.

El perfil mostrado en la figura 1.11, se lo obtiene con un maquinado en el cual se debe tener la precaución de mantener el ángulo de los dientes, y definir la profundidad para la aplicación apropiada del recubrimiento, lo cual se puede observar en la figura 1.12.

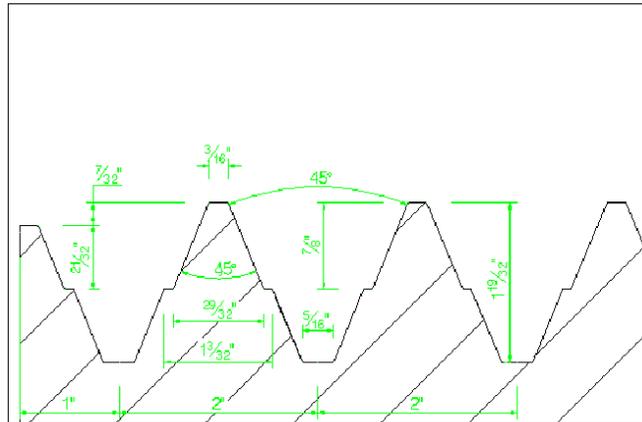


Figura 1.11 DETALLE DIENTES PREVIO A BLINDAJE

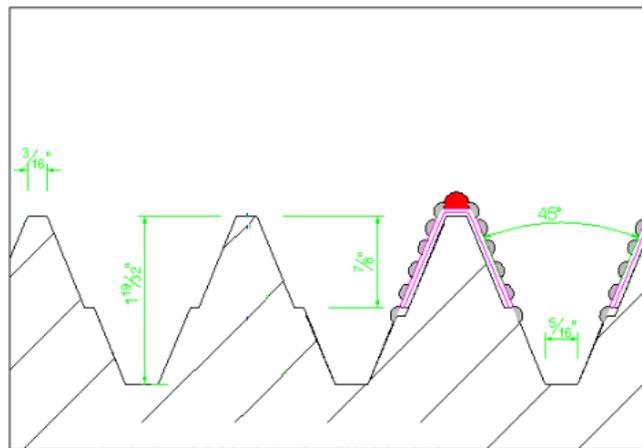


Figura 1.12 DETALLE DE APLICACIÓN RECUBRIMIENTO

1.3 Mecanismos de desgaste

Los más importantes mecanismos de desgaste en la industria azucarera son la abrasión y la corrosión, siendo la abrasión el más crítico en el proceso de preparación y molienda de la caña.

El desgaste es el deterioro progresivo resultante de la utilización o del medio ambiente, la separación de las partículas de un molino puede producirse por contacto abrasivo metálico o no metálico, o por contacto entre líquidos.

Los tipos de desgaste que se producen en un molino ocurren de manera simultánea, pero se analizará inicialmente de manera individual.

El principal es el desgaste abrasivo producido por el bagazo e impurezas, desgaste friccional producido por el roce entre la masa cañera y la cuchilla central y el desgaste por corrosión producido por el jugo.

1.3.1 Abrasión

El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas duras, como 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, puede clasificarse como:

- a. Abrasión de bajo esfuerzo, donde los esfuerzos no son lo suficientemente altos para romper la partícula abrasiva.
- b. Abrasión de alto esfuerzo, donde la partícula es sometida a cargas que ocasionan su fractura.
- c. Abrasión con desgarramiento, que abrasión de alto esfuerzo acompañado de impacto.

Una gran variedad de aleaciones se utilizan para proteger contra el desgaste de los diferentes elementos del molino, y las diferencias observadas en las ratas de desgaste están relacionadas directamente con la microestructura de la aleación utilizada.

1.3.2 Fricción

Ocurre cuando un metal roza con otro, el elemento más suave se desgastará y el más duro se protege, el movimiento relativo de las dos superficies crea un aumento considerable de la temperatura localizada y causa una oxidación superficial.

En el molino este desgaste se presenta durante el trabajo que realiza la cuchilla central de limpiar los fondos de los dientes de la maza cañera, esto obliga a acercar la cuchilla a la maza, una manera de reducir este tipo de desgaste es controlando este ajuste.

La cuchilla no debe estar pegada a la maza para realizar la limpieza de los dientes puede estar abierta máximo unos tres milímetros porque de lo contrario la maza se embarazaría y la cuchilla se desgastará de manera acelerada.

Actualmente está generalizada la aplicación de recubrimientos duros protectores en las mazas de los molinos de caña, el factor principal es disminuir el desgaste y darle asperezas, para que las mazas tengan un mejor agarre, mejorando la productividad y los índices de extracción.

1.3.3 Corrosión

El desgaste corrosivo en el area de molienda ocurre por una reaccion de naturaleza electroquímica en la superficie del metal, porque los fluidos que se manejan además de tener valores de pH ácidos poseen una gran cantidad de sólidos

insolubles.

Cuando un medio corrosivo se pone en contacto con una superficie metálica con movimiento relativo se pueden presentar diferentes casos en el mecanismo de desgaste metálico, pero en todos el efecto total es mayor que la suma de los desgastes producidos por cada uno de ellos.

Si el metal se pasiva, un incremento posterior de la velocidad provoca la destrucción mecánica de la capa pasiva y el aumento consiguiente de la velocidad de corrosión.

1.4 Recubrimientos duros

Los recubrimientos duros-protectores, consisten en la aplicación a una pieza de metal, de una capa superficial más dura y resistente que el metal base. Este recubrimiento se aplica por varias razones: para resistir la corrosión, para protección contra altas temperaturas o cambios bruscos de temperatura y para resistir el desgaste causado por abrasión, erosión, fricción o impacto.

Algunas ventajas de este recubrimiento son:

- Se pueden usar metales más baratos y suaves como metal base y aplicarles una superficie dura.

- Debido a los beneficios de mayor resistencia al desgaste del material para recubrimiento, las piezas de un equipo durarán más tiempo.
- Se pueden restaurar muchas piezas de equipos sin necesidad de desmontarlas.

1.4.1 Recubrimientos duros resultantes

Las fundiciones blancas de alto cromo depositadas por soldadura son el recubrimiento duro más utilizado para combatir el desgaste en mazas de molinos de caña.



Figura 1.13 FOTOGRAFÍA DURANTE APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO

Las fundiciones blancas de alto cromo, dependiendo del carbono equivalente, pueden ser del tipo hipoeutéctica si su microestructura consta de dendritas de austenita en una matriz

eutéctica compuesta a su vez por un agregado de austenita y carburos; o pueden ser eutécticas con la composición química y las condiciones de enfriamiento adecuadas; o bien su microestructura puede ser del tipo hipereutéctica, la cual consta de carburos primarios en una matriz eutéctica. Los carburos presentes en una fundición dependen de los elementos de aleación y de su porcentaje. Para la fundición blanca aleada con cromo se pueden presentar carburos del tipo M_3C , M_7C_3 y $M_{23}C_6$, donde M representa varios elementos, en este caso Fe y Cr. Los carburos que por lo general se encuentran en los recubrimientos de maza y en muchas otras aplicaciones de recubrimiento duro por soldadura son los del tipo M_7C_3 .

1.4.2 Descripción de los recubrimientos a analizar

A continuación se presentan tres diferentes recubrimientos que se utilizarán para el desarrollo de este estudio, con sus respectivas composiciones químicas, los cuales se los ha clasificado de la siguiente manera.

- Producto A
- Producto B
- Producto C

El Producto A, contiene teóricamente una aleación compuesta por: C- 4%; Mn- 1,8%; Si: 1,2%; Cr- 31%, para los ensayos se utilizará un electrodo de 4 mm, con los siguientes parámetros:

- Corriente: 160 A
- Voltaje: 220 V
- Velocidad de aporte: 0.26 cm/s

El Producto B, contiene teóricamente una aleación compuesta por: C- 4,5%; Cr- 28%; lo restante de Fe, para los ensayos se utilizará un electrodo de 4 mm, con los siguientes parámetros:

- Corriente: 150 A
- Voltaje: 220 V
- Velocidad de aporte: 0.26 cm/s

El Producto C, contiene teóricamente una aleación compuesta por: C- 1,8%; Mn- 2%; Cr- 7%; Mo- 0.6; Ti- 5%; lo restante de Fe, para los ensayos se utilizará un electrodo de 2.8 mm, con los siguientes parámetros:

- Corriente: 280 A
- Voltaje: 440 V
- Velocidad de aporte: 0,26 cm/s

CAPÍTULO 2

2. PRUEBAS DE LABORATORIO

En el presente capítulo se trata de poner en consideración las técnicas de laboratorio que permitan determinar las propiedades del recubrimiento, las cuales sean óptimas para la protección del material base.

Tal como se menciona en el capítulo anterior, se ha previsto designar a las tres marcas utilizadas para esta investigación como producto A, B, C, para omitir su nombre comercial.

2.1 Metodología de la Investigación

Con el propósito de indagar en las bondades o perjuicios que genera la aplicación de un recubrimiento al material base, y a su vez determinar alguna mejora en el procedimiento de blindaje, se realizaron las siguientes pruebas:

- Metalografía
- Barrido de dureza
- Análisis químico

El procedimiento fue obtener muestras del material del cual están compuestas las mazas, en este caso es fundición gris ASTM A48 Clase 30, cuyas propiedades se mencionaron en el capítulo anterior.

Se obtuvieron cinco muestras de 12x7x3cm a las cuales se le aplicaron los siguientes recubrimientos:

- Producto A
- Producto B
- Producto C

En la figura 2.1 se puede observar una de las muestras después de haber sido aplicado el recubrimiento.



Figura 2.1 VISTA DEL MATERIAL BASE CON RECUBRIMIENTO APLICADO.

Tabla 2

CLASIFICACIÓN Y DENOMINACIÓN DE LAS PROBETAS

Número de Probeta	Producto	Especificación	Denominación
1	A	Dos cordones de soldadura en la superficie con una pasada de soldadura.	A-1
2	A	Dos cordones de soldadura en la superficie con dos pasadas de soldadura.	A-2
3	B	Dos cordones de soldadura en la superficie con una pasada de soldadura.	B-1
4	B	Dos cordones de soldadura en la superficie con dos pasadas de soldadura.	B-2
5	C	Dos cordones de soldadura en la superficie con una pasada de soldadura.	C-1

Luego de esto cada muestra fue seccionada en tres partes, haciendo un total de quince probetas de 1.5x7x1.5cm, con esto se obtuvo cinco probetas para cada una de las pruebas a correspondientes.

Además, estas fueron sometidas a un proceso de rectificado, para obtener una superficie regular y adecuada para realizar las pruebas ya mencionadas.

Para el análisis metalográfico, se realizó una preparación de las probetas, con un banco de lijas, grano 120-220-300-400-600, y un pulido final con alúmina.

Ataque químico

- Para el material base- Nital
- Para la zona de aporte- Vilela

Para el análisis químico, se tuvo que realizar una modificación en la dimensión de la superficie a ser observada aproximadamente a 1x1cm, de manera que puedan ser colocadas en el porta-probetas del microscopio electrónico de barrido.

2.2 Metalografía

El objetivo de esta prueba es observar gráficamente la coalescencia que presentan cada uno de los recubrimientos al ser depositados en el material base, es decir la soldabilidad de cada uno de ellos, y a la vez observar las consecuencias que genera su aplicación sobre el material para su posterior análisis en el siguiente capítulo.

A continuación, se muestran las imágenes capturadas por el microscopio para cada probeta en las zonas principales como:

- Zona de aporte (Z.A)
- Zona de fusión (Z.F)
- Zona afectada térmicamente (Z.A.T)

Material Base

A continuación se muestra la metalografía del material base para corroborar que efectivamente se trabajó con este material.

En la figura 2.2 se muestra una toma de la microestructura del material base sin ataque químico a 100 aumentos.

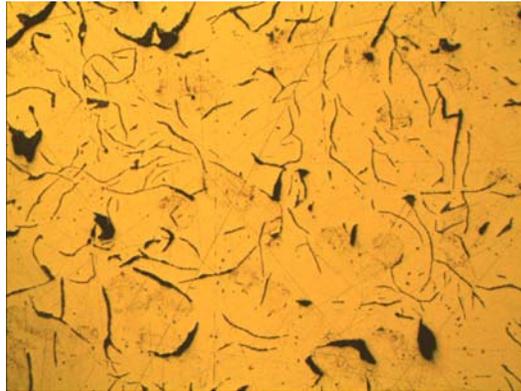


Figura 2.2 Material Base 100x Sin Ataque

Las figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 muestran la microestructura del material base, a 100X, 400X, 500X respectivamente, atacadas químicamente con Nital.



Figura 2.3 Material Base 100x Con Ataque

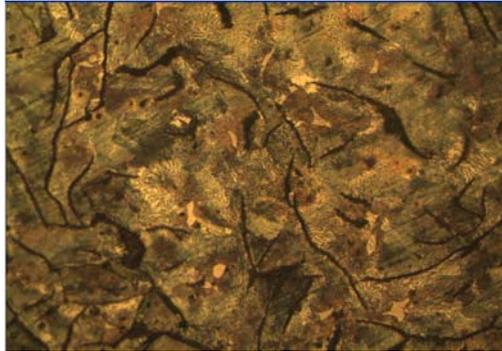


Figura 2.4 Material Base 400x Con Ataque



Figura 2.5 Material Base 500x Con Ataque

Como se puede observar en las figuras mostradas efectivamente se trata de una fundición gris, cuya característica principal es la aparición

del grafito en forma de escamas y su color característico de la superficie fracturada.

Metalografía del Producto A

Microestructura del Material de Aporte

Las figuras 2.6, 2.7, 2.8 muestran la microestructura del material de aporte de cada uno de los recubrimientos analizados.



Figura 2.6 ZA Producto A-400X



Figura 2.7 ZA 400X Producto B-1



Figura 2.8 ZA 400X Producto C

Tanto el producto A como el B son aleaciones con alto contenido de cromo y carbono en base de hierro, mientras el producto C es una aleación martensítica dura de Cr-Ti-Mo-C, medianamente aleada, a base de hierro.

Microestructura de la Zona de Fusión

Zona de Fusión-Producto A

En las figuras 2.9 hasta la 2.14, se muestra la metalografía de la zona de fusión entre material base y el material de aporte (Producto A), con una y dos capas de soldadura, lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.

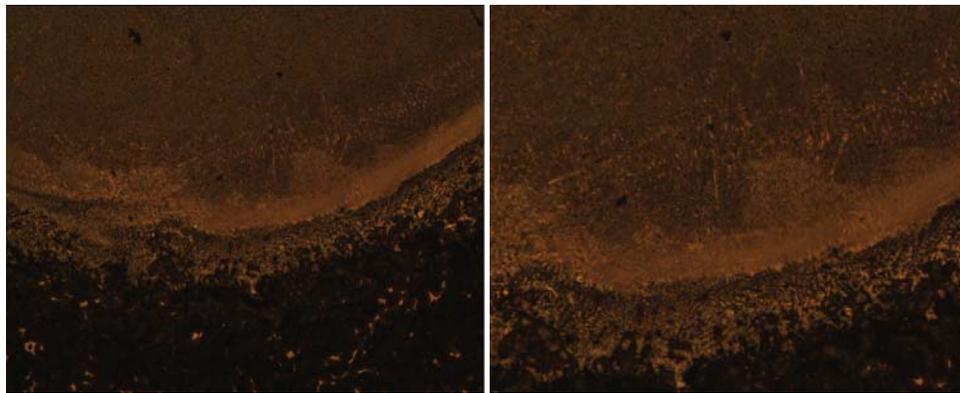


Figura 2.9 ZF 50X producto A-1

Figura 2.10ZF 50X producto A-2

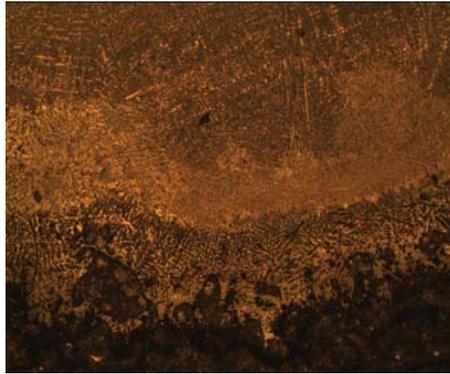


Figura 2.11 ZF 100X Producto A-1

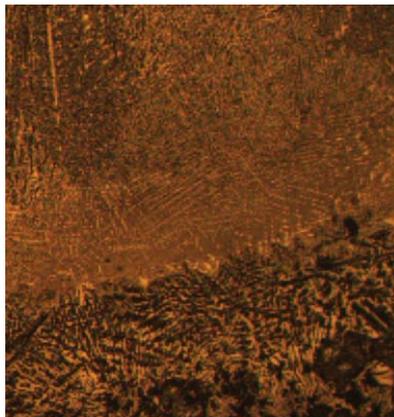


Figura 2.12 ZF 100X Producto A-2

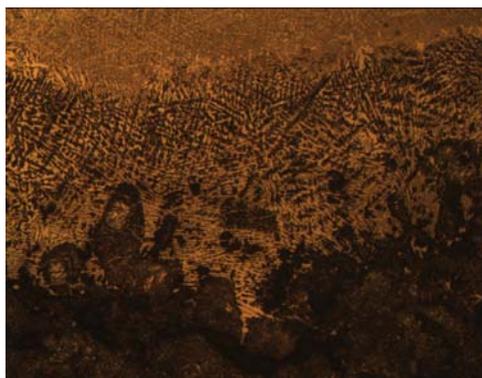


Figura 2.13 ZF 400X Producto A-1

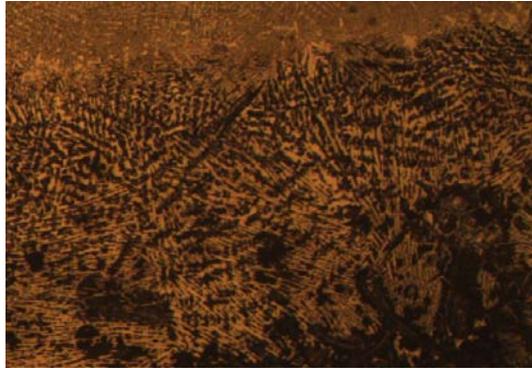


Figura 2.14 ZF 400X Producto A-2

Zona de Fusión-Producto B

En las figuras 2.15 hasta la 2.20, se muestra la metalografía de la zona de fusión entre material base y el material de aporte (Producto B), con una y dos capas de soldadura, lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.



Figura 2.15 ZF 50X Producto B-1



Figura 2.16 ZF 50X producto B-2

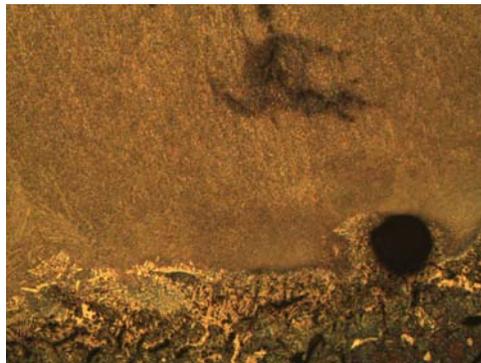


Figura 2.17 ZF 100X producto B-1



Figura 2.18 ZF 100X producto B-2



Figura 2.19 ZF 400X producto B-1



Figura 2.20 ZF 400X producto B-2

Zona de Fusión-Producto C

En las figuras 2.21 hasta la 2.23, se muestra la metalografía de la zona de fusión entre material base y el material de aporte (Producto C), lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.



Figura 2.21 ZF 50X producto C

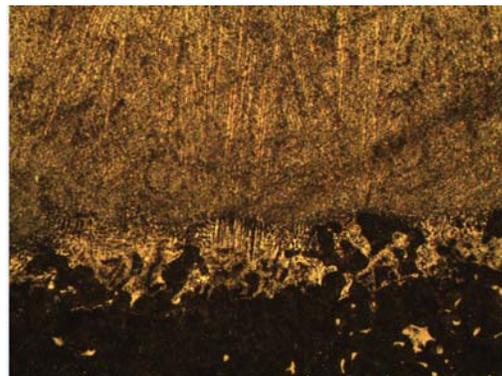


Figura 2.22 ZF 100X producto C

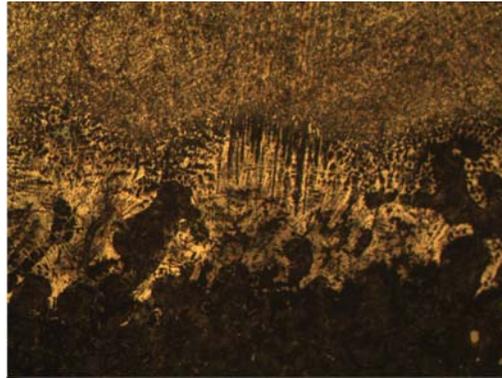


Figura 2.23 ZF 400X producto C

Microestructura de la Zona Afectada Térmicamente

Zona Afectada Térmicamente-Producto A

En las figuras 2.24 hasta la 2.29, se muestra la metalografía de la zona afectada térmicamente, que resulta de la deposición del material de aporte (Producto A) sobre el material base, con una y dos capas de soldadura, lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.



Figura 2.24 ZAT 50X producto A-1

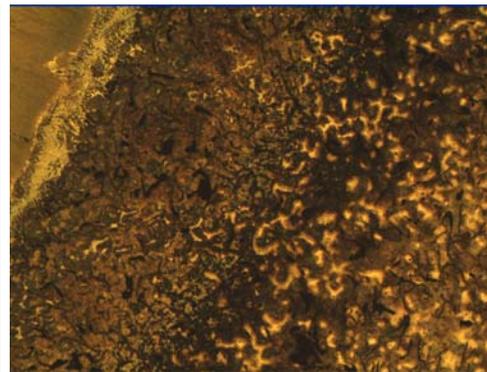


Figura 2.25 ZAT 50X producto A-2

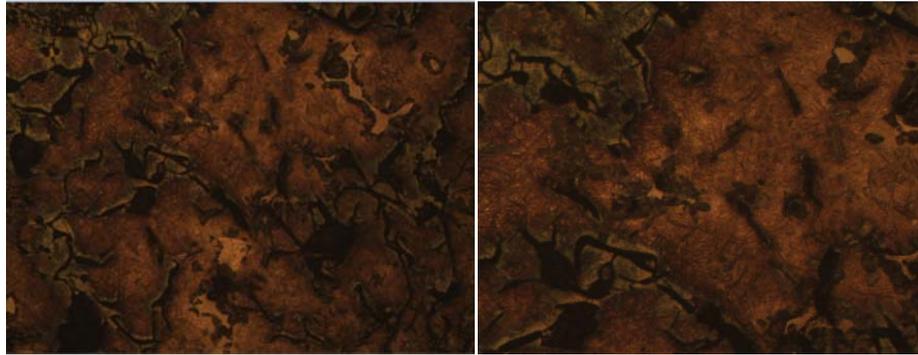


Figura 2.26 ZAT 400X producto A-1 Figura 2.27 ZAT 400X producto A-2



Figura 2.28 ZAT 500X producto A-1 Figura 2.29 ZAT 500X producto A-2

Zona Afectada Térmicamente-Producto B

En las figuras 2.30 hasta la 2.35, se muestra la metalografía de la zona afectada térmicamente, que resultada de la deposición del material de aporte (Producto B) sobre el material base, con una y dos capas de soldadura, lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.

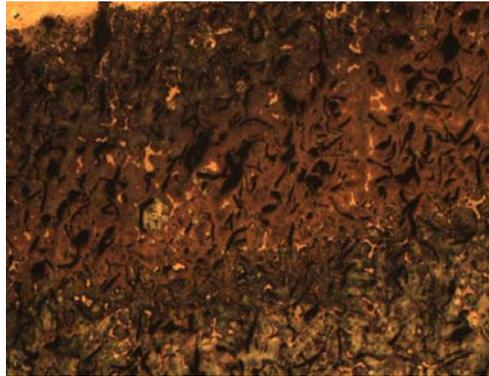


Figura 2.30 ZAT 50X producto B-1

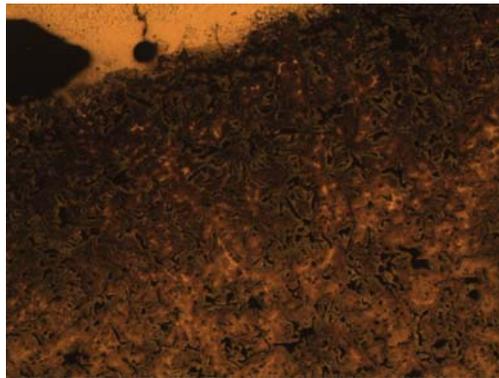


Figura 2.31 ZAT 50X producto B-2

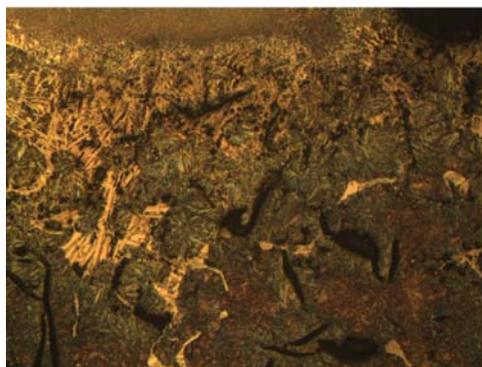


Figura 2.32 ZAT 400X producto B-1



Figura 2.33 ZAT 400X producto B-2



Figura 2.34 ZAT 500X producto B-1 Figura 2.35 ZAT 500X producto B-2

Zona Afectada Térmicamente-Producto C

En las figuras 2.36 y 2.37, se muestra la metalografía de la zona afectada térmicamente, que resultada de la deposición del material de aporte (Producto C) sobre el material base, con una y dos capas de soldadura, lo cual servirá para análisis en el capítulo 3.

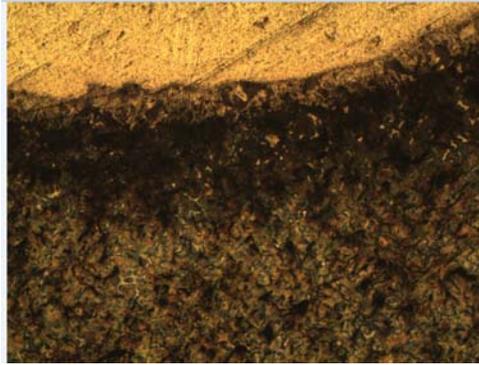


Figura 2.36 ZAT 50X producto C

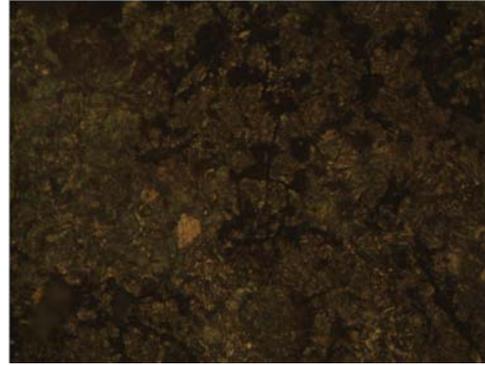


Figura 2.37 ZAT 500X producto C

2.3 Barrido de Dureza

Se realizó un ensayo de dureza a cada una de las probetas, en el cual se realizó un barrido, la figura 2.38 hace referencia a los puntos que fueron tomados como referencia para realizar este ensayo.

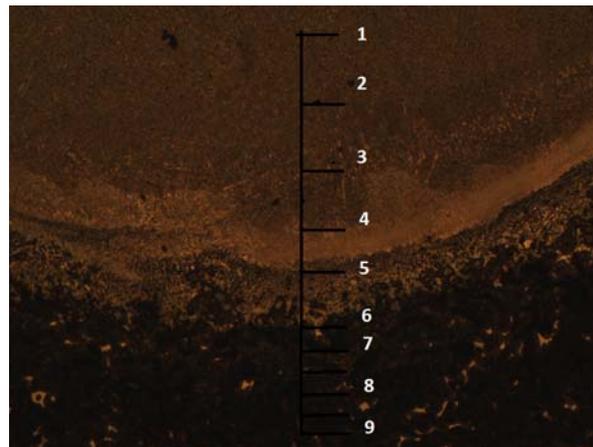


Figura 2.38 Distribución Barrido De Dureza

A continuación, en las tablas 3 hasta la 7, se muestran los resultados obtenidos al someter a cada una de las probetas a este ensayo.

Tabla 3
MEDICIONES DE DUREZA PROBETA A-1

PROBETA A-1									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dureza (HRc)	61,3	61,2	57,1	56,1	54,8	14	11	10	10

Tabla 4
MEDICIONES DE DUREZA PROBETA A-2

PROBETA A-2									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dureza (HRc)	63	64	60,6	58,4	55,8	14	10	10	10

Tabla 5
MEDICIONES DE DUREZA PROBETA B-1

PROBETA B-1									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dureza (HRc)	59,2	58,3	57,7	56	53,6	13	11	10	10

Tabla 6
MEDICIONES DE DUREZA PROBETA B-2

PROBETA B-2									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dureza (HRc)	63	62,2	60,4	60	57,9	13	11	10	10

Tabla 7
MEDICIONES DE DUREZA PROBETA C

PROBETA C									
Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dureza (HRc)	40,5	39,7	38,8	38,6	36	13	11	10	10

2.4 Análisis Químico

Tal como se indicó en la metodología de trabajo esta prueba se realizó mediante microscopía electrónica de barrido, con el propósito de determinar de una experimental los componentes de cada uno de los recubrimientos, y compararlos con los valores teóricos, y debido a las bondades de este equipo visualizar gráficamente la distribución de los elementos presentes.

Producto A

En las figuras 2.39 hasta la 2.43 se observa, los equivalentes de Carbono, Cromo, Manganeso, Silicio, Hierro presentes al realizar la deposición del Producto A.

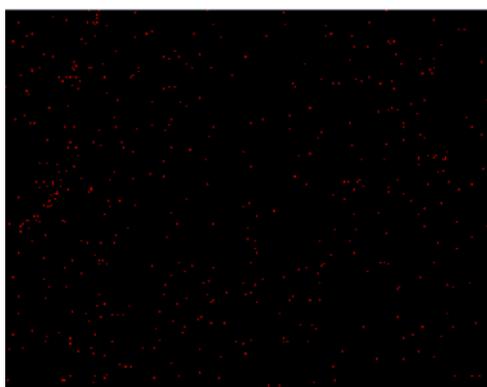


Figura 2.39 C Equivalente Probeta-A

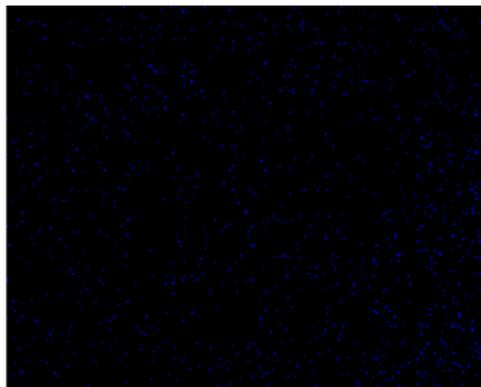


Figura 2.40 Cr Equivalente Probeta-A

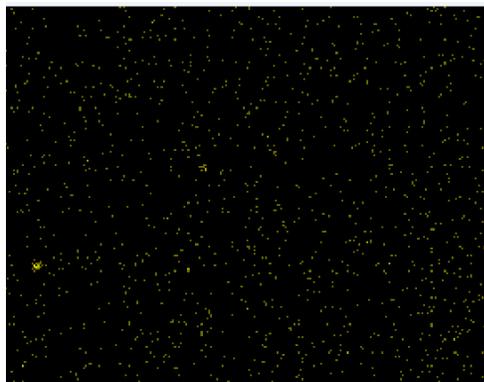


Figura 2.41 Mn EQUIVALENTE PROBETA-A

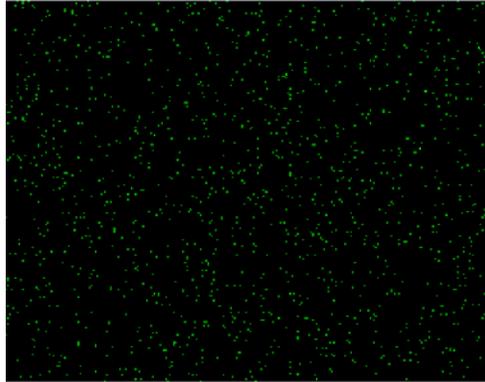


Figura 2.42 Si EQUIVALENTE PROBETA-A

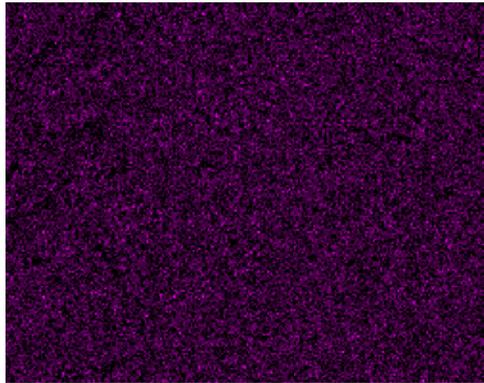


Figura 2.43 Fe EQUIVALENTE PROBETA-A

Tabla 8

**EQUIVALENTE PORCENTUAL DE ELEMENTOS
PRESENTES EN EL PRODUCTO A**

ELEMENTO	%
C	3.1-3.5
Cr	24-25
Mn	1.0-1.6
Si	0.8-1.2
Fe	64-67

Producto B

En las figuras 2.44 hasta la 2.46 se observa, los equivalentes de Carbono, Cromo, Manganeso, Silicio, Hierro presentes al realizar la deposición del Producto B.

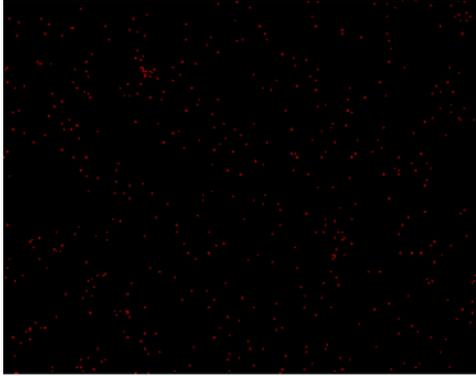


Figura 2.44 C Equivalente Probeta-B

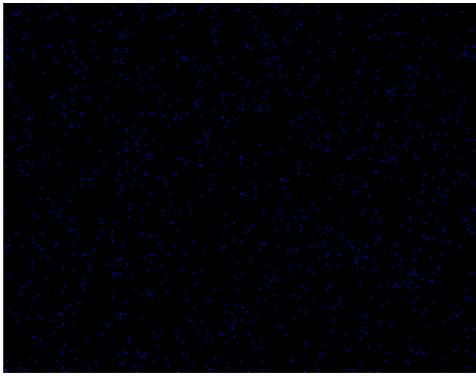


Figura 2.45 Cr Equivalente Probeta-B

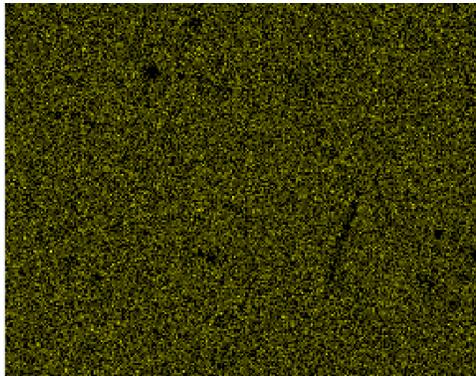


Figura 2.46 Fe equivalente Probeta-B

Tabla 9
EQUIVALENTE PORCENTUAL DE ELEMENTOS PRESENTES EN
EL PRODUCTO B

ELEMENTO	%
Carbono	4.3-4.6
Cromo	25-28
Hierro	64-67

Producto C

En las figuras 2.47 hasta la 2.51 se observa, los equivalentes de Carbono, Cromo, Manganeso, Silicio, Hierro presentes al realizar la deposición del Producto C.

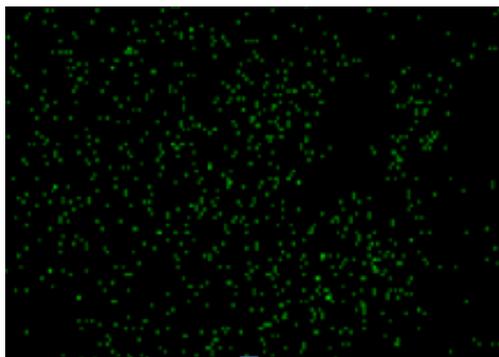


Figura 2.47 Cr Equivalente Probeta C

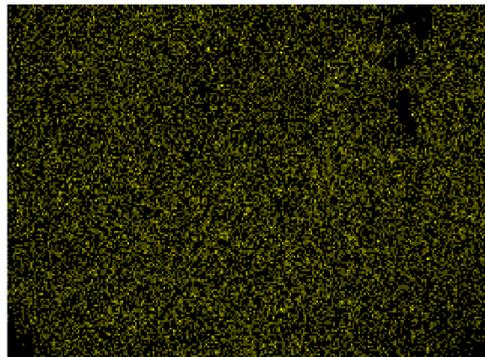


Figura 2.48 Fe Equivalente Probeta C

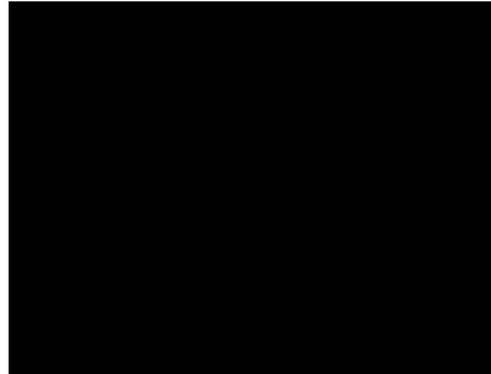


Figura 2.49 Mn Equivalente Probeta C Figura 2.50 Mo Equivalente Probeta

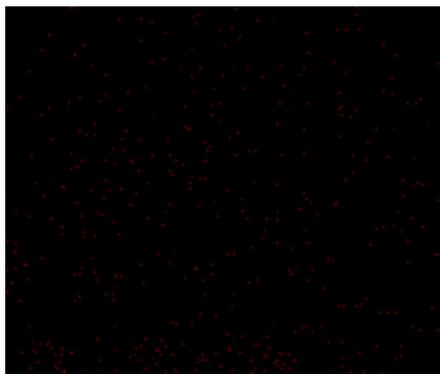


Figura 2.51 Ti EQUIVALENTE PROBETA C

Tabla 10

PORCENTAJE DE ELEMENTOS EN EL PRODUCTO C

ELEMENTO	%
C	1.45-1.96
Cr	06-09
Ti	04-06
Mn	1.0-1.6
Mo	0.2-0.5
Fe	80-85

Equipos utilizados

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Para la metalografía se usó un Microscopio Olympus GX-41 con capturador de imagen Pax-cam, el cual se muestra en la figura 2.52



Figura 2.52 FOTOGRAFÍA DE MICROSCOPIO UTILIZADO

Para el ensayo de dureza se utilizó un durómetro Marca Leco tipo hardest tester LR, modelo LR-300 TDL, digital con modo de medición AUTO.



Figura 2.53 FOTOGRAFÍA DURANTE MEDICIÓN DUREZA

Para el análisis de composición química, se utilizó un microscopio electrónico de barrido, marca: FEI, modelo: Inspect S, el cual se muestra en las figuras 2.54 y 2.55.



Figura 2.54 FOTOGRAFÍA DURANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO



**Figura 2.55 FOTOGRAFÍA DURANTE ANÁLISIS MICROSCOPIA
ELECTRÓNICA**

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis Técnico

De acuerdo a lo observado en el capítulo anterior, se puede tener una visión completa del comportamiento de cada uno de los recubrimientos al ser depositados en el metal base, y las consecuencias que esto conlleva, es decir sus ventajas y desventajas.

Uno de los factores importantes en la aplicación de soldadura es la penetración que presenta, lo ideal es que exista disolución, de tal manera que haya una mezcla homogénea y así el blindaje pueda soportar esfuerzos y evitar desprendimiento, en el caso de existir áreas

no fundidas permite concentraciones de esfuerzos que pueden resultar en fallas sin deformación apreciable.

Al existir desprendimiento la masa perderá agarre, lo cual ocasiona un incremento en la velocidad superficial de esta, lo cual se traduce en una variación de los valores de compactación y en el factor de reabsorción, lo cual se traduce en pérdida de eficiencia en la extracción, en la figura 3.1 se observa gráficamente el seguimiento realizado a un molino por varias semanas, el cual muestra la variación de la velocidad en la turbina de accionamiento que es quien genera el movimiento hacia los molinos.

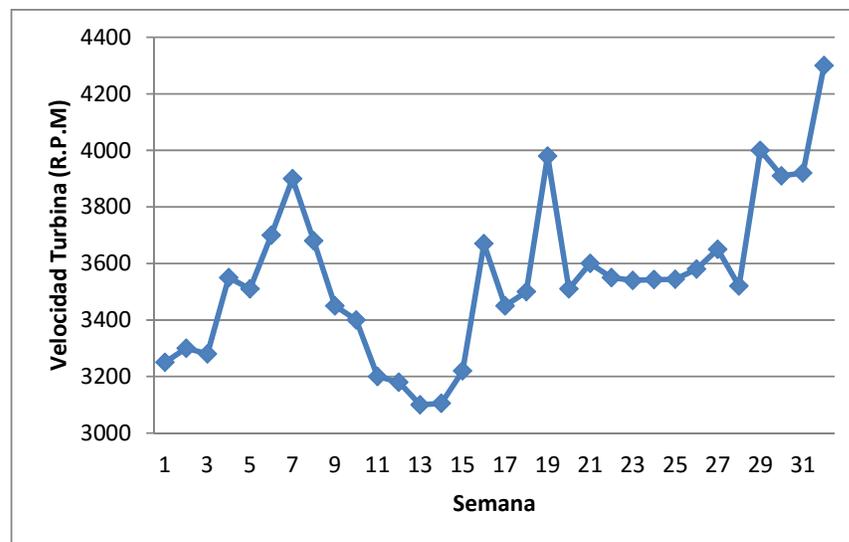


Figura 3.1 GRÁFICO VELOCIDAD TURBINAS VERSUS SEMANAS DE OPERACIÓN

Revisando imágenes de la metalografía realizada a las probetas, un punto de vital importancia es la zona de fusión de cada uno de los recubrimientos, se hizo una selección de imágenes tal como se puede visualizar en la figura 3.2.

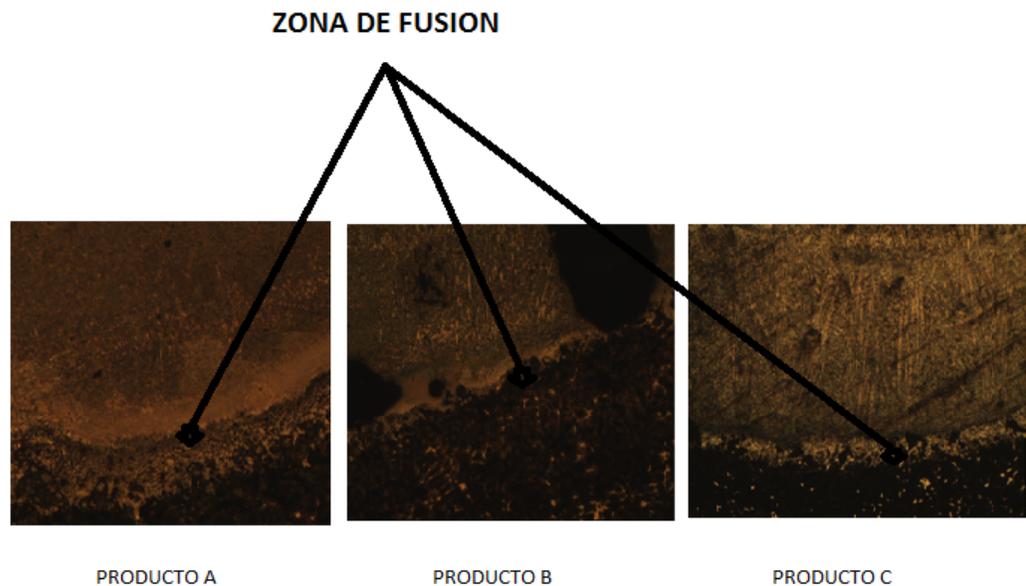


Figura 3.2 ZONA DE FUSIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS.

En esta imagen se puede notar una clara diferencia en la disolución que presenta cada una de ellos, respecto al producto A se evidencia una gran penetración en comparación con los otros dos productos, los cuales presentan una zona de fusión muy reducida.

Con lo cual se puede afirmar que el producto A presenta una mayor soldabilidad, con lo cual se evitaría desprendimiento del blindaje y evitar el cambio de los parámetros de extracción.

A continuación, se analizará desde el punto de vista de la dureza que presentan cada uno de los recubrimientos, la cual tiene como función asegurar una buena resistencia mecánica.

Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5, representan la variación de los valores de dureza de cada producto en la sección del blindaje, teóricamente cada uno de estos recubrimientos ofrece un valor de dureza, el cual debe cumplirse en la realidad para brindar la protección adecuada al material base.



Figura 3.3 VARIACIÓN DE VALORES DE DUREZA EN PRODUCTO A

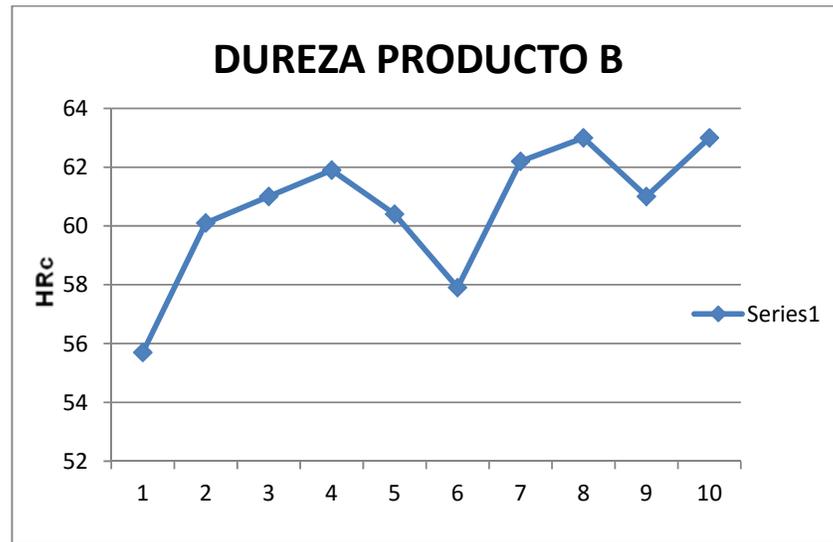


Figura 3.4 VARIACIÓN DE VALORES DE DUREZA EN PRODUCTO B

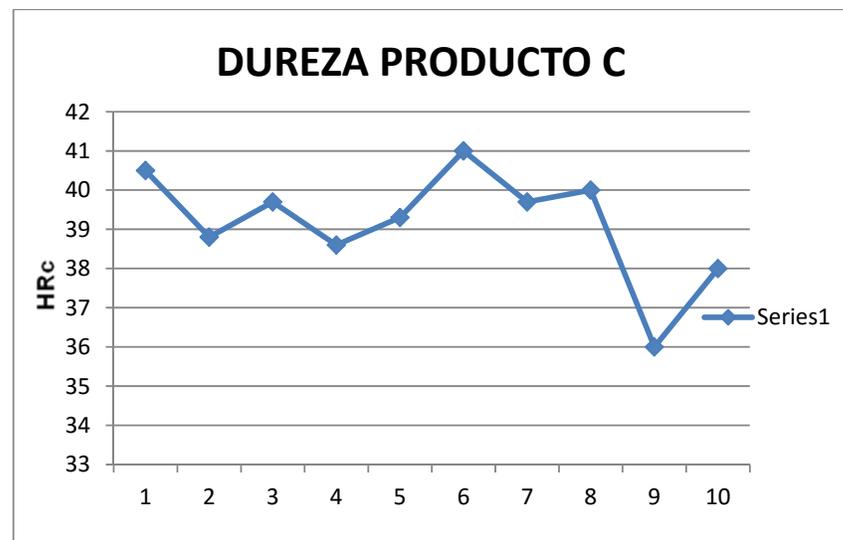


Figura 3.5 VARIACIÓN DE VALORES DE DUREZA EN PRODUCTO C

Según las mediciones realizadas, los productos A y B tienen una dureza promedio de 60 HRc, mientras el producto C tiene un promedio 40 HRc.

Los recubrimientos A y B, tienen un valor de dureza bastante elevado mientras que el C presenta un valor muy por debajo de los otros, esto se debe al porcentaje de carbono existente en la aleación.

El análisis de composición química dio como resultado que el producto A contiene un porcentaje de Cromo comprendido entre 23 y 25, y el B entre 25 y 28, con estos valores y el porcentaje de carbono en la fundición gris, que está comprendido entre 2,5 y 4%, con lo cual están dentro de los carburos del tipo M7C3.

En la figura 3.6 se muestra los valores de dureza y abrasión de los diferentes carburos, como se mencionó en el capítulo 1 para este tipo de aplicación son carburos de cromo, los cuales además de ser duros ofrecen una buena protección a la abrasión y corrosión.

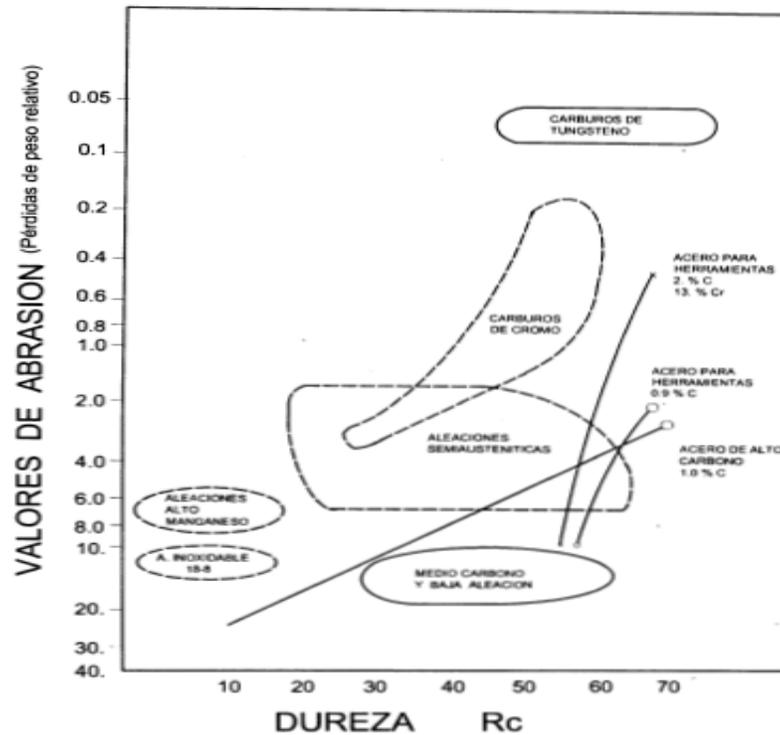


Figura 3.6 VALORES DE DUREZA Y ABRASIÓN DE VARIOS DEPÓSITOS DE RECUBRIMIENTOS DUROS.

Relacionando esta figura con los recubrimientos analizados, se puede apreciar que están en la categoría de carburos de Cr, los cuales poseen una alta dureza y una gran protección a la abrasión.

Se pudo observar ligeras grietas en los cordones de soldadura de los recubrimientos A y B, lo cual daba a pensar que era un defecto de la soldadura, pero en esta investigación se corroboró lo que indica la hoja técnica de la soldadura, la cual indica que es normal este

agrietamiento debido a que es un alivio de tensiones por la alta dureza que posee este tipo de recubrimiento.

Por tanto se recomienda la aplicación del producto A, debido a que ha mostrado tener excelentes propiedades, lo cual es requerido para una adecuada protección de las mazas de molinos.

3.2 Análisis Económico

Hasta el momento se ha mencionado desde el punto de vista técnico la importancia de usar un buen recubrimiento en mazas de molinos de caña de azúcar, pero cada acción preventiva o correctiva que se desea implementar en una industria debe estar plenamente sustentada y demostrada numéricamente.

Para demostrar la incidencia de esta acción, una de las herramientas importantes es la eficiencia en la extracción de azúcar, debido a que este es el principal indicador, el cual muestra la cantidad real de sacarosa que se obtendrá de la caña, y a la vez contrastarlo con el valor que invierte en soldadura de recubrimiento.

Para este análisis se usa como referencia un trapiche compuesto de 5 molinos con capacidad de 350-380 ton/hora de caña.

Tabla 11
CONSUMO DE SOLDADURA POR AÑO

KILOS DE SOLDADURA POR AÑO					
Año	2005	2006	2007	2008	2009
Kilos de soldadura	2014	1889	1725	2097	1905

Tabla 12
COSTO ANUAL POR RECUBRIMIENTO DEL TÁNDEM DE MOLINOS

COSTOS POR RECUBRIMIENTO					
Año	2005	2006	2007	2008	2009
Costo soldadura(\$/kg)	6,729	6,729	6,729	6,729	6,729
Costo Equipo-HH(\$/kg)	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Costo Total (\$/kg)	10,479	10,479	10,479	10,479	10,479
Costo Anual (\$)	21.104,71	19.794,83	18.076,27	21.974,46	19.962,49

De la tabla 12, se toma los valores de costo anual por recubrimiento y se realiza un promedio, cuyo valor da como resultado \$ 20.182,55 dólares.

De acuerdo a la capacidad planteada para este molino y el precio del azúcar, el costo por cada hora de parada es \$ 13.125,00 dólares.

La eficiencia de la extracción se la puede obtener a través de indicadores, en este caso se usó el % Pol en bagazo, que es la

cantidad de sacarosa que posee el bagazo, si se tiene un 100% de caña el 28% de esta se transforma en bagazo, y el porcentaje de sacarosa presente en la caña es de 11,2%

Por tanto los cálculos para obtener la eficiencia en la extracción son los siguientes:

$$\% \text{Sacarosa perdida en caña} = \% \text{ bagazo} * \% \text{Pol en bagazo}$$

Como se conoce que el 11,2% representaría el 100% en la caña entonces el porcentaje de pérdida se lo puede conseguir de la siguiente manera:

$$\% \text{Pérdida en extracción} = (100 * \% \text{Sac. Perd. Caña}) / 11,2$$

$$\% \text{Sac. Real} = 11,2\% - \% \text{Sac. Pérd. Caña}$$

$$\% \text{Ef. en Extracción} = 100\% - \% \text{Pérd. en extracción}$$

Se realizó un seguimiento al % de Pol en bagazo durante diversas semanas, partiendo desde el mejor valor que se puede conseguir en una extracción que es de 1,7 % hasta valores que se presentaron como consecuencia del desgaste, los resultados están tabulados en las tablas 13 hasta la 18.

Tabla 13
CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 1,7 % POL EN BAGAZO

1,7 % Pol en Bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	1,7
%Sac. Perdida respecto a caña	0,476
%Perdida en extracción	4,25
% Ef. en Extracción	95,75
% Sac. Real	10,724

Tabla 14
CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 2 % POL EN BAGAZO

2 % Pol en bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	2
%Sac. Perdida respecto a caña	0,56
%Perdida en extracción	5
% Ef. en Extracción	95
% Sac. Real	10,64

Tabla 15

CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 2,5 % POL EN BAGAZO

2,5 % Pol en bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	2,5
%Sac. Perdida respecto a caña	0,7
%Perdida en extracción	6,25
% Ef. en Extracción	93,75
% Sac. Real	10,5

Tabla 16

CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 3 % POL EN BAGAZO

3 % Pol en bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	3
%Sac. Perdida respecto a caña	0,84
%Perdida en extracción	7,5
% Ef. en Extracción	92,5
% Sac. Real	10,36

Tabla 17

CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 4 % POL EN BAGAZO

4 % Pol en bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	4
%Sac. Perdida respecto a caña	1,12
%Perdida en extracción	10
% Ef. en Extracción	90
% Sac. Real	10,08

TABLA 18

CÁLCULO DE EXTRACCIÓN CON 5 % POL EN BAGAZO

5 % Pol en bagazo	
%Sac. en caña	11,2
%Bagazo en caña	28
%Sac. en bagazo	5
%Sac. Perdida respecto a caña	1,40
%Perdida en extracción	12,5
% Ef. en Extracción	87,5
% Sac. Real	9,8

En la tabla 19, se muestra un resumen de la pérdida de extracción monitoreadas comparadas con la eficiencia referencial.

Tabla 19
PÉRDIDA DE EFICIENCIA EN LA EXTRACCIÓN COMO
CONSECUENCIA DEL DESGASTE.

Ef. Referencial (%)	Ef. (%)	Perdida en Extracción Ef. Referencial –Ef. (%)
95,75	95	0,75
	93,75	2,00
	92,5	3,25
	90	5,75
	87,5	8,25

Como se mencionó la molienda promedio del molino para este análisis es 7000 T.C por día, y con un contenido de 11,2% de sacarosa, entonces se tiene lo siguiente:

$$7000\text{Ton} * 11,2\% = 784 \text{ Ton de Sac.}$$

Al multiplicar las toneladas de sacarosa por la pérdida en extracción se cuantifica la cantidad de azúcar que se deja de obtener.

Tabla 20
AZÚCAR NO APROVECHADA POR PÉRDIDA DE EFICIENCIA.

Ef. Referencial-Ef. (%)	Azúcar no aprovechado (Ton)
0,75	5,88
2,00	15,68
3,25	25,48
5,75	45,08
8,25	64,68

Una tonelada de caña tiene un rendimiento de 20 sacos, y el costo por saco es de azúcar es de \$ 24 dólares, entonces al multiplicar estos valores por las toneladas de azúcar no aprovechadas se tiene la cantidad de dinero que se pierde por día y si a esa cantidad se la multiplica por 180 días que dura la zafra, se tiene la cantidad de dinero perdido anualmente.

Tabla 21
COSTO POR PÉRDIDA EN EXTRACCIÓN

Ef. Referencial –Ef. (%)	Azúcar no aprovechado (Ton)	Pérdida por día (\$)	Pérdida por zafra (\$)
0,75	5,88	2.822,40	508.032
2	15,68	7.526,40	1'354.752
3,25	25,48	12.230,40	2'201.472
5,75	45,08	21.638,40	3'894.912
8,25	64,68	31.046,40	5'588.352

Para tener una mejor apreciación del alcance de la tabla 21, se tabularon los valores de pérdida de eficiencia y la cantidad de dinero perdido por zafra, y se realizó un gráfico el cual se muestra en la figura 3.7.

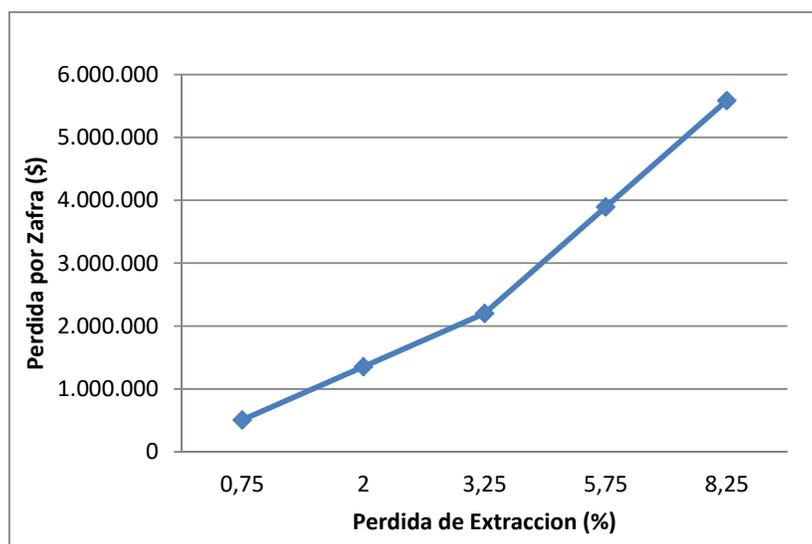


Figura 3.7 PÉRDIDA DINERO POR PÉRDIDA EN EFICIENCIA.

Anualmente por labores de blindaje de mantenimiento se ha contabilizado como promedio un total de 30 horas y al multiplicarlas por el costo por cada hora de parada, da como resultado \$ 393.750,00, y si a eso se le agrega el costo promedio en soldadura se tiene como promedio \$ 415.000 dólares, lo cual contrastado con la cantidad de

dinero que se desperdicia por pérdida en extracción es poco significativo.

Como se puede apreciar, la selección de un buen recubrimiento está plenamente justificada debido a que las sumas de dinero que se pierden por variación en la extracción son bastante elevadas.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. No todo tipo de recubrimiento duro sirve para toda aplicación, el recubrimiento C es muy reconocido en la industria como elemento de protección anti-desgaste, pero para este caso sus propiedades están muy por debajo de lo requerido.
2. Tanto el producto A como el B obtuvieron la dureza idónea para asegurar la protección del material base ASTM A48-41, desde el punto de vista de resistencia mecánica.
3. De los recubrimientos analizados, el producto A presenta gran soldabilidad frente a los otros elementos analizados, con lo cual se asegura una mezcla homogénea entre material base y aporte, y genera una alta resistencia al esfuerzo.
4. Se evidenció presencia de martensita con la aplicación de los recubrimientos, lo cual es un factor que estaba previsto debido al

elevado porcentaje de carbono que presenta el material base, para lo cual se debe controlar este factor con el fin de asegurar la máxima disolución entre el material base y aporte.

5. En el análisis químico se evidenció que tanto el producto A como el B, pertenecen a la clasificación de carburos de cromo tipo M7C3, lo cual es lo recomendado por el manual de ingenios azucareros para este tipo de aplicación.
6. En el caso de análisis, la pérdida en extracción es un factor muy importante, con el cual si no se tiene un control adecuado se desperdician cantidades superiores a \$1'000.000 de dólares por zafra, lo cual justifica con méritos la aplicación de un buen recubrimiento.
7. Con la implementación adecuada del recubrimiento y con un monitoreo adecuado tanto de la velocidad de las turbinas de accionamiento y la eficiencia de extracción de sacarosa, se puede maximizar la operación del tándem de molinos y a la vez evitar a tiempo daños irreversibles a los molinos.

Se recomienda lo siguiente:

1. La aplicación del producto A, el cual presenta las mejores propiedades tanto de resistencia mecánica como soldabilidad, lo cual es la combinación requerida para este caso por las condiciones severas de trabajo presentes.
2. Para conseguir el desempeño óptimo de un recubrimiento se debe seguir el W.P.S (Especificaciones del procedimiento de soldadura), lo cual debe ser estrictamente respetado, paralelamente ejecutar los procedimientos con soldadores previamente calificados.
3. Para mantener los parámetros de extracción establecidos de acuerdo a cada Ingenio Azucarero, al realizar el blindaje se debe tener la precaución de mantener el ángulo de inclinación de los dientes, debido a que estos son los que facilitan la extracción.
4. La realización de una tesis de grado acerca de la construcción de un equipo basado en la norma ASTM G-65, el cual es usado para realizar pruebas de desgaste, y sería útil para este tipo de análisis o en otras investigaciones relacionadas con desgaste, y a la vez un gran aporte para el laboratorio de la Facultad, el cual estaría dotado con un equipo muy valioso para las cátedras impartidas en esta.

5. Un análisis periódico de la soldadura aplicada, para tener un control de las propiedades mecánicas que están siendo agregadas al material base, y controlar que realmente es lo que se espera.

APÉNDICE

Terminología Usada en el medio

Sacarosa: Forma de azúcar que se encuentra en mayor abundancia en la caña. La fabricación de azúcar consiste en la cristalización de este azúcar.

Bagazo: Residuo fibroso resultante de la extracción del jugo del tallo de la caña, que está constituido por fibra y jugo residual.

Pol: Porcentaje de sacarosa en peso.

Brix: Porcentaje de sólidos solubles en el jugo de caña.

Lixiviación: Proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno de los componentes del sólido.

Maza: Rodillos ranurados que comprimen el bagazo extrayendo el jugo.

Coalescencia: Capacidad de dos o mas materiales para unirse entre si.

BIBLIOGRAFÍA

1. Manual de ingenios azucareros, E. Hugot, Cia. Editorial Continental
2. Desgaste de máquinas de preparación y molienda de caña de azúcar, Serie de Procesos Industriales No. 4, 2008
3. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. William F. Smith
3ra Edición, Mc Graw Hill
4. <http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/18/metalografia-aceros-fundiciones-inoxidables/>
5. Handbook of Materials Selections, John Wiley & Sons 2002.
6. Castolin+Eutectic, SUGAR MEETING 2000.