

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE Y PÉRDIDA DE AGARRE EN DEPOSITOS DE
SOLDADURA DE ALTO CROMO APLICADOS EN MAZAS DE FUNDICIÓN
GRIS DE LOS MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

SEBASTIAN DIAZ MILLAN



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE Y PÉRDIDA DE AGARRE EN DEPOSITOS DE
SOLDADURA DE ALTO CROMO APLICADOS EN MAZAS DE FUNDICIÓN
GRIS DE LOS MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO**

SEBASTIAN DIAZ MILLAN



**Universidad
del Valle**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, __ de Febrero de 2012

DEDICATORIA

Dedico la realización de este trabajo a:

A Dios, por brindarme la oportunidad de encontrar retos en mi vida, así como lo fue este trabajo.

A mis padres que siempre fueron un pilar para mi crecimiento y mi educación, que siempre me apoyaron en mis decisiones y creyeron en mí para finalizar este proyecto.

A mi hermano, Luis Miguel, que fue un modelo a seguir y demostró ser una persona de ejemplo para todos los que lo rodean.

Al equipo de Rugby Lobos Univalle, que además de ser un equipo deportivo es una familia y me enseñó que no existen cosas imposibles y siempre dar lo mejor de mí, que siempre se debe seguir hacia adelante cualquiera que sea la adversidad.

AGRADECIMIENTOS

A los directores de este proyecto Msc Fernando Casanova y PhD Yesid Aguilar Casto, los cuales con su ayuda, sus conocimientos y paciencia me permitieron desarrollar esta investigación satisfactoriamente.

A todos los maestros que contribuyeron a mi actual formación educativa, que me incentivaron a terminar esta etapa de mi vida.

A todos los compañeros de laboratorio que estuvieron presentes en el desarrollo de esta investigación. Al Msc Oscar Hernández por su constante actitud positiva y energía inagotable, al Ing. Luis David Duran por su ayuda en mi adaptación al proceso, al Ing. José Yesid Aguilar por su paciencia y ayuda a pesar de sus responsabilidades personales, al Ing. Renzo Victoria por su constante y contagiosa ganas de siempre saber más y buscar manera alternas a las adversidades y finalmente a las prontas profesionales Angie Bedoya y Luisa Fajardo que estuvieron apoyándome, ayudándome y acompañándome en el desarrollo de toda la investigación.

A los laboratoristas de la Escuela de Ingeniería de Materiales por su incondicional ayuda y colaboración. Al Ing. Irvin Jadway Castro por su paciencia y sugerencias que permitieron realizar satisfactoriamente todas las pruebas y ensayos necesarios.

A todos mis amigos pertenecientes al equipo Lobos Rugby Univalle. Que siempre me ayudaron incondicionalmente en todo lo posible y siempre estuvieron pendientes del desarrollo de mi proyecto de tesis.

A los estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Materiales que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme en el desarrollo de esta investigación.

A las escuelas de Ingeniería Mecánica y de Materiales que me permitieron desarrollar un proyecto del cual siempre estuve interesado y sentía que podía finalizar de una forma satisfactoria.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 Aportes	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Componentes de la caña	8
2.2 Descripción de los molinos de caña	9
2.3 Extracción de jugo	11
2.4 Desgaste y pérdida de agarre en las mazas	12
3. METODOLOGIA	16
3.1 Materiales	16
3.1.1 Metal Base	16
3.1.2 Recubrimientos	16
3.2 Unidad Experimental	17
3.3 Elaboración de probetas	18
3.4 Duración del ensayo	19
3.5 Banco de pruebas	19
3.6 Factores de estudio	21

	Pág.
3.7 Variables de respuesta	22
3.8 Microscopía electrónica	23
3.9 Metalografía	23
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
4.1 Efecto del desgaste en función de la distancia de deslizamiento y nivel de contaminación	24
4.2 Efecto del tipo de configuración de recubrimiento en el torque	27
4.3 Análisis Metalográfico	29
4.4 Análisis de superficies de desgaste	31
4.5 Microdureza	35
4.6 Comparación del efecto del desgaste entre prototipos y diferentes configuraciones	36
5. CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	42
ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química material base	16
Tabla 2. Composición química depósitos de soldadura	17
Tabla 3. Parámetros de soldadura en la aplicación de recubrimientos.	18
Tabla 4. Registro de pérdida de peso DFR = 0	44
Tabla 5. Registro de pérdida de peso DFR = 0.15	44
Tabla 6. Registro de pérdida de peso DFR = 0.5	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Core Sample, medición de la composición de la caña	8
Figura 2. Casco de un maza	9
Figura 3. Esquema de Molino de caña	10
Figura 4. Tipos más comunes de imbibición: a) Imbibición simple b) Imbibición compuesta	12
Figura 5. Composición de elementos que ingresan en los molinos de azúcar: a) Composición de la caña de azúcar. b) Composición de materia mineral	13
Figura 6. Maza afectada por efecto de socavado y desgaste	14
Figura 7. Unidad Experimental	17
Figura 8. (a) Montaje para la aplicación de los recubrimientos. (b) Aros soldados con su respectivo electrodo	19
Figura 9. Modificación de la norma ASTM-G65	20
Figura 10. (a) Strain Gage y antena emisora (b) Equipos de recepción y adquisición de datos.	23
Figura 11. (a) Sección media del metal base 200X (b) Interfaz entre recubrimiento y metal base 200X	29
Figura 12. Microestructura del metal base (a) 200X (b) 500X	30
Figura 13. Microestructura de recubrimiento (a) Hipoeutético 500X (b) Hipereutético 500X	30
Figura 14. EDS para recubrimiento (a) Hipoeutético 5.000X (b) Hipereutético 5.000X	31
Figura 15. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento bajo DFR=0 (a) Hipoeutético 600X (b) Hipoeutético 1500X (c) Hipereutético 600X (d) Hipereutético 1500X	32

	Pág.
Figura 16. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento bajo DFR=0.15 (a) Hipoeutético 600X (b) Hipoeutético 1500X (c) Hipereutético 600X (d) Hipereutético 1500X	33
Figura 17. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento bajo DFR=0.5 (a) Recubrimiento Hipoeutético 600X (b) Recubrimiento Hipoeutético 1500X (c) Metal base 1500X (d) Recubrimiento Hipereutético 1500X.	34
Figura 18. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento hipereutético bajo DFR=0.5 (a) Cresta 600X (b) Cresta 1500X (c) Flanco 1500X (d) Flanco 1500X.	35
Figura 19. Desgaste progresivo recubrimiento Hipoeutético DFR=0.5	46
Figura 20. Desgaste progresivo recubrimiento Hipereutético DFR=0.5	46

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente en el departamento del Valle del Cauca, la caña de azúcar se ha convertido en el cultivo más común, esto se debe a que las condiciones climáticas y las condiciones del suelo permiten la siembra de dicha planta durante todo el año. Otra razón considerable son los diversos productos que se pueden obtener a partir de la explotación de ésta gramínea, entre estos se encuentra el azúcar, licor, panela, alcohol carburante, entre otros.

Para la extracción del jugo, la caña se debe comprimir a través de rodillos ranurados que son denominados mazas. Es entonces de gran importancia el buen funcionamiento de dichos elementos para la correcta y eficaz extracción del jugo dentro del proceso de molienda. Un problema común dentro de la industria es el desgaste de la mazas de los molinos, dicho desgaste reduce el agarre de las mismas y de ésta forma se disminuye la eficiencia del proceso de extracción. Existen dos causas principales para que se presente desgaste abrasivo en las mazas, la primera es debido a la presencia de materia mineral extraña (MEM) [1], dicha materia se considera como abrasivo ya que está compuesta por materiales duros como sílice, partículas metálicas que se desprenden de procesos previos a la extracción y otros materiales provenientes de las etapas de cosecha, preparación y transporte [2], la segunda se relaciona con materia vegetal extraña como tallos, cogollos y raíces provenientes de plantas aledañas a la caña de azúcar.

Con el objetivo de disminuir el desgaste abrasivo en las mazas, actualmente en los ingenios se están aplicando recubrimientos duros sobre las superficies de las mismas, en la mayoría de casos se utilizan soldaduras de tipo Fe-Cr-C, la cuales según sus parámetros de aplicación, microestructura, forma y distribución de fases duras, ofrecen buena resistencia al desgaste abrasivo, sin embargo, la aplicación de dichos elementos producen altos costos de mantenimiento y al ser materiales de alta dureza, su desprendimiento en etapas iniciales de la molienda pueden ser de gran riesgo en etapas posteriores.

El deterioro de las superficies de la maza debido al desgaste abrasivo se puede observar en el cambio de geometría que sufren los dientes de la misma, de ésta forma se genera una deficiente alimentación y se disminuye la eficiencia del proceso de extracción.

A nivel mundial, actualmente en los ingenios azucareros es común el uso de fundición gris para la creación de las mazas en los molinos de caña. A pesar de que dicho material no posee las mismas propiedades mecánicas de los aceros, es mucho más rentable económicamente para elementos mecánicos o carcazas de gran tamaño que no están sometidas a cargas de tracción altas. Dentro de sus propiedades, la fundición gris, posee mayor facilidad de mecanizado, lo cual permite realizar un rayado con un menor gasto de energía en comparación del acero, también tiene la capacidad de amortiguar altas vibraciones y oscilaciones de resonancia [3].

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que los procedimientos para el mantenimiento tienen altos costos en la industria, tanto en el desarrollo como en los materiales utilizados, la presente investigación pretende evaluar el desgaste y la pérdida de agarre de las mazas de fundición gris blindadas con soldaduras de recubrimiento ricas en cromo. Dichas pruebas se realizaron sobre probetas que asemejan los dientes de las mazas y asimismo son sometidas a condiciones similares a las que se encuentran en la industria.

Con esta investigación se pretenden analizar qué configuración material base-soldadura posee una mayor resistencia al desgaste abrasivo y de esta forma tener una referencia para los futuros procesos de soldadura de recubrimiento en los ingenios, así, creando la posibilidad de disminuir los costos en la recuperación de mazas gastadas, tiempos en paradas de mantenimiento o evitando la disminución de la eficiencia de las mazas.

1. 2 Antecedentes

Se han desarrollado diferentes tipos de estudios sobre el desgaste que se presenta en el proceso de molienda debido al efecto abrasivo. Respecto a este fenómeno Casanova [2] presenta un estudio en el cual se evaluó el desgaste de probetas de acero A-36 que simularon los dientes de las mazas en los molinos de caña. Se evaluaron tres variables, presión, velocidad y contenido de materia extraña mineral. Se concluyó que el desgaste abrasivo en las mazas aumenta con la carga aplicada y la cantidad de materia extraña mineral. También se analizaron los mecanismos de desgaste presentes, siendo arado (ploughing) el más común seguido por el micro-corte (cutting).

Por medio de un ensayo similar al realizado por Casanova, Castañeda y Aguirre [4] evaluaron la sinergia abrasión-corrosión para un acero A-36, modificando los

valores de contaminación mineral o DFR. Se concluye que a mayor cantidad de materia mineral extraña hay una mayor cantidad de remoción de material y pérdida de masa en las probetas. También se muestra que hay una mayor acción de desgaste debido a la abrasión que a la corrosión.

Buchanan y Shipway [5] realizaron un estudio donde se comparó un método de soldadura de recubrimiento de superficie dura comúnmente utilizado en la industria cañera, SMAW contra un recubrimiento experimental de arco rociado. El estudio mostró que la morfología de los carburos y de la estructura de los depósitos de soldadura aplicados produce una diferencia notable en la resistencia del desgaste abrasivo. También se obtuvo un muy buen comportamiento del recubrimiento experimental, sin embargo se encontró un alto nivel de porosidad y una menor dureza que para el caso de soldadura convencional.

En estudios posteriores Buchanan y Shipway [6] utilizaron dos tipos de soldadura de recubrimiento comercial, uno hipoeutéctico y otro hipereutéctico de base Fe-Cr-C, las cuales fueron aplicadas sobre un sustrato de fundición gris por medio de SMAW y posteriormente fueron sometidas a desgaste abrasivo en condiciones similares a las encontradas en los molinos de caña. Se encontró que a pesar de que el recubrimiento hipereutéctico poseía una dureza relativamente mayor, no se presentó una diferencia significativa respecto al desgaste abrasivo entre las dos configuraciones. Los mecanismos de desgaste presentes fueron micro-arado y micro-fractura en el hipoeutéctico e hipereutéctico, respectivamente.

Uquillas B. [7] presentó resultados para ensayos similares a los realizados por Casanova con el objetivo de evaluar el efecto del jugo de caña en probetas construidas con acero A-36. Encontró que existe un efecto de sinergia abrasión-corrosión, corroborando lo presentado por Aguirre y Castañeda. Comentó que dicha sinergia produce capas pasivadoras sobre el material que posteriormente es removido por el efecto abrasivo y de ésta forma presentando pérdidas de masa.

Complementando el análisis y evaluación del desgaste de recubrimientos duros, Coelho A. y Antonio V. [8] presentaron el estudio tribológico, donde sometieron recubrimientos duros de tipo Fe-Cr-C y Fe-Cr-C (Nb, Ti) al desgaste, según la norma ASTM-G65. Dichos depósitos fueron aplicados sobre placas de acero 1020 por medio de SMAW y FCAW. Entre los resultados arrojados se encontró que los carburos de niobio (NbC) presentaron la mayor resistencia al desgaste, seguido por carburos de cromo aplicados con electrodo revestido, seguido por los carburos de titanio y finalmente los carburos de cromo formados a partir de la aplicación con Flux Core. También se encontró una relación directamente proporcional entre la

fracción volumétrica de carburos y la resistencia al desgaste para la soldadura SMAW. No se observó la misma relación para la soldadura aplicada por FCAW, ya que presentaba una matriz relativamente blanda y una menor cantidad de carburos libres en comparación a los carburos secundarios pertenecientes a la matriz.

Con el objetivo de evaluar el efecto que tiene el tipo de material y la rugosidad superficial en el desgaste del par tribológico caña-materia mineral extraña-metal Boada [9] utilizó una maquina que comprimía el bagazo por medio de un pistón contra una rueda de metal que gira constantemente. De dicho estudio se concluyó que los materiales con tratamientos térmicos poseen mayor resistencia que aquellos que no fueron sometidos. Con respecto a la rugosidad, se encontró que las rugosidades transversales permanecen después de los ensayos y aportan agarre, caso contrario en las longitudinales.

Utilizando un rediseño del prototipo presentado por Casanova, en el cual se maneja un mayor flujo de bagazo, L. Duran [10] sometió a desgaste anillos de acero A-36 recubiertos con acero inoxidable y depósitos de pepas hipoeutécticas, las cuales se ubicaron a diferentes distancias y ángulos entre sí. Los resultados arrojados muestran que para distancias pequeñas de deslizamiento entre las probetas y el bagazo, existe una alta rata de desgaste, para distancias mayores, dicha tendencia disminuye hasta el punto de amortiguarse y volverse constante a medida que la distancia recorrida aumenta. Por medio de la medición del torque, encontró que el agarre tiende a disminuir cada vez que el recorrido es mayor.

Victoria y Rodríguez [1] por medio de el rediseño del prototipo de la norma ASTM-G65 presentado por Duran evaluaron el desgaste en anillos de acero A-36 recubiertos con acero inoxidable y blindados con soldadura hipoeutéctica e hipereutéctica aplicada de forma aleatoria sobre los flancos y la cresta de los aros. Dichas configuraciones se sometieron a desgaste abrasivo por medio de bagazo con diferentes niveles de contaminación mineral. Se encontró que el recubrimiento que mejores resultados arrojó fue el hipereutéctico debido a la presencia de carburos de carácter Fe-Cr y carburos de niobio. Los mecanismos de desgaste mas observados fueron micro-corte, micro-arado y desprendimiento de carburos para el caso hipereutéctico.

Hernández [11] realizó una comparación de dos depósitos sometidos a condiciones de desgaste, hipoeutéctico e hipereutéctico, aplicados en forma de pepas sobre un colchón o buffer de acero inoxidable que a la vez está aplicado sobre un material base de acero estructural. Se encontró que la mejor

configuración fue aquella que poseía un recubrimiento hipereutéctico con un paso de 0,75 pulgadas y un ángulo de 10° entre pepas. Se concluyó que el tamaño de los depósitos es un factor significativo para la medición del agarre y desgaste producido en las pruebas.

Usando el prototipo desarrollado por Casanova, Bedoya y Fajardo [12], hicieron pruebas de desgaste bajo dos cargas diferentes, 400 y 600 N, e hicieron pruebas con y sin presencia de jugo de caña. Para los ensayos se utilizaron probetas de fundición gris clase 50 con una microestructura predominante por una matriz perlítica y grafito laminar. Se encontró que la fundición gris tiene mayor resistencia al desgaste bajo la acción de jugo de caña que en estado seco y posee una mayor resistencia que un acero de bajo carbono A-36 y un acero inoxidable austenítico 309.

1. 3 Justificación

El desgaste ocurrido en las mazas que conforman los molinos de caña, tienen como consecuencia dos problemas principalmente.

El primero, referente a un ámbito económico, son los altos costos que acarrea los procesos de blindajes y reconstrucción, ya que a través de la experiencia se ha concluido que son métodos viables para la prolongar la vida de las mazas. Sin embargo dichos blindajes no son una solución definitiva al problema del desgaste, debido a que al ser materiales auto-fisurables [1] tienden a desprenderse y teniendo en cuenta que son materiales de alta dureza, contribuyen al desgaste y desprendimiento de otras secciones posteriores en el proceso de molienda.

El segundo y posiblemente el más crítico, es la disminución de la eficiencia de la maza. Dicha disminución se produce cuando los dientes de las mazas empiezan a perder la geometría original y de esta forma es necesario aplicar más energía en forma de presión para que el sistema sea capaz de extraer adecuadamente el jugo presente en la caña de azúcar. Además, de disminuir la extracción, el bagazo producido sale con dimensiones no esperadas y de esta forma se dificulta la quema dentro de las calderas, a esto se le suma que sale con mayor cantidad de sacarosa, lo cual es un inconveniente tanto económico como de eficiencia del proceso.

Los problemas planteados están relacionados con reducidos conocimientos sobre los fenómenos de desgaste de superficie de mazas blindadas, ya que generalmente en el enfoque de los estudios no se tiene en cuenta la geometría de

las mazas, los parámetros utilizados en la aplicación de las soldaduras y las condiciones reales a las que se encuentran las mazas bajo operación.

Con esta investigación se pretende ahondar y entender sobre los fundamentos del desgaste abrasivo que se presenta en las mazas de fundición gris blindadas con soldaduras ricas en cromo. Se pretende mostrar un análisis de cómo las variables de proceso, tipo de soldadura, configuraciones de depósito y niveles de contaminación, pueden afectar el agarre en las mazas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el desgaste de fundición gris recubierta con soldadura de fundición blanca de alto cromo la cual es utilizada en mazas de los molinos de caña, con el fin de mejorar el desempeño que se lleva a cabo en la actualidad en el proceso de molienda.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el desgaste de las superficies para mazas con material base de fundición gris recubiertas con soldadura de recubrimiento duro de alto cromo (Fe-Cr-C) bajo una carga constante y tres diferentes niveles de contaminación (DFR).
- Evaluar las pérdidas de agarre que produce el desgaste mediante la medición del torque en las probetas a ensayar.
- Determinar mecanismos de desgaste en los materiales utilizados como recubrimiento: soldadura de recubrimiento hipoeutéctica e hipereutéctica de alto cromo
- Caracterizar las superficies de las probetas mediante microscopía óptica y electrónica (SEM)

1.5 Aportes

Por medio del desarrollo de esta investigación se tendrán como aportes para la comunidad científica e interesados:

- Generar conocimiento a partir de pruebas experimentales sobre el comportamiento de las mazas de molinos de caña blindadas sometidas a desgaste abrasivo.
- Exponer los mecanismo de desgaste presentes en el sistema tribológico recubrimiento duro- caña- materia extraña mineral, para lograr encontrar una configuración óptima entre material base y material de recubrimiento.
- Predecir el comportamiento del desgaste en las mazas de fundición gris, blindadas en la cresta y parte de los flancos para el proceso de molienda en un ingenio de caña.
- Lograr reducir los costos de mantenimiento en la industria azucarera que se ve constantemente afectada por la alta tasa de desgaste que se presenta en las mazas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Componentes de la caña

La caña de azúcar está compuesta por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida llamada jugo, que contiene principalmente agua y sacarosa. Con el objetivo de separar el azúcar, la sacarosa del jugo se cristaliza, mientras que la fibra se convierte en el bagazo después de ser molida la caña.

Las proporciones de los componentes dentro de la caña varían según la familia, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, entre otros. Teniendo en cuenta todas estas variables se han obtenido valores de referencia general:

Agua	73 - 76%
Sacarosa	8 - 15%
Fibra	11 – 16%

Dentro del jugo se pueden encontrar otros componentes en menor porcentaje como:

Glucosa	0,2 - 0,6 %
Sales	0,3 - 0,8 %
Fructosa	0,2 - 0,6 %
Ácidos Orgánicos	0,1 - 0,8 %
Otros	0,3 - 0,6 %

Con el objetivo de determinar las condiciones de la caña y predecir la productividad que se puede obtener a partir de la caña extraída, se utiliza un equipo llamado “Core Sample” el cual provee un análisis químico y está compuesto de un brazo mecánico que toma muestras de los trenes cañeros que ingresan a los ingenios.



Figura 1. Core Sample, medición de la composición de la caña [11]

Después de determinar las condiciones y así mismo un estimado de la productividad de la caña, los tallos son depositados sobre una banda transportadora que se encarga de llevarlos hasta las máquinas picadoras y/o desfibradoras que se encargan de la ruptura de los mismos. Dicha maquinaria puede variar según el ingenio, regularmente se utilizan dos etapas de cuchillas, la primera se encarga de cortar por impacto la caña en trozos pequeños y seguidamente una segunda etapa donde es desmenuzada completamente para luego ser transportada a los molinos.

2.2 Descripción de los molinos de caña

Se le denomina molinos al sistema encargado de moler y producir la extracción del jugo de caña para la obtención de azúcar en los procesos posteriores. Regularmente están compuestos por tres cascos cilíndricos horizontales y colocados en forma de triángulo isósceles, estos cascos son denominados mazas.

La compresión de los tallos se da por el propio peso de la maza, aproximadamente 10 toneladas, y por la presión que ejerce un pistón hidráulico sobre la maza superior, los cuales pueden alcanzar valores de 1800 psi para el primer molino hasta 3200psi en el último [11]. Actualmente, se utiliza una cuarta maza con el objetivo de ayudar al transporte y alimentación de la caña hacia el molino. Para aumentar el agarre y aumentar la eficiencia de las mazas, son maquinadas de tal manera que se obtienen ranuras en forma de “V” a los cuales se les denomina dientes. Los diámetros de dichas mazas dependen principalmente de la ubicación y función que normalmente tienen en el proceso de molienda.



Figura 2. Casco de un maza

Para obtener una mayor extracción se utilizan hasta seis molinos secuencialmente, a éste grupo de molinos se les denomina Tándem.

Existen tres elementos adicionales que ayudan a mejorar el proceso de extracción de jugo, los cuales son, el chute, los raspadores y el virador.

El chute cumple el objetivo de ayudar a la alimentación de la caña proveniente de las máquinas desfibradoras, su importancia radica en que debe mantener un flujo constante y sin altas variaciones para el ingreso de las fibras a los molinos.

Los raspadores se encargan de evitar el embagazamiento entre las ranuras de las mazas por medio de peines que se encuentran en la parte superior de la maza superior y en la inferior por encima de la maza cañera, Figura 3, el cual es un fenómeno donde el bagazo debido a las altas presiones a los que se ve sometido se adhiere a las paredes de los dientes de las mazas produciendo una superficie uniforme, lo cual se traduce como una condición más severa de desgaste debido a un mayor nivel de deslizamiento, en adición la eficiencia del molino se ve reducida notoriamente ya que se presenta el atascamiento del bagazo en medio del sistema.

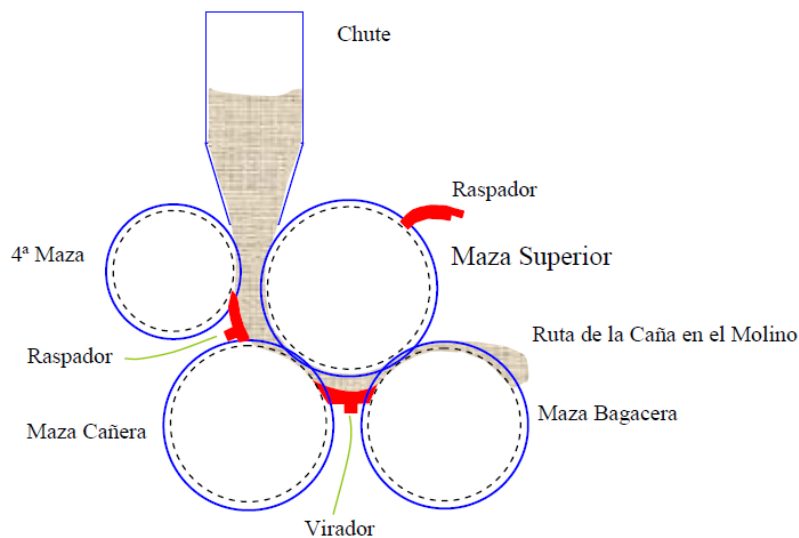


Figura 3. Esquema de Molino de caña

Por último se encuentra el virador, el cual es una lámina curva en la parte inferior del molino, entre la maza bagacera y la cañera, cumple con el objetivo de transportar el bagazo que ha sido molido en la primer etapa (entre la maza superior y cañera) hacia la segunda etapa (entre la maza superior y bagacera) en donde se aplica la mayor presión. También se utiliza como un raspador entre la maza cañera y bagacera.

Teniendo en cuenta que el desgaste es un fenómeno inherente al proceso de molienda, las mazas deben tener un rango para su manejo, es decir, a medida que se desgastan, la eficiencia del molino disminuye, de esta manera se debe aumentar la presión para mantener constante el proceso de molienda. De esta

forma, se maneja un “setting” o control de holgura, en el cual por medio de pistones hidráulicos se le aplica mayor presión a la maza superior que generalmente es la más afectada por el desgaste debido a su mayor carga (contra las mazas bagacera y cañera). También el sistema puede ser graduado para disminuir el exceso de esfuerzos cuando se aumente el flujo de caña.

2.3 Extracción de jugo

Inicialmente la caña debe ingresar por el chute y continuar hacia la abertura entre la cuarta maza y la superior, donde la presión es relativamente baja en comparación de la realizada entre la maza cañera y superior, finalmente la caña debe pasar entre la maza bagacera y la superior, de esta forma se extrae la mayor cantidad de jugo posible. Sin embargo, a pesar de las altas presiones a las que se ve sometida la fibra de caña, el bagazo todavía contiene entre el 40 y 45% de líquido (en peso) y es necesario adicionar otro proceso con el objetivo de obtener una mayor extracción, la imbibición.

La imbibición es el proceso en el que se aplica agua a un bagazo para aumentar la extracción de jugo en el siguiente molino. [13]. Con este procedimiento se busca que el fluido penetre en el colchón fibroso, se mezcle con el jugo y se diluya de tal forma que se pueda obtener el jugo que por medio de la compresión no se logró.

Hay dos tipos principales de imbibición, simple y compuesta. La primera consiste en aplicar solamente agua a cada molino a partir del segundo molino, es considerado un procedimiento rudimentario ya que debido a los grandes volúmenes de agua utilizados promueve la ineficiencia de procesos de molienda incompletos (sin desfibadora, sin cuarta maza, etc.). Por otro lado la imbibición compuesta es la práctica normalmente utilizada en la industria, consiste en adicionar el agua al final del último molino, el caldo formado es bombeado a las etapas anteriores y así sucesivamente, cuando el caldo llega al primer molino, es enviado para otras etapas de la producción.

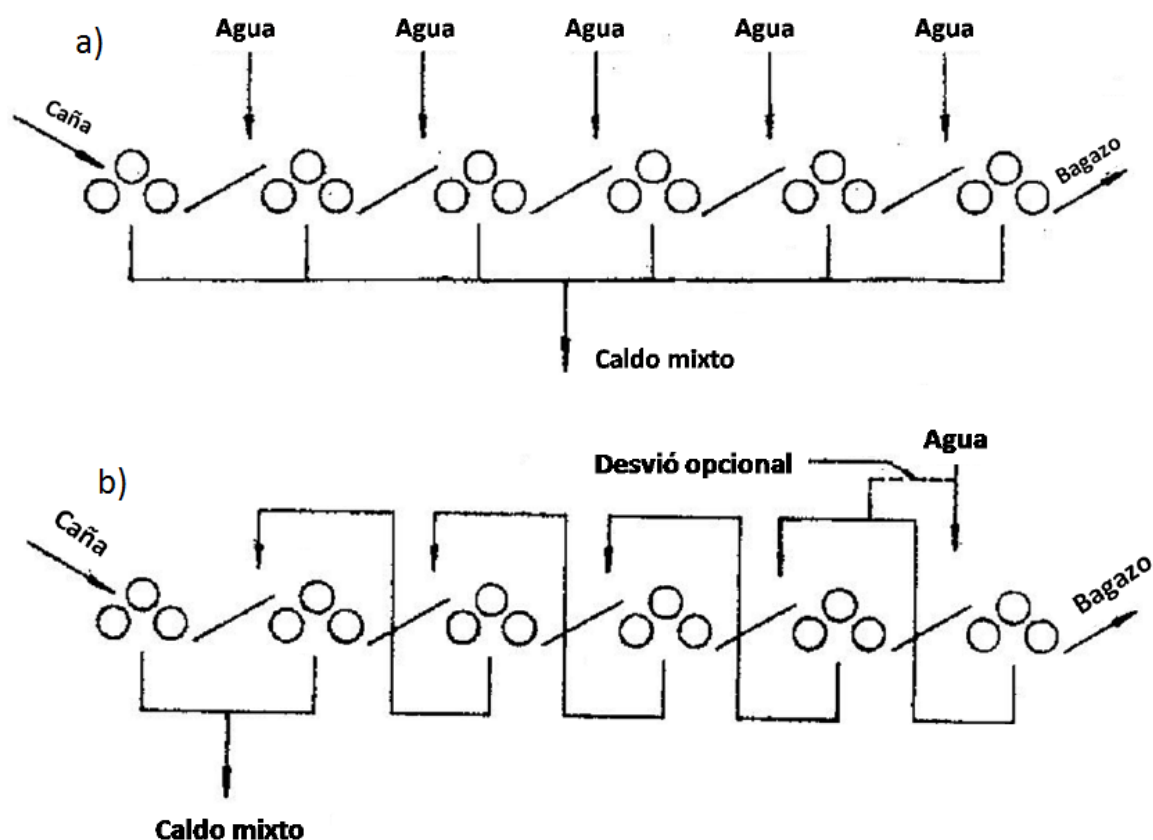


Figura 4. Tipos más comunes de imbibición: a) Imbibición simple b) Imbibición compuesta

Existe un procedimiento paralelo y complementario a la imbibición, llamado maceración. Este procedimiento tiene como finalidad, al igual que la imbibición, el aumento en la extracción, consiste en remojar el bagazo con el jugo diluido producto de la imbibición. En un tándem de 5 molinos normalmente se aplica maceración al segundo, tercero y cuarto molino y el agua de imbibición al quinto.

2.4 Desgaste y pérdida de agarre en las mazas

Entre los diferentes problemas que se presentan en el proceso de molienda, el desgaste ocurrido en la superficie de los dientes de las mazas es sin duda uno de los principales para la disminución en la eficiencia de todo el sistema.

Idealmente, las mazas deberían mantener un contacto constante con las fibras de la caña, sin embargo, hay diferentes elementos no deseados que ingresan al proceso de molienda que producen un efecto abrasivo severo sobre las superficies de contacto. A dicha materia extraña también se le denomina impurezas o

desechos. En la figura 5 se muestran los componentes tanto de la caña de azúcar como los de la materia extraña que ingresan a los sectores de molienda.

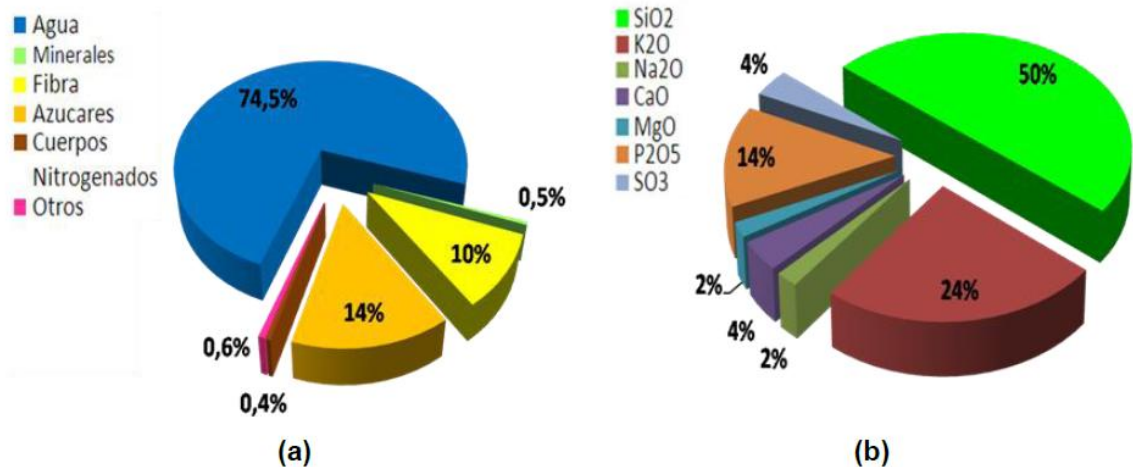


Figura 5. Composición de elementos que ingresan en los molinos de azúcar: a) Composición de la caña de azúcar. b) Composición de materia mineral [14]

Como se puede observar un pequeño porcentaje de la caña es sílice que es el componente más frecuente en la materia extraña, dicho porcentaje se mezcla con las impurezas externas para producir un efecto abrasivo sobre los elementos en que sostienen un contacto.

Aguilar [14] clasifica la materia extraña o impurezas en dos grupos:

El primer grupo es de orden vegetal, se refiere a ramas, raíces, cogollos, entre otros elementos atrapados en el proceso de recolección de caña en el campo. Sin embargo no hay información que relacione el aumento del desgaste en los sistemas de molienda debido a este tipo de impurezas, por otro lado se notifica que podrían afectar los procesos de extracción de sacarosa en los tallos de caña.

El segundo grupo está relacionado con materia mineral. Estos elementos son generalmente tierra y piedras que ingresaron en el proceso de recolección, a esto se le suma trozos metálicos que se pudieron desprender de algún componente mecánico en cualquier proceso anterior al de molienda. De esta forma se tiene una materia mineral extraña de gran dureza (en comparación con las fibras de caña) que promueven el desgaste en las mazas en los molinos y de esta forma se ve afectada de forma negativa la eficiencia del sistema.

Además del desgaste progresivo normalmente presente en las mazas existe una segunda forma de deterioro, el cual es la ruptura o desprendimiento de depósitos

de recubrimiento duro que se aplican en las crestas de los dientes, denominados comúnmente picotes. Dicho desprendimiento ocurre debido a un debilitamiento de la sección transversal del diente producido por socavamiento o defectos en la soldadura, los cuales pueden ser por una mala aplicación, por una débil adhesión al material base o por una mala limpieza en el proceso de recuperación y blindaje, cualquier inclusión que quede durante dicho proceso, posteriormente se comportará como un concentrador de esfuerzos, y de esta forma se podrá propagar una fisura con gran facilidad a través del recubrimiento llevándolo hasta la fractura parcial o en casos más severos total del diente. Las secciones de material desprendido junto con la materia extraña que ingresaron por la recolección en el campo y junto al material del desgaste progresivo se convierten en partículas abrasivas que afectarán los componentes de los molinos posteriores en el tándem.

En la figura 6 se muestra el efecto abrasivo sobre el material libre de recubrimiento, este efecto puede presentarse sobre un material expuesto ya sea porque nunca se aplicó algún tipo de soldadura o por el posterior desprendimiento de la misma. Se puede observar un desgaste mucho más severo en la sección sin recubrimiento y en la cresta del diente donde normalmente es aplicada la soldadura de blindaje.

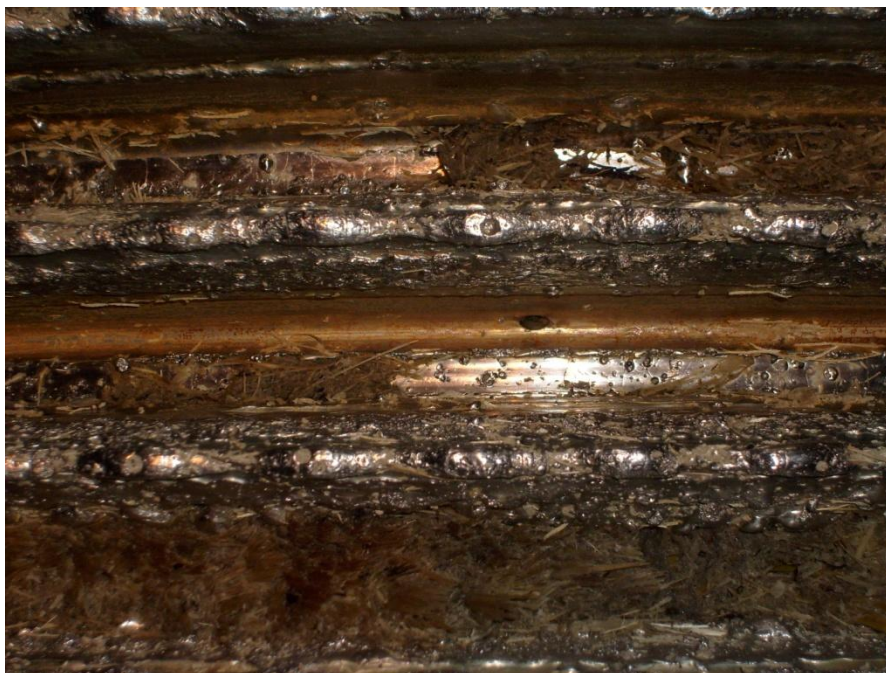


Figura 6. Maza afectada por efecto de socavado y desgaste

Existe un factor que contribuye y acelera el desgaste en el sistema de molienda, la corrosión, se presenta principalmente por el efecto del jugo sobre las fisuras que se forman sobre los recubrimientos, de esta forma se filtra y contribuye con el desprendimiento de los mismos. Otra forma de contribuir en el desgaste de las mazas es produciendo capas de óxido sobre el material libre de recubrimiento, de esta forma cada vez que dicha capa se desprende por el efecto abrasivo con el bagazo se pierde una parte del material base [7]. En la industria se pueden encontrar mazas de acero, debido a su tenacidad y fácil manejo, sin embargo es más sensible a la corrosión y asimismo se debe utilizar un buffer o colchón de recubrimiento para evitar este efecto sobre la superficie. Por otro lado, se encuentran las fundiciones de hierro, las cuales son más comunes debido a su relativa alta resistencia a la corrosión lo que permite aplicar los recubrimientos duros directamente sobre el material base, lo cual se ve representado en procesos más cortos y económicos para la industria.

3. METODOLOGIA

Normalmente es utilizada soldadura de recubrimiento de alto cromo de tipo Fe-Cr-C sobre las mazas de los molinos de caña, para el correcto estudio se deben considerar los procedimientos y parámetros utilizados para la aplicación de dicha soldadura y así mismo las variables que se presentan en el proceso de molienda dentro de los ingenios con el objetivo de contribuir en el avance tecnológico y desarrollo de la aplicación de soldadura de recubrimiento como método alternativo para protección de elementos mecánicos sometidos a desgaste.

3.1 Materiales

Como se mencionó anteriormente, las mazas de los molinos de caña están compuestas por dos materiales principalmente, primero un metal base al cual se le aplica una soldadura de recubrimiento, el que en este caso sería un segundo material.

3.1.1 Metal Base

El material base utilizado en las probetas de este proyecto fue una fundición gris, ya que es comercialmente económico y principalmente debido a su masiva utilización dentro de los ingenios nacionales y en el exterior. Éste sirve como soporte estructural de la maza en sí y así mismo para la soldadura aplicada en la superficie. La composición química del material base se presenta en la Tabla 1.

C	Mn	Si	S	P	Fe
2.7-4	0.8	1.8-3	0.07	0.2	Bal.

Tabla 1. Composición química material base

3.1.2 Recubrimientos

Como material de recubrimiento o consumible de soldadura se utilizaron dos electrodos revestidos de fundición blanca de tipo **Fe-Cr-C** (alto cromo). El primero es denominado en la industria como **WeldSugar-380** (WS-380) el cual es un recubrimiento hipoeutéctico, el segundo es un recubrimiento hipereutéctico denominado **O-8660**. Los diámetros utilizados para dichos electrodos fueron de 1/8 in para el O-8660 e 5/32 in para el WS-380. En la Tabla 2 se presenta la composición química entregada por los fabricantes.

ELEMENTOS	WS-380	O-8660
C	2.88	8.0
Mn	1.81	2.0
Si	2.36	2.0
S	-	-
P	-	-
Cr	18.49	26.0
Ni	0.021	-
Mo	0.002	-
V	-	-
Nb	-	14.0*
W	-	-
Cu	-	-
Fe	Bal.	Bal.

*Valor correspondiente a la suma de Mo + V +Nb + W

Tabla 2. Composición química depósitos de soldadura

3.2 Unidad experimental

La unidad experimental utilizada en este proyecto es un aro de fundición gris el cual es presentado en la Figura 7. A cada aro se le aplicó un consumible, un recubrimiento duro hipoeutéctico y otro hipereutéctico, luego fueron cortados en 12 probetas con el fin de cumplir el requerimiento de la norma ASTM G-65 donde cada sección debe tener un peso aproximado de $175 \pm 10\text{gr}$. Dichas secciones serán sometidas a un desgaste abrasivo bajo una cierta carga y una cantidad de materia mineral extraña controlada.

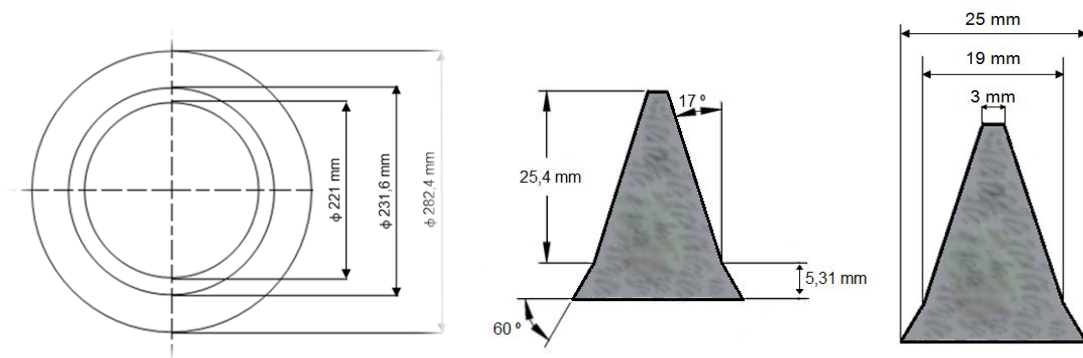


Figura 7. Unidad Experimental

3.3 Elaboración de probetas.

Se construyeron 2 configuraciones, un disco fue recubierto por un consumible hipoeutéctico y otro por un hipereutéctico. Ambas soldaduras fueron aplicadas

sobre la superficie de un aro de fundición gris que simula un diente de una maza de un molino de caña utilizado normalmente en la industria. A continuación se describe la notación para cada una de las configuraciones utilizadas:

Recubrimiento A: Deposito de soldadura WeldSugar-380 como roña al azar en forma continua a un cuarto de la altura desde la parte superior del diente (cresta) sobre los flancos y sobre la cresta del aro de fundición de gris.

Recubrimiento B: Se realizó un procedimiento similar al recubrimiento A, sin embargo se utilizó un consumible o soldadura denominado O-8660.

En la tabla 3 se presentan los parámetros utilizados para el proceso de soldadura de los tipos de electrodos.

Aro	Electrodo	Proceso	Diámetro (in)	Corriente (A)	Polaridad	Velocidad de aplicación (rpm)	Configuración	Forma de aplicación
1	WS 380	SMAW	5/32	80-90	DC (+)	0.07	Roña continua a ambos lados del diente y sobre la cresta.	Manual
2	O-8660	SMAW	1/8	70-85	DC (+)	0.07	Roña continua a ambos lados del diente y sobre la cresta.	Manual

Tabla 3. Parámetros de soldadura en la aplicación de recubrimientos.

La aplicación de los recubrimientos se realizó en un montaje hecho especialmente para los aros sobre un utilaje donde normalmente son aplicadas las diferentes soldaduras dentro del ingenio Manuelita S.A. Se utilizó dicho sistema con el objetivo de simular las condiciones de velocidad de rotación del diente y las condiciones normalmente utilizadas para la aplicación de soldadura de recubrimiento (blindaje) de las mazas en la industria. Se utilizaron tres electrodos por aro, en cada flanco se aplicó un electrodo y se empleó uno más en la cresta.

En la Figura 8 (a) se puede observar el montaje realizado para la aplicación de la soldadura. En el subíndice (b) se muestran los aros después de ser soldados y con sus respectivos electrodos.

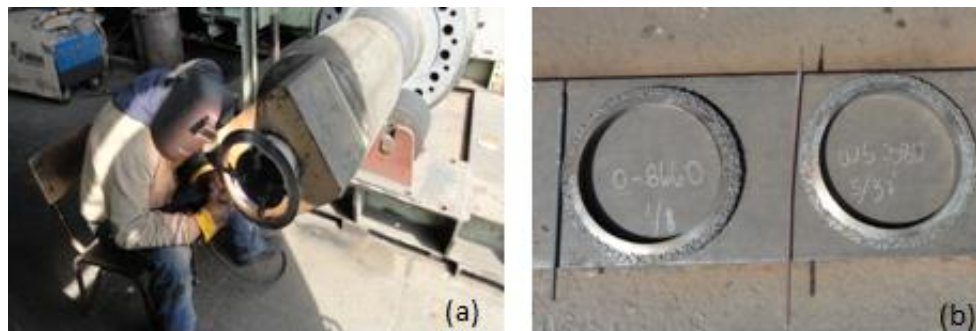


Figura 8. (a) Montaje para la aplicación de los recubrimientos. (b) Aros soldados con su respectivo electrodo

3.4 Duración del ensayo

Para cumplir 15 kilómetros de recorrido lineal del diámetro externo de la rueda, el dispositivo porta probetas debe dar un total de 16907 revoluciones. Esta distancia es tres veces mayor que la requerida en la prueba estándar ASTM G-65 [norma ASTM G-65], ya que el bagazo es un medio menos severo que la arena normalmente utilizada en dichas pruebas.

Como se concluye en la tesis de Casanova [2], no existe una influencia muy grande entre la velocidad y el desgaste de las probetas para rangos relativamente pequeños, de ésta forma se escoge una velocidad constante para las pruebas de 300mm/s o de 20.28 r.p.m. Utilizando esta velocidad para cumplir los 15 km de recorrido se deberán completar 13 horas y 53 minutos de prueba.

En este proyecto se realizaron 3 pruebas de 15 km de recorrido por recubrimiento y por nivel de contaminación, así, se pretende cuantificar los efectos abrasivos que produce el bagazo a dicha distancia recorrida. De esta forma para un nivel de contaminación y un recubrimiento se deberán realizar 41 horas y 39 minutos.

3.5 Banco de pruebas

En la figura 9. Se presenta la máquina utilizada para las pruebas.



Figura 9. Modificación de la norma ASTM-G65

El bagazo es depositado en una tolva, luego es alimentado, transportado y comprimido por un tornillo sin fin a través de un tubo en cuyo extremo se encuentran las probetas que son sometidas al desgaste abrasivo. Sobre el sistema es aplicada una carga constante a través de un peso sobre un volante.

Al presentarse deslizamiento de la rueda con respecto al bagazo, también hay presencia de desgaste. Dicho deslizamiento es similar al que se presenta comúnmente en la industria dentro de las mazas y raspadores de caña, de ésta forma se intenta simular dicho fenómeno. El diámetro de la rueda porta-probetas es similar al presentado por la norma ASTM G-65.

Las variables que se manejan en la máquina son: presión o carga del bagazo sobre la rueda, velocidad de alimentación y velocidad de giro de la rueda.

Con el objetivo de producir futuras comparaciones con otros proyectos relacionados a la evaluación del desgaste en las mazas de molinos de caña se mantuvieron constantes las variables de carga en 600 N y velocidad en 20,28 rpm (300 mm/s). La velocidad de alimentación sin embargo no se logró mantener en un valor constante para los diferentes niveles de contaminación que se manejaron en el proyecto. A medida de que el nivel de contaminación aumenta, así mismo se incrementa la dificultad de la alimentación del bagazo y de esta forma fue necesario variar la velocidad de giro del tornillo alimentación. Para los dos

motores, alimentación de bagazo y porta-probetas se utilizaron variadores de velocidad.

A partir de un aro se produjeron 12 probetas con el objetivo de simular el peso requerido para las probetas de la norma ASTM G-65. De esta forma para cada nivel de contaminación se tienen 3 segmentos con un ángulo de corte de 30°. Estos segmentos son analizados a partir de la medición de pérdida de peso, es decir, antes de cada prueba las probetas son pesadas en una balanza con una precisión de $\pm 0,0001$ gr, después de ser pesadas son acopladas al sistema de porta-probetas.

3.6 Factores de estudio

En este estudio se tuvieron en cuenta dos factores de estudio para el análisis del desgaste: el tipo de material utilizado y la relación fibra- arena o nivel de contaminación.

Para el desarrollo de las pruebas, primero es tomado bagazo limpio sustraído del último molino de algún tándem de algunos ingenios de la región, luego es tamizado en una malla de 3/16 de pulgada y posteriormente es lavado para remover las piedras e impurezas que se puedan entre las fibras. Para algunas pruebas se agregó cierta cantidad de sílice AFS 50/70 con una granulometría de 213-300 μm por partícula. Dicha cantidad depende de la relación que reportó Casanova [2] con respecto a la cantidad de sílice con respecto a la cantidad de fibra:

$$DFR = \frac{W_{mat. extraña}}{W_{fibra}}$$

En la presente investigación se realizaron pruebas a tres niveles de contaminación $DFR=0$, $DFR=0.15$ y $DFR=0.5$. Teniendo estas relaciones, conociendo el porcentaje de la fibra, que es aproximadamente 22,33% [2] y teniendo un peso de fibra, se puede obtener la cantidad de materia extraña que se debe adicionar al bagazo.

Con el objetivo de simular el proceso de la extracción de jugo dentro de un molino y posible efecto lubricante del agua y entre la caña y las mazas, se referenció la investigación de Aguirre y Castañeda [4], donde se muestra una relación experimental entre la cantidad de fibra y la cantidad de agua y jugo que se debe utilizar:

$$Volumen\ de\ Jugo = 0,243\ L/Kg_{bagazo} * W_{bagazo}$$

$$Volumen\ de\ Agua = 0,352\ L/Kg_{bagazo} * W_{bagazo}$$

Teniendo la mezcla de bagazo, arena, jugo y agua, se prosigue a la graduación de las velocidades de los motores para el porta-probetas y para el tornillo de alimentación. Se aplica la carga axial por medio del peso, se inicia la alimentación del bagazo que es comprimido por medio del tornillo sin fin, luego es encendido el motor de porta-probetas para empezar un ciclo de pruebas.

3.7 Variables de respuesta

Para este proyecto se tuvieron en cuenta dos variables a medir en los ensayos, fueron la medición del desgaste y el torque de accionamiento al que estaba sometido el eje conectado entre el servomotor y el porta-probetas en el momento en que las probetas tenían contacto con el desgaste, es decir, la medición de agarre de las probetas.

Para obtener la variable de desgaste, se contabilizó el peso de cada una de las probetas antes y después de terminado cada ensayo. Terminada cada prueba, las probetas son limpiadas con acetona, secadas y posteriormente pesadas en una balanza con precisión de ± 0.0001 gr. De esta forma, el peso inicial menos el peso final representa la pérdida de peso en cada uno de los segmentos analizados. En similitud al trabajo presentado por Victoria y Rodríguez [1] se realizaron 4 paradas por nivel de contaminación, una a 2, 17, 32 y 47 kilómetros. Los primeros 2Km se realizaron con el objetivo de eliminar escoria e impurezas que pudieron incrustarse en la superficie en el proceso de soldadura.

El torque es medido a través de un strain gage ubicado en el eje que transmite la potencia del servomotor hacia el porta-probetas, también se utilizó un sistema de transmisión por radio frecuencia *Bainsfield Engineerign Inc. RD9000 Reciver* y adquisición de 1000 datos por segundo con la ayuda de los software *Instacal* y *Tracer DAQ*.

La medición se logró debido a las pequeñas deformaciones que se presentan en el eje transmisor de potencia al porta-probetas cuando el sistema se encuentra en funcionamiento. Dichas deformaciones son cuantificadas por medio del strain gage y que a través de una calibración del equipo se puede relacionar con el torque aplicado, el cual se encuentra directamente relacionado con el agarre de las probetas.

El torque se midió para 4 puntos en cada uno de los niveles de contaminación que se manejaron, 0, 17, 32 y 47 kilómetros de recorrido lineal del diámetro externo de la rueda. En la Figura 10 se muestran los elementos utilizados para la toma y adquisición de datos.



Figura 10. (a) Strain Gage y antena emisora (b) Equipos de recepción y adquisición de datos.

3.8 Microscopía electrónica

La caracterización de la topografía de las probetas tanto en las crestas como en los flancos de los dos tipos de recubrimientos se realizó a través de un microscopio electrónico de barrido *Jeol, modelo JSM-6490 LV* en un rango de 600X a 1500X de ampliación.

3.9 Metalografía

Para el desarrollo de la metalografía, se extrajeron secciones de las probetas utilizadas en los ensayos donde se pudiese observar la micro-estructura tanto del material base como el del recubrimiento empleado. Luego las probetas se montaron en baquelita para evitar el deterioro y pérdida de las formas de los bordes durante el procedimiento de lijado. De esta forma se pulió la sección transversal con lijas de carburo de silicio desde número 200 hasta 1200, las secciones de prueba fueron pasadas por paños acompañados de sílica de 1 μ y 0,3 μ posteriormente.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el banco de pruebas en función de las variables descritas en la sección 3.7. Los valores obtenidos son graficados como la pérdida de masa en función de la distancia de deslizamiento y nivel de contaminación. También se presentan los resultados arrojados en las pruebas de medición de torque, dichas gráficas relacionan la pérdida de agarre de las probetas con la distancia de deslizamiento y el nivel de contaminación a la que fueron sometidas las probetas.

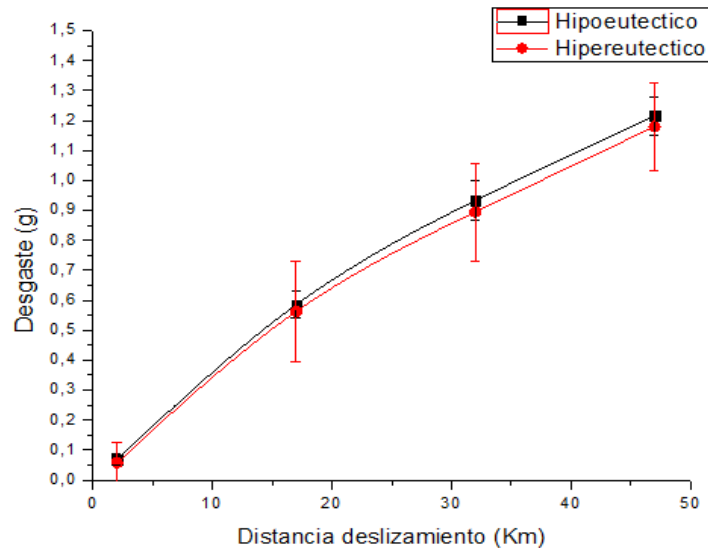
En complemento a los valores obtenidos en las pruebas, se analizaron las superficies tanto de los recubrimientos como del material base por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), se realizaron metalografías en las secciones transversales de cada una de las configuraciones sometidas a pruebas. Para finalizar, las probetas obtenidas de las diferentes pruebas fueron sometidas a los ensayos de micro-dureza. Todos los ensayos fueron realizados con el objetivo de caracterizar las superficies, identificar los mecanismos de desgaste y obtener una relación entre los valores arrojados del procedimiento experimental con la metalurgia de los materiales utilizados.

4.1 Efecto del desgaste en función de la distancia de deslizamiento y nivel de contaminación.

A partir de los datos obtenidos durante la experimentación se desarrollaron gráficas que relacionan el desgaste con la distancia de deslizamiento y el nivel de contaminación a las que fueron sometidas las probetas. Los datos arrojados por los ensayos se pueden observar en la sección de Anexos donde se muestra la masa perdida por cada una de las probetas durante el recorrido y la relación de cantidad de materia mineral agregada al tribo-sistema (DFR).

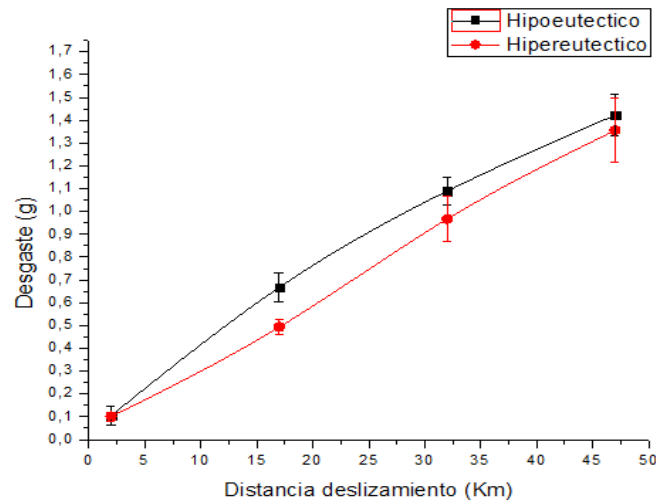
En la gráfica 1 se muestra el desgaste promedio y los valores de error para el nivel de contaminación DFR=0. Se presenta un crecimiento pronunciado para aproximadamente los primeros 20 kilómetros de recorrido, a partir de este punto se puede observar una disminución en la rata de desgaste, sin embargo, no se puede afirmar que se presente una amortiguación completa hasta finalizar la gráfica, esto indica que para un nivel de contaminación igual a cero después de 47 kilómetros de recorrido los recubrimientos utilizados no alcanzan el punto de equilibrio que generalmente revelan los materiales metálicos sometidos a desgaste abrasivo [15]. No se presenta ningún cambio en el orden de desgaste,

los valores demuestran que no hay una diferencia significativa durante el experimento ya que las barras de error se tocan entre sí.



Gráfica 1. Pérdida de peso DFR=0

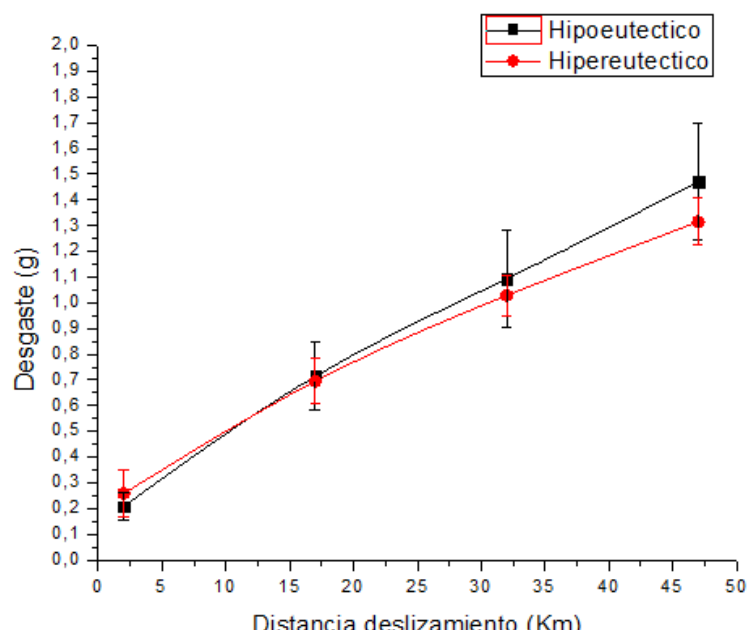
La gráfica 2 presenta el desgaste en función de la distancia de deslizamiento a las que fueron sometidas las probetas bajo un nivel de contaminación DFR=0.15. En el recubrimiento hipoeutético se observa un comportamiento creciente, con las variaciones más pronunciadas durante los primeros 20 kilómetros de recorrido. En el caso del recubrimiento hipereutético se presenta un punto de inflexión donde cambia el comportamiento del desgaste, hasta el final del experimento donde la diferencia en desgaste entre los dos recubrimientos es muy pequeña. Al igual que en caso DFR=0, se mantiene el orden de desgaste, siendo el valor promedio del hipereutético más resistente al desgaste que el hipoeutético.



Gráfica 2 Pérdida de peso DFR=0.15

La gráfica 3 muestra la pérdida de material en las probetas sometidas al desgaste en función de la distancia de deslizamiento, bajo un nivel de contaminación mineral DFR=0.5. En comparación a los dos otros niveles de contaminación, se observa un valor relativamente alto para los primeros 2 kilómetros de recorrido, el cual es un punto de referencia de pérdida de masa debido al desprendimiento de escoria y otros agregados en el proceso de soldadura que puedan ser indeseados para el experimento. De esta forma se observa que a un nivel relativamente alto de contaminación dichos elementos se desprenden, dejando así el recubrimiento y parte del material base en contacto directo con el abrasivo en menor tiempo.

A diferencia de otros niveles de contaminación, en este caso el recubrimiento hipereutético para un recorrido relativamente corto, menor a 20 kilómetros, presenta un mayor desgaste que el hipoeutético, sin embargo después de este punto el recubrimiento hipereutético tiende a disminuir su rata de desgaste hasta llegar a ser menor que el caso hipoeutético. Estos comportamientos están estrictamente relacionados con la metalurgia del material y los mecanismos de desgaste que están presentes sobre este [5]. No se puede afirmar la presencia de un cercano amortiguamiento de los sistemas, especialmente para el caso hipoeutético donde se presenta una mayor pendiente al final del experimento, situación diferente para el recubrimiento hipereutético donde se denota una disminución en la pendiente en referencia al punto anterior.



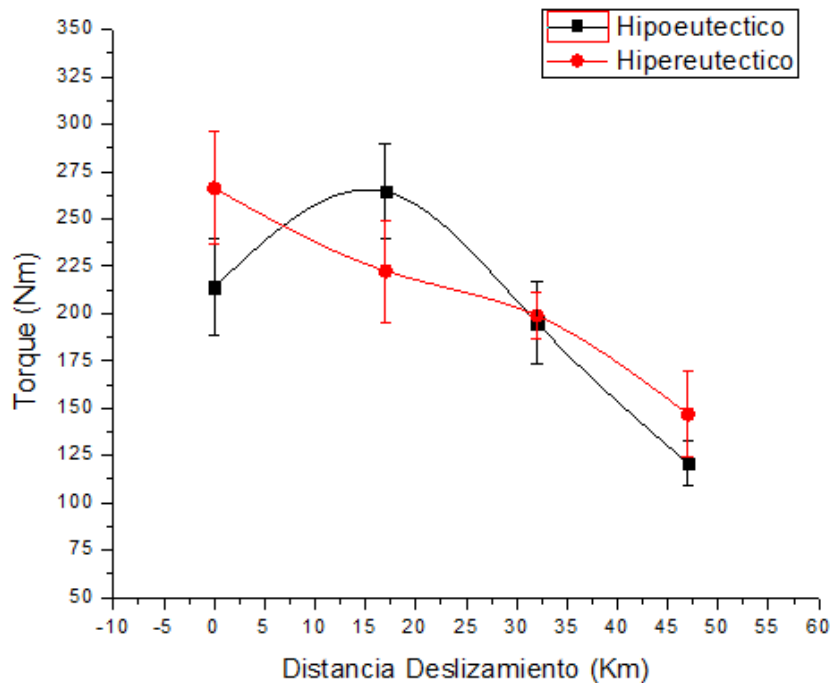
Gráfica 3. Pérdida de peso DFR=0.5

4.2 Efecto del tipo de configuración de recubrimiento en el torque.

Para el análisis del efecto del tipo de configuración de recubrimiento en el torque se realizaron las gráficas de la pérdida en los valores de torque en función de la distancia de deslizamiento a las que fueron sometidas las probetas. Las gráficas 4 a 6 muestran dicho comportamiento teniendo en cuenta el nivel de contaminación de cada prueba.

En la gráfica 4 se muestra el torque de los dos grupos de probetas sometidas a un nivel de contaminación DFR = 0. Para el caso hipereutéctico se observa un descenso en el torque sin caídas bruscas que se aproximan a una tendencia lineal, sin embargo, el caso hipoeutéctico presenta un comportamiento inesperado al mostrar un valor del torque superior para un recorrido de 17 kilómetros en comparación del valor inicial 0 kilómetros. Esta situación se le puede atribuir al efecto de embagazamiento [1] que normalmente experimentan este tipo de configuraciones donde el recubrimiento posee una superficie irregular. Al producirse dicho embotamiento de bagazo en distancias cortas de trabajo, la probeta puede deslizarse y así, efectuar un valor menor del esperado.

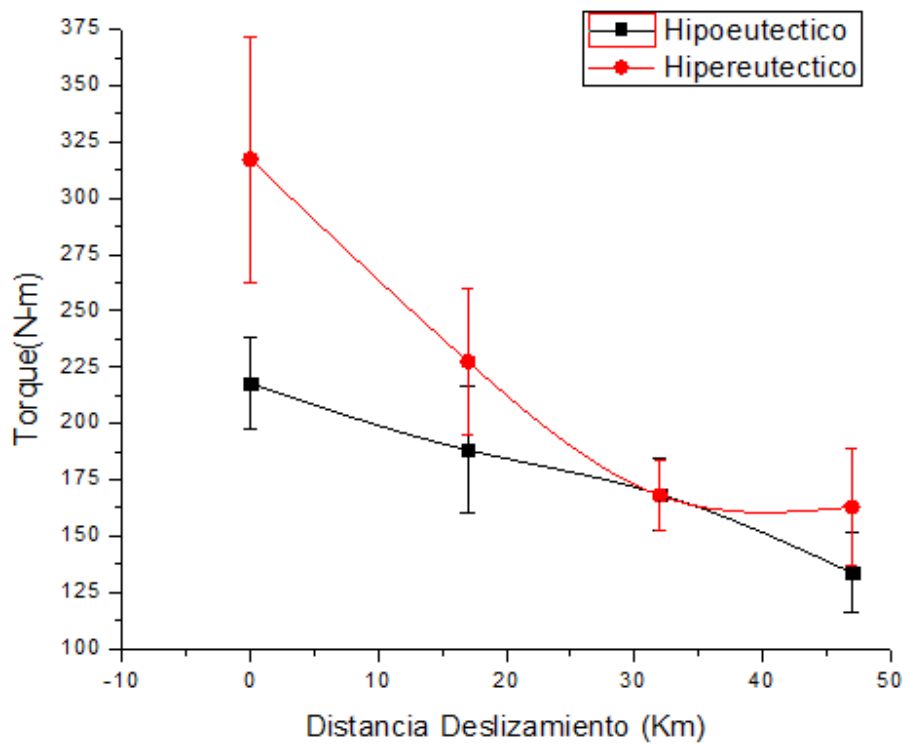
A partir de los 17 kilómetros de recorrido se observa una caída significativa en el torque para el caso hipoeutéctico, hasta el punto en que los valores arrojados son menores que el caso hipereutéctico.



Gráfica 4. Valores de Torque en función de la distancia de deslizamiento DFR=0

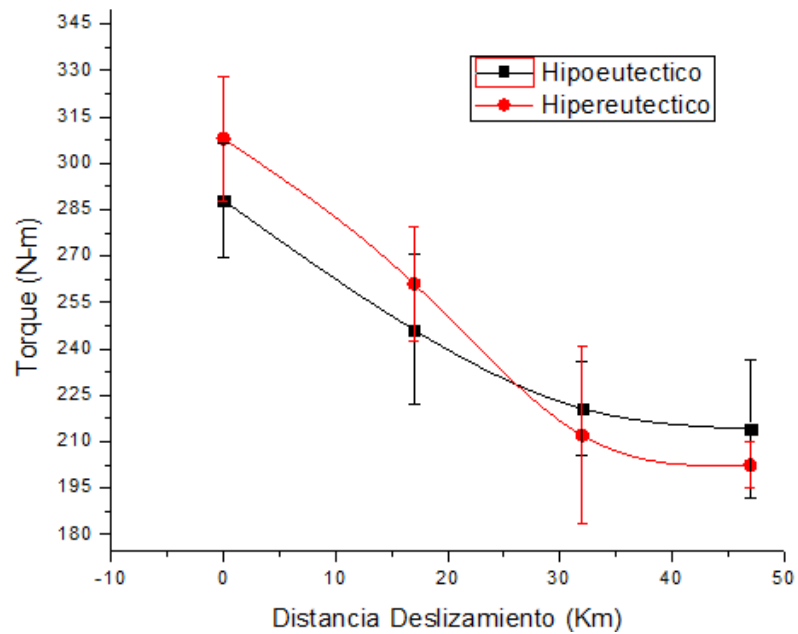
El torque en función de la distancia de deslizamiento para un nivel de contaminación DFR=0.15 se presenta en la gráfica 5. Como primera medida se puede observar la gran diferencia entre los puntos iniciales de las dos configuraciones, sin embargo, la rata de disminución de torque del caso hipereutético es mucho mayor que el caso hipoeutético, de esta forma el primero muestra una pendiente negativa mucho mayor que el segundo.

Para el final de las pruebas también se demuestran diferentes tendencias, mientras que para el caso hipereutético la tendencia es de amortiguamiento, el caso hipoeutético tiende a seguir disminuyendo dichos valores. Este comportamiento posiblemente está relacionado con la microestructura de los recubrimientos (ver sección 4.3) ya que la irregularidad de las superficies tiende a ser similares.



Gráfica 5. Valores de Torque en función de la distancia de deslizamiento DFR=0.15

En el tercer y último caso se presentan los valores de torque en función de la distancia de deslizamiento para un nivel de contaminación DFR=0.5. Para este caso las dos configuraciones presentan un comportamiento muy similar, principalmente para recorridos cortos (menores a 20 kilómetros), sin embargo, se presenta un cambio de posiciones a partir de este punto donde el caso hipereutético tiende a ser menor que el hipoeutético.



Gráfica 6. Valores de Torque en función de la distancia de deslizamiento DFR=0.5

Se puede observar una disminución significativa en los primeros puntos de distancia recorrida y una tendencia de amortiguamiento en los valores de torque para los dos tipos de recubrimiento en los puntos finales de la prueba DFR=0.5, comportamiento similar al que reporta Victoria y Rodríguez [1] para niveles altos de contaminación.

4.3 Análisis Metalográfico

En la figura 11 y 12 se muestra la forma y organización del grafito referente al material base, el cual se presenta como láminas de grafito distribuidas aleatoriamente.

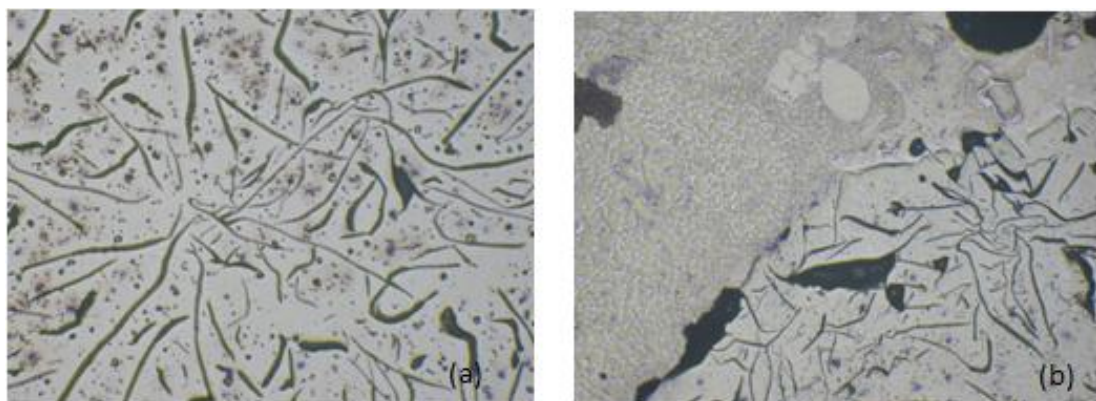


Figura 11. (a) Sección media del metal base 200X (b) Interfaz entre recubrimiento y metal base 200X

Para obtener la matriz en la que se encuentra inmerso el grafito se atacó la sección con Nital al 2%, revelando así una matriz perlítica con la presencia de esteadita, común en fundiciones con alto contenido de fósforo (más de 0.15% de P). La microestructura del material base revela un grafito laminar según la norma AST A247 y se asimila a un tipo de fundición tipo A, el cual posee una mayor resistencia al desgaste en comparación a otros tipos de fundición [18].

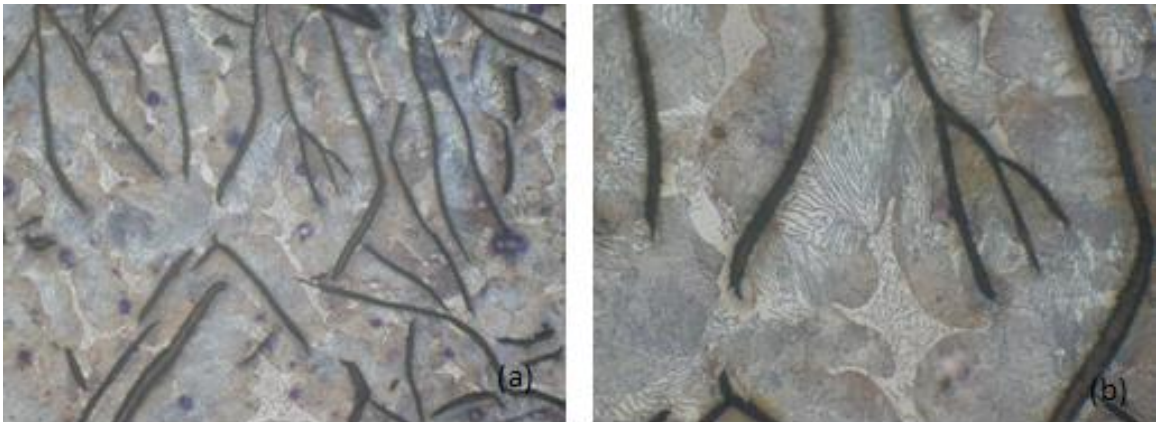


Figura 12. Microestructura del metal base (a) 200X (b) 500X

En la figura 13 se presenta la microestructura de los depósitos duros utilizados para el blindaje del material base. En la sección (a) se pueden observar dendritas de austenita con una fase interdendrítica eutéctica donde se encuentran láminas de carburos de cromo (Fe-Cr) y austenita, micro-constituyentes representativos de recubrimientos hipoeutéctico [6]. La sección (b) es representativa de un material hipereutéctico donde se encuentran carburos primarios y una matriz eutéctica, en adición se puede observar un tercer constituyente, carburo de niobio, el cual posee una alta dureza y resistencia al desgaste.

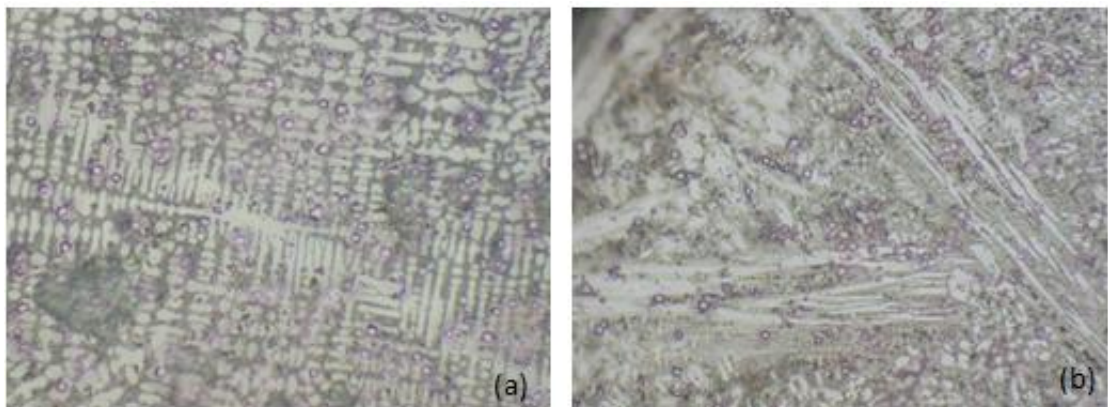


Figura 13. Microestructura de recubrimiento (a) Hipoeutéctico 500X (b) Hipereutéctico 500X

Se observaron los bordes de los recubrimientos con el fin de encontrar deformación plástica en la matriz, sin embargo no se presentó dicho fenómeno. Con ayuda del EDS de la microscopía electrónica se logró detallar los componentes de las diferentes fases que se observan en la microscopía óptica. En la figura 14 se presenta la sección transversal los recubrimientos junto con la identificación de los micro-constituyentes encontrados en los depósitos de soldadura. En el recubrimiento hipereutético se encontraron tanto carburos de cromo como de niobio inmersos en una matriz eutética, Figura 14 (b), mientras que para el caso hipoeutético se encontró una configuración dendrítica de hierro y dentro de una matriz eutética compuesta por placas de carburo de cromo y hierro y Figura 14 (a).

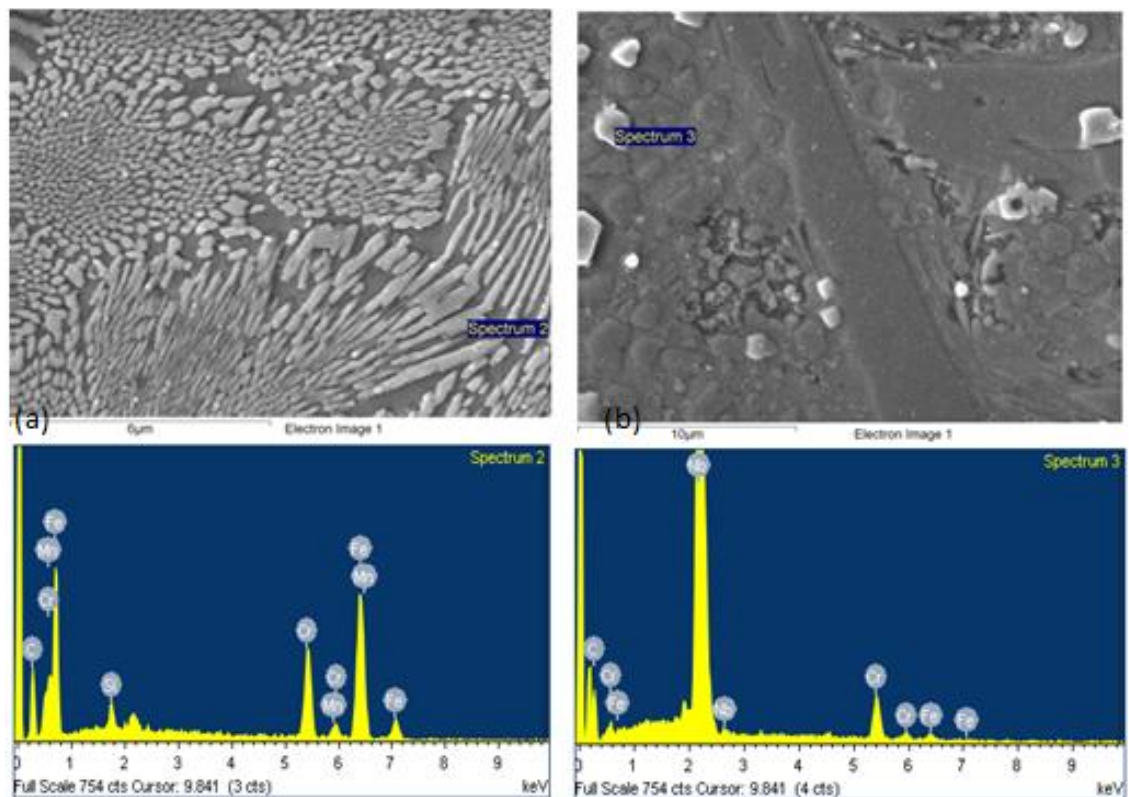


Figura 14. EDS para recubrimiento (a) Hipoeutético 5.000X (b) Hipereutético 5.000X

4.4 Análisis de superficies de desgaste

Para el análisis de las superficies se utilizó microscopía electrónica de barrido, desde la figura 15 hasta la 18 se presentan las superficies desgastadas dependiendo del nivel de contaminación mineral que se manejó en el respectivo

experimento. Se manejaron dos aumentos principalmente de 600X y 1500X para la obtención de imágenes

Las superficies de los depósitos sometidos a desgaste sin adición de materia mineral, DFR=0, se pueden observar en las Figura 15. Los subíndices (a) y (b) presentan la superficie del recubrimiento hipoeutético, donde se observan los surcos formados por deformación plástica debido a la acción abrasiva del bagazo. Utilizando electrones retrodispersados, (c) y (d) se puede observar la superficie desgastada del recubrimiento hipereutético y parte de la microestructura del mismo.

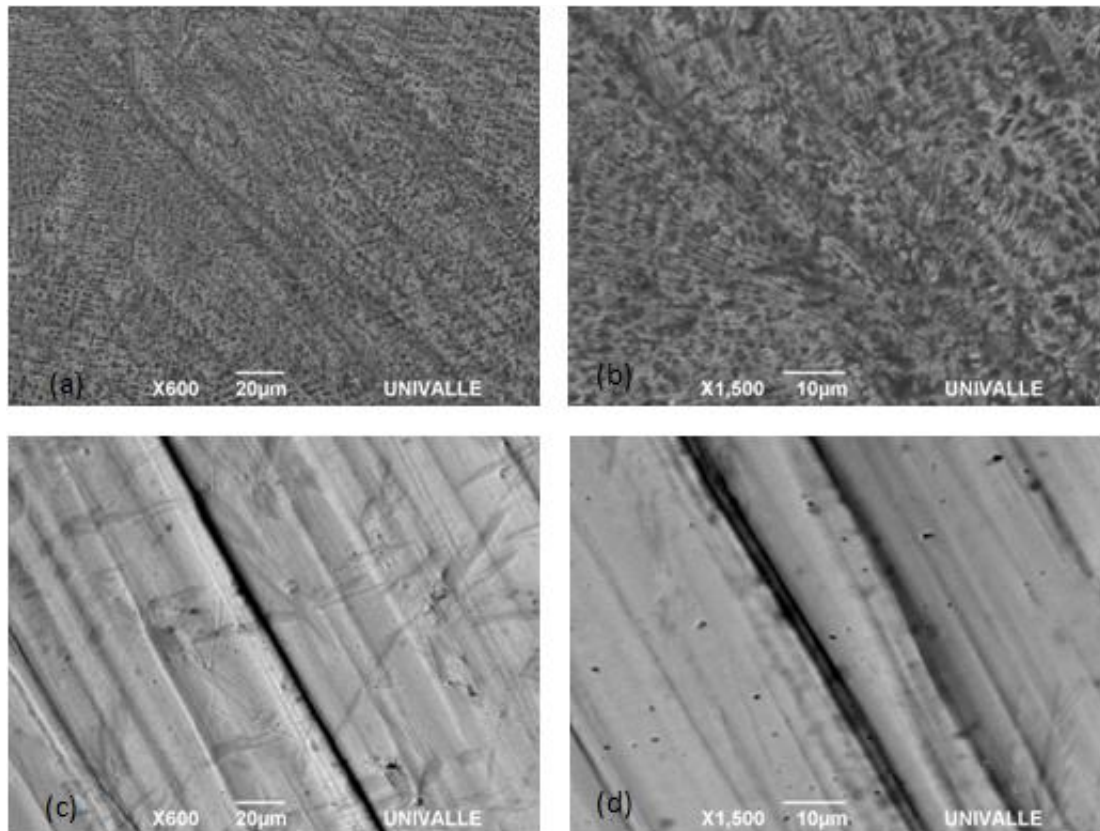


Figura 15. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento bajo DFR=0 (a) Hipoeutético 600X (b) Hipoeutético 1500X (c) Hipereutético 600X (d) Hipereutético 1500X

Para un nivel de contaminación media, DFR=0.15 y un depósito duro hipoeutético se presentan diferentes mecanismos de desgaste, desde *cutting* y *ploughing* hasta *wedge formation* [16] como se puede observar en la Figura 16. A pesar de presentar diferentes mecanismos se puede comentar que existen algunos que

predominan como lo es el *cutting*, tal y como se observa en los diferentes subíndices existe una constante presencia de esta forma de desgaste.

La figura 16. Representa los mecanismos de desgaste presentes sobre el recubrimiento duro hipereutético bajo un DFR=0.15. En los subíndices (a) y (b) se presenta la forma de desgaste sobre las pepas hipoeutéticas aplicadas en la cresta del diente, mientras que los subíndices (c) y (d) revelan la soldadura hipereutética, se observan surcos menos pronunciados que en el caso hipoeutético y un predominante mecanismo de *cutting*.

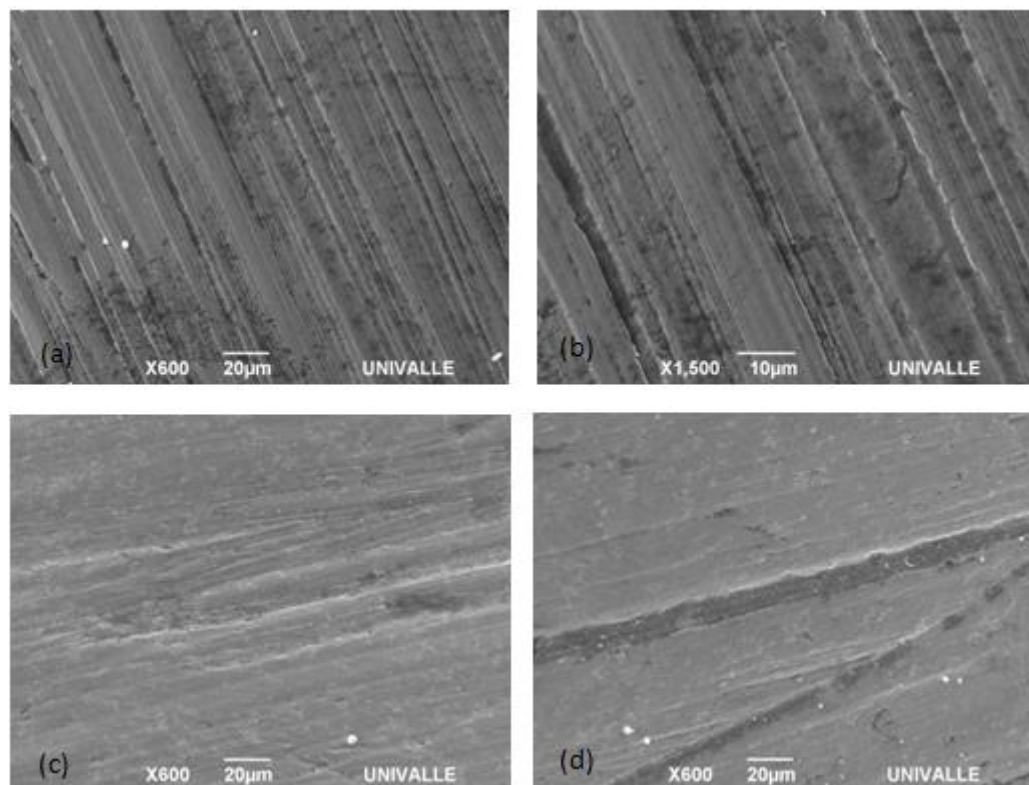


Figura 16. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento bajo DFR=0.15 (a) Hipoeutético 600X (b) Hipoeutético 1500X (c) Hipereutético cresta 600X (d) Hipereutético 1500X.

La figura 17. Muestra los mecanismos de desgaste efectivos sobre la superficie de los recubrimientos bajo un nivel de contaminación mineral alto DFR=0.5. En los subíndices (a) y (b) se presenta la superficie del depósito hipoeutético sobre la cresta donde se observan surcos producidos por *cutting*, *ploughing* y deformación plástica, en el subíndice (c) se encuentra una sección desnuda del material base, en el cual se observa pequeños surcos producidos por la abrasión. El subíndice

(d) muestra el depósito aplicado sobre un flanco del diente, se observa un comportamiento similar al de la cresta donde predomina el mecanismo de corte o *cutting*.

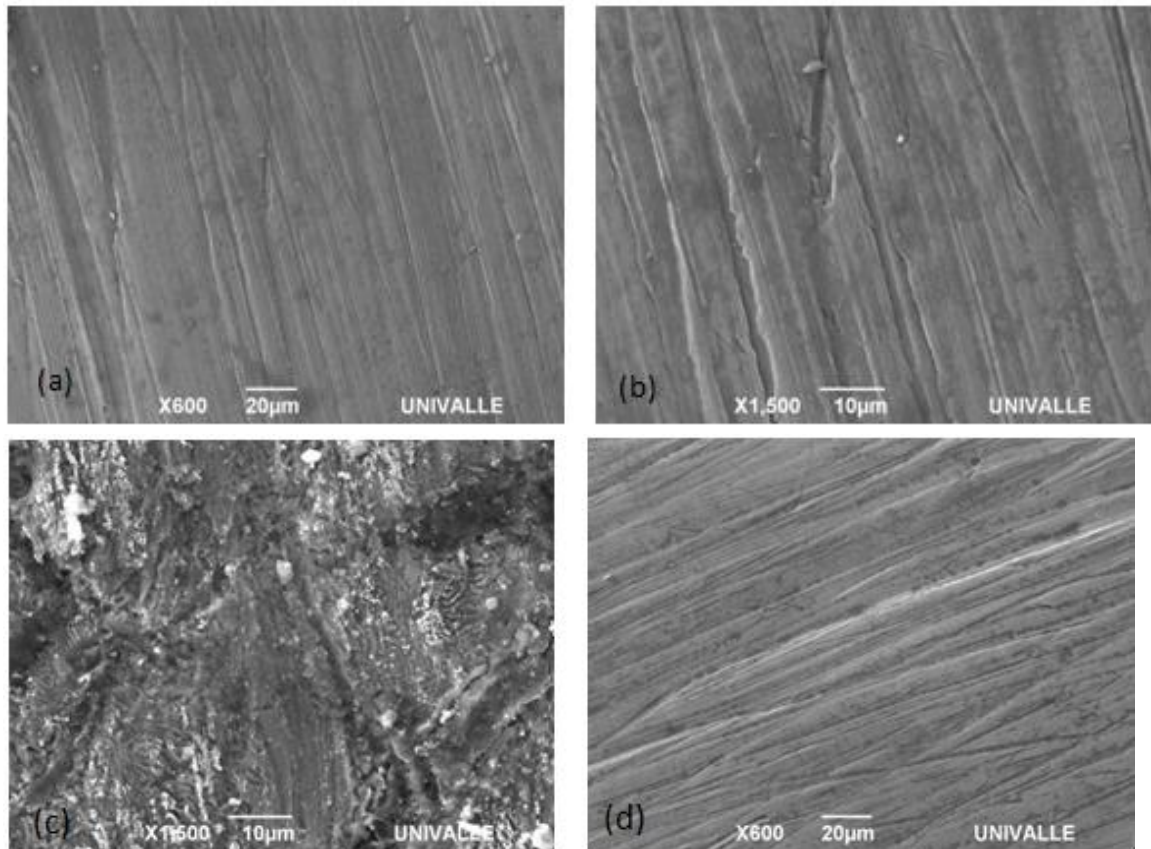


Figura 17. SEM sobre las superficies ensayadas bajo DFR=0.5 (a) Recubrimiento Hipoeutético 600X cresta (b) Recubrimiento Hipoeutético 1500X cresta (c) Metal base 1500X (d) Recubrimiento Hipereutético 1500X flanco.

En los subíndices (a) y (b) de la Figura 18. Se muestran las superficies del depósito duro hipereutético aplicado sobre la cresta del diente bajo un DFR=0.5, se puede observar un desgaste menos agresivo que en el caso hipoeutético bajo las mismas condiciones, atribuible a la acción protectora que los carburos proveen al material, en la sección de mayor aumento se observa algo de deformación plástica y *cutting*, [17] sin embargo las áreas afectadas no son tan grandes como en casos anteriores. En los subíndices (c) y (d) se presentan las superficies de desgaste del recubrimiento aplicado sobre un flanco del diente, se observa la acción constante de mecanismo como *cutting* y *ploughing*, en adición se puede observar el fenómeno de *spallation* o desprendimiento de carburos.

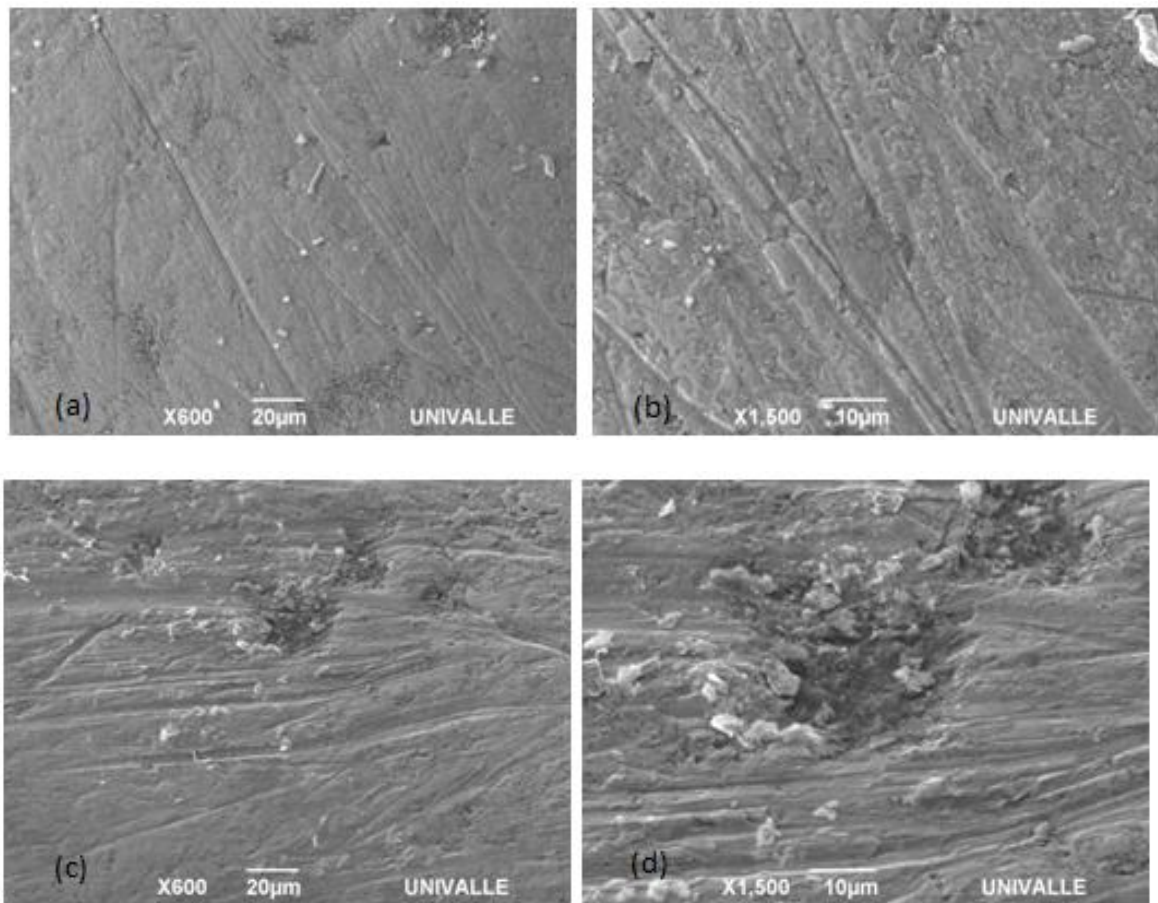
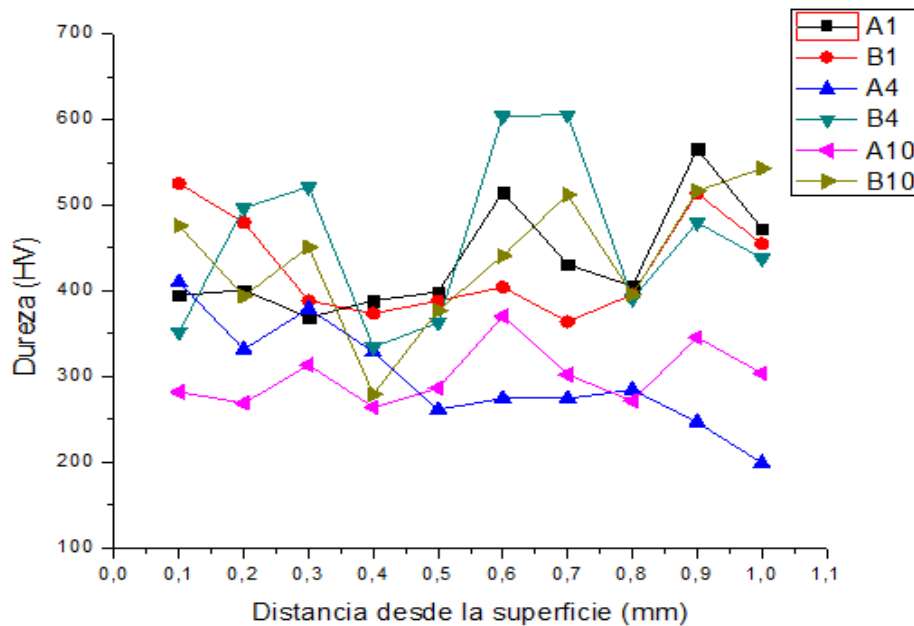


Figura 18. SEM sobre las superficies ensayadas de un recubrimiento hipereutético bajo DFR=0.5 (a) Cresta 600X (b) Cresta 1500X (c) Flanco 1500X (d) Flanco 1500X.

4.5 Microdureza

En la grafica 7 se presentan los valores de dureza en función de la distancia, se obtuvieron desde la superficie hasta 1mm de profundidad. Las identaciones se realizaron en la matriz de los recubrimientos hipoeutéticos e hipereutéticos sometidos a los diferentes niveles de contaminación. Para un fácil manejo de los datos, el recubrimiento hipoeutético se denominó A, mientras que el hipoeutético B; el nivel de contaminación se designó con números: 1, 4 y 10 para DFR=0, 0.15 y 0.5 respectivamente. Las mayores variaciones se presentan en los depósitos de más cantidad de carbono, hipereutéticos, los cuales tienden a tener una mayor cantidad de carburos. De esta forma se explica valores con gran variación como en el caso B10, donde la indentación posiblemente tuvo lugar cerca o sobre un carburo. No se presenta un cambio significativo entre los valores de dureza de la superficie con respecto al centro, lo que indica que no hubo una acción apreciable debido a la deformación plástica superficial de la matriz.



Gráfica 7. Valores de microdureza de la matriz de los diferentes recubrimientos sometidos a desgaste

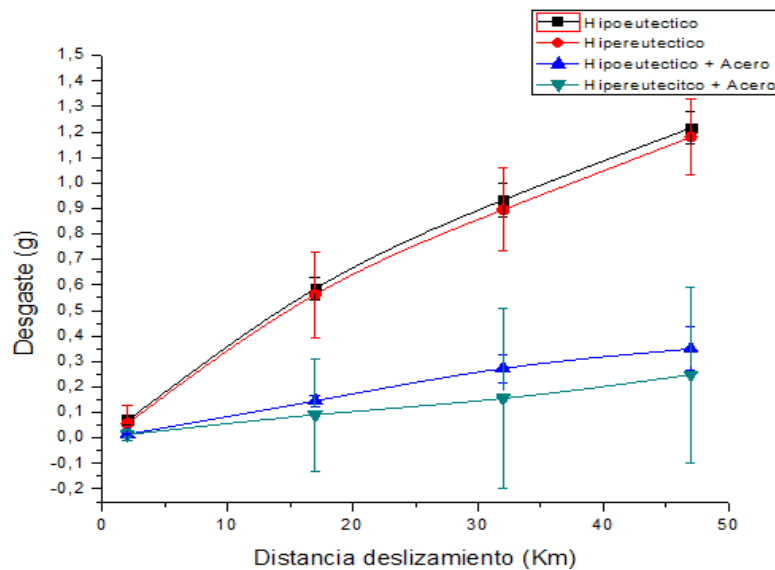
4.6. Comparación del efecto del desgaste entre prototipos y diferentes configuraciones.

Con el objetivo de ahondar en la evaluación del desgaste en las mazas de molinos de caña y el comportamiento de diferentes configuraciones (combinación de materiales base y recubrimientos) sometidas a condiciones de deterioro por abrasión, se realizó una comparación entre diferentes prototipos y diferentes configuraciones que se utilizaron durante el desarrollo de una parte del proyecto de investigación.

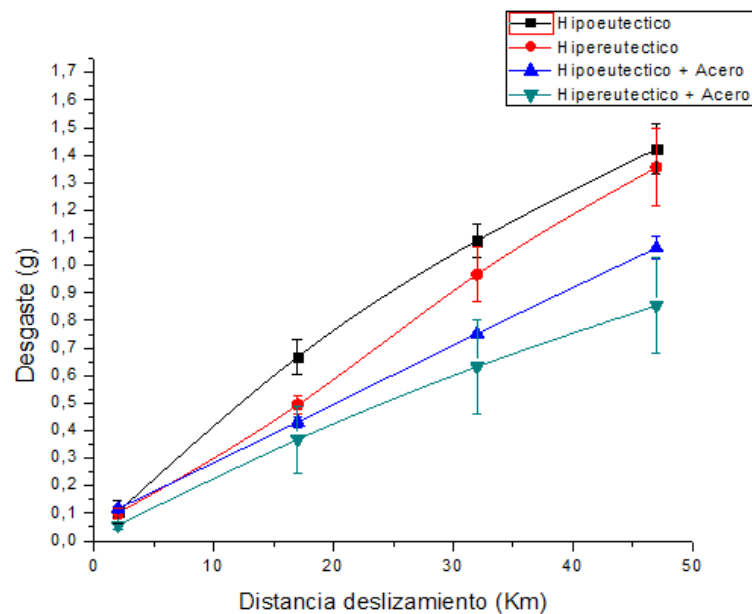
Se compararon y analizaron los resultados mostrados en esta tesis junto al proyecto presentado por Victoria y Rodríguez [1] donde se sometieron probetas con la misma geometría, carga y distancia de deslizamiento a desgaste abrasivo bajo la modificación de la norma ASTM G-65, donde la variación presente fueron la utilización de un material base acero A-36, sobre éste un *buffer* o colchón de protección de acero inoxidable para el material base y finalizado con cordones de roña continua de recubrimientos rico en cromo de carácter hipoeutéctico e hipereutéctico sobre los flancos y la cresta del diente.

En las gráficas de 8 hasta 10 se presentan los valores de desgaste en función de la distancia de deslizamiento para todos los tipos de configuraciones bajo diferentes niveles de contaminación. Las gráficas 8 y 9 ilustran los niveles de

contaminación DFR=0 y DFR=0.15, respectivamente, se observa una mayor resistencia al desgaste por parte de las configuraciones utilizadas por Victoria y Rodríguez, sin embargo en la grafica 10, referente al máximo nivel de contaminación, DFR=0.5, la configuración donde se utilizó la fundición gris de material base tanto para los depósitos hipoeutéctico e hipereutéctico presentaron mejor comportamiento donde se utilizó acero junto con un *buffer* de inoxidable.

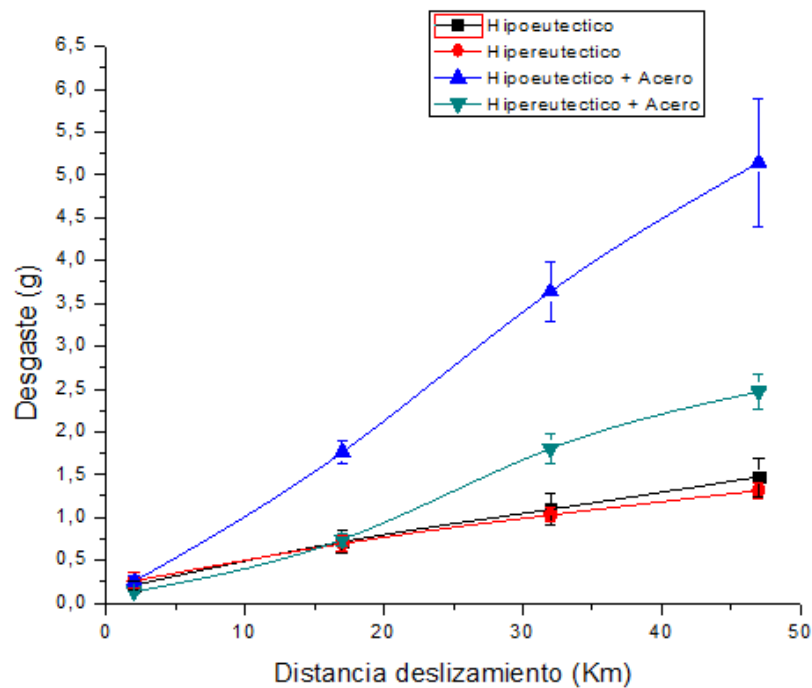


Gráfica 8. Comparación de desgaste entre prototipos y configuraciones en DFR=0



Gráfica 9. Comparación de desgaste entre prototipos y configuraciones en DFR=0.15

Este comportamiento es atribuible a la mayor resistencia al desgaste que posee la fundición gris en comparación a un acero estructural o un acero inoxidable 309, en presencia de jugo [12]. Al manejar un nivel tan alto de materia mineral, más partículas abrasivas tendrán contacto con el material base o colchón en el caso del acero y de esta forma el desgaste se ve afectado significativamente por el comportamiento del material base.



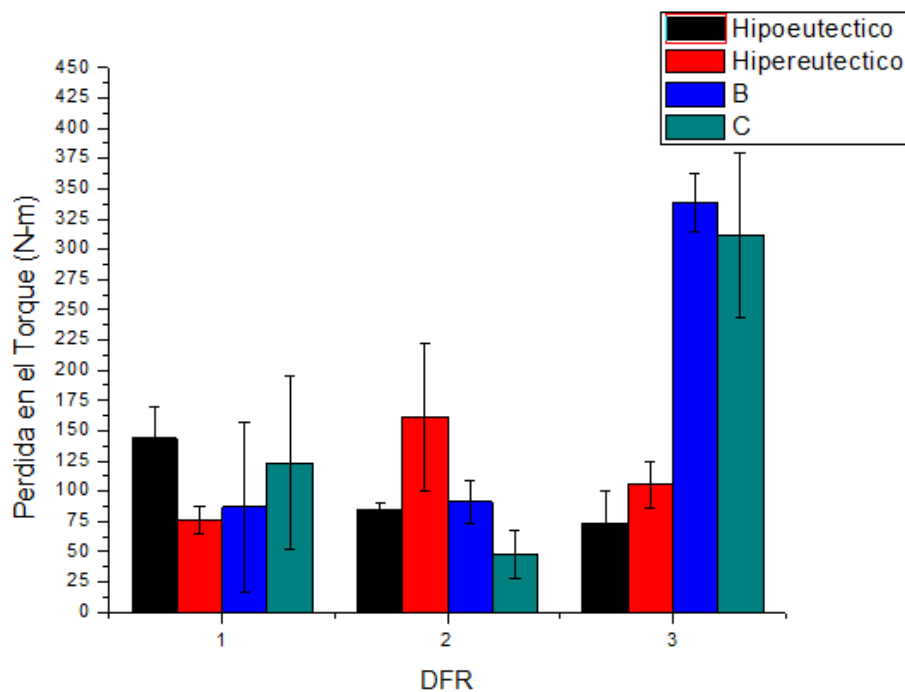
Gráfica 10. Comparación de desgaste entre prototipos y configuraciones en DFR=0.5

En complemento al análisis del desgaste producido por el efecto abrasivo, también se compararon entre los diferentes prototipos los valores de torque que están directamente relacionados con la pérdida de agarre de las probetas durante el experimento. La gráfica 11 presenta los comportamientos del torque en el sistema en relación con la pérdida de éste para un recorrido de 47 Kilómetros.

Los valores presentados en los diferentes gráficos muestran la diferencia entre el primer valor de torque y el último, 0 kilómetros y 47 kilómetros. Sin embargo, para el nivel de contaminación DFR=0 (representado por el numeral 1 en la gráfica) se utilizó como primer dato los 17 kilómetros ya que en los datos reportados por Victoria y Rodríguez este fue el primer punto que presentaron. Para cuestiones de facilidad de manejo, los datos obtenidos del documento de Victoria y Rodríguez

serán denominados como recubrimientos B y C, para depósitos hipoeutéticos e hipereutéticos, respectivamente.

En la gráfica 11 se presenta la diferencia de valores de torque para tres sistemas con un nivel de contaminación diferente cada uno. Los mejores comportamientos bajo un DFR=0 los presentan el recubrimiento hipereutético y la configuración B. La pérdida de agarre para un nivel de contaminación igual a 0.15 es representado como numeral 2, donde el mejor desempeño lo presenta la configuración C, seguida por el recubrimiento hipoeutético. El máximo nivel de contaminación es denominado como 3 en el gráfico, donde el comportamiento con menor diferencia entre sus puntos inicial y final son los del recubrimiento hipoeutético primero, hipereutético segundo.



Gráfica 11. Comparación de pérdida en el torque entre prototipos y configuraciones donde (1) DFR=0 (2) DFR=0.15 (3) DFR=0.5

5. CONCLUSIONES

Se evaluaron dos depósitos de soldadura de carácter hipoeutéctico e hipereutéctico aplicados sobre una fundición gris, los cuales fueron sometidos a desgaste abrasivo en función de tres diferentes niveles de contaminación, bajo una carga y una velocidad constante. Se determinó un aumento proporcional del desgaste con respecto al nivel de contaminación utilizado.

Se encontró una tendencia de amortiguamiento para los valores de desgaste de los dos tipos de recubrimiento utilizados. Para todas las configuraciones y bajo todos los niveles de contaminación se presentó una mayor pendiente de desgaste para los primeros veinte kilómetros de recorrido.

La pérdida de agarre a través de la medición de la torsión en función de la distancia de deslizamiento es significativa, ya que los depósitos de roña al ser aplicados de una forma aleatoria, presentan picos de mayor tamaño y son estos los que fácilmente se desgastan por efectos de la acción abrasiva del bagazo y la materia mineral agregada.

Se analizó el estado de las superficies desgastadas de los depósitos de soldadura, se encontró que el mecanismo predominante en todos los recubrimientos es el micro-corte o *cutting*, seguido por *ploughing* o micro-arado y posteriormente por la deformación plástica. En el caso hipereutéctico y máximo nivel de contaminación se presentó desprendimiento de carburos.

Se compararon los resultados de desgaste obtenidos en este proyecto junto con los presentados por Victoria y Rodríguez. Para los dos primeros niveles de contaminación, 0 y 0.15, las probetas con un material base de acero estructural presentaron un mejor comportamiento a la resistencia al desgaste, sin embargo para el máximo nivel de contaminación ocurrió lo contrario.

Mediante la diferencia entre los valores iniciales y finales del torque, se encontró que el agarre y la pérdida de este, está relacionado con la morfología de los depósitos aplicados y de la severidad de desgaste a los que son sometidos.

La variabilidad que se presenta tanto en los datos obtenidos de desgaste y de torque está estrictamente relacionada con la forma irregular de los depósitos y así mismo con la heterogeneidad de la microestructura de los recubrimientos utilizados.

REFERENCIAS

- [1] VICTORIA, R Y RODRIGUEZ V. Evaluación al desgaste y pérdida de agarre en depósitos duros hipoeutéticos e hipereutéticos por soldadura, sobre mazas de molinos de caña de azúcar. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales. Febrero 2011.
- [2] CASANOVA, F. Determinación De Las Propiedades Abrasivas Del Bagazo De Caña De Azúcar. Tesis de Maestría. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Mecánica. Junio 2006.
- [3] GULIAEV, A.P. Metalografía. Editorial Mir, Moscú. 1983.
- [4] AGUIRRE, D. y CASTAÑEDA, H. Sinergia abrasión – corrosión dada en los molinos de caña producida por el bagazo y el jugo de la caña. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009.
- [5] BUCHANAN, V.E; SHIPWAY, P.H Y MCCARTNEY, D.G. A comparison of the abrasive wear behaviour of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying, *Wear* 264 (2008) 542-549.
- [6] BUCHANAN, V.E; SHIPWAY, P.H Y MCCARTNEY, D.G. Microstructure and abrasive wear behavior of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear* 263 (2007) 99-110.
- [7] UQUILLAS, B. Evaluación de la sinergia abrasión-corrosión en materiales base de mazas de molinos de caña de azúcar. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales. 2009.
- [8] COELHO, A., ANTONIO, V. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. *Soldagem Insp.* Vol.14, No. 2, p.140-150, Abr/Jun 2009.
- [9] BOADA O. Fricción y desgaste de las mazas de molinos de caña. *Construcción de Maquinaria*. 1985, 10(2): 13-20.
- [10] DURÁN L. Efecto de la geometría de los depósitos de soldadura en la disminución del desgaste y pérdida de agarre en las mazas de molinos de caña de azúcar. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010.

- [11] HERNANDEZ, O. Evaluación del desgaste y pérdida de agarre en depósitos de soldadura sobre mazas de molinos de caña de azúcar. Tesis de Maestría. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales. Enero de 2010.
- [12] BEDOYA, A. Y FAJARDO, L. Evaluación del desgaste en mazas de fundición gris de los molinos de caña de azúcar en presencia y ausencia de jugo de caña. . Tesis de Pregrado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales. 2011.
- [13] DELFINI, P. Curso: Preparación y Molienda. Convenio SENA-ASOCAÑA-CENICAÑA. Febrero 1999.
- [14] AGUILAR, J. Y. Revisión de procedimientos de recuperación, recubrimiento y agarre de las mazas de los molinos en el Ingenio Manuelita S.A. Revisado en Cali el 24 de abril del 2009.
- [15] BHUSHAN, B. Modern Tribology Handbook. CRC press, New York, 2001.
- [16] BHUSHAN, B. Principles and Applications of Tribology. John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [17] MEZLINI, S. Correlation Between Tribological Parameters and Wear Mechanisms of Homogeneous and Heterogeneous Material. Springer 2008.
- [18] CUBBERLY, W. Metal Handbook Ninth Edition Volume 1: Properties and selection: Irons and Steels, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.

ANEXOS

	DFR = 0								
PROBETA	0 KM	$\Delta W1$	2 KM	$\Delta W2$	17 KM	$\Delta W3$	32 KM	$\Delta W4$	47 KM
A1	179,712	0,0497	179,6623	0,536	179,176	0,8612	178,8508	1,1428	178,5692
A2	179,6685	0,0697	179,5988	0,6209	179,0476	0,9863	178,6822	1,2463	178,4222
A3	185,9117	0,0867	185,825	0,5993	185,3124	0,9523	184,9594	1,2577	184,654
PROMEDIO A	181,764067	0,0687	181,695367	0,5854	181,178667	0,93326667	180,8308	1,2156	180,548467
B1	179,3674	0,1371	179,2303	0,5357	178,8317	0,8486	178,5188	1,2634	178,104
B2	173,833	0,017	173,816	0,7427	173,0903	1,0756	172,7574	1,2668	172,5662
B3	177,8802	0,018	177,8622	0,4095	177,4707	0,7606	177,1196	1,0094	176,8708
PROMEDIO B	177,026867	0,05736667	176,9695	0,56263333	176,464233	0,89493333	176,131933	1,17986667	175,847

Tabla 4. Registro de pérdida de peso DFR = 0

	DFR=0.15								
PROBETA	0 KM	$\Delta W1$	2 KM	$\Delta W2$	17 KM	$\Delta W3$	32 KM	$\Delta W4$	47 KM
A4	177,1696	0,1295	177,0401	0,7388	176,4308	1,1572	176,0124	1,5262	175,6434
A5	173,9515	0,128	173,8235	0,6477	173,3038	1,036	172,9155	1,3494	172,6021
A6	176,4793	0,0588	176,4205	0,616	175,8633	1,0758	175,4035	1,3922	175,0871
PROMEDIO A	175,8668	0,1054	175,7614	0,6675	175,1993	1,0897	174,7771	1,4226	174,4442
B4	180,3744	0,0873	180,2871	0,4617	179,9127	0,8891	179,4853	1,2387	179,1357
B5	183,3167	0,0917	183,225	0,5223	182,7944	1,0773	182,2394	1,5127	181,804
B6	180,7246	0,124	180,6006	0,4974	180,2272	0,9346	179,79	1,3163	179,4083
PROMEDIO B	181,4719	0,101	181,3709	0,4938	180,9781	0,967	180,5049	1,3559	180,116

Tabla 5. Registro de pérdida de peso DFR = 0.15

	DFR = 0.5								
PROBETA	0 KM	$\Delta W1$	2 KM	$\Delta W2$	17 KM	$\Delta W3$	32 KM	$\Delta W4$	47 KM
A10	182,4821	0,1636	182,3185	0,6131	181,869	0,9841	181,498	1,3615	181,1206
A11	183,0397	0,1961	182,8436	0,6666	182,3731	0,9857	182,054	1,3217	181,718
A12	178,9765	0,2658	178,7107	0,8625	178,114	1,3118	177,6647	1,7336	177,2429
PROMEDIO A	181,4994	0,2085	181,2909	0,7141	180,7854	1,0939	180,4056	1,4723	180,0272
B10	177,886	0,2184	177,6676	0,6254	177,2606	0,9469	176,9391	1,2215	176,6645
B11	181,3769	0,1956	181,1813	0,6631	180,7138	1,0305	180,3464	1,321	180,0559
B12	184,7539	0,3612	184,3927	0,7959	183,958	1,1079	183,646	1,4036	183,3503
PROMEDIO B	181,338933	0,2584	181,080533	0,6948	180,644133	1,02843333	180,3105	1,31536667	180,023567

Tabla 6. Registro de pérdida de peso DFR = 0.5



Figura 19. Desgaste progresivo recubrimiento Hipoeutético DFR=0.5



Figura 20. Desgaste progresivo recubrimiento Hipereutético DFR=0.5