



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA, 1948

*Facultad de Ingeniería Mecánica
Centro de Investigaciones de Soldadura*

Tesis en Opción del título de Master

Título: Evaluación del desempeño operacional y frente al desgaste erosivo de un aporte R-FeCr convertido en aporte por SMAW.

Autor: Ing. Alexis García Hernández

Tutor: Dr. Ing. Amado Cruz Crespo

Año 2015

Dedicatoria

- A mis padres: que me enseñaron a proyectarme en la vida.
- A mis dos hijos: los cuales son hoy mi gran fuente de motivación .
- A mi esposa, entrañable compañera.

Agradecimiento

- A el Dr. Ing. Amado Cruz-Crespo, por su nivel de exigencia, por ocuparle su preciado tiempo, y sobre todo su confianza en darle feliz término al trabajo investigativo.
- A el Dr. Ing. Eduardo Manuel Díaz-Cedré, por su gran apoyo, por estar siempre que lo he requerido.
- A mis compañeros de estudios, sin los cuales hubiese sido imposible llevar a cabo esta tarea desde el comienzo.
- A todos los que de una u otra forma han tenido que ver con el desarrollo de este modesto trabajo y que me es imposible mencionar, pues la lista sería interminable, sepan que su ayuda fue de vital importancia.

Resumen

En el presente trabajo se aborda un estudio sobre el desempeño de un aporte oxiacetilénico R-FeCr convertido en aporte por arco eléctrico E-FeCr, con el objetivo de utilizarlo en la restauración de elementos sometidos a desgaste erosivo, en particular las hélices de un tornillo extrusor de cerámicas. Se detalla la influencia de la corriente de soldadura en el comportamiento técnico – operativo y propiedades del depósito (rendimiento real, estabilidad de funcionamiento, metalografía y dureza del depósito) del consumible modificado, debido a la necesidad de incrementar la productividad en el recubrimiento superficial de las hélices y disminuir deformaciones, sin reducir las propiedades del metal depositado. Se evalúa además, mediante un diseño de experimentos, la influencia de la corriente de soldadura (80A; 100A; 120A) y el ángulo de incidencia de la partícula (15°; 45°; 90°) sobre el coeficiente de desgaste erosivo del aporte, utilizando para ello un dispositivo desarrollado para el ensayo de materiales a erosión seca. Para valorar la durabilidad de los depósitos, el estudio de erosión se realiza tomando como referencia el material original de las hélices del extrusor. Se concluye que el electrodo con recubrimiento aplicado presenta un adecuado desempeño operativo, posibilitando obtener depósitos por SMAW, propios para enfrentar el desgaste erosivo con un 70 % de durabilidad en relación con el material de referencia.

Palabras claves: Desgaste erosivo; Recargue duro; Comportamiento operacional; SMAW.

Abstract

The present work consists of a study for the conversion of an oxyacetylene R- FeCr filler metal in electric arc filler metal E- FeCr, with the objective of using it in the restoration of elements subject to erosive wear, particularly propellers of a ceramic's extruder screw. The influence of the welding current is detailed in the technical - operative behavior and properties of the deposit (real yield, operation stability, metallography and hardness of the deposit) of the consumable reconverted, due to the need to increase the productivity of the hardfacing processes and decrease the propeller's deformation, without reducing the properties of the deposits. It is also evaluated by means of a design of experiments, the influence of the welding current (80A; 100A; 120A) and the attack angle (15°; 45°; 90°) on the erosive wear coefficient of material supply, using an device developed for dry erosion. To value the durability of the deposits, the erosion study is carried out taking like reference the original material of the extruder's propellers. You conclude that consumable reconverted presents an appropriate technical- operative performance, facilitating to obtain deposits for SMAW process, to face the erosive wear with 70% of durability in relation to the reference material.

Key words: Erosive wear; Hardfacing; Operational behavior; SMAW.

Índice

Pág.

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I. Fundamentación Teórica	5
1.1 Introducción.....	5
1.1.1 Materias primas para la producción de ladrillos de cerámica roja	5
1.2 Principio de funcionamiento de la extrusora al vacío.....	7
1.3 Generalidades sobre el desgaste.....	11
1.4 El desgaste erosivo.....	12
1.5 Fundiciones blancas de alto cromo	28
1.5.1 Influencias de otros elementos formadores de carburos en las fundiciones blancas aleadas.....	31
1.6 Consumibles de aporte para enfrentar el desgaste.....	32
1.7 Ensayos de desgaste erosivo	35
Conclusiones del Capítulo I.....	39
Capítulo II. Materiales y Métodos.....	40
2.1 Introducción	40
2.2 Aplicación de revestimientos al consumible R-FeCr.....	41
2.3 Obtención de los depósitos... ..	41
2.4 Obtención de los registros de Corriente y Voltaje.....	43
2.5 Obtención de los recubrimientos para los ensayos de erosión	44
2.6 Análisis de la norma ASTM G 76-04 para la fabricación del dispositivo de ensayos.....	44
2.6.1. Fabricación del dispositivo de ensayos al desgaste erosivo	46
2.6.2 Ensayos comparativos de erosión	49
2.6.3 Técnica operatoria para la realización de ensayos con el dispositivo	51
Conclusiones del Capítulo II	53

Capítulo III. Resultados y Análisis.....	54
3.1 Introducción	54
3.2 Análisis del comportamiento de los parámetros de consumo	54
3.3 Análisis de la estabilidad de funcionamiento	57
3.4 Análisis del comportamiento de la dureza y la microestructura de los depósitos.....	60
3.5 Análisis de los resultados de ensayos al desgaste erosivo.....	64
3.5.1 Análisis de los resultados del ensayo de puesta a punto del dispositivo.....	64
3.5.2 Análisis comparativo del comportamiento al desgaste.....	66
3.6 Evaluación económica	72
Conclusiones del Capítulo III.....	76
CONCLUSIONES.....	78
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

Introducción

El incremento de la vida útil de los equipos y piezas constituye uno de los problemas fundamentales en la industria moderna y además, de los temas más debatidos. La mayoría de los análisis estadísticos efectuados al respecto indican que la causa fundamental de la sustitución y reparación de equipos y componentes es el desgaste sufrido bajo las condiciones de trabajo (AGUILAR-CASTRO, et al, (2001)).

La industria de materiales de la construcción no está ajena a esto. Daños provocados por el desgaste intensivo de partes y piezas se suceden cada día, producto de los severos regímenes de trabajo a los cuales en su mayoría están sometidas, predominando la alta abrasión- erosión combinada con impactos de diferentes magnitudes. Además, por el trabajo con materiales de las más diversas naturalezas y morfologías (rocas, arena, arcilla, cemento, etc.).

Los materiales cerámicos, debido a las características de la materia prima que se utiliza para su fabricación (arcilla), se encuentran entre los elementos de más alta difusión en la construcción civil actual, sin embargo los equipos encargados de manipular la arcilla para la elaboración de estos materiales, donde la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3) son los principales responsables del desgaste debido a su alta dureza, sufren un elevado proceso de deterioro, motivado por la acción de los mecanismos de desgaste erosivo-abrasivo que en gran parte de ellos están presentes. Por una parte el intenso régimen de trabajo a que se somete la maquinaria y por otro, la imposibilidad de adquirir recambios óptimos que posibiliten la continuidad del proceso productivo, han provocado la elevada necesidad de restaurar piezas que conforman las máquinas, en particular de las extrusoras al vacío, fundamentales en el procesamiento de la cerámica. Uno de los elementos que más deterioro sufre durante el proceso productivo dentro de esta máquina son las hélices del extrusor, generando una serie de dificultades en los productos terminados que provocan una disminución de los parámetros de calidad de los mismos, así como un alto porcentaje de pérdidas durante la cocción de las piezas.

Una práctica reconocida para solucionar este tipo de inconveniente es la aplicación de aleaciones resistentes a estos mecanismos de desgaste, mediante relleno superficial por soldadura (Lincoln Electric Company (2000)). Con la utilización de estos procesos es factible la obtención de aleaciones con tanta durabilidad o más que las apreciadas en las piezas originales, mediante la previa protección de las superficies.

Disponer de materiales adecuados para realizar esta operación es bien costoso y difícil bajo las condiciones económicas de países subdesarrollados, pues los aportes existentes (proceso oxiacetilénico) generan una serie de inconvenientes, tanto desde el punto de vista de productividad, como en lo referido al nivel de deformaciones que les introducen a las piezas por la excesiva aplicación de calor (CARY, (1994)). La reconversión de estos en aportes por arco eléctrico podría ser una solución, cuya demostración ha constituido el foco esencial del presente trabajo.

Poder cuantificar la capacidad de una aleación de resistir determinado régimen de desgaste erosivo es de vital importancia a la hora de seleccionar materiales de aportes para tal fin, dado que valores absolutos de los coeficientes de abrasión – erosión de materiales generalmente no se encuentran disponibles en la literatura, motivado por la diversidad de condiciones a que estos pudieran estar expuestos (ASTM G 76 (2004)). Por tanto, la construcción de dispositivos que faciliten esta tarea es de vital importancia.

La medición del desgaste erosivo con ayuda de dispositivos construidos a partir de estándares internacionales, permite tener ante todo credibilidad en los resultados obtenidos. Sin embargo, como el desgaste en general es un fenómeno que depende considerablemente de factores propios del ambiente donde se presente, es posible evaluarlo a través de parámetros diferentes a los estandarizados y los resultados continúan siendo válidos (MESA,(2004)).

En el presente trabajo se abordó la fabricación de un dispositivo, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G 76-2004 para el análisis de materiales sometidos a desgaste erosivo.

La comparación de los diferentes coeficientes de erosión obtenidos, ha permitido determinar por comparación, la vida útil probable de cualquier material a esta sollicitación, además de definir los parámetros del régimen de soldaduras más aconsejable a la hora de practicar los recubrimientos, también es de vital importancia a la hora de realizar la selección de un determinado material de aporte para recubrir un elemento desgastado, entre muchas otras aplicaciones que hacen de estos dispositivos herramientas eficaces tanto para la industria como para laboratorios donde se realicen estudios tribológicos de materiales.

Problema práctico: En países subdesarrollados como Cuba, el costo y la disponibilidad de aportes para enfrentar el desgaste de componentes bajo condiciones específicas de trabajo es una dificultad permanente que enfrentan las empresas procesadoras de minerales. Los aportes para proceso oxiacetilénico, existentes en almacenes de las empresas de materiales de la construcción, generan una serie de inconvenientes, tanto desde el punto de vista de productividad, como en lo referido al nivel de deformaciones que les introducen a las piezas por la excesiva aplicación de calor. Ello

requiere de los especialistas un análisis criterial de la viabilidad de su aplicación bajo circunstancias específicas, que en ocasiones conduce a la adquisición de aportes más costosos o incluso a la sustitución de las piezas desgastadas. Por otra parte, en la actualidad en la región central de Cuba no existe ninguna entidad de la producción o los servicios que posea un dispositivo para poder cuantificar por algún método normalizado el desgaste erosivo de materiales.

Problema científico: Se desconoce el comportamiento tecnológico del aporte oxiacetilénico R-FeCr cuando es convertido en aporte por arco E-FeCr, con vista a ser utilizado en el proceso de relleno superficial por soldadura, ni su capacidad de resistir sollicitaciones de desgaste erosivo intenso, predominante en los extrusores de cerámicas.

Hipótesis: Si se conoce el comportamiento tecnológico y las propiedades del depósito del aporte oxiacetilénico R-FeCr convertido en aporte por arco E-FeCr, es posible la práctica del relleno superficial por arco eléctrico, con el objetivo de incrementar la productividad sin que disminuyan las propiedades antidesgaste del mencionado aporte.

Objetivo General: Evaluar el comportamiento tecnológico del aporte oxiacetilénicos R-FeCr convertido en aporte por arco E-FeCr, así como su resistencia al desgaste erosivo mediante métodos normalizados, para ser utilizado en el recubrimiento superficial de piezas y partes sometidas a este tipo de desgaste.

Objetivos Específicos:

- Fabricar un dispositivo para ensayos al desgaste erosivo que cumpla con la norma ASTM G 76-2004.
- Evaluar el comportamiento tecnológico y la resistencia al desgaste erosivo del aporte oxiacetilénico R-FeCr convertido en aporte por arco E-FeCr.

Tareas:

- Revisión bibliográfica sobre las características principales de las extrusoras de cerámicas, así como de los mecanismos fundamentales de desgaste a que están sometidos los elementos principales que conforman estas máquinas y las particularidades del recubrimiento por soldadura como método de enfrentamiento al desgaste erosivo.
- Conversión, mediante aplicación de recubrimiento, de un aporte oxiacetilénico R-FeCr en aporte por arco E-FeCr, para ser utilizado en el recubrimiento de partes y piezas de las extrusoras de cerámicas.
- Evaluación de los parámetros de consumo (tasa de fusión y de deposición y el rendimiento real), en función de la corriente de soldadura (I_s), del aporte oxiacetilénico R-FeCr convertido en aporte por arco E-FeCr.
- Estudio de la estabilidad de funcionamiento, partiendo de los registros instantáneos de corriente y voltaje adquiridos durante la realización de los depósitos.
- Caracterización metalográfica de los depósitos, para diferentes niveles de corrientes de soldadura, así como del material original del recubrimiento de las hélices del extrusor.
- Fabricación de un dispositivo para ensayos al desgaste erosivo de acuerdo con ASTM G 76-2004.
- Puesta a punto del dispositivo de ensayos a desgaste erosivo.
- Desarrollo de ensayos de desgaste erosivo, evaluando el comportamiento del coeficiente de desgaste con respecto a la corriente de soldadura y ángulo de incidencia del abrasivo así como de ensayos comparativos en relación con material original.
- Evaluación económica de la utilización del electrodo reconvertido en la restauración de las hélices del extrusor.

Capítulo I. Fundamentación teórica

1.1 Introducción

El proceso de producción de elementos de cerámica roja lleva implícito etapas de preparación y procesamiento de materiales que provocan significativos niveles de desgaste en partes y piezas de equipos, que entran en contacto directo con la materia prima que se manipula.

En el capítulo se abordan los fundamentos teóricos vinculados al desgaste erosivo de las hélices del tornillo extrusor en el proceso de producción de cerámica roja. Se describen los aspectos generales sobre las materias primas para la obtención de dicho material y sobre el principio de funcionamiento de la extrusora, enfatizando en los componentes que sufren deterioro y dentro de ellos se enfatiza en el de las hélices del mecanismo extrusor. Dentro del desgaste erosivo se detalla en las variables vinculadas a las partículas erosivas (velocidad y ángulo de incidencia, tamaño, forma, dureza) y aquellas vinculadas al material del componente que se desgasta (dureza, microestructura, microconstituyentes y fracción volumétrica de las fases duras, así como la composición química de las aleaciones). Se relacionan los aportes frecuentemente utilizados para el recargue por soldadura para enfrentar el desgaste erosivo.

1.1.1 Materias primas para la producción de ladrillos de cerámica roja

Se sabe que la materia prima fundamental para la fabricación de ladrillos de cerámica roja son los materiales arcillosos. No obstante, en la preparación de una pasta cerámica existen tres ingredientes principales: los elementos plásticos, los magros o desengrasantes y los fundentes. La proporción y calidad de estos tres ingredientes determinará el producto cerámico (LOSVING-RUGA, (2005))

Elementos plásticos: Son las arcillas y caolines que forman la base de las pastas cerámicas debido a su plasticidad.

Arcilla: Lo que se designa técnicamente como arcilla es una mezcla de minerales, casi siempre en forma de laminillas, entre los que se encuentran silicatos de aluminio e hidratados de micas. Las arcillas constituyen los sedimentos geológicos más difundidos y su composición química es aproximadamente: Al_2O_3 , SiO_2 y H_2O . Desde el punto de vista mineralógico, todas las arcillas están constituidas en su mayor parte por los denominados minerales de la arcilla: filosilicatos de aluminio,

magnesio y hierro, entre los que merecen mencionarse la caolinita, montmorillonita, lilita, vermiculita, halloysita, entre otros. Dichos minerales se originan por meteorización y en procesos pedogenéticos de feldespatos y feldespatoides. Otros componentes mineralógicos de la arcilla son la sílice, generalmente en forma coloidal, carbonato de calcio, compuestos de hierro, y materia orgánica.

Elementos magros o desengrasantes: Son la sílice, la arena, trozos molidos de terracota y las arcillas silíceas. Se utilizan para reducir la excesiva plasticidad de la arcilla, para aumentar la porosidad, así como facilitar el secado del objeto e incrementar la resistencia de las piezas.

Elementos fundentes: Son los feldespatos, las micas, la cal, los fosfatos, los vidrios pulverizados y las arcillas fundentes, ferrosas y calcáreas. Dentro de las pastas cerámicas, estos son componentes de bajo punto de fusión, que se combinan con los compuestos aluminio-silíceos y que reducen la temperatura de fusión de la masa arcillosa, son sustancias que funden y hacen que fundan otros componentes. En otras palabras, son los encargados de bajar la temperatura de vitrificación y hacen que la pasta cerámica densifique más rápidamente. El uso de fundentes reduce, además de la temperatura, el tiempo de cocción y ambos factores conllevan el ahorro de energía.

Fundentes utilizados en la fabricación de ladrillos de cerámica roja: En la actualidad una de las vías para disminuir el consumo de combustible en la fabricación de productos cerámicos en general es el uso de materiales fundentes, o la utilización de arcillas con altos contenidos de materiales alcalinos como los carbonatos de calcio y de magnesio. Tanto el uso de fundentes en forma de adiciones en las mezclas arcillosas como el uso de arcillas con contenidos de fundentes en su composición química, traen consigo la cocción de las piezas a muy bajas temperaturas, lo que significa un aumento en el ahorro de energía. Es conocido que en la industria de la cerámica roja este es el principal indicador de costo y por tanto el que garantiza la eficiencia energética y económica (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

Entre los fundentes más utilizados están los carbonatos, el vidrio molido a partir del reciclado de botellas y recipientes de vidrio, el silicato de sodio, el lodo rojo de aluminio (residuo de la producción de aluminio), el bórax y el feldespato (LOSVING-RUGA, (2005)). Pueden ser utilizados de dos maneras fundamentalmente: como minerales presentes en la composición mineralógica de las arcillas o como adiciones a esta durante el proceso de elaboración de la mezcla.

1.2 Principio de funcionamiento de la extrusora al vacío

La palabra extrusión viene del latín "extrudere" que significa expulsar. La extrusión es, en general, la acción de dar forma o moldear una masa, haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta. La extrusión es un procedimiento industrial que permite obtener barras de diferentes formas, generalmente complejas.

El proceso de extrusión consiste en una matriz, cuya salida tiene la forma de la barra que se desea realizar. A grandes rasgos el extrusor es el equipamiento donde se transforma, se traslada, se compacta, se fusiona, se mezcla y conforma la arcilla a utilizar en el proceso de extrusión. Las hélices del extrusor tienen características propias que permiten poseer menor o mayor resistencia, mayor o menor capacidad de flujo, etc. Esto es gracias a la forma de la hélice y a sus ángulos de inclinación, a las características del tornillo sin fin, principalmente en el diámetro, el paso y a las características del mismo, que si es corto, estándar o largo. El extrusor de hélice es el que más se adapta al diseño de máquinas extrusoras por sus diversas ventajas y, fundamentalmente, por hecho de que tenga un nivel de producción muy alto. Entre los sistemas utilizados en la extracción de las pastas cerámicas, el sistema de hélices es el que al final ha terminado imponiéndose (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

A continuación se describe el funcionamiento de la extrusora al vacío (figura 1.1), haciendo un análisis de las funciones que deben cumplir cada uno de los elementos que componen la máquina, así como de los materiales con los cuales están fabricados.

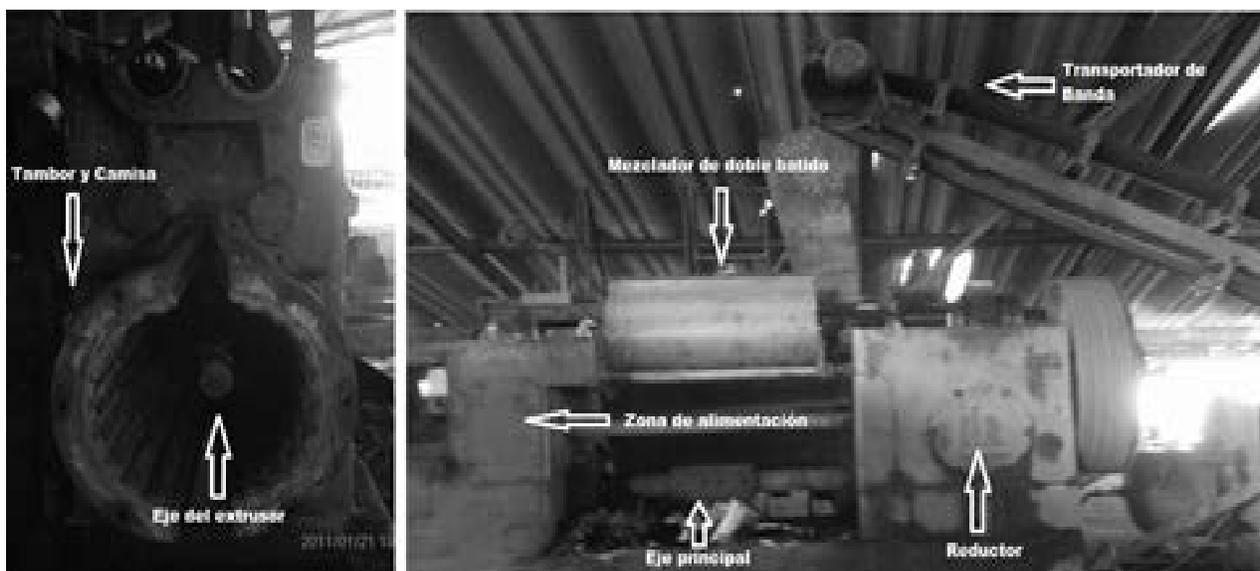


Figura 1.1 Máquina extrusora.

La materia prima cae mediante un transportador en el mezclador de doble batido, (figura 1.2a) donde se termina de ajustar la humedad de la arcilla. El mezclador está compuesto por un sistema de espinas, (paletas y vástagos) (figura 1.2b), que se insertan en los agujeros pasantes de los ejes. La orientación de las paletas permite regular la intensidad del batido y el volumen desplazado por el mezclador, así, cuanto mayor es la inclinación de la paleta, mayor será su productividad y menor su desgaste, aunque el mezclado es menos efectivo. Las paletas se fabrican de fundición blanca aleada al cromo y los vástagos de acero forjado AISI 1045.

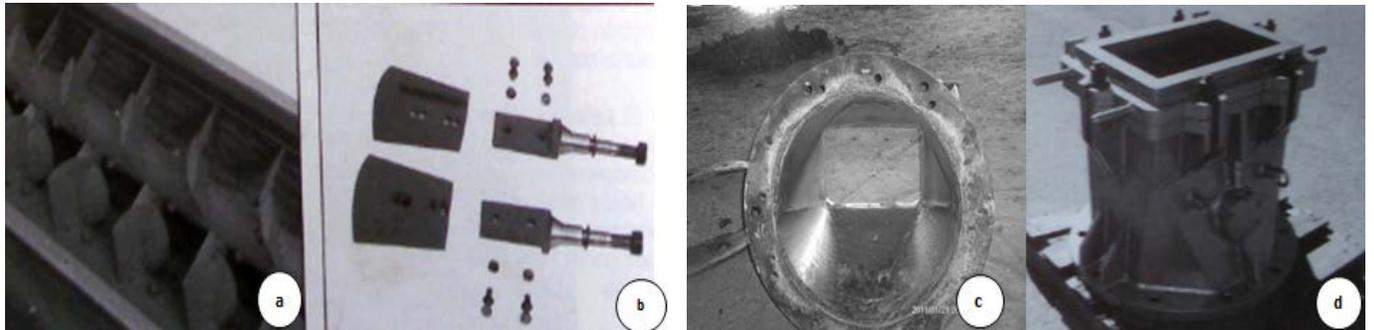


Figura 1.2. a) Mezclador de doble batido. b) Paletas y sus espinas. c) y d) embudo.

En la parte final del mezclador las paletas se sustituyen por hélices (figura 1.3b), y la artesa se cierra completamente forzando el barro a pasar hacia la cámara de vacío a través de unas entradas cónicas, a cuya salida se sitúan cuchillas o peines que producen la fragmentación de la arcilla, aumentando la superficie expuesta al vacío y facilitando el posterior desairado. Los peines se fabrican de acero herramental con durezas de aproximadamente 62 HRC. Las hélices son elaboradas de acero fundido AISI 1045, recubriéndolas con un anillo antidesgaste de fundición blanca aleada al cromo (figura 1.4). Del estado de los peines depende en una buena parte la eficacia del desairado de la arcilla (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

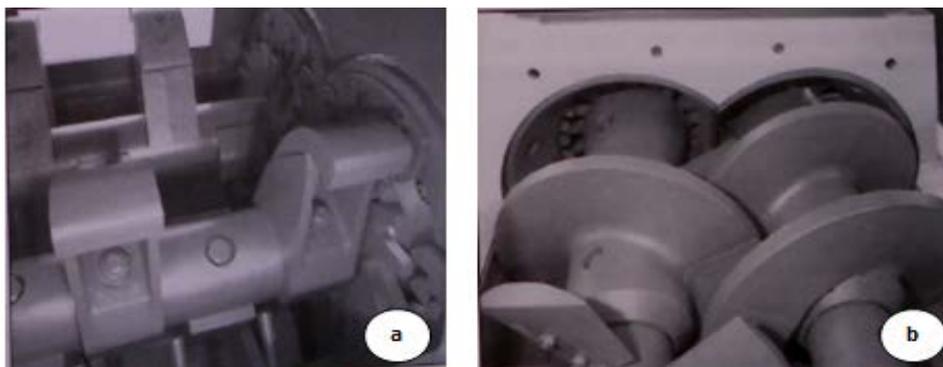


Figura 1.3. a) Palas alimentadoras. b) Hélices (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

Para facilitar la alimentación, en la cámara de vacío se colocan las palas alimentadoras (figura 1.3a), cuyo movimiento está sincronizado con las hélices, evitando que la arcilla se quede adherida en las paredes de la cámara de vacío. Dichas palas se fabrican de acero AISI 1045 fundido, recubierto por un suplemento atornillado de fundición blanca aleada al cromo (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

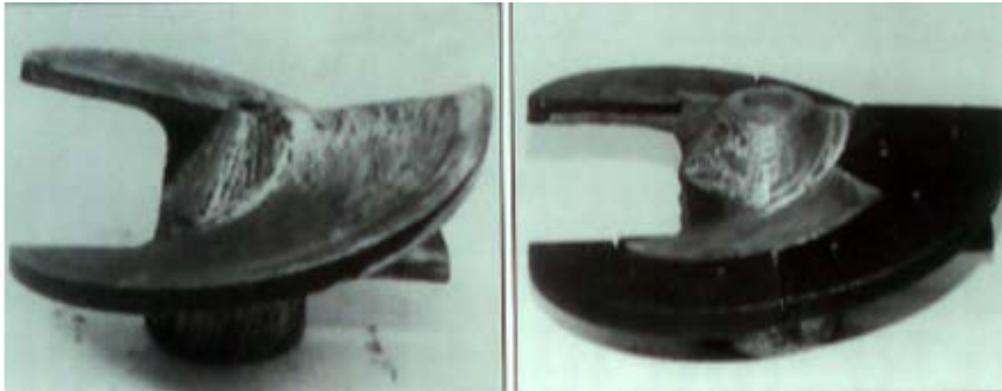


Figura 1.4. Hélices (con recubrimientos anti desgaste y sin él), (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).

El barro es forzado a la zona de alimentación del extrusor. Esta se compone de un tambor exterior fabricado de acero A-36, un eje principal de acero AISI 1045 y por un grupo de hélices (figura 1.5b) que se enchavetan al eje. Las hélices de la zona de alimentación tienen mayor paso que las restantes y todas se fabrican de acero fundido AISI 1045 con un suplemento antidesgaste de fundición blanca aleada al cromo.

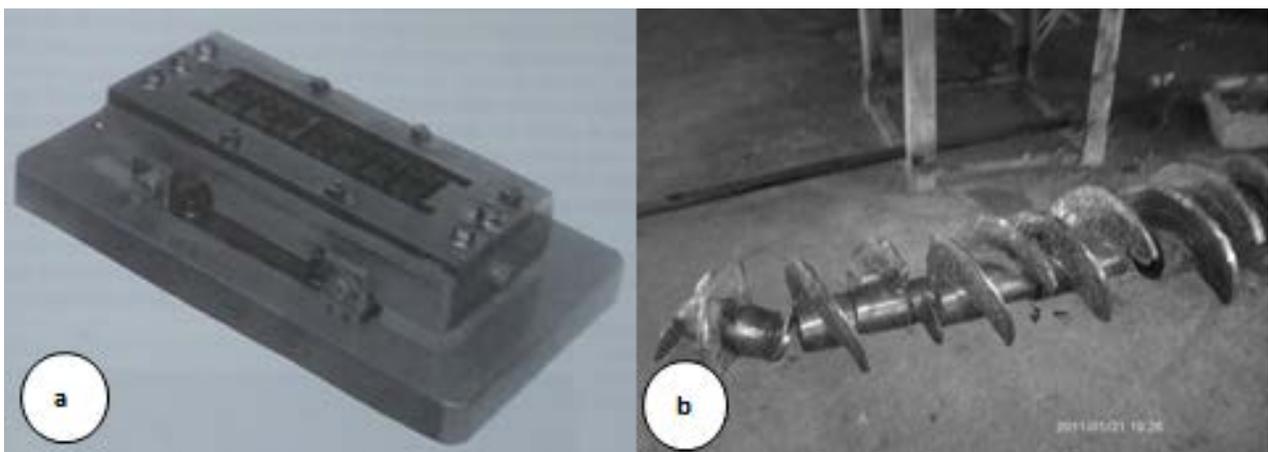


Figura 1.5. a) Molde o boquilla a) Grupo de hélices que conforman el tornillo extrusor.

Al tambor y la camisa se le sueldan planchuelas en toda su longitud (figura 1.6), para dificultar el movimiento circular de la arcilla y facilitar su desplazamiento. Al final de la hélice se coloca el embudo o expansor (figura 1.2c y d), el cual cumple las siguientes funciones: eliminación de las pulsaciones o diferencias de flujo, suprimir estructuras o laminaciones que se forman como consecuencia del ordenamiento de las partículas, transformación del flujo helicoidal en un flujo rectilíneo paralelo al eje de la extrusora, compensación de las diferencias de transporte entre el perímetro de la hélice y el cubo, igualar las velocidades en toda la sección del embudo para que la entrada de la arcilla al molde sea totalmente uniforme (FERNÁNDEZ ABAJO, (2000)).



Figura 1.6. Camisa con las planchuelas longitudinales recubiertas.

Dicho embudo se fábrica de acero A- 36, utilizando soldadura y conformado. Al final del embudo se coloca el molde o boquilla (figura 1.5a), dispositivo que configura la pieza a obtener. La mayor parte de sus componentes son fabricados para incrementar la resistencia al desgaste, de aceros termomejorables o de metal duro (carburos de tungsteno), comúnmente llamado WIDIA , abreviatura del alemán "**Wie Diamant**" (como el diamante).

De todos los elementos que conforman la extrusora fallan por desgaste los siguientes: las hélices del extrusor, las paletas del mezclador de doble batido, las hélices del doble batido, las costillas del cilindro, la boquilla, el embudo, los peines o cuchillas y las palas alimentadoras. Los componentes de la extrusora entran en contacto con la pasta abrasiva, siendo la erosión el mecanismo de desgaste predominante, con cierto efecto sinérgico de la acción corrosiva.

1.3 Generalidades sobre el desgaste

Según HAWK, (1999), hay cuatro mecanismos de desgaste: por adherencia, abrasión, corrosión y triboquímica de la reacción (la combinación de corrosión con otro mecanismo de desgaste). El mismo autor también menciona otros tipos de pérdida, como la cavitación y la fatiga por contacto, los cuales son también causantes del deterioro de los materiales. Respecto a los tipos de mecanismos de desgaste, diferentes autores aprecian el estudio de los fenómenos de desgaste en dependencia de criterios propios, y se presentan generalmente distintos esquemas de clasificación, siendo muy común encontrar la que los divide entre abrasión, adhesión, corrosivo-mecánico, fatiga superficial, cavitación y erosión (OCHOA, (2006); CRUZ, (2012)).

Debido a las distintas variables implicadas en los diferentes mecanismos de desgastes, este trabajo hizo apenas un acercamiento a la abrasión, erosión, la adherencia y la cavitación, con énfasis en las particularidades del desgaste por erosión. La figura 1.7 muestra en forma de esquema, los cuatro tipos de desgaste. El desgaste abrasivo se define como la remoción de material, causado por partículas o asperezas de alta dureza que actúan bajo esfuerzos, contra y a lo largo de una superficie sólida [HAWK, (1999)].

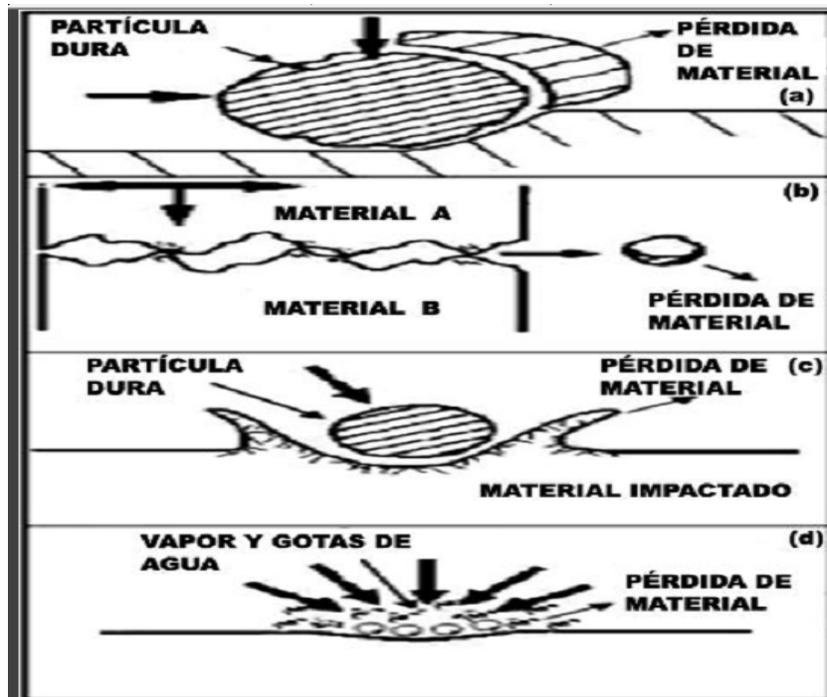


Figura 1.7. Tipos de desgaste: (a) abrasivo; (b) adhesivo; (c) erosivo d) cavitación (MARQUES, (2006)).

Según HUTCHINGS, (1992), los mecanismos de desgaste por abrasión pueden involucrar tanto la pérdida por deformación plástica, como la pérdida por fractura frágil. En algunas circunstancias, la deformación plástica suele ocurrir de una manera aislada; sin embargo, los dos tipos de mecanismos de desgaste por abrasión, normalmente ocurren simultáneamente. El desgaste abrasivo también es diferente cuando el contacto es entre dos cuerpos o cuando lo es entre tres cuerpos. Para MARQUES, (2006), la proporción del desgaste depende del grado de penetración del abrasivo en la superficie del material. Las pérdidas serán más grandes según la dureza del abrasivo sea mayor respecto a la superficie que está sufriendo el desgaste.

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra la otra con movimiento relativo, dando lugar a que los fragmentos de una superficie se adhieren a la otra. Este desgaste ocurre por las altas fuerzas de adherencia adquiridas cuando dos materiales entran en un fuerte contacto. El desgaste por adhesión normalmente ocurre cuando la lubricación es inadecuada y se produce la remoción de metal.

Mientras que los resultados finales producidos por el desgaste son similares, las causas que los producen son diferentes; por lo tanto es esencial entender los mecanismos involucrados antes de realizar la selección del material para la construcción de determinado elemento de máquina, o el procedimiento a utilizar para su restauración.

En la definición del tipo o mecanismo de desgaste y su magnitud inciden una serie de factores que se pueden agrupar de la siguiente forma, (OCHOA, (2006)):

- Condiciones de explotación o de operación: carga aplicada, velocidad, temperatura, tipos de movimiento, tipo de fricción, tiempo de trabajo, etc.
- Características de los cuerpos en contacto: materiales, composición química, dureza, dimensiones y forma, geometría superficial, microestructura, etc.
- Características del medio: humedad, atmósfera corrosiva, presencia de partículas abrasivas, propiedades de los lubricantes, etc.

1.4 El desgaste erosivo

El desgaste erosivo es un fenómeno que afecta gran cantidad de elementos de máquinas en un sinnúmero de industrias así como en turbinas hidráulicas, implementos agrícolas, sistemas de bombeo, dragado en ríos y minas, al igual que en piezas específicas usadas en las industrias petrolífera y petroquímica, entre otras muchas aplicaciones. Con este tipo de desgaste no solo se

tiene pérdida de material y la consecuente falla de las piezas, sino que está asociado a perjuicios financieros en virtud del tiempo que se necesita para la reparación de equipos y la sustitución de los componentes desgastados.

El conocimiento de los mecanismos de remoción de material involucrados durante el desgaste erosivo; así como el reconocimiento y la caracterización de las diferentes variables involucradas, son líneas muy importantes de investigación en la ingeniería actual, aunque su estudio haya comenzado hace ya varias décadas.

Varias teorías intentan entender y relacionar los diferentes mecanismos que actúan durante la erosión con las variables involucradas. Han sido desarrollados modelos matemáticos, los cuales se basan en hipótesis, que a veces limitan el análisis, ya que son realizados para aplicaciones muy específicas, orientadas a la solución de problemas particulares en procesos industriales. Muchos de estos modelos, aunque basados en líneas de pensamiento coherentes, actualmente se estudian para perfeccionarlos. Desde este punto de vista, se intenta modelar una teoría general del fenómeno de desgaste erosivo, para lo cual son utilizados los principios básicos de la mecánica y de la termodinámica, combinados con la ciencia e ingeniería de materiales (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 18, (1992)).

Un fenómeno que actúa de forma sinérgica con la erosión, es la corrosión, en general cuando el medio de trabajo es húmedo. La corrosión puede ser definida como un fenómeno que deteriora un material (generalmente metálico), por acción química o electroquímica del medio ambiente, asociada o no a esfuerzos mecánicos. La acción combinada de estos procesos, corrosión y desgaste erosivo, trae consigo la degradación acelerada de los materiales, debido a su comportamiento sinérgico. El proceso de desgaste corrosivo en materiales que forman capas pasivas, es acelerado cuando esta capa es débil, como en el caso de algunos aceros inoxidable austeníticos.

El desgaste erosivo se produce por el impacto de partículas duras en una superficie, las cuales pueden ser transportadas en un flujo de gas o de líquido. Se observa entonces que la erosión es un tipo de desgaste que se caracteriza por la pérdida de material, originada por la interacción mecánica de una superficie y un fluido, el que puede contener sólidos de origen externo o procedentes de la pérdida de material de la propia superficie, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 18, (1992)).

En el desgaste erosivo interaccionan diversas fuerzas de diferentes orígenes, como es el caso de una partícula en contacto con una superficie sólida, como se muestra en la figura 1.8. Las partículas vecinas pueden ejercer las fuerzas de contacto, así como el fluido que genera el flujo, pudiendo este

causar la fuerza de arrastre. En varias circunstancias, las fuerzas gravitacionales pueden ser importantes. Sin embargo, además de todas esas fuerzas, la dominante en una partícula erosiva es la fuerza del contacto ejercida por la superficie alcanzada que es la principal responsable de la desaceleración de la partícula. En el desgaste erosivo influyen, entre otros muchos factores, la masa de las partículas y el número de partículas individuales que alcanzan la superficie, además de la velocidad de impacto (HUTCHINGS, (1992)).

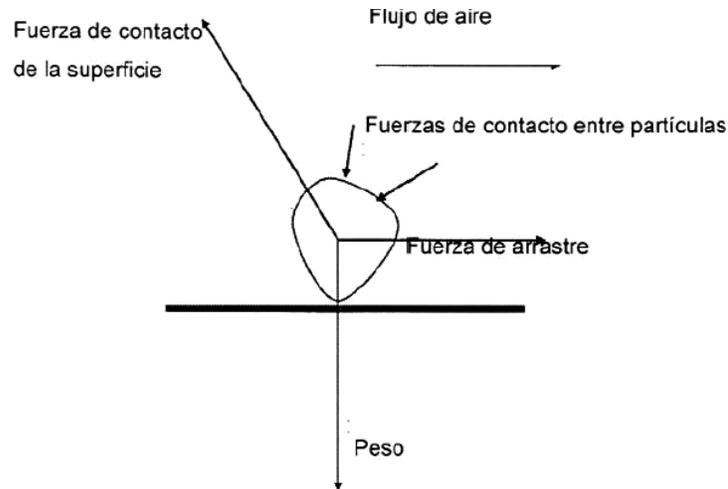


Figura 1.8. Conjunto de fuerzas que actúan sobre una partícula erosiva (HUTCHINGS, (1992)).

Para HUTCHINGS, (1992), al igual que en el caso del desgaste abrasivo, los mecanismos de la erosión deben involucrar, tanto la deformación plástica como la fractura frágil. Para TAKIMI, (2003), en el desgaste erosivo de una superficie dúctil puede ocurrir una deformación elástico-recuperable (figura 1.9) o una plástica, (deformación permanente).

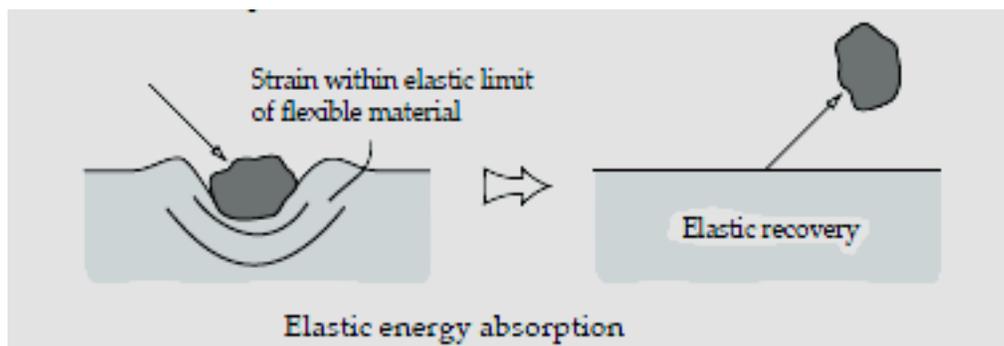


Figura 1.9. Deformación elástico-recuperable (STACHOWIAK Y BATCHELOR, (1998)).

El tipo de deformación dependerá del límite de resistencia del material que se excede en cualquier punto durante el impacto. En la erosión, los mecanismos de desgaste están directamente relacionados con el ángulo de incidencia de la partícula erosiva respecto a la superficie alcanzada. Para WHEELER y WOOD, (1992), la degradación de un material depende del ángulo con que cada partícula alcanza la superficie, y esta dependencia aumenta en los materiales dúctiles, la proporción de degradación es mayor para ángulos de colisión bajos (figura 1.10). En contraste con los materiales frágiles, en los dúctiles es más grande la pérdida de material en los ángulos de 0 a 30°.

Esta disparidad en el comportamiento puede explicarse por los diferentes mecanismos de deterioro involucrados en cada situación. La figura 1.10 muestra una curva típica de metal dúctil, demostrando y relacionando el mecanismo de desgaste con el ángulo de ataque de la partícula.

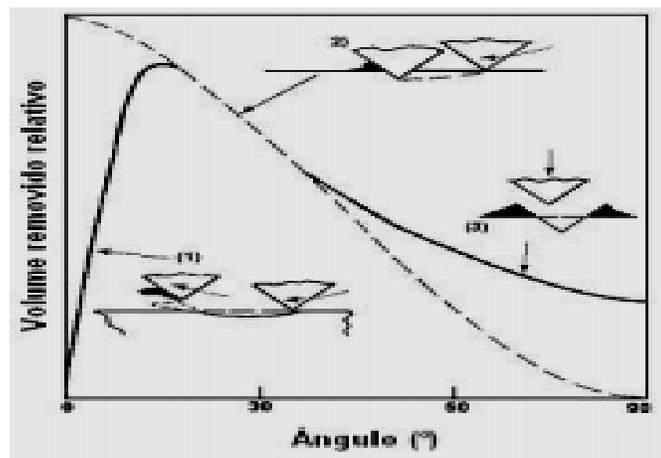


Figura 1.10. Curva experimental para la erosión de un metal dúctil (línea continua) y tres mecanismos postulados para remoción de material (WHEELER y WOOD, (1992)).

En otras definiciones clásicas de la erosión se afirma que este es un fenómeno por medio del cual el material es removido de una superficie durante la acción continua de partículas duras o de fluidos que la alcanzan. Las partículas impactan las superficies a diferentes velocidades (mayor que 1m/s) y ángulos de incidencia, donde el desgaste se origina a través de diferentes mecanismos (HOPPERT, (1989)). En la figura 1.11 se presentan esquemas que muestran la forma de cómo partículas erosivas actúan en una superficie en dependencia del ángulo de incidencia. Para la erosión en ángulos cercanos a 90°, la energía de la partícula es consumida durante la deformación de la superficie y para ángulos menores esa energía es utilizada para deformar y cortar el material de la superficie.

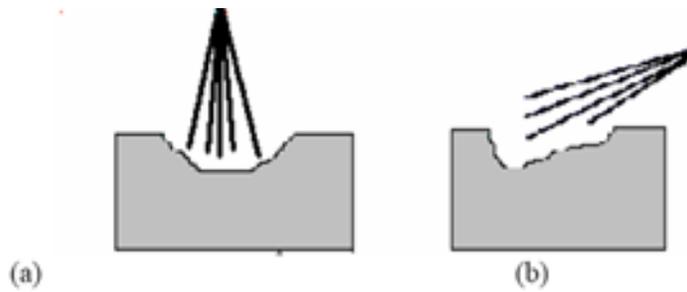


Figura 1.11. Erosión de una superficie según el ángulo de incidencia. a) Normal b) Diferente de 90° (WHEELER y WOOD, (1992)).

El choque de partículas duras y agudas a distintos ángulos cortará materiales dúctiles o blandos. La pérdida de material en el corte empieza cuando la partícula choca con la superficie. Para los ángulos normales de ataque, las partículas de cualquier forma o dureza provocarán la fatiga superficial del material alcanzado. Los materiales frágiles, como las cerámicas, tienen gran susceptibilidad a grietas y microfisuras, por consiguiente, son removidos preferencialmente por la interconexión de grietas que divergen del punto de choque de la partícula en la superficie (HOPPERT, (1989)). La figura 1.12 ilustra esquemáticamente el mecanismo de desgaste de materiales frágiles, para ángulos próximos a 90°.

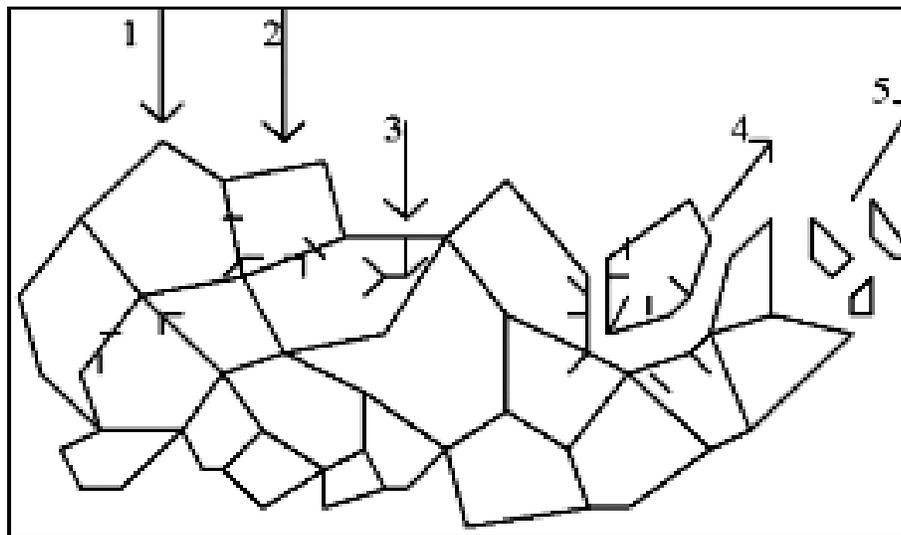


Figura 1.12. Mecanismo de desgaste. 1. Fatiga de la fase intergranular; 2. Microgrietas en el contorno de grano; 3. Inducción de microgrietas en el grano; 4. Desprendimiento del grano; 5. Desprendimiento de fragmentos de granos (HOPPERT, (1989)).

Las partículas que causan el desgaste erosivo pueden estar en ambientes secos o húmedos, pudiendo actuar de formas muy variadas, tal como se muestra en la figura 1.13. Cuando el medio de trabajo es húmedo (por ejemplo, un medio con agua y partículas de arena), la erosión y la corrosión son fenómenos que actúan en forma sinérgica, provocando la degradación acelerada de los materiales (ZUM GAHR, (1978)).

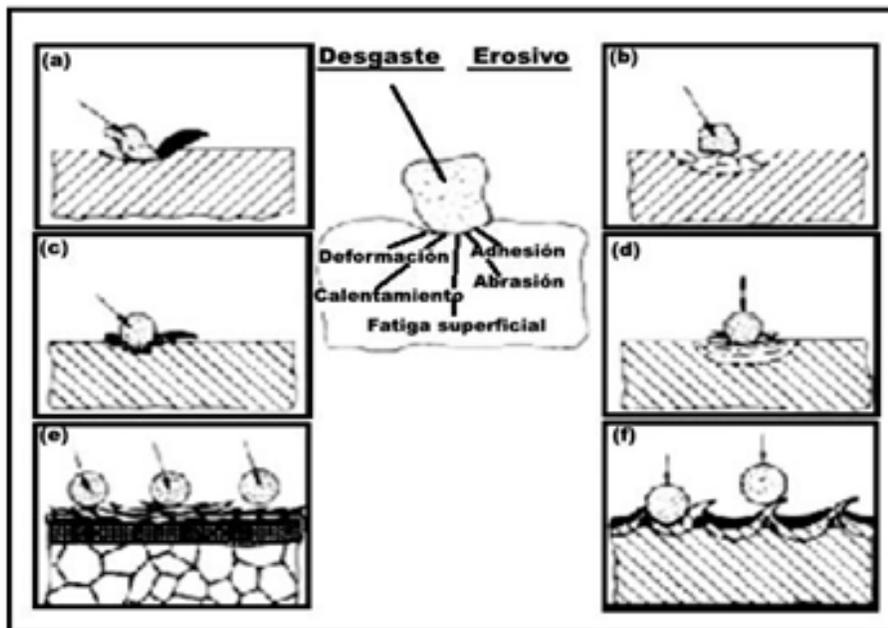


Figura 1.13. Diferentes formas de actuación de partículas erosivas en la formación de: (a) micro corte y micro-arado, (b) agrietamiento superficial, (c) desplazamiento de material al borde de los cráteres de impacto, (d) grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos, (e) formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado en los impactos y (f) formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos (ZUM GAHR, (1987)).

La pérdida de material debido al fenómeno de erosión es dependiente de varios factores interrelacionados, donde influyen las propiedades físico-químicas de la partícula erosiva, las propiedades y las estructuras de los materiales erosionados y las condiciones del medio (BALL, (1986)). En relación con lo anterior, según FINNIE, (1980), las variables que afectan la erosión pura puedan separarse en 3 tipos: Tipo I- Variables que describen el flujo de las partículas;

Tipo II- Variables que describen la naturaleza de las partículas; Tipo III- Variables que contemplan las propiedades de los materiales.

Tipo I: Variables que describen el flujo de las partículas.

- Velocidad de la partícula: la velocidad de una partícula erosiva tiene un efecto muy fuerte en los procesos de desgaste. Si la velocidad es muy baja, las tensiones de impacto son insuficientes para provocar la deformación plástica y los procesos de desgaste por fatiga superficial. Cuando la velocidad se aumenta, por ejemplo en el orden de los 20 m/s, es posible que el material erosionado se deforme plásticamente por el impacto de las partículas, lo cual, tras repetitivos ciclos de deformaciones, genera el desgaste. A muy altas velocidades la fusión de la microzona impactada pudiese ocurrir.

- Ángulo de incidencia o de colisión: es el ángulo entre la superficie erosionada y la trayectoria de la partícula erosiva. A bajos ángulos los procesos de desgaste se semejan al desgaste abrasivo, pues las partículas tienden a dejar un rastro después de impactar. Ángulos de impacto altos causan mecanismos de desgaste típicos de la erosión.

Ángulos cercanos a 0° son despreciables para el estudio de la erosión. Pequeños ángulos de incidencia de alrededor de 20° , provocan desgastes severos, si la partícula erosiva es dura y la superficie es relativamente suave, mientras que para ángulos cercanos a los 90° los materiales más frágiles son los que mayor deterioro sufren. La relación entre el ángulo de impacto de las partículas y las propiedades ductilidad y fragilidad de las mismas se muestran en la figura 1.14 (STACHOWIAK Y BATCHELOR, (1998)).

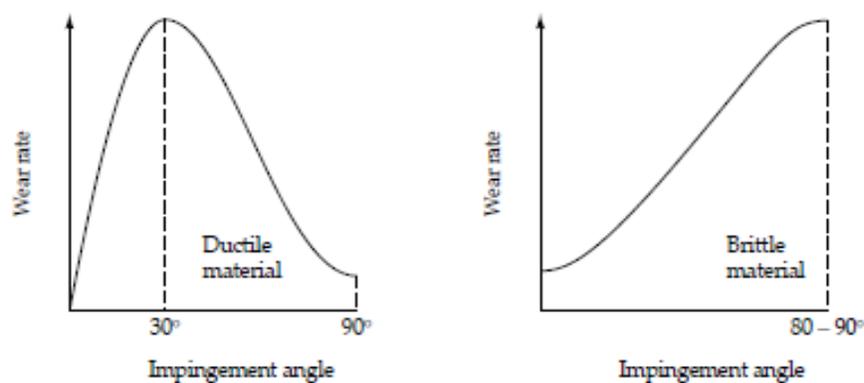


Figura 1.14. Representación esquemática del efecto del ángulo de incidencia y el coeficiente de erosión, para materiales: (a) dúctiles, (b) frágiles, (STACHOWIAK Y BATCHELOR, (1998)).

- Flujo (Concentración) de partículas: Se denomina a la masa de material impactado por unidad de área y tiempo, el desgaste erosivo es proporcional al flujo de partículas hasta ciertos valores límites, observados en algunos estudios, pues se piensa que flujos muy grandes provocan interferencia, que se genera entre las partículas que rebotan y las que llegan a la superficie anulándose unas a otras. Flujos laminares de partículas son menos agresivos que fluidos turbulentos, en clara relación con el ángulo de incidencia de la partícula (figura 1.15).

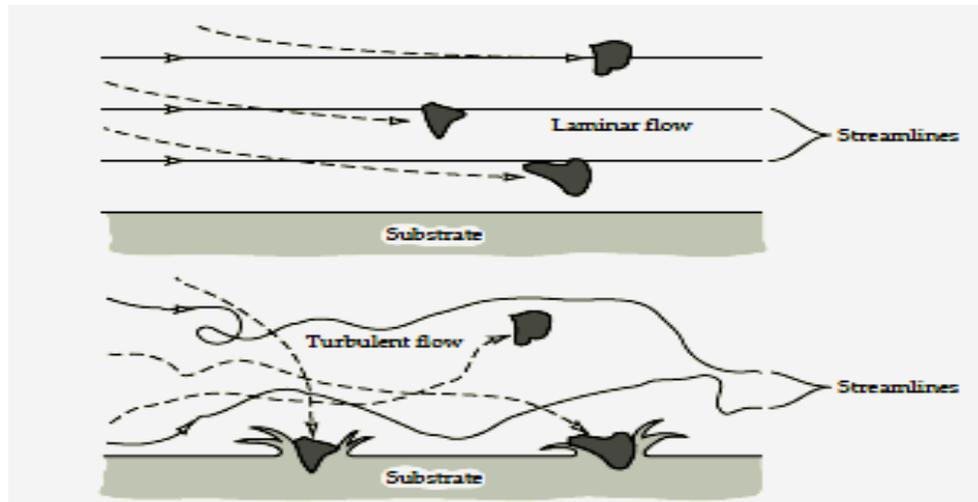


Figura 1.15. Efecto del tipo de flujo en el desgaste erosivo (STACHOWIAK Y BATCHELOR, (1998)).

Tipo II: Variables que describen la naturaleza de las partículas.

- Forma de la partícula: El coeficiente de desgaste depende en gran medida de la formas de las partículas, partículas con ángulos agudos causarán mayores desgastes que partículas redondeadas. Algunas de las formas en que pueden ser representadas las partículas erosivas son mostradas en la figura 1.16.

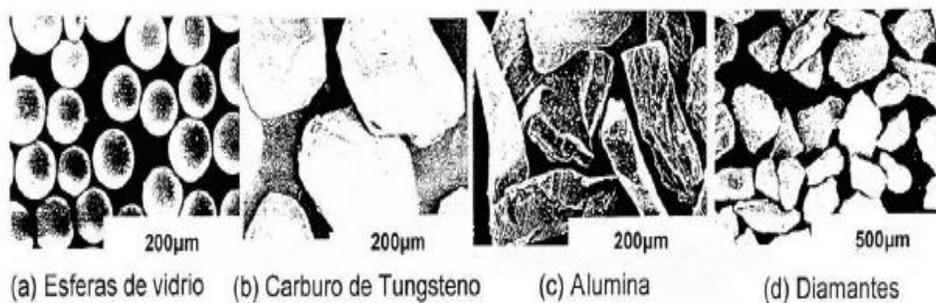


Figura 1.16. Configuración de diferentes partículas erosivas (FINNIE, (1980)).

Un método sencillo de obtener información de la forma de la partícula es el factor de redondez (F), este puede ser definido como la relación entre el área real de proyección (A) y el área de un círculo con el mismo perímetro de la proyección (P) (ecuación 1.1.1), (FINNIE, (1980)).

$$F = \frac{4\Pi A}{P^2} \quad (1.1.1)$$

Si para $F= 1$ la proyección es un círculo, mientras más se aleja de este valor tenderá a ser una partícula angular.

- **Dureza:** La dureza es una de las propiedades esenciales de las partículas en relación a la cantidad de desgaste obtenido. Las partículas con mayor dureza que la superficie a impactar causarán mayor desgaste que aquellas donde esta propiedad sea menor.

Para partículas esféricas comprimidas contra la superficie, la presión de contacto máximo es alrededor de 0.8 veces su dureza de indentación. Podemos esperar que una partícula esférica con dureza (H_a) cause indentación plástica en una superficie de dureza H_s , si H_s es menor a $0.8H_a$ esto es si $H_a/H_s > 1,25$. En la figura 20(b) para una relación de $H_a/H_s < 1,25$ la partícula será deformada plásticamente a diferencia de lo que ocurre en la figura 1.18(a), (FINNIE, (1980))

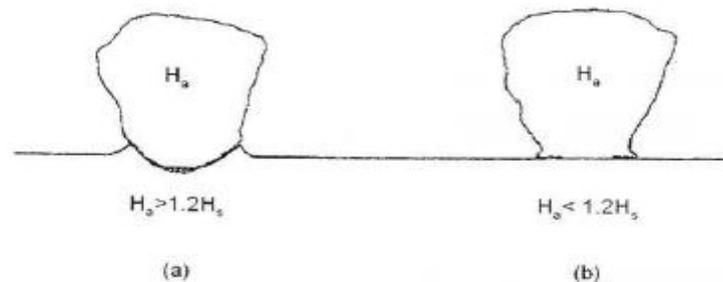


Figura 1.17. Contacto entre una partícula bajo carga normal y una superficie plana (FINNIE, (1980)).

En la figura 1.18 se muestran los valores típicos de dureza para una selección de materiales. El cuarzo (óxido de silicio) es el abrasivo natural más común, formando cerca de 60% de la corteza terrestre, teniendo una dureza de alrededor de 800kgf/mm (800 HV). Por otra parte, el acero martensítico puede llegar a tener una dureza menor a 1.25 veces la del cuarzo; por lo tanto es claro que aceros y metales no ferrosos serán especialmente vulnerables al desgaste erosivo por partículas

de cuarzo. Se justifica de esta manera, el desgaste que ocurre en gran parte de los elementos de la extrusora que están en contacto con el barro.

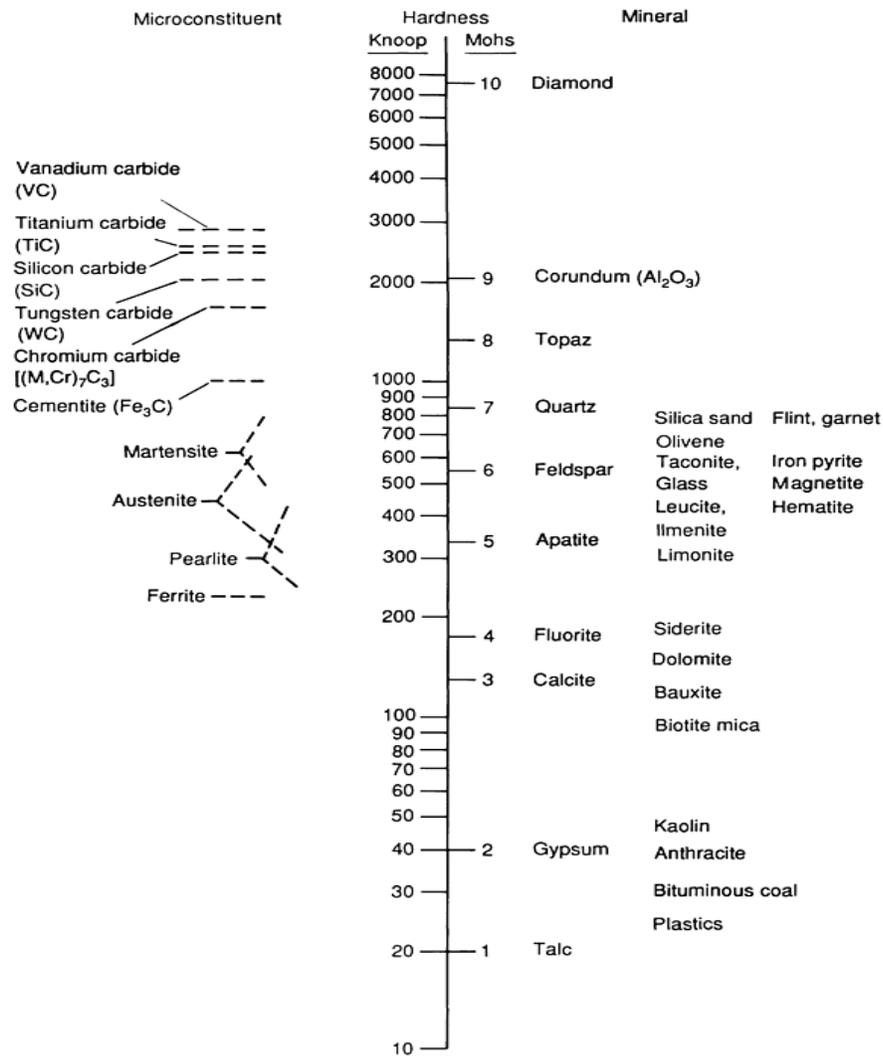


Figura 1.18. Durezas de los principales minerales y de los microconstituyentes de las aleaciones (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 18, (1992)).

- **Tamaño:** Se han encontrado diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas, tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles (figura 1.19), en el cual está involucrado el tamaño de la partícula. La cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de la partícula es menor de 100 μm (FINNIE, (1980)).

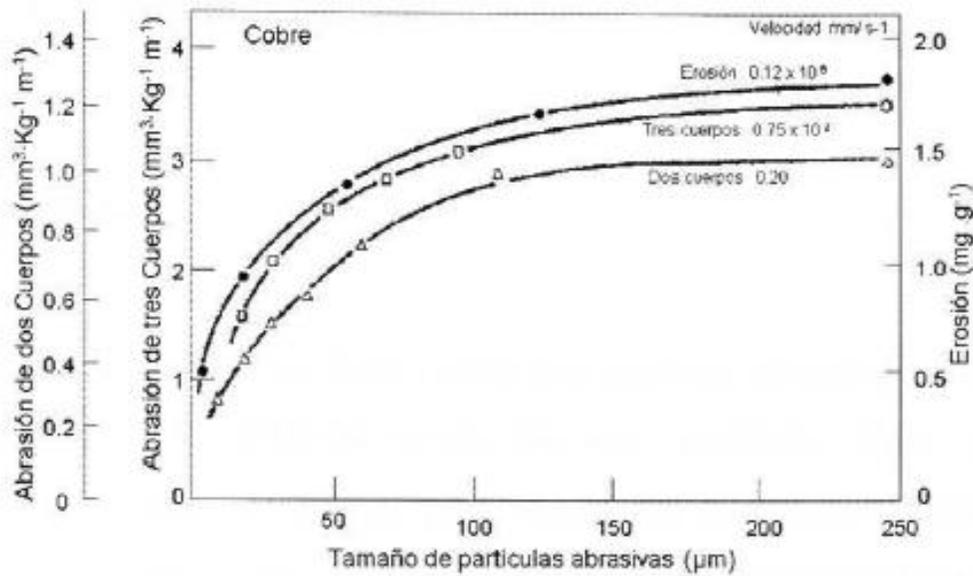


Figura 1.19. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Desgaste de cobre con partículas de SiC bajo los sistemas erosión (masa perdida/ masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos [volumen removido/ (carga *distancia)] (FINNIE, (1980)).

Tipo III: Variables que contemplan las propiedades de los materiales.

Las propiedades de los materiales ejercen un importante efecto sobre el desgaste erosivo, lo cual ha sido extensivamente estudiado. De manera similar que el desgaste abrasivo, se ha encontrado que no siempre las mejoras en las propiedades mecánicas coinciden con un aumento de la resistencia al desgaste erosivo. Para definir la resistencia al desgaste erosivo de un material, es útil considerar a que familia de materiales este pertenece, ejemplo, polímeros, metales, cerámicas, etc., donde existen grandes diferencias distintivas, y estas no varían por efectos de variables tales como velocidad, o el ángulo de incidencia. No existe una receta general a la hora de elegir materiales con alta resistencia al desgaste erosivo (STACHOWIAK Y BATCHELOR, (1998)).

- **Dureza del material:** FINNIE, (1980), llegó a la conclusión de que si al elevar la dureza de un material, se incrementa su resistencia al desgaste en mecanismos como abrasión o deslizamiento, esta premisa no se aplica para materiales sometidos a los mecanismos de la erosión. Esta relación se adapta solamente a metales puros en estado recocido (siendo la excepción el molibdeno y el tungsteno), (figura 1.20).

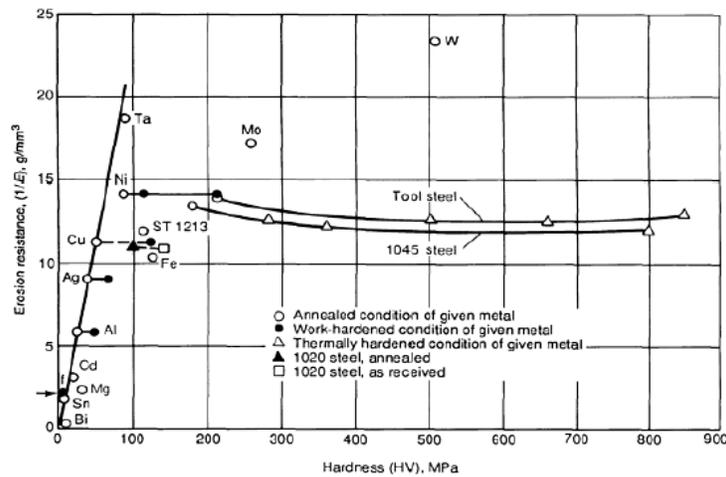


Figura 1.20. Resistencia a la erosión contra dureza del material. Metales puros y aceros con varios estados de endurecimiento por deformación y tratamiento térmico (FINNIE, (1980)).

El incremento en la dureza de un material no tiene efecto o tiene efecto negativo en su resistencia a la erosión (FINNIE, (1980)). Se ha demostrado que al incrementar la dureza a los materiales, estos exhiben un comportamiento frágil. La dificultad en la optimización de materiales para la reducción del desgaste erosivo se debe a que tanto las características del propio desgaste, como las del propio material intervienen en el control del coeficiente de desgaste (E). Una ilustración de esta regla se brinda en la comparación de la resistencia relativa a la erosión de metales, en función del ángulo de incidencia. Cuando el ángulo de incidencia es bajo, un acero endurecido muestra mucho menor desgaste que un acero con poca dureza. Esto se invierte cuando el ángulo se acerca a los 90°, lo cual se ilustra en la figura 1.21, (ZUM GAHR, (1978)).

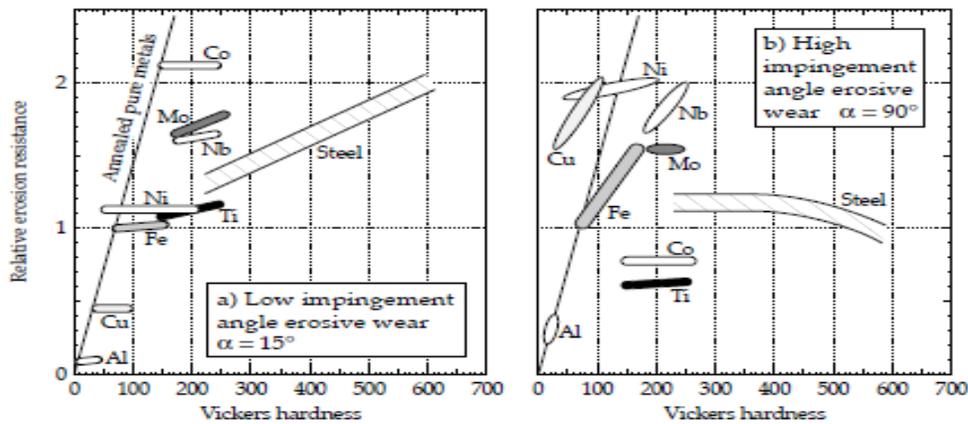


Figura 1.21. Efecto de las características de los metales y los parámetros de la erosión sobre el coeficiente de erosión (ZUM GAHR, (1978); KLEIS, (1984)).

Cuando los ángulos de incidencia son bajos es evidente que la dureza y la capacidad para endurecerse con el trabajo del material, eliminan los procesos de desgaste cuasi-abrasivos. En este caso, los materiales pueden ser asignados de acuerdo con la dureza de los metales puros.

Otros autores también han demostrado que la dureza solo tiene un pequeño efecto en la resistencia a la erosión. SARGENT, (1981), demostró muy poca influencia de la dureza sobre el coeficiente de erosión (E) en cualquier ángulo de impacto. SALIK Y BUCKEY, (1981), encontraron casi ningún efecto de la dureza sobre la erosión para el acero AISI 1045 por cristal molido (10 μm) con ángulo de incidencia de 90°. Sin embargo, utilizando cristal en forma de perlas (esferas) encontraron un sustancial incremento de la resistencia a la erosión para los niveles más altos de dureza, lo que se interpreta como un efecto único para partículas esféricas.

LEVY Y JAHANAMIR, (1980), encontraron que para el acero AISI 1075, tratado térmicamente hasta lograr estructuras perlíticas o de carburos esferoidales en su microestructura, este material exhibió un comportamiento dúctil, mostrando un ligero incremento de la resistencia a la erosión con el aumento de la dureza.

ZHU Y MAO, (1987), estudiaron la erosión en 3 aceros diferentes. Un AISI 4140 en estado de recocido (254 Hv) y dos en estado de temple y revenido (464 y 642 Hv), respectivamente. Otro material, este un acero rápido para herramientas en condición de recocido (289 Hv) y en condición de temple (923 Hv), también fue objeto de estudio. En general, erosivos blandos producen un valor máximo en el coeficiente de erosión para ángulos de incidencia cercanos a los 90°, mientras que erosivos extremadamente duros generaron abrasiones máximas a ángulos bajos, tanto en el acero rápido, como en el AISI 4140 y mostraron solo alrededor del 10% de variación en el coeficiente de desgaste (E) con respecto a la dureza para el SiC (~ 2500Hv), Al₂O₃ (~2200Hv), y SiO (~ 1350Hv). Sin embargo, utilizando polvo de cristal (~ 500Hv) como erosivo, con 15° de ángulo de incidencia a 65 m/s el coeficiente de erosión (E) se redujo alrededor de 0.41 a 0.25 mg/g para el acero 4140 debido al endurecimiento, para el acero de herramienta, (E) se redujo de 0.28 a 0.08 mg/g al endurecerse. Los erosivos de alta dureza produjeron resultados típicos, que hacen pensar en micro maquinados a bajos ángulos de incidencias, mientras los erosivos más suaves generan deformaciones superficiales sin una definición clara de la ranuras.

Tratamientos térmicos en los aceros para incrementar la dureza mejora la resistencia al desgaste erosivo a bajos ángulos de incidencia, pero esta decae para ángulos cercanos a los 90°. En resumen,

los efectos de pequeñas diferencias en, por ejemplo, la dureza o los contenidos de elemento de aleación entre materiales similares no pueden ser vistos de forma aislada de las características propias del sistema sometido a desgaste erosivo, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 18, (1992)).

- Microestructura

Cada día un número mayor de materiales están siendo creados con el objetivo de aminorar el desgaste erosivo en piezas y componentes de equipos y maquinarias, materiales tan disímiles como aceros y cerámicas, carburos de tungsteno y termoplásticos, aleaciones base cobalto y fundiciones blancas de alto cromo, aceros inoxidable especiales y aleaciones níquel- aluminio, y así dar lugar a una lista casi interminable que crece día a día con el desarrollo de la ciencia.

En el presente trabajo se centró en analizar la influencia de la microestructura solo en el caso de los aceros y de las fundiciones blancas aleadas, pues son los materiales que más se emplean en el caso particular de la extrusora al vacío.

La literatura disponible sobre el efecto de la microestructura del acero en su resistencia al desgaste erosivo, surge que aceros dúctiles son los más resistentes a este tipo de desgaste. Endurecerlos hasta la obtención de martensita solo ofrece pequeñas mejoras, excepto cuando los ángulos de incidencia son pequeños. La selección de aceros para minimizar el desgaste erosivo es por consiguiente, diferente a cuando estos se someten al desgaste abrasivo. Para aceros de bajo carbono, la fase ferrita con suficientes inclusiones de carburos esféricos, para inducir su fortalecimiento, es muy efectiva contra el desgaste erosivo. Estos exhibieron un comportamiento superior que los aceros perlíticos. Se ha encontrado que el desgaste erosivo en aceros muestra el clásico comportamiento dúctil de la erosión, es decir, un coeficiente de desgaste máximo para ángulos inferiores a 30°, con agrietamientos, tanto superficiales como bajo la superficie. Esto surge que la resistencia al desgaste erosivo de los aceros es limitada (LEVY, (1981)).

Para las partículas erosivas muy suaves como carbón, la inclusión de carburos mejora la resistencia al desgaste ligeramente (SARGENT Y SAIGAL, (1986)). Alear el acero o las fundiciones hasta obtener una microestructura que contenga una cantidad significativa de austenita es un principio efectivo para reducir el desgaste erosivo. Adiciones de alrededor de 2.5 % de silicio en aceros de 0.7 % de carbono o 0.45 % de silicio en hierros de 2.54 % de carbono, mejoran significativamente la resistencia al desgaste erosivo de estos materiales. Un tratamiento térmico óptimo para ambos materiales incluye un tiempo de austenitización relativamente grande, con el objetivo de eliminar toda la martensita y solo retener austenita y ferrita bainítica. Como regla general la ductilidad debe

prevalecer por encima de la dureza si queremos reforzar los aceros y mejorar su resistencia al desgaste erosivo (SHAH, (1986)).

La mejora de la resistencia a la erosión ha sido asociada con adición de elementos tales como: manganeso, cobalto y cromo. El efecto del níquel se considera inconsistente. Una microestructura muy fina es más beneficiosa, además de la ventaja de endurecerse esta con el trabajo. Resistencia a la erosión extremadamente alta podemos encontrar en la Stellite (Co+Cr+W), lo cual ha sido explicado por poseer una microestructura constituida por pequeñas partículas de carburos muy duros y una matriz resistente pero muy dúctil, o por las transformaciones cristalográficas inducidas por el impacto del líquido. Se ha reportado una gran resistencia a la erosión también en aceros al cromo-manganeso (10% de Cr y 12% de Mn), los cuales sufren la transformación austenita- martensita bajo el choque de las partículas (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 18, (1992)). SIMONEAU, (1986), encontró que la baja energía para concentrar los defectos es la razón fundamental para elevar resistencia a la erosión.

Una de las aleaciones más utilizadas para atenuar el desgaste erosivo en los elementos de máquinas son las fundiciones blancas de alta aleación. Estas han tenido una utilización mayoritaria en elementos donde sea necesaria una resistencia a la abrasión – erosión muy alta.

Toda fundición blanca de alta aleación contiene cromo para evitar la formación de grafito durante la solidificación y para mejorar la estabilidad de la fase de carburos, además, este le brinda una buena resistencia a la corrosión del material. En este tipo de fundiciones, el contenido de carbono está por debajo del 4%. La alta fracción por volumen de carburos de cromo en la microestructura le brinda una muy alta dureza, necesaria en aplicaciones donde la abrasión es la causa fundamental de fallo en elementos de máquinas. La matriz metálica que soporta la fase carburos en estos hierros, puede ser ajustada mediante la manipulación de los elementos aleantes, y también por tratamientos térmicos, para llegar a un balance entre la resistencia a la abrasión y tenacidad necesaria. Las fundiciones blancas de alta aleación pueden asimismo estar aleadas al níquel, molibdeno, cobre y combinaciones de estos elementos para prevenir la formación de perlita en la microestructura. Mientras una fundición blanca poco aleada, cuyo contenido de elementos aleantes está por debajo del 4%, alcanza dureza en el orden de 350-550-HB, las fundiciones blancas de alta aleación tienen durezas en el rango de 450-800HB. Muchas contienen carburos aleados M_7C_3 (Carburos de cromo), los que son sustancialmente más duros que los M_3C (Carburos de hierros), presentes en fundiciones blancas poco aleadas (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)). ASTM. A 532 cubre la composición química y dureza de las fundiciones bancas resistentes a la abrasión (Tabla1.1).

Tabla 1.1. Composición química y propiedades mecánicas de algunas fundiciones aleadas resistentes a la abrasión, según ASTM 532.

Class	Type	Designation	Mechanical requirements					
			Hardness, HB				Typical section thickness, max	
			Sand cast, min	Chill cast, min	Hardened, min	Softened, max	in.	mm
I	A	Ni-Cr-HC	550	600	...	...	8	200
I	B	Ni-Cr-LC	550	600	...	...	8	200
I	C	Ni-Cr-GB	550	600	...	...	3 diam ball	75 diam ball
I	D	Ni-Hi Cr	550	500	600	400	12	300
II	A	12% Cr	550	...	600	400	1 diam ball	25 diam ball
II	B	15% Cr-Mo-LC	450	...	600	400	4	100
II	C	15% Cr-Mo-HC	550	...	600	400	3	75
II	D	20% Cr-Mo-LC	450	...	600	400	8	200
II	E	20% Cr-Mo-HC	450	...	600	400	12	300

III	A	25% Cr	450	...	600	400	8	200
-----	---	--------	-----	-----	-----	-----	---	-----

(a) Maximum: 0.30% P, 0.15% S.

(b) Maximum: 0.10% P, 0.15% S.

(c) Maximum: 0.10% P, 0.06% S, 1.2% Cu

I	C	Ni-Cr-GB	2.9-3.7	1.3 max	0.8 max	2.7-4.0	1.1-1.5	1.0 max ^(a)
I	D	Ni-Hi Cr	2.5-3.6	1.3 max	1.0-2.2	5.0-7.0	7.0-11.0	1.0 max ^(b)
II	A	12% Cr	2.4-2.8	0.5-1.5	1.0 max	0.5 max	11.0-14.0	0.5-1.0 ^(c)
II	B	15% Cr-Mo-LC	2.4-2.8	0.5-1.5	1.0 max	0.5 max	14.0-18.0	1.0-3.0 ^(c)
II	C	15% Cr-Mo-HC	2.8-3.6	0.5-1.5	1.0 max	0.5 max	14.0-18.0	2.3-3.5 ^(c)
II	D	20% Cr-Mo-LC	2.0-2.6	0.5-1.5	1.0 max	1.5 max	18.0-23.0	1.5 max ^(c)
II	E	20% Cr-Mo-HC	2.6-3.2	0.5-1.5	1.0 max	1.5 max	18.0-23.0	1.0-2.0 ^(c)
III	A	25% Cr	2.3-3.0	0.5-1.5	1.0 max	1.5 max	23.0-28.0	1.5 max ^(c)

Sin embargo, un gran número de fundiciones blancas de alta aleación son producidas con modificaciones para aplicaciones específicas.

Según ASTM 532 las fundiciones blancas de alta aleación se dividen en tres grupos fundamentales:

- Fundiciones blancas al cromo-níquel: tienen bajo contenido de cromo (1÷4%) y níquel de (3÷5%). Las fundiciones al cromo – níquel son denominada comúnmente como Ni-Hard.
- Fundiciones blancas al cromo- molibdeno: estas mantienen el cromo en el rango de (11÷23%) y el molibdeno, por encima del 3%, además pueden ser frecuentemente aleadas con algo de níquel o cobre.
- Fundiciones que contienen (25% ÷ 28%) de cromo, las que pueden tener adiciones de molibdeno o níquel de alrededor del 1.5%.

1.5 Fundiciones blancas de alto cromo

Las fundiciones blancas de alto cromo poseen una muy buena resistencia a la abrasión-erosión, y se usan eficazmente en un sinnúmero de aplicaciones, tales como: impulsores y espirales de bombas de lodos o de líquidos en suspensión, en maquinaria de procesamiento de la cerámica, mezcladoras de concretos, y otras. En múltiples aplicaciones resisten la carga a impacto pesada, como en los martillos de impacto, los segmentos del rodillo de los molinos de procesamiento del carbón, y otras, que hacen estos materiales insustituibles.

Son reconocidas por brindar la mejor combinación de tenacidad y resistencia a la abrasión - erosión dentro del grupo de las fundiciones blancas. Variando la composición química y el tratamiento térmico, estas propiedades se pueden ajustar y llegar hasta el punto óptimo en muy disímiles aplicaciones donde esté presente el desgaste abrasivo o erosivo.

Las fundiciones blancas de alto cromo se describen como compuestos donde la fase de carburos (M_7C_3) es relativamente grande y muy dura. Estas pueden ser: hipoeutécticas, eutécticas o hipereutécticas (figura 1.22). En la matriz puede aparecer la fase de hierro blanda (austenita, martensita, ferrita, perlita, o bainita).

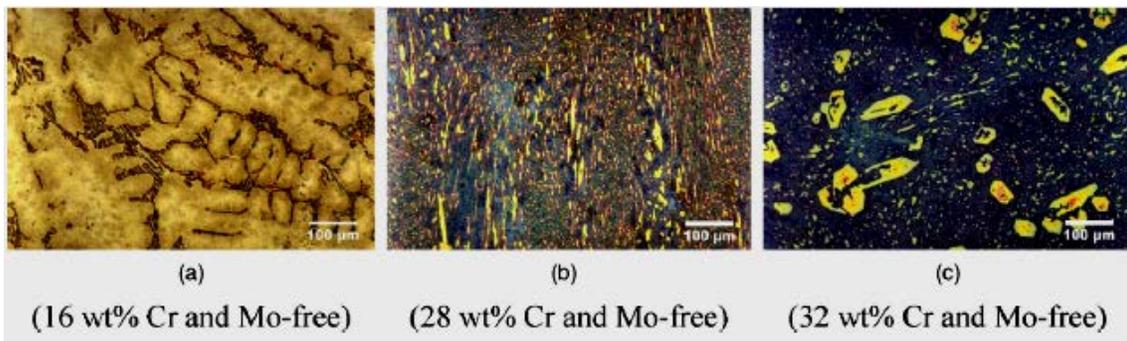


Figura 1.22. Microestructuras de las fundiciones blancas de alto cromo (a) Bajo carbono (hipoeutécticas). (b) Eutéctica (c) Alto carbono (hipereutéctica), (C. SCANDIAN, (2009).

Los carburos en las fundiciones blancas de alto cromo son extremadamente duros y resistentes al desgaste, pero también frágiles. En general la resistencia al desgaste se mejora con el incremento de la cantidad de carburos (incrementando el porcentaje de carbono), mientras la tenacidad se mejora con el incremento de la matriz metálica (reduciendo el porcentaje de carbono). La influencia del contenido de carbono es ilustrada en la figura 1.23, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

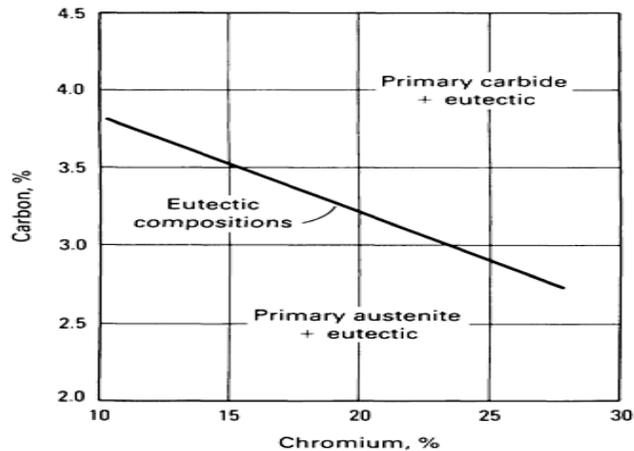


Figura 1.23. Relación entre el contenido de cromo y de carbono y la composición eutéctica en las fundiciones blancas de alto cromo, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

La estructura de la matriz más observada en las fundiciones blancas de alto cromo es la austenita como predominante, pero esta puede ser variada mediante tratamientos térmicos, hasta obtener una matriz totalmente martensita. En dependencia de la composición química, los carburos son típicamente del tipo M_7C_3 , donde M incluye Fe y Cr, y otros elementos formadores de carburos. Los carburos M_7C_3 crecen en forma de láminas y barras a lo largo de sus ejes, paralelos a la dirección del flujo de calor dentro del molde.

Las fundiciones al cromo – molibdeno (Clase 2, según tabla 1) que contienen de 11÷23% Cr y algo más de 3.5% Mo (figura 1.24), con una matriz que puede ser austenita, austenítica- martensítica o aquellas tratadas térmicamente con matriz totalmente martensítica, aportando máxima dureza y resistencia a la abrasión o erosión, son consideradas las más duras de todos los grados de las fundiciones blancas, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

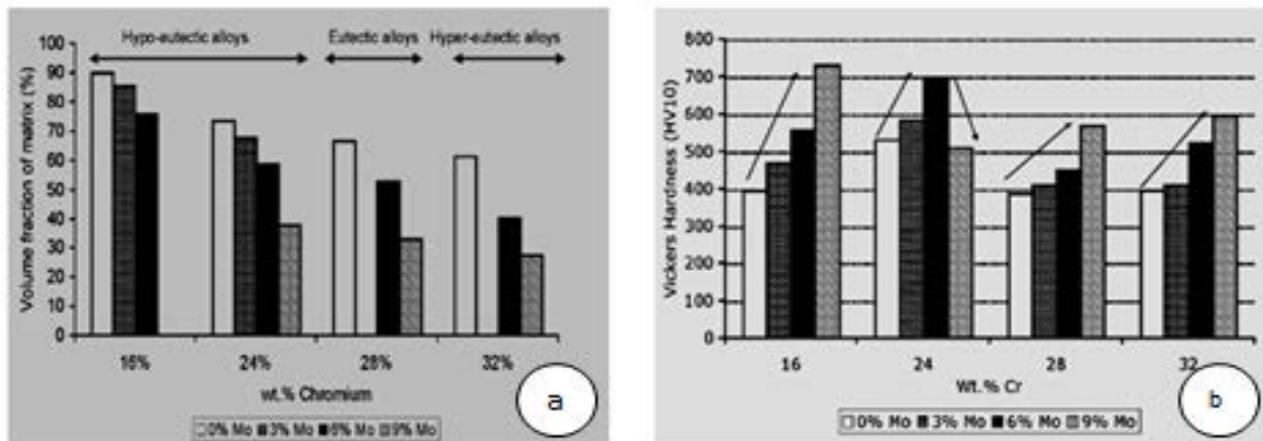


Figura 1.24. a) Fracción por volumen de la matriz en diferentes fundiciones blancas de alto cromo, en función del contenido de cromo y molibdeno. b) Macrodureza Vickers (HV10) de diferentes fundiciones blancas de alto cromo, en dependencia del contenido de cromo y de molibdeno (C. SCANDIAN, (2009)).

Las fundiciones de alto cromo (Clase 3, según tabla 1) presentan el más antiguo de los grados de las fundiciones de alto cromo, su primera patente data del año 1917, estas fundiciones contienen de 23÷ 28% Cr y algo más del 5% Mo. Para prevenir la aparición de perlita en la microestructura y lograr máxima dureza se añade molibdeno; alearlos también con níquel o cobre alrededor del 1% resulta buena práctica. Aunque la dureza obtenida no es tan alta como en fundiciones (clase 2) aleadas al cromo- molibdeno, estas fundiciones se seleccionan siempre que se necesite una resistencia a la corrosión adicional, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

La figura 1.25 ilustra el proceso de tratamiento térmico para las fundiciones blancas de alto cromo, mostrando lo importante, para evitar el agrietamiento, del enfriamiento lento a partir de los 650 °C, recomendando máximo de 30 °C /h, para configuraciones simples, fundiciones totalmente perlíticas pudieran utilizar rangos más rápidos, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

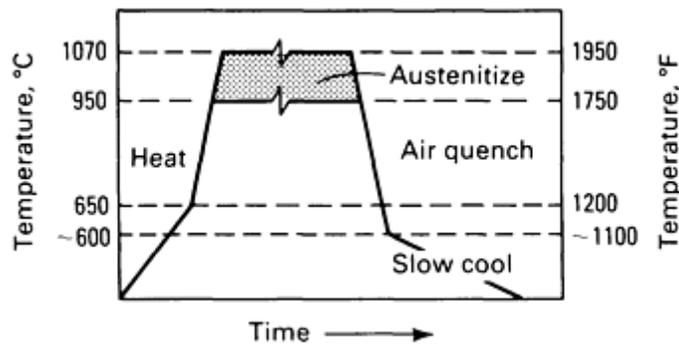


Figura 1.25. Régimen de tratamiento térmico de las fundiciones blancas de alto cromo, (ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15, (1992)).

1.5.1 Influencias de otros elementos formadores de carburos en las fundiciones blancas aleadas

La pérdida de masa producto de la erosión en las fundiciones blancas aleadas es una combinación de masa removida, tanto de la matriz como de los carburos. Gran cantidad de carburos acortan la distancia entre ellos, reduciendo el área de la matriz que los soporta, forma por la cual esta es protegida. Por otro lado, la matriz puede a su vez soportar los carburos primarios y secundarios. La clave radica en obtener una buena combinación de tenacidad en la matriz y dureza en los carburos. Al aumentar el contenido de elementos aleantes en fundiciones blancas de alto cromo con otros elementos formadores de carburos para obtener un buen comportamiento al desgaste, se requiere optimizar dichos elementos, para que tanto la matriz como los carburos sean reforzados (WAN Y LI, (2010)).

Como se conoce, añadir elementos formadores de carburos (W, Nb, V, Mo) a fundiciones blancas de alto cromo tiene efectos significativos dentro de las propiedades mecánicas, la composición química y la dispersión de las fases de carburos, así como la resistencia de la matriz (martensítica, austenítica) (WAN Y LI, (2010)).

- El Niobio (Nb) es un elemento que se encuentra aglomerado e interconectado con las partículas de carburos de cromo. Contenidos de 6% Nb, posibilitan que los NbC precipiten directamente a altas temperaturas antes que la solidificación de la aleación comience. De esta forma los NbC pueden desarrollar una configuración cristalográfica exactamente cúbica, distribuida al azar en la estructura.
- El Vanadio (V) se encuentra en las fundiciones en tres formas:

-Disuelto en la matriz.

-Disuelto en los carburos primarios y eutécticos.

-En pequeñas cantidades formando carburos finos con el tungsteno (W) y el cromo (Cr); por consiguiente, el (V) puede fortalecer la matriz y los carburos, además de formar carburos primarios directamente.

● El Wolframio (W) se puede encontrar en tres formas:

- Dispersos en la matriz.

- Dispersos dentro de los carburos, donde estos tienen gran habilidad para formar carburos primarios con el Nb.

- Formando carburos finos con el V y el Cr.

El Wolframio (W) no solo refuerza la matriz y los carburos, también configura una estructura en forma de esqueleto, de carburos primarios, lo cual es su principal propiedad para combatir la abrasión, (WAN Y LI, (2010)).

Tabla1. 2. Propiedades mecánicas de los carburos metálicos más utilizados (THEISEN, (1998)).

Carburos	Dureza (HV)	Densidad(Kg/m ³)	Punto de fusión(°C)
B ₄ C	3670	2500	2450
TiC	3000	4900	3100
W ₂ C	3100	17,200	2785
VC	2900	5700	2700
NbC	2000	7800	3600
WC	2200	15,700	2870
Cr ₇ C ₃	1630	6900	1755
Cr ₃ C ₂	1400	6700	1800
Fe ₃ C	1020	7500	1252

1.6 Consumibles de aporte para enfrentar el desgaste

Respecto a los materiales de aporte que se pueden utilizar para el relleno superficial, desafortunadamente no existen métodos estandarizados de clasificación y especificación para los diferentes tipos de electrodos a nivel mundial. Cada fabricante se acomoda a las normas vigentes del país donde se producen dichos materiales, así como se acoge a una o varias normas de carácter internacional, que le permiten establecer un patrón de comparación. Existen varios casos de materiales de relleno comerciales que no están cubiertos por algunas de estas normas o especificaciones, e incluso algunos de ellos no permiten que se les escoja por comparación según

alguna de estas normas, que tienen una amplia utilización. No obstante, sí es cierto que todo fabricante se preocupa por suministrar una información completa de cómo utilizar su producto específico para diferentes aplicaciones y diversas industrias, lo que hace que esta información sea en extremo útil y a la vez necesaria de consultar.

El relleno superficial por soldadura se utiliza para proveer superficies de trabajo con propiedades superiores a la que presentan diferentes zonas de las piezas, implementos o máquinas, haciéndolos adecuados para resistir la acción destructiva de fuerzas actuantes sobre estas, (CRUZ, (2006)). En el caso particular de la extrusora, como se ha señalado, la erosión es el mecanismo de deterioro principal. En ocasiones ocurre que más de una solución aceptable puede aplicarse para cualquier situación dada y que las condiciones reales de operación son las variables esenciales que gobiernan la selección, tanto del consumible, como del proceso de recargue más adecuado. Esta se basa generalmente en la disponibilidad, en la dilución que se logra (debe ser la mínima posible), y en la razón de deposición. La mayoría de las aleaciones se expenden bajo nombres comerciales, es por esto importante investigar los materiales recomendados para una aplicación específica. También pueden utilizarse pruebas comparativas para determinar lo adecuado de la selección realizada. La estructura de los metales depositados consiste usualmente en una matriz suave de base metálica, que soporta una fase dura en forma de carburos, boruros o compuestos ínter metálicos diseñados para resistir el desgaste abrasivo u otro tipo de daño.

En la actualidad existe gran diversidad de información sobre los materiales de relleno superficial, y en la industria existen centenares de materiales utilizados para obtener depósitos resistentes al desgaste, lo cual da lugar a que no se disponga de un criterio unitario para la selección de los mismos; y materiales que poseen similar composición química son recomendados por sus fabricantes para funciones diferentes.

Para la selección de un material de relleno superficial utilizaremos el criterio dado por LINCOLN ELECTRIC COMPANY, (2000), por considerarse acertado; el cual contiene los siguientes aspectos:

1. Según la razón para la aplicación del depósito.
2. Según la naturaleza del servicio.

- Según la razón para la aplicación del depósito tiene en cuenta las siguientes clases:

- a. Se debe mantener un borde o filo cortante.

- b. Se debe mantener una superficie simple, sin tener en cuenta el mantenimiento de un borde o filo agudo.

- c. Se deben proteger las superficies en contacto por deslizamiento.

De los tres casos anteriores, el que se debe tener en cuenta a la hora de reparar las partes fundamentales de la máquina extrusora es el segundo (b), ya que se debe proteger la superficie simple sin tener en cuenta la existencia de un borde cortante.

Como ya fue planteado, una superficie es resistente al desgaste erosivo cuando su dureza es 1,3 veces mayor que la dureza del abrasivo ($H_{mat} > 1,3 H_{abr}$). En nuestro caso las partículas causantes del desgaste presentan una dureza de 7 en la escala Mohs; por tanto, el material a depositar debe alcanzar una dureza superior a 1170 HV, la que puede ser lograda por una estructura que tenga insertados carburos de cromo (1200 HV a 1800 HV). Además, no solo el microconstituyente debe ser duro sino también la matriz que lo sostiene.

Algunas de las aleaciones que son capaces de soportar este régimen de trabajo lo constituyen los materiales que depositan fundiciones al cromo, con más de 20% de elementos de aleación. Dichos depósitos se caracterizan por ser una estructura a base de carburos de cromo, con una matriz eutéctica (austenita y carburos) y más de un 30% de cromo.

Históricamente la industria de materiales de la construcción ha comprado gran cantidad de consumibles para diferentes procesos de relleno (OAW, SMAW y FCAW); sin embargo, en los últimos tiempos y debido a las limitaciones económicas que ha sufrido el país, estas compras se han visto limitadas, por lo que se ha tenido que utilizar materiales de aporte que hasta este momento permanecían ociosos en los almacenes. Este es el caso de los aportes oxiacetilénicos R FeCr de 3,00 mm de diámetro, cuyas características se muestran en la tabla 3.

Como se puede apreciar en la tabla 3, este aporte cumple, desde el punto de vista de su composición química los requisitos para ser resistente al desgaste erosivo; sin embargo, el hecho de ser un aporte oxiacetilénico lo limita desde el punto de vista de la productividad, ya que el volumen del metal a aportar en la máquina extrusora es relativamente alto.

Tabla1.3. Características principales del aporte R-FeCr.

Clasificación AWS A5.21-2001	R-FeCr	
Dureza del depósito (HRC)	55 a 60	
Temperatura de mantenimiento de la dureza (°C)	600	
Cantidad de máxima de pasadas	3	
Maquinabilidad	Con abrasivos	
Composición química del metal de depósito (% en masa)	Carbono	3,5
	Cromo	30
Oxicortabilidad	No	
Color de identificación	Naranja	

Una solución a este problema, teniendo en cuenta lo planteado en la literatura, sería la aplicación de un revestimiento a dicho aporte, para de esa forma poderlo convertir en un aporte por arco y con eso elevar su productividad.

Sin embargo, esta conversión no es posible sin hacer un estudio más profundo de su comportamiento tecnológico, el cual permita determinar su factibilidad en la solución de los problemas de desgaste erosivo en las piezas fundamentales de la máquina extrusora.

1.7 Ensayos de desgaste erosivo

Existe una gran dificultad al comparar resultados de desgaste obtenidos por diversos investigadores debido a la variedad de los métodos de ensayo y al bajo control de ciertos aspectos de estos. Considerando específicamente el desgaste erosivo, la complejidad del fenómeno aún no ha permitido la creación de un ensayo universal, y frecuentemente los ensayos son hechos para reproducir las condiciones únicas que un determinado material encontrará en servicio.

Para simular las dos formas de desgaste erosivo (partículas en seco y en medio húmedo), han sido desarrollados dos equipamientos, esto motivado porque una sollicitación de resistencia al desgaste en un medio húmedo, puede no ser aplicada en una situación en un medio seco. Las normas

fundamentales que rigen estos ensayos son la ASTM G 76-1989, la cual hace referencia a partículas en seco y la ASTM G 73-1998 que se refiere a partículas en un medio acuoso.

Como fue abordado anteriormente, la norma más usada para la realización de ensayos de desgaste erosivo es la ASTM G 76-1989, siendo una variación de este ensayo, el descrito por la norma ASTM G 76-2004, que se diferencia por la realización del ensayo fuera de la cámara (figura 1.26). También se puede realizar este ensayo con un fluido líquido, el cual es otra de las manifestaciones del desgaste por erosión en la ingeniería, ensayo que está regido por la norma ASTM G 73-1998. En la figura 1.27 se muestra un esquema que hace referencia a esta norma.

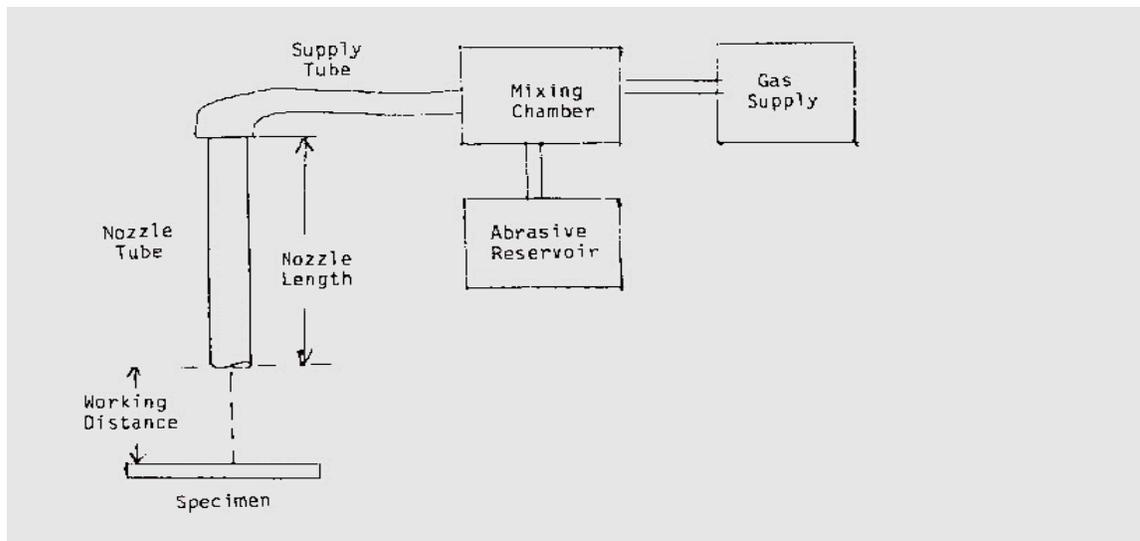


Figura 1.26. Esquema del dispositivo de ensayo que responde a la norma ASTM G 76-2004

Ambos ensayos no muestran grandes diferencias desde el punto de vista de la complejidad del equipamiento. No obstante, para las condiciones concretas del Laboratorio de Tribología y Corrosión del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), es más conveniente contar con equipos que no requieran de partes móviles (motor eléctrico) y que permitan realizar estudios de mayor versatilidad, en cuanto a posibilidades de ensayo.

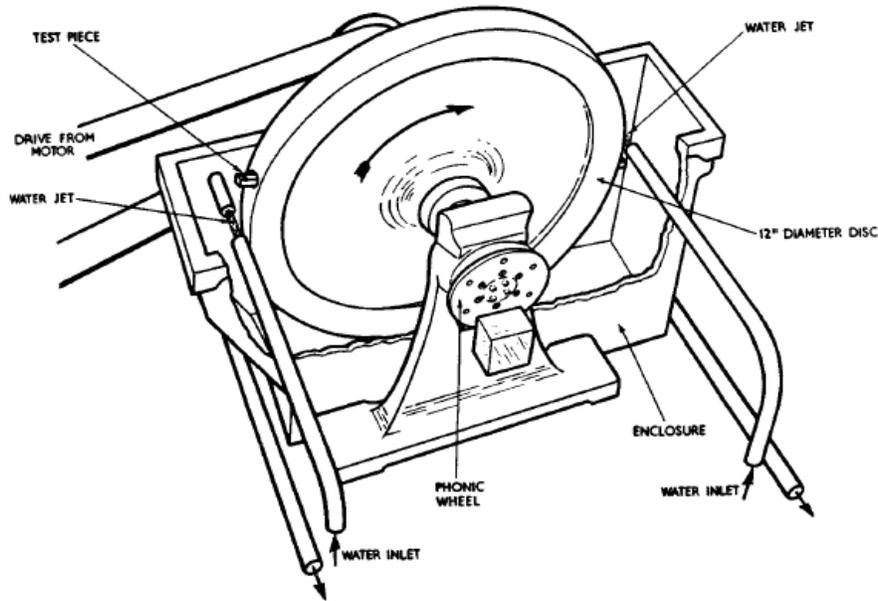


Figura 1.27. Esquema de la máquina de ensayos a la cual hace referencia la norma ASTM G 73-1998.

En tal sentido, se decidió fabricar una máquina que permitiera la realización de ensayos en condiciones secas con algún tipo de abrasivo. O sea, construir el dispositivo sobre la base de las normas ASTM G 76-1989 (ASTM G 76-2004).

En la figura 1.28 se muestra un esquema de otra variante de la norma ASTM G 73-1998, que da la posibilidad de realizar ensayos en condiciones húmedas.

El hecho de combinar la vía húmeda y la vía seca brinda la posibilidad de ensayar materiales en las dos condiciones del medio, con lo cual los estudios pueden ser más próximos a las condiciones reales de trabajo de los componentes. Con frecuencia un mismo elemento entra periódicamente en contacto con materiales abrasivos en condiciones secas y húmedas (industria minera y alimenticia, implementos agrícolas, entre otros) e incluso en presencia de fluidos muy particulares que inciden en el desempeño al desgaste de la pieza (transporte de medios barrosos, en la industria petrolífera, entre otros).

Algunos autores reportan ensayos de erosión que no responden directamente a ninguna norma, pero que permiten de igual modo realizar estudios de este mecanismo de desgaste. Un ejemplo de ello lo constituye la máquina de ensayos de erosión húmeda de brazo giratorio, descrita por AL-BUKHAITI, (2007), cuya representación esquemática se da en la figura 1.29.

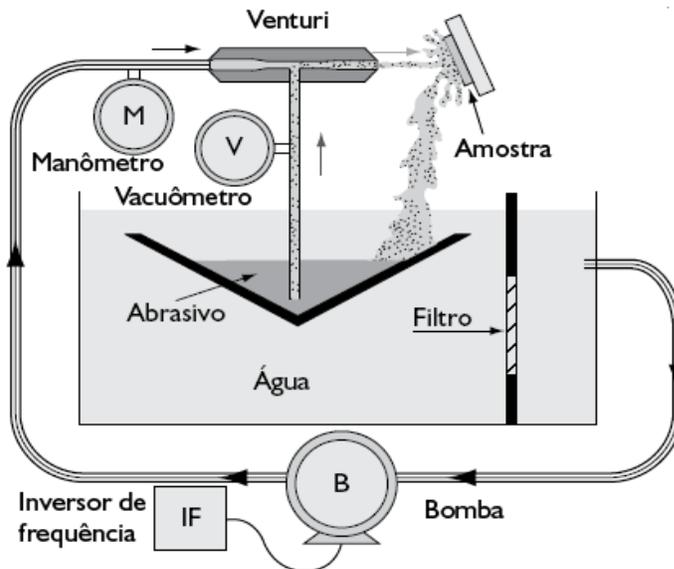


Figura 1.28. Esquema de la máquina de ensayos por erosión en condiciones húmedas, ASTM G 73-1998.

En esencia, esta máquina consiste en un sistema con partículas en suspensión que impactan sobre muestras en rotación. El impacto de las partículas se realiza por gravedad, mientras el ángulo de la muestra (ángulo de impacto) y la velocidad de rotación pueden ser variadas.

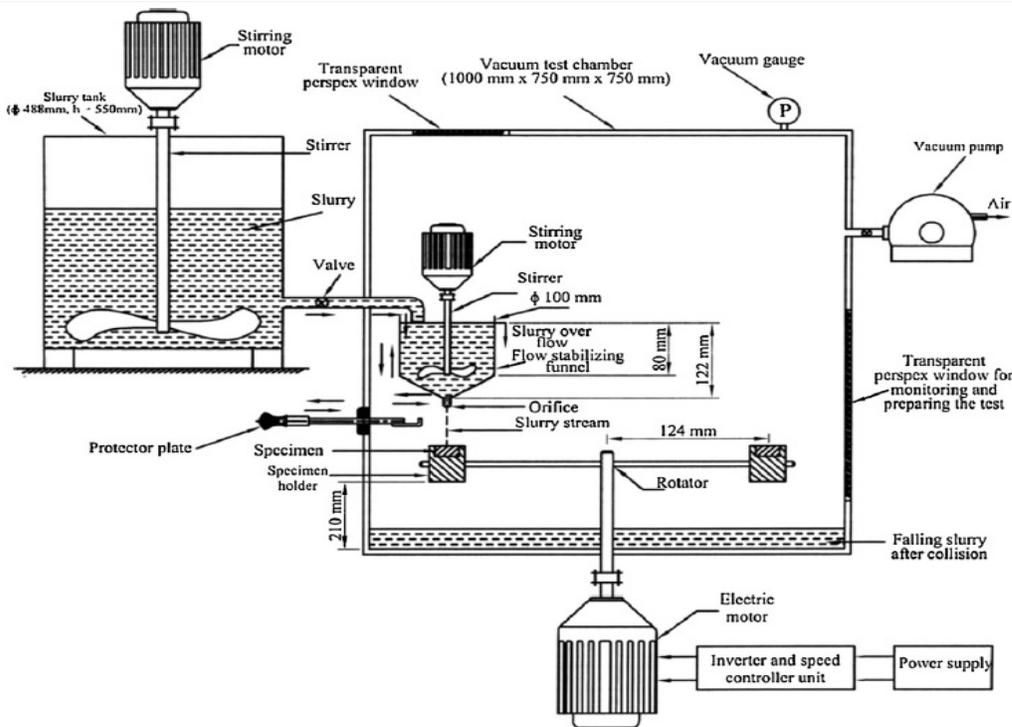


Figura 1.29. Diagrama esquemático de una máquina de ensayo de erosión húmeda de brazo giratorio (AL-BUKHAITI, (2007)).

Conclusiones del Capítulo 1

- 1- En el diseño de máquinas extrusoras, los sistemas que utilizan hélices para la extracción de la masa cerámica son los que se utilizan mayoritariamente, esto motivado por sus múltiples ventajas y en mayor medida, por la productividad de los mismos. El desgaste predominante, al cual están sometidas las piezas en contacto con la arcilla, es el erosivo, los ángulos de impacto varían desde pocos grados hasta casi los 90. Elementos donde el ángulo de impacto es bien bajo se comportan como si estuviesen sometidos a desgaste abrasivo, por lo que las propiedades de los materiales con que son elaborados deben referirse a este tipo de desgaste.
- 2- No se registra una fórmula general para elegir materiales con alta resistencia al desgaste erosivo; el problema hay que analizarlo de conjunto, donde se deben tener en cuenta las variables que describen, tanto el flujo de partículas como la naturaleza de estas, y las propiedades de los materiales.
- 3- La construcción de un dispositivo para el ensayo de diferentes materiales al desgaste erosivo permite simular, de una forma cercana a la realidad, lo que realmente debe ocurrir en un sistema tribológico, posibilitando elecciones correctas, tanto de materiales, como de recargues a la hora de restaurar elementos de máquinas averiados.
- 4- Para solicitaciones donde estén presentes la erosión, la abrasión y la corrosión, son indispensables las fundiciones blancas aleadas al cromo, sobre todo aquellas donde el Cr se encuentre en el orden de, $25 \div 28$ %, elementos de aleación tales como; el molibdeno, el vanadio, el niobio y el wolframio se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas de estas aleaciones.

Capítulo II: Materiales y Métodos

2.1 Introducción

El recubriendo de partes y piezas sometidas al desgaste erosivo con el objetivo de alargar su vida es práctica frecuente dentro de nuestras industrias. Un número elevado de consumibles permanecen en almacenes sin uso determinado, como el caso del aporte R-FeCr (proceso oxiacetilénico), el cual a pesar de su buen comportamiento frente al mecanismo de desgaste erosivo, dado fundamentalmente a las características de la aleación que se deposita (Hierro-Cromo-Carbono). La utilización del proceso oxiacetilénico genera una serie de inconvenientes, tanto desde el punto de vista de productividad, como en lo referido al nivel de deformaciones que les introducen a las piezas por la excesiva aplicación de calor (CARY, (1994)).

En este capítulo se aborda el procedimiento de reconversión de este material en un aporte por arco eléctrico E-FeCr, para el recubrimiento mediante proceso SMAW de piezas sometidas a desgaste erosivo, particularmente tornillos extrusores de arcilla, debido a la necesidad de incrementar la productividad del proceso de recubrimiento superficial y disminuir deformaciones, sin reducir las propiedades de los depósitos, determinando la influencia de la corriente de soldadura en el comportamiento técnico – operativo de este, así como el rendimiento real y la estabilidad de funcionamiento del consumible.

Se realiza un análisis de la norma ASTM G 76-2004, para la construcción de un dispositivo destinado a ensayos de materiales sometidos al desgaste erosivo, donde se tuvieron en cuenta el grupo de variables de mayor influencia para este tipo de desgaste.

Se evalúa, por medio del dispositivo que se construye, la resistencia del aporte por arco eléctrico E-FeCr al desgaste erosivo, comparando su comportamiento con respecto al ángulo de incidencia del abrasivo (α°), así como la corriente de soldadura (I_s) en tres valores diferentes, permitiendo un análisis comparativo en condiciones reales de servicio, y se demostró de esta manera, la factibilidad de la sustitución de un elemento por otro. Se brindan, además, una serie de recomendaciones en la técnica operatoria del aparato con el objetivo de realizar el ensayo lo más viablemente posible.

2.2. Aplicación de revestimientos al consumible R-FeCr

Para realizar el estudio, se tomaron seis partidas del aporte oxiacetilénico clasificados según la norma AWS A5.21 como R-FeCr, de 3,0 mm de diámetro por 300 mm de longitud. La superficie de dichos aportes fue limpiada con la utilización de papel abrasivo, para facilitar la adherencia del revestimiento. La formulación del revestimiento básico aplicado provino de un trabajo precedente CRUZ-CRESPO, et al, (2008), caracterizado por sus buenos resultados. El mismo estuvo compuesto por fluorita y caliza (en una relación 50/50 %) y silicato de sodio como aglutinante (29,4 % SiO₂, 10,1 % Na₂O, 60,51 % H₂O). El revestimiento se preparó en forma de masa seca, la cual luego de mezclada, fue aglutinada con un 40 % (referido al 100 % de dicha masa seca) de silicato de sodio, el mismo fue adicionado de manera gradual al tiempo que se iba aglomerando con una varilla de cerámica; a la masa seca le fue añadida agua hasta darle la textura adecuada a la pasta para su aplicación como revestimiento de los electrodos.

Luego de obtenida la pasta para aplicar en forma de revestimiento, esta fue colocada en un recipiente con forma cilíndrica de 20 mm de diámetro y 350 mm de longitud. Los aportes fueron sumergidos en dicho recipiente con la pasta obtenida y extraídos lentamente, de forma sucesiva hasta lograr el espesor de revestimiento apropiado.

Los electrodos revestidos fueron colocados en posición vertical para someterlos durante 24 horas al proceso de secado al aire. Luego de secados, se calcinaron en una estufa a 160 °C durante 2 horas, para extraerles toda la humedad posible. Se obtienen de este modo electrodos con revestimientos de 0,7 mm de espesor aproximadamente.

2.3. Obtención de los depósitos

Con los electrodos revestidos elaborados, utilizando un rectificador de soldadura LHF 630 ESAB, se procede a la obtención de los depósitos en los talleres de la Empresa de Materiales de Construcción, teniendo en cuenta trabajos precedentes en este campo, CRUZ-CRESPO, et al, (2008); FARIAS, et al, (2004). A los materiales de aporte estudiados se le evaluaron los siguientes parámetros tecnológicos:

- Parámetros de consumo
- Estabilidad de Funcionamiento
- Estructura metalográfica y Dureza

Se tomó como única variable de entrada en los experimentos, la corriente de soldadura (I_s), siendo este parámetro del régimen el que determina la magnitud del calor asociado y, por tanto, la microestructura y propiedades finales de los depósitos de recarga. De acuerdo con las recomendaciones dadas por los fabricantes de los materiales de aporte LINCOLN ELECTRIC COMPANY, (2000), se utilizó corriente continua con polaridad invertida (CC+), la cual, teniendo en cuenta el diámetro utilizado, fue variada en tres niveles (80, 100 y 120) A.

Para la obtención de las muestras y los registros fueron realizados cordones sobre planchas de acero AISI 1020 de 150x50x6 mm en posición plana. Antes de soldar, tanto las placas como los electrodos fueron pesados en una balanza técnica.

Al finalizar el proceso de soldadura, las muestras se limpiaron cuidadosamente para eliminar los restos de salpicaduras y escoria. Una vez realizado esto, la placa con el depósito y la colilla del electrodo, (figura 2.1), fueron nuevamente pesadas, para obtener de esta manera la información necesaria para determinar los parámetros de consumo.



Figura 2.1. Depósito terminado y colilla del aporte.

Una vez terminada esta etapa, de los depósitos fueron extraídas tres secciones de 8 mm de espesor, en el sentido trasversal a la del cordón (inicio, medio y final) y pulidas. Posteriormente, las muestras fueron atacadas con reactivo Murakami, (recomendado para materiales de alto carbono y cromo) y observadas a 200X de aumento en el Microscopio Óptico Metalográfico NOVEL modelo NIM-100, con una cámara fotográfica digital acoplada, y se precisó de esta manera las fases y los microconstituyentes presentes en los depósitos, así como la dureza de los mismos.

La medición de la dureza fue realizada con un microdurómetro SHIMATZU modelo HVS 1000 para una carga de 1000g, aplicada durante 15 s. Se realizaron un total de 10 mediciones en el centro del depósito de cada probeta, y se determinó el valor medio de dureza Vickers.

2.4. Obtención de los registros de Corriente y Voltaje

En virtud de los convenios de cooperación entre el CIS de la Universidad Central y la Universidad Federal de Uberlandia en Brasil, fue posible realizar algunos ensayos en una instalación mecanizada para la soldadura SMAW (figura 2.2), en LAPROSOLDA (Centro para Pesquisa y Desenvolvimento de Procesos de Soldaduras), con lo cual se evita la interferencia del soldador. Esta instalación, por su diseño, permite mantener constante la velocidad de soldadura y la longitud del arco durante el funcionamiento del proceso. Este último factor se regula con la ayuda de un sistema potenciométrico, el cual permite ajustar la longitud de arco lo más corta posible (para cada tipo de electrodo), como si fuera un operario el que estuviera realizando la operación.



Figura 2.2. Instalación experimental para la soldadura mecanizada con electrodo revestido.

De forma análoga a lo descrito en la obtención de los depósitos fueron realizados cordones sobre planchas de acero AISI 1020 de 150x50x6 mm en posición plana.

La instalación antes referida está acoplada a una computadora, con la cual, a través de una tarjeta de adquisición de datos, se registran los valores instantáneos de corriente y voltaje, a una frecuencia de 10 kHz, con una resolución de 12-bit, durante 6 s. Estos registros de valores instantáneos de corriente y voltaje, con posterioridad fueron convertidos y tratados con ayuda de programas computacionales dedicados a tales propósitos, a modo de obtener las informaciones relacionadas con la estabilidad de funcionamiento.

2.5. Obtención de los recubrimientos para los ensayos de erosión

De forma análoga a lo expuesto en el epígrafe 2.3, fueron obtenidos recubrimientos para la extracción de muestras para los ensayos de erosión, para lo cual se utilizaron planchuelas de acero AISI 1020 de 60x50x6mm, variando la corriente de soldadura (I_s), como única variable de entrada, en los tres niveles antes mencionados (80, 100 y 120) A, aplicando un solo pase y solapando los cordones, con el objetivo de lograr que zonas de la planchuela queden con el mínimo de defectos posibles.

Las tres probetas recubiertas fueron rectificadas, tanto en sus dimensiones exteriores como en la superficie de apoyo y la recubierta en sí, utilizando discos abrasivos de desbaste. Se elaboraron dos probetas adicionales, con las mismas dimensiones que las tres recubiertas: una de acero AISI 1020 como patrón de calibración (puesta a punto) para el equipo y otra a partir de una sección del recubrimiento de la hélice del extrusor, a la cual se le practicó además un análisis metalográfico similar al descrito en el epígrafe 2.3.

2.6. Análisis de la norma ASTM G 76-04 para la fabricación del dispositivo de ensayo

Este método de prueba cubre la determinación de la pérdida de material por la erosión de partículas sólidas, eyectadas por una corriente de gas a través de una boquilla. Puede ser utilizado en laboratorios para determinar el desgaste tipo erosivo de diferentes materiales; también ha sido usado como un ensayo tamiz con el objetivo de elaborar determinada relación de materiales de acuerdo a su resistencia al desgaste, simulando las condiciones de servicio (HANSEN, (1979)).

El ensayo utiliza el impacto repetido de partículas abrasivas, aceleradas dentro de una corriente de gas sobre una muestra. Desviaciones de las condiciones de la norma son permitidas, siempre que se documente cómo fueron realizadas y bajo qué condiciones, pues permite al laboratorio poseer una escala de mediciones del desgaste erosivo, siempre bajo las condiciones que se prefijen (ASTM G 76-2004).

La importancia de este método de prueba, para cualquier programa de mediciones de propiedades de materiales, radica en tener acceso al comportamiento de infinidad de materiales al desgaste erosivo, lo cual depende de un grupo de factores que pueden ser simulados, así como las condiciones de servicio y los resultados obtenidos pueden ser comparados con los diferentes métodos de ensayo.

En lo referido a la construcción del aparato, la norma establece que este debe ser capaz de erosionar el material siempre bajo condiciones controladas de exposición del mismo. La norma permite

cualquier desviación del diseño original mostrado en la figura 1.26, siempre que se adecúe la caracterización del sistema y los parámetros críticos del ensayo. Desviaciones en las dimensiones de la boquilla deben ser documentadas, su relación largo ÷ diámetro debe ser de 25:1, o mayor, con el objetivo de conseguir una aceptable velocidad de las partículas dentro del flujo; el material para su construcción debe ser resistente al desgaste erosivo, se recomiendan algunos como el carburo de tungsteno, para evitar su deterioro durante el servicio. Monitorear la boquilla, hasta que su diámetro no exceda en 10 % de su dimensión inicial, es fundamental (ASTM G 76-2004).

Otros de los requerimientos deben ser: el control de la velocidad de impacto de la partícula erosiva, el flujo del erosivo, así como la localización y orientación de la probeta con respecto a la corriente erosiva. Algunos métodos aceptados para la medición de la velocidad son: la fotografía de alta velocidad, el velocímetro láser, y el método de rotación de doble disco (ASTM G 76-2004).

Recomendaciones constructivas se refieren a que las dimensiones de las probetas deben elaborarse de forma rectangular, de 10×30×2mm; cambios en estas dimensiones pueden ser utilizadas siempre que se documente (ASTM G 76-2004). En lo referente al abrasivo a utilizar, la norma establece que este debe ser uniforme en sus características esenciales; tales como: tamaño de partículas, composición química, humedad, etc.

- Calibración del aparato

Para la calibración del aparato se debe elaborar una probeta con las dimensiones señaladas anteriormente de acero AISI 1020 (figura 2.3), lo cual debe ser analizado utilizando las especificaciones de la sección 9 de la norma ASTM G 76- 2004. Se recomienda que el aparato debe ser verificado siempre, luego que se realicen 50 pruebas, con el objetivo de analizar su estado y funcionamiento.

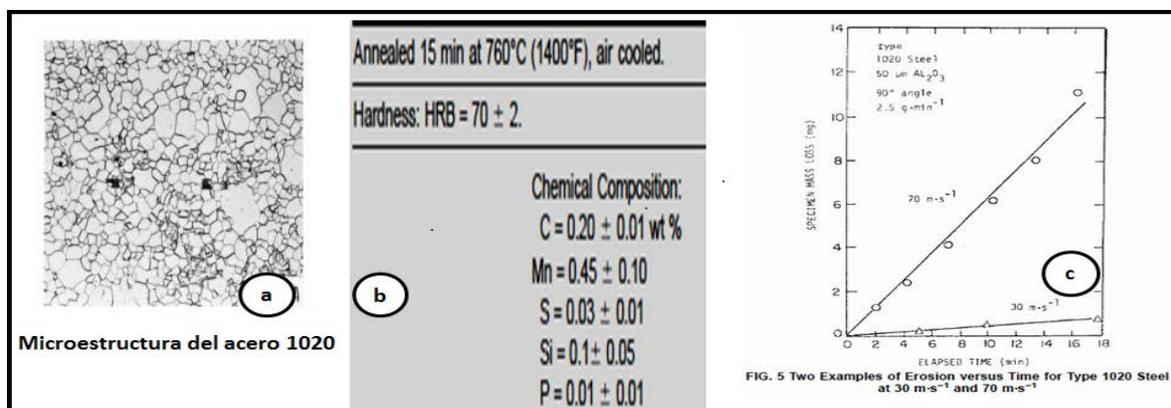


Figura 2.3. a)Microestructura del acero AISI 1020. b) Composición química. c) Test de erosión a diferentes velocidades de partículas para este acero (ASTM G 76-2004).

• Condiciones en que debe realizarse las pruebas según ASTM G 76-04:

- a) El tubo- boquilla debe tener 1.5 mm de diámetro en la salida y al menos 50 mm de largo.
- b) El gas a utilizar debe ser aire totalmente seco.
- c) Las partículas abrasivas deben tener 50- μm de tamaño, preferiblemente de Al_2O_3 , el abrasivo solo se permite utilizarlo una vez.
- d) La velocidad de la partícula erosiva debe ser de $30 \pm 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, al contactar con la probeta.
- f) El flujo de gas debe ser de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ y la presión del aire debe mantenerse en 140 kPa (20 psi).
- g) El tiempo de duración de la prueba no debe exceder los 10 min, tiempos superiores se permiten, siempre evitando que la profundidad del cráter producto de la erosión no supere 1mm.
- h) El ángulo de incidencia del flujo del erosivo sobre la probeta debe ser de $90\pm 2^\circ$.
- i) La prueba debe realizarse a temperatura ambiente, $(18 \div 28)^\circ\text{C}$.
- j) El flujo de partículas erosivas debe ser de $2.0 \pm 0.5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$.
- k) La distancia entre la boquilla y la muestra debe ser de $10 \pm 1\text{mm}$.

Cuando las condiciones de la prueba, los materiales o cualquier otra especificación sean variadas con respecto a la sección 9 de la referida norma, se deben relacionar y documentar cada una de estas divergencias.

2.6.1. Fabricación del dispositivo de ensayo al desgaste erosivo

Las máquinas para ensayos al desgaste erosivo son de relativa sencillez tecnológica, lo cual posibilita su fabricación en condiciones de taller.

Este epígrafe aborda la fabricación de una máquina de ensayo al desgaste erosivo en las condiciones de la Empresa de Materiales de la Construcción de Villa Clara, para su empleo en el análisis de las muestras recubiertas por soldadura a partir del aporte R-FeCr (reconvertido) y del material base del recubrimiento de las hélices del extrusor.

Para la fabricación del dispositivo, mostrado en la figura 2.4, se tomaron las consideraciones expuestas en la norma ASTM G 76-2004, que se detallaron en el epígrafe anterior, adecuándose a las condiciones propias del taller y aquellas de interés para el laboratorio de tribología del Centro de Investigaciones de Soldadura y utilizando trabajos precedentes, como el reportado por MESA, et al, (2004), que muestra un diseño de relativa sencillez tecnológica. En el presente trabajo se descartó la recomendación de cámara abierta que se muestra en el esquema del equipo según la norma referida

anteriormente y mostrado en la figura 1.27, pues de esta forma se evitaban ciertos inconvenientes relacionados con la dispersión del abrasivo, su pérdida y contaminación.

El dispositivo basa su funcionamiento en el principio de la eyección (MESA, et al, (2004)), de un abrasivo localizado en la tolva de almacenaje por una corriente de aire a una presión determinada, la cual al pasar por el eyector y arrastrar el abrasivo, lo concentra mediante una boquilla, proyectándolo a gran velocidad y energía cinética contra una placa colocada en el portamuestras, provocando la erosión de la misma. El flujo de aire es despresurizado dentro de la cámara y sale por el respiradero, en tanto, las partículas abrasivas se decantan en el fondo de la cámara.



Figura 2.4. Dispositivo de ensayo al desgaste erosivo.

En el sistema se tiene la posibilidad de controlar variables como:

- Velocidad de impacto de las partículas: para la medición de esta variable, debido a las condiciones del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), se realizará determinando la velocidad como una función de la diferencia de presiones (CHISTI AKOV, (1981)). Esto es posible con la introducción de un regulador de presión de O₂ a la entrada del tubo de alimentación de aire y la colocación de diafragmas segmentados (figura 2.5) en el tubo posterior al eyector, midiendo la presión antes y después del diafragma, con esto y un sistema de cálculo se determina analíticamente la velocidad del flujo.

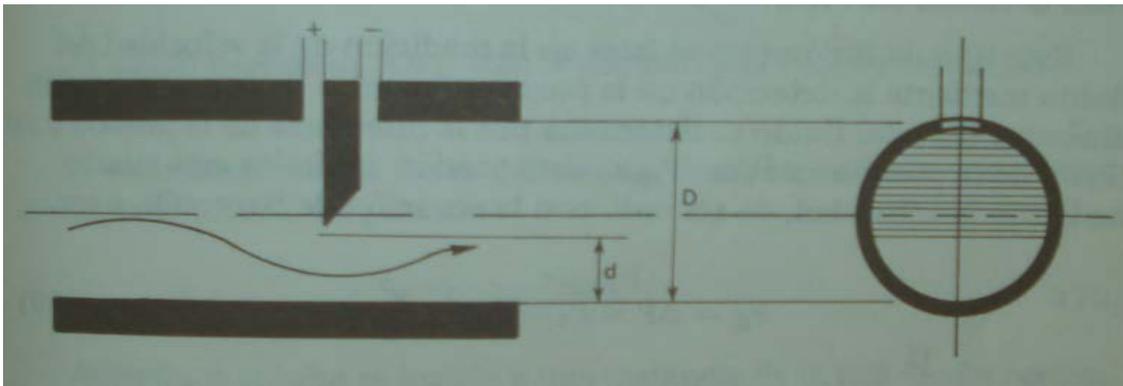


Figura 2.5. Diafragma segmentado, (CHISTI AKOV, (1981))

- Flujo de partículas: esta variable puede ser controlada con la válvula colocada debajo de la tolva de almacenaje, regulando su abertura y controlando el tiempo.
- Ángulo de impacto de las partículas: el ángulo es controlado a través de la variación del porta muestras en el rango desde 0 hasta 90°. Dispone además de una escala graduada en intervalos de 5°, que permite la colocación de la muestra en el ángulo deseado para el ensayo. Se recomienda controlar este parámetro con un nivel universal de burbuja el cual permite colocar ángulos entre (0÷90) °.
- La distancia entre la boquilla y la muestra: debe ser de 10 ±1mm según ASTM G 76-04, pero se dispone de regulación para realizar análisis con distancias de (0÷60) mm, mediante los prisioneros colocados en la sujeción del tubo principal.
- Tamaño y forma de las probetas: debido al sistema de sujeción de las probetas ante el flujo de material abrasivo, estas deben ser totalmente planas, con el mejor acabado superficial posible, sus dimensiones no deben de exceder los 40x60x10mm.

Para la fabricación de la estructura exterior del dispositivo se utilizaron láminas y perfiles de acero AISI A-36, soldados con electrodos revestidos E-6013, su cálculo no se detalló por lo insignificante de las solicitaciones a las cuales está sometida, las piezas que a mayores esfuerzos se someten son la boquilla y el eyector, ambas fabricadas de acero para herramientas 9XBI según GOST 5950-73, tratadas térmicamente hasta obtener $(58\div 62)$ HRC. En la salida de la boquilla se pudiera colocar por soldadura autógena, un suplemento de metal duro (WIDIA), para mejorar la resistencia al desgaste. Se ha tenido en cuenta lo ilustrativo de poder ver el ensayo en sí, por lo tanto se han colocado cristales que permiten apreciar el impacto de las partículas abrasivas sobre la muestra, lo que también haría posible en un futuro, colocar cámaras de alta velocidad para medir la velocidad del flujo de partículas, y hasta poder observar el fenómeno más detenidamente siempre que se logren imágenes y puedan ser procesadas. Posee además una escotilla en la parte inferior para extraer el erosivo decantado y una en la parte lateral que permite todo el acomodo del portamuestra.

2.6.2 Ensayos comparativos de erosión

Para los ensayos de erosión fue utilizado como erosivo el carburo de silicio, también llamado carborundo (SiC), el cual es un carburo covalente de estequiometría 1:1, que tiene una estructura de diamante, a pesar de la diferencia de tamaño del C y Si, que podría impedir la misma. Es casi tan duro como el diamante, posee una dureza de 9.2 en la escala de Mohs, y una densidad de 3.21g/cm^3 , lo cual lo hace muy apropiado para la labor. Este fue tamizado hasta obtener una granulometría de $(75\div 300)\ \mu\text{m}$, se aplicó la separación magnética de las partículas ferrosas que pudieran aparecer, lo cual se recomienda entre cada ensayo, por el hecho de la utilización repetida del abrasivo.

Las 5 probetas a ensayar son:

- Probeta #1: Depósito con $I_s= 80A$
- Probeta #2: Depósito con $I_s=100A$
- Probeta #3: Depósito con $I_s=120A$
- Probeta #4: Fundición de alto cromo
- Probeta #5: Acero AISI 1020 (puesta a punto del dispositivo)

Cada probeta fue limpiada cuidadosamente con cepillo de alambres, evitando cualquier presencia de óxidos y se le aplicó desengrasante (alcohol). Posterior a esto fue pesada en una balanza analítica y se registraron los resultados para cada caso. El abrasivo fue tamizado para obtener tamaños de partículas de $(75\div 300)$ μm , para cada ensayo fue utilizada una cantidad de 200 g.

Para el ensayo de puesta a punto del dispositivo se siguieron los pasos descritos en el epígrafe 2.6, según lo estipulado por la norma ASTM G 76-2004, utilizando el acero AISI 1020. El abrasivo, tamizado hasta tamaños de partículas de $(75\div 300)$ μm , fue pesado en 5 porciones de 200 g y fue eyectado a razón de 100 mg/min, colocando el portamuestras a 90° y una presión del aire de 12 kg/cm². Para estudiar el efecto del tiempo de ensayo sobre la pérdida de masa se realizaron 5 ensayos consecutivos con 200 g de abrasivo y se pesó luego de cada ensayo la masa de la probeta, evaluando el aumento progresivo de pérdida de masa en relación a la masa inicial.

Para las restantes 4 muestras, manteniendo la presión de aire constante en 12 kg/cm², se realizaron 3 ensayos a cada una, con ángulos de incidencia diferentes, 15° , 45° y 90° , según plan experimental mostrado en la tabla 2.1, y se obtuvieron valores del coeficiente de erosión para cada ángulo de incidencia (X_1) y cada valor de corriente de soldadura en la obtención del recubrimiento de la probeta (X_2). El erosivo (SiC) es reutilizado en los ensayos, siempre practicando la separación magnética entre ensayos, para evitar que las partículas de polvo de hierro que se generan durante la erosión provoquen resultados no deseados. El periodo que se pudiera reutilizar este abrasivo está por definir, en dependencia de su capacidad de mantener los filos cortantes en las partículas abrasivas, pudiendo ser el ensayo de calibración un indicador del tiempo de utilización del erosivo, lo que se recomienda sea estudiado con más profundidad en trabajos posteriores.

Tabla 2.1. Plan experimental para el ensayo de erosión.

N°	X_1	X_2	$\alpha,^\circ$	I_s, A
1	+	+	90	80
2	+	+/-	90	100
3	+	-	90	120
4	+	①	90	①
5	+/-	+	45	80
6	+/-	+/-	45	100

N°	X_1	X_2	$\alpha,^\circ$	I_s, A
7	+/-	-	45	120
8	+/-	①	45	①
9	-	+	15	80
10	-	+/-	15	100
11	-	-	15	120
12	-	①	15	①

2.6.3 Técnica operatoria para la realización de ensayos con el dispositivo

En una técnica operatoria tienen que estar plasmados los pasos a seguir para la interacción hombre-dispositivo, es decir, la operación de la máquina independientemente de cuál sea su complejidad. En el caso del dispositivo para la realización de ensayos erosivos fabricado se mencionan a continuación los pasos principales para la utilización del mismo:

- 1- Preparar la probeta: esto incluye su dimensionamiento y limpieza, ya sea química o mecánicamente.
- 2- Pesar la probeta en una balanza analítica de resolución 1 mg.
- 3- Pesar el abrasivo en una balanza técnica de resolución 10 mg.
- 4- Montar la probeta en el portamuestras.
- 5- Colocar el portamuestras dentro de la cámara.
- 6- Fijar el ángulo de incidencia entre la boquilla y el portamuestras y asegurar el apoyo mediante el prisionero.
- 7- Colocar el abrasivo en el sistema de alimentación (tolva de almacenaje).
- 8- Definir las condiciones de ensayo: flujo y presión de aire, tiempo al cual va a estar expuesta la probeta.
- 9- Poner en funcionamiento el compresor.
- 10- Realizar el ensayo.
- 11- Extraer, limpiar y pesar la probeta erosionada.
- 12- Limpiar y evacuar el abrasivo decantado.
- 13- Registrar los datos del ensayo.
- 14- Elaborar informe con todos los resultados de los ensayos.

El informe de los ensayos debe reflejar los parámetros con los cuales fueron realizados y los resultados de cada medición realizada, en particular de las masas iniciales y finales; así como la pérdida de masa y el cálculo de la pérdida de volumen si se estudiaran materiales de diferentes densidades. La forma más adecuada de reflejar los datos es en forma de tablas (tabla 2.2). En dependencia del estudio en particular realizado se elaborarán gráficos que muestren el comportamiento, por ejemplo: la pérdida de masa en función del ángulo de ataque, en función del tiempo de ensayo, en función de la granulometría del abrasivo, en función del tipo de abrasivo, en función del flujo, entre otros.

Tabla 2.2. Parámetros y resultados de los ensayos.

<i>N</i> º de muestra	α º	P (kg/cm ²)	<i>M_a</i> (g)	Tamaño del abrasivo (μ m)	<i>M₁</i> (mg)	<i>M₂</i> (mg)	ΔM (mg)	<i>E</i> (mg/kg)

Donde:

α º = Ángulo de incidencia en grados.

P = Presión de aire del sistema (kg/cm²).

M₁ = Masa de la muestra antes del ensayo en (mg).

M₂ = Masa de la muestra después del ensayo en (mg).

ΔM = Pérdida de masa de la muestra (mg).

M_a = Masa del abrasivo aplicado (g).

E = Coeficiente de erosión (mg/kg), definido como la relación de la pérdida de masa y la masa del abrasivo.

Conclusiones del Capítulo 2

- 1- Los aportes oxiacetilénicos del tipo R-FeCr, pueden ser convertidos satisfactoriamente en aportes por arco, mediante la adición de un revestimiento a base de fluorita, caliza, aglutinado con silicato de sodio, para ser utilizado en el recubrimiento superficial por soldadura de elementos desgastados mediante mecanismos erosivos, como es el caso de los tornillos extrusores de arcilla.
- 2- La utilización de una instalación mecanizada para soldadura SMAW permite la obtención de registros de corriente (Is) y voltaje (Us) sin la interferencia que provoca el factor humano, al mantener constante la velocidad de soldadura y la longitud del arco durante la realización del ensayo, facilitando una información más acertada en lo referido a la estabilidad de funcionamiento del electrodo.
- 3- La norma ASTM G 76-2004 brinda una serie de requerimientos indispensables para desarrollar el diseño de un dispositivo para ensayos de desgaste erosivos, brindando un gran número de variantes que flexibilizan la fabricación y utilización del mismo. Esto hace factible la fabricación de un dispositivo en las condiciones de taller para ensayar una alta gama de materiales.
- 4- Los parámetros extremos (presión de trabajo, tamaño y tipo de abrasivo y ángulo de incidencia) con los cuales se desarrollaron los ensayos, permiten una caracterización más acertada de los materiales ensayados, pues los coeficientes de desgaste son muy superiores a los normalmente declarados por la literatura.

Capítulo III. Resultados y Análisis

3.1. Introducción

Posterior a cumplimentar la reconversión del aporte R-FeCr (proceso oxiacetilénico) en un aporte E-FeCr para el recubrimiento de piezas sometidas al desgaste erosivo, así como la construcción de un dispositivo para realizar ensayos a materiales sometidos a este tipo de desgaste, en el presente capítulo se aborda el análisis de los principales resultados obtenidos, destacando los parámetros tecnológicos del nuevo aporte E-FeCr y la influencia de la corriente de soldadura (I_s) en la variación de cada uno de estos. Se establece la dependencia del coeficiente de erosión (E) respecto a la corriente de soldadura (I_s) en la obtención de los depósitos y al ángulo de incidencia (α°) de las partículas al desarrollar los ensayos de desgaste a cada depósito. Se realiza un análisis comparativo de los depósitos experimentales para las diferentes corrientes, tomando como referencia la fundición blanca de alto cromo (material original de recubrimiento de las hélices del extrusor) y se brinda, además, un análisis económico que permite comprobar la factibilidad de practicar el recubrimiento de las hélices con el aporte desarrollado.

3.2. Análisis del comportamiento de los parámetros de consumo

Los parámetros de consumo evaluados en función de la corriente de soldadura (I_s) fueron: la tasa de fusión, la tasa de depósito y el rendimiento real.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 3.1 y en las figuras 3.1 y 3.2 y en concordancia con lo tratado en la literatura, CRUZ-CRESPO, et al, (2008), con el aumento de la corriente hay una tendencia al aumento de la tasa de fusión y de deposición.

Tabla 3.1. Parámetros de consumo de los electrodos evaluados.

Punto experimental	Corriente media (A)	Voltaje medio (V)	Masa Inicial probeta (g)	Masa Inicial Electrodo (g)	Masa final probeta (g)	Masa final Electrodo (g)	Masa fundida (g)	Masa depositada (g)	Tasa de fusión (kg/h)	Tasa de depósito (kg/h)	Rendimiento real (%)
1	80	21,1	337,18	22,23	343,27	14,24	7,99	6,09	0,80	0,61	76,22
2	98	24,3	334,18	22,04	342,94	9,42	12,62	8,76	1,23	0,86	69,41
3	124	24,9	338,12	22,53	345,94	8,92	13,61	7,82	1,63	0,94	57,46
Patrón OAW	-	-	242,54	40,07	280,52	2,02	38,05	37,98	0,66	0,65	99,81

De acuerdo con MAZEL, (2006), la tasa de fusión y de depósito de un material de aporte están muy afectadas por las particularidades de los revestimientos, lo que produce variaciones en los grados de ionización de las atmósferas y estas a su vez variaciones en los modos de transferencia. De esta forma, cuanto mayor sea la energía de ionización de la atmósfera del arco, provocada por una mayor corriente de soldadura (para un revestimiento constante), menor serán el diámetro de las gotas que se transfieren, así como mayor su cantidad, incrementando de esta manera la tasa de fusión del material de aporte.

También este comportamiento podría estar asociado a la descomposición de la caliza, la cual está presente en el revestimiento adicionado. Este compuesto sufre un proceso de disociación endotérmica ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$) en el entorno de 850 °C, pero posteriormente con el incremento de la temperatura y la ocurrencia de los procesos de desoxidación, que son de carácter exotérmico, provocan un efecto sumatorio a la energía aportada por el arco, posibilitando de esta manera un incremento de la fusión y deposición de metal (MAZEL, (2006)).

En relación al comportamiento del rendimiento real (figura 3.3), se advirtió que en la medida que la corriente de soldadura se incrementa, se produce una reducción del rendimiento. Una explicación podría estar dada por un calentamiento excesivo del revestimiento del electrodo por efecto Joule, lo cual provoca que el mismo alcance una alta temperatura en casi toda su longitud y no solamente en su punta, donde se produce el arco. Esta temperatura puede ser suficientemente alta como para provocar la descomposición de los materiales que conforman el revestimiento, disminuyendo el efecto protector del mismo, lo cual como es de esperar aumenta el intercambio de calor con el medio circundante e incrementa la oxidación de los elementos de aleación y su pérdida. También, y de acuerdo con los trabajos de CRUZ-CRESPO, et al, (2008), con el incremento de la corriente se puede producir un cambio en la transferencia metálica, el cual, para este grupo de materiales de aporte en particular, puede producirse una disminución en el tamaño de las gotas que se transfieren, permitiendo el desarrollo de los mecanismos de la salpicadura.

Teniendo en cuenta el parámetro de rendimiento real, en este caso, la corriente más adecuada, dentro del rango evaluado, para aplicación de estos materiales de aporte, está en el orden de los 80 A.

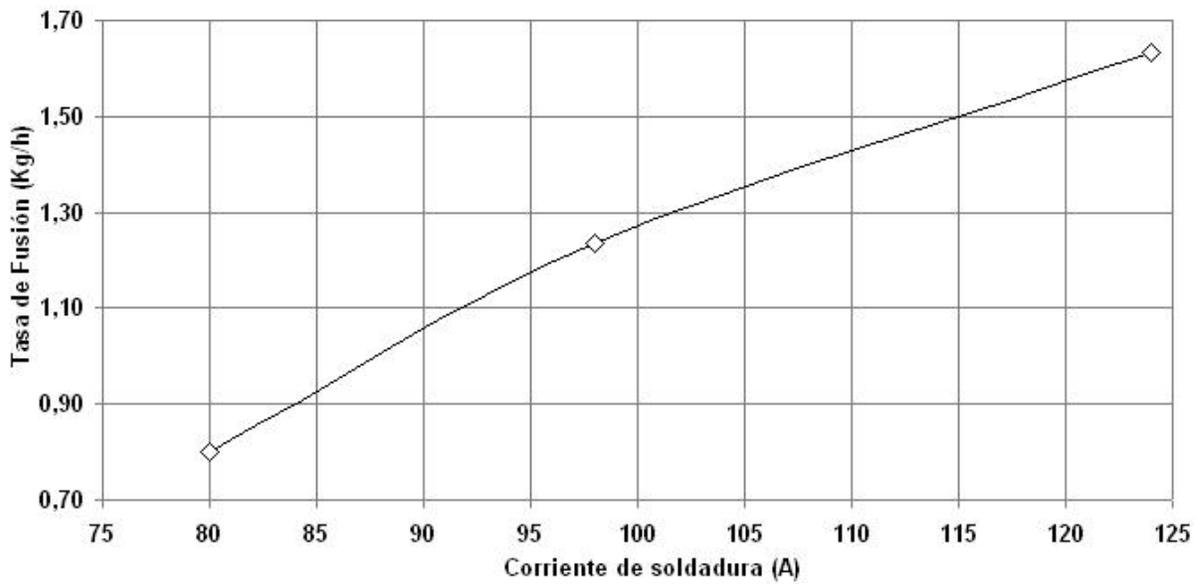


Figura 3.1. Comportamiento de la tasa de fusión con la corriente de soldadura.

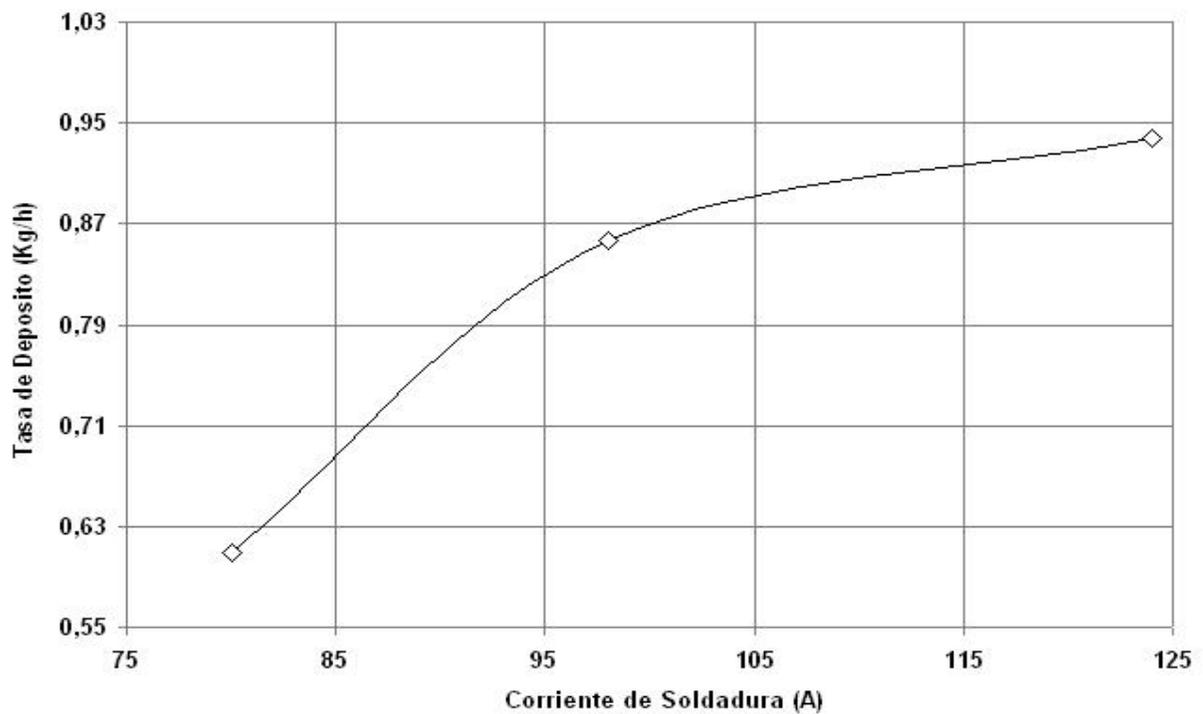


Figura 3.2. Comportamiento de la tasa de deposición con la corriente de soldadura.

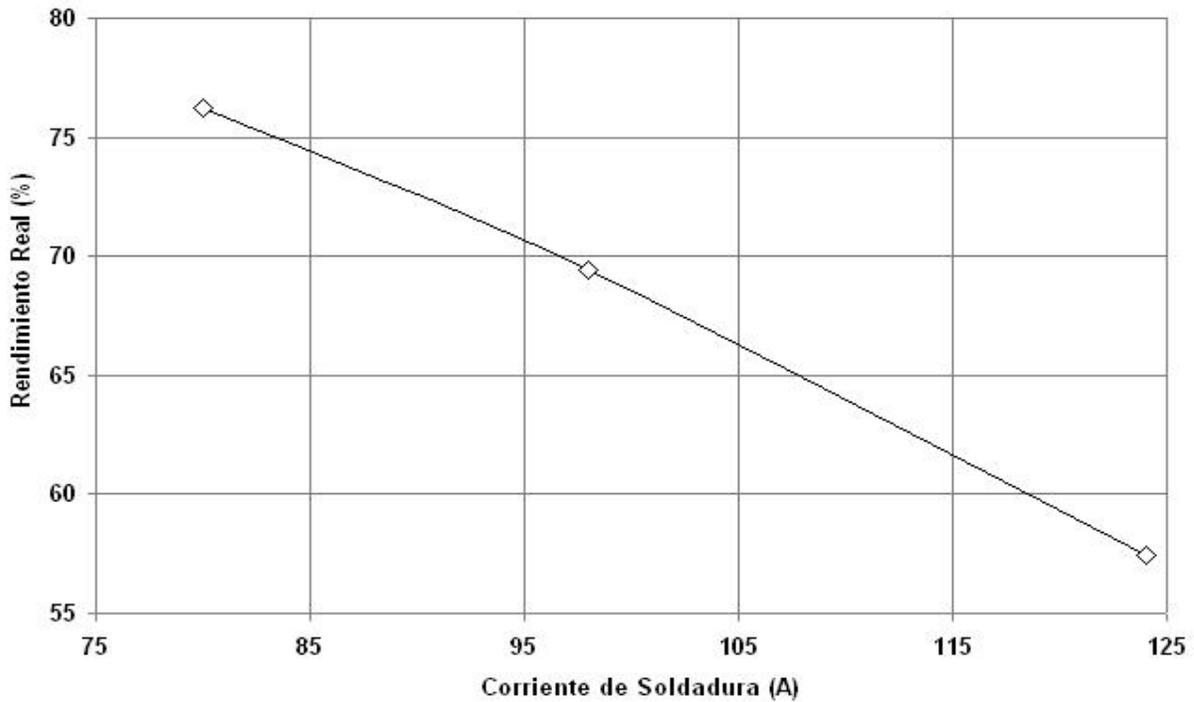


Figura 3.3. Comportamiento del rendimiento real con la variación de la corriente.

3.3. Análisis de la estabilidad de funcionamiento

Para el estudio de la estabilidad de funcionamiento y tomando como base lo planteado en la literatura, REHFELDT Y BOLLMAN, (1987), se partió de los registros instantáneos de voltaje adquiridos durante la realización de los depósitos (figura 3.4). Con estos registros se realizó el cálculo de los coeficientes de variación del voltaje (K_v) para cada valor de corriente de soldadura. Este coeficiente permite determinar la variabilidad (dispersión estadística) de los datos, su ecuación (3.3.1) expresa la desviación estándar de la media aritmética, mostrando una mejor interpretación de la variabilidad de la desviación estándar. Un resultado ideal, significaría tener una dispersión con relación a la media, lo más pequeña posible, por lo que en el caso de este estudio denotaría, que el consumible tiene un funcionamiento estable y no posee grandes oscilaciones ni diferencias de amplitudes. Es preciso destacar, que esta determinación solo tiene un carácter comparativo.

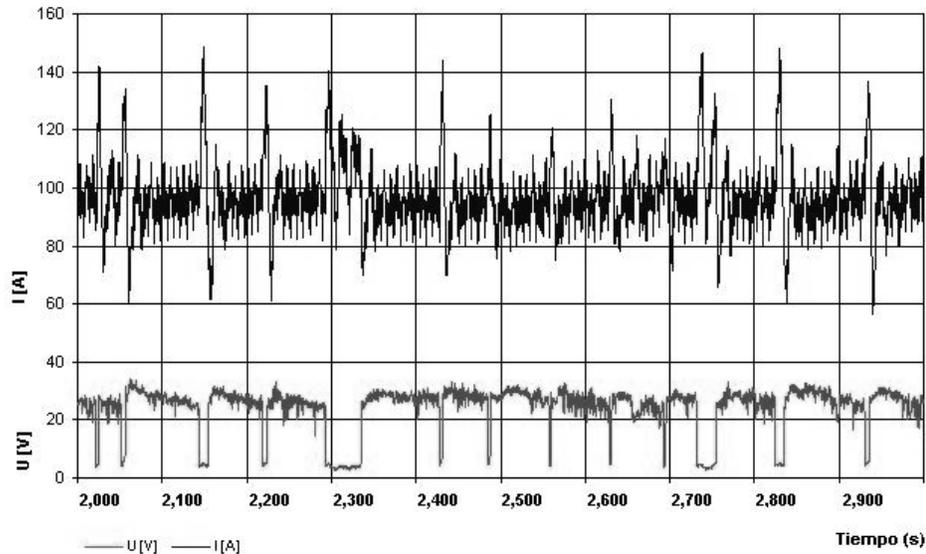


Figura 3.4. Ejemplo de registro de valores instantáneos de voltaje y corriente para el electrodo experimental (Registro para una corriente de 100 A).

Para determinar el coeficiente de variación se utilizó la ecuación:

$$K_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3.3.1)$$

Donde:

K_v : Coeficiente de variación (%)

σ : Desviación estándar (V)

\bar{X} : Media de las mediciones (V)

En la figura 3.5 se muestra el comportamiento del coeficiente de variación del voltaje ante el incremento de la corriente de soldadura. Este comportamiento es consistente con el comportamiento mostrado por el rendimiento real (figura 3.3), ya que en la medida que el proceso se hizo más estable (menor coeficiente de variación del voltaje), las pérdidas disminuyeron, lo que concuerda con lo reportado en la literatura, MONSALVE, et al, (2004), evidenciando de esa manera una posible disminución en el tamaño de las gotas de metal que se transfieren en la medida que la corriente de soldadura se incrementa.

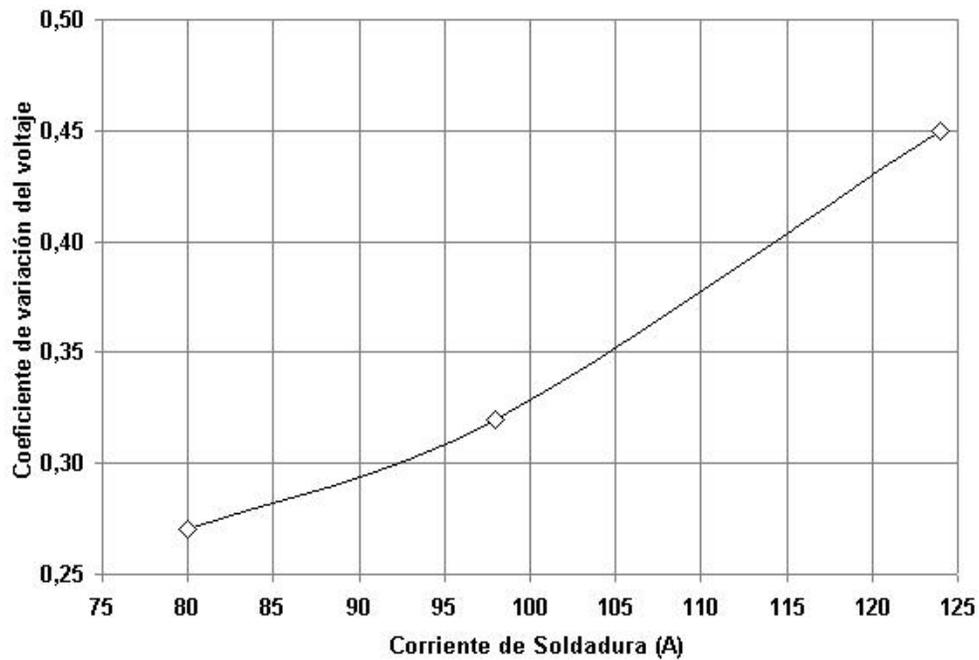


Figura 3.5. Comportamiento del coeficiente de variación del voltaje con respecto a la intensidad de corriente.

Para corroborar lo anteriormente planteado, respecto al cambio en la transferencia con el incremento de la corriente, los registros de valores instantáneos de voltaje y corriente adquiridos fueron procesados con el software ANALISCC. En la figura 3.6 se puede apreciar la relación entre la frecuencia de cortocircuitos con transferencia y la corriente, la cual según la literatura consultada, MONSALVE, et al, (2004), es el tipo de transferencia que normalmente ocurre en este proceso.

En la figura 3.6 se observa que en la medida que se incrementó la corriente, se acrecienta la frecuencia de cortocircuitos con transferencia metálica, lo cual es indicativo de la disminución del tamaño de las gotas de metal que fueron transferidas.

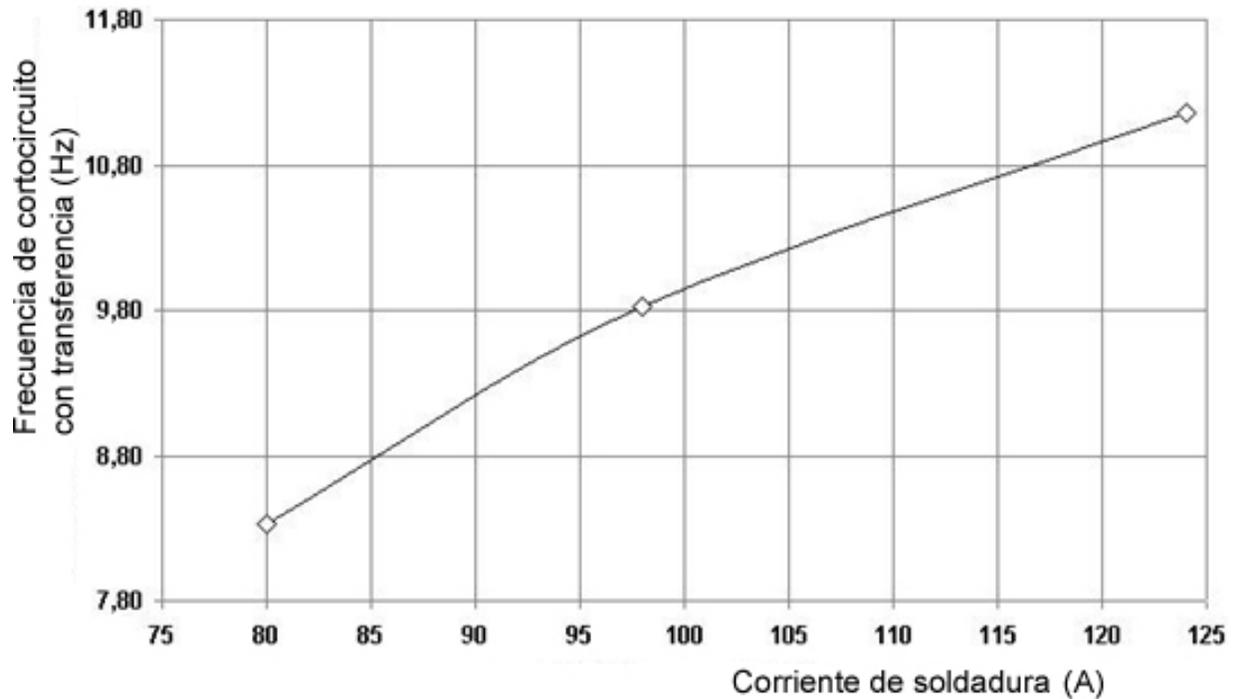


Figura 3.6. Comportamiento de la frecuencia de cortocircuitos con transferencia con respecto a la intensidad de corriente.

3.4. Análisis del comportamiento de la dureza y la microestructura de los depósitos

En la figura 3.7 se muestran los valores de dureza de los depósitos obtenidos para los tres niveles de corriente de soldadura ensayados con el electrodo experimental, observándose que para los menores niveles de esta, se obtuvieron los mayores valores de dureza (a pesar de que no se alcanzaron los valores de dureza logrados por el depósito realizado con el proceso oxiacetilénico), situación que ha sido abordada en la literatura consultada, BUCHELY, et al, (2005), que está adecuadamente justificada, pues para la menor intensidad de corriente, se produce una menor dilución, facilitando de esta manera que exista un contenido de elementos de aleación (Fe, Cr, C) capaces de formar carburos, (carbono y cromo), como se muestra en el diagrama de la figura 3.8.

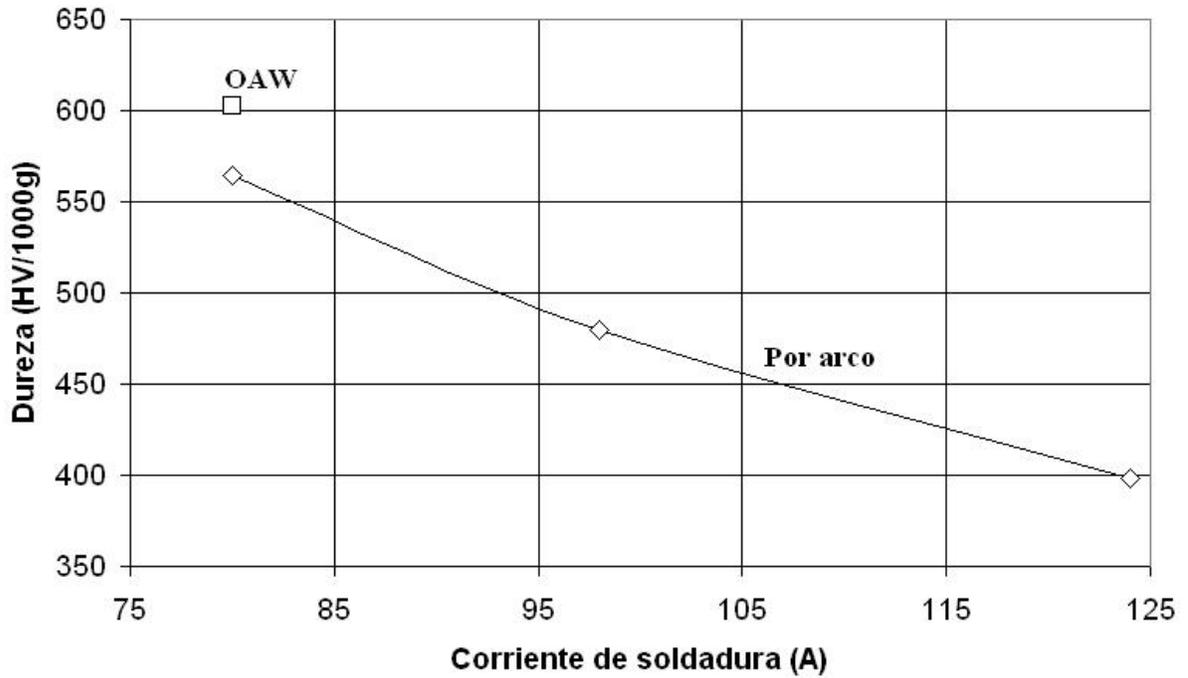


Figura 3.7. Comportamiento de la dureza del depósito con la variación de la intensidad de corriente (I_s).

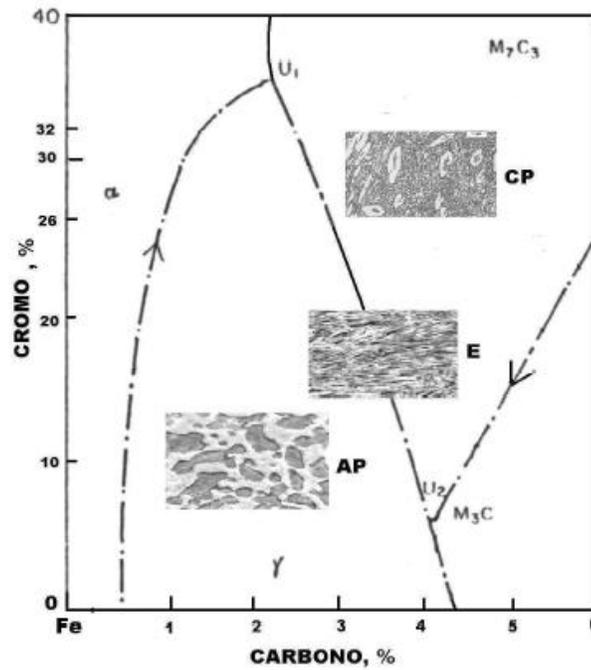
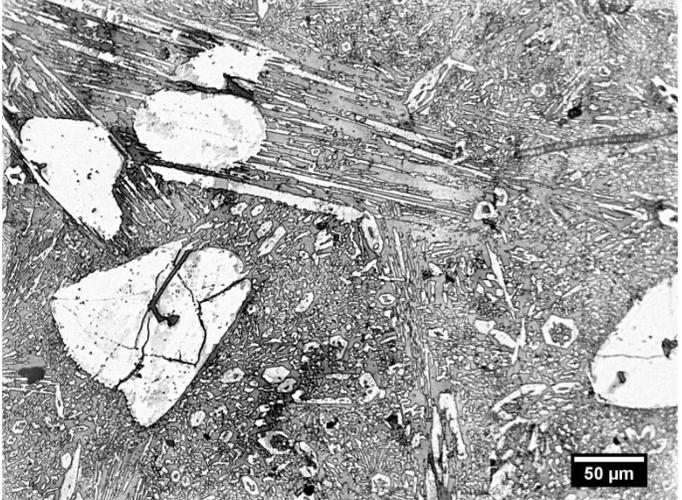
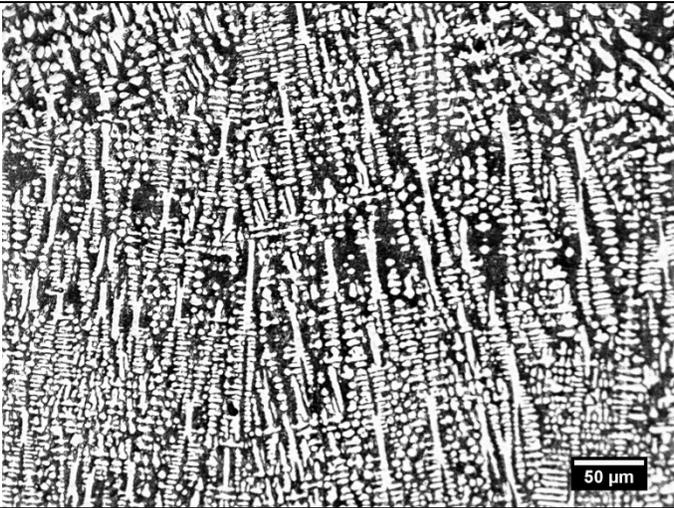
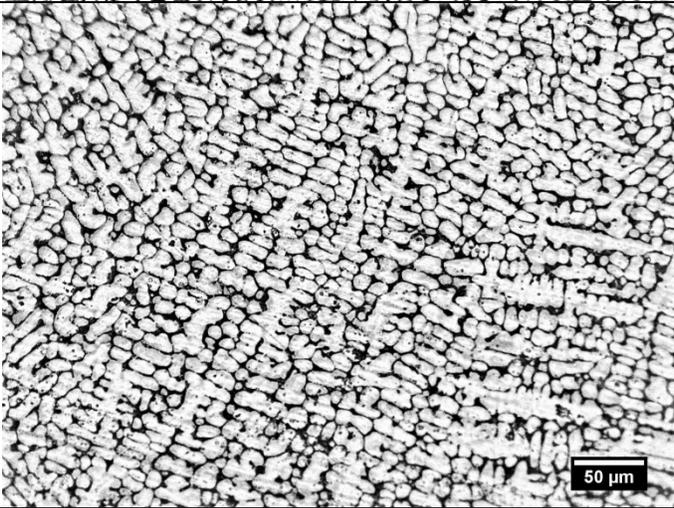


Figura 3.8. Superficie de líquidos del diagrama Fe-Cr-C (CHIA-MING et al. (2010)).

Para el caso del depósito donde se obtuvo la mayor dureza (570 HV), realizado con el menor nivel de corriente y tomando como base trabajos reportados en la literatura, CRUZ-CRESPO et al. (2008), se observa (tabla 3.2) una estructura formada por una matriz eutéctica (zonas oscuras) y campos dendríticos de austenita (zonas claras), correspondiente a una fundición blanca hipoeutéctica. En la medida en que se incrementó la corriente de soldadura se observaron cambios en la morfología de los depósitos, aumentando el tamaño de los campos dendríticos de austenita y disminuyendo el tamaño de la matriz eutéctica, lo cual es consistente con la disminución de la dureza (figura 3.7). Es necesario destacar que ninguno de los aportes en estudio, fueron capaces de superar los niveles de dureza alcanzado por el depósito realizado con el proceso OAW (610 HV), en cuyo cuadro microestructural se puede observar una matriz eutéctica con grandes carburos insertados en ella (aleación blanca hipereutéctica).

Tabla 3.2. Microestructura de los depósitos para diferentes niveles de corrientes de soldadura.

Nivel de corriente de soldadura (A)	Metal de aporte
	Microestructura (Ataque con Murakami observación a 200 X).
Referencia con OAW	

<p>Bajo Is=80</p>	
<p>Medio Is=100</p>	
<p>Alto Is=120</p>	

Toda vez que el estudio de desgaste se hizo tomando como referencia el material original del recubrimiento de la hélice del extrusor, se realizó la caracterización del mismo en el sentido de la microestructura y la dureza. Desde el punto de vista de la microestructura (figura 3.9), esta se caracteriza por la presencia de carburos probablemente del tipo M_7C_3 , insertados en una matriz eutéctica de pequeños carburos y austenita. Tanto por su microestructura, como por su composición química (figura 3.9), este material se corresponde con una aleación hipereutéctica, con dureza promedio de 650 Hv_{1000g} .

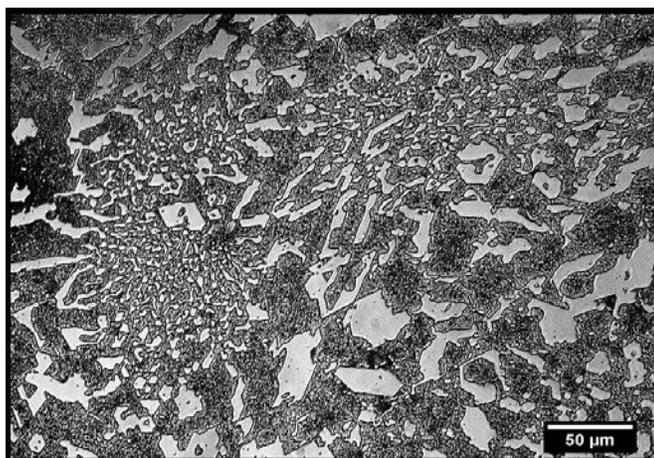


Figura 3.9. Microestructura de la fundición blanca de alto cromo (3.6% de C; 28.5% de Cr; 1.2 de Mo; 1.2% de Ni; 1.0% de Cu).

3.5 Análisis de los resultados de ensayos al desgaste erosivo

3.5.1 Análisis de los resultados del ensayo de puesta a punto del dispositivo

Los resultados de la puesta a punto del dispositivo de ensayo se muestran en la tabla 3.3 y en la figura 3.10. Como los parámetros utilizados no responden a la norma ASTM G 76- 2004, se declara este ensayo como de puesta a punto del dispositivo.

Tabla 3.3. Parámetros y resultados del ensayo de puesta a punto del aparato.

AISI 1020 $\alpha^\circ=90$					
P = 12 kg/cm ² Tamaño del abrasivo = (75÷300) μm					
<i>t</i> (s)	<i>Ma</i> (g)	<i>M</i> ₁ (mg)	<i>M</i> ₂ (mg)	ΔM (mg)	<i>E</i> (mg/kg)
120	200	51,4866	51,4553	31,3	156,5
240	400	51,4533	51,4255	61,1	152,75
360	600	51,4255	51,3947	91,9	153,16
480	800	51,3947	51,3645	122,1	152,62
600	1000	51,3645	51,3350	151,6	151,6

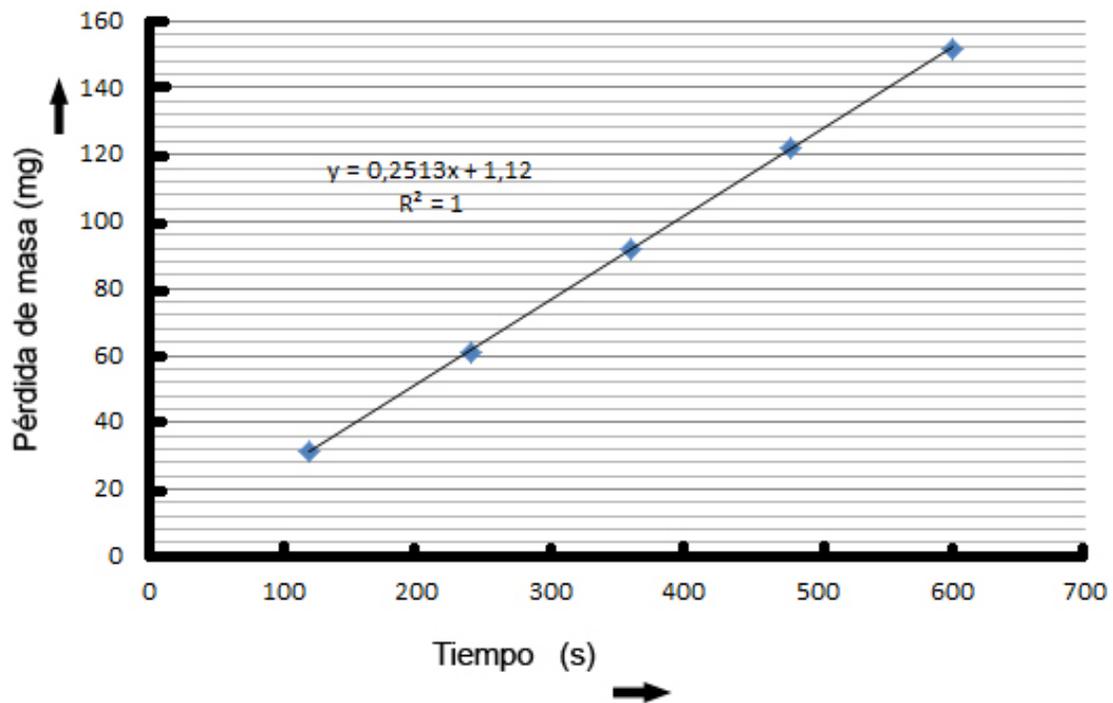


Figura 3.10. Prueba de erosión para el acero AISI 1020.

El comportamiento lineal del desgaste erosivo en función del tiempo de ensayo ha sido un comportamiento clásico reportado en la literatura, HUTCHINGS, (1992); ASTM G 76-04, siendo esto una evidencia de que el dispositivo fabricado es adecuado para este tipo de ensayo.

3.5.2 Análisis comparativo del comportamiento al desgaste

La tabla 3.4 muestra los resultados que se obtuvieron al ensayar las probetas elaboradas con las diferentes corrientes de soldadura ($I_s=80A$, $I_s=100A$, $I_s=120A$), así como las desarrolladas a partir del recubrimiento de la hélice del extrusor (muestras 4, 8 y 12), para diferentes ángulos de incidencia de las partículas, en correspondencia con el plan experimental mostrado en la tabla 2.1.

Tabla 3.4. Parámetros y resultados de los ensayos de erosión.

<i>N</i> ° de muestra	α°	I_s , A	P (kg/cm ²)	M_a (g)	Tamaño del abrasivo (μm)	M_1 (g)	M_2 (g)	ΔM (g)	E (mg/kg)
1	90	80	12	200	75÷300	127,1863	127.1715	0,0148	73.8
2	90	100	12	200	75÷300	115,4221	115.4058	0,0163	81.4
3	90	120	12	200	75÷300	118,3626	118.3451	0,0175	87.4
4	90		12	200	75÷300	125,8474	125.8350	0,0124	62
5	45	80	12	200	75÷300	127.1715	127.1534	0.0181	90.5
6	45	100	12	200	75÷300	115.4058	115.3857	0.0201	100.7
7	45	120	12	200	75÷300	118.3451	118.3231	0.0220	110
8	45		12	200	75÷300	125.8350	125.8193	0.0157	78.7
9	15	80	12	200	75÷300	127.1534	127.1296	0.0238	119
10	15	100	12	200	75÷300	115.3857	115.3589	0.0268	133.8
11	15	120	12	200	75÷300	118.3231	118.2948	0.0283	141.3
12	15		12	200	75÷300	125.8193	125.7999	0.0194	97

Se pudo apreciar mayor compatibilidad del recubrimiento desarrollado con la menor corriente de soldadura $I_s=80$ (tabla 3.2), con el material original ensayado (muestras 4, 8 y 12), teniendo esto una relación directa con la microestructura que se obtuvo para esta corriente y la dureza propia del depósito, con respecto a la probeta de fundición blanca de alto cromo (figura 3.9). En todos los casos, el desgaste de los depósitos experimentales fue mayor que el del material original, lo cual es coherente con el hecho de que este último es de fundición blanca hipereutéctica (figura 3.9), donde los carburos actúan como obstáculos a la penetración del abrasivo, mientras en los depósitos experimentales son de aleación hipoeutéctica, sin presencia de fase dura de la cristalización primaria (tabla 3.2). A medida que aumentó la corriente de soldadura, disminuyó la resistencia al desgaste erosivo, en total correspondencia con el engrosamiento de las dendritas austeníticas en la microestructura (tablas 3.2 y 3.4 y figura 3.13). En sentido general, se observó que el aumento del ángulo de incidencia de la partícula en el ensayo disminuye el coeficiente de desgaste (tabla 3.4 y figura 3.11).

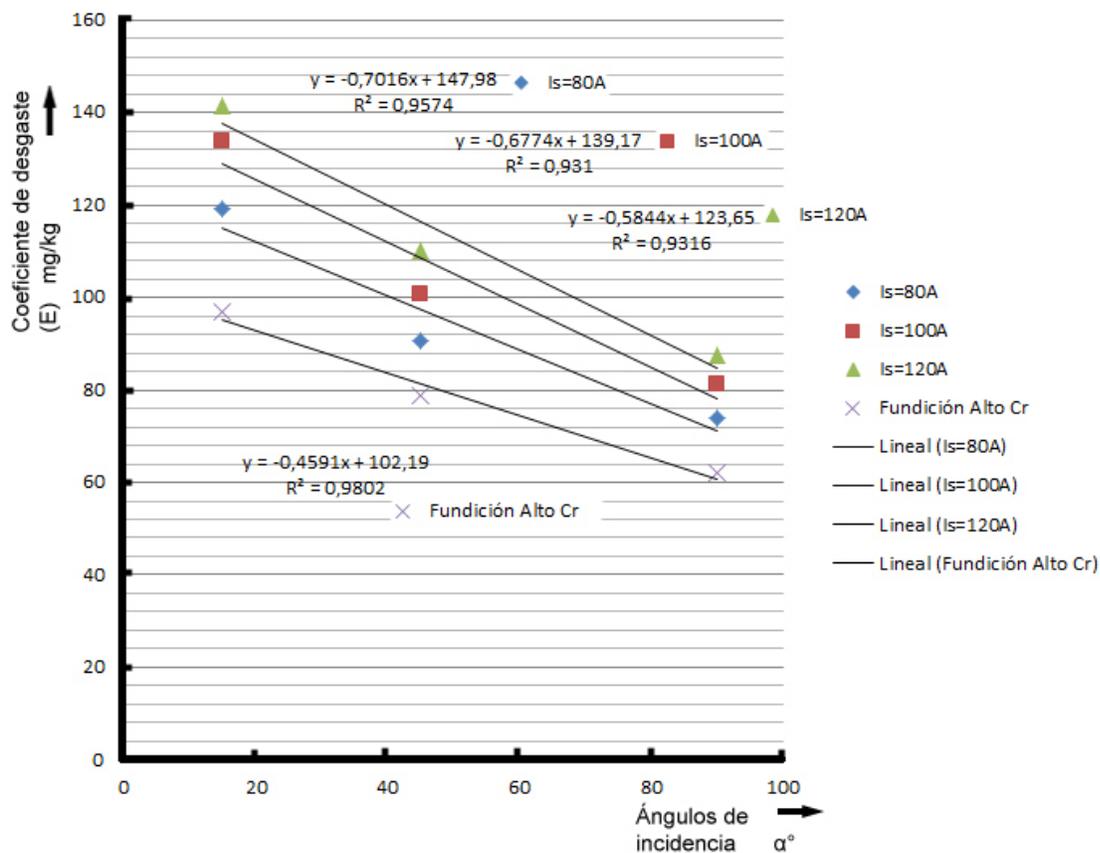


Figura 3.11. Comportamiento del coeficiente de desgaste con respecto al ángulo de incidencia.

La incompatibilidad de los materiales se demostró perfectamente para ángulos cercanos a 15° , tomando al coeficiente de desgaste erosivo (E) como referencia, no así para ángulos perpendiculares al flujo de abrasivo donde la diferencia entre cada uno de los analizados no fue superior a los 25 mg/kg, mientras para flujos casi horizontales se llegaron a alcanzar los 45mg/kg (figura 3.11), lo cual demostró que varios tipos de materiales pudieran ser elegible a la hora de enfrentar el desgaste erosivo a un ángulo determinado, esto variaría ostensiblemente para otra inclinación del flujo de abrasivo, haciendo que los mismos sean inadecuados. En todos los casos el comportamiento del desgaste frente al ángulo de incidencia tuvo un carácter lineal.

Para ángulos cercanos a 15° se hicieron visibles microcortes en la superficie erosionada (figura 3.12 c), además de un área impactada por el abrasivo muy superior a la de ángulos de 90° (figura 3.12a) donde se encontró una zona muy concentrada del desgaste, compuesta fundamentalmente por microcráteres. A 45° (figura 3.12b) están presentes una combinación de los mecanismos de desgastes de ambos extremos.

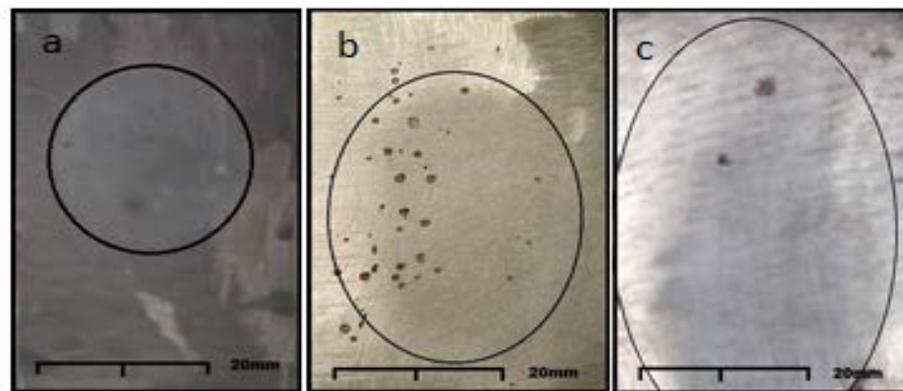


Figura 3.12. Probetas sometidas a ensayos de erosión. a) Probeta N° 1 con ángulo $\alpha^\circ=90$. b) Probeta N° 5 con ángulo $\alpha^\circ=45$. c) Probeta N° 9 con ángulo $\alpha^\circ=15$.

Los resultados obtenidos al ensayar un grupo de materiales al desgaste erosivo mostraron plena correspondencia con lo planteado en la literatura sobre el tema, ZUM GAHR, (1978). Se observa la tendencia al aumento de la resistencia frente a la erosión con el aumento de la dureza de los depósitos (figura 3.13), siendo claro que tanto, como ya ha sido abordado, la dureza como la

erosión están influenciadas por la corriente de soldadura (figura 3.7 y 3.13), ambas a su vez gobernadas por la microestructura (tabla 3.2), y manifestó menor efecto de la dureza frente al desgaste erosivo para ángulos cercanos a los 90° (figura 3.10), todo lo contrario a lo apreciado para ángulos inferiores a 20°, donde materiales sometidos a desgaste erosivo se comportaron de forma muy similar a cuando son sometidos a desgaste abrasivo, en el que la dureza es un parametro esencial para enfrentar esta sollicitación.

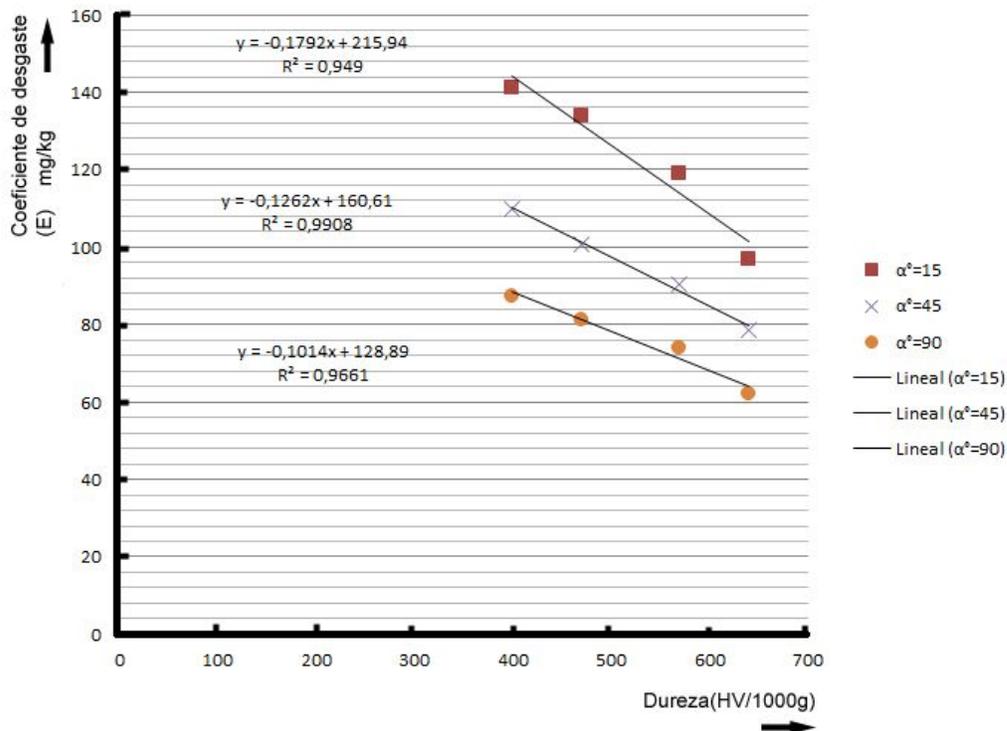


Figura 3.13. Comportamiento del coeficiente de desgaste erosivo con respecto a la dureza al variar el ángulo de incidencia.

Con el propósito de resumir el comportamiento del coeficiente de desgaste erosivo, bajo el efecto combinado de la corriente de soldadura en la obtención de los depósitos y el ángulo de impacto de la partícula abrasiva durante el ensayo de erosión, se realizó el procesamiento de los resultados basados en la tabla 3.4 con el empleo del software Statgraphics Centurion. Los resultados del análisis de varianza y el diagrama de Pareto (Tabla 3.5 y figura 3.14) demostraron que el efecto de ambas variables fue significativo, para un 95 % de probabilidad estadística, así como la interacción entre estas y el ángulo al cuadrado, pues solo resultó no significativa, la corriente al cuadrado.

Tabla 3.5. Análisis de Varianza para coeficiente de desgaste erosivo.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Ángulo Impacto	3825,37	1	3825,37	2694,00	0,0000
B: Corriente Soldadura	492,186	1	492,186	346,62	0,0003
AA	228,792	1	228,792	161,13	0,0011
AB	19,5712	1	19,5712	13,78	0,0340
BB	5,33556	1	5,33556	3,76	0,1479
Error total	4,25988	3	1,41996		
Total (corr.)	4431,43	8			

R-cuadrada = 99,9039 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,7437 por ciento

Error estándar del est. = 1,19162

Diagrama de Pareto estandarizado para coeficiente de desgaste erosivo

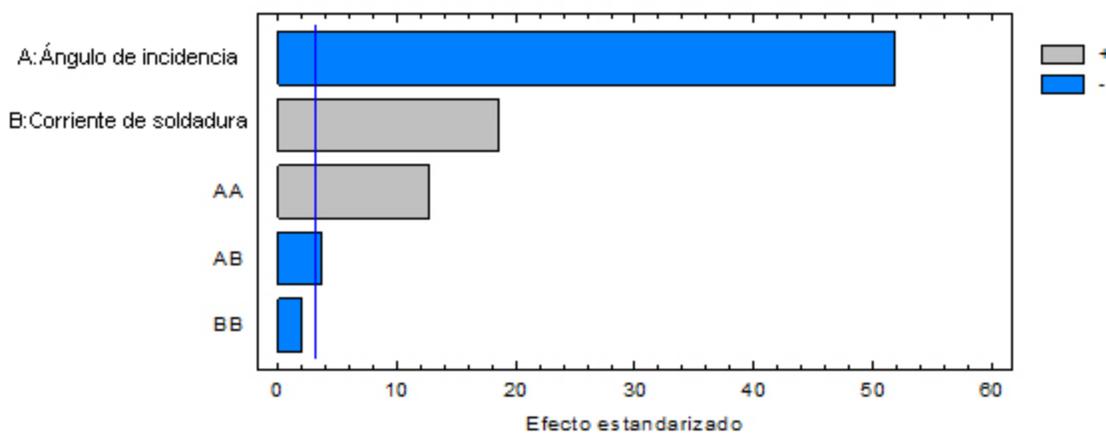


Figura 3.14. Diagrama de Pareto estandarizado para coeficiente de desgaste erosivo.

La gráfica de los efectos principales para el coeficiente de desgaste erosivo (figura 3.15) demuestra que el aumento del ángulo de incidencia disminuye dicho coeficiente y que el aumento de la corriente de soldadura en la obtención de los depósitos lo aumenta. Ello concuerda plenamente con los análisis realizados en relación con la figura 3.11.

Gráfica de efectos principales para coeficiente de desgaste erosivo (E)

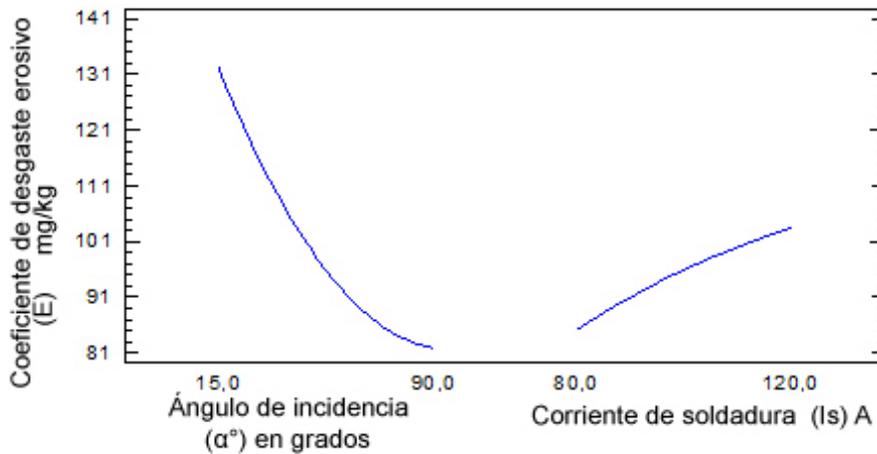


Figura 3.15. Efectos principales para el coeficiente de erosión.

Por su parte, la ecuación de regresión (3.5.1) muestra el efecto combinado de las variables de entrada (ángulo de incidencia y corriente de soldadura), base sobre la cual se ha obtenido la gráfica de superficies respuestas de la figura 3.16. Como se advierte, en plena correspondencia con los análisis realizados, el crecimiento del ángulo tiende a disminuir el coeficiente de erosión, mientras el incremento de la corriente de soldadura lo hace crecer (figura 3.16). De acuerdo con la pendiente se hace visible que el efecto del ángulo de incidencia es mucho más significativo que el de la corriente, lo cual coincide con lo mostrado en el diagrama de Pareto (figura 3.14).

$$E = 51,6731 - 1,2176 * \alpha + 1,42482 * I_s + 0,00797531 * (\alpha^2) - 0,00292982 * \alpha * I_s \quad (3.5.1)$$

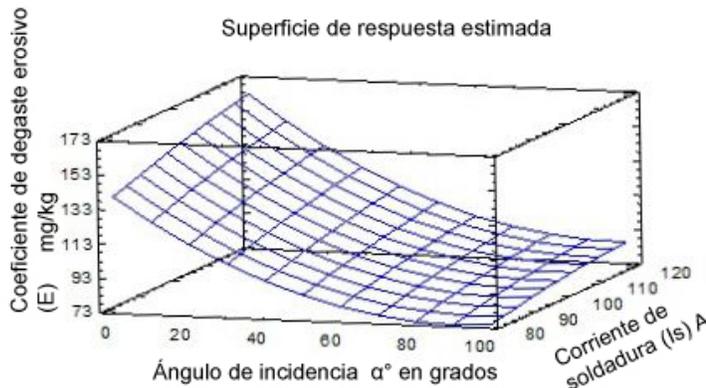


Figura 3.16. Comportamiento del coeficiente de desgaste erosivo (E) en función del ángulo de incidencia de la partícula (α°) y la corriente de soldadura (I_s) en la obtención de los depósitos.

3.6. Evaluación económica

Un elemento que completó el estudio del comportamiento de un determinado consumible lo constituyó la determinación del efecto económico durante su aplicación. En este caso, se decidió realizar este análisis al proceso de restauración de las hélices que conforman el extrusor de arcilla (figura3.17), utilizando el electrodo E-FeCr reconvertido, por lo que el factor productividad y la resistencia al desgaste erosivos son elementos de suma importancia a tener en cuenta. Para ello se partió de las siguientes condiciones:

- Diámetro exterior de la hélice: 400 mm
- Diámetro interior de la hélice: 300mm
- Cantidad de sectores de hélices que conforman el extrusor: 9
- Material del que está fabricado la hélice: AISI 1045
- Espesor a rellenar: 3 mm
- Régimen de soldadura a aplicar: 80 A

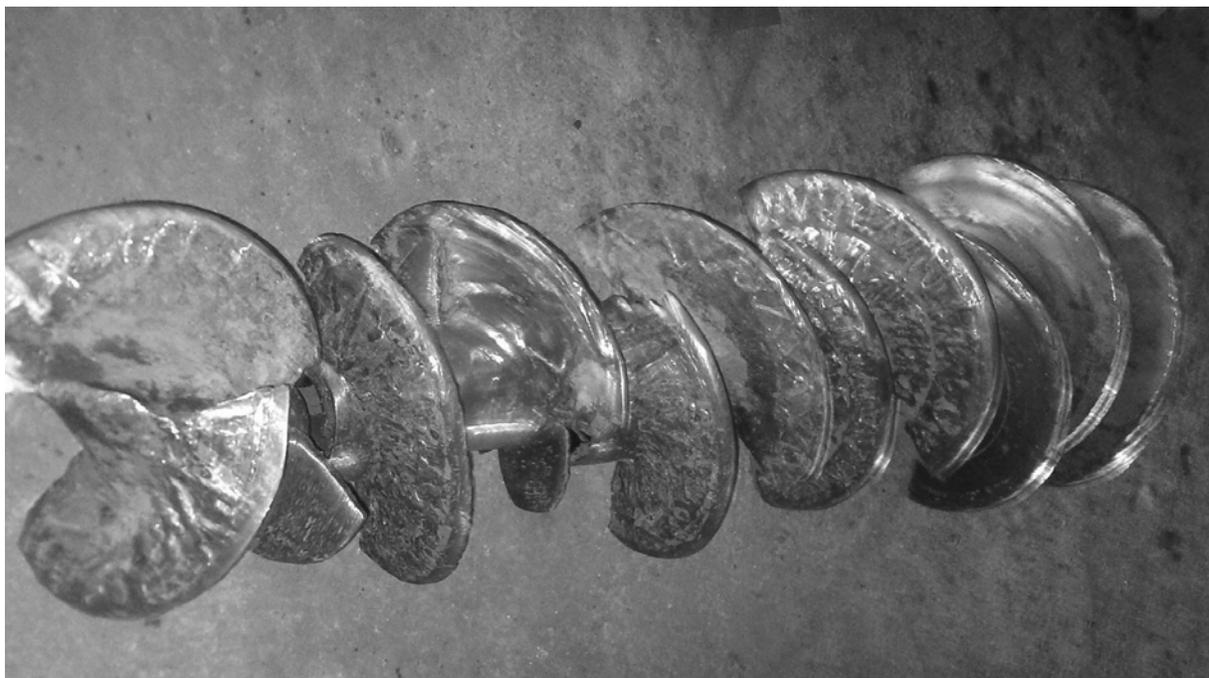


Figura 3.17. Hélices que conforman el extrusor de arcilla.

Para esto, se utilizó la metodología elaborada para la determinación de los costos de realización de la soldadura por DÍAZ- CEDRÉ, (2006), dadas en la ecuación 3.6.1.

$$C_{TS} = C_{CS} + C_{MOAD} + C_{ee} \quad (3.6.1)$$

Donde:

C_{TS} – costo total de soldadura (CUC)

C_{MOAD} – costo de mano de obra y administrativos (CUC)

C_{CS} – costo de consumibles de soldadura (CUC)

C_{ee} – costo de energía eléctrica (CUC)

Para la determinación de los costos de consumibles de soldadura, se utilizó la ecuación 3.6.2, la que establece que:

$$C_{CS} = C_e + C_{PC} \quad (3.6.2)$$

Donde:

C_{CS} – costo de consumibles de soldadura (CUC)

C_e – costo de electrodos a consumir (CUC)

C_{PC} – costo del precalentamiento (CUC)

El costo de electrodo consumido se determina por la ecuación 3.6.3

$$C_e = \frac{Mmd * P_e}{E_t} \quad (3.6.3)$$

Donde:

P_e : Precio del electrodo 5,45 CUC/Kg, (DE-EMC, (2014)), el cual incluye los gastos de reconversión del aporte R-FeCr.

E_t : El aporte R-FeCr con revestimiento a 80 A según los resultados de este trabajo tuvo una eficiencia real de 76.22 %.

La masa de metal a depositar se calcula por la ecuación 3.6.4

$$Mmd = Vmd * \gamma md \quad (3.6.4)$$

Vmd: Volumen de metal a depositar: 507738mm³

γ_{md} : Densidad del metal depositado: 0,00786 g/mm³

Mmd = 3.9 Kg.

Ce = 21.25 CUC por cada sección de hélices.

C_{PC} = 0 CUC, ya que no hay necesidad de dar precalentamiento

Ccs = 21.25 CUC.

El costo de mano de obra y administrativo se determina por la ecuación 3.6.5

$$C_{moad} = \frac{T_{mo} * V_{md} * \gamma_{md}}{RD * F_o} \quad (3.6.5)$$

Tmo: Tarifa de costos de mano de obra y administrativos: 5,01 CUC/h (DE-EMC, (2014)).

RD: Razón de depósito, según los resultados de este trabajo para este aporte es 610 g/h.

Fo = 0,3 Factor operacional para proceso SMAW, según la bibliografía consultada, DÍAZ-CEDRÉ, (2006).

C_{moad} = 12,42 CUC.

El costo de la energía eléctrica consumida en el proceso se determina por la ecuación 3.6.6.

$$C_{ee} = \frac{PkWh * V_a * I_s * M_{md}}{1000 * RD * F_o * E_{fu}} \quad (3.6.6)$$

Donde:

PkWh: Precio del kWh industrial: 0,06 CUC/h.

Va: Voltaje de arco, el cual según el resultado de este trabajo fue de: 21,1 V.

Is: Intensidad de corriente: 80A.

Efu: Eficiencia de la fuente de corriente, en este caso para un rectificador de soldadura LHF 630 la eficiencia es: 0,75

C_{ee} = 0,00253 CUC.

Por tanto, el costo de rellenar, al utilizar el electrodo R-FeCr con revestimiento, una de las hélices del extrusor es de **33,70 CUC**.

De aquí se deriva que el efecto económico (**Eec**) de la recuperación de las hélices del extrusor mediante la utilización del electrodo R-FeCr con la adición de un revestimiento se puede determinar por la ecuación 3.6.7:

$$\mathbf{Eec = Cpn - Cpr} \quad (3.6.7)$$

Donde:

Cpn: Costo de la pieza nueva: 175 CUC

Cpr: Costo de la recuperación: 33,70 CUC.

Eec = 141,30 CUC por cada hélice recuperada

Si se tiene en cuenta que el conjunto de la extrusora costa de 9 secciones de hélices, el efecto económico total por la recuperación de la misma es de 1271,70 CUC, valor el cual demostró la factibilidad de la recuperación de las hélices, al recubrir estas utilizando el electrodo R-FeCr con revestimiento adicionado.

Conclusiones del Capítulo 3

- 1- La puesta a punto del dispositivo de desgaste corroboró que con el aumento del tiempo de ensayo aumenta linealmente la pérdida de masa, siendo esto una clara evidencia de la capacidad del dispositivo para el estudio de materiales bajo condiciones de erosión seca.
- 2- El aporte E-FeCr en el rango de las bajas corrientes, ha poseído un comportamiento superior desde el punto de vista de los parámetros de consumo (tasa de fusión 0,8 kg/h y tasa de depósitos 0,61 kg/h) superior al aporte original para ser utilizado con proceso oxiacetilénico, no siendo así en lo referido al rendimiento, donde el proceso oxiacetilénico prácticamente no posee pérdidas (99,87 %). Con respecto a la estabilidad de funcionamiento, dicho aporte funcionó adecuadamente en el rango de las bajas corrientes, con el menor valor del coeficiente de variación del voltaje (0,27), dentro del rango de corrientes estudiado.
- 3- Los depósitos obtenidos por arco, particularmente en el rango de las bajas corrientes, no lograron los niveles de dureza, ni la estructura metalográfica que el aporte original deposita. Sin embargo, este aporte mostró un comportamiento adecuado ante los mecanismos de desgaste erosivo bajo los cuales funciona la extrusora. Con el aumento de la corriente de soldadura, la dureza de los depósitos obtenidos con los electrodos experimentales disminuyó, al igual que su resistencia al desgaste, lo cual está asociado con un engrosamiento de la microestructura de dendritas de austenita con una matriz eutéctica de austenita y carburos.
- 4- Al disminuir el ángulo de incidencia de las partículas en el ensayo de erosión aumentó el coeficiente de desgaste. Las probetas preparadas con intensidades bajas de corriente ($I_s=80A$) fueron las que más resistencia ofrecieron al desgaste erosivo a bajos ángulos de incidencia (15°).
- 5- La comparación entre la probeta elaborada de fundición blanca de alto cromo de la hélice del extrusor (material original) y las desarrolladas con los electrodos tipo E-FeCr, reconvertidos a partir del aporte R-FeCr, mostraron que la probeta recubierta con corriente de soldadura

igual a 80 A, evidenció un comportamiento aceptable referido al desgaste erosivo, lo cual permitió corroborar la factibilidad de la utilización del aporte reconvertido (amparado además en el análisis económico y en el estudio de los parámetros de consumo), al exhibir este una resistencia a la abrasión (1/E) de aproximadamente el 70% de la obtenida por el material base del recubrimiento de las hélices, por lo que se pudo estimar una vida útil del recargue de aproximadamente seis meses, lo cual se considera aceptable dentro del ciclo de mantenimiento de la máquina.

Conclusiones generales

- 1- El aporte oxiacetilénico R-Fe Cr convertido en un aporte por arco del tipo E-Fe Cr mostró un adecuado desempeño tanto; técnico - operativo, como a solicitaciones de desgaste erosivo. La durabilidad del recubrimiento seleccionado significa alrededor del 70 % de la vida útil del material original de las hélices del extrusor.
- 2- Bajo el efecto de la corriente, el comportamiento operativo y la microestructura evidenciaron su mejor desempeño para una corriente de 80 A. La microestructura del depósito corresponde a una fundición blanca hipoeutéctica, la cual muestra un engrosamiento microestructural en función de la corriente. Para el caso de la aleación original de las hélices del extrusor y la del depósito con el aporte oxiacetilénico R-Fe Cr, la microestructura obtenida es hipereutéctica.
- 3- El efecto combinado de la corriente de soldadura y el ángulo de incidencia de las partículas mostró que al aumentar la corriente aumenta el coeficiente de desgaste erosivo y al ser mayor el ángulo de impacto, el desgaste erosivo disminuye. La ecuación de regresión obtenida y la expresión gráfica de tal comportamiento permiten estimar valores del coeficiente de erosión para niveles de corrientes de soldadura y de ángulos de impacto de las partículas, enmarcados dentro del rango evaluado.
- 4- El dispositivo de ensayo a desgaste erosivo por vía seca, fabricado en correspondencia a normas internacionales y la técnica operatoria elaborada, posibilita la realización de investigaciones de desgaste comparativo de diferentes materiales, así como el estudio del efecto de diferentes parámetros de ensayo a desgaste erosivo (tamaño de la partícula, forma de la partícula, ángulo de ataque, velocidad del flujo, tipo de material abrasivo) en el Centro de Investigaciones de Soldadura. Lo anterior garantiza la realización de prácticas de laboratorio de erosión por vía seca de alto valor didáctico y la realización de ensayos como servicios de colaboración con la industria.

Recomendaciones

- 1- Introducir el resultado en la práctica del mantenimiento y reparación de la Empresa Materiales de la Construcción y generalizar este a otros sectores afines.
- 2- Utilizar de forma sistemática el dispositivo para ensayos a desgaste erosivo, tanto por parte del laboratorio de tribología de la UCLV, como por entidades que se destaquen en el diseño y la restauración de piezas por métodos de soldaduras de elementos sometidos a desgaste erosivos.
- 3- Sobre la base de las premisas teóricas y metodológicas del trabajo, realizar investigaciones de reconversión y evaluación de consumibles destinados a otras aplicaciones y consecuentemente fabricar dispositivos o equipos para erosión húmeda u otros mecanismos de desgaste (abrasivo, por fatiga, cavitación, corrosivo mecánico, etc).
- 4- Desarrollar estudios experimentales de comportamiento granulométrico y morfométrico de las partículas del abrasivo en función de las veces de reutilización del abrasivo y los tiempos de ensayo; así como, trabajos vinculados a la medición de la velocidad de la partícula.

Bibliografía

1. AGUILAR-CASTRO, Y.; CASANOVA-GARCÍA, F.; VICTORIA-PRADO, R.; AGUIRRE-GUERRERO, D.; UQUILLAS-RESTREPO, B. Desgaste en acero de bajo carbón debido a la acción de bagazo limpio o contaminado con sílice y jugo de caña. *Ingeniería y Universidad*. Vol. 15, No 2, pp. 373-384, 2011.
2. AL-BUKHAITI, M.A. AHMEDB, S.M. BADRAN, F.M.F. EMARAB, K.M. Effect of impingement angle on slurry erosion behavior and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron. *Wear* 262, p, 1187–1198, 2007.
3. ASM HANDBOOK. Volumen 15, Casting, p, 1484- 1500, 1992.
4. ASM HANDBOOK. Volumen 18, P, 320-477, 1992.
5. ASTM G 117-02 Standard Guide for Calculation and Reporting Measures of Precision Using Data from Interlaboratory Wear or Erosion Tests, 2002.
6. ASTM G 76-04. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement using Gas Jets, 2004.
7. ASTM G73-98 Standard Practice for Liquid Impingement Erosion Testing1, 1998.
8. ASTM G76-89 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets1, 1989.
9. ASTM. A 532.
10. BALL, A. The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials, *J.S. Afr. Inst. Min. Metall.*, v.86, n. 1, p.1 – 1, Jan. 1986.
11. BUCHANAN, V.E. MCCARTNEY, D.G. SHIPWAY, P.H. A comparison of the abrasive wear behavior of iron-chromium based hard-faced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying. *Wear* 264, p. 542–549, 2008.
12. BUCHELY, M.F., GUTIERREZ, J.C., LEON, L.M., TORO, A., The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear* No 259, pp. 52-61, 2005.
13. CARPENTER, S.D., CARPENTER, D., PEARCE, J.H.T. XRD and electron microscope study of an as-cast 26.6% chromium white iron microstructure. *Materials Chemistry and Physics* 85, p, 32–40, 2004.
14. CARY, H. B. *Modern Welding Technology*. Third Edition, Regents/Prentice Hall, New York, 800p. 1994.

15. CHIA-MING; CHANG YEN-CHUN-CHEN; WEITE-WU. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C Hardfacing alloy, *Tribology International* No 43, pp. 929–934, 2010.
16. CHISTIYAKOV, V. *Medición de flujo*. Habana; 1981.
17. COELHO LIMA, A. FERRARESI, A. Análise da Microestrutura e da Resistência al Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. *Rev. Soldagem Insp. São Paulo*, Vol. 14, No. 2 , p.140-150, Abr/Jun 2009.
18. COREA, E.O. ALCANTARA, N.G. TECCO, D.G. KUMAR, R.V. The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system. *The Minerals, Metals and Materials Society and ASM International*, p, 1671-1680, 2007.
19. CRUZ, A. *Desgaste. Material didáctico*. UCLV, 2012.
20. CRUZ-CRESPO, A., PERDOMO, L., PÉREZ, M.R. Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales, *Congreso da Sociedade Brasileira de Soldagem, Belo Horizonte*, Oct. 2006.
21. CRUZ-CRESPO, A., SCOTTI, A., RODRIGUEZ-PEREZ, M. Operational behavior assesment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 199, pp. 265-273, 2008.
22. DE-EMC; 2014.
23. DE MELO, R.V., VILLANI MARQUES. P. Estudo Comparativo da Resistência al Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares, *Rev. Soldagem Insp. São Paulo*, Vol. 14, No. 4 , p.329-335, Out/Dez 2009.
24. DÍAZ- CEDRÉ, E. *Curso de recuperación de Piezas. Material de apoyo a la docencia*. Editorial Feijoo. UCLV. 1999.
25. DOGAN, O.N., HAWK, J.A., LAIRD II, G. Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons. *A metallurgical and material transaction*. P, 1315-1328. 1997.
26. FARIAS, J. P., BÁLSAMO, P. S., SURIAN, E. S. The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol 26, No 3, pp. 17-21, 2004.

27. FERNÁNDEZ ABAJO, M. Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos. Editorial Beralmar, S.A; 2000.
28. FINNIE, I. The Mechanisms of Erosive Wear in Ductile Metals, Corrosion-Erosion Behavior of Materials, p, 118-126, 1980.
29. GOST 5950-73, 1973.
30. HANSEN, J.S. In Erosion: Prevention and Useful Applications, Adler, W. F., ed., ASTM STP 664, p, 148–162. 1979.
31. HAWK, J. A. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, Wear abrasive, nº 225-229, p.1031-1042, 1999.
32. HOPPERT, S. Alumina ceramics: superior materials for protection against wear and corrosion. Alemania: Siegburg, p.3 – 11, 1989.
33. HUTCHINGS, I.M. Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals, Wear, p.393 – 427, 1979.
34. HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
35. KLEIS, I. Grundlagen der Werkstoffauswahl bei der Bekämpfung des Strahlverschleisses, Zeitschrift für Werkstofftech. Vol. 15, pp. 49-58, 1984.
36. LEVY, A.V. AND S. JAHANMIR. The Effects of the Microstructure of Ductile Alloys on Solid Particle Erosion Behavior, in Corrosion-Erosion Behavior of Materials, TMS-AIME, p, 177-189,1980.
37. LEVY, A.V. The Solid Particle Erosion Behavior of Steel as a Function of Microstructure, Wear, Vol. 68, pp. 269-287, 1981.
38. LINCOLN ELECTRIC COMPANY. The Procedure Handbook of Arc Welding, Cleveland, Ohio, 2000.
39. LOSVING-RUGA, P.S. La arcilla, 2005.
40. MARQUES, C.M. Relação entre microestrutura e desgaste erosivo a frio e a quente em materiais cerâmicos à base de alumina. 2006. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, UFRGS, 2006.
41. MARTÍNEZ PRIETO, F., MARTÍNEZ ESCANAVERINO, F. Teoría y Práctica del rozamiento, Editorial CUJAE, 243 p., 1997.

42. MAZEL, Y.A. Development of high-productivity high-alloyed electrodes. *Welding International*, Vol 20, No 11, pp. 913-917, 2006.
43. MÉNDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. Penetration and defect formation in high-current arc welding, *Welding Journal*, No 10, pp.296s-305s, 2003.
44. MESA, D.H., MEJIA, E., GARCIA, J. Construcción de dispositivo para evaluar la resistencia al desgaste erosivo en seco de materiales. *Scientia et Technica Año X*, No 26, UTP. ISSN 0122-1701. Diciembre 2004.
45. MONSALVE, H. I.; MENA HERRERA, D. A.; GIRALDO BARRADA, J. E., Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura. *Dyna*, Año71, Nro. 144, pp.151-163. Medellín, Noviembre de 2004.
46. OCHOA, A., MACIAS, R.I. Aspectos teóricos sobre el desgaste abrasivo en los elementos de trabajo de las máquinas agrícolas en Cuba. 2006.
47. QUINBAO WAN; XIAOYAN LI. Effects of Nb, V, and W, on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Supplement to the welding journal*, p, 133-139. July, 2010.
48. REHFELDT, D., BOLLMAN, A., Comparing Investigations of Covered Electrodes of Different Fabrications by Statistical Process Analysis'. *IIW Document*, 212-677, 1987.
49. SALIK, J. AND BUCKLEY, D.H. Effects of Erodent Particle Shape and Various Heat Treatments on Erosion Resistance of Plain Carbon Steels, Technical Paper 1755, National Aeronautics and Space Administration, 1981.
50. SAPATEA, S.G., RAMARAO, A.V. Erosive wear behavior of weld hardfacing high chromium cast irons: effect of erodent particles. *Tribology International* 39, p 206–212, 2006.
51. SARGENT, G.A., AND SAIGAL, D. Erosion of Low-Carbon Steel by Coal Particles, *ASLE Transactions*, Vol. 29, p, 256-266. 1986.
52. SARGENT, G.A., KESHAVAN, M.K., MEHROTRA, P.K. AND H. CONRAD, H. The Erosion of Plain Carbon Steels by Ash Particles From a Coal Gasifier, *Proceedings of International Conference on Wear of Materials*, American Society of Mechanical Engineers, p, 613-618. 1981.
53. SCANDIAN, C., BOHER, C., DE MELLO, J.D.B., RÉZAIĀ-ARIA, F. Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear, *Wear* 267, p, 401–408, 2009.

54. SHAH, S.M., VERHOEVEN, J.D., BAHADUR, S. Erosion Behavior of High Silicon Bainitic Structures, I: Austempered Ductile Cast Iron, *Wear*, Vol. 113, pp. 267-278, 1986.
55. SHARMA, B.C. Process Stability Evaluation of Basic Coated Manual Metal Arc Welding Electrodes. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, Vol 86 , March 2006
56. SIMONEAU, R. A New Class of High Strain-Hardening Austenitic Stainless Steels to Fight Cavitation Erosion, *Proceedings of the 13th IAHR Symposium, Montreal*, p, 83.1 - 83.20, 1986.
57. SOUZA, M.S., GADOTTI, I., SCOTTI, A. Um Banco de Ensaio para Avaliar Eletrodos Revestidos, XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM - II Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica – CIDIM, Belo Horizonte, MG, Dez 1995.
58. STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. *Engineering tribology*, p, 484-667, 1998.
59. STEVENSON, A.N.J., I.M. HUTCHINGS, I.M. Wear of hardfacing white cast irons by solid particle erosion. *Wear* 186-187, p, 150-158, 1995.
60. TAKIMI, A.S., VILLANOVA, D.S., VICENZI, J. Revestimentos protetores aplicados por hvof: estudo comparativo da resistência à erosão a quente por cinzas de carvão mineral. *INFOMET*, 01 nov. 2003.
61. THEISEN, W. Hartphasen, in *Hartlegierungen und Hartverbundstoffe*, Hrs Hans Berns. Springer-Verlag Berlin, S. 28, 1998.
62. W. ZHU; Z.Y. MAO. Study of Erosion by Relatively Soft Particles, *Proceedings of International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers*, p 787-796, 1987.
63. WHEELER, D.W., WOOD, R.J.K. Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves. *Wear* 258, p. 526-536, 2005. *ASTM G40-92, Annual Book of ASTM Standards, Vol.3, 02*, p.160, 1992.
64. ZUM GAHR, K.H. *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam; Elsevier; 1987.

