

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIMI**  
Facultad de  
Ingeniería Mecánica  
e Industrial

## Centro de Investigación de Soldadura

### TRABAJO DE DIPLOMA

**Título:** Efecto de la composición del fundente obtenido con escoria de acería y ceniza de cascarilla del arroz sobre la microestructura y propiedades del metal depositado

**Autor:** Miguel A. Castro Espinosa

**Tutores:** Dr. Amado Cruz Crespo

MSc. Enrique Velásquez Pérez

MSc. Rodolfo Najarro Quintero

**Consultante:** Ing. Geannys Almeida Espinosa

Santa Clara, julio 2019  
Copyright©UCLV

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIMI**  
Facultad de  
Ingeniería Mecánica  
e Industrial

## Welding Research Center

### DIPLOMA THESIS

**Title:** Effect of the composition of the flux obtained with steel slag and rice husk ash on the microstructure and properties of the deposited metal.

**Author:** Miguel A. Castro Espinosa

**Thesis Director:** Dr. Amado Cruz Crespo

MSc. Enrique Velásquez Pérez

MSc. Rodolfo Najarro Quintero

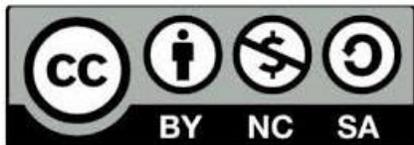
**Consultante:** Ing. Geannys Almeida Espinosa

Santa Clara, julio 2019  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

*Dedicatoria:*

*A mi familia, en especial a mi madre.*

## *Agradecimientos:*

*A mi familia, apoyo moral que me sostiene.*

*A mis tutores, por su apoyo incondicional y horas de dedicación*

*Al colectivo del CIS y mis compañeros de estudio por el apoyo brindado.*

*A todos aquellos que hicieron posible la realización de este trabajo.*

*Gracias*

## Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio acerca del efecto de la composición del fundente obtenido con escoria de acería y ceniza de cascarilla del arroz sobre la microestructura y propiedades del metal depositado. Dicho estudio parte de un diseño experimental del tipo Mc Lean Anderson donde las variables de entrada son: la matriz (X1), el grafito (X2) y el FeMnCr (X3). Fueron extraídas y preparadas muestras para macrografía, metalografía y ensayos de desgaste. A partir de las macrografías fueron determinados los parámetros geométricos de los depósitos, correspondientes a cada condición experimental. En base a la dilución fue determinada la composición del depósito de cordón sobre chapa. De cada depósito fueron obtenidas imágenes de la microestructura en la parte superior del cordón por microscopía óptica. También fue obtenida la imagen de microscopía de barrido de la muestra de mayor microdureza de la martensita y del depósito del fundente “MF-30/USH-600”, usado como referencia. Fue determinada la microdureza del constituyente duro; así como la dureza Vickers. Para la determinación del desgaste de los depósitos fue fabricada una bomba peristáltica para la regulación del goteo de la suspensión abrasiva en el ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre. La validación de la bomba fue realizada en base al comportamiento del desgaste en función del tiempo de ensayo en un acero AISI 1020. Los ensayos comparativos de desgaste de los depósitos se realizaron, utilizando el fundente “MF-30/USH-600” como referencia. Del procesamiento de los datos con el software Statgraphisc se obtuvieron las tendencias de comportamiento, en función de las variables de composición del fundente, de los elementos del depósito diluido, de la microdureza del constituyente duro, de la dureza y del desgaste. Se concluye que el mejor desempeño corresponde al depósito de la condición experimental “A”, mostrando una resistencia al desgaste similar al del fundente “MF-30/USH-600”.

## Summary

In the present work a study is made about the effect of the composition of the flux obtained with steel slag and rice husk ash on the microstructure and properties of the deposited metal. This study is based on an experimental Mc Lean Anderson design where the input variables are: the matrix (X1), the graphite (X2) and the FeMnCr (X3). Samples were extracted and prepared for macrography, metallography and wear tests. From the macrographs, the geometric parameters of the deposits were determined, corresponding to each experimental condition. Based on the dilution the composition of the weld deposit on sheet metal was determined. From each deposit, images of the microstructure in the upper part of the weld were obtained by optical microscopy. The scanning microscopy image of the sample with the highest microhardness of the martensite and the deposit of the flux "MF-30 / USH-600", used as reference, was also obtained. The micro hardness of the hard constituent was determined; as well as the Vickers hardness. To determine the wear of the deposits, a peristaltic pump was manufactured to regulate the drip of the abrasive suspension in the microabrasive test with free rotating sphere. The validation of the pump was carried out based on the wear behavior as a function of the test time in an AISI 1020 steel. The comparative tests of wear of the deposits were made, using the flux "MF-30 / USH-600" as reference. From the processing of the data with the Statgraphisc software, the behavior tendencies were obtained, according to the composition variables of the flux, the elements of the diluted deposit, the micro hardness of the hard constituent, the hardness and the wear. It is concluded that the best performance corresponds to the deposit of the experimental condition "A", showing a wear resistance similar to that of the flux "MF-30 / USH-600".

## Índice

<b>1. Introducción</b> .....	1
Capítulo I. Fundamentación teórica.....	5
1.1 Proceso de recargue por arco sumergido.....	5
1.1.1 Fundamentos del proceso.....	5
1.1.2 Aplicaciones.....	6
1.1.3 Desventajas.....	7
1.1.4 Ventajas.....	8
1.2 Clasificación de los fundentes.....	8
1.2.1 Clasificación según el método de obtención.....	9
1.2.2 Clasificación por composición química.....	9
1.2.3 Clasificación según el uso.....	10
1.3 Propiedades de los fundentes.....	10
1.3.1 Influencia del fundente sobre la estabilidad del arco.....	10
1.3.2 Propiedades tecnológicas de los fundentes.....	11
1.4 Influencia de los elementos de aleación en los aceros.....	11
1.5 Aceros al de alto carbono y baja aleación.....	14
1.6 Generalidades sobre el desgaste.....	15
1.6.1 Desgaste abrasivo.....	15
1.6.2 Desgaste abrasivo en tres cuerpos.....	17
1.6.3 Influencia del tamaño de las partículas en el desgaste abrasivo.....	17
1.6.4 Influencia de las propiedades de los materiales en el desgaste abrasivo.....	17
1.6.5 Influencia de los efectos ambientales en el desgaste abrasivo.....	19
1.7 Ensayos de desgaste abrasivo.....	19
1.7.1 Ensayo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa.....	21
Capítulo II. Materiales y métodos.....	24

2.1 Planificación experimental para el trabajo de diploma .....	24
2.2 Caracterización metalográfica y geometría de los depósitos.....	24
2.3 Determinación de microdureza y dureza de los depósitos.....	26
2.4 Fabricación de una bomba peristáltica para regulación del goteo en el ensayo de desgaste microabrasivo.....	27
2.5 Realización de ensayos de desgaste.....	29
Capítulo III. Resultados y análisis .....	32
3.1 Macrografía de los depósitos.....	32
3.2 Microestructura de los depósitos .....	35
3.2.1 Composición química y microestructura de los depósitos.....	35
3.2.2 Microdureza del constituyente duro de los depósitos.....	44
3.3 Dureza de los depósitos .....	49
3.4 Comportamiento al desgaste de los depósitos .....	52
3.5 Valoración del impacto económico, ambiental y social .....	54
Conclusiones.....	58
Recomendaciones.....	59
Bibliografía: .....	60

## 1. Introducción

Los procesos siderúrgicos son grandes generadores de escorias. En el proceso de altos hornos está estipulado en el propio diseño y montaje de la planta concebir las escorias como materias primas para otros procesos ingenieriles. Dada la versatilidad de estos materiales en cuanto a posibles aplicaciones y a las especificidades propias de los procesos en dependencia de las marcas de acero que se produzcan y de los hornos que se empleen. Son muchos los investigadores que abordan temas relacionados con las posibles aplicaciones de las escorias de acería. Algunas de las aplicaciones más comunes son el atrapado de CO<sub>2</sub> y la desulfuración de gases, en la construcción de carreteras, como aditivo en el concreto y en la producción de cemento. De todas las aplicaciones, la más frecuentes se relacionan al empleo en materiales de construcción civil (Huang, 2012). En el caso particular de la producción de acero en horno de arco eléctrico, las escorias pueden ser de dos tipos oxidantes y reductoras (también se conocen como negras y blancas). Según plantea Boza, (2011), esta nomenclatura se debe a las dos etapas del proceso: fusión (marcha oxidante) y afino (marcha reductora), La escoria negra, se obtiene en la primera etapa del proceso y está compuesta principalmente por óxido de hierro, calcio, silicio y aluminio. La trituración de estas escorias es un proceso muy engorroso. Por otra parte la escoria blanca generada en el proceso de afino es mucho menor en volumen y se caracteriza por tener menor cantidad de hierro y por poseer una cantidad alta de finos a causa del fenómeno de pulverización del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria.

Las escorias blancas hasta el presente encuentran su mayor utilidad en el proceso de elaboración del cemento, aunque de acuerdo con Méndez (2011), presenta desventajas con respecto a las escorias negras por el poco contenido de hierro que poseen, no obstante, hay experiencias industriales prolongadas de reciclado de la escoria de cuchara (escorias blancas) dentro del propio proceso de obtención del acero en Horno de Arco Eléctrico. Uno de estos proyectos es el de Ferriere Nord, Osoppo, Italia, que está en marcha desde el año 2001. En la planta se mezclan materiales refractarios usados y la escoria de cuchara. Una experiencia similar ha sido llevada a cabo a partir de 2005, en otra acería eléctrica italiana, la planta Ospitaletto de Stefana

SpA. Al igual que muchas empresas siderúrgicas en el mundo, en Cuba (Antillana de Acero y ACINOX Tunas), convierten las escorias en residuos sólidos, los cuales no tienen un destino útil. En el caso de Cuba se han llevado a cabo varias investigaciones sobre las escorias de acerías con el fin de darles un uso sobre todo tecnológico, aunque no se ha sistematizado ninguna aplicación concreta según plantea Zaragoza et al, (2000) y Suwardjo et al, (2005), el primero de los citados, refiere el empleo de las escorias como árido en la fabricación de bloques para la construcción y de fertilizante, respectivamente, sin hacer diferencias entre las escorias negras y blancas.

El estudio de la obtención de nuevos materiales ha sido un tema investigado por más de 15 años en el Centro de Investigaciones de Soldadura de la Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas, donde se han desarrollado, una estrategia encaminada al estudio de las potencialidades que brindan algunas reservas de minerales disponibles en el país. Muestra de ello lo constituye la obtención de fundentes para la soldadura por arco sumergido (SAW) con el objetivo de cubrir, en determinada medida, la demanda nacional de estos materiales. Esta institución ha desarrollado varios prototipos de fundentes dentro de los que se destaca uno específicamente, tipo fundido: el CIS F10 de acuerdo a Quintana et al, (2004), aplicable en aceros al carbono y a los de baja aleación, este se usa como consumible para ser utilizado en la soldadura por arco sumergido. También se encuentran otros dos fundentes aglomerados aleados, los cuales se destinan a la recuperación de piezas sometidas al mecanismo de desgaste con ligero impacto: el primero, denominado UCLV-2 obtenido por sintetización según Portal (1994); y el segundo, obtenido a partir de los productos de la reducción de cromitas refractarias designado al recargue superficial de piezas (Quintana et al 2002).

En Cuba se reporta el empleo de escorias de soldadura SAW del sistema  $MnO-SiO_2$  en la obtención de un fundente aglomerado para el recargue superficial de acuerdo con Cruz et al (2005). Por su parte Jerez (2006) estudia las escorias de hornos de cubilote con el fin de obtener la matriz de un fundente de recargue para Soldadura Automática por Arco Sumergido, estas escorias presentan un alto contenido de hierro en forma de óxidos y azufre, razón por la cual realizar un proceso previo de fusión reductora, lo cual

encarece y complejiza la obtención del fundente. Otra dificultad que presentan estas las escorias de horno de cubilote es que se pulverizan espontáneamente, precisando de un proceso de molienda y tamizado.

Dadas las ventajas de las escorias blancas de la producción de acero en Horno de Cuchara, con respecto a las escorias de otros procesos, en cuanto a composición química y física y la facilidad de molienda, se consideran ideales para el desarrollo de fundentes para recargue por soldadura con proceso SAW. La fabricación de fundentes aglomerados se podría llevar a cabo dentro de estas mismas empresas siderúrgicas y así se podrían cubrir las necesidades de dicha empresa, en cuanto a este tipo de fundente, la existencia en estas empresas de laboratorios con (tamizadora, molino, mezclador, estufa) y la sencillez requerida para la elaboración de estos fundentes hacen que no se requieran de grandes inversiones. La cantidad de escoria que se utilizaría para la elaboración de fundentes sería mínimo en comparación con la cantidad que se genera, por lo cual serían válidas otras propuestas de reutilización de estas escorias.

Por otra parte, en la Agroindustria del Arroz la generación de la cáscara como residual de la limpieza de los granos en los molinos es otro caso de proceso en el cual se genera gran cantidad de residuos que se desecha del cual la ceniza de la combustión es rica en  $\text{SiO}_2$ .

Dadas las propiedades de las escorias de afino del acero y de las cenizas de cascarilla del arroz, estas pueden ser empleadas en la matriz de un fundente de recargue. Evidentemente para lograr las propiedades deseadas del metal depositado, resistencia a la abrasión en este caso, debe ser adicionado un sistema de aleación que garantice la microestructura apropiada para tal desempeño del depósito.

### **Objetivo General:**

Establecer el efecto de la composición del fundente para recargue obtenido con escoria de acería y cenizas de cascarilla del arroz sobre la microestructura y propiedades del metal depositado.

**Objetivos específicos:**

- Establecer los vínculos de la composición del fundente para recargue obtenido con escoria de acería sobre la microestructura, la dureza y la resistencia al desgaste.
- Fabricar una bomba peristáltica para la regulación del goteo en el ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa.

**Hipótesis:**

Es posible establecer el efecto de la composición del fundente para recargue, obtenido con escoria de acería y ceniza de paja de arroz, sobre la microestructura y propiedades (dureza y resistencia al desgaste) del metal depositado, a partir de la caracterización microestructural y la realización de ensayos de dureza y desgaste de los depósitos.

**Aporte:**

Fue establecida la relación cuantitativa de la composición de los fundentes, obtenidos con empleo de escorias del proceso de afino del acero y ceniza de cascarilla de arroz, sobre las propiedades del metal depositado (Dureza y desgaste).

Fue fabricada una bomba peristáltica para la regulación del goteo en el ensayo de desgaste microabrasivo con esfera rotativa.

**Tareas:**

1. Revisión bibliográfica para la fundamentación teórica del trabajo de diploma.
2. Planificación experimental para la realización de la caracterización de los depósitos.
3. Caracterización metalográfica de los depósitos.
4. Determinación de micro dureza y dureza.
5. Fabricación de una bomba peristáltica para regular el goteo de la suspensión abrasiva en el ensayo de desgaste.
6. Determinación de la resistencia al desgaste.
7. Procesamiento y análisis de resultados experimentales.
8. Escritura del informe del trabajo de diploma.

## **Capítulo I. Fundamentación teórica**

### **1.1 Proceso de recargue por arco sumergido**

#### **1.1.1 Fundamentos del proceso**

La soldadura por arco sumergido produce la unión de los metales mediante el calor aportado por un arco eléctrico que surge entre un electrodo metálico desnudo que se alimenta continuamente de forma automatizada y el metal base. Tanto el arco como el metal fundido se encuentran sumergidos en una capa de fundente fusible granular. El metal de aporte se obtiene a partir de la fusión del propio electrodo desnudo, cuyas gotas se transfieren a través del arco, y en ocasiones a partir de una fuente adicional como una varilla o polvo metálico (AWS, 1991).

El proceso SAW, es de producción versátil que permite soldar con corrientes de hasta 2000 A con CA o CC, empleando uno o varios alambres o cintas de metal de aporte. Es posible usar fuentes de potencia de CA y CC en la misma soldadura simultáneamente. No se aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar o polvos metálicos (Yasser, 2002).

Se puede aplicar de tres modos diferentes: semiautomático, mecanizado y automático. El método semiautomático utiliza una pistola de soldar, manipulada manualmente que se encarga de alimentar el alambre y el fundente. La velocidad de avance puede darse de forma manual o mediante un pequeño motor montado en dicha pistola. Este método no se utiliza frecuentemente.

El método mecanizado emplea un equipamiento (tractor de soldadura con mecanismo de alimentación del alambre, mecanismo de avance y panel de control) que realiza la operación de soldadura completa, pero debe ser monitoreado por un operario que posiciona la pieza, inicia y detiene la soldadura y ajusta los controles.

El método automático utiliza un equipamiento que realiza la soldadura sin requerir un operario que ajuste los controles y continuamente monitoree la operación. Este equipamiento más costoso se puede justificar para garantizar una productividad mucho mayor.

En la figura 1.1 se muestra el esquema general de los componentes del depósito mediante el proceso SAW y en la figura 1.2 el esquema del recargue de una pieza cilíndrica.

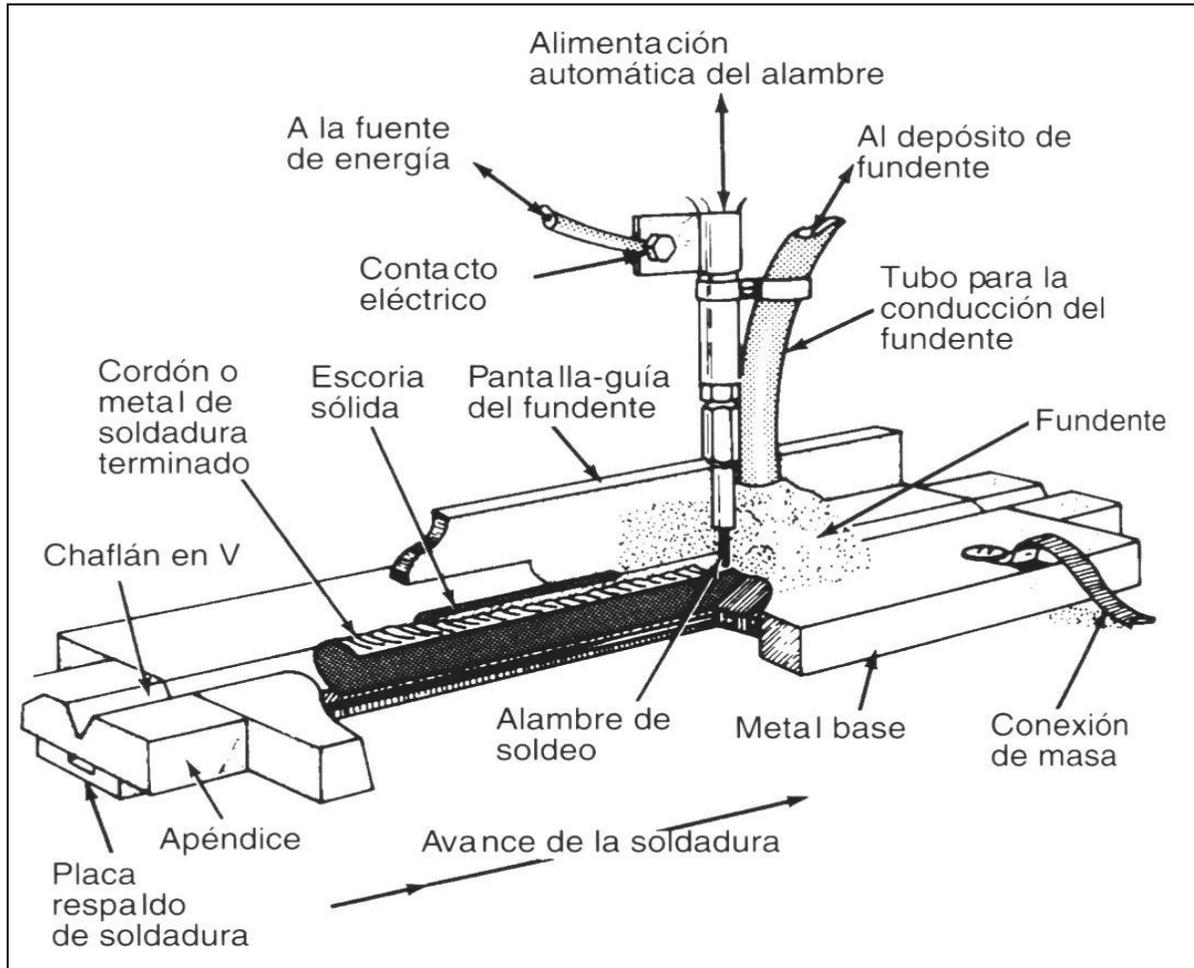


Figura 1.1: Esquema general del depósito mediante el proceso SAW

### 1.1.2 Aplicaciones

El proceso SAW se emplea fundamentalmente para soldar aceros de bajo y medio carbono, aceros de baja aleación, diversos tipos de aceros inoxidables y aleaciones base níquel. En cuanto el rango de espesores, se pueden soldar metales de 1,5 mm de espesor en adelante, aunque sus aplicaciones básicas son en la soldadura de grandes espesores (más de 20 - 25 mm). Se aplica generalmente a costuras rectas o circunferenciales de longitud apreciable (AWS, 1991).

Este proceso también presenta gran aplicación en la reconstrucción y el recargue de piezas cilíndricas, donde, contrario a la soldadura de unión, se precisa de depósitos con mínima penetración y máxima altura posible del refuerzo (recargue), lo que se consigue con la adecuada selección del régimen (tensión del arco, intensidad de corriente y velocidad de soldadura) (Cruz et al, 2007).

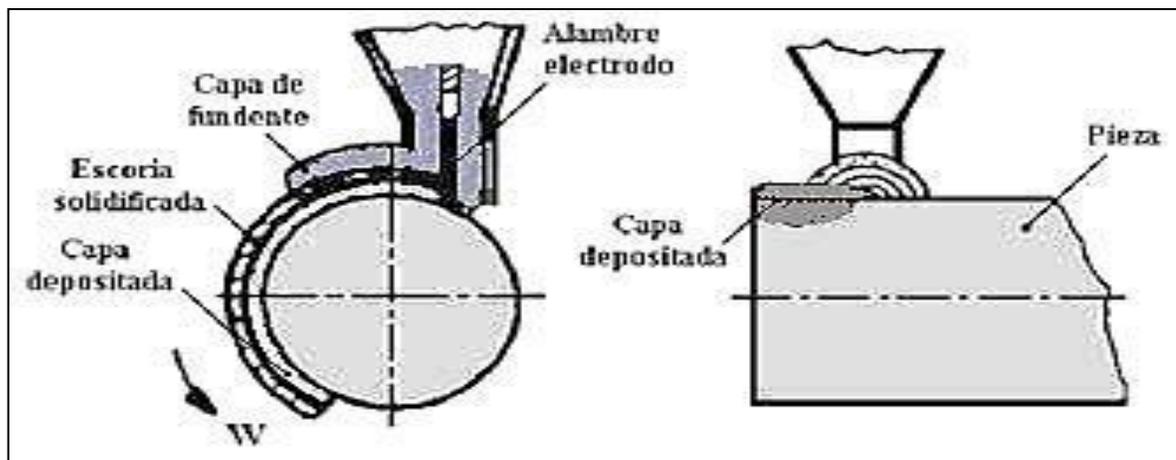


Figura 1.2. Esquema del recargue en una pieza cilíndrica

### 1.1.3 Desventajas

1. Puede emplearse solo en la soldadura en posición plana y horizontal de filete, para evitar que se derrame el fundente, la escoria y el metal del baño en estado líquido.
2. Se emplea básicamente en la soldadura de aceros.
3. Requiere un dispositivo para el almacenaje, alimentación y recogida del fundente.
4. Suele ser necesario el empleo de respaldo, para facilitar la realización de la pasada de raíz. En las variantes mecanizada y automática se requiere un cuidadoso control de la geometría de la unión para garantizar una costura de calidad.
5. Al final de cada pase es necesario eliminar la escoria solidificada.
6. El fundente está sujeto a contaminaciones que pueden producir defectos en la soldadura.

7. Generalmente no es un proceso adecuado para unir metales de pequeño espesor.
8. El alto aporte térmico y las lentas velocidades de enfriamiento del metal pueden ser un problema cuando se sueldan los aceros templados y revenidos.

#### **1.1.4 Ventajas**

1. Elevada calidad del metal depositado, ya que el fundente actúa como purificador y desoxidante del baño. Se puede producir un metal depositado de bajo hidrógeno.
2. Las uniones se pueden realizar con biseles poco profundos o en ocasiones sin bisel, con un consiguiente ahorro de metal de aporte.
3. Razones de depósito y velocidades de soldeo extremadamente elevadas.
4. Produce costuras con un buen acabado superficial y sin salpicaduras.
5. Prácticamente no se produce emisión de humos y gases.
6. El arco no es visible, por lo que la necesidad de protección de la vista del operario es mínima.
7. Mínimas pérdidas del material de aporte.
8. Comparado con el resto de los procesos fundamentales de soldadura por arco es el que presenta un mejor aprovechamiento del calor generado en el arco.
9. Puede emplearse en áreas abiertas ya que el fundente garantiza una protección contra el viento superior a la de procesos como el SMAW y GMAW.
10. Es fácilmente automatizable para elevar el factor operador.
11. Normalmente no requiere una elevada calificación por parte del operario.

#### **1.2 Clasificación de los fundentes**

Según plantea Bravo, (2005) y Cruz et al, (2007), el fundente tiene como objetivo la obtención de un metal depositado con composición química y propiedades mecánicas que cumplan con los requerimientos tecnológicos de la pieza. El mismo debe garantizar un arco estable, evitar la formación de grietas y poros, que se forme una escoria fácil de eliminar, debe dar la menor cantidad posible de desprendimiento de gases y humos; así como un alto grado de desoxidación, aleación. Los fundentes pueden ser

clasificados en grupos según el método de obtención, la composición química, la basicidad, actividad química, aplicación, estructura y dimensiones de los granos.

### **1.2.1 Clasificación según el método de obtención**

Según el método de obtención los fundentes se clasifican en fundidos y aglomerados. Vyslovovzil, (1971) y Gómez (2012) plantean que los fundentes fundidos se sintetizan por fusión de una mezcla creada a partir de diferentes materias primas no metálicas trituradas. La granulometría del fundente se obtiene por choque térmico de la masa fundida vertida como un chorro en un recipiente con refrigerante líquido, el más común es el agua, o a ese chorro de masa fundida se le suministra por un surtidor otro chorro a contracorriente o perpendicular de agua líquida o aire frío. Los granos así obtenidos presentan regularmente una estructura vítrea, amorfa y monolítica, cuya matriz es el mismo fundente y ejerce las mismas funciones metalúrgicas y operacionales para la matriz de los fundentes aglomerados, contribuyendo con un aporte másico más preponderante en un mayor resguardo de la composición química del cordón de soldadura resultante de la contribución de la simbiosis alambre-electrodo metal base y, en mucho menor grado, del fundente.

Los fundentes aglomerados están constituidos por granos, término que indica una forma más regular y una textura más heterogénea, constituida por una matriz que presenta una amplia diversidad de sustancias cristalinas (minerales, sustancias inorgánicas, etc.), amorfas (sustancias orgánicas y aglomerantes) y por una carga de aleación conformada fundamentalmente por ferroaleaciones y metales. Durante el proceso de fusión los componentes formadores de la escoria reaccionan entre sí, con los componentes de la carga de aleación y con el material de aporte convirtiendo el proceso metalúrgico en mucho más complejo y por etapas (Bravo, 2005).

### **1.2.2 Clasificación por composición química**

En dependencia de la composición química de la matriz (base formadora de escoria) los fundentes se clasifican en diferentes sistemas matriciales: de óxidos. de sales y de óxido- sales (Cary 1998).

Los fundentes basados en sistemas de óxidos están constituidos, fundamentalmente, por aquellos óxidos de elementos categorizados como metales y hasta un 10 % de compuestos de fluoruros. Estos son mayoritariamente utilizados en aceros al carbono y de baja aleación. Entre los oxidados los más frecuentes son del sistema de óxidos MnO- SiO<sub>2</sub> según plantea (Cruz et al, 2005).

Los constituidos por el sistema de sales están formados por fluoruros, cloruros de metales alcalinos y alcalinos térreos además de otros compuestos que no contienen oxígeno. Estos son utilizados en la soldadura de metales activos, tales como aluminio, titanio y otros, también en la soldadura por electroescoria. En el caso de los del sistema óxido- sales, están constituidos por fluoruros y óxidos metálicos. Este grupo de fundentes se emplea fundamentalmente en la soldadura y relleno de aceros; aleaciones mediana y alta (Cruz et al, 2004).

### **1.2.3 Clasificación según el uso**

Según la aplicación los fundentes se pueden clasificar: para recargue o para soldadura mecanizada, soldadura por electro escoria y plaqueado. Según plantea (Cruz et al, 2005) esta clasificación es condicional ya que un fundente utilizado para un proceso puede emplearse en otro exitosamente.

Se conocen fundentes de uso general destinados a la soldadura mecanizada y relleno por arco sumergido de aceros al carbono y de baja aleación con alambre de bajo carbono o baja aleación. También se conocen los fundentes especiales para casos particulares de soldadura (ejemplo para electro escoria) y para soldadura de aceros de alta aleación (Cruz et al, 2005).

## **1.3 Propiedades de los fundentes**

### **1.3.1 Influencia del fundente sobre la estabilidad del arco**

La mayor responsabilidad cuando se refiere a la estabilidad de arco, se le confiere al fundente, aunque existen otros elementos que pueden alterar dicha estabilidad.

Según Jerez, (2006) se puede influir sobre la estabilidad de encendido del arco mediante la introducción en el metal de elementos con bajo potencial de ionización, lo

cual casi siempre se logra a través de la composición del fundente, la presencia de fluoruros o haluros en el fundente desempeña un papel negativo, lo cual está condicionado por el arribo a la atmósfera del arco del anión  $F^-$ . Por esto, la concentración del fluoruro de calcio en valores excesivos en fundentes del sistema  $MnO-SiO_2$  ( $>10\% CaF_2$ ), hace decrecer significativamente la longitud del arco (la estabilidad).

### **1.3.2 Propiedades tecnológicas de los fundentes**

Las propiedades tecnológicas de los fundentes no son más que la capacidad de estos de lograr una forma adecuada del cordón en la soldadura, mantener la estabilidad del arco, de formar en la superficie una capa fácil de desprender. Para reflejar dichas propiedades se hace a través de índices cualitativos según plantea Bravo, (2005).

### **1.4 Influencia de los elementos de aleación en los aceros**

Los elementos de aleación se le adicionan al acero en determinadas proporciones con el fin de variar su estructura y propiedades. El manganeso forma una aleación que por encima de un contenido determinado hace que el estado austenita exista como estable desde la temperatura ambiente hasta la de fusión. Los átomos de aleación que se diferencian de los del hierro por sus dimensiones y su estructura, crean en la red tensiones que provocan la variación de su naturaleza. Todos los elementos que se disuelven en la ferrita hacen que varíen los parámetros de la red de ésta en un grado tanto mayor, cuando más se diferencian las dimensiones del átomo de hierro y del elemento de aleación. Los elementos con menor radio atómico que el hierro disminuyen los parámetros y los de radio atómico mayor lo aumentan (excepto el níquel). En la figura 1.4 se muestran la influencia de los elementos de aleación sobre la dureza(a) y la resiliencia(b).

El manganeso eleva considerablemente la dureza mientras que la resiliencia la disminuye. Por otro lado, el cromo aumenta en menor medida la resistencia y disminuye la resiliencia.

El cromo en el hierro hace que el umbral en frío tenga cierta elevación, lo cual no favorece a que dicho material sea resistente en bajas temperaturas figura 1.5.

En los aceros los elementos cromo y manganeso forman carburos, por encontrarse más a la izquierda en la tabla periódica, que el hierro. En los aceros aleados con elementos formadores de carburos (cromo y manganeso) se observan dos máximos de la velocidad de descomposición isotérmica de la austenita separados por una región de gran estabilidad de la austenita subenfriada figura1.6. La curva 1 muestra el comportamiento de un acero al carbono y la curva 2 muestra el comportamiento de un acero aleado con elementos formadores de carburos.

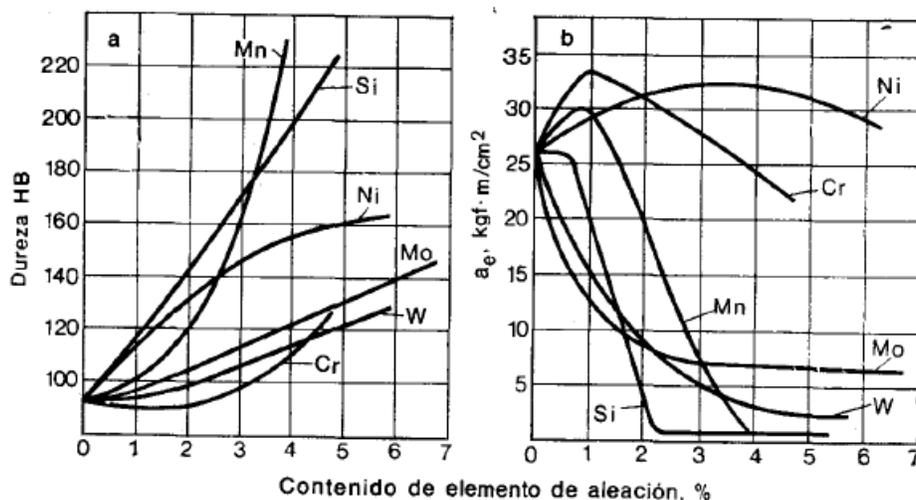


Figura 1.4 Influencia de los elementos de aleación sobre la dureza(a) y la resiliencia(b) (Guliaev, 1983)

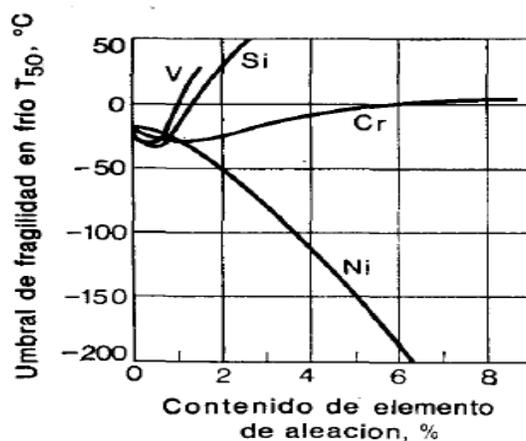


Figura 1.3 Influencia del contenido de aleación sobre el umbral de fragilidad en frío (Guliaev, 1983)

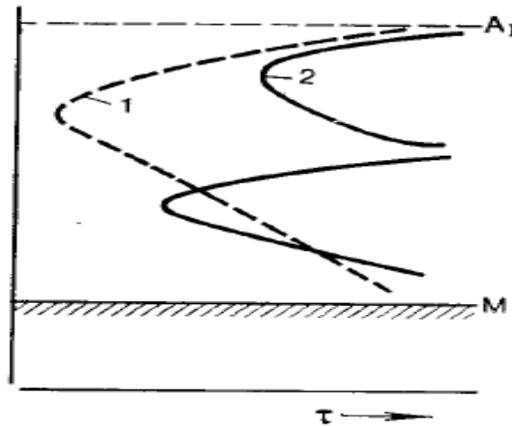


Figura 1.4 Diagrama de descomposición de la austenita (Guliaev, 1983)

La propiedad más importante de los elementos de aleación es la de ser capaces de retardar la velocidad de descomposición de la austenita en la región de la transformación perlítica, lo que se expresa por el desplazamiento de la línea hacia la derecha en el diagrama. Esto contribuye a que la templabilidad sea mayor y al subenfriamiento de la austenita hasta el intervalo de la transformación martensítica, siendo más lento el enfriamiento, por ejemplo, cuando se enfría en aceite o al aire, lo que, naturalmente va ligado a la disminución de la velocidad crítica del temple. La templabilidad del acero puede aumentarse aleándolo con varios elementos a la vez. Con respecto a la valoración del grado relativo de influencia de los diversos elementos en la templabilidad, existen datos que divergen en su expresión cuantitativa. Entre los elementos que más aumentan la templabilidad están el cromo y manganeso.

Los elementos de aleación no influyen en la cinética de la transformación martensítica, la cual, por lo visto, es parecida en todos los aceros. Su influencia se manifiesta en la posición del intervalo de temperaturas de esta transformación y esta a su vez se refleja también en la cantidad de austenita residual que se fija en el acero templado. La mayoría de los elementos hacen que descienda el punto martensítico y que aumente la cantidad de austenita residual (figura 1.7).

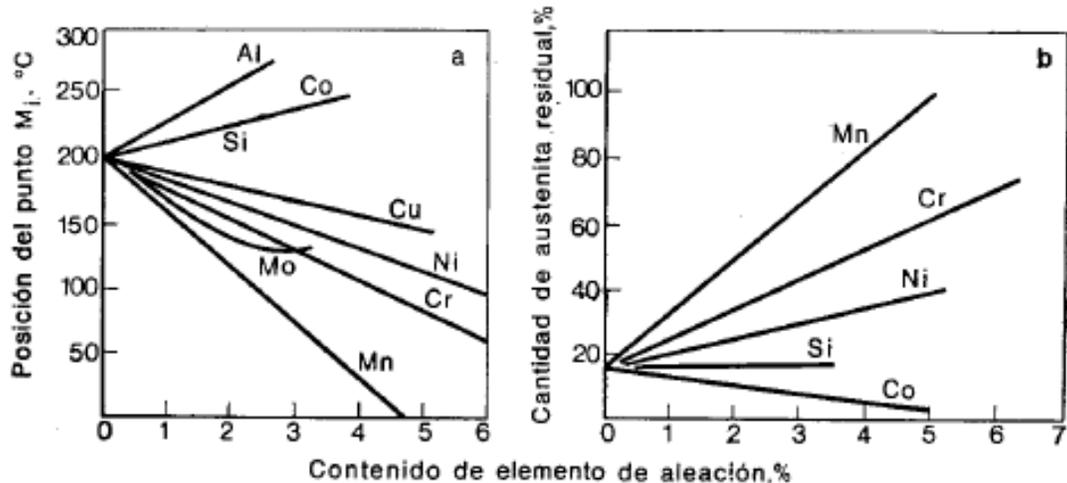


Figura 1.5 Influencia de los elementos de aleación en la temperatura de la formación martensítica (a) y en la cantidad de austenita residual (b) (Guliaev, 1983)

En el diagrama puede verse que para el 5 % de manganeso el punto martensítico baja hasta 0 °C; por consiguiente, con este contenido u otro mayor de este elemento de aleación puede fijarse el estado austenítico por enfriamiento.

### 1.5 Aceros al de alto carbono y baja aleación

De acuerdo con la composición de los aceros que serán estudiados en el presente trabajo (Cendan, 2018), estos se corresponden con aceros de alto carbono y baja aleación, relativamente similares a los aceros de alta templabilidad para herramientas (Guliaev, 1983).

Dichos aceros se clasifican en tres grupos, al grupo I corresponden los aceros aleados para herramientas ordinarias, en los cuales la adición de 1.0 a 1.5% de Cr asegura el aumento de la templabilidad. La adición de silicio proporciona cierto aumento complementario de la templabilidad y eleva la estabilidad al revenido, lo que mejora la capacidad de trabajo de la herramienta.

El grupo II se caracteriza por su contenido elevado de manganeso (siendo normal el contenido de silicio). Esto hace que en el temple aumente la cantidad de austenita residual y disminuya la deformación; por esta razón pueden llamarse aceros poco deformables para herramientas.

Al grupo III corresponden los aceros muy duros, aleados con volframio, lo cual afina mucho la fase de carburo en exceso y eleva por eso la dureza de estos aceros.

Comparando los resultados obtenidos en el trabajo de Cendan, (2018) con las características de los aceros de alta templabilidad, se puede establecer que los depósitos son próximos a los aceros de alta templabilidad para herramientas del grupo II.

### **1.6 Generalidades sobre el desgaste**

El desgaste se manifiesta en diferentes grados, algunas veces puede ser tolerado hasta cierto grado, otras veces es beneficioso inclusive. A pesar de que existen diversos métodos para reducirlo, su presencia representa considerables pérdidas económicas. Algunos autores como Ochoa & Macías, (2006) y Cruz, (2012) los divide entre abrasión, adhesión, corrosivo-mecánico, fatiga superficial, cavitación y erosión.

#### **1.6.1 Desgaste abrasivo**

El desgaste abrasivo es causado por el efecto de partículas o protuberancias duras, las cuales golpean o son forzadas a moverse a lo largo de una superficie sólida ocasionando daño y pérdida progresiva de material según lo establecido en la norma ASTM G40 del 2002. Una vez que el material duro penetra en la superficie, la remoción del material se realiza por uno o varios mecanismos a la vez. En particular, en este proceso de desgaste ocurre como corte, rayado, astillado o rompimiento por fatiga. Las propiedades del material, el tipo de movimiento y la carga tienen marcada influencia durante la remoción del material.

La tasa de desgaste no solo depende del material y sus características superficiales, sino también de la presencia de partículas abrasivas entre las superficies, de la velocidad de contacto y de las condiciones del ambiente. El fenómeno de desgaste por abrasión, se genera por tres procesos: dos cuerpos, tres cuerpos y fractura frágil. El primero, ocurre cuando un material duro se desliza a lo largo de una superficie sólida más blanda. Mientras, que el segundo, se presenta cuando, entre superficies en deslizamiento, existe material abrasivo que se atrapa, mismo que actúa sobre la superficie blanda, causándole daño significativo. En la figura 1.8. se muestra los procesos de dos y tres cuerpos.

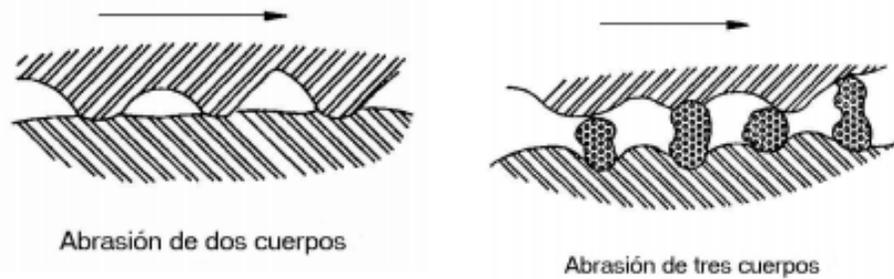


Figura 1.6 Mecanismos de desgaste abrasivo

En el desgaste abrasivo se presentan cuatro procesos: microarado, microcorte, microfátiga y microgrieta. El microarado se debe al paso de una partícula abrasiva que no produce desprendimiento de material de una superficie desgastada, el material desplazado se acumula delante de la partícula formando un surco. La superficie puede ser arada en repetidas ocasiones por las partículas que se encuentran en la superficie produciendo desprendimiento de material, este fenómeno se conoce como microfátiga. Si la partícula abrasiva o aspereza penetra la superficie liberando material de igual volumen que la ranura se presenta el microcorte. Las microgrietas pueden ocurrir por las altas concentraciones de tensión de la superficie frágil cuando se desliza una partícula produciendo desprendimiento de material en la superficie (Zum Gahr & Karl-Heinz, 1987).

El microarado y el microcorte son los fenómenos fundamentales en la mayoría de los metales dúctiles y dependen principalmente del ángulo de ataque de las partículas abrasivas. De acuerdo con los investigadores Mulheram y Sedriks, (1964), el material es liberado de la superficie por microcorte cuando el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) de la partícula erosiva es mayor que un valor crítico. Ese valor crítico del ángulo de ataque es función del material que está siendo desgastado y de las condiciones de ensayo. Experimentalmente  $\alpha$  describe una transición más gradual de microarado o microcorte. Autores como Stroud, (1994), Buttery et al, (1979) y Moore, (1981), discutieron el hecho que solo una parte del surco producido por partículas duras, es removido como partículas de desgaste fuera del material, el resto se localiza en el borde.

### **1.6.2 Desgaste abrasivo en tres cuerpos**

Este tipo de desgaste ocurre cuando entre las superficies deslizantes encuentran o caen partículas abrasivas de tamaño muy pequeño. Son varios los factores de los cuales depende, como la resistencia a la fractura, tamaño de las partículas, dureza y rugosidad de las superficies y el tipo de movimiento presente. La presencia de partículas duras entre dos materiales suaves de deslizamiento, trae el riesgo de que se invierta el tipo de desgaste a desgaste de dos cuerpos, debido a la permanente incrustación de las partículas duras en los materiales suaves. Otras veces, cuando las partículas no son muy duras, o son menos duras que las superficies de deslizamiento, estas solo se incrustan de manera temporal en las superficies. Sin embargo, cuando inicia el giro se liberan y la tasa de desgaste es relativamente menor. Cuando la rugosidad es mayor que el tamaño de las partículas, se ocasiona un desgaste insignificante (Trujano Galicia A 2011).

### **1.6.3 Influencia del tamaño de las partículas en el desgaste abrasivo**

Las partículas abrasivas tienen un tamaño que oscila entre 5 y 50  $\mu\text{m}$  de tamaño. Estudios realizados en laboratorios, muestran el comportamiento de las mismas en el proceso de abrasión y erosión en los metales. Algunos investigadores plantean que para partículas más pequeñas de 100  $\mu\text{m}$ , las tasas de desgaste caen drásticamente. Desde luego que el comportamiento difiere para partículas de diferentes materiales y diferentes metales. En la mayoría de las aplicaciones, el comportamiento observado en estos procesos de desgaste, resulta del reflejo del efecto verdadero del tamaño de la partícula debido al esfuerzo sobre el metal mismo, sobre todo durante experimentos de indentación y rompimiento.

### **1.6.4 Influencia de las propiedades de los materiales en el desgaste abrasivo**

En el proceso de desgaste abrasivo, las propiedades físicas y químicas de los materiales tienen marcada influencia, según lo ilustra la figura 1.9. Algunas de ellas son: dureza, módulo elástico, resistencia de cedencia, temperatura de fusión, estructura cristalina, microestructura y la composición.

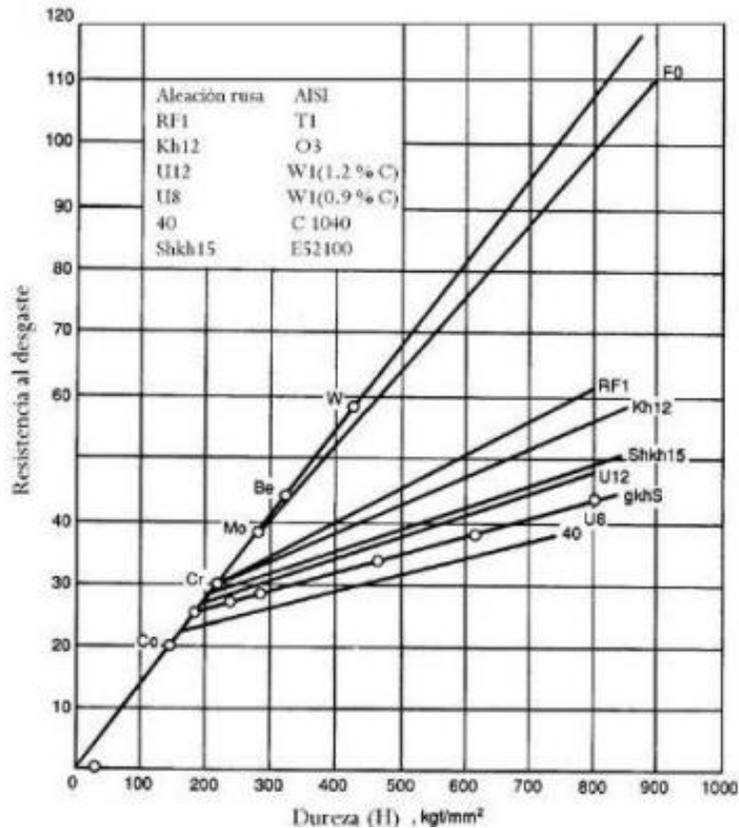


Figura 1.7 Influencia de la dureza sobre la resistencia al desgaste

La orientación y la estructura cristalina también son propiedades determinantes en la forma de presentarse el desgaste abrasivo. En metales con estructura cúbica, el desgaste es dos veces mayor a la tasa de desgaste de los hexagonales. Por otra parte, la microestructura define el grado de desgaste abrasivo que presenta un material, por ejemplo, la austenita y la bainita de igual dureza es mucho más resistente que la ferrita, perlita o martensita.

El uso de aleaciones e intersticios, como la adición de carbono al acero, le proporciona ventajas de resistencia al desgaste abrasivo. La creación de una segunda fase modifica para bien las propiedades del material en cuanto a la dureza y resistencia a la cedencia, como sucede en: precipitaciones o partículas como los carburos.

### **1.6.5 Influencia de los efectos ambientales en el desgaste abrasivo**

Los efectos ambientales actúan directamente sobre el desgaste abrasivo de los materiales incrementando la pérdida de material. A medida que se incrementa la temperatura, la tasa de desgaste se incrementa debido a que decrecen dureza y esfuerzo de cedencia. Por ejemplo, en el caso del aluminio y el cobre, cuando la temperatura se eleva desde el ambiente hasta 673 °K se observa un pequeño incremento en su tasa de desgaste, sobre todo debido a que, durante la abrasión, pequeñas áreas son calentadas adiabáticamente. El aumento de la velocidad de 0 a 2.5 m/s incrementa significativamente la tasa de desgaste abrasivo, se puede considerar que posiblemente se deba al aumento de temperatura, ocasionado por el calor de fricción.

Se sabe que el desgaste abrasivo es proporcional a la carga aplicada, siempre que no se rebase el valor y llegue a fracturar las partículas abrasivas. Cuando ocurre lo anterior, se generan nuevas partículas cortantes, mismas que incrementan el desgaste abrasivo.

La humedad y los gases corrosivos existentes en el medio ambiente tienen una influencia marcada sobre el desgaste abrasivo. En los sitios de trabajo de las máquinas o durante las pruebas de desgaste, se debe de contar con atmósferas limpias y de preferencia con valores de pH pequeños. La abrasión crea constantemente superficies nuevas que se corroen rápidamente e inmediatamente después, dichas capas se remueven por la acción de la abrasión.

### **1.7 Ensayos de desgaste abrasivo**

Según refiere uno de los primeros ensayos de abrasión fue realizado por Mikhail Lomonosov, miembro de la Academia Científica de Moscú entre 1745 y 1765, con el objetivo de estudiar la abrasión en los metales, minerales y vidrios (Cámara, 2006). Básicamente, su equipamiento era formado por un disco de diámetro fijo de 460 mm, con una manivela. La aplicación de la fuerza normal sobre los cuerpos de prueba era realizada a través de un sistema de pesos muertos. Este ensayo sufre algunas modificaciones por Brinell en cuanto al material del disco y el tipo de partículas

abrasivas, aunque el principio del método fue el mismo. A partir de ahí han seguido evolucionando hasta la actualidad y numerosos tipos de ensayo para aplicaciones de estudio específicas se han ido desarrollando, algunos de ellos normados por instituciones especializadas en la materia, como la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM), y otros que no han sido normados, pero se utilizan avalados por su factibilidad referida al estudio de los diferentes tipos de desgaste.

Según se plantea en la norma ASTM G 65 del año 2000, el volumen de desgaste en cualquier sistema de ensayo dependerá, en general, de un número de factores tales como carga aplicada, característica de la máquina de ensayo, velocidad de deslizamiento, ambiente que rodea el sistema y las propiedades de los materiales.

Existen varios métodos normados para determinar la razón de desgaste de un material, por ejemplo. Método de prueba para la medición de la resistencia a la abrasión usando un aparato “rueda de goma/arena seca”, establecido en norma ASTM G 65-00

Su sistema básico de funcionamiento se muestra en la figura 1.10.

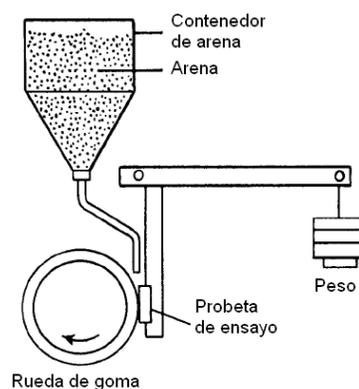


Figura 1.8 Método ensayo de abrasión con espiga establecido en la norma ASTM G 132-96

El esquema de funcionamiento se muestra en la figura 1.11

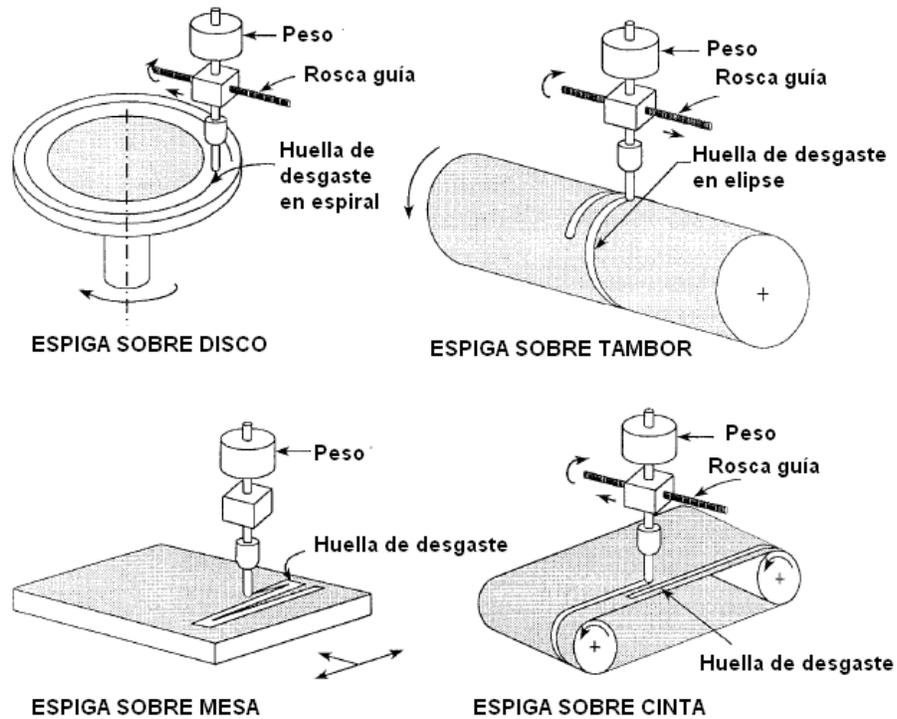


Figura 1.9 Método de ensayo para la medición de resistencia a la abrasión mediante contacto lazo-abrasivo

### 1.7.1 Ensayo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa

Este es un ensayo bastante difundido en el medio académico, según explica Cámara 2006 y 2013, el cual consiste en generar desgaste en un cuerpo de prueba o probeta de ensayo, mediante una esfera y con la participación de partículas abrasivas. Actualmente, dada la utilidad de este método, es aplicado en investigaciones relacionadas con el desgaste abrasivo de materiales metálicos y no metálicos.

Existen dos configuraciones de equipamientos para el ensayo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa:

- a) máquina de ensayo por esfera rotativa fija.
- b) máquina de ensayo por esfera rotativa libre.

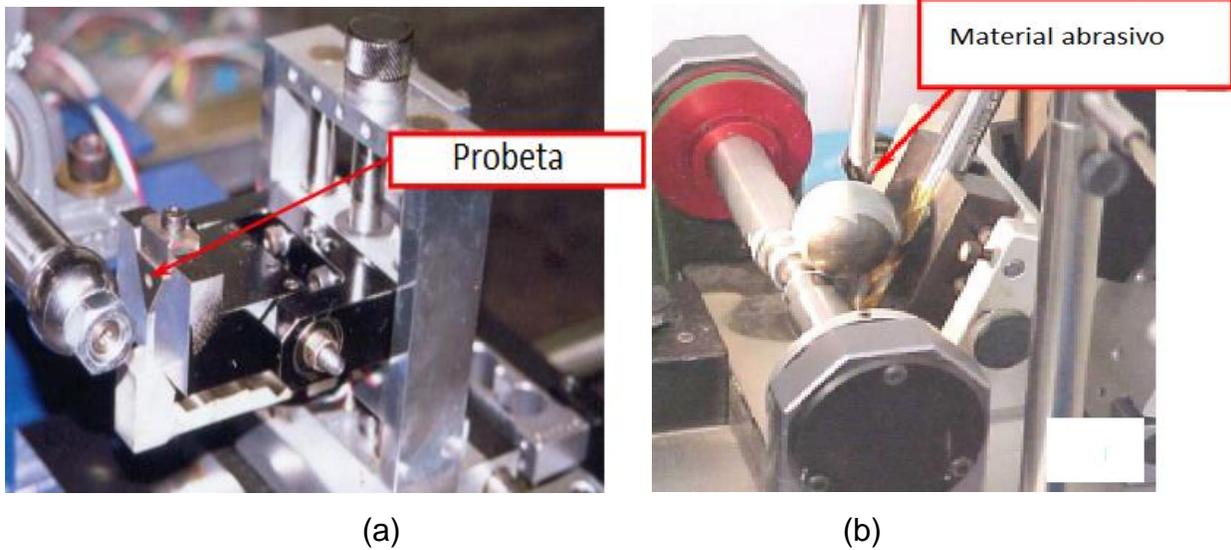


Figura 1.10 Máquina de ensayo de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fija y libre respectivamente

Cuando en ensayo de desgaste micro-abrasivo se realiza con esfera rotativa libre los parámetros de ensayo que pueden ser controlados son:

- Fuerza normal actuante sobre el cuerpo de prueba (es definida por el propio peso de la esfera, dada por la inclinación del cuerpo de prueba con relación al eje del motor)
- Tiempo de deslizamiento entre la esfera y el cuerpo de prueba.
- Concentración de la pasta abrasiva, así como dureza, tamaño y forma de las partículas abrasivas.
- Flujo de pasta abrasiva sobre el cuerpo de prueba y la esfera.

En la figura 1.12 se muestra una imagen tridimensional de un cráter de desgaste formado en una probeta de hierro sinterizado oxidado a vapor, obtenido con este tipo de ensayo.

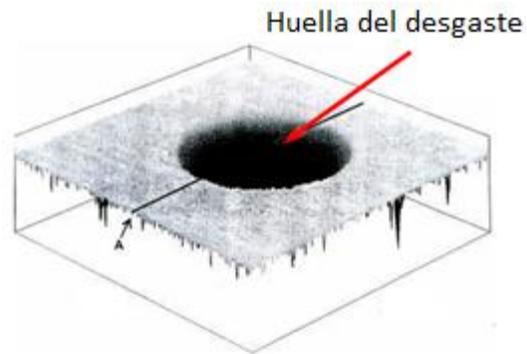


Figura 1.11 Imagen tridimensional de un cráter de desgaste formado mediante el ensayo de esfera rotativa en la superficie de una probeta de ensayo

Dada las características de la probeta de ensayo y las dimensiones del cráter, es posible la realización de múltiples mediciones en una misma probeta, al tiempo que pueden ser realizados perfiles de desgaste para evaluar el efecto de la dilución en depósitos de soldadura.

## Capítulo II. Materiales y métodos

### 2.1 Planificación experimental para el trabajo de diploma

En el presente trabajo se realizará la caracterización metalográfica y determinación de propiedades (dureza desgaste) de depósitos obtenidos en un trabajo previo (Cendan 2018). En dicho trabajo se estableció como matriz experimental de un diseño de experimentos tipo Mc Lean Anderson la que se muestra en la tabla 2.1, donde la matriz ( $X_1$ ), el grafito ( $X_2$ ) y el FeMnCr ( $X_3$ ), son las variables de entrada. La matriz está compuesta por 63 % de escoria de acería, 9 % de Fluorita y 28 % de ceniza de paja de arroz.

Tabla 2.1 Matriz experimental a realizar

Exp	$X_1$	$X_2$	$X_3$
a	88	7	5
b	88	2	10
c	78	2	20
d	78	7	15
ac	88	4.5	7.5
bc	83	2	15
cd	78	4.5	17.5
da	83	7	10
abcd	83	4.5	12.5

Son consideradas como probables variables respuestas las siguientes:

- Dureza de los depósitos
- Microdureza del constituyente duro
- Por ciento de austenita residual
- Área de refuerzo
- Desgaste

### 2.2 Caracterización metalográfica y geometría de los depósitos

Para la obtención de probetas para geometría de los cordones y realización del análisis metalográfico de los depósitos, obtenidos en un trabajo precedente (Cendan, C. 2018).

fueron extraídas muestra mediante cortes transversales en la tronzadora metalográfica del Centro de Investigaciones de Soldadura UCLV. Para el análisis metalográfico fueron preparadas 9 muestras, en correspondencia con el plan experimental de la tabla 1, así como una muestra de referencia del depósito del fundente comercial MF-30/USH-600.

Para el desbaste las muestras fueron montadas en un soporte con el objetivo de evitar el redondeo de los bordes. Esta operación fue realizada de acuerdo con la norma ASTM E3. empezando por una lija número 100 hasta una lija número 1200. Luego del desbaste. las muestras fueron pulidas con suspensión abrasiva de óxido de cromo. siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E3. 2011. Las muestras fueron atacadas con nital al 2 %. en correspondencia con las normas ASTM E340. (2015) y ASTM E407 (1999).

Para la determinación de los parámetros geométricos de los cordones (penetración, altura de refuerzo, ancho, áreas de penetración y de refuerzo), fueron captadas imágenes con una escala de referencia en un microscopio de bajo aumento (figura 2.1) del Laboratorio de Óptica de la UCLV. Las imágenes de las macrografías fueron procesadas con el software ImageJ para la determinación de los parámetros geométricos de los depósitos.



Figura 2.1 Microscopio de bajo aumento

La observación metalográfica y la adquisición de imágenes del centro superior del cordón fue realizada en el Laboratorio de Tribología y Materiales del Centro de Investigaciones de Soldadura de la UCLV, con el empleo de un microscopio óptico metalográfico marca Nobel, con cámara digital acoplada para la adquisición de imagen (Figura 2.2).



Figura 2.2 Microscopio metalográfico

### **2.3 Determinación de microdureza y dureza de los depósitos**

Con el empleo de un Microdurómetro Marca Shimatsu, del Laboratorio de Tribología y Materiales (Figura 2.3), fue determinada la microdureza del centro superior del cordón, región en la cual fueron adquiridas las imágenes de la microestructura. La medición de microdureza fue realizada en correspondencia con la norma ASTM E 384, (2002). La carga usada fue de 50 g por un tiempo de indentación de 10 s, excepto para la muestra “B”, que fue necesario aplicar 25 g porque la huella se salía de los límites de grano del constituyente duro. Para cada muestra fueron realizadas 10 indentaciones. Con vistas a tener una información más representativa del material, que abarque el constituyente duro y la austenita residual interdendrítica, fue también determinada la microdureza, aplicando en este caso una carga de 1000 g durante 10 s.



Figura 2.3 Microdurometro empleado

#### **2.4 Fabricación de una bomba peristáltica para regulación del goteo en el ensayo de desgaste microabrasivo**

La idea de construir una bomba peristáltica surge porque la máquina de ensayo de desgaste microabrasivo del Laboratorio de Tribología y Materiales del CIS, aun no contaba con un sistema para regular el goteo de la suspensión abrasiva durante el ensayo. Este tipo de bomba es de desplazamiento positivo, es decir, tiene una parte de succión y otra de descarga, por lo que es utilizada para bombear una gran variedad de fluidos (Streeter 1999). El fluido es transportado por medio de un tubo flexible (de 3 mm a 25 mm generalmente), colocado dentro de la carcasa circular de la bomba. El mecanismo más común cuenta con varios rodillos. Al ser sucesivamente comprimida la manguera por los rodillos que giran continuamente, obligan a circular el líquido en la dirección de giro. Si bien no es imprescindible, es recomendable colocar la bomba por debajo del nivel del líquido a bombear. Como el resto de sistemas de bombas, las peristálticas pueden generar una diferencia de presión mayor a la salida que la generada en la entrada de líquido.

Para la fabricación de la bomba en las condiciones del Centro de Investigaciones de Soldadura, se partió de la premisa del uso de materiales y elementos en desuso. Para la fabricación de la parte giratoria de la bomba fue usado un rotor de un ventilador

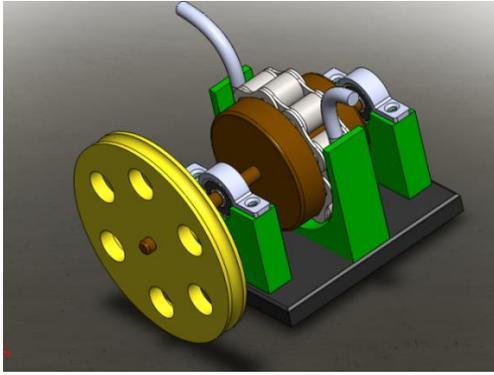
doméstico (Figura 2.4), el cual fue llevado a las dimensiones requeridas por un proceso de maquinado. Al rotor le fue colocada una sección de cadena de motocicleta en su parte exterior, cuyos rodillos giran libremente. El rotor fue montado en pedestales con cojinetes de rodamiento. Por un extremo del eje fue colocada una polea para su acople al motor.

De los componentes de la bomba, los esenciales para el adecuado funcionamiento son, la carcasa, la manguera y los rodillos móviles. A continuación se detalla sobre los mismos:

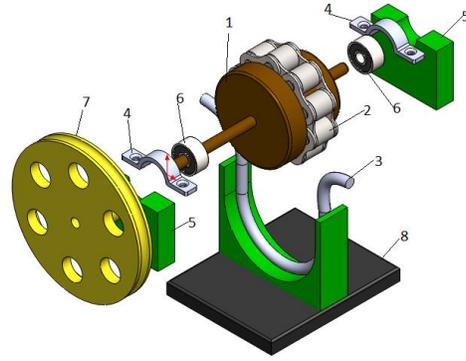
Carcasa o cubierta de la bomba (figura 2.4): Es la parte exterior de la bomba y cumple la función de alojar la manguera que al ser presionada realiza la función de bombeo del fluido. El material de construcción de la misma depende del tipo de función y del fabricante, según las especificaciones de bombeo. En el presente trabajo, la carcasa fue fabricada de una chapa de acero AISI 1020 de 3 mm.

Manguera (figura 2.4): Es un tubo hueco flexible, diseñado para transportar fluidos. Va ubicada dentro de la carcasa y queda presionada por cada vuelta que da el rotor con los rodillos móviles. La manguera a utilizar debe ser resistente a la temperatura de trabajo, a la presión y a la compatibilidad química del fluido a utilizar. Existen algunas opciones, tales como mangueras de caucho látex, manguera de noprène, de vinilo, de teflón, de polietileno, entre otras. En el presente trabajo fue empleada una manguera de caucho latex, que proviene de un equipo de análisis químico por absorción atómica en desuso.

Rodillos móviles (figura 2.4): Se ubican externamente en el rotor de la bomba peristáltica, y son los que ejercen presión para hacer fluir el líquido. La acción de rotación mueve el producto en el interior de la manguera con una velocidad de desplazamiento constante, sin deslizamiento (QuimiNet. 2000).



a)



b)



c)

Figura 2.4 Ensamble y despiece de la bomba peristáltica

a) Ensamble de la bomba; b) Despiece de la bomba; c) Bomba fabricada  
 1- eje. 2- rodillos. 3- manguera. 4- abrazaderas. 5- soporte de rodamientos. 6- rodamientos. 7- polea. 8- base carcasa

## 2.5 Realización de ensayos de desgaste

Previo al estudio de desgaste propiamente dicho, fue realizado un ensayo de validación del comportamiento de la instalación (Figura 2.5) para verificar el desempeño de la bomba peristáltica fabricada. Para ello, fue estudiado el efecto del tiempo de ensayo (de la distancia de recorrido), sobre el desgaste de un acero 1020. Los parámetros empleados en el ensayo de validación fueron:

- Velocidad de rotación de la esfera -  $220 \pm 2$  rpm
- Carga – 0.1 N

- Angulo de la probeta –  $81^\circ$
- Concentración de la suspensión abrasiva (alúmina de  $0,05 \mu\text{m}$  en agua destilada) –  $6,4 \text{ g}/98 \text{ mL}$
- Velocidad de goteo –  $1,3 \text{ mL}/\text{min}$
- Bola de acero de rodamiento de  $25,4 \text{ mm}$  de diámetro

Los ensayos de desgaste de los depósitos experimentales (3 ensayos por depósito) fueron realizados empleando las siguientes condiciones de ensayo:

- Velocidad de rotación de la esfera -  $220 \pm 2 \text{ rpm}$
- Carga –  $0.1 \text{ N}$
- Angulo de la probeta –  $81^\circ$
- Concentración de la suspensión abrasiva (SiC de  $10,6 \mu\text{m}$  en agua destilada) –  $12,8 \text{ g}/98 \text{ mL}$
- Velocidad de goteo –  $1,3 \text{ mL}/\text{min}$
- Bola de acero de rodamiento de  $25,4 \text{ mm}$  de diámetro
- Tiempo de duración del ensayo –  $10 \text{ min}$

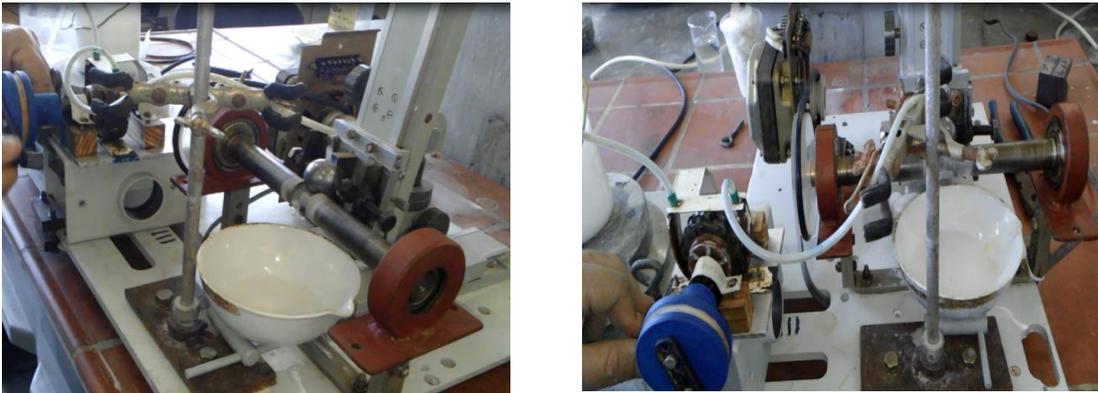


Figura 2.5 Instalación para ensayo de desgaste microabrasivo

Para la realización del ensayo, las probetas fueron desbastadas hasta una lija de 1200. La muestra es colocada en el portamuestras de tal modo que la bola incida sobre el punto de contacto específico que se quiera evaluar. Durante el ensayo, al girar la bola arrastra la suspensión abrasiva que se introduce entre esta y la superficie de la

probeta, provocando el desgaste en el punto de contacto. Luego del ensayo la muestra es lavada. Para la determinación del desgaste, la imagen de la huella es adquirida con un microscopio de bajo aumento, adquiriendo con el mismo aumento una imagen de una escala conocida. En base a las imágenes de las huellas y de la escala de referencia, con el empleo del software ImageJ, es medido el diámetro de la huella y se coloca la barra de escala a cada imagen.

## Capítulo III. Resultados y análisis

### 3.1 Macrografía de los depósitos

En la figura 3.1 se muestran macrografías de los depósitos, obtenidos con los fundentes experimentales correspondientes a la tabla 2.1. En la tabla 3.1 se dan los valores medios de los parámetros geométricos de los depósitos; así como el valor de coeficiente de dilución, calculado en función de las áreas ( $\delta = A_p / (A_p + A_r) * 100$ ;  $\delta$  es el coeficiente de dilución en %,  $A_p$  es el área de penetración en  $\text{mm}^2$  y  $A_r$  es el área de refuerzo en  $\text{mm}^2$ ). Se observa que la dilución muestra variaciones, que se asocian a las diferencias de composición de los fundentes, ya que fueron mantenidos los mismos parámetros de soldadura en la obtención de los depósitos. Al tratarse de fundentes que aportan diferentes composiciones de depósitos sin dilución (Cendan. 2018), carece de sentido un análisis de la dilución. Sin embargo, esta es de gran utilidad, ya que posibilita determinar la composición de los depósitos con una pasada, lo cual será abordado en detalle más adelante.

Como se trata de un proceso de recargue, es deseada la obtención de la mayor área de refuerzo posible, ya que ello significa mayor productividad. En base al plan experimental de la tabla 2.1 y los valores de áreas de refuerzo obtenidas fue realizado el procesamiento estadístico, empleando el software Statgraphics. Dado que el valor-P para ninguno de los posibles modelos es menor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre el área de refuerzo y los componentes de la mezcla del fundente, con un nivel de confianza del 95,0%. La relación sería significativa para el modelo cúbico especial (ecuación (3.1)), si se asume un nivel de confianza del 82,0 %. Para este modelo, se obtuvo un ajuste de  $R^2 = 87,14$  %. En el anexo 3.1 se muestran los detalles del procesamiento estadístico del área de refuerzo.

Si bien los resultados del área de refuerzo frente a la composición del fundente no muestran alta regularidad desde el punto de vista cuantitativo, se considera válido para el análisis cualitativo de la tendencia de comportamiento. En tal sentido, la figura 3.2 muestra el gráfico de superficies respuestas, donde se advierte que los menores valores corresponden al máximo de grafito ( $X_2$ ) y de matriz ( $X_1$ ) y al mínimo de FeCrMn ( $X_3$ ); mientras los mayores valores tienden a la arista de menor grafito, cuando los valores de matriz son relativamente medios y los de FeCrMn son relativamente altos.

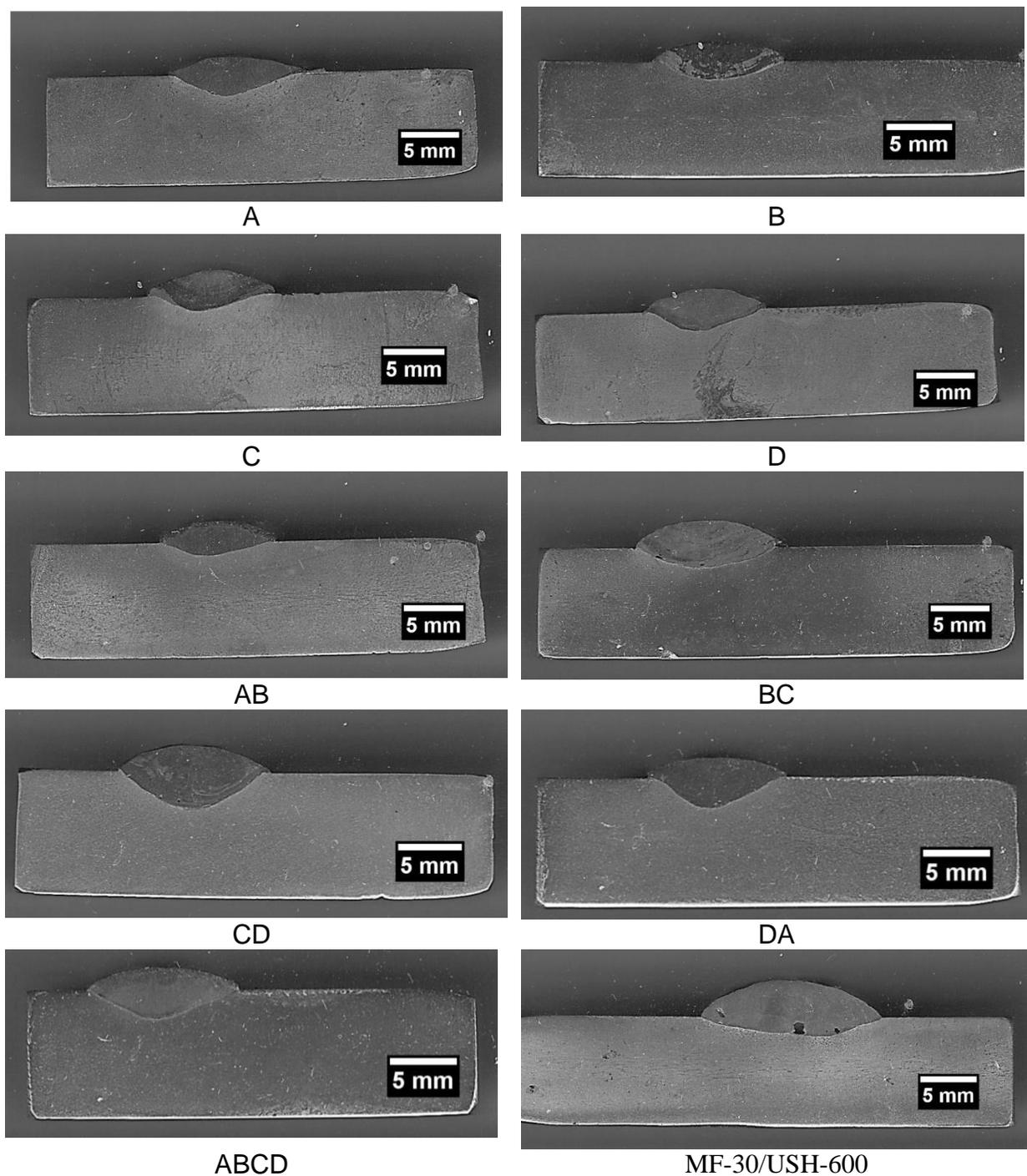


Figura 3.1 Macrográficas de los depósitos

El depósito se conforma fundamentalmente por el aporte del alambre, seguido del aporte del FeCrMn que contribuye con Fe, Cr, Mn y Si; mientras el grafito solo aporta C y la matriz puede aportar Si a partir de la reducción del  $\text{SiO}_2$  en ella presente ( $\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{Si} + \text{CO}_2$ ). En la Figura 3.3 se hace más evidente el efecto independiente de las

variables. En tal sentido, en la concurrencia de las variables de entrada (Matriz, Grafito y FeCrMn) en la conformación del metal aportado, el grafito juega el papel más negativo, ya que el FeCrMn es el mayor aportador de aleación y la matriz aporta de un lado aporta Si y de otro también propicia la interacción metal escoria favoreciendo en alguna medida la incorporación de los elementos del sistema de aleación.

Tabla 3.1 Parámetros geométricos de los depósitos

Depósito	H <sub>p</sub> , mm	h <sub>r</sub> , mm	A <sub>p</sub> , mm <sup>2</sup>	A <sub>r</sub> , mm <sup>2</sup>	δ, %
A	1,9	1,5	10,7	10,9	49,54
B	1,5	1,4	9,2	10,4	46,94
C	1,3	2,2	5,9	14,8	28,50
D	1,65	1,85	8,7	12,04	41,95
AB	1,1	1,8	5,5	11,9	31,61
BC	1,9	2,3	13	20,3	39,04
CD	3,1	1,9	20,2	16,1	55,65
DA	2,3	1,4	12,4	11,0	52,99
ABCD	1,9	1,65	11,7	13,2	46,99
MF-30/USH-600	1,8	3,2	16,5	35,1	31,98

$$\text{Area Refuerzo} = - 7,51644 \cdot X_1 - 48,7164 \cdot X_2 + 15,1136 \cdot X_3 + 147,678 \cdot X_1 \cdot X_2 + 51,276 \cdot X_1 \cdot X_3 + 81,732 \cdot X_2 \cdot X_3 - 191,916 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3.1)$$

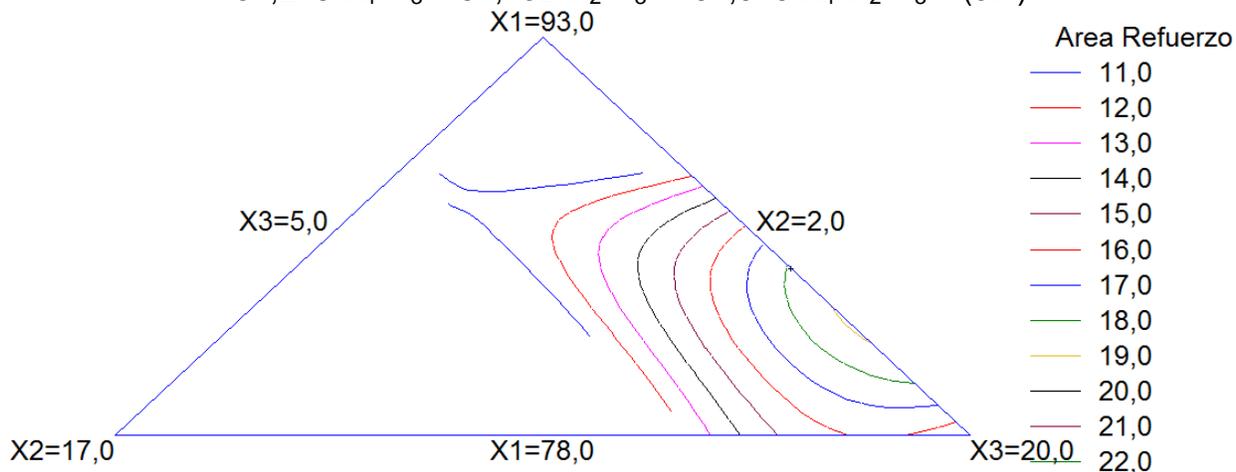


Figura 3.2 Área de refuerzo del depósito frente a la composición del fundente

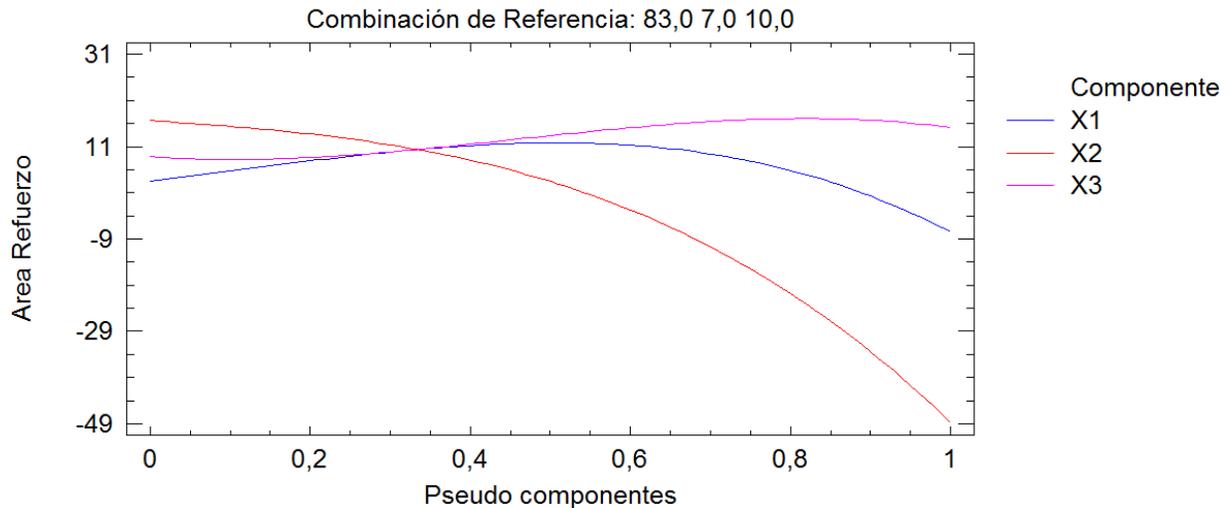


Figura 3.3 Efecto independiente de las variables de entrada sobre el área de refuerzo del depósito

Al tratarse de depósitos para enfrentamiento al desgaste, es deseado que el área de refuerzo sea la mayor posible para favorecer la productividad. Del proceso de optimización fue obtenido que el valor óptimo es de 19,11 mm<sup>2</sup>, para una combinación de variables independientes de X<sub>1</sub>=82,19 %; X<sub>2</sub>=2,0 % y X<sub>3</sub>=15,81%; o sea para el mínimo de grafito y valores relativamente altos de contenidos de FeCrMn y de matriz en el fundente.

### 3.2 Microestructura de los depósitos

#### 3.2.1 Composición química y microestructura de los depósitos

En la tabla 3.2 se da la composición química de los depósitos sin dilución, resultado de un trabajo precedente. En base a los valores de dilución de la tabla 3.1 y la composición química sin dilución de la tabla 3.2 fue determinada la composición química de los depósitos con dilución, mostrados en la tabla 3.3. Se observa que todos los puntos experimentales se corresponden con composiciones de depósitos adecuados para enfrentar el desgaste abrasivo. Los contenidos de carbono y la presencia de significativos contenidos de cromo y manganeso propician que la cristalización primaria se realice con la formación de austenita. En el enfriamiento ulterior en el estado sólido, con relativamente altas tasas de enfriamiento en un proceso de recargue por soldadura, la austenita se transforma en martensita o parcialmente en martensita y bainita. En correspondencia con lo abordado en el

epígrafe 1.4, el cromo y el manganeso desplazan las curvas de transformación isotérmica de la austenita hacia la derecha, favoreciendo la formación de martensita. La presencia de austenita residual en el metal depositado es favorecida por el carbono, por el cromo y sobre todo por el manganeso, ya que hacen descender el punto de inicio de la transformación martensítica (Guliaev 1983; Avner 1990).

Tabla 3.2 Composición de los depósitos sin dilución, en % masa (Cendan, 2018)

Fundente	C	Mn	Cr	Si
A	2,53	1,00	0,38	1,26
B	0,77	2,87	0,95	2,59
C	1,55	4,80	1,34	1,43
D	2,83	3,92	1,07	2,29
AB	2,01	1,87	0,73	2,36
BC	1,00	3,71	1,11	2,11
CD	2,09	5,05	1,40	3,06
DA	2,50	2,33	0,73	2,16
ABCD	1,79	3,67	1,12	2,33
MF-30/USH-600	0,99	2,04	7,83	1,38

Tabla 3.3 Composición de los depósitos con dilución, en % masa

Depósito	C	Mn	Cr	Si
A	1,37	0,73	0,19	0,71
B	0,50	1,73	0,51	1,45
C	1,16	3,56	0,96	1,07
D	1,72	2,46	0,62	1,39
AB	1,44	1,42	0,50	1,66
BC	0,69	2,44	0,67	1,34
CD	1,04	2,49	0,62	1,44
DA	1,28	1,33	0,34	1,09
ABCD	1,04	2,16	0,60	1,31
MF-30/USH-600	0,74	1,53	5,32	0,99

En base al plan experimental de la tabla 2.1 y la composición química con dilución de la tabla 3.3 fue realizado el procesamiento estadístico, empleando el software Statgraphics se obtuvo la ecuación de regresión (3.2). Dado que el valor-P para el modelo lineal es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre el carbono en el depósito y los componentes de la mezcla del fundente, con un nivel de confianza del 95,0%. Para este modelo, se obtuvo un ajuste de  $R^2 = 65,6\%$ , por lo que se considera que no es alto el ajuste, pero que es válido para evaluar la

tendencia de comportamiento. En el anexo 3.2 se muestran los detalles del procesamiento estadístico del carbono.

$$C = 0,597778 \cdot X_1 + 2,92278 \cdot X_2 + 0,902778 \cdot X_3 \quad (3.2)$$

Con el propósito de visualizar mejor la tendencia de comportamiento, la figura 3.4 muestra el gráfico de superficies respuestas del contenido de carbono en función de las variables de entrada. Se advierte que el aumento de grafito ( $X_2$ ) en el sistema de aleación del fundente aumenta el contenido de carbono en el depósito, lo cual tiene su explicación en que el grafito aporta el carbono directamente. El FeCrMn ( $X_3$ ), aunque en menor grado, también favorece la transferencia de carbono, ya que aporta manganeso que actúa como desoxidante. En la Figura 3.5 se visualiza el efecto independiente de las variables, donde se confirma el comportamiento creciente del carbono en el depósito con el aumento del grafito en el sistema de aleación.

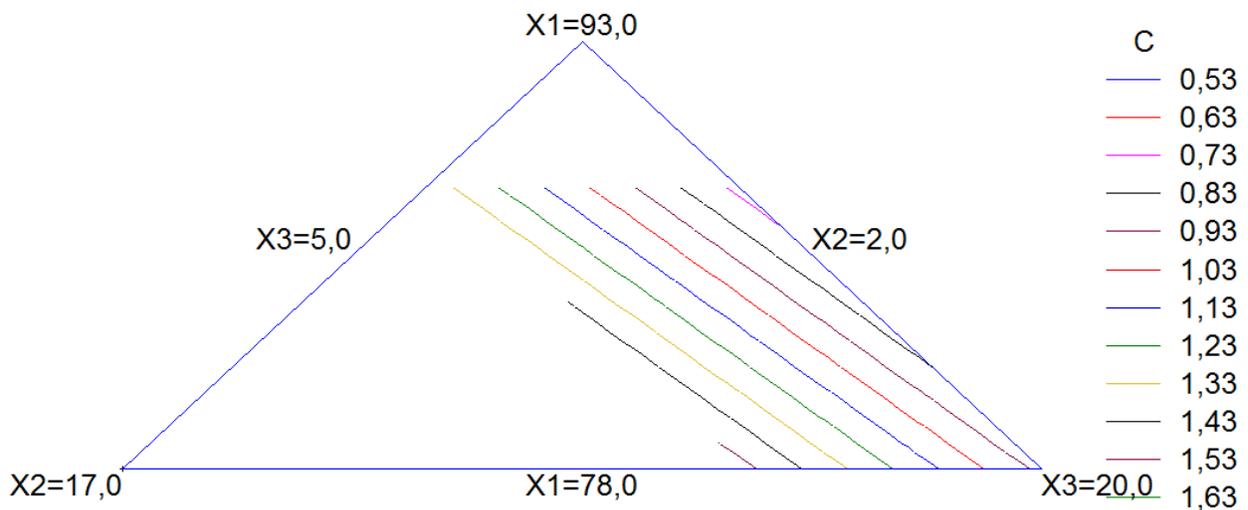


Figura 3.4 Carbono en el depósito con dilución frente a la composición del fundente

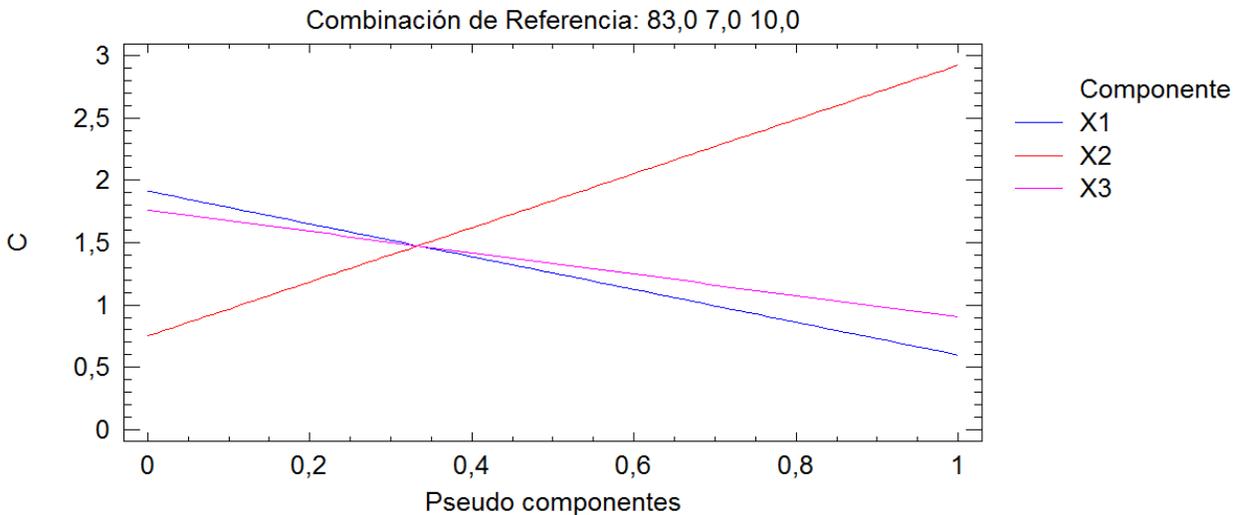


Figura 3.5 Efecto independiente de las variables de entrada sobre el contenido del carbono del depósito con dilución

Al tratarse de depósitos para enfrentamiento al desgaste abrasivo, es deseado que el carbono sea lo más alto posible para favorecer la formación de microconstituyentes duros. Del proceso de optimización fue obtenido que el valor óptimo es de 1,58 %, para una combinación de variables independientes de  $X_1=88,0$  %;  $X_2=7,0$  % y  $X_3=15,0$  %; o sea para el máximo de grafito, un valor relativamente alto de contenido de FeCrMn y un contenido mínimo de matriz en el fundente.

Análogamente que para el carbono, en base al plan experimental de la tabla 2.1 y la composición química con dilución de la tabla 3.3 fue realizado el procesamiento estadístico para el manganeso, empleando el software Statgraphics, resultado de lo cual se obtuvo la ecuación de regresión (3.3). Dado que el valor-P para el modelo lineal es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre el carbono en el depósito y los componentes de la mezcla del fundente, con un nivel de confianza del 95,0%. Para este modelo, se obtuvo un ajuste de  $R^2= 97,07$  %, por lo que se considera que es alto el ajuste. En el anexo 3.3 se muestran los detalles del procesamiento estadístico del manganeso

$$Mn = 1,02722 \cdot X_1 + 0,132222 \cdot X_2 + 3,34222 \cdot X_3 \quad (3.3)$$

La figura 3.6 muestra el gráfico de superficies respuestas del contenido de manganeso en función de las variables de entrada y la figura 3.7 muestra el efecto independiente de las variables, donde se hace evidente el comportamiento creciente del manganeso

en el depósito con el aumento del FeCrMn en el sistema de aleación del fundente, al ser este componente el único aportador de manganeso al sistema.

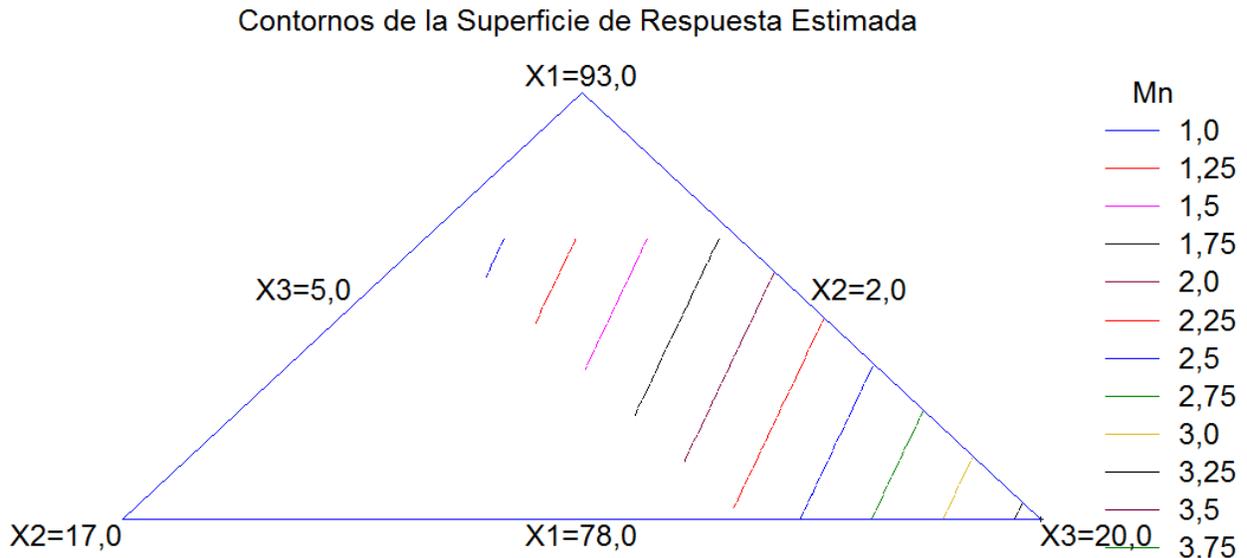


Figura 3.6 Manganese en el depósito con dilución frente a la composición del fundente

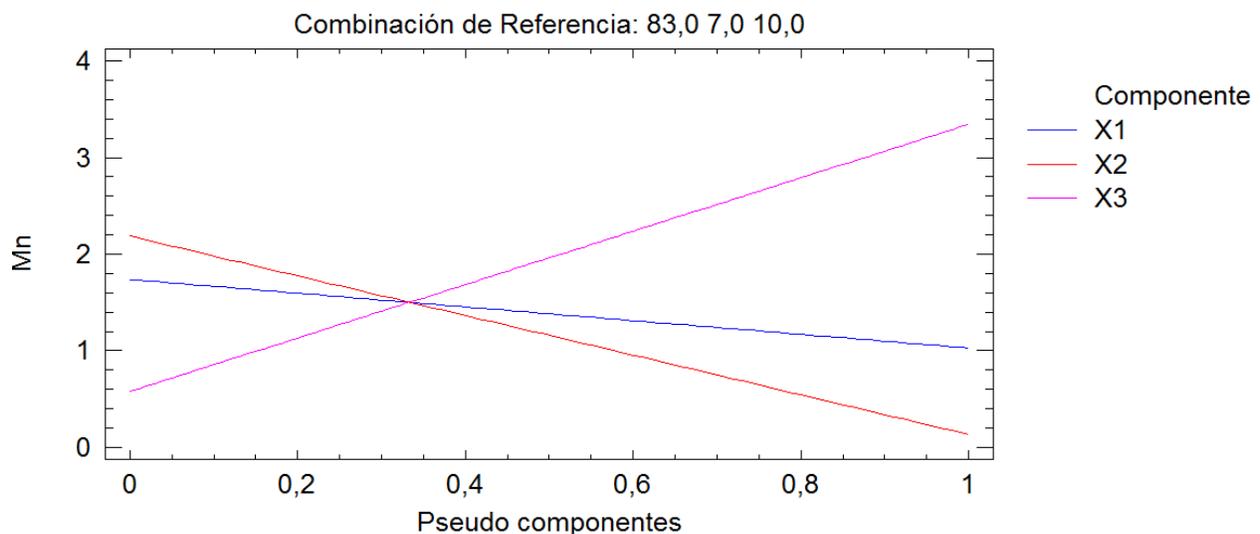


Figura 3.7 Efecto independiente de las variables de entrada sobre el contenido de manganeso del depósito con dilución

El contenido óptimo de manganeso es difícil de predefinir, ya que de una parte es conveniente que la dureza sea alta y el manganeso la puede disminuir al aumentar la probabilidad de austenita residual, pero al mismo tiempo la puede aumentar por un incremento de la templabilidad. Incluso, aun cuando disminuya la dureza, la presencia de austenita residual puede ser favorable si la abrasión se efectúa con impacto, ya que

aumenta la tenacidad. En tal sentido, lo más coherente es no considerar un óptimo para este elemento en particular, ya que los máximos contenidos de cromo y carbono son el criterio gobernante desde el punto de vista de la composición para enfrentar la abrasión.

Fue también realizado el procesamiento para establecer el comportamiento del cromo frente a las variables independientes, en base al plan experimental de la tabla 2.1 y la composición química con dilución de la tabla 3.4, empleando el software Statgraphics, resultado de lo cual se obtuvo la ecuación de regresión (3.4). Dado que el valor-P para el modelo lineal es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre el carbono en el depósito y los componentes de la mezcla del fundente, con un nivel de confianza del 95,0%. Para este modelo, se obtuvo un ajuste de  $R^2 = 88,67\%$ , por lo que se considera que es un ajuste adecuado. En el anexo 3.4 se muestran los detalles del procesamiento estadístico del cromo

$$Cr = 0,388333 \cdot X_1 - 0,101667 \cdot X_2 + 0,888333 \cdot X_3 \quad (3.4)$$

La figura 3.8 muestra el gráfico de superficies respuestas del contenido de cromo en función de las variables de entrada y la figura 3.9 muestra el efecto independiente de las variables, donde se hace evidente el comportamiento creciente del cromo en el depósito con el aumento del FeCrMn en el sistema de aleación del fundente, al ser este componente el único aportador de cromo al sistema. Para estas condiciones, la escoria no muestra ninguna influencia.

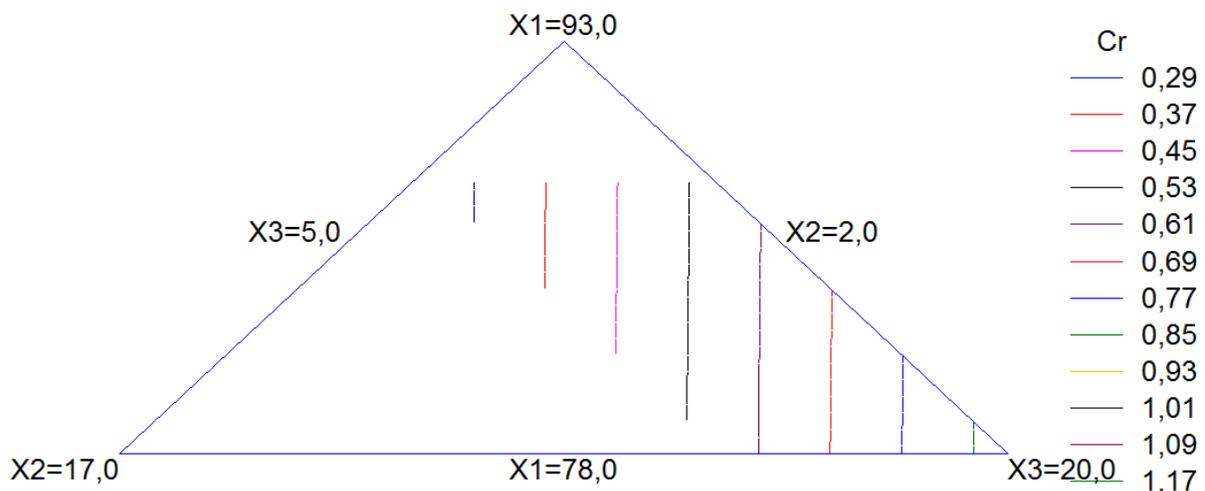


Figura 3.8 Cromo en el depósito con dilución frente a la composición del fundente

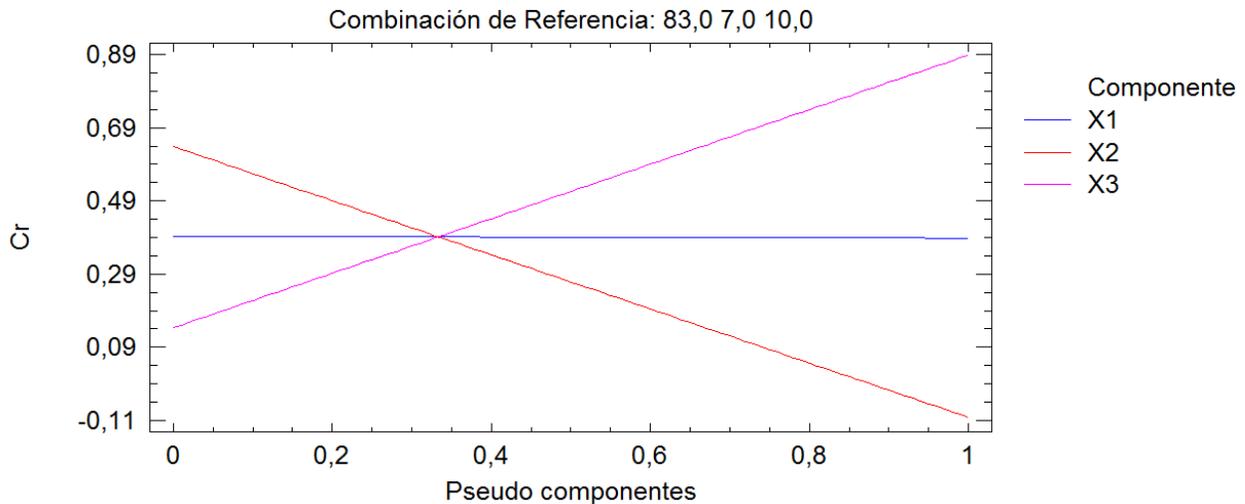


Figura 3.9 Efecto independiente de las variables de entrada sobre el contenido de cromo del depósito con dilución

Al tratarse de depósitos para enfrentamiento al desgaste abrasivo, es deseado que el cromo sea lo más alto posible para favorecer la formación de constituyentes duros en la microestructura. Del proceso de optimización fue obtenido que el valor óptimo es de 0,89 %, para una combinación de variables independientes de  $X_1=78,0$  %;  $X_2=2,0$  % y  $X_3=20,0$  %; o sea para el máximo de FeCrMn en el fundente y el mínimo de grafito y de matriz.

El procesamiento para establecer el comportamiento del silicio en el depósito con dilución frente a las variables independientes fue realizado con el software Statgraphics, en base al plan experimental de la tabla 2.1 y la composición química con dilución de la tabla 3.3, de lo cual se obtuvo la ecuación de regresión (3.5). Dado que el valor-P para todos los modelos es mayor que 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre el silicio en el depósito y los componentes de la mezcla del fundente, para un nivel de confianza del 95,0%. No obstante, el modelo cuadrático si muestra relación estadísticamente significativa si se considera un nivel de confianza de 89,83 %. Para este modelo, se obtuvo un ajuste de  $R^2= 86,11$  %, por lo que se considera que es un ajuste relativamente adecuado. En el anexo 3.5 se muestran los detalles del procesamiento estadístico del silicio

$$Si = 1,92333 \cdot X_1 - 5,11167 \cdot X_2 + 1,04833 \cdot X_3 + 5,49 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,36 \cdot X_1 \cdot X_3 + 10,62 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3.5)$$

La figura 3.10 muestra el gráfico de superficies respuestas del contenido de silicio en función de las variables de entrada y la figura 3.11 muestra el efecto independiente de las variables. Se advierte que el silicio muestra sus mayores valores hacia una región central que abarca todo el intervalo de composición de la matriz. En el efecto de los componentes independientes se observa que muestra un leve crecimiento con la matriz, atribuible al hecho que este es el componente del fundente que lo contiene en forma de  $\text{SiO}_2$ . Para que este elemento se incorpore al depósito, el óxido debe ser reducido, siendo la reacción más probable frente al Mn ( $(\text{SiO}_2) + [\text{Mn}] = [\text{MnO}] + [\text{Si}]$ ). Este proceso se verifica en la interfase metal escoria en estado líquido, donde el  $\text{SiO}_2$  de la escoria se reduce frente al manganeso metálico del metal, pasando ambos productos al metal. La alta concentración de  $\text{SiO}_2$  en la escoria (alta actividad termodinámica), favorece de manera significativa que la reacción vaya hacia la derecha. Luego, el MnO en el metal podría desoxidarse frente al carbono o formar un sulfuro con el azufre pasando a la escoria. Como resultado de las altas tasas de enfriamiento, propias de un proceso de recargue por soldadura, el metal del depósito no alcanza el equilibrio termodinámico. O sea que, al no estar el silicio presente en contenidos significativos en el alambre, y al estar en el fundente en forma de óxido en la matriz, su transferencia al depósito es consecuencia de un proceso redox, bajo condiciones de alta metaestabilidad.

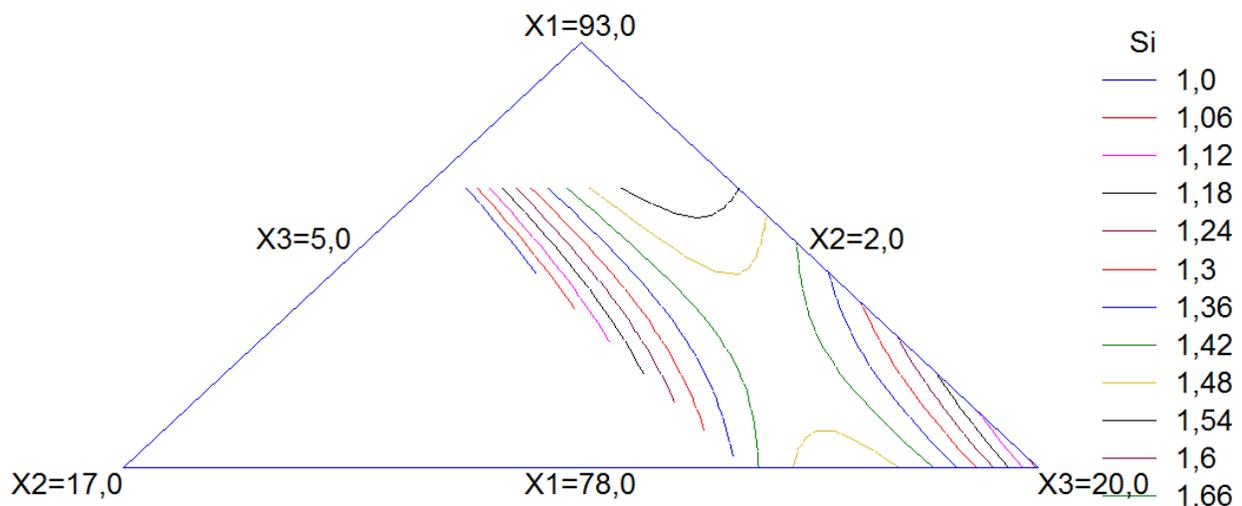


Figura 3.10 Silicio en el depósito con dilución frente a la composición del fundente

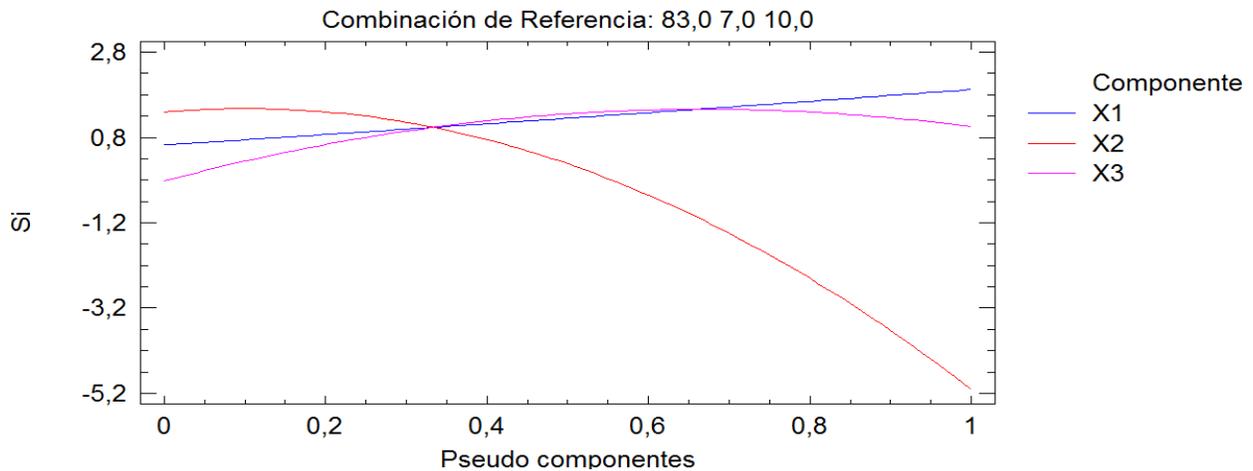
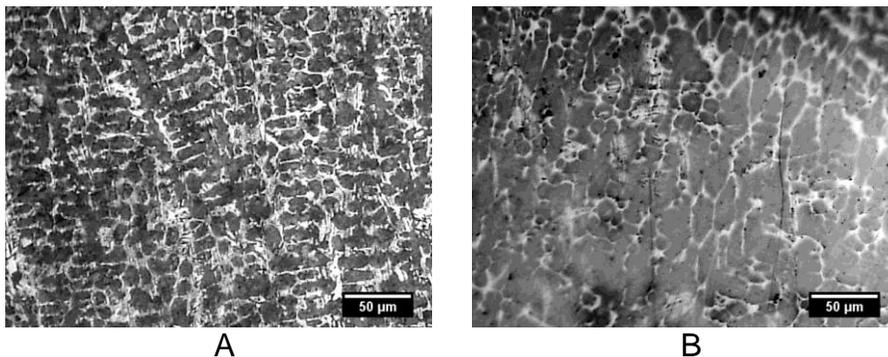


Figura 3.11 Efecto independiente de las variables de entrada sobre el contenido de silicio del depósito con dilución

En el caso del silicio, no se tiene un criterio preestablecido de cuál sería su mejor contenido para un depósito destinado al desgaste abrasivo. Se conoce que este elemento hace descender la temperatura de transformación eutéctóide, retardando de este modo el inicio de esta transformación. En cuanto al inicio de la transformación martensítica y la presencia de austenita residual, este elemento no manifiesta un efecto alguno (Guliaev 1983; Avner 1990).

Las imágenes de metalografía óptica, correspondientes a los depósitos obtenidos con los fundentes experimentales, se muestran en la figura 3.12. Se observan diferencias en la microestructura que se corresponden obviamente a los cambios en la composición de los depósitos (Tabla 3.3) y las condiciones de enfriamiento. En sentido general, se observa la presencia de una estructura dendrítica oscura, con predominio probable de martensita o martensita y bainita, con austenita residual de color claro en la región interdendrítica.



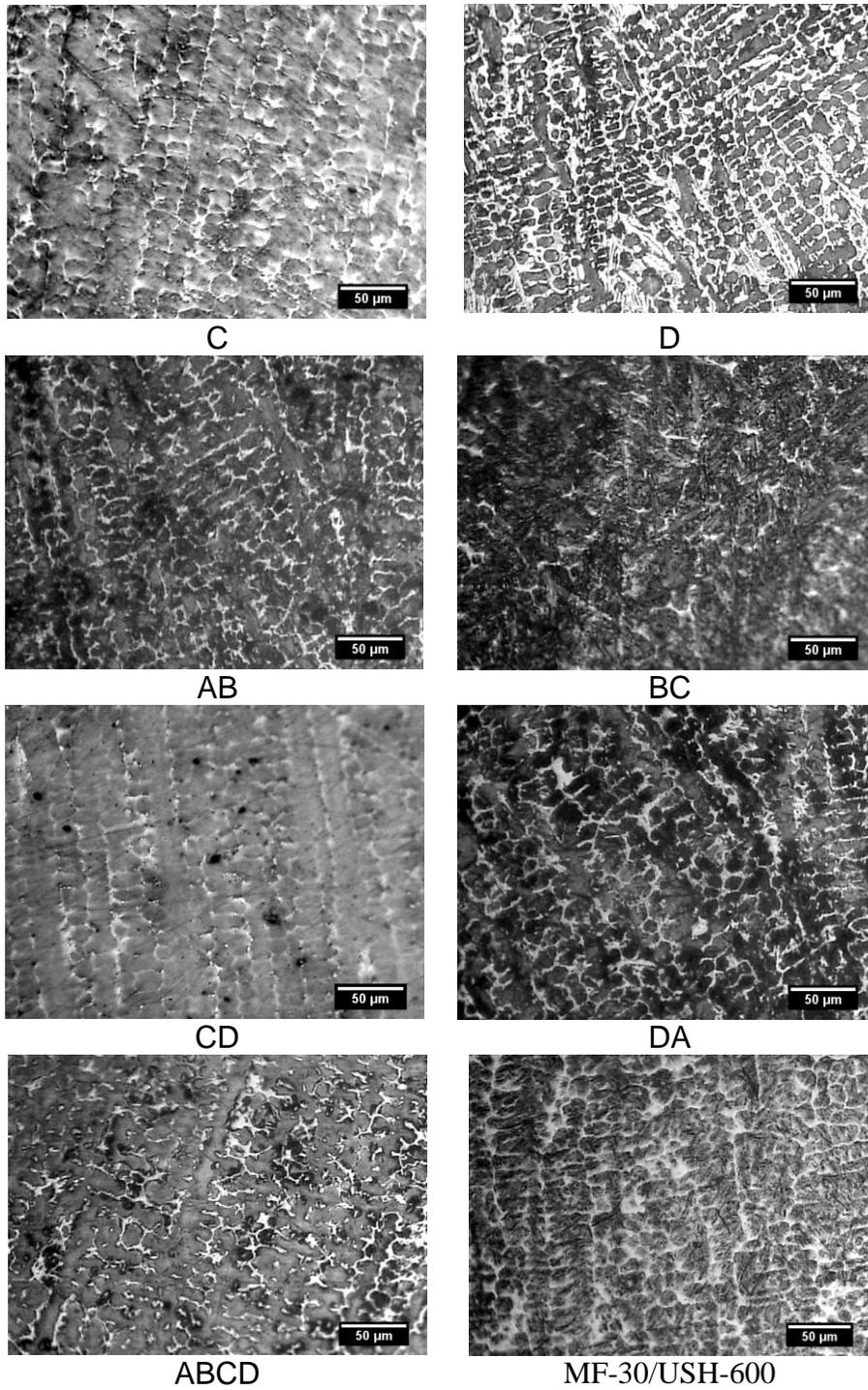


Figura 3.12 Metalografía de los depósitos

### 3.2.2 Microdureza del constituyente duro de los depósitos

Con el propósito de una identificación de la microestructura con mayor criterio, en la tabla 3.4 se muestran los valores de microdureza de las regiones dendríticas oscuras

(constituyente duro) en la figura 3.4. No fue posible determinar la microdureza de las regiones claras (de la austenita residual), ya que su tamaño es pequeño y la huella de la indentación rebasaba los límites del microconstituyente, incluso para la menor carga de ensayo posible.

Tabla 3.4 Resultados de los ensayos de microdureza de las zonas oscuras.

Dep.	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	HV <sub>4</sub>	HV <sub>5</sub>	HV <sub>6</sub>	HV <sub>7</sub>	HV <sub>8</sub>	HV <sub>9</sub>	HV <sub>10</sub>	HV <sub>m</sub>	D.St
A	701,1	739,2	752,5	701,1	726,1	689,1	739,2	752,5	766,3	726,1	729,3	25,5
B <sup>1</sup>	369,6	350,5	333,0	344,5	356,7	350,5	327,4	344,5	376,3	356,7	351,0	15,0
C	466,4	479,9	548,6	516,4	479,9	494,0	516,4	473,0	503,0	494,0	497,2	24,9
D	726,1	701,1	689,1	701,1	677,3	643,9	701,1	643,9	713,5	701,1	689,8	27,4
AB	643,9	612,9	654,8	593,4	623,0	633,3	603,0	654,8	643,9	603,0	626,6	22,7
BC	479,9	453,4	466,4	447,1	486,9	459,8	453,4	473,1	479,9	466,4	466,6	12,6
CD	516,4	524,2	508,8	516,4	501,3	508,8	524,2	494,0	516,4	524,2	513,5	10,2
DA	665,9	643,9	701,1	713,5	689,1	713,5	726,1	654,8	677,3	701,1	688,6	27,4
ABCD	540,3	557,2	548,6	540,3	532,1	574,9	548,6	508,8	494,0	557,2	540,2	23,8
MF-30/USH-600	677,3	665,9	689,1	701,10	689,10	677,30	701,10	665,90	713,5	689,10	686,9	15,6

<sup>1</sup> La indentación en este depósito fue necesario realizarla con una carga menor (25 g) para que la huella no rebasara el límite del constituyente microestructural.

De acuerdo con los valores de microdureza de la tabla 3.4 y lo que plantea la literatura especializada (Guliaev 1983; Avner 1990), la microestructura se corresponde con la martensita o con una mezcla de martensita y bainita.

En la figura 3.13 se muestra el gráfico de comportamiento de la microdureza de las zonas oscuras (constituyente duro) (Tabla 3.4), en función del contenido de carbono en el depósito (Tabla 3.3), donde se advierte un comportamiento de tendencia creciente. Por su parte, la figuras 3.14, muestra el comportamiento de la microdureza de la zona oscura (constituyente duro) en función de la relación del carbono con otros elementos. Se advierte un comportamiento de carácter creciente, que se interpreta como que el endurecimiento del constituyente duro es gobernado por el contenido de carbono en el depósito, ya que los otros elementos de manera independiente no mostraron ninguna regularidad en su efecto. Lo anterior se explica a partir del efecto del carbono sobre el espaciamiento de las láminas de las estructuras de tipo perlítica y fundamentalmente sobre la tetragonalidad de la martensita, ya que todo indica que es el microconstituyente que predomina (Guliaev, 1983; Avner, 1980; Smith 2006). La

microdureza de la martensita en el depósito del fundente comercial MF-30/USH-600, empleado como referencia, presenta un significativamente alto valor (Tabla 3.3), aun cuando el contenido de carbono no es tan alto en comparación a los experimentales (Tabla 3.2). En este caso particular, el contenido de Cr es significativamente superior al de los fundentes experimentales, siendo probable que la austenita de la cristalización primaria disuelva este elemento como solución sólida con átomos sustitucionales, influyendo por una parte sobre la distorsión directa de la red cristalina y por otra sobre la difusión del carbono en la transformación a martensita, lo que también se refleja en la tetragonalidad de la red de esta última.

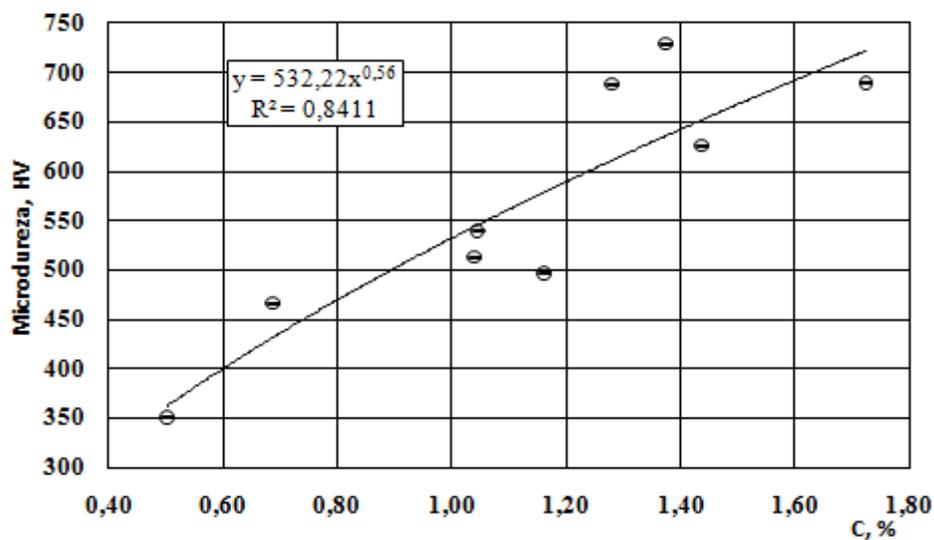


Figura 3.13 Microdureza de la zona oscura frente al carbono del depósito

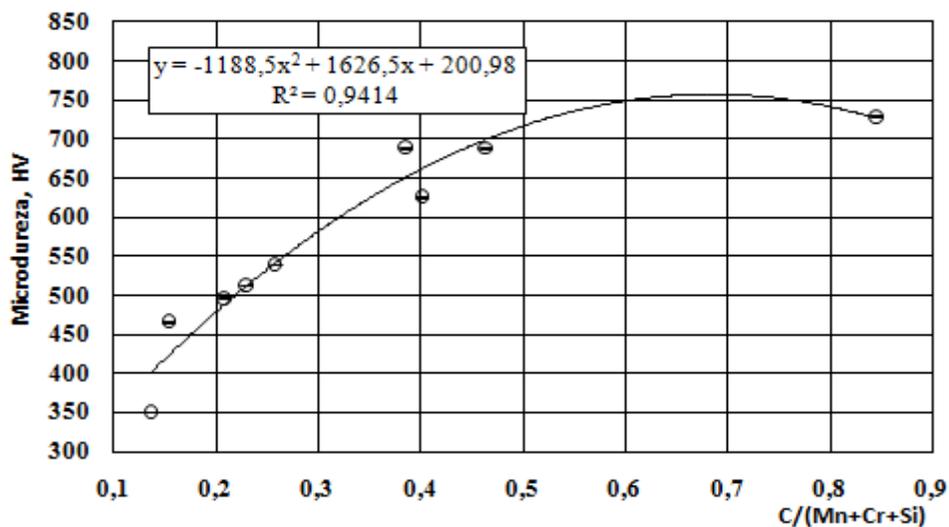


Figura 3.14 Microdureza de la zona oscura frente a la relación C/(Mn+Cr+Si)

En la figura 3.15 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido de la región martensítica del depósito “A” y del “MF-30/USH-600”, el primero corresponde al de mayor valor de la microdureza del constituyente duro dentro de los depósitos de fundentes experimentales (Tabla 3.4) y el segundo corresponde al depósito del fundente comercial usado de referencia. En ambos casos se observa la presencia de microporos, característicos en depósitos de recargue por soldadura (Coronado, et al. 2009). Aunque se observen diferencias morfológicas en la microscopía de los constituyentes de los dos depósitos, las imágenes se corresponden con lo reportado por la literatura para una estructura martensítica (Avner 1980; Xiang-Tao et al. 2014). En el caso del depósito experimental “A”, se observa una estructura más basta; sin embargo, al presentar una microdureza similar a la del comercial se confirma que el carbono ejerce un papel preponderante en el endurecimiento de la martensita como fue abordado encima.

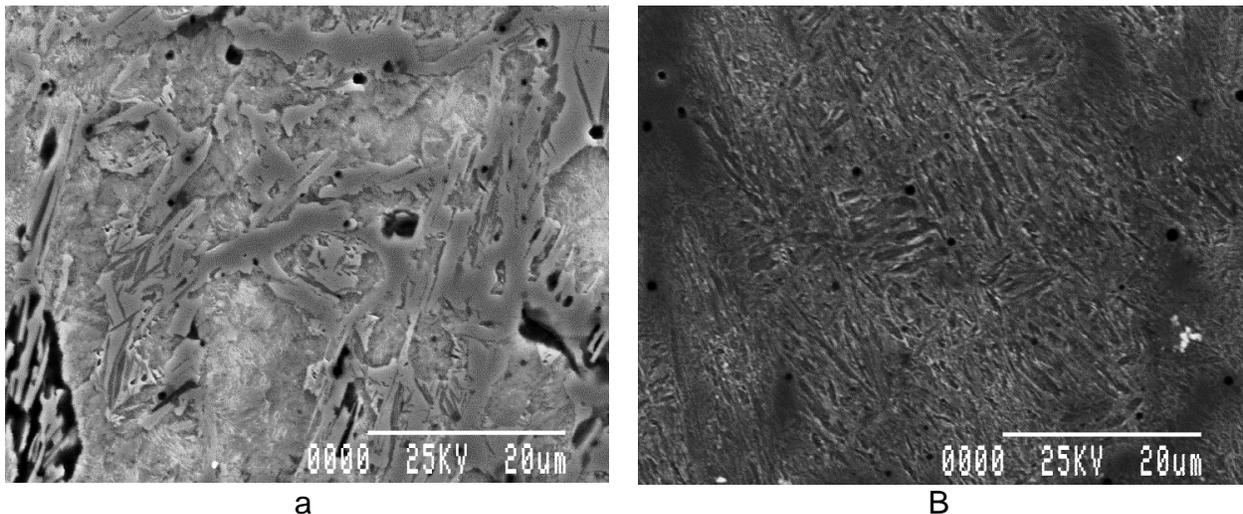


Figura 3.15 Microscopía de barrido de los depósitos. a) depósito “A”; b) Depósito “MF-30/USH-600”

A partir del procesamiento de los valores de microdureza de la tabla 3.4 frente a las variables independientes de la tabla 2.1, empleando el software statgraphics, se obtuvo la ecuación de regresión 3.1, cuyo ajuste se considera adecuado con  $R^2 = 83,87 \%$   $R^2_{aj} = 78,49 \%$ , dado que el valor-P para el modelo lineal es menor que 0,05, se considera que existe una relación estadísticamente significativa entre  $HV_{50}$  y los componentes de la mezcla del fundente, con un nivel de confianza del 95,0% (En el

anexo 3.6 se muestran en detalle los resultados del procesamiento estadístico). Con el propósito de visualizar mejor la tendencia de comportamiento, la figura 3.16 muestra el gráfico de superficies respuestas de la dureza del microconstituyente duro en función de las variables de entrada. Se advierte que el comportamiento está gobernado por la adición de grafito en el fundente, en plena correspondencia con lo analizado arriba sobre el efecto del carbono en el depósito sobre el endurecimiento de los productos de la transformación de la austenita en el enfriamiento (sobre el espaciamiento de las láminas de cementita en la bainita y sobre la tetragonalidad de la martensita), ya que el carbono del depósito depende de la adición de grafito en el sistema de aleación del fundente. La figura 3.17 muestra el efecto individual de los componentes del fundente sobre la microdureza, donde se evidencia claramente el papel gobernante del carbono.

$$\text{Microdureza} = 436,961 \cdot X_1 + 1226,66 \cdot X_2 + 433,761 \cdot X_3 \quad (3.5)$$

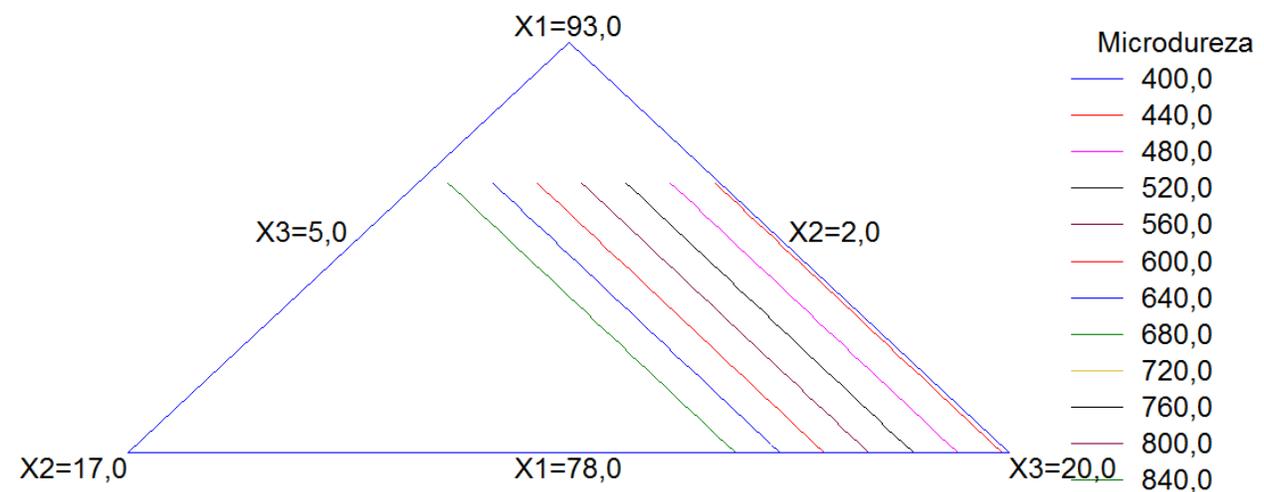


Figura 3.16 Microdureza HV<sub>50</sub> de la zona oscura frente a la composición del fundente

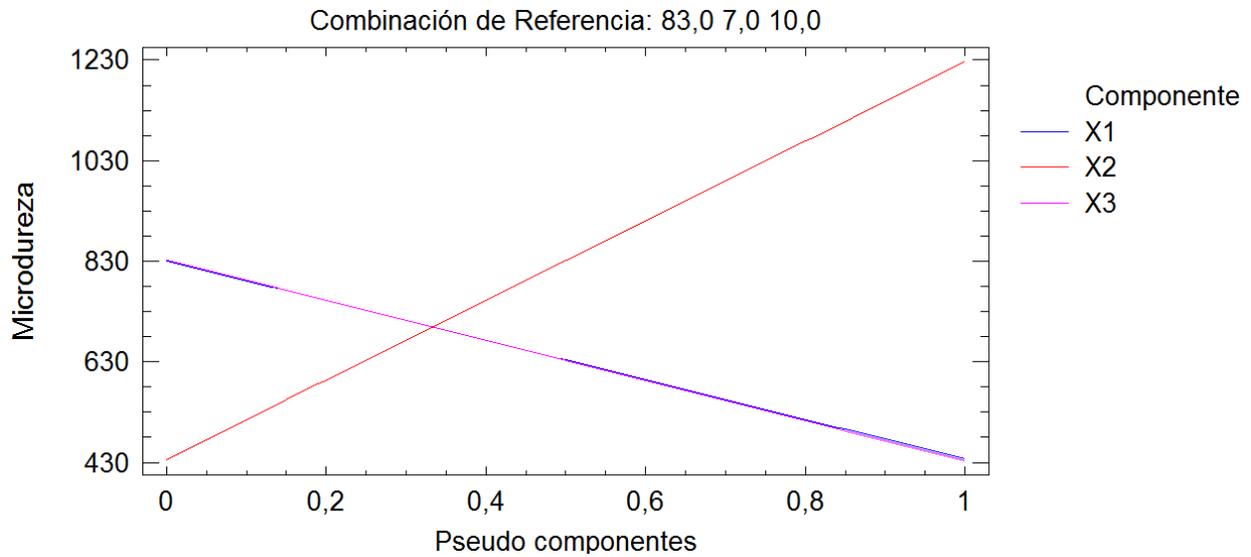


Figura 3.17 Efecto independiente de las variables de entrada sobre la microdureza del depósito

Al tratarse de depósitos para enfrentamiento al desgaste abrasivo, es deseado que la dureza del constituyente estructural duro sea lo más alta posible para limitar la penetración del abrasivo en la superficie. Del proceso de optimización fue obtenido que el valor óptimo es de 700,194 HV, para una combinación de variables independientes de  $X_1=88,0\%$ ;  $X_2=7,0\%$  y  $X_3=5,0\%$ ; o sea para el máximo de matriz del fundente y de grafito y el mínimo de FeCrMn.

### 3.3 Dureza de los depósitos

En la tabla 3.5 se reportan los valores de dureza de los depósitos. Se observa, que en comparación a la tabla 3.4 el comportamiento es de tendencia similar al de la microdureza del microconstituyente oscuro. Lo anterior se hace más evidente en la figura 3.18, donde se observa un comportamiento lineal de la dureza en relación a la microdureza del constituyente oscuro (del constituyente duro). De ello se pueden hacer la aseveración de que el contenido de carbono juega el papel gobernante en el desempeño de la dureza, en correspondencia con lo abordado arriba para la microdureza del constituyente duro. Como es obvio, la dureza en todos los depósitos es inferior a la microdureza de la martensita a causa de la presencia de austenita residual (Tablas 3.3 y 3.4). No obstante, la presencia de austenita residual no es

totalmente desfavorable, ya que aumenta la tenacidad del depósito propiciando el adecuado desempeño bajo condiciones de abrasión con impacto.

Tabla 3.5 Dureza de los depósitos

Depósito	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV1000g	DesvSt
A	655,2	635,9	633,6	643,1	631,3	650,3	645,5	650,3	655,2	643,1	644,4	8,6
B	281,9	285,5	271,8	283,3	279,2	277,8	280,6	284,0	279,9	282,6	280,7	3,9
C	419,3	413,1	425,7	401,0	405,8	428,3	424,4	419,3	410,6	425,7	417,3	9,3
D	545,6	553,2	555,1	543,7	547,5	551,2	545,6	543,7	553,2	549,4	548,8	4,2
AB	532,7	541,9	534,5	530,9	540,0	532,7	551,2	529,1	545,6	553,2	539,2	8,6
BC	409,4	402,2	407,0	402,2	410,6	404,6	407,0	408,2	405,8	413,1	407,0	3,5
CD	432,2	436,2	438,9	445,7	440,3	443,0	438,9	434,9	436,2	444,4	439,1	4,4
DA	551,2	572,8	578,9	570,8	587,1	574,8	578,9	580,9	589,2	570,8	575,5	10,6
ABCD	445,7	449,9	454,2	444,4	448,5	452,7	451,3	449,9	445,7	452,7	449,5	3,4
MF-30/USH-600	660,2	655,2	672,8	655,2	657,7	670,2	662,7	655,2	672,2	652,8	661,4	7,7

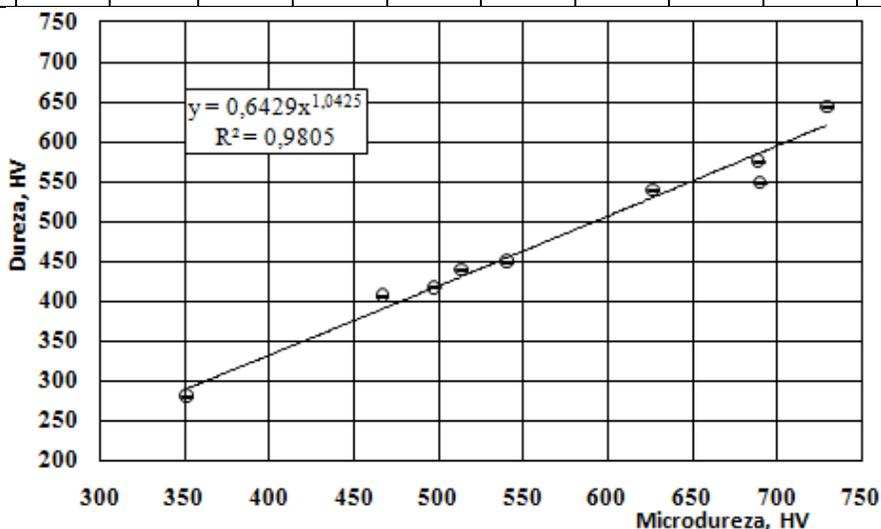


Figura 3.18 Dureza del depósito frente a la microdureza del constituyente duro

Desde el punto de vista de la dureza (Tabla 3.5), al tratarse de un recargue duro para enfrentamiento al desgaste, el mejor resultado se considera el del depósito del fundente experimental “A”, cuyo valor es similar (equivalente a 58 HRC) al del depósito del fundente comercial “MF-30/USH-600”, usado como referencia.

En base a los valores de las tablas 3.2 y 3.4 fue realizado el procesamiento estadístico, con el software Statgraphics, para establecer la dependencia de la dureza en función de las variables de composición del fundente. Se obtuvo la ecuación de regresión (3.2), cuyo ajuste se considera no muy alto, con  $R^2 = 77,14\%$  y  $R^2_{aj} = 69,52\%$ , dado que el valor-P para el modelo lineal es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre HV y los componentes del fundente, con un nivel de confianza del

95,0% (En el anexo 3.7 se muestran en detalle los resultados del procesamiento estadístico). La figura 3.19, correspondiente al gráfico de superficies respuestas de la dureza en función de los contenidos de matriz, grafito y FeCrMn en el fundente, visualiza la tendencia de comportamiento. Se observa que en este caso también el comportamiento está gobernado por la adición de grafito en el fundente, en plena correspondencia con el comportamiento lineal de la dureza con la microdureza (Figura 3.18) y de ambas, ya que dependen linealmente, con el carbono (Figuras 3.5, 3.17 y 3.19).

$$\text{Dureza} = 387,028 \cdot X_1 + 1021,18 \cdot X_2 + 357,478 \cdot X_3 \quad (3.6)$$

Como el objetivo es el enfrentamiento al desgaste abrasivo, la dureza del depósito debe ser como regla la mayor posible para limitar la penetración de las aristas del material abrasivo. En el proceso de optimización de esta respuesta fue obtenido que el mejor resultado es de 598,411HV, para una combinación de variables independientes de  $X_1=88,0\%$ ;  $X_2=7,0\%$  y  $X_3=5,0\%$ ; o sea para el máximo de matriz del fundente y de grafito y el mínimo de FeCrMn.

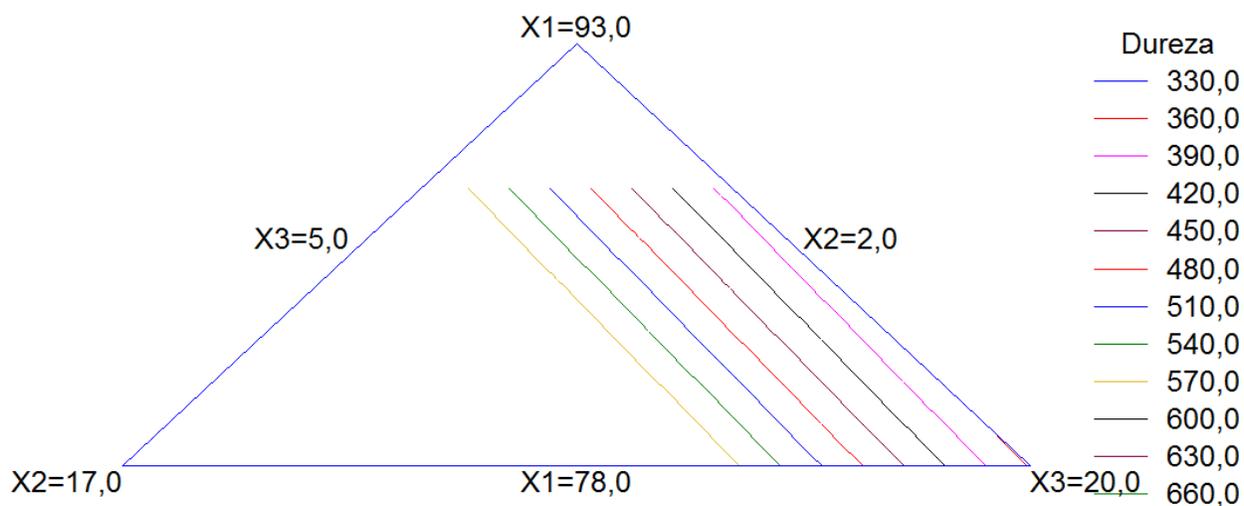


Figura 3.19 Dureza HV<sub>1000</sub> del depósito frente a la composición del fundente

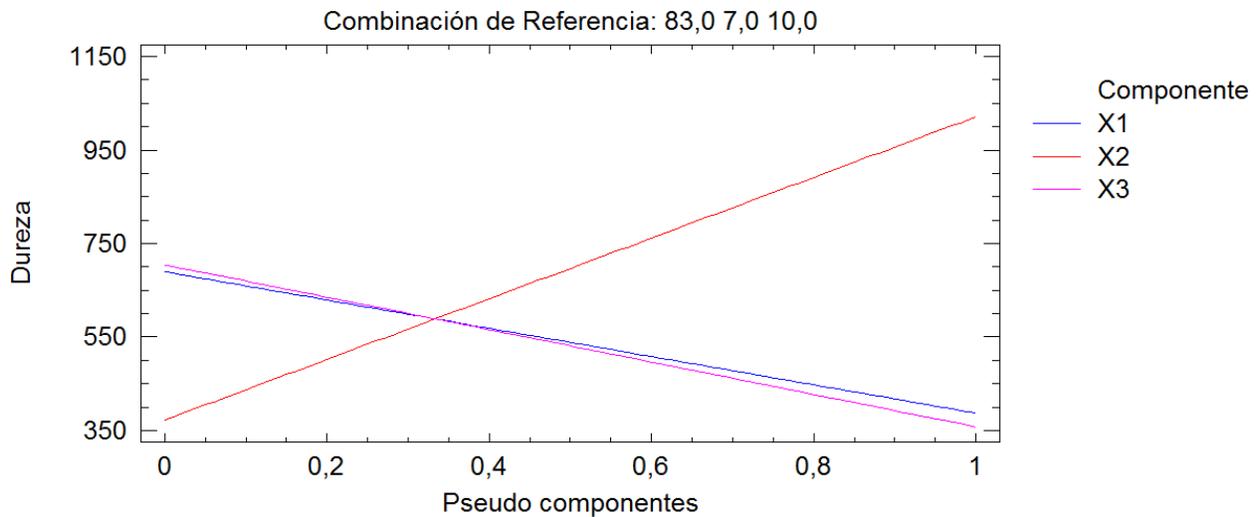


Figura 3.20 Efecto independiente de las variables de entrada sobre la dureza HV<sub>1000</sub> del depósito

### 3.4 Comportamiento al desgaste de los depósitos

En la tabla 3.6, se muestran los resultados del ensayo de desgaste de validación para diferentes tiempos de ensayo en una muestra de acero AISI 1020. En figura 3.21 se muestran huellas de desgaste para los dos tiempos de ensayo evaluados. A su vez la figura 3.22 muestra el comportamiento al desgaste en función del tiempo. En ambas figuras se aprecia que en la medida que aumenta el tiempo de ensayo el desgaste es mayor. Se observa que el comportamiento al desgaste es creciente en función del tiempo (Figura 3.22), lo cual coincide con lo que reporta la literatura especializada (ASM, 1992), constituyendo un cierto criterio de validación del adecuado funcionamiento de la bomba, ya que de no haber regulado el goteo de manera estable y manteniendo constante la proporción de abrasivo en la suspensión esto se habría reflejado como variable en el ensayo.

Tabla 3.6 Dureza de los depósitos.

Tiempo, min	Diámetros de la huella, $\mu\text{m}$				DesvSt, $\mu\text{m}$	$b_m$ , mm	$V$ , $\text{mm}^3$
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_m$			
0	-	-	-	-	-	-	-
5	553	551	550	551	2	0.551	0.00036
8	902	906	901	903	3	0.903	0.00257

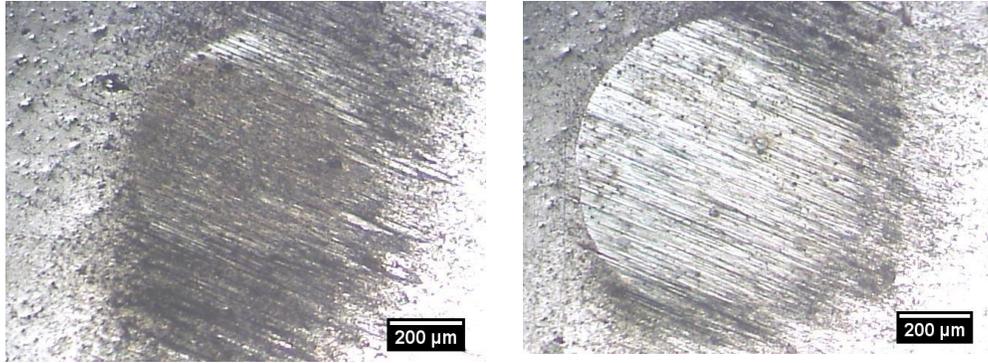


Figura 3.21 Huella de desgaste para diferentes tiempos de ensayo. a) 5 min de ensayo, b) 10 min de ensayo

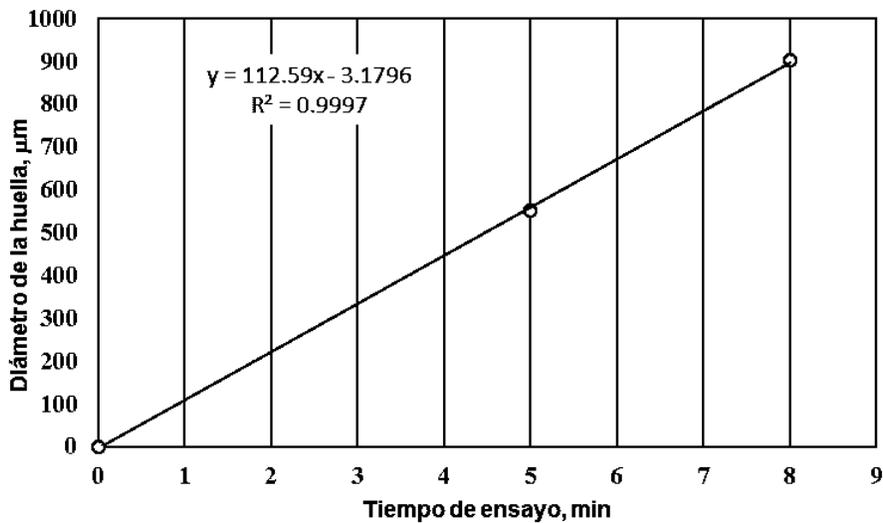


Figura 3.22 Comportamiento al desgaste en función del tiempo de ensayo

A partir del criterio de que en aceros de alto carbono y baja aleación la resistencia al desgaste es proporcional a la dureza, se considera que el depósito “A” es el más resistente al desgaste, similar al comercial de referencia “MF-30/USH-600” (Tabla 3.5). Por ello, fue realizado un estudio comparativo de desgaste mediante el ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre, empleando suspensión de SiC, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.7 y en la figura 3.23 se muestran las huellas de desgaste. Se advierte que hay relativa similitud en los resultados, siendo el comercial ligeramente más resistente al desgaste microabrasivo (el comercial es apenas un 6 % más resistente al desgaste).

Tabla 3.7 Resultados de los ensayos comparativos de desgaste

Muestra	b1, mm	b2, mm	b3, mm	bm, mm	t, min	V, mm <sup>3</sup>	DesvS mm
A	2,580	2,520	2,570	2,557	10	0,165	0,032
MF-30/USH-600	2,428	2,344	2,435	2,402	10	0,129	0,051

En la figura 3.23 se hace visible que el micromecanismo de desgaste que predomina es el microsurcamiento y microcorte, ya que se observa la presencia de surcos paralelos en la dirección de arrastre de las partículas abrasivas de la suspensión. Se advierte un formato definido del contorno de la huella y una alta circularidad, como evidencia de un adecuado régimen de ensayo.

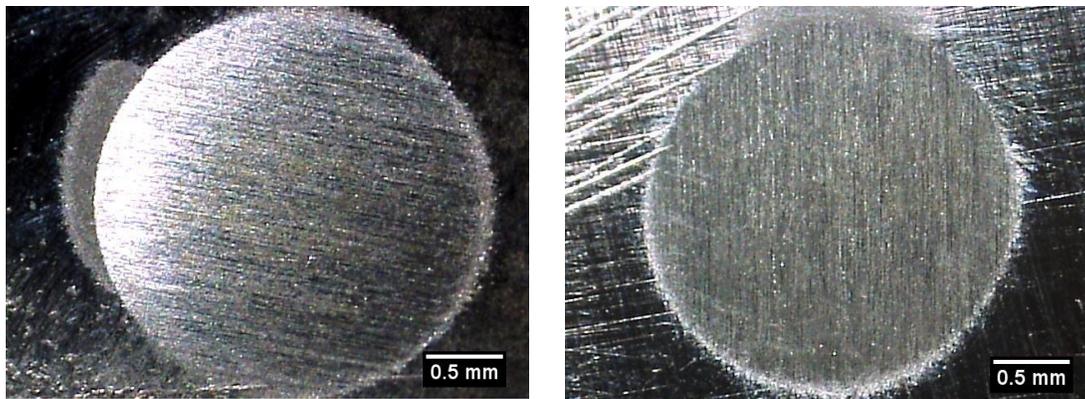


Figura 3.23 Huella de desgaste del ensayo con SiC. a) Depósito “A”, b) Depósito MF-30/USH-600

### 3.5 Valoración del impacto económico, ambiental y social

El empleo de las escorias de afino del acero en horno cuchara y de cenizas de la cascarilla del arroz para la formulación de fundentes destinados a la recuperación de piezas trae consigo un apreciable efecto económico debido a que reduce sustancialmente el consumo de materias primas para dicha formulación.

Para la valoración económica se ha considerado la producción del fundente, sobre la base del equipamiento existente en el laboratorio del CIS y las recomendaciones de la literatura para este tipo de análisis. En la tabla 3.9 se muestran los costos de inversión, pero como fue realizada hace más de 20 años se considera que ya fue amortizada.

Tabla 3.9 Costos de inversión

Peletizadora	1200 \$
--------------	---------

Molino de disco	2200 \$
Tamizadora	813 \$
Horno mufla	3117 \$
Mezcladora	900 \$
Estufa eléctrica	481 \$
Balanza técnica	260 \$
TOTAL	8971 \$

Los costos de instalación se consideran un 35 % de los costos de inversión, los de instalación eléctrica un 10 % y la edificación un 10 % (Peters, 1980). Obviamente, los costos de instalación tampoco serán considerados porque se considera que ya fue amortizado en el tiempo.

Costo de instalación----- $0,35 \times 8971=3139,85$  \$

Instalaciones eléctricas----- $0,10 \times 8971= 897,1$  \$

Edificación----- $0,10 \times 8971=897,1$  \$

Los costos directos se consideran la suma de los costos de inversión, de los costos de instalación, de la instalación eléctrica y de edificación,

Costos directos-----4934,5 \$

Los costos indirectos se consideran un 10% de los costos directos

Costos indirectos----- $0,10 \times 4934,5=493,45$  \$

El capital fijo invertido se considera la suma del costo de inversión, los costos directos y los costos indirectos.

Capital fijo invertido-----14398,95 \$

Se reitera que la inversión fue realizada hace más de 20 años, en función de obtener otros productos y prestar otros servicios, que por lo tanto ya fue amortizada y que para la producción del nuevo fundente no se requiere de ninguna nueva inversión. En base a ello solo serán considerados los gastos corrientes de producción (gasto en materia prima, gastos en energía y gastos en mano de obra).

Para determinar los gastos de materia prima (Tabla 3.10) se toma como referencia una tonelada de fundente, estableciendo que la escoria y la ceniza no tienen costo alguno

porque son residuales. Para los gastos de energía fueron considerados los consumos de los equipos involucrados (Tabla 3.11).

Tabla 3.10 Consumo de materia prima

Materia prima	Consumo (ton)	Precio (\$/ton)	Costo (\$)
Escoria	0,451	-	-
Ceniza	0,127	-	-
Fluorita	0,041	171	7,01
FeCrMn	0,035	660	23,10
Grafito	0,049	440	21,56
Silicato de sodio	0,300	262	78,60
Total fundente			130,27

Tabla 3.11 Consumo de energía y capacidad de los equipos

Equipo	Consumo (kW)	Capacidad (kg/h)	Consumo (kW-h/kg)	Consumo (kW-h/t)
Mescladora	0,7	4	0,175	175
Molino de disco	1,3	109	0,130	130
Tamizadora	0,8	10	0,08	80
Peletizadora	2,9	4	0,725	725
Estufa	2	6	0,333	333
Mufla	5,6	5	1,12	1120

### Consumo de energía para obtener una tonelada de fundente:

Escoria ----- 0,451x80= 36,08  
 FeCrMn ----- 0,035x130 + 0,035x 80= 7,35  
 Fluorita ----- 0,041x80= 7,38  
 Mezclado -----0,7x175= 122,50  
 Peletización -----1x725=725  
 Estufa-----1x333= 333  
 Mufla ----- 1x1120= 1120  
**Total**----- 2351,31 kW x 0,09=211,62 \$

### Mano de obra:

Se toma como criterio que será producida 1 tonelada al mes

1 Técnico A: ----- 600 \$  
1 obrero calificado: -- 500 \$  
TOTAL-----1100 \$/mes

El gasto total para una tonelada de fundente sería:  $130,27 + 211,62 + 1100 = 1441,89$  \$

El precio de una tonelada de fundente con estas características (MF-30/USH-600) es de alrededor de \$3000. Ello significa que se puede producir un ahorro de **1558,11 \$** por sustitución de importación de cada tonelada.

Desde el **punto de vista ambiental**, el aprovechamiento de escorias residuales de acería y de cenizas de la combustión de la paja de arroz constituyen elementos positivos que pueden ser sintetizados de la siguiente forma:

- Revalorización de residuales en deshuso.
- Producciones más limpias al ser aprovechado el residual
- Aumento de la sustentabilidad de la siderurgia y del sector agroindustrial
- No agresión al medio en la extracción de minerales naturales
- Alargamiento de la vida útil de las piezas (ampliación del ciclo de generación de chatarra)

Desde el **punto de vista social**, se logra:

- Soberanía tecnológica al producir un fundente en las condiciones de infraestructura industrial del país,
- Fortalecer el vínculo universidad-empresa,
- Independencia de las fluctuaciones de mercado, garantizando el suministro estable a los consumidores
- El encadenamiento productivo entre sectores: Siderurgia, agroindustria, sector metalmeccánico, etc.
- La producción de un nuevo fundente con valor agregado, producto de la innovación (La ciencia como fuerza productiva).

## Conclusiones

1. La bomba peristáltica diseñada y fabricada, muestra un buen desempeño de funcionamiento, garantizando la frecuencia de goteo sin alterar la proporción de la suspensión abrasiva. En los ensayos de validación el desgaste mostró un comportamiento lineal con el recorrido de ensayo (con el tiempo de ensayo).
2. La composición química de los depósitos de cordones sobre chapa mantiene relativamente la misma tendencia de comportamiento que la de los depósitos sin dilución. De acuerdo a la composición, propia de un acero al carbono de baja aleación con presencia de Cr y Mn, todos los depósitos obtenidos son apropiados para enfrentamiento al desgaste abrasivo con ligero impacto. En correspondencia con dicha composición y las condiciones de enfriamiento, la microestructura en todos los casos es mayoritariamente martensita (con probable presencia de bainita en algunos casos), con presencia de austenita residual, similar a la del fundente comercial de referencia.
3. Los valores de microdureza del microconstituyente duro (martensita o martensita y bainita) son gobernados por el contenido de carbono, asociado al aumento de la tetragonalidad de la martensita. La dureza de los depósitos es linealmente gobernada por la microdureza del microconstituyente duro. El fundente "A" es considerado el de mejores propiedades para enfrentar el desgaste abrasivo, con dureza similar a la del comercial de referencia.
4. De acuerdo con los resultados de ensayos comparativos de desgaste, el fundente "A", muestra un desempeño relativamente similar (un 6 % menos resistente) al del fundente comercial MF-30/USH-600.

## **Recomendaciones**

1. Dar continuidad a la investigación, realizando un estudio detallado de impacto ambiental y un estudio de desgaste de los depósitos del plan experimental.
2. Usar el trabajo como referencia metodológica para estudios similares.
3. Realizar estudios de otras aplicaciones para las escorias de acería.

## Bibliografía:

1. ASM Handbook. Friction, wear and lubrication. ASM International, Vol 18. 1992.
2. ASTM E 10. Standard test method for Brinell hardness of metallic materials. ASTM International 2007. Pp 1 – 32.
3. ASTM E 384. Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM International 2001. Pp 1 – 24.
4. ASTM E3 -11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
5. ASTM E340-15, Standard practice for macroetching metals and alloys
6. ASTM G132 -96, Standard Test Method for Pin Abrasion Testing
7. ASTM G40 -02 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion
8. ASTM G407 -99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys
9. ASTM G65 -00, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus
10. Avner S. H. Introducción a la metalurgia física. 2ª edición. McGraw-Hill. México 1990. 695 pág.
11. AWS, Welding Handbook, (1991) 8ª Edición, Volumen 2, Welding Processes,
12. Boza Regueira M, Utilización de las escorias de acería como material de construcción, Ciencia & Futuro V,1 No, 4 Año 2011.
13. Bravo E, Obtención de depósitos metálicos resistentes al desgaste abrasivo empleando fundentes aleados desarrollados a partir de escorias de soldadura, (2005), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
14. Buttery, T, C., Shammatt, M,A., Travers, D,N, (1979), Die wall reaction and friction during compaction of some direct compression base, Proceedings, J Pharm Pharmacol.
15. Camara Ronaldo, Estudio do comportamento do coeficiente de desgaste dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo, (2006)
16. Cary, H,B, Modern Werding Technology, (1998), Edición 4ta, 780 pp, Editorial Prentici Hall, Upper Soddle River, New Jersey, Columbus, Ohio.
17. Cendan, C, Desarrollo de un fundente para recargue por SAW a partir de escorias de afino del acero y con adición de cenizas de paja de arroz, (2018),

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

18. Coronado J. J., Caicedo H. F., Gómez A. L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International* 42. 2009. 745–749.
19. Cruz A., Quintana R., García L., Perdomo L., Jiménez G., Gómez C.R., Alguacil F.J, y Cores A, Empleo de escorias de soldadura del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la obtención de un nuevo fundente aglomerado aleado, *Rev, Metal, Madrid* 41 (2005), P 3-11).
20. Cruz Crespo A., Quintana Puchol, R., Perdomo González, L., Gómez Pérez C, Fundente fundido del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la soldadura por arco sumergido, Certificado de concesión: N° 23173, Organización: Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual (OCPI), Cuba, Resolución N° 3116/06.
21. Cruz, A, Desgaste, Material didáctico, UCLV, 2012.
22. Cruz, A, et al, Castellanos, G, Díaz, E, Estudio de los Vínculos de la Composición de un Fundente Fundido con su Estructura y Propiedades, (2007), *Soldagem Insp, São Paulo*, pág,305-315.
23. Cruz, A, et al, Fundente Aglomerado Aleado Obtenido a Partir de Escorias de Alta Sílice y Alto Manganeso, (2004), *Soldagem & Inspeção, São Paulo*, Año 9, No, 2 Junho.
24. Cruz, A, Quintana et al, Empleo de escorias de soldadura del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la obtención de un nuevo fundente aglomerado aleado, (2005), *Revista de metalurgia, Madrid* 41 págs, 3-11.
25. Cruz, A, Scotti A, Efecto sobre la Dilución de la Granulometría de la Ferroaleación en el Alma de Eléctrodos Tubulares Revestidos bajo lá Influencia de lá Composición del Revestimiento, (2011), *Soldagem & Inspeção, São Paulo*, pág,079-085.
26. Gómez, C R, Introducción al estudio de los fundentes fundidos, (2012), [www.monografias.com](http://www.monografias.com) (consultada 14/5/2014).
27. Guliáev A,P, Metalografía, (1983), Mir, Editor, Moscú, Tomo II pág,25-29.

28. Huang Yi, Guoping Xu, Huigao Cheng, Junshi Wang, Yinfeng Wan, Hui Chen, An overview of utilization of steel slag, *Procedia Environmental Sciences* 16 (2012) 791 – 801 (The 7th International Conference on Waste Management and Technology), Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
29. Jerez Pereita R, Matriz fundida vítrea obtenida a partir de la reducción carbotérmica de residuales sólidos industriales destinada a fundentes aglomerados aleados para la soldadura automática, Tesis Doctoral, UCLV, 2006, 150
30. Méndez Piña A, Proyecto sobre residuos: Utilización de escorias como sustitutos de áridos, Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental, Escuela de Organización Industrial, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011
31. Moore, M, A, (1981), *Abrasive Wear: Fundamentals of Friction and Wear of Materials*, ASM, 73,
32. Ochoa A., Macías R,I, Aspectos teóricos sobre el desgaste abrasivo en los elementos de trabajo de las máquinas agrícolas en Cuba, 2006,
33. Patón, E,O, et al,.: Soldadura automática bajo fundente, Kiev, Editorial Mashqiz, 1948, pp 344, Portal, D, G.: Desarrollo de fundentes no fundidos para el relleno de rodillos de bulldozer y piezas que trabajan en condiciones similares, Tesis Doctoral, U,C,L,V, 1994
34. Peters, M.S.: *Plant Design and economics for chemical engineers*. 2da edición. Ed. Pueblo y Educación.1980
35. Quiminet, (2000), Quiminet.com, Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/queson-las-bombas-peristalticas-32689.htm>
36. Quintana Puchol, R., Perdomo González, L., Cruz Crespo A., Gomez Pérez C, Fundente fundido para la soldadura automática bajo arco sumergido (SAW) y procedimiento de obtención, Certificado de Patente Nro.:23018, Tomo:001; folio: 02, Año 2004
37. Quintana Puchol, R., Perdomo González, L., Cruz Crespo A., Gomez Pérez C, Procedimiento de obtención simultanea de escoria esponjosa y aleaciones de cromo destinadas a la confección de fundentes aglomerados para la soldadura

- automática bajo fundentes (SAW), Certificado de Patente Nro.:22793, Tomo:001; folio: 024 del libro correspondiente al año 2002,
38. Sedriks and T, O, Mulhearn, the effect of Work-Hardening on the Mechanics of Cutting in Simulated Abrasive Processes, *Wear*, Vol, 7,1964, p 451,
  39. Smith W. y Hashemi J. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 4ta edición. Mc Graw Hill, 2006. 1210 p.
  40. Streeter Victor L, Mecánica de Fluidos, novena edición, 1999.
  41. Stroud, W, (1994) Hardness Effect, *Tribology International*, 27, 233,
  42. Suwardjo W,, Fidalgo Y,, García L,, Santiesteban A,, Bolivar J,, Kindelan M,, Perez H, Caracterización, formulación y micro peletización de escorias metalúrgicas para su empleo en la agricultura, XI Congreso Metalúrgico Cubano, MTALURGIA 2005, ISSN 1607-6281, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, julio de 2005,
  43. Trujano Galicia A, Coeficientes tribológicos para aceros al carbono AISI 1045 y acero aleado AISI 4140, 2011, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, México,
  44. Valdez, Á, et al, Influencia de la Forma de los Granos del Fundente Fundido CIS-F10 en la Morfología y Propiedades del Metal Depositado, (2010), *Soldagem Insp*, p, pág 141-149,
  45. Vyslovovzil Z, Ciencia de Materiales para ramas de metales, (1971), Editorial de Ciencia y Técnica, La Habana: Instituto Cubano del Libro pág, 230-253,
  46. Xiang-Tao D., Zhao-Dong W., Yi H., Hui Z., Guo-Dong W. Microstructure and Abrasive Wear Behavior of Medium Carbon Low Alloy Martensitic Abrasion Resistant Steel. *Journal of iron and steel research, international*. 2014, Vol. 2, No 1. P 98-103).
  47. Yasser, S,R,, Obtención de FeCrMn para el desarrollo de materiales para soldar, (2002), Centro de Investigación de Soldadura, Facultad de ingeniería Mecánica, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas, Santa Clara,
  48. Zaragoza Valdés R,; Nasur Bogachkov A,; Alix A, Concepción Gómez; Daysarih Tápanes Robau, Utilización de las escorias del horno de arco eléctrico como arido en la fabricación de bloques para la construcción, 5ta Convención y Feria

Internacionales, METANICA 2000, ISSN 1607-6281, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, del 17 al 21 de julio de 2000,  
49. Zum Gahr, Karl-Heinz, (1987), Microstructure and wear of materials, Elsevier,

### Anexo 3.1 Procesamiento estadístico del área de refuerzo

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Area Refuerzo (mm<sup>2</sup>)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	1617,11	1	1617,11		
Lineal	38,0835	2	19,0418	2,60	0,1537
Cuadrático	12,3314	3	4,11047	0,39	0,7700
Cúbico Especial	21,0515	1	21,0515	3,99	0,1837
Error	10,543	2	5,27148		
Total	1699,12	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	2,7057 3	46,44	28,58
Cuadrático	3,2452 3	61,47	0,00
Cúbico Especial	2,2959 7	87,14	48,58

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Area Refuerzo. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que

0,05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo media es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para Area Refuerzo**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Gl Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	71,4665	6	11,9111	2,26	0,3382
Error total	10,543	2	5,27148		
Total (corr.)	82,0094	8			

R-cuadrada = 87,1442 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 48,5769 por ciento

Error estándar del est. = 2,29597

Error absoluto medio = 0,881086

Estadístico Durbin-Watson = 1,15525 (P=0,1120)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,235113

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es mayor o igual que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre Area Refuerzo y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 87,1442% de la variabilidad en Area Refuerzo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 48,5769%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2,29597. El error medio absoluto (MAE) de 0,881086 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos

para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### **Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para Area Refuerzo**

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámet</i>	<i>Estimad</i>	<i>Estánd</i>	<i>T</i>	<i>Valor-</i>
<i>ro</i>	<i>o</i>	<i>ar</i>		<i>P</i>
A:X1	- 7,51644	8,2640 7		
B:X2	- 48,7164	44,339 9		
C:X3	15,1136	2,2443 7		
AB	147,678	79,763	1,85146	0,2053
AC	51,276	21,672 3	2,36597	0,1416
BC	81,732	66,638 5	1,2265	0,3448
ABC	- 191,916	96,036 3	-1,99837	0,1837

R-cuadrada = 87,1442 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 48,5769 por ciento

Error estándar del est. = 2,29597

Error absoluto medio = 0,881086

Estadístico Durbin-Watson = 1,15525 (P=0,1120)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,235113

**El StatAdvisor**

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Area Refuerzo} = - 7,51644 * X_1 - 48,7164 * X_2 + 15,1136 * X_3 + 147,678 * X_1 * X_2 + 51,276 * X_1 * X_3 + 81,732 * X_2 * X_3 - 191,916 * X_1 * X_2 * X_3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Area Refuerzo

Valor óptimo = 19,1144

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	82,1899
X2	2,0	7,0	2,0
X3	5,0	20,0	15,8101

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Area Refuerzo sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.2 Procesamiento estadístico del carbono en el depósito diluido

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para C (%)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de GI</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	11,6508	1	11,6508		
Lineal	0,742083	2	0,371042	5,72	0,0407
Cuadrático	0,111053	3	0,0370176	0,40	0,7647
Cúbico Especial	0,0286017	1	0,0286017	0,23	0,6794
Error	0,249618	2	0,124809		
Total	12,7822	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0,25471 3	65,59	54,12
Cuadrático	0,30453 2	75,41	34,42
Cúbico Especial	0,35328 3	77,94	11,75

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en C. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0,05, asumiendo

que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo lineal.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para C**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Lineal	0,742083	2	0,371042	5,72	0,0407
Error total	0,389272	6	0,0648787		
Total (corr.)	1,13136	8			

R-cuadrada = 65,5924 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 54,1232 por ciento

Error estándar del est. = 0,254713

Error absoluto medio = 0,178889

Estadístico Durbin-Watson = 1,47494 (P=0,2318)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,165267

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre C y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 65,5924% de la variabilidad en C. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 54,1232%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,254713. El error medio absoluto (MAE) de 0,178889 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si

haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### Lineal Resultados de Ajuste de Modelo para C

		Error	Estadísti	
			co	
Parámet	Estimad	Estánd	T	Valor-
ro	o	ar		P
A:X1	0,59777 8	0,24753 7		
B:X2	2,92278	0,53698 2		
C:X3	0,90277 8	0,16980 9		

R-cuadrada = 65,5924 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 54,1232 por ciento

Error estándar del est. = 0,254713

Error absoluto medio = 0,178889

Estadístico Durbin-Watson = 1,47494 (P=0,2318)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,165267

### El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$C = 0,597778 \cdot X_1 + 2,92278 \cdot X_2 + 0,902778 \cdot X_3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes.

Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar C

Valor óptimo = 1,57611

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	78,0
X2	2,0	7,0	7,0
X3	5,0	20,0	15,0

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza C sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.3 Procesamiento estadístico del manganeso en el depósito diluido

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Mn (%)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	37,2914	1	37,2914		
Lineal	5,29017	2	2,64508	57,91	0,0001
Cuadrático	0,0187778	3	0,00625926	0,07	0,9702
Cúbico Especial	0,0232067	1	0,0232067	0,20	0,6985
Error	0,232071	2	0,116036		
Total	42,8556	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0,21371 9	95,07	93,43
Cuadrático	0,29170 6	95,41	87,77
Cúbico Especial	0,34064	95,83	83,32

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Mn. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0,05, asumiendo

que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo lineal.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para Mn**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Lineal	5,29017	2	2,64508	57,91	0,0001
Error total	0,274056	6	0,0456759		
Total (corr.)	5,56422	8			

R-cuadrada = 95,0747 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,4329 por ciento

Error estándar del est. = 0,213719

Error absoluto medio = 0,152716

Estadístico Durbin-Watson = 1,25625 (P=0,1450)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,257091

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Mn y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95,0747% de la variabilidad en Mn. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 93,4329%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,213719. El error medio absoluto (MAE) de 0,152716 es el valor promedio de los

residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### Lineal Resultados de Ajuste de Modelo para Mn

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámet</i>	<i>Estimad</i>	<i>Estánd</i>	<i>T</i>	<i>Valor-</i>
<i>ro</i>	<i>o</i>	<i>ar</i>		<i>P</i>
A:X1	1,02722	0,20769 8		
B:X2	0,13222 2	0,45056		
C:X3	3,34222	0,14248		

R-cuadrada = 95,0747 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,4329 por ciento

Error estándar del est. = 0,213719

Error absoluto medio = 0,152716

Estadístico Durbin-Watson = 1,25625 (P=0,1450)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,257091

### El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$Mn = 1,02722 * X_1 + 0,132222 * X_2 + 3,34222 * X_3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes.

Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Mn

Valor óptimo = 3,34222

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	78,0
X2	2,0	7,0	2,0
X3	5,0	20,0	20,0

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Mn sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.4 Procesamiento estadístico del cromo en el depósito diluido

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Cr (%)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de GI</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	2,7889	1	2,7889		
Lineal	0,330017	2	0,165008	23,47	0,0015
Cuadrático	0,00315	3	0,00105	0,08	0,9661
Cúbico Especial	0,00682667	1	0,00682667	0,42	0,5818
Error	0,0322067	2	0,0161033		
Total	3,1611	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0,08384 84	88,67	84,89
Cuadrático	0,11406 6	89,51	72,03
Cúbico Especial	0,12689 9	91,35	65,39

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Cr. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0,05, asumiendo

que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo lineal.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para Cr**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Lineal	0,330017	2	0,165008	23,47	0,0015
Error total	0,0421833	6	0,00703056		
Total (corr.)	0,3722	8			

R-cuadrada = 88,6665 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 84,8887 por ciento

Error estándar del est. = 0,0838484

Error absoluto medio = 0,0637037

Estadístico Durbin-Watson = 1,55729 (P=0,2694)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,138219

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Cr y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 88,6665% de la variabilidad en Cr. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 84,8887%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0838484. El error medio absoluto (MAE) de 0,0637037 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si

haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

#### Resultados de Ajuste de Modelo para Cr

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
A:X1	0,388333	0,081486		
B:X2	-0,101667	0,176768		
C:X3	0,888333	0,0558989		

R-cuadrada = 88,6665 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 84,8887 por ciento

Error estándar del est. = 0,0838484

Error absoluto medio = 0,0637037

Estadístico Durbin-Watson = 1,55729 (P=0,2694)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,138219

#### **El StatAdvisor**

Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$Cr = 0,388333 \cdot X1 - 0,101667 \cdot X2 + 0,888333 \cdot X3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes.

Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

## Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Cr

Valor óptimo = 0,888333

<i>Facto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptim</i>
<i>r</i>			<i>o</i>
X1	78,0	88,0	78,0
X2	2,0	7,0	2,0
X3	5,0	20,0	20,0

## El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Cr sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.5 Procesamiento estadístico del silicio en el depósito diluido

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Si (%)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	14,5924	1	14,5924		
Lineal	0,0758833	2	0,0379417	0,42	0,6760
Cuadrático	0,45815	3	0,152717	5,32	0,1017
Cúbico Especial	0,00560667	1	0,00560667	0,14	0,7449
Error	0,08056	2	0,04028		
Total	15,2126	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0,30119 7	12,24	0,00
Cuadrático	0,16947 6	86,11	62,95
Cúbico Especial	0,20069 9	87,01	48,04

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Si. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0,05, asumiendo

que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo media es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cuadrático.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### ANOVA para Si

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cuadrático	0,534033	5	0,106807	3,72	0,1544
Error total	0,0861667	3	0,0287222		
Total (corr.)	0,6202	8			

R-cuadrada = 86,1066 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 62,951 por ciento

Error estándar del est. = 0,169476

Error absoluto medio = 0,0844444

Estadístico Durbin-Watson = 1,54007 (P=0,2614)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,124081

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cuadrático actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es mayor o igual que 0,05, no hay una relación estadísticamente significativa entre Si y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 86,1066% de la variabilidad en Si. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 62,951%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,169476. El error medio absoluto (MAE) de 0,0844444 es el valor promedio de los

residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### Cuadrático Resultados de Ajuste de Modelo para Si

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámet</i>	<i>Estimad</i>	<i>Estánd</i>	<i>T</i>	<i>Valor-</i>
<i>ro</i>	<i>o</i>	<i>ar</i>		<i>P</i>
A:X1	1,92333	0,46584 6		
B:X2	- 5,11167	2,96852		
C:X3	1,04833	0,15211		
AB	5,49	4,70125	1,16777	0,3273
AC	-0,36	1,07854	- 0,33378 4	0,7605
BC	10,62	4,31416	2,46166	0,0907

R-cuadrada = 86,1066 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 62,951 por ciento

Error estándar del est. = 0,169476

Error absoluto medio = 0,0844444

Estadístico Durbin-Watson = 1,54007 (P=0,2614)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,124081

### El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cuadrático ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$Si = 1,92333*X_1 - 5,11167*X_2 + 1,04833*X_3 + 5,49*X_1*X_2 - 0,36*X_1*X_3 + 10,62*X_2*X_3$$
 en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

**Optimizar Respuesta**

Meta: maximizar Si

Valor óptimo = 1,59024

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	88,0
X2	2,0	7,0	2,90467
X3	5,0	20,0	9,09533

**El StatAdvisor**

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Si sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.6 Procesamiento estadístico de la microdureza del constituyente duro

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Microdureza (HV)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón- F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	2,89317E6	1	2,89317E6		
Lineal	104789,	2	52394,3	15,59	0,0042
Cuadrático	8849,3	3	2949,77	0,78	0,5775
Cúbico Especial	104,28	1	104,28	0,02	0,9040
Error	11206,4	2	5603,2		
Total	3,01812E6	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R- Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	57,965 5	83,87	78,49
Cuadrático	61,402 2	90,95	75,86
Cúbico Especial	74,854 5	91,03	64,12

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Microdureza. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que

0,05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo lineal.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para Microdureza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Lineal	104789,	2	52394,3	15,59	0,0042
Error total	20160,0	6	3360,0		
Total (corr.)	124949,	8			

R-cuadrada = 83,8654 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 78,4872 porciento

Error estándar del est. = 57,9655

Error absoluto medio = 40,6383

Estadístico Durbin-Watson = 2,28607 (P=0,6533)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,260633

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Microdureza y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 83,8654% de la variabilidad en Microdureza. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78,4872%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 57,9655. El error medio absoluto (MAE) de 40,6383 es el valor promedio

de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### Lineal Resultados de Ajuste de Modelo para Microdureza

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámet</i>	<i>Estimad</i>	<i>Estánd</i>	<i>T</i>	<i>Valor-</i>
<i>ro</i>	<i>o</i>	<i>ar</i>		<i>P</i>
A:X1	436,961	56,332 3		
B:X2	1226,66	122,20 2		
C:X3	433,761	38,643 6		

R-cuadrada = 83,8654 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 78,4872 por ciento

Error estándar del est. = 57,9655

Error absoluto medio = 40,6383

Estadístico Durbin-Watson = 2,28607 (P=0,6533)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,260633

### El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Microdureza} = 436,961 \cdot X_1 + 1226,66 \cdot X_2 + 433,761 \cdot X_3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes.

Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la

lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

### **Optimizar Respuesta**

Meta: maximizar Microdureza

Valor óptimo = 700,194

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	88,0
X2	2,0	7,0	7,0
X3	5,0	20,0	5,0

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Microdureza sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

### Anexo 3.7 Procesamiento estadístico de la dureza del depósito

#### Efectos Estimados del Modelo Completo para Dureza (HV)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	2,05588E6	1	2,05588E6		
Lineal	73998,4	2	36999,2	10,12	0,0120
Cuadrático	13499,1	3	4499,7	1,60	0,3543
Cúbico Especial	94,2507	1	94,2507	0,02	0,8943
Error	8339,74	2	4169,87		
Total	2,15181E6	9			

#### Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	60,4608	77,14	69,52
Cuadrático	53,022	91,21	76,56
Cúbico Especial	64,5745	91,31	65,23

#### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Dureza. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyen productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0,05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, parece

que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo lineal.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

### **ANOVA para Dureza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Lineal	73998,4	2	36999,2	10,12	0,0120
Error total	21933,1	6	3655,51		
Total (corr.)	95931,5	8			

R-cuadrada = 77,1367 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 69,5156 por ciento

Error estándar del est. = 60,4608

Error absoluto medio = 43,7531

Estadístico Durbin-Watson = 2,06687 (P=0,5365)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,133464

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Dureza y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 77,1367% de la variabilidad en Dureza. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 69,5156%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 60,4608. El error medio absoluto (MAE) de 43,7531 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos

en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

### Lineal Resultados de Ajuste de Modelo para Dureza

		Error	Estadísti	
Parámetro	Estimado	Estándar	T	Valor-P
A:X1	387,028	58,7574		
B:X2	1021,18	127,463		
C:X3	357,478	40,3072		

R-cuadrada = 77,1367 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 69,5156 por ciento

Error estándar del est. = 60,4608

Error absoluto medio = 43,7531

Estadístico Durbin-Watson = 2,06687 (P=0,5365)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,133464

### El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Dureza} = 387,028 \cdot X_1 + 1021,18 \cdot X_2 + 357,478 \cdot X_3$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes.

Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Dureza

Valor óptimo = 598,411

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
X1	78,0	88,0	88,0
X2	2,0	7,0	7,0
X3	5,0	20,0	5,0

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Dureza sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.