



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA



TÍTULO: Estudio para el aumento de la vida útil de los álabes de los Exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney, mediante la aplicación de relleno superficial por soldadura.

Autor: Luis E. Perdomo Alvarez

Tutor: Dr. Eduardo M. Díaz Cedré.

Santa-Clara

2013

" Año 55 de la Revolución "



El éxito no es la clave de la felicidad. La felicidad es la clave del éxito. Si amas lo que estás haciendo, vas a ser exitoso”
Albert Schweitzer

A mis padres por haberme traído a este mundo real y maravilloso y por convertirme en un hombre de bien.

A Victor R. Santos Melian, alguien muy especial que no puedo dejar de mencionar, porque ha sido un padre de esmero y consagración para mí en todo momento, por su apoyo, protección, por haber sido una fuente de enseñanza, haberme instruido desde niño, ya que sin él no hubiese sido la persona que soy hoy.

A esa madre tan grande y bella que tengo la cual desde pequeño me ha conducido por la senda correcta.

A mi hermano que siempre me ha apoyado y servido de ejemplo.

A mis abuelos Sonia, Hugo, Luis y Alicia, Dios lo tengo en la gloria.

Agradezco a mis tías Mary e Ileana por su apoyo incondicional.

A mi novia que me ha apoyado en todo este tiempo sin escatimar.

A todas aquellas personas que han confiado en mí.

Agradecimientos

El empeño personal no es suficiente para la realización de una obra, se necesita el apoyo de muchos que a veces sin percatarse nos inspiran, nos sugieren ideas o nos señalan dificultades. Por ello agradezco.

Primeramente a Dios por estar conmigo en todo momento y por permitirme lograr este sueño.

Agradecer a mi tutor el Dr. Eduardo M. Díaz Cedre por haberme apoyado en este trabajo de diploma y haber confiado en mí para la elaboración del mismo, además de ser un ejemplo a seguir para mi desarrollo profesional y personal, ya que constituyó un amigo y un padre, que me supo ofrecer sus consejos para encaminarme en la vida.

A todos mis amigos de curso, en especial al Chino, Roberto, Kalimba, Javier, Alberto, Pablo, e Ignacio con los que he podido contar en todo momento.

A todos los profesores que transmitieron sus conocimientos y experiencias profesionales.

A los compañeros de la Fábrica de Cemento que sin su apoyo y dedicación no hubiese sido posible este trabajo en particular a Carbajal, Saul padre, Saul hijo, Alexis, Omar, y Marcial.

A todas aquellas personas que aportaron un granito de arena para lograr este sueño. A aquellos que mantuvieron una actitud positiva en los momentos buenos y malos que con ahinco se mantuvieron firmes sin fluctuar.

A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.

Introducción.....	1
Capítulo I: Revisión Bibliográfica	
1.1 El cemento como material de construcción	4
1.2 Proceso de producción del cemento en la fábrica Cemento Siguaney	4
1.3 Exhustores, problemas de desgaste	9
1.4 Desgaste de los elementos que conforman el Exhaustor	11
1.5 Propiedades de las partículas	14
1.6 Tecnologías utilizadas para la protección de los álabes en el Exhaustor.	18
1.7 Selección del proceso tecnológico (Posibilidad y Realidad)	19
1.7.1 Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)	19
1.7.2 Soldadura por arco con electrodo tubular continuo y con núcleo de fundente (FCAW).....	22
1.7 Selección de una aleación para el relleno superficial de los álabes que conforman el Exhaustor	24
Capítulo II: Materiales y Métodos	
2.1 Materiales y Métodos.....	29
Capítulo III: Resultados y Discusión	
3.1 Resultados y Análisis.....	33
3.1.1 Parámetros de consumo	33
3.1.2 Dureza de los depósitos y caracterización metalográfica	37
3.1.3 Ensayo de desgaste	40
3.2 Evaluación económica.....	46
Conclusiones	50
Recomendaciones.....	51
Bibliografía.....	52

Resumen.

El presente trabajo consiste en un estudio del comportamiento técnico-operacional de electrodos revestidos para el recubrimiento duro por arco manual, con posibilidades de ser utilizados en la protección de álabes de los exhaustores para el enfriamiento del clínker en la Fábrica Cemento Siguaney. Para ello se evaluaron tres materiales de aporte recomendados para la protección de elementos sometidos al desgaste abrasivo en su modalidad erosivo. Se realizaron depósitos con diferentes niveles de corriente de soldadura según la información dada por el fabricante, determinándose las características técnico-operativas de los consumibles de soldadura estudiados, tales como: tasa de fusión y deposición, rendimiento real; así como se establecieron las propiedades de los depósitos en cuanto a estructura metalográfica y dureza. Finalmente se desarrolló un ensayo de desgaste comparativo en condiciones reales de servicio, demostrando de esta manera la factibilidad de la protección de manera satisfactoria de este tipo de elementos. El análisis integrado de estas características posibilitó la selección del metal de aporte más adecuado, así como la mejor corriente de soldadura para esta aplicación concreta.

Abstract

The present work is a study of the technical and operational behavior of coated electrodes for manual arc hardfacing, with potential to be used in protecting the exhausters blades for cooling the clinker in Siguaney Cement Factory. We evaluated three filler materials recommended for protection of elements subjected to abrasive wear in erosive mode. Deposits were made with different welding current levels according to information given by the manufacturer, to determine the technical and operational characteristics of the studied welding consumables, such as melting and deposition rate, actual yield and properties were established deposits regarding metallographic structure and hardness. Finally developed a comparative wear test actual service conditions, thus demonstrating the feasibility of satisfactory protection of such elements. The integrated analysis of these features enabled the selection of the most suitable filler metal and welding current the best for this particular application.

Introducción

El incremento de la vida útil de los equipos y piezas constituye uno de los problemas fundamentales en la industria moderna y uno de los temas más debatidos. La mayoría de los análisis estadísticos efectuados al respecto indican que la causa fundamental de sustitución y reparación de equipos y componentes es el desgaste sufrido bajo las condiciones de trabajo [1].

La industria cementera es un caso donde esto se pone de manifiesto, debido a la gran heterogeneidad de los materiales que manipulan los equipos que forman parte de la misma (Fe_2O_3 , CaCO_3 , SiO_2 , Ca_2O_3 , Zeolita, etc.) [2]. La mayoría de estos equipos están sometidos a severos regímenes de trabajo, predominando la alta abrasión, que en muchas ocasiones viene acompañada de determinados niveles de impactos y en muchos casos altas temperaturas. La erosión a pesar de ser considerada por la literatura una variante de la abrasión, posee sus particularidades en cuanto a la forma en que ocurre el deterioro de la superficie, la que está dada por la presencia del medio que suspende las partículas abrasivas. Si este medio es un gas caliente, la transferencia del calor al cuerpo en que hace contacto, puede constituir un elemento intensificador del desgaste, ya que facilita el corte o la deformación de la superficie [3].

Un caso concreto donde se pone de manifiesto este tipo de desgaste, lo constituyen los álabes de los exhaustores. Este elemento es el encargado de manipular los gases con partículas en suspensión provenientes del proceso de enfriamiento de los ciclones a la atmosfera. Desde el punto de vista químico, estas partículas están formadas por Fe_2O_3 , CaCO_3 , SiO_2 , Ca_2O_3 , Zeolita, etc.) De todos estos, la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3), son los principales responsables del desgaste que ocurre en los álabes de la exhaustores, debido a la elevada dureza que poseen estos materiales y la acción mecánica del soplado [4].

Una práctica reconocida para solucionar este tipo de problema es la aplicación de aleaciones resistentes a este mecanismo de desgaste mediante recubrimiento superficial por soldadura [5]. Sin embargo, en el caso particular de la Fábrica de cemento Siguaney, existen en los almacenes tres tipos de consumible recomendados para la aplicación antes citada, sin tener una completa certeza de cual utilizar para este tipo de pieza en particular:

Problema práctico: La vida útil de los álabes en los Exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney es extremadamente corta (30 días). El deterioro de los mismos provoca interrupciones constantes, generando gastos considerables, tanto en su sustitución como en el proceso productivo.

Hipótesis: Si se protegen mediante relleno superficial por soldadura los álabes de los Exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney, usando el material de aporte adecuado para tales condiciones de trabajo, es posible incrementar su vida útil, disminuyendo las paradas por esta causa.

De lo anterior se deriva el siguiente objetivo general:

Objetivo General: Estudiar el comportamiento técnico operacional de consumibles de soldadura, que permita su selección para la protección de los álabes de los Exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney

Objetivos Específicos:

1. Estudiar las características del proceso productivo donde están ubicados los Exhaustores en la Fábrica de Cemento Siguaney.
2. Determinar los mecanismos de desgaste que causan el deterioro de los elementos que entran en contacto con el clínker en la Fábrica de Cemento Siguaney.
3. Seleccionar el proceso de soldadura y los materiales de aporte posibles a aplicar en la protección de los álabes de los Exhaustores en la Fábrica de Cemento Siguaney.
4. Determinar el comportamiento técnico operativo de los materiales de aporte posibles a aplicar en la protección de los álabes de los Exhaustores en la Fábrica de Cemento Siguaney.

Tareas:

- Revisión bibliográfica sobre las características de los exhaustores, así como de los mecanismos fundamentales de desgaste a que están sometidos los elementos principales que conforman este equipo.
- Determinar los procesos de relleno superficial por soldadura que pueden ser utilizados para incrementar la vida útil de los álabes ubicados en los exhaustores de la fábrica de cemento.

- Determinar el comportamiento tecnológico de varios aportes con posibilidades de ser utilizado en la protección de los álabes exhaustores de la fábrica de cemento.
- Realización del análisis económico del proceso.

Capítulo I

1.1 El cemento como material de construcción.

El cemento es una mezcla de piedra caliza y arcilla, triturada y calcinada hasta el punto fundente, convertida en una escoria granulada llamada clínquer que se muele con una pequeña proporción de yeso (sulfato de calcio) hasta quedar finamente pulverizada. Es el aglutinante básico del hormigón y de muchos otros productos que se utilizan en la construcción, tales como: mosaicos, baldosas, bloques, asbestos cemento, tubos para acueducto y alcantarillado, etc [6].

El cemento Portland ha llegado a una gran perfección, ya que es el material industrializado de mayor consumo, con costo de producción relativamente bajos en comparación con otros materiales, presenta unas propiedades adecuadas para las metas que se quieran alcanzar. Está compuesto básicamente por caliza, arcilla y yeso los cuales están abundantes en la naturaleza. A principios del siglo xx el cemento llego a popularizarse convirtiéndose en un material estratégico para el desarrollo de cualquier país.

En Cuba existen 3 grandes fábrica productoras de este material, ubicadas en La Habana, Santiago de Cuba y Sancti-Espíritus. En el caso particular de la Fábrica de Cemento de Siguaney, ubicada en la provincia de Sancti-Espíritus a pesar de no ser una planta caracterizada por su alto volumen de producción, si constituye el laboratorio de la industria cementera cubana, debido a la diversidad en sus producciones (cemento blanco, cemento mortero, cemento impermeabilizante, cemento subacuático y el metacaolín) [7]. Toda esta amalgama de producto genera que la mayoría de su equipamiento tecnológico este sometido a condiciones de extrema abrasión.

1.2 Proceso de producción del cemento en la fábrica Cemento Siguaney.

Para poder realizar cualquier análisis vinculado a la protección de piezas por soldadura es importante conocer los elementos vinculados al proceso de producción, para de esa forma tener una idea sobre los principales factores vinculados al proceso productivo y que pueden influir en el desgaste de las piezas. Es por ello que a continuación se detallan las características que conforman dicho proceso [8].

Proceso de producción del cemento en la Fábrica de Siguaney

Las operaciones básicas a considerar en la fabricación del cemento son las siguientes:

1. Extracción, transportación y trituración.
2. Dosificación y pre homogenización.
3. Secado y molienda del crudo.
4. Homogenización.
5. Fabricación del clínquer.
6. Molienda y ensilado.
7. Expedición.

Extracción, transportación y trituración.

En la labor de extracción se utilizan actualmente máquinas perforadoras de gran rendimiento que realizan su trabajo apoyadas por grandes voladuras con barrenos desde la superficie, posterior a esta tarea, es transportada (Figura 1) toda la materia prima mediante camiones y vía ferria, luego de la transportación son situadas en almacenes o canteras (Figura 2), la piedra caliza y la Zeolita ó Tobas como también se le conoce las cuales son los únicos elementos que necesitan ser triturados para disminuir su granulación debido a los grandes volúmenes con que proviene de las minas. La arcilla es pasada por un diluidor para su posterior molienda, y el hierro pasa directamente a los molinos.



Figura 1. Extracción y transportación de las materias primas.



Figura 2. Almacenes de materias primas

Dosificación y Pre homogenización

Ya una vez triturada la piedra caliza, la arcilla diluida, y el resto de las materias primas en el almacén, se procede a la dosificación y pre mezcla de los componentes que pasaran a la molienda (algunos de los elementos de ajuste puede adicionarse posteriormente).

Secado y molienda del crudo

Según el proceso empleado, la molienda se realiza en seco o en húmedo, en nuestro caso es húmeda, ya que a los molinos se le suministra agua. La humedad del crudo impone limitaciones técnicas en la molienda y es por ello la necesidad de un secado previo del crudo. El secado necesita unos gases que pueden tener diversas procedencias ya sea los gases de escape del mismo horno o el calor necesario para el secado se genera en un hogar auxiliar. El sistema de molienda consta de dos molinos y se realiza como un circuito abierto en el que el material que abandona el molino ya no retorna al mismo, los mismos cuentan con martillos para desmenuzar los tamaños gruesos de los componentes, pasando posteriormente al molino de bolas donde se completa el secado y se alcanza la granulometría deseada (Figura 3).



Figura 3. Molinos de pasta.

Homogenización

Dado que las materias primas utilizadas para la fabricación del clínker de cemento deben cumplir unas especificaciones definidas, antes de proceder a su cocción es necesario realizar un ajuste definitivo donde se mezclan todos los componentes (Figura 4), esta operación se conoce con el nombre de homogenización. En esta fase del proceso se determina la composición elemental del crudo resultante y se establecen relaciones numéricas entre los componentes químicos más importantes resultando una serie de módulos.



Figura 4. Proceso de homogenizado

Fabricación del clínker

Esta operación incluye los procesos comprendidos desde la alimentación del crudo hasta la salida del clínker del enfriador. Previamente, en el proceso de vía húmeda, la pasta

homogenizada se alimenta directamente al horno rotatorio (Figura 5). Los procesos físico-químicos por los que atraviesa el crudo a medida que se va calentando son los siguientes:

El crudo sufre unos procesos físico-químicos a medida que va calentándose:

1. Secado hasta una temperatura próxima a los 150°C.
2. Eliminación del agua de constitución de la arcilla hasta los 500°C.
3. Descarbonatación desde 850°C hasta unos 1.100°C.
4. Clinkerización entre 1.250 y 1.475°C.

En general las reacciones que se producen hasta la obtención del clínker son de carácter fuertemente endotérmico consumiéndose entre 380 y 440 kcal/kg de clínker



Figura 5. Horno rotatorio de secado

Molienda y Acabado

El clínker a su salida del enfriador es enviado a los correspondientes silos, de donde es extraído y mezclado con el yeso y las restantes adiciones, en la calidad y proporciones adecuadas al cemento que se desea fabricar. La mezcla dosificada de componentes es molida hasta la granulometría necesaria. Usualmente, no son requeridos en esta fase del proceso aportes de energía térmica ya que el propio calor residual del clínker y el desarrollo por fricción son suficientes para eliminar la humedad de las adiciones.

Expedición

Finalmente fabricado el cemento pasa a los silos de almacenamiento, y luego a las empacadoras las cuales embolsan el cemento para la entrega y transportación (Figura 6).



Figura 6. Empacadora de cemento

1.3 Exhustores, problemas de desgaste

Como se mencionó en epígrafes anteriores dentro del complejo proceso productivo intervienen los exhaustores (Figura 7) los cuales son uno de los principales problemas durante la producción cemento, debido a su misma función que le corresponde jugar en el proceso de fabricación.

El clínker una vez que salga del horno, cae en un área de enfriamiento donde se le extrae el calor sobre unos enfriadores de parrilla, a los cuales se les hacen circular elevados volúmenes de aire frío desde abajo hacia arriba llegándole a bajar la temperatura del mismo unos 1000 °C, parte de este aire es succionado por el tiro del horno y el otro extraído por estos exhaustores que luego pasaran a la atmósfera, estos ventiladores son los componentes que suministran la energía al fluido para vencer la resistencia que ejercen los elementos del sistema (Figura 8), pero este aire extraído lleva partículas abrasivas desprendidas del mismo enfriamiento del clínker que luego pasan por unos colectores los cuales hacen precipitar las partículas más densas y caen al proceso de transportación del clínker, las partículas menos densa pasan y llegan a los exhaustores de aquí el desgates de los álabes. Los exhaustores tienen grandes aplicaciones en las industrias, están destinados a crear el tiro uniforme de aire [6].



Figura 7. Exhautor de la Fábrica de Cemento Siguaney.

Luego tienen que cumplir dos tareas principales:

- Extraer todos los gases caliente del proceso de secado.
- Vencer todas las pérdidas desde el horno hasta la chimenea. (Parillas, colectores, etc.).

Los exhaustores instalados en las industrias del cemento, de forma general poseen características similares entre sí, en cuanto a su estructura, posición de los álabes y materiales de que están fabricados. Sus diferencias se manifiestan fundamentalmente en cuanto a los parámetros técnicos: volumen de gases que manipulan, presión, frecuencia de rotación y otros [6].

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo hemos tomado como referencia uno de los exhaustores instalados en la cementera de Siguaney. Dentro de las partes que componen este equipo nos detendremos en el análisis del rodete y los álabes que son los elementos que sufren deterioro durante su explotación. La principal falla de estos elementos es:

1. Desgaste de los discos y los álabes.

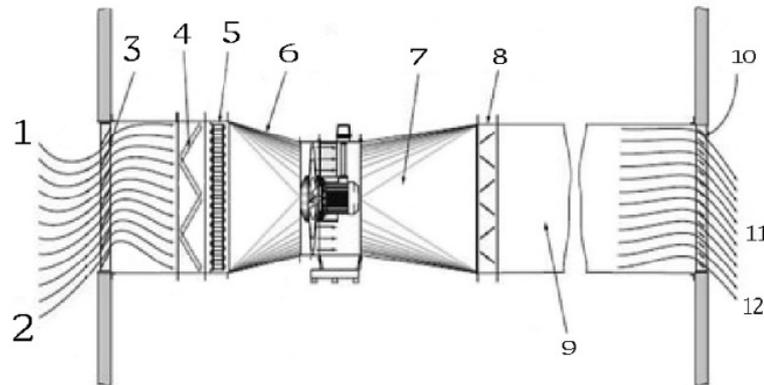


Figura 8. Sistema de ventilación.

Siendo:

1. Aire a la entrada.
2. Filtro.
3. Cambio de forma (contracción).
4. Salida del ventilador, difusor.
5. Dámetro de control o balance.
6. Conductos, codos, etc.
7. Distribuidor de entrega.

1.4 Desgaste de los elementos que conforman el exhaustor

El flujo que manipula estos exhaustores están cargados de partículas altamente erosivas [9] entre las cuales están:

- Mineral: Óxido de Hierro (Fe_2O_3)
- Caliza (CaCO_3)
- Arcilla (SiO_2) ó Argilita (SiO_2)
- Zeolita
- Yeso (Ca_2O_3)

Dentro de los minerales antes expuestos la presencia de la arcilla es la causante principal del severo desgaste erosivo a que están sometidas estas máquinas, debido a la presencia en la arcilla de materiales de alta dureza, tales como el Al_2O_3 y SiO_2 .

El desgaste erosivo se presenta en la superficie de los cuerpos, resultado de la acción de partículas sólidas que los impactan. Estas partículas pueden estar en ambientes secos o húmedos, pudiendo actuar en forma muy variadas [10].

Existe una zona en los álabes donde se produce más severamente este fenómeno durante la explotación del equipo, esta zona se encuentra situada en la parte superior de las paletas y hacia el centro, como se muestra en la (Figura 9). La zona desgastada se encuentra bastante definida.

De acuerdo a lo visto anteriormente, a las causas del desgaste erosivo que ocurre en esta parte del exhaustor, se le suman las características del material del cual está construido, un acero de bajo porcentaje de carbono, aproximadamente un ASTM A-36 [11], (Tabla 1). Por sus características (baja resistencia mecánica y dureza), este material no se considera apropiado para la función que realiza.

Tabla 1: Composición química del acero ASTM A-36 [11].

C	Cu	Mn	P y S	Si
< 0,25	0,2	0,8-1,35	0,04 – 0,05	0,4 max.

Propiedades mecánicas del ASTM A-36 [11].

- Límite de fluencia (σ_y): 250 MPa
- Tensión de rotura (σ_B): 400 – 550 MPa
- Alargamiento relativo (δ): 20 %



Figura 9. Zona desgastada del álabe.

El desgaste erosivo por partículas sólidas es el que principalmente se manifiesta en estas máquinas. En este tipo de desgaste, actúan diversas fuerzas sobre las partículas que actúan (Figura 10).

En algunas condiciones, la fuerza de gravedad puede tomar importancia, pero la fuerza dominante es la fuerza impacto de la partícula, esta es la fuerza de contacto ejercida por la superficie [12].

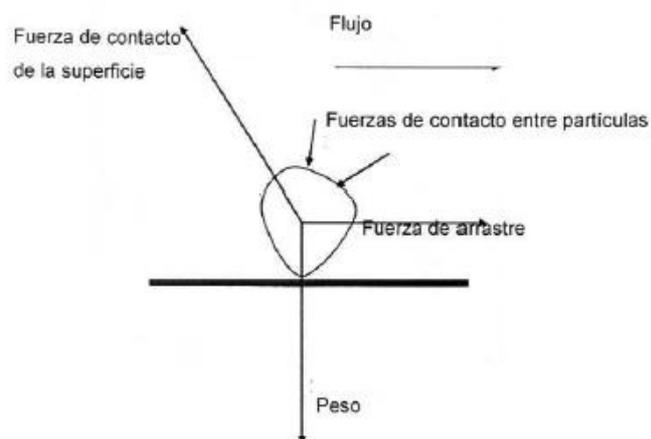


Figura 10. Fuerza de contacto partícula-superficie [15].

La pérdida de material debido al fenómeno de erosión es dependiente de varios factores interrelacionados, donde influyen las propiedades físicas y químicas de la partícula erosiva, las propiedades y las estructuras de los materiales erosionados y las condiciones del medio.

1.5 Propiedades de las partículas:

Dureza

La dureza es una de las propiedades esenciales de las partículas en relación a la cantidad de desgaste obtenido [13,14]. Las partículas con mayor dureza que la superficie a impactar causará más desgaste que aquellas partículas de menor dureza. Este comportamiento es mostrado en la (Figura 11) donde las magnitudes de desgastes de metales y cerámicos, para el sistema de abrasión de dos cuerpos, empiezan a ser muchos mayores cuando la relación de la dureza de la partícula (H_a) y la dureza de la superficie a impactar (H_s) es mayor a 1.

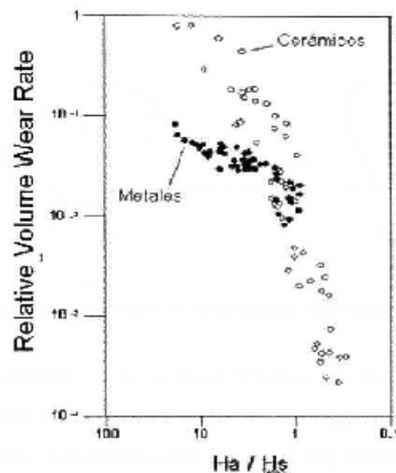


Figura 11. Desgaste para la relación de dureza partícula (H_a)-superficie (H_s) [13,14].

Este comportamiento se puede explicar con el estudio de la mecánica de contacto entre una partícula y una superficie plana. Si la superficie del material fluye plásticamente una vez que su punto de cedencia es excedido, ocurrirá un significativo flujo plástico en la superficie cuando la presión de contacto alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ($3y$). La deformación ocurrirá si la carga normal de la partícula es incrementada y solo si la partícula puede sostener la presión de contacto sin deformarse. Si la partícula falla por flujo

plástico o fractura frágil antes de que la presión sobre la superficie alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ($3Y$), ocurrirá insignificante deformación plástica en la superficie [15].

Para partículas esféricas presionadas contra la superficie, la presión de contacto máximo es alrededor de 0.8 veces su dureza de indentación. Podemos esperar que una partícula esférica con dureza (H_a) cause indentación plástica en una superficie de dureza H_s , si H_s es menor a 0.8 H_a esto es si $H_a/H_s > 1,25$. En la (Figura 12(b)) para una relación de $H_a/H_s < 1,25$ la partícula será deformada plásticamente a diferencia de lo que ocurre en la (Figura 12(a))

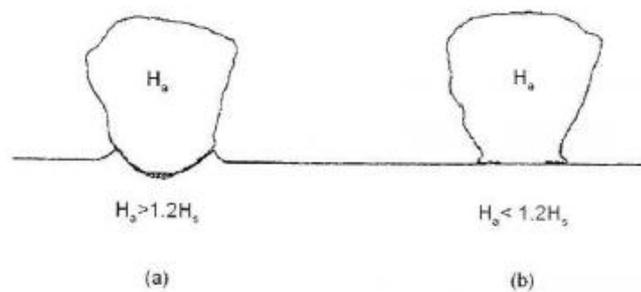


Figura: 12 Contacto entre una partícula baja carga normal y una superficie plana [15].

En la figura 13 se muestran los valores típicos de dureza para una selección de materiales. El cuarzo (óxido de silicio) es el abrasivo natural más común, formando cerca de 60% de la corteza terrestre, teniendo una dureza de alrededor de 800 kgf/mm (800 HV). Por otra parte el acero martensítico puede llegar a tener una dureza menor a 1.25 veces la dureza del cuarzo, por lo tanto es claro que aceros y metales no ferrosos serán especialmente vulnerables al desgaste erosivo por partículas de cuarzo. Justificándose de esta manera el desgaste que ocurren en todos los elementos del exhaustor que están en contacto con Al_2O_3 y SiO_2 .

Forma

Los rangos de desgastes dependen fuertemente de la forma de la partícula, donde partículas angulares causaran mayores desgastes que partículas redondeadas. Algunas de las formas en que pueden ser representadas las partículas erosivas son mostradas en la figura 14.

<i>1. Typical abrasive materials</i>	<i>Material Hardness (HV)</i>
Diamond	6000–10000
Boron carbide, B ₄ C	2700–3700
Silicon carbide	2100–2600
Alumina (corundum)	1800–2000
Quartz (silica)	750–1200
Garnet	600–1000
Magnetite, Fe ₃ O ₄	370–600
Soda-lime glass	~500
Fluorite, CaF ₂	180–190
<i>2. Phases or constituents of steels and cast irons</i>	
Ferrite, α-Fe	70–200
Pearlite (plain C)	250–320
Pearlite (alloyed)	300–460
Austenite (12% Mn)	170–230
Austenite (low alloy)	250–350
Austenite (high Cr)	300–600
Martensite	500–1000
Cementite, Fe ₃ C	840–1100
Chromium/iron carbide, (Fe,Cr) ₇ C ₃	1200–1600

Figura 13. Valores de dureza de partículas abrasivas, fases de hierro y aceros [15].

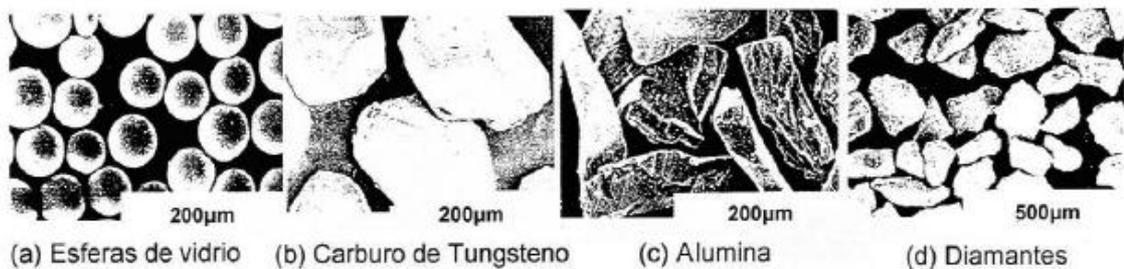


Figura 14. Partículas erosivas [15].

Un método sencillo de obtener información de la forma de la partícula es el factor de redondez (F), este puede ser definido como el área real de proyección (A) y el área de un círculo don el mismo perímetro de la proyección (P) (Ecuación 1.1.1)

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

Si $F= 1$ la proyección es un círculo, a medida que se aleja de este valor tendrá a ser partícula angular.

Tamaño

Se han encontrados diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles, donde está involucrado el tamaño de la partícula Lain Finnie [15] demostró que la cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de la partícula es menor de 100 μm .

La figura 15 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de 10 μm causan alrededor de una cuarta del desgaste que acusan las partículas de 100 micrómetro [15].

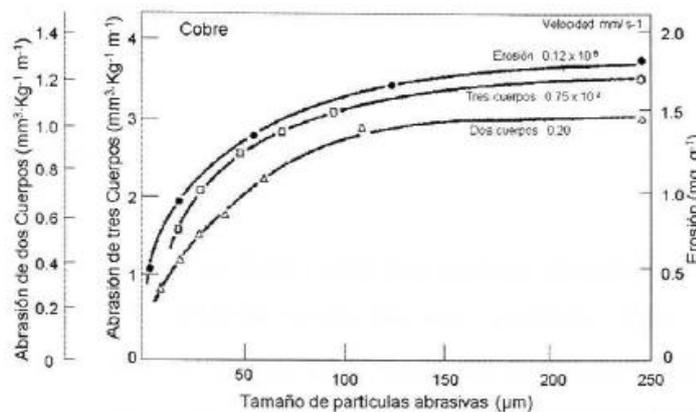


Figura 15. Desgaste en función del tamaño de la partícula. Desgaste de cobre con partículas de SiC bajo los sistemas erosión (masa perdida/ masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido/ (carga *distancia)) [15].

Dureza de la superficie

Para materiales frágiles el desgaste involucra fractura frágil y existen una fuerte dependencia con el tamaño de partícula, llegándose a presentar incluso comportamientos dúctiles en el material [14].

Cualquier que sea el mecanismo dominante, las partículas pequeñas causan afortunadamente menor desgastes. Los métodos de filtración o centrífugos son muy utilizados debido a que eliminan grandes partículas del sistema y dejan las más pequeñas, disminuyendo así, los

rangos de desgastes efectivamente. Finnie [15] llegó a la conclusión de que si al elevar la dureza de un material se incrementa su resistencia al desgaste en mecanismos como abrasión o deslizamiento, esta premisa no se aplica para materiales bajo el mecanismo de erosión figura 16. Encontrando solamente esta relación para metales puros en estado recocido (siendo la expresión el molibdeno y el tungsteno).

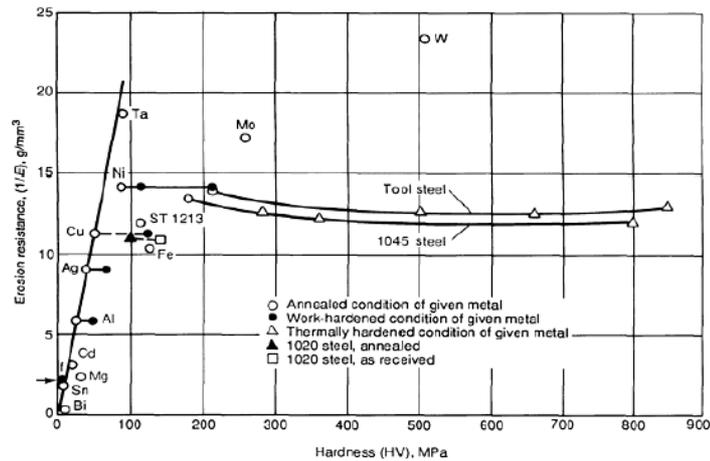


Figura 16. Resistencia a la erosión contra dureza del material. Metales puros y aceros con varios estados de endurecimiento por deformación y tratamiento térmico [15].

El incremento en la dureza de un material no tiene efecto o tiene efecto negativo en su resistencia a la erosión [14]. Se ha demostrado que al incrementar la dureza a los materiales estos exhiben un comportamiento frágil.

1.6 Tecnologías utilizadas para la protección de los álabes en el Exhaustor.

Se conoce que como solución a los problemas relacionados con el desgaste en la industria del cemento, se han tomado algunas medidas y se han realizado recuperaciones de muchas de las maquinarias instaladas. En el caso particular de los álabes de exhaustor, estas recuperaciones consisten en la sustitución de los elementos desgastados por otros nuevos, fabricados básicamente por planchas de acero de bajo porcentaje de carbono de espesor 8 mm. Sin embargo los costos de importación de estos elementos, por su grado de especificidad son altos, rondando los 1500 USD/T. Es por ello que la soldadura puede ser una herramienta capaz de ser utilizada para la protección de piezas de equipos de la industria del cemento.

1.7 Selección del proceso tecnológico (Posibilidad y Realidad)

Los procesos tecnológicos asociados al relleno ocupan un lugar fundamental en la recuperación de piezas, ya que con ellos se puede resolver en gran medida los problemas de desgaste que inutilizan las piezas. El tipo de desgaste, las dimensiones, las formas de la pieza, el tipo de material base, las condiciones de trabajo y el acceso a la zona dañada, son factores que condicionan la selección del procedimiento de recuperación a emplear, además le imprimen un sello característico de complejidad tecnológica, al requerirse en los casos más complejos de un enfoque multidisciplinario para solucionar el problema en cuestión. Las características fundamentales de la mayoría de los procesos de recuperación son las mismas que poseen dichos métodos para soldadura. La diferencia fundamental estriba en los materiales de aportación empleados [16].

Analizando la situación concreta del exhaustor y teniendo en cuenta las posibilidades que presenta los talleres de la fábrica, así como el personal capacitado y los aspectos antes señalados, los procesos de soldadura que mayor posibilidad tienen para aplicarse en el relleno de las piezas sometidas al desgaste son:

- **Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).**
- **Soldadura por arco con electrodo tubular continuo y núcleo de fundente (FCAW)**

1.7.1 Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)

El proceso de soldadura con electrodo recubierto (SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que la fusión del metal se produce producto del calor generado en el arco eléctrico que se crea entre el extremo del electrodo recubierto consumible y la superficie de los metales base que se van a unir (Figura 17).

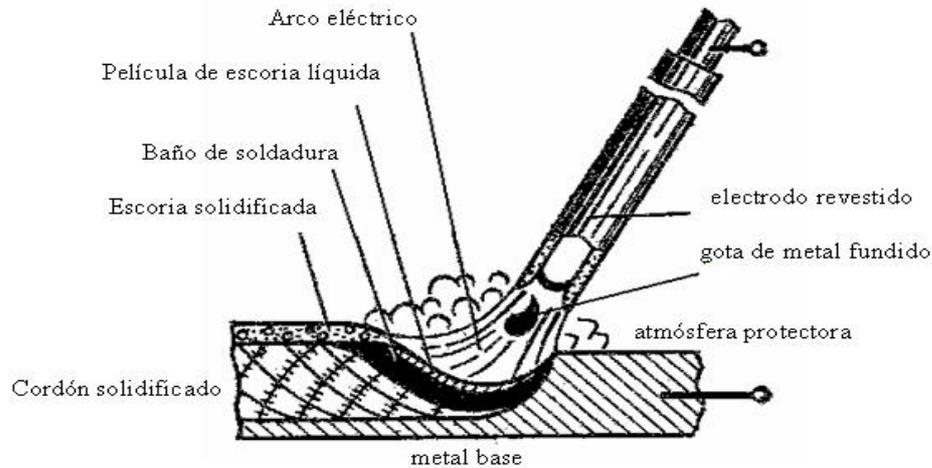


Figura 17. Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) [16].

El calor generado funde la punta del electrodo y la superficie del metal base. De esta forma las pequeñas gotas de metal fundido que se forman sobre la punta del electrodo viajan a través de la columna del arco y junto con el metal base fundido forman el baño de soldadura. El electrodo se desplaza a una velocidad adecuada (velocidad de soldadura) fundiendo constantemente una porción del metal base y adicionando metal de aporte producto de su propia fusión. En la medida que el proceso se desarrolla el baño metálico va solidificando y formando el metal de la costura. La protección del metal a elevada temperatura de la acción del oxígeno y el nitrógeno del aire se realiza a través del revestimiento que cuando ocurre la combustión genera gases y una escoria que cubre las gotas de metal y el baño de soldadura, creando una doble barrera protectora.

Tanto el electrodo recubierto como el metal base forman parte del circuito eléctrico de soldadura, que se muestra a continuación. Este circuito se inicia con la fuente de energía eléctrica, e incluye los cables conductores, el porta electrodo o tenaza, la conexión a tierra, la pieza a soldar y el electrodo recubierto. Uno de los cables que provienen de la fuente de energía se conecta al porta electrodo y el otro a la conexión a tierra, que se fija a la pieza. Este circuito se cierra al hacer contacto el electrodo con la pieza [16].

Ventajas del proceso:

- El equipo es relativamente simple, barato y portátil.

- Tanto el metal de aporte como el medio para proteger al metal de soldadura se garantiza por el propio electrodo recubierto.
- No es necesario el empleo de un gas protector auxiliar o de fundentes.
- Es menos sensible a las corrientes de aire que los procesos de protección gaseosa, por lo que resulta ideal para trabajos en campo.
- Puede emplearse en áreas de acceso limitado.
- Puede utilizarse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía, ya que no requiere conductores de gases de protección, conductores de agua para el enfriamiento, etc.
- El proceso es adecuado para depositar la mayoría de las aleaciones resistentes al desgaste.
- Permite la realización en todas las posiciones espaciales.

Limitaciones del proceso:

- Es un proceso relativamente lento, ya que el ciclo de trabajo y las razones de depósito generales son usualmente inferiores que las que se garantizan con los procesos de electrodo continuo. Esto se debe fundamentalmente a la necesidad del cambio de los electrodos recubiertos, a la necesidad de eliminar la escoria en la terminación del cordón, antes de comenzar el depósito nuevamente y a las menores intensidades de corriente que se emplean.
- Este proceso tiene la desventaja de que la corriente pasa a través de toda la longitud del electrodo, por lo que la máxima intensidad de corriente que se puede emplear depende de la resistencia eléctrica del núcleo metálico. Un amperaje excesivo sobrecalienta el electrodo y destruye el revestimiento afectando las características del arco y la protección.
- Requiere gran habilidad por parte del soldador, debido a su carácter completamente manual.
- No es aplicable a espesores de capas inferiores a 1.5 a 2 mm.
- Aunque en teoría se puede depositar cualquier espesor por encima de 1.5 mm, el proceso no resulta productivo cuando se requiere rellenar espesores gruesos (mayores de 38 mm). En estos espesores son más adecuados los procesos SAW y FCAW.

1.7.2 Soldadura por arco con electrodo tubular continuo y con núcleo de fundente (FCAW)

El proceso de soldadura por arco con electrodo tubular (FCAW) se basa en un arco eléctrico que surge entre un alambre-electrodo tubular con núcleo de fundente que se alimenta continuamente y el metal base. La protección del metal del baño se garantiza por el fundente dentro del electrodo, y puede emplear o no un gas de protección externo (Figura 18).

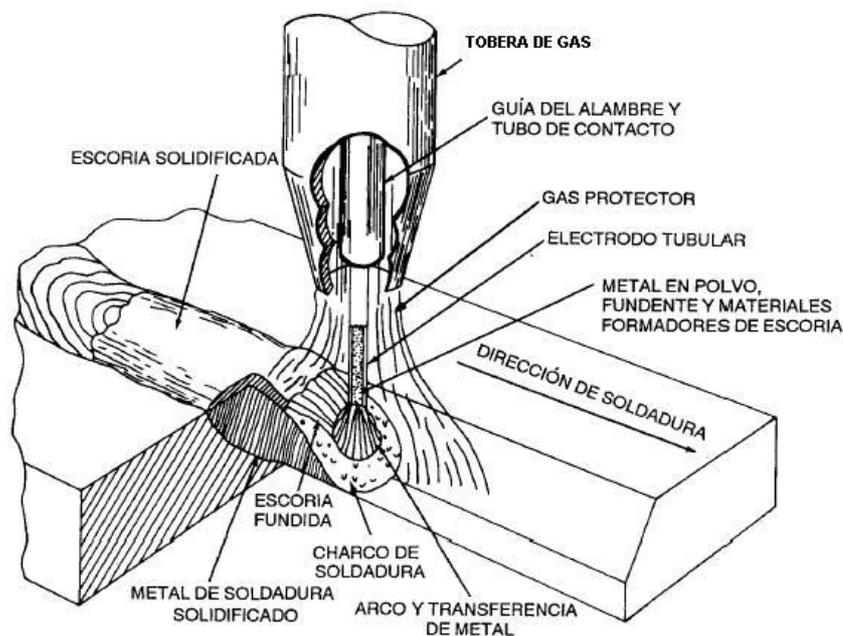


Figura 18. Proceso de soldadura por arco con electrodo tubular continuo y con núcleo de fundente (FCAW) [16].

En la variante autoprotegida, la protección del baño ocurre gracias a la descomposición y vaporización del fundente; dicho fundente genera además una capa de escoria que cubre el metal semejante al proceso SMAW. En la variante con protección gaseosa se utiliza un gas protector externo, como protección adicional a la del fundente. Este gas puede ser CO_2 o mezclas de $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Es un proceso generalmente semiautomático, aunque puede utilizarse en la variante mecanizada y automática [16].

Ventajas del proceso:

- Comparado con el proceso SMAW se requiere menor nivel de habilidad por parte del soldador.
- Ofrece razones de depósito de hasta 4 veces las logradas con electrodo revestido, con una frecuente disminución de costos de hasta un 50 – 75%.
- El empleo de electrodos tubulares autoprotegidos elimina la necesidad de manipular un fundente o gas protector, y lo hace más tolerante a las condiciones de viento presente en la soldadura en campo.
- Es más tolerante a los elementos en los aceros que normalmente pueden causar agrietamiento de las uniones soldadas cuando se emplean los procesos SMAW o GMAW.
- Bajo condiciones normales elimina el problema de absorción de humedad de los electrodos y fundentes básicos.
- Presenta un aprovechamiento del metal de aporte (eficiencia del depósito) intermedio entre los procesos SMAW y GMAW (hay pérdidas por escoria, pero no por colillas).

Limitaciones del proceso:

- Se aplica solo a metales ferrosos y aleaciones base níquel.
- Produce una capa de escoria que debe ser eliminada.
- Los electrodos tubulares, en base a su peso, son más costosos que los sólidos excepto para algunos aceros de alta aleación.
- El equipo es más complejo, más costoso y menos portátil que el de SMAW; no obstante esto se compensa con los incrementos de productividad.
- En la variante FCAW-G, durante la soldadura de campo dicha protección puede ser afectada por las corrientes de aire; esto no constituye problema en la variante autoprotegida, salvo para corrientes de aire muy fuertes, ya que la protección se genera en la punta del electrodo, donde se necesita.

La pistola debe estar cerca de la pieza de trabajo, y por lo tanto, el proceso es menos adaptable que el de electrodo recubierto para soldadura en áreas de difícil acceso.

Pero la realidad es que este proceso de soldadura no se aplica debido a la no existencia de experiencia tecnológica en su utilización, ni instalaciones en todos los lugares para aplicarlo, a pesar de ser esta una técnica de avanzada que se aplica en el mundo entero en el campo de la recuperación de piezas. Es por ello que se selecciona el proceso manual por arco eléctrico para el relleno, debido a su amplia difusión en todas las industrias nacionales como el proceso de soldadura más universal utilizado en la recuperación de piezas.

1.8 Selección de una aleación para el relleno superficial de los álabes que conforman el Exhaustor.

Respecto a los materiales de aporte que se pueden utilizar para el relleno superficial, desafortunadamente no existen métodos estandarizados de clasificación y especificación para los diferentes tipos de electrodos a nivel mundial. Cada fabricante se acomoda a las normas vigentes del país donde se produce dichos materiales, así como se acoge a una o varias normas de carácter internacional que le permiten establecer un patrón de comparación. Existen varios casos de materiales de relleno comerciales que no están cubiertos por algunas de estas normas o especificaciones e incluso algunos de ellos no permiten que se les acoja para comparación por alguna de estas normas que tienen una amplia utilización. No obstante, sí es cierto que todo fabricante se preocupa por suministrar una información completa de cómo utilizar su producto específico para diferentes aplicaciones y diversas industrias, lo que hace que esta información sea en extremo útil y a la vez necesaria de consultar.

Como ya se planteó anteriormente, el relleno superficial por soldadura se utiliza para proveer superficies de trabajo con propiedades superiores a la que presentan diferentes zonas de las piezas, implementos o máquinas, haciéndolos adecuados para resistir la acción destructiva de fuerzas actuantes sobre estas [17], en el caso particular de los exhaustores, la erosión es el mecanismo de deterioro principal. En ocasiones ocurre que más de una solución aceptable puede aplicarse para cualquier situación dada y que las condiciones reales de operación son las variables esenciales que gobiernan la selección del consumible y proceso de recargue más adecuado. Esta se basa generalmente en la disponibilidad, en la dilución que se obtiene (debe ser la mínima posible) y en la razón de deposición. La mayoría de las aleaciones se comercializan bajo nombres comerciales. Es por esto importante investigar los materiales recomendados para una aplicación específica. También pueden utilizarse pruebas

comparativas para determinar lo adecuado de la selección realizada. La estructura de los metales depositados consiste usualmente en una matriz suave de base metálica que soporta una fase dura en forma de carburos, boruros o compuestos intermetálicos diseñados para resistir el desgaste abrasivo u otro tipo de daño.

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

Para la selección de un material de relleno superficial utilizaremos el criterio dado por [17]. Pues lo consideramos bastante concreto y contiene los siguientes aspectos:

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

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

- a. Se debe mantener un borde o filo cortante.
- b. Se debe mantener una superficie simple sin tener en cuenta el mantenimiento de un borde o filo agudo.
- c. Se deben proteger las superficies en contacto por deslizamiento.

De los tres casos anteriores el de las partes que conforman el exhaustor es el segundo (b), ya que se debe proteger la superficie simple (los álabes) sin tener en cuenta la existencia de un borde cortante.

Según la bibliografía consultada, se plantea que una superficie es resistente al desgaste erosivo cuando su dureza es 1,3 veces mayor que la dureza del abrasivo ($H_{mat} > 1,3 H_{abr}$), en nuestro caso las partículas causantes del desgaste presentan una dureza de 3 en la escala MOHS, por tanto el material a depositar debe alcanzar una dureza entre 1170 HV a 1664 HV, dureza que puede ser lograda por una estructura que tenga insertados carburos de cromo (1200 HV a 1800 HV), además no solo el microconstituyente debe ser duro sino también la matriz que lo sostiene. Una matriz que presenta una extremada dureza lo constituye la martensítica (500 HV a 1000 HV). De no ser así, debido al efecto de abrasión se destruirá la matriz y se caería el carburo.

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

Históricamente la industria del cemento ha comprado gran cantidad de consumibles para diferentes procesos de relleno (OAW, SMAW y FCAW) sin embargo en los últimos años en el mercado nacional han estado presente varios aportes de la firma UTP- Böhler, entre los cuales se encuentran: el UTP 710, UTP 670, UTP Ledirit-61. Los que según las recomendaciones declaradas por el fabricante [18], son capaces de soportar adecuadamente las condiciones de desgaste erosivo, típicas de la industria del cemento.

A continuación se muestran las características fundamentales que poseen estos consumibles.

UTP 710

Según el fabricante [18] este aporte es un electrodo básico para revestimientos resistentes a la fuerte abrasión con moderada resistencia al impacto, con un rendimiento de 140 % y dureza aproximadamente entre 58-63 HRC. El mismo presenta un campo de aplicación amplio ya que se desarrollado a base de carburos de cromo, este aporte es utilizado generalmente donde hay fuerte desgaste por abrasión, presentando asimismo resistencia moderada a la presión y al impacto causado por carbón, grava, arena, etc. Ideal para revestimientos de dientes de excavadora, gusanos, superficies de guías de deslizamiento, extremos de válvulas y diversas partes de maquinaria, este material de aporte puede utilizarse provechosamente como capa final. Dentro de las características de soldadura el UTP 710 se deposita con facilidad. El baño de fusión, fácil de controlar, permite depósitos que en la mayoría de los casos no necesitan trabajo suplementario. El aspecto del depósito es plano, regular y maquinable por muela abrasiva. Presenta en su revestimiento C, Si, Mn, y Cr(CrC). El rango de corriente de soldadura para los diferentes diámetros y longitudes de los electrodos, se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Rango de corriente de soldadura para diferentes diámetros.

Diámetro y longitud (mm)	3,2 x 300	4,0 x 400	5,0 x 400
Corriente de soldadura (A)	90-130	100-150	140-190

UTP 670

Dentro de las características del UTP 670 se puede mencionar que es un electrodo básico para revestimientos duros resistentes a la presión, impacto y abrasión. Este aporte según el fabricante presenta rendimiento real de 130% y una dureza entre 55-60 HRC. Como campo de aplicación este aporte presenta un alto rendimiento para revestimientos duros en piezas de acero, acero fundido y aceros al Mn expuestos a esfuerzos simultáneos de desgaste por presión, impacto y abrasión. Debido a su alto rendimiento es recomendable para revestimientos de una sola capa, a un bajo costo, estos recubrimientos se recomiendan para rodillos, superficies de rodamiento, cilindros de laminación, cadenas de oruga, ruedas portantes, cejas de ruedas, molinos, de rodillos, gusanos, batidores, quebradoras, partes de dragas, poleas de cable, superficies de choque. Como características de la soldadura se puede soldar fácilmente en posición horizontal y ascendente. La escoria se quita con facilidad. La superficie de los cordones se presenta lisa. El revestimiento de dicho material está compuesto por C, Si, Cr, Fe. El rango de corriente de soldadura para los diferentes diámetros y longitudes de los electrodos, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Rango de corriente de soldadura para diferentes diámetros.

Diámetro y longitud (mm)	3.2 x 350	4.0 x 450	5.0 x 450	6.0 x 450
Corriente de soldadura (A)	90-120	130-180	170-210	210-250

UTP Ledurit-61

El UTP Ledurit-61 no difiere mucho en los electrodos antes expuestos ya que es también un electrodo básico para protecciones resistentes a la abrasión con mediana resistencia al impacto, con un rendimiento real de 140 %, y una dureza aproximada entre 55-60 HRC. Como campo de aplicación este electrodo de alto rendimiento, desarrollado a base de carburos de cromo. Se utiliza contra los desgastes por abrasión, presión y ligero hasta mediano impacto, causados p. ej. Por carbón, minerales, grava, arena, etc., para revestimientos de dientes de excavadora, gusanos, superficies de guías de deslizamiento, extremos de válvulas y partes de máquinas sujetas a temperaturas de trabajo hasta 200 °C. Al igual que los demás materiales de aportes en estudio este se deposita con más facilidad. El baño de fusión es fácil de controlar, permite depósitos que en la mayoría de los casos no necesitan maquinado posterior. El aspecto del depósito es plano, regular, es maquinable por muela abrasiva, y la escoria se quita

fácilmente. Su revestimiento está compuesto por C, Si, y Cr. El rango de corriente de soldadura para los diferentes diámetros y longitudes de los electrodos, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango de corriente de soldadura para diferentes diámetros.

Diámetro y longitud (mm)	4,0 x 400	5,0 x 400
Corriente de soldadura (A)	100-150	140-190

Por lo antes expuesto, se puede apreciar que los tres tipos de electrodos poseen características que los hace ser adecuados para solucionar los problemas vinculados al desgaste que ocurre en los álabes de los exhaustores, sin embargo si tomados como base, solo las característica expuesta en sus respectivos catálogos, se hace imposible saber cuál de ellos es el que de manera más adecuada es capaz de solucionar los referidos problemas, es por ello que se impone un estudio más profundo que lo permia determinar.

Capítulo II

2.1 Materiales y Métodos

Para realizar el estudio de cual material de aporte podrá ser utilizado en la protección de los álabes de los exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney, se tomaron tres partidas de los materiales disponibles en los talleres de mantenimiento de la fábrica y que están recomendados para utilizarse ante el mecanismo de desgaste abrasivo-erosivo. Los aportes fueron: el UTP 710, de 4 mm de diámetro y 450 mm de longitud, clasificado según las normas: DIN 8555 [19] como E 10-60 y por la AWSA5.23 [20] como E Fe Cr-A1, el UTP 670, de 3 mm de diámetro y 350 mm de longitud, clasificado según la norma DIN 8555 [19] como E 6-UM-60 y el UTP Ledurit-61, de 4 mm de diámetro y 450 mm de longitud, clasificado como E 10-UM-60-GRZ por la norma DIN 8555 [6] y como E Fe Cr-A1, según la norma AWS 5.23 [20].

Teniendo en cuenta trabajos precedentes en este campo [21, 22], a los materiales de aporte en estudio se le evaluaron los siguientes parámetros tecnológicos:

- Parámetros de consumo
 - Tasa de fusión
 - Tasa de deposito
 - Rendimiento real
- Estructura metalográfica y Dureza
- Resistencia al desgaste

Como en el proceso SMAW, la velocidad de soldadura está asociada con la habilidad del soldador y que el voltaje no puede controlarse independientemente de la corriente [16]. Se tomó como única variable de entrada en los experimentos la corriente de soldadura (I_s) (manteniendo constante la velocidad de soldadura) con vistas a estudiar su efecto sobre el comportamiento técnico-operativo. Además, este parámetro del régimen es quien determina la magnitud del calor asociado, por tanto la microestructura y propiedades finales de los depósitos de recargue. De acuerdo a las recomendaciones dadas por los fabricantes de los materiales de aporte [18], se utilizó corriente continua con polaridad invertida (CC+), la cual

teniendo en cuenta los diámetros utilizados mencionados con anterioridad fue variada en tres niveles (bajo, medio y alto), como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Identificación de los aportes y rango de corriente utilizado en el estudio.

Material de aporte	Corriente baja (A)	Identificación	Corriente media (A)	Identificación	Corriente alta (A)	Identificación
UTP 710	95	1A	130	1B	150	1C
UTP 670	90	2A	120	2B	160	2C
UTP Ledurit-61	100	3A	120	3B	150	3C

Los depósitos fueron realizados sobre una placa de acero ASTM A-36 en posición plana. La variación de la corriente tuvo en cuenta las recomendaciones dada por el fabricante para cada tipo de electrodo como se expuso con anterioridad.

Las chapas de metal base y los electrodos fueron pesados antes de la realización de los ensayos con la utilización de una balanza técnica con una precisión de ± 1 g. Con respecto a los tiempos de soldadura fueron medido con la utilización de un cronometro con una precisión de $\pm 0,2$ s.

Al finalizar el proceso de soldadura, las muestras fueron limpiadas cuidadosamente para eliminar los restos de salpicaduras y escoria. Una vez realizado esto, las placas con los depósitos y las colillas de los electrodos fueron nuevamente pesadas, para obtener de esta manera la información necesaria para determinar los parámetros de consumo (Figura 19).

Una vez terminada esta etapa, de los depósitos fueron extraídas tres secciones de 8 mm de espesor, en el sentido transversal a la cordón (inicio, medio y final) y pulidas. Concluida esta operación, las muestras fueron atacadas con el reactivo número 86 [23], (recomendado para materiales de alto carbono y cromo) y posteriormente observadas a 200X de aumento en el Microscopio Óptico Metalográfico NOVEL modelo NIM-100, con una cámara fotográfica digital acoplada. Determinándose de esta manera las fases y los microconstituyentes presentes en los depósitos.



Figura 19. Depósito terminado y colilla del aporte (proceso por arco) [23].

Teniendo en cuenta la relación existente entre la microestructura y dureza, se le determinaron los valores de dureza en los depósitos. Es necesario destacar, que debido a la imposibilidad de constar con un equipo de medición de dureza macro se utilizó un equipo de microdureza, pero con una carga máxima de 1000 g, para que de esa forma el microidentador piramidal realizara un efecto similar al macroidentador. La medición de la dureza fue realizada con un microdurómetro SHIMATZU modelo HVS 1000. Se realizaron un total de 5 mediciones en el centro del depósito de cada probeta, determinándose su valor medio de dureza Vickers.

Además del estudio antes mencionado, como una forma de validad el comportamiento de los materiales de aporte y teniendo en cuenta los resultados mostrados en la literatura [24] se realizó un ensayo de desgaste comparativo en condiciones reales de servicio, tomando como referencia un álabe sin protección como se utiliza actualmente en la fábrica el cual como se mencionó anteriormente está elaborado de acero de bajo contenido de carbono. La realización de los ensayos directamente en condiciones de servicio del exhaustor permitieron tener presente todos aquellos aspectos que pueden incidir en el desgaste de los álabes durante el proceso de enfriamiento del clínker, entre los cuales se pueden señalar:

- Tamaño de las partículas de clínker
- Temperatura del fluido
- Velocidad de impacto de las partículas sobre los álabes.

Para la realización de las pruebas se elaboraron álabes con las mismas dimensiones de los que se utilizan en los exhaustores. Los álabes elaborados fueron protegidos mediante la utilización

de los aportes en estudio. La protección se realizó con los dos extremos del régimen de soldadura (corriente máxima y mínima) con el objetivo de evaluar solo la tendencia de comportamiento. El relleno se aplicó de tal forma que cubrió $\frac{1}{2}$ del álabe pero de forma transversal, ya que es la zona severamente afectada por el desgaste. El sentido de colocación de los cordones fue paralelo a los bordes y de una manera cerrada, cada cordón cubrió $\frac{1}{4}$ del cordón contiguo, evitando de esta manera los inconvenientes que ocurren con el incremento de la dilución (Figura 20). Al concluir el proceso de relleno los álabes fueron pesados utilizando la misma balanza técnica. Los álabes protegidos se montaron en el exhaustor. De igual manera se procedió con la colocación de un álabe sin protección, el cual sirvió como un punto de partida para el estudio del desgaste. Estas muestras se sometieron a una labor ininterrumpida durante 500 h, al cabo del cual se extrajeron y se pesaron nuevamente. Obteniéndose de esta manera la cantidad de masa pérdida.



Figura 20. Álabe de exhaustor protegidos [24].

Capítulo III

3.1 Resultados y Análisis

3.1.1 Parámetros de consumo

Como fue expuesto en el epígrafe anterior, los parámetros de consumo evaluados para cada tipo de material de aporte fueron: tasa de fusión, deposición y el rendimiento real.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 6 y en las Figuras 21 y 22 y en concordancia con lo tratado en la literatura [21, 25] con el aumento de la corriente hay una tendencia al aumento de la tasa de fusión y depósito en todos los materiales de aporte en estudio.

Tabla 6. Resultados de los parámetros de consumo de los electrodos revestidos evaluados.

Probeta	Baja Corriente			Media Corriente			Alta corriente		
	1A	2A	3A	1B	2B	2B	1C	2C	3C
Masa Inicial probeta (g)	335	331	337	251	331	235	274	336	300
Masa Inicial Electrodo (g)	77	72	101	66	74	102	78	72	100
Masa final probeta (g)	346	343	349	263	346	245	282	350	308
Masa final Electrodo (g)	61	56	81	48	54	88	66	50	89
Masa fundida (g)	16	16	20	18	20	14	12	22	11
Masa depositada (g)	11	12	12	12	14	10	8	14	8
Corriente media (A)	95	91	100	130	123	120	150	165	150
Voltaje medio (V)	21.4	22	21	23.4	24	23	25.8	27	25
longitud del cordón (cm)	12.2	11.5	14.2	12.4	11.5	13.4	10.4	11.0	9.9
Tiempo de arco (h)	0,012	0,013	0,015	0,010	0,013	0,010	0,007	0,012	0,006
Tasa de fusión (kg/h)	1.33	1.27	1.38	1.80	1.59	1.40	1.71	1.77	1.90
Tasa de depósito	0.92	0.93	0.83	1.20	1.12	1.00	1.14	1.13	1.38

(kg/h)									
Rendimiento real (%)	68.75	73.23	60.00	66.67	70.51	71.43	66.67	63.74	72.73

De acuerdo con [25], la tasa de fusión y depósito de los materiales de aporte en estudio, están muy afectados por las particularidades de los revestimientos, lo que produce variaciones en los grados de ionización de las atmósferas y estas a su vez variaciones en los modos de transferencia. De esta forma cuanto mayor sea la energía de ionización de la atmósfera del arco, provocada por una mayor corriente de soldadura (para un revestimiento constante) menor serán el diámetro de las gotas que se transfieren, así como mayor su cantidad, incrementando de esta manera la tasa de fusión del material de aporte.

También este comportamiento podría estar asociado a la descomposición de la caliza, la cual está presente en los revestimientos de los aportes en estudio, ya que son del tipo básico. Este compuesto sufre un proceso de disociación endotérmica ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$) en el entorno de 850 °C, pero posteriormente con el incremento de la temperatura y la ocurrencia de los proceso de desoxidación, se convierte en exotérmico, realizando un efecto sumatorio a la energía aportada por el arco, posibilitando de esta manera una incremento de la fusión y deposición de metal [25].

Con respecto al comportamiento del rendimiento real (Figura 23), se advierte, que en la medida que la corriente de soldadura se incrementa, se produce una disminución del rendimiento para los aportes 1 y 2. Una explicación de tal comportamiento, tomando en consideración los trabajos de Bradi [26] se sustenta, en que el incremento de la corriente, repercute en una variación del tamaño de las gotas de metal que se transfieren durante el cortocircuito (disminución de su tamaño), para este grupo de materiales en particular. Con este un incremento se desarrollan los mecanismos que motivan la salpicadura. Siendo la salpicadura el principal fenómeno causante de la disminución del rendimiento real en los electrodos revestidos [27]. Una situación opuesta ocurre para el aporte 3, el cual a medida que se incrementa la corriente, se produce un aumento del rendimiento real.

Por lo que teniendo en cuenta, el parámetro de rendimiento real, el mejor comportamiento lo logra en aporte 2 en el campo de las bajas corrientes (90 A).

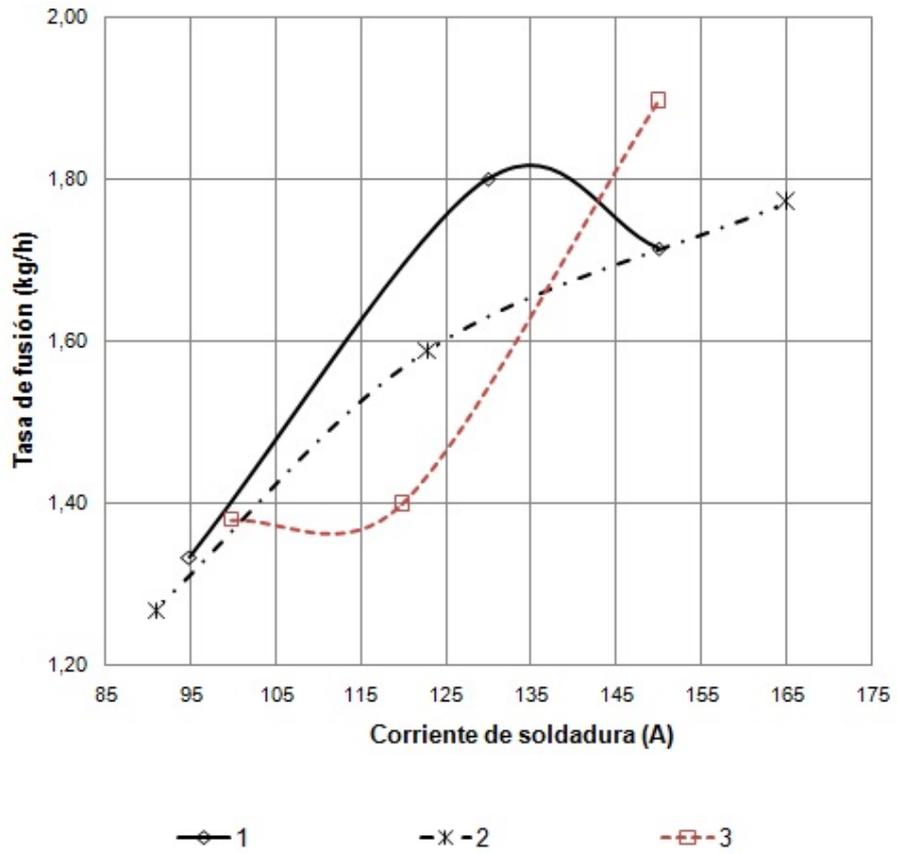


Figura 21. Comportamiento de la tasa de fusión con la corriente de soldadura [27].

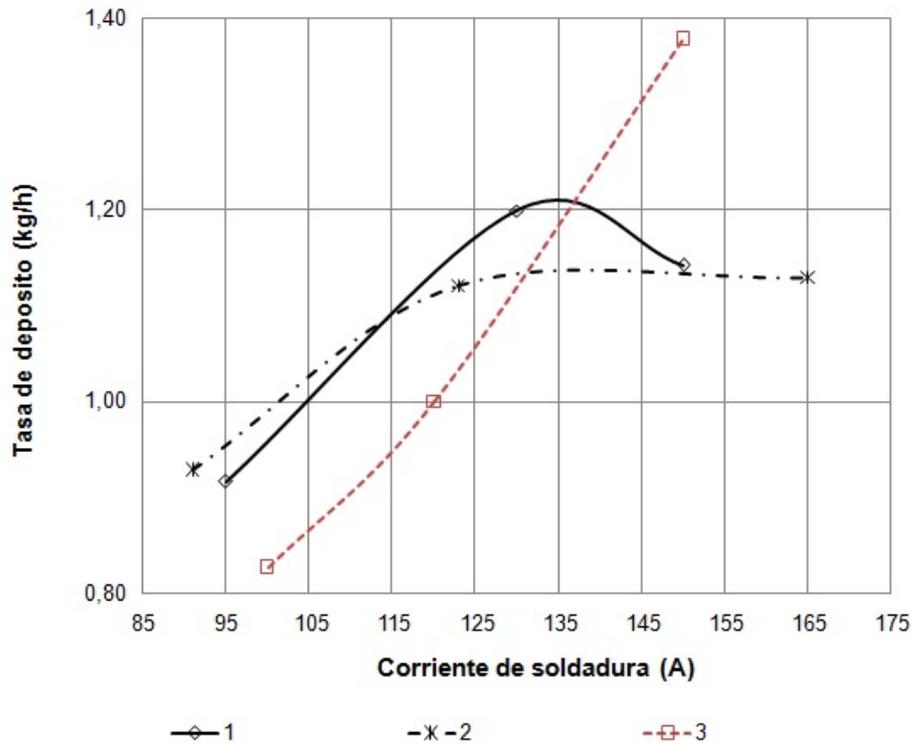


Figura 22. Comportamiento de la tasa de deposición con la corriente de soldadura [27].

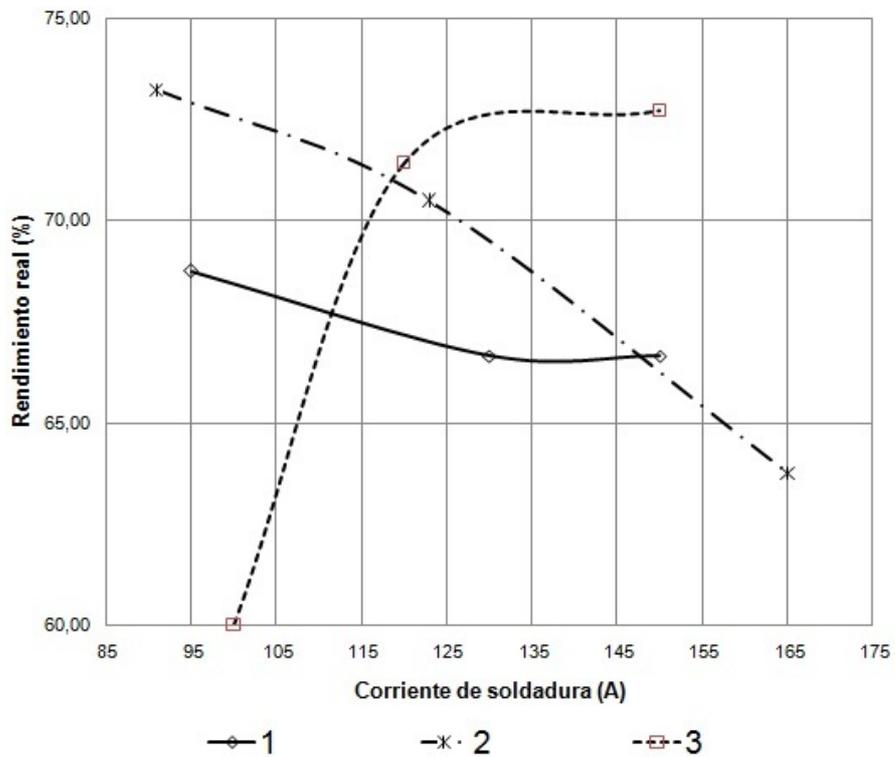


Figura 23. Comportamiento del rendimiento real con la variación de la corriente [27].

3.1.2 Dureza de los depósitos y caracterización metalográfica.

En la Tabla 7 y en la figura 24 se muestran los valores de dureza de los depósitos obtenidos para los tres aportes en estudio con diferentes niveles de corrientes de soldadura. Se observa que para los menores niveles de corriente de soldadura, se obtienen los mayores valores de dureza, situación que ha sido abordada en la literatura [28], y que está justificada ya que para la menor intensidad de corriente, se produce una menor dilución, facilitando de esta manera la formación de un depósito con mayor aprovechamiento de los elementos de aleación del consumible y favoreciéndose en ello formación de carburos [29,30]. De acuerdo a los trabajos de Balsamo et al. [19], se hace evidente también, que para un mismo nivel de corriente los valores de dureza del depósito realizado con el aporte 2, son superiores al resto de los aportes (1 y 3). Lo que es consistente con las estructuras metalográficas observadas en las Tabla 8, 9, y 10.

Tabla 7. Comportamiento de la dureza con la variación de la corriente de soldadura para los aportes en estudio.

Nivel de corriente	Muestra	Dureza (HV/1000g)					Dureza Media (HV/1000g)
Baja	1A	650	628	587	626	655	629
	2A	747	713	756	724	685	725
	3A	479	479	461	464	444	465
Media	1B	541	527	515	564	543	538
	2B	566	568	564	557	547	560
	3B	434	428	404	421	409	419
Alta	1C	455	428	467	451	454	451
	2C	388	375	373	359	372	373
	3C	343	360	365	357	335	352

Para el caso del material de aporte 2, con el nivel de corriente mínimo (90A), la microestructura observada (Figura 2A de la Tabla 9), se corresponde con la mayor dureza (725 HV). En este caso se observa una estructura compuesta básicamente por carburos primarios (zonas claras) en una matriz eutéctica, formada por carburos, austenita y martensita (zonas oscuras), no observándose presencia de dendritas de austenita. Esta estructura es coincidente

con la reportada en la literatura para depósitos con características similares [31, 32]. Para los niveles medio y alto de corriente con este material de aporte (Figura 2B y 2C de la Tabla 9) se observó que en la medida que se incrementó la corriente, ocurrieron cambios en la morfología de los depósitos, disminuyendo la cantidad de carburos primarios y aumentando la cantidad del campo eutéctico. Lo cual es consistente con la disminución de la dureza que se muestra en la figura 24 y en la Tabla 9.

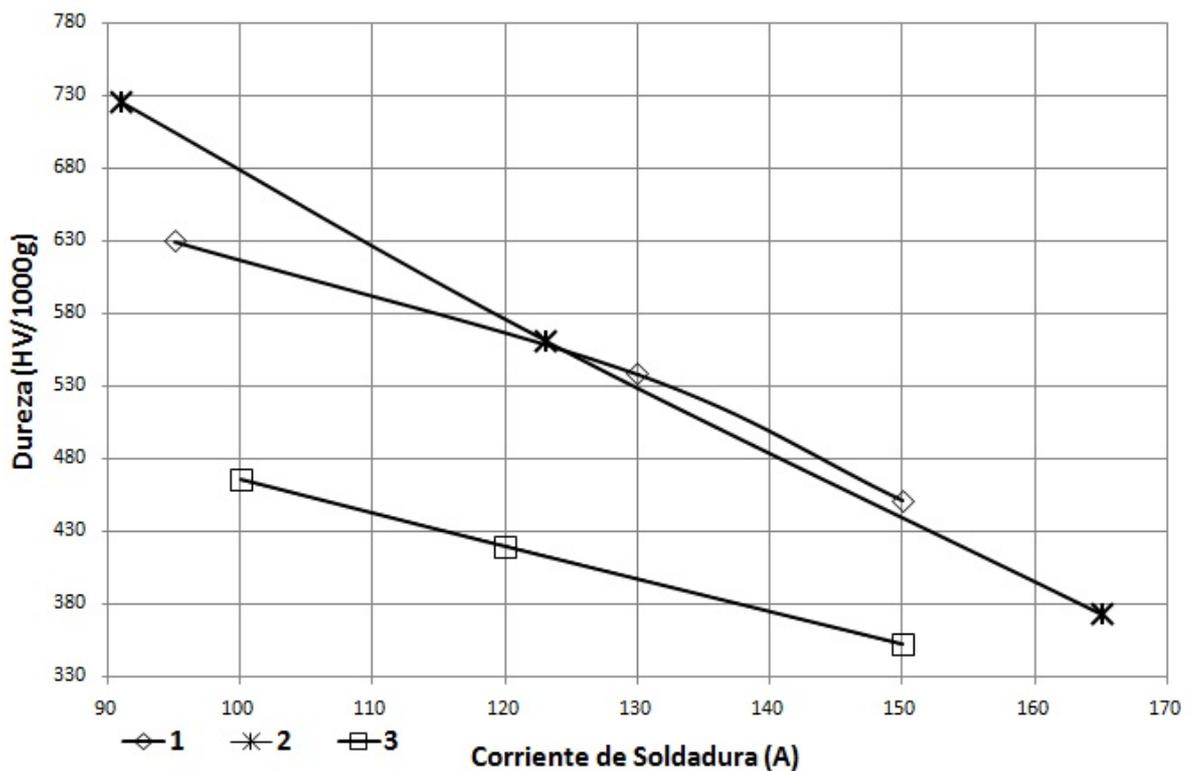


Figura 24. Comportamiento de la dureza del depósito con la variación de la intensidad de corriente [31, 32].

La disminución de la dureza en los depósitos para el resto de los aportes en estudio (1 y 3) también disminuyó en la medida que se incrementó la corriente de soldadura. Como en el caso anterior esto es consistente con las microestructuras mostradas en las Tablas 8 y 10. Los mayores valores de dureza se corresponden con los depósitos que muestran mayor cantidad de eutéctico (zonas oscuras) y menor cantidad de austenita (zonas claras), según se muestran en la Figura 1A de la Tabla 8 y la Figura 3A de la Tabla 10). El incremento de la corriente va acompañada de modificaciones visibles en la microestructura cuyo indicativo es el incremento

de la presencia de la austenita (zonas claras en las Figura 1C en la Tabla 8 y 3C en la Tabla 10).

Llama la atención que de acuerdo a las composiciones químicas declarada por los fabricantes de los aportes [18], dichos materiales poseen composiciones químicas relativamente cercanas, sin embargo las microestructuras difieren, mostrando microconstituyentes más duros en los depósitos realizados con el aporte 2 utilizando el mínimo de corriente, comparada con los depósitos realizados con los aporte 1 y 3 utilizando también el mínimo de corriente. Para encontrar una explicación a esta variación y de acuerdo a lo reportado en la literatura[28] se determinó las áreas del metal fundido y las áreas del metal depositado a todas las muestras y sobre la base de ellas, se determinó la dilución alcanzada en función de la corriente de soldadura para cada aporte en estudio (Figura 25).

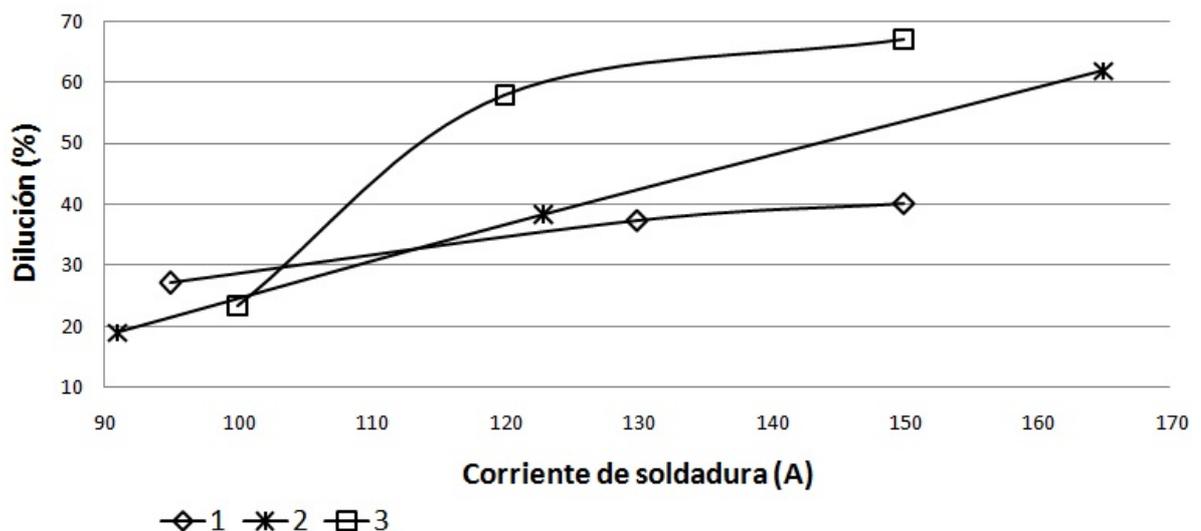


Figura 25. Influencia de la corriente de soldadura en la dilución [28].

Los niveles de dilución alcanzados por el aporte 1 y 3 son mayores que los logrados por el aporte 2 para el nivel de corriente mínimo. Esta variación en la dilución de acuerdo a lo planteado en la literatura [28,] provoca variaciones en las composiciones químicas de los depósitos.

De acuerdo con el trabajo realizado por Sairre, et. al [33] la superficie de líquidus del diagrama Fe-Cr-C propuesta por Jackson (Figura 26) describe de manera satisfactoria las microestructuras obtenidas durante la solidificación de la soldadura para este tipo de aleaciones, a pesar de la metaestabilidad que el proceso de soldadura impone. Así, los cambios

microestructurales presentes en las muestras para diferentes amperajes obedecen principalmente a cambios en composición química generados por el efecto de la dilución; el incremento del porcentaje de dilución causa un desplazamiento de la ubicación de la aleación en el diagrama de Jackson.

Por ejemplo, si tenemos una aleación que posee una composición química con carbono entre 3 y 5% y cromo entre 26 y 32% la microestructura siempre será carburos primarios del tipo M_7C_3 en una matriz eutéctica formada por austenita mas carburos de cromo (A en la Figura 26); a medida que disminuyen los porcentajes de cromo y carbono, y nos acercamos a la línea U_1-U_2 de la Figura 26, se favorece la formación de una estructura eutéctica (E en la Figura 26); y si disminuyen aún más los porcentajes de cromo y carbono el resultado es una estructura compuesta por austenita primaria en una matriz eutéctica (C en la Figura 26).

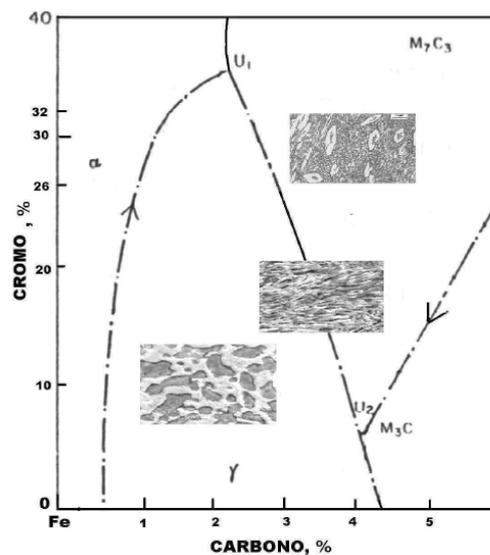


Figura 26. Superficie de líquidus del diagrama Fe-Cr-C, de acuerdo con Jackson [33].

3.1.3 Ensayo de desgaste

En la Tabla 11 y en la Figura 27 se muestra el comportamiento al desgaste de los álabes protegidos con los diferentes aportes en el rango mínimo y máximo de la corriente de soldadura. Como referencia se ubicó la pérdida de masa de un álabe sin protección. Tal comportamiento es un indicativo de que el álabe protegido con el aporte 2 en el rango de las bajas corriente (2A) presenta el mejor comportamiento ante el desgaste, situación esta que

tiene plena correspondencia con la microestructura y dureza que presenta el referido depósito y que fue tratada en el epígrafe anterior. Para el caso de 500 horas de explotación, este aporte se desgasto 5 veces menos que el álabe sin protección.

Tabla 11. Resultados de los ensayos de desgaste a nivel industrial.

Identificaciones de las muestras	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	Masa perdida (%)
1 ^a	1759	1614	145	8,24
1C	1725	1468	257	14,89
2 ^a	1773	1678	95	5,35
2C	1694	1506	188	11,09
3 ^a	1752	1614	138	7,87
3C	1751	1618	160	7,59
Sin Protección	1567	1176	391	24,95

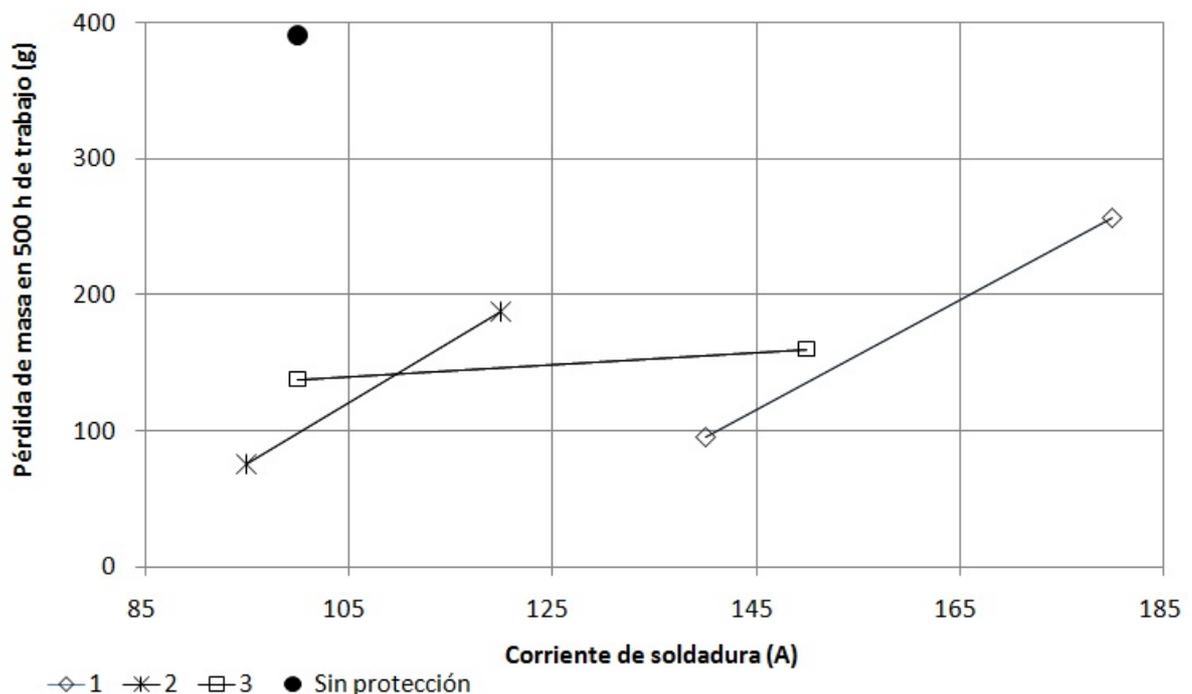
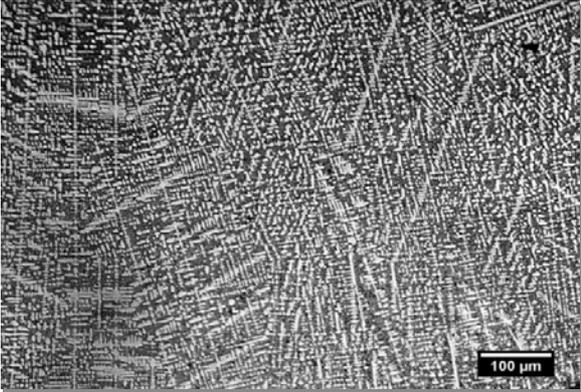


Figura 27. Comportamiento del desgaste en los álaves durante 500 horas de trabajo.

La evaluación de depósitos para recubrimiento duro, deben ser jerarquizadas en lo posible, aquellas propiedades que propician una mayor resistencia al desgaste. En tal sentido, el depósito 2 presenta el mejor comportamiento al mostrar los mayores valores de dureza, lo que

está motivado por la presencia de una microestructura formada por carburos primarios de cromo en una matriz eutéctica. Los elementos antes mencionado justifican el comportamiento que presento el álabe protegido con este metal de aporte durante 500 h de trabajo. Con respecto a los parámetros de consumo del aporte ante mencionado también manifestó los mejores parámetros en el campo de las bajas corrientes elementos (tasa de depósito de 0,93 kg/h y un rendimiento real de 73,23 %). De la integración de todos estos elementos se desprende que el aporte 2 en el campo de las bajas corriente tiene el mejor desempeño para la aplicación en estudio.

Tabla 8. Microestructura de los depósitos realizados con el aporte 1 para diferentes corrientes de soldadura.

Nivel de corriente de soldadura (A)	<p style="text-align: center;">Aporte 1 (Ataque con Reactivo 86, observación a 100 X).</p>
Mínima	 <p style="text-align: center;">1A</p>
Media	 <p style="text-align: center;">1B</p>

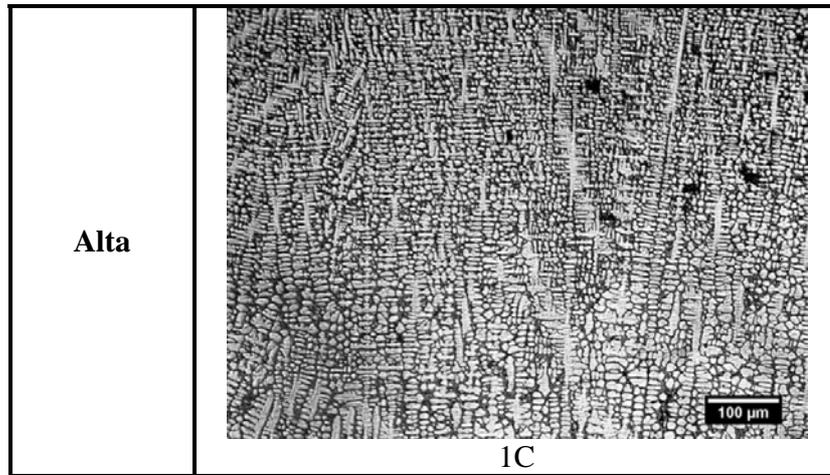
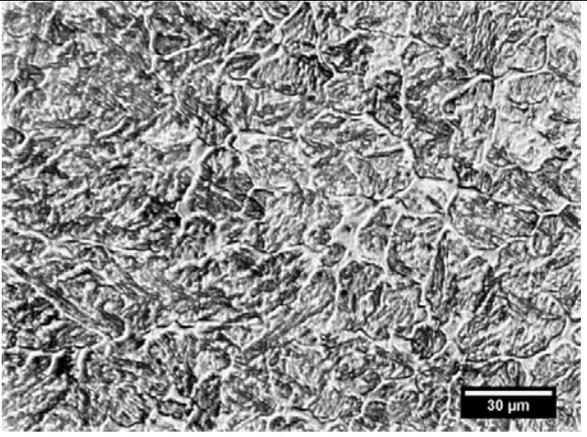


Tabla 9. Microestructura de los depósitos realizados con el aporte 2 para diferentes corrientes de soldadura.

Nivel de corriente de soldadura (A)	Aporte 2 (Ataque con Reactivo 86, observación a 100 X).
Mínima	 <p>30 μm</p>
	2A

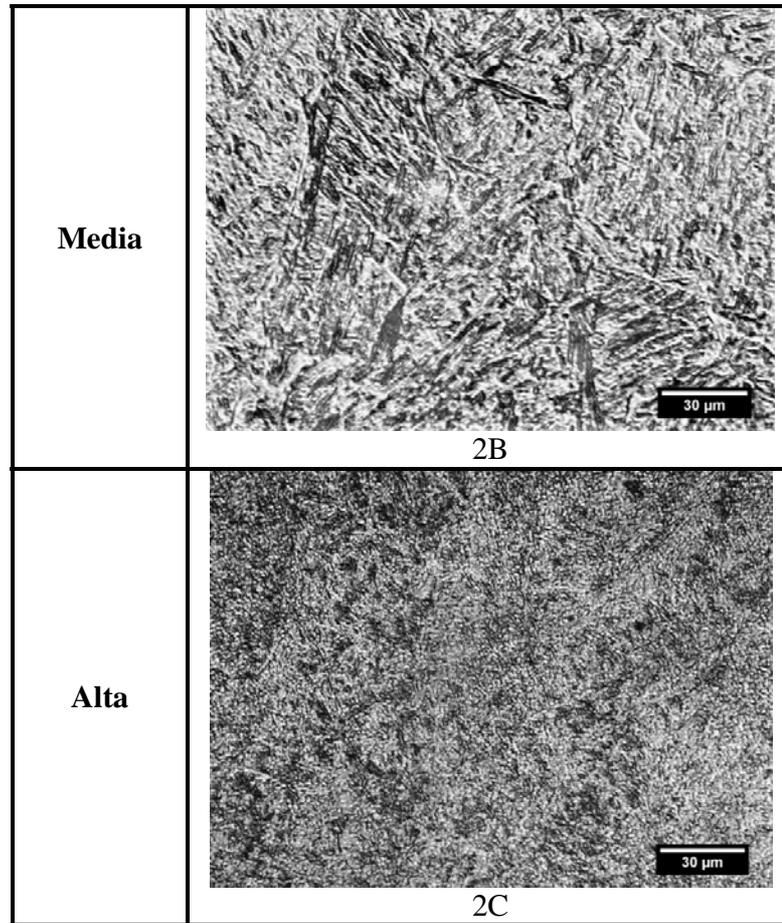
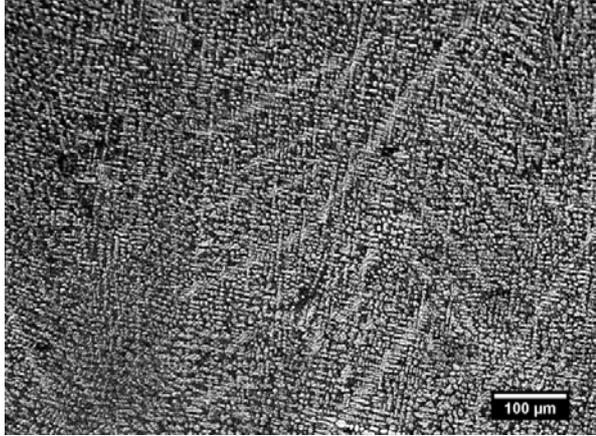
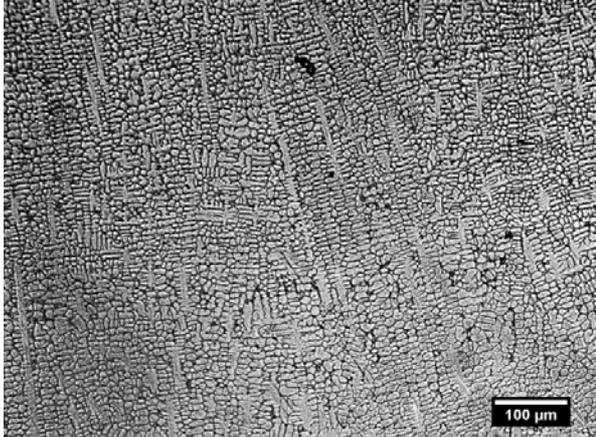
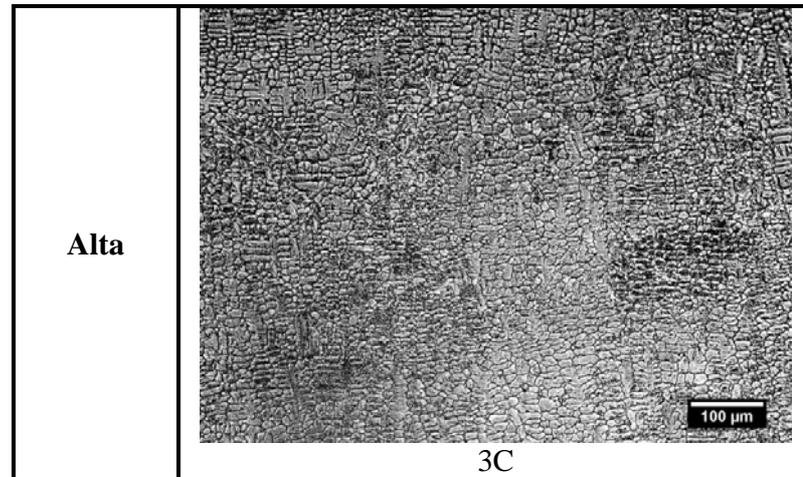


Tabla 10. Microestructura de los depósitos realizados con el aporte 3 para diferentes corrientes de soldadura.

Nivel de corriente de soldadura (A)	<p style="text-align: center;">Aporte 3 (Ataque con Reactivo 86, observación a 100 X).</p>
Mínima	 <p style="text-align: center;">3A</p>
Media	 <p style="text-align: center;">3B</p>



3.2 Evaluación económica

Un elemento que completa el estudio del comportamiento de un determinado consumible lo constituye la determinación del efecto económico durante su aplicación. En este caso se decidió realizar este análisis a los álabes que conforman el exhaustor de la Fábrica Cemento Siguaney (Figura 28) utilizando el electrodo UTP 670 revestido. Debido a que dicho consumible manifestó el mejor comportamiento técnico-operación, como fue visto en los epígrafes anteriores. Para ello se partió de las siguientes condiciones:

- Cantidad de álabes del exhaustor: 19
- Material del que está fabricado el álabe: acero de bajo porcentaje de carbono (aproximadamente ASTM A-36).
- Espesor a rellenar: 3 mm
- Régimen de soldadura a aplicar: 90 A



Figura 28. Álabes que conforman el exhaustor.

Para esto, se utilizó la metodología para la determinación de los costos de realización de la soldadura [16] dadas en la ecuación 3.5.1.

$$C_{TS} = C_{CS} + C_{MOAD} + C_{ee} \quad (3.5.1)$$

Donde:

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

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

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

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

Para la determinación de los costos de consumibles de soldadura, se utilizó la ecuación 3.5.2, la que establece que:

$$C_{CS} = C_e + C_{PC} \quad (3.5.2)$$

Donde:

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

C_e – costo de electrodos a consumir (CUC)

El costo de electrodo consumido se determina por la ecuación 3.5.3

$$C_e = \frac{M_{md} * P_e}{E_t} \quad (3.5.3)$$

Donde:

P_e : Precio del electrodo: 4,00 CUC/Kg, [34]

E_t : El aporte UTP 670 a 90 A según los resultados de este trabajo tiene un rendimiento real de 73,23 %.

La masa de metal a depositar se calcula por la ecuación 3.5.4

$$M_{md} = V_{md} * \gamma_{md} \quad (3.5.4)$$

V_{md} : Volumen de metal a depositar: 33150 mm³

γ_{md} : Densidad del metal depositado: 0,00781 g/mm³

$M_{md} = 0.258 \text{ Kg.}$

$C_e = 1,51 \text{ CUC.}$

$C_{PC} = 0 \text{ CUC}$ ya que no hay necesidad de dar precalentamiento a esta pieza por tener el carbono equivalente menor de 0,20 %

$C_{cs} = 1,51 \text{ CUC.}$

El **costo de mano de obra y administrativo** se determina por la ecuación 3.5.5

$$C_{moad} = \frac{T_{mo} * V_{md} * \gamma_{md}}{RD * F_o} \quad (3.5.5)$$

T_{mo} : Tarifa de costos de mano de obra y administrativos: 3,2 CUC/h [37]

RD : Razón de depósito, según los resultados de este trabajo para este aporte es 930 g/h.

F_o : Factor operador para proceso SMAW manual, según la bibliografía [37] es 0,3

$C_{moad} = 3,03 \text{ CUC.}$

El **costo de la energía eléctrica consumida** en el proceso se determina por la ecuación 3.5.6.

$$C_{ee} = \frac{PkWh * V_a * I_s * M_{md}}{1000 * RD * F_o * E_{fu}} \quad (3.5.6)$$

Donde:

$PkWh$: Precio del kWh industrial: 0,06 CUC/h [37]

V_a : Voltaje de arco, el cual según el resultado de este trabajo es: 20 V

I_s : Intensidad de corriente: 90 A.

E_{fu} : Eficiencia de la fuente de corriente, es este caso para un inversor modelo HM630 la eficiencia es: 0,85

Cee = 0,12 CUC.

Sustituyendo en la ecuación 3.5.1, el costo de rellenar con el electrodo UTP 670 un álabe del exhaustores de **4,66 CUC**. Como el exhaustor posee 19 álabes, el costo de protección asciende a **88,63 CUC**

De aquí se deriva que el **efecto económico (Eec)** de la recuperación de los álabes del exhaustor por la ecuación 3.5.7

$$\mathbf{Eec=Cpn-Cpr} \quad (3.5.7)$$

Donde:

Cpn: Costo de los álabes sin protección: 20 CUC [31]

Cpr: Costo de los álabes con protección: 88,63 CUC.

Eec = - 76 por cada álabe protegido

Como se puede apreciar en lo anteriormente expuesto desde el punto de vista del proceso de protección, los álabe sin protección presentan un costo inferior al costo de protección por soldadura. Sin embargo si tomamos en cuenta los resultados de los ensayos de desgaste y el posterior desempeño del elemento, unido a lo planteado en la literatura [35], la factibilidad de un proceso de protección no solo depende de su costo, sino también del posterior desenvolvimiento del elemento.

Para esto fue necesario calcular la relación de duración (DR), la que establece la relación entre la duración de la pieza sin protección y la pieza protegida ecuación 3.5.8

$$\mathbf{DR = DP/DSP} \quad (3.5.8)$$

Dónde:

DP: duración de la pieza protegida hasta su desgaste crítico: 2500 horas [36].

DSP: duración de la pieza sin protección hasta su desgaste crítico: 300 horas [36].

DR=8,33

Esta relación de duración se vinculó con los costos de protección mediante la relación de costo (RC) la cual se expresa través de la ecuación 3.5.9

$$\mathbf{RC = (Cpn * DR)/Cpr} \quad (3.5.9)$$

RC= 2,01

Por tanto como RC es mayor que 1, evidentemente el aumento de la vida útil de los álabes justifica plenamente los costos que se tiene durante la protección de los mismos.

Conclusiones:

1. El proceso de soldadura SMAW, debido a sus reconocidas ventajas y su alta difusión en la industria nacional, es el más adecuado para ser utilizado en la protección de los álabes en los Exhaustores de la Fábrica de Cemento Siguaney.
2. De los 3 electrodos estudiados para la utilización del relleno superficial por soldadura en los álabes, el UTP 670 en el rango de las bajas corrientes presenta el mejor comportamiento, dado por una tasa de depósito de 930 g/h, dilución del 19 %, rendimiento real de 73,23 % y ser capaz de depositar los cordones de mayor dureza entre los restantes aportes estudiados, favorecida por la presencia de elementos formadores de carburos de cromo primarios en una matriz eutéctica la cual brinda una adecuada resistencia al desgaste erosivo.
3. Desde el punto de vista económico, la protección por soldadura de los álabes es factible ya que aumenta en 8 veces la vida útil con respecto a los álabes originales, para así disminuir las paradas innecesarias en medio de producciones.

Recomendaciones:

- Realizar un estudio exhaustivo de las restantes partes del Exhaustor que están sometidas a desgaste erosivo, para ver si es viable su protección utilizando el relleno superficial por soldadura.
- Revisar la implementación de este proceso tecnológico para proteger otros elementos sometidos al desgaste erosivo.

Bibliografía:

- [1]AGUILAR-CASTRO, Y.; CASANOVA-GARCÍA, F.; VICTORIA-PRADO, R.; AGUIRRE-GUERRERO, D.; UQUILLAS-RESTREPO, B. Desgaste en acero de bajo carbón debido a la acción de bagazo limpio o contaminado con sílice y jugo de caña. Ingeniería y Universidad. 2011, Vol. 15, No 2, pp. 373-384.
- [2]CHANDEL, R.S., Hardfacing consumables and their characteristics for mining and mineral processing industry, Indian Welding Journal, No 6, pp. 26-34, 2004.
- [3]AMERICAN SOCIETY OF METAL, Friction, Lubrication, and Wear Technology, Volume 18, ASM International, 1992, 1879p
- [4]MARTÍNEZ PRIETO, F.; MARTÍNEZ ESCANAVERINO, F. Teoría y Práctica del Rozamiento. Editorial CUJAE, La Habana, 1997, 243p.
- [5]LINCOLN ELECTRIC COMPANY, The Procedure Handbook of Arc Welding. Cleveland, Ohio, 2000, 783p
- [6]PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO. Disponible en Internet: www.ieca.es/fabcemento.php. [Consultado el día 1 de Enero de 2013]
- [7]FÁBRICA DE CEMENTO “SIGUANÉY”, Reporte de Producción, Enero-marzo, 2012.
- [8] COLECTIVO DE AUTORES, Ahorro de energía en la industria del cemento. Universidad Autonoma de Occidente. Ediciones COLCIENCIAS. Colombia.
- [9]HIDALGO J.:Diagnostico de fallas, mantenimiento a ventilador de tiro. Guatemala, 2010.
- [10]BUCHANAN-SHIPWAY, V.E., MCCARTNEY, D.G., Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, Wear, No 263, pp. 99-110, 2007.
- [11] THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Designation: A 36/A 36M-00a, “Standard Specification for Carbon Structural Steel”, 2001.
- [12]MARTÍNEZ PRIETO, F., MARTÍNEZ ESCANAVERINO, F. Teoría y Práctica del rozamiento.México, Editorial CUJAE, 243 p., 1997.
- [13]COELHO LIMA, A., FERRARESI A.; Análise da Microestrutura e da Resistência al Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. Rev. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 2, p.140-150, Abr/Jun 2009.

- [14]DE MELO, R. V., VILLANI MARQUES P. Estudo Comparativo da Resistência al Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares, Rev. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 4, p.329-335, Out/Dez 2009.
- [15]CHIA-MING, CHANG, YEN-CHUN-CHEN, WEITE-WU, Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy, , Tribology Internacional No 43, pp 929–934, 2010.
- [16]COLECTIVO DE AUTORES, Apuntes para la asignatura Soldadura, Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central de las Villas, 2002.
- [17]CRUZ-CRESPO, A.; PERDOMO L.; PÉREZ M. R.; Fernandez R. y Ortiz T. M. Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales.
- [18]UTP DE MEXICO, Gama de electrodos, Disponible: <http://www.UTP.com.mx>.
[Consultado el día 15 de Abril de 2013]
- [19]DEUTSCHESINSTITUTFÜR NORMUNG, DIN 8555 Filler Materials for Hardfacing and Surfacing, 1998.
- [20]AMERICAN WELDING SOCIETY, A5.13 Specifications for Surfacing Welds Rods and Electrodes, 2002.
- [21]CRUZ-CRESPO, A., SCOTTI, A., RODRIGUEZ-PEREZ, M., Operational behavior assessment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing, Journal of Materials Processing Technology, Vol 199, pp.265-273, 2008.
- [22]FARIAS, J., BÁLSAMO, P., SURIAN, E., The effect of wollastonite on operational characteristics of AWSE6013 electrodes, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol 26, No 3, pp. 17-21, 2004.
- [23]MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE METALOGRAFÍA ÓPTICA. Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 1998.
- [24]GONZALO, I., GÓMEZ-LIMÓN, D., NÚÑEZ, A., RUIZ, C., Desgaste de aceros en equipos de trituración en plantas de tratamiento de áridos”, Memorias del 1er Congreso Argentino de Áridos, Tomo II, Mar del Plata, 2008.
- [25]QUITES, A.M., DUTRA, J.C., Influência do Arco Voltaico sobre o Consumo do Eletrodo e Geometria da Solda, Soldas e Eletrodos, abril, pp.18-25, 1979

- [26] BRANDI, S.D., TANIGUCHI, LIU, C., S., Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding, *Welding Journal*, October, pp. 261s-270s, 1991
- [27] DÍAZ-CEDRÉ E., RAMOS-MORALES, F., TELLO-RICO, M., CHAPARRO-GONZÁLEZ, J., CRUZ-CRESPO, A., RODRÍGUEZ-PÉREZ, M., ORTIZ-MÉNDEZ, T., POZO MOREJÓN, J.A., Estudio del comportamiento de la emisión de salpicadura, en el proceso de GMAW, utilizando mezclas de CO₂ + O₂ como gas de protección, *Ingeniería Revista Académica de la FIUADY*, 10-2, pp. 17-24, 2006.
- [28] MONSALVE, H.I., MENA-HERRERA, D.A., GIRALDO-BARRADA, J.E., Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura, *Dyna*, Año 71, Nro 144, pp.151-163, 2004.
- [29] BUCHANAN-SHIPWAY, V.E., MCCARTNEY, D.G., Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear*, No 263, pp. 99-110, 2007.
- [30] BUCHELY, M.F., GUTIERREZ, J.C., LEON, L.M., TORO, A., The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, No 259, pp. 52-61, 2005.
- [31] DE MELO, R., VILLANI-MARQUES, P., Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares, *Soldagem & Inspeccao*, Vol. 14, No. 4, Out/Dez, pp. 329-335, 2009.
- [32] COELHO-LIMA, A., FERRARESI, A., Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira, *Soldagem & Inspeccao*, Vol. 14, No. 2, Abr/Jun, pp. 140-150, 2009.
- [33] DE SAIRRE BÁLSAMO P. S, A. SCOTTI Y J. D. BIASOLI DE MELLO, Interpretación de la microestructura de recargues duros depositados por soldadura utilizando la superficie de liquidus de diagramas Fe-Cr-C, *Revista de Soldadura, CENIM*, Vol25,Nº4, 199-207. 1995.
- [34] NIETO, J., Re: solicitud de cotización de piezas, comunicación electrónica, recambios@acerosysuministros.com, [Consultado el día 2 de Febrero de 2013].
- [35] LA ROSA, E., Curso de reacondicionamiento de piezas por soldadura. Combinado Mecánico del Níquel, Moa, 1995.

- [36]FÁBRICA DE CEMENTO “SIGUANEY”, Reporte de Producción, Enero-marzo, 2012.
- [37]OPINIÓN DE LOS ESPECIALISTA DE LA PLANTA DEL HOLLO DE MANICARAGUA, 01/01/2013