



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA



TRABAJO DE DIPLOMA

Rehabilitación de piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos del tipo "De Pantalla" mediante la aplicación de relleno superficial por soldadura.

Autor: José Francisco Betancourt Arias.

Tutores: Dr. Eduardo Díaz Cedré.

Ing. Pedro Rodríguez Peña.

Santa Clara

2009-2010

"Año 52 de la Revolución"



PENSAMIENTO

*La vida tiene dos reglas: número 1, nunca te rindas;
número 2, siempre recuerda la regla número 1.*

Duke Ellington.

DEDICATORIA

- *A mi abuela Paterna.*
- *A mis padres por estar siempre pendientes de 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.

- *A todos mis familiares que me apoyaron siempre.*
- *A todos mis amigos que estuvieron en las buenas y en las malas.*
- *A todos los profesores que han sabido guiarme hasta este momento.*

RESUMEN

Resumen.

El presente trabajo trata sobre la tecnología para la recuperación de partes del Molino Secundario de Pantalla HAZEMAG que se utiliza en la trituración de áridos en las canteras. En el mismo, se brinda información sobre las características de este equipo, se realiza un análisis de los mecanismos de desgaste que actúan sobre sus partes, se ofrecen dos variantes de procesos tecnológicos de soldadura que pueden ser utilizadas para la reparación de las referidas partes afectas por desgaste, así como la comparación de dos electrodos para ver cual es el mas indicado y el análisis de los costos para la sustitución de las partes del molino.

Abstract.

This paper deals with the technology for the recovery of parts of Mill Display Secondary Hazemag used in the crushing of aggregates in the quarries. In it, provides information on the characteristics of this team, an analysis of the wear mechanisms acting on its parts, there are two variants of welding technological processes that can be used for the repair of those side affects through attrition and the comparison of two electrodes to see which is the most suitable and cost analysis for replacement of parts of the mill.

INDICE

Índice.

Introducción	1
Capítulo 1	5
1.1 Equipos de molienda de áridos.....	5
1.2 Molino de impacto HAZEMAG, principio de funcionamiento.....	10
1.3 Condiciones de desgaste a que están sometidas las piezas del molino.	13
1.4 Tecnologías utilizadas para la recuperación de las piezas del molino... 16	
1.5 Selección del proceso tecnológico.....	18
1.6 Selección de una aleación para el relleno.	23
Capítulo II. Materiales y métodos	28
2.1 Planificación de experimento para la obtención y evaluación de los parámetros de consumo.	28
2.2- Obtención de los depósitos para la determinación de los parámetros de consumo.	29
2.3- Determinación de las dimensiones y áreas de la sección transversal de los depósitos.....	30
2.4- Determinación de la estructura metalográfica y los perfiles de dureza.. 31	
Capítulo 3. Resultados y Análisis	33
3.1 Parámetros de consumo.....	33
3.2 Geometría del cordón.....	37
3.3 Caracterización metalográfica y de dureza de los depósitos.....	42
Capitulo 4. Cálculo Económico	48
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Bibliografía	59

INTRODUCCION

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 no es la rotura, sino el desgaste sufrido bajo las condiciones de trabajo.

La industria de la construcción no es ajena a esto acentuándose en gran medida el desgaste debido a la utilización de materiales de las más diversas naturalezas y morfología (piedra, arena, tierra, pequeños pedazos de metales etc.) en el proceso de elaboración de la materia prima, debido al vertiginoso desarrollo de la mecanización. A estas condiciones se encuentran expuestos muchos elementos y equipos, un ejemplo de esto, lo constituyen los equipos de moliendas y especialmente las trituradoras, lo cual implica la necesidad de sustituir y recuperar una gran cantidad de estas piezas para lograr un funcionamiento eficiente de estos equipos. Lo anterior, a motivado que se le de una importancia especial a la recuperación de las partes, paredes laterales, pantallas y percutores, que son las partes que más están sometidas a desgaste.

Sabemos que por medio de la soldadura de relleno o metalizado podemos aplicar aleaciones mas duraderas que las obtenidas en la pieza original, mediante la previa protección de la superficie. Obtener las propiedades mecánicas y tecnológicas de acuerdo a las necesidades de la pieza según el medio donde trabaja, es algo que requiere de ciertos análisis que hacen esta tarea un poco difícil. Por lo que se necesita una correcta selección de la aleación, el proceso y la secuencia tecnológica a emplear según las necesidades imperantes.

Problema científico: Se desconocen los aspectos técnico - económico que intervienen en el proceso relleno superficial por soldadura de piezas sometidas

a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos., como una vía de incrementar la vida útil de las mismas.

Hipótesis: Si se establecen los elementos técnico – económico que intervienen en el proceso de relleno superficial por soldadura de piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos, es posible incrementar la vida útil de dichas piezas, lo que repercutirá en una disminución de los costos de operación en el proceso así como una disminución de los gastos por reposición de piezas.

De lo anterior se deriva el siguiente objetivo general:

Objetivo General: Establecer los elementos técnico - económico que intervienen en el proceso de relleno superficial por soldadura de piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos.

Objetivos Específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre las características proceso de relleno superficial por soldadura en piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos.
- Implantar los elementos de proceso tecnológico relleno superficial por soldadura en piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos.

Tareas:

- Revisión bibliográfica sobre las características de los molinos de trituración de árido, así como de los mecanismos fundamentales de desgaste a que están sometidos los elementos principales que conforman estas máquinas.
- Determinar los procesos de relleno superficial por soldadura que pueden ser utilizados para la rehabilitación de piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos.
- Fijar los sistemas aleantes a utilizar por los procesos de relleno superficial por soldadura que puedan ser resistentes a los diferentes

regímenes de desgaste abrasivo/impacto que están presentes en la piezas de los molinos de trituración de áridos

- Delimitar los procedimientos tecnológicos a utilizar por los procesos de relleno superficial por soldadura que puedan ser utilizados en la rehabilitación de piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos.
- Realización del análisis económico del proceso.

Impactos:

Económicos: El establecimiento de los elementos técnico – económico que intervienen en el proceso de relleno superficial por soldadura en piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos, permitirán el incremento de la vida útil de dichas piezas, lo que repercutirá en una disminución de los costos de operación del proceso por eliminación de paradas, así como una disminución de los gastos por reposición de piezas.

Metodológico: Se establece desde el punto de vista Metodológico una secuencia que puede constituir una guía para encarar la rehabilitación de piezas con características similares.

Sobre la Salud Humana: Alcanzar criterios para una mayor durabilidad y fiabilidad de las piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos, minimiza los riesgos en que incurren los operarios y mecánicos durante la reparación de estos equipos.

Defensa Nacional: Una mayor durabilidad y fiabilidad de las piezas sometidas a desgaste abrasivo/impacto en molinos de trituración de áridos evita fallas catastróficas y paralización de flujos productivos lo que podría repercutir en la paralización de obras de la defensa del país que se este acometiendo.

Tipo de investigación: Exploratoria y descriptiva.

Métodos científicos empleados: Análisis de síntesis; inductivo deductivo, análisis y revisión documental.

CAPITULO I

Capítulo I.

1.1 Equipos de molienda de áridos.

El tamaño de las rocas que se extraen en los yacimientos y que son destinadas a la industria de la construcción es muy variable y dependen en gran medida de las condiciones de extracción. Esto impide que puedan ser utilizadas en ese estado en la mayoría de las diferentes etapas del proceso de construcción. Es por ello que el proceso de molienda es una etapa prácticamente imprescindible, la misma está compuesta por un conjunto de tratamientos mecánicos, para procesar las rocas con el fin de obtener fragmentos de dimensiones homogéneas.

La cantidad de pasos de moliendas depende del tamaño final del árido que se necesite obtener. Por ejemplo: si las dimensiones de los bloques son del orden de algunos centímetros, ha de recurrirse a una o varias trituraciones, ahora, si las partículas a obtener son del orden de milímetros, la trituración debe ser seguida de un molido. Estas operaciones van siempre acompañadas de cribados, que, juiciosamente efectuados, economizan el proceso (Comas y Basqués, 1960, 226 p.).

Antes de pasar al molido el mineral debe pasar por las quebrantadoras, las cuales se distinguen por ser básicamente de dos tipos:

Quebrantadoras de mandíbula: Son aquellas donde el material se introduce entre dos mandíbulas, una de ellas es fija, la otra es móvil, animada de un movimiento de avance y retroceso gracias a un sistema biela- excéntrica (Ver figura 1.1).

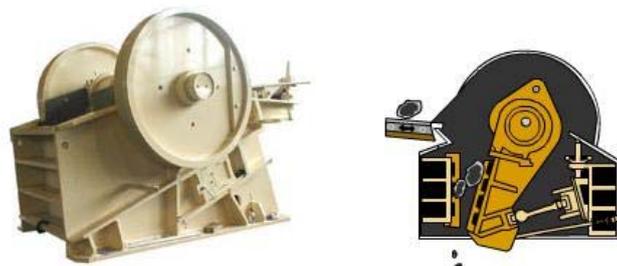


Figura 1.1 Quebrantadora de mandíbula. (Maquinarias Shibang, 2009)

Quebrantadoras giratorias: Son aquellas donde el mineral tritura por compresión entre la pared de una cuba troncocónica fija y un rodillo cónico impulsado por un árbol animado de un movimiento giratorio que alcanza las 500 rpm (Ver figura 1.2).



Figura 1.2 Quebrantadora giratoria. (Maquinarias Shibang, 2009).

Como se señaló anteriormente, para lograr un determinado tamaño de los áridos, no solo se necesita de las quebrantadoras, también son necesarios los molinos, como un proceso posterior al quebrantado (Comas y Basqués, 1960, 226 p.). Los diferentes tipos de molinos se citan a continuación:

Molinos de cilindros: Están formados por dos cilindros huecos de igual diámetro y de ejes horizontales paralelos. Estos cilindros giran en sentido inverso, la superficie de trituración, la cual puede ser liza o estriada se fabrica de acero endurecido. Los soportes de uno de los cilindros son fijos y solidarios de la armazón, los soportes del otro están montados sobre unas ranuras, lo que permite regular la distancia entre los ejes. Cuando un fragmento demasiado duro resiste al molido, el cilindro regulable puede separarse para darle paso, unos resortes potentes vuelven el cilindro a su posición normal. El diámetro de los cilindros varía de 45 a 150 cm, y su longitud, entre 30 y 60 centímetros. El espesor de la capa superficial es del orden de 10 cm y la velocidad de rotación llega a 100 rpm (ver figura 1.3).

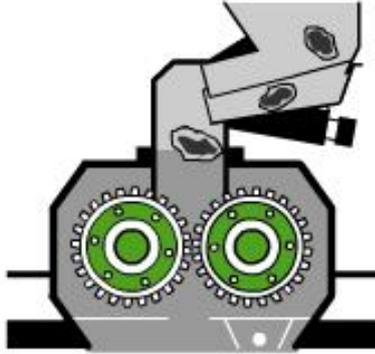


Figura 1.3 Molino de cilindro (Maquinarias Shibang, 2009)

Molino de bolas: Está formado por una caja robusta que gira alrededor de un eje horizontal. La trituración del mineral se realiza por unas bolas de acero o de sílex puestas en movimiento por la rotación misma de la caja. Un tamiz situado en la periferia deja salir solamente los granos del tamaño deseado y los rechazados continúan en el interior con las bolas molidoras. El diámetro del aparato varía de 0.6 a 3m, la longitud es aproximadamente tres cuartos del diámetro. El número de bolas pesando cada 1 Kg. puede ser 1000. La velocidad de rotación es del orden de 100 rpm (Ver figura 1.4).



Figura 1.4 Molino de bolas (Maquinarias Shibang, 2009).

Molinos centrífugos: Son aquellos donde el material se proyecta por inercia contra las paredes de una cuba que gira alrededor de un eje vertical, se tritura por unas piezas flotantes móviles que actúan también bajo la acción de la inercia (ver figura 1.5).



Figura 1.5 Molino centrífugo (RSS SITEMAP, 2008)

Molinos de Martillos: Después de llegar a los rotores, el material a triturar es machacado por los cabezales móviles, que lo proyectan contra los deflectores. En la parte inferior se efectúa una segunda trituración entre rotor y deflector. La dirección rotativa del rotor puede cambiarse, gracias a la incorporación de deflectores en ambos lados (reversión). Esto garantiza un óptimo uso de las cabezas de martillo en relación con el desgaste (ver figura 1.6).

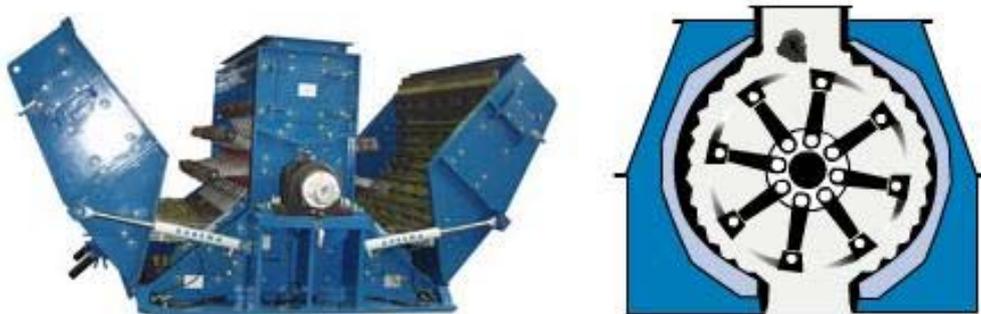


Figura 1.6 Molino de martillos (AEUBENA, 2008)

Molinos de impacto: Son aquellos donde la trituración de la roca ocurre sobre la base de la utilización de la fuerza de impacto. Al entrar las rocas al área de la barra de impacto, son triturados debido al impacto de alta velocidad que la misma produce y son lanzados hacia la placa de impacto en el rotor para una trituración secundaria. Luego los materiales serán devueltos nuevamente a la barra de impacto para una tercera trituración. Este proceso se repite hasta que los materiales son triturados en el tamaño requerido y descargados desde la parte más baja de la máquina. El tamaño y la forma del polvo final puede ser

cambiada ajustando el espacio entre la barra de impacto y el soporte del rotor (ver figura 1.7).

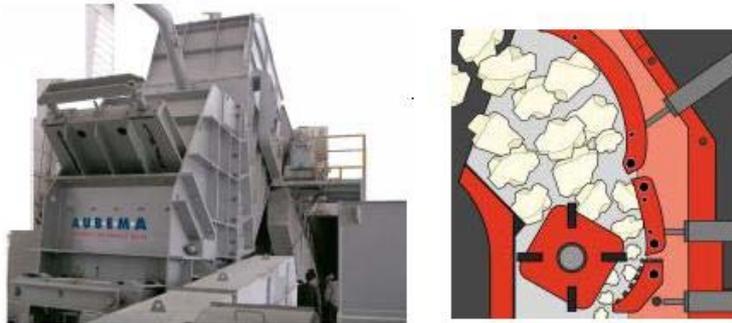


Figura 1.7 Molino de impacto (AUBEMA, 2008).

De todos estos molinos, en Cuba los que mayor difusión presentan son los molinos de impactos debido a las ventajas que presentan comparados con los demás. Entre estas ventajas podemos citar:

- La posición adecuada de las pantallas de choque asegura el mayor impacto y alto coeficiente de reducción y óptima cubicidad de materiales que son triturados.
- Obtienen mayor cantidad de material válido en la primera pasada, sobre la base de menor consumo de energía
- Rápido acceso a la cámara de impacto los que permite un rápido reemplazo de la barra y de las placas de impacto, facilitando un mantenimiento rápido y simple.
- Las barras de impacto pueden ser rotadas, dando la posibilidad de trabajar por sus cuatro caras optimizando su utilización

Sin embargo, el inconveniente fundamental de este tipo de maquinaria consiste en que sus elementos de molienda están sometidos a niveles de desgaste superiores a los demás tipos de molinos. Esto provoca que los estoques de piezas de repuesto de este tipo de maquinaria tengan que ser considerablemente altos. A continuación se detalla más sobre este tipo de molino, tomando como referencia el modelo HAZEMAG, el cual es uno de los más difundidos en Cuba.

1.2 Molino de impacto HAZEMAG, principio de funcionamiento.

Los molinos de impacto HAZEMAG, como muchos otros de su tipo, se utilizan en la trituración de rocas que pueden ir desde bloques grandes hasta pequeños. Ellos basan su funcionamiento en las rocas con un determinado tamaño, se vierte por la boca del molino, las mismas se trituran sobre la base de la acción entre el percutor y la placa de choque, la cual está sostenida con la pantalla. El tamaño del producto obtenido se realiza sobre la base de la regulación de la abertura entre el percutor situado en el rotor y las placas de choque. En la Tabla 1.1 se pueden apreciar algunas características de este tipo de molino.

Tabla 1.1- Características del molino de impacto HAZEMAG.

Modelo	Boca de Entrada (mm)	Tamaño de Alimentación (mm)	Máx. Potencia (Kw.)	Peso Máquina (T)	Producción (T/h)
HAZEMAG	1080-400	350	110	16.5	70-130

1.2.1 Partes del Molino.

Un molino de impacto HAZEMAG, como se muestra en la figura 1.8, consta de los siguientes elementos principales:

Bastidor de trituración: Es la parte externa del molino y es la encargada de darle soporte a todo el conjunto, está construida de chapas laminada, unidas mediante soldadura, con una gran cantidad de nervios para de esa forma poder darle rigidez a todo el conjunto. Con el objeto de poder realizar rápidamente el cambio de las piezas gastadas, esta máquina, en su parte trasera, posee una puerta abatible con un cilindro hidráulico de doble efecto con antiretorno incorporado para seguridad de las maniobras.

Blindajes Laterales: Están colocados en el interior del molino, para de esa forma dar protección al bastidor de trituración. Están constituidos por piezas gruesas de configuración simple, muy similares entre sí, para de esa forma evitar incomodidades en cuanto a la colocación de los repuestos. Estas piezas

están elaborados de materiales de alta resistencia a la abrasión, principalmente, fundición blanca de alto cromo. Para facilitar su colocación están sujetas con cuñas ajustadas exteriormente contra la carcasa.

Placas de Choque: La interacción de estos elementos y el percutor, permiten la trituración de las rocas. Las placas de choque están elaboradas de fundición blanca de alto cromo, van unidas a las pantallas mediante fijaciones mecánicas, ya que las placas llevan su propia rosca de fundición. Con el objetivo de obtener un mayor volumen de áridos de pequeñas dimensiones, a este tipo de molino, en dependencia de su diseño, se le puede colocar más de una placa de choque (un máximo de tres). Estas placas adicionales van equipadas con un elemento hidráulico que le permite el acercamiento hacia el rotor.

Pantallas: Son las encargadas de soportar las placas de choque, están elaboradas de acero laminado, utilizando chapas de gran espesor, soldado, con nervios en la parte trasera, haciendo de ella una pieza monobloque.

Percutor: Como se dijo anteriormente la interacción de las placas de choque y el percutor con las rocas, provocan la trituración de las mismas. Estas barras van montadas sobre el rotor, el cual posee un diseño especial (unos alojamientos longitudinales, con el fin de dar soporte a las barras de choque, las cuales son introducidas lateralmente). Estas barras de choque están elaboradas de un acero con alto contenido de cromo y manganeso y pueden ser puestas de varias formas en el rodete con vistas a utilizarlas varias veces en la medida que se desgasta (cuatro veces). La sujeción de estos elementos se realiza mediante unas chavetas laterales.

Equipo Hidráulica: Es un equipo compacto que consta de un depósito, el cual en la parte inferior lleva incorporado la bomba, filtro y regulador, todo ello cerrado en estanco con cierre. La máquina lleva la correspondiente instalación hidráulica, actuando para abrir la carcasa principal del molino para revisión o cambios de placas, y asimismo, para la regulación de la tercera placa de acercamiento o separación del rotor, según convenga

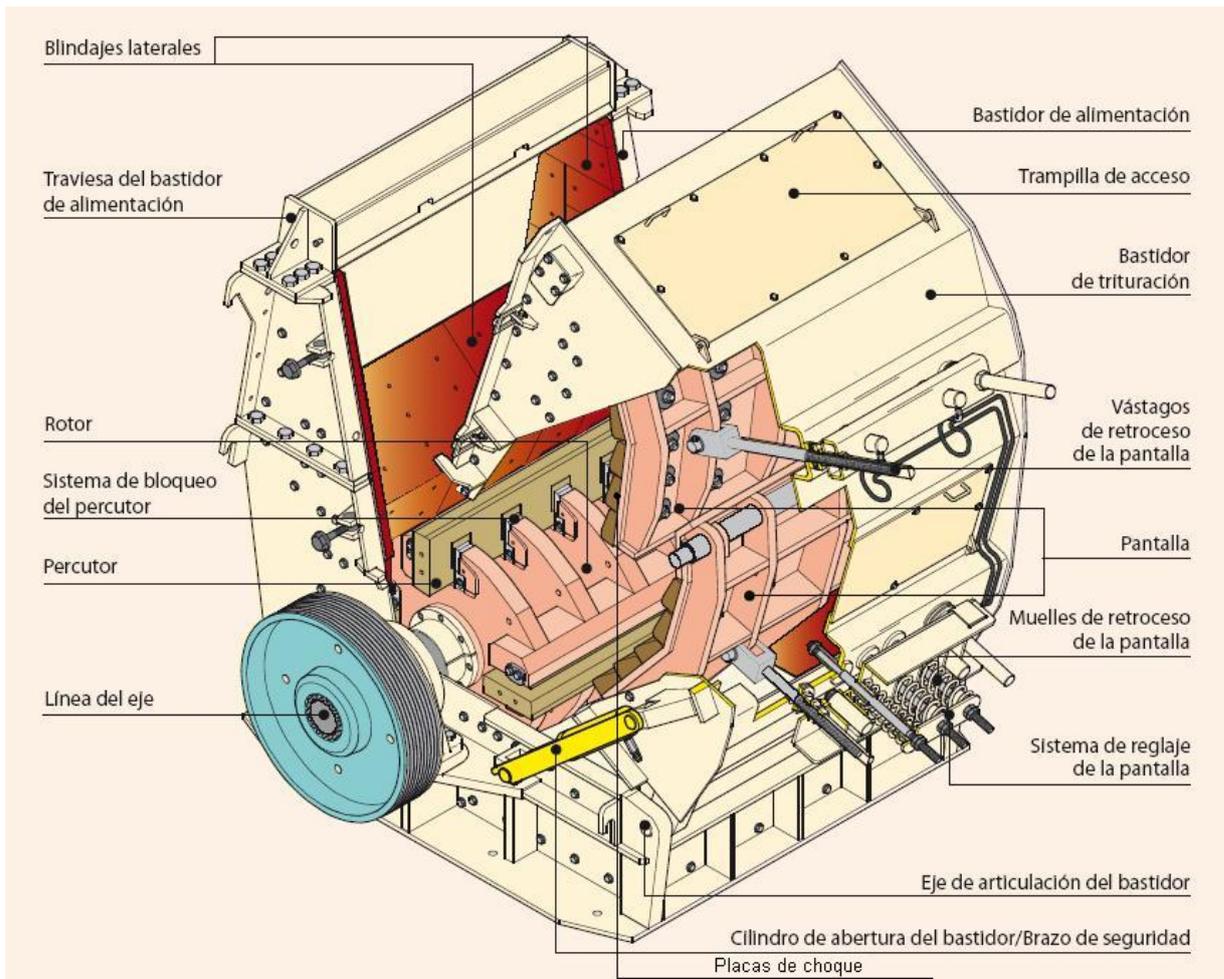


Figura 1.8 Elementos constitutivos de un molino de impacto HAZEMAG (Metso minerals, 2006)

Como se ha podido apreciar en este epígrafe, los elementos que están sometidos a mayor desgaste y que potencialmente son los causantes fundamentales de la salida de servicio de este equipo son:

- Los blindajes laterales.
- Los percutores.
- Las placas de choque.

A continuación se explican las condiciones de desgaste a que están sometidos estos elementos.

1.3 Condiciones de desgaste a que están sometidas las piezas del molino.

El desgaste es la pérdida progresiva de sustancia en la superficie de trabajo de los cuerpos como resultado del movimiento relativo de los mismos, lo que lleva a la variación de las propiedades de los elementos.

Diversos factores inciden en el desgaste, lo cual lo convierte en un sistema complejo, donde se establece una conexión entre la fricción, el desgaste y las características físico - mecánicas de los cuerpos deslizantes en dependencia de las condiciones externas. Entre estos factores podemos citar: (Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

Factores Metalúrgicos: Dureza, Tenacidad, Constitución y Estructura; Composición química.

Factores Operacionales: Materiales en contacto, Modo y tipo de carga, Velocidad, Temperatura, Rugosidad de la superficie, Distancia recorrida;

Factores externos: Elementos externos, corrosión. Etapas del desgaste.

Existen varias clasificaciones de desgaste, sin embargo una de las más extendidas en la literatura fue la planteada por Barwell (1957; citado en Martínez y Martínez, 1997, 243 p.), la que consiste en explicar el modo en que se desprende la capa de metal durante la interacción. Esta puede ser de cuatro tipos fundamentales.

- Fatiga superficial.
- Abrasión.
- Adhesión.
- Corrosivo –mecánico.

El mecanismo de desgaste a que más están sometidos los principales elementos que conforman el molino (los blindajes laterales, los percutores y las placas de choque) es el desgaste abrasivo. Este mecanismo se basa en la presencia de un movimiento tangencial, la superficie dura se deslizará, formando surcos en la superficie blanda lo que produce desprendimiento de esta sin remoción de material (ver figura 1.9). El proceso de desgaste abrasivo esta muy difundido en la industria. Este aparece de diferentes formas y en la

práctica se diferencia en varios tipos, desgaste de dos cuerpos y de tres cuerpos. En el caso del molino de impacto, el más frecuente es el de tres cuerpos, por ejemplo: el desgaste abrasivo que ocurre entre las rocas-percutor-placa de choque y en el caso de dos cuerpo en que ocurre entre blindaje laterales-roca.

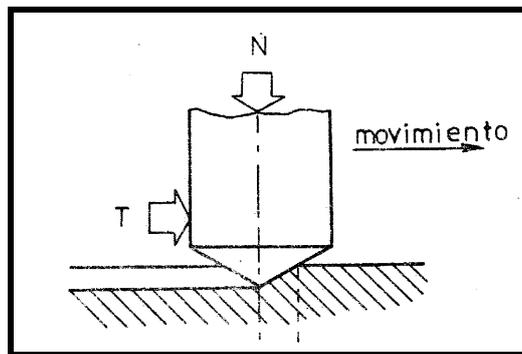


Figura 1.9 Proceso abrasión (Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

La ocurrencia de este mecanismo está condicionada por la dureza de la superficie. ((Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

HBp- Dureza de la partícula.

HBmet.- Dureza del metal.

Si $HBp \gg HBmet$. Se produce el microcorte o la ralladura.

Si HBp es aproximada a HBmet. No ocurre el mecanismo abrasivo.

Si $HBmet = 1.3HBp$. Se obtienen buenos resultados de resistencia.

El mecanismo abrasivo a su vez se puede dividir en tres tipos, los cuales se encuentran presentes en las principales partes a que conforman el molino en estudio:

- Abrasión de baja presión.
- Abrasión de alta presión.
- Abrasión por arranque o impacto.

Abrasión a baja presión: Este se encuentra presente en las paredes del molino (blindaje lateral), fundamentalmente en la zona de la boca, ocurre gradualmente por el deslizamiento de partículas, moviéndose libres sobre una superficie (ver figura 1.10), produciendo un rayado o pulido. Las tensiones

actuantes son bajas y no exceden la resistencia a la rotura del abrasivo, no se fragmentan.

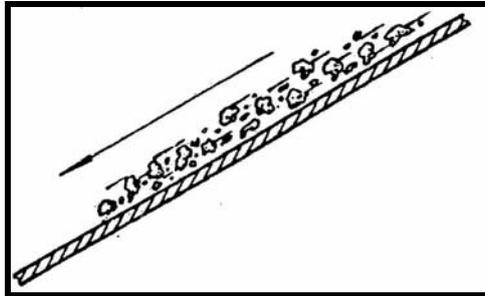


Figura 1.10 Abrasión de baja presión. (Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

Abrasión a alta presión: Este tipo de desgaste está presente cuando las rocas son obligadas a pasar entre las placas de choque y el percutor (ver figura 1.11). Dadas las fuerzas de compresión aplicadas las partículas se fracturan, al igual que el metal base, por lo que este debe poseer alto límite de fluencia.

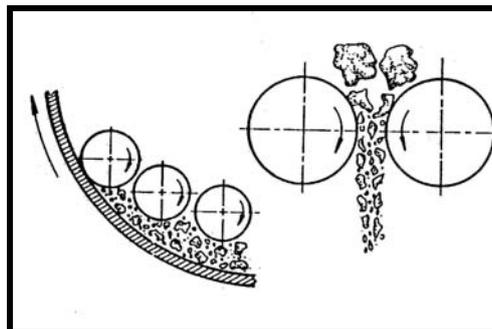


Figura 1.11 Abrasión de alta presión (Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

Abrasión con impacto: Este mecanismo se encuentra presente en el percutor. Involucra la remoción del material por la acción del abrasivo, cuyas partículas son de tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado. La energía de impacto se transfiere al material y haciendo que el abrasivo produzca grandes surcos y ralladuras apreciables a simple vista (ver figura 1.12).

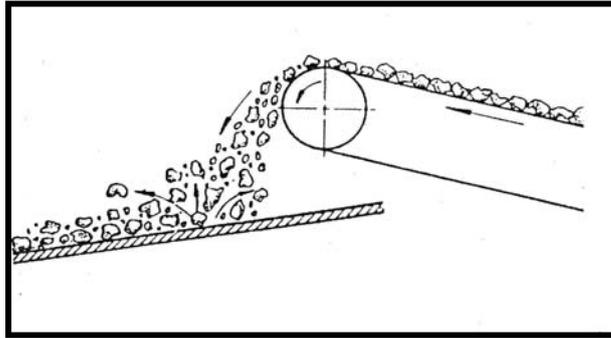


Figura 1.12 Abrasión con impacto. (Martínez y Martínez, 1997, 243 p.)

1.4 Tecnologías utilizadas para la recuperación de las piezas del molino.

Conocemos que como solución a los problemas relacionados con el desgaste, en la industria de materiales para la construcción, se han tomado algunas medidas y se realiza la recuperación de mucha de las maquinarias instaladas. En algunos casos, estas recuperaciones consisten en la sustitución de los elementos desgastados por otros nuevos, fabricados básicamente por fundición. Sin embargo los costos de importación de estos elementos, por su grado de especificidad son altos, rondando los 104 CUC (Nieto, 2010) y por otra parte la industria nacional no tiene condiciones para su fabricación. Es por ello que la soldadura puede ser una herramienta capaz de ser utilizada para la rehabilitación de piezas de equipos de la industria de materiales de la construcción

En el caso particular de los molinos y debido a las características que desde el punto de vista metalúrgico presentan los materiales de que están elaborados los elementos que más problemas de desgaste poseen (blindajes laterales, percutores y placas de choque), la aplicación directa de soldadura, pudiera repercutir negativamente desde el punto de vista de la calidad y durabilidad de dichos elementos, ya que los mismos están elaborados de materiales que presentan mala soldabilidad (fundiciones blancas al cromo y al cromo manganeso). Un ejemplo de lo anteriormente planteado, se puede apreciar en la tabla 1.2, la que representa una composición química típica de una placa de blindaje de un molino HAZEMAG. La figura 1.13 muestra en un cuadro la

microestructura, de la propia placa de blindaje, donde se puede apreciar la presencia de cementita (zonas blancas) y carburos de cromo (zonas negras):

Tabla 1.2- Composición química de una placa de blindaje de un molino HAZEMAG.

Elementos químicos.	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
% en masa	3.14	2.25	1.77	10.65	0.29	0.20	0.25	0.69

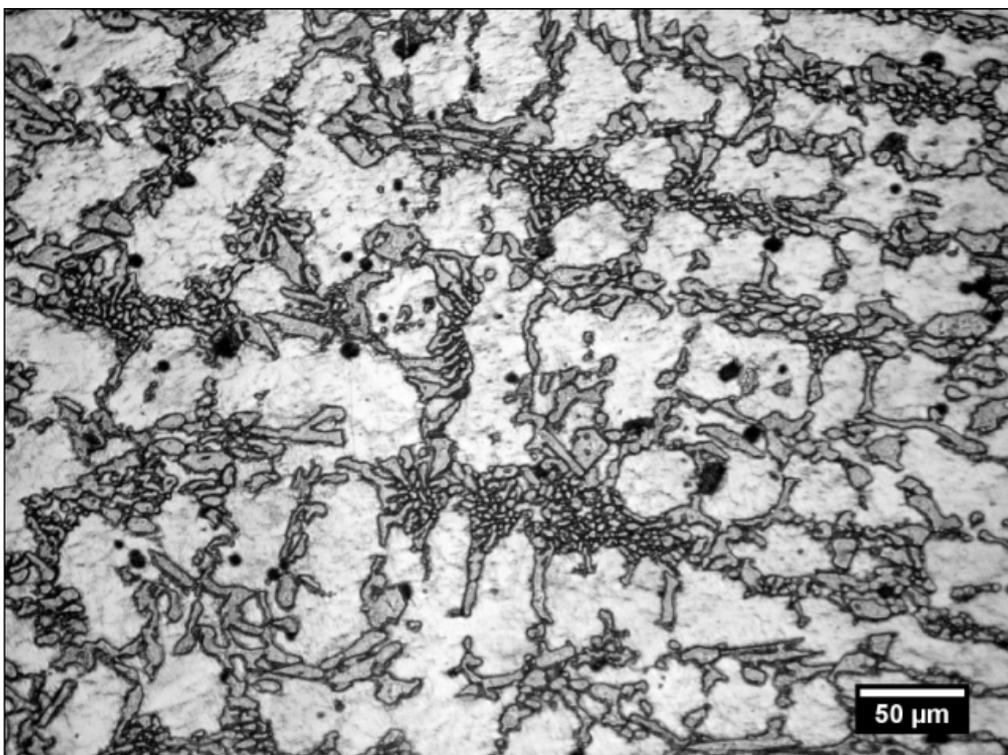


Figura 1.13 Cuadro microestructural de la placa de blindaje (A 200X atacada con Murakami).

Es por ello que la vía más fácil de rehabilitar esos elementos sería su sustitución por elementos similares, fabricados de acero, de bajo contenido de carbono, los cuales presentan buena soldabilidad, pero recubrirlos con materiales antidesgaste aplicados por soldadura.

1.5 Selección del proceso tecnológico.

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.

Analizando la situación concreta del molino y teniendo en cuenta 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 y núcleo de fundente (FCAW).**

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 (ver figura 1.14).

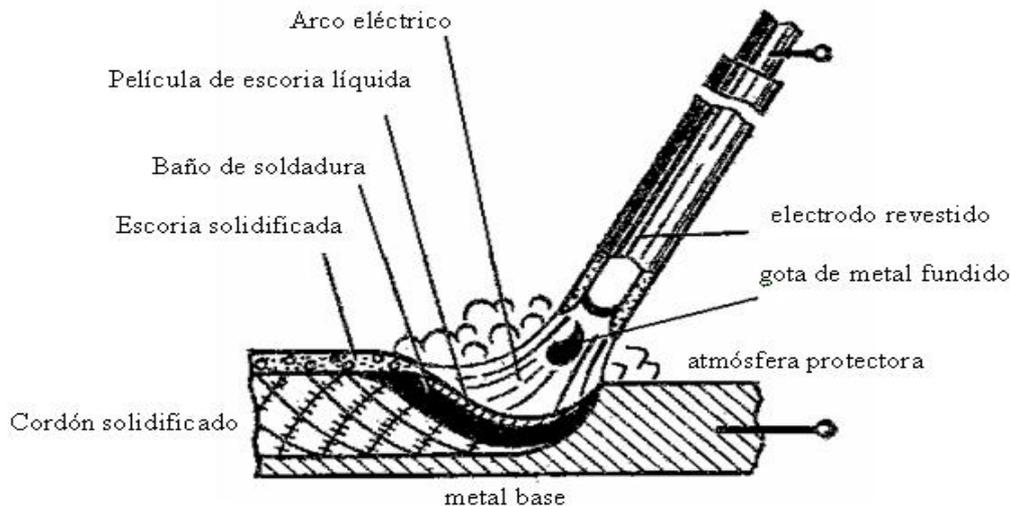


Figura 1.14 Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido.
(ANSI/AWS)

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 se realiza 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 portaelectrodo 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 portaelectrodo 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.

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:**

- 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 capaz 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.

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 (ver figura 1.15).

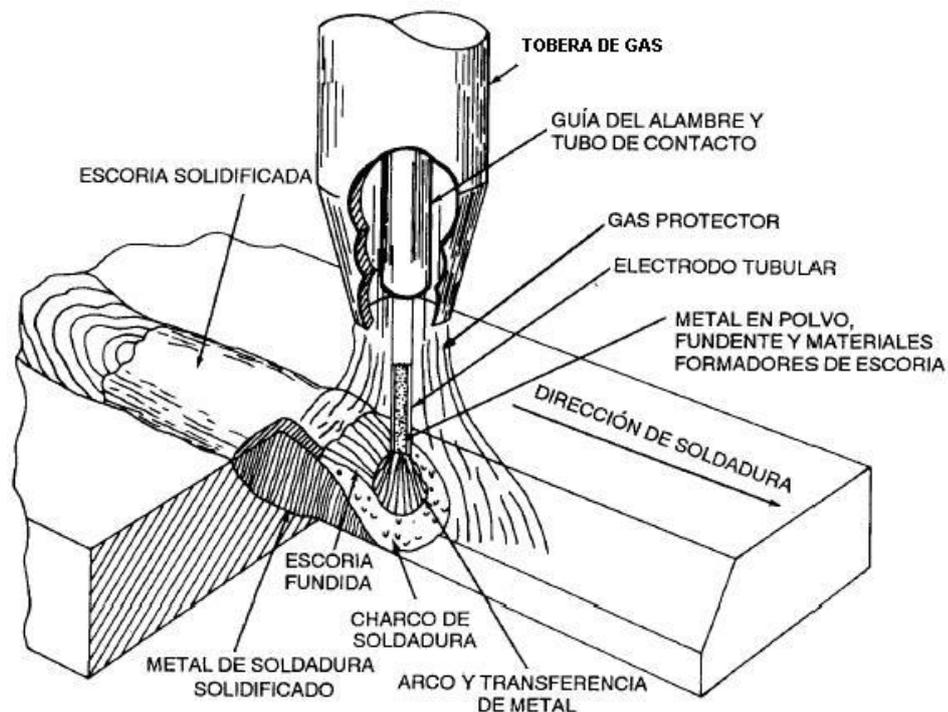


Figura 1.15 Proceso de soldadura por arco con electrodo tubular continuo y con núcleo de fundente (FCAW) (ANSI/AWS)

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.

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 autoprottegida, 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.

Históricamente la industria de materiales de la construcción ha comprado consumibles para ambos procesos, incluso muchas toneladas de diferentes tipos de electrodos tubulares para el relleno permanecen en los almacenes de forma ociosa, como son: OA - 300, OA - 400, UTP T-6, entre otros. Esto ocurre 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 para el relleno, debido a su amplia difusión en todas canteras y molinos como el proceso de soldadura más universal utilizado en la recuperación de piezas.

1.6 Selección de una aleación para el relleno.

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 son recomendados por sus fabricantes para funciones diferentes.

Para la selección de un material de relleno superficial utilizaremos el criterio dado por la firma Lincoln Electric Company, 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 nuestro es el segundo (b), ya que se debe proteger la superficie simple de los blindajes laterales, del percutor y de las placas de choque sin tener en cuenta la existencia de un borde cortante.

Según la bibliografía consultada, se plantea que una superficie es resistente al desgaste abrasivo 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.

En el mercado se pueden encontrar un grupo de electrodos revestidos (ver tabla 1.3) que responden a las características antes citadas (fundiciones al cromo martensítica con más de un 20% de aleación).

Tabla 1.3- Electrodoos revestidos presentes en el mercado que depositan fundición al cromo martensítica con más de un 20% de aleación

Fabricante	Identificación
CUAREPOTI	Agrotec 1400
UTP	UTP 670

Agrotec 1400: Este es un electrodo desnudo de sección tubular, deposita un metal de soldadura con alto contenido de carburos de cromo que le otorgan muy buena resistencia a la abrasión con moderada resistencia al impacto. Genera muy poca escoria y posee un elevado rendimiento >95%. Al ser electrodo tubular requiere menores amperajes que productos similares de sección sólida, lo que garantiza bajos niveles de dilución. Alguna de sus características principales se puede apreciar en la tabla 1.4. Cuando es necesario reconstrucción o recargues de mucho espesor, se recomienda el aporte de un colchón con electrodo del tipo AWS-7018 y luego Agro Tec 1400.

Tabla 1.4- Características principales del electrodo AGROTEC 1400.

Clasificación AWS A5.21-2001	ER-FeCr	
Dureza del deposito (HRC)	55 a 60	
Temperatura de mantenimiento de la dureza (°C)	600	
Cantidad de máxima de pasadas	3	
Maquinabilidad	Con abrasivos	
Composición química del metal de depósito (% en masa)	Carbono	3,5
	Cromo	30
Oxicortabilidad	No	
Tipo de corriente y polaridad	CC (+)	
Corriente de soldadura	Diámetro del electrodo(mm)	(A)
	3,5	90 -130
	5	120 - 160
	7,2	150 - 200
Posición de soldadura	Plana	
Color de identificación	naranja	

Tabla 1.5- Características principales del electrodo UTP 670.

Clasificación DIN 8555	E 6-UM-60	
Dureza del depósito (HRC)	55 a 60	
Cantidad de máxima de pasadas	1	
Maquinabilidad	Con abrasivos	
Composición química del metal de depósito (% en masa)	Carbono	0,4
	Silicio	1
	Manganeso	1
	Cromo	9,5
	Molibdeno	0,6
	Vanadio	1,5
Oxicortabilidad	No	
Tipo de corriente y polaridad	CC (+)	
Corriente de soldadura	Diámetro del electrodo y largo (mm)	(A)
	3,2 X 350	90 -120
	4 X 450	123 - 168
	5 X 450	170 - 210
	6 X 450	210 - 250
Posición de soldadura	Plana, horizontal y horizontal de filete	
Enfriamiento posterior a la soldadura	Lento	

Por lo antes expuesto, se puede apreciar que ambos electrodos poseen características que los hace ser adecuados para solucionar los problemas vinculados a los desgastes que ocurren en las piezas de los molinos de impacto, sin embargo si tomados como base solos 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 permita determinar.

CAPITULO II

Capítulo II. Materiales y métodos.

2.1 Planificación de experimento para la obtención y evaluación de los parámetros de consumo.

En el trabajo se utilizaron dos electrodos por arco para recargue, uno revestido, el UTP 670, de diámetro 4 mm por 350 mm de largo y otro desnudo, el CUAREPOTI Agrotec 1400 de 5 mm de diámetro por 500 mm de longitud, con vista a hacer un análisis comparativo de los resultados.

Teniendo en cuenta que 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 se tomó como variable de entrada para los experimentos la corriente de soldadura (Is) (tratando de mantener constante la velocidad de soldadura) con vistas a estudiar su efecto sobre los parámetros tecnológicos del electrodo y teniendo en cuenta que este parámetro del régimen será en este caso quien determinará la magnitud de calor asociado, por tanto la microestructura y propiedades finales de los depósitos de recargue. En ambos electrodos la corriente fue variada en un rango de 120 a 160 A. Esto tiene como objetivo obtener la zona de operación adecuada para cada electrodo. Quedando los experimentos como se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1- Planificación de los experimentos.

No. del experimento		Valor de la corriente soldadura (A)
Electrodo UTP 670	Agrotec 1400	
1	4	120
2	5	145
3	6	160

2.2- Obtención de los depósitos para la determinación de los parámetros de consumo.

Fueron utilizados en la obtención de los depósitos, para valorar la geometría de las uniones, chapas de prueba de acero CT3 de 100×50×10mm , las cuales fueron fijadas para evitar la deformación, luego de ser previamente limpiadas de herrumbres y otras suciedades.

Se utilizó una fuente de soldadura cuyos datos se ofrecen a continuación:

- Marca: Inverter.
- Modelo: HM630.
- Potencia nominal de entrada: 3-fase, 380V + / -10%, 50Hz.
- Capacidad nominal de entrada (KVA): 13, 18, 26, 36.
- Ciclo de trabajo nominal (%): 60, 60, 60, 35.
- Corriente de salida (A) :30-315, 40-400, 50-500, 50-630.
- Tensión nominal del derecho (V): 32,5, 36, 40, 44.
- Eficiencia (%): 85.
- El factor de potencia: 0,93.
- Sin carga de tensión (V): 80.
- Sin carga desperdicio (W): 80.
- Aislamiento de grado: F.
- Shell grado de protección: IP21S.
- Peso (Kg): 40, 42, 47, 60.
- Tamaño (L * W * H) mm: 650 * 320 * 625m m.

El tiempo de arco fue medido por un cronómetro con precisión mínima de ± 0.6 seg. Luego de realizar los depósitos se limpiaron las planchas cuidadosamente con piqueta, cincel-martillo y cepillo de alambre para eliminar los restos de salpicaduras y escoria.

Para la realización de los depósitos fueron pesados todos los cuerpos de prueba y los electrodos a estudiar, con vistas a obtener los resultados en cuanto a la tasa de fusión, deposición y el rendimiento de los mismos. El

pesado de los materiales fue realizado en una balanza técnica Los depósitos fueron realizados por un soldador con gran experiencia en la aplicación de la soldadura de recargue mediante el proceso SMAW y en posición plana. Antes y después de la soldadura fueron pesados las chapas y los electrodos. Estos datos aparecen en el capítulo III.

Pasos para la realización de las mediciones con vistas al cálculo posterior de los parámetros de consumo:

- Se marcarán en una esquina de forma legible las chapas de acero al carbono utilizadas.
- Se marcarán en el extremo los electrodos a utilizar para las distintas réplicas.
- Se pesarán las chapas inicialmente utilizando la balanza dispuesta en el puesto de trabajo (g).
- Medir con pie de rey el diámetro efectivo de los electrodos a utilizar (mm).
- Medir con una regla metálica, la longitud inicial de los electrodos. (mm).
- Medir masa bruta inicial de los electrodos. (g)
- Todos los datos se anotarán en la tabla de datos.
- Regular la intensidad de corriente de la fuente al valor requerido para proceder con el primer ensayo del electrodo a probar.
- Medir el tiempo básico de soldadura mediante el cronómetro.
- Limpiar rigurosamente las chapas de escoria y salpicaduras utilizando los medios disponibles.
- Pesar las planchas y anotar la masa final de las mismas.

2.3- Determinación de las dimensiones y áreas de la sección transversal de los depósitos.

Los depósitos fueron cortados transversalmente con una tronzadora en el laboratorio de metalografía del CIS. Luego de pulido a espejo les fue realizado el ataque con Murakami con vistas a revelar la forma del cordón.

Para la medición de los parámetros que definen la geometría de soldadura (ancho, penetración, altura del refuerzo, área de penetración y área de refuerzo se utilizó un sistema de medición óptico, el cual consistió en una cámara digital Canon A630 acoplada a un microscopio óptico de bajo aumento(2X).

Posteriormente las imágenes captadas fueron procesadas con la ayuda del programa computacional Imagen J, obteniéndose las diferentes dimensiones que caracterizan el cordón de soldadura.

2.4- Determinación de la estructura metalográfica y los perfiles de dureza.

A las probetas correspondientes a diferentes valores de corriente y debidamente preparadas y atacadas se le practicó análisis metalográfico, para de esa forma determinar las fases presentes en los depósitos, para ello se utilizó el microscopio metalográfico (NIM-100). Además de eso, como una forma de la corroborar la estructura presente y teniendo en cuenta la relación existente entre la microestructura y dureza, se le determinaron perfiles de dureza, partiendo desde el metal depositado en dirección descendente hacia el metal base por el centro del depósito. La medición de la dureza fue realizada con un microdurómetro AROTEC modelo HVS 1000 con una carga aplicada de 98,07 N y con aumento de 400X. Se realizaron un total de 15 puntos, separados a 0,5 mm de distancia a cada probeta, 120A ,145A y 160A. En cada punto se realizaron 3 mediciones. Se determinó para cada probeta el valor medio de dureza Vickers, a partir de 3 mediciones en el centro superior del depósito.

CAPITULO III

Capítulo III. Resultados y Análisis.

3.1 Parámetros de consumo.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados de los parámetros de consumo de los dos electrodos para los tres niveles de corriente evaluados. Estos parámetros son: tasa de consumo, la tasa de deposición, el rendimiento real y las pérdidas.

Tabla 3.1 - Parámetros de consumo de los electrodos evaluados.

Nivel de corriente.	Baja 120 A		Media 145 A		Alta 160 A	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Identificación	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Electrodo	UTP670	Agrotec 1400	UTP 670	Agrotec 1400	UTP670	Agrotec 1400
Masa Inicial probeta (g)	331.45	332,14	331.29	330,2	336.25	336,76
Masa Inicial Electrodo (g)	72.43	48,06	74.01	48,25	72.12	47,71
Masa final probeta (g)	343.32	345,55	345.61	342,53	350.05	348,42
Masa final Electrodo (g)	56.22	30,92	53.7	31,53	50.47	31,64
Masa fundida (g)	16.21	16,14	20.31	16,72	21.65	16,07
Masa depositada (g)	11.87	11,41	14.32	12,33	13.8	11,66
Corriente media (A)	119	119	144	144	159	159
Voltaje medio (V)	22,1	17,5	23,6	20	26,6	25,3
Longitud del cordón (cm)	11,5	11,5	11,5	7,5	11	6,5
Tiempo de arco (h)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Taza de fusión (Kg. /h)	1,27	1,34	1,59	2,01	1,77	2,23
Taza de depósito (Kg. /h)	0,93	1,05	1,12	1,48	1,13	1,61
Rendimiento real (%)	73,23	78,24	70,51	73,74	63,74	72,56
Pérdidas (%)	26,77	21,76	29,49	26,26	36,26	27,44

De acuerdo a los resultados el rendimiento real mayor para ambos electrodos se logra con la menor intensidad de corriente de soldadura lo cual se puede apreciar en el gráfico 3.1. Por tanto desde este punto de vista de los mejores resultados de aplicación de recargue, se obtienen con los menores valores de corriente (120 A), siendo el electrodo AGROTEC 1400 el que mejores valores de rendimiento posee (78,24 %). La causa de este fenómeno se debe a que en la medida que las corrientes se incrementan, se incrementan también los fenómenos de oxidación y pérdidas de los elementos de la carga aleante, haciendo menor su incorporación al depósito metálico.

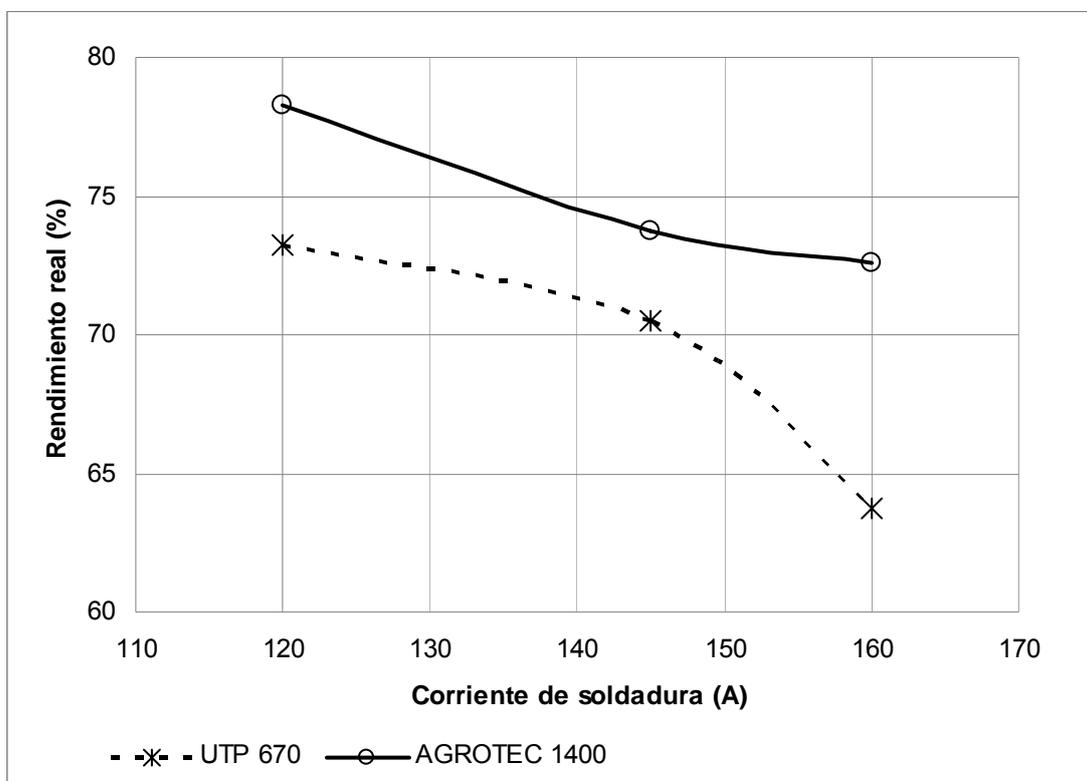


Figura. 3.1 Comportamiento del rendimiento real con la variación de la corriente.

Por otra parte se observa que al aumentar la corriente existe una tendencia al aumento en la tasa de fusión (Figura 3.2) y la tasa de depósito (Figura 3.3). Este comportamiento podría estar asociado a la descomposición de la caliza, (la cual debe estar presente en ambos electrodos). Ella sufre un proceso de disociación endotérmica ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$) en el entorno de 850 oC, 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 un

incremento de la función y deposición de metal (Mazel, 2006). Lo anteriormente planteado, se corresponde con el comportamiento de las pérdidas (Figura 3.4), donde se advierte, que las mismas se incrementan en la medida que aumenta la corriente, ya que a pesar de que existe una mayor cantidad de metal, también se pierde mayor cantidad por la ocurrencia de los procesos anteriormente descritos.

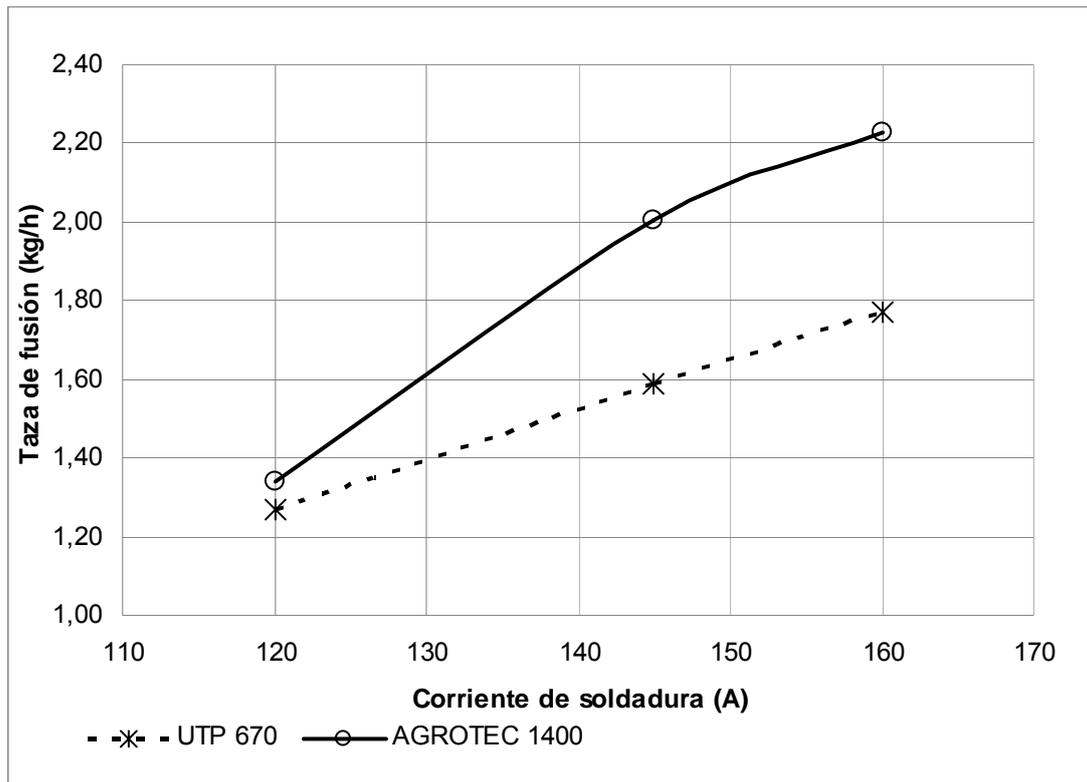


Figura. 3.2. Comportamiento de la tasa de fusión con la corriente de soldadura.

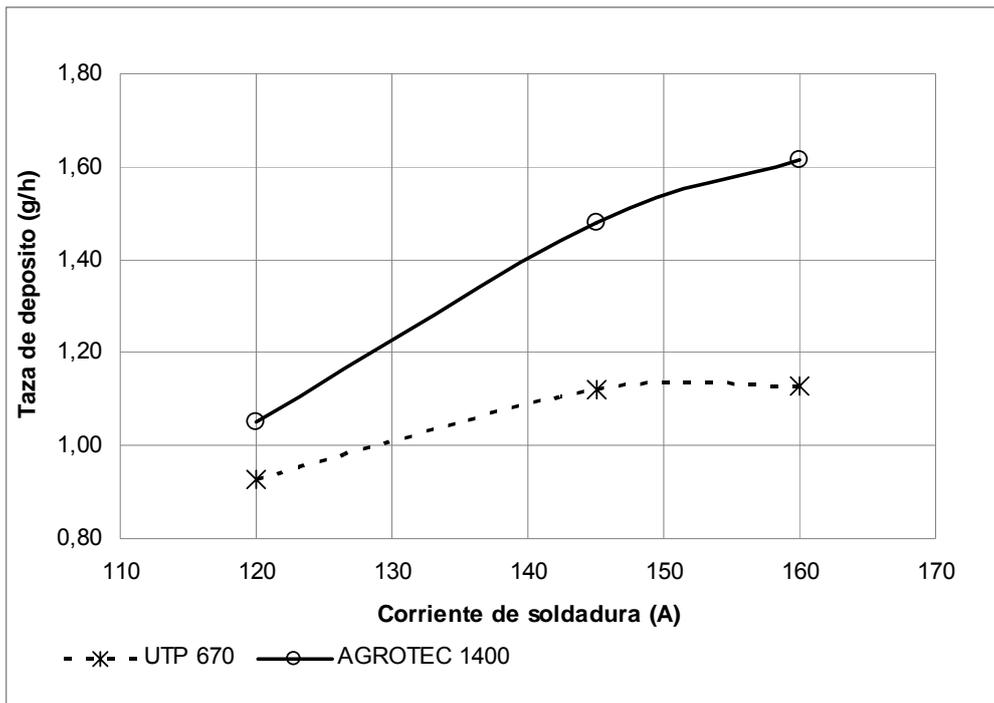


Figura. 3.3. Comportamiento de la tasa de deposición con la corriente de soldadura.

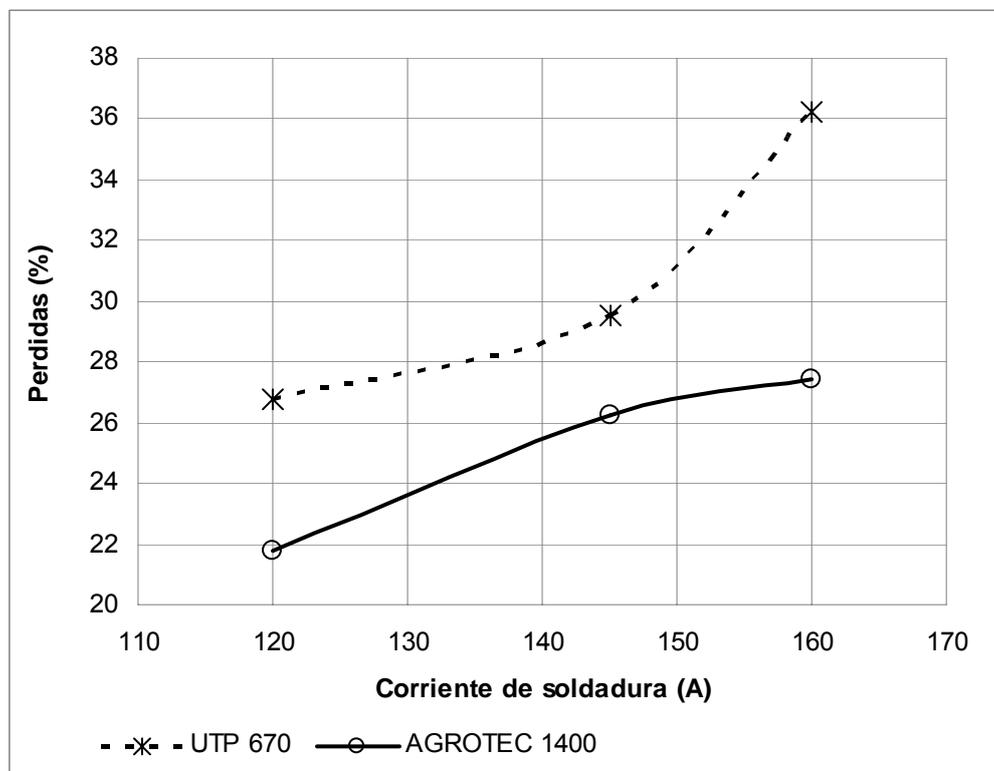


Figura. 3.4. Comportamiento de las pérdidas en función de la corriente de soldadura.

En la comparación de un electrodo con respecto al otro, desde el punto de vista de los parámetros de consumo, el electrodo AGROTEC 1400, presenta mejores características, dadas por un mayor rendimiento total (78,24 %) y las menores pérdidas (22 %), siendo el nivel medio de corriente (145 A) el que mejor propiedades reporta.

3.2 Geometría del cordón.

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de las mediciones de los parámetros geométricos que caracterizan los cordones de soldadura.

Tabla 3.2- Geometría de los cordones realizados con la variación de corrientes.

Nivel de corriente	Bajo		Medio		Alto	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Identificación	1A	1B	2A	2B	3A	3B
Electrodo	UTP 670	Agrotec 1400	UTP 670	Agrotec 1400	UTP 670	Agrotec 1400
Corriente de soldadura media (A)	119	119	144	144	159	159
Ancho del cordón (mm)	6,87	5,88	9,36	6,85	11,70	9,21
Altura del refuerzo (mm)	2,34	3,72	2,01	3,51	1,50	2,49
Profundidad de penetración (mm)	0,75	0,55	1,56	0,84	3,48	1,59
Área del refuerzo (mm ²)	11,82	16,17	13,12	17,43	14,34	18,48
Área de penetración (mm ²)	3,80	2,51	9,43	3,23	21,79	9,12
Dilución (%)	0,24	0,13	0,42	0,16	0,60	0,33

Como se puede apreciar en la figura 3.5 y 3.6, con el aumento de la corriente de soldadura, el ancho del cordón y la profundidad de penetración aumentan. Esto es algo ampliamente abordado en la literatura especializada (HAIDAR, 1998), estando su fundamento asociado a la potencia específica del arco, o sea

la relación de calor generado hacia la pieza por unidad de tiempo y al área de contacto entre la pieza y el arco. En este trabajo se utilizó corriente continua con polaridad invertida (CC+), por tanto la zona catódica está en el metal base y el calor generado en esta zona (calor de la zona catódica, Q_c) es responsable del calentamiento y fusión del metal base y la potencia específica asociada (Q_c/A_0), sería la responsable de la fusión local. La energía Q_c está dada por la energía generada por el paso de los electrones por la zona catódica ($Q_v=I \cdot V_c$, donde V_c es la tensión catódica), menos la energía que se precisa para la emisión de electrones en el cátodo ($Q_\phi=I \cdot \phi$, donde ϕ -función de trabajo) y la energía que se requiere para el calentamiento de este a la temperatura de arco ($Q_T=3/2KTl/e$, de T es la temperatura del arco, K la constante de Boltzman y e es la carga del electrón). O sea $Q_c=I(V_c-3/2(KT/e)-\phi)$, aumentando de forma proporcional con el aumento de la corriente (Allen et al., 1998: 277-285).

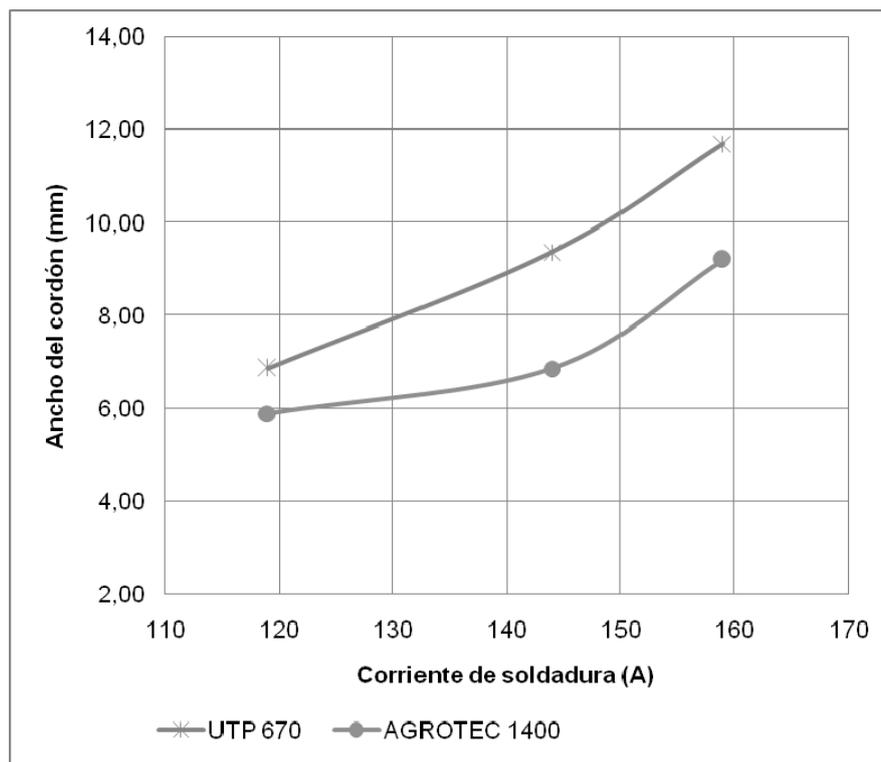


Figura 3.5. Comportamiento del ancho de los cordones con la variación de la corriente.

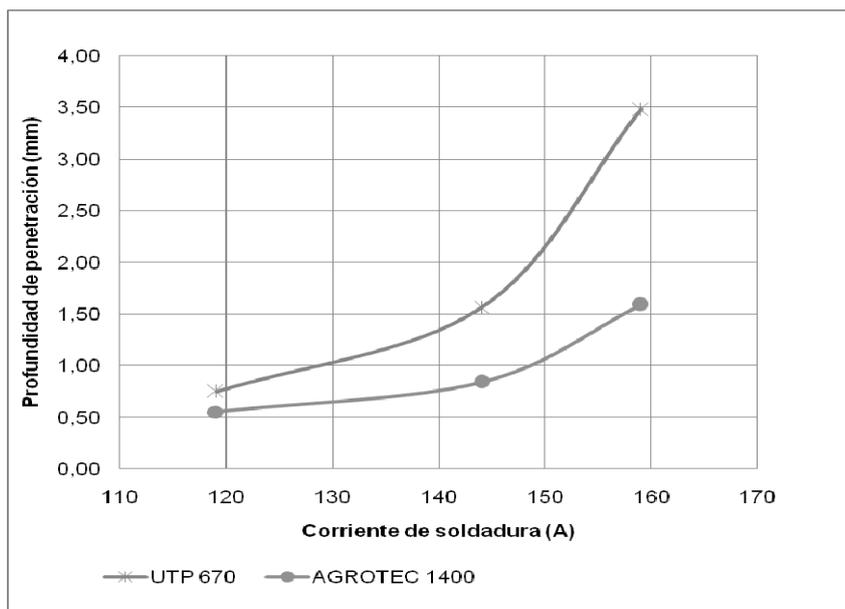


Figura. 3.6. Comportamiento de la profundidad de penetración con la variación de la corriente.

Para el caso de la altura del refuerzo, (ver Figura 3.7) existe una tendencia a la disminución con el incremento de la corriente, esto podría estar asociado a que con un aumento de la temperatura del metal fundido, producto del incremento de la corriente, la fluidez del metal líquido se vea incrementada, lo cual unido al incremento del volumen de metal depositado (figura 3.3), provoca, debido a la acción de la fuerza de gravedad, un efecto de deslizamiento del metal fundido y un aumento en el ancho. Este fenómeno, también viene acompañado de la ocurrencia de defectos de solapamiento, los cuales en las operaciones de relleno superficial no son en extremo peligrosos (Bortoni et al., 1989).

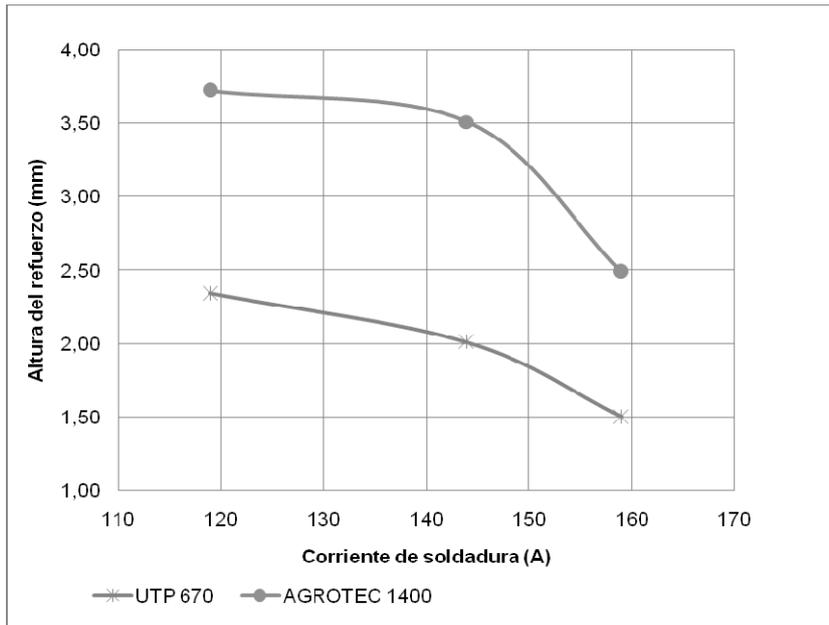


Figura. 3.7. Comportamiento de la altura del refuerzo de los cordones con la variación de la corriente.

El área de refuerzo (figura 3.8) se incrementa con el aumento de la corriente, lo que está en plena correspondencia con el incremento del ancho y la disminución de la altura de refuerzo de los depósitos, lo que a su vez se corresponde con el aumento de la Tasa de deposición de la figura 3.3, como ya fue planteado. Por otra parte el área de penetración (figura 3.9) aumenta con la corriente como resultado del incremento de la profundidad de penetración (ver figura 3.6) y del ancho del cordón (ver figura 3.5)

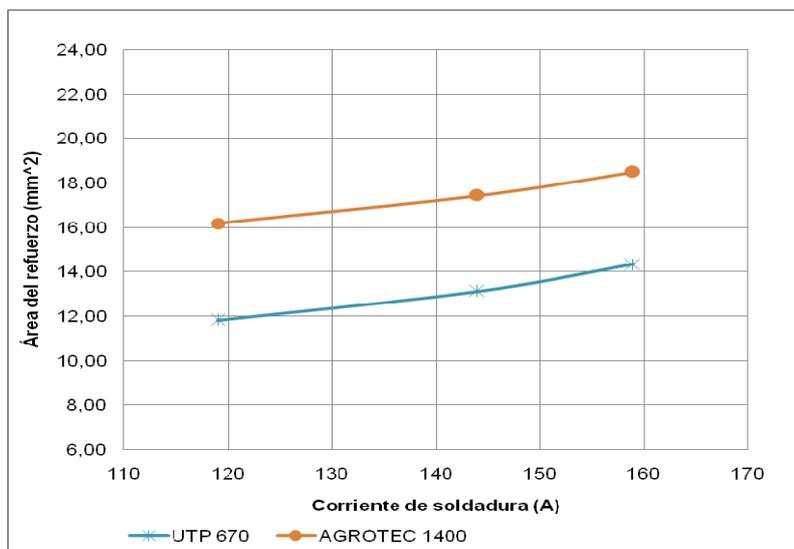


Figura 3.8. Comportamiento del área de refuerzo con la variación de la intensidad de corriente de soldadura.

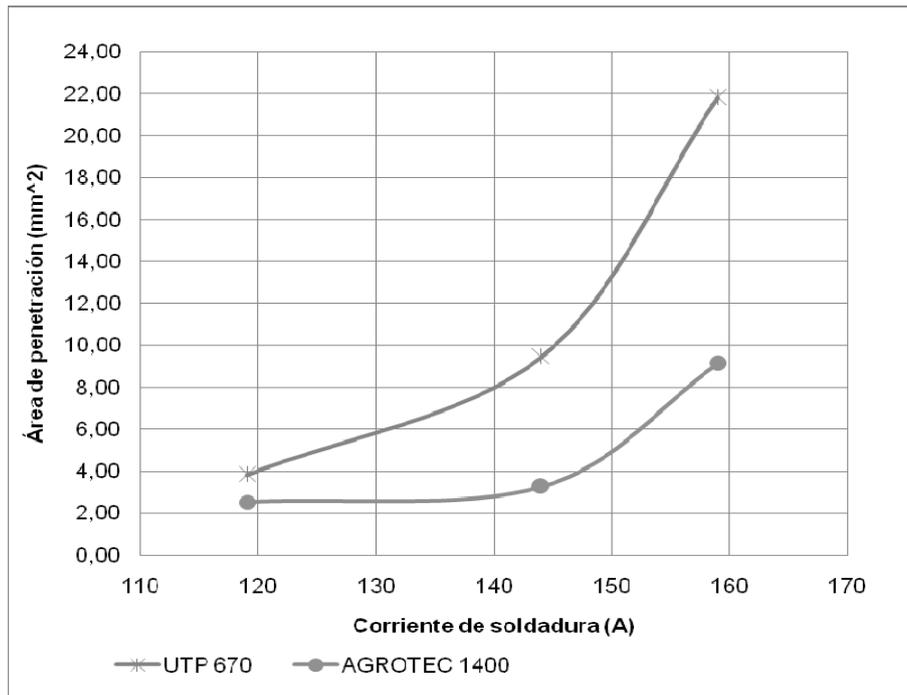


Figura 3.9. Comportamiento del área de penetración con la variación de la intensidad de corriente.

La dilución aumenta con el aumento de la corriente (figura 3.10), lo cual es algo esperado de los resultados del comportamiento de las áreas de penetración y depositada de las figuras 3.6 y 3.7.

Tal comportamiento de la dilución en cierta medida resume el comportamiento de la geometría desde el punto de vista del recargue y da criterio del mejor comportamiento del electrodo AGROTEC 1400 en el rango de las corrientes medias (145 A), ya que en las corrientes bajas y media, la dilución posee poca variación (0,13 y 0,16) sin embargo los demás parámetros se incrementan si se comparan la corriente mínima y media.

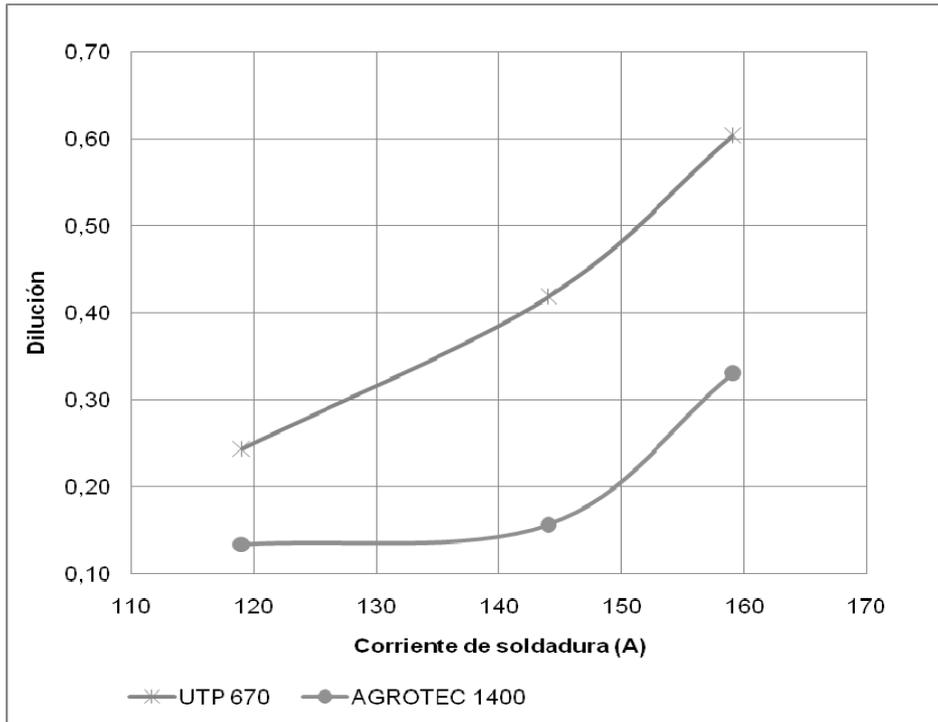


Figura 3.10. Comportamiento de la dilución con la variación de la intensidad de corriente.

3.3 Caracterización metalográfica y de dureza de los depósitos.

En la tabla 3.3 y en la figura 3.11 y 3.12, se muestran los valores de los perfiles de dureza (HV/10) obtenidos para los dos aportes con las diferentes corrientes de soldadura ensayadas.

Tabla 3.3- Perfiles de dureza para probetas de diferentes corrientes.

Is (A)	Distancia del metal depositado al metal base (mm)	UTP 670				Agrotec 1400			
		Dureza (HV/10)				Dureza (HV/10)			
		1	2	3	Δ	1	2	3	Δ
120	9	179	186	209	191	151	183	195	176
	8,5	177	191	175	181	166	151	156	158
	8	169	151	188	170	161	173	168	167
	7,5	156	176	186	172	169	186	169	175
	7	174	197	172	181	183	184	174	180
	6,5	183	167	177	176	195	186	161	181
	6	181	167	178	175	190	173	178	180
	5,5	193	191	199	194	161	185	183	176
	5	151	165	184	167	175	177	197	183
	4,5	167	164	172	168	229	245	234	236

	4	172	193	169	178	499	472	485	485
	3,5	292	297	272	287	594	576	612	594
	3	599	536	642	592	653	748	775	725
	2,5	599	536	642	592	632	653	653	646
	2	592	673	536	600	748	698	975	807
	1,5	606	715	599	640	775	748	698	740
	1	681	606	627	638	975	840	834	883
	0,5	762	715	606	694	908	901	937	915
145	7,5	186	193	182	187	186	159	197	181
	7	168	167	176	170	178	164	185	176
	6,5	152	151	177	160	163	173	183	173
	6	170	189	177	179	183	195	197	192
	5,5	198	161	151	170	197	207	196	200
	5	171	221	213	202	188	176	215	193
	4,5	188	182	169	180	690	710	712	704
	4	824	634	772	743	748	1015	804	856
	3,5	835	681	690	735	975	975	1015	988
	3	579	772	724	692	975	975	1015	988
	2,5	762	772	715	750	975	937	1015	976
	2	606	665	657	642	1015	1015	1015	1015
	1,5	673	690	673	679	1015	1015	1015	1015
	1	690	734	752	725	1015	1015	1015	1015
0,5	642	673	690	668	1015	1015	1015	1015	
160	7,5	162	170	198	177	188	185	188	187
	7	156	161	170	163	191	195	194	193
	6,5	151	166	140	153	182	183	189	185
	6	152	151	156	153	162	166	177	168
	5,5	160	168	156	161	173	174	188	178
	5	280	272	287	280	196	174	193	188
	4,5	322	219	556	366	220	216	211	216
	4	415	418	423	419	750	760	765	758
	3,5	513	522	540	525	808	867	808	828
	3	464	724	657	615	975	975	867	939
	2,5	634	673	752	687	1015	1015	1015	1015
	2	681	690	698	690	1015	1015	1015	1015
	1,5	724	813	627	722	1015	1015	1015	1015
	1	743	715	772	743	1015	1015	1015	1015
0,5	707	715	734	719	1015	1015	1015	1015	

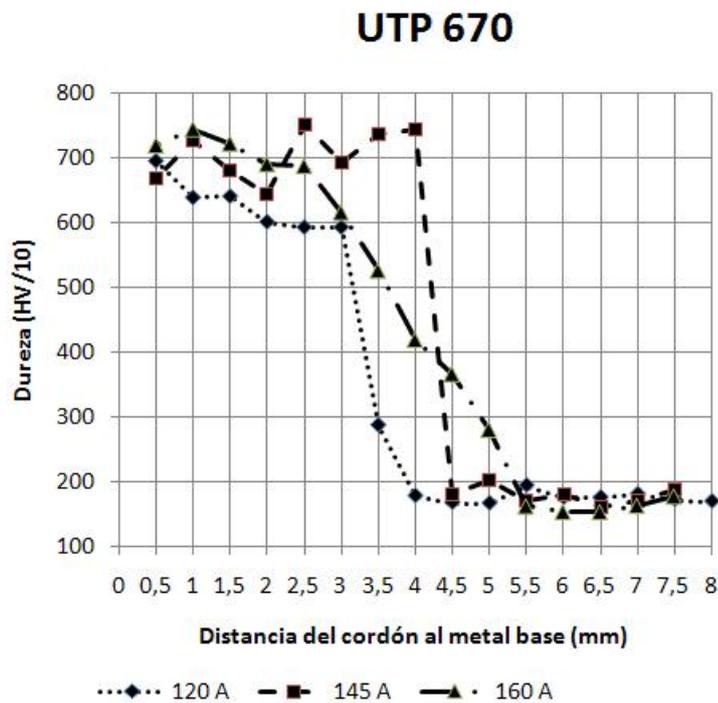


Figura 3.11. Comportamiento del perfil de dureza para

el electrodo UTP 670 con la variación de la intensidad de corriente.

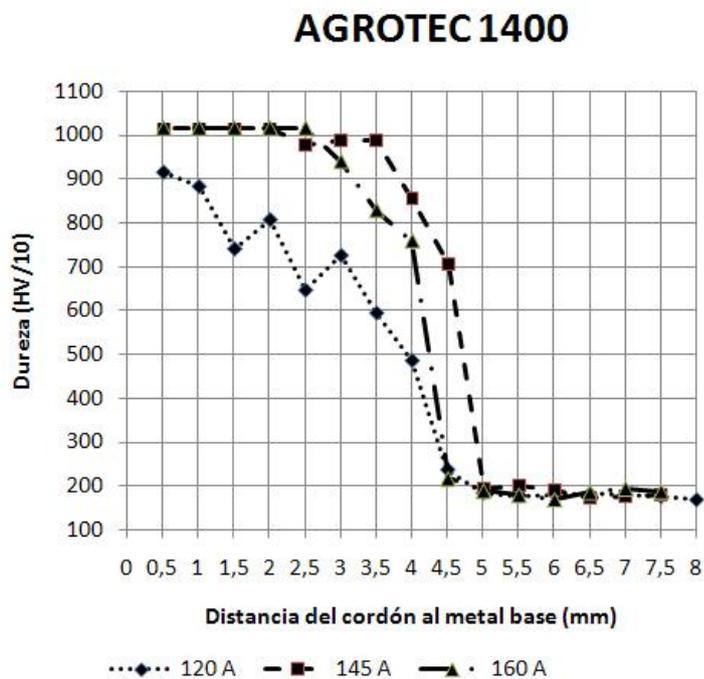


Figura 3.12. Comportamiento del perfil de dureza para el electrodo AGROTEC 1400 con la variación de la intensidad de corriente.

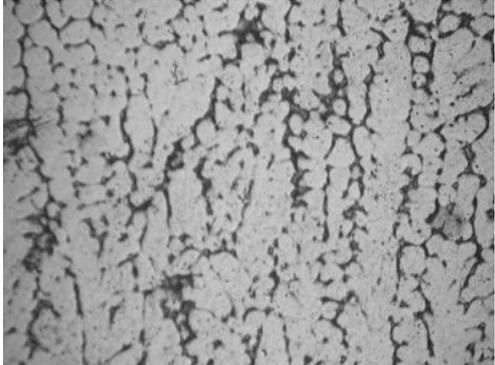
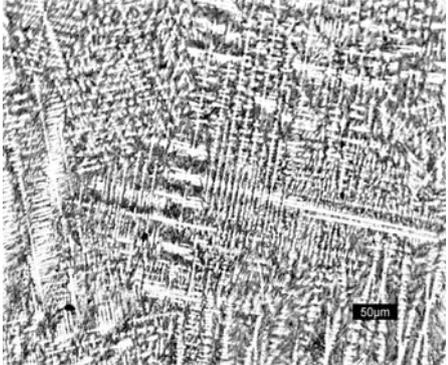
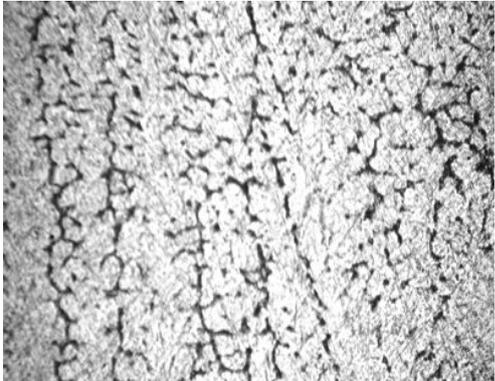
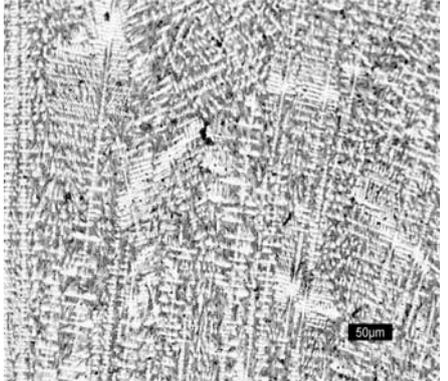
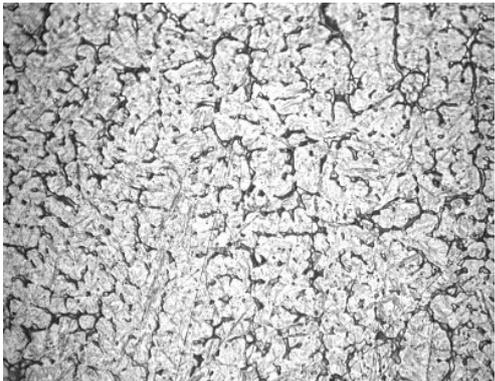
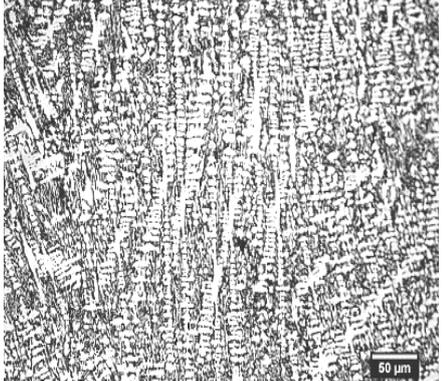
De la observación de la tabla 3.3 y de las figuras 3.11 y 3.12 se evidencia que, como era de esperar para una misma corriente la dureza varía

significativamente entre el metal base y el depósito, coincidiendo este cambio de dureza con las dimensiones de los cordones mostrados en la tabla 3.2, no observándose cambios significativos de dureza en lo que al metal base se refiere.

En la dureza de los depósitos de ambos electrodos, se observa que para los menores niveles de corriente de soldadura (120 A), se obtienen los menores niveles de dureza, situación que ha sido abordada en la literatura (WU, W. et al., 2000) y que está dada debido a que para los niveles de calentamiento que provoca esa corriente de soldadura, la velocidad de enfriamiento es muy rápida, para permitir la formación de carburos de cromo. Ahora, una situación diferente ocurre para el mayor nivel de intensidad de corriente de soldadura (160 A), donde, si se le compara con el nivel intermedio de corriente de soldadura (145 A) logra menores niveles de dureza, lo que puede estar dado por el incremento de la dilución y con ello la disminución de la cantidad estequiométrica de carbono que es capaz de formar carburos (ver figura 3.10).

Por otro lado, si comparamos los valores de dureza en la zona del depósito (figuras 3.11 y 3.12) de un electrodo con el otro, se puede apreciar que los valores logrados por el electrodo AGROTEC 1400, son superiores (1010 HV) a los alcanzados por el UTP 670 (772 HV) para un mismo nivel de corriente de soldadura (145 A) lo que es consistente con lo observado en la tabla 3.4, (microestructura compuesta por austenita en forma de dendritas y una matriz eutéctica formada por austenita y carburos de cromo (Coelho et al., 2009), que a su vez es lo que concuerda con la composición química que declaró el fabricante del electrodo en la tabla 1.4 del Capítulo I. Mientras que en los otros depósitos lo que se observa es una microestructura compuesta por martensita y austenita retenida, observándose un patrón de segregación dendrítico; estas observaciones son consistentes con lo esperado para este tipo de materiales (Gualco et al., 2008).

Tabla 3.4. Microestructura de los depósitos para diferentes corrientes de soldadura.

Nivel de corriente de soldadura (A)	UTP 670	AGROTEC 1400
	Microestructura (Ataque con Nital al 2% observación a 200 X).	Microestructura (Ataque con Murakami, observación a 200 X).
120		
145		
160		

Finalmente, se advierte cierta diferencia entre las microestructuras de los depósitos para diferentes corrientes (Tabla 3.4), lo que expresa que la corriente de soldadura influye y puede modificar significativamente las propiedades de los mismos.

CAPITULO IV

Capítulo IV. Cálculo Económico.

Para la determinación del efecto económico de la sustitución del blindaje fundido, por uno de acero de bajo carbono y relleno con el metal de aporte AGROTEC 1400, se parte de las siguientes condiciones:

- Tamaño de la placa a blindar: 220 mm X 140 mm X 12,7 mm.
- Espesor a rellenar: 5 mm.
- Régimen de soldadura a aplicar: 145 A.

Para esto, se utiliza la metodología para la determinación de los costos de realización de la soldadura (Colectivo de Autores, 2002), dadas en la ecuación 4.1:

$$C_{TS} = C_{CS} + C_{MOAD} + C_{ee}. \quad [4.1]$$

Donde:

C_{TS} – representa el 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 4.2, la que establece que:

$$C_{cs} = C_e + C_{PC}. \quad [4.2]$$

$C_{cs} = 6,56$ CUC.

Donde:

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

C_E – costo de electrodos a consumir (CUC)

C_{PC} – costo del precalentamiento (CUC)

El costo de electrodo consumido se determina por la ecuación 4.3:

$$C_e = \frac{Mmd * Pe}{Et} \quad [4.3]$$

Donde:

Pe: Precio del electrodo: 4.00 CUC/Kg, (Rodríguez, 2010).

El aporte AGROTEC 1400 a 145 A según los resultados de este trabajo tiene una eficiencia real de 73,74 %.

La masa de metal a depositar se calcula por la ecuación 4.4:

$$Mmd = Vmd * \gamma md \quad [4.4]$$

Vmd: Volumen de metal depositado: 220 mm X 140 mm X 5 mm = 154000 mm³

γmd : Densidad del metal depositado: 0,00786 g/mm³

Mmd = 1.21 Kg.

Ce = 6.56 CUC.

El costo de mano de obra y administrativo se determina por la ecuación 4.5

$$Cmoad = \frac{Tmo * Vmd * \gamma md}{RD * Fo} \quad [4.5]$$

Tmo: Tarifa de costos de mano de obra y administrativos: 5.01 CUC/h (Rodríguez, 2010).

RD: Razón de depósito, según los resultados de este trabajo para este aporte es 1480 g/h.

Fo: Factor operador para proceso SMAW manual, según la bibliografía (Colectivo de Autores, 2002), es 0.3, sin embargo de acuerdo a las particularidades de este electrodo donde cada cierto tiempo hay que ajustarlo a la tenaza, se decide fijar este parámetro en 0,25

Cmoad = 16.4 CUC.

El costo de la energía eléctrica consumida en el proceso se determina por la ecuación 4.6:

$$Cee = \frac{PkWh * Va * Is * Mmd}{1000 * RD * Fo * Efu} \quad [4.6]$$

Donde:

PkWh: Precio del kWh industrial: 0,06 CUC h (Rodríguez, 2010).

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

Is: Intensidad de corriente: 145A.

Efu: Eficiencia de la fuente de corriente, es este caso para un inversor modelo HM630 la eficiencia es: 0,85

$C_{ee} = 0.67 \text{ CUC.}$

Por tanto el costo de rellenar con el electrodo AGROTEC 1400 una placa de acero para sustituir un blindaje fundido es de 23.63 CUC, al sustituir los valores en la ecuación 4.1.

De aquí se deriva que el efecto económico (E_{ec}) de la sustitución del blindaje fundido por la pieza de acero rellena con el electrodo AGROTEC 1400 se puede determinar por la ecuación 4.7:

$$E_{ec} = C_{pn} - C_{pr} - C_{pa} \quad [4.7]$$

Donde:

C_{pn} : Costo de la pieza nueva: 104 CUC (Nieto, 2010).

C_{pr} : Costo de la pieza recuperada: 23.63 CUC.

C_{pa} : Costo de la placa de acero ASTM A-36 de 220 mm X 140 mm X 12,7 mm: 4.34 CUC (García, 2010).

$E_{ec} = 76.03 \text{ CUC.}$

Lo que prueba la factibilidad de la sustitución de la pieza rellena por la pieza fundida.

CONCLUSIONES

Conclusiones.

- En los elementos de molienda están presentes una combinación de mecanismos de desgaste, sin embargo los predominantes son la abrasión y el impacto.
- En el caso de las placas de los blindajes laterales del molino de pantalla, el mecanismo de desgaste principal es el abrasivo, mientras que el secundario es de impacto.
- Para la sustitución de las placas del blindaje lateral del molino de pantalla, por placas de acero de bajo carbono recubiertas por soldadura, el electrodo AGROTEC 1400, presenta las mejores características técnico – operativas, si se le compara con el electrodo UTP 670.
- Es factible económicamente la sustitución de las placas de los blindajes laterales originales del molino de pantalla, por placas de acero al carbono rellenadas superficialmente por soldadura, existiendo una ganancia por placa de 76.03 CUC.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones.

- Realizar un estudio exhaustivo a las otras partes del molino que están sometidas a desgaste abrasivo/impacto, para ver si es viable su sustitución utilizando el relleno superficial por soldadura.
- Realizar ensayos de desgaste con el electrodo seleccionado, como una forma de corroborar más lo que se a desarrollado en este trabajo.

REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS

Referencias Bibliográficas.

1. Allen, J; Olson, D and R. Frost., (1998) "Exothermically Assisted Shielded Metal Arc Welding" en *Welding Journal*, July,1998, pp. 277-285
2. AUBEMA. (2008). " Molino de impacto primario" en *SANDVIK* [En línea]. Alemania, Disponible en: <http://www.AUBEMA - Gama de productos - Molino de impacto primario.htm>. [Accesado el día 23 de marzo de 2010]
3. Bortoni, O; Patrone, J and P. Marino., (1989) "Recargues por soldadura de superficies sometidas a desgaste" en *Siderurgia* 49, 1989, pp.114-139
4. Coelho, A and A. Valtair., (2009) "Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira" en *Soldagem Insp.* São Paulo, Abr/Jun 2009, Vol. 14, No. 2, pp.140-150
5. Colectivo de autores, (2002) *Apuntes para la asignatura Soldadura*. Santa Clara, Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central de las Villas.
6. Comas, A y L. Basqués, (1960) *Curso básico de Metalurgia y Siderurgia*. Barcelona, Imprenta Juvenil, 226 p.
7. García, G. 20 de mayo 2010. Comunicación Telefónica.
8. Gualco, A; Svoboda, H and E. Surian., (2008) "Efecto del tratamiento térmico post-soldadura sobre la resistencia al desgaste de depósitos de acero martensítico, para recargue" em *Soldagem Insp.* São Paulo, Jul/Set 2008, Vol. 13, No. 3, p.237-244
9. HAIDAR, J., (1998) "An analysis of the formation of metal droplets in arc welding" en, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31, 1998, pp. 1233–1244
10. Maquinarias Shibang. (2009). "Trituradora de mandíbula " en *TRITURADORA* [En línea]. Shanghai, Disponible en: <http://www.JC la trituradora de mandíbula del estilo europa - SBM.htm>. [Accesado el día 25 de marzo de 2010]
11. Martínez Prieto, F y E. Martínez Escanaverino, (1997) *Teoría y Práctica del rozamiento*. México, Talleres Gráfico, 243 p.

12. Mazel, A., (2006) "Development of high-productivity high-alloyed electrodes" en *Welding International*, 20 (11) , 2006, pp. 913- 917
13. Metso Minerals. (2006). "Molinos de Impacto" en *Metso Minerals*. [En línea]. España, disponible en www.metsominerals.com [Accesado el día 23 de marzo de 2010]
14. Nieto, J., (2010) "Re: de la solicitud de precio de piezas", recambios@acerosysuministros.com [Lista de correo] 10 de junio, disponible en <http://www.acerosysuministros.com> [Accesado el 12 de Junio de 2010]
15. Rodríguez, P. 22 de mayo 2010. Comunicación Personal.
16. RSS SITEMAP. (2008). "Molino Centrifugo" en *TRITURADORA* [En línea]. Shanghai, Disponible en: [http://www.Molino centrifugo.mht](http://www.Molino%20centrifugo.mht). [Accesado el día 22 de marzo de 2010]
17. WU, W. et al., (2000) "The relationship between alloying elements and retained austenite in martensitic stainless steel welds" en *Scripta Materialia*, 42, 2000, pp.1071-1076

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía.

1. Bálsamo, P.S.S.; Scotti, A. & Mello, J.D.B., Interpretación de la Microestructura de Recargues Duros Depositados por Soldadura Utilizando la Superficie de Líquidos de Diagramas Fe-Cr-C. Rev. Soldadura, 25 (4), 1995, CENIN, Madrid, pp. 199-207
2. Bergolla Cabeza, Amparo. Caracterización de los depósitos de soldadura realizados con electrodos tubulares. Trabajo de Diploma. Curso 93-94.
3. Bhushan, B., Gupta, B.K. Handbook of tribology, McGraw-Hill, New York 1991. .
4. Buchely, M.F; Gutierrez, J.C. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Wear 259 (2005) 52–61
5. Burgos Solas, José L. . . “Teoría de los procesos de soldadura”. Material de apoyo al curso de la maestría en Ingeniería Mecánica. UCLV. 2000. Santa Clara. Cuba
6. Burgos Solas, José. Relleno superficial por soldadura. Curso recuperación de piezas por soldadura. Universidad Central de Venezuela. 1996.
7. Burgos Solas, José. Relleno superficial por soldadura. Curso recuperación de piezas por soldadura. Universidad Central de Venezuela. 1996
8. Burgos Solas, José. Tecnología de Soldadura.
9. Catálogo de productos CUAREPOTI. Electrodo especiales. www.cuarepoti.com.ar.
10. CRUZ, A., Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales, Congreso da Sociedade Brasileira de Soldagem, Belo Horizonte, Oct. 2006.
11. Díaz Cedré, Eduardo. Curso de recuperación de Piezas. Material de apoyo a la docencia. Editorial Feijóo. UCLV. 1999. 342p
12. Hardfacing. <http://www.aws.org/w/s/wj/2002/07/feature/index.html>. Bajado el 3 de Mayo de 2006.

13. Kuhn, Howard; Medlin, Dana. ASM Handbook. V. 8. Mechanical testing and evaluation. ASM International. ISBN 0-87170-389-0. ASM International. OH. EUA. 2001. 2235p
14. La soldadura de recargue duro. <http://www.welding-advisers.com/Hardfacing.html>.
15. Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en cromo y tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW) Dyna. Noviembre Año:Vol 71, Número 144, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. pp. 165-171. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. ISSN 0012-7353. 2004
16. Rodríguez Pérez, Manuel. Electrodo Tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores-estabilizadores y piezas que trabajen en condiciones similares. 1992. Tesis de doctorado. UCLV. Cuba.
17. Specification for Surfacing Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, AWS A5.13-2000 (SFA 5.13-2001), Part C, Section II, 2000, 29p).