

EFFECTO DEL AMPERAJE EN LAS PROPIEDADES DE RECUBRIMIENTOS DUROS RESISTENTES A LA ABRASIÓN APLICADOS POR SOLDADURA

HÉCTOR IVÁN MONSALVE GIL

Grupo de Soldadura – Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellin, Colombia, ivangil@universia.net.co

DAVID ALEJANDRO MENA HERRERA

Grupo de Soldadura – Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellin, Colombia, davidmh@cis.net.co

JORGE ENRIQUE GIRALDO BARRADA

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellin, Colombia, jegirald@unalmed.edu.co

Recibido 20 de Septiembre de 2004, aceptado 2 de Octubre de 2004, versión final 9 de Octubre de 2004

RESUMEN: Se estudió el efecto del amperaje en la microestructura, la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de dos aleaciones para recubrimientos duros con base hierro, alto Cr y C. Se aplicaron dos y tres capas de cada electrodo mediante el proceso SMAW sobre platinas de acero ASTM A36. La resistencia al desgaste abrasivo se calculó midiendo la masa perdida después de un ensayo de acuerdo al estándar internacional ASTM G65. La microestructura fue analizada usando microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM) y el porcentaje de dilución fue calculado en forma gráfica para un cordón de soldadura. Los resultados muestran que al disminuir la entrada de calor se reduce el porcentaje de dilución y se promueve la formación de carburos primarios. La más alta resistencia al desgaste abrasivo se obtiene cuando la microestructura estuvo compuesta de carburos primarios y una matriz eutéctica.

PALABRAS CLAVE: Desgaste abrasivo, microestructura, entrada de calor, recubrimientos duros, soldaduras de reparación y mantenimiento.

ABSTRACT: The effect of amperage on microstructure, hardness and abrasive wear resistance of two Fe-based hardfacing alloys with high Cr and C was studied. Two and three layers of each hardfacing electrode were applied by SMAW process onto ASTM A36 steel plates. The abrasive wear resistance was calculated from the mass losses measured after abrasion tests, using a dry sand-rubber wheel testing machine according to ASTM G65 standard. The microstructure was analyzed using optical and scanning electron microscopy (SEM), and the dilution percent was calculated graphically for a single weld pass. The results showed that decreasing heat input reduced the dilution percent and promoted formation of primary carbides in the microstructure. The highest abrasive wear resistance was obtained when the microstructure was composed of primary carbides and eutectic matrix.

KEY WORDS: abrasive wear, microstructure, heat input, hardfacing, maintenance and repair welding.

1. INTRODUCCIÓN

Un recubrimiento o recargue duro es la aplicación superficial por soldadura, spray térmico o un proceso similar de una o varias capas, cordones o puntos de un material generalmente duro, resistente a uno o varios tipos de desgaste, sobre un componente metálico (1).

Los recubrimientos duros se aplican con el objetivo de mejorar la resistencia al

desgaste de una pieza o componente y para extender su vida de servicio. Son empleados principalmente en operaciones de reparación y reconstrucción para evitar así el costoso reemplazo de la pieza. También se vienen aplicando últimamente en piezas que se producen en serie.

Una clasificación presentada por Crook P. y H. Farmer (2), divide las aleaciones de recargues duros aplicadas por soldadura en cinco grandes familias: aleaciones de

reconstrucción, aleaciones para desgaste metal – metal, aleaciones para desgaste metal – tierra, carburos de Tungsteno y aleaciones no ferrosas. En este trabajo solo se estudian las aleaciones para desgaste metal – tierra, las cuales son hierros blancos con altos contenidos de cromo, de 6% á 35%, y carbono entre 2% y 6%. Su característica microestructural más importante es que poseen carburos M_7C_3 que se forman durante la solidificación y se distribuyen en una matriz austenítica o formada por los productos de su transformación (6). La importancia de los carburos radica en que son los encargados de proporcionarle resistencia al desgaste abrasivo al recubrimiento.

Los parámetros de soldadura en la aplicación de recubrimientos duros, independientemente del proceso, pueden ocasionar amplias diferencias en las estructuras de los depósitos de soldadura superficiales resistentes al desgaste y en la vida en servicio. Variables tales como la energía, representada por el amperaje de soldadura, el modo de corriente, la velocidad de aplicación y el diámetro del electrodo, pueden producir diferentes estructuras y propiedades a las aleaciones de soldaduras superficiales (8).

Para el estudio se usaron dos electrodos comerciales del mismo diámetro y de composición química similar, que se usan en el medio industrial para reparaciones de superficies desgastadas por abrasión. Se estudió la influencia que tiene el amperaje del proceso de soldadura SMAW en la dureza y resistencia a la abrasión, en la microestructura y en el porcentaje de dilución en dos y tres capas de soldadura.

2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Soldadura de cupones

Se realizaron 14 depósitos de soldadura superficial sobre platinas de acero ASTM A36 de 200x50x12mm de acuerdo con el código ASME sección IX (7): nueve usando el electrodo marca Eutectic-Castolin EUS 5005 y

cinco usando el electrodo marca Eutectic-Castolin CP 7007. Ambos electrodos se aplicaron con tres amperajes diferentes: 100, 120 y 140A con corriente continua y electrodo positivo, y se usó un diámetro de 1/8". Las demás variables del proceso de soldadura se mantuvieron lo más constantes posible. En la tabla 1 se observa la cantidad de cupones realizados para cada electrodo. La composición química del metal de soldadura en estado no diluido para cada electrodo, según el proveedor, se presenta en la tabla 2. Con el fin de reducir la distorsión que se genera por los pases de soldadura sobre las platinas de acero ASTM A36 y garantizar la planitud de la misma, se realizó un doblado previo de 7 mm sobre cada una de ellas (fig 1). Después de la soldadura se obtuvieron cupones casi planos lo cual era necesario para extraer las probetas de resistencia al desgaste.

Tabla 1. Cupones realizados con cada electrodo y amperajes.

AMPERAJE	EUS 5005	CP 7007
100 A	3 cupones	2 cupones
120 A	3 cupones	2 cupones
140 A	3 cupones	1 cupón
Total de cupones	9	5

Tabla 2. Composición química del metal de soldadura en estado no diluido.

EUS 5005						
%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Mo	%Si	%Fe
4	24,53	0,21	0,36	0,17	1,38	balance
CP 7007						
%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Mo	%Si	%Fe
3.8	33.5	0.2	0.5	0.5	0.6	balance

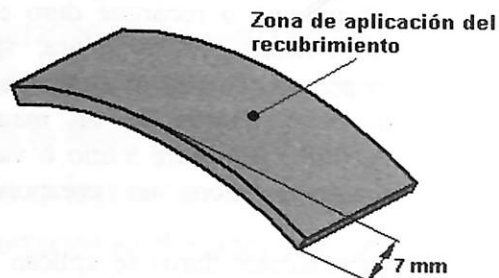


Figura 1. Esquema de las platinas antes de la soldadura.

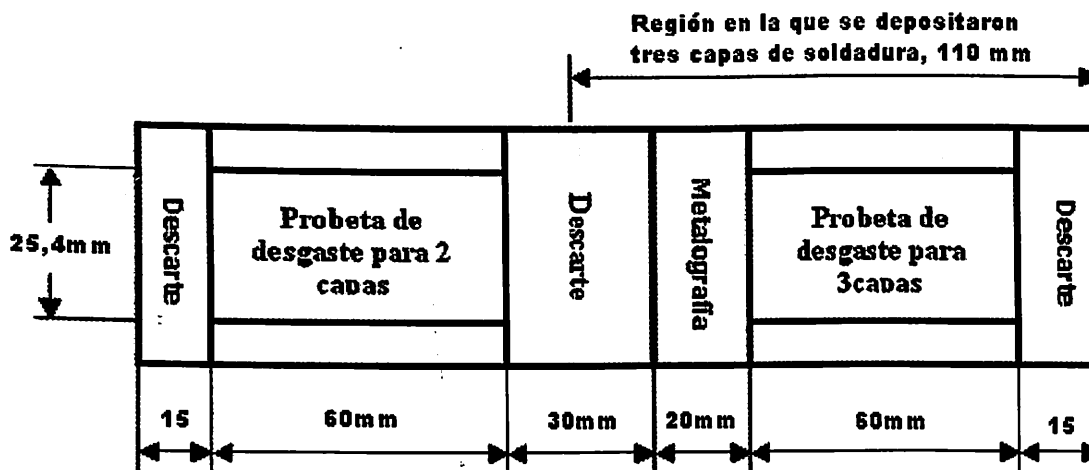


Figura 2. Esquema del cupón y dimensiones de corte de las probetas.

Una vez listas las platinas, se usó un equipo de Miller XMT-300 para aplicar los cordones superficiales de soldadura manualmente, uno adyacente al otro, hasta completar una capa sobre el metal base. Ésto se realizó nuevamente completando dos capas de soldadura y luego se realizó una tercera capa que solo se depositó en 110 mm de la platina, para cortar probetas de desgaste con dos y tres capas de soldadura del mismo cupón (fig 2).

En todos los cupones se usó la técnica de arrastre con ángulo de trabajo de 90° y ángulo de avance entre 10 y 15°. Para aplicar cada cordón el soldador siguió un brazo mecánico que se desplazaba a una velocidad constante de 2,5mm/s con el fin de mantener la velocidad de aplicación lo mas constante posible. De cada cordón se registro el voltaje y amperaje que presentó el visualizador del equipo de soldadura y, además, se midió la longitud de cada cordón y el tiempo que se demoró el operario en realizarlo. En la tabla 3 se presentan los amperajes y las entradas de calor promedio de cada cupón.

2.2 Corte de probetas

Luego de depositar la soldadura, las probetas para desgaste y metalografía se cortaron de los cupones usando un disco abrasivo, de acuerdo con las dimensiones que se presentan en la figura 2.

Tabla 3. Amperaje y entrada de calor de cada cupón.

Cupón	Intervalo de Amperaje	Entrada de calor promedio (J/mm)
5-10-1	97-102	800
5-10-2	100	900
5-10-3	99-101	960
5-12-1	120-121	1220
5-12-2	120	1200
5-12-3	120	1050
5-14-1	140	1340
5-14-2	140	1580
5-14-3	140	1250
7-10-1	98-102	820
7-10-2	99-102	950
7-12-1	119-123	1180
7-12-2	119-121	1130
7-14-1	140	1260

Designación de los cupones:

5: Electrodo 5005
 7: Electrodo 7007
 10: 100 amperios
 12: 120 amperios
 14: 140 amperios
 1, 2 ó 3: repeticiones

2.3 Desgaste

Los ensayos de desgaste abrasivo se realizaron a baja presión siguiendo la metodología del procedimiento B de la norma

ASTM G65-01 (3), en una máquina para desgaste tipo *rueda de caucho* con un peso de 130 N y arena seca compuesta de sílice de granulometría ASF 50-70. En la figura 3 se esquematiza la máquina del ensayo, en la cual se realiza una abrasión lineal de 1436m, midiendo la masa perdida y asumiendo una densidad de $0,0077\text{gr/mm}^3$ (9), que es la usual para este tipo de materiales, se calcula el volumen perdido expresado en mm^3 y se toma como indicador de la resistencia al desgaste abrasivo.

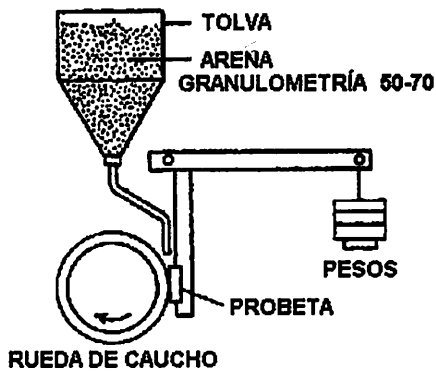


Figura 3. Esquema de la máquina del ensayo G65-01

2.4 Metalografía

Se pulieron las probetas designadas para metalografía hasta obtener un acabado de espejo. Luego se atacó la superficie con el reactivo Kalling (5g de CuCl_2 , 100ml de Etanol y 100ml de HCl) durante 15 segundos y se observó la microestructura en un microscopio óptico a través de un plano transversal a la soldadura. Además, se tomaron microfografías usando un microscopio electrónico de barrido (SEM).

2.5 Dureza

Se hicieron mediciones de dureza Rockwell C (HRC) a lo largo de la sección transversal de los cordones de soldadura en las probetas designadas para metalografía; se tomaron varias mediciones de dureza por capa, cuyos resultados se observan en la tabla 5.

2.6 Análisis químico

Con el fin de determinar que tipo de carburos se formaron en los depósitos se realizó un análisis químico en las probetas de metalografía usando un espectrómetro EDS acoplado al microscopio electrónico de barrido (SEM). También se realizaron mapas de composición para determinar la distribución de los principales elementos presentes en la aleación.

2.7 Dilución

Se aplicó manualmente un cordón de soldadura sobre una platina de acero ASTM A36 de $200 \times 50 \times 12\text{mm}$ (fig 4), usando los electrodos CP 7007 y EUS 5005, con cuatro entradas de calor diferentes cada uno que se obtuvieron variando el amperaje. Los amperajes seleccionados para cada electrodo fueron 100, 120, 140 y 160A y, por tanto, se obtuvieron ocho probetas distintas.

Para la aplicación de las soldaduras se empleó el mismo procedimiento de los cupones. En la tabla 4 se presentan las variables de aplicación de los cordones de soldadura.

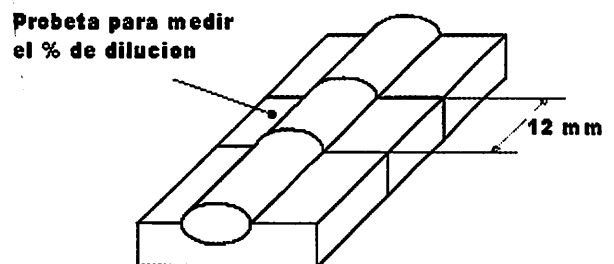


Figura 4. Plano de corte de las probetas de dilución.

Tabla 4. Amperaje y entrada de calor.

Cordón	Amperaje (A)	Entrada de calor (J/mm)
Electrodo CP 7007		
1	96 - 103	1130
2	120 - 123	1050
3	139 - 141	1500
4	160	1400

Electrodo EUS 5005		
5	100 - 105	1010
6	121 - 122	1090
7	141	1530
8	160	1780

Luego de depositar la soldadura se cortaron de la zona central las probetas de dilución, como se observa en la figura 4, con unas dimensiones de 50x12x12mm.

Para la medición del porcentaje de dilución se pulieron las dos secciones transversales de la probeta hasta obtener un acabado espejo y se atacó con el reactivo Kalling durante 40 segundos. Usando un estereoscopio con un aumento de 4.5X se obtuvieron dos imágenes de cada cordón de soldadura como la que se observa en la figura 5, después se procesaron las imágenes usando un software de dibujo, con el cual se calcularon las áreas del metal base y metal de soldadura, que sirvieron para el cálculo del porcentaje de dilución de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\%D = \frac{A_{MB}}{(A_{MB} + A_{MA})} \times 100\%$$

donde, A_{MB} es el área de la sección transversal del metal base fundido y A_{MA} es el área de la sección transversal del metal de aporte. (fig 6)
En cada cordón de soldadura se realizaron tres medidas de dureza HRC sobre el metal de

soldadura. Los resultados se presentan en la tabla 8.



Figura 5. Cordón de soldadura pulido y atacado. La regla mide 10mm.

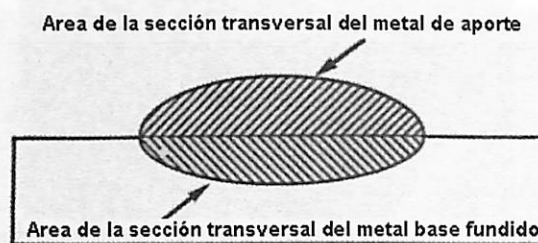


Figura 6. Ilustración de la dilución en un cordón de soldadura. (ref. 5)

3. RESULTADOS

En la tabla 5 se presentan los resultados del ensayo de desgaste abrasivo para dos y tres capas de soldadura, las microestructuras encontradas en cada capa de soldadura para los depósitos y la dureza promedio para cada capa medidas en una sección transversal a los depósitos de soldadura.

Tabla 5. Resultados de ensayos de desgaste, microestructura encontrada y dureza medida.

Cupón	VOLUMEN PERDIDO (mm ³)		MICROESTRUCTURA ¹ (VER TABLAS 6 y 7)			DUREZA (RC)		
	Dos capas	Tres capas	Primera capa	Segunda capa	Tercera capa	Primera capa	Segunda capa	Tercera capa
5-10-1	25,54	11,97	E	CP	CP	52	59	59
5-10-2	18,43	18,67	AP	CP	CP	53	62	58
5-10-3	11,62	9,27	AP/E	E/CP	CP	57	59	58
5-12-1	22,15	14,02	AP/E	CP	CP	56	57	58
5-12-2	27,05	8,89	AP	E/CP	CP	53	59	58
5-12-3	56,97	27,36	AP	E	E/CP	49	59	57
5-14-1	13,39	10,12	AP	E/CP	CP	46	52	56
5-14-2	15,19	9,23	AP	CP	CP	51	60	58
5-14-3	52,01	41,61	AP	E	E/CP	49	58	59
7-10-1	99,44	96,82	AP	E	E	50	55	56
7-10-2	94,01	40,97	AP	E	E/CP	51	56	54
7-12-1	87,05	91,97	AP	E	E	50	53	51
7-12-2	97,17	102,02	AP	AP/E	E	49	55	57
7-14-1	87,99	103,43	AP	AP	AP/E	46	52	57

Nota 1: cuando se encontró una capa de soldadura con cordones de diferente microestructura se reportan en la tabla de la siguiente forma: E/CP, o sea que se encontró unos cordones con solo eutéctico y otros con carburos primarios.

En las figuras 7, 8 y 9 se presentan las micrografías de las microestructuras encontradas en los depósitos de soldadura.

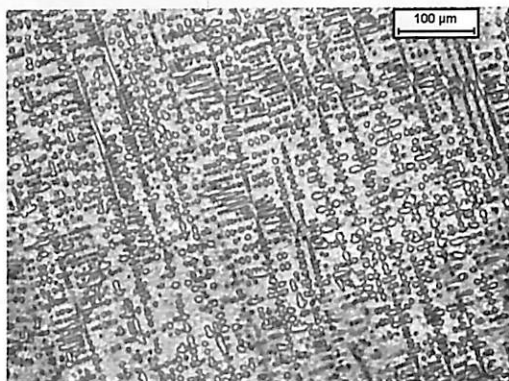


Figura 7. Microestructura compuesta por austenita en forma de dendritas en una matriz eutéctica formada por austenita mas carburos de cromo, la cual se denomina AP.

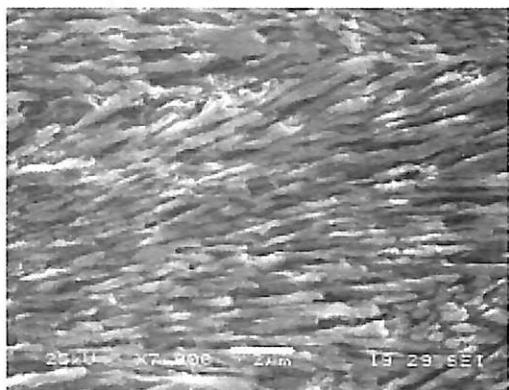


Figura 8. Microestructura compuesta por un eutéctico formado por austenita y carburos de cromo, imagen de SEM, la cual se denomina E.

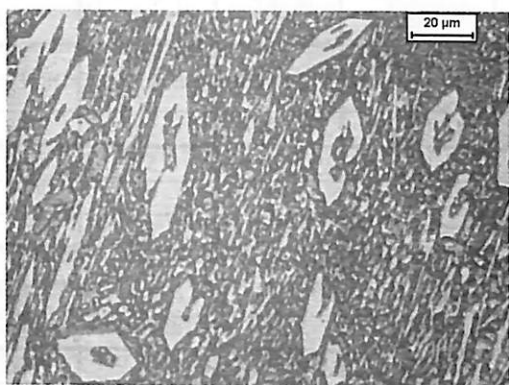
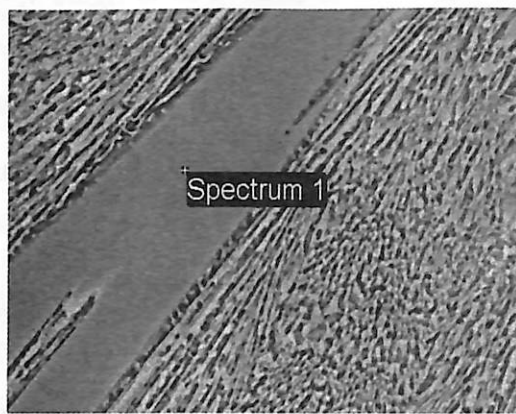


Figura 9. Microestructura compuesta por carburos hexagonales de cromo de la forma M_7C_3 en una matriz eutéctica formada por austenita mas carburos de cromo, la cual se denomina CP.

En la figura 10 se presenta uno de los espectros realizados en los carburos presentes en los depósitos; se encontró que para los dos electros los carburos son de la forma M_7C_3 , donde el M esta compuesto por hierro y cromo.



Spectrum	C	Cr	Fe	Total
Carburo M7C3	35.04	44.69	20.27	100.00

Figura 10. Espectro realizado sobre un carburo.

En las figuras 11 y 12 se presentan los mapas de composición correspondientes a las regiones donde se encontraron carburos M_7C_3 para los depósitos de los electodos EUS 5005 y CP 7007 respectivamente. Para ambos electodos se observa que los carburos están compuestos principalmente de hierro y cromo; también se encontró manganeso, el cual mostró una tendencia a concentrarse en los carburos, aunque esta tendencia no fue comprobada en los espectros realizados como el que se ilustra en la figura 10. Para el electodo EUS 5005 se encontraron cobre, titanio, molibdeno, vanadio, silicio y carbono distribuidos uniformemente en toda la estructura además de los elementos presentes en los mapas. Para el CP 7007 se encontró titanio, silicio y carbono distribuidos uniformemente en la estructura además de los elementos presentes en los mapas. En las tablas 6 y 7 se muestran micrografías para los electodos EUS 5005 y CP 7007 respectivamente de las microestructuras encontradas en cada capa de acuerdo con cada amperaje usado.

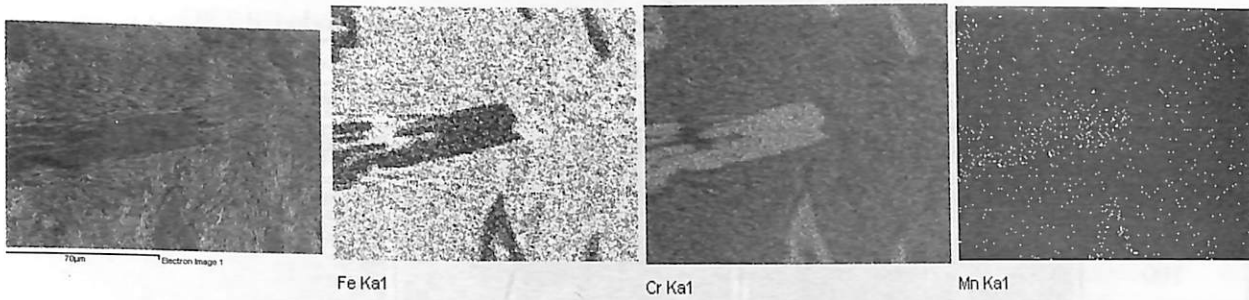


Fig 11. Mapa de composición para una región del EUS 5005.

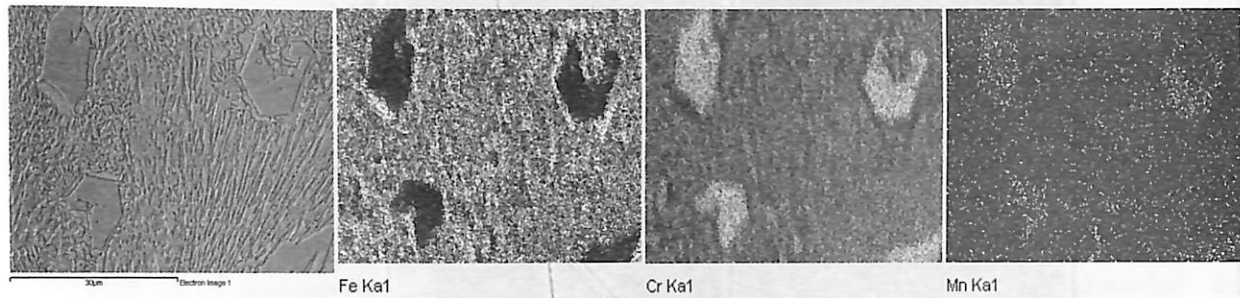


Figura 12. Mapa de composición para una región del CP 7007.

Tabla 6. Variación de la microestructura con el amperaje para el electrodo EUS 5005.

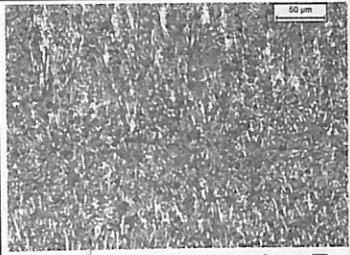
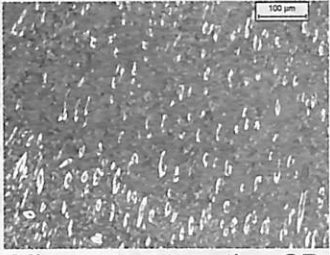
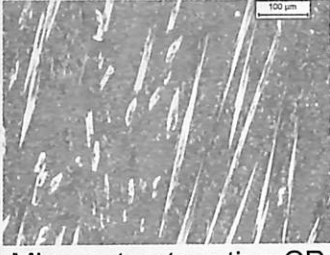
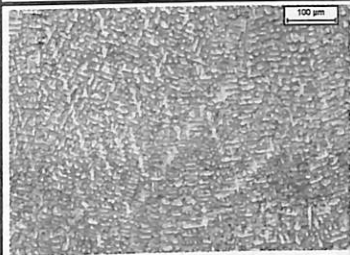
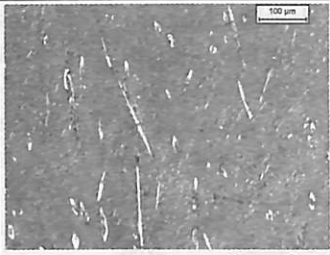
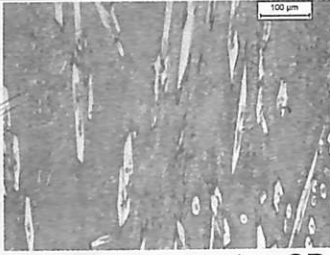
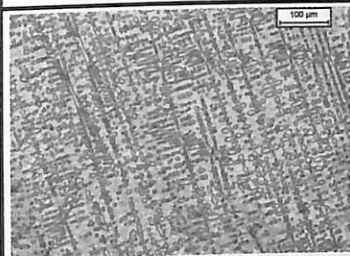
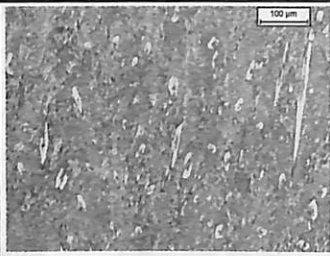
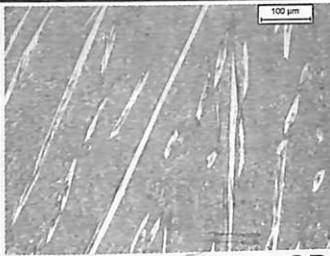
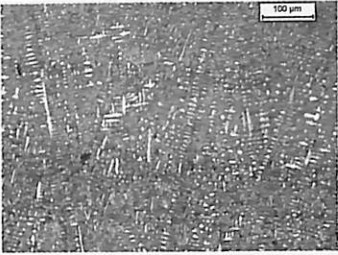
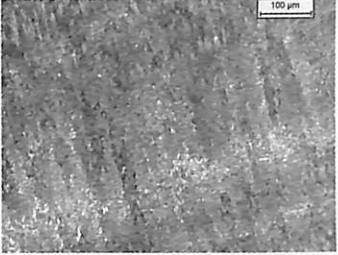
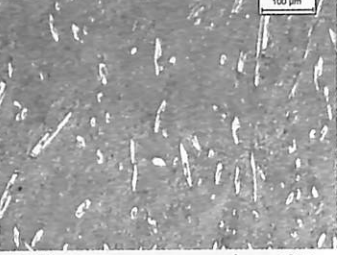
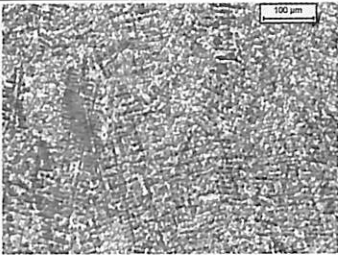
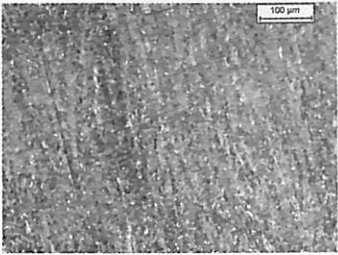
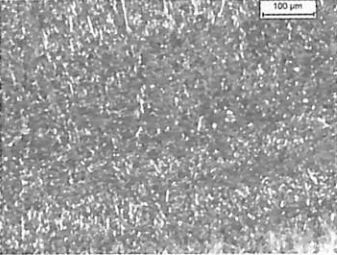
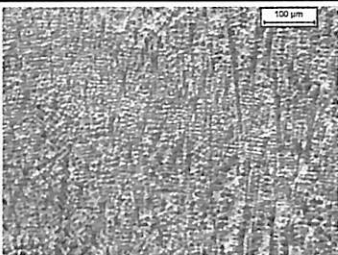
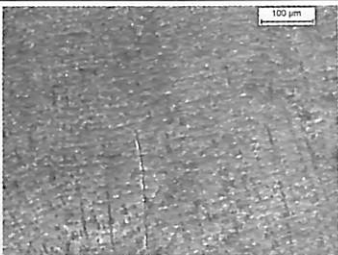
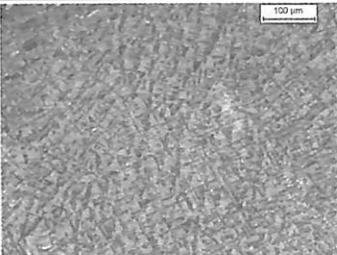
AMPERAJE	MICROESTRUCTURA		
	PRIMERA CAPA	SEGUNDA CAPA	TERCERA CAPA
100	 Microestructura tipo E	 Microestructura tipo CP	 Microestructura tipo CP
120	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo CP	 Microestructura tipo CP
140	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo CP	 Microestructura tipo CP

Tabla 7. Variación de la microestructura con el amperaje para el electrodo CP 7007.

AMPERAJ E	MICROESTRUCTURA		
	PRIMERA CAPA	SEGUNDA CAPA	TERCERA CAPA
100	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo E	 Microestructura tipo CP
120	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo E	 Microestructura tipo E
140	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo AP	 Microestructura tipo AP

Los resultados obtenidos para el porcentaje de dilución y la dureza en las probetas se encuentran en la tabla 8. Puesto que se obtuvieron dos valores de dilución para cada cordón, el valor presentado es el promedio de los dos cálculos realizados.

Tabla 8. Amperaje, entrada de calor, dureza y porcentaje de dilución calculado.

Cordón	Amperaje (A)	Entrada de calor (J/mm)	%Dilución	Dureza HRC Promedio
Electrodo CP 7007				
1	96-103	1130	11	51
2	120-123	1050	16	49
3	139-141	1500	27	48
4	160	1400	40	41
Electrodo EUS 5005				
5	100-105	1010	20	53
6	121-122	1090	27	53
7	141	1530	41	47
8	160	1780	55	42

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según Easterling (10) un incremento en la densidad de corriente (amperaje) extiende el rango de las isoterma que se forman durante la soldadura. Al extenderse el rango de las isoterma un mayor volumen de material base alcanza la temperatura de fusión, lo que genera un incremento en la proporción de metal base en el metal de soldadura y por esto se incrementa el porcentaje de dilución.

En la figura 13 se observa, para un solo cordón de soldadura, como varía el porcentaje de dilución para los dos electrodos con el amperaje. El electrodo EUS 5005 mostró mayor porcentaje de dilución (entre 20 y 55%) que el electrodo CP 7007 (entre 11 y 40%) para los mismos niveles de amperaje. También se observa en la figura 13 que, el porcentaje de dilución al usar la corriente de 160A es aproximadamente cuatro veces mayor que el

que se presenta cuando se usa la corriente de 100A, para cada electrodo.

Como se observa en la figura 14, para un solo cordón de soldadura, con el aumento de la corriente eléctrica se disminuye la dureza. Se presenta además una disminución de la dureza de alrededor de 10 HRC para cada electrodo en el intervalo de corriente usado, puesto que al aumentar la corriente aumenta el porcentaje de dilución haciendo que el porcentaje de cromo y carbono en el metal de soldadura disminuya, lo que genera una microestructura menos dura ya que se disminuye la proporción de elementos aleantes formadores de fases duras, como carburos.

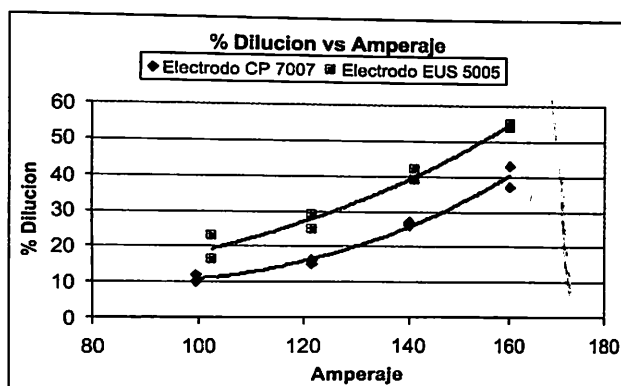


Figura 13. % Dilución vs Amperaje para un solo cordón.

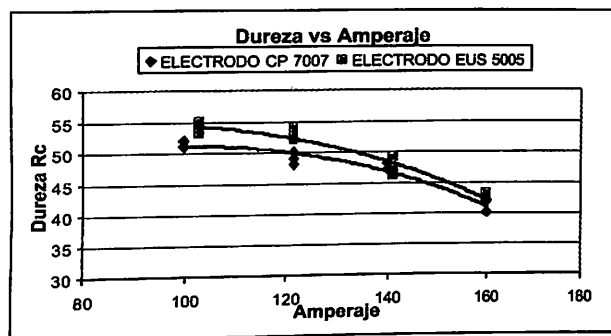


Figura 14. Dureza contra corriente para un solo cordón.

Se observó que hubo una mayor penetración y mayor tamaño en los cordones aplicados con los amperajes mayores.

En las tablas 5 y 6 se observa que para la primera capa del electrodo EUS 5005, con bajo amperaje (100A) se forma una microestructura eutéctica y, con el aumento de la corriente, se promueve la formación de una microestructura compuesta por austenita

primaria y eutéctica (AP) como se observa en la tabla 6; obsérvese que para el amperaje más alto (140A) siempre se encontró una microestructura del tipo AP. En la segunda capa se encontró que la microestructura predominante es del tipo CP para el amperaje más bajo (100A) y, a medida que aumentó la corriente, se aumentó la proporción de microestructura eutéctica. Cuando con los amperajes medio y alto se encontró una microestructura del tipo CP (cupones 5-12-1 y 5-14-2) la densidad de carburos fue menor que con el amperaje más bajo como se observa en la tabla 6. En la tercera capa con el amperaje más bajo siempre se obtuvo una microestructura del tipo CP, con mayor densidad de carburos que los obtenidos en la segunda capa y, a medida que aumentó el amperaje se disminuyó la densidad de carburos e incluso se encontraron cordones sin carburos primarios y con una microestructura del tipo E, como es el caso de los cupones 5-12-3

y 5-14-3 (Tabla 5).

Para el electrodo CP 7007 como se observa en la tabla 5 y 7 y en la figura 7, para la primera capa la microestructura siempre fue del tipo AP y no cambió con el amperaje. En la segunda capa con bajo amperaje siempre se obtuvo una microestructura eutéctica y a medida que se aumentó el amperaje se favoreció la formación de una microestructura del tipo AP. En la tercera capa con bajo amperaje se encontró una microestructura eutéctica y se observó una tendencia a formar una microestructura del tipo CP; como fue el caso del cupón 7-10-2, donde se encontró solo un cordón con microestructura del tipo CP aunque con baja densidad de carburos primarios.

De acuerdo con el trabajo realizado por Sairre, et. al (4) la superficie de liquidus del diagrama Fe-Cr-C propuesta por Jackson 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, como se observa en la figura 15. 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 (CP en la figura 15); a medida que disminuyen los porcentajes de cromo y carbono, y nos acercamos a la línea U1-U2 de la figura 15, se favorece la formación de una estructura eutectica (E en la figura 15); y si disminuyen aún más los porcentajes de cromo y carbono el resultado es una estructura compuesta por austenita primaria en una matriz eutéctica.

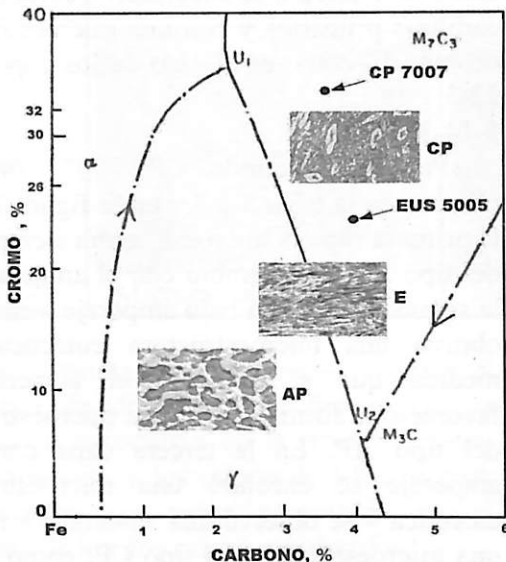


Figura 15. Superficie de líquidus del diagrama Fe-Cr-C, de acuerdo con Jackson. (4)

Según la composición química suministrada por el proveedor para el electrodo EUS 5005, el diagrama de Jackson (figura 15) predice que la microestructura que se podría obtener en estado no diluido es del tipo CP, esto coincide con la microestructura observada en la tercera capa (tablas 5 y 6); para el electrodo CP 7007, en el diagrama de Jackson (figura 15) se predice una microestructura del tipo CP, pero se encontró que la microestructura predominante en la tercera capa es eutéctica (tabla 5 y 7), esto

indica que la composición química real está sobre la línea eutéctica (U1-U2) y no coincide con la suministrada por el proveedor.

Para el electrodo EUS 5005, en la figura 16 se observa que la mayor cantidad de volumen perdido, es decir la menor resistencia al desgaste abrasivo, se obtuvo en los cupones 5-12-3 y 5-14-3, y en ellos se encontró una microestructura eutéctica; en los cupones que presentaron carburos primarios del tipo M_7C_3 se obtuvieron menores pérdidas de volumen.

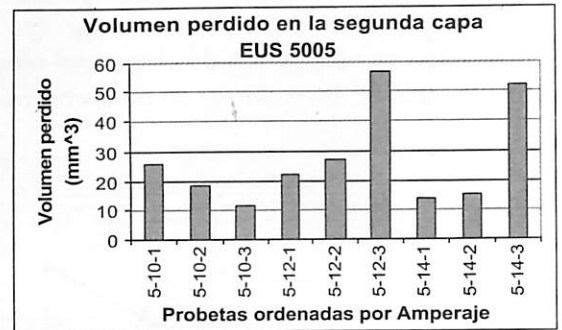


Figura 16. Volumen perdido en la segunda capa para el electrodo EUS 5005.

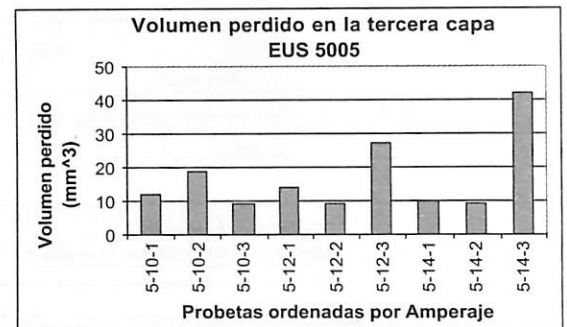


Figura 17. Volumen perdido en la tercera capa para el electrodo EUS 5005.

En la figura 17 la mayor pérdida de volumen la presentan los cupones 5-12-3 y 5-14-3, que tenían cordones completamente eutécticos y otros con una microestructura del tipo CP. Esto muestra que la microestructura eutectica no es favorable para la resistencia al desgaste abrasivo y, como se dijo antes, los altos amperajes promueven la formación de este tipo de microestructura en la segunda y tercera capa del electrodo EUS 5005.

En la tabla 5 y las figuras 16 y 17 se observa que la tercera capa presenta menor pérdida de volumen que la segunda capa, por tanto, la resistencia al desgaste abrasivo es

mejor en la tercera capa donde se observa mayor densidad de carburos primarios (tabla 6). Esto muestra que una mayor densidad de carburos primarios mejora la resistencia al desgaste abrasivo.

Para el electrodo CP 7007, en la figura 18 se observan altas pérdidas de volumen en todos los cupones y no hay una variación significativa con respecto al amperaje. Las microestructuras encontradas en estos cupones son eutécticas para bajos amperajes y del tipo AP para altos amperajes. En la figura 19 se resalta que el cupón 7-10-2, depositado con el amperaje más bajo, en el cual se encontró un cordón con una microestructura del tipo CP, presentó la mayor resistencia al desgaste.

En las figuras 20 a 22 se presenta la variación de la dureza con el amperaje para el electrodo EUS 5005: para la primera y segunda capa se observa que con el aumento del amperaje se disminuye la dureza y al pasar de la primera a la segunda capa la variación de la dureza con el amperaje se hace menor, y en la tercera la variación de la dureza con el amperaje no es significativa.

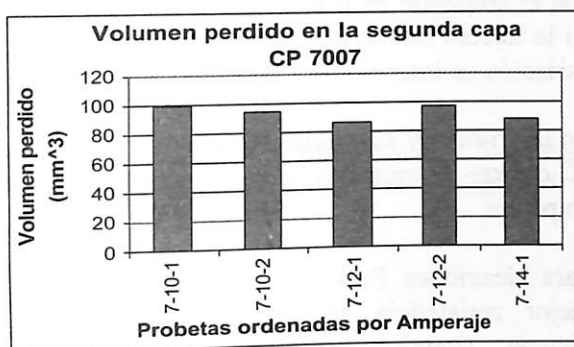


Figura 18. Volumen perdido en la segunda capa para el electrodo CP 7007.

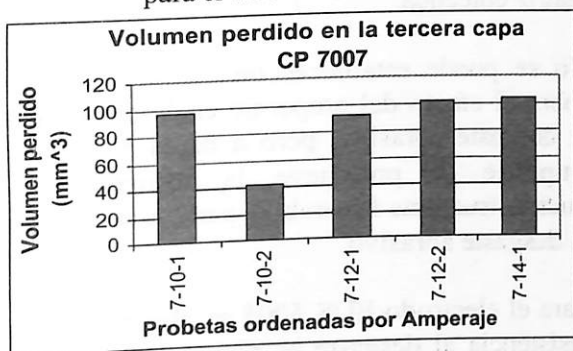


Figura 19. Volumen perdido en la tercera capa para el electrodo CP 7007.

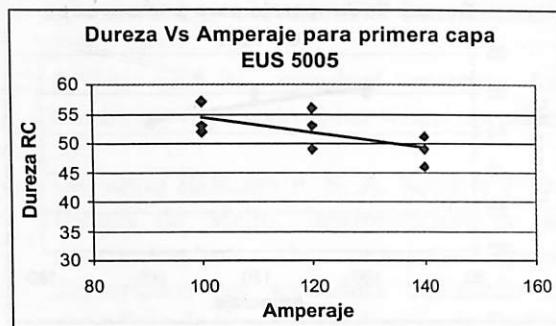


Figura 20. Dureza vs amperaje para la primera capa con el electrodo EUS 5005.

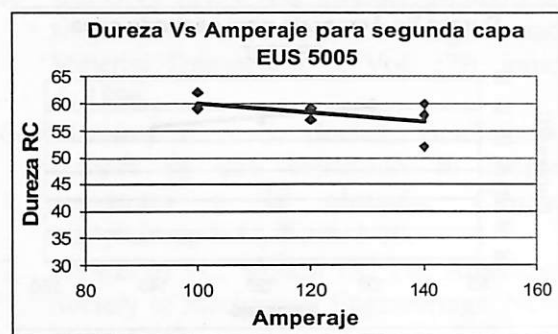


Figura 21. Dureza vs amperaje para la segunda capa con el electrodo EUS 5005.

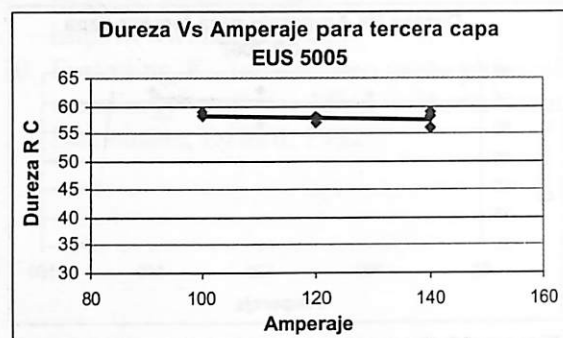


Figura 22. Dureza vs amperaje para la tercera capa con el electrodo EUS 5005.

En las figuras 23 a 25 se presenta la variación de la dureza con el amperaje para el electrodo CP 7007, ésta presenta un comportamiento similar que para el electrodo EUS 5005.

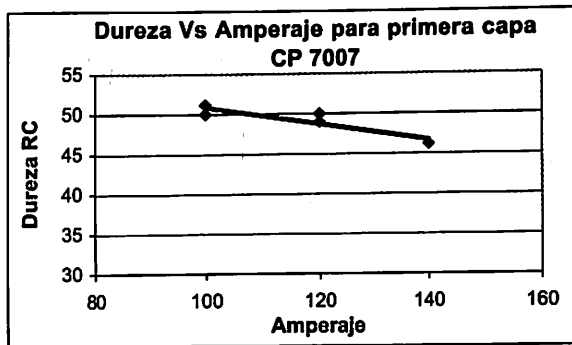


Figura 23. Dureza vs amperaje para la primera capa con el electrodo CP 7007.

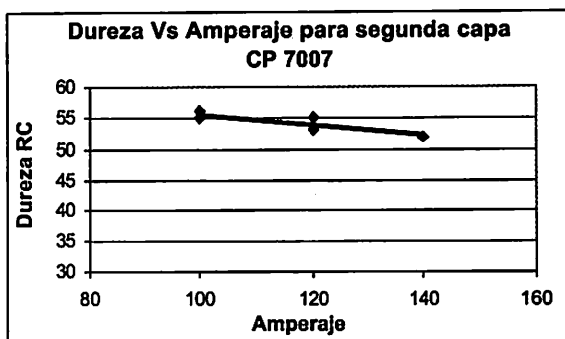


Figura 24. Dureza vs amperaje para la segunda capa con el electrodo CP 7007.

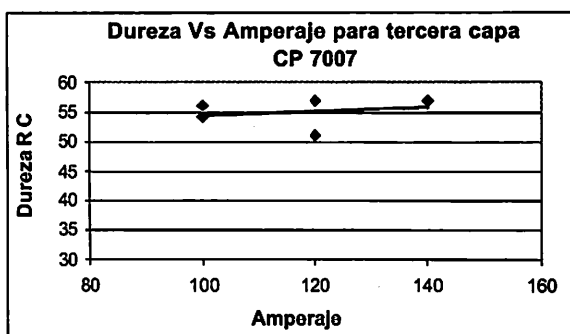


Figura 25. Dureza vs amperaje para la tercera capa con el electrodo CP 7007.

El comportamiento de la dureza respecto a la variación del amperaje es similar para los dos electrodos puesto que ambos presentan fases más duras en la medida que aumenta su contenido de aleación. Para la primera capa el efecto de la dilución es alto puesto que se deposita la soldadura sobre un acero de bajo contenido de aleación (ASTM A36) y se observa que al variar el amperaje, varían significativamente el porcentaje de dilución y la dureza. Para la segunda capa el efecto de la dilución es menor puesto que la soldadura se

deposita sobre un material que posee un contenido de aleación superior al del metal base inicial, por tanto los cambios del porcentaje de dilución con el amperaje generan menor cambio en la dureza que los observados para la primera capa. En la tercera capa el efecto de la dilución es menor que en las capas anteriores debido a que se ha alcanzado un nivel de aleación en el cual ni el porcentaje de dilución, ni sus cambios con el amperaje, afectan significativamente la composición química del metal de soldadura, ni su dureza.

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que los aumentos en el amperaje generan incrementos en el porcentaje de dilución y la disminución del amperaje reduce el porcentaje de dilución.

El electrodo EUS 5005 presentó mayores porcentajes de dilución para todos los amperajes que el CP 7007.

En ambos electrodos, la variación de la dureza con el amperaje es mayor en la primera capa, en la tercera no varía y en la segunda capa la variación es intermedia.

En la primera y segunda capas se observó que la dureza disminuyó con el aumento del amperaje.

Para aleaciones Fe-Cr-C, se encontró que la mejor resistencia al desgaste abrasivo se obtiene cuando la microestructura está compuesta de carburos primarios M_7C_3 en una matriz eutéctica.

No se puede establecer una tendencia clara sobre el efecto del amperaje en la resistencia al desgaste abrasivo, pero a bajos niveles de amperaje se promueve la formación de microestructuras favorables para la resistencia al desgaste abrasivo.

Para el electrodo EUS 5005 se observó que la resistencia al desgaste es mejor en la tercera capa debido a que en ésta hay mayor densidad de carburos primarios que en la segunda capa.

También se encontró que para el amperaje más bajo la densidad de carburos obtenida es mayor que para amperajes más altos.

La microestructura predicha con la composición química suministrada por el proveedor del EUS 5005 coincide con las microestructuras observadas. Para el CP 7007 la microestructura predicha con la composición química suministrada por el proveedor no coincide con la microestructura observada que corresponde a una aleación eutéctica, lo que indica que es menos aleada en Cr y C de lo que dice su proveedor.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Nacional de Colombia y a la Dirección de investigación Sede Medellín por facilitar sus recursos para el desarrollo de éste trabajo. Al profesor Alejandro Toro por su acompañamiento y apoyo durante la realización de este trabajo. También se agradece a los demás integrantes del Grupo de Soldadura y del Grupo de Tribología y Superficies por sus valiosos aportes. Finalmente agradecemos a la empresa ASTECO S.A. por su colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM, Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6., Edition 9^ª.
2. Crook P. y H. Farmer, Friction and wear of hardfacing alloys, ASM International, 758 - 765.
3. ASTM G65-01, standard practice for conducting dry sand/rubber wheel abrasion test.
4. De Sairre Bálamo 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, Vol 25, N°4, 199-207. 1995.
5. DuPONT J.N. y A.R. Marder, Dilution in single pass arc welds, Metallurgical and Material Transaction B, Vol. 27B, junio de 1996.
6. Maratray F. y S. Bechet, Fundiciones blancas de alto contenido en cromo resistentes a la abrasión, Climax Molybdenum S.A., Paris, 1-10.
7. ASME BPVC, section IX, The American Society of Mechanical Engineerings, New York, 1992.
8. Quaas J. F., Hardfacing International, Welding Journal, 175-182. Marzo 1970.
9. Material Property Data: <http://www.matweb.com>
10. Easterling, K., Introduction to the physical metallurgy of welding, Butterworth Heinemann, Oxford, 1992.