

## EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO EN RECUBRIMIENTOS DUROS PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA MINERA

### RESUMEN

Fue estudiada la resistencia al desgaste abrasivo de dos recubrimientos duros de alto Cr y alto W, usados como protección en la industria minera. Los recubrimientos fueron aplicados en una sola capa sobre un sustrato de acero estructural AISI A36, mediante soldadura eléctrica SMAW. El recubrimiento RFeCrA1, aplicado con soldadura oxiacetilénica, fue usado como material de comparación debido a su elevada resistencia a la abrasión.

La resistencia al desgaste se evaluó en máquina de arena seca y rueda de caucho mediante el procedimiento A de la norma ASTM G65. Las superficies desgastadas fueron analizadas con ayuda de microscopía óptica y electrónica.

Los resultados mostraron que la mayor resistencia al desgaste abrasivo se obtuvo con recubrimientos cuya microestructura está compuesta por carburos primarios de tipo  $(Fe,Cr)_7C_3$  y matriz eutéctica, mientras que en muestras donde se observó austenita pro-eutéctica la pérdida de masa fue mayor. El recubrimiento tipo Fe-W-C, en cuya microestructura se observaron carburos de tipo WC, presentó también elevada resistencia al desgaste debido a la dureza y capacidad de deformación de la estructura.

**PALABRAS CLAVES:** Recubrimientos duros, Resistencia al desgaste abrasivo, Norma ASTM G65, Microscopía óptica y electrónica.

### ABSTRACT

The resistance to abrasive wear of two hardfacing alloys containing either high Cr or high W was studied. The alloys were deposited onto AISI A36 steel plates by a SMAW procedure. An alloy applied by oxyacetylene welding was used as comparison material.

Wear resistance was measured in a dry sand – rubber wheel testing machine according to ASTM G65 standard, procedure A. The worn surfaces and the microstructure of the samples were analyzed in optical and scanning electron microscope, while the hardness of the deposits was measured in a Rockwell hardness tester.

The best abrasion resistance was obtained in microstructures composed of primary  $(Fe,Cr)_7C_3$  carbides and eutectic matrix, while higher mass losses were measured in Fe-Cr-C specimens containing primary austenite. The Fe-W-C hardfacing also showed good abrasion resistance due to the high hardness and deformability of the structure.

### 1. INTRODUCCIÓN

De los diversos modos de degradación de una superficie, entre deformación plástica, agrietamiento, cambios estructurales, corrosión y desgaste, éste último y en particular el tipo de desgaste abrasivo es uno de los grandes problemas que se presentan en piezas que trabajan en contacto con minerales.

La Norma ASTM G40-92 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra

una superficie y se mueven a lo largo de ella, provocando daños superficiales intensos y con ello la destrucción total o parcial de la pieza [1].

La forma en que es arrancado el material o deformada la superficie de una pieza, se conoce como mecanismo de desgaste, siendo que el mecanismo más efectivo de remoción de material en desgaste abrasivo en materiales dúctiles es el *corte*. Sin embargo, en función de determinadas variables del sistema y propiedades de los materiales involucrados, la eficiencia en la remoción de material bajo este mecanismo puede ser atenuada. Cuando esto ocurre, se dice que está presente el

### JUAN CARLOS GUTIÉRREZ

Ing. Mecánico  
Universidad de Ibagué  
Corunversitaria  
juancgp24@hotmail.com

### LISYS MARGARITA LEÓN SEVILLA

Ing. Mecánico.  
Universidad Nacional de Colombia  
Sede Medellín.  
Estudiante de Maestría Escuela de  
Materiales, Universidad Nacional de  
Colombia Sede Medellín.  
lmleons@unalmed.edu.co

### DAIRO HERNÁN MESA GRAJALES

M.Sc.  
Docente Transitorio T.C  
Escuela de Tecnología Mecánica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
dhmesa@utp.edu.co

### ALEJANDRO TORO

Dr. Phd.  
Director: Grupo de Tribología y  
Superficies, Escuela de Ing. de  
Materiales, Universidad Nacional de  
Colombia, Medellín, Colombia  
aotoro@unalmed.edu.co

mecanismo de *microsurcado*, donde la remoción de material solamente se presenta por acciones repetidas de los abrasivos, llevando a un proceso de fatiga de bajo ciclaje. [2, 3]

Una de las posibles formas de evaluar el desgaste abrasivo es por medio de un procedimiento conocido como ensayo de desgaste abrasivo a seco con rueda de caucho y chorro de arena. Este procedimiento, cuyas especificaciones son dadas por la norma ASTM G65, permite obtener resultados sobre el comportamiento cuantitativo y cualitativo de un material con respecto a otros, donde la pérdida de masa es el parámetro principal. [4]

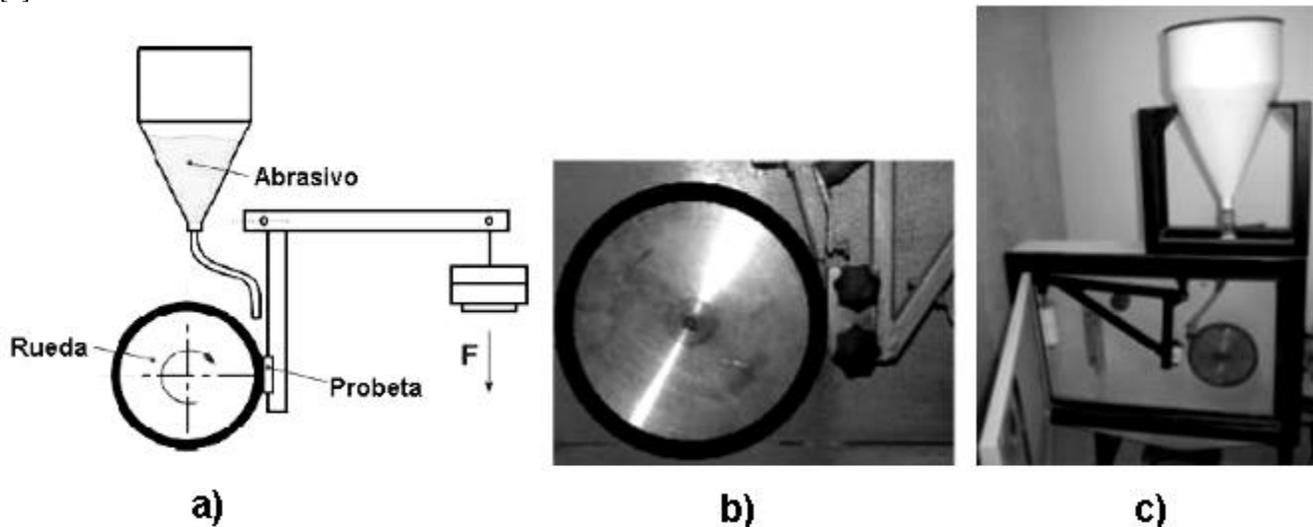


Figura 1. Máquina de ensayos de abrasión según norma ASTM G65. a) Esquema general, b) parte de la máquina donde se produce el desgaste y c) máquina empleada en este trabajo. [4,6,7,8]

Por otro lado, en la actualidad se están utilizando soluciones económicas y rápidas a problemas de desgaste abrasivo, tales como reconstruir partes dañadas con procesos de soldadura denominados recargues. Estos procesos tienen la finalidad de recubrir las piezas con aleaciones que facilitan la formación de depósitos duros. Este tipo de solución es sencilla para enfrentar el desgaste y a la vez permite incrementar la vida útil de los elementos de máquinas reconstruidos. [7]

Dentro de los procesos de soldadura que se utilizan para aplicar los recubrimientos duros están el de soldadura eléctrica (SMAW), siendo ésta una de las soluciones más viables, rápidas y económicas a los problemas de desgaste abrasivo, ya que permite ser realizada en el lugar en donde se encuentra la parte o superficie defectuosa.

Otro procedimiento bastante utilizado es el de soldadura GTAW (Gas Tungsten Metal Arc Welding), con el que se pueden obtener estructuras más finas que las obtenidas por soldadura Oxiacetilénica debido al calor localizado, y por ende se obtendrá una mayor resistencia al desgaste,

El dispositivo de ensayo, mostrado en las figuras 1 a), b) y c), consta principalmente de una tolva y conducto para la arena seca, un disco de acero recubierto con caucho vulcanizado, una palanca para control de la carga, un porta-probeta y un motor. Como características de funcionamiento, la máquina tiene un variador de velocidad, un contador de revoluciones y un sistema de control. En el contacto entre el disco y la muestra se mantiene un flujo constante de abrasivo a través de una boquilla que deja pasar las partículas con un caudal constante. [5]

puesto que el tamaño de los carburos afecta de manera directa dicha propiedad [7].

Las familias de recubrimientos duros más utilizados, aplicados por procesos de soldadura con el fin de aumentar la resistencia al desgaste abrasivo en piezas recuperadas, son la familia de recubrimientos martensíticos, aplicados en condiciones de desgaste por contacto metal-metal, la familia de recubrimientos ricos en carburos de Cr, ideales para condiciones de desgaste abrasivo con moderado impacto y la familia de recubrimientos ricos en carburos de Tungsteno, aplicados en condiciones de abrasión pura o eventualmente con bajo impacto. [7].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Recubrimientos

Los recubrimientos utilizados fueron aplicados sobre placas de acero estructural ASTM A36 de 300 mm de longitud, 35 mm de ancho y 3/8" (9.525 mm) de espesor.

Se usó el proceso de soldadura SMAW con las especificaciones de aplicación de los distribuidores para aplicar los recubrimientos de alto Cr (electrodo de 1/8") y alto W (electrodo de 3/16").

Por otro lado, el recubrimiento RFeCrA1 se aplicó por soldadura oxiacetilénica de acuerdo a procedimiento

optimizado por una empresa local para fabricación de discos de arado de elevada resistencia a la abrasión. La composición química de los recubrimientos es mostrada en la tabla 1.

Recubrimiento	Marca	Composición Química, % en peso				
		C	Cr	Mn	W	Si
CITODUR V-1000	Oerlikon	4,3	35	1,1	---	---
ULTIMIUM N-112	Eutectic-Castollin	4,5	---	2,1	26	---
RFeCr-A1	Cuarepoti (Argentina)	4,5	30	1,5	---	4,0

Tabla 1. Composición química nominal (en peso) de los recubrimientos utilizados

## 2.2. Ensayos de desgaste abrasivo

Los ensayos de desgaste abrasivo se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM G65 según el procedimiento tipo A, con la máquina de rueda de caucho-arena seca, la cual se muestra en la figura 1 c), ubicada en el laboratorio de tribología y superficies de la Universidad Nacional, sede Medellín..

La máquina cuenta con un disco de acero recubierto con caucho butílico con dureza media de 40 shore, girando a una velocidad de 200 rpm. Durante los ensayos, una carga de 130N fue aplicada por contrapeso, utilizando un sistema de palancas. La tolva y el conducto permiten un flujo de sílice a caudal constante.

La distancia total de ensayo fue de 4309 m. Las probetas de ensayo fueron paralelepípedos de 25 x 65 x 12 mm, cortados de las placas donde se aplicaron los distintos recubrimientos.

Fueron utilizadas partículas de sílice con granulometría media AFS 30/50 (300–600  $\mu\text{m}$ ). El flujo de partículas sobre las superficies de desgaste fue de aproximadamente 310 g/min.

El desgaste medido como la pérdida de masa se registró en una balanza AND HR-200, con resolución de 0.0001g. Los resultados de pérdida de masa fueron normalizados usando la distancia de desgaste recorrida (4309 m). El valor de resistencia a la abrasión calculado corresponde

al inverso del cociente entre la masa perdida por la muestra y la distancia recorrida, y se expresa en  $(\text{mg/m})^{-1}$ .

## 2.3. Análisis de las superficies desgastadas

Las superficies desgastadas fueron observadas en microscopio estereoscópico *LEICA GZ6* con su correspondiente sistema digital de análisis de imágenes, y en microscopio electrónico de barrido *JEOL JSM 5910LV* con microanálisis químico mediante espectrómetros de tipo EDS y WDS

## 2.4. Análisis microestructural y dureza

La microestructura de los materiales fue analizada usando microscopio óptico *Olympus PME3B* y microscopio electrónico de barrido *JEOL JSM 5910LV*. La dureza fue medida usando durómetro Wolpert en escala *Rockwell C* y la microdureza se determinó mediante microdurómetro *SHIMADZU* en escala Vickers con carga de 25 y 50 gf.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Caracterización microestructural de los recubrimientos utilizados

En la figura 2 se pueden apreciar las tres diferentes zonas presentes en el depósito realizado con electrodo Citodur V1000 con una única capa.

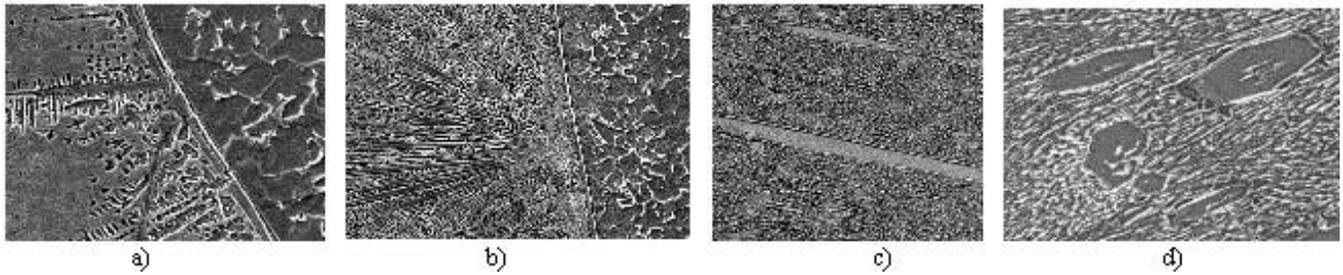


Figura 2. Micrografías del recubrimiento Citodur V 1000 - 1capa; a) Zona de crecimiento dendrítico, b) Zona de carburos alargados  $M_7C_3$ , c) Detalle de los carburos, d) Zona de carburos primarios MC [6].

Cerca de la intercara metal base-recubrimiento, se observa una estructura con crecimiento dendrítico (Fig. 2 a), ocasionada por el rápido enfriamiento característico del proceso de soldadura eléctrica. En las figuras 2 b y c), se aprecia una zona con presencia de carburos alargados del tipo  $M_7C_3$  (primarios) inmersos en una matriz martensítica, los cuales no presentan una orientación preferente respecto a la intercara o a la superficie. Ya en la zona cercana a la superficie, los carburos no se presentan alargados sino con forma hexagonal y la matriz está compuesta por constituyente eutéctico figura 2 d).

El recubrimiento Ultimum N112 reveló una microestructura en la que se pueden apreciar carburos

primarios del tipo MC (microdureza aproximada 2500 HV) rodeados a su vez por una red eutéctica con carburos del tipo  $M_6C$  (microdureza aproximada 1600 HV), los cuales adoptan una configuración geométrica comúnmente conocida como “espina de pescado” (*Fish bone*). La matriz del depósito es martensita con microdureza media 630 HV, correspondiente a la parte oscura que puede apreciarse en la Figura 3. Esta microestructura, típica de aceros de herramientas con contenidos elevados de W, V o Co, se presentó bastante homogénea en todo el recubrimiento. La figura 4 muestra la microestructura de recubrimiento usado como comparación RFeCr-A. En este recubrimiento se observan carburos de tipo  $M_7C_3$  con diferentes tamaños y formas, inmersos en una matriz eutéctica

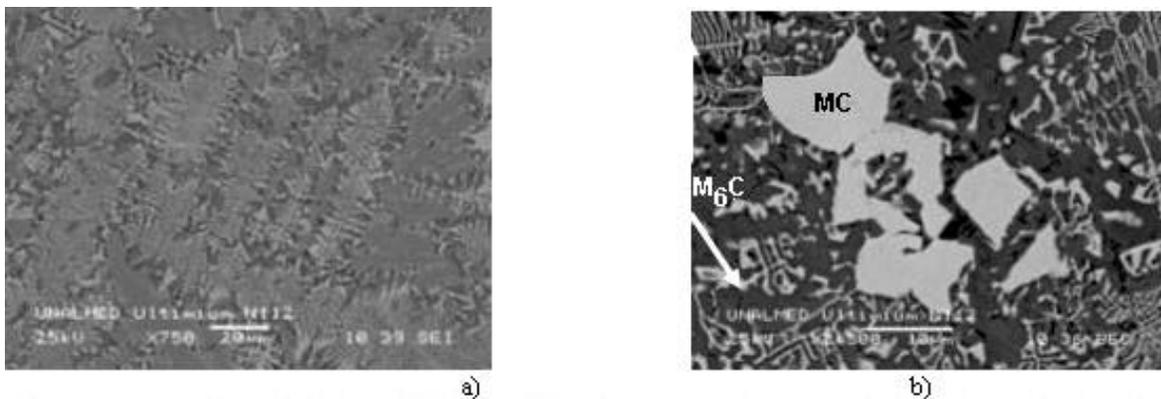


Figura 3. Microestructura del recubrimiento Ultimum N112 - 1 capa. a) Vista general, b) Carburos de tipo  $M_6C$  y MC en matriz martensítica [6].

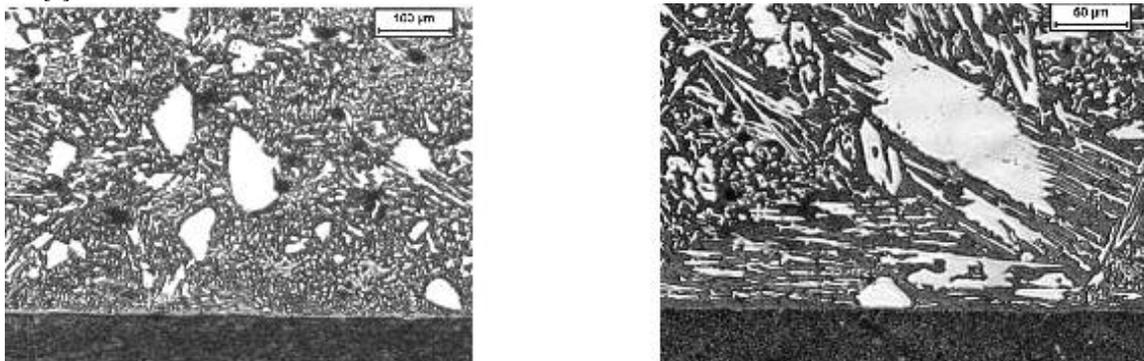


Figura 4. Microestructura del recubrimiento RFeCr-A1 con una capa. Se observan carburos primarios con amplia variedad de tamaños y matriz eutéctica [6].

A pesar que los recubrimientos CITODUR V1000 y RFeCr-A1 presentan composiciones químicas promedio muy similares, su microestructura y comportamiento frente a la abrasión difieren en gran medida. Estas diferencias se fundamentan, entre otras cosas, en que la dilución del depósito RFeCr-A1 en el metal base fue muy baja, como se puede inferir del perfil recto de la intercara entre el metal base y el recubrimiento (figura 4). Este hecho se refleja en la presencia de carburos primarios en toda la extensión del recubrimiento, los cuales le confieren a la microestructura muy buenas características frente a la sollicitación durante el trabajo, aún en condiciones de una sola capa depositada. La matriz observada es eutéctica y los carburos en algunos casos llegan a tener un tamaño medio superior a las 100 μm.

### 3.2 Resistencia al desgaste abrasivo y su relación con la microestructura

#### 3.2.1 Pérdidas de masa y resistencia al desgaste

La tabla 2 muestra los resultados generales de pérdida de masa y resistencia a la abrasión obtenidos en el ensayo de desgaste abrasivo, para cada uno de los recubrimientos estudiados. Los valores más bajos de pérdida de masa se reportaron en los recubrimientos RFeCr-A1 y Ultimium N112, mientras el Citodur V 1000 sufrió siempre la mayor degradación.

Recubrimiento	Pérdidas de masa [mg]	Resistencia a la abrasión, (mg/m) <sup>-1</sup>
Ultimium N112	177.9	24.2
Citodur V-1000	2923.8	1.4
RFeCr-A1	84.4	51.0

Tabla 2. Pérdida de masa de los recubrimientos y resistencia a la abrasión [6].

El recubrimiento RFeCr-A1 aplicado con proceso oxiacetilénico debe su elevada resistencia al desgaste a que la dilución es prácticamente despreciable, y a que los carburos en su microestructura están homogéneamente distribuidos dentro del depósito y de mayor tamaño a los obtenidos mediante deposición por soldadura de arco eléctrico (SMAW).

#### 3.2.2. Efecto de la Microestructura

Las figuras 5 a) b) y c), muestran como los carburos duros actúan como barrera para el avance de las partículas abrasivas. En el depósito de Ultimium N112 los carburos de tungsteno permiten cierta deformación en su estructura (Fig. 5 c y d) y actúan como escudo para la matriz evitando que la partícula abrasiva penetre y cause remoción de masa por corte.

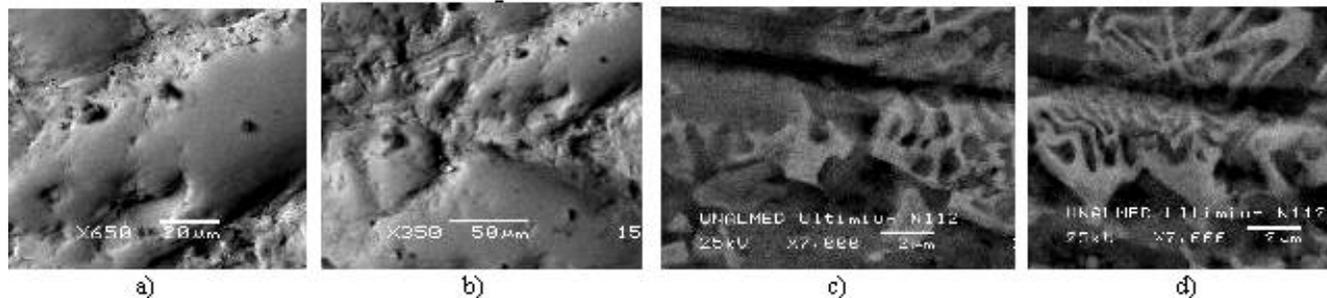


Figura 5. Respuestas de los carburos de cromo y de tungsteno frente a las partículas abrasivas; a) y b) Carburos de Cromo; c) y d) Carburos de Tungsteno. [6]

### 3.3. Efecto de la dureza

En la tabla 3 se pueden apreciar las durezas alcanzadas por los diferentes recubrimientos depositados. Cabe anotar que las diferencias entre las familias de recubrimientos no supera en ningún caso los 10 Rockwell C en promedio, o sea menos del 20% relativo a la dureza máxima, mientras que el factor entre la resistencia a la abrasión máxima y mínima en los ensayos fue de 36, como se aprecia en la tabla 4 para los recubrimientos RFeCr-A1 y CITODUR V1000.

Recubrimiento	Dureza HRC				Prom
Ultimium N 112	59	55	59	59	58
Citodur V 1000 una capa	53	53	52	55	53
RFeCr-A1	58	60	57	58	58

Tabla 3. Durezas de los recubrimientos ensayados.

Lo anterior indica entonces, que la dureza de los recubrimientos ensayados no está directamente relacionada con su resistencia a la abrasión, como si lo está la microestructura en términos del tipo, tamaño y distribución de los constituyentes.

#### 4. CONCLUSIONES

Los recubrimientos duros aplicados por procesos de soldadura ofrecen una buena alternativa para recuperar partes sometidas a desgaste abrasivo como en el caso de la industria minera.

El recubrimiento RFeCr-A1, cuya microestructura está compuesta por carburos primarios de tipo  $M_7C_3$  en matriz eutéctica, presentó la mejor resistencia al desgaste abrasivo de todas las superficies ensayadas.

El recubrimiento Ultimium N112, rico en tungsteno, presentó elevada resistencia al desgaste debido principalmente a la tenacidad de los carburos de tipo  $M_6C$  formados en la microestructura, los cuales mostraron alta capacidad de deformación y resistencia al corte.

La dureza no es un parámetro concluyente al momento de evaluar la resistencia al desgaste abrasivo de los materiales estudiados en este trabajo, puesto que pequeñas variaciones en dureza llevaron a cambios muy grandes en pérdidas de masa por abrasión usando ensayo normalizado de arena seca y rueda de caucho.

Al usar una sola capa de recubrimiento por proceso SMAW se obtiene mucha dilución del material base dentro del recubrimiento y por ende dicho recubrimiento presenta características muy heterogéneas, estimulándose la formación de austenita pro-eutéctica y reduciéndose la resistencia al desgaste abrasivo.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Industrias BONEM S.A, Medellín

Talleres J.M Ltda, Medellín

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SEDRIKS, A.J. MULHEARN, T. O.; Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive process, *Wear*, v. 7, 1963, pp. 457-466.
- [2] HUTCHINGS, I. M. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge, 1992, p 133- 171.
- [3] ZUM GAHR, KARL-HEIZ, Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987. p. 80-350.
- [4] Hawk J.A. , Wilson R.D., Tylczak J.H., Dogan O.N. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation, *Wear*, Vol 225, 1999.
- [5] ASTM G65-80 Standard practice for Conducting dry sand / rubber abrasion test
- [6] GUTIERREZ, Juan C, Relación entre microestructura y resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos de carburos de cromo y carburos de tungsteno depositados por soldadura para aplicaciones en la industria minera, Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia (Medellín), CORUNIVERSITARIA (Ibagué), 2004.
- [7] ASM HANDBOOK. Friction, Lubrication and Wear Technology. Volume 18. 1992, p 176- 192.
- [8] HUTCHINGS, I. M. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge, 1992, p 133- 171.
- [8] RABINOWICZ, E. Friction and Wear Materials. New York; John Wiley & Sons, Inc, 1965, 167-172.
- [9] RICHARDSON, R.C.O The Wear of Materials by relatively soft abrasives. *Wear*, 11 1968, p 245-275.