

**ESTUDIO MICROESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS DUROS
SOMETIDOS AL DESGASTE ABRASIVO EN UN ACERO BASE AISI/SAE 4140
APLICADOS POR SOLDADURA ELÉCTRICA SMAW**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

EDIZON FERNANDO VARGAS 20102275039

JUAN PABLO BARRERA 20092275003

ANTEPROYECTO DE GRADO

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2013**

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2. ESTADO DEL ARTE	6
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS.....	18
4.1 OBJETIVO GENERAL	18
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
5. MARCO TEÓRICO	19
5.1 DESGASTE DE MATERIALES.....	19
5.1.1 El Desgaste Abrasivo	19
5.1.2 Tipos De Desgaste Abrasivo	20
5.1.3 Abrasión Controlada Y No Controlada	22
5.1.4 Variables Del Desgaste Abrasivo	22
5.2 LA TRIBOLOGÍA	27
5.3 LOS RECUBRIMIENTOS DUROS.....	27
5.4 ESTRUCTURA Y MICROESTRUCTURA DE LOS METALES	28
6. METODOLOGÍA.....	29
7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	31
8. PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	32
BIBLIOGRAFÍA.....	34
ANEXOS.....	37

FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Formas de desgaste abrasivo	20
Figura 2: Cinco procesos de desgaste abrasivo.	21
Figura 3: Resistencia al desgaste frente a la dureza de los materiales puros y aleaciones.....	24
Figura 4: Efecto sobre el desgaste abrasivo cuando el tamaño de la segunda fase es variado	26

TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Factores y variables del diseño de experimentos.	29
Tabla 2: Selección del tipo de ensayo según la Norma ASTM G65 - 00	30

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel Mundial, en la industria metalmecánica, minera y agrícola, se presentan, en muchos casos, averías en las superficies de los materiales en contacto debido al desgaste abrasivo producido entre ellos, causando el sobre mantenimiento y bajo rendimiento en las plantas de producción, llegando a ser cercano al 50%¹ de las fallas totales producidas anualmente, provocando paros inesperados de las máquinas y detención de los sistemas de producción. El costo de la abrasión es alto y se ha estimado entre 1 y 4% del PIB de una nación industrializada².

En Colombia, al igual que en el resto del mundo, el desarrollo de los recubrimientos duros en forma de capas o películas delgadas, está asociado a la batalla que libra contra los nocivos efectos de la fricción y el desgaste generados sobre las piezas mecánicas en las líneas de producción. Grupos de investigación universitarios con apoyo de Colciencias y la participación de la industria metalúrgica y metalmecánica han contribuido en el desarrollo de esta tecnología³. Universidades en Colombia como la UNAL sede Medellín, han planteado la necesidad de investigar a fondo el desgaste superficial en el acero base AISI/SAE A36, sometidos a un proceso conocido como recubrimiento duro⁴, en el cual se deposita una capa fundida de material duro proveniente de un proceso de soldadura necesario para endurecer la parte superficial del material base, para reducir el desgaste y aumentar la vida útil de la pieza; al igual en la Universidad del valle pionera en estudios del desgaste ha logrado atacar el problema usando dos técnicas de endurecimiento superficial, por deposición catódica (PDV) y por el

¹ MARTÍNEZ PÉREZ, Francisco. La Tribología, Ciencia y Técnica para el mantenimiento. Desgaste de sólidos. Desgaste abrasivo. México D.F. Ed. Limusa S.A. Grupo Noriega Editores, 2003. P.88

² YLCZAK J. Abrasive Wear. ASM Handbook, Friction, Lubrications & wear Technology. V.18. 1992.P337

³ MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos Duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD). [Versión Electrónica]. Revista Metal Actual No 8. 2008. P. 32

⁴ PEREZ CEPEDA, Jaime Andrés. Influencia de la Microestructura en el Comportamiento a Desgaste Abrasivo Evaluado bajo Norma ASTM G65 de Depósitos de Soldadura Anti desgaste Aplicados sobre Sustratos de Acero de baja Aleación y bajo Carbono. Bogotá, Colombia. UNAL, Facultad de ingeniería, departamento de Ingeniería mecánica y mecatrónica. 2011. 108 p.

método de deposición química de vapor (CDV)⁵, aplicado a la industria minera⁶ y agrícola⁷.

La industrial local, al igual que en el resto del país, muestra un aumento del mantenimiento debido al desgaste en piezas que no se han podido recuperar como sucede en la empresa de soldaduras WEST ARCO, con las unidades de extrusión de celulosa, en donde, el distribuidor de pastas, que sirve para recubrir el núcleo de alambre con la mezcla, en la elaboración del electrodo, sufre en el proceso un gran desgaste, por esto, la Universidad Libre desarrolló un proyecto para la recuperación de dichas partes dentro de la máquina⁸. Otras universidades como la Universidad De Los Andes, La Pontificia Bolivariana y La Universidad Nacional con Sede en Bogotá, en el ámbito local, han desarrollado grupos en tribología para la investigación del desgaste y la lubricación.

A través de la Universidad Distrital y el semillero de investigación en Tribología se incentivó el estudio del desgaste en los recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica (SMAW), a partir de los conocimientos impartidos en el área de materiales y análisis de falla; con lo que se pretende, determinar, a partir de la micro-estructura, la resistencia al desgaste abrasivo en un acero AISI/SAE 4140 bonificado; cuestionando lo siguiente; ¿Cuáles serán las micro estructuras que definirán las mejores propiedades que favorezcan la resistencia al desgaste abrasivo en un acero AISI/SAE 4140 bonificado?

Finalmente, si al aplicar los recubrimientos duros por medio de la soldadura eléctrica SMAW, usando los electrodos (duro well 450, west hard premium y west hard 65) de la WEST ARCO, sobre un acero base AISI/SAE 4140 bonificado; se buscará la presencia de micro estructuras, carburos precipitados. Además, si los generamos en la deposición de electrodos con alto contenido de cromo, variando el

⁵ MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos Duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD) (2008). [Versión Electrónica]. Revista Metal Actual. No 8, P. 32-37

⁶ PEREZ CEPEDA, Op. Cit., 108 p.

⁷ CORONADO, Jairo, RIVAS, Sandro y GOMEZ, Adolfo. Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña. Medellín, Colombia. UNAL. Revista Dyna, volumen 71, numero 144. 2004. P. 1-8.

⁸ WILCHES, Camilo recuperación por recubrimientos duros para prensas de extrusión de consumibles de soldadura, desgastado por abrasión. Tesis de grado especialización en soldadura. Bogotá. Universidad Libre de Colombia. (2010). 72 p.

número de capas depositadas a una misma temperatura establecida de precalentamiento, se elevará la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo.

En la Sede de la Facultad Tecnológica, contamos con la ayuda de varios equipos, como el microscopio óptico, el durómetro y la máquina de ensayo para medir la abrasión usando un sistema que genera desgaste abrasivo con “Arena seca sobre una rueda de Caucho” fabricada según la norma ASME G65-04, del laboratorio de materiales y ensayos. A nivel externo, se cuenta con acceso al equipo de alta precisión para el análisis micrográfico; el microscopio óptico de barrido electrónico (SEM) de la Universidad Nacional sede Bogotá.

2. ESTADO DEL ARTE

El recubrimiento de metales es normalmente la capa de material, relativamente delgada, que cubre un metal o aleación. Los recubrimientos se aplican para conseguir alguna propiedad superficial que no tiene el material base, influyendo en las propiedades ligadas a la superficie, como la resistencia a la corrosión, reflectividad, color, soldabilidad, resistencia eléctrica por contacto y resistencia a la abrasión⁹. En el mundo, la tribología es la ciencia que se especializa en el estudio del desgaste de los materiales, nace alrededor de 1966 en el seno de la comisión del ministerio de educación y Ciencia de la Gran Bretaña y comenzó a reconocerse como un método potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos, haciéndose común en muchos países para la estimulación de investigaciones en fricción, lubricación y desgaste, convirtiéndose en la cuarta disciplina de más grande desarrollo para la construcción de maquinaria, debido a la presencia de pares de fricción que existen en todo sistema dinámico. La tribología, vista desde el sector educativo universitario, industrial y estatal, se ha convertido en un ítem dentro de las recomendaciones para el desarrollo tecnológico en países como la Gran Bretaña, EEUU, Japón, Alemania y Rusia¹⁰.

En sectores de la industria minera, metalúrgica, petroquímica, de celulosa, agrícola, alimentaria y de transporte; en las que se producen una gran cantidad de pérdidas energéticas por problemas de fricción y desgaste, la ingeniería mecánica ha logrado un gran desarrollo en cuanto al control del desgaste para soportar grandes capacidades de cargas, de mayores velocidades y operaciones a elevadas temperaturas con respecto a la reducción del peso de los componentes de las máquinas, buscando de esta manera aumentar la confiabilidad, la vida útil y el uso efectivo de la energía, economizando el remplazo de sistemas sometidos a desgaste, de materiales provenientes de materia prima que es pobre en algunos de

⁹ PEREZ MOLERA, Sola. Recubrimientos de los Metales. Preparación de las superficies metálicas. Generalidades. Barcelona, España. Marcombo Eds. 1989. P. 11.

¹⁰ MARTÍNEZ PÉREZ, Francisco. La Tribología, Ciencia y Técnica para el mantenimiento. desgaste de sólidos. desgaste abrasivo. México D.F. Ed. Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. 2003. P. 9-11 y P. 86-91.

estos países. Entre las principales tendencias de investigación en tribología realizados en estas naciones y al que se le va a realizar mayor énfasis en esta investigación será el tema del desgaste abrasivo, el cual es un tipo de daño que sufren las superficies deslizantes en contacto debido al desprendimiento de partículas sólidas en el área de rozamiento¹¹.

Existen diferentes maneras de atacar este tipo de desgastes abrasivos, uno de los cuales es el endurecimiento superficial el cual es un proceso cuyo objetivo principal es aumentar la resistencia al desgaste y la fatiga de las piezas metálicas, sin afectar significativamente el material. Los recubrimientos duros son un caso particular, en el que se aplica una capa de pequeño espesor, sobre la superficie de una pieza, con el fin de mejorar las propiedades de dureza ante el desgaste. Una de las técnicas para realizar un recubrimiento duro es por la deposición catódica: PVD (Deposición Física de vapor) o CDV (Deposición química de vapor), utilizando equipos sputtering o magnetón sputtering¹².

De estas dos técnicas empleadas para obtener recubrimientos duros, la que ha tenido mayor auge desde hace más de 20 años, tanto a nivel académico como industrial, es la basada en (PVD), que no afecta las propiedades mecánicas de los materiales por las altas temperaturas como lo hace el método por (CVD). EL (PVD), es utilizado en gran variedad de procesos de manufactura, en países Europeos y norteamericanos, reemplazando los métodos tradicionales, como la técnica por inmersión en caliente. Este método consiste en evaporar un metal puro o aleación por medios físicos, de manera que reaccione y forme un nuevo compuesto para depositarlo sobre la pieza a recubrir. Las técnicas de (PVD), se pueden dividir en aquellas en que la evaporación se inicia por calentamiento o en la técnica en el que el vapor se obtiene por el bombardeo de material sólido a depositar con partículas. EL primero se logra o por efecto del calentamiento por un haz de electrones en crisol que contiene un metal (Ion Plating), o por efecto de un arco eléctrico que se desplaza por un metal, (evaporación por arco) y el segundo se logra mediante un

¹¹ MARTÍNEZ, Op, cit., P. 88

¹² Grupo de investigación del Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales. RDAI. (2009). Extraído el 17/12/2012 del sitio WEB de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. <http://rdai.univalle.edu.co/rdaienespanol.html>.

bombardeo de un haz de iones de gas inerte, argón (Sputtering o pulverización catódica), optimizado por campos magnéticos (magnetron). Los métodos de arco revestido y haz de electrones del (PVD), se emplean en recubrimientos duros para resistir el desgaste¹³.

A continuación se muestran algunas investigaciones llevadas a cabo, respecto a la selección de electrodos y los materiales bases, comportamiento y resultados obtenidos al emplearse recubrimientos duros en algunos materiales a nivel mundial:

Según las investigaciones realizadas por Sanjay, Mondal, y A.K. Jha.¹⁴, en el año 2000, sobre el efecto de la micro-estructura y de la composición química de una aleación sometida a un recubrimiento duro en el comportamiento al desgaste abrasivo, explica, que el recubrimiento duro es una técnica de modificación superficial, que se utiliza para reconstruir la superficie de una pieza de trabajo, además menciona que el éxito económico del proceso depende de la forma en que se selecciona y se aplica el recubrimiento duro por soldadura sobre un material particular, dependiendo de la composición química. Con este factor, en el experimento se utilizaron tres electrodos de temple superficial que tienen composiciones químicas diferentes, se comparó y analizó la respuesta al desgaste abrasivo de estos recubrimientos sobre un acero de bajo carbono con respecto a un acero blando sin recubrimiento. Esto, con el fin, de comprender el efecto de la composición química y la respuesta de la microestructura al desgaste del material con recubrimiento duro respecto al acero blando, en el que se observó que la tasa de desgaste en las aleaciones con recubrimiento duro, que tiene un alto contenido de cromo en la aleación, es menor, respecto al desgaste obtenido sobre un acero blando o de bajo carbono. Deduciendo, que el índice de desgaste mínimo sobre un recubrimiento duro puede ser por obtener una micro-estructura más fina, por la existencia de bainita relativamente gruesa y por la presencia de carburos primarios y secundarios. Además, se denota que el mecanismo de desgaste

¹³ MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos Duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD). [Versión Electrónica]. Revista Metal Actual No 8. 2008. P. 33-37.

¹⁴ SANJAY, D.P. MONDAL, AND A.K. JHA. Effect of Microstructure and Chemical Composition of hardacing alloy on abrasive wear behavior. ASM International. JMEPEG No 9. 2000. P. 649 - 655.

abrasivo está asociado dos factores: al mecanismo de corte y a la acción de arado de las partículas abrasivas, dependiendo de las características de dureza y microestructura del material base; en donde para los aceros al carbono cuya dureza es menor, el arado es mayor, mientras para los aceros recubiertos de mayor dureza, el corte es más evidente.

En cuanto a la selección del proceso de soldadura de recargue en aceros al carbono, los investigadores Balasubramanian, Varahamoorthy, Ramachandran y Muralidharan¹⁵, en el año 2008, hicieron un análisis sobre la base de factores cuantitativos y cualitativos. En este estudio, se habla sobre las técnicas de soldadura de temple superficial como un método de recubrimiento duro, utilizado para alargar la vida útil de los componentes de ingeniería, ya sea mediante la reconstrucción o mediante la fabricación, de manera que se produzca una capa de material compuesto para combatir el desgaste, erosión y corrosión. En este artículo se determinó el mejor proceso de soldadura para un recubrimiento duro en aceros utilizados en calderas en función de factores cuantitativos (por la medición de porcentaje de dilución) y factores cualitativos (utilizando el proceso de jerarquía analítica [AHP]). De manera que se compararon los cinco diferentes procesos de soldadura: La soldadura por arco metálico protegido (SMAW), la soldadura por arco metálico con gas (GMAW), la soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), la soldadura por arco sumergido (SAW) y la soldadura por arco de plasma (PTAW). Entonces, basados en los factores cuantitativos y cualitativos; se encontró que el mejor método de recubrimiento duro por soldadura, en aceros al carbono usados en la fabricación de calderas, es el proceso PTAW, seguido de los procesos GTAW y SMAW respectivamente, por el factor cuantitativo; y seguido por los métodos SMAW y SAW respectivamente, por el factor cualitativo. Aplicándose además, a cualquier otro grado acero al carbono que requiera un proceso de recubrimiento duro.

Existen diferentes tipos de máquinas de ensayo con los que se puede evaluar el desgaste, uno de ellos es el que aplica la norma ASTM G99-04, con el método de

¹⁵ V. BALASUBRAMANIAN, R. VARAHAMOORTHY, C. S. RAMACHANDRAN & C. MURALIDHARAN. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors. Int J Adv Manuf Technol No 40. 2009. P. 887 – 897.

(Pin sobre disco, POD). Los investigadores Martínez, Massetti y Svoboda¹⁶, en el año 2012, realizaron un estudio bajo esta norma, para analizar el efecto de la geometría del pin en el comportamiento al desgaste de la soldadura depositada en un recubrimiento duro. Explicando que el proceso de recubrimiento duro por soldadura es un método muy utilizado para recuperar su funcionalidad sobre graves superficies desgastadas, corroídas u oxidadas, que se producen durante el deslizamiento entre metal y metal o en aplicaciones de contacto como el proceso de laminado, en donde, los principales mecanismos de desgaste son por oxidación, por fatiga bajo la superficie y por adhesión de material. Los materiales base que se seleccionaron para realizar el análisis del desgaste fueron: el acero al carbono con un contenido de 0,2% como el AISI/SAE 1020 y otro con un contenido del 20% de aleación, como el acero martensítico para herramientas H13. Las variables como la velocidad de deslizamiento, la carga o el esfuerzo de contacto, tienen una incidencia importante en la tasa de desgaste, esto se puede observar con las pruebas de desgaste según la Norma ASTM G99-04 que utiliza el método (Pin sobre disco, POD), en el que se analizó el comportamiento tribológico al desgaste por deslizamiento, entre dos piezas de diferente material, el pin y el disco con el recubrimiento duro. El objetivo de esta investigación fue estudiar la influencia de la geometría del Pin (Plano o esférico), en un ensayo POD, en la que se evaluó la resistencia al desgaste de un recubrimiento duro por deposición de soldadura sobre un acero H13, tratado térmicamente, comparado con un acero AISI/SAE 1020, a diferentes cargas y velocidades de deslizamiento. En el que se concluye que existe una influencia de la geometría del Pin con relación a la velocidad de desgaste, ya sean a cargas altas o bajas, no tanto a bajas velocidades (0,47m/s), como a altas velocidades de deslizamiento (2m/s). Con cargas pequeñas (10N), el volumen de material retirado por el Pin (Plano) sobre disco, era mayor. Mientras que con cargas más altas (40N), el Pin (esférico) provocaba mayor desgaste.

¹⁶ M. MARTÍNEZ, A. MASSETTI & H. SVOBODA. Effect of the pin geometry on the wear behavior of welddeposited hardfacing. 11th International Congress on Metallurgy & Materials SAM/CONAMET 2011. Argentina: Laboratorio de Materiales y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Procedia Materials Science 1. 2012. P. 305 – 312.

Kazemipour, Shokrollahi y Sharafi¹⁷. En el año 2010, analizaron la influencia de la micro-estructura de un material base tratado térmicamente, en la resistencia al desgaste abrasivo, luego de aplicarse un recubrimiento duro de Fe-32Cr-4.5Cwt% a la aleación, que se depositó sobre una placa de acero al carbono de A36, mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico (SMAW). Inicialmente se tienen dos materiales base, uno sin tratamiento térmico, presentando en su micro-estructura una matriz ferrítica, y otro con tratamiento térmico de temple, que muestra en su micro-estructura una matriz martensítica. Los resultados de las pruebas de desgaste por el método (Pin sobre Disco), muestran que se obtiene un mejor comportamiento a la resistencia al desgaste en el acero que presenta una matriz martensítica, a razón de un 20% en condiciones de baja carga (5N) y a razón de un 15% en condiciones de alta carga (20N); mientras que el acero con matriz ferrítica muestra una resistencia al desgaste más pobre, menos de la mitad de lo que resiste la matriz martensítica. Según las observaciones, aunque la dureza es mayor en una matriz martensítica que en una ferrítica, la dureza no demuestra un verdadero índice de resistencia al desgaste, puesto que una matriz dura presenta características quebradizas. Los métodos de Micro-labrado, Micro-corte y Micro-fisuras, están reconocidas por las empresas en el estudio del arranque de material, en donde la proporción del mecanismo de micro-labranza aumenta al incrementarse la dureza de la matriz. Se observó también que los carburos primarios actuaron como una barrera para interrumpir el movimiento libre de las partículas abrasivas que se podían introducir entre las superficies en contacto durante la prueba de ensayo de desgaste, con la posibilidad de alterar los resultados, impidiendo la abrasión entre los cuerpos en contacto.

Lakshminarayanan, Balasubramaniam, Varahamoorthy y Babu¹⁸, en el 2008, utilizando la metodología de respuesta superficial, calcularon la dilución por plasma de arco transferido (Stellite) para el recubrimiento duro en un acero al carbono

¹⁷M. KAZEMIPOUR, H. SHOKROLLAHI & SH. SHARAFI. The influence of the matrix Microstructure on abrasive Wear. Resistance of Heat-Treated Fe-32 Cr-4.5C wt% Hardfacing alloy. Springer Science + Business Media, LLC. No 39. 2010. P. 181-192.

¹⁸A. K. LAKSHMINARAYANAN, V. BALASUBRAMANIAM, R. VARAHAMOORTHY & S. BABU. Predicting the dilution Transferred arc Hardfacing of Stellite on carbon Steel using response surface methodology. Department of Manufacturing, Center for Materials Joining & Research (CEMAJOR). Nagar, India. Annamalai University. Metals and Materials international. Vol 14. No 6. 2008. P. 779-789.

AISI/SAE 1040; en donde el control de la dilución es importante en los recubrimientos duros, a fin de mantenerla lo más baja posible, que es lo deseable, debido a las condiciones que debe cumplir el proceso (Stellite). Actualmente, las empresas de fabricación utilizan los procesos de soldadura por arco eléctrico protegido (SMAW), soldadura eléctrica protegida con gas (GMAW), soldadura de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW) y soldaduras por arco sumergido (SAW), para el temple superficial. En estos procesos el porcentaje del nivel de dilución es mayor, entre un 10% y un 30%. En el método de soldadura por plasma de arco transferido (PTA), en un recubrimiento duro, el enlace metalúrgico solidificado entre el depósito y el sustrato se obtiene con un mínimo de dilución de menos del 10%. Lo que lleva a la investigación de este tipo de recubrimiento a través de la metodología de respuesta superficial, para predecir y optimizar el porcentaje de la dilución de una superficie de recubrimiento duro a base de cobalto producido por el proceso (PTA), que con el uso del diseño de experimentos junto con un modelo estadístico, se convierte en un método eficaz para optimizar este proceso. Para llevar a cabo este experimento, se identificaron cinco factores totalmente replicables, que influyen en la dilución del depósito de recubrimiento duro, que son: la corriente del arco transferido, la velocidad de desplazamiento, la tasa de alimentación del polvo, la frecuencia de oscilaciones y la distancia de detención; que, junto con la ayuda de un modelo matemático desarrollado usando la metodología de superficie de respuesta superficial, se optimizará los parámetros del proceso que producen los menores porcentajes de dilución.

A nivel nacional, investigaciones realizadas por Sevilla, Gutiérrez y Toro¹⁹, en el año 2004, pertenecientes al grupo de investigación en tribología y superficies, de la universidad Nacional, con sede en Medellín; determinaron la relación entre la micro-estructura y la resistencia al desgaste de recubrimientos ricos en cromo y tungsteno, aplicando soldadura eléctrica (SMAW) sobre placas de acero ASTM A36, utilizando dos electrodos de bajo cromo, dos de alto cromo, en una y dos capas, y

¹⁹ LEON SEVILLA, Lysis Margarita, GUTIERREZ PINEDA, Juan Carlos & TORO, Alejandro. Relación Microestructura resistencia al desgaste de Recubrimientos duros Ricos en Cromo y Tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW). Dyna, Revista de la facultad de Minas de la UNAL - Medellín. Vol. 71 No 144. 2004. P. 165 - 171.

un electrodo de tungsteno, en una capa. Se evaluó la resistencia al desgaste en una máquina que genera desgaste abrasivo con arena seca sobre una rueda de cacho construida según la Norma ASTM G65-80, usando partículas de sílice como material abrasivo con un índice de finura AFS 50 – 70. Usando la microscopia óptica y el análisis de barrido electrónico para identificar la microestructura, se determinó que la resistencia a la abrasión no está directamente relacionada con la dureza del material pero si con el tipo, tamaño, forma, composición química y distribución de los carburos que se encuentran en la matriz del recubrimiento, obteniéndose los mejores resultados abrasivos en los depósitos con microestructura compuesta por carburos primarios en una matriz eutéctica. También, se concluye que al aplicar una capa de soldadura de recubrimiento, existe bastante dilución de material depositado, que no es homogénea y que reduce la capacidad de resistencia contra el desgaste abrasivo, mientras al aplicar doble capa el desgaste se reduce.

En la Universidad Nacional, con sede en Bogotá, para el área de materiales y procesos, Pérez Cepeda²⁰, en el año 2011, realizó una investigación en la que estudió la influencia de la microestructura en el comportamiento al desgaste abrasivo, evaluado bajo norma ASTM G65, depositando material de soldadura sobre el acero base de baja aleación y bajo carbono AISI/SAE A36, con el objetivo de reconstruir las piezas de maquinaria y recuperar las geometrías perdidas por el desgaste abrasivo, mejorando las aplicaciones de recubrimientos duros y material de relleno para la reconstrucción de “Sprockets” como los dientes endurecidos de elementos de maquinaria en la industria. Para este análisis se tuvieron en cuenta tres factores, el material depositado (Electrodos AWS E11018 M, West Hard 400 Ni, West Crome, West Hard 30 y West Hard 65), las temperaturas de precalentamiento y de sostenimiento, y el número de capas depositado (variando el número de pases), que afectan las características finales de los recubrimientos duros aplicados con soldadura. Con el ensayo de desgaste, se midió la pérdida de peso en relación al volumen en milímetros cúbicos de material removido, con lo

²⁰ PEREZ CEPEDA, Jaime Andrés. Influencia de la Microestructura en el Comportamiento a Desgaste Abrasivo Evaluado bajo Norma ASTM G65 de Depósitos de Soldadura Anti desgaste Aplicados sobre Sustratos de Acero de baja Aleación y bajo Carbono. Bogotá, Colombia. UNAL, Facultad de ingeniería, departamento de Ingeniería mecánica y mecatrónica. 2011. 108 p.

que se determinó la resistencia al desgaste para cada una de las capas depositadas sobre el material base. Ahora, por medio de un análisis estadístico, se identificó la probeta que más se acercó al promedio obtenido del anterior ensayo, se cortó para caracterizarla micro estructuralmente, se tomaron mediciones de micro dureza en las áreas cercanas a la cara desgastada, se analizó la superficie por el método de observación de microscopia por barrido electrónico (SEM), para identificar la composición química, medir el porcentaje de porosidades, la rugosidad superficial y determinar la estructura por difracción de rayos X, sobre la última capa que ha sufrido el desgaste. Como resultado, se descubrió que los recubrimientos obtenidos con los electrodos con alto contenido de cromo, mostraron las mejores propiedades contra el desgaste, como el conseguido por el electrodo West Crome, que no presento deformación plástica y rayado sobre la última capa; seguidos de los recubrimientos aplicados con electrodos con contenidos de manganeso del 15% y los recubrimientos aplicados con electrodos de bajo carbono, con bajas y medias aleaciones, que mostraron unos resultados más pobres frente al desgaste.

A nivel industrial y enfocados a la industria azucarera, Buchanan, Shipway y McCartne²¹, en el año 2007. Analizaron la Micro-estructura y el comportamiento al desgaste abrasivo de recubrimientos duros basados en Fe-Cr-C, aplicados por soldadura de arco eléctrico (SMAW). En donde el recubrimiento es depositado sobre el sustrato de la fundición gris, por medio del proceso SMAW, usando dos electrodos comerciales para recubrimientos duros. La prueba de resistencia al desgaste abrasivo se realizó por el método “Bloque sobre anillo”, que simula el desgaste experimentado en un molino de caña de azúcar, realizando el análisis por medio de técnicas (SEM). Encontrando que la dureza del recubrimiento hiper-eutéctico es mayor al recubrimiento hipo-eutéctico. En los dos casos, se logró una dureza óptima en la primera capa depositada. Las pruebas demostraron que no había diferencia significativa en la resistencia al desgaste del recubrimiento duro a cargas más altas. Se encontraron que los mecanismos de desgaste predominantes fueron por micro arado y micro fisuras.

²¹ BUCHANAN V, SHIPWAY P y MCCARTNEY D. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. Jamaica: School of Engineering University of Technology. Science Direct. Wear No 263. 2007. P. 99 -110.

Gutiérrez, León, Mesa y Toro²², en el año 2004. Realizaron la evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera del Cerrejón. En donde se estudió la resistencia al desgaste abrasivo en dos recubrimientos duros de alto Cr y W, usados como protección en la industria minera. Estos recubrimientos fueron aplicados sobre un acero estructural AISI A36, mediante soldadura eléctrica (SMAW). Se evaluó la resistencia al desgaste con la ayuda de la máquina de ensayo tribológico de arena seca y rueda de caucho con el procedimiento A de la norma ASTM G65, se realizó ensayos de dureza y se analizó la composición con el (SEM). Se concluyó que la dureza no es un parámetro definitivo al momento evaluar la resistencia al desgaste abrasivo de los materiales estudiados en este trabajo, puesto que pequeñas variaciones en la dureza llevaron a cambios muy grandes en pérdidas de masa por abrasión. Además, se encontró que 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, que estimulan la resistencia al desgaste abrasivo.

Para el departamento de mantenimiento de soldaduras de la West Arco Ltda., Wilches, Camilo²³, estudiante de posgrado de la Universidad libre de Bogotá, realizó un estudio sobre el desgaste abrasivo en un distribuidor de pasta para prensas de extrusión, con el fin, de recuperar la pieza usando recubrimientos duros. Inicialmente, determinó el tipo de acero con una muestra del difusor de pasta o “calavera”, por medio de un análisis de la composición química con un espectrómetro de emisión óptica por chispa y tomando su dureza, hallando un acero AISI/SAE 4140 templado y revenido; y luego, realizó la reconstrucción con el material de aporte seleccionado, West Rodé 10 (E11018M), en dos capas, a una temperatura de precalentamiento de 300°C entre pases. Por último, procedió a aplicarle el recubrimiento duro con el electrodo West Hard 70 en dos pases, para elevar la resistencia al desgaste abrasivo a alta presión. El objetivo final era

²²GUTIERREZ, Juan, LEON, Lisy, M.Sc. MESA, Dairo y Dr. PhD. TORO, Alejandro. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicarlos en la industria minera. Scientia et Technica Año X No 25. UTP. ISSN 01222-1701. Agosto, 2004. P. 149-154.

²³ WILCHES, Camilo recuperación por recubrimientos duros para prensas de extrusión de consumibles de soldadura, desgastado por abrasión. Tesis de grado especialización en soldadura. Bogotá. Universidad Libre de Colombia. (2010). 72 p

determinar la relación costo beneficio, teniendo en cuenta el tiempo de vida y el numero de remplazos, entre el cambio de una pieza desgastada por otra nueva o definitivamente optar por reconstruir la pieza por medio del recubrimiento duro, durante un proceso de mantenimiento. Concluyendo, que con la aplicación del recubrimiento duro, la vida útil de la pieza se incrementaba 3.6 veces más, siendo mas económica y funcionalmente viable reconstruir la pieza, que optar en reemplazarla por una nueva.

A nivel local, Malagón y González²⁴, en el año 2012, construyeron y calibraron la máquina de desgaste abrasivo según la Norma G65-04, de chorro de arena seca sobre una rueda de Caucho, para estudiar el comportamiento anti desgaste del acero templado AISI/SAE 4140 frente al acero MAXDUR 450, clasificado como un acero con propiedades resistentes al desgaste abrasivo. Para el análisis, se caracterizó la dureza, micro dureza y la resistencia al impacto, con el objeto de evaluar el comportamiento del tratamiento térmico frente al desgaste. Determinando, que con la relación existente, entre la dureza del material abrasivo, es decir, los granos de arena y los materiales desgastados; el acero templado tuvo mayor desgaste abrasivo, mientras el acero con propiedades anti-desgaste, obtuvo el mejor comportamiento. Además, se realizó un análisis de microscopia por barrido electrónico (SEM), para observar, la presencia de micro agrietamientos, micro fatigas, micro surcos y micro cortes en la superficie desgastada.

²⁴ MALAGÓN, Edward y GONZALEZ, Francisco. Estudio comparativo del comportamiento del acero templado AISI/SAE 4140 y el acero MAXDUR 450. Bogotá, Colombia. UD, Facultad Tecnológica. Grupo de Investigación en Tribología. 2012. 65 p.

3. JUSTIFICACIÓN

El desgaste abrasivo a través de la historia ha sido una de los grandes causas por la cuales la industria metalúrgica, agrícola, minera y manufacturera ha sufrido grandes pérdidas económicas y baja productividad de sus fábricas debido al sobre mantenimiento de la maquinaria, elevando el tiempo reparación.

Debido al poco desarrollo industrial e investigativo en Colombia, de los recubrimientos duros sobre un acero bonificado AISI/SAE 4140; se ha decidido estudiar el comportamiento micro estructural frente al desgaste abrasivo, evaluado con la Norma ASTM G65-04, sobre éste acero, ampliamente utilizado en la industria automotriz, petrolera, en partes de maquinaria y piezas forjadas.

Con este estudio, identificaremos la micro-estructura que favorecerá las propiedades anti-desgaste de los recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica SMAW, con los electrodos (Duroweld 450, West Hard Premium y West Hard 65)²⁵ sobre el acero AISI/SAE 4140 bonificado. Así podremos provocar éstas micro-estructuras en los recubrimientos duros para mejorar su comportamiento ante el desgaste abrasivo y alargar su vida útil, reduciendo los costos en mantenimiento, tiempos de parada y fallas inesperadas, lo que generará, beneficios productivos y económicos en las empresas que quieran implementar esta tecnología.

Actualmente la Universidad Distrital, Facultad Tecnológica, ha comenzado a profundizar en el estudio de dicha área, dentro del grupo de investigación en Tribología, para el cual, se ha decidido realizar éste aporte de investigación tecnológica y ampliar el conocimiento de dicha rama.

²⁵ Catálogo de Soldaduras West Arco - West Rode [Versión electrónica]. Extraído el 14 de enero, 2012 de http://www.westarco.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=63&Itemid=76

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar, a partir de su micro-estructura, la resistencia al desgaste abrasivo de los recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica SMAW en un acero base AISI/SAE 4140 bonificado.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la resistencia al desgaste abrasivo de los recubrimientos duros mediante la prueba ASTM G65-04, de chorro de arena seca sobre rueda de caucho.
- Identificar la micro estructura de los recubrimientos duros (duroweld 450, west hard premium y west hard 65) en aplicaciones de una y dos capas en un acero base AISI/SAE 4140 por medio de soldadura SMAW.
- Relacionar la micro-estructura y dureza de los recubrimientos duros respecto a la resistencia al desgaste abrasivo.
- Analizar la composición, micro-estructura y morfología de la superficie desgastada con el microscopio electrónico de barrido (SEM).

5. MARCO TEORICO

5.1 DESGASTE DE MATERIALES

Este fenómeno, igual que la corrosión y la fatiga, es una de las maneras de degradación de las piezas de elementos mecánicos, definiéndolo como el daño superficial sufrido por los materiales luego de ciertas condiciones de trabajo, en el que existe una remoción de partículas de la superficie de una pieza metálica por acción de las fuerzas de fricción, impacto o corrosión. El resultado del desgaste, es la pérdida de material, la reducción de las dimensiones, tolerancias y ajustes. El problema del desgaste existe en cualquier parte donde haya movimiento y esto ocurre todas las industrias, lo que causa grandes pérdidas debido a las paradas de producción no planificadas, reemplazos repetitivos de partes costosas, costos elevados de mantenimiento no planificado, pérdidas de eficiencia de producción y de ventas por los pobres rendimientos de los productos. Para evitar estos inconvenientes, los diseñadores comenzaron a idear ciertos métodos sencillos como mantener baja la presión de contacto, la velocidad de deslizamiento, lisas las superficies de rodamiento, usar materiales duros, asegurar bajos coeficientes de fricción y usar lubricantes²⁶.

5.1.1 El Desgaste Abrasivo

El tipo de desgaste al que se le va hacer referencia es el desgaste abrasivo, definido por la ASTM como el originado por las particular duras que son forzadas a moverse contra una superficie sólida, lo que envuelve un progresiva pérdida de material debido al movimiento relativo entre la superficie y una sustancia de contacto²⁷, dicho de otra manera, ocurre cuando asperezas de una superficie dura o bien

²⁶ TABUCHI MATSUMOTO, Edgardo. Selección de Recubrimientos Duros Aplicados a Piezas Industriales. Desgaste. Revista del Instituto de investigación de la facultad de Geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica de San Marcos. Vol. 2. No 4. Diciembre, 1999. 3 p.

²⁷ YLCZAK J. Op. Cit., P. 338.

partículas libres duras deslizan sobre una superficie más blanda y produce daño en esta superficie por deformación plástica y fractura.

5.1.2 Tipos De Desgaste Abrasivo

La abrasión se categoriza según el tipo de contacto y el ambiente en el que se produce, ya sea entre dos o tres cuerpos, en un ambiente que puede ser abierto, como el producido por el flujo libre de material cayendo por gravedad sobre una tolva inclinada, o cerrado, como el producido durante el mecanizado de piezas. Dos situaciones de desgaste abrasivo se muestran en la siguiente figura²⁸.

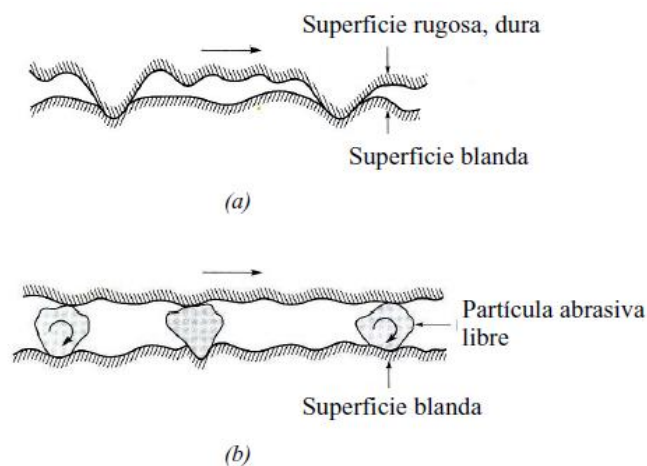


Figura 1. Formas de desgaste abrasivo. a) Una superficie áspera y dura deslizando sobre una superficie más blanda (Dos cuerpos); donde la superficie dura se introduce y elimina material más blando, como lo que sucede en el limado. b) partículas abrasivas libres (tercer cuerpo), atrapadas entre dos superficies deslizantes; donde las partículas duras desgastan el material de una o ambas superficies, alguna de estas más blanda que las partículas. Un ejemplo, lo que sucede en el pulido.

Existen varios mecanismos que tratan de explicar como el material es removido, estos son la fractura, la fatiga y la fusión, pero debido a la complejidad de la abrasión no existe un mecanismo que explique a plenitud toda la pérdida. En la siguiente figura se da una idea de los procesos que son posibles cuando una partícula abrasiva simple atraviesa una superficie²⁹.

²⁸ BOTERO, Maryory Astrid. Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los recubrimientos Duros. Desgaste Abrasivo. España: Departamento de física Aplicada I Óptica de la Universidad de Barcelona. Diciembre, 2005. P. 22-23.

²⁹ TYLCZAK, Op. cit., P. 338

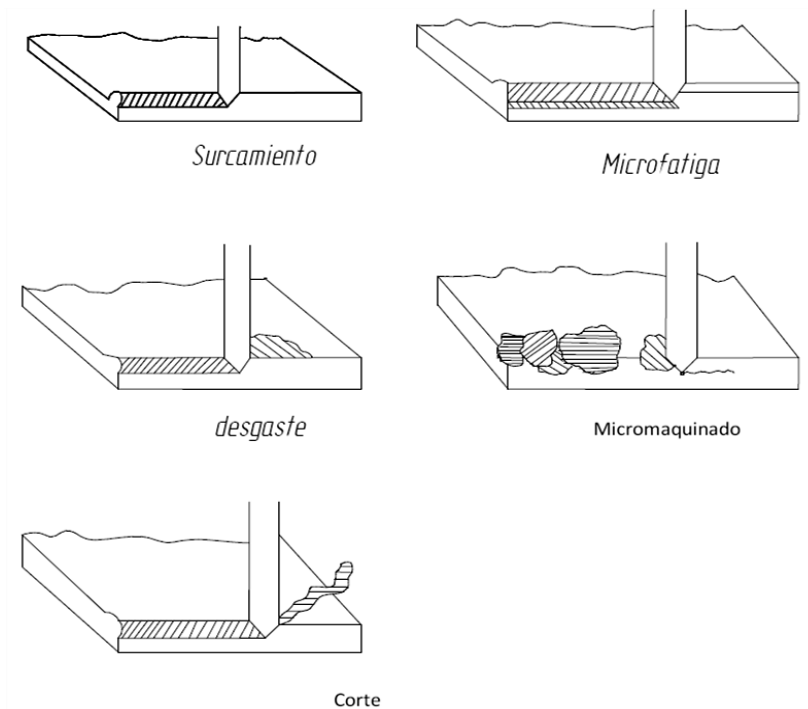


Figura 2. Cinco procesos de desgaste abrasivo.

El surcamiento es el proceso de labrado (Plowing), con el cual se desplaza el material de un surco hacia los lados, el cual ocurre bajo cargas ligeras sin tener una pérdida real de material, provocando un daño cerca a la superficie del material al aumentar las dislocaciones al trabajarse en frío. Al generarse daño por el rayado sobre una superficie trabajada en frío, las pérdidas del trabajo adicional se pueden observar mediante la micrografía.

Una cuña puede formarse en el frente de la abrasión si la razón entre el esfuerzo cortante de la interface relativa de contacto con el esfuerzo cortante aumenta a niveles altos (de 0,5 a 1,0)³⁰.

El corte es la forma más severa de desgaste en materiales dúctiles, puesto que el abrasivo de la punta remueve la viruta, como lo hace una máquina herramienta; removiendo material con poco desplazamiento del material relativo al tamaño de la ranura o labrado. Para una partícula abrasiva fuerte, existe un ángulo crítico que depende del material que está siendo desgastado, en el que pasa de un acanalado a un corte.

³⁰ TYLCZAK, Op. cit., P. 339

5.1.3 Abrasión Controlada Y No Controlada

Durante el proceso de eliminación de material, las superficies pierden masa, cuya tasa puede ser o no controlada. A modo de ejemplo las retroexcavadoras y equipos de remoción de tierra que se usan en las minas operan en un modelo no controlado de abrasión en tres cuerpos, debido a que la tierra y los otros minerales no son más duros que las superficies de acero de los equipos. Esto es debido al proceso de endurecimiento previo de los aceros para herramientas que pasan de tener una dureza absoluta de 200Kg/mm² a 1000 Kg/mm², superando la dureza estándar de la sílice que es de 800 Kg/mm².

El desgaste por abrasión controlado se maneja generalmente en procesos de manufactura, como el rectificado en dos cuerpos, en el cual medios abrasivos como el carburo de silicio, se introduce en la pieza a alta velocidad de desplazamiento, para eliminar material, controlando las dimensiones y los acabados superficiales³¹.

5.1.4 Variables Del Desgaste Abrasivo

Entre las características que se deben tener en cuenta para mejorar la resistencia la desgaste de un material están:

Para el abrasivo, debido a los cambios en la razón de desgaste, se debe estudiar el ángulo de efecto crítico, la dureza (Importante para evaluar el desgaste del material), tenacidad y tamaño del grano. En cuanto al material, para correlacionarlo al desgaste abrasivo, las propiedades que se tendrán en cuenta son: La dureza, el módulo de elasticidad, el límite de fluencia, la temperatura de fusión, estructura cristalina, micro estructura y composición química³².

La dureza se define como la medida de resistencia de un material a la deformación permanente. Las pruebas de dureza son métodos de inspección que se utilizan para conocer las propiedades mecánicas de un material, debido a la relación que

³¹ PEREZ CEPEDA, Op. cit., P. 9

³² TYLCZAK, Op. cit., P. 344

existe entre dureza y otras propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, el límite elástico y la tenacidad, obtenidas con pruebas de tracción, donde los resultados pueden ser paralelos uno del otro, mientras que la prueba de dureza es más simple y se considera como un ensayo no destructivo.

La dureza no se puede considerar como una propiedad fundamental del material, los valores obtenidos no son absolutos y no hay estándares universales de estos, en cambio, la dureza muestra valores cuantitativos en término de deformación producida por un indentador de forma específica, con una carga aplicada, por un tiempo dado. El objetivo del ensayo es determinar si un material o el tratamiento particular al que es sometido son adecuados para un uso específico.

Entre los métodos de indentación estática para medir la dureza encontramos: los Métodos Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop³³.

En estos métodos de indentación estática usualmente se aplican cargas grandes, cuando las cargas aplicadas son superiores a los 10N, las pruebas son referenciadas como pruebas de macro dureza (Rockwell, Brinell), las cuales se utilizan para medir sobre materiales en volumen. Para medir micro dureza (Vickers, Knoop) se aplican cargas inferiores a 10N con las cuales se mide la dureza de recubrimientos o de tratamientos superficiales con un espesor equivalente a varias micras.

Se ha demostrado experimentalmente y teóricamente que la dureza de un material se correlaciona con la tasa de abrasión. Khrushchov³⁴, realizó una gran cantidad de pruebas y encontró una relación inversa entre la tasa de abrasión y la dureza para materiales puros, como se observa en la siguiente gráfica³⁵. Además, realizó ensayos con materiales con diferente dureza, en las que la dureza se relacionó de

³³ BOTERO, Maryory Astrid. Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los recubrimientos Duros. Propiedades mecánicas. Dureza. España: Departamento de física Aplicada I Óptica de la Universidad de Barcelona. Diciembre, 2005. P31-36

³⁴ Ibid. KHRUSHCHOV

³⁵ TYLCZAK, op. cit., P. 341

forma inversamente lineal con respecto al desgaste abrasivo, con una pendiente diferente a la de los materiales duros.

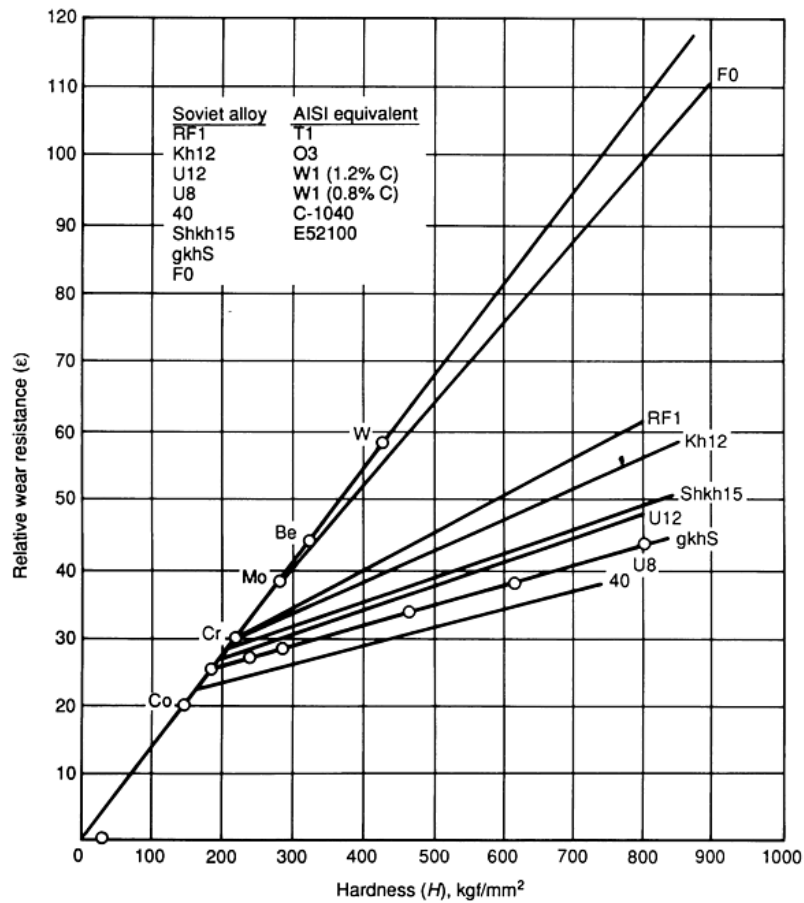


Figura 3. Resistencia al desgaste frente a la dureza de los materiales puros y aleaciones.

En general se cree que la superficie de un material es endurecido hasta un nivel muy alto durante el proceso de abrasión, según la investigaciones de Richardson³⁶, sobre el endurecimiento por arado durante el desgaste en un grupo de materiales duros, en el que también encontró que la resistencia al desgaste del material era proporcional a la superficie desgastada.

En el desgaste abrasivo se ha encontrado una dependencia entre la estructura cristalina y su orientación, según investigaciones de Alison³⁷, muestra que en los metales cúbicos el desgaste es prácticamente el doble del desgaste de los metales que poseen estructura hexagonal, debido a la baja tasa trabajo de endurecimiento de este último.

³⁶ Ibid RICHARDSON

³⁷ Ibid ALISON

La microestructura también es importante, la austenita y la Bainita a igual dureza tienen mayor resistencia a la abrasión que la ferrita, la perlita o la martensita, debido al aumento en la capacidad de endurecimiento por deformación y en la ductilidad de la austenita.

Adicionalmente se ha encontrado que la tenacidad a la fractura (K_{IC}) del material, es importante para determinar el desgaste abrasivo en materiales cerámicos y en menor medida en fundiciones blancas de hierro³⁸.

Las aleaciones se utilizan a menudo para mejorar el rendimiento del material a la resistencia al desgaste, estas adiciones pueden hacer de manera intersticial, mediante la adición de carbono al hierro, o por sustitución. Tylczak, estudio la resistencia a la abrasión de aleaciones de Zr y Ti con pequeñas adiciones intersticiales de N y O, que también disminuyen el desgaste. Durante el proceso de sustitución se demostró que la abrasión de las aleaciones con una completa solubilidad, como el Hf-Zr, Cu-Ni y Cr-V, en la mezcla, la abrasión es proporcional a la cantidad de cada aleación, de la fuerza de la unión y de la red cristalina.

Una manera común de cambiar las propiedades de un material es producir una segunda fase. Los tratamientos que provocan la formación de precipitados pueden resultar en mayores incrementos en la dureza y en límite de fluencia.

Los precipitados de gran tamaño como los carburos, de gran dureza, se pueden utilizar para disminuir el desgaste abrasivo, donde la proporción del tamaño de los granos abrasivos y las partículas duras, en la matriz son variadas³⁹, como se observa en la siguiente figura.

³⁸ TYLCZAK, Op. cit., P. 342

³⁹ TYLCZAK, Op. cit., P. 343

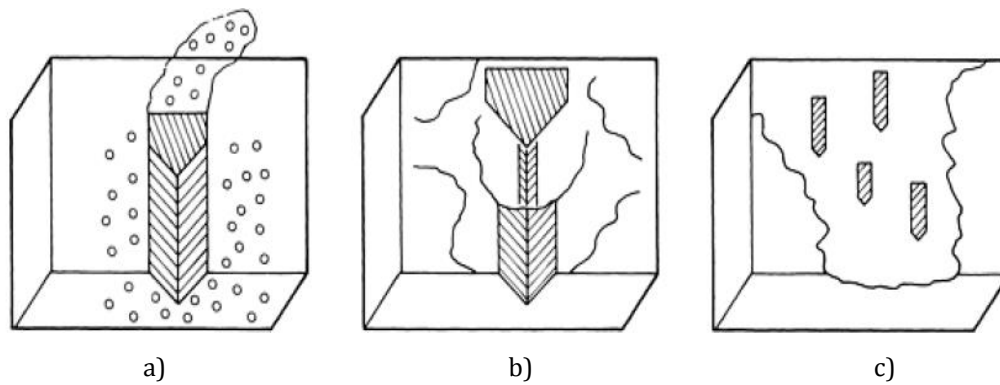


Figura 4. Efecto sobre el desgaste abrasivo cuando el tamaño de la segunda fase es variado, a) Segunda fase pequeña, fácilmente removible, b) segunda fase con un tamaño grande; protector de la matriz, c) segunda fase de tamaño muy grande, forma canales de abrasión pequeños sobre la superficie.

La relación entre el tamaño de la partícula del material y el tamaño del grano abrasivo es importante. Entre más grandes son los granos abrasivos mayor será el labrado de desgaste. Cuando las partículas son pequeñas en relación con los granos abrasivos y el labrado del desgaste, no se obtiene una buena resistencia a la abrasión del material. Si los granos abrasivos son muy pequeños con relación a las partículas duras y los huecos entre las partículas son grandes, entonces los granos abrasivos son capaces de socavar las partículas duras lo que permite que sean desalojadas por el grano abrasivo de gran tamaño. Lo que significa que las partículas que funcionan mejor para la protección contra el desgaste deben ser duras y resistentes.

La forma de la partícula abrasiva es un factor importante puesto que influye en el proceso de contacto, en el tamaño y en la geometría del labrado o ranura crítica. En donde, si la partícula abrasiva y la dureza superficial son constantes, constante será también el área de contacto proyectado, siendo el área de la sección transversal del labrado resultante dependiente de la forma de la partícula⁴⁰.

⁴⁰ PEREZ CEPEDA, Op. cit., P. 13

5.2 LA TRIBOLOGÍA

La tribología se deriva del término griego tribo, el cual se entiende “frotamiento o rozamiento”, interpretándose como “la ciencia del rozamiento”. Los diccionarios definen a la tribología como la ciencia que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas, aplicando el arte operacional a problemas de importancia económica, enfocados a la confiabilidad, al mantenimiento y al desgaste del tipo técnico, en todos los ámbitos de la tecnológica desde la doméstica hasta la aeroespacial⁴¹.

La tribología se enfoca bajo tres fenómenos: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como resultado de este fenómeno y la lubricación como medio de solución para evitar el desgaste. La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes.

5.3 LOS RECUBRIMIENTOS DUROS

Son el producto de la generación de una capa superficial dura y resistente al desgaste sobre metales, por soldadura, que se conoce como revestimiento duro, el cual es relativamente fácil de aplicar, requiriendo solo las aleaciones de revestimiento duro en la forma de varillas de soldar y una llama de arco eléctrico. Entre las ventajas de este proceso está el hecho de que puede aplicarse a aéreas sujetas a desgaste, como también están disponibles compuestos duros y resistentes al desgaste, proporcionando el uso efectivo de aleaciones de alto costo con una gran protección.

Los revestimientos duros pueden aplicarse a la mayoría de los metales ferrosos, con pocas excepciones. Los aceros al carbono son relativamente fáciles de revestir en forma dura, sobre todo para aquellos que tiene menos del 0,35% de carbono, puesto que la soldadura se hace mucho más difícil al aumentar el contenido de carbono teniendo que calentarlos antes y después del revestimiento.

⁴¹ M. en I. DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ. Tribología: Fricción, desgaste y Lubricación. Lecturas de Ingeniería 2. México: Laboratorio de Tecnología de Materiales del Departamento de Ingeniería de la UNAM. 2007. P3.

El recubrimiento duro se utiliza más extensamente donde la lubricación sistemática para reducir la abrasión es imposible, como en herramientas para perforación de pozos petroleros, equipos de agricultura y movimiento de tierra, para minería, válvulas de motores, equipos de procesamiento químico y de refinería. Con este proceso se logra la prolongación de la vida útil de las piezas lubricadas, como troqueles para trabajo de metales y áreas de maquinaria con gran rapidez de desastre. Las superficies revestidas en forma dura suelen ser más resistentes al calor y a la corrosión que las superficies externas endurecidas por deposición o difusión o endurecidas por flama. EL revestimiento duro sirve para incrementar la eficacia de operación, disminuyendo el costo de reemplazo y la pérdida de tiempo de producción permitiendo emplear un metal base de bajo costo para piezas que se desgastan o corroen⁴².

5.4 ESTRUCTURA Y MICROESTRUCTURA DE LOS METALES

Se puede identificar la caracterización de la estructura a escala atómica en los materiales, en donde la geometría del cristal es común. Se identifican los siete sistemas cristalinos y los 14 retículos de los cristales. Cada una de los miles de estructuras de cristales encontrados en los materiales naturales y artificiales, clasificados entre estos pocos sistemas y retículos, dentro de una estructura dada. Encontrado que la mayoría de las estructuras corresponden a uno relativamente simple. Las estructuras cristalinas más comunes en los metales son: la cubica centrada en el cuerpo (BCC), la cubica centrada en la cara (FCC) y la hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP)⁴³. Una fase es una proporción química y estructuralmente homogénea de la microestructura. El componente es una de las sustancias químicas con las cuales está formada la fase. La microestructura depende de la composición química y del comportamiento dentro del diagrama de fases, dependiendo del proceso de solidificación. Las microestructuras más comunes en los aceros son: la ferrita, la perlita, la cementita, la bainita y la martensita.

⁴² AVNER, Sidney. Introducción a la metalurgia. Desgaste de los metales. Segunda Edición. McGraw Gill. Capítulo 14. 1995. P. 573-574.

⁴³ SKAKELFORD, James. Ciencia de materiales para ingenieros. Prentice Hall. 1992. P. 87 y P. 201-220.

6. METODOLOGÍA

Fase 1. Recolección de información.

En el inicio de la investigación se desarrollara la recolección de información a nivel mundial, regional y local, clasificando y sistematizando la información de artículos, libros, normas, fichas técnicas de equipos, materiales y proyectos de grados relacionados.

Fase 2. Diseño del experimento.

Se definirán los factores y variables, que afectarán las características finales de los recubrimientos duros.

Tabla 1. Factores y variables del diseño de experimentos.

Factores	Variables
Temperatura de precalentamiento	150 °C ^B
Material depositado Electrodos ^A	Duroweld 450
	West Hard Premium
	West Hard 65
Numero de capas	1
	2

^A Electrodo fabricados por la WEST ARCO.

^B Esta temperatura se ha escogido, debido a que en los estudios de PEREZ CEPEDA sobre la influencia de la micro estructura en el comportamiento al desgaste abrasivo, en cuanto a la temperatura de precalentamiento, para poder aplicar el recubrimiento y luego someter a desgaste; de las tres que propuso: A T. Ambiente, 150°C y 350°C, es a 150°C que respondía, en promedio, a un mejor comportamiento frente al desgaste.

Fase 3 Realización de pruebas al desgaste

De acuerdo al número mínimo de pruebas obtenidas por el cálculo del diseño de experimentos, se aplicarán los recubrimientos duros en una y dos capas, usando el proceso SMAW de soldadura por arco eléctrico, Sobre el acero AISI/SAE 4140 bonificado, precalentando el material base a 150°C.

Se realizarán las pruebas finales de desgaste en las probetas preparadas y sobre los resultados del desgaste, se hará un análisis estadístico que seleccionará las muestras más representativas para el estudio.

Las pruebas se realizarán en la máquina de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65-00, del método de chorro de arena seca sobre rueda de caucho, con los siguientes parámetros de prueba:

Tabla 2. Selección del tipo de ensayo de desgaste según la Norma ASTM G65 -00

Procedimiento específico	Fuerza aplicada sobre el espécimen N (Lb) ^c	Revoluciones de la rueda RPM	Distancia Lineal de Abrasión por la rueda. m (ft)
A	130 (30)	6000	4309 (14138)

^cTolerancia $\pm 3\%$.

Fase 4. Caracterización micro estructural y morfológica

Se realizará la caracterización micro-estructural de los especímenes desgastados, a través del análisis metalográfico, micrográfico, de dureza, micro-dureza y composición (SEM) de los recubrimientos duros, con la ayuda del microscopio óptico y durómetro que posee la universidad Distrital, Facultad Tecnológica y del Microscopio de barrido electrónico SEM, que posee la Universidad Nacional.

Fase 5. Análisis de resultados

Se tomarán los resultados obtenidos en las pruebas de dureza y se comparará la pérdida de material con el número de capas, luego de ello, se seleccionarán las que resultaron con menor desgaste y se identificarán las micro-estructuras presentes en las superficies de estas muestras, para determinar las que mejor favorezcan la resistencia al desgaste abrasivo; además, se relacionará con la micro-dureza obtenida.

Fase 6. Elaboración del documento final y las conclusiones

Corresponde a las actividades de construcción del documento de tesis de grado para optar al título de ingeniero mecánico acompañado con los anexos que soportaran dicha investigación.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Id	FASES DEL PROYECTO	DURACION		Semestre 2, 2013						Semestre 1, 2014					
		SEMANAS	MESES	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
1	Recolección de información	40	10	[-----]											
2	Diseño de experimento	4	1	[-----]											
3	Realización pruebas de desgaste	12	3	[-----]											
4	Caracterización microestructural y morfológica	12	3	[-----]											
5	Análisis de resultados	12	3	[-----]											
6	Elaboración documento final	8	2	[-----]											

Fecha de Inicio:	03/06/2013
Fecha de Finalización:	03/06/2014

8. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Duración estimada del Proyecto		Semanas	Meses	
		48	12	
RECURSO HUMANO				
Descripción		horas/ Semana	Costo Total	Fuente de financiación
1	Tutor del proyecto	1h	\$1.000.000	Universidad
2	Autores del Proyecto	15h	\$10.000.000	Personal
3	Laboratoristas talleres de Metalografía, Mecanizado y soldadura	12h	\$3.000.000	Universidad
RECURSO TÉCNICO INTERNO				
Descripción		Costo de Utilización		Fuente de financiación
Equipo de apoyo Laboratorio de Metalografía	Durómetro	\$2.000.000		Universidad
	Microscopio Óptico	\$2.000.000		
	Máquina de Ensayo de desgaste ASTM Norma G65-00	\$1.000.000		
Equipo de apoyo Laboratorio de Mecanizado	Torno	\$500.000		Universidad
	Esmeril	\$500.000		
	Rectificadora	\$500.000		
Equipo de apoyo Laboratorio de soldadura	Equipo de soldadura por electrodo revestido SMAW	\$1.000.000		Universidad
1	Servicio de fotocopiado e impresión Universidad	\$100.000		Personal

RECURSO TÉCNICO EXTERNO				
Descripción		horas/ semana	Costo de Utilización	Fuente de financiación
Centro de aplicaciones en soldadura del Instituto WEST ARCO		20h	\$1.000.000	Personal
Servicio de Microcopia por barrido Electrónico SEM del laboratorio (CEIF). Universidad Nacional de Bogotá		5h	\$1.000.000	Personal
2	Computadores Portátiles		\$1.000.000	Personal
2	Servicios de fotocopiado e impresión		\$200.000	Personal
MATERIA PRIMA				
Descripción		Cantidad	Costo Total	Fuente de financiación
Electrodos Recubrimientos duros WEST ARCO 4.0 mm(5/32")	Duroweld 450	10 kg.	\$300.000	Personal
	West hard premium	10 Kg.	\$180.000	
	West hard 65	10 kg.	\$80.000	
Acero base comercial	AISI/SAE 4140	20" x 15" x 1/2"	\$800.000	Personal
Arena prueba desgaste	Granulometria AFS (50-70)	20 Kg.	\$75.000	personal
GASTOS DE TRANSPORTE				
Investigación y Ensayos Universidad Distrital			\$600.000	Personal
Pruebas SEM Universidad Nacional			\$50.000	
Compra electrodos West arco			\$50.000	
Compra del Acero base			\$100.000	
Cortes y procesos			\$200.000	
Otros			\$200.000	

COSTO PERSONAL DEL PROYECTO	\$15.935.000
------------------------------------	---------------------

BIBLIOGRAFIA

- MARTÍNEZ PÉREZ, Francisco. La Tribología, Ciencia y Técnica para el mantenimiento. desgaste de sólidos. desgaste abrasivo. México D.F. Ed. Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. 2003. P. 9-11 y P. 86-91.
- YLCZAK J. Abrasive Wear. ASM Handbook, Friction, Lubrications & wear Technology. V. 18. 1992. P. 337.
- MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos Duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD). [Versión Electrónica]. Revista Metal Actual No 8. 2008. P. 32-37.
- PEREZ CEPEDA, Jaime Andrés. Influencia de la Microestructura en el Comportamiento a Desgaste Abrasivo Evaluado bajo Norma ASTM G65 de Depósitos de Soldadura Anti desgaste Aplicados sobre Sustratos de Acero de baja Aleación y bajo Carbono [Abstract]. Bogotá, Colombia. UNAL, Facultad de ingeniería, departamento de Ingeniería mecánica y mecatrónica. 2011. 108 p.
- CORONADO, Jairo, RIVAS, Sandro y GOMEZ, Adolfo. Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña. Medellín, Colombia. UNAL. Revista Dyna, volumen 71, numero 144. 2004. P. 1-8.
- WILCHES, Camilo. Recuperación por recubrimientos duros para prensas de extrusión de consumibles de soldadura, desgastado por abrasión. Tesis de grado especialización en soldadura. Bogotá. Universidad Libre de Colombia. 2010. 72 p.
- PEREZ MOLERA, Sola. Recubrimientos de los Metales. Preparación de las superficies metálicas. Generalidades. Barcelona, España. Marcombo Eds. 1989. P11.
- MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos Duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD). [Versión Electrónica]. Revista Metal Actual No 8. 2008. P. 33-37.
- Grupo de investigación del Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales. RDAI. Cali, Colombia. 2009. Extraído el 17/12/2012 de la WEB <http://rdai.univalle.edu.co/rdaienespanol.html>.
- SANJAY, D.P. MONDAL, and A.K. JHA. Effect of Microstructure and Chemical Composition of hardacing alloy on abrasive wear behavior. ASM Internacional. JMEPEG No 9. 2000. P. 649-655.

- V. BALASUBRAMANIAN, R. VARAHAMOORTHY, C. S. RAMACHANDRAN & C. MURALIDHARAN. Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors. *Int J Adv Manuf Technol*. No 40. 2009. P. 887 – 897.
- M. MARTÍNEZ, A. MASSETTI & H. SVOBODA. Effect of the pin geometry on the wear behavior of welddeposited hardfacing. 11th International Congress on Metallurgy & Materials SAM/CONAMET 2011. Argentina: Laboratorio de Materiales y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. *Procedia Materials Science* 1. 2012. P. 305-312.
- M. KAZEMIPOUR, H. SHOKROLLAHI & SH. SHARAFI. The influence of the matrix Microstructure on abrasive Wear. Resistance of Heat-Treated Fe-32 Cr-4.5C wt% Hardfacing alloy. Springer Science + Business Media, LLC. No 39. 2010. P. 181-192.
- A. K. LAKSHMINARAYANAN, V. BALASUBRAMANIAM, R. VARAHAMOORTHY & S. BABU. Predicting the dilution Transferred arc Hardfacing of Sellite on carbón Steel using response surface methodology. Departament of Manufacturing, Center for Materials Joing & Research (CEMAJOR). Nagar, India. *Annamalai University. Metals and Materials international*. Vol 14. No 6. 2008. P. 779-789.
- LEON SEVILLA, Lysis Margarita, GUTIERREZ PINEDA, Juan Carlos & TORO, Alejandro. Relación Microestructura resistencia al desgaste de Recubrimientos duros Ricos en Cromo y Tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW). *Dyna, Revista de la facultad de Minas de la UNAL - Medellín*. Vol. 71 No 144. 2004. P. 165- 171.
- BUCHANAN V, SHIPWAY P y MCCARTNEY, D. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. Jamaica: School of Engineering University of Technology. *Science Direct Wear* No 263. 2007. P. 99 – 110.
- GUTIERREZ, Juan, LEON, Lysis, M.Sc. MESA, Dairo y Dr. Phd. TORO, Alejandro. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicarlos en la industria minera. *Scientia et Technica* Año X No 25. UTP. ISSN 01222-1701. Agosto, 2004. P. 149-154.
- Catálogo de Soldaduras West Arco - West Rode [Versión electrónica]. Extraído el 14/01/2012 de la WEB http://www.westarco.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=63&Itemid=76
- MALAGÓN, Edward y GONZALEZ, Francisco. Estudio comparativo del comportamiento del acero templado AISI/SAE 4140 y el acero MAXDUR 450. Bogotá, Colombia. UD, Facultad Tecnológica. Grupo de investigación en tribología. 2012. 65 p.

- TABUCHI MATSUMOTO, Edgardo. Selección de Recubrimientos Duros Aplicados a Piezas Industriales. Desgaste. Revista del Instituto de investigación de la facultad de Geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica de San Marcos. Vol. 2. No 4. Diciembre, 1999. 3 p.
- BOTERO, Maryory Astrid. Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los recubrimientos Duros. España: Departamento de física Aplicada I Óptica de la Universidad de Barcelona. Diciembre, 2005. P. 22-23 y P. 31-36.
- M. en I. DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ. Tribología: Fricción, desgaste y Lubricación. Lecturas de Ingeniería 2. México: Laboratorio de Tecnología de Materiales del Departamento de Ingeniería de la UNAM. 2007. p3.
- AVNER, Sidney. Introducción a la metalurgia. Desgaste de los metales. Segunda Edición. McGraw Gill. Capítulo 14. 1995. P. 573-574.
- SKAKELFORD, James. Ciencia de materiales para ingenieros. Prentice Hall. 1992. P. 87 y P. 201-220.

ANEXOS

1. Norma ASTM G65 - 04
2. Ficha técnica del acero comercial AISI/SAE 4140 bonificado
3. Fichas técnicas de los electrodos especiales, Duroweld 450, West Hard Premium y West Hard 65, proporcionados por la West Rode de la West Arco Ltda.