

**ENSAYOS DE DUREZA, RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN Y
ADHESIÓN DESPUÉS DE APLICAR UN PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO
PARA UN ACERO AISI 1045 CON RECUBRIMIENTOS DE UNA MEZCLA DE
CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO, DE TAMAÑO
NANOMÉTRICO.**

JOSÉ JULIÁN PARADA VILLAMIZAR

RAUL ELIECER SANABRIA NIETO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2015

**ENSAYOS DE DUREZA, RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN Y
ADHESIÓN DESPUÉS DE APLICAR UN PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO
PARA UN ACERO AISI 1045 CON RECUBRIMIENTOS DE UNA MEZCLA DE
CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO, DE TAMAÑO
NANOMÉTRICO.**

**JOSÉ JULIÁN PARADA VILLAMIZAR
RAUL ELIECER SANABRIA NIETO**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR:
ALFONSO SANTOS JAIMES
Ingeniero mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, noviembre de 2015

DEDICATORIA

A **DIOS** por darme la fortaleza para seguir adelante, por iluminarme y guiarme por el buen camino, cuidándome de todo peligro, permitiéndome estar en la Universidad Pontificia Bolivariana para así superarme cada día para emprender un nuevo camino hacia el éxito.

A mi madre **Maritza Nieto** por la confianza y el apoyo incondicional en todo mi proceso de formación, por cuidar de mí y velar por mi bienestar y educación, teniendo esa voz de ánimo para continuar y mirar con positivismo todas las adversidades, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar de mi ni un solo momento.

A mi padre **Luis Enrique Sanabria** por ese gran apoyo económico, por estar pendiente de lo que necesito, en los obstáculos siempre estuvo al lado mío brindándome consejos para siempre seguir adelante.

A mis **hermanos** les agradezco por sus consejos y motivación para la culminación de esta carrera profesional, por su tiempo compartido y por el impulsar el desarrollo de mi formación profesional, este gran logro ha sido posible gracias a ustedes.

A **Alfonso Santos Jaimes** por brindarme la confianza y apoyo siendo un gran soporte en todo momento, por sacar parte de su tiempo para verificar, corregir y guiar hacia nuestras metas y velar por hacer las cosas por el camino correcto.

Raúl Eliecer Sanabria Nieto

DEDICATORIA

A **Dios** gracias por permitirme culminar una etapa importante en mi vida teniéndome de su mano con protección y misericordia. Gracias a ti Señor por darnos la salud y la provisión a mi familia; todas las oportunidades que nos brindas, especialmente todas aquellas que fueron base fundamental para mi desarrollo a pesar de los contratiempos y dificultades que en su momento surgieron.

A mis padres **José María Parada Duarte** y **Carmen Smith Villamizar González** por su incansable apoyo que me han brindado hasta el día de hoy. Dedicarles este triunfo a ellos por su incondicional y siempre oportuno amor, es una meta más en mi desarrollo profesional que redarguye en el interior de cada uno. Agradecerles por las lecciones que han enseñado permitiéndome mayor progreso en mi búsqueda de un mejor carácter.

A mi hermana **Maira Alejandra Parada Villamizar** gracias por el amparo que me convida cada día, por el interés de verme cada vez mejor y su inigualable forma de quererme hasta rabiarse.

Agradecer a **Dary Alexandra Suárez Solano** por creer en mí, soportarme y declarar una vida llena de superación.

A mi gran amigo **Alfonso Sarmiento Molina**, agradecerle y dedicarle este logro conseguido que en muchas ocasiones me ofreció su ayuda y colaboración.

José Julián Parada Villamizar

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Alfonso Santos y Víctor Cuéllar por guiarnos en nuestro proceso de formación, por la disposición y el empeño que tuvieron para el desarrollo de los ensayos, por las explicaciones y correcciones que nos permitieron ir mejorando poco a poco. Agradecer al plantel educativo por sus instalaciones ya que sin ellas el desarrollo de nuestro proyecto se hubiera hecho más difícil, por el centro de mecanizado y el apoyo de Ludwig que tuvo la disposición para apoyarnos en lo que necesitábamos y por los compañeros que estuvieron compartiendo durante el transcurso de nuestros estudios

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. CARBURO DE TUNGSTENO	22
3.2. DIÓXIDO DE TITANIO	23
3.3. CASTOLIN EUTECTIC 13495	24
3.4. ACERO AISI 1045	25
3.5. NORMA ASTM G99-05	26
3.6. NORMA ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010).....	27
3.7. ROCIADO TÉRMICO	28
3.8. DUREZA.....	30
3.8.1. Dureza Rockwell	31
3.9. DESGASTE	31
3.9.1. Desgaste abrasivo.....	32
3.9.2. Desgaste adhesivo.....	32

3.10. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	33
4. METODOLOGÍA	35
4.1. EQUIPOS	35
4.1.1. Durómetro hartip 1500	35
4.1.2. Balanza analítica sartorius BP 211D	36
4.1.3. Tribómetro pin on disk.....	37
4.1.4. Máquina de desgaste por abrasión	37
4.1.5. Soplete de proyección térmica a llama.....	38
4.2. MATERIAL DE TRABAJO	39
4.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS	40
4.4. RECUBRIMIENTO FORMADO POR CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO EN PORCENTAJES DETERMINADOS.....	42
4.5. SUMINISTRO DE RECUBRIMIENTO EN PROBETAS RECTANGULARES Y REDONDAS.....	42
4.6. DESARROLLO DE ENSAYOS.....	43
4.6.1. Ensayo de dureza	44
4.6.2. Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo.....	45
4.6.3. Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo	47
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
5.1. VERIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y MORFOLÓGICAS DE CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO	50
5.2. DEFINICIÓN DE NÚMEROS DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA ADQUIRIR DATOS ESTADÍSTICOS CONFIABLES	56

5.3. RESULTADO DE PRUEBAS DE DUREZA.....	57
5.4. RESULTADOS DE PRUEBAS DE RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO	62
5.5. RESULTADOS DE PRUEBAS DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO.....	67
6. CONCLUSIONES	72
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades y características carburo de tungsteno.	23
Tabla 2. Propiedades y características dióxido de titanio.	24
Tabla 3. Propiedades de polvo Castolin.	25
Tabla 4. Condiciones para pruebas de desgaste adhesivo	45
Tabla 5. Condiciones a tener en cuenta para las pruebas de desgaste abrasivo. .	47
Tabla 6. Tamaño de partículas para carburo de tungsteno	52
Tabla 7. Tamaño de partículas para dióxido de titanio	53
Tabla 8. Porcentajes en peso y número atómico de carburo de tungsteno	54
Tabla 9. Porcentaje en peso y número atómico de dióxido de titanio	55
Tabla 10. Calculo de número de ensayos de dureza.....	58
Tabla 11. Ensayo de dureza de probetas redondas normalizadas	59
Tabla 12. Ensayo de dureza de probetas redondas templado-revenido.....	59
Tabla 13. Ensayo de dureza de probetas redondas con recubrimiento	59
Tabla 14. Ensayo de dureza de probetas rectangulares normalizadas	60
Tabla 15. Ensayo de dureza de probetas rectangulares templado-revenido	60
Tabla 16. Ensayo de dureza de probetas rectangulares con recubrimiento.	60
Tabla 17. Calculo de número de ensayos de resistencia al desgaste adhesivo	63
Tabla 18. Pérdida de material probetas normalizadas.....	63
Tabla 19. Pérdida de material probetas templado-revenido	64
Tabla 20. Pérdida de material probetas con recubrimiento.....	64
Tabla 21. Cálculo de número de ensayos de desgaste abrasivo.....	68

Tabla 22. Pérdida de material de probetas normalizadas.....	68
Tabla 23. Pérdida de material de probetas templado-revenido	69
Tabla 24. Pérdida de material de probetas con recubrimiento.....	69

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Carburo de tungsteno.	22
Figura 2. Dióxido de titanio.	23
Figura 3. Ejemplo condiciones para ensayos Tribómetro Pin on Disk.	26
Figura 4. Proceso de rociado térmico en frío.	30
Figura 5. (a) Abrasión por dos cuerpos (b) Abrasión de tres cuerpos.	32
Figura 6. Características desgaste adhesivo.	33
Figura 7. Dispositivo medidor de dureza.	35
Figura 8. Balanza Sartorius BP 211D usada para pesaje de probetas.	36
Figura 9. Representación básica de la composición del tribómetro.	37
Figura 10. Máquina para ensayo de desgaste abrasivo.	38
Figura 11. Dispositivo de proyección.	39
Figura 12. Diseño probeta rectangular (medidas en milímetros).	40
Figura 13. Diseño probeta redonda (medidas en milímetros).	41
Figura 14. Mecanizado de probetas.	41
Figura 15. Suministro de material de recubrimiento sobre probeta redonda.	43
Figura 16. Prueba de ensayo de dureza.	44
Figura 17. Máquina Pin on Disk. (UPB)	46
Figura 18. Huellas sobre probeta por ensayo de desgaste adhesivo.	46
Figura 19. Máquina para desgaste abrasivo.	48
Figura 20. Huella sobre probetas por ensayo de desgaste abrasivo.	49

Figura 21. Imágenes de partículas de carburo de tungsteno, obtenidas mediante SEM.....50

Figura 22. Imágenes de partículas de dióxido de titanio, obtenidas mediante SEM.
.....51

Figura 23. Irregularidades en la superficie de la probeta.61

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Gráfico de análisis EDS Carburo de Tungsteno	53
Gráfico 2. Gráfico de análisis EDS Dióxido de titanio	55
Gráfico 3. Resultados ensayos de dureza	58
Gráfico 4. Pérdida de volumen de material promedio por unidad de distancia lineal recorrida.....	62
Gráfico 5. Resultado de pruebas de resistencia al desgaste adhesivo.....	65
Gráfico 6. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste adhesivo (250m).....	66
Gráfico 7. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste adhesivo (750m y 1000m).	66
Gráfico 8. Pérdida de volumen de material promedio por unidad de distancia lineal recorrida.....	67
Gráfico 9. Resultado de pruebas de resistencia al desgaste abrasivo.....	70
Gráfico 10. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste abrasivo.	71

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ENSAYOS DE DUREZA, RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN Y ADHESIÓN DESPUÉS DE APLICAR UN PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO PARA UN ACERO AISI 1045 CON RECUBRIMIENTOS DE UNA MEZCLA DE CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO, DE TAMAÑO NANOMÉTRICO.

AUTOR(ES): José Julián Parada Villamizar
Raúl Eliecer Sanabria Nieto

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Alfonso Santos Jaimes

RESUMEN

Existen materiales con la capacidad de mejorar propiedades físicas y químicas, con esto, se aplicó la combinación de elementos capaces de mejorar la dureza, resistencia al desgaste por abrasión y adhesión de un material, al acero AISI 1045. La combinación de material para recubrimiento térmico fue Carburo de Tungsteno (WC) y Dióxido de Titanio (TiO₂) tamaño nanométrico. El Carburo de Tungsteno es uno de los materiales con mayor dureza actualmente en la industria, este material puede resistir altas presiones, temperaturas elevadas y la manifestación de fricción. Por otra parte, el dióxido de titanio es un material que tiene importancia por poseer propiedades de dispersión, estabilidad química y por no ser tóxico, que a su vez, su estructura octaédrica es de gran producción industrial usados para la obtención de materiales cerámicos. Para el desarrollo de ensayos se usó acero AISI 1045, como referencia se tuvo las probetas normalizadas. Para ensayos de dureza se logró obtener un mejoramiento de 31,84 % con tratamiento temple-revenido; sin embargo las probetas recubiertas de WC-15 wt. % TiO₂ de tamaño nanométrico experimentó una reducción de 39,06 %. Los ensayos de desgaste adhesivo, el promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida, demostró que con tratamiento temple-revenido se reduce 75,82 % el material perdido en volumen, así mismo con aplicación de recubrimiento WC - 15 wt. % TiO₂ de tamaño nanométrico hubo una disminución de 91,21 % de material perdido en volumen. Los ensayos de desgaste abrasivo, el promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida, presentó que el acero expuesto a tratamiento temple-revenido mostró aumento de 79,85 % de material perdido en volumen, por otro lado las de tipo con recubrimiento WC - 15 wt. % TiO₂ de tamaño nanométrico se redujo 55,74 % de material perdido en volumen.

PALABRAS CLAVES:

Carburo de tungsteno, dióxido de titanio

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: TESTING HARDNESS, RESISTANCE TO ABRASION AND ADHERENCE AFTER APPLYING THERMAL SPRAY PROCESS FOR AISI 1045 STEEL WITH COATINGS OF A MIXTURE OF TUNGSTEN CARBIDE AND TITANIUM DIOXIDE, NANO-SIZED.

AUTHOR(S): José Julián Parada Villamizar
Raúl Eliecer Sanabria Nieto

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

There are materials with the ability to improve physical and chemical properties, with this combination of elements able to improve hardness, abrasion resistance and adhesion of a material was applied to steel AISI 1045. The combination of material for thermal coating It was tungsten carbide (WC) and titanium dioxide (TiO₂) nanoscale. The tungsten carbide is one of the materials with higher hardness in the industry today, this material can withstand high pressures, high temperatures and friction manifestation. Moreover, titanium dioxide is a material which is important for having scattering properties, chemical stability and not be toxic, which in turn, the octahedral structure of great industrial production is used for producing ceramic materials. For assay development AISI 1045 steel was used as the reference standard samples were reported. For testing the hardness was able to obtain an improvement of 31.84% with treatment quenching-tempering; however the specimens coated WC-15 wt. % TiO₂ nanometer size was reduced by 39.06%. The average loss of material per unit of linear distance traveled adhesive wear tests, showed that treatment with 75,82% hardening-tempering reduces the volume lost material and same coating application WC - 15 wt. % Nano-sized TiO₂ was a decrease of 91.21% of the material lost in volume. The average loss of material per unit of linear distance traveled abrasive wear tests, provided that the steel subjected to quenching-tempering treatment showed increased material lost 79.85% in volume, on the other hand the type with WC coating - 15 wt. % TiO₂ nano-sized material lost 55.74% in volume was reduced.

KEYWORDS:

Tungsten carbide, titanium dioxide

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Muchas herramientas desde su aparición han aportado desarrollo en la construcción de la industria que se disfruta hoy en día, debido a esto grandes máquinas y artefactos mantienen el ritmo de la innovación.

El proceso de rociado térmico en frío es una de las tantas aplicaciones que en la industria se emplean para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales, donde uno de ellos es el acero al carbono, que permite la fabricación de una amplia gama de elementos manifestando un cumplimiento eficaz en operación, pero al estar sometido en diferentes condiciones está expuesto a la aparición de corrosión y baja resistencia al desgaste. El rociado térmico en frío es un proceso en el cual el material de revestimiento WC - 15 wt. % TiO₂ de tamaño nanométrico finamente dividido es depositado de forma semi-fundida sobre acero AISI 1045 para producir un depósito termo-rociado de buena adherencia. Este depósito proporciona una capa resistente a los diferentes fenómenos de desgaste produciendo una mayor vida útil y eficiencia de trabajo.

El material de aporte que se utilizó en el proyecto se adquirió específicamente de tamaño nanométrico, dado que en anteriores investigaciones se ha deducido que al ser reducido el tamaño del material va a ser mayor la adherencia y propiedades mecánicas. Se requiere un estudio morfológico con un equipo de microscopía electrónica de barrido, incorporado a un sistema de microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X para ratificar las cualidades del recubrimiento.

Los ensayos de desgaste adhesivo y abrasivo se efectuaron bajo normas ASTM G65-04 (Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus), y la ASTM G99-05 (Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus). Los equipos para efectuar los ensayos se encuentran ubicados en el taller de procesos de fabricación y mecanizado de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.

La metodología fue, adquirir el material de aporte, carburo de tungsteno y dióxido de titanio de tamaño nanométrico, estudio morfológico, fabricación de probetas de acero AISI 1045, realización de tratamiento térmico templado-revenido, sandblasting a probetas próximas a recubrir con WC - 15 wt. % TiO_2 de tamaño nanométrico y por última instancia los ensayos de dureza y desgaste adhesivo y abrasivo.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento de recubrimientos de WC - 15 wt. % TiO_2 de tamaño nanométrico, a través de ensayos ASTM de dureza y resistencia al desgaste, depositados sobre un acero AISI 1045.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar química y morfológicamente los materiales utilizados para los recubrimientos, a través de microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de dispersión de rayos x.

Resultado: Histograma de los tamaños de partícula de los materiales utilizados en los recubrimientos y determinación teórica de la composición química de cada material.

Indicador: Se utilizará el equipo de microscopia electrónica de barrido FE Schottky de alta resolución, disponible en la UPB seccional Bucaramanga.

- Realizar los recubrimientos de la mezcla de WC - 15 wt. % TiO_2 , sobre un acero AISI 1045 a través del proceso de rociado térmico en frío.

Resultado: Recubrimientos adheridos al sustrato

Indicador: Se utilizaran los parámetros de proceso encontrados en la revisión bibliográfica para depósitos realizados a través de rociado térmico por llama.

- Determinar el número de ensayos requeridos para obtener resultados validos de las propiedades de dureza y resistencia al desgaste, mediante el uso de ecuaciones de estadísticas básicas.

Resultado: Número de ensayos requeridos para cada una de las propiedades mecánicas obtenidas.

Indicador: Los resultados permitirán obtener una confiabilidad del 95% y un error máximo del 10%.

- Determinar la variación de la dureza y resistencia al desgaste en aceros AISI 1045, cuando se encuentra Normalizado, templado – Revenido y recubierto con una mezcla de WC - 15 wt. % TIO_2 de tamaño nanométrico, a través de la realización de ensayos mecánicos

Resultado: Gráficos de dureza, resistencia al desgaste adhesivo y resistencia al desgaste abrasivo.

Indicador: Los ensayos se realizarán siguiendo las normas ASTM G99-05 y G65-04.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la problemática del desgaste en los diferentes elementos de máquinas, se pretende realizar un proyecto de grado encaminado a la búsqueda de soluciones, donde se busca aplicar un proceso de rociado térmico en frío, en la cual va ver una mezcla de diferentes materiales con el fin de recubrir un acero AISI 1045. La información obtenida después de las diferentes pruebas o ensayos realizados, servirá de aporte a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, para fortalecer la línea de investigación en ciencia de los materiales. Con los resultados obtenidos se podrá saber si es conveniente invertir en materiales para el recubrimiento en este caso del acero y así prolongar su vida útil o económicamente es mejor el cambio de la pieza.

3. MARCO TEÓRICO

Los materiales que se seleccionaron para llevar a cabo el recubrimiento como capa resistente en la investigación de los fenómenos de desgaste presentes en piezas mecánicas fabricadas en acero AISI 1045, son carburo de tungsteno y dióxido de titanio.

3.1. CARBURO DE TUNGSTENO

El carburo de tungsteno (WC) se considera que es un excelente material cerámico debido a su combinación única de propiedades, alto módulo de Young, alto punto de fusión, alta densidad, y una excelente resistencia a la abrasión y corrosión. WC nano-estructurado ha tomado más atención desde algunas décadas debido a su solicitud en herramientas y resistencia al desgaste de elementos de corte. También exhibe alta tenacidad a la fractura, que es útil para las aplicaciones mecánicas y tribológicas.¹

Figura 1. Carburo de tungsteno.



Fuente: http://www.plansee.com/media/images/Tungsten_powder.png

¹ CHEN, Wei-Hsio. NAYAK, Pramoda K. Lin, Hao-Tung. CHANG, Man-Ping. HUANG, Jow-Lay. Synthesis of nanostructured tungsten carbide via metal-organic chemical vapor deposition and carburization process. En: International Journal of Refractory Metals and Hard Materials [on-line]. Noviembre 2014. Volumen 47, p. 44-48. Disponible en: <www.sciencedirect.com>

Tabla 1. Propiedades y características carburo de tungsteno.

Propiedades Carburo de tungsteno (WC)	
Densidad	15,7 g/cm ³
Punto de fusión	2.870 °C
Estructura cristalina	Hexagonal
Coefficiente de expansión térmica	5.2 · 10 ⁻⁶ [1/K]
Módulo de elasticidad	550 GPa
Resistividad eléctrica	22 μcm

Fuente: Autores del proyecto. Información recopilada: ASM HANDBOOK. Vol 7. Powder metal technologies and applications. p.195 y International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. p.44.

3.2. DIÓXIDO DE TITANIO

Se presenta en la naturaleza en varias formas: rutilo (estructura tetragonal), anatasa (estructura tetragonal) y brookita (estructura ortorrómbica). El dióxido de titanio rutilo y el dióxido de titanio anatasa se producen industrialmente en grandes cantidades y se utilizan como pigmentos y catalizadores en la producción de materiales cerámicos.²

Figura 2. Dióxido de titanio.



Fuente: http://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/images/titanium-dioxide_LG.png

² ROSALES, José A. Materiales para fotocatalisis y electro-fotocatalisis. Monografía de pregrado en ingeniería química. Poza Rica: Universidad Veracruzana, 2010, p. 29.

Alrededor del 70% de dióxido de titanio producido en el mundo se destina para productos comerciales como pigmento en pinturas para exteriores, de igual forma pigmento para esmaltes, plásticos, papel, fibras, alimentos, productos farmacéuticos, cosméticos y cremas dentales.³

Tabla 2. Propiedades y características dióxido de titanio.

Propiedades Dióxido de Titanio (TiO₂)	
Densidad	4,17 g/cm ³
Punto de fusión	1.830 °C
Punto de ebullición	2.972 °C
Estructura cristalina	Rutilo
Coefficiente de expansión térmica	8-10 · 10 ⁻⁶ [1/K]
Conductividad térmica	2,5-5,0 [W/(m·K)]
Número de Vickers	980[KgF/mm ²]

Fuente: Autores del proyecto. Información recopilada: ASM HANDBOOK. Vol 7. Powder metal technologies and applications. p.451 y <http://www.goodfellow.com/S/Dioxido-de-Titanio.html>

3.3. CASTOLIN EUTECTIC 13495 ⁴

Es un polvo de aleación de níquel de alto rendimiento para obtener revestimientos duraderos a la abrasión y la fricción, su modo de aplicación es bajo el proceso de proyección térmica.

³ KINSINGER, N. TANTUCCIO, A. SUN, M. YAN, Y. KISAILUS, D. Photocatalytic titanium dioxide composite. En: Journal of Nanoscience and Nanotechnology. Agosto, 2011. Volumen 11, Número 8, p. 7015 – 7021 (7). ISSN: 1533-4899.

⁴ Castolin Corporation. Castolin Eutectic. [En línea] 03 de Julio de 2013. www.castolin.com.

Tabla 3. Propiedades de polvo Castolin.

Propiedades Castolin Eutectic 13495	
Rango de fusión (Sólido)	1760 °F
Rango de fusión (Líquido)	2000 °F
Horno de fusión	2170 ° F (punto de ajuste)
Polvo de cobertura	0.042 libras / ft2 @ 0,001"
Coeficiente de flujo de caudal	18 segundos
Densidad	4 g / cc

Fuente: www.castolin.com

3.4. ACERO AISI 1045 ⁵

Es un acero de grado de ingeniería de aplicación que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad. Se utiliza frecuentemente para elementos endurecidos a llama y puede ser usado en condiciones de suministro: laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido o en agua y revenido). El punto crítico se puede conocer como la temperatura a la que el acero cambia la austenita y se empieza a formar la fase cristalina de martensita, esa temperatura está entre 840 °C y 870 °C. El punto de fusión esta alrededor de 1250 °C y 1350 °C.

Presenta una densidad 7.87 g/cm³

Propiedades mecánicas del acero AISI 1045:

- Esfuerzo máximo 565 MPa.
- Elongación 12%.
- Módulo de elasticidad 200 GPa

⁵ General de aceros SA. SAE 1020 y SAE 1045 Aceros de ingeniería al carbono. Marzo, 2007.

- Maquinabilidad 57%.
- Conductividad térmica 52 W/(m°C).

3.5. NORMA ASTM G99-05 ⁶

ASTM G99-05 es un método estándar aprobado para la obtención de datos válidos y creyentes de pruebas de desgaste adhesivo en máquinas de tipo pin on disk, en ella muestra los parámetros de diseño para la construcción de máquina además de la metodología para realizar los ensayos. En los ensayos se deben garantizar condiciones fundamentales tales como una velocidad de giro de la probeta o disco constante, un pin en posición vertical estático que debe estar en contacto con la probeta de forma perpendicular y puesta en una distancia o radio específica; también es importante garantizar la carga aplicada la cual ejerce el pin sobre la probeta sometida a desgaste adhesivo. Esta norma emplea fórmulas para la obtención de datos como es el volumen perdido de la probeta y otras como el radio a colocar el pin, tiempo en el cual se va a someter la prueba y las veces posibles de rayado del disco.

Figura 3. Ejemplo condiciones para ensayos Tribómetro Pin on Disk.

CONDICIONES DE LA PRUEBA			
CARGA APLICADA [N]			
VELOCIDAD ANGULAR [RPM]			
DISTANCIA RECORRIDA [M]			
NÚMERO DE GIROS			
DIAMETRO DE CONTACTO [M]			
TEMPERATURA DE TRABAJO [°C]			

Fuente: Norma ASTM G99-05

⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. *Standard test method for wear testing with a Pin-on-Disk apparatus (ASTMG99-05)*. United States : s.n., 2010.

3.6. NORMA ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010)⁷

Este método de ensayo cubre los procedimientos de laboratorio para la determinación de la resistencia de los elementos metálicos al desgaste por abrasión por medio del ensayo de arena seca y rueda de caucho. La idea del ensayo es producir suficientes datos con el fin de determinar un rango de resistencia para un conjunto de condiciones específicas.

- Los resultados de este ensayo se informan como la pérdida de volumen en milímetros cúbicos con el fin de lograr una uniformidad. Este ensayo tiene cinco procedimientos recomendados para grados específicos de resistencia al desgaste por abrasión.
- Una prueba relativamente severa situando materiales metálicos a gran escala de la pérdida de volumen bajo la resistencia a la abrasión extrema. Útil en materiales de rango medio a la abrasión extrema.

Una prueba a corto plazo de abrasión, utilizado para materiales altamente abrasivos.

- Una variación en la carga siendo más ligera y es útil en materiales con recubrimientos delgados.
- Una variación más ligera que el primer procedimiento y es útil en materiales de baja resistencia a la abrasión.
- Es una variación a corto plazo del segundo procedimiento y es útil para la clasificación de materiales con mediano o bajo nivel de resistencia a la abrasión.

En estas normas no se tienen en cuenta condiciones de seguridad, se supone que el usuario debe tomar todas las medidas preventivas para el desarrollo de estas pruebas. La gravedad del desgaste abrasivo dependerá del tamaño de la partícula abrasiva, la forma, la tensión expuesta y la frecuencia de contacto de la partícula.

⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus*. United States : s.n., 2010.

El valor de la práctica radica en la predicción de la clasificación de los materiales en un orden relativo a como ocurriría en un ambiente abrasivo, estos datos de pruebas obtenidos pueden ser comparados con materiales que trabajan a un ambiente abrasivo. Todos los elementos que influyen en estas pruebas son de vital importancia para asegurar la uniformidad de los resultados de las pruebas, entre ellos son el caucho de la rueda, el tipo e abrasivo, la forma, la abertura de la boquilla, el brazo donde se aplica la fuerza. Para el desarrollo de estas pruebas el espécimen debe tener una forma rectangular de 25 por 75 mm y 3.2 a 12.7mm de espesor, estas medidas pueden variar un poco de acuerdo con las necesidades del usuario. En el caso de los depósitos se aplican sobre el plano de las caras y se recomiendan bases de doble soldadura para evitar la disolución de la soldadura por el metal base, para desarrollar una cicatriz de desgaste adecuada, la superficie debe rasparse como terreno plano para producir una superficie lisa y plana por lo menos de 63.4 mm de largo y 19.1 mm de ancho.

3.7. ROCIADO TÉRMICO

El rociado térmico es un proceso para añadir a un metal capas del mismo material o de metales diferentes. La combinación resultante puede tener mejores propiedades físicas, químicas o costos más económicos que los de un metal o aleación uniforme.⁸

Varias técnicas han sido probadas hasta el día de hoy, uno de ellos es el uso de biomateriales. Los metales, polímeros, cerámicos y compuestos cuya aplicación haya sido comprobada con evaluaciones clínicas pueden complementarse con esta técnica de proyección y alcanzar su performance con la misma.⁹

⁸ PAGNOLA, MARCELO. *Recubrimiento por thermal spray*. Buenos Aires, Argentina : s.n., 2006.

⁹ SUN, L. Material Fundamentals and Clinical Performance of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings: a review. *J Biomed Mater Res*, Vol 58, 2001. p.92.

El sistema que se emplea para rociado térmico usa dos categorías distintas como fuente de calor que son arco eléctrico y gases oxi-combustibles. El sistema que usa arco eléctrico está compuesto por plasma transferido, plasma no transferido y sistema Arc spray. En la utilización de fuente oxi-combustible se puede definir, combustión por llama o HVOF (High Velocity Oxyfuel), que es un proceso de aspersión de alta velocidad.

En el sistema de calentamiento por arco plasma es usado en: plasma de arco no transferido y arco de plasma transferido. En este sistema los materiales son usados en forma de polvo, las partículas son fundidas por las altas temperaturas del arco plasma sobre la superficie con temperatura reducida. En los sistemas plasma son usados gases y mezclas especiales de acuerdo a la aplicación del aporte. En el sistema arco eléctrico son aplicados materiales fundidos en forma de spray provenientes de dos alambres sólidos o tubulares, el proceso utiliza corriente continua que alimenta a los alambres siendo el material fundido, atomizados y proyectados sobre la superficie de impacto de la pieza.

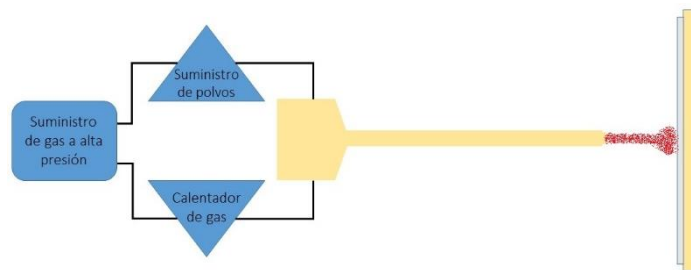
Cuando se utiliza como fuente de calor una mezcla oxi-combustible como oxígeno y acetileno, se dividen en tres sistemas: flame spray, thermo spray y HVOF.

En el sistema flame spray se tiene la alimentación continua de un alambre sólido que se funde al pasar por la llama siendo proyectado en dirección de la pieza con la ayuda de un aire comprimido adicional.

En el sistema thermo spray son usados solamente los gases oxi-combustibles y los materiales a ser depositados están en polvo que son calentados al pasar por la llama y proyectados sobre la superficie a revestir. Estos sistemas son cada vez más utilizados para aplicaciones en mantenimiento y reparación.

El sistema HVOF utiliza oxígeno y acetileno en alta presión generando alta energía en la cámara de combustible, la aleación en polvo es arrastrada a alta velocidad hasta la superficie de la pieza.¹⁰

Figura 4. Proceso de rociado térmico en frío.



Fuente: Autores del proyecto.

La deformación de las partículas durante el impacto, sobre la capa de recubrimiento, hace que se generen esfuerzos de compresión elevados.

Con base en estudios de la Universidad Nacional, la industria colombiana aún no ha adoptado la proyección térmica como método para atacar los problemas de corrosión y desgaste. La recuperación y mantenimiento se sigue manteniendo a través de procesos de proyección catódica y el uso de pinturas de alto desempeño.¹¹

3.8. DUREZA¹²

Se define la dureza de un material como su resistencia a la indentación permanente. Una buena dureza significa generalmente que el material es resistente al rayado y al desgaste. La resistencia a estos parámetros es una característica importante para

¹⁰ METCO / PERKIN, Elmer. Diamond Jet System and Gun Manual, 1989.

¹¹ MARÍN VILLAR, Camilo. Thermal Spray: Protección de alto impacto. En: Metal Actua [En línea]. Mayo, 2008. Ed 8. Disponible en: www.metalactual.com/revista/8/tratamiento_thermal_spray.pdf

¹² GROOVER, Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. 1997. 1a. Ed, p. 57.

muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la mayoría de las herramientas que se emplean en manufactura.

3.8.1. Dureza Rockwell¹³

Éste ensayo es usado ampliamente, lleva el nombre del metalurgista que lo desarrolló en la década de los veinte. Su uso es muy conveniente y las diversas mejoras que ha tenido a través de los años lo ha hecho adaptable a una variedad de materiales. En el ensayo de dureza Rockwell se presiona contra el espécimen un indentador en forma de cono, o una pequeña esfera (1/6 o 1/8 pulg de diámetro), usando una carga menor de 10 Kg para asentar el indentador en el material, después se aplica una carga mayor de 150 Kg (u otro valor) para que el indentador penetre en el espécimen una cierta distancia más allá de su posición inicial. La máquina de ensayo convierte esta distancia de penetración adicional en una lectura Rockwell de dureza.

3.9. DESGASTE¹⁴

Un efecto de la fricción es el desgaste. El desgaste implica la remoción gradual de material de una superficie. Hay numerosos ejemplos de desgaste en los procesos de manufactura, la mayoría de los cuales son indeseables: el desgaste de las herramientas en el maquinado de metales (brocas, por ejemplo), el desgaste de los datos en las diferentes operaciones de formato de metales, la erosión de los moldes en fundición y el desgaste general de la maquinaria de producción.

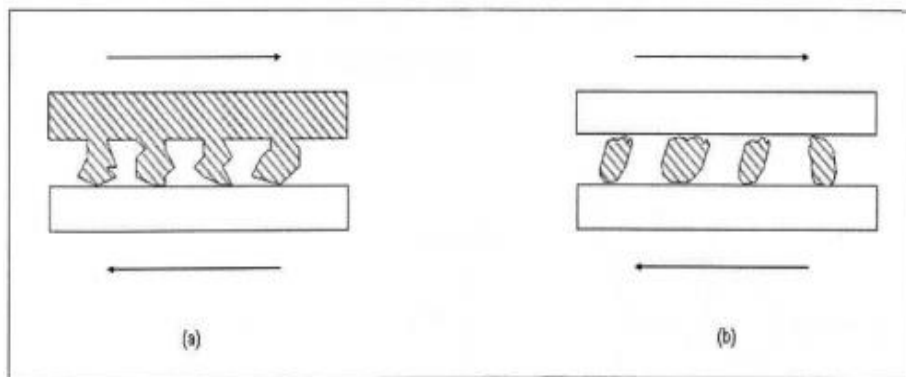
¹³ GROOVER, Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. 1997. 1a. Ed, p. 57-58.

¹⁴ GROOVER, Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. 1997. 1a. Ed, p. 102.

3.9.1. Desgaste abrasivo

La abrasión es un desgaste causado por la acción de numerosas asperezas duras de una superficie que choca sobre otra. Las asperezas pueden resultar de la irregularidad y rugosidad general de la superficie más dura, o porque el material tiene empotrado en él partículas duras que sobresalen en la superficie. En cualquier caso, la acción abrasiva implica el rayado y el desgaste de la segunda superficie para formar y remover partículas de desgaste, resultando una progresiva pérdida de material. Este tipo de desgaste produce marcas de rayado longitudinal en la dirección del movimiento relativo.¹⁵

Figura 5. (a) Abrasión por dos cuerpos (b) Abrasión de tres cuerpos.



Fuente: Tribología, fricción, desgaste y lubricación. UNAM. Felipe del castillo.

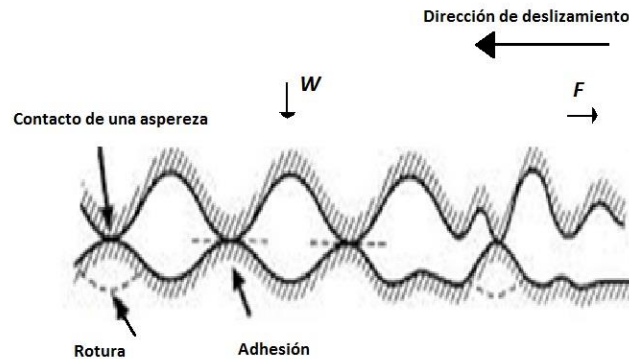
3.9.2. Desgaste adhesivo

Ésta es una manifestación de la teoría de la adhesión en fricción. Conforme las dos superficies se deslizan una sobre otra y ocurre la unión de las asperezas, el movimiento continuo de las superficies requiere el rompimiento de las juntas enlazadas. Cada vez que se rompe un enlace se remueve una pequeña partícula (llamada partícula de desgaste) de una de las superficies. Que la partícula de

¹⁵ GROOVER, Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. 1997. 1a. Ed, p. 103.

desgaste provenga de una u otra superficie depende de las resistencias relativas involucradas. El material más débil es la fuente de la mayoría de las partículas de desgaste, aunque la acción de desgaste ocurre en ambas superficies.¹⁶

Figura 6. Características desgaste adhesivo.



Fuente: Óliver Luengo L. Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP.

3.10. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV.

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La variación morfológica de la muestra entrega diversas señales (electrones secundarios, electrones retro-dispersados, emisión de rayos X, etc.) que son recogidas por distintos detectores;

¹⁶ GROOVER, Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. 1997. 1a. Ed, p. 103.

los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.¹⁷

¹⁷. The Material Information Society. Materials Characterization. ASM International. Volumen 10A. p. 490-491.

4. METODOLOGÍA

Primero se va nombrar los equipos utilizados durante la realización del proyecto, después los materiales de trabajo, luego como se fabricaron las probetas y su diseño, posteriormente suministro y recubrimiento en probetas rectangulares y redondas formado por WC y TiO_2 y por último el desarrollo de ensayos.

4.1. EQUIPOS

Para el desarrollo de las prueba se utilizaron diferentes equipos de trabajo, los cuales se usaron principalmente el durómetro hartip 1500, balanza analítica sartorius BP 211D, tribómetro pin-on-disk, máquina de desgaste por abrasión soplete de proyección térmica a llama.

4.1.1. Durómetro hartip 1500¹⁸

Dispositivo utilizado para la obtención de dureza que gozan los diferentes materiales a pesar de sus múltiples tamaños y tipos, en las escalas principales de dureza (HB, HV, HR). Este dispositivo brinda la oportunidad de operar en cuales sea el área de ubicación y superficie del elemento ensayado.

Figura 7. Dispositivo medidor de dureza.



Fuente: www.bulutmak.net

¹⁸ BMS Bulut Makina Sanayi Ve Ticaret Ltd. Bulut Makina. [En línea] [Citado el: 27 de Agosto de 2015.] www.bulutmak.com.

4.1.2. Balanza analítica sartorius BP 211D

Es una balanza de manipulación sencilla y precisa en la interpretación de unidades para elementos estudiados. Su rango de pesaje escalonado con precisión es de 0 gramos a 210 gramos. Además, posee un software de conteo, porcentual, densidad total-neto, estructura de protección en vidrio y salida de datos para conexión de PC o impresora.

- Capacidad: 210 g.
- Linealidad: (0.03)/0.1/0.2 mg.
- Clase de calibración Peso: E2
- Calibración: Integrada accionada por motor.

Figura 8. Balanza Sartorius BP 211D usada para pesaje de probetas.

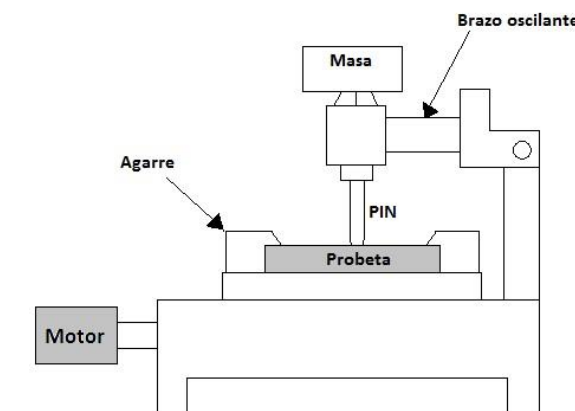


Fuente: Autores del proyecto.

4.1.3. Tribómetro pin on disk

La máquina tipo pin on disk, es un equipo que realiza estudios de desgaste adhesivo de materiales que consiste en un disco giratorio base donde su fuente de movimiento es un motor a revoluciones determinadas, sobre él se sitúa la probeta a ensayar mediante acoples asegurados por un sistema de mordazas y en esta se puede cargar un elemento tipo punzón, bola o superficie plana por medio de una estructura ajustable a la distancia de operación y masa que modifica la fuerza de contacto.

Figura 9. Representación básica de la composición del tribómetro.



Fuente: Autores del proyecto.

4.1.4. Máquina de desgaste por abrasión

La máquina para ensayo abrasivo está construida bajo la orientación de la norma ASTM G65-04. El componente abrasivo usado para este tipo de ensayos es arena tamizada y previamente examinada para que en su contenido no haya otros elementos que afecten los resultados de estos. La máquina está integrada por una tolva donde se deposita el material abrasivo y de ahí canaliza hacia una boquilla con dimensiones especificadas en la norma que aplicarán dicho material en medio

de la probeta ensayada y el tambor que gira a velocidad determinada proveniente de un motor de 1 hp eléctrico de tres fases. Además, cuenta con un variador de frecuencia que modifica la velocidad de trabajo del motor y por consiguiente la velocidad de giro del tambor.

Figura 10. Máquina para ensayo de desgaste abrasivo.



Fuente: Autores del proyecto.

4.1.5. Soplete de proyección térmica a llama

Su función es a base de hidrocarburos. Funciona con recipientes para polvo integrado y con oxígeno. En ocasiones si se desea hacer uso de mayor cantidad de polvo, se debe disponer de aparatos externos para transportarlo con aire comprimido purificado. Este instrumento tiene un consumo de gas que podría alcanzar varios kilogramos por hora. Para su óptimo funcionamiento tener en cuenta que el gas combustible se debe calibrar enfocado en la velocidad de aplicación del

material a recubrir, debido a que la presión de trabajo del acetileno oscila entre 1,5 bar y 2,5 bar.

Figura 11. Dispositivo de proyección



Fuente: Autores del proyecto.

4.2. MATERIAL DE TRABAJO

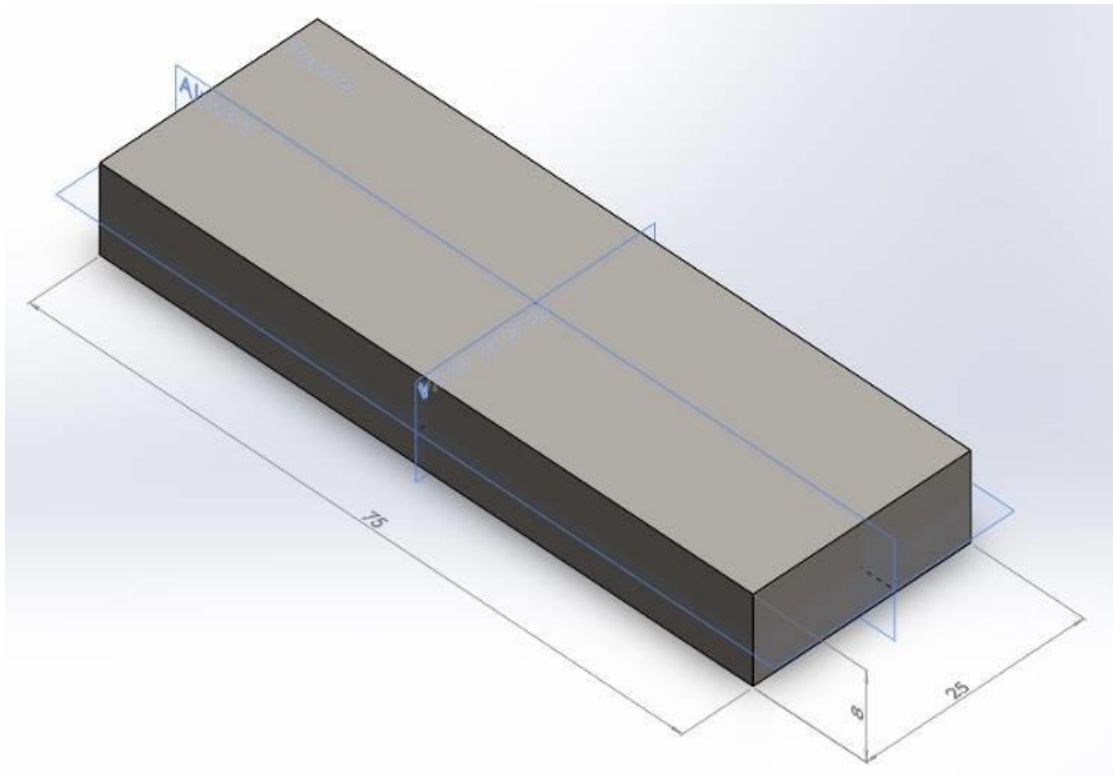
Los materiales a trabajar, Carburo de tungsteno y dióxido de titanio, fueron obtenidos por medio de mKNANO (División of M K Impex Corp.), esta empresa se encuentra en Mississauga (en el área de Toronto, Canadá) y se dedica a productos y aplicación de nanotecnología. El carburo de tungsteno posee un 99,95% de pureza y un tamaño de grano de 60nm; el dióxido de titanio posee un 98% de pureza y un tamaño de grano 60nm.

El material base fue el acero AISI 1045, este fue adquirido por la Compañía general de aceros S.A, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Su actividad consagra la comercialización e industrialización de aceros especiales de la más alta calidad.

4.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS

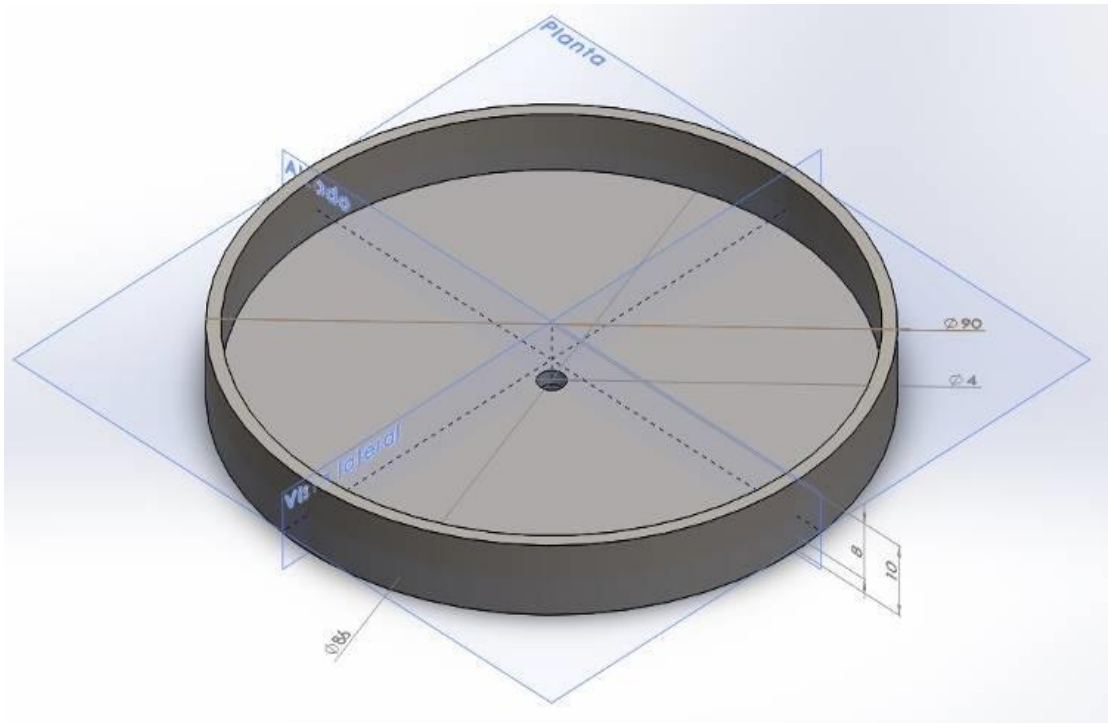
La fabricación de las probetas se emplea con acero AISI 1045. Como normativa de la sociedad americana para pruebas y materiales, las dimensiones de las probetas rectangulares (figura 11) y redondas (figura 12) se referencian según el modelo para este tipo de ensayos, a su vez los procesos de maquinado que se someten los elementos antes de estudios destructivos, y así ir diseñando el perfil del recubrimiento a utilizar posteriormente.

Figura 12. Diseño probeta rectangular (medidas en milímetros).



Fuente: Autores del proyecto. Software SolidWorks 2015.

Figura 13. Diseño probeta redonda (medidas en milímetros).



Fuente: Autores del proyecto. Software Solidworks 2015.

Figura 14. Mecanizado de probetas.



Fuente: Autores del proyecto.

El proceso de preparación de la superficie de las probetas luego de su maquinado se acata bajo la norma NACE No.1 /SSPC-SP5, indicando que la superficie debe verse libre aceite, grasa, polvo, óxido, capa de laminación, restos de pintura sin ninguna irregularidad. El acabado presenta un color gris uniforme donde podría presentar variaciones según el tipo de abrasivo usado.¹⁹

4.4. RECUBRIMIENTO FORMADO POR CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO EN PORCENTAJES DETERMINADOS

Con los materiales WC y TiO₂, la actividad siguiente consistió en la distribución de los porcentajes en peso de éstos para la mezcla cuantificada de polvo que se colocará en el recipiente integrado del soplete de proyección a llama.

La nueva concentración establece: 85% WC + 15% TiO₂.

4.5. SUMINISTRO DE RECUBRIMIENTO EN PROBETAS RECTANGULARES Y REDONDAS

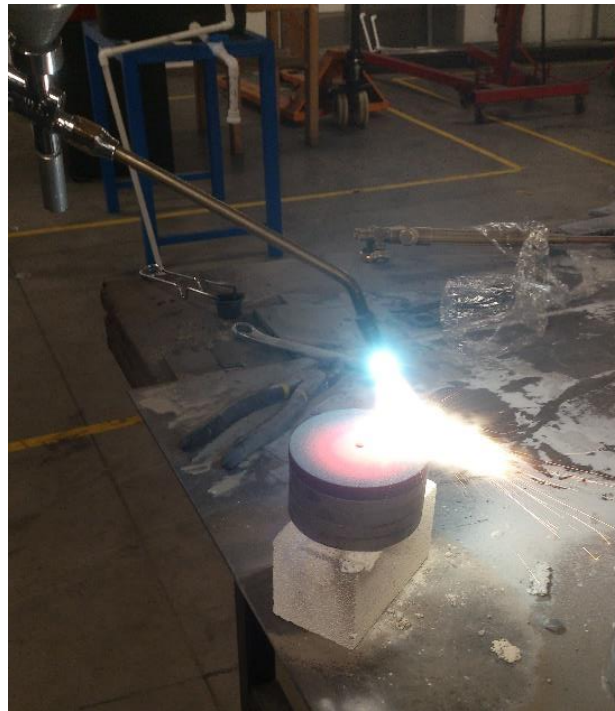
El proceso con el que se lleva a cabo el suministro de recubrimiento es rociado térmico en frío, esta busca la adherencia del material polvo sobre las probetas de ensayo fabricadas con acero AISI 1045 sin la existencia de difusión atómica entre ellos. Se ajustan las presiones de trabajo para el acetileno de 8 Psi y para el oxígeno 25 Psi, aproximadamente. Posteriormente se mantuvo la llama para precalentar las probetas en la zona que se desea recubrir a una temperatura entre los 180 °C y los

¹⁹ SSPC: Steel Structures Painting Council. NACE: National Association of Corrosion Engineers. Joint Surface Preparation Standard NACE No.1 / SSPC-SP5 White Metal Blast Cleaning. Reaffirmed 2006. ISBN: 1-57590-107-2

190 °C, el acero toma un color amarillo indicando el momento para rociar la mezcla de carburo de tungsteno – dióxido de titanio. Se aplica la capa de material sobre el área de trabajo con movimientos circulares para evitar el sobrecalentamiento de la pieza.

Este proceso se lleva a cabo de la misma forma para los dos tipos de probetas, rectangulares y redondas.

Figura 15. Suministro de material de recubrimiento sobre probeta redonda.



Fuente: Autores del proyecto.

4.6. DESARROLLO DE ENSAYOS

Los ensayos se realizaron en acero AISI 1045, de este material se fabricaron dos tipos de probetas, redondas y rectangulares, así mismo se clasificaron estas en tres bloques, normalizadas, templado (El templado se hizo a una temperatura de 850 °C

y enfriado rápidamente en aceite) – revenido (El revenido a 320 °C y enfriado lento, convección natural) y las de recubrimiento de WC - 15 wt. % TiO₂ de tamaño nanométrico, depositado por el proceso de rociado térmico en frío.

4.6.1. Ensayo de dureza

En el ensayo de dureza se utilizó el equipo medidor de dureza HARTIP 1500, este tiene una exactitud de 0,4% aproximadamente, con este se midió la dureza ROCKWELL en la superficie de las probetas, para que los datos sean precisos a cada probeta se le hicieron cinco mediciones en puntos diferentes, donde los resultados fueron tabulados y promediados.

Figura 16. Prueba de ensayo de dureza.



Fuente: Autores del proyecto.

4.6.2. Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo

Este ensayo se realizó en la maquina pin-on-disk, para poder realizar las pruebas se debió tener en cuenta los parámetros de la norma ASTM G99-05 “método de prueba estándar para ensayos de desgaste con una maquina pin-on-disk”. Según esta norma se tiene unas condiciones de pruebas.

Tabla 4. Condiciones para pruebas de desgaste adhesivo

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS			
Carga aplicada [N]	10.2	10.2	10.2
Velocidad angular [RPM]	300	300	300
Distancia lineal recorrida [m]	250	750	1000
Número de revoluciones del ensayo	3980	5971	5307
Diámetro de contacto [m]	0.02	0.04	0.06
Temperatura de Trabajo [°C]	28	28	28

Fuente: Autor del proyecto

En la máquina de la figura 17 se realizó el proceso de desgaste adhesivo de material, donde la probeta redonda es ubicada sobre un disco giratorio y sujeta por un sistema de mordazas, su movimiento es generado por un motor que gira determinado tiempo según la norma establecida ASTM G99-05; sobre la probeta se aplica una carga determinada donde el elemento que hace desgaste con la probeta es un pin con punta de bola y a su vez donde se puede ajustar la distancia de operación.

Figura 17. Máquina Pin on Disk. (UPB)



Fuente: Autores del proyecto.

En el transcurso de las pruebas las probetas quedan marcadas por huellas circulares proporcionadas por el desgaste, esto se puede ver en la figura 18.

Figura 18. Huellas sobre probeta por ensayo de desgaste adhesivo.



Fuente: Autores del proyecto.

4.6.3. Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo

Este ensayo se realizó en la máquina de desgaste abrasivo, para poder realizar las pruebas se debió tener en cuenta los parámetros de la norma ASTM G65-04 “método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho”. Según esta norma se debe tener unas condiciones de pruebas. (Ver tabla 5)

Tabla 5. Condiciones a tener en cuenta para las pruebas de desgaste abrasivo.

Procedimiento especificado	Fuerza contra la probeta, N (lb)	Revoluciones de la Rueda	Abrasión Lineal	
			m	ft
A	130 (30)	6000	4309	14138
B	130 (30)	2000	1436	4711
C	130 (30)	1000	718	2360
E	130 (30)	100	71.8	236

Fuente: Autores del proyecto.

Para que haya un mayor control de la prueba, el desarrollo de esta debe pasar por una serie de pasos, y son los siguientes:

- Tener pesadas cada una de las probetas a ensayar.
 - Verificar el estado de la máquina y cada uno de sus componentes para evitar irregularidades durante el ensayo y no tener influencia en el resultado.

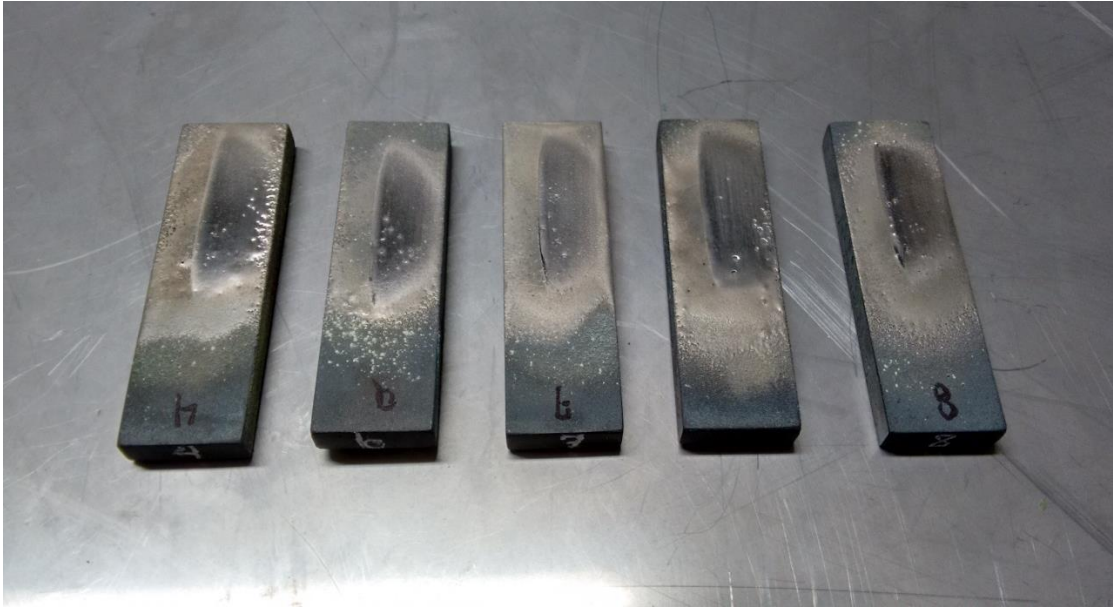
Figura 19. Máquina para desgaste abrasivo.



Fuente: Autores del proyecto

- Establecer el PLC con una frecuencia de 22,5 HZ, medida indicada según la norma.
- El flujo de arena debe ser de entre 300 y 400 g/min, este debe ser uniforme antes y después de la prueba, luego de cada prueba, el caucho se debe dejar reposar para retomar la siguiente prueba.
- Se aloja la probeta en el soporte de la máquina y se añade los pesos apropiados al brazo de la palanca para aplicar la fuerza de contacto requerida.
- Se enciende la máquina y se deja caer el brazo donde está la probeta lentamente para que haga contacto con la rueda y empiece a existir rozamiento.
- Se separa el brazo de la probeta, se apaga la máquina, se limpia de nuevo el equipo y se procede a pesar de nuevo la probeta. (Véase probetas desgastadas figura 20).

Figura 20. Huella sobre probetas por ensayo de desgaste abrasivo.



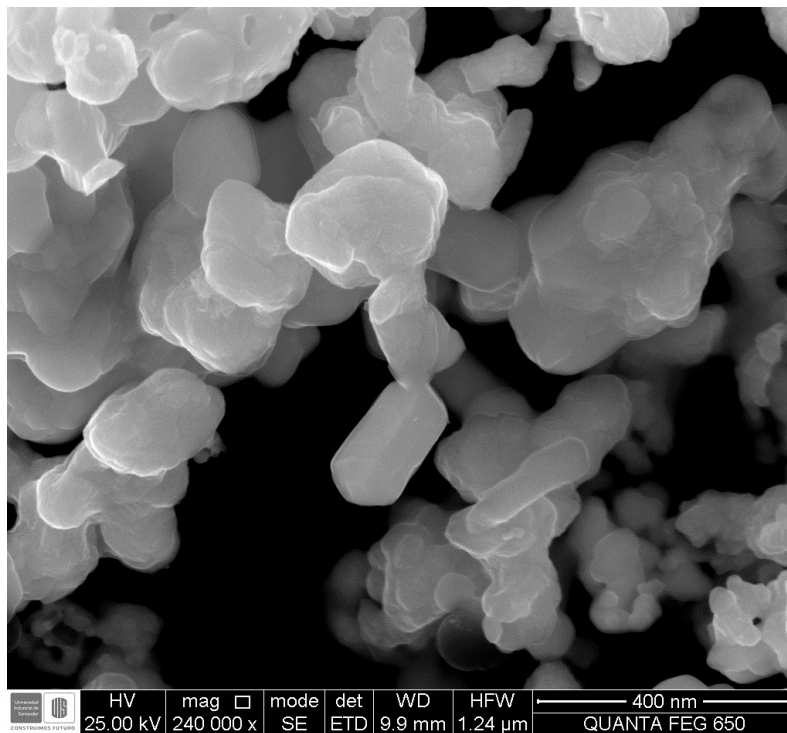
Fuente: Autores del proyecto.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

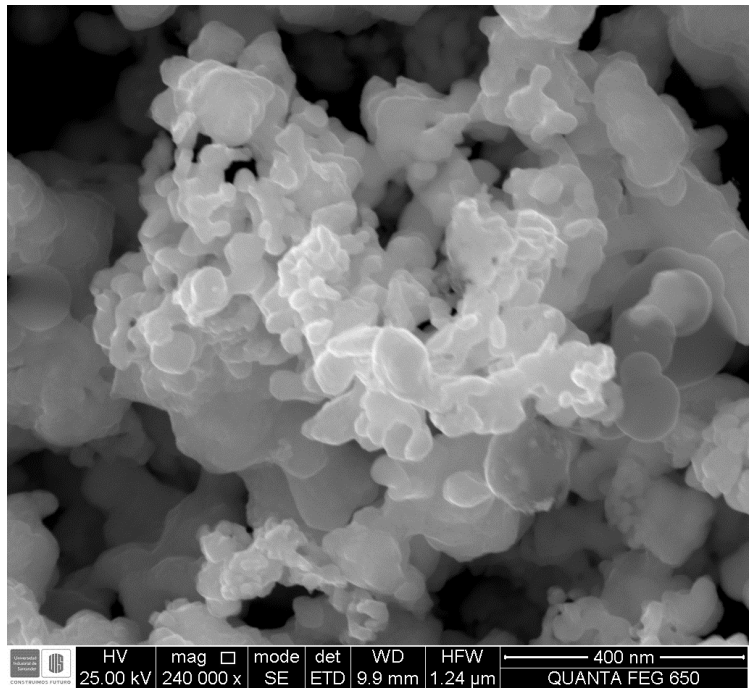
5.1. VERIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y MORFOLÓGICAS DE CARBURO DE TUNGSTENO Y DIÓXIDO DE TITANIO

Para verificar las características químicas y morfológicas de los materiales, se enviaron muestras a la Universidad Industrial de Santander para poder ser analizadas por el microscopio electrónico de barrido, donde se obtuvieron diferentes imágenes y tablas. (Véase figura 21 y 22)

Figura 21. Imágenes de partículas de carburo de tungsteno, obtenidas mediante SEM.

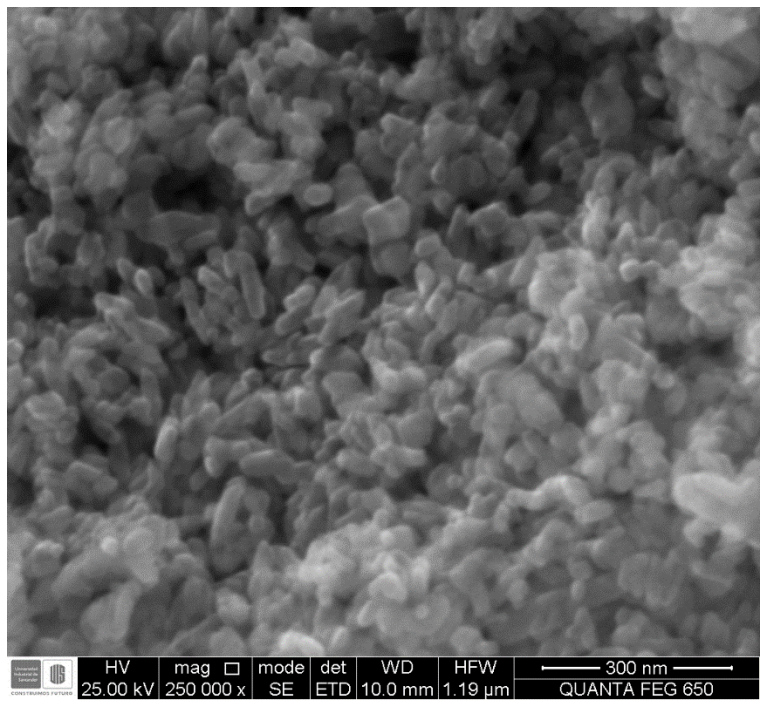


Fuente: Autores del proyecto

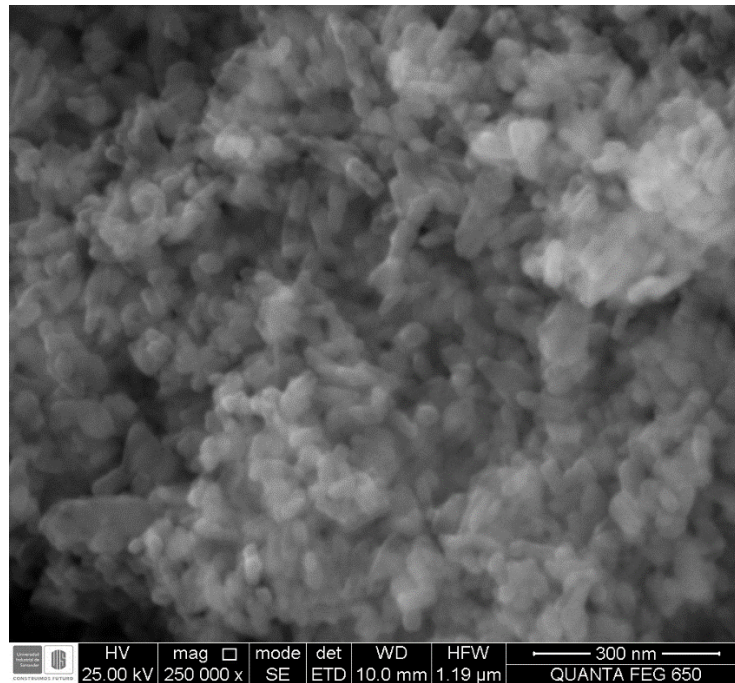


Fuente: Autores del proyecto

Figura 22. Imágenes de partículas de dióxido de titanio, obtenidas mediante SEM.



Fuente: Autores del proyecto.



Fuente: Autores del proyecto

Analizando las figuras 21 y 22, se trabajó en una escala de 400nm y 300nm para el carburo de tungsteno y dióxido de titanio respectivamente. Para el cálculo de este se tomaron diez partículas de cada material, se midieron, se promediaron y se demostró el tamaño del material (Véase en las tablas 6 y 7). Con respecto a las imágenes se puede decir que representan una geometría irregular, además se observa que no hay uniformidad y que las partículas están distribuidas de forma aleatoria.

Tabla 6. Tamaño de partículas para carburo de tungsteno

TAMAÑO DE PARTICULAS [Nm]	
240	293
280	300
268	320
293,3	288
295	300
Promedio= 287,73	

Fuente: Autores del proyecto

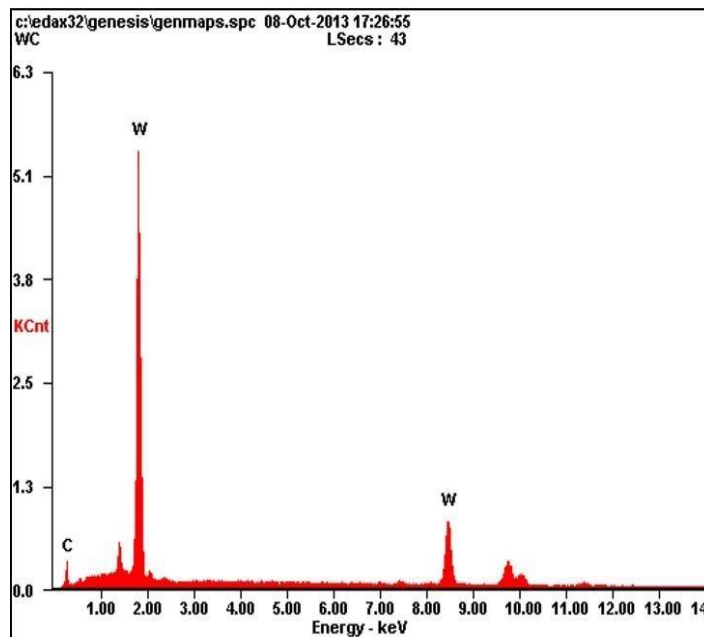
Tabla 7. Tamaño de partículas para dióxido de titanio

TAMAÑO DE PARTICULAS [Nm]	
134	110
98,78	143,65
118,65	92,43
89	101
159	120,36
Promedio= 116,687	

Fuente: Autores del proyecto

La microscopía electrónica de barrido proporciono los análisis EDS para el carburo de tungsteno y dióxido de titanio (Véase en el gráfico 1 y 2), así mismo entregando tablas de los porcentajes de peso atómico para cada material (Véase en la tabla 8 y 9), con el fin de compararlos con los porcentajes ya establecidos en la tabla periódica de elementos químicos y comprobar la composición química de cada material.

Gráfico 1. Gráfico de análisis EDS Carburo de Tungsteno



Fuente: Autores del proyecto

En el gráfico 1 se puede evidenciar la presencia del Wolframio y del carbono, corroborando la presencia de dichos elementos en la muestra de trabajo del proyecto.

Tabla 8. Porcentajes en peso y número atómico de carburo de tungsteno

Elemento	Wt %	At %
Carbono (C)	10,73	64,80
Wolframio (W)	89,27	35,20

Fuente: Autores del proyecto.

El análisis teórico para determinar la composición elemental del carburo de tungsteno:

$$At C = 12,01 \text{ g/mol}$$

$$At W = 183,85 \text{ g/mol}$$

$$At WC = At C + At W = 195,86 \text{ g/mol}$$

$$\%At C = \frac{At C}{At WC} * 100 = \frac{12,01 \text{ g/mol}}{195,86 \text{ g/mol}} * 100 = 6,13\%$$

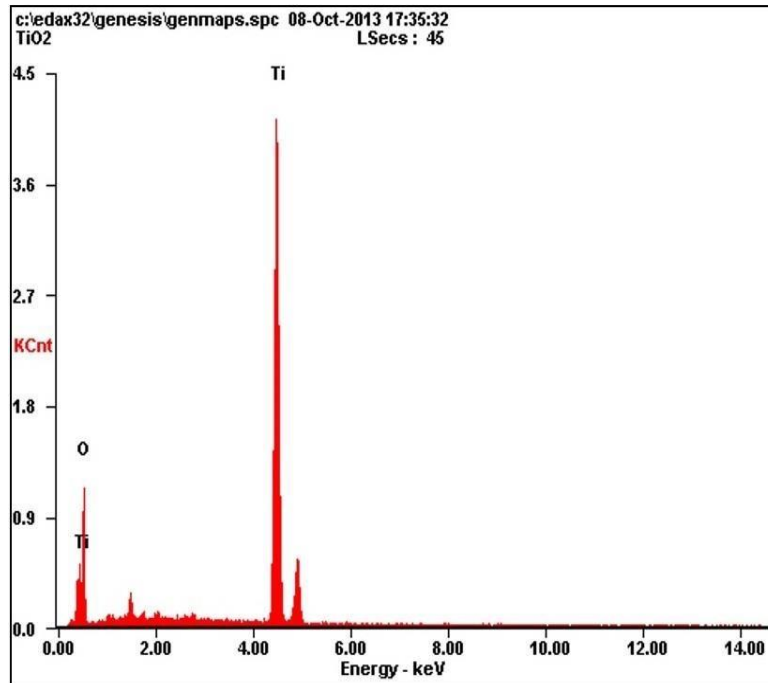
$$\%At W = \frac{At W}{At WC} * 100 = \frac{183,85 \text{ g/mol}}{195,86 \text{ g/mol}} * 100 = 93,87\%$$

El error que hay entre los porcentajes de peso atómico arrojados por el análisis EDS y los calculados en base a la tabla periódica es:

$$e = \left| \frac{At Wr - At Wm}{At Wr} \right| * 100 = \left| \frac{93,87\% - 89,27\%}{93,87\%} \right| * 100$$

$$e = 4,90\%$$

Gráfico 2. Gráfico de análisis EDS Dióxido de titanio



Fuente: autores del proyecto.

En el gráfico 2 se puede evidenciar la presencia del titanio y del oxígeno, corroborando la presencia de dichos elementos en la muestra de trabajo del proyecto.

Tabla 9. Porcentaje en peso y número atómico de dióxido de titanio

Elemento	Wt%	At%
Titanio(Ti)	68,54	56,35
Oxigeno (O)	31,46	43,65

Fuente: Autores del proyecto.

El análisis teórico para determinar la composición elemental del dióxido de titanio:

$$At Ti = 47,86 \text{ g/mol} \quad At O = 15,99 \text{ g/mol} \quad At O_2 = At O * 2 = 31,98 \text{ gr/mol}$$

$$At TiO_2 = At Ti + At O_2 = 79,84 \text{ g/mol}$$

$$\%At Ti_2 = \frac{At Ti}{At TiO_2} * 100 = \frac{47,86 \text{ g/mol}}{79,84 \text{ g/mol}} * 100 = 59,94\%$$

$$\%At O_2 = \frac{At O_2}{At TiO_2} * 100 = \frac{31,98 \text{ g/mol}}{79,84 \text{ g/mol}} * 100 = 40,05\%$$

El error que hay entre los porcentajes de peso atómico arrojados por el análisis EDS y los calculados en base a la tabla periódica es:

$$e = \left| \frac{At Tir - At Tim}{At Tir} \right| * 100 = \left| \frac{59,94\% - 68,54}{59,94\%} \right| * 100$$

$$e = 14,34\%$$

Según los resultados obtenidos se dijo que la composición de los elementos ya estudiados son ciertamente W, C, Ti y O; aun así se puede evidenciar porcentajes de error, este puede ser por el tipo de estudio aplicado, ya que el EDS es un análisis semi-cuantitativo, donde se pueden presentar errores. Con todo esto se puede concluir que los materiales a utilizar con certeza son carburo de tungsteno y dióxido de titanio.

5.2. DEFINICIÓN DE NÚMEROS DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA ADQUIRIR DATOS ESTADÍSTICOS CONFIABLES

Para calcular el número de ensayos requeridos con el fin de obtener una confiabilidad del 95%, se desarrolló una premuestra con 4 o 5 probetas para cada tipo de ensayo de dureza, resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo, la ecuación que se utiliza para calcular el número de ensayos requeridos es la siguiente:

$$n = \frac{S^2 * Z^2}{e^2}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra para una confiabilidad dada.

S = Desviación estándar de los resultados obtenidos de la premuestra.

Z = Variable obtenida de la tabla para la distribución normal, depende del nivel de confianza que se quiere obtener de los resultados del ensayo.

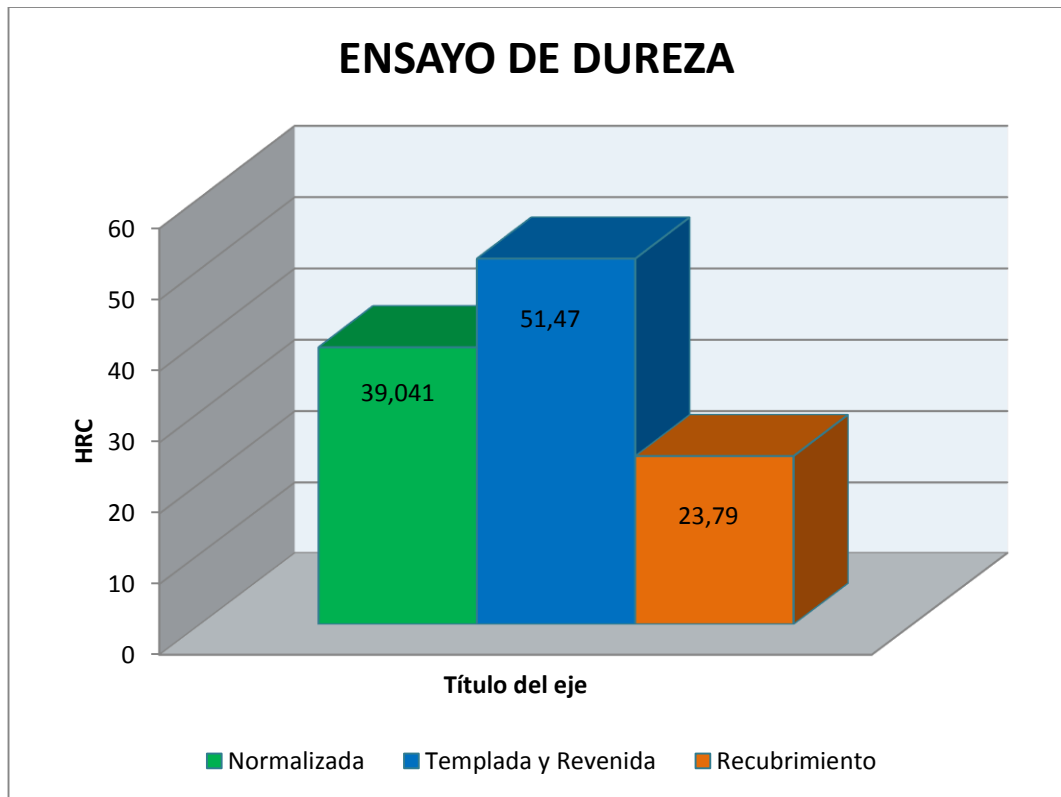
e = Máximo error permisible en los datos obtenidos del ensayo. Inicialmente para poder obtener el total de número ensayos se hizo una premuestra de 4 o 5 probetas

Estadísticamente, esta fórmula es utilizada en muchos campos, demostrando que da resultados confiables.

5.3. RESULTADO DE PRUEBAS DE DUREZA

En este ensayo se hizo una premuestra de 4 ensayos para poder obtener el total de números de ensayo, dando como resultado un número de 5 ensayos (Véase tabla 10), de cada tipo se tabularon los datos obtenidos por cada una de las pruebas de dureza (Véase en las tablas 11-16), teniendo en cuenta esto se realizó un balance general de las probetas (redondas y rectangulares) donde se puede identificar las diferentes variaciones en los ensayos de dureza de las probetas de tipo normalizado, templado-revenido y con el recubrimiento. A cada probeta se le aplico su respectiva medición en puntos diferentes, promediando sus datos y así poder tener una comparación entre los tres diferentes procesos.

Gráfico 3. Resultados ensayos de dureza



Fuente: Autores del Proyecto.

Tabla 10. Calculo de número de ensayos de dureza

PROBETA	DUREZA		
	Normalizado	Templado - Revenido	Con recubrimiento
1	36,33	49	23,9
2	37,95	48	24,4
3	41,3	53	23,4
4	40,72	54	21,3
Promedio	39,075	51	23,25
Desv. Estándar	2,342171357	2,943920289	1,362595562
Error 5%	1,95375	2,55	1,1625
Núm. de Ensayos	5,297876213	4,913310265	5,064662088

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 11. Ensayo de dureza de probetas redondas normalizadas

PROBETAS REDONDAS NORMALIZADAS						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	40,58	37,79	38,65	38,97	38,87	38,97
2	38,33	38,93	39,05	37,82	40,52	38,93
3	38,35	40,38	39,22	40,22	38,12	39,26
4	38,27	38,6	40,29	39,23	40,18	39,31
5	39,01	39,42	38,73	39,57	37,87	38,92

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 12. Ensayo de dureza de probetas redondas templado-revenido.

PROBETAS REDONDAS TEMPLADO-REVENIDO						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	52	50	51	51	51	51
2	50	50	50	50	51	50,2
3	51	52	50	50	50	50,6
4	50	50	50	50	50	50
5	50	52	52	52	51	51,4

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 13. Ensayo de dureza de probetas redondas con recubrimiento

PROBETAS REDONDAS CON RECUBRIMIENTO						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	19,6	21,4	23,2	18,7	19,8	20,54
2	23,5	22,4	25,7	21,2	23,4	23,24
3	14,5	16,3	15,7	18,5	16,8	16,36
4	28,8	32,7	31,2	29,5	33	31,04
5	25,8	23,4	22,9	21,5	29,8	24,68

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 14. Ensayo de dureza de probetas rectangulares normalizadas

PROBETAS RECTANGULARES NORMALIZADAS						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	38,87	40,51	39,12	37,65	39,95	39,22
2	38,24	39,36	38,81	37,77	39,66	38,77
3	38,25	40,44	39,49	37,89	37,99	38,81
4	39,42	40,12	37,8	39,99	38,82	39,23
5	39,22	38,83	39,45	38,72	38,71	38,99

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 15. Ensayo de dureza de probetas rectangulares templado-revenido

PROBETAS RECTANGULARES TEMPLADO-REVENIDO						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	51	53	52	52	52	52
2	52	53	52	51	52	52
3	52	52	52	52,5	53	52,3
4	52	53	53	53	53	52,8
5	52	52	53	53	52	52,4

Fuente: Autores de proyecto

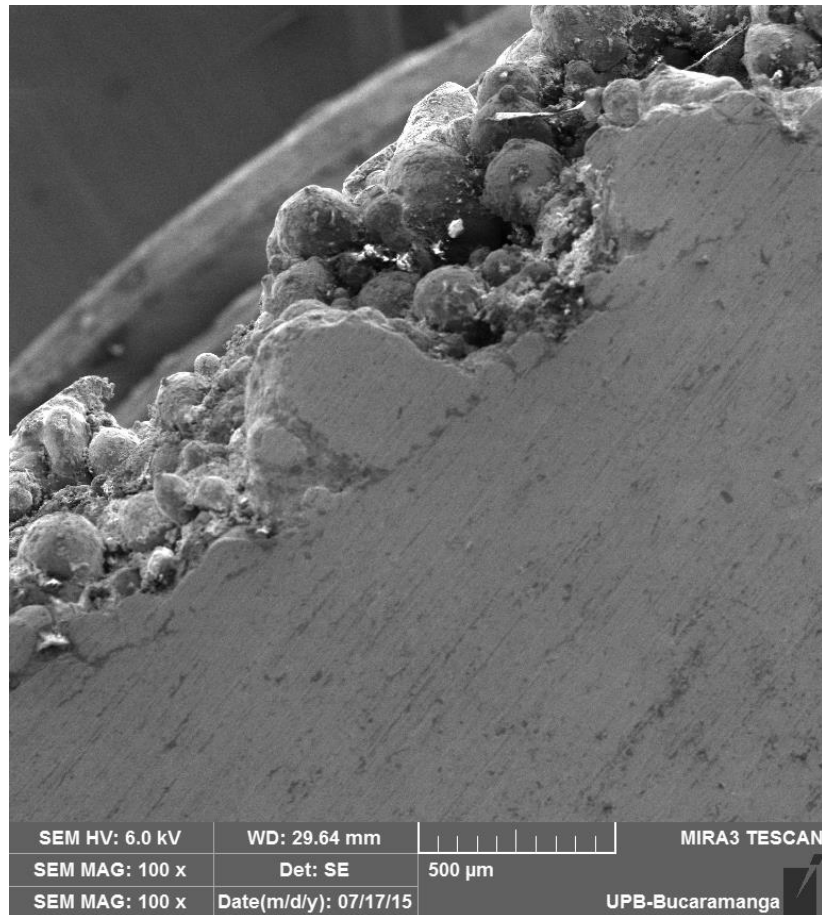
Tabla 16. Ensayo de dureza de probetas rectangulares con recubrimiento.

PROBETAS RECTANGULARES CON EL RECUBRIMIENTO						
PROBETA	PUNTO 1 [HRC]	PUNTO 2 [HRC]	PUNTO 3 [HRC]	PUNTO 4 [HRC]	PUNTO 5 [HRC]	PROMEDIO [HRC]
1	24,8	24,4	26,1	25	25,8	25,22
2	28,6	30,4	27,8	31,1	29,6	29,5
3	19,6	17,8	16,9	18,9	22	19,04
4	17	14,7	21,3	18,9	17,6	17,9
5	26,1	32,2	35,2	28,6	29,8	30,38

Fuente: Autores del proyecto.

Se observó los resultados y se pudo identificar, que el acero AISI 1045 con el recubrimiento mostro una menor dureza que el acero normalizado y tratamiento templado-revenido, esto es contradictorio de acuerdo a la teoría, por lo tanto se buscó errores que hayan perjudico los resultados. Para realizar los ensayos de dureza, el indentador debe hacer contacto en una zona uniforme para que de una lectura confiable sobre la dureza, por eso se realizó un estudio microscópico a las probetas recubiertas con WC y TiO_2 . En los resultados se pudo evidenciar irregularidades en la superficie, mostrando espacios libres que podían afectar la lectura del durómetro.

Figura 23. Irregularidades en la superficie de la probeta.



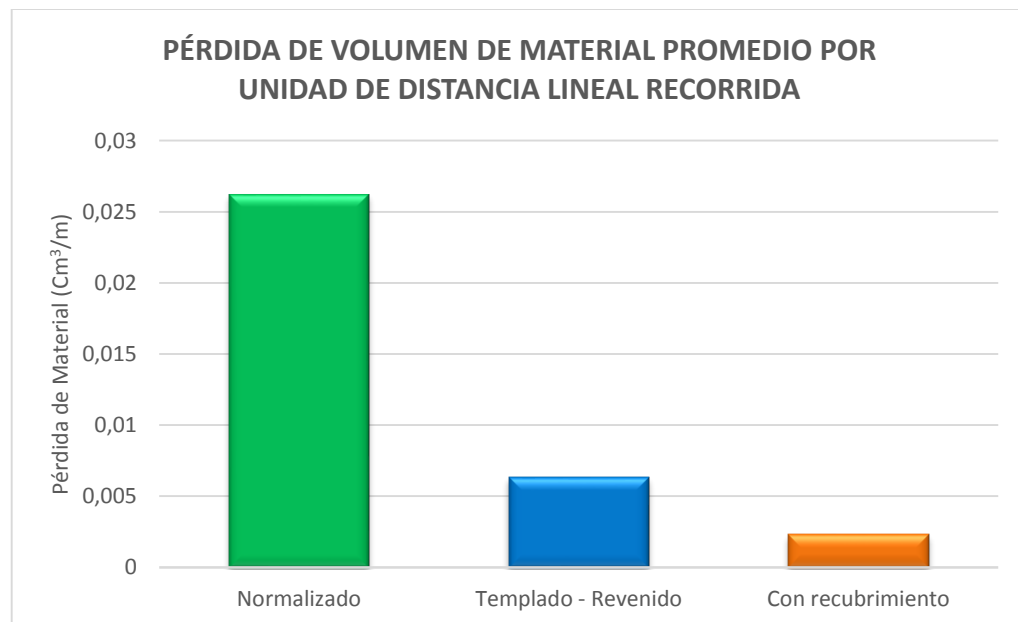
Fuente: Autores del proyecto

5.4. RESULTADOS DE PRUEBAS DE RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO

Inicialmente para poder obtener el total de número ensayos se hizo una premuestra de 5 probetas, para poder realizar dicho cálculo se tuvo en cuenta una confiabilidad del 95% con un error máximo del 5% y la metodología sugerida en la norma ASTM G99-05, dando como resultado un número de 11 ensayos para que haya una mayor confiabilidad, posteriormente se realizó las pruebas de estas y se logró determinar el promedio de la perdida en volumen. (Véase en las tablas 17-20).

El gráfico 4 muestra la perdida de material promedio en volumen de cada uno de los procesos (normalizado, templado-revenido y con recubrimiento) por unidad de distancia recorrida, mostrando una reducción notable para el tratamiento templado-revenido y aun mayor para el tratamiento con el recubrimiento.

Gráfico 4. Pérdida de volumen de material promedio por unidad de distancia lineal recorrida



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 17. Calculo de número de ensayos de resistencia al desgaste adhesivo

DIFERENCIA EN VOLUMEN DE PROBETAS CON RECUBRIMIENTO [Cm³]			
Probeta	250[m]	750[m]	1000[m]
1	0,00019617	0,005949428	0,003418471
2	0,00023429	0,006873221	0,003523227
3	0,00019964	0,007540558	0,003806457
4	0,00020359	0,006697618	0,003495541
5	0,00022178	0,007206115	0,002992696
Promedio	0,00021109	0,006853388	0,003447278
Desv. Estandar	1,6296E-05	0,000599671	0,000293505
Error 5%	1,0555E-05	0,000342669	0,000172364
Num. Ensayos	8,78821377	11,28957548	10,6891218

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 18. Pérdida de material probetas normalizadas

PÉRDIDA DE MATERIAL EN PROBETAS NORMALIZADAS [cm³]			
Probeta	250[m]	750[m]	1000[m]
1	0,001552535	0,01844517	0,04954807
2	0,001222082	0,01815959	0,0594458
3	0,001662207	0,01906232	0,05539343
4	0,001215017	0,01761055	0,05955626
5	0,001360589	0,02161946	0,06338299
6	0,001433003	0,02384338	0,05322763
7	0,001700514	0,02397809	0,0545037
8	0,001555015	0,01728152	0,05173333
9	0,001299674	0,02338067	0,06389661
10	0,001032764	0,0185338	0,0578295
11	0,000957966	0,02124943	0,05801664
PROMEDIO	0,001362851	0,02028763	0,05695763
DESV. EST.	0,000244952	0,00259292	0,00456987
cm³/m	0,000005	0,000081	0,000228

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 19. Pérdida de material probetas templado-revenido

PÉRDIDA DE MATERIAL EN PROBETAS TEMPLADO-REVENIDO [cm³]			
Probeta	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,000969207	0,00582565	0,0069658
2	0,001072173	0,00586793	0,00792447
3	0,001480175	0,00578564	0,01690195
4	0,001305561	0,00606415	0,01653499
5	0,001461336	0,00441121	0,01385519
6	0,001349738	0,00501317	0,01728866
7	0,001944249	0,00590149	0,00759428
8	0,001794571	0,00581223	0,00734733
9	0,001220356	0,00455159	0,01498107
10	0,000987534	0,00547097	0,01528117
11	0,001383028	0,00498282	0,00973317
PROMEDIO	0,001360721	0,00542608	0,01221891
DESV. EST.	0,000308593	0,00058567	0,00428114
cm³/m	0,000005	0,000022	0,000049

Fuente: Autores del proyecto

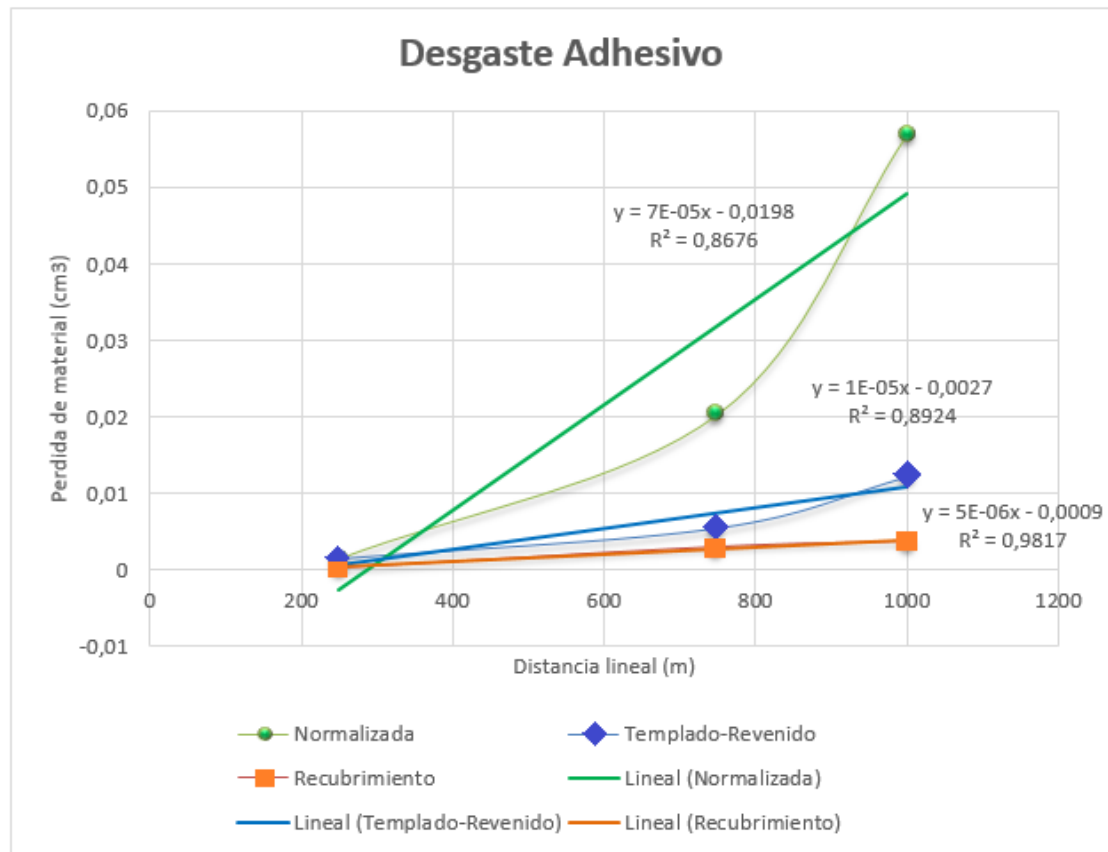
Tabla 20. Pérdida de material probetas con recubrimiento

PÉRDIDA DE MATERIAL EN PROBETAS CON RECUBRIMIENTO [cm³]			
Probeta	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,000201708	0,00378605	0,00118123
2	0,000226078	0,00326096	0,00614454
3	0,000222408	0,00242618	0,00268882
4	0,00019745	0,00410182	0,00366156
5	0,000232233	0,00324845	0,00688121
6	0,000226189	0,0022832	0,00015616
7	0,000188935	0,0022378	0,00185894
8	0,000208175	0,00317076	0,0031198
9	0,000229752	0,00246616	0,00184046
10	0,00016756	0,00271512	0,00773439
11	0,000189333	0,00312785	0,00555447
PROMEDIO	0,000208166	0,00298403	0,00371105
DESV. EST.	0,0000210	0,000616	0,0025084
cm³/m	0,000001	0,000012	0,000015

Fuente: Autores del proyecto

Se puede analizar en el gráfico 5 qué tanto como la curva de normalizado, siendo la más notable como la templado-revenido presentan un mayor desgaste que la del recubrimiento, mostrando esta una tendencia lineal, con esto, se puede afirmar que el recubrimiento proporcione una mejora en el acero AISI 1045 brindándole una mayor resistencia al desgaste adhesivo.

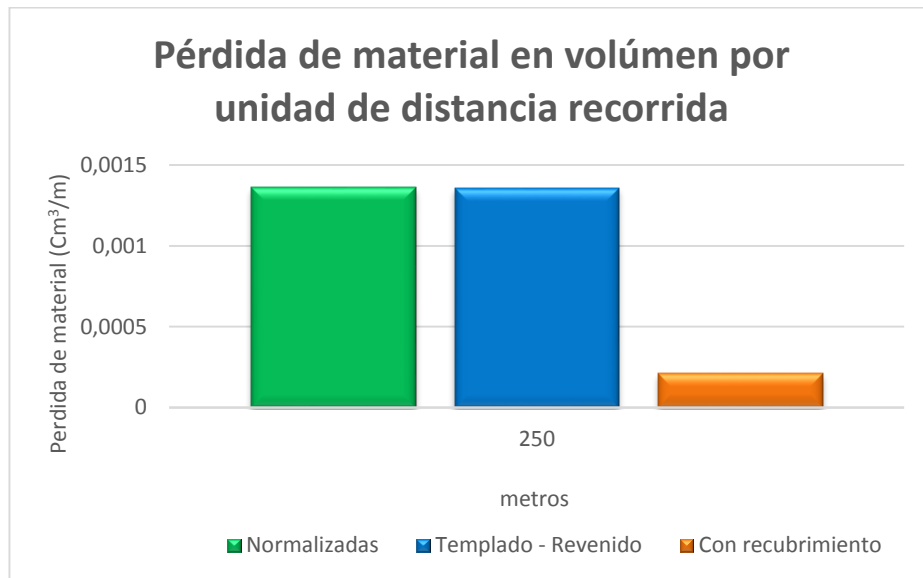
Gráfico 5. Resultado de pruebas de resistencia al desgaste adhesivo.



Fuente: Autores del proyecto

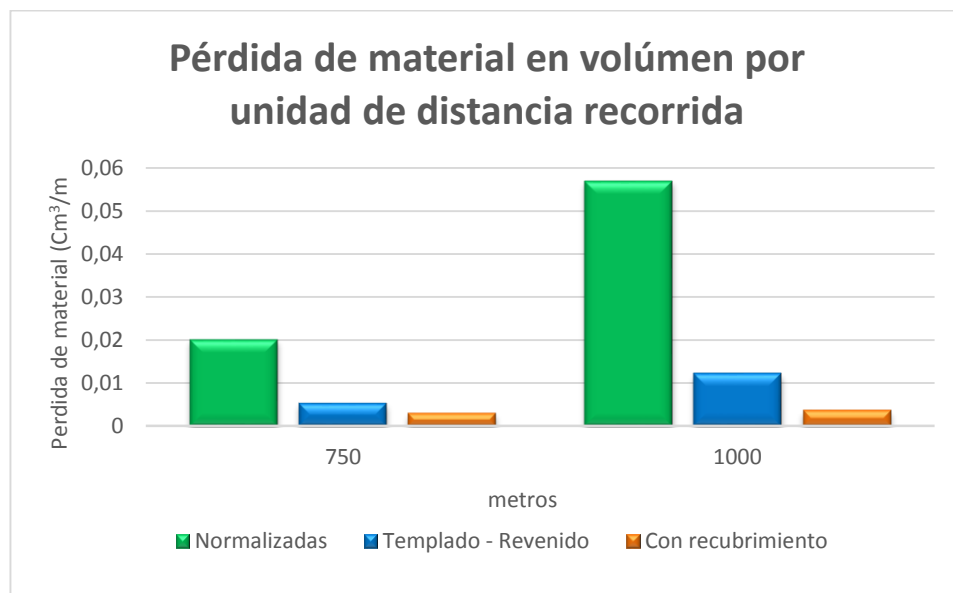
El gráfico 6 y 7 muestra el volumen del material perdido por unidad de distancia lineal recorrida demostrando que al ver una mayor distancia lineal va a ver un mayor desprendimiento de material y se puede considerar que las probetas con el recubrimiento presenta una menor pérdida de material demostrando de nuevo las mejoras para el acero AISI 1045.

Gráfico 6. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste adhesivo (250m).



Fuente: Autores del proyecto.

Gráfico 7. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste adhesivo (750m y 1000m).



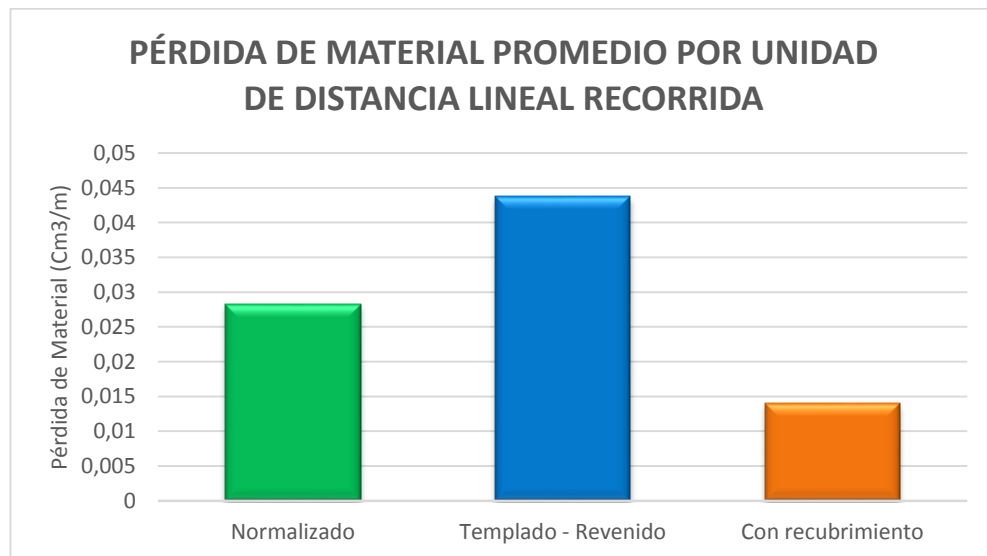
Fuente: Autores del proyecto

5.5. RESULTADOS DE PRUEBAS DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO

Inicialmente para poder obtener el total de número ensayos se hizo una premuestra de 5 probetas, para poder realizar dicho cálculo se tuvo en cuenta una confiabilidad del 95% y un error máximo del 5% y los parámetros de la norma ASTM G65-04 (REAPROBADA EN EL 2010), dando como resultado un número de 11 ensayos para que haya una mayor confiabilidad, posteriormente se realizó las pruebas de estas y se logró determinar el promedio de la perdida en volumen. (Véase en las tablas 21-24).

El gráfico 8 muestra la perdida de material promedio en volumen de cada uno de los procesos (normalizado, templado-revenido y con recubrimiento) por unidad de distancia recorrida, mostrando que para el tratamiento templado-revenido hay un mayor desprendimiento de material, en cambio para el tratamiento con el recubrimiento hay un menor desprendimiento de material.

Gráfico 8. Pérdida de volumen de material promedio por unidad de distancia lineal recorrida.



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 21. Cálculo de número de ensayos de desgaste abrasivo.

DIFERENCIA EN VOLUMEN DE LAS PROBETAS CON RECUBRIMIENTO [Cm³]				
Probeta	A(30 min)	B(15min)	C(5min)	D(0,5min)
1	0,2308667	0,1997667	0,0395334	0,0263
2	0,198954	0,2173667	0,0428665	0,0259333
3	0,1898667	0,1899	0,044997	0,02494
4	0,2184667	0,2037333	0,0438333	0,02909
5	0,2252667	0,1886667	0,0453	0,0301667
Promedio	0,2126841	0,1998867	0,043306	0,027286
Desv. Estándar	0,0175465	0,0116832	0,0023205	0,0022281
Error 5%	0,0106342	0,0099943	0,0021653	0,0013643
Num. Ensayos	10,036268	5,037492	4,2338583	9,8325204

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 22. Pérdida de material de probetas normalizadas

PÉRDIDA DE MATERIAL PROBETAS NORMALIZADAS [cm³]				
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
1	0,06594	0,0326	0,00945	0,00081
2	0,06638	0,03525	0,01102	0,00116
3	0,06985	0,03495	0,01121	0,00115
4	0,06518	0,03384	0,01156	0,00068
5	0,07062	0,03522	0,00964	0,00067
6	0,06596	0,03398	0,0117	0,00099
7	0,06946	0,03439	0,00962	0,00105
8	0,06685	0,03369	0,01082	0,00111
9	0,06678	0,03392	0,0114	0,00078
10	0,0675	0,03313	0,01028	0,00111
Promedio	0,06745	0,0341	0,01067	0,00095
cm³/m	0,000016	0,000024	0,000015	0,000013

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 23. Pérdida de material de probetas templado-revenido

PÉRDIDA DE PROBETAS TEMPLADO-REVENIDO [cm³]				
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
1	0,09368	0,06176	0,02131	0,00201
2	0,09185	0,05847	0,02132	0,00226
3	0,0935	0,05993	0,021	0,00213
4	0,0937	0,06185	0,02191	0,00225
5	0,0943	0,05726	0,0214	0,00193
6	0,09478	0,06061	0,02145	0,00199
7	0,09472	0,05471	0,02144	0,00224
8	0,09274	0,05382	0,02101	0,00211
9	0,09258	0,05565	0,0213	0,00192
10	0,09327	0,05746	0,02153	0,00221
Promedio	0,09351	0,05815	0,02137	0,0021
cm3/m	0,000022	0,000040	0,000030	0,000029

Fuente: Autores del proyecto

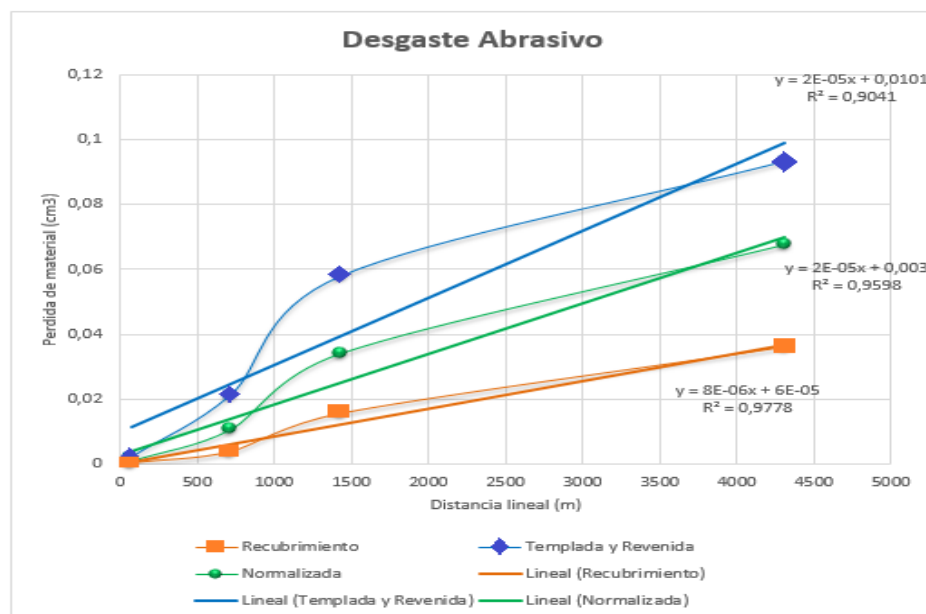
Tabla 24. Pérdida de material de probetas con recubrimiento

PÉRDIDA DE MATERIAL DE PROBETAS CON RECUBRIMIENTO [cm³]				
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
1	0,034716414	0,01442559	0,003997439	0,000379267
2	0,035689283	0,016515678	0,003724629	0,000371864
3	0,03650321	0,014721245	0,003963926	0,000384186
4	0,0365532	0,016913851	0,003938825	0,000386105
5	0,035720717	0,014879033	0,003925421	0,000370266
6	0,036824737	0,016718961	0,003924086	0,000390769
7	0,036535517	0,015685469	0,003708055	0,000413015
8	0,036054029	0,015031644	0,003696704	0,000397114
9	0,035155098	0,014363453	0,003565897	0,000342513
10	0,035293962	0,016531299	0,003844179	0,000410042
Promedio	0,035904617	0,015578622	0,003828916	0,000384514
cm3/m	0,000008	0,000011	0,000005	0,000005

Fuente: Autores del proyecto.

Se puede analizar en el gráfico 9, qué tanto como la curva de templado-revenido siendo la más notable como la normalizada presentan un mayor desgaste que la del recubrimiento, mostrando esta una tendencia lineal, con esto, se puede decir que el recubrimiento proporcionó una mejora en las propiedades del acero AISI 1045 brindándole una mayor resistencia al desgaste abrasivo. Según la practica realizada el acero templado-revenido tiene mayor dureza que el de tipo normalizado, por esto debería tener un menor desgaste que esta, analizando esto podría decirse que es contradictorio, por lo tanto se buscó posibles soluciones a esto, y al momento de realizarse las pruebas la maquina presento algunas fallas, una de estas fue el caucho que rodeaba la rueda de acero, el caucho al calentarse se salía de la rueda de acero ocasionando que esta hiciera el rayado, mientras el estudiante apagaba la maquina el tiempo y el desgaste se desfasaba de lo establecido, otra falla es el flujo de arena, aunque la arena fue tamizada habían impurezas que obstruían el paso de esta, haciendo el reducir el flujo de arena, estos son algunos inconvenientes que se tuvieron a la hora de realizar ensayo y pudo haber perjudicado en la toma de resultados.

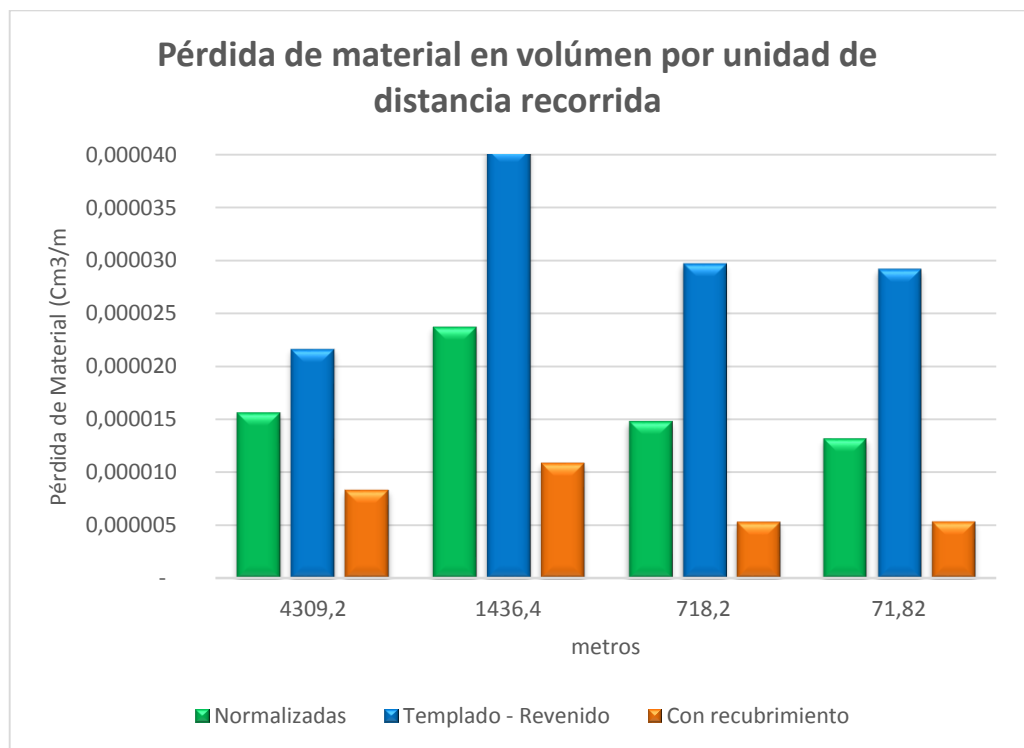
Gráfico 9. Resultado de pruebas de resistencia al desgaste abrasivo.



Fuente: Autores del proyecto.

El gráfico 10 muestra el volumen del material perdido por unidad de distancia lineal recorrida y se puede considerar que para el proceso templado-revenido presenta un mayor desprendimiento de material para cada una de las distancias lineales establecidas en cambio para el proceso con recubrimiento experimentando un menor desprendimiento de material, demostrando de nuevo las mejoras en las propiedades para el acero AISI 1045.

Gráfico 10. Pérdida de material en volumen por unidad de distancia lineal recorrida en la prueba de desgaste abrasivo.



Fuente: Autores del proyecto.

6. CONCLUSIONES

- Con las pruebas de microscopía electrónica de barrido y de EDS se pudo confirmar el tamaño de los materiales, carburo de tungsteno y dióxido de titanio, era nanométrico, y que su composición elemental evidentemente es Wc y TiO₂.
- En los ensayos de dureza se logró evidenciar datos erróneos con respecto a la dureza del recubrimiento, se volvieron a repetir los ensayos y los resultados dieron similares, se procedió hacer un estudio de microscopia para ver cómo se estaba presentando el recubrimiento, y se vio que el recubrimiento era irregular, por esto al realizar el ensayo no garantizaba que se estuviera midiendo la dureza en el recubrimiento, ya que el indentador podría quedar en el aire, por consiguiente se necesita una medición de microdureza.
- Se pudo observar en las gráficas de resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo, que la curva de recubrimiento tiene una relación directamente proporcional entre la pérdida de material en la probeta y la distancia lineal recorrida, corroborando el comportamiento que se esperaba ya que acerca a una tendencia real.
- El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI 1045, con respecto a las de tipo normalizadas, permite concluir que en el proceso térmico de templado-revenido hay una disminución de un 75,82% de material perdido en volumen, así mismo las de recubrimiento de WC - 15 wt. % TiO₂, experimentaron una mayor disminución de un 91,21% de material perdido en volumen.
- El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI 1045, con respecto a las de tipo normalizadas, permite concluir que en el proceso térmico de templado-revenido hay un aumento de un 79,85% de material perdido en volumen, en cambio

las de recubrimiento de WC - 15 wt. % TiO_2 , presentaron una disminución de un 55,74% de material perdido en volumen.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Un sitio adecuado para uso de las máquinas, especialmente la máquina de ensayo de desgaste abrasivo, para los futuros proyectos y de esta forma solucionar los problemas referentes a la pulverización de la arena esparcidos por el área.
- Un mantenimiento preventivo a las maquinas del laboratorio de procesos de fabricación de la facultad de ingeniería mecánica, ya que hubieron diferentes problemas al tratar de usar las máquinas y esto puede generar problemas a la toma de resultados y conclusiones, como los resultados obtenidos de las probetas templado-revenido en la máquina de desgaste abrasivo.
- El recubrimiento de las probetas ha dado resultados positivos, demostrando que este método debe ser mejor estructurado para el momento del depósito del material sobre el elemento a recubrir, buscando la manera de que el recubrimiento quede uniforme para que así no genere inconvenientes al trabajar con este.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. (2010). *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus*. United States.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. (2010). *Standard test method for wear testing with a Pin-on-Disk apparatus (ASTMG99-05)*. United States.

ASM Thermal Spray Society. *Thermal Spray Technology*. Volumen 5A. ASM international, 2013.

p. 34-50.

PAGNOLA, MARCELO. *Recubrimiento por thermal spray*. Buenos Aires, Argentina : s.n., 2006.

SUN, L. Material Fundamentals and Clinical Performance of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings: a review. *J Biomed Mater Res*, Vol 58, 2001. p.92.

METCO / PERKIN, Elmer. *Diamond Jet System and Gun Manual*, 1989.

MARÍN VILLAR, Camilo. Thermal Spray: Protección de alto impacto. En: *Metal Actua* [En línea]. Mayo, 2008. Ed 8. Disponible en: www.metalactual.com/revista/8/tratamiento_thermal_spray.pdf

GROOVER, Mikell P, *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*. 1997. 1a. Ed, p. 57-58-102-103.

Batchelor, G. W.-A. (2001). *Engineering tribology*. BH.

de Agosto de 2015, de www.bulutmak.com

The Material Information Society. *Materials Characterization*. ASM International. Volumen 10A. p. 490-491.

BMS Bulut Makína Sanayi Ve Ticaret Ltda. (s.f.). *Bulut Makína*. Recuperado el 27

SSPC: Steel Structures Painting Council. NACE: National Association of Corrosion Engineers. *Joint Surface Preparation Standard NACE No.1 / SSPC-SP5 White Metal Blast Cleaning*. Reaffirmed 2006. ISBN: 1-57590-107-2

Castolin Corporation. (03 de Julio de 2013). *Castolin Eutectic*. Obtenido de www.castolin.com

General de aceros SA. SAE 1020 y SAE 1045 Aceros de ingeniería al carbono. Marzo, 2007.

PAGNOLA, M. (2006). *Recubrimiento por thermal spray*. Buenos Aires, Argentina.

Sartorius. (s.f.). *Sartorius-lab*. Recuperado el 27 de Agosto de 2015, de www.sartorius-lab.net/

T, F. G. (s.f.). *Verschleiss and Zuverlassigkeit*.

V, K. (1971). *.Metode pogischionige dolgovechmosti ditalier mschin*. Moscú: E. maschinstroginigi.