

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS DE
WC- 15 wt. % Al₂O₃ EN LA DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN
ACERO AISI 1045**

**DAVID FERNANDO CEPEDA JARABA
AINSSER ENRIQUE MONTES VALDELAMAR**



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

2015

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS DE
WC- 15 wt. % Al₂O₃ EN LA DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN
ACERO AISI 1045**

**DAVID FERNANDO CEPEDA JARABA
AINSSER ENRIQUE MONTES VALDELAMAR**

**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, 6 de Agosto de 2015

DEDICATORIA

A Dios.

Al todo poderoso por guiarme en este camino, por siempre estar presente; sobre todo en los momentos más difíciles, por brindarme la salud y la fuerza necesaria para obtener este importante logro.

A mi madrecita, Liney Amparo Jaraba Vargas

Por su incondicional apoyo, por sus palabras sabias en momentos cruciales. Para ella es este título.

A mi padre, Geiman Fabián Cepeda Guerra

Por los llamados de atención, por las constantes charlas de concienciación y su valioso apoyo.

A mi abuelo, Arcenio Javier Jaraba Garay

Por su confianza, su temple, por creer en mí y apoyarme, por él es este logro.

A Alfonso Santos Jaimes

Por compartir sus conocimientos de manera desinteresada, por atender oportunamente las diferentes consultas necesarias en el proceso de finalizar los estudios universitarios.

David Fernando Cepeda Jaraba.

DEDICATORIA

A Dios primeramente por darme estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y por darme la fortaleza necesaria para culminar esta meta.

A mi madre María Valdelamar Arrieta, por darme la vida, creer en mí y la motivación constante que me permite ser cada día una persona mejor. Gracias mamita, todo esto te lo debo a ti.

A mi hermano Leusfuin Montes Valdelamar, por haberme introducido a ésta ingeniería, por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis demás hermanos Eiskein, Marbelis Montes y Paul Polo, también fueron un soporte para mí en los momentos difíciles y por su apoyo incondicional, los quiero mucho.

Ainsser Enrique Montes Valdelamar.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pontificia Bolivariana, a su planta de docentes, laboratoristas y personal de apoyo, porque sin duda alguna fueron parte fundamental en el desarrollo íntegro de cada uno de los profesionales hoy presentes, especialmente a Alfonso Santos y Víctor Cuellar, por compartir con nosotros sus conocimientos y contar siempre con su disposición. A los compañeros quienes nos acompañaron en esta experiencia, nos brindaron su apoyo y amistad. A Talleres Unidos Ltda. Quienes con su vasta experiencia en procesos mecánicos, aportaron conocimientos y recursos para la culminación del proyecto de grado.

David Fernando Cepeda Jaraba

Ainsser Enrique Montes Valdelamar

TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVOS.....	17
OBJETIVO GENERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1. JUSTIFICACION DEL TRABAJO.....	19
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. ROCIADOS TÉRMICOS.....	20
2.2. CARBURO DE TUNGSTENO	22
2.3. ENSAYO DUREZA	22
2.4. DESGASTE ABRASIVO	23
2.5. DESGASTE ADHESIVO.....	24
2.6. NORMA ASTM G99-05 ^[6]	25
2.7. NORMA ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010)	26
2.8. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	27
3. METODOLOGÍA.....	28
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	28
3.2. REVISIÓN DE EQUIPOS PARA LAS PRUEBAS.....	28
3.3. DISEÑO Y MAQUINADO DE PROBETAS.	28
3.4. CALCULO DEL NUMERO DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA OBTENCION DE DATOS ESTADISTICAMENTE CONFIABLES	30
3.5. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y QUÍMICA DEL CARBURO DE TUNGSTENO Y ALÚMINA.....	31
3.6. DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS.....	31

3.7.	ENSAYOS	32
3.7.1.	Proceso de templado y revenido	32
3.7.2.	Ensayos de dureza.....	32
3.7.3.	Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo.....	34
3.7.4.	Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo.	36
4.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	38
4.1.	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y QUÍMICAS DEL CARBURO DE TUNGSTENO Y ALÚMINA.....	38
4.2.	ENSAYO DE DUREZA.	42
4.3.	ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO.....	46
4.4.	ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO	51
5.	CONCLUSIONES.....	577
6.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	59
7.	BIBLIOGRAFIA	60
8.	ANEXOS	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo condiciones para ensayo tribómetro pin-on-disk	266
Tabla 2. Condiciones de la prueba de desgaste adhesivo.....	355
Tabla 3. Condiciones de la prueba de desgaste abrasivo	377
Tabla 4. Medición de partículas de Carburo de tungsteno.....	39
Tabla 5. Medición de partículas de Alúmina	39
Tabla 6. Proporción de peso y número atómico de carburo de tungsteno	40
Tabla 7. Proporción de peso y número atómico alúmina	411
Tabla 8. Dureza probetas rectangulares normalizadas.....	422
Tabla 9. Dureza probetas rectangulares templadas y revenidas	433
Tabla 10. Dureza probetas rectangulares con el recubrimiento.....	433
Tabla 11. Dureza probetas redondas normalizadas	444
Tabla 12. Dureza probetas redondas templadas y revenidas	444
Tabla 13. Dureza probetas redondas con el recubrimiento	455
Tabla 14. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo	47
Tabla 15. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo	47
Tabla 16. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo	48
Tabla 17. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas normalizadas	48
Tabla 18. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas templadas y revenidas	49
Tabla 19. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas con recubrimiento	49
Tabla 20. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo	52

Tabla 21. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo	53
Tabla 22. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo	53
Tabla 23. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas normalizadas	544
Tabla 24. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas templadas y revenidas	54
Tabla 25. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas con recubrimiento	555

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de rociado térmico por llama con polvo	21
Figura 2. Carburo de tungsteno de tamaño nanométrico.....	222
Figura 3. Medición de dureza.....	233
Figura 4. (a) Abrasión de dos cuerpos. (b) Abrasión de tres cuerpos.....	244
Figura 5. Características desgaste adhesivo	255
Figura 6. Diseño de probeta redonda	29
Figura 7. Diseño de probeta rectangular.....	29
Figura 8. Mecanizado de probetas.....	30
Figura 9. Deposición del recubrimiento.....	322
Figura 10. Ensayo de dureza	333
Figura 11. Ensayo de dureza	333
Figura 12. Durómetro	344
Figura 13. Prueba de desgaste adhesivo	355
Figura 14. Maquinaria para la prueba de desgaste abrasivo	377
Figura 15. Imágenes de las partículas de carburo de tungsteno obtenidas mediante SEM	38
Figura 16. Imágenes de las partículas de alúmina obtenidas mediante SEM.....	38
Figura 17. Gráfica EDS carburo de tungsteno	40
Figura 18. Grafica EDS alúmina	41
Figura 19. Resultado de ensayo de dureza	455
Figura 20. Superficie de la capa de recubrimiento de Carburo de tungsteno y Alúmina.....	466
Figura 21. Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo	466
Figura 22 Resultados ensayos de resistencia al desgaste adhesivo.	50
Figura 23. Comparación de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en los ensayos de desgaste adhesivo	51

Figura 24. Huella sobre las probetas luego de ser sometidas al desgaste abrasivo	52
Figura 25. Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo	555
Figura 26. Comparación pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en los ensayos de desgaste abrasivo	566

TABLA DE ANEXOS

ANEXO A. CURVA DE TEMPLE DE PROBETAS	63
ANEXO B. INFORME DE LABORATORIO	655
ANEXO C. DUROMETRO PORTATIL	677

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS DE WC- 15 wt. %
Al₂O₃ EN LA DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI 1045

AUTOR(ES): Ainsser Enrique Montes Valdelamar David
Fernando Cepeda Jaraba

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Alfonso Santos Jaimes

RESUMEN

En actualidad se han realizado modificaciones a gran cantidad de materiales con el fin de mejorar propiedades químicas, físicas y mecánicas para poder aumentar su vida útil, reducir costos, disminuir fallas y aumentar variación de aplicaciones en la industria; procesos como los metalizados, tratamientos térmicos, recubrimientos electrolíticos y químicos son altamente usados para conseguir dichas mejoras; sin embargo no se dispone de relaciones que permitan determinar estas mismas propiedades para diferentes proporciones de recubrimientos de estos materiales, por lo cual se realizará las respectivas pruebas de dureza y resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo de un acero común AISI 1045 con una capa de recubrimiento de carburo de tungsteno (WC) nanoparticulado y alúmina [Al] _ (2) O _ 3. El carburo de tungsteno, es un compuesto cerámico e intersticial formado por wolframio y carbono que debido a su alta dureza es muy utilizado en la industria para recubrir piezas como brocas, por su parte, la alúmina o dióxido de aluminio, es el principal material en la formación de esmaltes y arcillas debido a que aporta mejoras en propiedades como la dureza y en el punto de fusión. En este proyecto, se realizaron ensayos de dureza, resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, según como lo indican las normas ASTM G99-05 y G65-04. Para cumplir con los parámetros de estas normas, se hicieron los diseños de las probetas para su posterior mecanizado y para el granallado de las que iban a ser recubiertas. El cálculo del número de probetas necesarias para cumplir con una confiabilidad del 95% se hizo cumpliendo un procedimiento estadístico bajo la correlación: $n = (S^2 * Z^2) / e^2$ obteniendo como resultado un número de 10 probetas para cada ensayo.

PALABRAS CLAVES:

Carburo de Tungsteno y Alúmina

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DETERMINATION AND COMPARISON OF THE NEW PROPERTIES OF A COMMON STEEL AISI 1045 WITH A COATING OF NANOPARTICULATED TUNGSTEN CARBIDE AND ALUMINA (Al₂O₃)

AUTHOR(S): Ainsser Enrique Montes Valdelamar David
Fernando Cepeda Jaraba

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

In actuality, different modifications have been made to many materials, trying to improve the chemical, physical and mechanical properties to increase lifespan, reduce costs, reduce failures and increase the applications in industry; processes as metalized, heat treatment, electrolytic and chemical coating are highly used to achieve such improves; however there are no enough data for determining these properties for different coating proportions for these materials, so it will do hardness tests, resistance under compression and wear to a common AISI 1045 steel with a nanoparticulated tungsten carbide coating layer (WC) and alumina (Al₂O₃). Tungsten carbide is a ceramic and interstitial compound formed by tungsten and carbon, due to its high toughness is widely used in industry for coating parts such as drill bits. The alumina or aluminium dioxide is the main material in the formation of glazes and clay because it provides improved properties such as hardness and melting point. In this project, testing the hardness, resistance to abrasive and adhesive wear is made, as indicated by ASTM G65-04 and ASTM G99-05 standards. To meet the parameters of these rules, the designs of the specimens for subsequent machining and sandblasting of those were made to be coated. The calculation of the number of specimens necessary to comply with a reliability of 95% was fulfilling a statistical procedure under the correlation: $n=(S^2 \cdot Z^2)/e^2$ resulting in a total of 10 test specimens for each test.

KEYWORDS:

Tungsten Carbide and alumina

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Los rociados térmicos son procesos en los cuales se proyectan materiales cerámicos, carburos o plásticos en forma de “spray” con la ayuda de gases para formar un revestimiento denso y perfectamente adherido sobre un sustrato con el fin de mitigar significativamente los problemas superficiales de los materiales usados en la industria y mejorar sus propiedades mecánicas, físicas y/o químicas. Las técnicas de rociado térmico pueden ser por combustión por llama, oxicomcombustible de alta velocidad, detonaciones; sistema de arco eléctrico, plasma con arco transferido y no transferido.

Industrias como la alimenticia, minera, aeroespacial, automotriz y de petróleo usan estas técnicas de rociado para la restauración de piezas (con el fin de ajustar las medidas a la tolerancia precisa), modificación de propiedades térmicas, fricción durante un contacto deslizante, pero más significativamente se usan para aumentar la eficiencia en la producción disminuyendo los costos de mantenimiento de las herramientas y/o máquinas de herramientas que intervienen en los procesos haciendo de los recubrimientos una estrategia rentable para combatir problemas de desgaste, corrosión a alta temperatura y acuosa, degradación y regulación térmica.

En este proyecto se utilizarán estos rociados térmicos con recubrimientos de carburo de tungsteno y alúmina sobre acero AISI 1045 para aplicar ensayos clásicos como es el PIN ON DISC, para determinar la variación de propiedades como la dureza y a resistencia al desgaste entre dicho acero en diferentes estados (normalizado, templado y revenido) con respecto al acero con el recubrimiento mencionado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de recubrimientos de WC- 15 wt. % Al_2O_3 de tamaño nanométrico, a través de ensayos ASTM de dureza y resistencia al desgaste, depositados sobre un acero AISI 1045.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar química y morfológicamente los materiales utilizados para los recubrimientos, a través de microscopía 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 microscopía electrónica de barrido FE Schottky de alta resolución, disponible en la UPB seccional Bucaramanga.

- Realizar los recubrimientos de la mezcla de WC- 15 wt. % Al_2O_3 , sobre un acero AISI 1045 a través del proceso de rociado térmico en frío.

Resultado: Recubrimientos firmemente adheridos al sustrato.

Indicador: Se utilizarán 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 válidos de las propiedades de dureza y resistencia al desgaste, mediante el uso de ecuaciones de estadística básica.

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

Indicador: Los resultados permitirán obtener una confiabilidad superior al 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. % Al_2O_3 de tamaño nanométrico, a través de la realización de ensayos mecánicos

Resultado: Gráficos de las propiedades mecánicas 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.

1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La forma en la que se selecciona un material para realizar un trabajo específico es quizá el paso más crítico que debe darse, tener en cuenta todas las propiedades del material (físicas, químicas y mecánicas) y las condiciones en las cuales trabajará (cargas, temperaturas, presión) hará que el proceso de fabricación garantice los parámetros necesarios para que el producto final cumpla con los objetivos para el cual fue desarrollado. Es por esto que se desarrolla un proyecto de grado el cual busca determinar ciertas propiedades de un acero común sometido a un recubrimiento de carburo de tungsteno (WC) – 15% wt y alúmina (Al_2O_3) de tamaño nanométrico.

Por otra parte, se aportará conocimiento importante a la facultad de ingeniería mecánica de la universidad pontificia bolivariana, en el área de investigación de materiales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ROCIADOS TÉRMICOS

El rociado térmico también llamado proceso de “Metalización por proyección” presenta ventajas de gran confiabilidad, gran rentabilidad, son prácticos, tiene como objetivo el de dar propiedades superficiales a los materiales a los que se les realizará el recubrimiento presentando propiedades superiores a los presentes en la pieza sin el proceso.

El material de aporte presenta propiedades específicas que se querrán conferir al material al que se le realizará el proceso, el material de aporte se proyecta ya sea de forma fundida o semi-fundida de manera de rociado “spray” (figura 1) dando un revestimiento denso y adherido a la superficie. El material de aporte se aplicará a una temperatura no mayor de 300°C garantizando que la pieza a recubrir no sufrirá deformaciones. El material de aporte puede ser en forma maciza o polvo¹.

El rociado térmico tiene como objetivo:

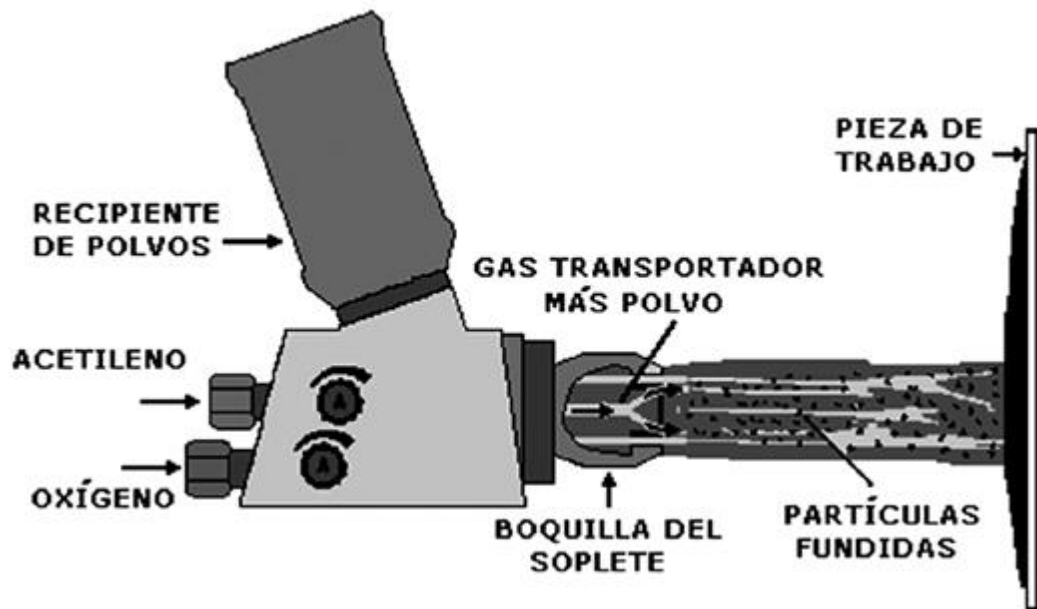
- El aumentar la resistencia al desgaste del material protegiendo su superficie.
- La protección contra la corrosión, retardando su efecto.
- Presentar valores de dureza mayores a los dados por la pieza.
- Aumentar la vida útil de una pieza o parte.
- Extender el intervalo de mantenimientos de la pieza o máquina.
- Reducir costos de reparación.

Los rociados térmicos son utilizados hoy en día en diferente número de aplicaciones ya sea:

¹ METALLISATION. Metalización por proyección. [En línea].
<http://www.lagacerogroup.com/sitiolag/images/stories/boletinmetalizacion.pdf> [Citado el 23 de Agosto 2014]

- Industria petrolera
- Industria de autopartes
- Industria metalmeccánica
- Industria petroquímica
- Industria minera
- Reemplazo en el uso del cromo
- Reemplazo en el uso de pinturas epóxicas para protección anticorrosiva.

Figura 1. Esquema del proceso de rociado térmico por llama con polvo



Fuente: Trevisan, R. & Lima, C. (2002). *AspersaoTermica Fundamentos E Aplicacoes*. Sao Paulo: Editorial Artliber.

2.2. CARBURO DE TUNGSTENO

También llamado WIDIA (“WIE DIAMANT”) “como el diamante” debido a su elevada dureza, es un compuesto cerámico formado por tungsteno y carbono. Pertenece al grupo de carburos, presenta una composición química de W_3C hasta W_6C . Utilizado en la fabricación de aceros por sus propiedades. Presenta escasa ductilidad. El carburo de tungsteno (figura 2) es utilizado en la elaboración de utensilios de corte, piezas de elevada resistencia térmica, piezas que necesitan elevada dureza incluso a elevadas temperaturas².

Figura 2. Carburo de tungsteno de tamaño nanométrico



Fuente:<http://tungsten-carbide-powder.net/spanish/index.html>

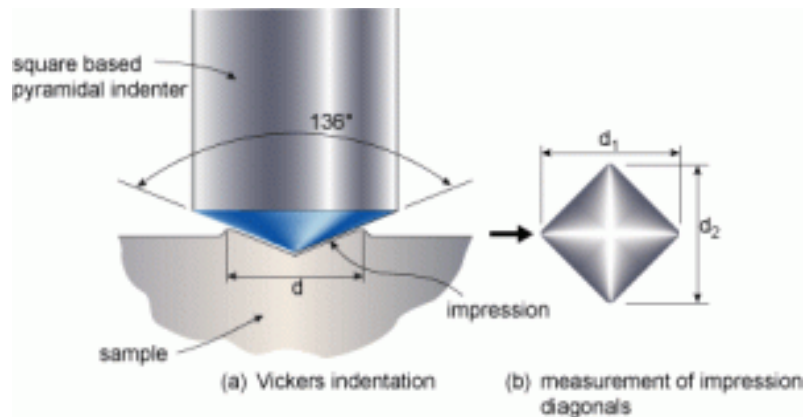
2.3. ENSAYO DUREZA

El ensayo de dureza como se muestra en la figura 3, representa una alternativa relativamente sencilla al ensayo de tracción. La resistencia del material a la penetración indica su resistencia de forma cualitativa. El penetrador puede ser tanto redondeado como puntiagudo y es de un material mucho más duro que el de la pieza que se ensaya, ejemplo acero endurecido, carburo de wolframio o diamante.

²Carburo de Tungsteno. Carburo de Tungsteno. [En Línea].
<http://www.lagacero group.com/sitiolag/images/stories/boletinmetalizacion.pdf>[Citado el 23 De Agosto 2014]

Los índices de dureza empíricos se calculan a partir de fórmulas adecuadas que emplean medidas de la geometría de la huella creada por la indentación³.

Figura 3. Medición de dureza



Fuente: Propiedades físico - mecánicas de los materiales. Nov 2013
<<http://fradeblogs.wordpress.com/>>

2.4. DESGASTE ABRASIVO

La norma ASTM G65-04 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción de partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella. La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste por deslizamiento es el grado de desgaste entre los cuerpos involucrados (mayor en el desgaste abrasivo), ya sea por la naturaleza, tipo de material, composición química o por la configuración de la geometría.

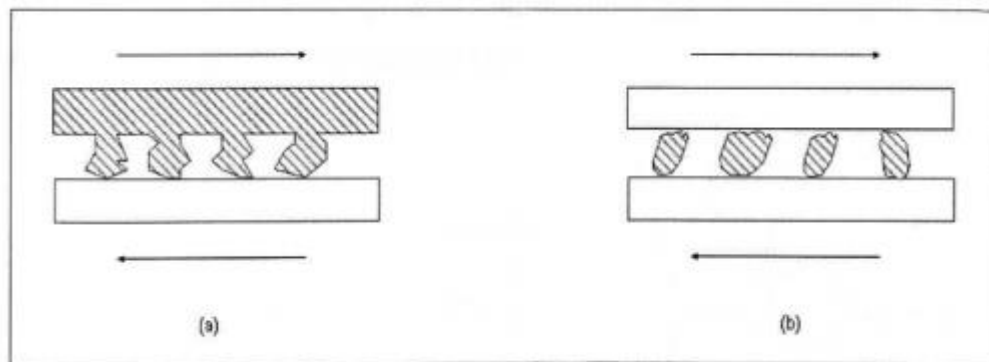
Existen básicamente dos tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo de dos cuerpos o de tres cuerpos (figura 4). En abrasión de dos cuerpos, el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto⁴.

³ SMITH, William. Fundamentos De La Ciencia E Ingeniería De Materiales. México: McGraw- Hill 2004. 227P

⁴ EcuRed. Desgaste Abrasivo. [En Línea].
http://www.ecured.cu/index.php/Desgaste_abrasivo[Citado el 23 De Agosto 2014]

En abrasión de tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo. Como ejemplo de desgaste abrasivo a dos cuerpos se tiene un taladro penetrando una roca, mientras que a tres cuerpos se puede citar el desgaste sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar la roca, o por la presencia de partículas contaminantes en un aceite que sirve para lubricar las superficies en contacto deslizante.

Figura 4. (a) Abrasión de dos cuerpos. (b) Abrasión de tres cuerpos



Fuente: tribología, fricción, desgaste y lubricación. Laboratorio de tecnología de materiales. Unam. Felipe del castillo. Cautitlan Izcalli 2007.

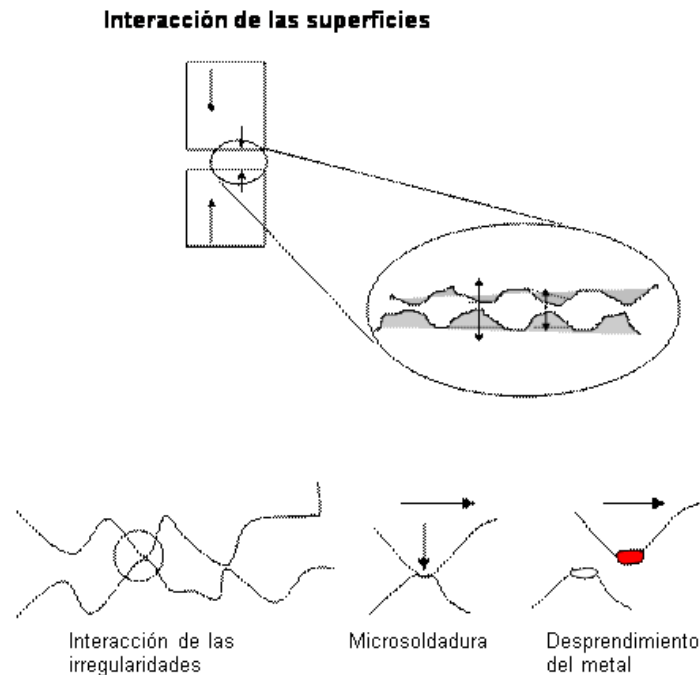
2.5. DESGASTE ADHESIVO

Es la pérdida lenta de material en las rugosidades de las dos superficies que se encuentran en movimiento relativo como resultado del impacto de partículas sólidas o metálicas en suspensión en el aceite de un tamaño mucho menor que el mínimo espesor de la película lubricante.

Estas partículas al entrar en la zona de la película lubricante, cambian su trayectoria lineal como resultado del cambio de presiones, se desordenan y chocan con las rugosidades, es posible que cuando empiezan a chocar no causen

desgaste, pero van fatigando poco a poco las superficies que impactan hasta que finalmente dan lugar al desprendimiento de material⁵

Figura 5. Características desgaste adhesivo



Fuente: capítulo 3. Desgaste. López. < <http://lopezva.files.wordpress.com> >

2.6. NORMA ASTM G99-05⁶

La norma ASTM G99-05, establece parámetros principales para la realización de ensayos de desgaste mediante el uso de un tribómetro pin-on-disk, dentro de la cual se exponen las condiciones de la prueba, tales como carga aplicada, velocidad, distancia lineal recorrida, entre otras (tabla 1).

El equipo pin-on-disk consiste en un disco giratorio sobre el que se coloca uno de los materiales bajo ensayo y que es cargado a través de un elemento (del otro

⁵ Textos Científicos. Desgaste Erosivo [En línea]
<http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion>[Citado 23 De Agosto 2014]

⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk apparatus. United States: ASTM, 2010. (ASTM G99-05).

material de ensayo) tipo punzón-bola o superficie plana por medio de un peso conocido que puede ser hasta de 60N. El sistema es controlado por un ordenador y se pueden obtener y registrar parámetros como: fuerza de rozamiento, coeficiente de rozamiento, desgaste y temperatura.

Tabla 1. Ejemplo condiciones para ensayo tribómetro pin-on-disk

condiciones de la prueba			
Carga aplicada [N]			
Velocidad angular [RPM]			
Distancia recorrida [M]			
Numero de giros			
Temperatura de trabajo [°C]			

Fuente: Norma ASTM G99-05 (REAPROBADA EN EL 2010)

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

La norma ASTM G65 – 04 (Reprobada en el 2010) presenta un parámetro de manejo en los laboratorios para la determinación de la resistencia de un material metálico al desgaste por abrasión por medio de un chorro de arena seca y una rueda de caucho, la unidad con la que se mide este tipo de ensayos está dada en milímetros cúbicos, entre mayor sea el volumen perdido menor resistencia a la abrasión tiene el metal, al momento de realizar las pruebas debe contarse con una variación de velocidades y cargas aplicadas las cuales se encuentran

⁷ ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010) método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho.

especificadas en la norma, el diseño y parámetros de medidas para la realización de la maquina también son brindados por la norma.

2.8. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Conocida por sus siglas inglesas SEM, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la muestra, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes. La microscopía electrónica de barrido permite la observación y caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos en escalas nanométricas y micrométricas; además de tener la capacidad de obtener imágenes tridimensionales de superficies en un amplio rango de materiales. El mayor uso de la microscopía electrónica de barrido es el de obtener imágenes topográficas a muy altas magnificaciones.

3. METODOLOGÍA

3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Búsqueda de información acerca de la metalización en frío para conocer del tema y saber de cómo se lleva a cabo, dado que este procedimiento ya es realizado en la industria, se da tiempo para el estudio y así saber cuál es la mejor forma de hacer la metalización o rociado térmico.

3.2. REVISIÓN DE EQUIPOS PARA LAS PRUEBAS.

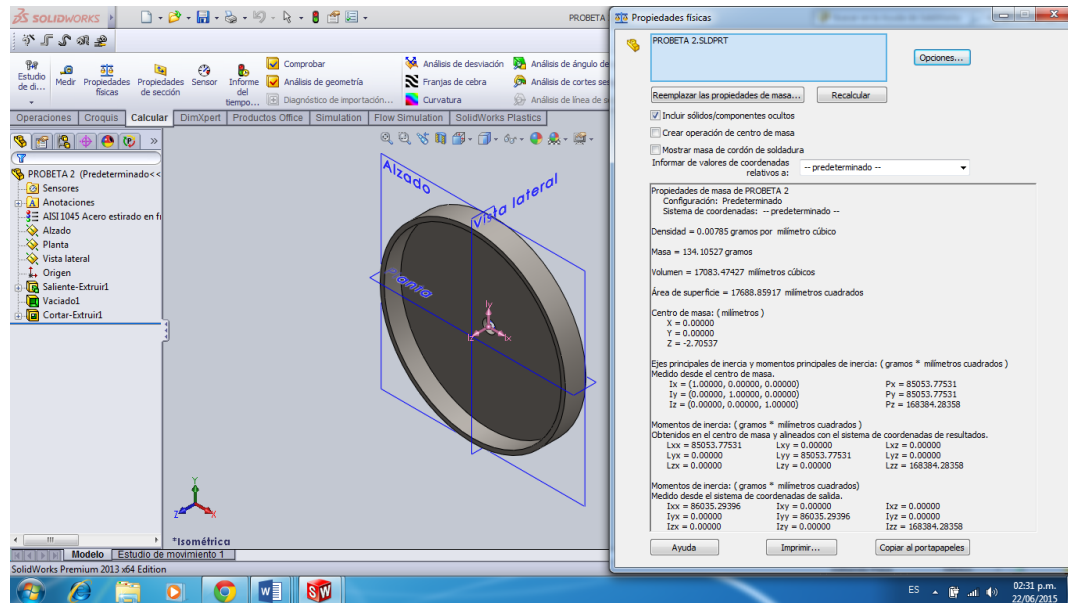
Revisar y comprobar el buen funcionamiento de los equipos para la realización de las pruebas de Desgaste y Dureza.

3.3. DISEÑO Y MAQUINADO DE PROBETAS.

Se realizarán las probetas de acero AISI 1045 según la norma para este tipo de ensayos, la cual indica las medidas tanto para las probetas redondas (figura 6) como las rectangulares (figura 7) y de igual forma suministra información acerca del maquinado (figura 8) al cual éstas se verán sometidas antes de ser objeto de pruebas destructivas para determinar el comportamiento del recubrimiento.

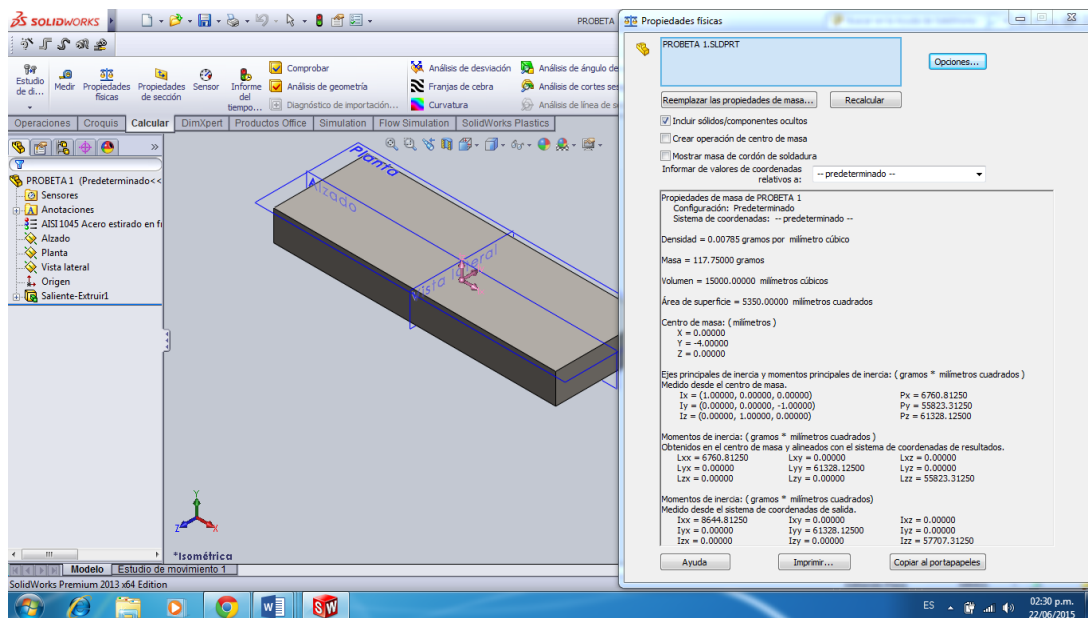
A las probetas redondas y rectangulares se les dieron un acabado superficial tipo 2 triángulos (llevan como símbolo 2 triángulos las superficies cuya uniformidad y alisado se consiguen mediante uno o más alisados con desprendimiento de viruta) con el fin de que al aplicar las cargas en el ensayo de dureza, al hacer los respectivos rayados en el de resistencia al desgaste adhesivo y resistencia al desgaste abrasivo, no existieran imperfecciones en la superficie del material que pudiera afectar la aplicación del ensayo y/o los resultados del mismo.

Figura 6. Diseño de probeta redonda



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 7. Diseño de probeta rectangular



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 8. Mecanizado de probetas



Fuente: Autores del proyecto.

3.4. CÁLCULO DEL NÚMERO DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS ESTADÍSTICAMENTE CONFIABLES.

Con el fin de obtener una confiabilidad del 95% en los resultados obtenidos, se realizarán pruebas a 5 probetas para cada tipo de ensayo y así medir la dureza, resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo; con los resultados obtenidos, se usa la siguiente ecuación:

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

Donde:

n = Tamaño de la muestra para una confiabilidad específica

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

Z= Variable obtenida de la tabla para la distribución normal para una confiabilidad del 95 %

e = Máximo error permisible en los datos obtenidos del ensayo

3.5. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y QUÍMICA DEL CARBURO DE TUNGSTENO Y ALÚMINA

Utilizando la técnica SEM (microscopía electrónica de barrido) y la EDS (espectroscopía de dispersión de energía de rayos x), se determinará la forma, el tamaño de las partículas de los elementos que componen el recubrimiento (carburo de tungsteno y alúmina) y la composición química de los mismos. Específicamente la técnica EDS, entrega un reporte del espectro, identificación de los elementos con porcentajes en peso atómico y número atómico de los elementos.

3.6. DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS

El rociado térmico se aplica con una antorcha especial la cual atomiza el oxígeno y el acetileno, proyectando las partículas hacia el metal base. Para la metalización se emplea polvo a base de níquel. El metalizado tiene la función de evitar la oxidación del acero durante la aplicación del carburo de tungsteno.

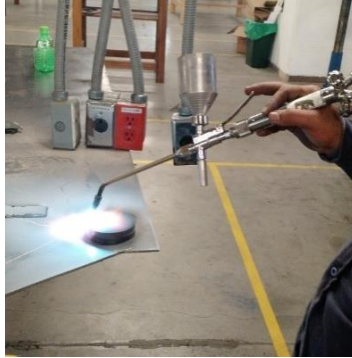
Se ajusta la llama de trabajo (figura 9). Para el acetileno, emplear alrededor de 10 PSI, para el oxígeno, emplear alrededor de 40 PSI. Ajustar la llama más o menos a ½" de longitud, de tal forma que se tenga una llama azul limpia. Si se necesita más calor durante la aplicación, aumentar la presión de oxígeno a 50 PSI y de acetileno a 12 PSI.

Precalear el área a ser metalizada, a una temperatura entre 150°C y 180°C, mediante quemador aire gas. Verificar dicha temperatura. Cuando se empleen tizas térmicas, tener la precaución de no contaminar el sitio a metalizar. Evitar que el metal adquiera coloración azul, un leve amarillamiento del área, indica un límite de temperatura aceptable, el cual no es nocivo para la adherencia.

Aplicar una capa delgada de aleación nanoparticulada. La capa debe ser lo suficientemente gruesa para que cubra el área de aplicación. La capa de

metalizado es necesaria solamente para la primera aplicación del carburo de tungsteno fundido al metal base⁸.

Figura 9. Deposición del recubrimiento



Fuente: Autores del proyecto.

3.7. ENSAYOS

Los ensayos fueron aplicados a 2 tipos de probetas, redondas y rectangulares, cada tipo de probeta fueron fabricadas en acero AISI 1045. Los tipos de probetas se dividieron en 3 lotes diferentes, el primero fue de probetas normalizadas, el segundo de probetas templadas y revenidas y el tercero de probetas con el recubrimiento de carburo de tungsteno (WC) y alúmina (Al_2O_3).

3.7.1. Proceso de templado y revenido

Estos tratamientos térmicos fueron aplicados a las probetas necesarias, para obtener una confiabilidad del 95%. El templado se hizo a una temperatura de 850°C y enfriado rápido en aceite y el revenido a 300°C y enfriado lento (aire en convección natural).

3.7.2. Ensayos de dureza

En este ensayo se usó el durómetro INSIZE ISH-PHA (figura 12), el cual permite tener una lectura mínima de 1 HLD, 1 HV, 1 HB, 0.1 HRC, 0.1 HRB. Se realizaron

⁸ Manual de procedimientos/metalización/ talleres unidos Ltda.

ensayos de dureza con este instrumento a las probetas normalizadas y recubiertas, para las templadas y revenidas, se usó un durómetro KARL FRANK L003, tal como se evidencia en las figuras 10 y 11.

Figura 10. Ensayo de dureza



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 11. Ensayo de dureza



Fuente: Autores del proyecto

Figura 12. Durómetro



Fuente: <http://www.insize.ir/products/instruments/42%20MODEL%20ISHPHAPORTABLE%20HARDNESS%20TESTER.php>

3.7.3. Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo

Los ensayos de resistencia al desgaste adhesivo se hicieron según las especificaciones de la norma ASTM G99-05 “método de prueba estándar para ensayos de desgaste con una máquina de pin-on-disk”. Este método consiste en aplicar una carga sobre la probeta en movimiento (figura 13) durante un tiempo determinado, garantizando así que la distancia recorrida sea la que figura en la norma (tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de la prueba de desgaste adhesivo

CONDICIONES DE LA PRUEBA			
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: Autores del proyecto.

Figura 13. Prueba de desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto.

3.7.4. Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo.

Este ensayo se hace bajo la norma ASTM G65-04 (RE-APROBADA 2010) método de prueba estándar para pruebas de desgaste abrasivo con una rueda de caucho y arena teniendo en cuenta las condiciones de trabajo que se especifican en la tabla 3 y las siguientes recomendaciones:

- Limpiar adecuadamente y de manera minuciosa los especímenes, con el fin de evitar algún tipo de impureza.
- Pesarse cada uno de las probetas a ensayar.
- Especificar en la máquina (figura 14) la magnitud de la velocidad de la rueda de caucho, la cual debe girar a 300 RPM.
- Ajustar el flujo de arena a través de la boquilla entre 300 y 400 g/min. La rotación de la rueda se debe iniciar cuando la cortina de arena sea uniforme. El tiempo entre pruebas debe ser el necesario para que la rueda vuelva a la temperatura ambiente, para el procedimiento B este debe ser superior a 30 minutos.
- Sujetar la probeta en el soporte de la máquina y añadir los pesos apropiados al brazo de la palanca para desarrollar la fuerza requerida en el ensayo.
- Ajustar del contador de revoluciones en el número definido para el procedimiento especificado.
- Iniciar el giro de la rueda y bajar inmediatamente el brazo de palanca para permitir que la probeta entre en contacto con la rueda.
- Separar la probeta de la rueda y apagar el equipo de ensayo. El flujo de arena debe medirse antes y después de la prueba.
- Remover la probeta ensayada y volver a realizar el pesaje de la misma.
- Obtener la pérdida de masa para cada uno de las probetas ensayadas y finalmente utilizar la ecuación para convertir la pérdida de masa en pérdida de volumen.

Tabla 3. Condiciones de la prueba 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
D	130 (30)	100	71.8	236

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 14. Maquinaria para la prueba de desgaste abrasivo



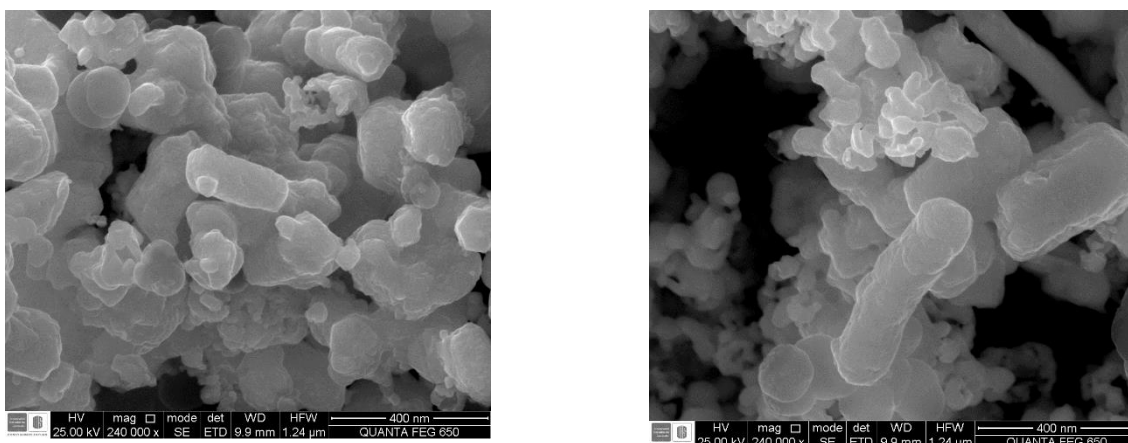
Fuente: Autores del proyecto.

4. RESULTADOS Y ANALISIS.

4.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y QUÍMICAS DEL CARBURO DE TUNGSTENO Y ALÚMINA

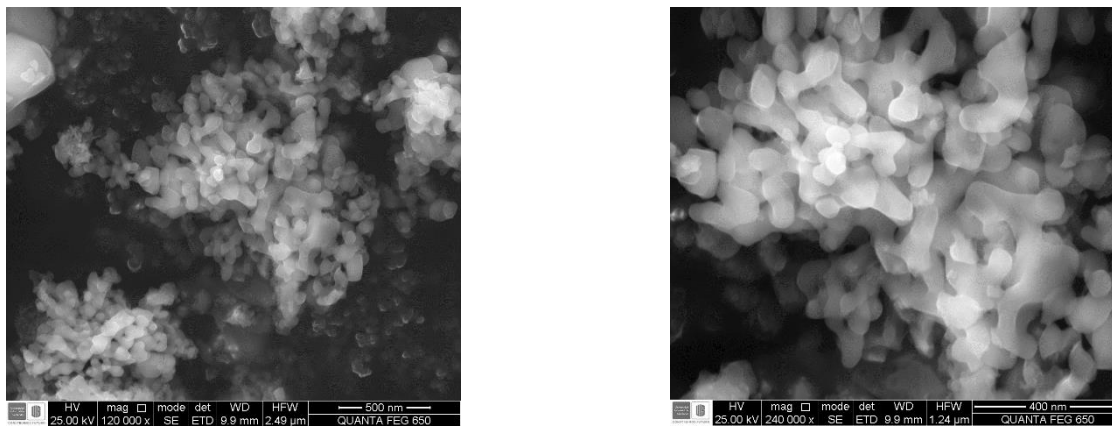
Las muestras de carburo de tungsteno y alúmina analizadas en el microscopio, permiten determinar la morfología de estas sustancias; un ejemplo de ellas se relaciona en la figura 15 y 16.

Figura 15. Imágenes de las partículas de carburo de tungsteno obtenidas mediante SEM



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 16. Imágenes de las partículas de alúmina obtenidas mediante SEM



Fuente: Autores del proyecto.

En las figuras 15 y 16, mostradas anteriormente, se puede observar que tanto el carburo de tungsteno como la alúmina utilizados tienen una gran cantidad de partículas con formas geométricas irregulares, mientras que en menor proporción presentan una tendencia a poseer formas geométricas cilíndricas. También se puede afirmar que el tamaño de las partículas está en el orden de los nanómetros, ya que las escalas de las imágenes son para el carburo de tungsteno y la alúmina de 400nm y 500nm respectivamente. Además de esto, se realizan mediciones en las cuales se toman muestras al azar dentro de las figuras 15 y 16 las cuales se tabulan (tabla 4 y 5 respectivamente) y se toman medidas a escala para determinar el tamaño real de las partículas.

Tabla 4. Medición de partículas de Carburo de tungsteno

medición en la figura 15		
item	tamaño [cm]	tamaño real [nm]
1	0,5	100
2	0,2	40
3	0,7	140
4	0,3	60
5	0,3	60

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 5. Medición de partículas de Alúmina

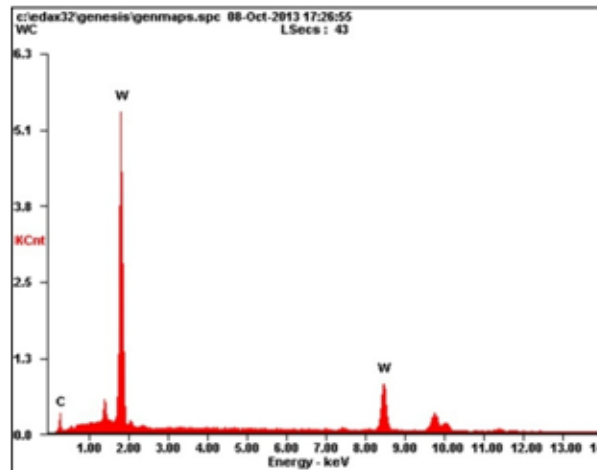
medición en la figura 16		
item	tamaño [cm]	tamaño real [nm]
1	0,3	60
2	0,5	100
3	0,6	120
4	0,4	80
5	0,2	40

Fuente: Autores del proyecto.

Como se muestra en las tablas anteriores, se encuentran tamaños de partículas para sendos compuestos hasta 40 nanómetros [nm].

Los análisis de EDS para el carburo de tungsteno y la alúmina obtenidos a través de microscopía electrónica de barrido se muestran en las figuras 17 y 18; de igual manera en las tablas 4 y 5 se relacionan los porcentajes de peso atómico de cada material, los cuales se comparan con las relaciones porcentuales teniendo como referencia la tabla periódica de los elementos, esto para comprobar la composición de los mismos.

Figura 17. Gráfica EDS carburo de tungsteno



Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 6. Proporción de 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 de la alúmina es:

$$\text{At C} = 12.01 \text{ g/mol}$$

$$\text{At W} = 183.85 \text{ g/mol}$$

$$\text{At WC} = 195.86 \text{ g/mol}$$

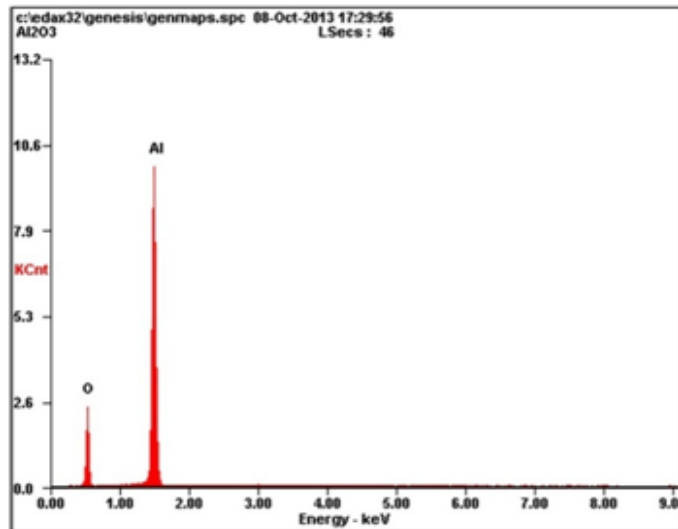
$$\% \text{At W} = (\text{At W} / \text{At WC}) * 100 = 93.87\%$$

$$\% \text{At C} = (\text{At C} / \text{At WC}) * 100 = 6.13\%$$

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

$$e = (At\ W_r - At\ W_m) * 100 / At\ W_r = 62.50\%$$

Figura 18. Grafica EDS alúmina



Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 7. Proporción de peso y número atómico alúmina

Elemento	Wt%	At%
Oxigeno (O)	38,35	51,20
Aluminio (Al)	61,65	48,80

Fuente: Autores del proyecto.

El análisis teórico para determinar la composición elemental de la alúmina es:

$$At\ Al = 26.98\ g/mol$$

$$At\ O = 15.99\ g/mol$$

$$At\ Al_2 = 53.96\ g/mol$$

$$At\ O_3 = 47.97\ g/mol$$

$$At\ Al_2O_3 = 101.93\ g/mol$$

$$\%At\ Al_2 = (At\ Al_2 / At\ Al_2O_3) * 100 = 52.93\%$$

$$\%At\ O_3 = (At\ O_3 / At\ Al_2O_3) * 100 = 47.07\%$$

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

$$e = (At_{Al_2r} - At_{Al_2m}) * 100 / At_{Al_2r} = 7.8\%$$

Los resultados obtenidos permiten concluir que los elementos presentes en la muestra son efectivamente Al, W, C y O; sin embargo existe una diferencia entre datos teóricos esperados y los obtenidos de manera experimental, esto puede ser por el tipo de análisis realizado, ya que el EDS es un análisis semicuantitativo, donde pueden existir errores un poco mayores, como el evidenciado en el caso del carburo de tungsteno. Debido a esto se puede afirmar que el material utilizado para realizar los depósitos son efectivamente carburo de tungsteno y alúmina.

4.2 ENSAYO DE DUREZA.

Según el manual de procedimientos de Talleres Unidos LTDA. Y apoyados en el manual del durómetro usado, para tener una medida estadísticamente confiable, se deben realizar 5 ensayos de dureza por cada tipo de probeta (redondas y rectangulares) y de las diferentes variaciones de las mismas (normalizadas, templadas y revenidas y probetas con el recubrimiento). Los resultados se muestran en las tablas 8, 9, 10, 11, 12, 13 y figura 19.

Tabla 8. Dureza probetas rectangulares normalizadas

PROBETAS RECTANGULARES NORMALIZADAS						
	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	37,80	39,99	38,82	39,23
5	39,22	38,83	39,45	38,72	38,71	38,99

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 9. Dureza probetas rectangulares templadas y revenidas

PROBETAS RECTANGULARES TEMPLADAS Y REVENIDAS						
	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 del proyecto.

Tabla 10. Dureza probetas rectangulares con el recubrimiento

PROBETAS RECTANGULARES CON EL RECUBRIMIENTO						
	punto 1 [HRC]	punto 2 [HRC]	punto 3 [HRC]	punto 4 [HRC]	punto 5 [HRC]	promedio [HRC]
1	24,37	25,26	24,42	15,66	25,34	23,01
2	18,18	23,74	22,13	22,79	24,18	22,20
3	18,42	23,20	19,68	22,69	21,68	21,13
4	17,81	20,66	19,72	24,32	21,52	20,81
5	21,18	17,19	17,85	20,16	18,55	18,98

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 11. Dureza probetas redondas normalizadas

PROBETAS REDONDAS NORMALIZADAS						
	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	38,60	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. Dureza probetas redondas templadas y revenidas

PROBETAS REDONDAS TEMPLADAS Y REVENIDAS						
	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

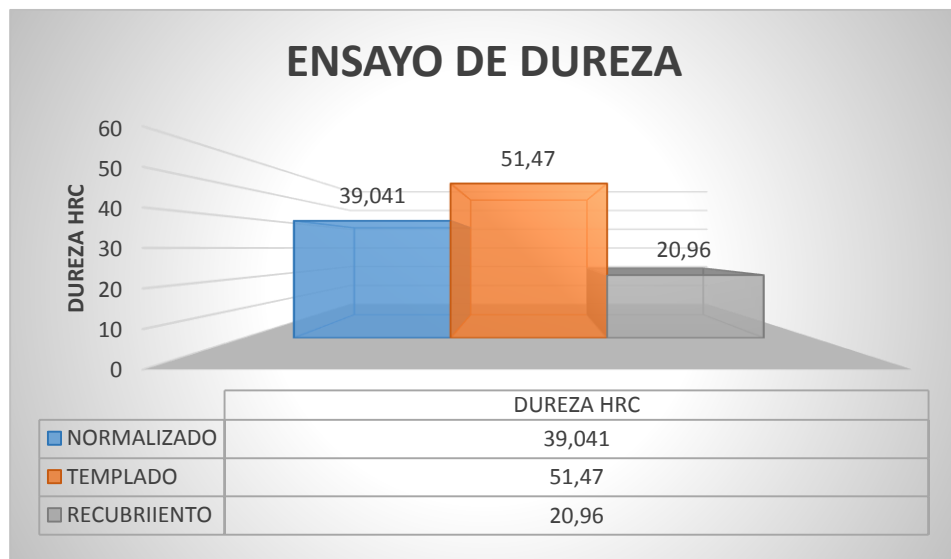
Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 43. Dureza probetas redondas con el recubrimiento

PROBETAS REDONDAS CON EL RECUBRIMIENTO						
	punto 1 [HRC]	punto 2 [HRC]	punto 3 [HRC]	punto 4 [HRC]	punto 5 [HRC]	promedio [HRC]
1	20,43	22,27	21,74	20,05	18,89	20,68
2	19,24	20,78	20,57	20,92	20,52	20,41
3	22,06	19,78	20,22	20,36	19,22	20,33
4	21,36	20,19	21,79	19,33	20,95	20,72
5	20,46	21,82	21,52	20,94	21,92	21,33

Fuente: Autores del proyecto.

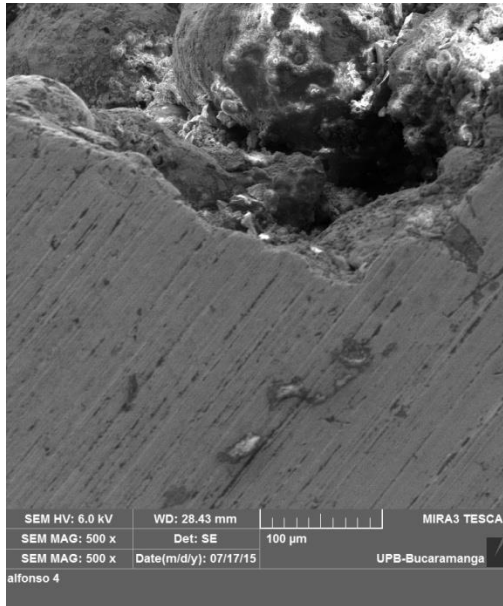
Figura 19. Resultado de ensayo de dureza



Fuente: Autores del proyecto.

Analizando los resultados arrojados por la figura 19, se puede inferir que la dureza en el acero AISI 1045 después de un proceso de templado y revenido, mejora en un 31.84% y disminuye en 46.31% después de aplicar el recubrimiento, sin embargo, y como se muestra en la figura 20, la capa del recubrimiento sobre el acero no es uniforme por lo tanto los resultados del ensayo de dureza en las probetas con el recubrimiento presentan un error en el método.

Figura 20. Superficie de la capa de recubrimiento de Carburo de tungsteno y alúmina



Fuente: Autores del proyecto.

4.3 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO

Siguiendo la metodología sugerida en la norma ASTM G99-05 “método de prueba estándar para ensayos de desgaste con una máquina de pin-on-disk”, se obtienen unas huellas circulares en las probetas causadas por el desgaste, tal cual se pueden observar en la figura 21.

Figura 20. Ensayo de resistencia al desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto.

En el cálculo del número de ensayos necesarios para obtener una confiabilidad del 95% y un error máximo del 5%, (tabla 14, 15 y 16), se determina un número de 10 ensayos para que los resultados sean confiables, una vez realizados estos 10 ensayos se determina el promedio de pérdida en volumen de las mismas después de cada ensayo como se muestra (tablas 17, 18, 19 y figura 22).

Tabla 54. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo

DIFERENCIA EN VOLÚMEN DE LAS PROBETAS REDONDAS NORMALIZADAS [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,00160365	0,02186837	0,05459023
2	0,00170170	0,02147558	0,06120299
3	0,00178981	0,01954565	0,05159448
4	0,00176433	0,02056900	0,05120382
5	0,00184076	0,01825902	0,04997473
PROMEDIO	0,001740051	0,020343524	0,053713253
DESV. EST.	9,12198E-05	0,001469633	0,004517418
ERROR 5%	8,70025E-05	0,001017176	0,002685663
NUM. ENSAYOS	4	8	10

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 15. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo

DIFERENCIA EN VOLÚMEN DE LAS PROBETAS REDONDAS TEMPLADAS [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,00124756	0,00504926	0,00231805
2	0,00140291	0,00437665	0,00213805
3	0,00132696	0,00517070	0,00232272
4	0,00133189	0,00531189	0,00217265
5	0,00115902	0,00475372	0,00262420
PROMEDIO	0,001293669	0,004932442	0,002315134
DESV. EST.	9,32179E-05	0,000372574	0,000191866
ERROR 5%	6,46834E-05	0,000246622	0,000115757
NUM. ENSAYOS	8	8	10

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 16. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste adhesivo

DIFERENCIA EN VOLÚMEN DE LAS PROBETAS REDONDAS CON RECUBRIMIENTO [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,00113588	0,00148662	0,00223928
2	0,00099153	0,00152866	0,00221452
3	0,00115478	0,00172399	0,00260870
4	0,00107643	0,00161083	0,00240828
5	0,00095117	0,00176327	0,00259660
PROMEDIO	0,00106196	0,00162268	0,00241348
DESV. EST.	8,87754E-05	0,000119917	0,000188152
ERROR 5%	5,30979E-05	8,11338E-05	0,000120674
NUM. ENSAYOS	10	8	9

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 67. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas normalizadas

PÉRDIDA PROBETAS REDONDAS NORMALIZADAS [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,0015525352	0,0184451672	0,0495480677
2	0,0012220822	0,0181595914	0,0594458016
3	0,0016622067	0,0190623197	0,0553934266
4	0,0012150173	0,0176105507	0,0595562620
5	0,0013605892	0,0216194558	0,0633829937
6	0,0014330026	0,0238433817	0,0532276262
7	0,0017005141	0,0239780912	0,0545036982
8	0,0015550149	0,0172815203	0,0517333310
9	0,0012996736	0,0233806693	0,0638966114
10	0,0009579655	0,0212494254	0,0580166379
PROMEDIO	0,0013958601	0,0204630173	0,0568704456
DESV. EST.	0,000230979	0,002663519	0,004807407

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 18. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas templadas y revenidas

PÉRDIDA PROBETAS REDONDAS TEMPLADAS [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,000969207	0,005825650	0,006965796
2	0,001072173	0,005867933	0,007924468
3	0,001480175	0,005785639	0,016901945
4	0,001305561	0,006064145	0,016534991
5	0,001461336	0,004411214	0,013855187
6	0,001349738	0,005013167	0,017288658
7	0,001944249	0,005901491	0,007594279
8	0,001794571	0,005812225	0,007347326
9	0,001220356	0,004551589	0,014981071
10	0,000987534	0,005470974	0,015281170
PROMEDIO	0,0013584901	0,0054704026	0,0124674893
DESV. EST.	0,000325192	0,000597586	0,004428257

Fuente: Autores del proyecto.

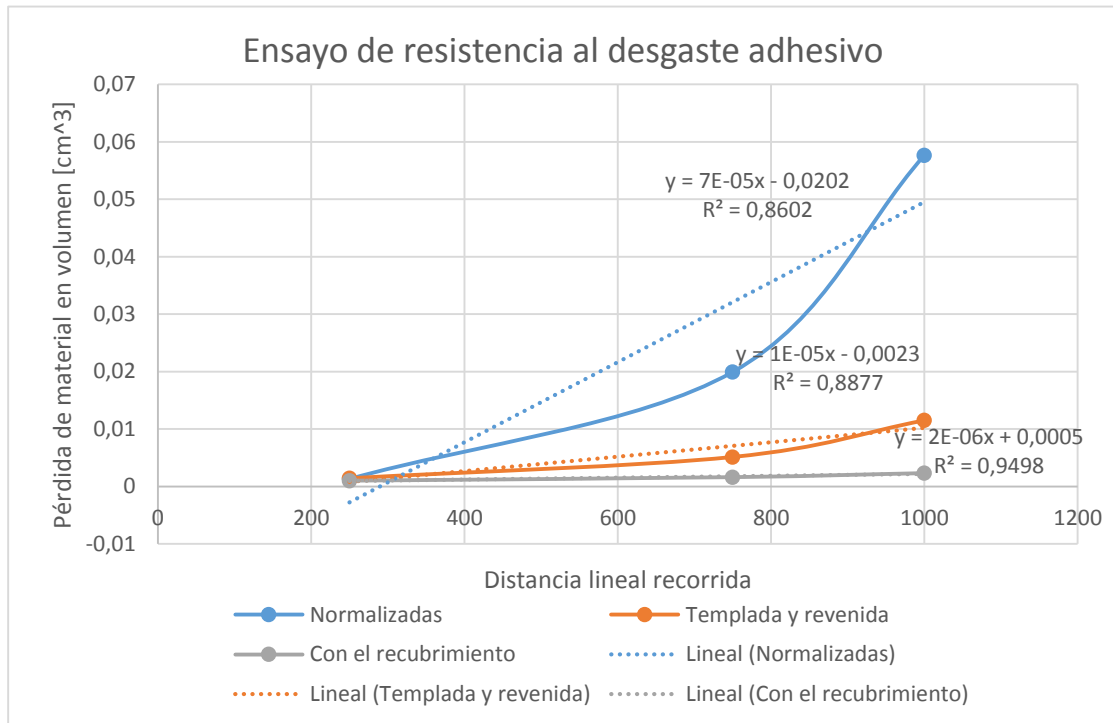
Tabla 79. Pérdida de material ensayos desgaste adhesivo probetas con recubrimiento

PERDIDA PROBETAS REDONDAS RECUBRIMIENTO [cm³]			
ITEM	250 [m]	750 [m]	1000 [m]
1	0,0008904527	0,0015774016	0,0022530373
2	0,0009734685	0,0014617696	0,0022665996
3	0,0011405322	0,0013787971	0,0024640898
4	0,0011579915	0,0013876878	0,0023527772
5	0,0011235577	0,0018822555	0,0022416351
6	0,0008947155	0,0015903896	0,0022683435
7	0,0008588226	0,0017303682	0,0023672112
8	0,0009481693	0,0013655634	0,0023982999
9	0,0009511553	0,0012868073	0,0021777503
10	0,0012076257	0,0019210116	0,0021940481
PROMEDIO	0,0010146491	0,0015582052	0,0022983792
DESV. EST.	0,000128984	0,000223361	9,29548E-05

Fuente: Autores del proyecto.

Tabulando los resultados obtenidos (figura 22) se puede concluir que al aplicar el rociado térmico con el recubrimiento de alúmina y carburo de tungsteno sobre un acero AISI 1045, la resistencia al desgaste adhesivo mejora significativamente.

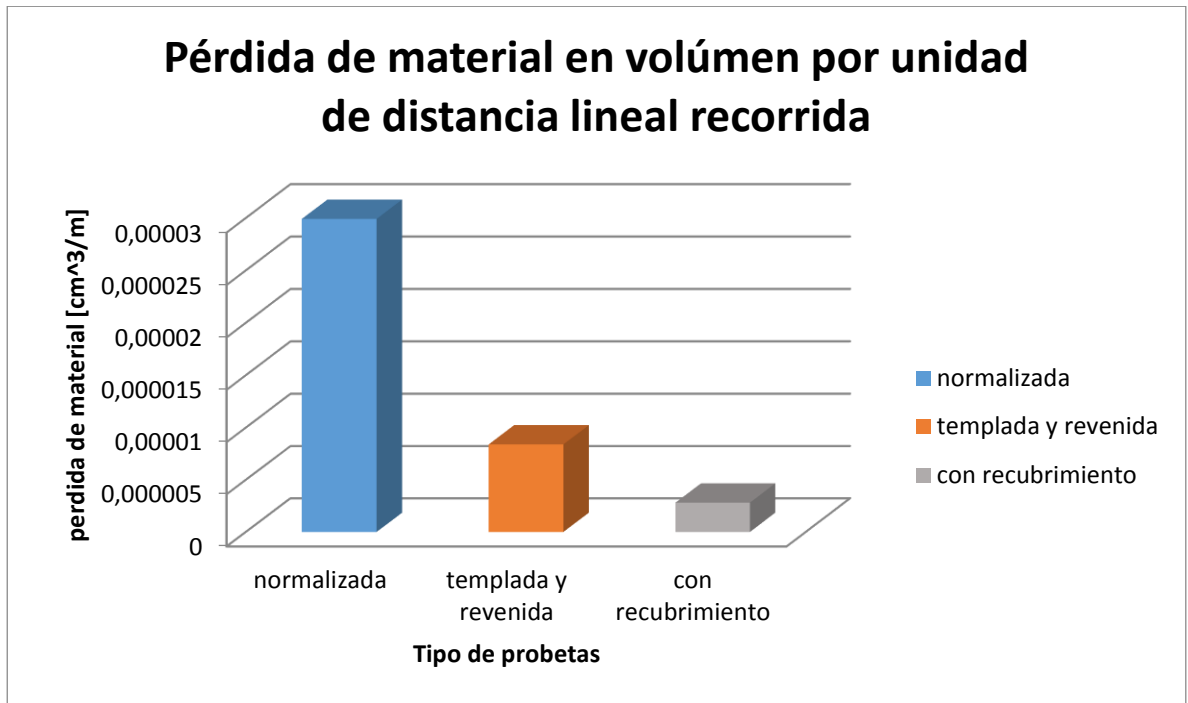
Figura 21 Resultados ensayos de resistencia al desgaste adhesivo.



Fuente: Autores del proyecto.

Para complementar y hacer más claro en análisis de los resultados, se define el volúmen del material perdido por unidad de distancia lineal recorrida como se puede ver en la figura 23.

Figura 22. Comparación de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en los ensayos de desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto.

Claramente se observa que en las probetas con recubrimiento de alúmina y carburo de tungsteno la pérdida de material es mucho menor, lo que ratifica el mejoramiento de la resistencia al desgaste adhesivo.

4.4 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO

Tal y como se muestra en la figura 24, el ensayo de resistencia al desgaste abrasivo, deja una huella sobre la probeta lo cual indica la remoción de material.

Figura 23. Huella sobre las probetas luego de ser sometidas al desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto.

En el cálculo del número de ensayos necesarios para obtener una confiabilidad del 95% y un error máximo del 5%, (tabla 20, 21 y 22), se determina un número de 10 ensayos para que los resultados sean confiables, una vez realizados estos 10 ensayos se determina el promedio de pérdida en volumen de las mismas después de cada ensayo como se muestra (tablas 23, 24, 25 y figura 22).

Tabla 20. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo

PÉRDIDA DE MATERIAL PROBETAS NORMALIZADAS [cm³]				
ITEM	A(30 min)	B(15 min)	C(5 min)	D(0,5 min)
1	0,06988535	0,03332059	0,01110828	0,00099720
2	0,06685350	0,03497240	0,01138854	0,00104268
3	0,07180042	0,03401274	0,01075159	0,00113376
4	0,06701062	0,03453503	0,01005096	0,00092611
5	0,06966879	0,03519745	0,01115924	0,00110828
PROMEDIO	0,06904374	0,03440764	0,01089172	0,00104161
DESV. EST.	0,002099347	0,000757727	0,000522448	8,40371E-05
ERROR 5%	0,003452187	0,001720382	0,000544586	5,20803E-05
NUM. ENSAYOS	2	1	4	10

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 21. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo

PÉRDIDA DE MATERIAL PROBETAS TEMPLADAS [cm³]				
ITEM	A(30 min)	B(15 min)	C(5 min)	D(0,5 min)
1	0,09453928	0,06132059	0,02328662	0,00231936
2	0,09242038	0,05141401	0,02169427	0,00211465
3	0,09383439	0,05384713	0,02219745	0,00232548
4	0,09229299	0,06109554	0,02150318	0,00208917
5	0,10447134	0,06017834	0,02012611	0,00220637
PROMEDIO	0,09551168	0,05757113	0,02176153	0,00221101
DESV. EST.	0,005097803	0,004611284	0,00114693	0,000110674
ERROR 5%	0,004775584	0,002878556	0,001088076	0,00011055
NUM. ENSAYOS	4	10	4	4

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 22. Muestra para obtener número de ensayos necesarios para desgaste abrasivo

PÉRDIDA DE MATERIAL PROBETAS CON RECUBRIMIENTO [cm³]				
ITEM	A(30 min)	B(15 min)	C(5 min)	D(0,5 min)
1	0,04465393	0,02212739	0,00650955	0,00043312
2	0,03989809	0,02043312	0,00806369	0,00040764
3	0,04196178	0,02066242	0,00779618	0,00042038
4	0,04281529	0,01992357	0,00793631	0,00035669
5	0,04037580	0,02197070	0,00773248	0,00036943
PROMEDIO	0,04194098	0,02102344	0,00760764	0,00039745
DESV. EST.	0,001920165	0,000975261	0,000627083	3,29737E-05
ERROR 5%	0,002097049	0,001051172	0,000380382	1,98726E-05
NUM. ENSAYOS	3	3	10	10

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 23. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas normalizadas

PÉRDIDA PROBETAS RECTANGULARES NORMALIZADAS [cm³]				
1	0,06594	0,03260	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	0,01170	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	0,01140	0,00078
10	0,06750	0,03313	0,01028	0,00111
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
Promedio	0,06745	0,03410	0,01067	0,00095

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 24. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas templadas y revenidas

PÉRDIDA PROBETAS RECTANGULARES TEMPLADAS [cm³]				
1	0,09368	0,06176	0,02131	0,00201
2	0,09185	0,05847	0,02132	0,00226
3	0,09350	0,05993	0,02100	0,00213
4	0,09370	0,06185	0,02191	0,00225
5	0,09430	0,05726	0,02140	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	0,02130	0,00192
10	0,09327	0,05746	0,02153	0,00221
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
Promedio	0,09351	0,05815	0,02137	0,00210

Fuente: Autores del proyecto.

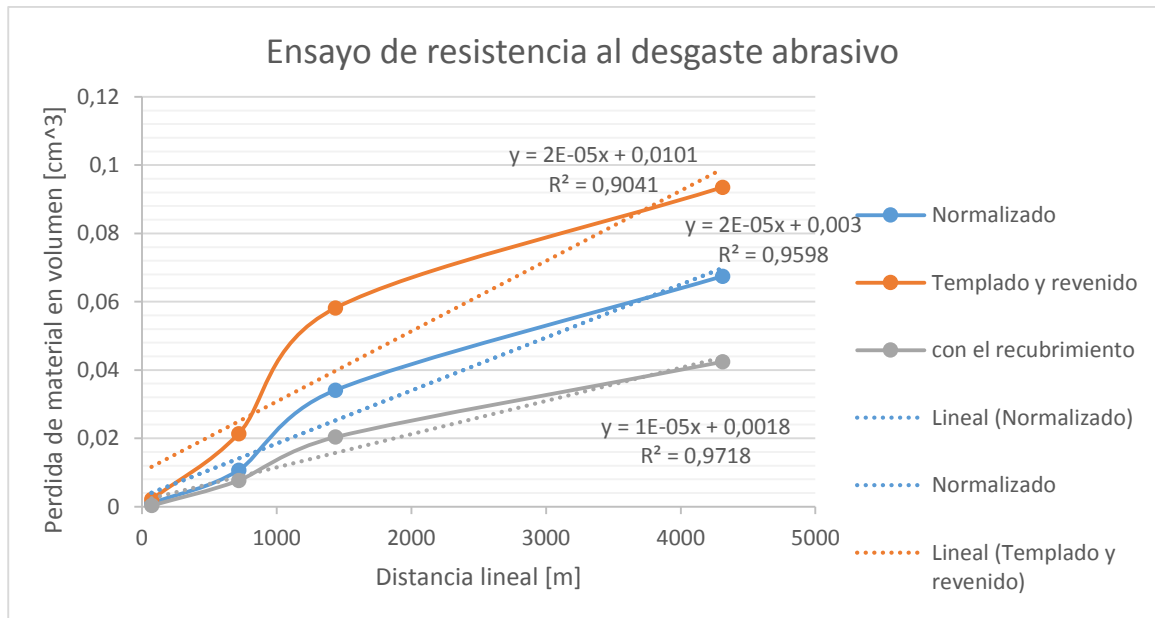
Tabla 25. Pérdida de material ensayos desgaste abrasivo probetas con recubrimiento

PÉRDIDA PROBETAS RECTANGULARES RECUBIERTAS [cm ³]				
1	0,04212	0,02114	0,00771	0,00039
2	0,04225	0,01991	0,00820	0,00029
3	0,04325	0,02094	0,00806	0,00030
4	0,04282	0,02083	0,00790	0,00031
5	0,04290	0,01987	0,00669	0,00025
6	0,04167	0,01995	0,00827	0,00029
7	0,04234	0,02018	0,00808	0,00031
8	0,04164	0,02094	0,00783	0,00026
9	0,04272	0,01967	0,00660	0,00037
10	0,04223	0,02003	0,00718	0,00025
Dist [m]	4309,2	1436,4	718,2	71,82
Promedio	0,04239	0,02035	0,00765	0,00030

Fuente: Autores del proyecto.

Graficando los resultados obtenidos (figura 25) se puede concluir que al aplicar el rociado térmico con el recubrimiento de alúmina y carburo de tungsteno sobre un acero AISI 1045, la resistencia al desgaste abrasivo mejora significativamente.

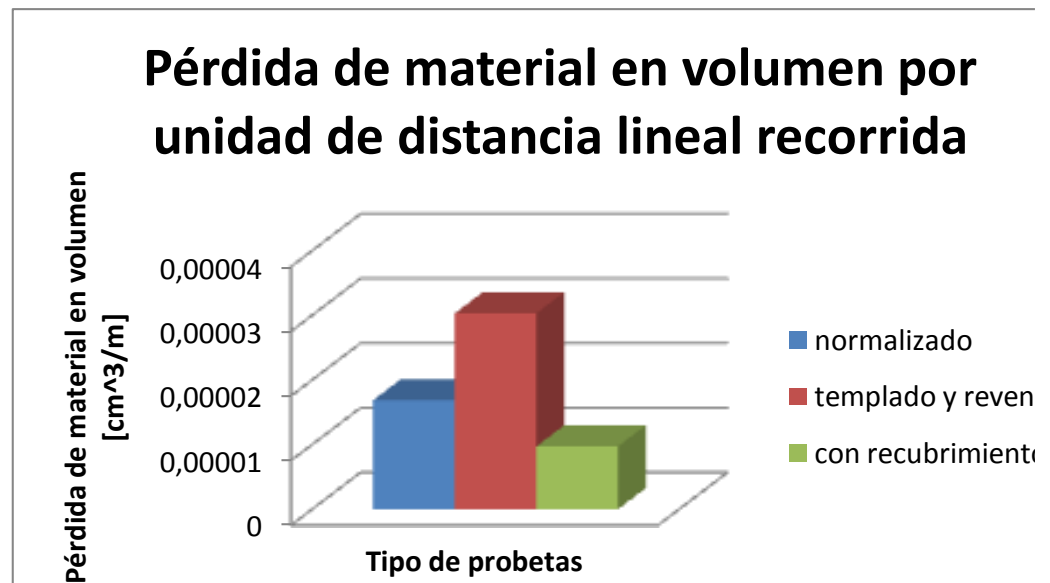
Figura 245. Ensayo de resistencia al desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 26 se muestra la cantidad de material perdido en volumen por unidad de distancia lineal.

Figura 25. Comparación pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en los ensayos de desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto.

La figura 26 permite concluir que hay un pico de pérdida de material en la distancia de 1436.4 m, esto puede ser debido a que la adhesión del recubrimiento sobre el material base no suficientemente fuerte como para evitar que éste se desprenda.

5 CONCLUSIONES

- La dureza del acero AISI 1045 mejora en un 31.84% al ser sometido a un tratamiento térmico como es el de templado-revenido, sin embargo disminuye en 46,31 % al aplicarse el recubrimiento de WC- 15 wt. % Al_2O_3 , sin embargo, a pesar de que en la figura 19 donde la comparación de la dureza se observa claramente una disminución de esta propiedad, se debe tener en cuenta que las condiciones en las que el ensayo fue realizado no fueron las adecuadas, debido a la no uniformidad de la superficie después de aplicado el recubrimiento, esto ocasiona que el indentador no esté soportado debidamente
- Los ensayos de resistencia a los desgastes adhesivos y abrasivos realizados a las probetas con el recubrimiento, permiten observar una relación lineal directamente proporcional entre la pérdida de material en la probeta y la distancia lineal recorrida.
- El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI1045, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye la pérdida de material en un 80.04%, por otra parte, con el recubrimiento de WC- 15 wt. % Al_2O_3 disminuye la pérdida en un 95.96%
- El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI 1045, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido aumenta la pérdida de material en 38.63% mientras que con el recubrimiento de WC- 15 wt. % Al_2O_3 , se disminuye en un 37.15%
- Las pruebas de microscopía electrónica de barrido y EDS, permiten comprobar mediante los datos reales y teóricos obtenidos y el análisis y medición que se le realizó a cada elemento (carburo de tungsteno y

alúmina) que los compuestos a los depositados en las probetas para todos los ensayos, corresponden claramente a carburo de tungsteno y alúmina.

6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un plan de mantenimiento a los equipos que se encuentran en el laboratorio de procesos de fabricación de la facultad de ingeniería mecánica, ya que se encontraron diferentes contratiempos en la operación y puesta en marcha de algunos de ellos.
- Se recomienda la adquisición de una balanza con la capacidad adecuada por parte de la facultad de ingeniería mecánica, para posteriores proyectos similares y de esta forma solucionar el inconveniente de los horarios al solicitar el préstamo de esta herramienta.
- El proceso de deposición del recubrimiento en el material base, se hicieron en lugares diferentes con un procedimiento adecuado suministrado por los laboratoristas de la facultad y complementado por una empresa con experticia en el tema.
- Se recomienda realizar ensayos de adherencia del recubrimiento al material base, con el fin de medir y evaluar esta propiedad y así brindar resultados más completos.

7 BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk apparatus. United States: ASTM, 2010. (ASTM G99-05).

ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010) método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho.

ASTM G99 – 05 (REAPROBADA EN EL 2010) método de prueba estándar para medir el desgaste causado por un pin de acero, utilizando máquina pin-on-disk.

Carburo de Tungsteno. Carburo de Tungsteno. [En Línea].
<http://www.lagacerogroup.com/sitiolag/images/stories/boletinmetalizacion.pdf>
[Citado el 23 De Agosto 2014]

EcuRed. Desgaste Abrasivo. [En Línea].
http://www.ecured.cu/index.php/Desgaste_abrasivo[Citado el 23 De Agosto 2014]

Manual de procedimientos/ensayos de dureza/ Talleres Unidos Ltda.
[Revisado enero 2014]

Manual de procedimientos/metalización/ Talleres Unidos Ltda.
[Revisado enero 2014]

METALLISATION. Metalización por proyección. [En Línea] disponible en:
<http://www.lagacerogroup.com/sitiolag/images/stories/boletinmetalizacion.pdf>
[Citado el 23 de Agosto 2014]

SIMITH, Wiliam. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Mexico: MacGraw – Hill 2004. 227P

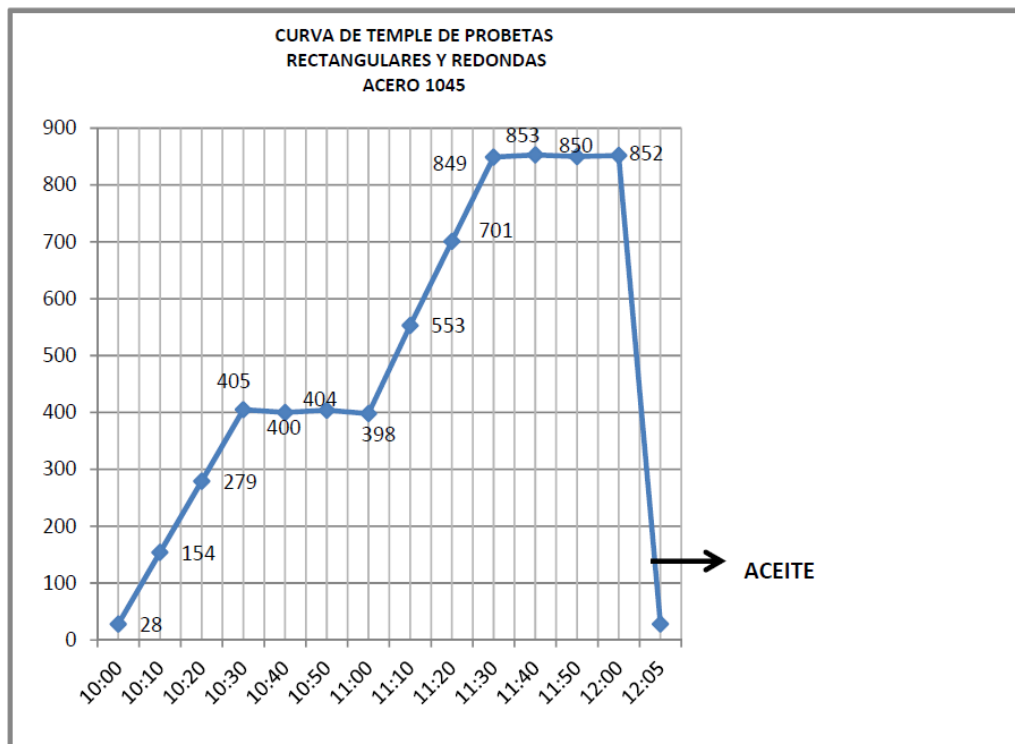
Textos Científicos. Desgaste Erosivo. [En línea]
<http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion> [Citado 23 De Agosto 2014]

8 ANEXOS

ANEXO A. CURVA DE TEMPLE DE PROBETAS

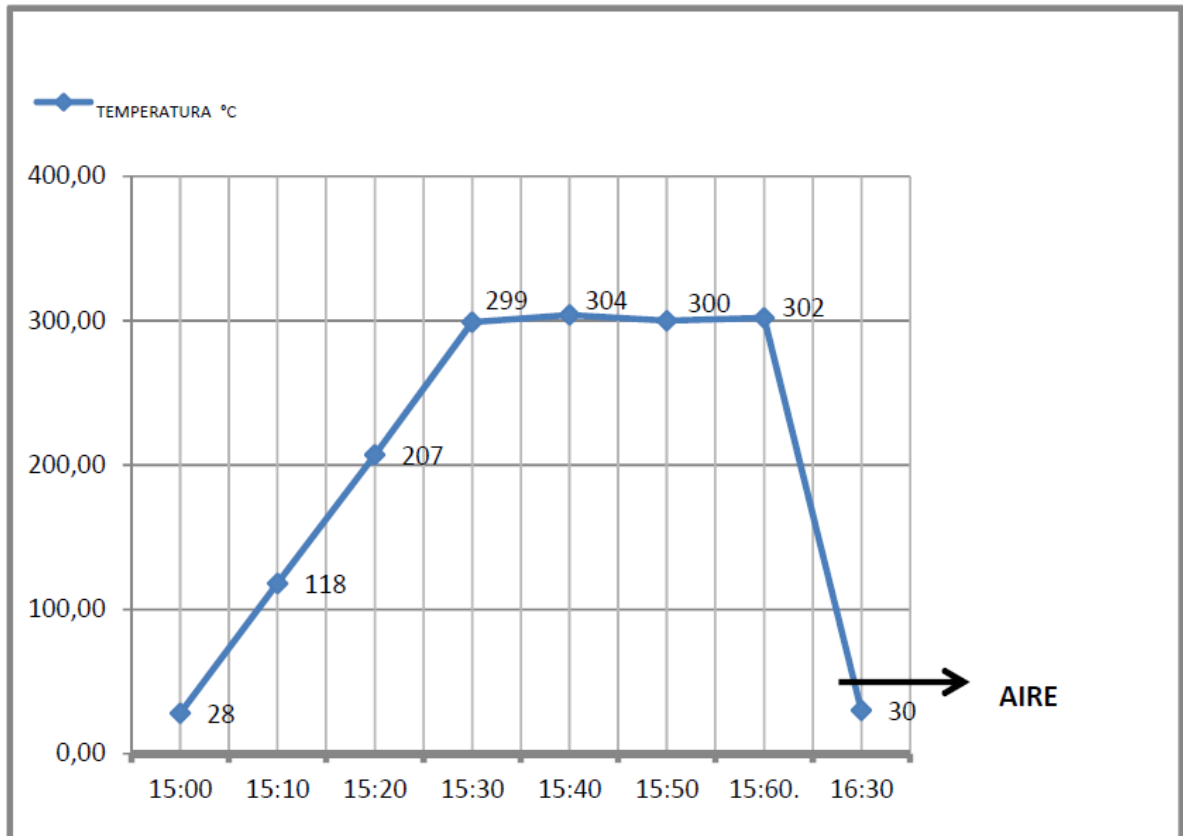
CURVA DE TEMPLE DE PROBETAS RECTANGULARES Y REDONDAS ACERO 1045

DATOS	TIEMPO	TEMPERATURA °C
1	10:00	28
2	10:10	154
3	10:20	279
4	10:30	405
5	10:40	400
6	10:50	404
7	11:00	398
8	11:10	553
9	11:20	701
10	11:30	849
11	11:40	853
12	11:50	850
13	12:00	852
14	12:05	28





**CURVA DE REVENIDO DE PROBETAS
RECTANGULARES Y REDONDAS**

DATOS	TIEMPO	TEMPERATURA °C
1	15:00	28
2	15:10	118
3	15:20	207
4	15:30	299
5	15:40	304
6	15:50	300
7	15:60.	302
8	16:30	30



ANEXO B. INFORME DE LABORATORIO

 IMATT SAS.	INFORME DE LABORATORIO		 Certificado CO05/990 Servicios de tratamiento térmico, mecanizado industrial y laboratorio metalográfico
	COD. FRLM-01	REV. No. 02	
	FECHA: 02/08/05	PAG. 1 de 1	

INFORME No. 06	FECHA: 30-06-2015
CLIENTE: TALLERES UNIDOS	

DESCRIPCION DE LAS PIEZAS: PROBETAS RECTANGULARES Y REDONDAS



PRUEBA(S) SOLICITADA(S): Prueba de dureza en escala Rocwell C a 10 probetas en acero 1045, sometidas a Tratamiento Térmico de Temple desde 850°C con 30 minutos de sostenimiento y enfriamiento en aceite a 30°C, con posterior Revenido a 300°C durante una hora.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: 30362

CANTIDAD DE PIEZAS CUBIERTAS POR ESTE INFORME: 10

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS:



IMATT SAS.

INFORME DE LABORATORIO



Certificado CO05/990
Servicios de tratamiento
térmico, mecanizado
industrial y laboratorio
metalográfico

COD. FRLM-01

REV. No. 02

FECHA: 02/08/05

PAG. 1 de 1

VALORES EXPRESADOS EN ESCALA HRC PIEZAS RECTANGULARES

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	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

PIEZAS REDONDAS

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	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

Equipo Utilizado : Durometro KARL FRANK L003

Carga : 150 Kg

Palpador : Punta de Diamante

Patrón de verificación : Placa SUN-TEC N° 044079

OBSERVACIONES:

ELABORADO POR:



FABIO ALBERTO GARZON

Ing. FABIO ALBERTO GARZON GALVIS

Laboratorio Metalográfico

ANEXO C. DUROMETRO PORTÁTIL

Importa y garantiza



DURÓMETRO PORTÁTIL CÓDIGO ISH-PHA



- Provisto de dispositivo de impacto D
- Tipo Leeb(HLD) , convertible a Vickers(HV), Brinell(HB), Rockwell(HRC and HRB), Shore(HS) y resistencia de tracción(MPa)
- Conectable a impresora via bluetooth
- Display LCD
- Apagado automático
- De acuerdo con la norma ASTM A 956



ESPECIFICACIÓN

Lectura mínima	1HLD, 1HV, 1HB, 0.1HRC, 0.1HRB, 1HS, 1MPa	
Exactitud	±6HLD(cuando HLD=800)	
Display	Leeb(HLD), convertidor de dureza, dirección de impacto, testeo de tiempo, valor promedio, datos	
Conexión	bluetooth	
Aplicable	peso mínimo	5kg
		2kg (sobre soporte sólido)
		0.1kg(con placa)
	espesor mínimo: 5mm	
	radio mínimo de la superficie curvada: 11mm	
	rugosidad máxima(Ra): 1.6 μm	
Fuente de alimentación	3 baterías AAA	
Dimensión	150 × 80× 24mm	
Peso	200g	

ENTREGA ESTÁNDAR

Unidad principal	1pc
Dispositivo de impacto D	1pc
Impresora	1pc
Patrón de dureza	1pc
Anillo de apoyo	1pc
Cepillo de limpieza	1pc
Adaptador AC/DC	1pc

MATERIAL APLICABLE Y GAMA DE DUREZA DE IMPACTO DISPOSITIVO D

Material	HLD	HV	HB	HRC	HRB	HS	(Mpa)
Acero y fundición	300-900	81-955	81-654	20-68	38-100	32-100	375-2639
Metal duro	300-840	80-898		20-67			
Acero inoxidable	300-800	85-802	85-655		46-101		
Fundición de hierro	360-650		93-334				
Fundición de aluminio	170-570		19-164		23-84		
latón	200-550		40-173		13-95		
Bronce	300-700		60-290				
Cobre	200-690		45-315				

