

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS DE ALÚMINA
(Al_2O_3) - 50 % wt DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2) EN LA DUREZA Y
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI/SAE 1020**

**JHONN FREDDY SANABRIA PINTO
IVÁN DARÍO MANTILLA QUINTERO**



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

2015

**DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTO DE ALUMINA
(Al₂O₃) - 50 wt % DIOXIDO DE TITANIO (TiO₂) EN LA DUREZA Y
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI/SAE 1020**

**JHONN FREDDY SANABRIA PINTO
IVAN DARIO MANTILLA QUINTERO**

**Proyecto 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
FLORIDABLANCA**

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 9 de marzo 2015

DEDICATORIA

Principalmente damos Gracias a **DIOS** por brindarnos la oportunidad de estudiar tan maravillosa carrera, la provisión económica a nuestros padres por Ayudarnos a cumplir este sueño tan anhelado, por llenarnos de salud, sabiduría y bendición a nuestros hogares.

A mi padre **HORACIO SANABRIA RUEDA** por apoyarme incondicionalmente en todo momento con cariño, sabiduría, tolerancia y mucho amor al momento de enfrentar tantas dificultades presentadas durante el transcurso de mi vida profesional.

A mi madre **BLANCA ISABEL PINTO** por su amor, paciencia y apoyo en el transcurso de todo este largo camino de sacrificios, por luchar día a día para convertir a su hijo en un excelente ser humano con grandes valores y principios.

A mis hermanas **CRISTINA y MELISA SANABRIA** por apoyarme emocionalmente día a día y recordarme la linda familia que somos, por brindarme su apoyo y preocupación.

A **CLAUDIA RODRIGUEZ** porque cada día me recordaba de que un profesional no solo es una persona con sabiduría sino un ser humano con humildad, sencillez y siempre luchar por el bienestar de sus allegados.

A **ALFONSO SANTOS JAIMES** por brindarnos confianza, sabiduría y paciencia en el transcurrir de este arduo camino, con su rigidez pero siempre ofreciéndonos una mano amiga en cualquier momento.

Jhonn Freddy Sanabria Pinto

DEDICATORIA

Primeramente a Dios por darme la oportunidad de estudiar tan excelente carrera, en tan excelente universidad que forma profesionales íntegros en las diversas áreas de Desarrollo.

A mis padres por brindarme la oportunidad de formarme un profesional en tan excelente universidad, apoyo económico y moral para salir adelante.

A mis hijos por darme cada día la motivación para salir adelante y luchar por ellos para brindarles un buen futuro y ser de ejemplo para ellos.

Iván Darío Mantilla Quintero

AGRADECIMIENTOS

Primordialmente agradecemos a tan excelente institución por brindarnos el apoyo en este camino de preparación profesional, por ofrecernos a docentes con una gran formación no solo profesional sino también humana. Al ingeniero Alfonso Santos Jaimes por apoyarnos en el transcurrir de este proyecto y permitirnos trabajar junto a él.

Jhonn Fredy Sanabria Pinto

Iván Darío Mantilla

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	21
4. MARCO TEÓRICO	22
4.1. ROCIADO TÉRMICO.....	22
4.1.1 Rociado térmico por llama	23
4.2. PROPIEDADES MECANICAS.....	24
4.2.1 Desgaste.....	24
4.2.1.1. Desgaste Abrasivo.....	24
4.2.1.2. Desgaste adhesivo	24
4.2.1.3. Desgaste por fatiga superficial.....	26
4.2.2. Dureza.	26
4.2.2.1. Dureza vickers.	26
4.3 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	27
4.4 NORMAS	28
4.4.2. Norma Astm G65- 04 (Reaprobada en el 2010).	28
4.5 EQUIPOS.....	29
4.5.1 Microscopia electrónica de barrido	29
4.5.2. Tribómetro pin-on-disc.	30

4.5.3. Durómetro HARTIP 1500.....	33
4.5.4 Balanza SARTORIUS BP 211D.....	34
4.6. MATERIAL.....	34
4.6.1 Dióxido de titanio (Ti O ₂).....	35
4.6.2 Alúmina (<i>AL₂O₃</i>).....	36
5. METODOLOGÍA	38
5.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS MATERIAES A TRABAJAR..	38
5.2. MATERIALES UTILIZADOS PARA PROBETAS	¡Error! Marcador no definido.
5.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICAS Y COMPOSICIÓN MORFOLÓGICA DE ALÚMINA (<i>Al₂O₃</i>) Y DIÓXIDO DE TITANIO (Ti O ₂).....	¡Error! Marcador no definido.
5.4. MAQUINADO Y GRANALLADO DE PROBETAS.....	¡Error! Marcador no definido.
5.5. REVISAR DOCUMENTACION EXTRA PARA LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	¡Error! Marcador no definido.
5.6. PROCESO DE RECUBRIMIENTO TÉRMICO POR LLAMA A PROBETAS DE ACERO AISI /SAE 1020.	¡Error! Marcador no definido.
5.7. PRUEBAS DE DUREZA	¡Error! Marcador no definido.
5.8. PRUEBA DE DESGASTE ABRASIVO	¡Error! Marcador no definido.
5.9. PRUEBA DESGASTE ADHESIVO	¡Error! Marcador no definido.
5.10. TOMA DE DATOS, ANÁLISIS RESPECTIVO DE CADA PRUEBA.....	¡Error! Marcador no definido.
5.11 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LOS DIFERENTES ENSAYOS	¡Error! Marcador no definido.
5.12. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN OBTENIDA POR CADA PRUEBA.....	¡Error! Marcador no definido.
6. RESULTADOS.....	48

6.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN MORFOLÓGICA DE LOS MATERIALES Al_2O_3 Y TiO_2	48
6.2. ENSAYO DE DUREZA VICKER	52
6.3. ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO.	¡Error! Marcador no definido.
6.3.1. Ensayo Desgaste Adhesivo.	¡Error! Marcador no definido.
7. CONCLUSIONES	65
8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXOS.....	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de desgaste adhesivo.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Características de instrumento de medición	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Propiedades Dióxido de titanio.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Mezcla de material. Fuente: Autor del proyecto	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5 características del tipificado de arena AFS 50/70.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6. condiciones para ensayo de Tribómetro Pin on Disk.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Resultados muestra de Dureza vickers.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 8. Resultados de Desgaste Abrasivo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. Resultados generales de Prueba de desgaste adhesivo perdida de volumen	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10. Resultados generales prueba de desgaste adhesivo (pines).....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Rociado térmico	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Sistema de proyección térmica	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Desgaste abrasivo	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4 Características desgaste adhesivo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Medición de dureza Vickers.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Microscopio electrónico de barrido	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7. Tribómetro Pin- on-Disc	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8. balanza Sartorius BP 211D.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Dióxido de titanio	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10. Alúmina.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 11. Propiedades Alúmina.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12. Geometrías de probetas	¡Error! Marcador no definido.
Figura. 13 Probetas circulares maquinadas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Probetas rectangulares maquinadas	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Proceso de recubrimiento a) rociado térmico b) flujo de depósito de material c) probeta después de realizar recubrimiento d) probeta granallada	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Pistola de proyección térmica.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Máquina medidora de desgaste abrasivo	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Balanza de 0.0001g de margen de error.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Interior máquina medidora de desgaste abrasivo. ..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. Tribómetro pin on disk.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21. Probetas después de ser sometidas a Pruebas	¡Error! Marcador no definido.

Figura 22. Probetas después de prueba de desgaste adhesivo. ... **¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Representación dureza Vickers fuente: Autor del proyecto.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Grafica 2. Resultado Desgaste abrasivo Fuente: Autor del proyecto.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Grafica 3. Pérdida de volumen por longitud Fuente : Autor del Proyecto	¡Error!
Marcador no definido.	
Grafica 4. Desgaste adhesivo pérdida de volumen (Disco)	¡Error! Marcador no definido.
Grafica 5. Resultados pérdida de volumen por longitud.	¡Error! Marcador no definido.
Grafica 6. Desgaste adhesivo de pines Fuente: Autor de proyecto	¡Error!
Marcador no definido.	

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: TITULO: DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS DE ALÚMINA (Al₂O₃) - 50 % wt DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) EN LA DUREZA Y RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI/SAE 1020

AUTOR(ES): Jhonn Sanabria Pinto- Ivan Mantilla

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Ing. Alfonso Santos

RESUMEN

En la actualidad al estudio de diversas soluciones empleadas para satisfacer las necesidades y demandas. Debido a que la gran mayoría de elementos de máquina son sometidos al desgaste, y con el fin de prolongar la vida útil de los mismos, se presenta una alternativa conocida como proceso de rociado térmico, a fin de emplearse para la fabricación y recuperación de los elementos de máquinas. Se pretende determinar la variación de la dureza y resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo en un acero AISI/SAE 1020 normalizado, tratado térmicamente mediante temple-revenido o recubierto con una mezcla de alúmina (Al₂O₃) - 50% wt dióxido de titanio (TiO₂), depositado a través de un proceso de rociado térmico en caliente. Los resultados de las pruebas permiten afirmar que La dureza Vickers del acero AISI/SAE 1020 mejora en un 14.4% cuando el material es tratado térmicamente con un proceso de temple-revenido; y en un 42.8% cuando es recubierto a través de un proceso de rociado térmico por llama con una capa de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂. El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, se concluye que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 22,5% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂ la aumentan en un 331%; y el promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, permite afirmar que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 10,2% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂ la aumentan en un 51,5%.

PALABRAS CLAVES:

recubrimiento- alumina - dióxido de titanio-desgastes -Dureza

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DETERMINATION ON THE INFLUENCE OF A COATING OF ALUMINA (Al_2O_3) 50 wt % TITANIUM DIOXIDE (TiO_2) ON THE STRENGTH AND WEAR RESISTANCE OF A STEEL AISI /SAE 1020

AUTHOR(S): Jhonn Sanabria Pinto- Ivan Mantilla

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Ing. Alfonso Santos

ABSTRACT

In the course of the years, one of the most important problems in industry, has been the phenomenon of degradation of parts, mechanical parts and equipment that has led today a study of various solutions used to meet the needs and demands. Because the vast majority of machine elements are subjected to wear and to prolong the life thereof, there is an alternative known as thermal spraying process, and has been used for manufacture and recovery machine elements. The test results support the conclusion that the Vickers hardness of steel AISI / SAE 1020 improves by 14.4% when the material is heat treated with a quenching-tempering process; and 42.8% when it is coated through a process called thermal sprayed with a layer of Al_2O_3 - 50 wt% TiO_2 . The average loss of material per unit of linear distance covered in abrasive wear tests on specimens of AISI / SAE 1020, allows us to conclude that heat treatment quenching-tempering decreases by 22.5% this loss, while Al_2O_3 coatings - 50 wt% TiO_2 increase it by 331%; and the average loss of material per unit of linear distance covered in adhesive wear tests on specimens of AISI / SAE 1020, suggests that the heat treatment of quenching-tempering decreases the loss 10.2%, while Al_2O_3 coatings - 50 wt% TiO_2 increases by 51.5%.

KEYWORDS:

COATING-ALUMINA- TITANIUM DIOXIDE -WEAR RESISTANCE-
THE STRENGTH

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

A través de los tiempos el uso de diversos materiales ha sido de vital importancia para el desarrollo del hombre, quien a diario busca una mejor calidad de vida. Es el caso del uso de materiales como los aceros no aleados, los cuales han sido empleados en diferentes sectores como la arquitectura, la conservación de alimentos, la automoción, entre otros; gracias a sus magníficas características de versatilidad, maleabilidad, resistencia, confort y durabilidad, las cuales permiten un excelente desempeño al momento de procesarlo. Sin embargo, este tipo de material posee algunas desventajas como lo son la fácil corrosión a la intemperie, la baja resistencia al desgaste y la alta conductividad térmica que posee.

La investigación que se lleva a cabo en este proyecto consiste en el uso de materiales cerámicos, depositados a través del proceso de rociado térmico, como recubrimiento de un acero al carbono convencional AISI/SAE 1020, con el fin de cuantificar el comportamiento de las propiedades mecánicas de desgaste y dureza. En general se usan procesos de tratamientos de temple-revenido para mejorar estas propiedades en los aceros al carbono, sin embargo cuando el porcentaje de carbono es menor al 0.2% su influencia sobre el comportamiento de estas propiedades es prácticamente nulo, por lo cual los recubrimientos son una alternativa bastante llamativa para alcanzar las mejoras deseados.

El tamaño de los materiales utilizados como recubrimientos influyen en el comportamiento de las propiedades mecánicas estudiadas, en la bibliografía se encuentra que entre menor sea el tamaño de los mismos, mejor serán las propiedades mecánicas del recubrimiento; debido a esto los materiales utilizados en el desarrollo de este proyecto de grado fueron adquiridos a una empresa canadiense con un tamaño en escala micrométrica.

Los ensayos de desgaste abrasivo y adhesivo se realizan según las 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 utilizados para estos ensayos se encuentran disponibles en el laboratorio de procesos industriales de la UPB seccional Bucaramanga y consisten en un equipo para medir la abrasión utilizando arena y rueda de caucho, y una máquina PIN ON DISK para ensayos de desgaste.

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto consistió de las siguientes actividades: adquisición de polvo de tamaño micrométrico de alúmina y dióxido de titanio, caracterización morfológica y química de los materiales de recubrimiento, maquinado de probetas de acero AISI/SAE 1020 normalizado, realización de tratamiento térmico de temple y revenido, depósito de recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50\% \text{ wt TiO}_2$ y por último la realización de los ensayos de dureza y resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo.

Para la realización de las caracterizaciones morfológicas se utiliza un equipo de microscopia electrónica de barrido, el cual tiene integrado un sistema de microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X, EDS, que permite la caracterización química de los materiales utilizados para los recubrimientos.

Los resultados de las pruebas permiten afirmar que La dureza Vickers del acero AISI/SAE 1020 mejora en un 14.4% cuando el material es tratado térmicamente con un proceso de temple-revenido; y en un 42.8% cuando es recubierto a través de un proceso de rociado térmico por llama con una capa de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$. El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 22,5% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ la aumentan en

un 331%; y el promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, permite afirmar que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 10,2% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ la aumentan en un 51,5%

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de tratamientos térmicos superficiales de temple para mejorar la dureza y resistencia al desgaste de acero al carbono, se dificulta cuando se tiene elementos de máquinas con configuraciones geométricas complejas y tamaños considerables; debido a lo anterior se busca determinar si el uso de recubrimientos con mezcla de alúmina (Al_2O_3) - 50 % wt dióxido de titanio (TiO_2) de tamaño micrométrico, permiten obtener dureza y resistencia al desgaste similares a las que son alcanzadas a través de tratamientos térmicos superficiales de temple-revenido realizados en aceros al carbono AISI/SAE 1020.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de un recubrimiento de alúmina (Al_2O_3) - 50 wt % dióxido de titanio (TiO_2) micrométrico en la dureza y resistencia al desgaste de un acero AISI/SAE 1020, cuando se encuentra Normalizado o Templado-Revenido, mediante ensayos ASTM G99-05, ASTM G65-04 (REAPROBADA) realizados a través de los equipos que proporcionara la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga; con el fin de obtener datos estadísticos y las respectivas curvas de correlación.

2.2 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 mezcla de alúmina (Al_2O_3) - 50% wt dióxido de titanio (TiO_2), sobre un acero AISI /SAE 1020 a través del proceso de rociado térmico por llama.

Resultado: Recubrimientos firmemente adheridos al sustrato.

Indicador: Se utilizará 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 básicas.

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 5%.

- Determinar la variación de la dureza y resistencia al desgaste de aceros AISI/SAE 1020, cuando se encuentra Normalizado, templado - revenido y recubierto con una mezcla de alúmina (Al_2O_3) - 50 % wt dióxido de titanio (TiO_2) de tamaño micrométrico, 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

3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

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, por medio de la aplicación de recubrimientos de alúmina (Al_2O_3) - 50 % wt dióxido de titanio (TiO_2) de tamaño micrométrico sobre un acero al bajo carbono, utilizando un proceso de rocío térmico por llama. Con los resultados obtenidos se podrá saber si es conveniente invertir en materiales para el recubrimiento en esta clase de aceros no aleados y sí es posible prolongar su vida útil.

Adicionalmente el trabajo busca aportar al fortalecimiento de la línea de investigación en materiales de la facultad de ingeniería mecánica, la cual se encuentra en sus primeras fases de desarrollo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ROCIADO TÉRMICO

El rociado térmico es un proceso de proyección que consiste en aplicar varias capas de un material sobre otro, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. En la actualidad es uno de los procesos más utilizados por su facilidad de aplicación y representan un gran beneficio a la hora de fabricar piezas o realizar procesos de mantenimiento. El proceso consiste en la deposición de material en forma de polvo fundido, el cual será expulsado por un gas inerte a través de una pistola hacia el material que se desea recubrir, tal como se observa en la figura 1, formando así una superficie totalmente nueva. Los materiales utilizados para recubrir piezas pueden ser metales, polímeros o cerámicos. Al momento de realizar el recubrimiento al material deseado, este ha tenido que pasar por un proceso de preparación como limpieza para generar una buena adherencia del material.

Figura 1. Proceso de rociado en frío.



Fuente: FLAMESPRAY Aplicación de recubrimientos [en Línea] [Citado 15 de Diciembre de 2014]
Disponible en: <http://www.flamespray.com.mx>

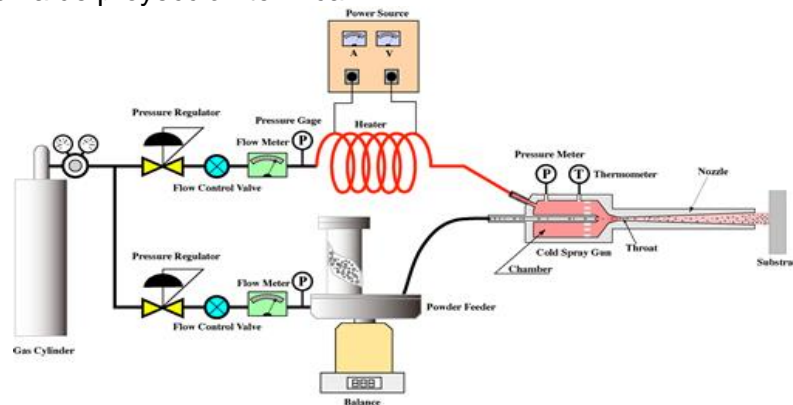
El proceso de rociado térmico es uno de los medios más eficaces que se han desarrollado para combatir el desgaste prematuro, al adelantarse a la falla o al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en sus condiciones óptimas. De esta forma se optimiza la disponibilidad del equipo, se disminuye costos de

mantenimiento y se maximiza la vida útil de los equipos y la maquinaria¹. La técnica generalmente implica el rociado de metal en forma de polvo o alambre fundido y este se logra gracias a la combustión de un gas con oxígeno o con un arco eléctrico (plasma). Las partículas fundidas son aceleradas por las llamas y gases, y proyectadas con gran impacto sobre un sustrato previamente preparado, usualmente metálico, hasta alcanzar el espesor deseado para posteriormente ser maquinado o rectificado².

4.1.1 Rociado térmico por llama.

En el transcurso del proceso se utiliza una pistola que se encarga de proyectar el material en forma de polvo. En el proceso de rociado térmico por llama alimentado con polvo (figura 2), el polvo se transporta gracias al flujo de gas que circula a través de la cámara de combustión de la pistola hasta ser expulsado por la boquilla, luego la fuerza de la llama hace que impacte sobre la superficie del material que se desea recubrir generando una adherencia mecánica formando una superficie nueva³.

Figura 2. Sistema de proyección térmica



Fuente: Plasma Giken Sistema de proyección térmica. [En línea] citado 15 de diciembre de 2014, disponible en: <http://www.plasma.co.jpg>

¹ LUDDEY MARULANDA José Protección Contra La Corrosión Por Medio Del Rociado Térmico, Pereira, 2007, universidad tecnológica de Pereira, ingeniería metalúrgica.

² Recubrimientos de Materiales Compuestos Metal-Cerámico Obtenidos por Nuevas Tecnologías de Proyección Térmica: Proyección Fría y su Resistencia al Desgaste. Revista de Metalurgia, 47 (5) Septiembre –Octubre ,390-401, 2011. Issn: 0034 -8572.

³ THERMAL SPRAY. Protección de alto impacto. Camilo Marín Villar [en línea] [citado 10 diciembre de 2014] disponible en: <http://www.metalactual.com/revista/8/tratamiento_thermal_spray.pdf>

4.2 PROPIEDADES MECANICAS

4.2.1 Desgaste.

El desgaste es un deterioro progresivo generado en los elementos que se someten a fricción y calor, estas son algunas de las principales causas por las que se realiza el mantenimiento o cambio de elementos de máquinas, mientras hayan dos superficies en contacto este efecto es inevitable. Aunque el desgaste no ocasiona fallas violentas, puede generar grandes problemas como pérdida de potencia y/o disminución de eficiencia⁴.

4.2.1.1 Desgaste Abrasivo: El desgaste abrasivo es un efecto de pérdida de material generado al momento en que se encuentran en contacto un material duro sobre una superficie más suave, también se reconoce u observa como los rayones que se presentan en el material de superficie más suave. Otra forma en la que ocurre desgaste abrasivo es cuando existen partículas duras entre dos superficies deslizantes en contacto. Este tipo de desgaste se puede presentar en seco o en presencia de líquido.

El desgaste abrasivo puede ocurrir entre dos o más cuerpos, esto se genera cuando las perturbaciones duras de una superficie se deslizan una sobre otra, como se observa en la figura 3. Un ejemplo de esto es el uso de lijas⁵.

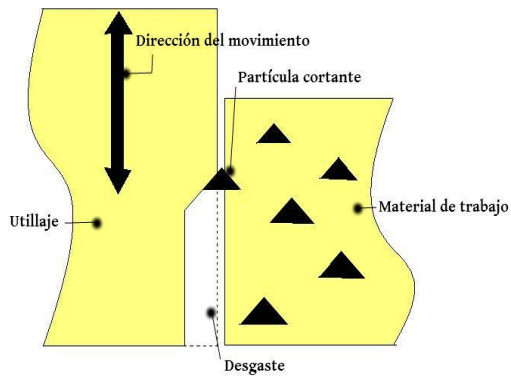
4.2.1.2 Desgaste adhesivo: El desgaste adhesivo ocurre cuando se presenta el deslizamiento de dos superficies bajo presión. Estas fuerzas hacen que partículas de un material se desprendan y se adhieran al otro material, lo que origina un aumento en su rugosidad (figura 4).

Figura 3. Desgaste Abrasivo

⁴ Desgastes. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
<http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

⁵ DÍAZ N, Siul J. FRANCO S, Adolfo A Análisis Comparativo De La Resistencia Al Desgaste De Piezas Sinterizadas Y Piezas Recubiertas Por Rociado Térmico HVOF, Caracas, 2002. Ingeniería Mecánica

Desgaste abrasivo

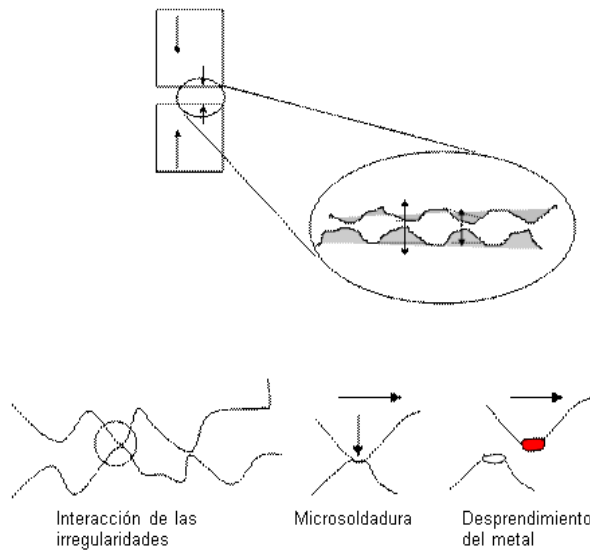


Fuente: WIKIMEDIA COMMONS Desgaste abrasivo [en línea] [citado 17 de diciembre de 2014] disponible en: <http://commons.wikimedia.org>

Sí un material es dúctil, la deformación que se produce antes de la separación de las partículas es mucho mayor, por lo cual la partícula que se separa de la aspereza puede permanecer unida a la otra aspereza como material transferido de una superficie a otra.

Figura 4. Características desgaste adhesivo

Interacción de las superficies



Fuente: Andrés López Velázquez, capítulo 3. Desgaste. López. [En línea] [Citado 15 de diciembre de 2014, disponible en: <http://lopezva.files.wordpress.com>

4.2.1.3 Desgaste por fatiga superficial: Este tipo de desgaste es producido cuando se encuentran en contacto superficial dos elementos lubricados presentando formas de deformación plástica. El número que conlleva a la producción de partículas de desgaste llamadas ciclos crítico-elásticos⁶.

4.2.2 Dureza.

Es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica) en su superficie. La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar, siendo por lo general fabricado de acero templado, carburo de tungsteno o diamante.

En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el indentador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta; después de producir la indentación, se retira el penetrador y se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad. Al momento de retirar la pieza en contacto se mide el área que presenta deformación indicando así la resistencia a la carga⁷.

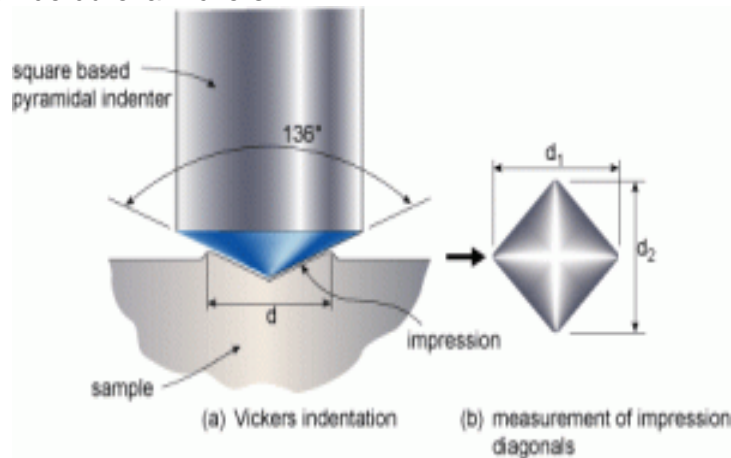
4.2.2.1 Dureza Vickers: Es un método de ensayo que permite medir la dureza de todos los materiales metálicos sin importar su condiciones, este método es por

⁶ DEL CASTILLO. Felipe; IZCALLI Cautitlan. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación. Laboratorio de tecnología de materiales. UNAM. 2007

- ⁷ PROPIEDADES FISICO MECANICAS DE LOS MATERIALES. Ruben G. Frade. Noviembre
21.2013<<http://fradeblogs.wordpress.com/2013/11/21/propiedades-fisico-mecanicas-de-los-materiales/>>

indentación, se fuerza un indentador piramidal de base cuadrada con tres caras específicas, ejerciendo una carga perpendicularmente determinada después de un largo tiempo, contra la superficie del material al que se le generara el ensayo y se mide la diagonal resultante por la carga aplicada luego de ser removida, como se observa en la figura 5. Con estos datos, utilizando las tablas apropiadas y la caracterización por dureza Vickers (HV) se puede calcular la dureza Vickers⁸.

Figura 5. Medición de dureza Vickers



Fuente: Propiedades Físico-Mecánicas de materiales. [En línea] [Citado 15 de noviembre de 2013, disponible <http://fradeblogs.wordpress.com>]

4.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y REVENIDO

El templeado es un proceso de calentamiento y enfriamiento controlado, la mayoría de las aleaciones de acero se calientan a temperaturas que oscilan entre 750° C y 1300° C. Dependiendo de la composición del material, el tiempo de calentamiento y la severidad del enfriado se pueden conseguir un gran intervalo de dureza. El proceso de Revenido se realiza posteriormente al templeado, y consiste en mantener el material a temperaturas inferiores a 650° C durante un tiempo determinado, este

-
- ⁸ ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES. Dureza y templabilidad en aceros. Facultad de ingeniería UNLP.

proceso reduce en un gran porcentaje la fragilidad del material, pero disminuye la resistencia del mismo, adicionalmente permite la realización de ajustes mecánicos a las piezas.⁹

4.4 NORMAS

Las normas utilizadas para la realización de los ensayos de desgaste son las siguientes:

4.4.1 Norma ASTM G99-05

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 del cual se exponen las condiciones de la prueba, tales como una carga aplicada, velocidad, distancia lineal recorrida, entre otras. 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 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 temperatura¹⁰.

4.4.2 Norma ASTM G65- 04 (Reaprobada en el 2010).

La norma ASTM G65 -04 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 será la resistencia a la abrasión que tendrá el metal, al momento de realizar las pruebas debe contarse con una variación de velocidades y

⁹ ROBLEDO. David M. Temple y Revenido Evaluación de los Parámetros de Temple y Revenido para el Acero AISI/SAE 1045 a Escala Industrial. Corporación eco-eficiente. Medellín. Colombia.[en línea] [citado 10 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.trateriber.es> >

¹⁰ DEL CASTILLO Felipe. IZCALLI Cautitlan. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación. Laboratorio de tecnología de materiales. UNAM. 2007.

cargas aplicadas las cuales se encuentran especificadas en la norma, diseño y parámetros de medidas. Los parámetros de diseño y fabricación de la máquina también están específicos en la norma¹¹.

Según las especificaciones de la norma, durante la realización de los ensayos se deben seguir cinco procedimientos recomendados para la determinación de 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.
- 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.

4.5 EQUIPOS

4.5.1 Microscopia electrónica de barrido.

Conocida por sus siglas inglesas, SEM, utiliza electrones para formar imágenes. Para lograrlas, el equipo cuenta con un dispositivo (figura 6) 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, obteniendo información de la forma, textura y composición química de sus constituyentes. La

¹¹ ASTM INTERNACIONAL –Standard test method for measuring abrasion the Dry Sand/ Rubber Wheel Apparatus. <http://www.astm.org/Standards/G65.htm>

microscopía electrónica de barrido permite la observación y caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos en escalas nanométricas y micrométricas; además de poder obtener imágenes tridimensionales de superficies en un amplio rango de materiales. El mayor uso de la microscopía electrónica de barrido es el obtener imágenes topográficas de muy alta calidad a grandes magnitudes.

Estos instrumentos alcanzan resoluciones de hasta 1 nanómetro y una profundidad de foco de hasta 10 micrómetros, a diferencia del microscopio tradicional la microscopía electrónica de barrido proporciona una imagen tridimensional, especificando claramente la superficie estructural de la muestra¹².

Figura 6. Microscopio electrónico de Barrido



Fuente: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Investigaciones uniandes [en línea] [citado 11 de diciembre de 2014] disponible en: <https://investigaciones.uniandes.edu.co>

4.5.2 Tribómetro pin-on-disc.

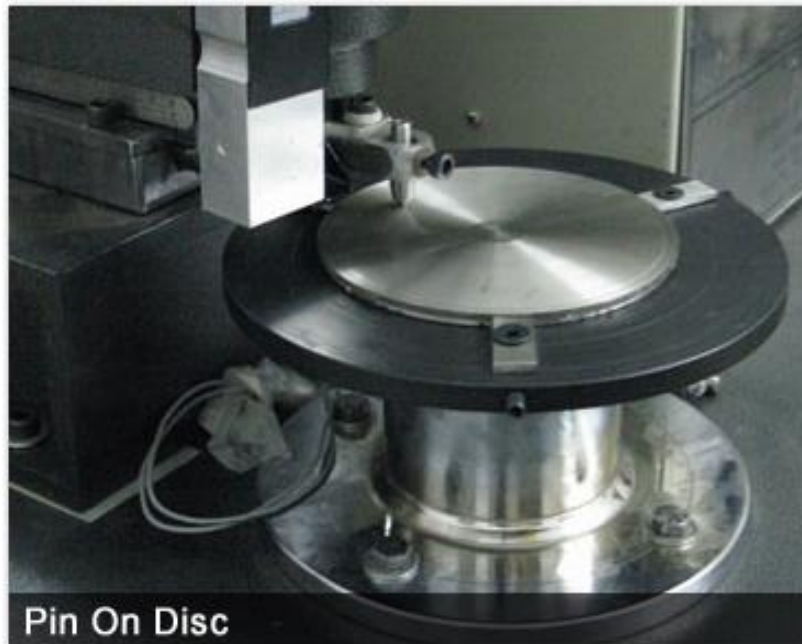
El tribómetro pin – on – disc es un maquina diseñada para realizar pruebas de desgaste adhesivo (figura 7). Este equipo consta de un Disco giratorio en el cual se ponen los materiales a los cuales se les desea realizar los ensayos y son cargados

¹²SERVICIO DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO. Universidad Politécnica de Valencia. Infomacion@upv.es.< <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753120normalc.html>>

a través de un elemento tipo punzón (el otro material), bola o cualquier otra geometría plana, por medio de un peso de hasta 60 N¹³.

El sistema es controlado por ordenador (velocidad regulable) y puede registrar parámetros como fuerza de rozamiento, coeficiente de rozamiento y desgaste. Para realizar dichos ensayos es importante revisar la norma ASTM G99-05 y resaltar los puntos más importantes, sabiendo que es un método estándar para la obtención de datos válidos.

Figura 7. Tribómetro Pin – on - Disc



Fuente: FRICTIONWEAR High Pin On Disc Tribometer [en línea] [citado 14 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.frictionwear.com>>

4.5.3 Equipo para medir Abrasión Utilizando Arena Seca y Rueda de caucho.

Los ensayos de resistencia al desgaste abrasivo se realizaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010) *Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho,*

¹³ FRICTIONWEAR High Pin On Disc Tribometer [en línea] [citado 14 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.frictionwear.com>>

las mediciones de desgaste son reportadas como la pérdida de volumen en milímetros cúbicos para cada una de las probetas utilizadas en los diferentes tipos de ensayo.

El equipo utilizado (figura 8) se encuentra en el laboratorio de procesos industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el cual cuenta con una boquilla diseñada para producir una tasa de flujo de arena 300 a 400 g/min.

Figura 8. Máquina para medición de desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto

La arena utilizada como material abrasivo es tipificada con AFS 50/70, es decir, debe cumplir con las especificaciones mostradas en la tabla 4, y su porcentaje de humedad debe ser menor al 0.5% de su peso.

Tabla 1. Características de la arena para realizar los ensayos de abrasión

Tamiz (U.S size)	Tamaño de la abertura del tamiz	% retenido en el tamiz
40	425 μm (0.0165 in)	No
50	300 μm (0.0117 in)	5% máx.
70	212 μm (0.0083 in)	95% min
100	150 μm (0.0059 in)	No pasa

Fuente: norma ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010) *Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho*

Los ensayos realizados siguen los parámetros de prueba definidos por la norma ASTM G65-04, y se encuentran relacionados en la tabla 5.

4.5.4 Durómetro HARTIP 1500.

El método de funcionamiento se basa en las medidas de las velocidades de impulsión y rebote de un cuerpo móvil impulsado por un resorte contra la superficie de materiales metálicos o cauchos; este equipo es portable, lo que facilita su uso en muchas aplicaciones (figura 9). Su funcionamiento es muy simple, y puede medir 5 diferentes escalas de dureza, como se relaciona en la Tabla 2. Además el equipo realiza las conversiones entre las diferentes escalas de manera automática.

Figura 9. Medidor de dureza HARTIP1500



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 2. Escalas de Dureza que se pueden obtener con el medidor de dureza HARTIP1500

Símbolo	Significado
HB	Dureza Brinell
HRB	Dureza Rockwell B
HRC	Dureza Rockwell C
HSD	Dureza Shore
HV	Dureza Vickers

Fuente: Manual Medidor de dureza HARTIP1500

Las características del equipo son las siguientes:

- Precisión $\pm 0,5\%$ (HL = 800), precisión de repetición $\pm 4HL$
- Doble tecnología patentada de bobina, los valores de medición son exactos y estables
- Diseño integrado, fácil de transportar y con una sola mano
- Conversión de dureza entre varias unidades
- Calcula automáticamente la media
- Económico

4.5.5 Balanza SARTORIUS BP 211D.

Instrumento para la medición de peso, con una capacidad máxima de hasta 200 gramos y una exactitud de 0.0001 gramos. Posee una alta precisión, su diseño es sencillo y es fácil de usar (figura 10).

Figura 10. Balanza Sartorius BP 211D



Fuente: Autores del proyecto

4.6 MATERIALES

Los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto son Alúmina, Dióxido de Titanio y Acero AISI/SAE 1020

4.6.1 Dióxido de titanio (TiO_2).

El Dióxido de titanio (figura 11), presenta cuatro polimorfos diferentes: rutilo, anatasa, brooquita y akaogiita. La anatasa, la brooquita y rutilo son las fases más usadas en diferentes campos y se sintetizan a escala comercial. La akaogiita es un mineral que se forma a elevadas presión y temperatura, habitualmente como producto del impacto de meteoritos. La amplia variedad de aplicaciones del dióxido de titanio se debe a sus propiedades químicas, ópticas, eléctricas, físicas y mecánica, algunas de las cuales se relacionan en la tabla 3; los campos de aplicación del TiO_2 son:

- El rutilo es muy usado como pigmento blanco en pinturas, papel, cerámicas, vidrios, cosméticos, etc.
- Está presente en dispositivos electrónicos como sensores de gas, células fotovoltaicas, electrodos de baterías de litio y dispositivos de memoria.
- Se utiliza en dispositivos biocompatibles, como implantes óseos o bio-sensores.
- Desarrollo de superficies autolimpiables.
- Se utiliza para la obtención de recubrimientos densos, duros y que ofrecen una gran resistencia al desgaste por abrasión o fricción.
- Se usa en la descontaminación de agua y aire mediante procesos fotocatalíticos.

Figura 11. Dióxido de Titanio



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 3. Propiedades Físicas del TiO₂

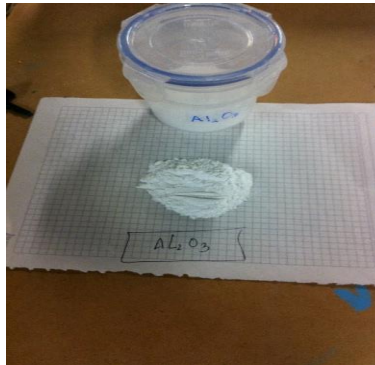
Propiedades	
Densidad	4510 Kg/m ³ .
Punto de ebullición	3260 °C
Punto de Fusión	1668 °C
Estructura	Rutilio

Fuente: LENNTECH Propiedades químicas del titanio [en línea] [citado 14 de diciembre de 2014] disponible en <http://www.lennotech.es/periodica/elementos/ti.htm>

4.6.2 Alúmina (Al₂O₃)

Los óxidos de aluminio, ver figura 12, más abundantes en la naturaleza son el corindón (α -Al₂O₃), el diásporo (α -AlO(OH)), la bohemita (γ -AlO(OH)), y la gibbsita (γ -Al(OH)₃). Los tres últimos se encuentran comúnmente en la bauxita, mineral compuesto principalmente por gibbsita, bohemita y diásporo, acompañadas por Fe₂O₃ y TiO₂ en cantidades variables.

Figura 12. Polvo de Alúmina de tamaño micrométrico



Fuente: Autores del proyecto

Más del 90% del Al₂O₃ producido a nivel mundial se utiliza para la obtención de aluminio. La alúmina se obtiene mediante el proceso Bayer, y el aluminio mediante el proceso Hall-Heroult, que implica la reducción de Al₂O₃. El proceso Bayer fue desarrollado un año después del descubrimiento del proceso electrolítico para la obtención de aluminio a partir de alúmina. En él se utiliza como materia prima la bauxita, algunos de cuyos depósitos explotados actualmente tienen dominios

gibbsiticos, aunque en ocasiones tienen una proporción significativa de oxohidróxido, principalmente bohemita.

La fase estable a alta temperatura es la alfa (corindón), que es la que más aplicaciones tiene a nivel industrial. Sus propiedades físicas más relevantes se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del corindón (α -Al₂O₃)

Propiedad	Valor
Densidad a 25°C	3.76 – 3.99 g/cm ³
Punto de fusión	2040 °C
Dureza Vickers	1500 – 2000 HV1.0
Módulo de Young	260 – 410 GPa
Resistencia a la compresión	2000 – 4000 MPa

Fuente: Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. [En línea] [Citado 14 de diciembre de 2014] disponible en <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1792.pdf>.

Tradicionalmente, la α -alumina ha sido una de las cerámicas estructurales más empleadas debido a sus buenas propiedades mecánicas, su carácter refractario y su estabilidad química en ambientes agresivos. Se emplea como material refractario debido a su elevado punto de fusión (2040 °C). Su alta dureza la convierte en material idóneo para herramientas de corte, rodamientos, juntas de sellado, válvulas, etc. Además, la α -alúmina es un material biocompatible con aplicaciones en medicina.

4.6.3 Acero al Carbono AISI/SAE 1020

Los aceros al carbono simple son, en esencia, aleaciones de hierro y carbono que contienen hasta 1.2% carbono. Sin embargo la mayoría de los aceros contienen menos del 0.5 por ciento de carbono. La mayoría de los aceros se fabrican mediante la oxidación del carbono y otras impurezas del arrabio hasta que el contenido de carbono en el hierro se reduce al nivel necesario.

Los aceros al carbono simple se designan más comúnmente con un código de cuatro dígitos AISI/SAE. Los dos primeros dígitos son 10 e indican que se trata de acero al carbono simple. Los dos últimos dígitos indican el contenido de carbono nominal del acero, en centésimas de punto porcentual. Por ejemplo, el número de código AISI/SAE – 1020 indica que se trata de un acero al carbono simple con un contenido nominal de 0.2 por ciento de carbono.

5. METODOLOGÍA

El propósito de este capítulo es definir los procedimientos que se realizaron para alcanzar los objetivos propuestos en el desarrollo del proyecto; la metodología se dividió en cinco etapas:

- Adquisición de materiales.
- Caracterización morfológica y química de la alúmina y el dióxido de titanio
- Fabricación de probetas para ensayos
- Deposición de recubrimientos de la mezcla $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt\% TiO}_2$
- Determinación del número de ensayos requeridos para la obtención de datos estadísticamente confiables.
- Realización de ensayos de microdureza, desgaste abrasivo y desgaste adhesivo

5.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

El material base utilizado fue acero AISI/SAE 1020, el cual fue adquirido a través de la METALMARKET ubicada en la ciudad de Bucaramanga. La forma geométrica de adquisición de este material fue de cortes redondos de 88.9 mm de diámetro y 12 mm de espesor, además cortes de lámina 28 mm de ancho, 82 mm de alto y 12.7 mm de espesor.

La alúmina y el dióxido de titanio de tamaño micrométrico fueron adquiridos a la empresa Goodfellow¹⁴, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Londres (Inglaterra). La alúmina posee un 99.9% de pureza y el tamaño promedio de los granos es de 45 micrones; el dióxido de titanio posee un 99.6% de pureza y el tamaño promedio de los granos es de 45 micrones. La forma geométrica del material es particulado.

5.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y QUÍMICA DE LA ALUMINA Y EL DIOXIDO DE TITANIO

La caracterización morfológica y química de la alúmina y el dióxido de titanio, se realizó a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido o SEM (Scanning Electron Microscope); para lo cual se utilizó el equipo con que cuenta el laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en su sede de Guatiguará. El equipo es de marca FEI modelo QUANTA FEG 650, dotado con la tecnología Field Emission para la emisión de electrones, cuenta con detectores ETD, BSED, LFD, GSED para adquisición de imágenes y sonda SDD APOLLO X para la detección de rayos X.

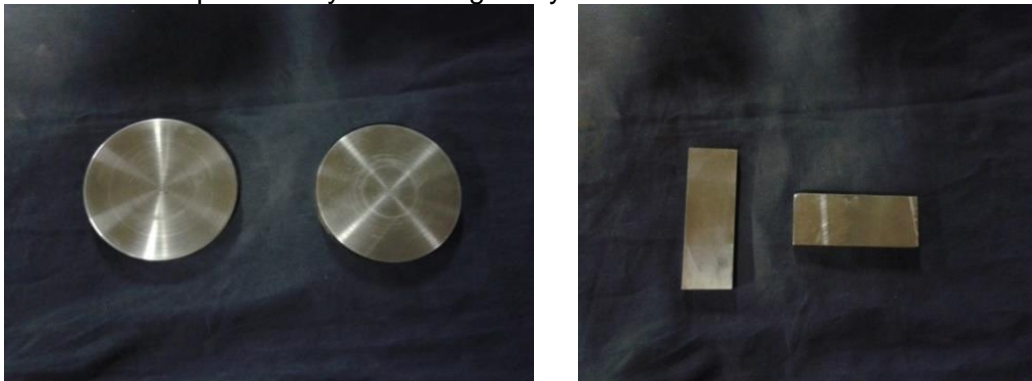
Las imágenes obtenidas del microscopio permiten identificar la forma y calcular el tamaño de las partículas que componen el material. Adicionalmente el microscopio tiene integrado un sistema de microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), el cual entrega un reporte que contiene el espectro, los elementos identificados con sus porcentajes en peso atómico y número atómico (el EDS es un análisis semi-cuantitativo).

5.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS

¹⁴http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat11.php?ewd_token=ibGgEro7Oxep6IL06tp8SMEIFyTFMU&n=4uIJZhA7x4fjRzimFVyLd9wOUtHE9s

Las probetas para realizar los depósitos se fabricaron a partir de proceso de mecanizado en torno y fresadora; la forma geométrica se ilustran en la figura 13, las cuales se adaptan a los requerimientos de las normas ASTM y los equipos a utilizar en los ensayos de dureza, resistencia al desgaste adhesivo y resistencia al desgaste abrasivo. Las probetas son sometidas a un proceso de granallado, el cual consiste en la proyección sobre la superficie de un chorro de arena (tamizada por una malla de 200mm – mesh 10) a una presión de 120 lb estipulada, con el fin de eliminar agentes contaminantes que puedan afectar el anclaje del recubrimiento.

Figura 13. Probetas para ensayos de desgaste y dureza



Fuente: Autores del proyecto

5.4 DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{TiO}_2$

Se inicia el proceso con la mezcla de alúmina y dióxido de titanio en porcentajes iguales de peso, la cual se deposita en la tolva de la pistola de proyección, figura 14.

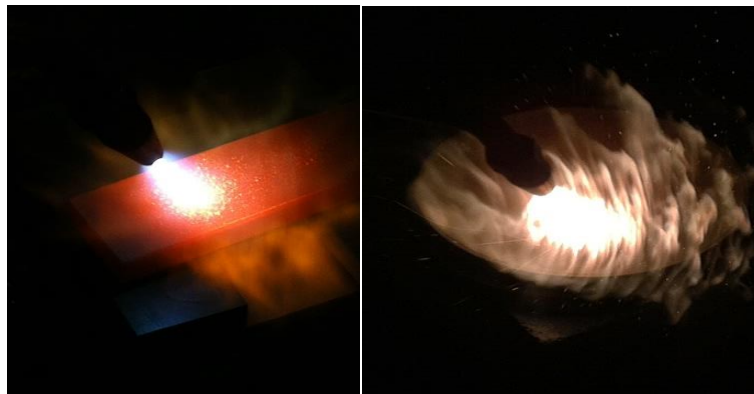
Figura 14. Pistola para el proceso de rociado térmico por llama.



Fuente: Autores del proyecto

Posteriormente se enciende el equipo oxiacetilénico y a través de la llama se calienta el material bases (AISI/SAE 1020) hasta llegar a una temperatura aproximada a 700°C; posteriormente a través de la pistola se realiza la proyección de la mezcla sobre la superficie del material, tal como se observa en la figura 15, el cual con anterioridad ha sido granallado y recubierto con una aleación fusible a base de níquel, la cual es suministrada por la empresa SAGER, ubicada en la ciudad de Bogotá. Las presiones utilizadas en la realización de los depósitos fueron de 5 psi para el acetileno y 15 psi para oxígeno.

Figura 15. Proceso de recubrimiento del material base





Fuente: Autores del proyecto

5.5 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS ESTADÍSTICAMENTE CONFIABLES.

Para determinar el número de ensayos requeridos para obtener datos estadísticamente confiables, se realizó una premuestra con 4 probetas para cada tipo de ensayo a realizar (dureza, resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo). La ecuación que se utiliza para determinar 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.

El nivel de confianza que se desea obtener de los resultados del ensayo será como mínimo de un 95%, lo que corresponde a un valor de Z de 1.96; también se espera que el error permisible no supere el 10% de los valores promedios obtenidos de los

ensayos de dureza, resistencia al desgaste adhesivo y resistencia al desgaste abrasivo.

5.6 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Los ensayos se realizaron en tres tipos diferentes de probetas: las primeras se fabricaron en acero AISI/SAE 1020 Normalizado; las segundas fueron del mismo acero, pero tratado térmicamente con un proceso de temple (calentamiento 850°C y enfriamiento en agua) y revenido (calentamiento 350°C y enfriamiento al aire); y las últimas fueron de acero AISI/SAE 1020 con recubrimiento de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂, depositado a través del proceso de rociado térmico por llama.

5.6.1 Ensayos de Dureza

Se utiliza el equipo medidor de Dureza HARTIP 1500; para obtener la dureza Vickers se realiza el siguiente procedimiento:

- Oprimir el botón ON para encender el instrumento de Medición
- Luego se pulsa el botón M, para asignarle la dirección en la cual se realizara la prueba, esta será vertical con dirección hacia abajo.
- Nuevamente se oprime el botón M para asignar el tipo de material que se le realizara la prueba en este caso M1
- Nuevamente se pulsa el botón M para asignar el tipo de prueba a realizar, para este proyecto será HU que corresponde a dureza Vickers y se finaliza pulsando otra vez M para seleccionar la opción promedio y así obtener una mayor certeza en los resultados obtenidos de los ensayos.

5.6.2 Ensayo de Resistencia al desgaste abrasivo

Para el desarrollo de estas pruebas se utilizan los parámetros específicos definidos por la norma ASTM G65-04 (REAPROBADA 2010): *método de prueba estándar*

para pruebas de desgaste abrasivo con una rueda de caucho y arena. El procedimiento a seguir serán los siguientes aspectos:

- Limpiar adecuadamente y de manera minuciosa los especímenes, con el fin de evitar algún tipo de impureza.
- Pesar cada uno de las probetas a ensayar.
- Especificar en la máquina, figura 16, la magnitud de la velocidad de la rueda de caucho, la cual debe girar a 300 RPM.

Figura 16. Máquina para ensayos de desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto

- 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.

$$Volumen\ perdido, mm^3 = \frac{masa\ perdida\ (g)}{densidad\ (g/cm^3)} * 1000$$

Los ensayos realizados siguen los parámetros de prueba definidos por la norma ASTM G65-04, y se encuentran relacionados en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros realización de ensayos de abrasión

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)	100	71.8	236
E	130 (30)	1000	718	2360

Fuente: norma ASTM G65 – 04 (REAPROBADA EN EL 2010) *Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando arena seca y rueda de caucho*

5.6.3 Ensayos de Resistencia al desgaste adhesivo

Los ensayos de resistencia al desgaste adhesivo se realizaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM G99-05 *método de prueba estándar para ensayos de desgaste con una máquina de pin-on-disk*, las mediciones de desgaste son reportadas como la pérdida de volumen en milímetros cúbicos para cada una de los discos utilizados en los ensayos.

El equipo utilizado (figura 17) se encuentra en el laboratorio de procesos industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el cual trabaja a velocidades de operación ubicadas en el rango de 60 a 600 RPM. Las distancias lineales definidas para la realización de los ensayos fueron de 250, 750 y 1000 metros.

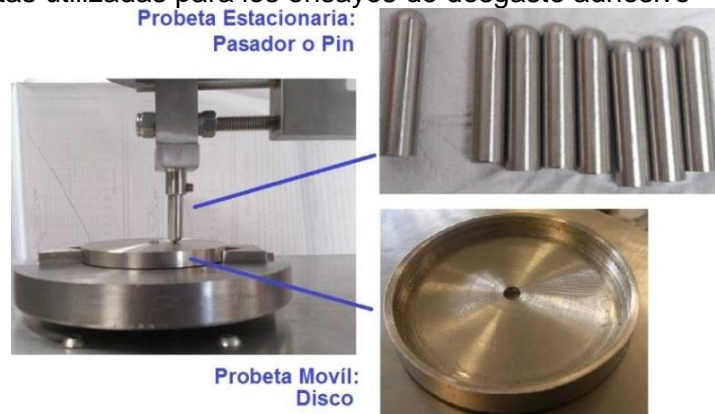
Figura 17. Máquina para medición de desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto

Para la realización de los ensayos se utiliza una probeta estacionaria y otra móvil (figura 18); la estacionaria es un pasador o pin sujetado en la parte superior del brazo porta-pasadores. Esta punta posee una geometría redondeada que requiere procesos de elaboración menos complicados. La parte móvil, que es un disco acoplado al porta probetas por medio de unas tenazas de sujeción y gira a la velocidad transmitida por el motor.

Figura 18. Probetas utilizadas para los ensayos de desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto

El procedimiento definido por la norma para la realización de los ensayos de desgaste adhesivo es el siguiente:

- Limpiar de manera minuciosa los especímenes (disco y pasador), con el fin de eliminar impurezas y materiales extraños presentes en la superficie.
- Pesaje de los especímenes con una exactitud de 0.0001 g.
- Insertar el disco y el pasador de forma segura en el dispositivo de sujeción, de manera que se encuentren perpendicularmente al eje de transmisión.
- Añadir las masas requeridas para garantizar la carga recomendada, se presiona el pasador contra el disco por medio de la adición o sustracción de masas externas, como se observa en la figura 19.

Figura 19. Masas externas requeridas para garantizar la carga recomendada en el ensayo



Fuente: Autores del proyecto

- Ingresar los valores en el programa del PLC, los cuales incluyen, frecuencia de operación y número de revoluciones del disco, lo que permite determinar la distancia lineal recorrida.
- Iniciar la prueba con el disco y el pasador en contacto bajo carga; el equipo se detiene automáticamente apenas se alcance el número de revoluciones especificado en el PLC para el ensayo. Las pruebas no deben interrumpirse o continuarse por ningún motivo, si se presenta algún inconveniente la prueba debe volverse a realizar con probetas nuevas.
- Retirar el disco y el pasador, realizar un proceso de limpieza para eliminar cualquier residuo.
- Realizar el proceso de pesaje de los especímenes ensayados

- 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.

$$\text{Volumen perdido, mm}^3 = \frac{\text{masa perdida (g)}}{\text{densidad (g/cm}^3)} * 1000$$

Para la realización de los ensayos se utilizaron las condiciones de prueba relacionadas en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de los ensayos 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

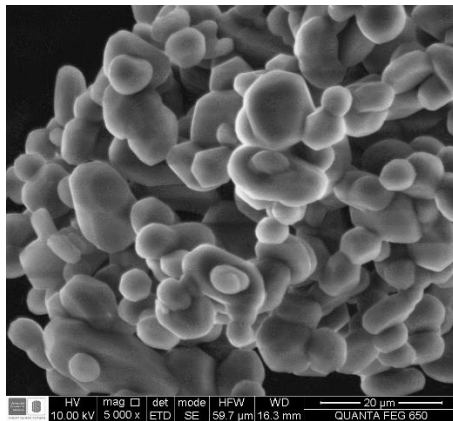
Fuente: Autores del proyecto

6. RESULTADOS OBTENIDOS

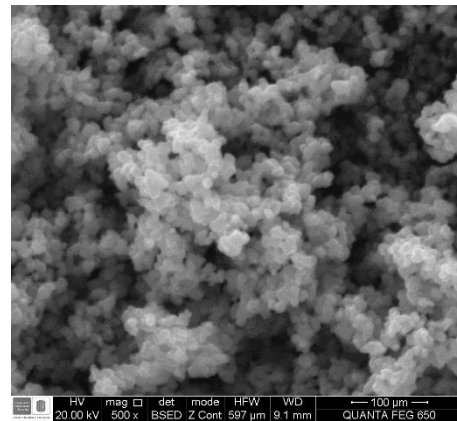
6.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICA Y QUÍMICA DEL Al₂O₃ Y EL TiO₂

Los ensayos realizados en el microscopio electrónico de barrido dan como resultado imágenes que permiten determinar la morfología de la alúmina y el dióxido de titanio analizado; un ejemplo de ellas se relaciona en la figura 20.

Figura 20. Imágenes de las partículas de alúmina (a) y dióxido de titanio (b), obtenidas mediante SEM



(a)



(b)

Fuente: Autores del proyecto

La figura 20 permite observar que tanto la alúmina como el dióxido de titanio utilizados tienen una gran cantidad de partículas con formas geométricas irregulares, mientras que en menor proporción presentan una tendencia a poseer formas geométricas esféricas. También se puede afirmar que el tamaño de las partículas está en el orden de los micrómetros, ya que las escalas de las imágenes son de 20 μm para la alúmina y 100 μm para el dióxido de titanio.

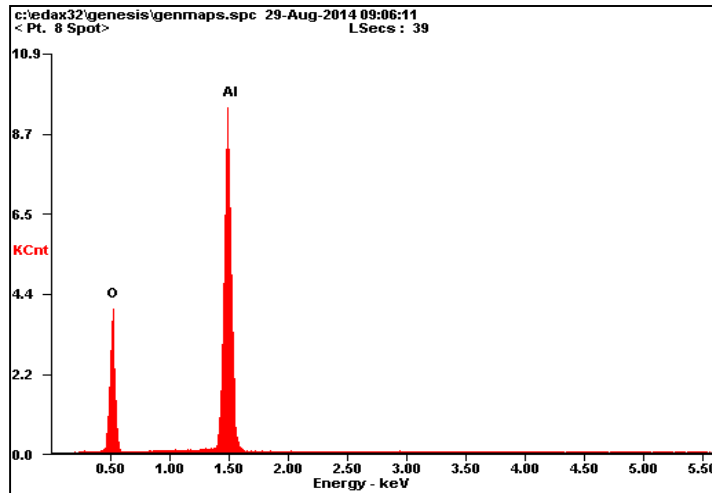
Los análisis de EDS realizados para la alúmina y el dióxido de titanio obtenido a través de microscopía electrónica de barrido, se relacionan en las figuras 21 y 22. En las tablas 7 y 8 se relacionan los porcentajes de peso atómico de cada material, los cuales se comparan con las relaciones porcentuales teniendo como referencia la tabla periódica de elementos, esto para comprobar la composición de los mismos.

Tabla 7. Proporción de peso y número atómico de Al_2O_3

Elemento	Wt%	At%
Aluminio (Al)	58,88	45,92
Oxígeno (O)	41,12	54,08

Fuente: Autores del proyecto

Figura 21. Gráfica resultante del análisis EDS del Alúmina



Fuente: Autores

del proyecto

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

$$\begin{aligned}
 At\ Al &= 26,98\ g/mol & At\ O &= 15,99\ g/mol \\
 At\ Al_2 &= At\ Al * 2 = 53,96\ g/mol & At\ O_3 &= At\ O * 3 = 47,97\ g/mol \\
 At\ Al_2O_3 &= At\ Al_2 + At\ O_3 = 101,93\ g/mol
 \end{aligned}$$

$$\%At\ Al_2 = \frac{At\ Al_2}{At\ Al_2O_3} * 100 = \frac{53,96\ g/mol}{101,93\ g/mol} * 100 = 52,93\%$$

$$\%At\ O_3 = \frac{At\ O_3}{At\ Al_2O_3} * 100 = \frac{47,97\ g/mol}{101,93\ g/mol} * 100 = 47,07\%$$

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:

$$e = \frac{At\ Al_2r - At\ Al_2m}{At\ Al_2r} * 100 = \frac{52,93\% - 45,92\%}{52,93\%} * 100$$

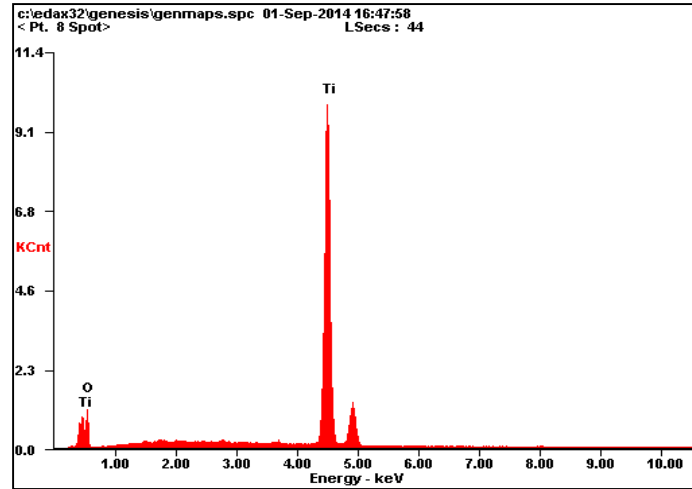
$$e = 13,24\%$$

Tabla 8. Proporción de peso y número atómico de TiO₂

Elemento	Wt%	At%
Titanio (Ti)	78,36	54,74
Oxígeno (O)	21,64	45,26

Fuente: Autores del proyecto

Figura 22. Gráfica resultante del análisis EDS del dióxido de titanio



Fuente: Autores del proyecto

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

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

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

$$\%At Ti = \frac{At Ti}{At TiO_2} * 100 = 59,94\%$$

$$\%At O_2 = \frac{At O_2}{At TiO_2} * 100 = 40,06\%$$

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:

$$e = \frac{At Tir - At Tim}{At Tir} * 100 = \frac{59,94\% - 54,74}{59,94\%} * 100$$

$$e = 8,67\%$$

Los resultados obtenidos permiten concluir que los elementos presentes en las muestras efectivamente son Al, Ti y O; sin embargo existe una diferencia entre los

datos teóricos esperados y los experimentales obtenidos; esto se puede justificar por el tipo de análisis realizado, ya que el EDS es un análisis semicuantitativo, donde pueden existir errores un poco mayores. Debido a lo anterior se puede afirmar que el material utilizado para los depósitos son efectivamente Alúmina y Dióxido de Titanio.

6.2 ENSAYO DE DUREZA VICKERS

Inicialmente se realizó una premuestra con 4 ensayos para cada tipo de probeta, esto con el fin de determinar el número de ensayos necesarios para alcanzar una confiabilidad del 95% y un % de error del 5%. Los resultados se relacionan en la tabla 9.

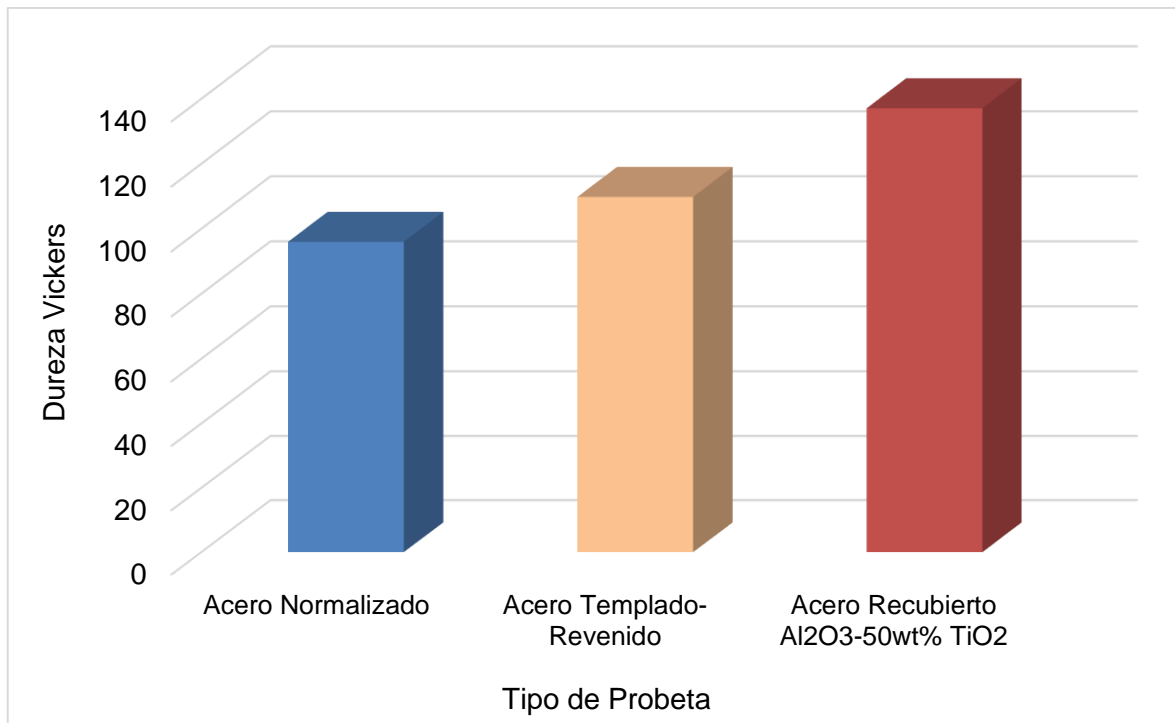
Tabla 9. Resultados premuestra de ensayos de dureza Vickers

MUESTRA	DUREZA VICKERS		
	Acero AISI/SAE 1020 Normalizado	Acero AISI/SAE 1020 Templado y Revenido	Acero AISI/SAE 1020 con recubrimiento Al ₂ O ₃ – 50 wt% TiO ₂
1	94.8	106.6	139.6
2	100.2	107.8	139.2
3	97.4	108.0	128.6
4	91.4	116.6	140.8
Promedio	96.0	109.8	137.1
Desviación Estándar	3.8	4.6	5.7
Número de Ensayos	3	3	3

Fuente: Autores del proyecto

La tabla 9 permite concluir que el número de ensayos de dureza Vickers necesarios para alcanzar datos estadísticamente confiables es de 3; como la premuestra utilizada fue de 4 ensayos por cada tipo de probeta, entonces no se hace necesario la realización de más pruebas. El comportamiento y la variación de la dureza en cada tipo de probeta, se muestra en la figura 23.

Figura 23. Resultados ensayo de Dureza Vickers



Fuente: Autores del proyecto

La figura 23 permite concluir que la dureza Vickers del acero AISI/SAE 1020 mejora en un 14.4% cuando el material es tratado térmicamente con un proceso de temple-revenido; y en un 42.8% cuando es recubierto con una capa de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂.

6.3 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO.

Los ensayos de resistencia al desgaste abrasivo dan como resultado una huella rectilínea sobre la probeta, y por consiguiente una remoción de material, tal como se observa en la figura 24.

Figura 24. Huellas sobre las probetas después de ser sometidas a ensayos de desgaste abrasivo



Fuente: Autores del proyecto

Para la determinación del número de ensayos requeridos en las pruebas de desgaste abrasivo se utiliza como parámetro de comparación el volumen perdido en la probeta, en mm^3 . Los datos utilizados son los obtenidos de una premuestra de 4 ensayos realizada a probetas recubiertas con $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$; los resultados de volumen perdido y el número de ensayos requeridos para una confiabilidad del 95% y un error máximo del 10% se relacionan en la tabla 10.

Tabla 10. Pérdida de Material presentada en los ensayos de desgaste abrasivo en probetas de acero AISI/SAE 1020 recubierto con $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)							
	71.82		718.2		1436.4		4309.2	
	Peso (g)	Volumen (mm^3)	Peso (g)	Volumen (mm^3)	Peso (g)	Volumen (mm^3)	Peso (g)	Volumen (mm^3)
1	0.2833	36.08	0.2796	35.61	0.6505	82.87	1.0058	128.12
2	0.2595	33.06	0.3221	41.04	0.5233	66.67	0.8554	108.96
3	0.1892	24.11	0.2985	38.03	0.5056	64.40	0.9698	123.54
4	0.2594	33.05	0.3515	44.78	0.6267	79.84	1.2267	156.26
Promedio		31.57		39.86		73.44		129.22
Desviación Estándar		5.18		3.96		9.26		19.79
Número de Ensayos		10		4		6		9

Fuente: Autores del proyecto

La tabla 10 permite concluir que el número de ensayos de resistencia al desgaste abrasivo necesarios para alcanzar datos estadísticamente confiables es de 10; los

resultados obtenidos de cada tipo de probeta (acero AISI/SAE 1020 Normalizado; acero AISI/SAE 1020 tratado térmicamente con un proceso de temple y revenido y acero AISI/SAE 1020 con recubrimiento de $Al_2O_3 - 50 \text{ wt\% } TiO_2$, depositado a través del proceso de rociado térmico por llama) se relacionan en las tablas 11, 12 y 13.

Tabla 11. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 normalizado

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)							
	71.82		718.2		1436.4		4309,2	
	Peso (g)	Volumen (mm ³)	Peso (g)	Volumen (mm ³)	Peso (g)	Volumen (mm ³)	Peso (g)	Volumen (mm ³)
1	0.0452	5.76	0.1629	20.75	0.2892	36.84	0.6303	80.29
2	0.0478	6.09	0.1606	20.46	0.2473	31.50	0.6733	85.77
3	0.0479	6.10	0.1693	21.57	0.2098	26.73	0.5903	75.20
4	0.0446	5.68	0.1635	20.83	0.2189	27.89	0.6157	78.43
5	0.0465	5.92	0.1673	21.31	0.2748	35.01	0.6423	81.82
6	0.0473	6.03	0.1658	21.12	0.2657	33.85	0.6372	81.17
7	0.0458	5.83	0.1626	20.71	0.2361	30.08	0.6408	81.63
8	0.0437	5.57	0.1667	21.24	0.2275	28.98	0.6621	84.34
9	0.0449	5.72	0.1672	21.30	0.2783	35.45	0.6586	83.90
10	0.0481	6.13	0.1689	21.52	0.2677	34.10	0.6814	86.80
Promedio	0.0462	5.92	0.1655	20.96	0.25153	31.70	0.6432	80.62
Desviación Estándar	0.0016	0.199	0.0029	0.372	0.0274	3.496	0.0273	3.482

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 12. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 templado y revenido

Fuente: Autor del proyecto

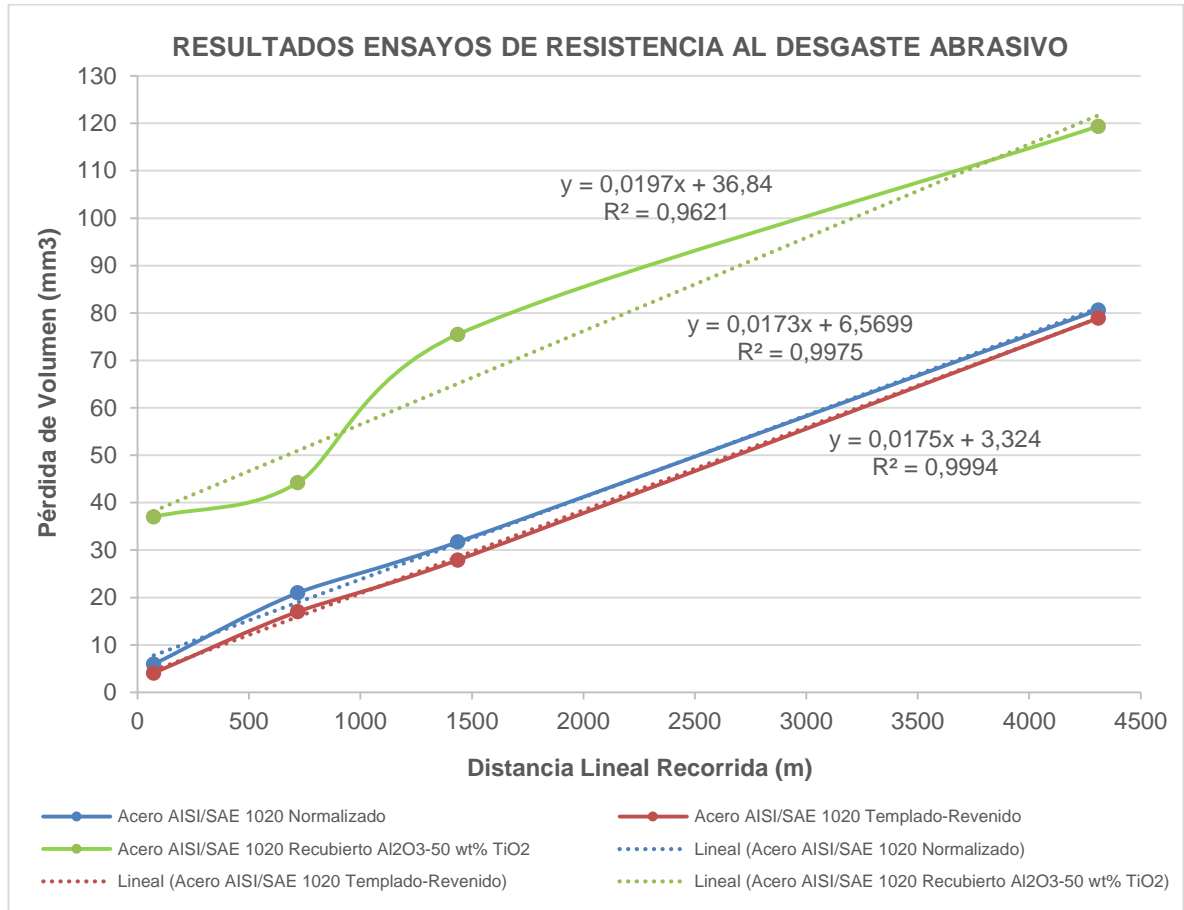
MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)							
	71.82		718.2		1436.4		4309,2	
	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)
1	0.0333	4.24	0.1035	13.18	0.197	25.10	0.6312	80.41
2	0.0389	4.96	0.1367	17.41	0.1979	25.21	0.6508	82.90
3	0.0223	2.84	0.1503	19.15	0.2462	31.36	0.5708	72.71
4	0.0362	4.61	0.1364	17.38	0.2058	26.22	0.6397	81.49
5	0.0345	4.39	0.1345	17.13	0.2135	27.20	0.6241	79.50
6	0.0267	3.40	0.1225	15.61	0.2145	27.32	0.5948	75.77
7	0.0283	3.61	0.1276	16.25	0.2211	28.17	0.6115	77.90
8	0.0332	4.23	0.1447	18.43	0.2184	27.82	0.6226	79.31
9	0.0351	4.47	0.1388	17.68	0.2337	29.77	0.6419	81.77
10	0.0309	3.94	0.1406	17.91	0.2423	30.87	0.6073	77.36
Promedio	0.0319	4.07	0.1336	17.01	0.2190	27.90	0.6195	78.91
Desviación Estándar	0.0052	0.668	0.0137	1.748	0.0160	2.042	0.0252	3.212

Tabla 13. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 recubierto con $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)							
	71.82		718.2		1436.4		4309,2	
	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)	Peso (g)	Volumen (mm3)
1	0.0954	12.15	0.2796	35.61	1.1172	142.31	1.0058	128.12
2	0.2833	36.08	0.2000	25.48	0.6505	82.87	0.8554	108.96
3	0.4825	61.47	0.3221	41.04	0.6609	84.19	1.7109	217.94
4	0.2595	33.06	0.5318	67.74	0.5233	66.67	0.9698	123.54
5	0.7676	97.78	0.2957	37.66	0.3785	48.22	1.6051	204.48
6	0.0841	10.72	0.2985	38.03	0.5056	64.40	0.6266	79.82
7	0.1892	24.11	0.3151	40.14	0.6267	79.84	0.6004	76.48
8	0.2594	33.05	0.3515	44.78	0.5315	67.71	0.5295	67.45
9	0.2109	26.86	0.5449	69.41	0.2653	33.80	0.2402	30.60
10	0.2712	34.54	0.3305	42.11	0.6651	84.72	1.2267	156.26
Promedio	0.2903	36.98	0.3470	44.20	0.5925	75.47	0.9370	119.37
Desviación Estándar	0.2011	25.62	0.1087	13.85	0.2257	28.76	0.4717	60.09

Fuente: Autor del proyecto

Figura 25. Comparación de la resistencia al desgaste abrasivo en probetas de acero AISI/SAE 1020

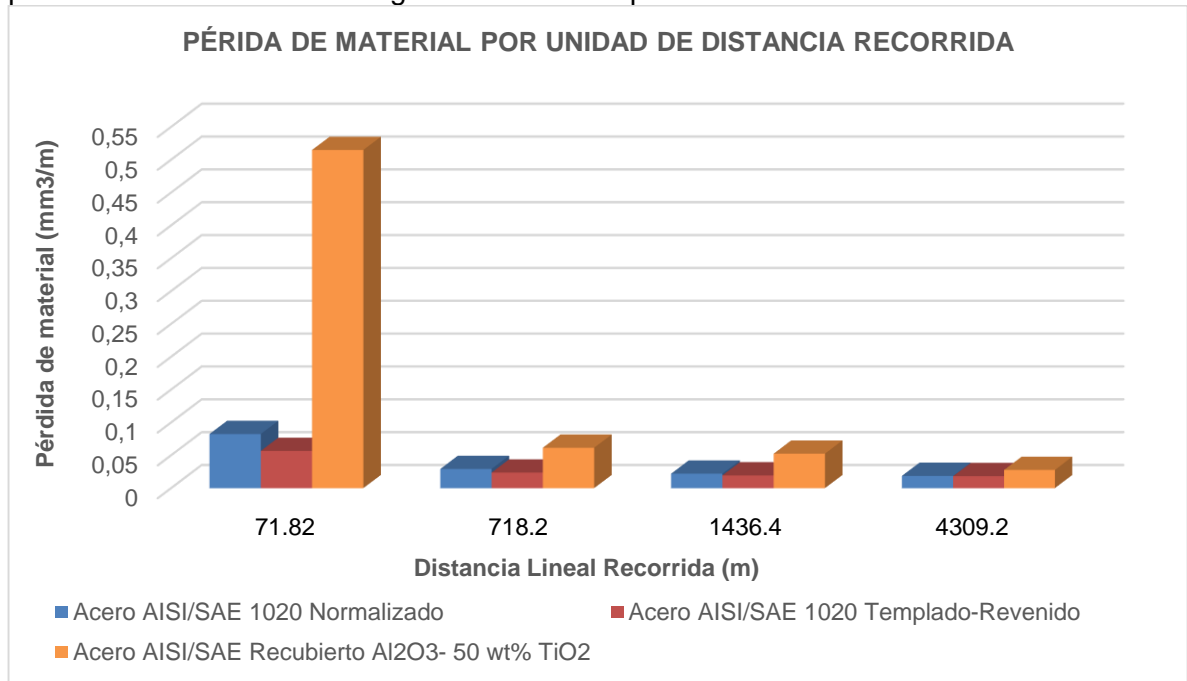


Fuente: Autor del proyecto

La figura 25 permite observar una relación lineal directamente proporcional entre la pérdida de material en la probeta y la distancia lineal recorrida, lo cual concuerda con la información bibliográfica consultada. También se puede concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido mejora la resistencia al desgaste abrasivo del acero AISI/SAE 1020 normalizado; y que el recubrimiento Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂ disminuye dicha propiedad.

Para poder analizar los resultados se define el volumen de material perdido por unidad de distancia lineal recorrida; los resultados se relacionan en la figura 26.

Figura 26. Comparación de la pérdida de material por unidad de distancia recorrida en las pruebas de resistencia al desgaste abrasivo en probetas de acero AISI/SAE 1020

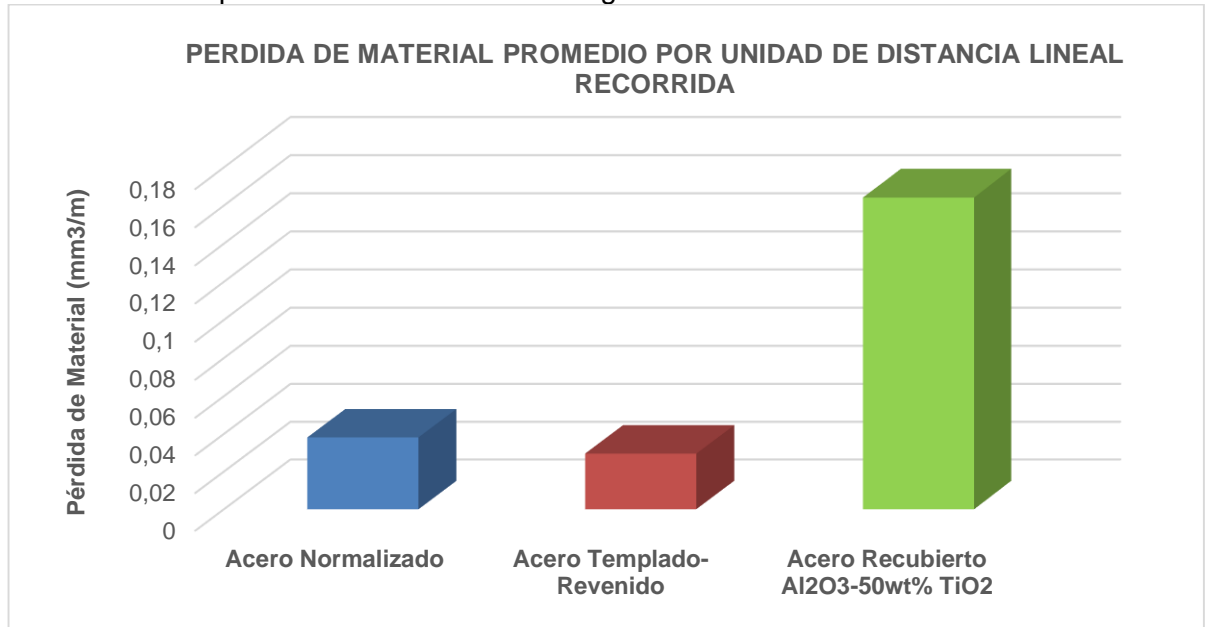


Fuente: Autor del proyecto

La figura 26 permite concluir que la mayor pérdida de material en las probetas recubiertas se presenta en distancias cortas, lo cual puede indicar una tendencia a pensar que la adhesión del recubrimiento sobre el material base no es lo suficientemente fuerte como para evitar que este se desprenda. En la figura 27 se observan los datos promedio de la pérdida de material por unidad de distancia recorrida para cada una de las clases de probeta ensayada.

El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 relacionados en la figura 27, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 22,5% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂ la aumentan en un 331%

Figura 27. Comparación de la pérdida de material promedio por unidad de distancia recorrida en las pruebas de resistencia al desgaste abrasivo sobre acero AISI/SAE 1020



Fuente: Autor del proyecto

6.3 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO.

Los ensayos de resistencia al desgaste adhesivo dan como resultado una huella circular sobre la probeta, y por consiguiente una remoción de material, tal como se observa en la figura 28.

Figura 28. Huellas sobre las probetas después de ser sometidas a ensayos de desgaste adhesivo



Fuente: Autores del proyecto

Para la determinación del número de ensayos requeridos en las pruebas de desgaste adhesivo se utiliza como parámetro de comparación el volumen perdido en la probeta, en mm^3 . Los datos utilizados son los obtenidos de una premuestra de 4 ensayos realizada a probetas recubiertas con $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$; los resultados de volumen perdido y el número de ensayos requeridos para una confiabilidad del 95% y un error máximo del 10% se relacionan en la tabla 14.

Tabla 14. Pérdida de Material presentada en los ensayos de desgaste adhesivo en probetas de acero AISI/SAE 1020 recubierto con $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)					
	Peso (g)	Volumen (mm^3)	Peso (g)	Volumen (mm^3)	Peso (g)	Volumen (mm^3)
1	0.5399	68.77	0.6541	83.33	1.2359	157.45
2	0.3916	49.88	0.7859	100.12	1.1283	143.73
3	0.5327	67.86	0.5704	72.66	1.3043	166.16
4	0.5399	68.78	0.5988	76.28	1.1823	150.62
Promedio		63.82		83.10		154.49
Desviación Estándar		9.30		12.18		9.59
Número de Ensayos		9		9		2

Fuente: Autores del proyecto

La tabla 14 permite concluir que el número de ensayos de resistencia al desgaste adhesivo necesarios para alcanzar datos estadísticamente confiables es de 9, sin embargo se decide realizar 10 ensayos por cada tipo de probeta; los resultados obtenidos de cada una de ellas (acero AISI/SAE 1020 Normalizado; acero AISI/SAE 1020 tratado térmicamente con un proceso de temple y revenido y acero AISI/SAE 1020 con recubrimiento de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$, depositado a través del proceso de rociado térmico por llama) se relacionan en las tablas 15, 16 y 17.

Tabla 15. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 normalizado

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)					
	250		750		1000	
	Peso (g)	volumen (mm3)	Peso (g)	volumen (mm3)	Peso (g)	volumen (mm3)
1	0.2190	27.90	0.4420	56.31	0.5107	65.06
2	0.2616	33.32	0.4447	56.65	0.4370	55.67
3	0.2007	25.57	0.3865	49.24	0.4030	51.34
4	0.2110	26.88	0.3769	48.01	0.4797	61.11
5	0.2344	29.86	0.4128	52.59	0.4362	55.57
6	0.2436	31.03	0.3744	47.69	0.4581	58.36
7	0.2754	35.08	0.4216	53.71	0.4729	60.24
8	0.2065	26.31	0.4116	52.43	0.4994	63.62
9	0.2248	28.64	0.4352	55.44	0.5075	64.65
10	0.2372	30.22	0.3973	50.61	0.4639	59.10
Promedio pérdida de material	0.2314	29.48	0.4103	52.27	0.4668	59.47
Desviación Estándar	0.0241	3.07	0.0260	3.31	0.0347	4.42

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 16. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 templado y revenido

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)					
	250		750		1000	
	Peso (g)	volumen (mm3)	Peso (g)	volumen (mm3)	Peso (g)	volumen (mm3)
1	0.2322	29.58	0.3978	50.68	0.4674	59.54
2	0.2311	29.44	0.3826	48.74	0.4438	56.54
3	0.2218	28.25	0.2997	38.18	0.4116	52.43
4	0.1891	24.09	0.3191	40.65	0.3965	50.51
5	0.1942	24.74	0.3762	47.92	0.3892	49.58
6	0.1853	23.61	0.3105	39.55	0.4341	55.30
7	0.2105	26.82	0.3753	47.81	0.4483	57.11
8	0.2157	27.48	0.3544	45.15	0.4227	53.85
9	0.2036	25.94	0.3819	48.65	0.4506	57.40
10	0.2309	29.41	0.3276	41.73	0.4009	51.07
Promedio pérdida de material	0.2114	26.94	0.3525	44.91	0.4265	54.33
Desviación Estándar	0.0178	2.27	0.0353	4.49	0.0264	3.36

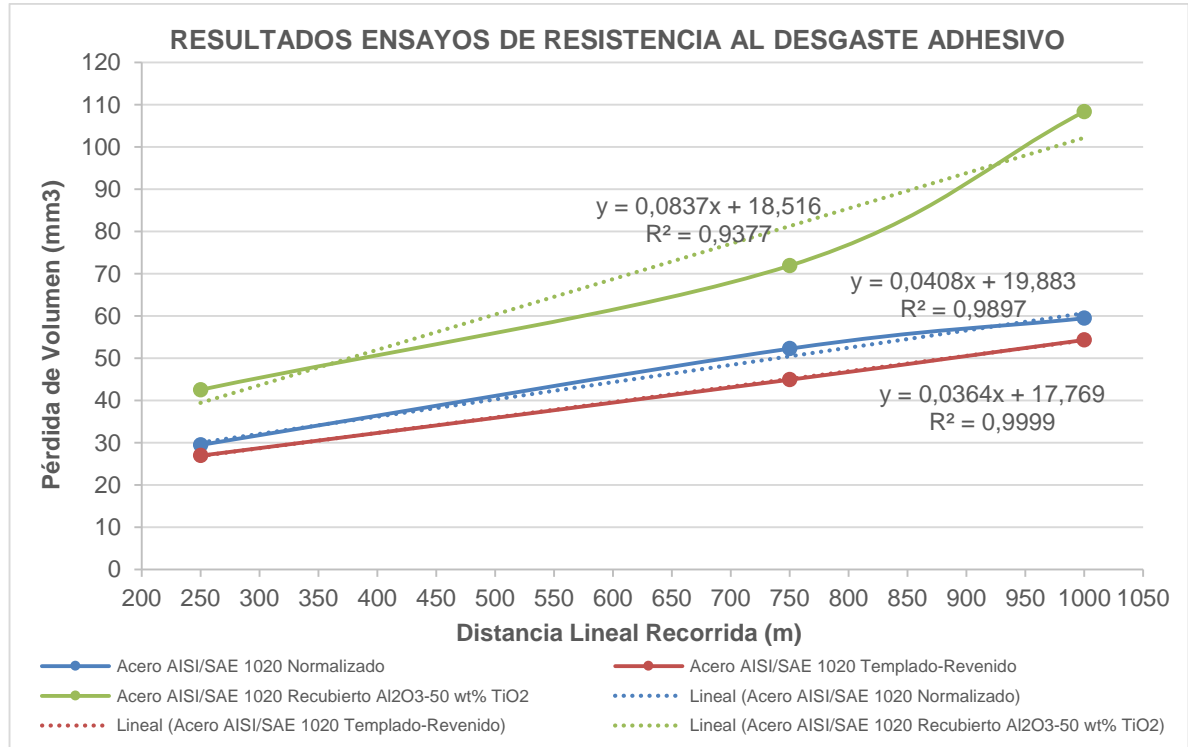
Fuente: Autor del proyecto

Tabla 17. Pérdida de Material en los ensayos de desgaste Adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 recubierto con Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂

MUESTRA	DISTANCIA LINEAL (m)					
	250		750		1000	
	Peso (g)	volumen (mm ³)	Peso (g)	volumen (mm ³)	Peso (g)	volumen (mm ³)
1	0.5399	68.77	0.6541	83.33	1.2359	157.45
2	0.3916	49.88	0.4417	56.27	0.5964	75.97
3	0.6720	85.61	1.2984	165.41	1.4429	183.81
4	0.2197	27.99	0.7859	100.12	1.1283	143.73
5	0.1000	12.73	0.3482	44.35	0.5045	64.26
6	0.5327	67.86	0.5704	72.66	0.2515	32.04
7	0.5399	68.78	0.4178	53.22	1.3043	166.16
8	0.0625	7.96	0.3452	43.97	0.5160	65.74
9	0.1212	15.44	0.1848	23.54	0.3467	44.17
10	0.1596	20.34	0.5988	76.28	1.1823	150.62
Promedio pérdida de material	0.3339	42.54	0.5645	71.92	0.8509	108.39
Desviación Estándar	0.2259	28.77	0.3114	39.67	0.4474	56.99

Fuente: Autor del proyecto

Figura 29. Comparación de la resistencia al desgaste Adhesivo en probetas de acero AISI/SAE 1020

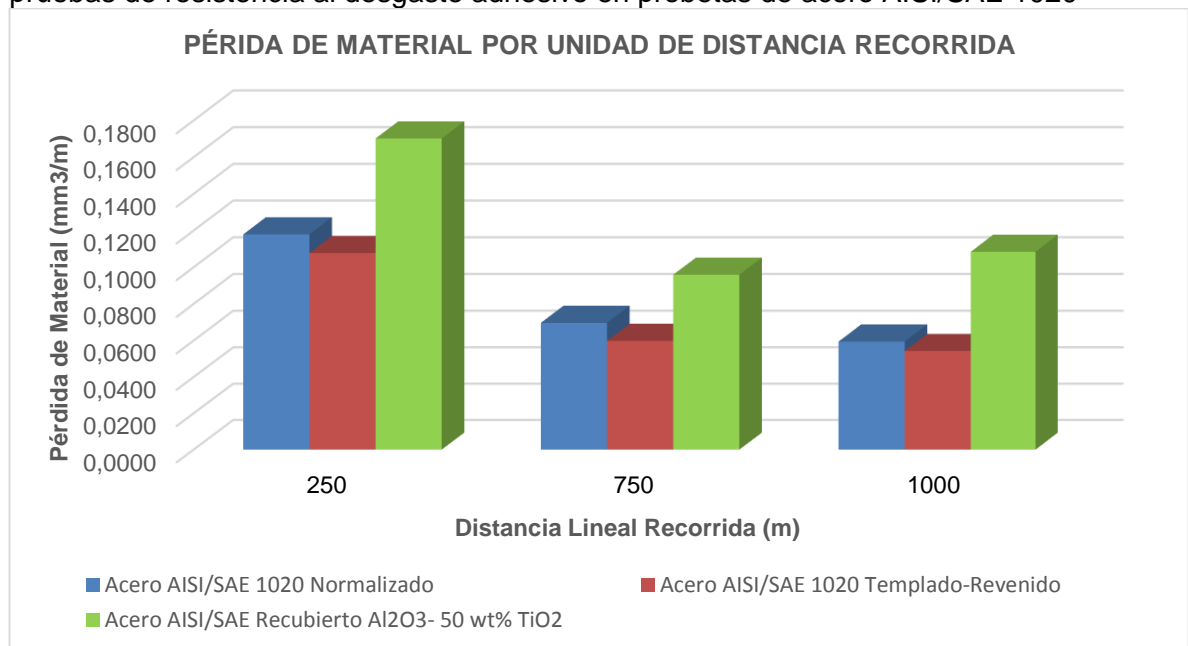


Fuente: Autor del proyecto

La figura 29 permite observar una relación lineal directamente proporcional entre la pérdida de material en la probeta y la distancia lineal recorrida, lo cual concuerda con la información bibliográfica consultada. También se puede concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido mejora la resistencia al desgaste adhesivo del acero AISI/SAE 1020 normalizado; y que el recubrimiento $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ disminuye dicha propiedad.

Para poder analizar los resultados se define el volumen de material perdido por unidad de distancia lineal recorrida; los resultados se relacionan en la figura 30.

Figura 30. Comparación de la pérdida de material por unidad de distancia recorrida en las pruebas de resistencia al desgaste adhesivo en probetas de acero AISI/SAE 1020

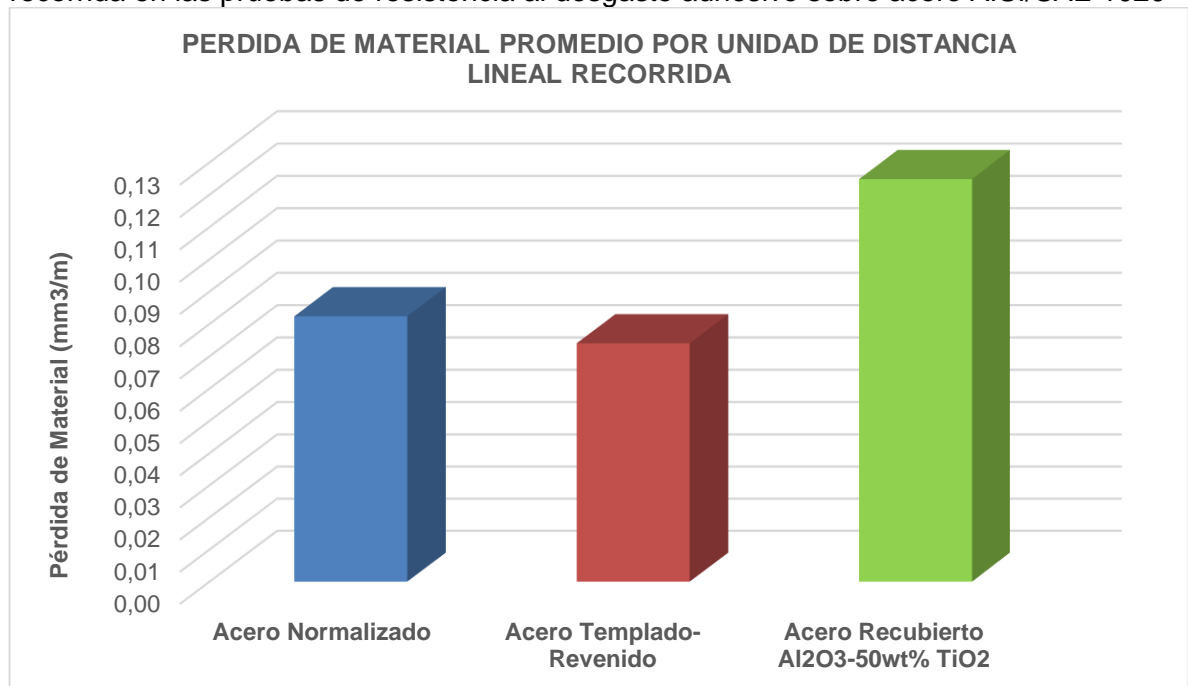


Fuente: Autor del proyecto

La figuras 30 permite concluir que la mayor pérdida de material en las probetas recubiertas se presenta en distancias cortas, sin embargo continua estando por encima en las demás distancias de los ensayos realizados, esto puede indicar una tendencia a pensar que no solo la adhesión del recubrimiento sobre el material base es insuficiente, sino que también las proporciones de la mezcla influyen

negativamente en la resistencia al desgaste adhesivo de estos compuestos cerámicos, ya que tanto la alúmina como el dióxido de titanio presentan una alta resistencia a soportar desgaste. En la figura 31 se observan los datos promedio de la pérdida de material por unidad de distancia recorrida para cada una de las clases de probeta ensayada.

Figura 31. Comparación de la pérdida de material promedio por unidad de distancia recorrida en las pruebas de resistencia al desgaste adhesivo sobre acero AISI/SAE 1020



Fuente: Autor del proyecto

El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 relacionados en la figura 31, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 10,2% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de Al₂O₃ – 50 wt% TiO₂ la aumentan en un 51,5%

7. CONCLUSIONES

- Los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ depositados a través del proceso de rociado térmico por llama permiten mejorar la dureza del material base, sin embargo esta metodología de deposición origina un recubrimiento discontinuo y posiblemente con muy baja adherencia, por lo cual la resistencia al desgaste disminuye.
- El número total de pruebas de Dureza Vickers realizados fue de 4, debido a que solo se necesitan 3 para alcanzar una confiabilidad del 95% y un porcentaje de error del 5%. Para Resistencia al desgaste adhesiva y abrasivo se realizan 10 pruebas para alcanzar una confiabilidad del 95% y un porcentaje de error del 10%.
- La dureza Vickers del acero AISI/SAE 1020 mejora en un 14.4% cuando el material es tratado térmicamente con un proceso de temple-revenido; y en un 42.8% cuando es recubierto a través de un proceso de rociado térmico por llama con una capa de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$.
- Los ensayos de resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo 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 abrasivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 22,5% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ la aumentan en un 331%
- El promedio de la pérdida de material por unidad de distancia lineal recorrida en ensayos de desgaste adhesivo sobre probetas de acero AISI/SAE 1020, permite concluir que el tratamiento térmico de temple-revenido disminuye en un 10,2% dicha pérdida, mientras que los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ la aumentan en un 51,5%

- Las pruebas de microscopia electrónica de barrido y de EDS permiten afirmar que el tamaño de los materiales utilizados para los recubrimientos poseen tamaño micrométrico y que su composición química efectivamente es Alúmina (Al_2O_3) y dióxido de titanio (TiO_2)
- Los recubrimientos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{ wt\% TiO}_2$ originan una mejora en la dureza superficial del material; sin embargo una disminución de la resistencia al desgaste del mismo; esto se puede justificar debido a que la alúmina y el dióxido de titanio poseen una alta dureza, sin embargo si no poseen una buena adherencia al sustrato fácilmente se desprende del mismo y la pérdida de material ante ensayos dinámicos aumenta.

8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.

- Se recomienda hacer una mayor cantidad de ensayos de resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo con probetas de acero AISI/SAE 1020 recubiertas, con Al_2O_3 – 50 wt% TiO_2 , a través del proceso de rociado térmico por llama, debido a que por razones de disposición de los equipos necesarios no se pudo alcanzar el 5% de error presupuestado en el proyecto.
- Se recomienda realizar ensayos de adherencia del recubrimiento al material base, desafortunadamente estos ensayos no se pudieron llevar a cabo durante el proyecto debido a que no se cuenta con el equipo necesario para ejecutarlos.
- Los parámetros para la proyección de la mezcla sobre las probetas como la temperatura en la que se debe encontrar el material y tiempo de proyección se hizo de forma manual (artesanal) a criterio del colaborador del laboratorio de procesos industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana.
- Es recomendable realizar mantenimiento preventivo a la máquina de desgaste abrasivo debido a que gran cantidad de sus partes no se encuentran en condiciones óptimas para realizar estas pruebas y generar resultados más confiables.

BIBLIOGRAFÍA

CALLE Gabriel y HENAO Édison. Dureza Vickers.. Dic. 2011 [en línea] [citado 14 diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>>

DEL CASTILLO Felipe. IZCALLI Cautitlan. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación. Laboratorio de tecnología de materiales. UNAM. 2007

DÍAZ N, Siul J. FRANCO S, Adolfo A Analisis Comparativo De La Resistencia Al Desgaste De Piezas Sinterizadas Y Piezas Recubiertas Por Rociado Termico HVOF, Caracas, 2002,. Ingeniería Mecánica

DÍAZ N, SIUL J. FRANCO S, ADOLFO A. Análisis Comparativo de la Resistencia al Desgaste de Piezas Sinterizadas y Piezas Recubiertas Por Rociado Térmico HVOF, Caracas, 2002, Ingeniería Mecánica

DÍAZ N, SIUL J. FRANCO S, ADOLFO A. Análisis Comparativo de la Resistencia al Desgaste de Piezas Sinterizadas y Piezas Recubiertas Por Rociado Térmico HVOF, Caracas, 2002, Ingeniería Mecánica

FRADE. Rubén G. PROPIEDADES FISICO MECANICAS DE LOS MATERIALES Noviembre 21. De 2013 [en línea] [citado 15 de diciembre 2014] disponible en: <<http://fradeblogs.wordpress.com/2013/11/21/propiedades-fisico-mecanicas-de-los-materiales/>>

FRICITIONWEAR High Pin On Disc Tribometer [en linea] [citado 14 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.frictionnwear.com>>

LENNTECH Propiedades químicas del titanio [en línea] [citado 14 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.lenntech.es>>

LUDDEY MARULANDA José Protección Contra La Corrosión Por Medio Del Rociado Térmico, Pereira, 2007, , universidad tecnológica de Pereira, ingeniería metalúrgica

MARIN VILLAR. Camilo THERMAL SPRAY. Protección de alto impacto. <http://www.metalactual.com/revista/8/tratamiento_thermal_spray.pdf>

QUIMINET Propiedades y principales uso. [en línea] [citado 12 de diciembre de 2014] disponible en: < <http://www.quiminet.com>>

Recubrimientos de Materiales Compuestos Metal-Cerá Mico Obtenidos por Nuevas Tecnologías de Proyección Térmica: Proyección Fría (Cgs) y su Resistencia al Desgaste (•) Revista de Metalurgia, 47 (5) Septiembre –Octubre ,390-401, 2011. Issn: 0034 -8572.

ROBLEDO. David M. Temple y Revenido Evaluación de los Parámetros de Temple y Revenido para el Acero Aisi/Sae 1045 a Escala Industrial. Corporación eco-eficiente. Medellín. Colombia.[en línea] [citado 10 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.trateriber.es> >

SERVICIOS CIENTÍFICOS-TÉCNICOS DE LA UPC – tribómetro pin on disk en línea] [citado 10 de diciembre de 2014] disponible en: <<http://www.upc.edu/sct/es/equip/510/tribometro-pin-on-disk.html>>

THERMAL SPRAY. Protección de alto impacto. Camilo Marin Villar [en línea] [citado 8 de diciembre de 2014] disponible en: <http://www.metalactual.com/revista/8/tratamiento_thermal_spray.pdf>

UREZA VICKERS. Gabriel calle y Édison Henao. Dic. 2011 en línea] [citado 11 de diciembre de 2014] disponible en:
<<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>>

ANEXOS