

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE
MATRIZ CERÁMICA (Al_2O_3) Y REFUERZO CERAMICO (TiO_2)

JORGHER MARCEL FAJARDO SERENO
JUAN DAVID CASTRO LOPEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2019

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE
MATRIZ CERÁMICA (Al_2O_3) Y REFUERZO CERAMICO (TiO_2)

JORGHER MARCEL FAJARDO SERENO
JUAN DAVID CASTRO LOPEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
INGENIERO MECÁNICO

Director:
ING. ALFONSO SANTOS JAIMES

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado calificador

Jurado calificador

Floridablanca, Santander.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, queremos darle gracias a Dios por brindarnos sabiduría para saber afrontar todas las dificultades que se nos presentaron en ese largo camino y así poder culminar esta gran meta.

En segundo lugar, a nuestros familiares por habernos brindado el apoyo y acompañamiento de forma incondicional durante todo este gran proyecto de vida
En tercer lugar, al ingeniero Alfonso Santos por ser nuestro director guiarnos y apoyarnos en todo el proceso académico.

En cuarto lugar, al grupo de investigación en desarrollo y tecnología en nuevos materiales GIMAT de la universidad industrial de Santander por la facilitación del horno para llevar a cabo el proceso de sinterización de las probetas, a ellos muchas gracias.

En quinto lugar, al laboratorio de nano ciencia y tecnología de la universidad pontificia bolivariana por la paciencia, apoyo y asesoramiento con el microscopio para llevar acabo el estudio de microscopía electrónica y poder cumplir con los objetivos del proyecto.

Y en último lugar a nuestros amigos y compañeros que contribuyeron de forma directa o indirecta en nuestro crecimiento intelectual, personal y ético profesional

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEORICO.....	15
3.1. MATERIALES CERÁMICOS.....	15
3.1.1. Propiedades.	15
3.1.2. Nuevos materiales cerámicos.	16
3.1.3. Procesado de materiales cerámicos.....	16
3.2. MATERIALES COMPUESTOS	17
3.2.1. Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC).	19
3.2.2. Materiales que se pueden utilizar para elaborar material compuesto	19
3.3. DESGASTE EROSIVO	22
3.4. DESGASTE ABRASIVO	23
3.4.1. Tipos de abrasión.....	24
3.5. ENSAYO DE DUREZA	24
3.6. PROCESO DE SINTERIZADO	25
3.7. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM G76-18 PARA REALIZAR PRUEBAS DE EROSIÓN POR IMPACTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	26
3.7.1. Esquema de la plataforma de prueba.....	26
3.7.2. Procedimiento de prueba	27

3.8. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM G65-16E1 PARA MEDIR LA ABRASIÓN UTILIZANDO EL APARATO DE ARENA SECA.....	29
3.8.1. Diagrama del aparato de prueba.....	30
3.8.2. Materiales Para Las Muestras. Materiales	30
3.8.3. Parámetros de prueba.....	30
3.8.4. Cálculo e informe de resultados.	31
3.9. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM E10-18 PARA LA DUREZA.....	31
3.10. FASE 1. CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE Y FABRICACIÓN DE PROBETAS	33
3.10.1. Obtención de la matriz y el refuerzo.....	35
3.11. FASE 2: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	38
3.11.1. Ensayo de desgaste erosivo.	39
3.11.2. Ensayo de dureza.....	41
3.11.3. Ensayo de Desgaste Abrasivo.....	41
3.12. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA.....	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	45
4.1. CARACTERIZACIÓN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ CERÁMICA DE DIÓXIDO DE TITANIO.....	45
4.1.1. Desgaste erosivo.....	45
4.1.2. Ensayo de dureza.....	50
4.1.3. Desgaste Abrasivo	55
5. CONCLUSIONES.....	613
6. RECOMENDACIONES	624
BIBLIOGRAFIA	635

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fabricación de las probetas	34
Tabla 2. Tabla de composiciones de material.....	35
Tabla 3. Tiempo de cocción de cada composición	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Material compuesto.....	17
Figura 2. Dióxido de titanio	20
Figura 3. Óxido de aluminio.	21
Figura 4. Silicato de sodio.....	22
Figura 5. Desgaste erosivo	23
Figura 6. Desgaste abrasivo	24
Figura 7. Ensayo de dureza.....	25
Figura 8. Sinterización	26
Figura 9. Prueba desgaste.....	27
Figura 10. Máquina desgaste abrasivo	30
Figura 11. Prueba dureza	31
Figura 12. Proceso de mecanizado	34
Figura 13. Mezcla de los materiales	36
Figura 14. Vaciada al molde	36
Figura 15. Prensado de la probeta.....	37
Figura 16. Figura después del prensado	37
Figura 17. Sinterización	38
Figura 18. Máquina desgaste erosivo	39
Figura 19. Balanza de precisión para medir la masa de cada probeta	40
Figura 20. Huella de desgaste	40
Figura 21. Equipo para pruebas de dureza.....	41
Figura 22. Máquina de ensayo.....	42
Figura 23. Balanza de precisión para medir la masa de cada probeta	42
Figura 24. Huella de desgaste abrasivo.....	43
Figura 25. Equipo de microscopia electrónica	44
Figura 26. Resultado de microscopia electrónica punto 2	62
Figura 27. Resultado de microscopia electrónica punto 3	62

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Desgaste erosivo vs tiempo probetas de alúmina	45
Gráfica 2. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 10% de TiO ₂	46
Gráfica 3. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 20% de TiO ₂	47
Gráfica 4. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 30% de TiO ₂	47
Gráfica 5. Desgaste probetas tiempo de cocción 2 horas.....	48
Gráfica 6. Desgaste probetas tiempo de cocción 3 horas.....	49
Gráfica 7. Desgaste probetas tiempo de cocción 4 horas.....	49
Gráfica 8. Dureza Brinell alúmina (Al ₂ O ₃)	50
Gráfica 9. Dureza Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 10%.....	51
Gráfica 10. Dureza Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 20%.....	51
Gráfica 11. Dureza Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 30%	52
Gráfica 12. Dureza Brinell probetas tiempo 2 H.....	53
Gráfica 13. Dureza Brinell TIEMPO 3H.....	53
Gráfica 14. Dureza Brinell tiempo 4H.....	54
Gráfica 15. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL ₂ O ₃	55
Gráfica 16. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL ₂ O ₃ -TiO ₂ 10%.....	55
Gráfica 17. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL ₂ O ₃ -TiO ₂ 20%.....	56
Gráfica 18. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL ₂ O ₃ -TiO ₂ 30%.....	57
Gráfica 19. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 2H.....	57
Gráfica 20. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 3 H.....	58
Gráfica 21. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 4 H.....	59

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ CERÁMICA (AL₂O₃) Y REFUERZO CERAMICO (TiO₂)

AUTOR(ES): FAJARDO SERENO JORGHER MARCEL
CASTRO LOPEZ JUAN DAVID

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): SANTOS JAIMES ALFONSO

RESUMEN

En la actualidad el diseño y desarrollo de nuevos materiales permiten mejorar el avance tecnológico en la ingeniería por eso se desarrolla un estudio sobre las características de dos materiales cerámicos: alúmina y dióxido de titanio que permitan mejorar el desempeño de los mismos en determinadas aplicaciones; es un campo de investigación que día a día se incrementa debido a que son apetecidos para aplicaciones que combinen características mecánicas elevadas con una relación de peso considerablemente bajo. Se desarrolla una investigación con el uso de emplear materiales compuestos reforzados con dióxido de titanio y se empleó la alúmina como matriz cerámica. A estos compuestos se le realizan una caracterización mecánica mediante la implementación de pruebas con diferentes ensayos a través de la norma de ASTM. Los ensayos que se llevaron a cabo fueron desgaste erosivo, siguiendo la norma ASTM G76 / 18 donde se pudo observar la pérdida lenta de material en las rugosidades de las dos superficies que se encuentran en movimiento; en el ensayo de dureza se encontró una deformación local, en el material que se ensayó, a través de un indentador. Los valores se encontraron que los valores obtenidos son dependientes del método y las condiciones en las que se realizó el ensayo lo que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañado de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo.

PALABRAS CLAVE:

Oxido de aluminio, dióxido de titanio, ensayo de dureza, desgaste abrasivo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: OBTAINING AND CHARACTERIZING A CERAMIC MATRIX COMPOSITE MATERIAL (Al₂O₃) AND CERAMIC REINFORCEMENT (TiO₂)

AUTHOR(S): FAJARDO SERENO JORGHER MARCEL
CASTRO LOPEZ JUAN DAVID

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: SANTOS JAIMES ALFONSO

ABSTRACT

At present, the design and development of new materials allow to improve the technological advance in engineering, so a study is carried out on the characteristics of two ceramic materials: alumina and titanium dioxide that allow improving their performance in certain applications; It is a field of research that increases day by day because they are desired for applications that combine high mechanical characteristics with a considerably low weight ratio. An investigation is carried out with the use of composite materials reinforced with titanium dioxide and alumina was used as a ceramic matrix. These compounds are mechanically characterized by implementing tests with different tests according to the ASTM standard. The tests implemented were erosive wear under the ASTM G76 / 18 standard where it was possible to observe the slow loss of material in the roughness of the two surfaces that are in motion; in the hardness test a local deformation was found, in the material that was tested, through an indentator. The values were found that the values obtained are dependent on the method and the conditions in which the test was performed, so that a hardness value is useful and allows its comparison must be accompanied by the indication of the method used and the test conditions.

KEYWORDS:

Aluminum oxide, titanium dioxide, abrasive wear, hardness test

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la utilización de los materiales compuestos ha crecido en forma significativamente en casi todos los niveles de la industria, su gran versatilidad se ha visto reflejada en una gran cantidad de sectores industriales, como la aeronáutica y la aeroespacial, Incluyendo las aplicaciones civiles, automotrices, deportivas e incluso textiles.

De acuerdo con las necesidades del ser humano es de su interés buscar soluciones a la creciente contaminación y preocuparse por los posibles impactos ambientales producidas por la industria y el sistema de consumo que se ha convertido en la actualidad en un factor crítico a la hora de diseñar y elaborar los productos. La utilización de materiales cerámicos ha sido desde la antigüedad una técnica que ha servido al hombre para mejorar su calidad de vida ofreciendo una alternativa económicamente viable y ambientalmente amigable, por eso es que en este proyecto se buscó explorar la factibilidad del uso de un material compuesto como la cerámica. Su amplio rango de aplicaciones como refuerzos para matrices, su alta disponibilidad y manufactura de bajo precio, las convierte en una opción de interés para el mercado.

La finalidad de este proyecto es el desarrollo y caracterización mecánica de nuevos materiales elaborados con matriz cerámica y refuerzo de dióxido de titanio, los cuales se definen por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no son posibles de obtener en los materiales originales y que permitan mejorar el desempeño de los usos propios de estos materiales en determinadas aplicaciones y a nivel industrial, fabricando compuestos mediante el proceso de sinterización.

1. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de nuevos materiales que permitan mejorar el desempeño de los mismos en determinadas aplicaciones es un campo de investigación que día a día se incrementa, debido principalmente al requerimiento de prestaciones cada vez más exigentes. Actualmente la universidad ha incursionado en este campo principalmente buscando obtener materiales compuestos con matrices poliméricas y refuerzos de fibras naturales o sintéticas; sin embargo, no se tiene conocimiento de trabajos encaminados a la obtención de materiales compuestos de matriz cerámica y refuerzo cerámico.

Adicionalmente el conocimiento referente al proceso de sinterizado de materiales a partir de polvos para la obtención de materiales compuestos es poco implementado dentro de la facultad de ingeniería mecánica debido principalmente a la falta de equipos para llevar a cabo este procedimiento. Este proyecto se desarrollará con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander, ya que ellos son los facilitadores del horno requerido para alcanzar la temperatura necesaria en el proceso de sinterizado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener y Caracterizar mecánicamente un material cerámico con matriz cerámica (alúmina) reforzado con dióxido de titanio a través de ensayos de dureza, desgaste erosivo y abrasivo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una búsqueda bibliográfica acerca de la forma cómo se obtienen los materiales compuestos a través de fuentes bibliográficas como libros y bases de datos. **Resultado:** Información recopilada sobre los temas consultados. **Indicador:** Se utilizarán las fuentes bibliográficas disponibles en la internet y en la Universidad Pontificia Bolivariana.
- Obtener un material compuesto con matriz de alúmina y tres porcentajes diferentes de material de refuerzo (dióxido de titanio) a través de un proceso de sinterizado. **Resultado:** Probetas del material compuesto. **Indicador:** Se utilizará microscopia electrónica de barrido para comprobar la presencia de las dos fases dentro del material compuesto.
- Caracterizar mecánicamente los materiales compuestos obtenidos a través de ensayos de dureza y desgaste erosivo y abrasivo. **Resultado:** Gráficas del comportamiento mecánico del material. **Indicador:** Los ensayos se realizarán siguiendo las normas ASTM G76 / 18 para el ensayo de desgaste erosivo, ASTM G-65 para el desgaste abrasivo y para el ensayo de dureza ASTM E10.

3. MARCO TEORICO

3.1. MATERIALES CERÁMICOS

la manufactura de los materiales cerámicos es la más antigua de la humanidad, los materiales cerámicos son sólidos inorgánicos que no son metálicos creados por medio de un tratamiento térmico ¹. Estos se adquieren al realizar un proceso de horneado a mariales naturales, como la greda o caolín, unido con ciertas cantidades de aditivos y tintes ², etc.

3.1.1. Propiedades.

- Los materiales cerámicos a comparación de los metales y los plásticos presentan una mayor dureza, no son combustibles y oxidables.
- La alta dureza hace que sea un material ampliamente empleado como abrasivo y extremos cortantes pata herramientas.
- Tienen una alta resistencia a temperaturas elevadas, con una alta capacidad de aislamiento térmico y eléctrico.
- Presenta una alta resistencia a la corrosión y a la erosión que causa los medios atmosféricos.
- Son resistentes en su mayoría a los agentes químicos.
- Su principal característica es que pueden manufacturarse en formas con dimensiones establecidas.
- Son cerámicos frágiles en la mayoría de las veces presentan fracturas a esfuerzos de tensión y tienen poca elasticidad.
- Tienen capacidad de soportar bajas temperaturas si presentar deformidades.

¹ LANDÍN, Pedro. Materiales cerámicos: propiedades, clasificación y obtención. Pelandintecno-Tecnología Eso. 07 de febrero de 2013. [En línea] [Consultado el 21 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/materiales-ceramicos-propiedades.html>>

² Ibíd.

3.1.2. actuales Materiales cerámicos han evolucionado en los últimos años se representan de diferentes clases:

- Carburos, como el carburo de silicio, carburo de tungsteno, carburo de titanio, carburo de tantalio, carburo de cromo y carburo de boro.
- Nitruros, como el nitruro de silicio, nitruro de boro, nitruro de titanio y oxinitruro cerámico o sialon.
- Óxidos cerámicos como la alúmina y zirconia. Se emplean en las prótesis de cadera cerámicas que superan en prestaciones a las aleaciones metálicas.
- Composites de matriz cerámica. Son materiales que presentan alta resistencia a temperaturas elevadas y se utilizan para vehículos espaciales como protector térmico. Incluye el carburo de silicio reforzado con carbono (C/SiC).
- Se conoce con el nombre de electro cerámica a aquellos materiales cerámicos diseñados específicamente por sus propiedades eléctricas o magnéticas. Se están llevando a cabo investigaciones en motores de automóviles, aviones, generadores eléctricos. Algunas aplicaciones del electro cerámicas son aislamiento eléctrico, semiconductores, resistencias, varis torés, condensadores, imanes, memorias, diodos y fibras ópticas para comunicaciones.

3.1.3. Proceso de los materiales cerámicos. Las etapas básicas en la fabricación de productos cerámicos son:

- Extracción: producción de la arcilla, se realizan a cielo abierto, se sitúan en cercanías de la fábrica.
- Preparación: se realiza el proceso de molienda y unión de las materias primas que hacen parte del material. La composición varía de acuerdo con las propiedades que requiera la pieza cerámica.
- Conformación: se utilizan métodos de moldeado regularmente, las partículas y otros constituyentes pueden ser mezclados en seco o húmedo para otros procesos de manufactura como ladrillos, tubería y

alcanzar la unión de los componentes con agua es la técnica más común.

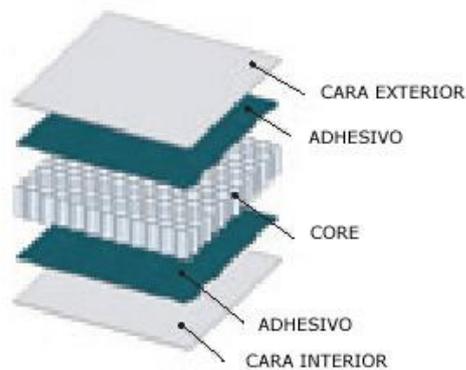
- Proceso de prensado: el material puede ser prensado en seco, plástico o húmedo.
- Prensado en seco: se usa para productos cerámicos.
- Secado: una vez las piezas sean moldeadas si se realizara en un proceso de cocción se romperían, por lo que es recomendable que antes tengan un proceso de secado con el fin de eliminar la humedad, antes de ser sometidas a tratamientos térmicos con elevadas temperaturas, la eliminación de la humedad se realiza a una temperatura menor de 100°C y tarda alrededor de un día.
- Cocción: al realizar el proceso de cocción a elevadas temperaturas ocurren una serie de reacciones terminan en una consistencia de alta dureza.

3.2. MATERIALES COMPUESTOS

Son aquellos materiales que están formados a partir de la unión de dos o más materiales diferentes con propiedades físicas o químicas. Estos materiales se componen de matriz y refuerzos. Las características serán más evidentes una vez se realicen las pruebas de los ensayos de compresión, tensión, flexión, y desgaste adhesivo³.

Figura 1. Material compuesto

³ AIMPLAS. Tipos de materiales compuestos. AIMPLAS. 30 de noviembre de 2016. [En línea] [Consultado el 21 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>>



Fuente: www.images.google.com

En los últimos años ha incrementado la utilización de materiales compuestos para aplicaciones (automoción, construcción civil, industria aeronáutica) y todo indica que este crecimiento continuará durante los próximos años. Ejemplo, en manufactura del transporte es imprescindible materiales que sean ligeros, rígidos, resistentes al impacto y a la corrosión y al desgaste.

El uso de materiales compuestos permite omitir los materiales más comunes como lo son el acero y otros metales, debido a que pueden brindar propiedades mejores. por ejemplo, desde el punto de vista de la resistencia y la rigidez, los materiales compuestos reforzados con fibras ofrecen un alargamiento de rotura que es mucho menor si se compara con metales de resistencia similar⁴.

Ventajas:

- Presentan un mayor enlace resistencia - peso.
- Mayor rigidez.
- Mayor resistencia a la fatiga.
- Mayor resistencia a la corrosión.
- Mayor resistencia dieléctrica.
- Alta flexibilidad.

⁴ RODRÍGUEZ, Hermenegildo. Estudio de los Materiales Compuestos. Ingemecanica.com. 2019. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>>

- Buenas propiedades mecánicas.

Desventajas

No se registran amplios conocimientos sobre diseños de piezas de materiales compuestos, las herramientas de cálculo existentes no son tan conocidas como ocurre para el diseño de piezas metálicas.

- El costo de materiales suele ser elevado
- Faltan estudios sobre el comportamiento mecánico de la pieza fabricada con material compuesto.

3.2.1. Materiales compuestos de matriz cerámica. Poseen mejores propiedades mecánicas que los materiales cerámicos, como la resistencia y la tenacidad, particularmente en los rangos de bajas temperaturas. Es donde el componente se presenta como fase continúa actuando como ligante, suele ser flexible y poco resistente y transmite los esfuerzos de unas fibras a otras.

Las propiedades más importantes de los cerámicos (resiste a elevadas temperaturas y rigidez mecánica) hacen que estos materiales sean muy apetecidos en aplicaciones industriales.

3.2.2. Materiales que se pueden utilizar para elaborar material compuesto

3.2.2.1. Dióxido de titanio. Es un elemento inorgánico y sólido, posee un color blanco y térmicamente es estable se produce en bastantes tipos de roca y arenas. Es uno de los elementos más comunes en la superficie terrestre.

En los últimos años ha tenido una amplia aplicación en la gama de bienes industriales como recubrimientos, papel, tintas de impresión, cerámicas ⁵.

⁵ CEFIC. Sobre el dióxido de titanio. TDMA. 2018. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.pureti.es/wp-content/uploads/2018/06/Que%CC%81-es-el-dio%CC%81xido-de-titanio.pdf>>

Figura 2. Dióxido de titanio



Fuente: www.images.google.com

3.2.2.2. *Alúmina*. Es un material cerámico compuesto por óxido de aluminio (Al_2O_3) junto con la sílice, es uno de los materiales más importantes y fundamentales en la construcción de arcillas barnices y esmaltes. Es insoluble en agua y ligeramente soluble en ácidos y bases fuertes.

Lo que caracteriza a la alúmina es su dureza, que ha permitido a las empresas fabricantes de abrasivos mantenerse y sustentarse permitiéndole ser una de las más antiguas y rentables del mundo. Tiene un punto elevado de fusión $2052\text{ }^{\circ}C$ ($2345,15\text{ K}$) y su rigidez es incluso mayor que la de aluminio. El proceso de fabricación de las piezas de alúmina se realiza a través de métodos de prensado, extrusión, colado e inyección de la alúmina en polvo⁶.

⁶ QUIMINET.COM. Tipos de alúmina y sus principales usos. QUIMINET.COM. 04 de enero de 2006. [En línea] [Consultado el 20 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-alumina-y-sus-principales-usos-4110.htm>

Figura 3. Óxido de aluminio.



Fuente: www.images.google.com

3.2.2.3. *Silicato de sodio*. El silicato de sodio conocido también como vidrios solubles, es un producto químico que contiene sustancias inorgánicas compuestas primordialmente por Óxido de Silicio (SiO_2) y Óxido de Sodio (Na_2O)⁷.

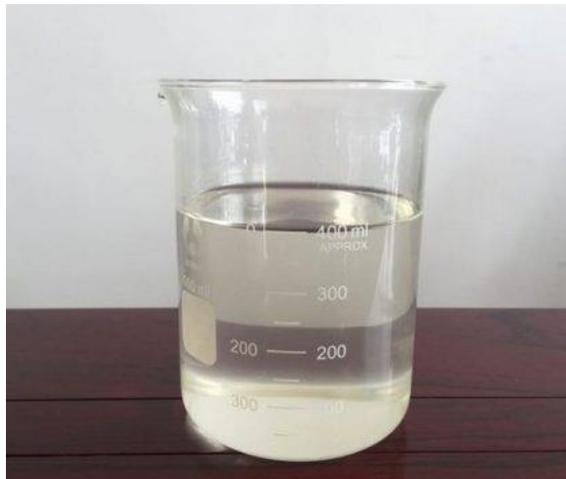
Tiene muchas propiedades útiles, que pueden ser utilizadas para resolver de forma eficiente y económica muchos problemas que surgen en procesos industriales y químicos, Por su bajo costo tienen un amplio uso en las diferentes industrias⁸.

⁷ SILICATOS ESPECIALES S.A. Silicato de Sodio. Silicatos Especiales S.A. 2016. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.silicatosespeciales.com.mx/productos/silicato-de-sodio/>>

⁸ QUIMINET.COM. Usos y aplicaciones del silicato de sodio líquido y sólido. QUIMINET.COM. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-silicato-de-sodio-liquido-y-solido-27872.htm>>

En la industria es utilizado como adhesivo, aglutinante capa protectora ayuda como coagulante, anticorrosivo, insumo químico, entre otras. Como adhesivos o aglutinantes es muy utilizado, debido a que contiene características que lo hacen funcionar por sí mismo como adhesivo y humecta de forma rápida los vidrios, superficies cerámicas, y a la mayoría de los minerales como: acero, aluminio, zinc, plomo y algunas otras superficies metálicas⁹.

Figura 4. Silicato de sodio



Fuente: www.images.google.com

3.3. DESGASTE EROSIVO

El desgaste erosivo es aquel que se produce en un cuerpo por agentes externos como el viento; también se puede dar por la fricción continua de otros cuerpos, se produce mediante la pérdida lenta de material de las dos superficies que se encuentran en movimiento como resultado del impacto de partículas sólidas o metálicas¹⁰.

Se produce en métodos donde las partículas golpean una pieza a elevadas velocidades relativas. A pesar de que la pérdida de material para cada impacto

⁹ Op. Cit. SILICATOS ESPECIALES S.A. 2016.

¹⁰ ECURED. Desgaste erosivo. ECURED. 2019. [En línea] [Consultado el 22 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Desgaste_erosivo>

es muy pequeña, el daño constante es a menudo significativo. La erosión puede ser mayor si se usan partículas con bordes afilados y tamaños más grandes¹¹.

Figura 5. Desgaste erosivo



Fuente: ECURED. Desgaste erosivo. ECURED. 2019. [En línea] [Consultado el 22 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Desgaste_erosivo>

3.4. DESGASTE ABRASIVO

Se conoce como desgaste abrasivo al cambio de la superficie mediante partículas de una elevada dureza al deslizarse sobre la otra superficie que presenta una menor resistencia mecánica¹².

Cuando un material se desplaza sobre otro ocurre un desgaste y si se presenta una presión y el recorrido es constante la probeta sometida presenta un desgaste hasta romperse¹³.

¹¹ M & E. Desgaste por erosión. Ingeniería mecánica y eléctrica. 2019. [En línea] [Consultado el 22 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.myethermalspray.com/soluciones/desgaste-por-erosion/>>

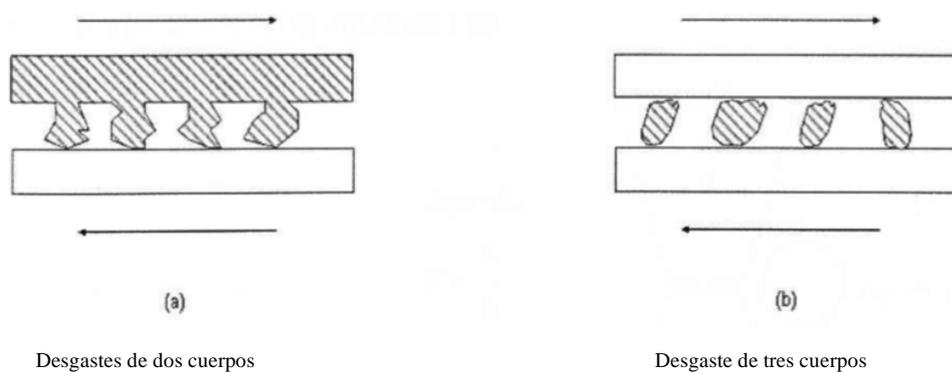
¹² SCRIBD. Desgaste abrasivo. SCRIBD. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://es.scribd.com/document/313586854/DESGASTE-ABRASIVO>>

¹³ INSTITUTO ASTECO. Qué es el desgaste por abrasión y cómo combatirlo. Instituto Asteco. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://institutoasteco.com/asteco/desgaste-por-abrasion/>>

3.4.1. Tipos de abrasión. esta ocurre cuando la rugosidad de una superficie entra en contacto con la otra superficie.

La Abrasión de tres cuerpos ocurre cuando en las dos superficies que están en contacto entra polvo o algún otro contaminante, el desgaste de la pieza ocurre con el movimiento relativo de las superficies en contacto¹⁴.

Figura 6. Desgaste abrasivo



Fuente: www.images.google.com

3.5. ENSAYO DE DUREZA

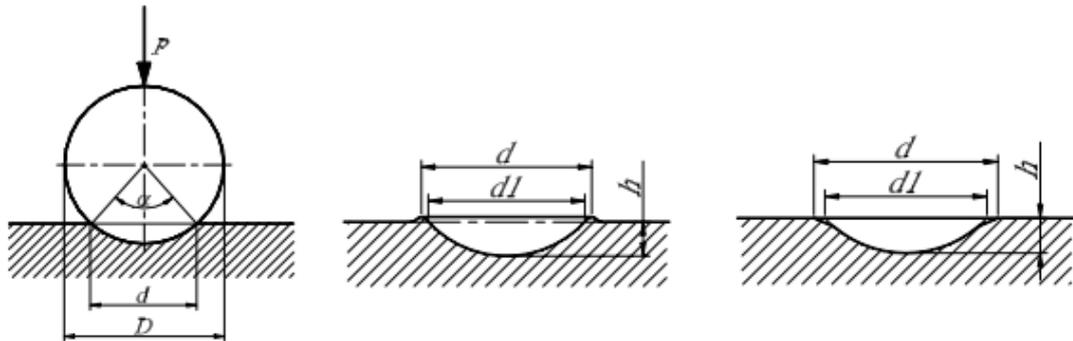
Es la resistencia que presenta un material al ser rayado. Cuanto más duro sea un material mayor será su resistencia. Siempre se cumple que la dureza de un material resulta inversamente proporcional a la huella que queda en su superficie al aplicarle una fuerza.

En este sentido se puede definir a la dureza de un material aquella propiedad de la capa superficial del material para poder resistir las deformaciones elásticas, plásticas o ruptura debido a la acción de los esfuerzos de contacto originados

¹⁴ Ibíd.

por un cuerpo con una mayor dureza, de determinada forma y dimensiones, el cual no sufre deformaciones residuales durante el contacto¹⁵.

Figura 7. Ensayo de dureza



Fuente: www.images.google.com

3.6. PROCESO DE SINTERIZADO

Es un proceso térmico que consiste en llevar una pieza a elevadas temperaturas durante un determinado tiempo y a una temperatura más baja a la temperatura del punto de fusión del metal de base. Al llevar la pieza a una elevada temperatura se produce la unión entre las partículas. La sinterización se realiza en hornos continuos con velocidades y atmósfera controladas, opera en temperaturas entre 750 y 1300°C de acuerdo con el material y de las características que se desee conseguir.

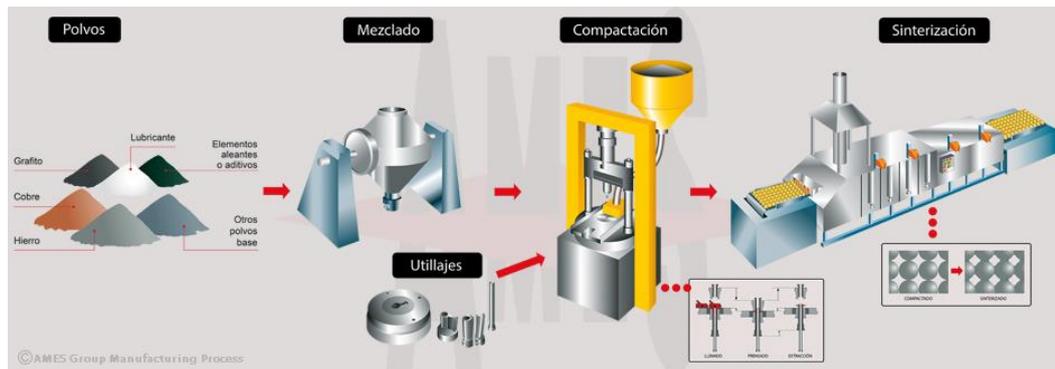
La adaptabilidad del material depende de las propiedades del material, del proceso de sinterizado y del procedimiento de manufactura¹⁶.

¹⁵ RODRÍGUEZ, Hermenegildo. Ensayos de Dureza en los Materiales. Ingemecanica.com. 2019. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>>

¹⁶ AMES. Proceso de fabricación básico. AMES. 2019. [En línea] [Consultado el 13 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.ames-sintering.com/es/proceso-de-sinterizado/>>

La propiedad de los polvos está ligada al tamaño de las partículas, distribución del tamaño, la forma, la pureza y la densidad el tamaño de las partículas deben estar en un rango de 0,5 μm y 200 μm ¹⁷.

Figura 8. Sinterización



Fuente: AMES. Proceso de fabricación básico. AMES. 2019. [En línea] [Consultado el 13 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.ames-sintering.com/es/proceso-de-sinterizado/>>

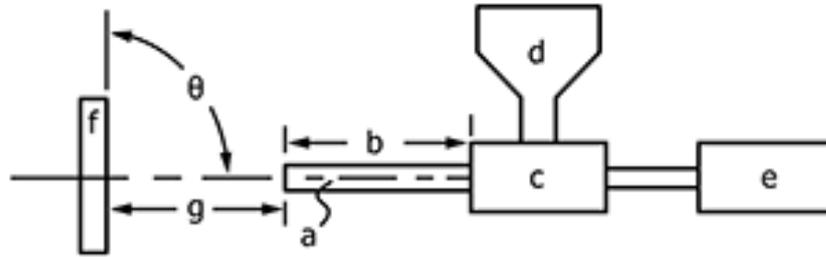
3.7. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM G76-18 PARA REALIZAR PRUEBAS DE EROSIÓN POR IMPACTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

La importancia de este método de prueba en cualquier programa general de mediciones para evaluar el comportamiento de erosión de los materiales dependerá de muchos factores relacionados con las condiciones de las aplicaciones de servicio. En este método de prueba se determina el grado de correlación de los resultados obtenidos con los del rendimiento de campo o los resultados utilizando en otros sistemas y métodos de prueba. Este método de prueba puede usarse para clasificar la resistencia a la erosión de los materiales en las condiciones especificadas de prueba.

3.7.1. Esquema de la plataforma de prueba.

¹⁷ ECURED. Sinterización. ECURED. 2019. [En línea] [Consultado el 13 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.ecured.cu/Sinterizaci%C3%B3n>>

Figura 9. Prueba desgaste



Fuente: ASTM. Procedimiento de prueba. ASTM COMPASS. 2019. [En línea] [Consultado el 05 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://eifl.net/e-resources/astm-compass>>

- a = Boquilla de chorro de gas
- b = Longitud de la boquilla
- c = Cámara de mezclado
- d = Tolva abrasiva
- e = Fuente de gas
- f = probeta de prueba
- g = Distancia de la boquilla a la probeta
- θ = Ángulo de impacto

3.7.2. Procedimiento de prueba

- Establecer y medir la velocidad y el flujo de partículas especificados. Ajuste los controles del equipo para obtener las condiciones adecuadas de velocidad y flujo antes de insertar las muestras de prueba. Los valores de velocidad de flujo de partículas se determinan midiendo y posteriormente pesando el abrasivo que sale de la boquilla durante un período de tiempo medido.
- Prepare la superficie de la muestra si es necesario para lograr uniformidad y un acabado adecuado. Se recomienda una rugosidad de la superficie de 1 μm (40 $\mu\text{in.}$) Rms o menor. Limpie la superficie de la muestra con cuidado.

- Monte la muestra en la ubicación y orientación adecuadas en el aparato. Someta la muestra a impacto de partículas durante un intervalo de tiempo seleccionado, medido con una precisión de 5 s. Retire la muestra, límpiela y vuelva a pesar y calcule la pérdida de masa.
- Repita este proceso utilizando un nuevo espécimen cada vez para determinar al menos cuatro puntos durante un tiempo total de al menos 600 s y se debe graficar esos valores como pérdida de masa versus tiempo transcurrido.

Para la generación del reporte se debe contar con la siguiente información:

- **Identificación del material:** tipo, especificación química, tratamiento térmico y de procesamiento, dureza y densidad. Las condiciones de procesamiento deben incluir el método de fundición (como frío o arena); método de formación (como forjar o presionar y sinterizar); y el porcentaje de densidad ideal.
- **Muestras:** método de preparación y limpieza de muestras, rugosidad de la superficie inicial y número probado.
- **Identificación de partículas erosionadas:** distribución de tamaño, forma, composición, pureza, fuente y método de fabricación. Proporcione una fotografía de la colección típica de partículas.
- **Condiciones de prueba:** velocidad de partículas (promedio) y método de determinación; orientación de la muestra en relación con la corriente de impacto; flujo de partículas; área erosionada (tamaño, forma); temperatura de la muestra y partículas y gas portador; Duración del examen; método para determinar las condiciones de erosión en estado estacionario; composición del gas portador, incluido el contenido de agua, la presión y el método de medición; y método para determinar la masa de abrasivo utilizada.

- **Descripción del equipo de prueba.**

La tabulación del valor de la erosión y la desviación estándar para cada muestra informada como una pérdida de volumen de material por unidad de masa de abrasivo ($\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

El informe deberá indicar claramente si la prueba se realizó en condiciones estándar, detallar cualquier desviación de esas condiciones e indicar la frecuencia de calibración utilizando materiales de referencia¹⁸.

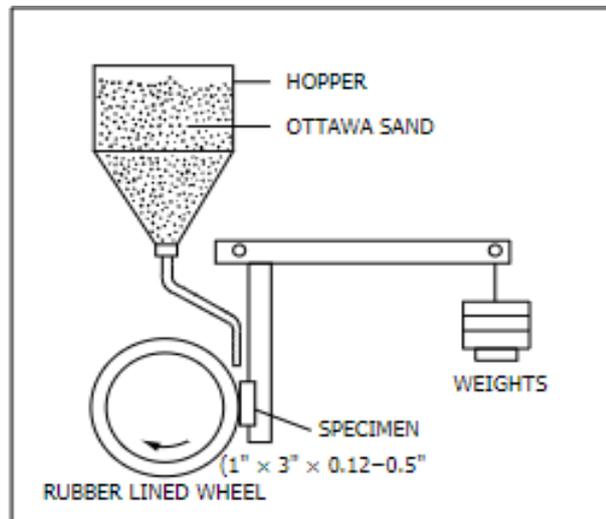
3.8. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM G65-16E1 PARA MEDIR LA ABRASIÓN UTILIZANDO EL APARATO DE ARENA SECA

La prueba de abrasión con arena / goma implica la abrasión de una muestra de prueba estándar con un grano de tamaño y composición controlados. El abrasivo se introduce entre la muestra de prueba y una rueda giratoria con un borde de goma de clorobutilo o neopreno de una dureza especificada. Este espécimen de prueba se presiona contra la rueda giratoria a una fuerza especificada por medio de un brazo de palanca mientras un flujo controlado de grano desgasta la superficie de prueba. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve en la dirección del flujo de arena. Tenga en cuenta que el eje de pivote del brazo de palanca se encuentra dentro de un plano que es aproximadamente tangente a la superficie de la rueda de goma y normal al diámetro horizontal a lo largo del cual se aplica la carga. La duración de la prueba y la fuerza aplicada por el brazo de palanca varía como se indica en los procedimientos A a E. Las muestras se pesan antes y después de la prueba y se registra la pérdida de masa. Es necesario convertir la pérdida de masa en pérdida de volumen en milímetros cúbicos, debido a las amplias diferencias en la densidad de los materiales. La abrasión se informa como pérdida de volumen según el procedimiento especificado.

¹⁸ ASTM. Procedimiento de prueba. ASTM COMPASS. 2019. [En línea] [Consultado el 05 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://eifl.net/e-resources/astm-compass>>

3.8.1. Diagrama del aparato de prueba

Figura 10. Maquina desgaste abrasivo



Fuente: ASTM. Procedimiento de prueba. ASTM COMPASS. 2019. [En línea] [Consultado el 05 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://eifl.net/e-resources/astm-compass>>

3.8.2. Materiales Para Las Muestras. Materiales: la intención de este método de prueba es permitir la prueba de abrasión de cualquier forma de material, incluidos metales forjados, fundiciones, forjados, recubrimientos de soldadura de gas o eléctricos, depósitos de pulverización de plasma, metales en polvo, metalización, cerámicos, cerámicas. Etcétera. El tipo de material determinará, hasta cierto punto, el tamaño total de la muestra de prueba.

3.8.3. Parámetros de prueba. Fuerza aplicada contra la muestra de prueba y el número de revoluciones de la rueda para los Procedimientos de prueba AE.

Flujo de arena: la velocidad del flujo de arena será de 300 a 400 g / min (0,66 a 0,88 lb / min).

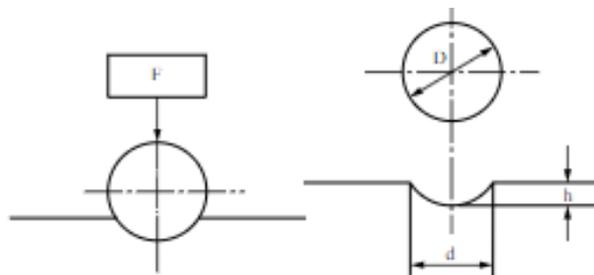
Tiempo: el tiempo de la prueba.

3.8.4. Cálculo e informe de resultados. Los resultados de la prueba de abrasión deben informarse como pérdida de volumen en milímetros cúbicos de acuerdo con el procedimiento especificado utilizado en la prueba. Por ejemplo, ___mm³ por ASTM__ Procedimiento ____. Si bien los resultados de pérdida de masa pueden usarse internamente en laboratorios de prueba para comparar materiales de densidades equivalentes¹⁹.

3.9. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR ASTM E10-18 PARA LA DUREZA

La prueba de dureza Brinell es una prueba de dureza de indentación que puede proporcionar información útil sobre materiales metálicos. Esta información puede correlacionarse con la resistencia a la tracción, la resistencia al desgaste, la ductilidad u otras características físicas de los materiales metálicos, y puede ser útil en el control de calidad y la selección de materiales.

Figura 11. Prueba dureza



Fuente: ASTM. Procedimiento de prueba. ASTM COMPASS. 2019. [En línea] [Consultado el 05 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://eifl.net/e-resources/astm-compass>>

- El penetrador se pone en contacto con la muestra de prueba en una dirección perpendicular a la superficie y se aplica la fuerza de prueba F. La fuerza de prueba se mantiene durante un tiempo de permanencia especificado y luego se elimina.

¹⁹ Ibíd.

- El diámetro de la sangría se mide en al menos dos direcciones perpendiculares entre sí. El valor de dureza Brinell se deriva de la media de las mediciones de diámetro²⁰.

²⁰ *Ibíd.*

3. METODOLOGIA

Para llevar a cabo este proyecto se realizó una investigación con experimentación aleatoria con dióxido de titanio y alúmina con el fin de observar los resultados de estos materiales compuestos. Mediante el uso de datos a nivel numérico se pudo obtener información de forma detallada sobre materiales compuesto como: matriz cerámica, refuerzo de dióxido de titanio para medir tanto cuanto se desgasta como su dureza.

Se realizó un análisis bibliográfico para obtener información sobre ¿Qué es un material?, ¿Que es un material cerámico?, ¿Qué funciones tiene el aglutinante utilizado?, entre otros.

Para este proyecto se desarrollaron tres fases las cuales se explican a continuación.

3.10. FASE 1. CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

El molde se construyó mediante el proceso de mecanizado en un torno empleando el torneado recto convencional para darle forma a las diferentes partes de las piezas del molde; luego para el ensamblaje se utilizó la soldadura para la unión de las piezas del material en la cual las piezas y por último se empleó el proceso de fresado para pulir las superficies y los acabados. El molde fue fabricado en acero RH 6cm de largo, 3cm de ancho y de 1,5cm de espesor tal como se muestra en la figura 3.1.

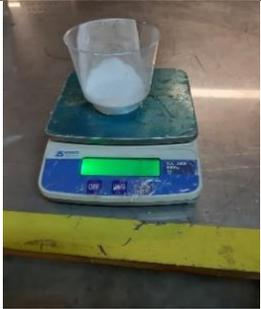
Figura 12. Proceso de mecanizado



Fuente: Autores

La fabricación de las probetas se llevó a cabo empleando tres tipos de materiales Alúmina (AlO_3), Dióxido de titanio (TiO_2) y el aglutinante silicato de sodio este último para humectar y unir los dos materiales al momento de mezclarse como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Fabricación de las probetas

		
a) Alúmina	b) Dióxido de titanio	c) Silicato de sodio

Fuente: Autores

3.10.1. Obtención de la matriz y el refuerzo. Para la matriz del material compuesto se utilizó polvo Alúmina (Al_2O_3), y para el refuerzo del material compuesto se utilizó polvo de Dióxido de titanio (TiO_2), al molde se añade 100% en gramo de matriz [Alúmina (Al_2O_3)]. Como se muestra en figura.

La elaboración se llevó acabo con tres tipos de materiales trabajando con tres porcentajes diferentes, primero como se muestra en la tabla 3.1; se pesó la alúmina al 100%, a ese peso se le calcula tres porcentajes (10%, 20%, y 30%), para cada porcentaje se trató de forma diferente, el peso total de la alúmina fue de 30g, al sacarle el 10% de ese peso se le agrego 3g de dióxido de titanio, al 20% de alúmina, se le agrego 6g de dióxido de titanio y al 30% de alúmina se le agrego 9r de dióxido de titanio.

Tabla 2. Tabla de composiciones de material

Material compuesto	%porcentaje	
	Al_2O_3	TiO_2
composición 1	100	0
composición 2	90	10
composición 3	80	20
composición 4	70	30

Fuente: Autores

Posteriormente, se mezcló con una cantidad del aglutinante silicato de sodio (Na_2SiO_3), véase en la figura 13 hasta obtener una mezcla homogénea,

Figura 13. Mezcla de los materiales



Fuente: Autores

Luego esta es vaciada al molde como se muestra en la figura 14

Figura 14. Vaciada al molde



Fuente: Autores

Donde fue compactada uniaxialmente en frio por 15 minutos en una prensa como se muestra en la figura 15

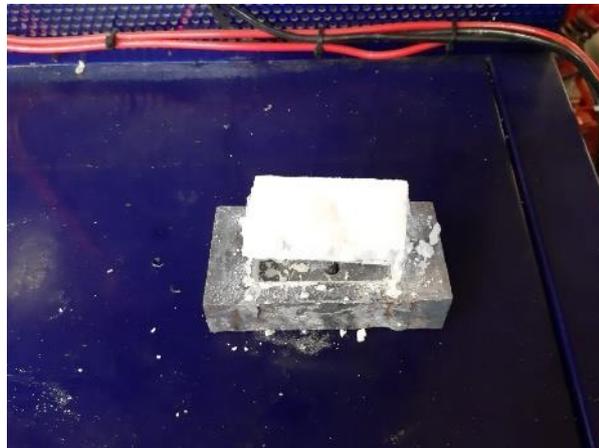
Figura 15. Prensado de la probeta



Fuente: Autores

Para así poder obtener las preformas como se muestra en la figura donde la probeta queda como se muestra en la figura:

Figura 16. Figura después del prensado



Fuente: Autores

Por último, se le hace un tratamiento térmico (sinterización) a una temperatura ($T=1000^{\circ}\text{C}$) con 3 tiempos diferentes a cada composición que fueron (dos horas, tres horas y cuatro horas) y así obtener las probetas como se muestra en la tabla. Este horno fue facilitado en la UIS (UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE

SANTANDER) debido a que en la universidad no se contaba con un horno para el proceso de cocción.

Figura 17. Sinterización



Fuente: Autores

Tabla 3. Tiempo de cocción de cada composición

Material compuesto	Tiempo (horas)	
	Al ₂ O ₃	TiO ₂
composición 1	2	2
composición 2	3	3
composición 3	4	4

Fuente: Autores

3.11. FASE 2: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

La caracterización se obtuvo empleando un método para la generación de ciertas muestras de los materiales compuestos, las cuales deben cumplir con los requisitos estipulados del comportamiento mecánico del material en las normas ASTM G76 / 18 para el ensayo de desgaste erosivo, ASTM G-65 para el desgaste abrasivo y para el ensayo de dureza ASTM E10 a las cuales se les iba hacer los ensayos.

3.11.1. Ensayo de desgaste erosivo. La finalidad de realizar el desgaste erosivo es poder observar las propiedades que poseen los materiales antes del ensayo y evaluar el comportamiento de erosión de los materiales después del desgaste sobre las probetas por lo cual se realizan las pruebas utilizando una máquina de ensayo de desgaste erosivo según las normas ASTM G76 / 18. Se realizaron 36 ensayos con 8 tiempos diferentes, pesando las probetas antes y después del ensayo y así obtener las curvas para clasificar la resistencia a la erosión de los materiales en las condiciones especificadas de prueba, los datos que se obtuvieron fueron correlacionados en una tabla de Excel para la generación de una curva más acertada y real.

Figura 18. Máquina desgaste erosivo



Fuente: Autores

Se obtuvieron un total de 36 probetas, se realizaron 36 pruebas de desgaste erosivo por un lado a cada probeta, la masa final de cada probeta después de haberse ejecutado una prueba, es la masa inicial de la siguiente prueba de esa misma probeta, la masa se midió en una balanza de precisión (figura 19).

Figura 19. Balanza de precisión para medir la masa de cada probeta



Fuente: Autores

Una vez realizados los ensayos se obtuvieron desgaste erosivo como se muestra en la figura 20:

Figura 20. Huella de desgaste



Fuente: Autores

3.11.2. Ensayo de dureza. Para determinar la dureza de los materiales se utilizó un durómetro portátil “SADT HARDNESS TESTER – HARTIP 1500” según con las normas ASTM E10; el valor de dureza que se obtuvo fue el promedio de 3 mediciones que se le hizo a una de las caras de la probeta la cual se había lijado antes de la muestra.

Figura 21. Equipo para pruebas de dureza



Fuente: www.images.google.com

3.11.3. Ensayo de Desgaste Abrasivo. El propósito es medir la pérdida de masa por el desgaste erosivo, y evaluar la tenacidad a la fractura, la influencia de la composición química y la estructura en la resistencia al desgaste abrasivo de los materiales, que se da después de someterlos a la prueba del desgaste abrasivo sobre las probetas por lo cual se realizan las pruebas utilizando una máquina de ensayo de desgaste abrasivo según las normas ASTM G-65. Se realizaron 36 ensayos con 8 tiempos diferentes, pesando las probetas antes y después del ensayo. Una vez realizados los ensayos se obtuvieron las huellas de desgaste indicadas en la figura.

Los datos obtenidos fueron correlacionados en una tabla de Excel para la generación de una curva más acertada y real.

Figura 22. Máquina de ensayo



Fuente: Autores

Se obtuvieron un total de 36 probetas, se realizaron 36 pruebas de desgaste erosivo por un lado a cada probeta, la masa final de cada probeta después de haberse ejecutado una prueba, es la masa inicial de la siguiente prueba de esa misma probeta, La masa se midió en una balanza de precisión (figura 23).

Figura 23. Balanza de precisión para medir la masa de cada probeta



Fuente: Autores

Una vez realizados los ensayos se obtuvieron las huellas de desgaste como se muestra en la figura 24:

Figura 24. Huella de desgaste abrasivo



Fuente: Autores

3.12. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

Luego de hacer los diferentes ensayos finalmente se les hace el estudio a las probetas mediante por microscopía de barrido electrónico con el microscopio Tescan el cual crea imágenes de la superficie con una alta resolución. Este microscópico muestra un análisis EDS, el cual identifica la composición elemental de un área de la muestra.

Al realizar análisis por SEM las muestras deben ser SÓLIDAS, deben estar SECAS o LIBRES DE HUMEDAD, tener un TAMAÑO que quepa dentro del microscopio (máximo 3cm*3cm*3cm), estar BIEN MONTADAS o FIJADAS al pin para evitar caídas

Para la realización de esta prueba primero se hizo fue un montaje donde se pudo disponer de 7 muestras dentro de la torreta en cada turno de trabajo y se fijan con cinta de doble faz de Carbono o con pintura que puede ser de cobre o plata. Seguidamente se le hizo un metalizado donde las muestras son introducidas en la cúpula del “sputtering” y son sometidas a condiciones de vacío y por ultimo son rociadas con oro pulverizado en forma de iones que adquieren características luminiscentes. El recubrimiento realizado de esta forma garantiza un espesor homogéneo y muy fino (inferior a 0,5 nanómetros) obteniendo una

muestra conductora de electrones, pero sin que se vea afectada su topografía superficial.

Una de las características más importantes de esta técnica es que permite determinar la presencia de elementos en una muestra de este compuesto.

Figura 25. Equipo de microscopia electrónica



Fuente: Autores

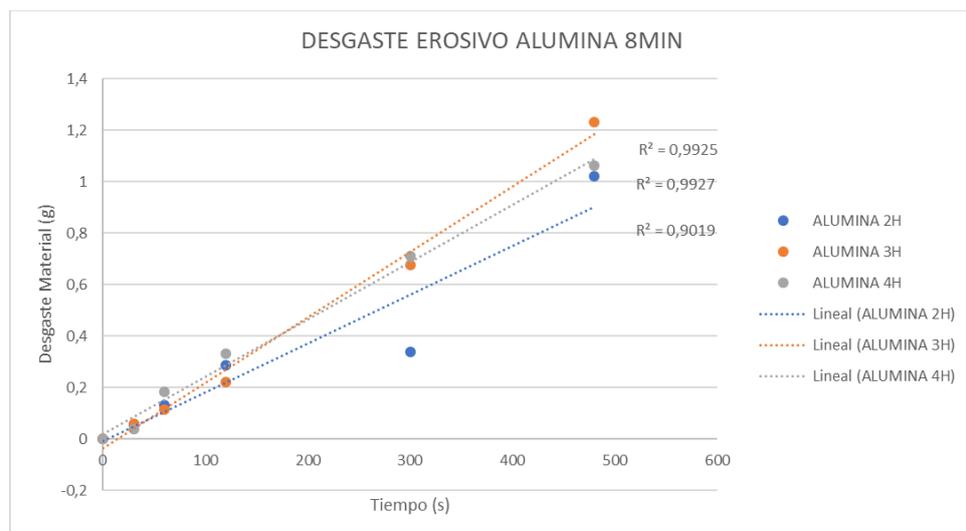
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ CERÁMICA DE DIÓXIDO DE TITANIO

El óxido de aluminio (Al_2O_3) en sus varios niveles de pureza es el material cerámico avanzado que más se usa, en el proceso de sinterización se realizó un tratamiento térmico el cual consistía en llevar el material cerámico a una temperatura de 1000°C en un horno vulcan 3-350 donde la velocidad de calentamiento fue de $5^\circ\text{C}/\text{min}$, se determinamos tres grupos de probetas que se clasificaron en temperaturas de sostenimiento de 2, 3 y 4 horas, a partir de esto y de la composición de las probetas se realizaron las pruebas de desgaste erosivo, abrasivo y dureza, teniendo en cuenta que las probetas en los ensayos de desgaste fueron sometidas a un tiempo de 8min en total los resultados fueron los siguientes:

4.1.1. Desgaste erosivo

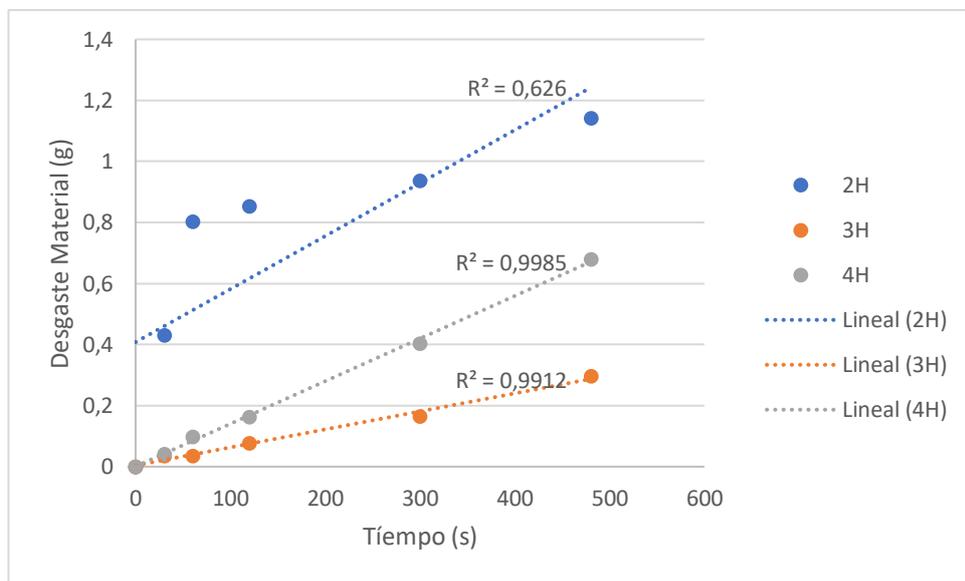
Gráfica 1. Desgaste erosivo vs tiempo probetas de alúmina



Fuente: Autores

Al observar el gráfico 1 de desgaste de material vs tiempo podemos decir que la probeta de alúmina de tiempo de cocción de 3 horas al finalizar los 8 minutos del ensayo representa una mayor pérdida de material con incremento del 20% de pérdida tomando como tiempo de referencia el valor de desgaste a los 8 minutos de cada probeta, dado a que las 3 tienen la misma cantidad de material este cambio se puede dar a la variación de flujo con que se impactaba la probeta.

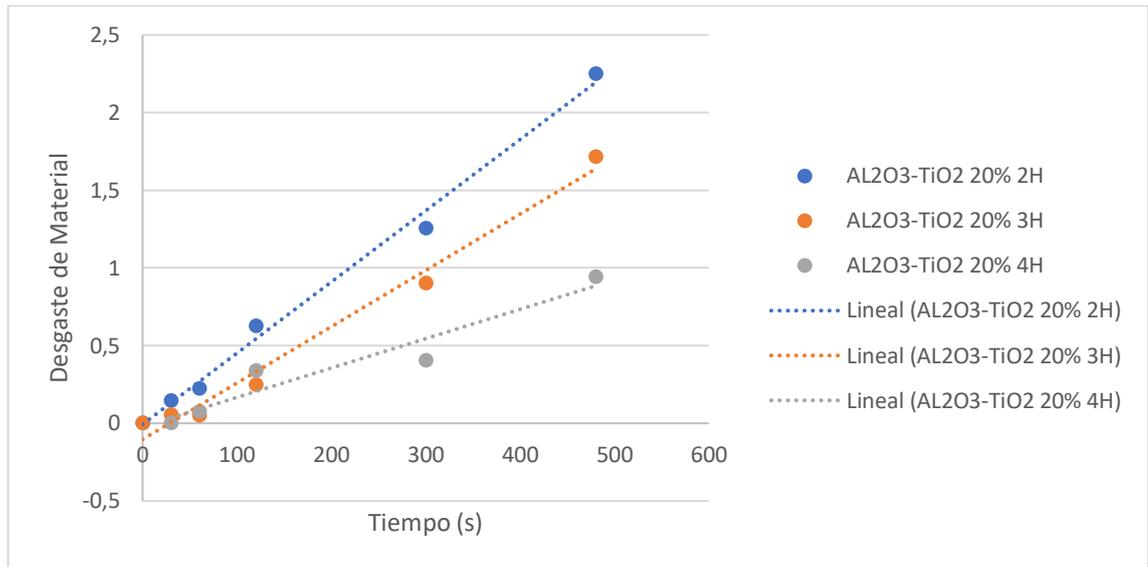
Gráfica 2. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 10% de TiO₂



Fuente: Autores

En la gráfica 2, utilizamos el valor de referencia de 5 minutos de desgaste erosivo y observamos que la pérdida en estas condiciones para las probetas de conformadas con un 90% de alúmina y el 10% de dióxido de titanio con un tiempo de cocción de 2, 3 y 4 horas la probeta que mayor representa desgaste de material es la que tiene un tiempo de cocción de 2 horas con un incremento pérdida de material comparada con la probeta de 4 horas del 60%.

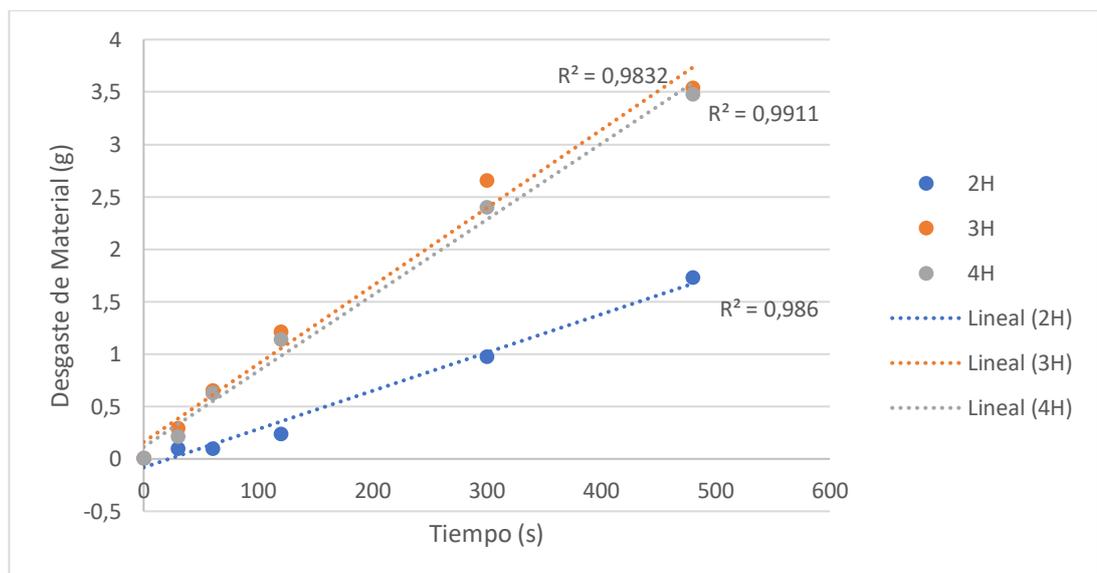
Gráfica 3. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 20% de TiO2



Fuente: Autores

En la gráfica 3 el porcentaje de incremento de pérdida de material del 80 % óxido de aluminio con el 20% de Dióxido de titanio la probeta que mayor presente desgaste es la de tiempo de cocción de 2 horas con un incremento de desgaste del 25% con respecto a las otras 2 probetas que tenían condiciones de tiempo de cocción diferente.

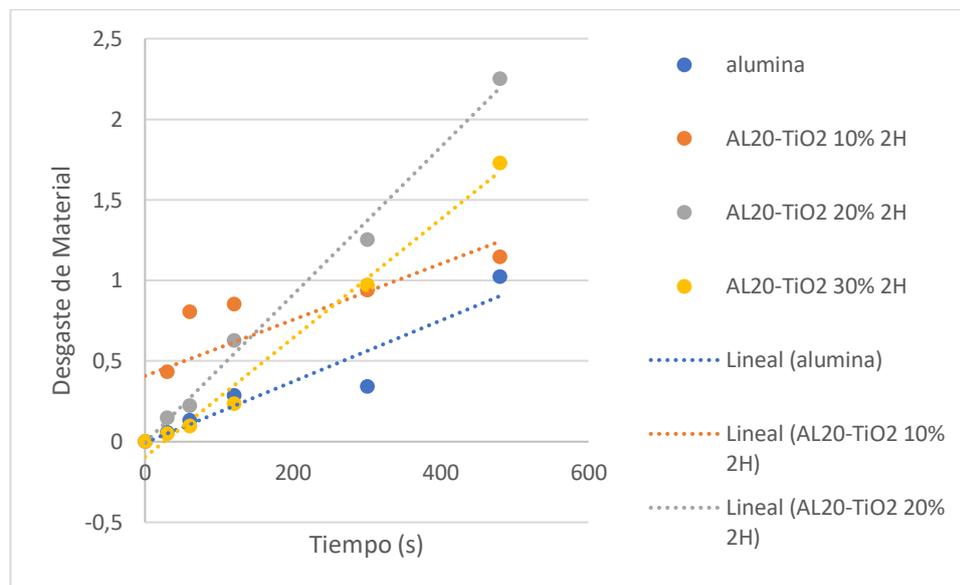
Gráfica 4. Desgaste erosivo vs tiempo probetas con el 30% de TiO2



Fuente: Autores

En la gráfica 4 podemos observar que se cuenta con una composición del 70% óxido de aluminio y 30% de dióxido de titanio las probetas con tiempo de cocción de 3 y 4 horas representan un porcentaje de desgaste mayor a probeta de cocción de tiempo de 2 horas en un incremento de desgaste del 35% pasado los 8 minutos de la prueba.

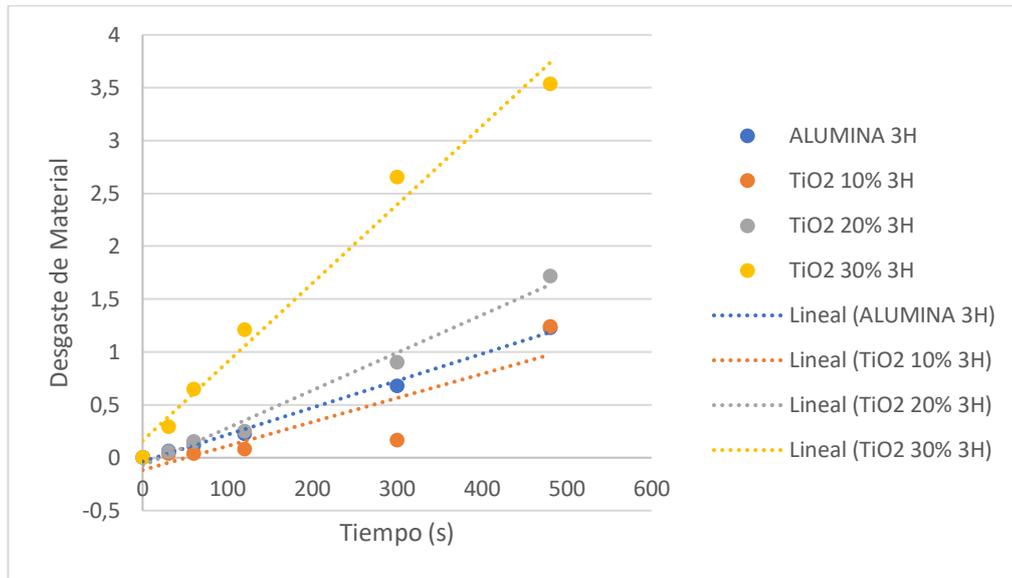
Gráfica 5. Desgaste probetas tiempo de cocción 2 horas



Fuente: Autores

En la gráfica 5 podemos observar el comportamiento del desgaste erosivo de las de la alúmina, y de las probetas que contienen el 10, 20, y 30% en un tiempo de cocción de 2 horas y prueba de desgaste de 8 minutos, de las 4 probetas la que menor desgaste representa es la que contiene alúmina sola. Las probetas que contienen el material cerámico como refuerzo se esperaba que incrementara la resistencia al desgaste, pero se observó que disminuyó la resistencia una posibilidad de que esto ocurriera probablemente fue debido a la sinterización entre los dos materiales que no origina enlaces tan fuertes lo que hicieron que en el proceso de desgaste uno se desprendiera más fácil del otro.

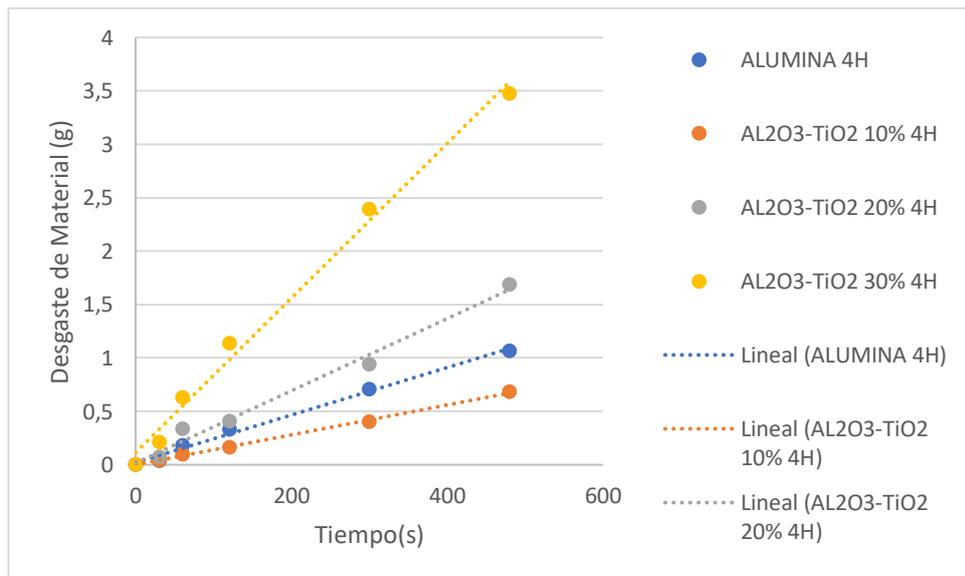
Gráfica 6. Desgaste probetas tiempo de cocción 3 horas



Fuente: Autores

La gráfica 6 en comparación con la gráfica 5 se puede observar que las probetas que representan una menor resistencia al desgaste de material es la alúmina y la que contienen un 20% de dióxido de titanio debido a las composiciones del material y al proceso de sinterización.

Gráfica 7. Desgaste probetas tiempo de cocción 4 horas

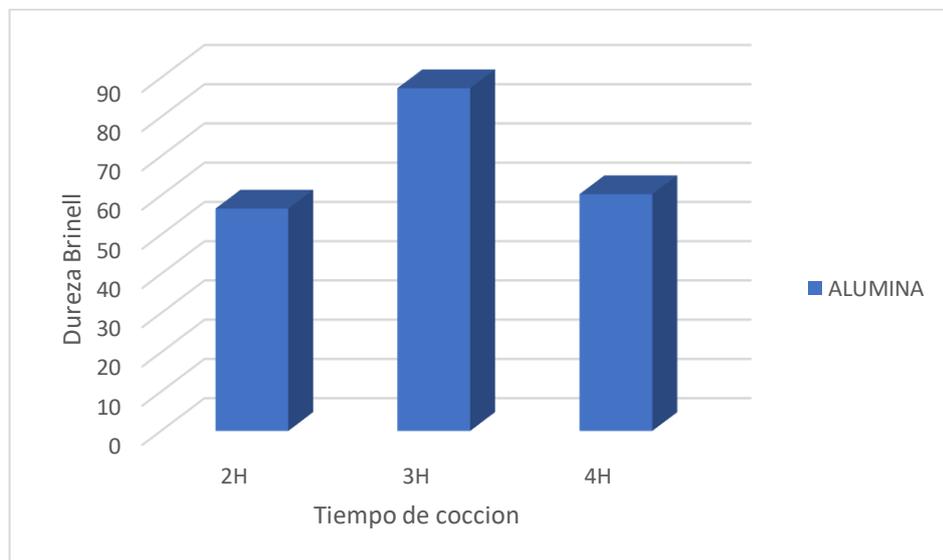


Fuente: Autores

Por último, en la gráfica 7 de desgaste erosivo podemos observar que a mayor cantidad de material de composición se presenta una menor resistencia al desgaste la causa de que esto ocurra es debido al proceso de sinterización entre los dos materiales no proporciono enlaces entre los dos materiales tan fuertes lo que hizo que en el proceso de desgaste uno se desprendiera más fácil del otro.

4.1.2. Ensayo de dureza

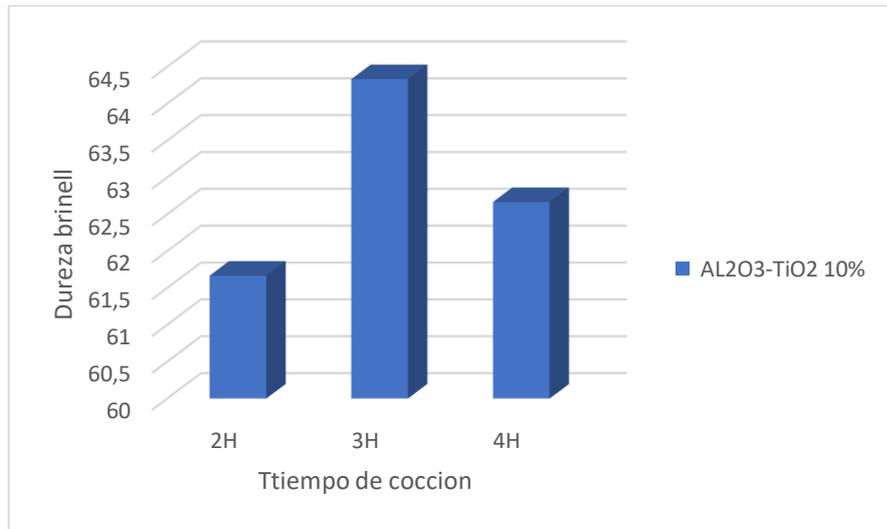
Gráfica 8. Dureza Brinell alúmina (al203)



Fuente: Autores

En la gráfica 8 observamos la materia alúmina al 100%, las probetas que tuvieron un comportamiento de dureza mayor fue la de 3 horas a diferencia de las otras 2 que fueron de 2 horas y 4 horas debido al tiempo de cocción. Podemos analizar que entre más tiempo de cocción va tener su capacidad para soportar, el desgaste va hacer mayor.

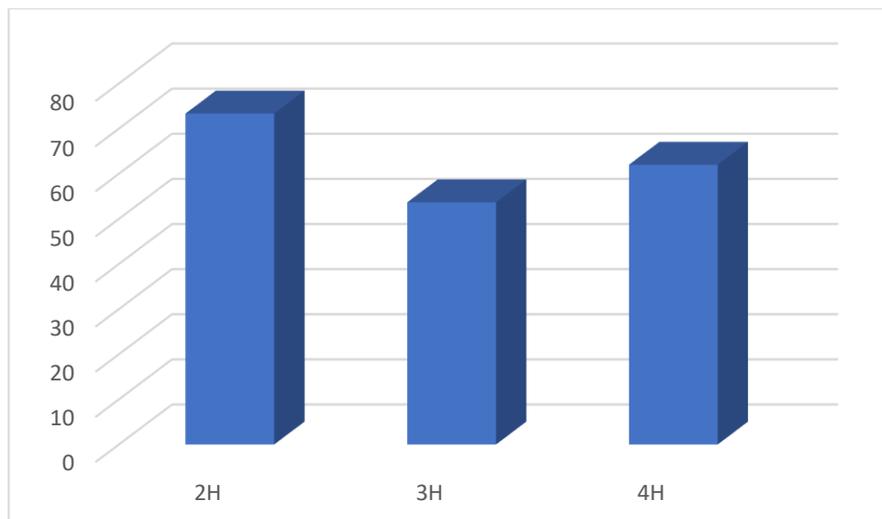
Gráfica 9. Dureza Al₂O₃-TiO₂ 10%



Fuente: Autores

En esta gráfica podemos observar al mezclarse 90% Al₂O₃ y 10% de TiO₂ las probetas que tuvieron un comportamiento de dureza mayor fue la de 3 horas a diferencia de las de 2 horas y 4 horas. Se puede analizar que a menor tiempo de cocción menos dureza va tener el material y entre más tiempo de cocción también puede perderse dureza el material.

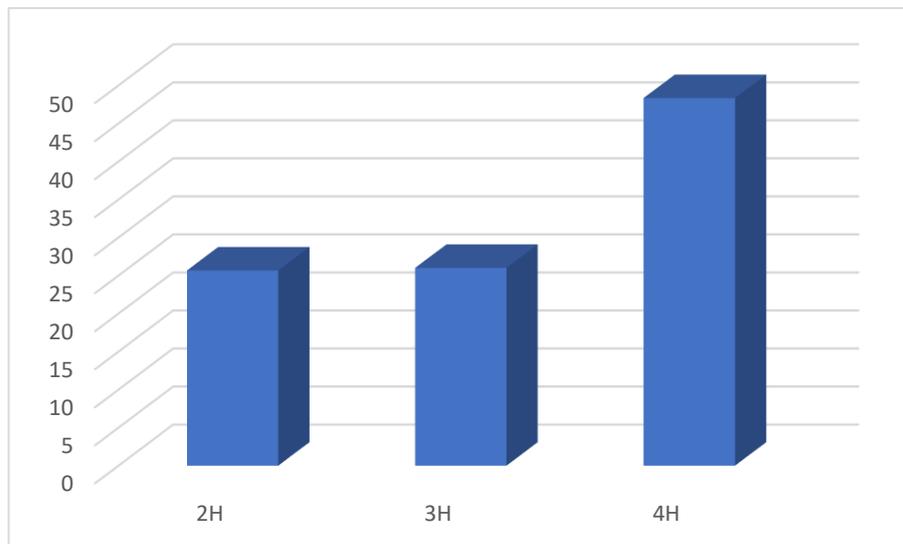
Gráfica 10. Dureza Al₂O₃-TiO₂ 20%



Fuente: Autores

En esta gráfica podemos observar que la probeta con un tiempo de cocción de 2 horas fue la que más dureza obtuvo a diferencia que la de 3 y 4 horas. Podemos analizar que con un porcentaje de 20% de refuerzo el material se va a compactar más, es decir que entre más tiempo se deje en cocción el valor de la dureza puede variar debido a que el compuesto pierda propiedades y no pueda tener la misma cohesión.

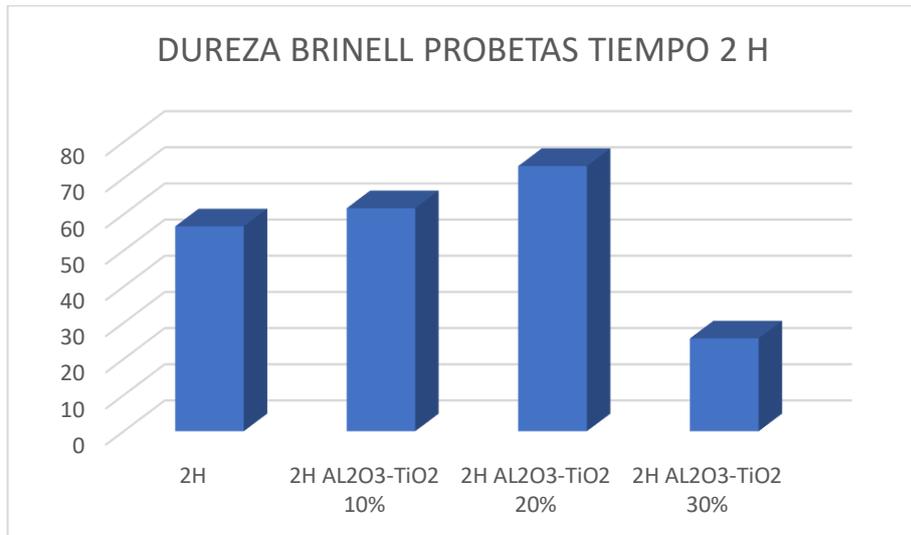
Gráfica 11. Dureza Al₂O₃-TiO₂ 30%



Fuente: Autores

En esta gráfica podemos observar que la probeta a un porcentaje del 30 % de refuerzo de titanio que más tuvo dureza fue la de 4horas, podemos analizar que entre más porcentaje de refuerzo y más tiempo de cocción tenga el material compuesto va a tener una dureza más elevada, puede ser debido a que el material va a compactarse más.

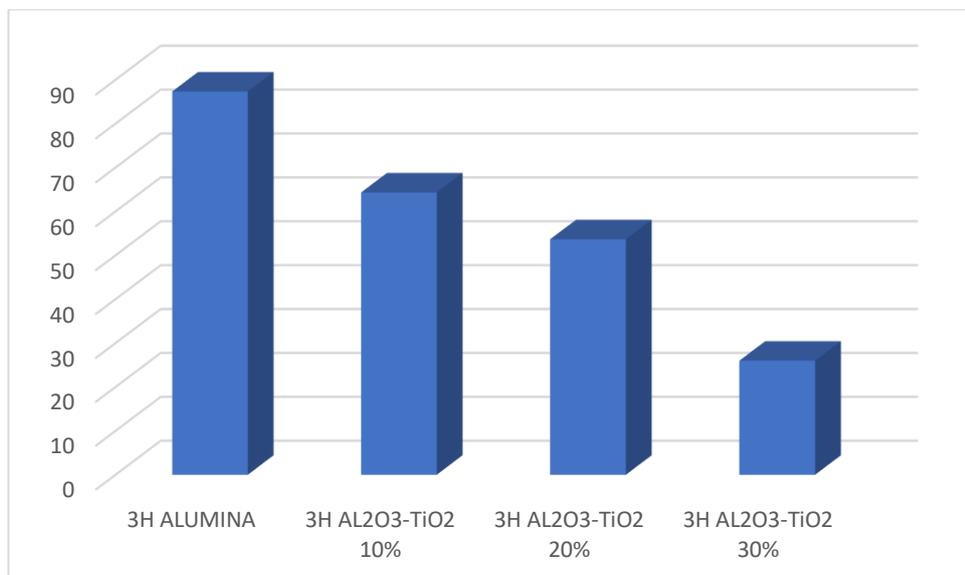
Gráfica 12. Dureza Brinell probetas tiempo 2 H



Fuente: Autores

En esta gráfica se pudo analizar que la probeta con 20 % de refuerzo fue la que más dureza tuvo al mismo tiempo de cocción, a diferencia con las otras probetas del 10%, 30% y la alúmina al 100%, podemos analizar que entre más porcentaje de material de refuerzo tenga a este tiempo de cocción el material va tener menos cohesión y por lo tanto no va tener la misma dureza.

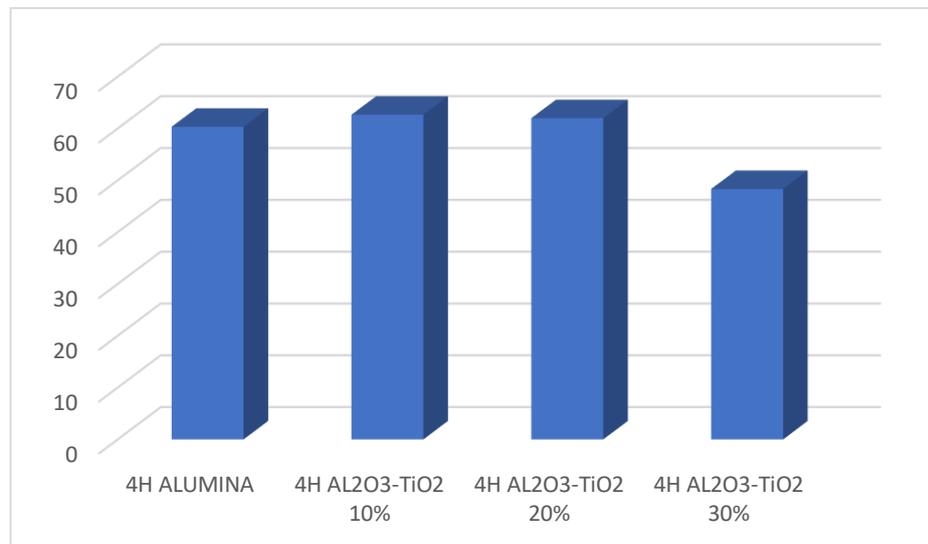
Gráfica 13. Dureza Brinell TIEMPO 3H



Fuente: Autores

En esta gráfica podemos observar que la probeta con más dureza fue la alúmina podemos analizar que la alúmina pura va tener un valor de dureza mayor que mezclándola con el refuerzo ya sea al 10% 20% o 30% a ese tiempo de cocción se puede decir que es debido a que no alcanza a compactarse y por esa razón la probeta pura tiene un índice de dureza más elevada.

Gráfica 14. Dureza Brinell tiempo 4H



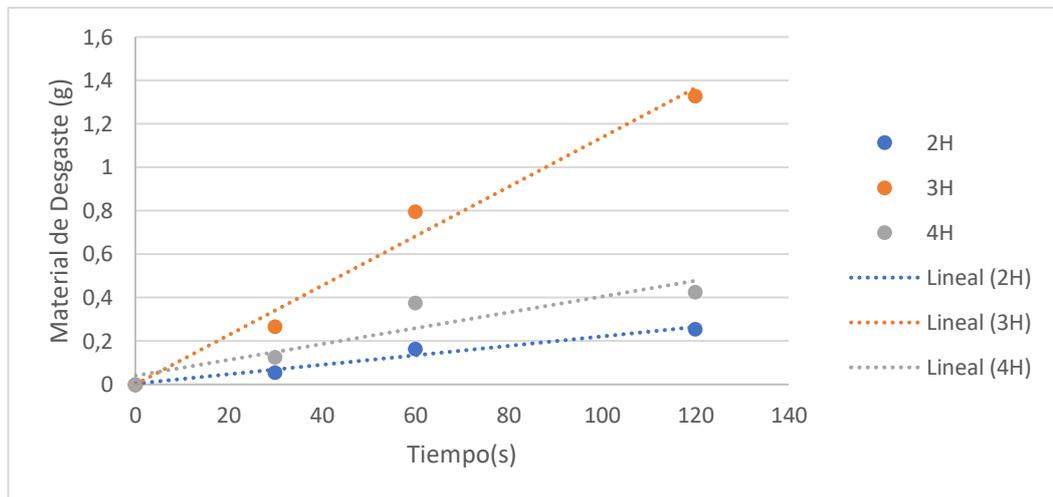
Fuente: Autores

Acá podemos observar que la probeta que tiene menos porcentaje de refuerzo (10% de titanio) a este tiempo de cocción va a tener más dureza a las que tienen más porcentaje de refuerzo como (20 % y 30% de titanio) o la que tiene 100% de alúmina. Podemos analizar que entre más material de refuerzo tenga no va tener cohesión y no va a compactarse y su capacidad para soportar el desgaste va hacer menor.

Por último, podemos analizar que entre menos porcentaje se tenga de refuerzo de Dióxido titanio el material va a tener una mayor dureza esto se produce debido a la sinterización de los materiales no hubo una fuerte cohesión entre partículas donde se esperaba que a mayor porcentaje de dióxido de titanio los porcentajes de dureza fueran altos.

4.1.3. Desgaste Abrasivo

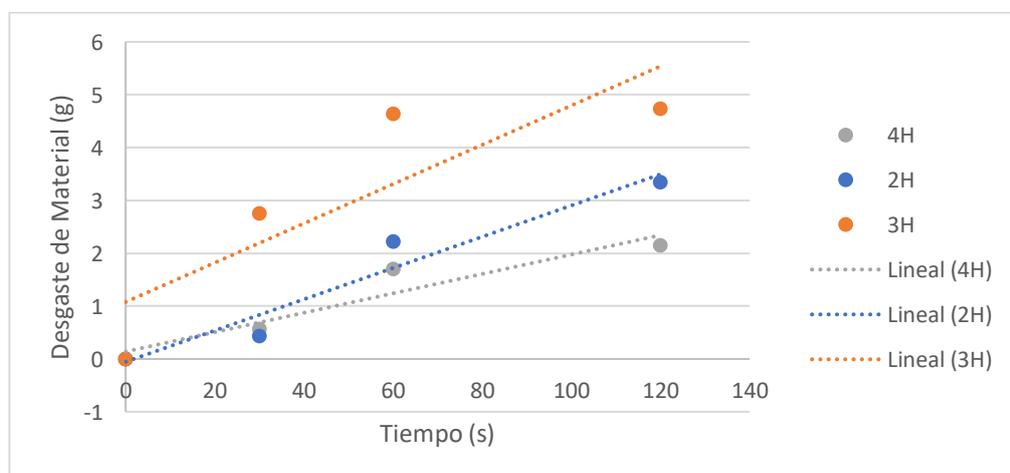
Gráfica 15. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL₂O₃



Fuente: Autores

Al observar la gráfica 15 de desgaste abrasivo vs tiempo podemos decir que la probeta de alúmina de tiempo de cocción de 2 horas al finalizar los 2 minutos del ensayo representa una menor pérdida de material con el 20% de reducción tomando como tiempo de referencia el valor de desgaste a los 120 minutos de cada probeta.

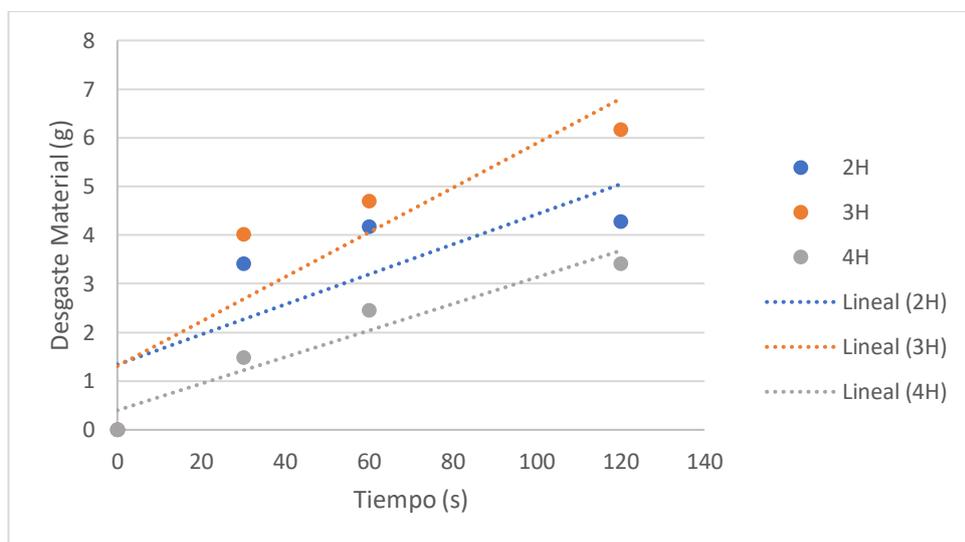
Gráfica 16. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL₂O₃-TiO₂ 10%



Fuente: Autores

En la gráfica 16 podemos observar según la tendencia lineal que conforme avanza el tiempo del ensayo aumenta la pérdida de material, en este caso la probeta que representa menor resistencia al desgaste es la que contiene un tiempo de cocción de 3 horas con un porcentaje de reducción del 29,35% con respecto a la del tiempo de cocción de 2 horas.

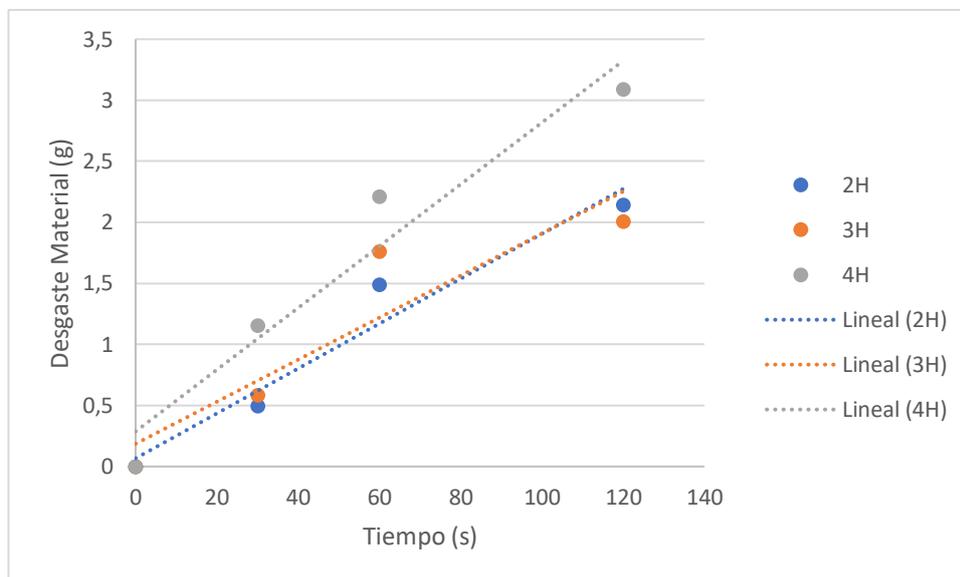
Gráfica 17. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL₂O₃-TiO₂ 20%



Fuente: Autores

En la gráfica 17 a medida que pasa el tiempo el desgaste es mucho mayor de puede decir que el desgaste transcurre de forma lineal donde el porcentaje de incremento comparado con la probeta de cocción de 2 y 4 horas es de 31%.

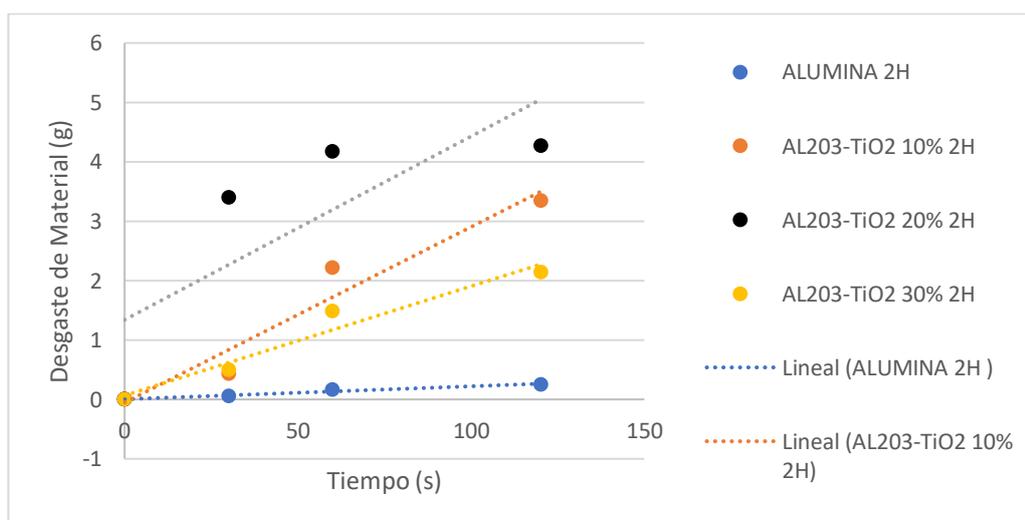
Gráfica 18. Desgaste abrasivo vs tiempo con AL2O3-TiO2 30%



Fuente: Autores

En la gráfica 18 podemos observar que la probeta con un tiempo de cocción de 4 horas y 30% de TiO2 el desgaste es mucho más rápido y de tendencia lineal con un porcentaje de reducción del 30,6 %.

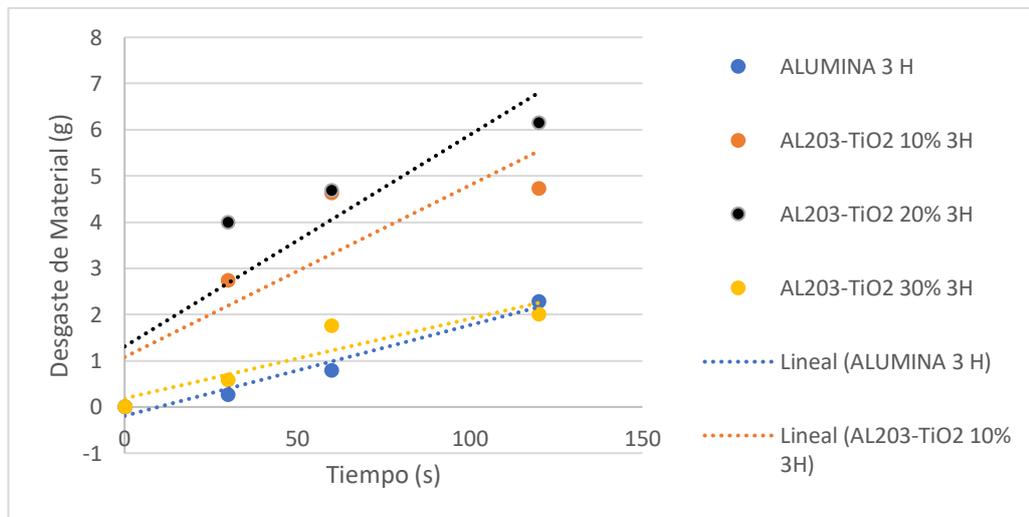
Gráfica 19. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 2H



Fuente: Autores

En la gráfica 19 podemos observar el desgaste que ocurre a las probetas con tiempo de cocción de 2 horas, podemos decir que la que menor desgaste presenta tiene 100% de alúmina, así mismo se puede decir que la que posee un 70% de alúmina y 30% de dióxido de titanio representa un mayor desgaste se puede decir que este desgaste se pudo haber originado debido al proceso de sinterización entre los 2 materiales.

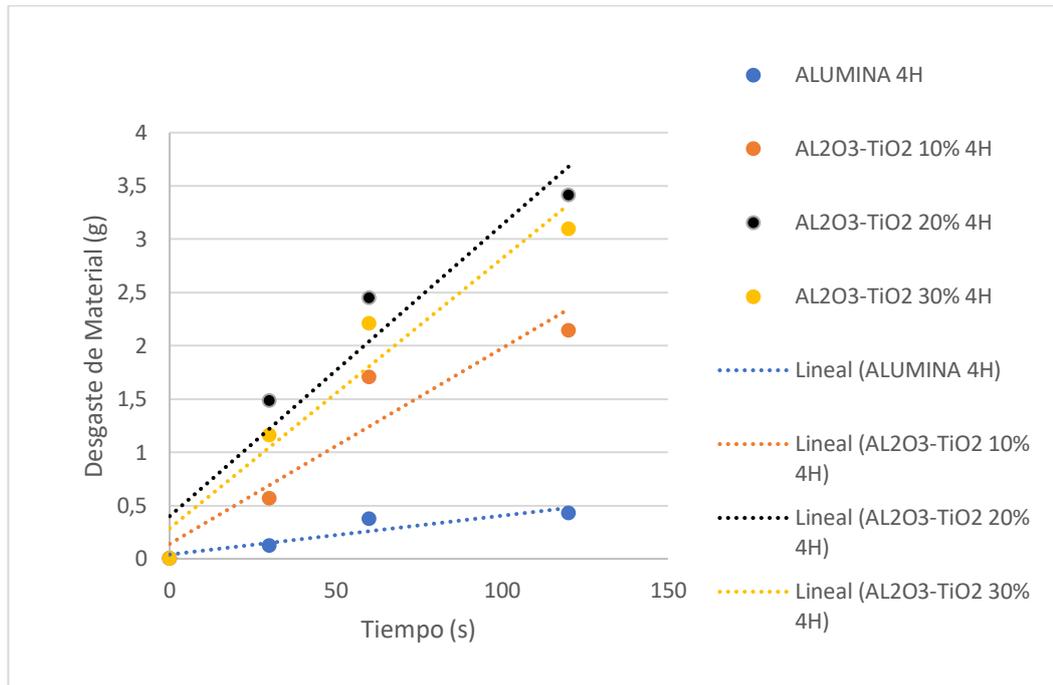
Gráfica 20. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 3 H



Fuente: Autores

Se puede observar que las probetas que representan una menor resistencia al desgaste de material es la alúmina y la que contienen un 20% de dióxido de titanio debido a las composiciones del material y al proceso de sinterización, y en comparación con el grafico anterior se puede ver que a mayor cantidad de material depositante y tiempo decocción mayor es el desgaste.

Gráfica 21. Desgaste abrasivo vs tiempo probetas de cocción 4 H



Fuente: Autores

En la gráfica 21 de desgaste abrasivo podemos observar que a mayor cantidad de material de composición se presenta una menor resistencia al desgaste la causa de que esto ocurra es debido al proceso de sinterización entre los dos materiales no proporciono enlaces entre los dos materiales tan fuertes lo que hizo que en el proceso de desgaste uno se desprendiera más fácil del otro.

MICROSCOPIA

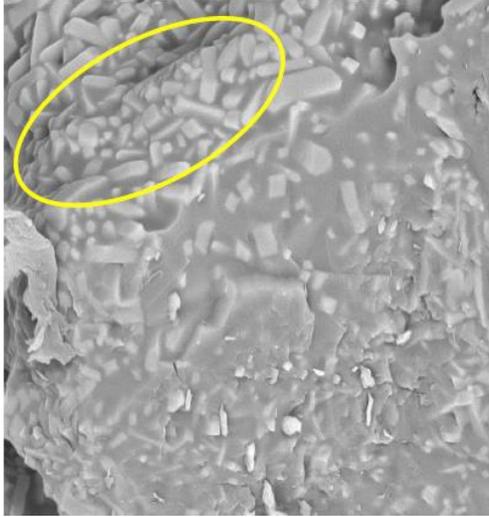


Figura 26 muestra de titanio y alúmina punto 1

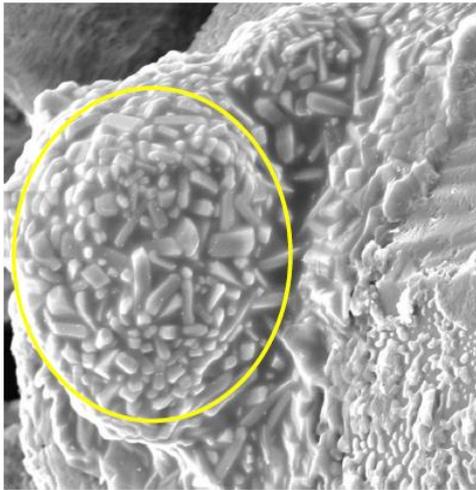


Figura muestra de titanio y alúmina punto 1

Se observa unas partículas de diferentes formas como circulares, rectangulares, redondeadas pero que tienen una sustancia que las abarca y esas figuras se encuentran separadas a cierta distancia no están ni aglomeradas y se pueden determinar bien la forma en la que se encuentran, las partículas más pequeñas y circulares que se ven podría ser dióxido de titanio ya que tiene menor porcentaje en la muestra y las partículas más grandes y con diversas formas podrían ser alúmina

5. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de este trabajo se pudo lograr de manera correcta realizar la caracterización mecánica y morfológica de los materiales compuestos con materiales cerámicos.
- Se fabricó un molde el cual fue adecuado para una realización eficiente en la manufactura de probetas que permitió la producción en diferentes porcentajes del material.
- Para las pruebas de desgaste erosivo y abrasivo se generaron las correspondientes curvas de tiempo y pérdida de masa a cada una con los diferentes porcentajes y tiempo de cocción, configuraciones comprobando así el desgaste del material.
- Para todos los porcentajes se obtuvo un comportamiento muy similar comparado con la capacidad de desgaste: se identificó que el mejor comportamiento presentado frente al desgaste abrasivo entre los dos materiales evaluados fue la alúmina, demostrando buenas características de dureza y resistencia a este tipo de desgaste en ambientes altamente abrasivos como lo es el movimiento de tierras.
- En los resultados realizados de ensayo de dureza se observó que entre menos refuerzo de dióxido de titanio y más tiempo de sinterizado se deje, el material va tener una mayor dureza.
- Cuando se exponen las probetas a medio abrasivos, las graficas obtenidas de los resultados nos permiten comparar cómo cambia el porcentaje de desgaste, también se pudo observar mediante las gráficas obtenidas, que nos permite visualizar cual fue el comportamiento de los materiales en el medio abrasivo a las que fueron expuestas las probetas.

6. RECOMENDACIONES

En este proyecto las probetas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se llevaron al horno para una cocción, una recomendación es que una vez hecha, en ese mismo instante, se debió poner al horno ya que así el material no pierde propiedades secándose al ambiente.

Debido a que las probetas no se les pudo aplicar una fuerza constante de presión ya que la prensa tenía fugas y se iba bajando poco la presión, algunas probetas no quedaron uniformemente debido a eso unas se fracturaron más rápido que otras, la recomendación es que la prensa mantenga esa fuerza constante para que así pueda resistir más.

BIBLIOGRAFIA

AIMPLAS. Tipos de materiales compuestos. AIMPLAS. 30 de noviembre de 2016. [En línea] [Consultado el 21 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>>

AMES. Proceso de fabricación básico. AMES. 2019. [En línea] [Consultado el 13 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.ames-sintering.com/es/proceso-de-sinterizado/>>

CEFIC. Sobre el dióxido de titanio. TDMA. 2018. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.pureti.es/wp-content/uploads/2018/06/Que%CC%81-es-el-dio%CC%81xido-de-titanio.pdf>>

ECURED. Desgaste erosivo. ECURED. 2019. [En línea] [Consultado el 22 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Desgaste_erosivo>

ECURED. Sinterización. ECURED. 2019. [En línea] [Consultado el 13 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.ecured.cu/Sinterizaci%C3%B3n>>

INSTITUTO ASTECO. Qué es el desgaste por abrasión y cómo combatirlo. Instituto Asteco. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://institutoasteco.com/asteco/desgaste-por-abrasion/>>

LANDÍN, Pedro. Materiales cerámicos: propiedades, clasificación y obtención. Pelandintecno-Tecnología Eso. 07 de febrero de 2013. [En línea] [Consultado el 21 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/materiales-ceramicos-propiedades.html>>

M & E. Desgaste por erosión. Ingeniería mecánica y eléctrica. 2019. [En línea] [Consultado el 22 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<http://www.myethermalspray.com/soluciones/desgaste-por-erosion/>>

QUIMINET.COM. Tipos de alúmina y sus principales usos. QUIMINET.COM. 04 de enero de 2006. [En línea] [Consultado el 20 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-alumina-y-sus-principales-usos-4110.htm>>

QUIMINET.COM. Usos y aplicaciones del silicato de sodio líquido y sólido. QUIMINET.COM. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-silicato-de-sodio-liquido-y-solido-27872.htm>>

RODRÍGUEZ, Hermenegildo. Ensayos de Dureza en los Materiales. Ingemeconica.com. 2019. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://ingemeconica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>>

RODRÍGUEZ, Hermenegildo. Estudio de los Materiales Compuestos. Ingemeconica.com. 2019. [En línea] [Consultado el 11 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://ingemeconica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>>

SCRIBD. Desgaste abrasivo. SCRIBD. 2019. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://es.scribd.com/document/313586854/DESGASTE-ABRASIVO>>

SILICATOS ESPECIALES S.A. Silicato de Sodio. Silicatos Especiales S.A. 2016. [En línea] [Consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <<https://www.silicatosespeciales.com.mx/productos/silicato-de-sodio/>>