

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ FENÓLICA CARGADO CON PARTÍCULAS
DE CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO SBR.

CAROLINA CARDONA FERNÁNDEZ

LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ OCHOA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2013

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ FENÓLICA CARGADO CON PARTÍCULAS
DE CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO SBR.

CAROLINA CARDONA FERNÁNDEZ

LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ OCHOA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2013

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ FENÓLICA CARGADO CON PARTÍCULAS
DE CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO SBR.

CAROLINA CARDONA FERNÁNDEZ

LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ OCHOA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Asesor

SANTIAGO BETANCOURT PARRA

Ingeniero Mecánico, Ph. D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2013

DEDICATORIA

Dedico este gran logro a **Dios**, por darme siempre la fortaleza de seguir adelante, a mis padres Gemma Fernández y José Fernando Cardona quienes han sido siempre mi guía y apoyo en todos los momentos de mi vida, a mi hermano Sebastián Cardona por ser mi compañía, y fiel amigo.

A toda mi **familia** porque siempre han tenido palabras de aliento y me han acompañado en este camino.

Carolina Cardona Fernández

Dedico este logro a Dios y a la memoria de mi querido padre José Fernando Rodríguez y mi abuela Ana Lucila Carreño por ser ellos mi guía e inspiración. También quiero dedicarlo a mi madre Miriam Ochoa y a mi hermana María Clemencia Rodríguez por su apoyo incondicional, la educación y el amor que me brindan. Finalmente a mi querido abuelo José Rodríguez, porque sin él nada de esto sería posible; y a toda mi familia por los consejos, la motivación y su voto de confianza.

Luis Fernando Rodríguez Ochoa

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín por la educación brindada durante el pregrado y que hoy se materializa en este trabajo de grado, por permitirnos hacer uso de sus instalaciones y los equipos necesarios para el desarrollo del mismo. De la misma manera extendemos los agradecimientos a todo el personal del bloque de laboratorios UPB-Medellín, por las asesorías, los consejos y su disposición de ayudar de la mejor manera en todo momento.

A nuestro director Santiago Betancourt Parra por haber aceptado orientar este trabajo de grado, haber tenido siempre la mejor disposición para resolver nuestras dudas y brindarnos su ayuda y conocimiento.

CONTENIDO

Objetivos	8
Resumen	9
Introducción	10
1. Marco teórico	12
1.1. Material compuesto	12
1.1.1. Matriz	12
1.1.1.1. Polimérica	12
1.1.1.2. Metálica	13
1.1.1.3. Cerámica	13
1.1.2. Refuerzo	13
1.1.3. Interfase	13
1.2. Generalidades de la resina fenólica	14
1.2.1. Novolaca	14
1.3. Generalidades de caucho Estireno Butadieno SBR	15
1.4. Tribología	16
1.4.1. Fricción	17
1.4.1.1. Fuerza de fricción	19
1.4.1.2. Factores que condicionan la fricción	20
1.4.1.3. Formas de reducir la fricción	21
1.4.2. Desgaste	21
1.4.2.1. Adhesivo	21
1.4.2.2. Abrasivo	21
1.4.2.3. Corrosivo	22
1.4.2.4. Erosivo	22
1.4.2.5. Por fatiga superficial	22
1.4.2.6. Por cavitación	22
1.4.2.7. Por corrientes eléctricas	22
1.4.3. La fricción de elastómeros	23

1.4.4 La fricción de polímeros	24
2. Materiales y métodos	25
2.1. Materias primas	26
2.1.1. Resina fenólica	26
2.1.2. Caucho SBR	28
2.1.3. Agente desmoldante (POLIMUL)	30
2.2. Métodos de elaboración	31
2.2.1. Corte de probetas	42
2.2.2. Fabricación de los pines para la caracterización tribológica	43
2.2.3. Ensayo pin disco	44
3. Pruebas de laboratorio y resultados	47
3.1. Densidad	47
3.2. Absorción de humedad	50
3.3. Dureza	53
3.4. Flexión a tres puntos	56
3.5. Ensayos tribológicos	61
4. Conclusiones	69
Recomendaciones y trabajos futuros	71
Referencias	73

Objetivos

Objetivo General:

Determinar el comportamiento tribológico de un material compuesto de matriz fenólica cargado con partículas de SBR.

Objetivos específicos:

- Identificar las características del SBR para ser empleado como reforzante particulado de matrices fenólicas.
- Fabricar materiales compuestos de matriz fenólica reforzados con partículas de SBR a diferentes proporciones variando el tamaño de partícula y el contenido de refuerzo.
- Determinar las propiedades mecánicas y características superficiales del material compuesto obtenido.
- Evaluar el comportamiento tribológico del material compuesto fabricado empleando un tribómetro pin-disco y un contracuerpo de acero.

RESUMEN

En este trabajo de grado se elaboró un material compuesto de matriz fenólica tipo novolaca con refuerzo de caucho estireno butadieno SBR en polvo, fabricando distintas probetas con diferentes proporciones de matriz y reforzante. La fabricación de las probetas se realiza por medio de un mezclado manual y por compresión en caliente como técnica de conformado del material compuesto.

Posteriormente se ejecutaron las pruebas de densidad, flexión a 3 puntos, dureza, desgaste, absorción de humedad, adicionalmente se efectuaron ensayos de pin disco a fin de determinar el coeficiente de fricción y se analizaron finalmente los resultados para sugerir posibles aplicaciones tribológicas del material y recomendar trabajos futuros.

De acuerdo con lo encontrado, se evidencian cambios en el comportamiento del coeficiente de fricción como consecuencia de la incorporación del caucho y que efectivamente el tamaño de partícula afecta el material compuesto en cuanto a su comportamiento tribológico y mecánico.

El trabajo aquí expuesto fue presentado en el VII Congreso Internacional de Materiales que se realizó en la ciudad de Medellín el mes de Octubre de 2013, evento en el cual fue aceptado para participar en la modalidad de póster, en los anexos 1 y 2 se presentan el certificado y el resumen correspondientes (carpeta anexos).

Palabras claves: COF, tribología, matriz fenólica, probeta, caucho SBR.

INTRODUCCIÓN

Un material compuesto está formado por dos o más componentes disímiles entre sí y se caracteriza porque las propiedades del material final son superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado. Los materiales compuestos están formados por dos fases: una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo. El refuerzo generalmente proporciona las propiedades mecánicas al material compuesto y la matriz la resistencia química, térmica y ambiental. Los fenómenos de adhesión entre matriz y refuerzo se encuentran ubicados en la interface [1].

Para este trabajo de grado se elabora un material con matriz fenólica y refuerzo de SBR (estireno butadieno) para estudiar su comportamiento tribológico.

El caucho estireno butadieno, frecuentemente abreviado SBR (del inglés styrene-butadiene rubber) es un elastómero sintético obtenido mediante polimerización de una mezcla de estireno y butadieno. Es el caucho sintético con mayor volumen de producción mundial. Su principal aplicación es en neumáticos. El SBR tiene buena resistencia al desgaste, especialmente a aquel que responda más a mecanismos de fatiga por rozamiento. En este sentido se comporta mejor que el caucho natural y de ahí su adopción casi universal en las bandas de rodamiento para neumáticos de automóviles [2] [3].

La matriz fenólica hace parte del grupo de matrices termoestables, su principal aplicación se encuentra en componentes aislantes de equipos electrónicos, reductores y materiales que sufran desgaste (especialmente donde la lubricación es mínima), la tipo fenólica novolaca es llamada también de fricción por su amplio uso en aplicaciones de ese tipo. Sus ventajas se deben a su excelente estabilidad a elevadas temperaturas, baja emisión de humo y gases tóxicos cuando son expuestas al fuego y especialmente a la combustión lenta, resistencia al envejecimiento, estabilidad dimensional, resistencia a alta tensión [4] [5].

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1 MATERIAL COMPUESTO

Un material compuesto se considera como una asociación intencionada y artificial de dos materiales dispares, uno de ellos debe ser el reforzante mientras que el otro es catalogado como matriz aglutinadora, logrando que la combinación de estos materiales sea un compuesto con mejores propiedades que si estuvieran trabajando como materiales individuales, y la mejora depende de la aplicación deseada [1].

En un material compuesto existen 3 componentes denominados: matriz, refuerzo e interfase.

1.1.1 Matriz: Tiene como función unir los reforzantes aplicados al material, siendo ésta la que da el carácter, aportando propiedades físicas y químicas al compuesto, protegiendo el reforzante del ambiente [6].

Existen 3 tipos de matrices, denominadas:

1.1.1.1 Poliméricas: La matriz polimérica u orgánica, es la más utilizada en la actualidad puesto que tiene como ventajas que permite la obtención de piezas complicadas y de baja densidad. Esta matriz puede ser termoestable o

termoplástica dependiendo de si presenta reticulación o no, lo que determina si es reutilizable y además sus propiedades mecánicas. Para el caso de este proyecto se usa una matriz polimérica termoestable denominada resina fenólica novolaca de la que se hablará más adelante.

1.1.1.2 Metálicas: Se seleccionan normalmente porque conservan las propiedades de los metales como el elevado módulo de elasticidad, la elevada resistencia mecánica. Las más utilizadas son de aluminio, magnesio o titanio.

1.1.1.3 Cerámicas: Este tipo de matrices mejoran las propiedades mecánicas del material compuesto como la resistencia y la tenacidad. Se usan generalmente vidrios de sílice, basados en óxidos, y carburos como la alúmina y el carburo de silicio [7].

1.1.2 Refuerzo: Es el componente que tiene como función transmitir las cargas a la matriz, por lo cual define en gran medida las características mecánicas del compuesto como por ejemplo la resistencia y la rigidez. A pesar de que generalmente se usan las fibras como reforzante, para este caso se usó caucho estireno butadieno SBR pulverizado.

1.1.3 Interfase: La carga que actúa sobre la matriz es transmitida al reforzante a través de la interfase, por esta razón deben presentar una excelente unión que permita que se transmitan de manera adecuada los esfuerzos mecánicos.

Un aspecto muy importante para tener una buena unión es la mojabilidad, que se define como la capacidad de un líquido para extenderse sobre una superficie sólida.

Existen distintas uniones en la interfase para materiales compuestos poliméricos: unión mecánica, unión física, unión química [8][9][7].

1.2 GENERALIDADES DE LA RESINA FENÓLICA

La resina fenólica es un polímero termorrígido que se obtiene a partir de la reacción de los fenoles con el formaldehído. La reacción se lleva a cabo por condensación produciendo agua como residuo, por ese motivo debe retirarse el agua para obtener un buen acabado en la pieza. Para este tipo de resina existen dos tipos importantes: las novolacas y los resoles. Para el caso de este estudio se usa resina tipo novolaca como matriz del material compuesto debido a su amplio uso para aplicaciones de fricción, a continuación se menciona una breve descripción:

1.2.1 Novolaca: Se destaca porque la proporción molar fenol-formaldehído es mayor a uno (>1), la reacción de polimerización se lleva a cabo por ácido-catálisis, en ellas las unidades de fenol se vinculan principalmente por grupos metileno [10].

Este tipo de resinas son modificadas por un agente de curado llamado hexametilentetramina (HMTA) que permite policondensación y formación del termorrígido durante la etapa de curado.

Las resinas fenólicas son usadas generalmente como aglutinante en los materiales de fricción gracias a su bajo costo y buena combinación de propiedades mecánicas, como alta dureza, buena resistencia a la compresión, resistencia térmica media, etc [4].

1.3 GENERALIDADES CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO SBR

Frecuentemente abreviado SBR (del inglés styrene-butadiene rubber) es un elastómero sintético obtenido mediante polimerización de una mezcla de estireno y butadieno. Es el caucho sintético con mayor volumen de producción mundial. Su principal aplicación es en neumáticos. El SBR tiene buena resistencia al desgaste, especialmente a aquel que responda más a mecanismos de fatiga por rozamiento, en este sentido se comporta mejor que el caucho natural y de ahí su adopción casi universal en las bandas de rodamiento para neumáticos de automóviles [2].

Entre sus propiedades puede encontrarse que el SBR tiene menor resistencia a la tracción y a la rotura. Aunque es superior en permeabilidad, resistencia al envejecimiento, al calor y al desgaste,

especialmente al que responde a mecanismos de fatiga por rozamiento, por lo que se dice que tiene un mejor comportamiento que el caucho natural [11].

1.4 TRIBOLOGÍA

Es la ciencia que estudia la interacción entre las superficies en contacto y que presentan algún tipo de movimiento relativo. El término *tribología* fue acuñado en 1966 y es derivado de la palabra griega *tribos* que significa “frotamiento”, de tal manera que la traducción literal sería la ciencia del frotamiento [12]. Analiza fenómenos como la fricción, el desgaste y la mecánica de contacto, usando la lubricación para corregir al máximo estos fenómenos, aplicado a mecanismos que se usan generalmente en la industria, para alargar su vida útil y aumentar la durabilidad. “Una mayor durabilidad de los equipos se logra si se reduce al máximo la fricción de sus diferentes mecanismos” [14].

Cabe aclarar que en sus inicios la tribología sólo se limitaba a estudiar los fenómenos alrededor de la fricción, pero hoy en día se ha extendido a los fenómenos que limitan la vida útil de los equipos, siendo la participación del fabricante y del usuario un referente importante para su buen funcionamiento ya que los fabricantes deben realizar el diseño de éstos de tal manera que sea lo más óptimo posible para garantizar una vida útil considerable, aplicando materiales que dentro del funcionamiento normal del equipo tengan desgaste mínimo,

permitiendo que el usuario final pueda hacer un mantenimiento efectivo de él, implementando programas de lubricación, y control de calidad de los distintos elementos que lo componen.

Por lo anterior, es preciso resaltar que el propósito de la tribología es lograr la minimización de las pérdidas resultantes de la fricción y el desgaste en todos los niveles de la tecnología donde se presente frotamiento entre superficies. La investigación en tribología conduce entonces a alcanzar una mayor eficiencia, un mejor rendimiento, menos averías y por supuesto ahorros [12].

La definición del tribosistema resulta útil para describir el proceso tribológico, el cual tiene 4 elementos principales: entradas, perturbaciones, salida y pérdidas. En éste se consideran también un cuerpo y un contracuerpo involucrados, como es el caso del ensayo pin-disco donde el cuerpo es el pin y el disco es el contracuerpo [14].

Dentro de la tribología se estudian principalmente 2 fenómenos: la fricción y el desgaste.

1.4.1 Fricción: Es definida como la fuerza que se opone al movimiento entre dos superficies en contacto, relacionada con la pérdida de energía mecánica durante el inicio y final del movimiento entre las zonas que se encuentran en contacto y movimiento. En la fricción existe un término que no se considera como una propiedad sino como un parámetro, es el denominado **coeficiente de fricción** que depende de otros factores, como: la temperatura, la humedad, la velocidad de

deslizamiento, la presión de contacto, el tipo de lubricante, el acabado superficial, y la forma de la región de contacto; existen dos tipos: **Coefficiente de fricción estático**: Se da por la relación entre la fuerza necesaria y el peso necesario para mover el elemento. **Coefficiente cinético de fricción** (por deslizamiento): es la relación entre la fuerza y el peso necesario para mantener al elemento en movimiento. Ambos pueden ser por fricción sólida o líquida.

Igualmente dentro de este fenómeno se pueden producir fricción interna que se produce entre las partículas de un mismo cuerpo y la fricción externa que se da entre las partículas de cuerpos diferentes. Esta última a su vez se divide en:

➤ **Fricción de deslizamiento**: Se da durante el movimiento relativo tangencial entre distintos elementos sólidos.

Dentro de la fricción del deslizamiento hay factores que influyen como el material de trabajo, el tiempo de contacto, la carga, la velocidad, la temperatura, la geometría del contacto.

La fricción siempre ocurre en puntos de picos de la rugosidad porque una superficie procesada por métodos comunes generalmente da una superficie desigual [13].

➤ **Fricción de rodamiento**: Se da durante el movimiento relativo de rodadura entre distintos elementos sólidos.

➤ **Fricción de rotación**: Se da durante el movimiento relativo de rotación entre distintos elementos sólidos.

- **Fricción estática:** Se refiere a la pérdida de energía mecánica al inicio y al final del movimiento relativo tangencial entre dos zonas en contacto.
- **Fricción móvil:** Se refiere a la pérdida de energía mecánica durante el movimiento relativo entre dos zonas en contacto.
- **Fricción de choque:** Se refiere a la pérdida de energía mecánica al inicio y al final del movimiento relativo normal entre dos zonas en contacto.

1.4.1.1 Fuerza de fricción: Se refiere a la fuerza paralela y que se opone al movimiento cuando existe deslizamiento o rodamiento de un cuerpo sobre una superficie, se conoce también como fuerza de rozamiento. Se define como:

$$F = fN \quad (1)$$

F = Fuerza necesaria para iniciar y/o mantener el movimiento, (kgf, lbf, N).

f = Coeficiente de fricción, (adimensional)

N = Fuerza normal, que mantiene las dos superficies juntas, (kgf, lbf, N).

Cuando se aplica una fuerza que no es suficiente para mover un elemento esta se denomina fuerza estática de rozamiento F_e , por el contrario cuando la fuerza aplicada al elemento es suficiente para moverlo esta se denomina fuerza cinética de rozamiento F_c . Cuando:

$F_c < F_e$, no hay movimiento

$F_c > F_e$, el movimiento es inminente

$F_c = F_e$, el cuerpo se mueve

Bajo el fenómeno de fricción existen ciertos factores que la condicionan y ayudan a reducirla:

1.4.1.2 Factores que condicionan la fricción:

- **Carga:** Factor incontrolable ya que hace parte de todo mecanismo y se constituye por su propio peso y fuerza.
- **Naturaleza de los materiales:** Dependiendo de la estructura molecular de los materiales dos cuerpos pueden tener mayor o menor fricción.
- **Acabado superficial:** Si hay mayor rugosidad, y la superficie es más áspera mayor es la fricción, existen dos tipos:
 - **De asperezas agudas:** Son causadas por falta de exactitud en la máquina herramienta.
 - **De asperezas dentadas:** son causadas por ligeras fallas en la herramienta de corte y naturaleza.
- **Capa de estructura cristalina intacta.**
- **Capa de estructura cristalina desfigurada.**
- **Capa de estructura cristalina casi destruida.**
- **Capa absorbida.**
- **Geometría de los cuerpos.**
- **Tolerancia entre las piezas.**

- **Temperatura de funcionamiento.**
- **Adhesión:** La temperatura y presión soportadas entre dos superficies pueden causar que se suelden.
- **Cizallamiento:** Se da cuando las asperezas entre superficies es tan grande que causan corte en la otra superficie.
- **Arado:** Se presenta cuando una de las superficies en movimiento relativo presenta una o varias irregularidades superficiales, que producen deformaciones permanentes en el otro elemento.
- **Lubricación:** Una cantidad apropiada de lubricante puesta entre dos superficies, disminuye la fricción [14].

1.4.1.3 Formas de reducir la fricción:

- Puliendo las superficies.
- Cambiar el deslizamiento por rodamiento.
- Interponer lubricantes.

1.4.2 Desgaste: Es un fenómeno que se da por el roce entre dos superficies causando deterioro en dichas superficies que pueden estar compuestas por distintos materiales. Existen distintos tipos de desgaste, los cuales son:

1.4.2.1 Adhesivo: Se presenta en todos los mecanismos, donde sus superficies tienen contacto directo y no tienen una película de lubricante entre ellos que impida el roce directo.

- 1.4.2.2 Abrasivo:** El desgaste abrasivo se da por incrustaciones de partículas provenientes del medio y que pueden tener mayor o igual dureza de las superficies en contacto ocasionando cortes en los materiales.
- 1.4.2.3 Corrosivo (por corrosión o herrumbre):** Se da por causa de aceites oxidados o contaminación del aceite en fluidos que se encuentran en contacto con el proceso.
- 1.4.2.4 Erosivo:** es un tipo de desgaste que se da debido a sólidos en suspensión que se involucran en el proceso que impactan con las superficies en contacto arrancado material debido al momentum de las partículas y que se pueden presentar como consecuencia del empleo de un aceite de viscosidad mayor a la requerida.
- 1.4.2.5 Por fatiga superficial:** Se da como consecuencia de esfuerzos cíclicos de tensión, compresión y esfuerzos cortantes sobre una superficie que finalmente causan picaduras o escamas en las superficies en contacto.
- 1.4.2.6 Por cavitación:** Se da cuando entre las superficies en contacto existe fluidez de aceite y por diferencia de presiones ocasiona burbujas de vapor que se transportan hasta encontrar una región de mayor presión y donde la burbuja bruscamente regresa al estado líquido ocasiona picaduras en las superficies.
- 1.4.2.7 Por corrientes eléctricas:** Se ocasiona por el paso de corriente eléctrica a través de elementos materiales en contacto.

Problemas ocasionados por el desgaste:

- Mayor consumo de repuestos por aumento en las reparaciones y en el mantenimiento.
- Reducción en la producción por paros de máquinas.
- Vida útil más corta de mecanismos.
- Posibles accidentes ante el peligro de rotura de piezas al sobrepasar los límites permisibles de diseño [14][15][16][9].

1.4.3 La fricción de elastómeros.

Se ha encontrado que a pesar de que la fricción puede ser alta, no hay prácticamente ninguna transferencia de caucho hacia una superficie más dura si un elastómero que es más blando se desliza sobre una superficie limpia y lisa.

En la mayoría de sistemas, la interfase de unión es más débil con la presencia de cauchos más suaves ya que hay poca reticulación y ocurre desprendimiento de material.

A pesar de que el caucho en su comportamiento ante la fricción presenta adhesión, esto puede disminuirse con la presencia de un lubricante, reduciéndola a valores más pequeños. Esto ha llevado a la utilización de cauchos de alta histéresis en neumáticos de automóviles como un medio para aumentar la resistencia al deslizamiento en superficies mojadas o con grasas [17].

1.4.4 La fricción en polímeros.

Implica la adhesión y deformación, así como grietas por debajo de la superficie. El comportamiento de los polímeros ante la

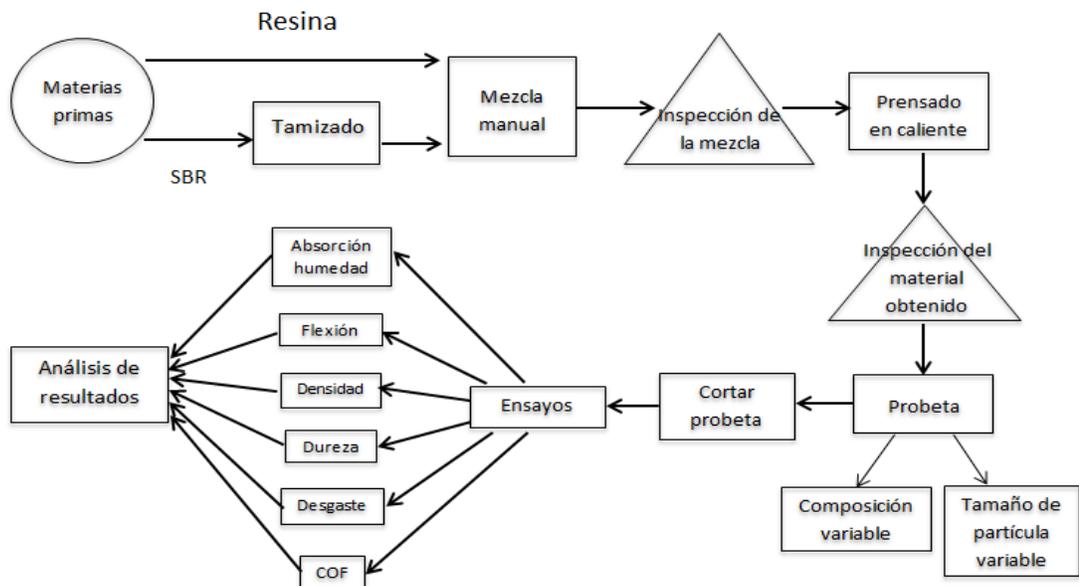
fricción se asemeja al de los metales, excepto que hay poca evidencia para el crecimiento de las deformaciones que se producen durante el deslizamiento y son más dependientes de la temperatura y velocidad de cizallamiento. Debido a su pobre conductividad térmica y bajo punto de fusión puede darse fusión en el material como resultado del calor producido durante la fricción, generando una capa fundida por disipación viscosa [17].

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se definen y describen las materias primas, los métodos, el proceso de fabricación, los equipos y los ensayos realizados durante el desarrollo del proyecto para obtener materiales compuestos de matriz fenólica y reforzante caucho SBR. Se fabricaron materiales compuestos con un tamaño de partícula del reforzante menor a 0,25 mm y porcentaje de refuerzo variable (0, 10, 20, 30, 40 y 50%), y otros materiales con una composición porcentual definida (30% de refuerzo) pero con el tamaño de partícula del refuerzo variable. Esto se realizó para evaluar la variación de algunas propiedades mecánicas, físicas y tribológicas. En la figura 1 se muestra la metodología para el desarrollo experimental de este trabajo:

Figura 1. Esquema del desarrollo experimental.



2.1 MATERIAS PRIMAS

2.1.1 Resina fenólica.

Para el desarrollo de este proyecto se usó la resina fenólica producida y comercializada por la empresa INTERQUIM S.A, el tipo de resina es novolaca modificada con el agente de curado hexametilentetramina (HMTA). Éste es un compuesto orgánico heterocíclico cristalino blanco que es sumamente soluble en agua y solventes orgánicos polares. Se obtiene a partir de formaldehído y amoniac que tiene como función el aumento de la relación formaldehído/fenol, que provoca que se inicie la reacción de polimerización necesaria para el endurecimiento y entrecruzamiento de la resina fenólica. Esta resina pertenece al tipo de polímero 6600MC, su presentación es en polvo fino uniforme de tonalidad blanca (Figura 2) [4].

Para su curado solo es necesario someterla a una fuente de calor, finalmente después de curada la resina tiene un color amarillo ámbar. En la tabla 1 se presenta la ficha técnica suministrada por la empresa comercializadora.

Figura 2. Resina fenólica



Tabla 1. Propiedades físicas de la resina fenólica en estado sólido.

Característica	Valor
Apariencia	Polvo fino
Punto de fusión (°C, capilar)	82-93
Humedad (% peso, Karl Fisher)	1,5 máximo
Tiempo de curado (seg, 160° C, Hot place)	40-50
Flujo (mm 125°C, Plato inclinado)	25-35
% agente de curado (HMTA)	80-90

Fuente: Ficha técnica departamento técnico INTERQUIM S.A¹[8]

¹ FICHA TECNICA DEL POLIMERO 6600MC. Departamento técnico INTERQUIM

2.1.2 Caucho SBR.

Se empleó un caucho SBR (estireno-butadieno) pulverizado (Figura 3) que no presentaba uniformidad en los tamaños de partícula por lo que se realizó la caracterización de un kilogramo de material por medio de tamizaje. Para tal fin se emplearon los tamices de malla número: 10, 20, 30, 40 y 60, y la tamizadora marca PINZUAR modelo PS-35 serie 1185 (Figura 4) ubicada en el laboratorio de soldadura del bloque 8 de la Universidad Pontificia Bolivariana. En la tabla 2 se presenta la ficha técnica del caucho SBR.

Figura 3. Caucho SBR pulverizado



Tabla 2. Propiedades caucho SBR

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Peso Específico	1.6 ±0.05	gr/cm ³
Dureza	70±5	Shore A
Carga de rotura	≥ 3	Mpa
Alargamiento a la rotura	≥ 250	%
Resistencia al desgarro	2	N/mm
Temperatura mínima de servicio	-25	°C
Temperatura máxima de servicio	70	°C
Envejecimiento por aire caliente	72 x 70	h x °C
Resistencia al Ozono		Moderada
Resistencia ácidos y álcalis diluidos		Moderada
Resistencia ácidos y álcalis concentrados		No recomendada
Resistencia a productos químicos orgánicos		Buena
Resistencia a disolventes orgánicos		No recomendada

Fuente: Información proporcionada por la empresa Empaquetaduras y Empaques S.A²

² Ficha técnica proporcionada por proveedor a la empresa Empaquetaduras y Empaques S.A

Figura 4. Tamizadora PINZUAR modelo PS-35 serie 1185



2.1.3 Agente desmoldante (POLIMUL).

Para evitar que los discos de material compuesto elaborados se adhieran al molde se utilizó como agente de desmolde cera polimérica (POLIMUL), ésta contiene un solvente que al elevar la temperatura se evapora y genera una capa delgada que evita la adhesión. Su presentación es en emulsión y se obtuvo de manera comercial, es fabricada por la empresa COLRESIN S.A. En la tabla 3 se presenta su ficha técnica [8].

Tabla 3. Propiedades físico-químicas del agente de desmolde POLIMUL.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA
Apariencia	Líquido opaco
Color	Blanco
Olor	Característico
Solubilidad en agua	Misible
Inflamabilidad	No presenta
Punto de ebullición	100 °C a 1atm
Densidad	1.02 +/- 0.01 g/ml
pH al 100%	9
pH al 10%	8-9

Fuente: Ficha técnica POLIMUL. COLRESIN S.A³

2.2 MÉTODO DE ELABORACIÓN.

A continuación se muestra el proceso de elaboración aplicado durante la fabricación de las probetas usadas en los ensayos que se llevaron a cabo en el desarrollo del proyecto de investigación.

Inicialmente se tiene un molde hecho en acero 1020 de 50 mm de diámetro y que tiene un espesor interior de 3,5 mm. A partir de este molde se obtiene un disco de volumen 6,872 cm³ (Figura 5). Para la elaboración de los discos se

³ Ficha técnica POLIMUL. COLRESIN S.A

usaron las materias primas mencionadas anteriormente, con el caucho ya clasificado por tamices.

Para la elaboración de las probetas para los ensayos de flexión a tres puntos, se utilizó un molde hecho en acero 1020 de 140 mm de diámetro y 3,7 mm de espesor en su interior.

A partir de este molde se obtuvo un disco de volumen $56,957 \text{ cm}^3$ (Figura 6).

Figura 5. Molde usado para la fabricación de las probetas



Figura 6. Molde usado para sacar probetas para ensayo de flexión.



Basados en la ley de mezclas y sabiendo que el volumen del molde es constante se obtuvieron los volúmenes parciales correspondientes a cada componente como se muestra en las tablas 4 y 5, esto con ayuda de una herramienta de cálculo realizada en Excel.

$$V_{COMPUESTO} = x * V_{REFUERZO} + (1 - x) * V_{MATRIZ}$$

$$V_{COMPUESTO} * x = V_{MATRIZ}$$

$$V_{COMPUESTO} * (1 - x) = V_{REFUERZO}$$

Dónde:

$V_{COMPUESTO}$: Volumen total del molde [cm³].

x : Fracción porcentual volumétrica del componente [%].

$V_{REFUERZO}$: Volumen del caucho SBR [cm³].

V_{MATRIZ} : Volumen de la resina fenólica novolaca [cm³] [9].

Conociendo la densidad de cada componente a partir de las fichas técnicas así:
para la resina: 1,35 g/cm³, para el SBR: 0,94 g/cm³, se obtuvieron entonces las masas correspondientes para cada concentración de la siguiente manera:

Tabla 4. Composición en volumen y masa del material compuesto a diferentes proporciones para las probetas del molde pequeño.

RESINA FENÓLICA + CAUCHO SBR							
%	%	Vol.	Vol. Caucho	Vol. Total	Peso	Peso	
Resina	Caucho	Resina	SBR	[cm³]	[cm³]	Resina	caucho
		[cm³]				[gr]	SBR [gr]
90	10	6,185	0,687	6,872	8,350	0,646	
80	20	5,498	1,374	6,872	7,422	1,292	
70	30	4,811	2,062	6,872	6,494	1,938	
60	40	4,123	2,749	6,872	5,567	2,584	
50	50	3,436	3,436	6,872	4,639	3,230	

Tabla 5. Composición en volumen y masa del material compuesto a diferentes proporciones para las probetas del molde grande.

RESINA FENÓLICA + CAUCHO SBR							
%	%	Vol. Resina	Vol. Caucho	Vol.	Peso	Peso	
Resina	Caucho	[cm³]	SBR	[cm³]	Total	Resina	caucho
					[cm³]	[gr]	SBR [gr]
90	10	51,261	5,696	56,957	69,203	5,354	
80	20	45,566	11,391	56,957	61,514	10,708	
70	30	39,870	17,087	56,957	53,824	16,062	
60	40	34,174	22,783	56,957	46,135	21,416	
50	50	28,479	28,479	56,957	38,446	26,770	
100	0	56,957	0	56,957	76,892	0	

Luego de obtener el valor de la masa de cada componente se procedió al pesaje de resina y caucho para la elaboración de las probetas en las distintas composiciones, en una balanza densimétrica marca SCHIMADZU con capacidad máxima de 200 g y apreciación 0.0001g, ubicada en el laboratorio de materiales del bloque 8, Universidad Pontificia Bolivariana (Figura 7).

Figura 7. Balanza densimétrica



Luego de obtener los pesos deseados de cada material se vierten ambos materiales en un recipiente de vidrio (Figura 8) para realizar el mezclado de manera manual con movimientos traslacionales y circulares durante aproximadamente 10 minutos. A medida que se realiza el proceso debe observarse el estado de la mezcla, asegurándose de obtener un aspecto homogéneo.

Figura 8. Recipiente de vidrio



Cuando se tiene la mezcla completamente homogénea se procede a verterla en el molde, sin olvidar antes la aplicación del desmoldante en él, para evitar que se adhiera el material durante el proceso de curado a las paredes del molde.

La técnica que se utilizó para el curado de la matriz fue la compresión en caliente que es un proceso de transformación de polímeros, el molde se ubica en una prensa cuyos platos superior e inferior han sido precalentados y se aplica una presión por medio de un pistón hidráulico para forzar al material a entrar en contacto con todas las áreas del molde, mientras que la presión y la temperatura se mantienen hasta que el material cure [18].

Luego de tener la mezcla en el molde se procede a la compresión en caliente, introduciendo el molde en el interior de los platos de la prensa (Figura 9) precalentada a una temperatura superior a 180 °C, esto debido a que cuando se cierra la prensa la temperatura de los platos baja súbitamente y lo que se quiere es que el molde alcance rápidamente una temperatura superior a 160 °C que es la temperatura sugerida de curado de la resina fenólica, y se aplica una presión superior a 200 PSI durante 15 minutos. La presión y el tiempo de curado también fueron datos tomados de un trabajo de grado anterior [9].

Figura 9. Prensa



Finalmente después del proceso de compresión en caliente se obtiene la probeta final (Figura 10) del material compuesto, variando el tamaño de partícula con la proporción 70/30 resina/SBR, y variando las composiciones resina/SBR con tamiz #60 a 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50%.

Figura 10. Probeta final



Después de este proceso se observaron varias situaciones en las composiciones como: la probeta final de composición 90-10 presentó una tonalidad más amarilla que el resto de probetas, generalmente la probeta quedaba con mejor acabado y pocas burbujas por la parte de inferior del molde, la parte superior de la probeta quedaba con algunas burbujas.

Finalmente la probeta con mejores acabados, y que no presentaban fases en la parte interna es la probeta de composición 70/30 siendo ésta la elegida para variar los tamices.

Durante la fabricación de estas probetas se observaron características a nivel macroscópico que presentaron las probetas después de fabricadas, a continuación se mencionan algunas de ellas:

- Las probetas de diferentes porcentajes de refuerzo con el tamaño de partícula más fino (malla #60), presentan mejor acabado superficial en la cara inferior y las siguientes características para las diferentes composiciones:

Nota: Se considera como parte superior la cara que quedaba en la parte de arriba del molde y como parte inferior la cara que quedaba debajo del molde.

- Composición 90-10: Presentan un color marrón no homogéneo, presentaron bordes quemados y parches oscuros en la superficie. En el interior presenta una diferencia de fase denotada por un color amarillo pálido en la parte superior, a pesar de que se siguió la indicación de la temperatura y el tiempo de curado. No presentó porosidad.
- Composición 80-20: En esta muestra se aumentó la temperatura hasta alcanzar un promedio de 170°C; presentó un tono marrón más oscuro que la anterior (90-10), también presentó bordes quemados. En el interior se evidencia la existencia de diferentes fases siendo una de tonalidad más clara. También se observó la aparición de algunos poros pero en cantidad mínima.
- Composición 70-30: Esta muestra presenta la mejor apariencia de homogeneidad en su color superficial. Presenta poca porosidad en el interior y en los bordes tiene una apariencia de quemado sobre todo en la parte superior, esto es debido a que el control de la temperatura de los platos superior e inferior se controla por separado y durante este proceso se pudo observar que el plato superior alcanzaba temperaturas más altas más rápido que el plato inferior.
- Composición 60-40: En la superficie superior se observó una mancha grande y oscura además de una gran porosidad, en la

parte inferior también presentó porosidad y un color oscuro en las zonas cercanas a los bordes, así mismo los bordes fueron de color oscuro. En el interior presenta gran porosidad en cantidad y tamaño, presentó un color homogéneo.

- Composición 50-50: En la superficie inferior presentó un color homogéneo, y manchas pequeñas de color oscuro, y muy poca porosidad, en la cara superior presentó alta porosidad pero de tamaño pequeño y un tono marrón, en los bordes se observó una alta porosidad de distintos tamaños. En el interior presentó un color marrón uniforme con un tono más oscuro en la parte inferior, tiene alta porosidad con concentración en la parte superior.

Con la realización de estas muestras a distintas composiciones se obtuvo que la composición adecuada para fabricar los compuestos variando el tamaño de partícula fuera la composición 70-30, debido a las características que pudieron apreciarse de manera visual. Se notó que ésta obtuvo una mejor apariencia en cuanto a homogeneidad en la mezcla y presentó poca porosidad tanto en el interior como en la parte externa de la muestra.

2.2.1 Corte de probetas

Terminada la elaboración de los discos de material compuesto se procedió a cortarlos, algunos en placas rectangulares para las pruebas de flexión a tres puntos y otros en cuadrados de diferentes tamaños; de

éstos últimos algunos para las pruebas de densidad, dureza y absorción de humedad y otros para la fabricación de los pines para los ensayos tribológicos.

Para el cortado de los compuestos se utilizó una cortadora de disco de diamante marca Power Tools modelo CA 180 como se muestra en la siguiente figura:

Figura 11. Cortadora.

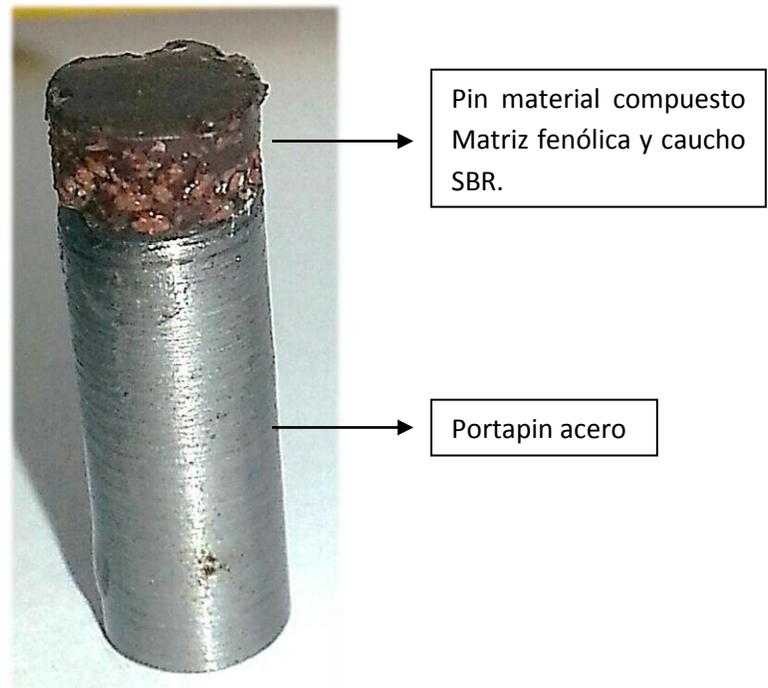


2.2.2 Fabricación de los pines para la caracterización tribológica

Para realizar las pruebas en el tribómetro, fue necesario maquinar por torneado inicialmente unos portapines metálicos, hechos en acero 1020 con una longitud de 17 mm y un diámetro de 6,4 mm, éstos tienen como finalidad permitir la sujeción del pin de material compuesto al brazo del

tribómetro. Los discos de material compuesto fueron cortados en cuadrados de 1cm de lado aproximadamente para ser pegados a los portapines con un adhesivo industrial de secado rápido (TEK BOND 721). Seguidamente, se procedió a maquinarse los pines de material compuesto para que tuvieran un diámetro igual al del portapin como se muestra en la Figura 12.

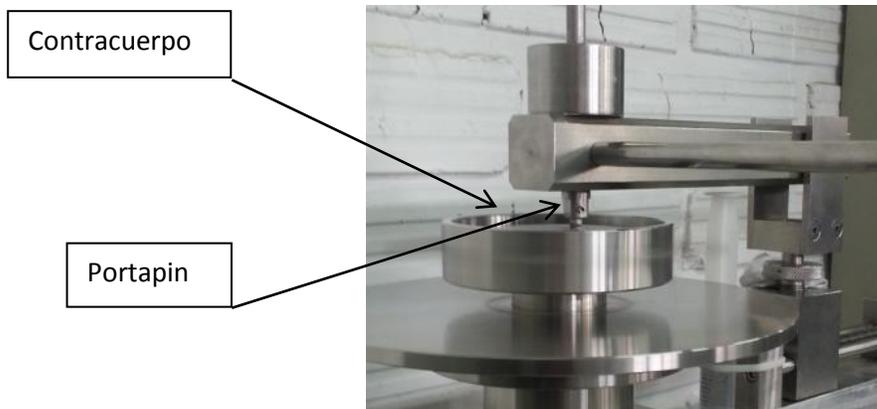
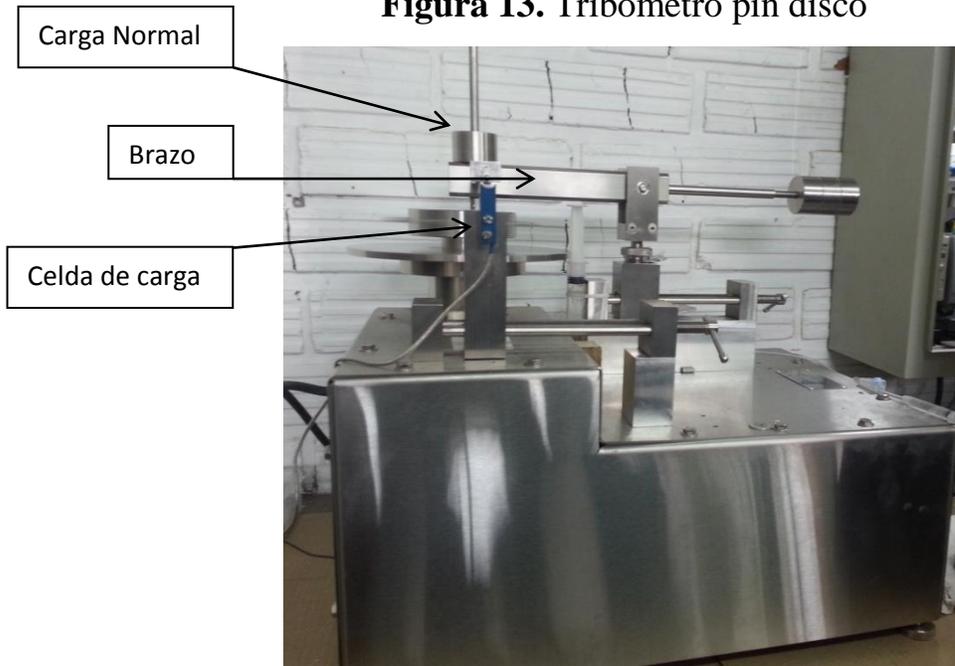
Figura 12. Pin utilizado para los ensayos en el tribómetro.



2.2.3 Ensayo pin disco

El ensayo de pin disco (Figura 13) consta de dos elementos principales, el pin y el disco. Es considerado un ensayo versátil de tribología ya que permite el estudio de variables de un tribosistema tales como: velocidad de deslizamiento, fuerza normal, material del cuerpo, material del contracuerpo, esfuerzos de contacto, entre otros. El ensayo consiste en hacer girar el disco a una velocidad predeterminada y durante un período de tiempo establecido. Un pin sujetado al brazo del tribómetro se pone en contacto con el disco a una distancia respecto al centro del disco establecida con anterioridad. Las fuerzas tangenciales generadas por cuenta de la fuerza de fricción son medidas por medio de una celda de carga, la cual envía la señal a un programa de computador capaz de almacenar los valores de las cargas para cada instante de tiempo (0,1 segundos) [9].

Figura 13. Tribómetro pin disco



En la figura 13 se muestra el tribómetro propiedad de la Universidad Pontificia Bolivariana que se encuentra en el bloque 8, en el que se realizaron los ensayos. El sistema estuvo sometido a una fuerza normal de 10,791 N (1,1 kg), se usó como contracuerpo un disco de acero 1020

al cual se le realizó un rectificado para obtener un acabado superficial N4 ($Ra=0,2 \mu\text{m}$) y con un variador de velocidad se controló la velocidad angular para mantener una velocidad lineal de 1,885 m/s. Cada ensayo tuvo una duración de 10 minutos, con lo cual se recorrió una distancia de 1130,9 m.

CAPÍTULO 3

3. PRUEBAS DE LABORATORIO Y RESULTADOS.

En este capítulo se describen los procedimientos realizados y los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos de este trabajo. Se realizaron pruebas para determinar propiedades físicas como la densidad y la absorción de humedad, otras pruebas para determinar propiedades mecánicas como flexión a 3 puntos y dureza, y finalmente, se realizaron pruebas para determinar el comportamiento tribológico de los materiales compuestos.

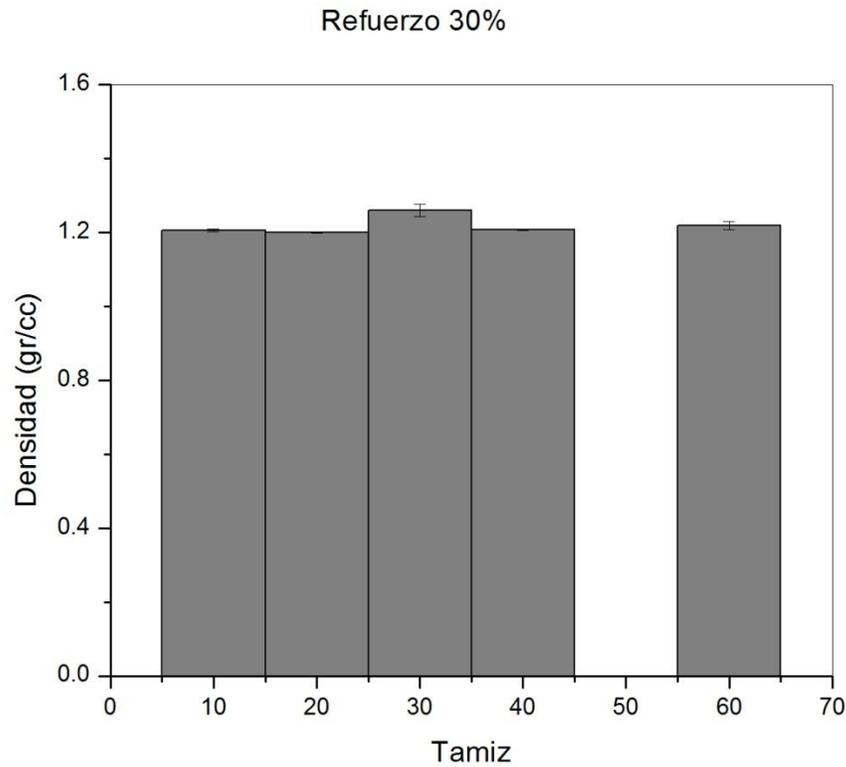
3.1 Densidad

Este ensayo fue realizado en una balanza densimétrica (Figura 7) con etanol al 96% que posee una densidad conocida de $0,79 \text{ gr/cm}^3$, para las probetas con refuerzo del 30% de SBR variando el número de tamiz y para las probetas de número de tamiz 60 variando el porcentaje de refuerzo. Se obtuvieron los siguientes resultados:

La figura 14 ilustra los resultados obtenidos para la densidad del material compuesto con un refuerzo del 30% variando el tamaño de partícula. Muestra que los valores no tienen variaciones muy significativas, encontrándose alrededor de 1.2 gr/cm^3 , siendo el valor menor de 1.2005 gr/cm^3 y el valor mayor 1.2599 gr/cm^3 , para los

tamices 20 y 30 respectivamente, presentando una diferencia entre ellos de 4.7146%.

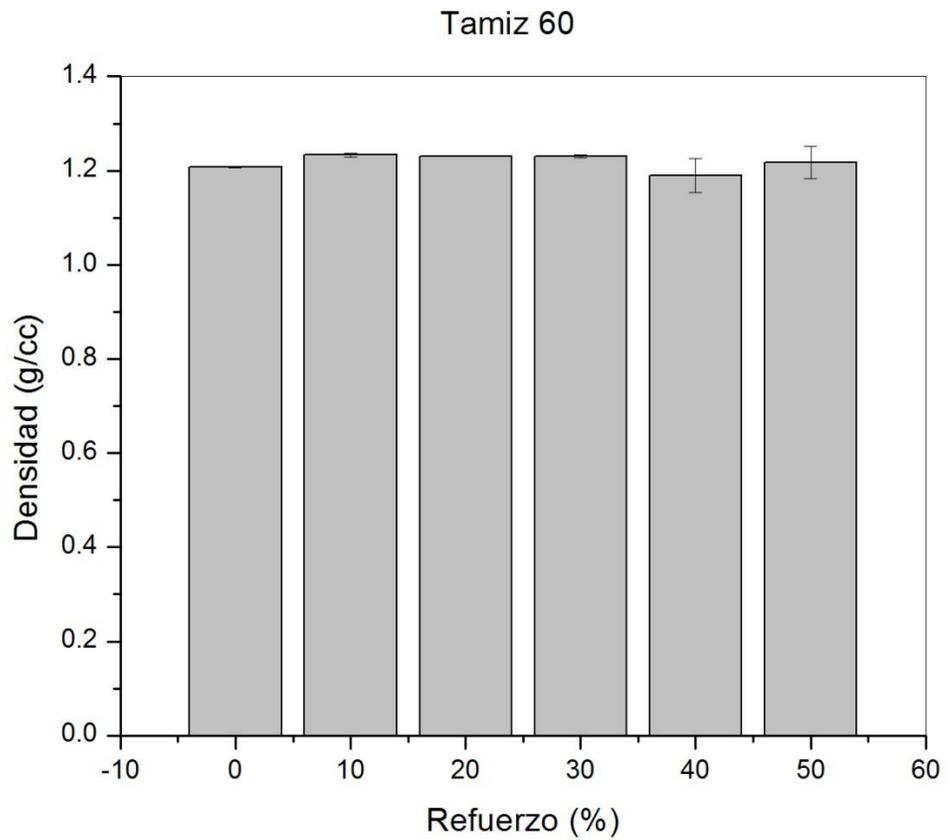
Figura 14. Densidad vs # Tamiz (tamaño de partícula) con 30% de refuerzo



La figura 15 ilustra los resultados obtenidos para los materiales compuestos variando el porcentaje de refuerzo de caucho SBR con el tamaño de partícula definido por el tamiz #60. Se observaron valores similares entre ellos con desviaciones estándar bajas, siendo el valor $1,1895 \text{ gr/cm}^3$ para el porcentaje de refuerzo del 40% y $1,2329 \text{ gr/cm}^3$

para el porcentaje de refuerzo del 10%, lo que representa una diferencia entre ellos de 3.520%.

Figura 15. Densidad vs % de refuerzo con tamaño de partícula definido por el tamiz #60



3.2 Absorción de humedad

Este ensayo se determinó basado en la norma ASTM D570: *Water Absorption of Plastics*, dicho método cubre la determinación de la razón relativa de absorción de humedad para plásticos cuando se sumergen en agua. Estas probetas fueron secadas en un horno de convección forzada por 24 horas a una temperatura de 105°C y pesadas, posteriormente sumergidas en agua por 24 horas y luego pesadas para calcular el porcentaje de absorción de humedad obtenido [19]. Para este cálculo se utilizó la ecuación siguiente:

$$\% \text{ Humedad absorbida} = \frac{W_{\text{húmedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} * 100\%$$

W húmedo: masa probeta después de permanecer 24 horas sumergida en agua. [gr]

W seco: masa probeta después de permanecer en el horno de convección forzada durante 24 horas. [gr]

Se obtuvieron los siguientes resultados:

En la figura 16 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de absorción de humedad para los materiales compuestos con 30% de refuerzo de SBR, variando el tamaño de partícula. Para este porcentaje de refuerzo se halló una baja absorción de humedad, inferior a 1% en todos los casos; siendo el compuesto con mayor tamaño de partícula el que mayor porcentaje de humedad presentó (0,8567%).

Figura 16. Absorción de humedad vs Refuerzo de 30% de SBR variando tamiz.

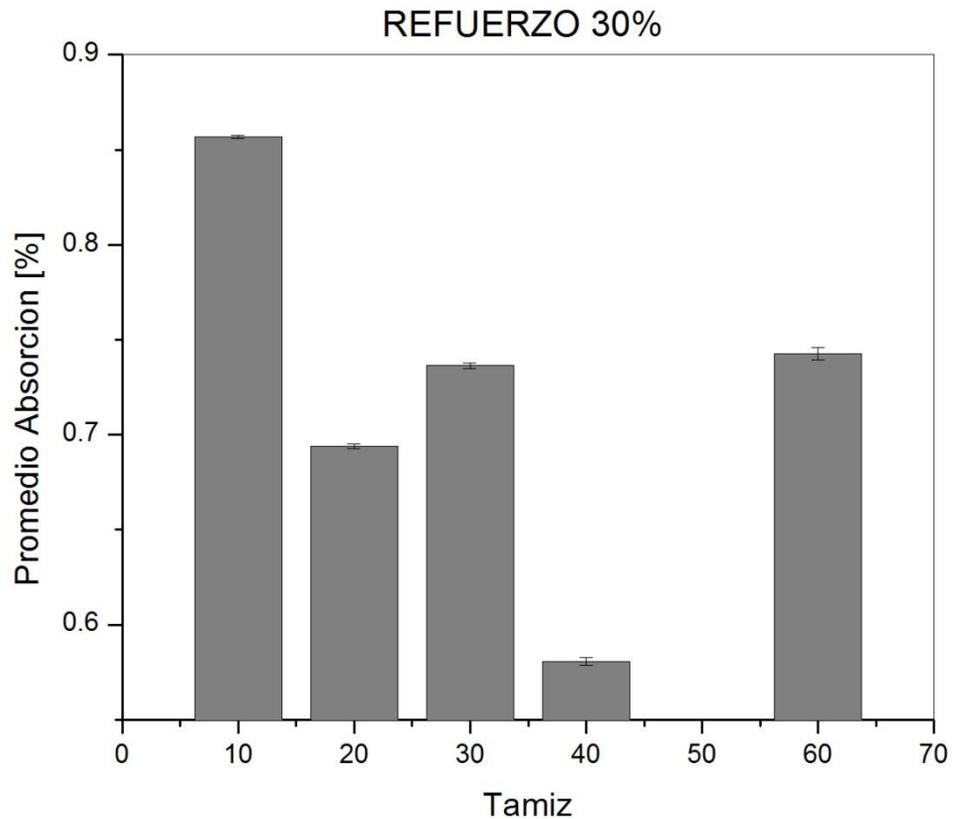
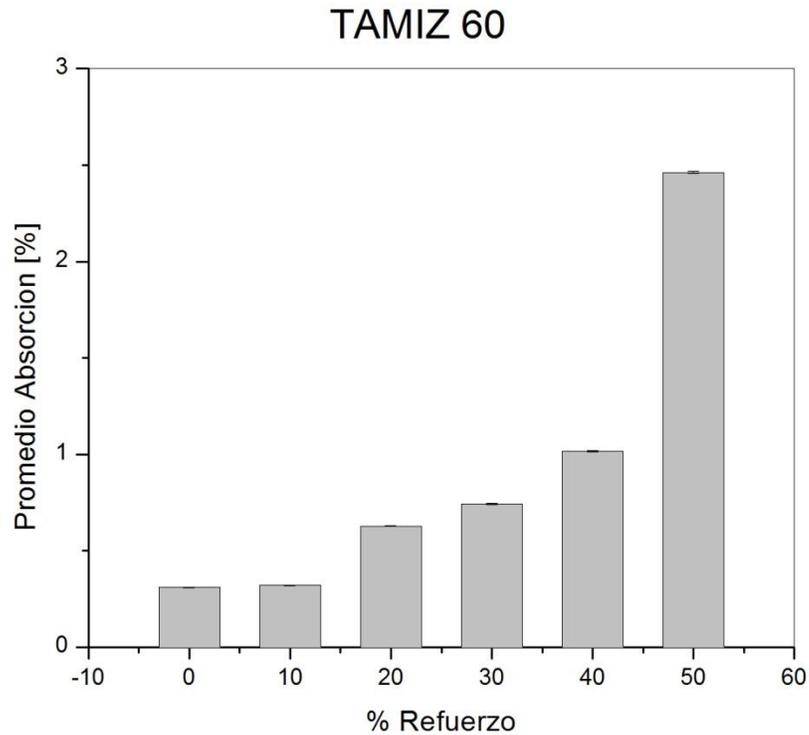


Figura 17. Resultados de absorción de humedad para tamiz #60 variando porcentaje de refuerzo.



En la figura 17 se puede observar que el compuesto presenta una tendencia a aumentar el porcentaje de absorción de humedad a medida que se aumenta el porcentaje de refuerzo. Esto puede deberse a que el caucho de SBR impide un adecuado curado de la resina en el interior, lo que genera una alta porosidad que deja espacios donde se puede alojar la humedad. Basados en un experimento previo, que se realizó en la tesis “Desarrollo de materiales compuestos de matriz fenólica reforzados con fibras carbonosas de origen vegetal” [20], donde se evaluó el porcentaje de absorción de humedad variando la temperatura

de curado de la resina fenólica, se determinó que para una temperatura de curado mayor a 165°C el porcentaje de absorción aumenta, dado lo anterior y sabiendo que se usó como temperatura de curado para este trabajo un valor superior a 165°C, se entiende que el material absorba humedad.

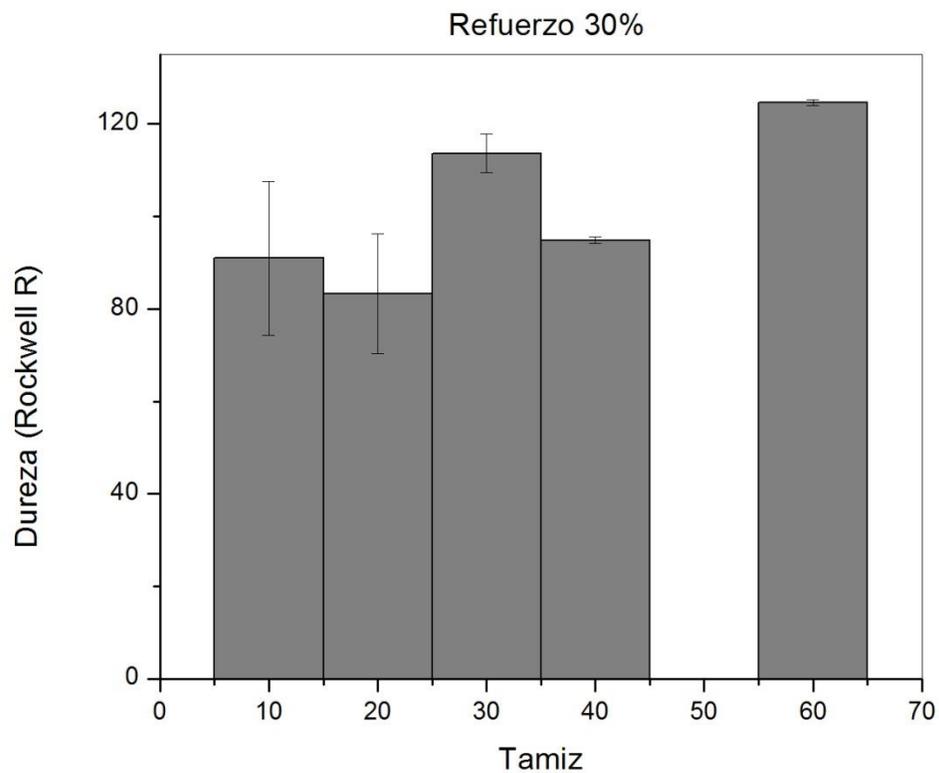
3.3 Dureza

La definición en física de dureza dice que es la resistencia que un cuerpo opone a ser dividido por un elemento cortante o a ser desgastado o rayado por otro cuerpo. De esta manera, se dice que un cuerpo es más duro que otro cuando puede rayarle y/o desgastarle; este fenómeno depende de la cohesión entre sus partículas [21].

En el caso de los plásticos y los elastómeros se usan diferentes tipos de escalas como por ejemplo la dureza Barcol, que cumple con normativa ASTM B648-2000 y ASTM D2583; la dureza Rockwell escalas: L, M, R; y la más usada que es la escala de dureza Shore A para los elastómeros y Shore D para los termoplásticos y termorrígidos, éstas basadas en las normas DIN 53505 y DIN 7868. Para este caso se tomaron las medidas en escala Rockwell R [22] con un carga de 588,4 N durante 1 segundo. Obteniendo resultados directamente del equipo y realizando 3 ensayos por probeta obtenida. A continuación se muestran los resultados:

En la figura 18 se observa que la probeta con mayor dureza es la probeta de 30% de refuerzo con tamiz número 60, y la de menor dureza la probeta de tamiz número 20, este resultado no presenta una tendencia específica, y sus valores se encuentran un poco alejados entre sí, presentando desviaciones estándar hasta de 16,6286.

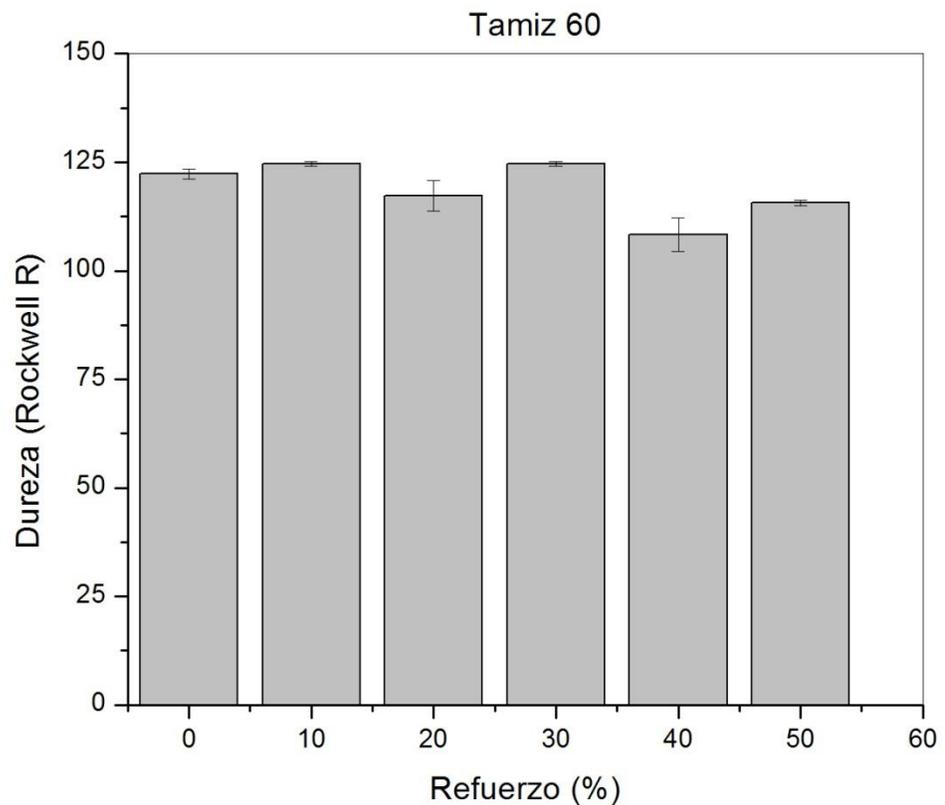
Figura 18. Resultados de dureza Rockwell R para refuerzo de 30% de SBR variando el tamaño de partícula (# tamiz).



En la figura 19 se muestran los resultados de dureza Rockwell R para la variación de porcentaje de refuerzo con un tamaño de partícula

definido. La probeta que presentó mayor dureza fue la de refuerzo 10% y la de menor fue la probeta de refuerzo 40%, en general los valores oscilan entre 108,33 y 124,67 Rockwell R, frente a estos resultados no puede llegarse a una conclusión que indique alguna tendencia específica, aunque todos los resultados presentan un valor mayor a 100. Estos resultados pueden observarse en la figura siguiente.

Figura 19. Resultados de dureza para tamiz #60 variando porcentaje de refuerzo.



3.4 Flexión a tres puntos

Las propiedades de flexión en los plásticos se deben determinar para establecer qué aplicaciones son adecuadas para su uso. En la norma ASTM D790 se describe el procedimiento para medir dicha propiedad.

El alcance de dicha norma dice que estos métodos de ensayo cubren la determinación de las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o cortes de hojas, platos o formas moldeadas. Estos métodos son aplicables a materiales rígidos y semirrígidos. Sin embargo, la resistencia a flexión no puede ser determinada para materiales que no fallen en la superficie exterior de la muestra dentro del límite de deformación del 5.0% de este método [23].

Se llevó a cabo el procedimiento A, que está diseñado principalmente para materiales que se rompen a flexiones comparativamente pequeñas. El procedimiento que se realiza es poner la barra sobre dos soportes, ésta es cargada por un elemento que está ubicado en mitad de camino de los soportes. Esto fue realizado en la máquina electromecánica universal de ensayos mecánicos Instron Ref: 5582 con capacidad máxima 10 Tonf equivalente a 100.000 N que está ubicada en el bloque 8 de laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana (figura 20). Se usó la relación 16 a 1 para el cálculo de la distancia mínima entre los apoyos

(span), que depende del espesor de la probeta, la velocidad del ensayo fue 1.58 mm/min, hallada mediante la siguiente ecuación:

$$Velocidad = \frac{z * l^2}{6 * d}$$

Z= 0,01 mm/min. Parámetro definido por la norma.

L= 59,52 mm. Distancia entre apoyos

D= 3,7 mm. Espesor de la probeta

Figura 20. Máquina universal de ensayos mecánicos.



A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Figura 21. A. Carga (N) vs. #Tamiz (superior); **B.** Carga (N) vs. %Refuerzo (inferior).

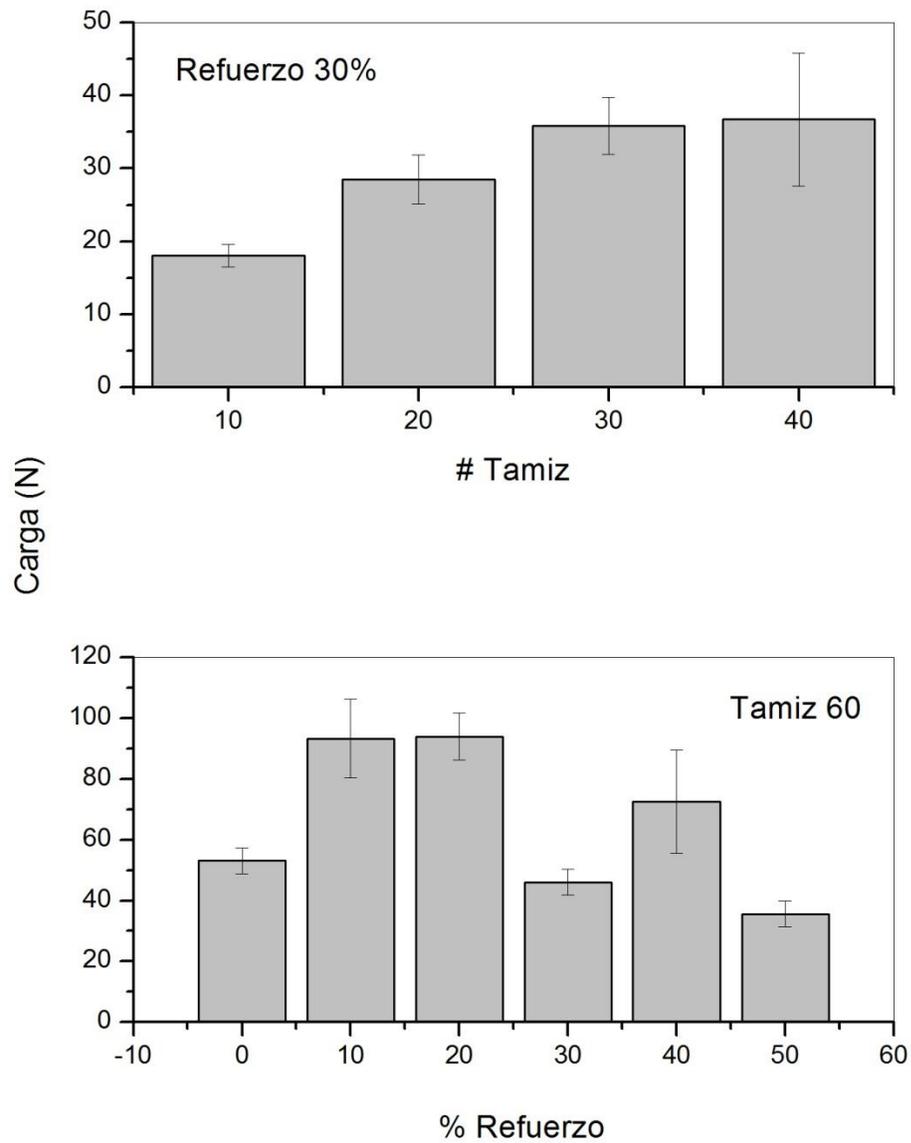


Figura 22. Esfuerzo de flexión para probetas 30% de refuerzo variando el tamaño de partícula (# de tamiz).

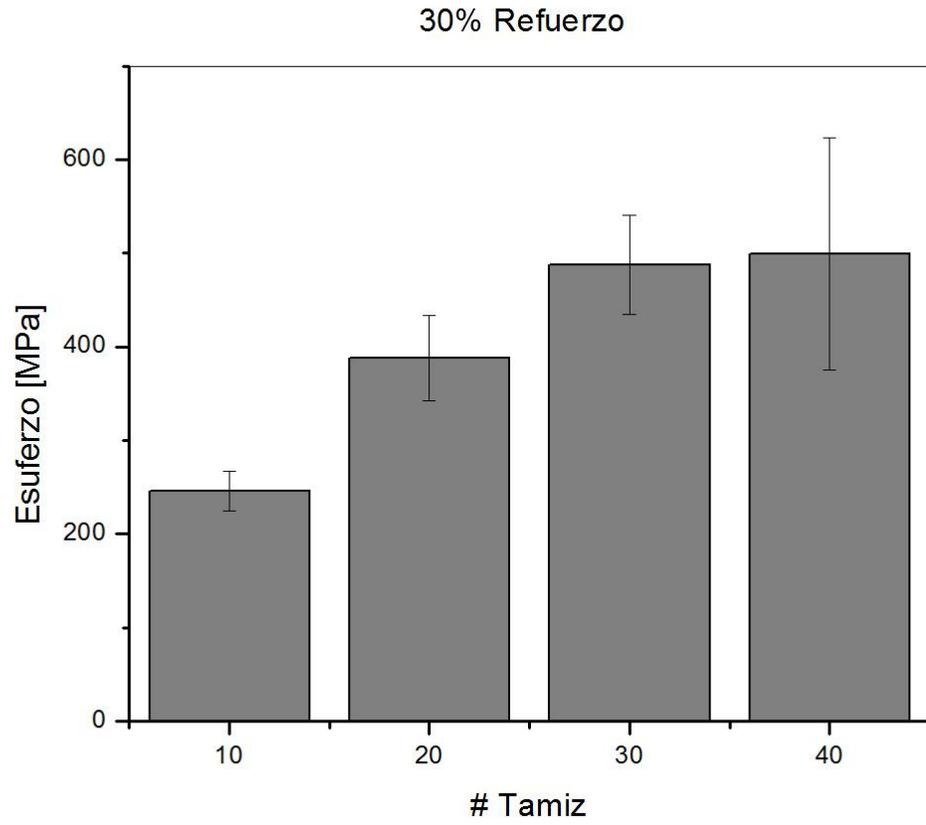
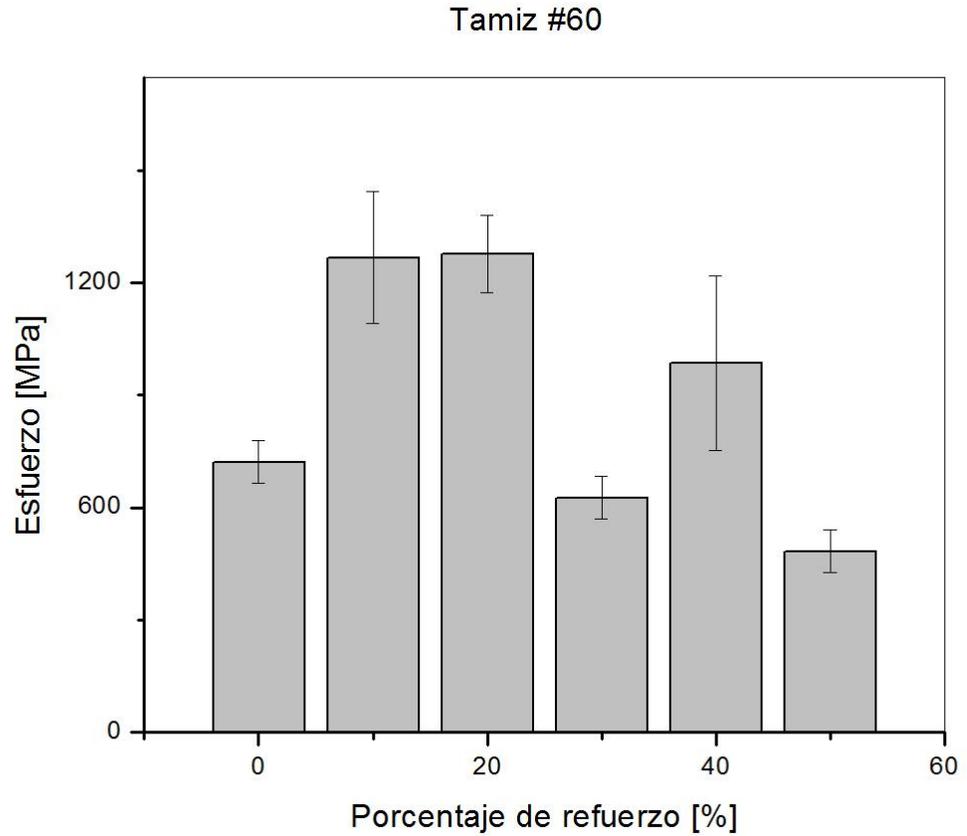


Figura 23. Esfuerzo de flexión para probetas con tamaño de partícula definido variando % de refuerzo.



Con los resultados obtenidos en los ensayos se puede observar que el caucho aumenta la capacidad del material de soportar cargas a flexión solo en porcentajes bajos de refuerzo, esto se observa en la figura 21.B y la figura 23 donde se aprecia que los valores de cargas más altos se obtuvieron para los porcentajes de refuerzo 20 y 10% respectivamente. Sin embargo, la desviación de esos resultados es alta, lo que no permite

concluir que efectivamente el caucho logra mejorar propiedades mecánicas del compuesto.

Para el caso de la variación del tamaño de partícula, es decir, de los números de tamices (figura 22), los valores de carga tienen una tendencia ascendente a medida que disminuye el tamaño de partícula. Sin embargo, son valores bajos en comparación con los obtenidos con otros porcentajes de refuerzo. Por lo tanto sería interesante en un trabajo futuro estudiar el comportamiento a flexión de un compuesto con otro porcentaje de refuerzo variando el tamaño de partícula.

3.5 Ensayos tribológicos:

Para este ensayo el sistema estuvo sometido a una fuerza normal de 10,791 N (1,1 kg), se usó como contracuerpo un disco de acero 1020 al cual se le realizó un rectificado para obtener un acabado superficial N4 ($R_a=0,2 \mu\text{m}$) y con un variador de velocidad se controló la velocidad angular para mantener una velocidad lineal de 1,885 m/s. Cada ensayo tuvo una duración de 10 minutos, con lo cual se recorrió una distancia de 1130,9 m, con un radio entre el pin y el centro del contracuerpo de 25 mm, significando una frecuencia en el variador de velocidad de 12 Hz. Este ensayo fue realizado bajo la Norma ASTM G99-05 - Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus [24].

Figura 24. Resultados coeficiente de fricción para pines con tamaño de partícula definido por el tamiz #60 variando porcentaje de refuerzo.

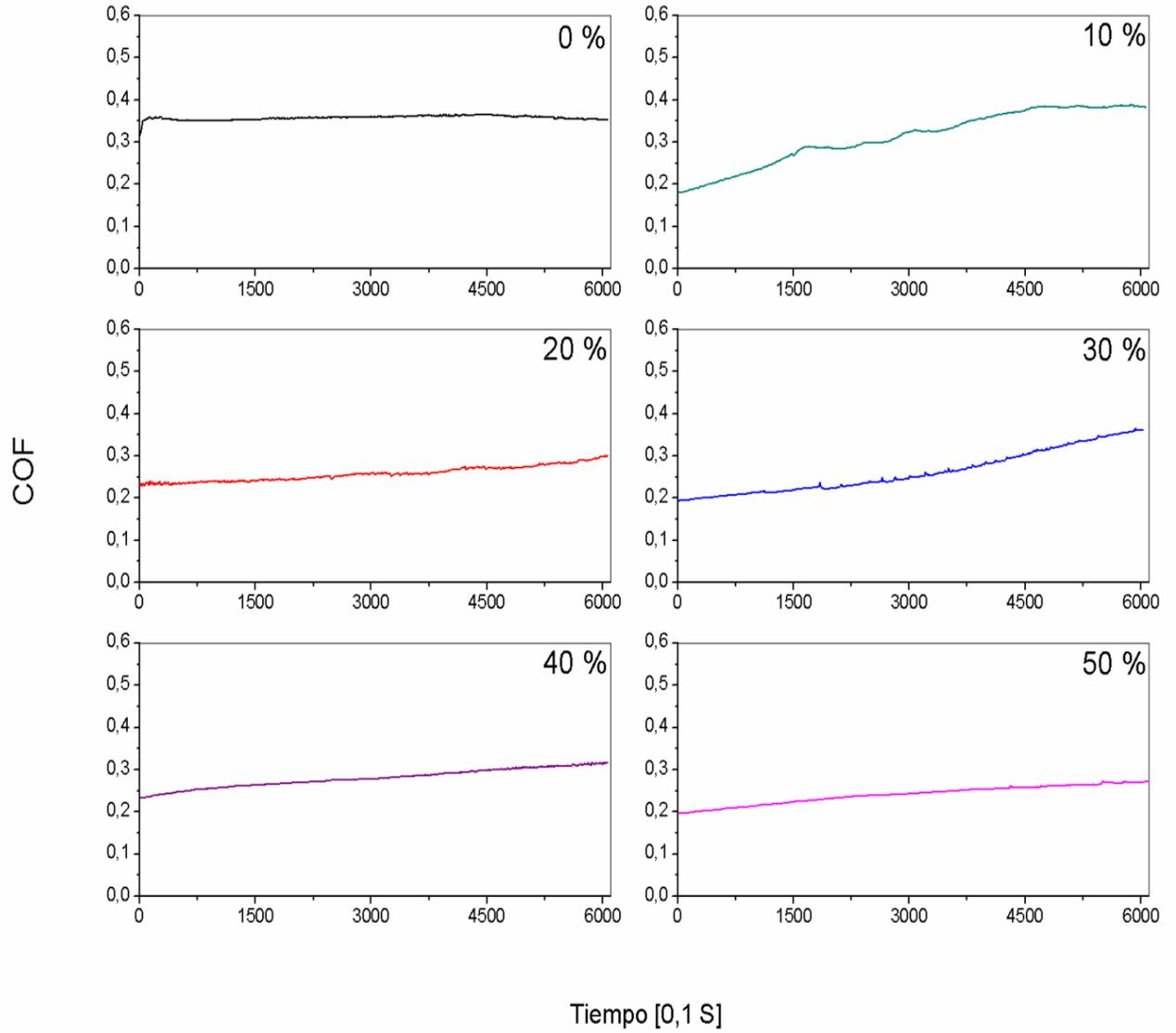
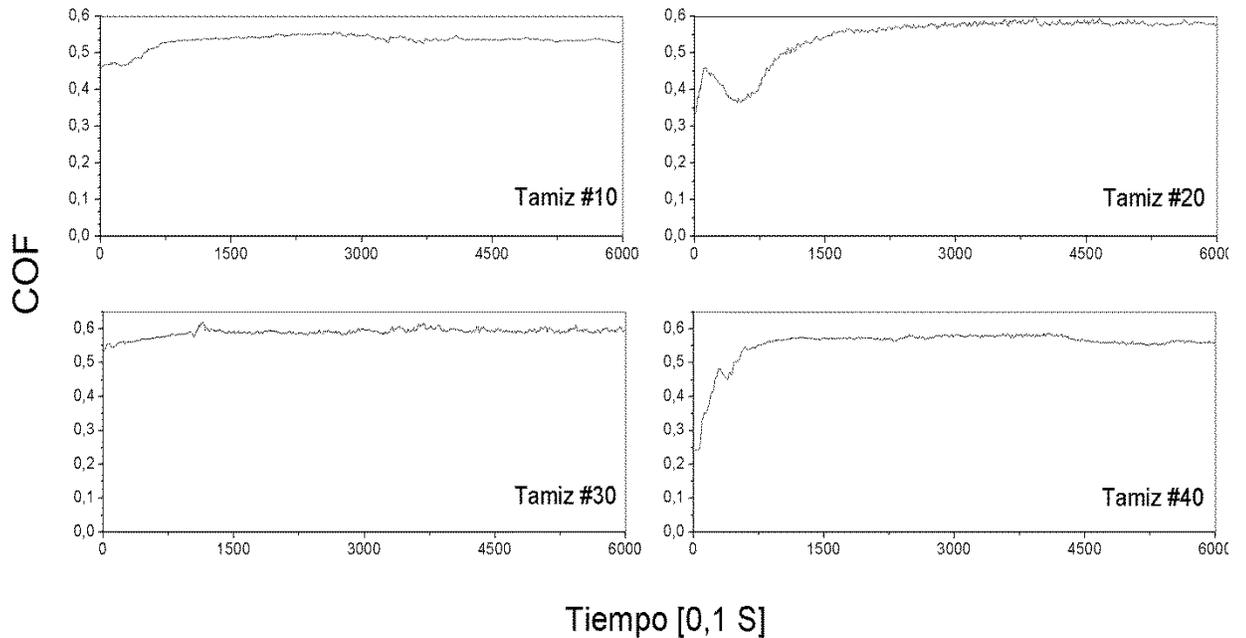


Figura 25. Resultados coeficiente de fricción para pines con 30% de refuerzo variando el tamaño de partícula (# de tamiz).



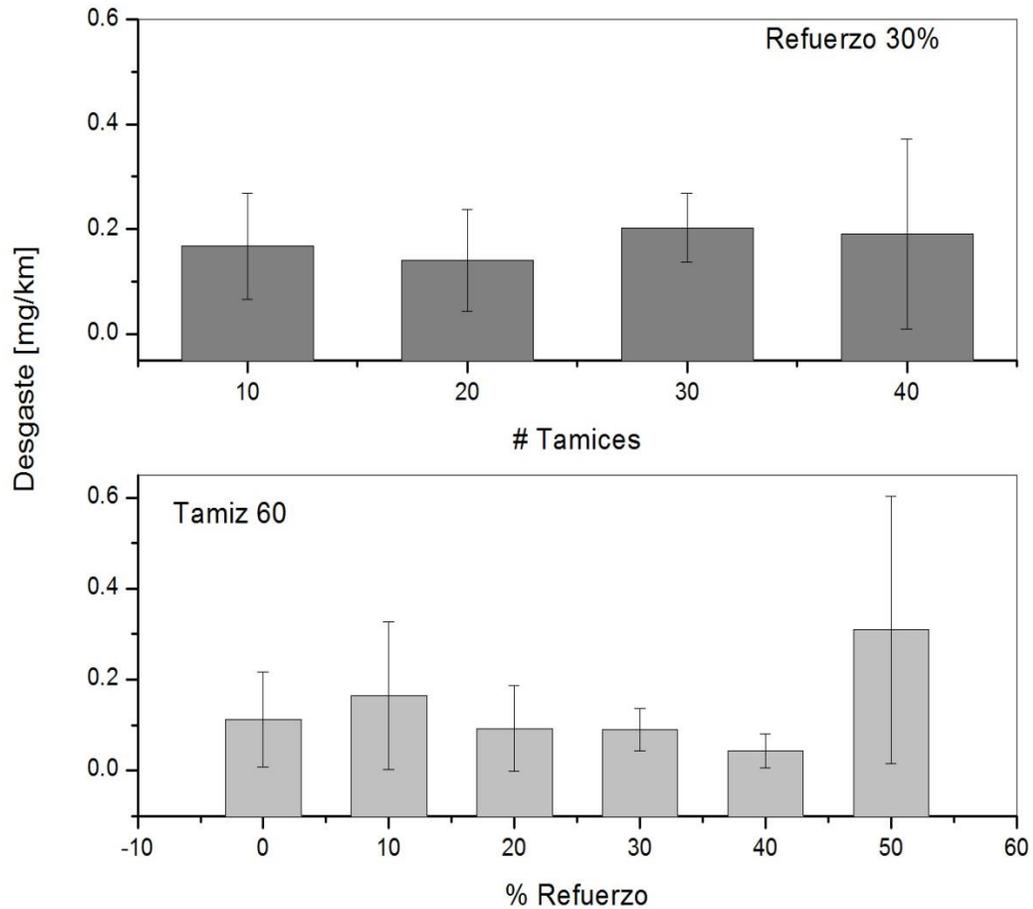
En la figura 24 se puede observar que el COF presenta una tendencia ascendente para todos los compuestos, es decir, los materiales que tienen algún porcentaje de caucho como reforzante. Aunque todos comienzan con valores bajos de COF (0,2) la mayoría logran llegar a valores superiores a 0,3 antes de un kilómetro de recorrido, incluso, para el compuesto de 30% de refuerzo se aprecia una tendencia más pronunciada a subir luego de un recorrido aproximado de 900m.

Otras observaciones con respecto a los resultados es que la variación en el COF no es significativa con respecto al aumento de porcentaje de refuerzo del

compuesto. En la figura 25 se observa que el comportamiento del COF para los compuestos de 30% de refuerzo con variación del tamaño de partícula es más alto y más estable en el tiempo, a pesar de que presenta mucho más ruido la medición. Esto puede deberse a un fenómeno conocido como stick-slip, en el cual se presenta una adhesión del caucho al contracuerpo que produce un incremento súbito de la fuerza de fricción que dura muy poco tiempo y termina cuando se da el deslizamiento.

Otro factor a tener en consideración es que el tamaño de partícula del caucho al ser mayor, puede generar amortiguamiento en el contacto, lo que generaría vibraciones.

Figura 26. Resultados de desgaste: **A.** pines con 30% de refuerzo, variando el tamaño de partícula (# de tamiz) (Superior). **B.** pines de tamaño de partícula definido por el tamiz #60, variando porcentaje de refuerzo (Inferior).

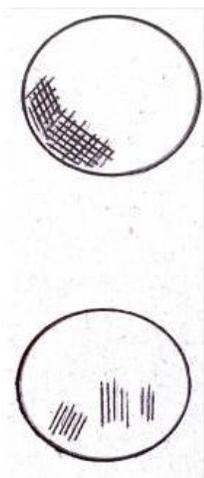


En la figura 26 se observa el desgaste que presentaron los compuestos tanto para la variación de tamices a un mismo porcentaje de refuerzo como para el número de tamiz 60 variando el porcentaje de refuerzo. En el primer caso se observa que el desgaste que presentaron los pines después de los ensayos

estuvieron en valores entre 0.15 y 0.2 mg/km. Siendo el desgaste más significativo para el pin de tamiz número 30.

En el caso de la variación de refuerzo se observa que el desgaste de los compuestos pareciera ser aproximadamente igual o menor con el incremento del % de refuerzo, excepto para el 50%. Esto puede deberse a que posiblemente el caucho no permite un adecuado curado de la resina fenólica, lo que genera una porosidad demasiado alta y agrietamientos en el material.

Después de realizar las pruebas tribológicas, se observaron los pines hechos con materiales compuestos variando el porcentaje de refuerzo en un estereoscopio. No es posible presentar las imágenes en esta tesis puesto que para la fecha de terminación de este trabajo la universidad no contaba con los medios adecuados para esto. Sin embargo, se presenta a continuación unos bosquejos de los pines que permiten identificar las zonas donde se presentó desgaste:

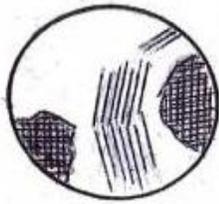


Pin resina 40% refuerzo

- ✓ Presento alguna porosidad.
- ✓ Tuvo cambios de color.
- ✓ Presento zonas de desgaste, denotadas por una apariencia distinta al resto de la superficie del pin.

Pin resina 50% refuerzo

- ✓ Presento porosidad de mayor tamaño.
- ✓ Presentó cambios de color.
- ✓ Presento grietas.



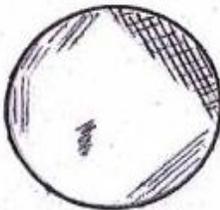
Pin resina 100%

- ✓ Se observaron algunos rayones.
- ✓ Presentó algunas zonas más oscuras.



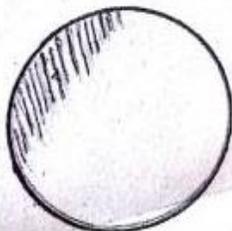
Pin resina 10% refuerzo

- ✓ Presentó cambios de color y porosidad en su superficie



Pin resina 20% refuerzo

- ✓ Presento cambios de color.
- ✓ Presento mucha porosidad.
- ✓ Presento zonas de desgaste, pero sin rayado, solo denotadas con un color más claro.



Pin resina 30% refuerzo

- ✓ Presento mucha porosidad.
- ✓ Tuvo cambios de color.

Las rayas simples indican evidencias en la superficie del pin de un desgaste de tipo abrasivo. Las partes que se ven con una especie de malla, puesto que

tienen rayas en sentido perpendicular unas sobre otras, muestran un desgaste también abrasivo pero sin líneas claramente definidas sobre la superficie. Finalmente, las partes que tienen alta densidad de líneas, que parecen parches oscuros, indican capas adheridas sobre la superficie del pin que probablemente son producto de un fenómeno conocido como “back transfer formation layer” (BTFL), que ocurre cuando las partículas que se separan del pin por efecto abrasivo se adhieren nuevamente a él como una capa externa.

Para el caso del pin con 50% de refuerzo, se pudo observar una superficie agrietada, con alta porosidad. Esto podría deberse a un desgaste por fatiga superficial puesto que podría haberse presentado alguna oscilación del pin con respecto al disco durante la prueba [25].

Otra observación que se puede hacer a partir de las evidencias es que las caras de los pines no son totalmente paralelas, por lo que el desgaste se concentra en algunas esquinas o zonas bien definidas.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES

En el caso de las pruebas de densidad, no se hallaron variaciones muy significativas entre los resultados, pero sí se puede intuir que al aumentar el porcentaje de refuerzo ($> 40\%$) la densidad tiene una tendencia a disminuir.

En absorción de humedad, la muestra que presentó mayor absorción fue la que se realizó con el mayor tamaño de partícula. Esto puede deberse a que el caucho no permite un adecuado curado de la resina en su interior y se generen espacios vacíos que sirvan de alojamiento para la humedad, puesto que bajo las condiciones de curado de la resina, se estableció que ésta presenta un grado de absorción de humedad considerable.

Para el caso del desgaste, se puede observar que la variación del tamaño de partícula con una composición de 30% de refuerzo no presenta cambios significativos.

En el caso del tamaño de partícula menor con variación del porcentaje de refuerzo, se observó que la muestra de 50% de refuerzo presentó el mayor desgaste. Esto puede deberse a que el caucho no permite un adecuado curado de la resina, lo que genera la propagación de grietas internas, alta porosidad superficial y mayor desprendimiento de partículas, lo cual asociado a una posible oscilación del pin con respecto al disco, podría generar el desgaste por fatiga superficial.

Para el caso de los pines de 0, 10 y 20 % de refuerzo se evidenció un posible desgaste por adhesión puesto que al observar la superficie de los pines en el estereoscopio se apreciaba una capa superficial.

Se evidencia que efectivamente el tamaño de partícula afecta el material compuesto en cuanto a su comportamiento tribológico y mecánico, como se ha comprobado en trabajos anteriores de investigación, donde se fabrican materiales compuestos con distintos porcentajes de carga. Así como pueden también afectar su comportamiento tribológico otros factores como la carga aplicada en el “pin on disk test” [26].

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Acorde a la experiencia obtenida durante el desarrollo de este trabajo, se exponen algunas sugerencias y recomendaciones para trabajos futuros:

Dados los resultados obtenidos en este trabajo, se puede observar que el COF tiene tendencia ascendente con la incorporación de caucho, por lo tanto sería interesante realizar un trabajo posterior con matriz de resina fenólica, incorporando caucho y aditivos que mejoren su comportamiento a fricción. Algunos de los aditivos que se sugieren son: polvo de carbón, grafito, polvo de hierro, fibras de acero, alúmina y otros aditivos para fricción [27].

Se recomienda también estudiar la incorporación de aditivos que mejoren el comportamiento mecánico del compuesto para ser utilizado como piso en algunos lugares donde sea necesario. Esto sería preciso para compuestos con 30% de refuerzo y tamaños de partícula del caucho correspondientes a tamices de #10, 20, 30, 40; puesto que presentaron un COF superior a 0,5 que es el valor mínimo para considerar un piso seguro [28].

Se recomienda para trabajos futuros realizar el “pin on disk test” aplicando distintas cargas de manera que pueda verse su influencia dentro del comportamiento tribológico del material.

En el momento de fabricación de las probetas evaluar distintas temperaturas dentro del rango de curado de la matriz fenólica así como el tiempo de prensado en caliente, para evaluar su influencia en la obtención de la muestra final.

Para ampliar el campo de aplicación de material y determinar un uso adecuado pueden realizarse pruebas térmicas como DSC o TGA que permitan visualizar el comportamiento del material ante cambios de temperaturas [29].

Se recomienda realizar ensayos previos para entender el funcionamiento y montaje del tribómetro “pin on disk”, con el fin de evitar al máximo errores de medición en las pruebas a realizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. G. Angelica, “Curso materiales compuestos.” Medellin, 2013.
- [2] Wikipedia, “Caucho Estireno-Butadieno,” 2013. .
- [3] E. Demirhan, F. Kandemirli, M. Kandemirli, and V. Kovalishyn, “Investigation of the physical and rheological properties of SBR-1712 rubber compounds by neural network approaches,” *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1737–1741, Jan. 2007.
- [4] Wikipedia, “Hexametilentetramina,” 2013. .
- [5] J. D. Martínez, S. Pavone, J. Velásquez, G. Quintana, and P. Gañán, “ESTUDIO CINÉTICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DE RESINAS FENÓLICAS NOVOLACAS MODIFICADAS CON LIGNINA.”
- [6] Wikipedia, “Materiales compuestos,” 2013. .
- [7] Mariano, “Tecnología de los plásticos,” 2011. .
- [8] M. S. L. A. U. vargas Isabel, “Desarrollo de materiales compuestos de matriz fenólica reforzados con fibras carbonados de origen vegetal,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.
- [9] D. Robledo Vargas, “Análisis de las características tribológicas de materiales fenólicos con fibras carbonosas de origen natural, en contacto deslizante con discos de freno para posibles aplicaciones en la industria autopartes de materiales de fricción.,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2013.
- [10] Y. P. E, “Compuestos con enlaces dobles C=O. El grupo carbonil,” in *Química organica básica y aplicada: de la molecula a la industria*, 1996, pp. 512–513.
- [11] Monografias.com, “El caucho SBR.” .

- [12] B. Bhushan, *The engineering handbook*. CRC Press LLC, 2000.
- [13] W. S. H. Ping, “sliding friction,” in *principles of tribology*, T. U. Press, Ed. China: Jhon Wiley and sons (Asia)Pte Ltd, 2012, pp. 251–253.
- [14] A. A. P, *Tribología y lubricación industrial y automotriz*. 1993, pp. 25–42.
- [15] B. P. Santiago, Notas de clase “Fundamentos de tribología” 2012, pp. 1–34.
- [16] B. P. Santiago, Notas de clase, capítulo de “Friction” en *Fundamentos de tribología*, 2012, pp. 1–71.
- [17] W. R. Liimis, *New directions in lubrication, materials, wear, and surface interactions. Tribology in the 80’s*. EEUU: Noyes publication, 1985, pp. 121–125.
- [18] J. A. Shey, *Procesos de manufactura*. Mexico: , 2000.
- [19] J. Crank, G. S. Park, A. Press, and G. S. Huvard, “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics 1,” vol. 98, no. Reapproved 2010, pp. 1–4, 2013.
- [20] M. S. Adriana and U. vargas M. Isabel, “Desarrollo de materiales compuestos de matriz fenólica reforzados con fibras carbonadas de origen vegetal,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.
- [21] B. F, “Dureza,” in *tratado elemental de física*, Madrid: , 1839, pp. 100–103.
- [22] PCE, “Medidores de dureza,” 2013. [Online]. Available: www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/medidores-de-dureza.htm.
- [23] P. Specimens and E. I. Materi-, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1,” pp. 1–11, 2013.

- [24] W. Conshohocken, “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1,” vol. 05, no. Reapproved 2010, pp. 1–5, 2013.
- [25] M. M. K. Dae Kyun Baek, “Fretting behavior of a rubber coating: Friction characteristics of rubber debris,” *Wear*, vol. 261, no. 10, pp. 1114–1120, 2006.
- [26] S. Basavarajappa, K. V Arun, and J. P. Davim, “Effect of Filler Materials on Dry Sliding Wear Behavior of Polymer Matrix Composites – A Taguchi Approach,” vol. 8, no. 5, pp. 379–391, 2009.
- [27] a. Saffar and a. Shojaei, “Effect of rubber component on the performance of brake friction materials,” *Wear*, vol. 274–275, pp. 286–297, Jan. 2012.
- [28] “www.paritarios.cl.” [Online]. Available: http://www.paritarios.cl/entrevistas_NON-SLIP_La_solucion_antideslizante_que_ayuda_a_disminuir_el_riesgo_de_caidas_en_superficies_humedas.html. [Accessed: 02-Nov-2013].
- [29] UPTC, “Análisi termogravimetrico.” .