



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN  
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
UNIDAD OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y  
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES  
(INGENIERÍA)**

**“COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE COMPOSITO REFORZADO CON  
FIBRA DE AGAVE ANGUSTIFOLIA HAW PARA PASTILLAS DE FRENADO”**

## **TESIS**

Que para obtener el grado de:

**Maestro en ciencias**

Presenta:

**Ing. Carlos Martínez Díaz**

Directores de tesis:

**Dr. Magdaleno Caballero Caballero**

**Dr. Fernando Chiñas Castillo**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 14:00 horas del día 21 del mes de junio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:

Comportamiento tribológico de composito reforzado con fibra de Agave angustifolia Haw para pastillas de frenado.

Presentada por el alumno:

Martínez Díaz  
Apellido paterno Apellido materno  
Nombre(s) Carlos

Con registro: 

A	1	5	0	0	3	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
Dr. Magdalena Caballero  
Caballero

  
Dr. Fernando Chías Castillo

  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús  
Cano Barrita

  
Dr. Rafael Aláñez Ramírez

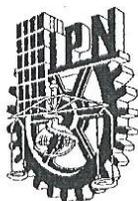
  
Dr. Miguel Chávez Gutiérrez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



GENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F. el día 21 del mes de junio del año 2017, el (la) que suscribe MARTÍNEZ DÍAZ CARLOS alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro A150032, adscrito(a) al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dres. Magdaleno Caballero Caballero y Fernando Chiñas Castillo** y cede los derechos del trabajo titulado **Comportamiento tribológico de composito reforzado con fibra de Agave angustifolia Haw para pastillas de frenado**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones [posgradoax@hotmail.com](mailto:posgradoax@hotmail.com) ó [carlos85utvco14@gmail.com](mailto:carlos85utvco14@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MARTÍNEZ DÍAZ CARLOS  
Nombre y firma del alumno(a)



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a Dios por darme la dicha de existir en este mundo

A mis padres Asunción y Felipe por haberme inculcado los valores que hoy día son los pilares de mi vida, por su apoyo incondicional y su ejemplo de trabajo

A mis hermanas Erika, Alma y Adaline por los ratos tan divertidos que hemos pasado y por ser ejemplo de unión.

A mis abuelos por siempre desearme lo mejor en mi desarrollo profesional y personal

A Luz María por el aliento, paciencia amor que me brindo durante el desarrollo del presente trabajo

A mis compañeros y amigos que hicieron más amena esta etapa de mi vida

# Agradecimientos

Al CONACYT por el apoyo económico del cual fui beneficiado

Al CIIDIR-IPNOaxaca por haberme brindado las facilidades para la elaboración de la presente tesis

Al comité tutorial y jurado integrado por: Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Fernando Chiñas castillo, Dr. Felipe de Jesús cano barrita, Dr. Rafael Alavéz Ramírez, Dr. Miguel Chávez Gutiérrez por el tiempo brindado, las sugerencias y recomendaciones para el mejoramiento del trabajo

A M.C. José Luis Montes Bernabé M. C. Luis silva Santos, M. C. Margarito Ortiz, M.I. José Navarro Antonio y a todos los docentes del CIIDIR-Oaxaca por sus consejos y la oportunidad de compartir sus conocimientos y experiencias.

Al laboratorio de Biomacromoleculas por permitirme hacer uso de su herramienta y equipo, en especial al Dr. Miguel Chávez Gutiérrez y a la compañera Irais Aragón

A la SEPI ESIME-ZACATENCO por brindarme las facilidades para hacer uso de sus máquinas y equipo, en especial al Dr. Ezequiel Gallardo Hernández y Dr. Manuel vite torres docentes del grupo de Tribología.

A los técnicos del taller Z4 de máquinas herramientas de la ESIME-Zacatenco Salvador Chávez, Alejandro Villagrán y Cesar Pérez, por el apoyo en el maquinado de las muestras y otras actividades.

A mis compañeros: Raymundo Martínez Jiménez, Luis Ángel Rosario Díaz, Marco Antonio Ramírez Sorroza, Aurelio Martínez Ibarra, por su amistad y acertados consejos que tuvieron hacia mi persona. A los compañeros de residencia profesional y servicio social que de una u otra manera también aportaron su granito de arena para lograr esta investigación.

## RESUMEN

En este estudio, se elaboró un composito reforzado con fibras de *Agave angustifolia* Haw que tuviera características similares a la de una pastilla de freno de automóvil, estas se mezclaron a diferentes concentraciones con grafito, carbonato de calcio, óxido de aluminio y resina fenólica, la longitud de la fibra que se empleó estuvo en el rango de 150 a 250  $\mu\text{m}$  y para empastillar dicho material se compactó en un molde cerrado de placa caliente. Se evaluó el comportamiento tribológico de las formulaciones con una máquina pin on disk bajo la norma ASTM G99 los resultados de esta prueba mostraron que todas las formulaciones elaboradas presentan un coeficiente de fricción mayor al del material de pastilla de freno comercial. En cuanto al desgaste de las superficies de los pines dos formulaciones elaboradas tuvieron mejor desempeño al perder menos material que la formulación comercial, otro aspecto importante fue que el desgaste provocado al disco fue relativamente mayor comparado con el composito comercial sin embargo se demostró que existe una correlación entre la concentración de fibra y el desgaste producido en la superficie del disco, es decir, a mayor contenido de fibra en el compuesto se remueve menos material en la superficie del disco de hierro fundido. El resultado indicó que la fórmula F2 es la que más se asemeja a las condiciones de la pastilla de freno, teniendo un coeficiente de fricción promedio de  $\mu = 0.4$  y un desgaste de formulación promedio de 6 mg en 4600 m de deslizamiento mientras que la fórmula comercial obtuvo un coeficiente de fricción  $\mu = 0.3$  y perdió la cantidad de 7 mg de material a la misma distancia de ensayo. Por este motivo las fibras de Bagazo de *Agave angustifolia* Haw debidamente acondicionadas (lavadas y molidas) pueden ser utilizadas eficazmente como un reemplazo de las fibras de refuerzo en una formulación de material de fricción comercial.

**Palabras clave:** compositos, fibras de agave, freno, desgaste, fricción.

## ABSTRACT

In this study, a composite reinforced with fibers of *Agave angustifolia* Haw that had characteristics similar to the one of a brake pad of automobile, these were mixed to different concentrations with graphite, calcium carbonate aluminum oxide and phenolic resin, the length Of the fiber used was in the range of 150 to 250  $\mu\text{m}$  and to pack such material into a closed hot plate mold. The tribological behavior of the formulations was evaluated with a pin-on-disk machine under ASTM G99. The results of this test showed that all formulations have a higher coefficient of friction than the commercial brake pad material. As for the wear of the pin surfaces two formulations had better performance when losing less material than the commercial formulation, another important aspect was that the wear caused to the disc was relatively higher compared to the commercial composite however it was demonstrated that there is a Correlation between the fiber concentration and the wear produced on the disc surface, ie at higher fiber content in the composite, less material is removed on the surface of the cast iron disc. The result indicated that formula F2 is the one that most closely resembles the conditions of the brake pad, having an average coefficient of friction of  $\mu = 0.4$  and an average formulation wear of 6 mg in 4600 m of slippage while formula Commercially obtained a coefficient of friction  $\mu = 0.3$  and lost the amount of 7 mg of material at the same test distance. For this reason properly packaged *Agave angustifolia* Haw Bagasse fibers (washed and milled) can be effectively used as a replacement of the reinforcing fibers in a commercial friction material formulation.

**Key words:** composites, agave fibers, brake, wear, friction.

## CONTENIDO

<b>CAPITULO1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Justificación .....	3
1.4 Antecedentes.....	4
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Objetivos.....	6
1.6.1 Objetivo general.....	6
1.6.2 Objetivos específicos .....	7
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1 Materiales de fricción empleados en automóviles.....	7
2.1.1 El Freno de disco .....	7
2.1.3 Fibras de refuerzo empleadas en materiales de fricción. ....	9
2.1.5 Material de relleno empleado en compositos de fricción .....	11
2.1.6 Modificadores del coeficiente de fricción empleados en materiales de fricción.....	11
2.2 Fibras naturales .....	12
2.2.1 Fibra de bagazo de <i>agave Angustifolia</i> Haw .....	13
2.3 Materiales poliméricos .....	14
2.3.1 Polímeros termoplásticos .....	14
2.3.2 Polímeros termofijos .....	15
2.4 Tribología.....	16
2.4.1 Mecanismos de desgaste.....	16
2.4.2 Fuerza de fricción .....	18
2.5 Ensayo de dureza.....	19
2.5.1 Ensayo de dureza Brinell .....	19
2.5.2 Ensayo de dureza Rockwell .....	20
2.5.3 Otros ensayos de dureza .....	20
2.5.4 Comparación entre los ensayos de dureza .....	20
2.6 Transferencia de calor por conducción .....	21

2.7 Conductividad térmica .....	21
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1 Colecta de la fibra .....	24
3.2 Acondicionamiento de la fibra .....	24
3.2.1 Lavado .....	24
3.2.2 Reducción de tamaño.....	24
3.3 Tamaño de los pines.....	24
3.4 Resina termo fija .....	24
3.5 Ingredientes del composito de fricción .....	25
3.6 Molino para fibras .....	25
3.7 Mezcladora de los polvos.....	25
3.8 Máquina tribológica de perno sobre disco (pin on disk, ASTM G99) ....	26
3.9 Diseño experimental .....	27
3.10 Acondicionamiento de la fibra de bagazo de agave para emplearlas en el material de fricción .....	28
3.10.1 Colecta del material .....	28
3.10.2 Lavado del bagazo.....	29
3.11 Determinación de la calidad del lavado .....	31
3.11.1 Medición del pH .....	32
3.12 Reducción de tamaño.....	32
3.13 Tamizado .....	33
3.14 Verificación de la calidad de la molienda .....	33
3.15 Elaboración de las muestras.....	33
3.15.1 Medición de los materiales (proporción en masa).....	35
3.15.2 Mezclado de los materiales.....	36
3.16 Elaboración del compuesto .....	37
3.16.1 Selección del tipo de molde.....	37
3.16.2 Fabricación de las de probetas del material de fricción .....	47
3.17 Maquinado de los discos de prueba .....	48
3.18 Pruebas tribológicas.....	49
3.18.1 Acondicionamiento del par tribológico .....	49
3.18.2 Diseño y construcción de porta pines .....	53
3.18.3 Ajustes del banco de pruebas .....	54

3.18.4 Colocación de los elementos a ensayar y de medición .....	54
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión .....</b>	<b>56</b>
4.1 Acondicionamiento de la a fibra de bagazo de agave para emplearla como refuerzo .....	56
4.1.1 Lavado .....	56
4.1.2 Reducción de tamaño.....	58
4.1.3 Granulometría .....	59
4.2 Elaboración del composito .....	59
4.3 Rugosidad y dureza del par tribológico.....	60
4.4 Determinación de las propiedades tribológicas mediante la norma G-99 .....	63
4.4.1 Coeficiente de fricción .....	63
4.4.2 Desgaste del par tribológico.....	64
4.5 Análisis micrográficos de las superficies de los pares tribológicos ensayados .....	68
4.5.1 Micrografías de la superficie de los pines ensayados .....	68
4.5.2 Micrografías de las superficies de los discos ensayados .....	72
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Pinza de freno típica y configuración del rotor</i> .....	8
<b>Figura 2.</b> Esquema del proceso de moldeo por compresión .....	16
<b>Figura 3.</b> Desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos.....	17
<b>Figura 4.</b> Ejemplos de transferencia de película metálica: a) transferencia de película de latón sobre alúmina y b) película de transferencia de aleación de Al-Si sobre un anillo de pistón. ....	18
<b>Figura 5.</b> Recomendación para los ensayos de dureza (Askeland, 1998).....	20
<b>Figura 6.</b> <i>Metodología seguida en la investigación</i> .....	23
<b>Figura 7.</b> Molino de cuchillas FRITSCH.....	25
<b>Figura 8.</b> Mezcladora de polvos Hamilton Beach .....	26
<b>Figura 9.</b> <i>Máquina pin on disk</i> .....	26
<b>Figura 10.</b> Ubicación de la zona de recolección de bagazo .....	28
<b>Figura 11.</b> Uso del método de cuarteo para la colecta del material a) traspaleo, b) cuarteo, c) embolsado y d) sellado en caja para su traslado .....	29
<b>Figura 12.</b> Construcción de los marcos de lavado a) cortado del material b) soldado del marco C) corte de la malla y d) soldado de la malla en el marco .....	30
<b>Figura 13.</b> <i>proceso de lavado del bagazo de agave a) pre selección de la fibra, b) remojada c), lavada a presión y d) secada al sol.</i> ....	31
<b>Figura 14.</b> <i>Procedimiento para la reducción de tamaño a) cortado previo con tijera b) molienda c) cambio de las rejillas y d) tamaño final de la fibra</i> .....	32
<b>Figura 15.</b> Secuencia de tamizado de fibras a) preparación de tamices b) colocación de la fibra, tamizado a mano y d) fibra seleccionada.....	33
<b>Figura 16.</b> Diagrama para la elaboración de las muestras .....	34
<b>Figura 17.</b> Medición del peso de los ingredientes a) empleo de la balanza y b) materiales listos para mezclar .....	35
<b>Figura 18.</b> <i>Proceso de mezclado de los ingredientes a) incorporación individual de los ingredientes, b) mezclado, c) mezcla final y d) envasado y etiquetado de la mezcla</i> .....	36
<b>Figura 19.</b> Diagrama para la fabricación del molde cerrado de placa caliente .....	37
<b>Figura 20.</b> <i>Clasificación de las formas de acuerdo con sus características geométricas</i> .....	38
<b>Figura 21.</b> Moldes empleados en la fabricación de materiales de fricción.....	39
<b>Figura 22.</b> Diseño del molde mediante software con CAD .....	40
<b>Figura 23.</b> Selección de la resistencia de cartucho en el catálogo POLIMEX .....	41
<b>Figura 24.</b> Construcción del molde a) maquinado y b) partes del molde terminadas .....	43
<b>Figura 25.</b> <i>Secuencia de conexión de los componentes a) y b) sujeción e interconexión de los componentes al panel de instrumentos, c) colocación de las resistencias y d) conexiones finalizadas</i> .....	44

<b>Figura 26.</b> Elaboración de muestras de control a) monitoreo de los parámetros de moldeo y b) muestras de control terminadas.....	45
<b>Figura 27.</b> Curvas de temperatura vs tiempo empleado en la elaboración de las muestras a) muestra 1 y b) muestra 2.....	46
<b>Figura 28.</b> proceso de fabricación de las muestras a) pesado del material al emplear, B) llenado de las cavidades del molde) moldeo, d) extracción de las muestras E) curado de 8 h y f) embolsado y etiquetado .....	47
<b>Figura 29.</b> proceso de obtención de los discos de prueba a) disco usado de automóvil, B) corte del núcleo ,c) separación del núcleo y área de contacto, d) marcas de corte, e) corte manual del área marcada)cilindrado, g) refrenado y h) disco terminado.....	48
<b>Figura 30.</b> Diagrama para la realización de las pruebas tribológicas .....	49
<b>Figura 31.</b> Rectificado del par tribológico a) rectificado del disco y b) rectificado del pin .....	50
<b>Figura 32.</b> Lavado de los discos con acetona en tina ultrasónica.....	51
<b>Figura 33.</b> Medición de la rugosidad de los discos .....	51
<b>Figura 34.</b> Prueba de micro dureza a) discos y b) pines .....	52
<b>Figura 35.</b> Medición del peso de las muestras antes del ensayo .....	52
<b>Figura 36.</b> Proceso de diseño y construcción del porta pines a) diseño CAD en 3D, b) planos de construcción en 2D, operación de fresado de la cavidad, d) operación de cilindrado en maquina CNC, f) roscado a mano y g) porta pines terminado ....	53
<b>Figura 37.</b> Ajuste y nivelación de la máquina de pruebas .....	54
<b>Figura 38.</b> Ajustes y equipamiento de la maquina antes del ensayo a) ajuste del disco, b) colocación y centrado del pin, c) nivelado y ajuste del brazo basculante, d) colocación de la carga y el sensor .....	56
<b>Figura 39.</b> Micrografías ópticas de la calidad de lavado de fibra a) sin lavar, b) lavado a mano y c) lavado a presión.....	57
<b>Figura 40.</b> Prueba de pH a fibras tratadas (a y b) con dos repeticiones .....	58
<b>Figura 41.</b> Micrografías ópticas de la fibra molida (a y b).....	58
<b>Figura 42.</b> Comparativo micrográfico del composito reforzado con fibras de agave ay b y vs un composito reforzado con fibras minerales.....	60
<b>Figura 43.</b> Grafica de rugosidad de los discos.....	61
<b>Figura 44.</b> Grafica de la microdureza de los discos.....	62
<b>Figura 45.</b> Grafica de la microdureza de las diferentes formulaciones .....	63
<b>Figura 46.</b> Curvas comparativas del coeficiente de fricción de las seis formulaciones y el material comercial.....	64
<b>Figura 47.</b> Grafica de promedios de pérdida de material individuales y por formulación.....	65
<b>Figura 48.</b> Grafica del desgaste promedio de las formulaciones comparándolas con el contenido de fibra .....	66
<b>Figura 49.</b> Grafica del desgaste provocado a los discos por las diferentes formulaciones .....	67

<b>Figura 50.</b> Promedio de pérdida de material de los discos provocado por las diferentes formulaciones relacionándola con la cantidad de fibra .....	68
<b>Figura 51.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F2 .....	69
<b>Figura 52.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F4 .....	69
<b>Figura 53.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F1 .....	70
<b>Figura 54.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F6 .....	71
<b>Figura 55.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F3 .....	71
<b>Figura 56.</b> Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F5 .....	72
<b>Figura 57.</b> Comparación de las superficies de los discos mediante micrografías ópticas a) disco antes de la prueba b) disco gastado por la formulación F5, c) disco gastado por la formulación F2 y d) disco gastado por la formulación f3.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Clasificación de las pastillas de freno comerciales.....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 2. <i>Fibras de refuerzo comúnmente utilizadas en materiales de fricción</i></b>	<b>9</b>
<b>Tabla 3. <i>Matrices comúnmente usadas en materiales de fricción</i>.....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 4. <i>Principales rellenos utilizados en la fabricación de materiales de fricción</i> .....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 5. <i>Modificadores de coeficiente empleados en los materiales de fricción</i> .....</b>	<b>12</b>
<b>Tabla 6. <i>Características físicas y químicas de las fibras de bagazo de Agave angustifolia Haw</i>.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabla 7. <i>Diseño de experimento con un solo factor y tres repeticiones</i> .....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 8. <i>Proporciones de ingredientes para la elaboración de compositos</i>..</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 9. <i>Características de las diferentes técnicas de moldeo plásticos</i> .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 10. <i>Lista de material empleada para instrumentar el molde</i> .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 11. <i>Granulometría de la fibra de bagazo molida</i>.....</b>	<b>59</b>

# CAPITULO1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Introducción

La tribología es una ciencia multidisciplinaria que incluye disciplinas como hidrodinámica, mecánica de cuerpo sólido, ciencia de los materiales, química, física, matemática y computación; sus estudios incluyen a la fricción, el desgaste, lubricación, la confiabilidad, el rendimiento y la eficiencia, todo esto para para optimizar los sistemas mecánicos.

En la mayoría de los sistemas mecánicos se busca disminuir la fuerza de fricción, sin embargo para múltiples aplicaciones es necesaria ésta fuerza; un ejemplo es el sistema de frenado y embrague presentes en máquinas destinadas para el transporte.

Los materiales de fricción se emplean en todo tipo de aplicaciones, que van desde una goma para borra hasta los grandes embragues que se usan en las maquinarias para la minería. Uno de los materiales que han recibido especial atención y un muy riguroso estudio son los materiales de fricción destinados a la fabricación de frenos debido a la necesidad de encontrar materiales sustitutos (que sean de la región) que mantengan las propiedades tribológicas pero que disminuyan el consumo de materiales de importación que evidentemente los hace menos rentables.

Los materiales compuestos destinados para la fabricación de forros de frenos, surgieron a la par del transporte cada vez más rápido, el problema era como detener el móvil de una forma confiable, la solución fue el empleo de fibras de algodón en una matriz bituminosa, la cual se considera el primer compuesto de forros de freno y fue creada por Herbert Froode en 1897 (Blau, 2001).

Los materiales compuestos siguieron evolucionando hasta llegar a incorporar fibras minerales para el refuerzo de estos revestimientos de fricción, las fibras empleadas fueron derivadas del asbesto. Esta formulación resulto tener mejores prestaciones que las anteriores debido a que mejoraban las características del material de fricción, las cuales son: un alto y estable coeficiente de ficción, baja conductividad térmica, resistencia al desgaste y bajo costo de fabricación; en general esta formulación tenía muchas ventajas y se utilizó ampliamente desde el principio del siglo XX hasta 1980, década en la cual se descubrió que los residuos que generaba este material es nocivo para la salud ya que es un agente altamente cancerígeno ya que la aspiración de las micro partículas del asbesto provoca cáncer de pulmón (Chan & Stachowiak, 2004).

Al confirmarse los riesgos a la salud que el asbesto provoca, los países desarrollados prohibieron el empleo de este material definitivamente (Aguilar Madrid, et al., 2009), motivo por el cual la industria automotriz retomó el uso de otros materiales libres de asbesto para la formulación de revestimientos de fricción para frenos. Las fibras que sustituyeron al asbesto con prestaciones y características similares y que en la actualidad son las que se emplean para fabricar revestimientos de fricción para frenos automotrices son: fibras metálicas, fibras minerales, fibras de vidrio, fibras de carbono etc.

Otra alternativa es emplear fibras vegetales como refuerzo en materiales de forro de frenos, las principales propiedades que debe tener para ser una alternativa aceptable es una alta resistencia a la tensión y módulo de elasticidad. Un ejemplo de mejorar significativamente estas propiedades en un compuesto es tratar las fibras químicamente con NaCl como lo demostraron Mysalmy & Ragendran (2011).

Las características del material de freno de automóvil son: mantener un alto coeficiente de fricción con el disco de freno aun en altas temperaturas exhibir un coeficiente de fricción estable y consistente con el disco de freno. Las pastillas de freno típicamente están constituidas por los siguientes componentes: aditivos de fricción que determinan las propiedades del compuesto, comprenden una mezcla de abrasivos y lubricantes, material de relleno el cual reduce el costo y mejora la fabricación de las pastillas, un aglutinante el cual mantiene unidos los componentes de las pastillas y fibras de refuerzo que proporcionan resistencia mecánica (D. Chan & G W Stachowiak, 2003).

Por lo mencionado anteriormente esta investigación pretende estudiar un sustituto de fibras de refuerzo para un material precursor (base) destinado a fabricar forros para frenos automotrices con la innovación de emplear fibras vegetales provenientes del *Agave angustifolia* Haw tratadas alcalinamente con la finalidad de mejorar las propiedades tribológicas del compuesto.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Los materiales utilizados para la fabricación de un automóvil son principalmente metálicos y polímeros derivados del petróleo que al ser extraídos y procesados en partes automotrices llegan a generar una huella de carbono de 17 toneladas de CO<sub>2</sub> (Berners-Lee & Clark, 2010).

Las pastillas o forros de freno cerámicas son las que utilizan los fabricantes de automóviles en sus unidades antes de salir de la fábrica, las principales

características que tiene este compuesto son: el estable coeficiente de fricción en rangos de temperatura y humedad, baja conductividad térmica, sus desventajas son: el desgaste excesivo del material de fricción y su alto costo en el mercado comparado con otros materiales.

Una alternativa que se utiliza como material de fricción en automóviles modernos son los compuestos semimetálicos, los cuales son los mayormente empleados por su costo notablemente inferior comparado con el material de equipo original, otra ventaja que tienen estas es su alto coeficiente de fricción y su durabilidad, los inconvenientes de este material son que desgastan más rápidamente la superficie del disco o tambor de freno, tienen una alta conductividad térmica que puede hacer entrar en ebullición al fluido de freno, hecho completamente indeseable para el sistema de frenos por la pérdida de efectividad para detener el móvil.

### **1.3 Justificación**

El sistema de frenado de un automóvil es uno de los más importantes debido a que es este el que se encarga de convertir la energía cinética del auto en energía calorífica, mediante la fricción que se genera entre las piezas con movimiento relativo. Las partes que se someten a rozamiento en un automóvil moderno están comprendidas por una pieza móvil denominada disco y una fija llamada pinza o mordaza la cual aloja las pastillas de fricción (Brijendra & Ashish, 2015).

Las partes que integran este sistema se han diseñado para que a distintas condiciones de frenado el desempeño de los frenos sea el adecuado: mantener un coeficiente de fricción estable a diferentes rangos de humedad y temperatura, baja vibración y ruidos.

Los avances tecnológicos en materiales y las leyes ambientales han provocado cambios en el diseño de las partes automotrices un ejemplo es la adaptación de la electrónica en el sistema de inyección y en general para todo el funcionamiento, otro ejemplo es la tendencia a fabricar autos más ligeros ayudándose de los nuevos materiales que reducen el consumo de combustibles mejorando la relación peso/potencia.

A nivel mundial se busca eliminar el uso del asbesto por ser un agente cancerígeno para las personas, debido a esto se han realizado investigaciones para formular un material compuesto libre de este material sustituyendo estas fibras minerales por fibras naturales como la de coco, caña, cascara de plátano sisal, etc.

Los materiales compuestos de fricción con incorporación de fibras orgánicas vegetales (subproductos agroindustriales) como refuerzo se han estudiado en diferentes países, un ejemplo de ellos es Nigeria en donde emplearon fibras de coco, caña y cascara de plátano; los resultados de las pruebas del nuevo material señalan que desempeño de éstos, son similares a los materiales de fricción comerciales que contienen fibras de asbesto (Aigbodion, et al., 2010).

En muchas de las actividades agroindustriales que se realizan a nivel mundial se generan residuos con grandes cantidades de fibra vegetal, como ejemplo tenemos los ingenios azucareros, extracción de aceite de coco, cultivo de piña etc., todas estas actividades se llevan a cabo en México, sin olvidar una de las más representativas de este país que es la del proceso Maguey-Mezcal.

En el estado de Oaxaca la actividad mezcalera genera anualmente 122 696 toneladas de bagazo o desecho, producto subutilizado que es vertido en ríos, arroyos o utilizado mínimamente como combustible en hornos ladrilleros, ocasionando un grave problema al ambiente (Martínez, et al., 2013). Este desecho se pretende utilizar para la fabricación de un material compuesto de fricción y de esta manera disminuir el impacto ambiental que genera.

#### **1.4 Antecedentes**

La necesidad de erradicar el asbesto en los materiales de fricción que se comercializan en países subdesarrollados como Nigeria y Malasia principalmente han orillado a los investigadores a buscar un sustituto de este material que cumpla con las características de un material de fricción.

Con los desechos agrícolas generados por la extracción de aceite de coco nigeriano, Ibhadode y Dagwa (2008) colectaron, limpiaron y molieron a un tamaño de 125 micrómetros éste subproducto, posteriormente la incorporaron en un material compuesto destinado a la fabricación de pastillas de freno con matriz de resina, modificadores del coeficiente de fricción y fibras de relleno; las pruebas las realizaron con un equipo que ellos mismos diseñaron y construyeron. Las propiedades que evaluaron fueron tribológicas (coeficiente de fricción y desgaste), mecánicas (dureza y resistencia a la compresión), físicas (peso específico, porosidad y capacidad de absorción) entre otras. Los resultados que obtuvieron los compararon con las propiedades de una pastilla de frenos comercial que contiene asbesto y concluyen que la fibra de coco es un buen sustituto de este material cancerígeno.

De igual forma Ruzaidi et al (2011) incorporo fibras de desecho de palma como un material de relleno, resina fenólica como matriz, fibras de acero como refuerzo,

grafito y alúmina como modificadores del coeficiente de fricción. Usando proporciones de 40, 20, 20, 10 y 10 respectivamente, realizaron la mezcla y pre moldearon las muestras con una prensa manual a una presión de 17 MPa, posteriormente se compactaron nuevamente en un molde a una temperatura de 150°C y una presión de 60 toneladas por un tiempo de 5 minutos, para finalizar se curaron las muestras a una temperatura de 150°C por cuatro horas. Las pruebas que realizaron fueron caracterización térmica, resistencia a la compresión y el desgaste. La conclusión de la investigación demuestra que los desechos de esta palma puede ser una alternativa efectiva como material de relleno en una pastilla de freno.

Otro estudio que se realizó, utilizando subproductos agrícolas fue realizado por Idris., et al (2013), en este estudio los investigadores usaron una base de resina fenólica como matriz, añadiendo cascara de plátano acondicionadas (secadas y molidas). La adición de fibras de cascara de plátano fueron divididas en fibras molidas y fibras calcinadas a 1200°C, ambas con un tamaño de 100 micrómetros, la variable de las muestras fue la concentración de resina la cual fue de 5, 10, 15, 20, 25 y 30%. Las pruebas a las que se sometieron las probetas fueron microscopia electrónica de barrido, peso específico, absorción de agua y aceite (SAE 20-50), resistencia a la compresión, al fuego, se evaluó el coeficiente de fricción y el desgaste; los resultados obtenidos fueron que la proporción ideal de resina es de 20% combinada con fibras de plátano sin carbonizar y que la combinación de fibras calcinadas con la resina mostraron características inferiores en todas las pruebas, otro resultado fue que a mayor cantidad de resina aumenta la resistencia a la compresión, dureza y el peso específico y por otra parte disminuye la absorción de agua y aceite así como la tasa de desgaste, en general los investigadores afirman que las fibras de cascara de plátano pueden ser usadas como un sustituto del asbesto en la manufactura de pastillas de freno.

Por su parte Aigbodion., et al (2010) emplearon el bagazo de caña en una matriz de resina fenólica, el procedimiento fue el siguiente: se secó el bagazo al sol por una semana posteriormente se molió a diferentes tamaños (100, 150, 250, 350 y 710 micrómetros), las probetas se elaboraron de acuerdo al tamaño de fibra ( las cantidades fueron fijas 70% de fibra y 30% de resina), se les moldeó con una presión de 100 KN/cm<sup>2</sup> a una temperatura de 140 °C, con un intervalo de moldeo de 2 minutos y finalmente se curaron las muestras a una temperatura de 120°C durante 8 horas; las pruebas realizadas fueron: ensayo de dureza Brinell de los especímenes con una carga de 3000 kg e indentador de 10 mm, prueba de compresión la cual consistió en aplicar presión a los especímenes de 22.7mm, para determinar el porcentaje de absorción se pesaron los especímenes antes de sumergirlos en agua y aceite de motor (SAE 20-50) respectivamente a temperatura ambiente por 24 horas, al concluir ese tiempo se pesó nuevamente y se calculó la absorción, la densidad se calculó por desplazamiento de líquido y finalmente para calcular la tasa de desgaste se colocaron las muestras en una maquina habilitada

con un disco de hierro fundido y se sometió a rozamiento con una carga de 20N por 5000 m. Los investigadores concluyeron que las muestras que mostraron mejor rendimiento en todas las pruebas fueron las elaboradas con un tamaño de fibra de 100 micrómetros y proporción del 70% de la misma, este rendimiento es comparable con el desempeño que tiene una pastilla de freno fabricada con asbesto, otro resultado fue que a medida que se aumentaba el tamaño de fibra la dureza, la resistencia a la compresión y la densidad de las muestras disminuía mientras que la absorción (de agua y aceite) y la tasa de desgaste aumentaba.

Yun., et al (2010) evaluaron la viabilidad económica para elaborar materiales de fricción ecológicos empleando fibras comerciales de origen natural como refuerzo (marca JMM, a base de celulosa), usaron una matriz, fibras de relleno y modificadores del coeficiente de fricción. Se realizaron cuatro tipos de muestras con diferentes materiales y concentración de los mismos (p. ej. muestra C: resina fenólica, polvo de nitrilo de caucho, BaSO<sub>4</sub>, grafito sintético, coque, di sulfuro de molibdeno, trisulfuro de antimonio, oxido de magnesio, alúmina, silicato de circonio y fibra natural. El equipo utilizado fue microscopio electrónico de barrido, analizador termo gravimétrico y un dinamómetro. Los parámetros que se midieron fueron fricción, desgaste, estabilidad térmica y el costo de las materias primas. El resultado que se obtuvo fue que el empleo del 6% de fibra natural combinado con el resto de los materiales que conforman un material de fricción es menos costosa que una pastilla de freno ecológica de la marca OEM TM y su rendimiento de frenado es equiparable a esta.

## **1.5 Hipótesis**

Las fibras de *Agave angustifolia* Haw son un sustituto para las fibras de refuerzo que se emplean en un material de fricción comercial

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

Obtener un material de fricción con propiedades tribológicas similares a las de un material de fricción comercial, empleando fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw como refuerzo.

## **1.6.2 Objetivos específicos**

Acondicionar la fibra de bagazo de agave para emplearla como refuerzo

Diseñar y construir un molde metálico para la elaboración de las muestras

Seleccionar los materiales y elaborar el composito

Determinar las propiedades tribológicas del material compuesto mediante la norma ASTM G99

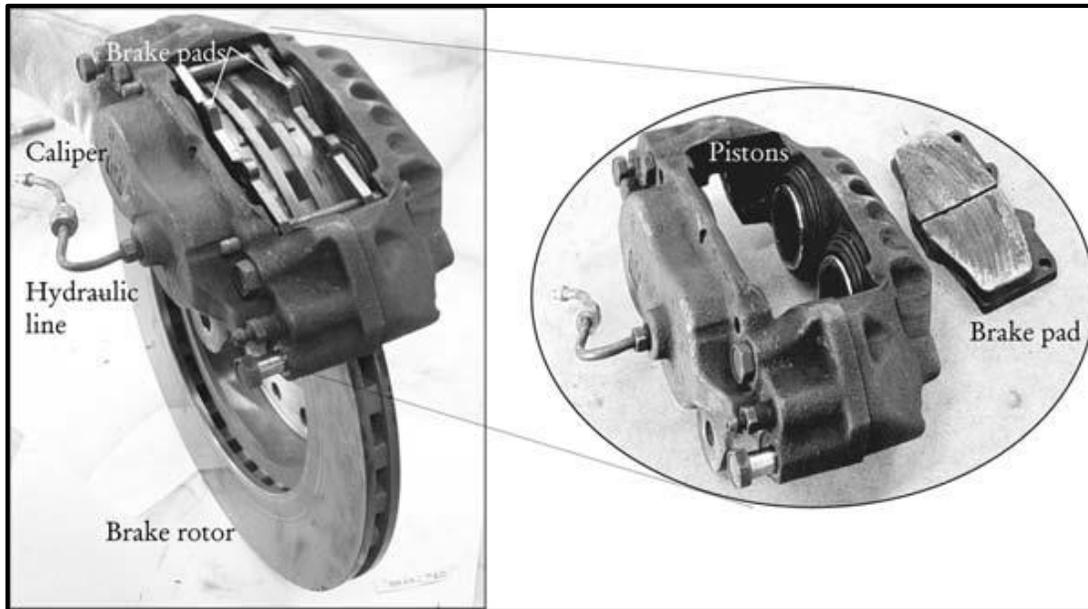
## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Materiales de fricción empleados en automóviles**

El propósito de los materiales de fricción implementados en los vehículos es desacelerar a este mediante la transformación de la energía cinética del móvil a calor, a través de la fricción, y la disipación de ese calor al medio circundante. Otros requerimientos adicionales que requieren estos compositos son: resistencia a la corrosión, peso ligero, larga vida, bajo ruido, fricción estable, baja tasa de desgaste y un costo aceptable. Los dos sistemas más comunes de frenado son de disco y de tambor (Blau, 2001).

#### **2.1.1 El Freno de disco**

El freno de disco consiste en un disco de hierro fundido atornillado al cubo de la rueda y al alojamiento estacionario que contiene el material de fricción llamado pinza como se muestra en la figura 1 la pinza está acoplada a una parte fija de la del eje del vehículo. Entre cada pistón y el disco hay una pastilla de freno mantenida en la posición mediante pasadores de retención (Gujrathi & Damale, 2015)



**Figura 1.** Pinza de freno típica y configuración del rotor

## 2.1.2 Clasificación de las balatas

Chan & Stachowiak, 2004 clasifican las pastillas de freno como se muestra en la tabla 1

**Tabla 1.** Clasificación de las pastillas de freno comerciales

Clasificación	Ingredientes
Metálica	Predominantemente metálica, con fibras de acero y cobre
Semimetálica	Mezcla metálica e ingredientes orgánicos.
Orgánica (sin asbesto)	Predominantemente orgánica con fibras minerales caucho y grafito, etc.

Las exigencias principales que deben cumplir las balatas de freno según Eriksson et al. (Citado por Gujrathi & Damale, 2015) son las siguientes

- Mantener un coeficiente de fricción lo suficientemente alto con el disco de freno.
- La balata de freno no debe alterarse o fallar de tal forma que el coeficiente de fricción con el disco de freno se vea comprometido a altas temperaturas.
- Debe exhibir un coeficiente de fricción estable y consistente con el disco de freno.

- Principales componentes de una pastilla de fricción

Erikson et al. (Citado por Gujrathi & Damale, 2015) clasifica los principales componentes de las pastillas de freno como de la siguiente manera:

- Fibras de refuerzo, las cuales proveen resistencia mecánica a las balatas de freno.
- Aglutinantes, los cuales mantienen los componentes de las balatas de freno juntos.
- Materiales para relleno, los cuales reducen el costo y mejoran la manufactura de las balatas de frenos.
- Aditivos friccionantes, los cuales determinan las propiedades de fricción de las balatas de freno y comprenden una mezcla de abrasivos y lubricantes.

### 2.1.3 Fibras de refuerzo empleadas en materiales de fricción.

En la tabla 2 se muestran fibras que comúnmente son usadas para reforzar compositos de fricción.

**Tabla 2.** Fibras de refuerzo comúnmente utilizadas en materiales de fricción

Componentes	Ventajas	Desventajas
de vidrio	Resistencia térmica suficiente (punto de fusión alto de 1430°C, pero comienza a suavizarse en aproximadamente 600°C.	Frágil.
Metálicas	Resistencia térmica suficiente del cobre y acero (puntos de fusión mayores de 1000°C.	Cantidades grandes pueden causar desgaste excesivo
Aramida	Buena rigidez en relación al peso, excelente resistencia térmica, buena resistencia al desgaste.	Suave, no puede ser usada sin otras fibras.
Titanato de Potasio (un tipo de cerámico)	Resistencia térmica (punto de fusión alto de aproximadamente 1371°C), muy duro con buena resistencia al desgaste.	Peligroso para la salud.
Sepiolita	Resistencia térmica (punto de fusión alto de aproximadamente 1550°C), es capaz de absorber líquidos.	Un peligro potencial para la salud.
Cerámico	Resistencia térmica (alto punto de fusión 1700-2040°C), buena relación rigidez/peso.	Frágil

## 2.1.4 Aglutinantes o matrices empleadas en materiales de fricción.

En la tabla 3 Se muestran las principales matrices usadas en la fabricación de materiales de fricción.

**Tabla 3.** Matrices comúnmente usadas en materiales de fricción

Componentes	Ventajas	Desventajas
Resina fenólica	Económica y fácil de producir.	Frágil, resistencia al impacto baja, altamente tóxica, se descompone a temperaturas relativamente bajas (450°C).
Resina COPNA	Resistencia a la unión muy alta mezclada con grafito (un lubricante sólido común). Por consiguiente, tiene una resistencia más alta al desgaste que la resina fenólica pura.	Se descompone en temperaturas relativamente bajas (entre 450 y 500°C).
Resina fenólica modificada-silicona	Mejor resistencia al impacto, mayor resistencia química y al calor que la resina fenólica pura; repelencia al agua mejorada.	Su base es aun fenólica y es altamente tóxica.
Resina éster cianato	Resistencia al calor muy alta, químicamente inerte, amortiguador de vibraciones.	Frágil, baja resistencia al impacto.
Resina fenólica epoxi- modificada	Mejor resistencia al calor que la resina fenólica pura.	Su base es aun fenólica y es altamente tóxica.
Resina poliamida termoplástica	Resistente a la abrasión, no exhibe deformación térmica.	Conductividad térmica tres veces más baja que la resina fenólica.

### 2.1.5 Material de relleno empleado en compositos de fricción

En la tabla 4 se describen las características más importantes de los principales rellenos que se emplean en la fabricación de materiales de fricción.

**Tabla 4.** Principales rellenos utilizados en la fabricación de materiales de fricción

Material para relleno	Descripción
Sulfato de Bario	Imparte estabilidad térmica a la balata de freno, ayuda con la fricción de los materiales.
Carbonato de calcio	Imparte estabilidad térmica a la balata de freno.
Mica	Suprime el ruido provocado en las balatas de freno.
Vermiculita	Suprime el ruido provocado en las balatas de freno, pero tiene resistencia baja al calor.
Titanatos de metales alcalinos	Contribuye a la estabilidad del coeficiente de fricción.
Trióxido de molibdeno	Previene la deformación térmica y agrietamiento de la balata bajo condiciones de alta temperatura.
Polvo de maní	Contiene el ruido provocado en las balatas de freno, pero no se adhiere bien con algunos otros materiales.
Polvo de caucho	Contiene el ruido provocado en las balatas de freno, pero no se adhiere bien con algunos otros materiales.

### 2.1.6 Modificadores del coeficiente de fricción empleados en materiales de fricción

En la tabla 5 se enlistan los principales materiales que son empleados en la fabricación de materiales de fricción, así como los efectos que causan en el desempeño de estos.

**Tabla 5.** Modificadores de coeficiente empleados en los materiales de fricción

Aditivos de fricción	Descripción
Grafito	Ampliamente usado como lubricante sólido, disponible en formas sintética y natural y en hojuelas y polvo. Es capaz de formar una capa de lubricante estable sobre cualquier superficie.
Sulfuros de metal	Buenas propiedades lubricantes, con conductividades más bajas que el grafito, ejemplos incluyen los sulfuros de antimonio/estaño/cobre/plomo.
Óxidos metálicos/silicatos	Abrasivos con durezas fluctuando entre 500 HV (cuarzo) a 1750 HV (óxido de aluminio-alúmina); ejemplos incluyen cuarzo (SiO <sub>2</sub> ), silicato de zirconio, óxido de zirconio (ZrO <sub>2</sub> ), óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).

## 2.2 Fibras naturales

Las fibras naturales se clasifican en dos ramas importantes las cuales son:

Fibras animales

Fibras vegetales

La clasificación particular que propone Raymond et al. (Obra citada en Tapia, et al., 2006) para las fibras vegetales se describe a continuación:

Hierbas y cañas.- fibras provenientes de tallos de plantas monocotiledóneas, por ejemplo: hierbas y paja de trigo, arroz, cebada, entre otras

Hojas.- fibras que se encuentran a lo largo de hojas de plantas monocotiledóneas, por ejemplo: abacá, sisal, henequén, entre otras.

Tallos.- provenientes de la corteza interna de plantas dicotiledóneas; por ejemplo: lino yute, cáñamo, kenaf, entre otras

Semillas e hiladuras de frutos.- incluye y también las sedas; por ejemplo: algodón.

Fibras maderables.- fibras de madera dura (angiospermas) y maderas suaves (gimnospermas); por ejemplo.- maple, eucalipto, pino.

### 2.2.1 Fibra de bagazo de *agave Angustifolia* Haw

El bagazo es un subproducto resultante de la destilación del mezcal, el cual se realiza de forma artesanal siguiendo el siguiente proceso:

- 1.- Cosecha de la piña de los magueyes de 8 años
- 2.- seccionado de las piñas (se cortan con machete en cuartos o mitades)
- 3.- Cocción de los trozos de piña en horno bajo tierra a una temperatura de 800 °C
- 4.- Molienda en trapiche (rueda de piedra)
- 5.- Fermentación en tinajas de madera de fibras y jugos
- 6.- Se someten a destilación en alambique de cobre durante 7 horas a una temperatura de 94 °C
- 7.- Se desecha el bagazo

En la tabla 6 Se muestran los resultados de la caracterización física y química de las fibras del bagazo cocido de *Agave angustifolia* Haw.

**Tabla 6.** Características físicas y químicas de las fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw

Parámetro	Resultado
Densidad	414.7 kg/m <sup>3</sup>
Diámetro del haz fibroso	501 µm
Longitud del haz fibroso	144 mm
Contenido de humedad	7.78 ± 0.37 %
Solubilidad en agua fría	2.66 ± 0.12 %
Solubilidad en agua caliente	4.39 ± 0.32 %
Solubilidad en NaOH al 1%	20.22 ± 0.27 %

Extractivos en etanol/tolueno	1.54 ± 0.11 %
Extractivos totales	5.30 ± 0.40 %
Lignina Klason	17.91 ± 1.02 %
Lignina Soluble	2.78 ± 0.35 %
Lignina total	20.69 ± 0.97 %
Holocelulosa	82.12 ± 0.49 %
Celulosa	48.04 ± 1.36 %
Hemicelulosa	34.08 ± 1.03 %
α-Celulosa	55.03 ± 0.33 %
Contenido de cenizas	1.28 ± 0.06 %

---

*Fuente: Hidalgo (2010)*

## 2.3 Materiales poliméricos

La palabra polímero significa, muchas partes. En este sentido se puede considerar como un material polimérico sólido aquel que contiene múltiples partes o unidades enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido. Cuando se combina un polímero con varios aditivos al material resultante se le denomina plástico. Los plásticos se dividen en dos clases termoplásticos y termofijos según sean los enlaces químicos de su estructura (William & Javad Hashemi, 2006).

### 2.3.1 Polímeros termoplásticos

A los materiales termoplásticos es necesario calentarlos para darles su forma y después enfriarlos, de este modo adquieren y conservan su forma que se les dio. Estos materiales pueden volverse a calentar cierto número de veces para darles nuevas formas sin que haya un cambio significativo en sus propiedades (op cit.).

### **2.3.2 Polímeros termofijos**

Los polímeros termofijos se llaman así porque una vez que se completa la polimerización no es posible una deformación adicional. La densidad de enlaces cruzados es tan alta que tampoco es posible una deformación elástica significativa; el polímero es frágil pero tiene un módulo elástico y una resistencia a la temperatura relativamente alto (Schey, 2002).

#### **2.3.2.1 Proceso de moldeo por compresión en materiales termofijos**

William & Javad Hashemi, 2006 indica que muchas resinas termofijas, como las de fenol-formaldehído, urea-formaldehído y melanina-formaldehído, son moldeadas mediante el proceso de moldeo por compresión. En el moldeo por compresión la resina plástica que puede estar precalentada, se carga en un molde caliente que tiene una o varias cavidades. La parte superior del molde es presionada hacia abajo sobre la resina plástica y la presión aplicada y el calor funden la resina. Es necesario continuar aplicando calor (generalmente un minuto o dos) para completar los enlaces entrecruzados de la resina termoestable.

Este mismo autor describe las siguientes ventajas del moldeo por compresión las cuales son:

Debido a la relativa sencillez de los moldes el costo inicial de estos es bajo

El flujo relativamente corto del material reduce el desgaste y la abrasión de los moldes

La producción de piezas grandes es más factible

Es posible que los moldes sean más compactos debido a la sencillez del molde

Los gases que se desprenden de la reacción de curado pueden escapar durante el proceso de moldeo

Las desventajas del moldeo por compresión son:

Con este proceso es difícil obtener piezas con formas complicadas

Puede ser difícil mantener los insertos dentro de los márgenes de tolerancia

Es necesario recortar las rebabas de las piezas moldeadas

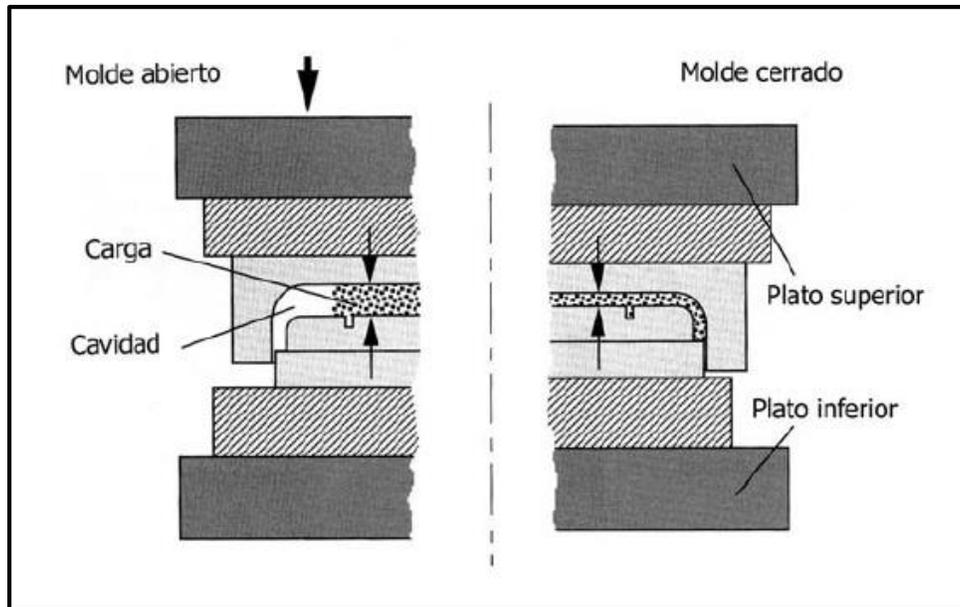


Figura 2. Esquema del proceso de moldeo por compresión

## 2.4 Tribología

Los diccionarios definen a la Tribología como la ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas. La Tribología es el arte de aplicar un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento, y desgaste del equipo técnico, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas. El entendimiento de las interacciones superficiales en una interfase requiere tener conocimiento de varias disciplinas incluyendo la física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, reología, lubricación, diseño de máquinas, desempeño y confiabilidad (Díaz del Castillo, 2007).

### 2.4.1 Mecanismos de desgaste

#### 2.4.1.1 Desgaste abrasivo

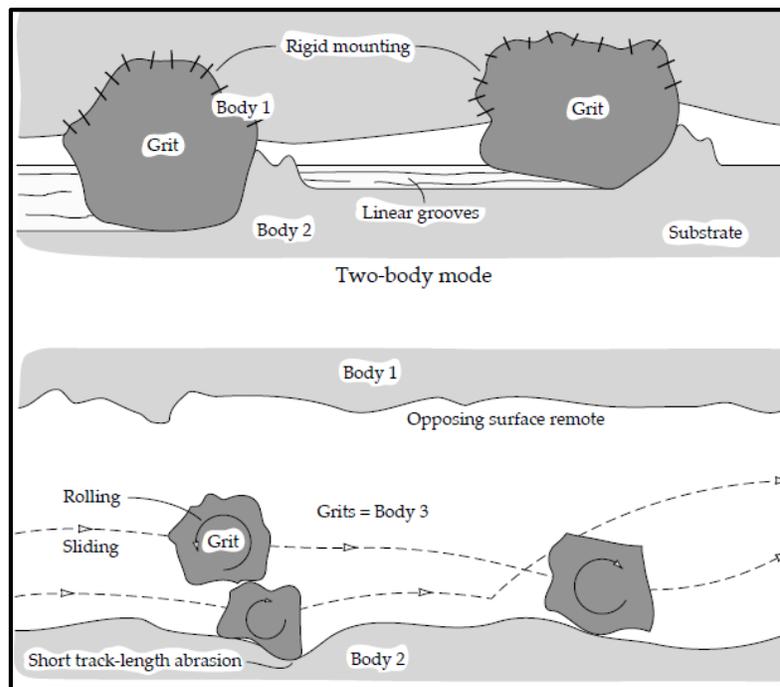
El desgaste abrasivo según Stachowiak & Batchelor, 2014 se produce cuando un objeto sólido se carga contra partículas de un material que tienen igual o mayor dureza. El grado de desgaste por abrasión es mucho mayor de lo que se puede realizar. Cualquier material, puede causar desgaste abrasivo si las partículas duras están presentes. Por ejemplo, un material orgánico, tal como caña de azúcar, se asocia con el desgaste abrasivo de cortadores de caña y trituradoras debido a la pequeña fracción de sílice presente en la planta.

La forma en que las partículas pasan sobre la superficie desgastada determina la naturaleza del desgaste abrasivo. La literatura denota dos modos básicos de desgaste abrasivo:

- De dos cuerpos
- Desgaste abrasivo de tres cuerpos.

El desgaste abrasivo de dos cuerpos se ejemplifica por la acción del papel de lija sobre una superficie.

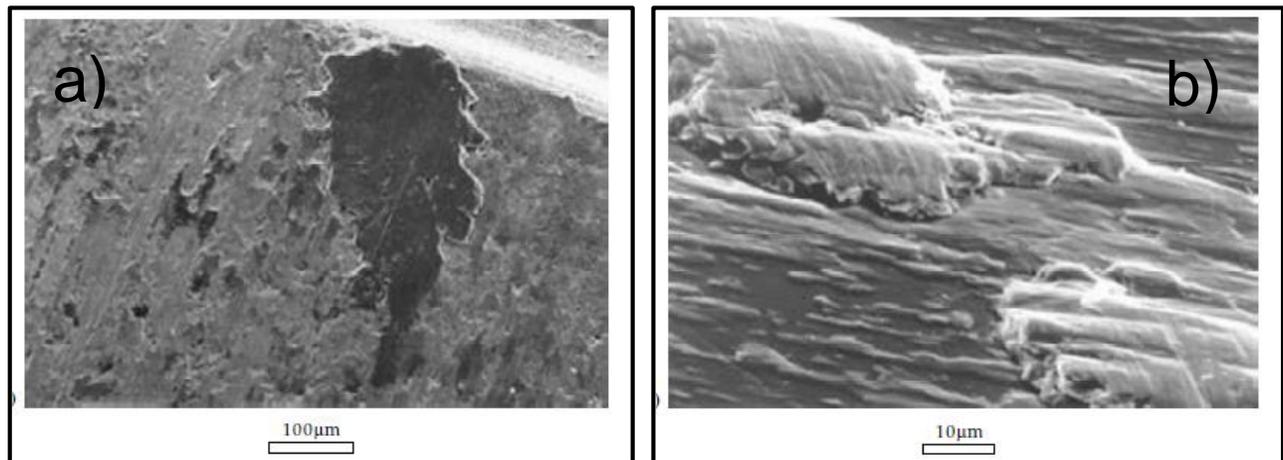
Asperezas duras o granos rígidamente sostenidos pasan sobre la superficie como una herramienta de corte. En desgaste abrasivo de tres cuerpos, los granos están libres de rodar, así como deslizarse sobre la superficie, ya que no se mantienen rígidos.



**Figura 3.** Desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos

### 2.4.1.2 Desgaste adhesivo

Esta forma de desgaste ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interface donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.



**Figura 4.** Ejemplos de transferencia de película metálica: a) transferencia de película de latón sobre alúmina y b) película de transferencia de aleación de Al-Si sobre un anillo de pistón.

### 2.4.2 Fuerza de fricción

La Fricción se puede definir como la fuerza tangencial de resistencia a un movimiento relativo de dos superficies de contacto.

$$F = \mu \cdot N$$

Donde N representa la fuerza normal y  $\mu$  representa la fricción. Aquí se trabaja con dos valores. En una muestra inmóvil tenemos la fricción estática, particularmente la fuerza requerida para crear movimiento dividido por la fuerza que presiona a la vez el cruzamiento de superficies. Esta medida es frecuentemente conocida como el coeficiente estático de fricción.

Para una muestra en movimiento tenemos la fricción dinámica (también llamada fricción cinética), que es la fuerza requerida para sustentar movimiento en una

velocidad superficial especificada dividida por la fuerza que presiona a la vez el cruzamiento de superficies. De manera similar se usa todavía el término de coeficiente dinámico de fricción (Brostow, et al., 2003).

#### **2.4.2.1 Leyes de la fricción**

La relación es comúnmente referida a las primeras leyes concernientes a la fricción formuladas en 1699 por Amontons, particularmente:

- a) La resistencia causada por la fricción es proporcional a la carga
- b) Esa resistencia es independiente del área aparente de contacto (Op.cit.)

#### **2.4.2.2 Tasa de desgaste de superficies con movimiento relativo**

La vida útil de los componentes cuya función tribológica que demanda ambientes es controlada por el desgaste. Usualmente esto es cuantificado evaluando la tasa de desgaste específica (ecuación 1).

$$U_{sp} = V_{loss} / (F \cdot D) \text{ (ecuación 1)}$$

Donde  $V_{loss}$  representa la pérdida volumétrica de la muestra, F la fuerza aplicada y del total de la distancia deslizable (Op.cit.)

### **2.5 Ensayo de dureza**

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Se han inventado una diversidad de pruebas de dureza, pero las de uso más común son los ensayos Rockwell y Brinell (Op. cit)

#### **2.5.1 Ensayo de dureza Brinell**

En este ensayo, una esfera de acero duro (por lo general de 10mm de diámetro), se oprime sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión generada comúnmente de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza o índice de dureza Brinell a partir de la ecuación 2:

$$HB = \frac{F}{(\pi/2)D(D - \sqrt{D^2 - Di^2})} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde F es la carga aplicada en kilogramos, D es el diámetro del penetrador en mm y Di es el diámetro de la impresión en mm (Askeland, 1998).

## 2.5.2 Ensayo de dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de la penetración es medida automáticamente por el instrumento y se convierte a índice de dureza Rockwell (Op. cit).

## 2.5.3 Otros ensayos de dureza

Los ensayos Vickers y Knoop son pruebas de micro dureza; producen penetraciones tan pequeñas que se requiere de un microscopio para obtener su medición (Op.cit).

## 2.5.4 Comparación entre los ensayos de dureza

En figura 1 se muestra las recomendaciones de los ensayos de dureza dependiendo del material a ensayar

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Figura 5. Recomendación para los ensayos de dureza (Askeland, 1998)

## 2.6 Transferencia de calor por conducción

Cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde  $q$  es la rapidez de transferencia de calor y  $\frac{\partial T}{\partial x}$  es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. A la constante positiva  $k$  se le llama la conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura. A esta ecuación se le llama la ley de conducción de calor de Fourier en honor al físico matemático francés Joseph Fourier (Holman, 1999)

## 2.7 Conductividad térmica

La ecuación 4 es la igualdad que define la conductividad térmica. Basándose en esta definición, se pueden realizar mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes materiales.

La energía térmica puede ser conducida en los sólidos de dos modos: vibración de red y transporte por medio de electrones libres. En los buenos conductores eléctricos un gran número de electrones libres se mueven en la estructura de la red del material.

De la misma manera que estos electrones pueden transportar carga eléctrica, también pueden llevar energía térmica de una región de alta temperatura a una de baja temperatura, como ocurre en los gases. De hecho, con frecuencia nos referimos a estos electrones como gas de electrones. La energía también se puede

transmitir como energía vibracional en la estructura de red del material. No obstante, en general, este último modo de transferencia de energía no es tan grande como el transporte por electrones y por esta razón los buenos conductores eléctricos son casi siempre buenos conductores de calor, a saber cobre, aluminio y plata, y los aislantes eléctricos son casi siempre buenos aislantes del calor (Op.cit.)

### **CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOS**

La metodología que se siguió en el presente trabajo de investigación se muestra en la figura 6

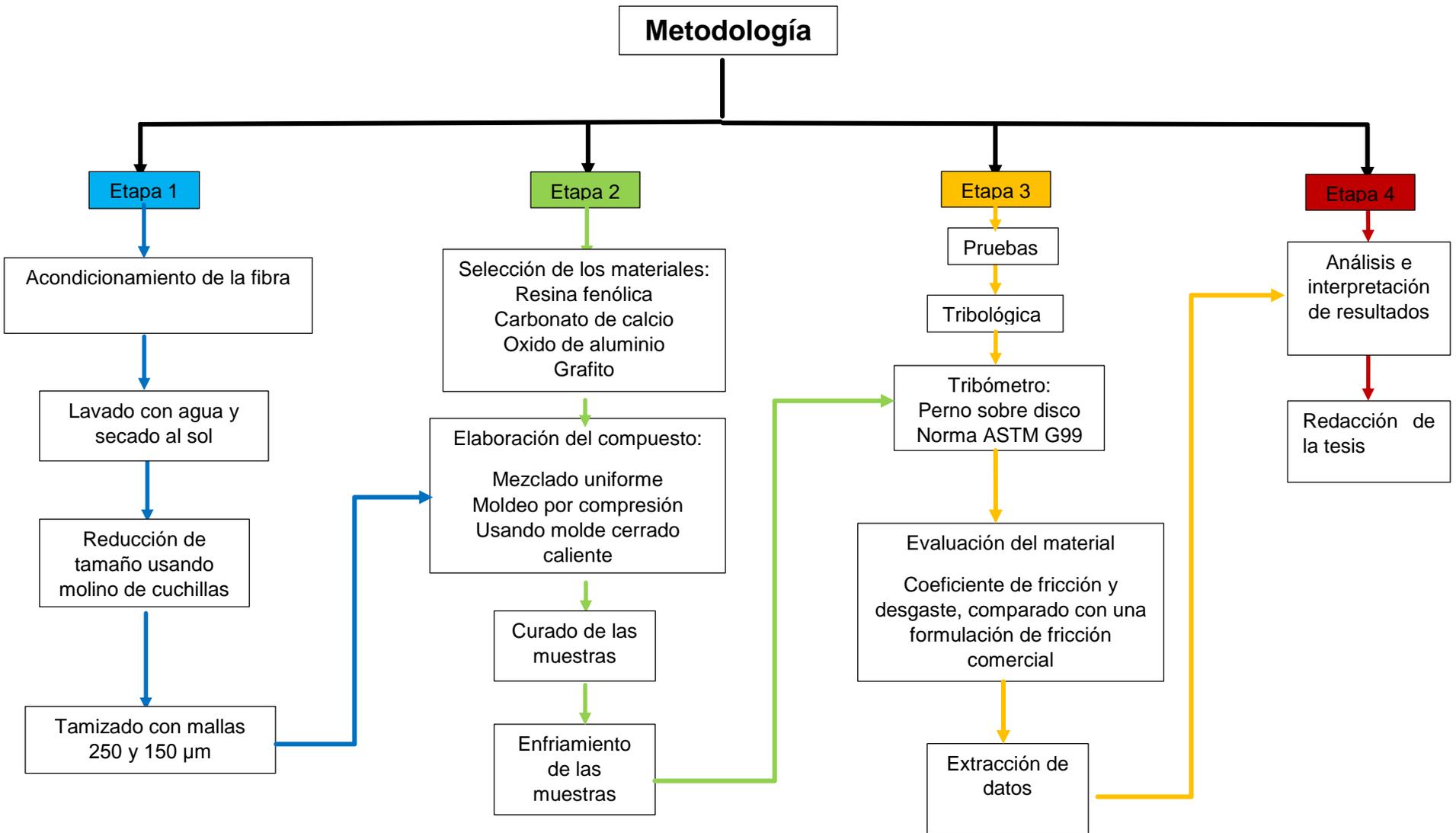


Figura 6. Metodología seguida en la investigación

### **3.1 Colecta de la fibra**

A partir de la norma NMX-AA-015-1985 se establece el método de cuarteo para la obtención de una población de 10 kg de bagazo para los análisis en el laboratorio. El método consiste en traspalear el material formando un montículo, posteriormente se divide en cuatro partes iguales, denominadas sectores A, B, C y D se eliminan las partes opuestas A y C ó B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 Kg de residuos sólidos. De las partes eliminadas del primer cuarteo, se toman 10 Kg aproximadamente de residuos sólidos para los análisis del laboratorio

### **3.2 Acondicionamiento de la fibra**

#### **3.2.1 Lavado**

Una vez que se ha colectado la fibra se procede a limpiar la fibra mediante el método reportado en el CIIDIIR Oaxaca (Caballero Caballero, et al., 2014)

#### **3.2.2 Reducción de tamaño**

Para obtener los tamaños de la fibra de Agave se procederá a moler las fibras en un molino de cuchillas que tenga capacidad para moler fibras vegetales hasta 100  $\mu\text{m}$ .

### **3.3 Tamaño de los pines**

Según la norma ASTM G-99 el tamaño de las muestras puede variar en forma cilíndrica esférica y también con perfil cuadrado, los tamaños de los pernos tienen un rango de 2-10 mm. El tamaño seleccionado es de 10 X 10 X 25 mm y perfil cuadrado.

### **3.4 Resina termo fija**

Para la matriz del compuesto se usó resina fenólica FR-2026 en su presentación en polvo, la cual es un polímero termo fijo que requiere un moldeo por compresión en molde caliente y un proceso de curado que mejora la sinterización. El proveedor fue FENORESINAS.

### 3.5 Ingredientes del composito de fricción

Los materiales se eligieron de acuerdo a la resistencia térmica que presentan, esto debido a que la fibra tiene una resistencia relativamente baja de la misma. Los materiales elegidos son:

Carbonato de calcio

Oxido de Aluminio

Grafito

El proveedor de estos materiales fue SURQUIMED Oaxaca

### 3.6 Molino para fibras

El molino con el que se cuenta para esta actividad es un molino de cuchillas marca FRITSCH, modelo PULVERISETTE 19, con motor de 1.5 KW, rotor con corte en "V", ideal para materiales de dureza media, quebradizas y muestras fibrosas (figura 7) ubicado en el laboratorio de Biomacromoléculas del CIIDIR-IPN Oaxaca.



**Figura 7.** Molino de cuchillas FRITSCH

### 3.7 Mezcladora de los polvos

Para mezclar de forma homogénea los diferentes materiales se utilizó una mezcladora eléctrica especial para polvos Hamilton Beach Ecelectrics, modelo 63220 ubicada en el laboratorio de concretos del CIIDIR-IPN Oaxaca.



**Figura 8.** Mezcladora de polvos Hamilton Beach

### **3.8 Máquina tribológica de perno sobre disco (pin on disk, ASTM G99)**

Equipado con un disco de hierro fundido, carga regulable y ajuste de velocidad angular, este equipo se encuentra en el laboratorio Z4 de la SEPI ESIME-Zacatenco (figura 9).



**Figura 9.** Máquina pin on disk

### 3.9 Diseño experimental

Para comprobar la hipótesis se deben realizar los siguientes experimentos:

Prueba de fricción y desgaste del material compuesto

Para este experimento la variable dependiente que se estudió fue la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción

Los factores de interés para dicho experimento son:

El tamaño de la fibra que se estableció en un rango entre 150 y 250  $\mu\text{m}$ .

Proporción de los componentes, los cuales eligieron siete diferentes formulaciones.

Las pruebas se realizaron con carga normal constante 52.5N

Las velocidad de ensayo fue constante: 0.94 m/s

La tabla 7 muestra el diseño de experimento de un solo factor con tres repeticiones, el cual resulta en 21 unidades experimentales.

**Tabla 7.** *Diseño de experimento con un solo factor y tres repeticiones*

Replica	Formulación						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	FC
1							
2							
3							

### 3.10 Acondicionamiento de la fibra de bagazo de agave para emplearlas en el material de fricción

En esta parte del trabajo se realizaron las labores de lavado, reducción de tamaño y tamizado del bagazo de *Agave angustifolia* How con el objetivo de emplearlas como refuerzo en el material de fricción.

#### 3.10.1 Colecta del material

El material se colectó en el palenque “Bianii” el 15 de Abril del 2016, el bagazo tenía 2 días de haberse desechado, cabe mencionar que esta fábrica de mezcal está certificada ante COMERCAM A.C y se encuentra en el municipio de Santiago Matatlán cuyo distrito es Tlacolula (ver figura 10). Este distrito es el mayor productor y empleador de plantas de agave en el estado de Oaxaca, consumiendo 47% de las plantas disponibles en todo el territorio mezcalero (Palma, et al., 2016).

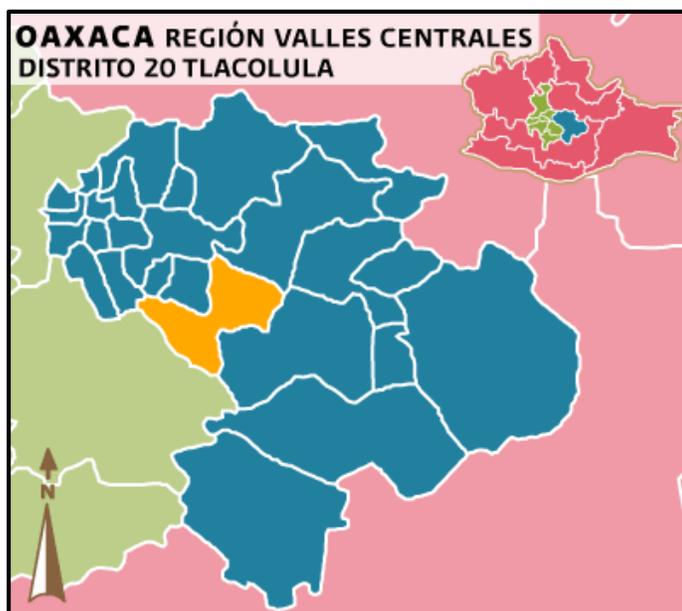


Figura 10. Ubicación de la zona de recolección de bagazo

Para realizar la colecta del bagazo, se empleó el método de cuarteo NMX-AA-015-1985, correspondiente a residuos sólidos municipales. El material se colectó en el palenque anteriormente mencionado utilizando bieldos, bolsas de polietileno, guantes de látex, cajas plásticas, cubetas y cámara fotográfica. El procedimiento se muestra en la figura 10 a,b,c,d. El montón de bagazo se traspaleó con el bieldo, hasta que se tuvo un montón aproximadamente homogéneo, posteriormente se dividió en cuatro partes iguales

(cuadrantes) después se eligieron dos partes opuestas y se extrajeron por último se envasó en las bolsas de polietileno y estas se depositaron en una caja plástica para su transporte.

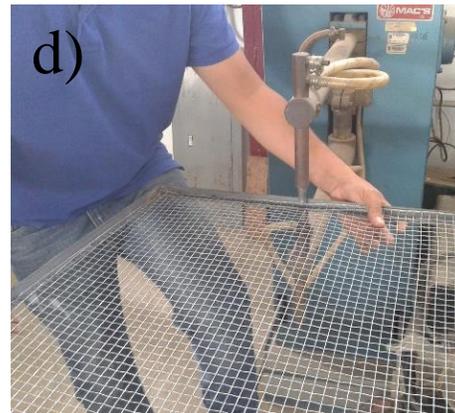
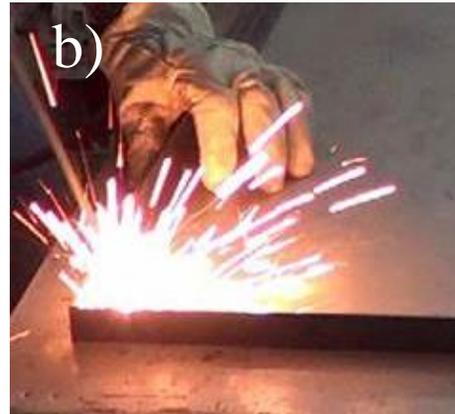


**Figura 11.** Uso del método de cuarteo para la colecta del material a) traspaleo, b) cuarteo, c) embolsado y d) sellado en caja para su traslado

### 3.10.2 Lavado del bagazo

Una vez que se contaba con el material de estudio en las instalaciones del CIIDIR Oaxaca, se procedió a limpiar el material. El procedimiento de lavado de bagazo reportado por Caballero Caballero, et al., 2014 fue modificado al emplear un lavado a presión de agua con una hidrolavadora, cabe señalar que esta actividad se realizaba solo con las manos.

El empleo de la hidrolavadora genero la necesidad de contar con un dispositivo de sujeción de la fibra al momento de lavarla. Por esta razón se construyeron los marcos de lavado, estos se fabricaron con un perfil de acero comercial de 3/4" y una malla galvanizada de 12 mm de abertura el proceso de construcción se muestra en la figura 12.



**Figura 12.** Construcción de los marcos de lavado a) cortado del material b) soldado del marco C) corte de la malla y d) soldado de la malla en el marco

### 3.10.2.1 Procedimiento de lavado

El lavado del bagazo se logró llevando a cabo lo siguiente: Extracción de materiales distintos a las fibras (piedras, residuos de leña, bagazo incinerado, etc), remojo del material con agua potable durante 24 horas, drenado del agua de remojo, colocación del

bagazo en los marcos de limpieza, lavado a presión con hidrolavadora (karcher, modelo K4), secado al sol durante 2 horas y una vez seco se guardó en bolsas de polietileno.



**Figura 13.** proceso de lavado del bagazo de agave a) pre selección de la fibra, b) remojo c) lavado a presión y d) secada al sol.

### 3.11 Determinación de la calidad del lavado

Para poder validar el nuevo método de lavado se realizaron pruebas del grado de limpieza de las fibras con dos métodos, los cuales fueron:

Observación superficial de la fibra

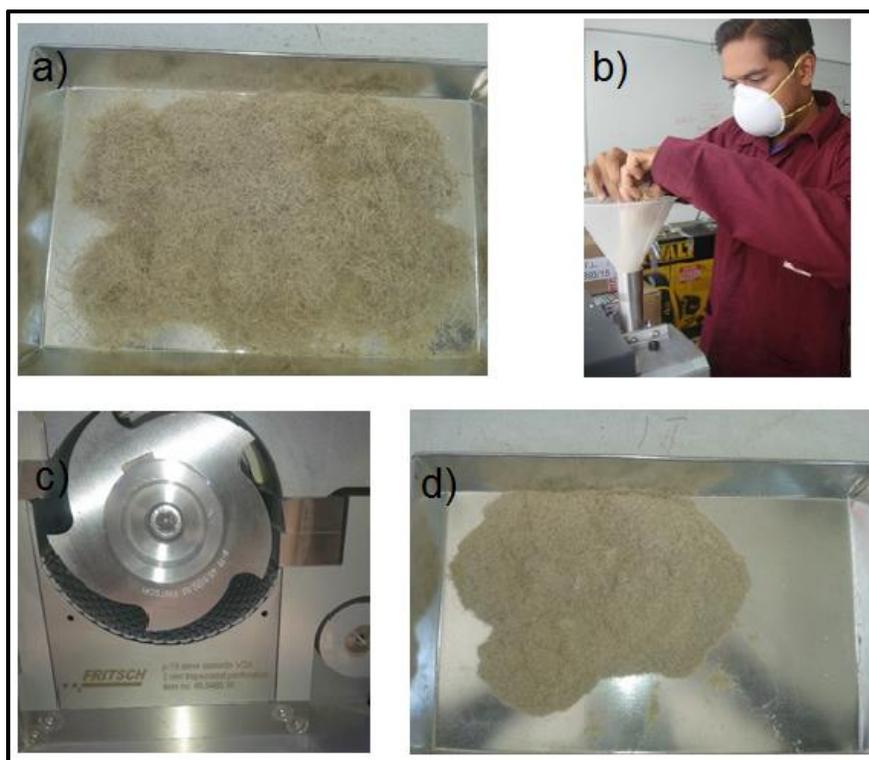
Para observar la el estado superficial de la fibra (limpieza y daño) se utilizó un microscopio óptico Carl zeiss, modelo Stemi 2000-C habilitado con cámara digital el cual

### 3.11.1 Medición del pH

En esta prueba se tomó una muestra al azar y se cortaron las fibras a una longitud aproximada de 1mm usando unas tijeras, la cantidad de la fibra cortada que se uso fue de 2g +- 0.001g, posteriormente se colocó la fibra y agua destilada en un vaso de precipitados y finalmente se midió el pH empleando un medidor de pH portátil marca HACH. Se realizaron dos repeticiones

### 3.12 Reducción de tamaño

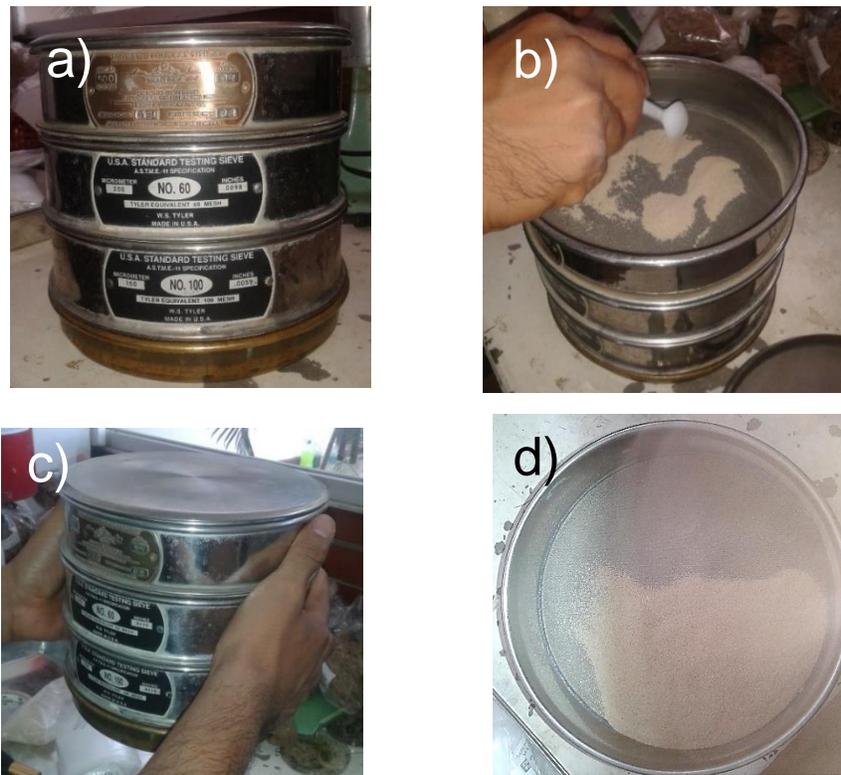
Una vez que se contaba con la fibra limpia y seca se procedió a reducirla de tamaño, esta actividad se hizo en cuatro etapas las cuales fueron: corte con tijeras a una longitud aproximada de 50mm, posteriormente se empleó un molino de cuchilla de la marca FRITSCH modelo PULVERISETTE 19, colocando la rejilla de corte de 2mm, cuando toda la fibra se tenía a esa longitud se cambiaron las rejillas de 1mm, 0.5mm y 0.200mm respectivamente. Posteriormente se tamizo utilizando el tamiz del número 60 (250  $\mu$ m).el procedimiento se muestra paso a paso en la figura 14.



**Figura 14.** Procedimiento para la reducción de tamaño a) cortado previo con tijera b) molienda c) cambio de las rejillas y d) tamaño final de la fibra

### 3.13 Tamizado

Posterior a la molienda se procedió a tamizar las fibras con tamices normalizados según ASTM-E-11, los números de malla usados fueron tamiz #60 y el #100 (figura ¿??). Las fibras que se seleccionaron fueron las que pasaron por la malla 60 pero quedaron retenidas en la malla 100.



**Figura 15.** Secuencia de tamizado de fibras a) preparación de tamices b) colocación de la fibra, tamizado a mano y d) fibra seleccionada

### 3.14 Verificación de la calidad de la molienda

Para verificar la calidad de la reducción de tamaño se empleó el análisis de las imágenes de las fibras molidas, esto se llevó a cabo con el uso del microscopio óptico Carl Zeiss, modelo Stemi 2000-C.

### 3.15 Elaboración de las muestras

Para elaborar el material compuesto se procedió de acuerdo con las etapas mostradas en el diagrama de la figura 16

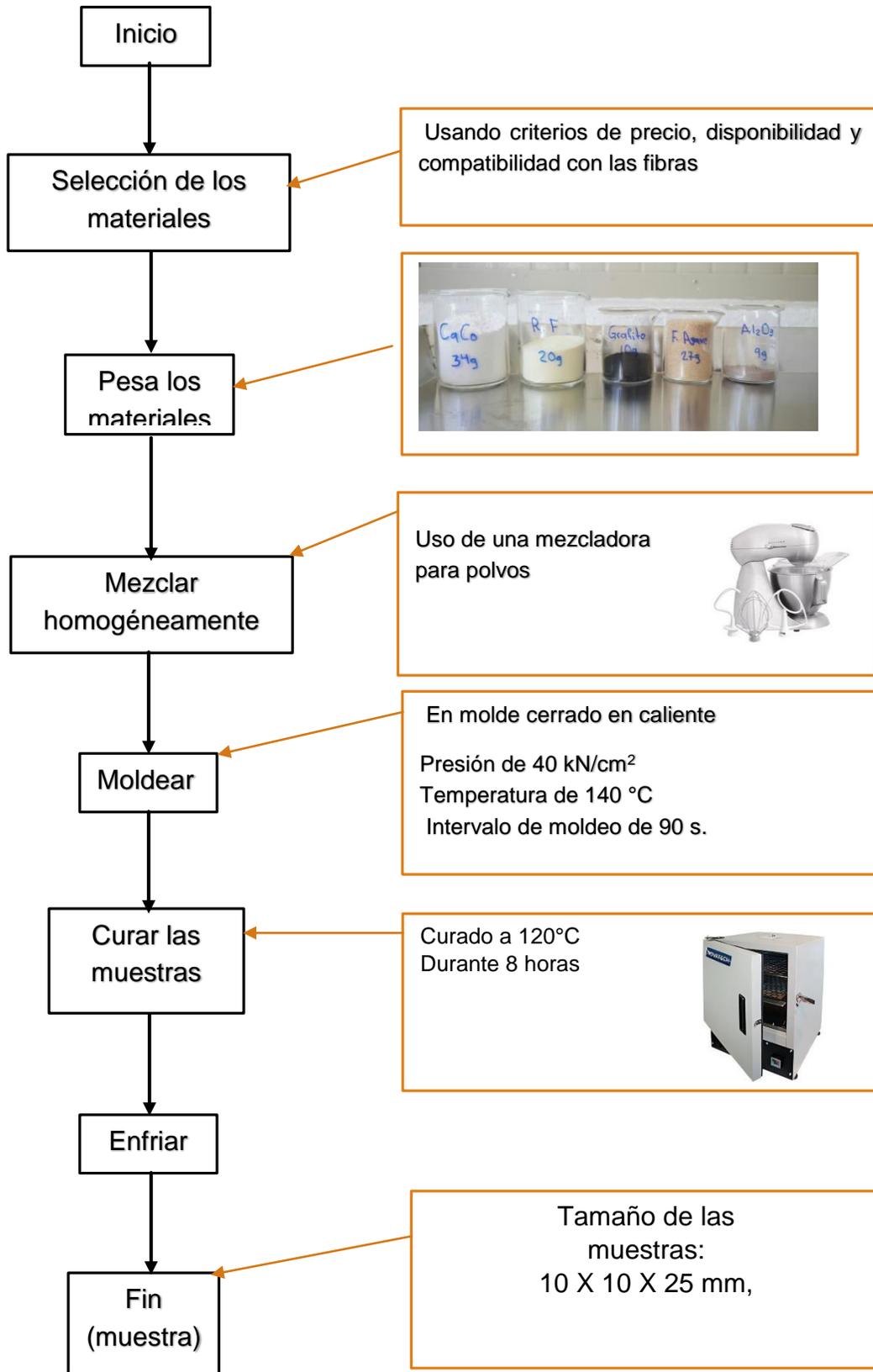


Figura 16. Diagrama para la elaboración de las muestras

### 3.15.1 Medición de los materiales (proporción en masa)

Una vez que se habían diseñado las formulaciones se procedió a la medición de las proporciones, mismas que se llevaron a cabo con el empleo de una balanza analítica marca BOECO, modelo BWL 51, guantes de látex y vasos de precipitados (figura 17 a). Se tomó como 100% de la formulación a 100g de la misma, esto se determinó a partir de la elaboración de las muestras de prueba del molde, en las cuales se midieron cantidades de aproximadamente 5g por muestra. Las cantidades de los materiales se muestran en la tabla numero 8



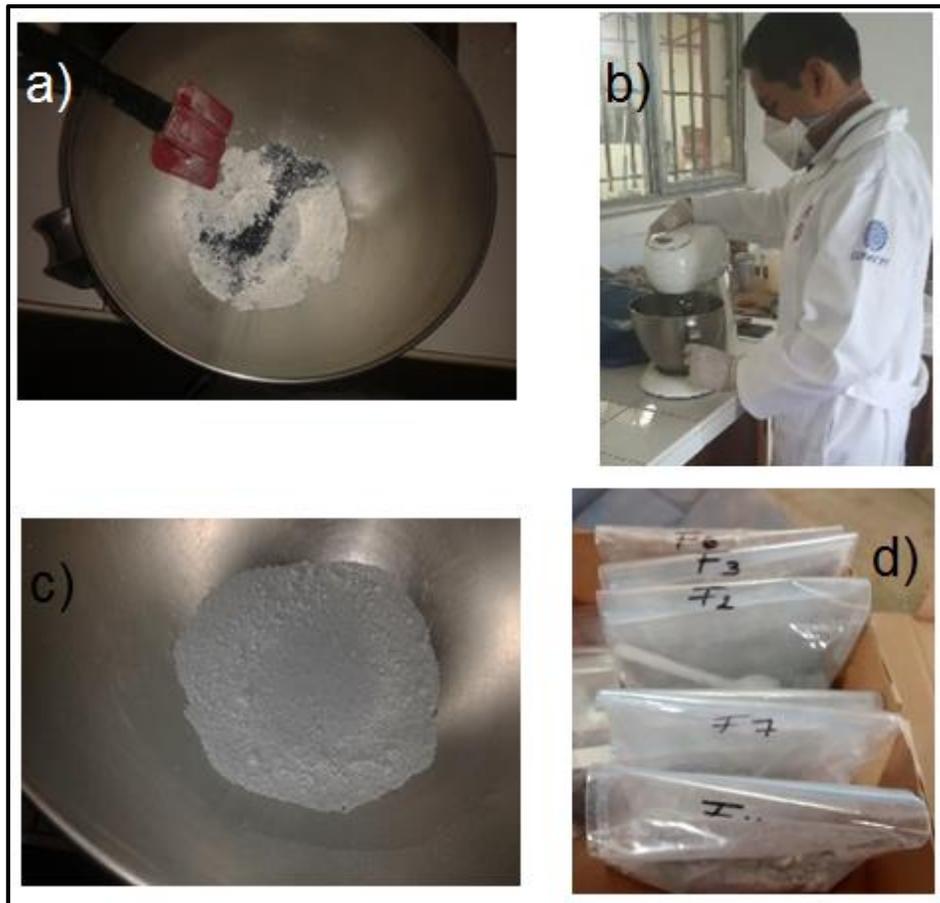
**Figura 17.** Medición del peso de los ingredientes a) empleo de la balanza y b) materiales listos para mezclar

**Tabla 8.** Proporciones de ingredientes para la elaboración de compositos

	Formulaciones (en %)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Carbonato de calcio	34	17	47.5	34	61	39
Fibras de agave	27	44	13.5	32	0	27
Resina fenólica	20	20	20	20	20	20
Oxido de Aluminio	9	9	9	9	9	9
Grafito	10	10	10	5	10	5

### 3.15.2 Mezclado de los materiales

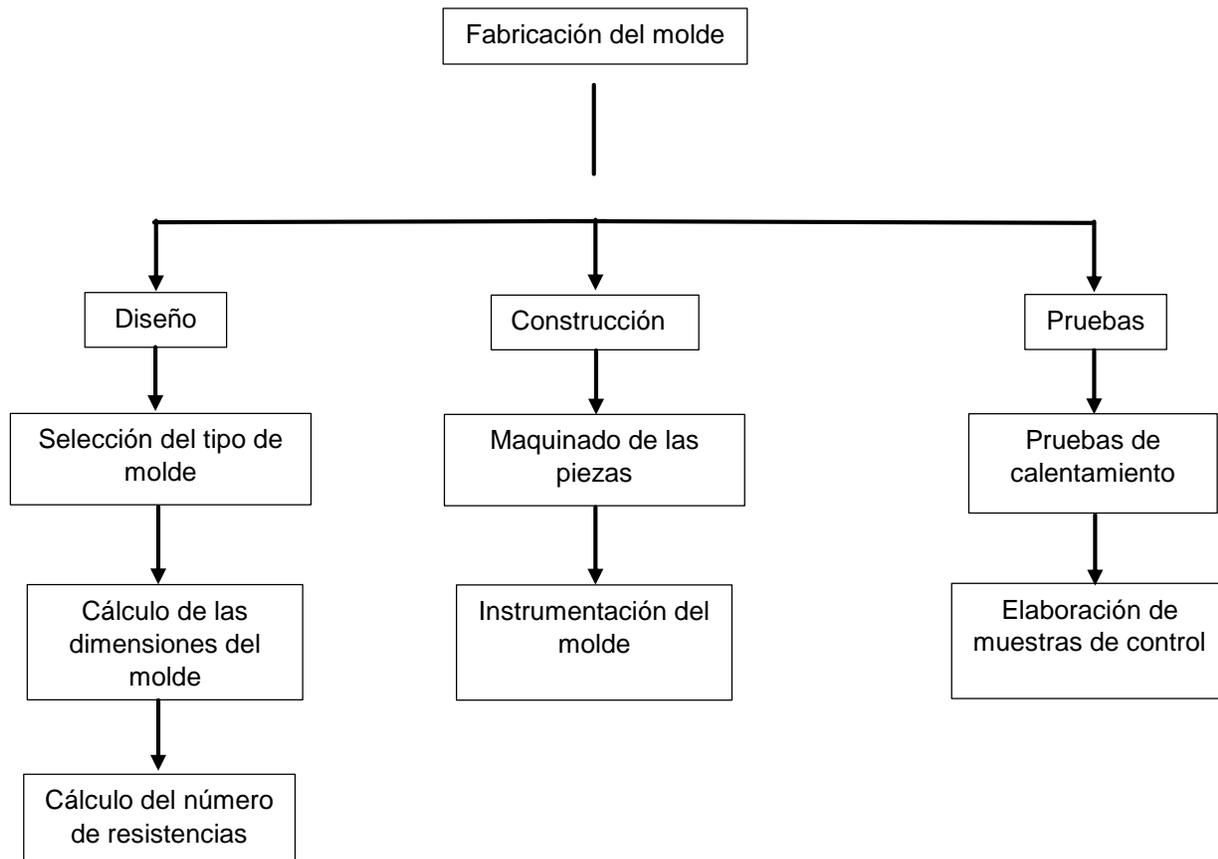
Para lograr una mezcla aproximadamente homogénea se empleó la mezcladora de polvos Hamilton Beach Eclectrics, modelo 63220. El proceso de mezclado se realizó agregando los materiales uno a uno con un tiempo intermedio entre las sustancias de 2 minutos y una vez que se agregaron todos los ingredientes continuo el mezclado por 5 minutos más. El orden de la incorporación de los ingredientes fue el siguiente: carbonato de calcio, resina fenólica, grafito, fibras de agave y finalmente el óxido de aluminio. La secuencia completa del mezclado se muestra en la figura 18.



**Figura 18.** Proceso de mezclado de los ingredientes a) incorporación individual de los ingredientes, b) mezclado, c) mezcla final y d) envasado y etiquetado de la mezcla

### 3.16 Elaboración del compuesto

Para elaborar las muestras se tuvo la necesidad de diseñar y construir un molde cerrado de placa caliente de tres piezas, el diagrama de construcción se muestra en la figura 19



**Figura 19.** Diagrama para la fabricación del molde cerrado de placa caliente

#### 3.16.1 Selección del tipo de molde

Según Schey (2002) la forma de la pieza dicta que procesos se pueden considerar para fabricarla y en forma general al elevarse la complejidad se reduce el rango de procesos aplicables y se incrementa el costo del diseño y la manufactura. En la figura 20 Se muestra una clasificación de las formas de acuerdo con sus características geométricas.

Incremento de la complejidad espacial →

Abreviación	0 Sección transversal uniforme	1 Cambio en el extremo	2 Cambio en el centro	3 Curva espacial	4 Un extremo cerrado	5 Ambos extremos cerrados	6 Elemento transversal	7 Irregular (compleja)
R(edonda)								
B(arra)								
S(ección, abierta) SS(emicerrada)								
T(ubo)								
F(plana)								
Sp(esférica)								
U(corte segado)								

**Figura 20.** Clasificación de las formas de acuerdo con sus características geométricas

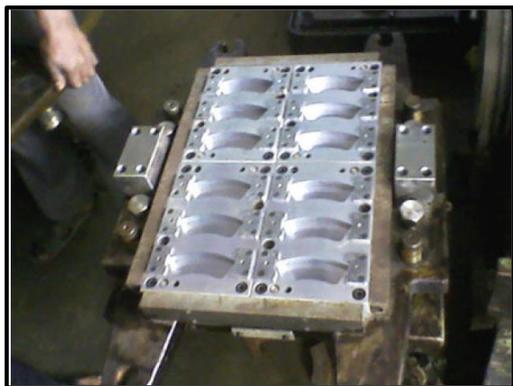
Una vez que se ha tomado en cuenta la forma y sabiendo que el material es un polímero, este mismo autor ha clasificado las técnicas de moldeo de plásticos por las características particulares de cada una de ellas, los criterios de clasificación se muestran en la tabla 9

**Tabla 9.** Características de las diferentes técnicas de moldeo plásticos

<b>Moldeo</b>						
<b>Características</b>	<b>Vaciado</b>	<b>Extrusión</b>	<b>Inyección</b>	<b>Compresión</b>	<b>Transferencia</b>	<b>Termoformado</b>
<b>Pieza</b>						
Material	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Termoplásticos
Preferencia	Termoplásticos			Termofijos	Termofijos	
Forma	todas	Todo grupo 0	Todo (núcleo perdido)	Solo excepción de t3,5,6,F5 y U4	Igual que en la compresión	T4; F4,7 y S5
Sección min, mm	4	0.4	0.4	0.8	0.8	1
<b>Costo</b>						
Equipo	D-E	A-B	A-C	B-C	B-C	B-D
Herramienta	B-E	A-C	A-C	A-C	A-C	B-C
Mano de obra	A-C	D-E	D-E	C-E	C-E	B-E
<b>Producción</b>						
Habilidad del operador	B-E	D-E	C-E	D-E	D-E	B-E
Tiempo de entrega	Días	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Días-Semanas
Tiempo de ciclo		10-60	10-60	20-600	10-300	10-60
Cantidad mínima	1	1000	100-1000	100-1000	100-1000	10-1000

Sabiendo que las muestras del material tendrían forma simétrica de tipo barra y que se utilizaría una matriz polimérica termofija en presentación de polvo, la opción más viable a utilizar es la de moldeo por compresión.

Habiendo decidido el método de moldeo se buscaron alternativas de moldes para materiales de fricción, siendo la más utilizada la que corresponde al molde cerrado, las partes principales de este son: placa central con las cavidades para depositar el material en forma de polvo, placa superior que compacta dicho material, placa inferior con dados de expulsión de las pastillas de fricción y elementos de calentamiento tipo bobinas en espiral o de resistencias de cartucho (figura 21).



**Figura 21.** Moldes empleados en la fabricación de materiales de fricción

### 3.16.1.1 Cálculo de las dimensiones del molde

Para la optimización de las dimensiones del molde se tomaron en cuenta los principales parámetros de moldeo los cuales son: presión, temperatura y tiempo de proceso.

Tomando en cuenta dichas variables y con el empleo de un programa de diseño asistido por computadora (CAD) se diseñaron moldes de tres piezas rectangulares y se simularon con las cargas y temperaturas de moldeo hasta obtener el modelo con las menores dimensiones y peso, sin afectar la resistencia mecánica del mismo. El diseño del molde final se muestra en la figura 22.

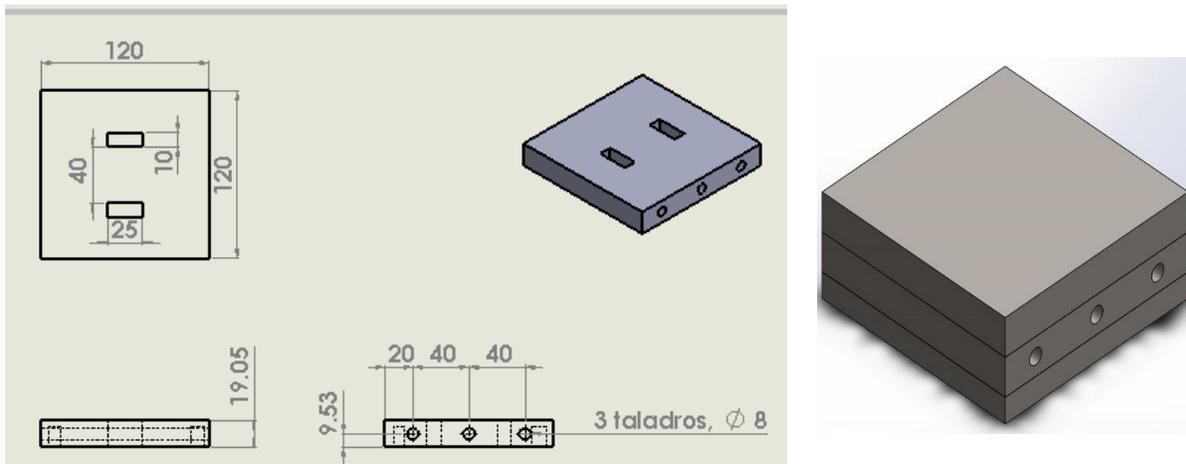


Figura 22. Diseño del molde mediante software con CAD

### 3.16.1.2 Selección del tipo de calefactor

Teniendo las dimensiones del molde establecidas y apoyados por la asesoría del fabricante de equipos de calentamiento POLIMEX, quienes nos facilitaron los catálogos de las resistencias que fabrican y en los cuales podemos encontrar información detallada de estas. En la figura 23 Se muestra un fragmento de la información que contiene el catalogo. Analizando las alternativas de dicho documento y las recomendaciones de los técnicos, se decidió emplear lo siguiente (se muestra en el recuadro de color rojo).

Resistencia tipo cartucho de alta densidad de 120mm de longitud y 8mm de diámetro, potencia 400 W a 120 v marca Polimex.

Controlador de temperatura (termostato) marca Rango de 50-300°C

## RESISTENCIAS TIPO CARTUCHO

Las resistencias tipo cartucho se usan principalmente para ser introducidas en un barreno, hecho en un metal sólido para calefacción localizada en los procesos que exigen control riguroso de temperaturas, tales como moldes, cilindros, etiquetado, estampado en caliente, sellado de bolsas, equipo de empaque y medicinales, extrusoras e inyectoras para plásticos así mismo como para calentar gases y líquidos.

### RESISTENCIAS TIPO CARTUCHO DE ALTA DENSIDAD

**CARACTERÍSTICAS:** Las resistencias de alta densidad (compactas) son útiles para aplicaciones de alta temperatura, donde la reducida durabilidad de los cartuchos es un problema constante. Los cartuchos de alta densidad duran hasta 15 veces más en la misma aplicación que las resistencias de cartucho comunes. Son también capaces de brindar hasta 5 veces mayores densidades de potencia eléctrica con temperaturas de hasta 1500 °F (820°C). Se fabrican con varias terminaciones para proteger los cables contra la flexión, humedad, abrasión, contaminación y para aplicaciones especiales.



#### CONECTORES QUE APLICAN

DIAMETRO	DESARROLLO (cm)	SIN CONECTOR	1/2" X 33mm	1/2" X 22mm	5/8" X 22mm	ESPECIAL	VOLTS	WATTS
5/16"	50, 100, 150 y 200	X	X	X	X	X	120 A 480V	200 A 3000W
3/8"	50, 100, 150 y 200	X	X	X	X	X	120 A 480V	200 A 4000W
1/2"	50, 100, 150 y 200	X	NO APLICA	NO APLICA	X	3/4" X 25mm	120 A 480V	200 A 6000W
5/8"	50, 100, 150 y 200	X	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	7/8" X 25mm	120 A 480V	200 A 8000W

NOTA: Los conectores especiales para tubulares de 1/2" y 5/8" de diámetro se especifican de 3/4" x 25mm y 7/8" x 25mm respectivamente, debido a que son los más comunes que se ocupan para esa medida del diámetro.

Figura 23. Selección de la resistencia de cartucho en el catálogo POLIMEX

### 3.16.1.3 Cálculo del número de resistencias

El número de resistencias necesarias para el calentamiento del molde se determinó a partir del tiempo en el cual se necesitaba calentar dicho dispositivo. Los cálculos realizados se desarrollaron de la siguiente manera:

#### Datos de la resistencia de cartucho

$$\text{Diámetro} = \frac{5}{16} \text{ pulg} \approx 8 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud} = 120 \text{ mm}$$

$$\text{Potencia} = 400 \text{ Watts} = 400 \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

$$1 \text{ Joule} = 0.24 \text{ Cal}$$

#### Datos del molde

Material: placa comercial

$$C_p = 465 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (Dato de tablas)}$$

$$\rho = 7833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Dato de tablas)}$$

$$v_t = 8.688(10^{-4}) \text{ m}^3 \quad \text{(Dato del software)}$$

### Calculo de la conversión instantánea de energía de la resistencia

$$Potencia = 400 \frac{J}{seg} * \frac{0.24 cal}{1J} = 96 \frac{cal}{seg}$$

### De la ecuación de densidad se despeja la masa

$$\rho = \frac{m}{v} \Rightarrow m = \rho * v$$

Calculando la masa se tiene:

$$m = 7833 \frac{kg}{m^3} * 8.688(10^{-4})m^3 = 6.789 kg$$

### Cálculo de la cantidad de calor a suministrar al molde

$$Q = mC_p \Delta T$$

$$Q = (6.789 kg) \left( 465 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right) (150 - 25) ^\circ C = 394610.625 J = 94706.55 Cal$$

### Cálculo del tiempo en que tardara en calentar el molde

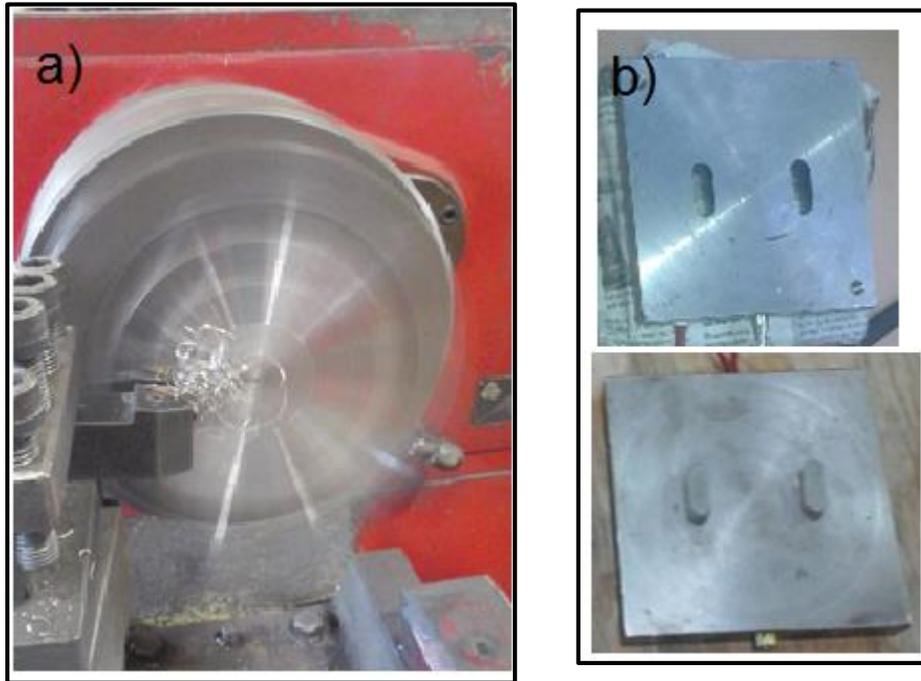
$$Q = Q \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{Q_1}{Q}$$

$$Q_1 = \left( 96 \frac{cal}{seg} \right) (3 Resistencias) = 288 \frac{cal}{seg}$$

$$\Delta T = \frac{94706.55 Cal}{288 \frac{cal}{seg}} = 328.8425 seg = 5.48 min$$

### 3.16.1.4 Construcción del molde

Las partes del molde se fabricaron utilizando operaciones básicas de soldadura y maquinado por arranque de viruta (torneado, fresado, taladrado y roscado). En la figura 24 a se muestra una de las etapas de maquinado y las piezas terminadas después de dichas operaciones (figura 24 b).



**Figura 24.** Construcción del molde a) maquinado y b) partes del molde terminadas

### 3.16.1.4 Instrumentación del molde

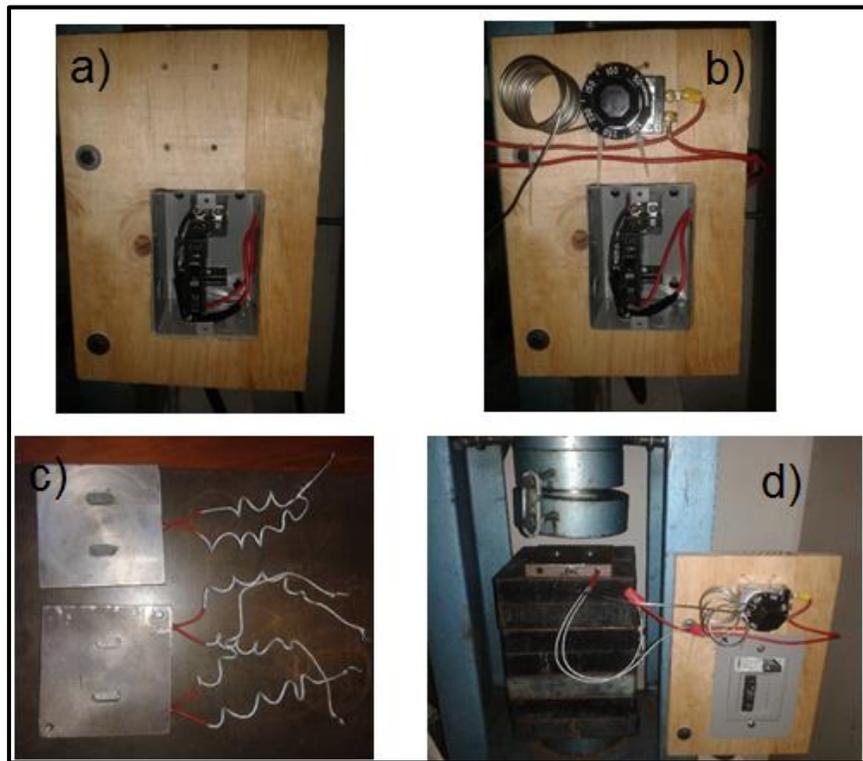
Para lograr los ciclos de calentamiento controlados del molde fue necesario adquirir el material que se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10.** Lista de material empleada para instrumentar el molde

Cantidad	Unidad	Descripción
3	pieza	Resistencia tipo cartucho de alta densidad de 120mm de longitud y 8mm de diámetro, potencia 400 W
1	pieza	Termostato marca Rango de 50-300°C.
1	pieza	Centro de carga de dos circuitos marca IUSA
1	pieza	Interruptor termomagnético para 20 A y 120 V, marca square D

2	metros	Metro cable uso rudo 2 x 10
2	metros	Cable AWG Cal. 10
1	pieza	Clavija industrial recta 127 V marca Royer
2	pieza	Conector ciego roscado para empalme de cables de 12.7mm marca UL
1	pieza	Termopar tipo K

Una vez adquirido el material y equipo necesario, se procedió a realizar las conexiones de los mismos, esto se llevó a cabo utilizando pinzas, destornilladores y cinta aislante. La secuencia de conexión se muestra en la figura 25.



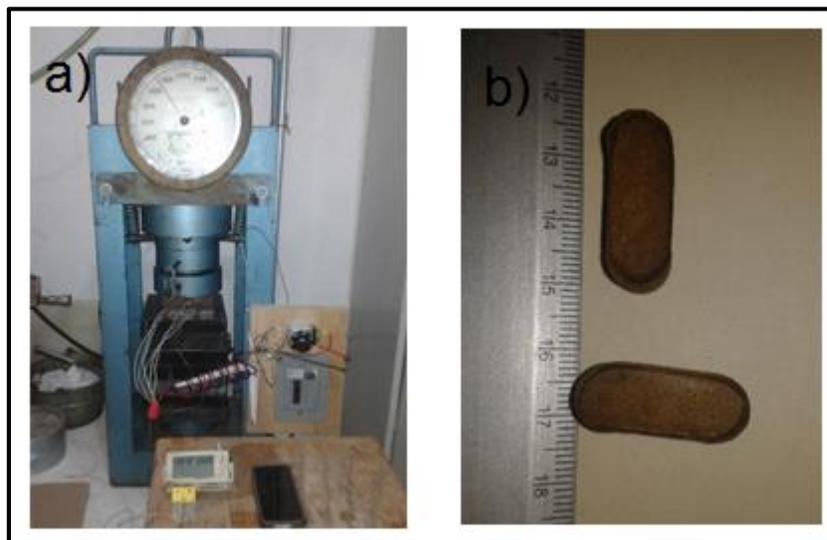
**Figura 25.** Secuencia de conexión de los componentes a) y b) sujeción e interconexión de los componentes al panel de instrumentos, c) colocación de las resistencias y d) conexiones finalizadas

### 3.16.1.5 Pruebas de calentamiento

Para evaluar el funcionamiento y la correcta conexión de los elementos de calentamiento y control se procedió a realizar pruebas de calentamiento sin material de moldeo, con ello se midió el tiempo de calentamiento y el funcionamiento del termostato.

### 3.16.1.6 Elaboración de muestras de control

Para probar el proceso de fabricación de muestras empleando el molde de placa caliente se comprimieron muestras de resina fenólica mezclada con fibras de agave con un rango de proporciones del 70 al 30 %, para comprimir las muestras se utilizó una prensa manual análoga con alcance de medición de 120 toneladas marca ELVEC modelo E 654, con estas pruebas se monitoreo la temperatura, el tiempo y la presión de moldeo (figura 26).



**Figura 26.** Elaboración de muestras de control a) monitoreo de los parámetros de moldeo y b) muestras de control terminadas.

Parámetros de elaboración de las muestras de control

Las condiciones de elaboración de las muestras fueron las siguientes:

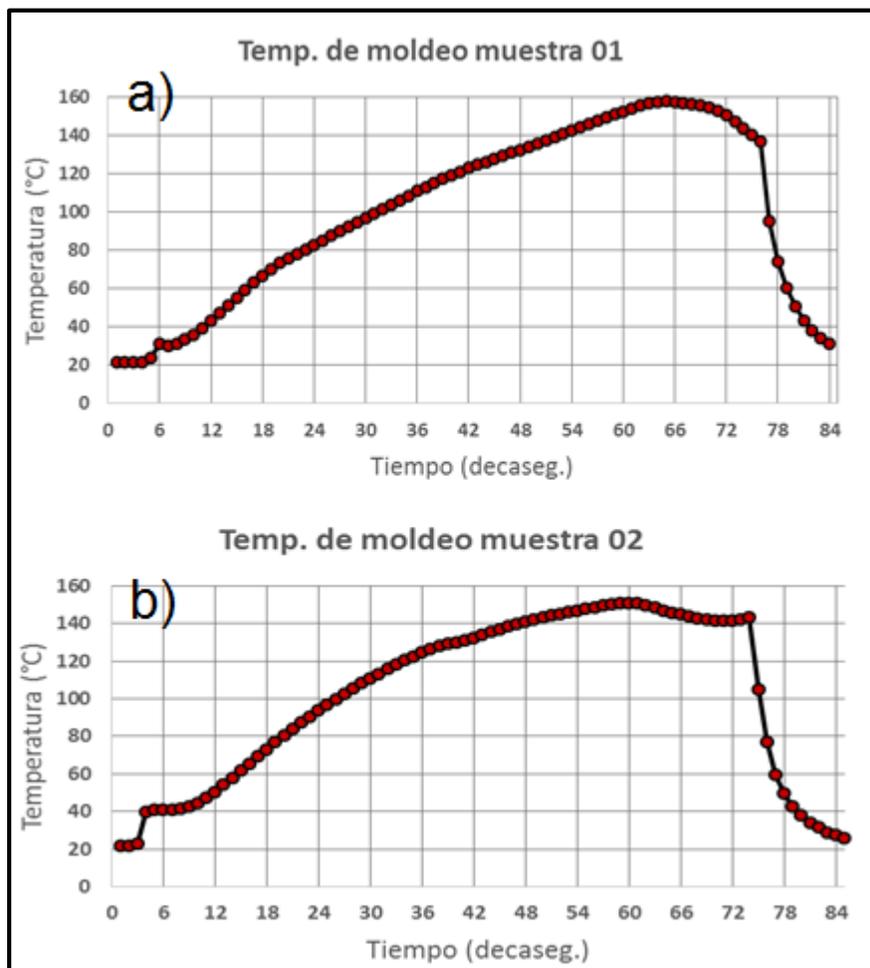
Temperatura  $150 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Presión 10 Ton

Tiempo de moldeo 90 Seg

Curado 8 horas

Para verificar la repetibilidad del proceso de elaboración de muestras se recurrió al empleo de un registrador de datos marca HOB0 modelo UX120-014M el cual es compatible con termopar tipo K, con los datos grabados en el aparato se elaboraron las gráficas que se muestran en la figura 27. En ellas se muestra que el proceso es aproximadamente igual en cuanto a los tiempos de calentamiento y las temperaturas.



**Figura 27.** Curvas de temperatura vs tiempo empleado en la elaboración de las muestras a) muestra 1 y b) muestra 2

### 3.16.2 Fabricación de las de probetas del material de fricción

Teniendo preparadas las seis formulaciones del material de fricción y habiendo realizado las pruebas de funcionamiento del equipo de moldeo, se procedió a fabricar las muestras de las distintas formulaciones, para ello se aleatorizó el orden de proceso de las mismas para reducir el error de proceso. En la figura 28 Se muestran los pasos que se siguieron para la elaboración de los pines.



**Figura 28.** Proceso de fabricación de las muestras a) pesado del material al emplear, B) llenado de las cavidades del molde) moldeo, d) extracción de las muestras E) curado de 8 h y f) embolsado y etiquetado

### 3.17 Maquinado de los discos de prueba

Según la norma ASTM G-99 para probar las muestras del material de fricción en la máquina pin on disk se necesitan discos con un diámetro de 30 a 100 mm y un espesor de 2 a 10 mm. El material seleccionado fue hierro fundido tomando como referencia los trabajos de Ibhadode & Dagwa, 2008 y Mysalmy & Ragendran, 2011, por esta razón se emplearon discos de freno de un vehículo Dodge Journey.

La operación comenzó con el cortado del centro de los tornillos del disco en el torno, posteriormente se marcaron los discos en la superficie de contacto del aro, se cortaron las secciones, se cilindro y por último se refrentó (figura 29).



**Figura 29.** proceso de obtención de los discos de prueba a) disco usado de automóvil, B) corte del núcleo ,c) separación del núcleo y área de contacto, d) marcas de corte, e) corte manual del área marcada) cilindrado, g) refrentado y h) disco terminado

### 3.18 Pruebas tribológicas

Para poder realizar las pruebas tribológicas se recurrió al procedimiento mostrado en la figura 30.

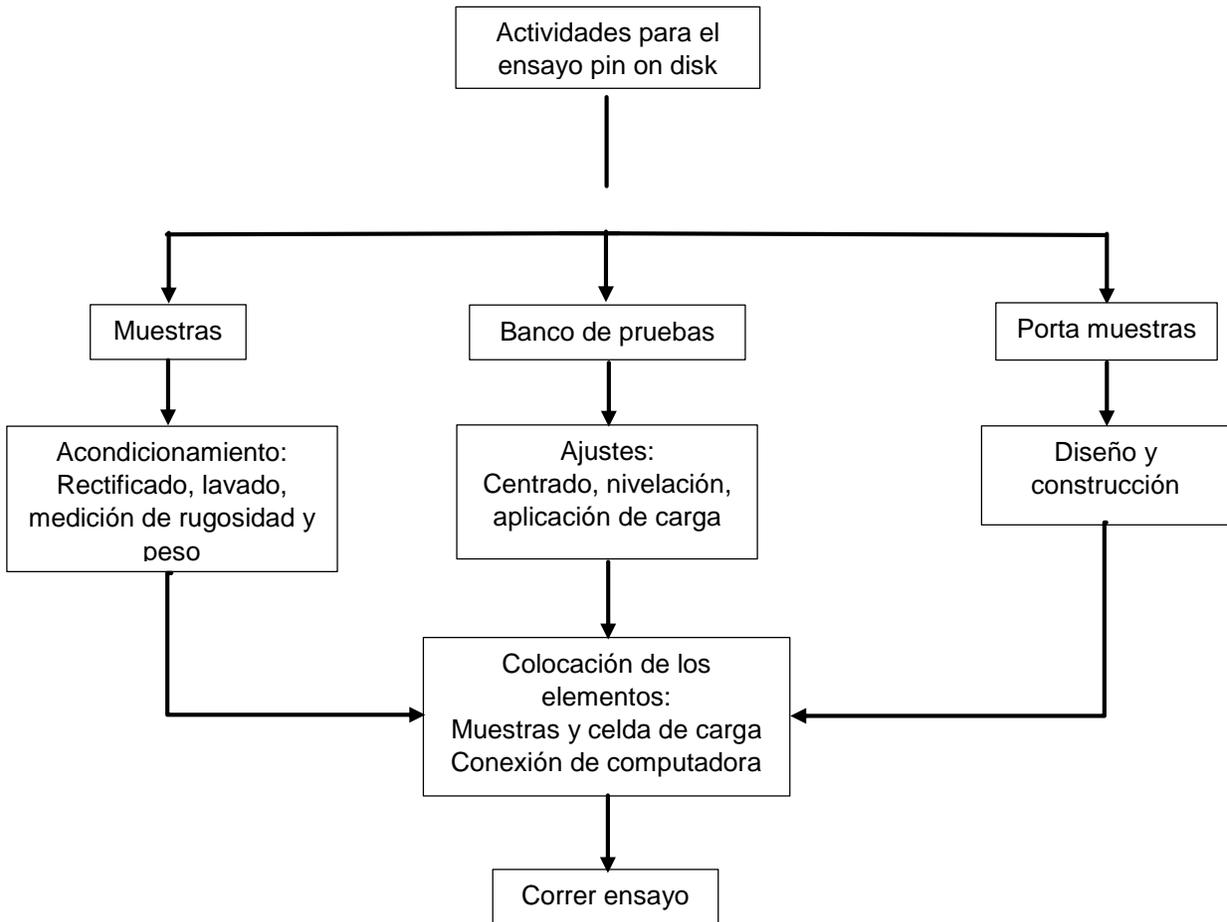


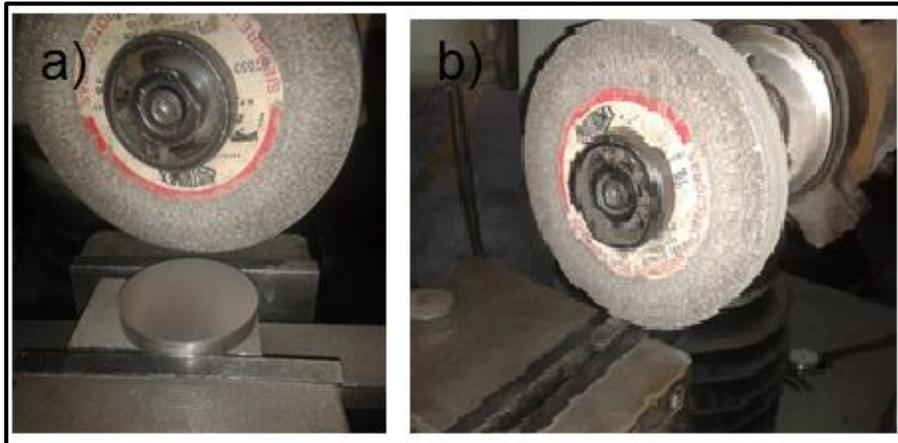
Figura 30. Diagrama para la realización de las pruebas tribológicas

#### 3.18.1 Acondicionamiento del par tribológico

##### 3.18.1.1 Rectificado de la superficie

Siguiendo con las recomendaciones de la norma G-99, en la cual establece un promedio de rugosidad en la superficie de  $0.8 \mu\text{m}$  o menor, se procedió a rectificar la superficie de los discos en una afiladora universal (figura??), con rueda abrasiva

marca AUSTROMEX clave 181, la ficha técnica se encuentra en el anexo???. Esta misma maquina fue utilizada para corregir las dimensiones de los pines para que estos coincidieran con la superficie de contacto establecida la cual fue de 10mm (figura 31)



**Figura 31.** Rectificado del par tribológico a) rectificado del disco y b) rectificado del pin

### 3.18.1.2 Limpieza de las muestras

Habiendo realizado la rectificación de las muestras se procedió con el lavado de las mismas, para esta actividad se utilizó un vaso de precipitados y se colocó un disco, posteriormente se vertieron 100 mL de acetona y se introdujo el vaso en una tina ultrasónica por un tiempo de 3 minutos (figura 31), concluido el tiempo de lavado se extrajo el disco y se secaron con toallas absorbentes, por último se embalo el disco en una bolsa de polietileno marcada con el número de registro del disco la manipulación de las muestras en esta actividad se llevó a cabo empleando guantes de látex para evitar la contaminación de estas. Esta actividad se repitió para cada uno de los 21 discos a ensayar.

Para la limpieza de los pines se utilizó un paño y acetona, la técnica consistió en frotar el paño húmedo hasta eliminar el polvo de la superficie y se secó con una toalla absorbente, una vez limpios y secos se procedió a depositar las muestras en una bolsa de polietileno marcada con su respectivo código de registro



**Figura 32.** Lavado de los discos con acetona en tina ultrasónica.

### 3.18.1.3 Medición de la rugosidad

La rugosidad de las muestras se llevó a cabo empleando el rugosímetro portátil marca GALAXI modelo GR260 ubicado en el laboratorio de Tribología del IPN, ESIME-Zacatenco. Como se muestra en la figura 33 la prueba se realizó en todas las muestras colocándolas una superficie plana y estable, se hicieron 5 repeticiones para cada muestra.

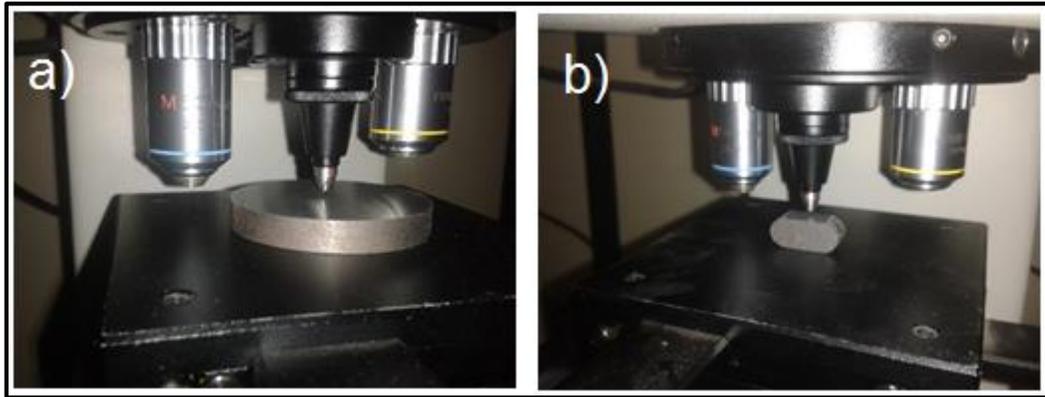


**Figura 33.** Medición de la rugosidad de los discos

### 3.18.1.4 Medición de la dureza

Otro parámetro que solicita la norma es la dureza de los materiales a ensayar, por tal motivo se procedió a la medición de la misma con la utilización del microdurometro marca LECO modelo LM 700 ubicado en el laboratorio de Tribología

del IPN ESIME Zacatenco, obteniéndose un perfil de dureza con valores distanciados 50  $\mu\text{m}$  uno del otro en línea recta. (Figura 34), la carga de indentación seleccionada fue de 1000 gf para discos y 200 gf para los pines, el tiempo de indentación seleccionado fue de 15 segundos para ambas muestras.



**Figura 34.** Prueba de micro dureza a) discos y b) pines

### 3.18.1.5 Medición del peso de las muestras

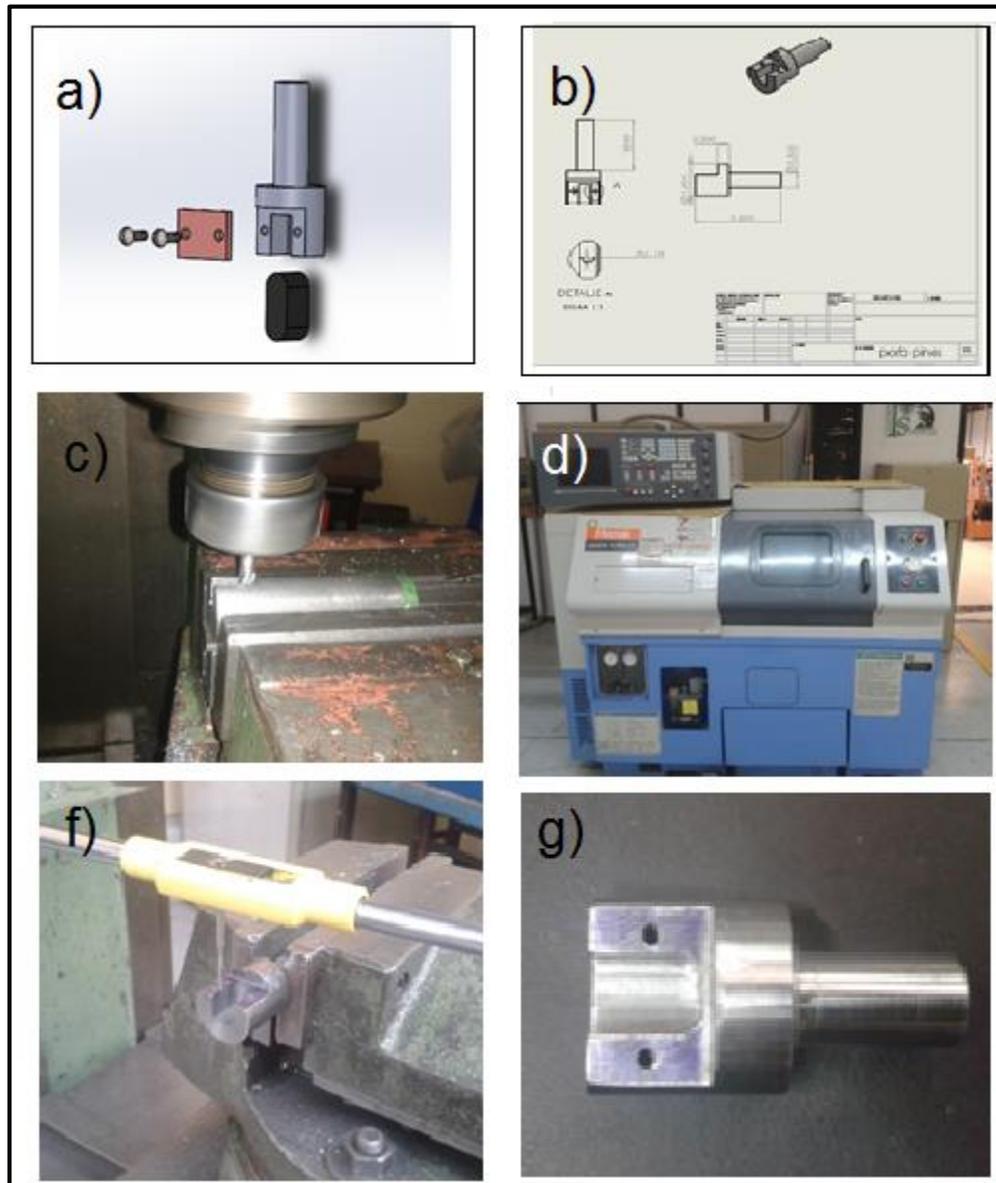
Para reportar la pérdida de masa fue necesario pesar las muestras antes y después del ensayo. Para medir el peso de las muestras se utilizó una balanza analítica marca SCIENTECH modelo SA310 con precisión de 0.1 mg (figura 35). Se realizaron tres repeticiones para cada una de las muestras.



**Figura 35.** Medición del peso de las muestras antes del ensayo

### 3.18.2 Diseño y construcción de porta pines

Debido a la geometría y dimensiones de los pines surgió la necesidad de diseñar y construir un dispositivo de ajuste y sujeción de los mismos, denominado porta pines. El material empleado fue una barra de acero 7018 cold roll con un diámetro nominal de 25.7mm (1 pulg), mediante operaciones de remoción de material (figura 36 a) se consiguió la pieza mostrada en la figura 36 g.



**Figura 36.** Proceso de diseño y construcción del porta pines a) diseño CAD en 3D, b) planos de construcción en 2D, operación de fresado de la cavidad, d) operación de cilindrado en maquina CNC, f) roscado a mano y g) porta pines terminado

### 3.18.3 Ajustes del banco de pruebas

Antes de correr los ensayos en la maquina pin on disk se realizaron operaciones de ajuste y nivelación de la misma, esto con el fin de corregir la horizontalidad para reducir las vibraciones, usando herramientas básicas como nivel de burbuja y llaves mecánicas se logró colocar horizontalmente la maquina (figura 37)



**Figura 37.** Ajuste y nivelación de la máquina de pruebas

### 3.18.4 Colocación de los elementos a ensayar y de medición

Posterior al ajuste del banco se continuó colocando todos los elementos que necesita la máquina para poder correr la prueba de fricción y desgaste. El procedimiento se repitió para cada uno de los pares tribológicos y se llevó a cabo de la siguiente manera:

1.-ajuste y sujeción del disco de prueba en la mordaza giratoria de la máquina. Esta operación se realizó con el uso de la llave cuadrada de la mordaza y un indicador de caratula marca MITUTOYO modelo 2040 con precisión de 0.01 mm. El disco se coloca en la mordaza y con el empleo del indicador se reduce la desviación de horizontalidad hasta un valor aproximado de 0.05mm (figura 38 a)

2.- acoplamiento del porta muestras en el broquero de la máquina e inserción del pin en la cavidad del porta pines, esto con el uso de destornillador y llave de broquero.

3.- calibración del brazo basculante. En esta etapa se ajustó el radio de contacto mediante el movimiento de la manivela de movimiento transversal y para el balanceo del peso se recorrieron las masas destinadas para ello (figura 38 c)

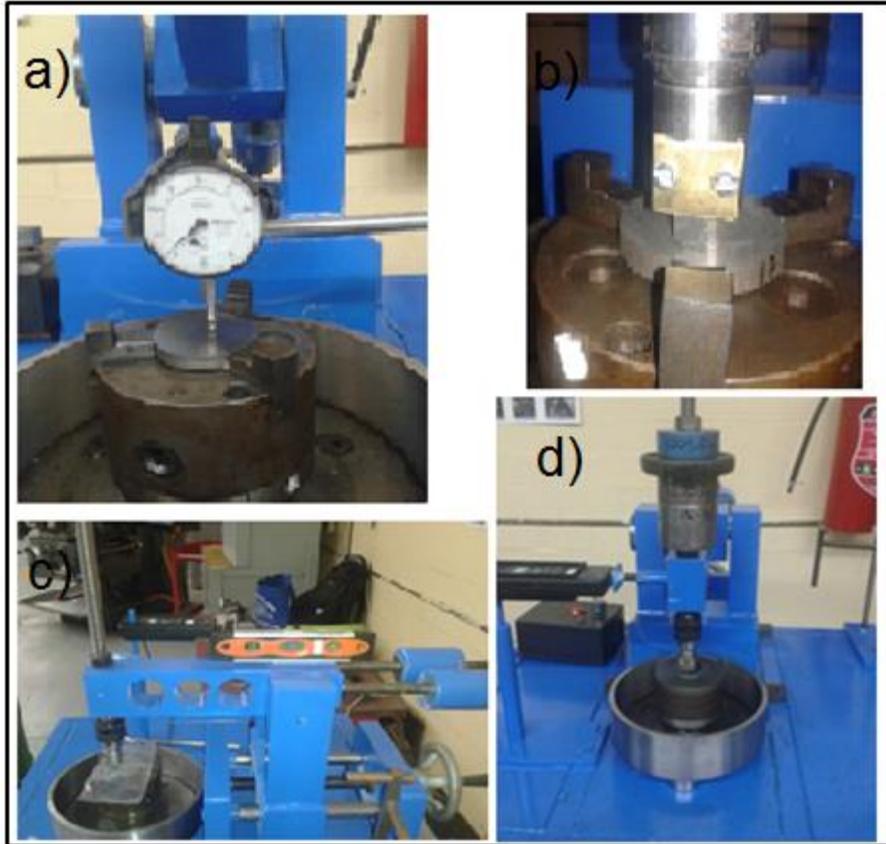
4.-colocacion de la carga. Esta operación se realizó mediante el acoplamiento de discos con peso conocido el vástago de contrapeso los cuales se aseguran con una tuerca.

5.-alineacion, ajuste y conexión de la celda de carga. En este caso se insertó la celda en la varilla destinada para dicho dispositivo, el tornillo que se muestra en la figura 38 d Se ajusta para que el brazo basculante quede alineado con el radio del disco; la conexión de la celda se realiza mediante el adaptador análogo PASPORT.

6. selección de la velocidad angular. Para seleccionar la velocidad angular se energizo la caja de control del motor y se giraron los potenciómetros a la máxima capacidad la cual es de  $450 \pm 5$  RPM.

7.-empleo del software DATA STUDIO. Una vez que se conectó el adaptador análogo PASPORT se abrió el programa y se eligió el tipo de sensor que en este caso es de fuerza, posteriormente se seleccionó el estudio de gráfica y por último se corrió el ensayo.

Los pasos anteriores se repitieron para cada uno de los pares tribológicos que en total fueron 21.



**Figura 38.** Ajustes y equipamiento de la maquina antes del ensayo a) ajuste del disco, b) colocación y centrado del pin, c) nivelado y ajuste del brazo basculante, d) colocación de la carga y el sensor

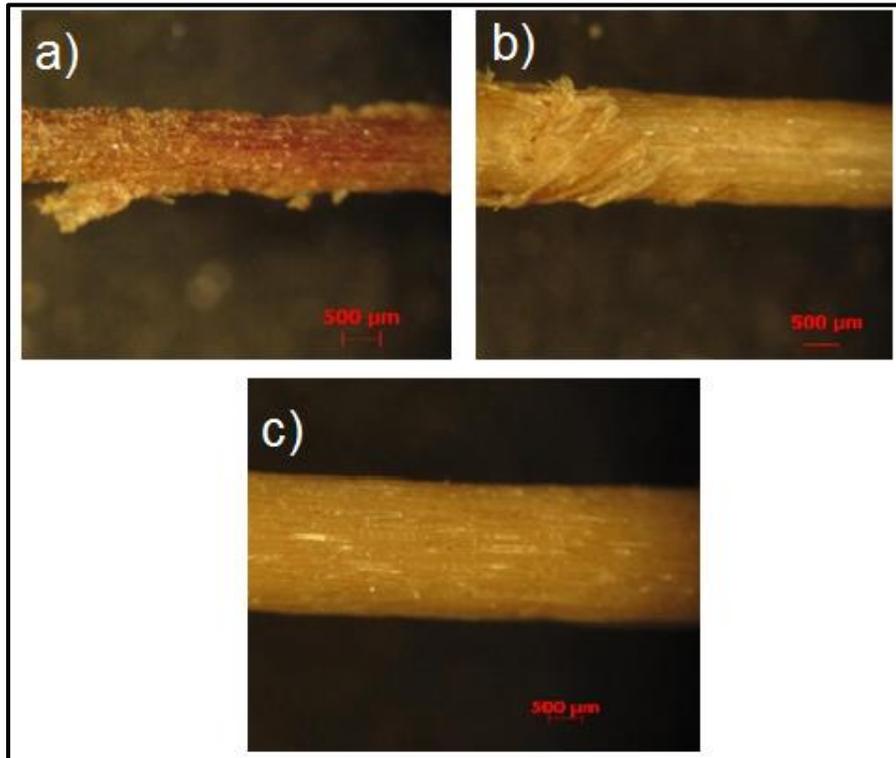
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Acondicionamiento de la a fibra de bagazo de agave para emplearla como refuerzo

#### 4.1.1 Lavado

El método de lavado modificado mostro mejores resultados en la limpieza de las fibras además de no provocar modificación o daño aparente en la superficie de las mismas, esto se puede observar en la figura 39 c En la cual se muestra el

comparativo de las fibras sin lavar, lavado a mano y a presión. Otro factor a destacar es la rapidez de lavado, empleando en promedio 4 h por cada 100 g de fibra limpia y seca en comparación con las 8 h en promedio con el método de lavado a mano.



**Figura 39.** Micrografías ópticas de la calidad de lavado de fibra a) sin lavar, b) lavado a mano y c) lavado a presión

En el caso de la medición del pH se obtuvo un promedio de 8.21(figura 40), esto indica mayor remoción de material adherido (pulpa principalmente) el cual tiene un pH ácido, cabe mencionar que con el método tradicional de lavado se tienen lecturas de pH de 4.8.

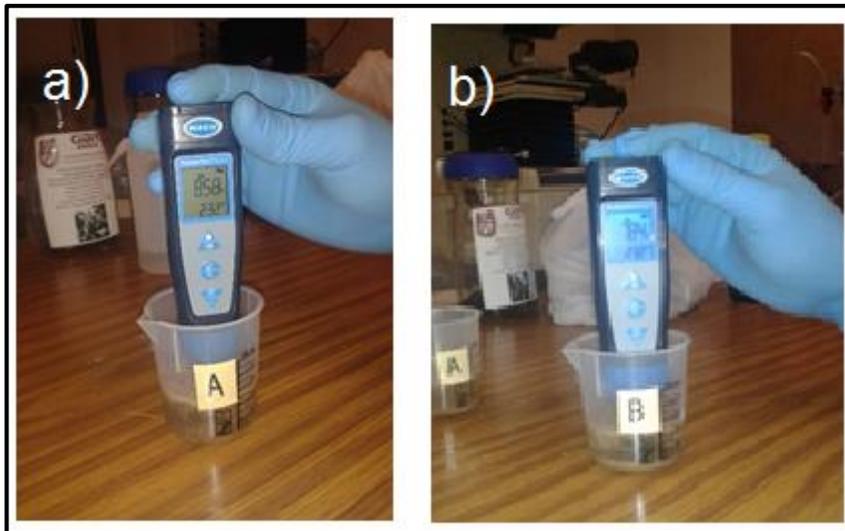


Figura 40. Prueba de pH a fibras tratadas (a y b) con dos repeticiones

#### 4.1.2 Reducción de tamaño

En esta parte del proceso de acondicionamiento de las fibras no se observaron daños en la estructura de las mismas, el corte y los tamaños son muy regulares (figura 41)

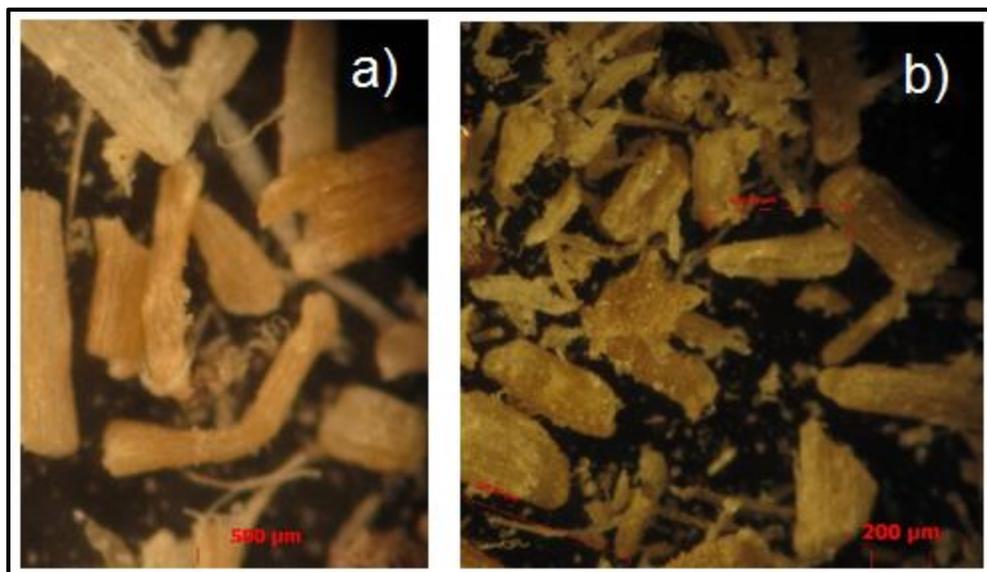


Figura 41. Micrografías ópticas de la fibra molida (a y b)

### 4.1.3 Granulometría

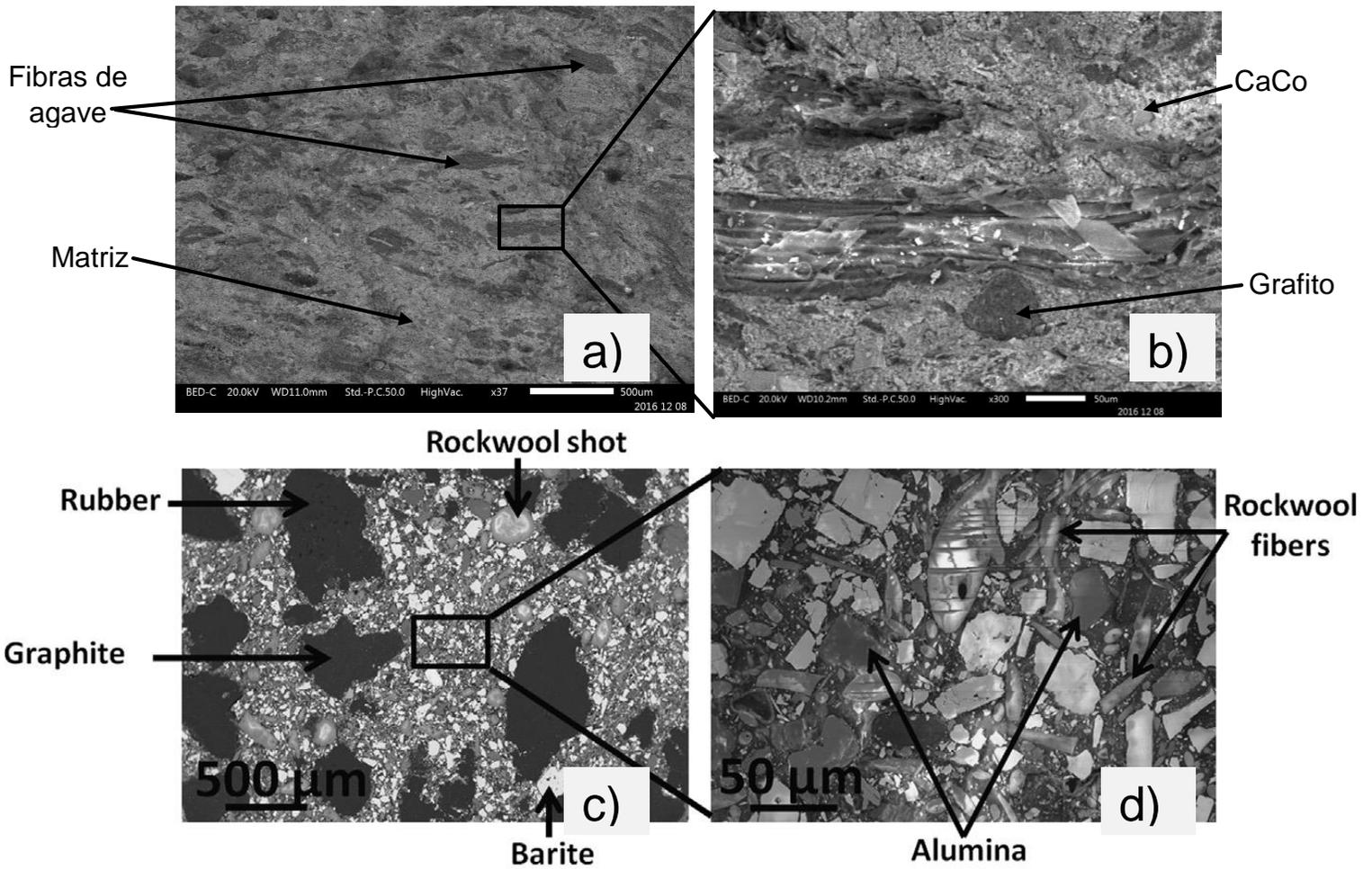
En la tabla número 11 Se muestra el análisis granulométrico de las fibras de bagazo molidas, el peso total de la muestra fue de 742.04 g

**Tabla 11.** Granulometría de la fibra de bagazo molida

Malla (US)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado
60	250	135.23	18.22	18.22
100	150	491.56	66.24	84.47
Residuo	-150	115.25	15.53	100.00
		742.04	100	

### 4.2 Elaboración del composito

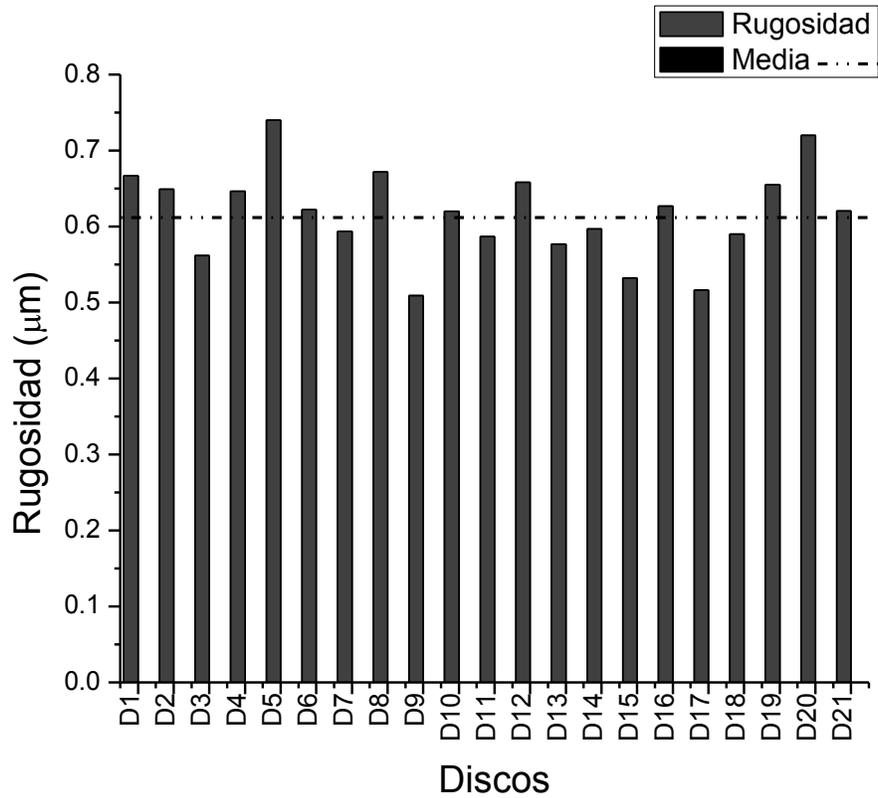
En la figura 42 a y b Se observa la morfología del composito reforzado con fibras de agave, en ella se aprecia la compatibilidad de las fases, también destaca que no existen huecos o espacios entre la matriz y las fibras, esto es deseable ya que con ello se está asegurando que el material de fricción tenga mayor resistencia mecánica. En comparación con el material de fricción de la figura 42 c y d Se tiene una morfología similar con respecto a los materiales presentes en cada una de ellas



**Figura 42.** Comparativo micrográfico del compuesto reforzado con fibras de agave ay b y vs un compuesto reforzado con fibras minerales

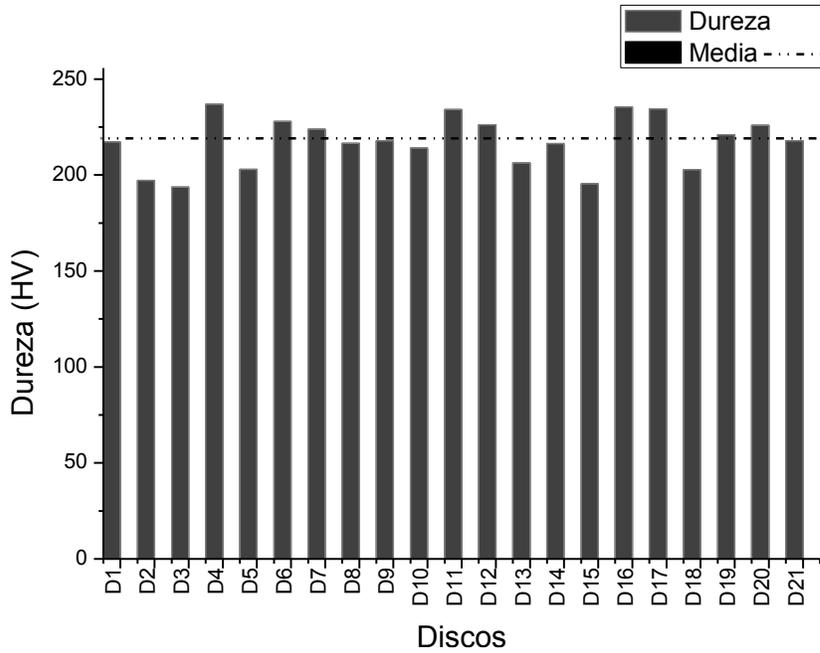
### 4.3 Rugosidad y dureza del par tribológico

La norma G 99 recomienda ensayar el par tribológico con una rugosidad menor a  $0.8 \mu\text{m}$ . En la figura 43 Se muestran los resultados de las mediciones de rugosidad para cada uno de los discos así como el promedio ( $0.617 \mu\text{m}$ ) y la desviación estándar ( $0.108 \mu\text{m}$ ).



**Figura 43.** Grafica de rugosidad de los discos

En la figura 44 Se muestra la gráfica de microdureza correspondiente a los discos que se ensayaron, en ella se resalta el promedio general, el cual fue de 219.28  $\text{HV}_{1\text{Kgf}}$  y una desviación estándar de 25.87  $\text{HV}_{1\text{Kgf}}$ .



**Figura 44.** Grafica de la microdureza de los discos

En el caso de la dureza de las formulaciones, se tuvieron los resultados mostrados en la figura, en esta grafica se aprecia los promedios individuales así como el promedio de cada formulación siendo f6 la formulación que presento mayor dureza, seguida por F3, FC, F4, F5, F1 y F2 respectivamente.

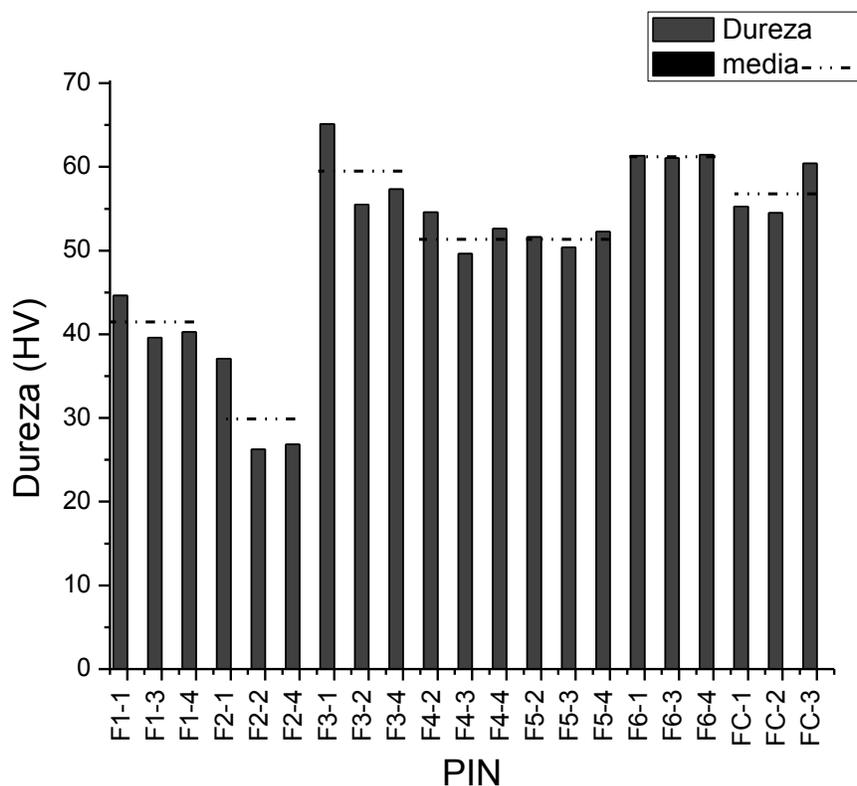
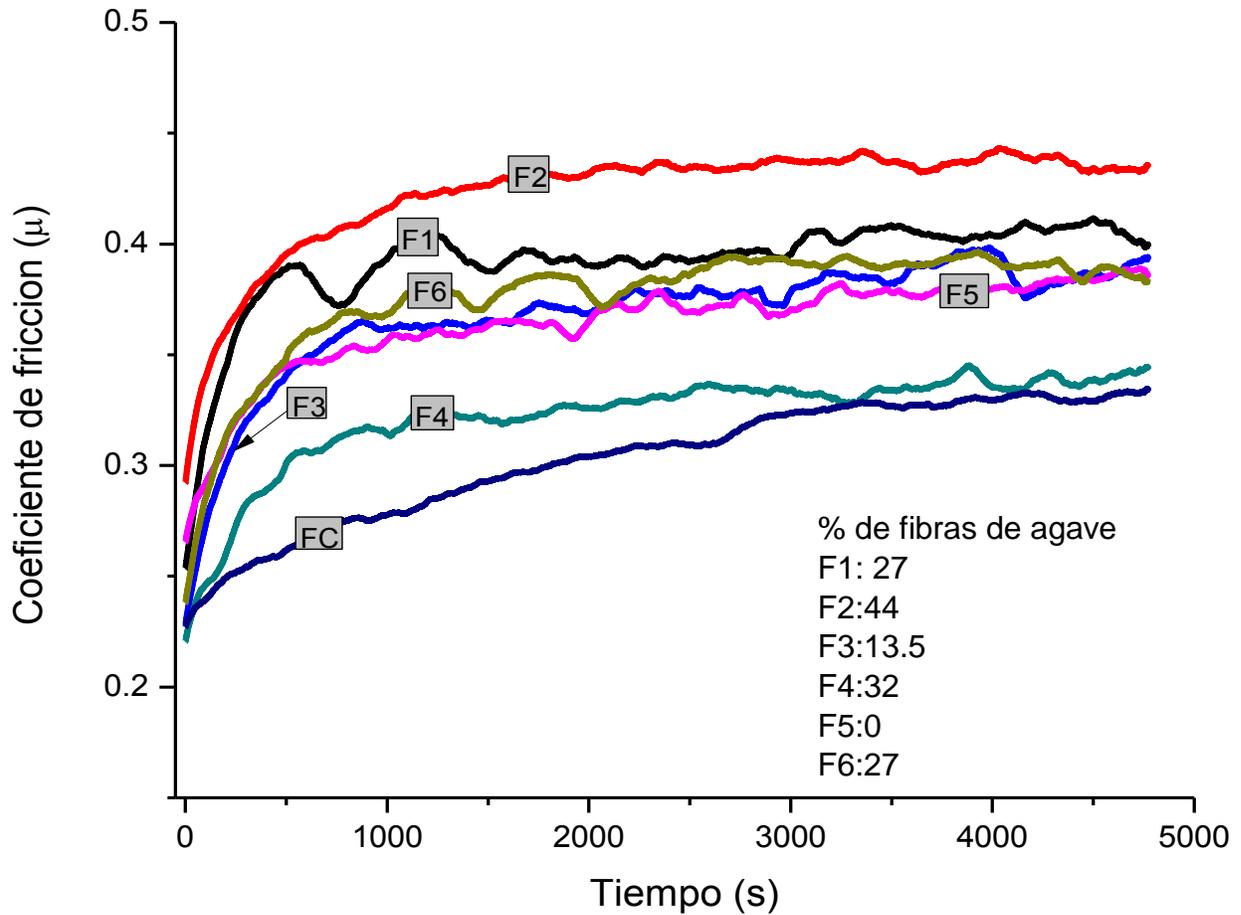


Figura 45. Grafica de la microdureza de las diferentes formulaciones

#### 4.4 Determinación de las propiedades tribológicas mediante la norma G-99

##### 4.4.1 Coeficiente de fricción

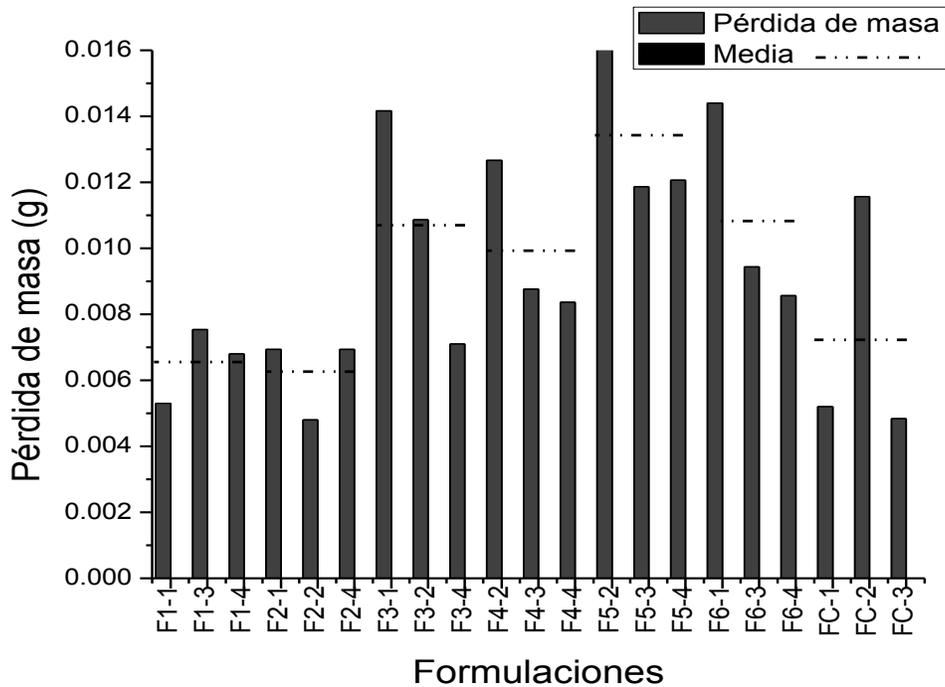
En la figura 46 Se puede observar las curvas del coeficiente de fricción de las diferentes formulaciones, en ella se distingue que el material FC (formulación comercial) mostró un menor coeficiente de fricción en comparación con las formulaciones elaboradas en el presente trabajo. La muestra F2 es la que mayor porcentaje de fibras de agave contiene y también es la que presento un mayor coeficiente de rozamiento, en ese sentido los compuestos F1y F6 mostraron un coeficiente de fricción similar entre ellos y cuentan con el mismo porcentaje de fibras de refuerzo (27%), en este orden decreciente continua F3 y corresponde al compuesto con 13.5 de fibras, para F5 que es el la muestra que no contiene fibras de refuerzo se tiene un coeficiente menor al de las formulaciones antes mencionadas, haciendo esa misma correlación entre la carga de fibras y el coeficiente de fricción para F4 esta no se cumple ya que tendría que ser la segunda muestra con mayor rozamiento.



**Figura 46.** Curvas comparativas del coeficiente de fricción de las seis formulaciones y el material comercial

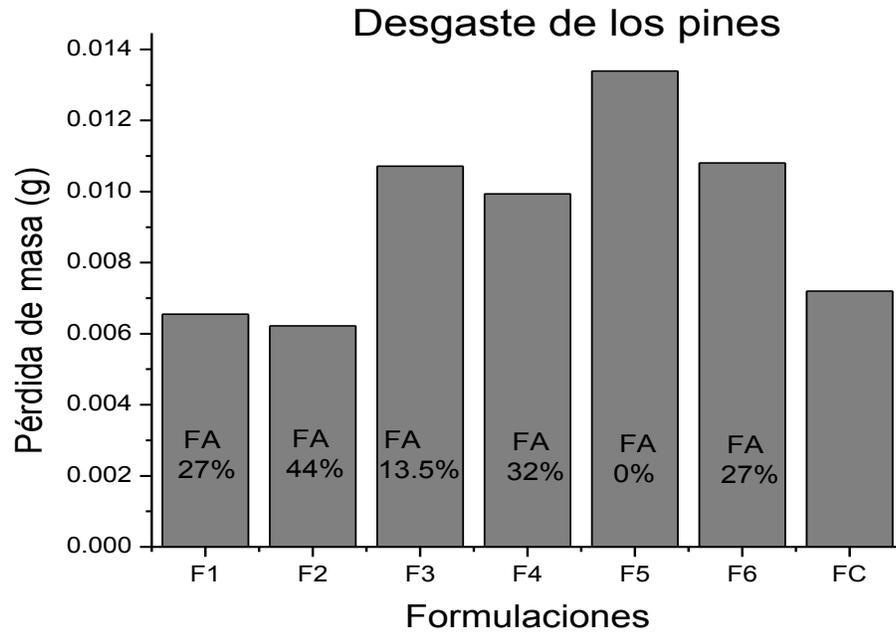
#### 4.4.2 Desgaste del par tribológico

La figura 47 muestra una gráfica de barras que corresponde a la pérdida de material de las distintas formulaciones también se puede observar las medias para cada compuesto y que en todas ellas hubo variabilidad de resultados, esto tal vez se deba a la disposición de los materiales en el material, esto no es particular para las formulaciones elaboradas, también el compuesto comercial presenta este mismo comportamiento.



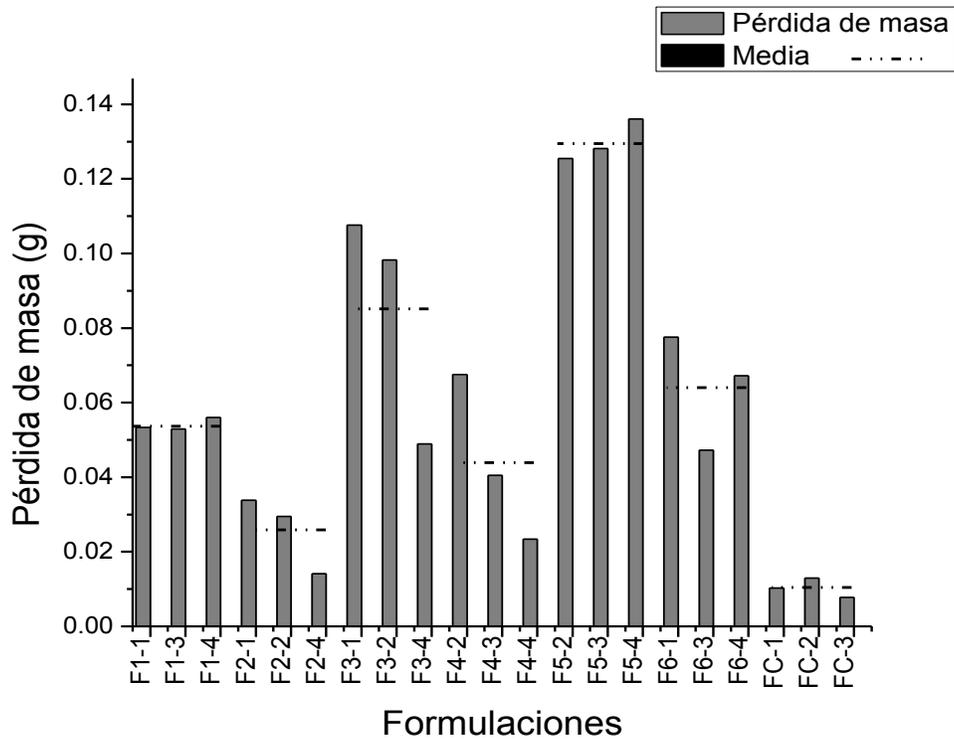
**Figura 47.** Grafica de promedios de pérdida de material individuales y por formulación

En la figura 48 se muestran los promedios para cada formulación y las cantidades de fibra empleada en dichos materiales, se nota de inmediato que la formulación F2 que contiene la mayor carga de fibras de refuerzo (44%) fue la que menor desgaste presento incluso fue menor que FC, por el contrario la que más desgaste sufrió fue la muestra que no cuenta con estas fibras (F5). Si se hace la correlación entre el desgaste y la cantidad de fibra presente en las muestras, esta se cumple para F1 y F3 las cuales tienen 27 y 13.5% del material reforzante, sin embargo no sucede lo mismo con F4 y F6 a las cuales se le agregaron 32 y 27% de fibras de agave, la razón de esta diferencia podría deberse al menor contenido de grafito de estas dos formulaciones la cual es de 5%.



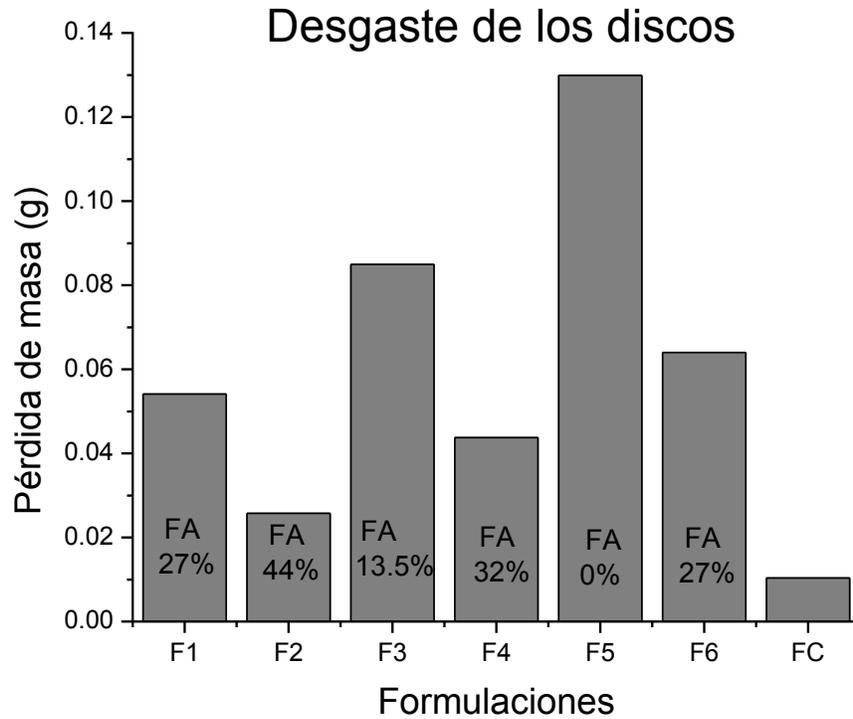
**Figura 48.** Grafica del desgaste promedio de las formulaciones comparándolas con el contenido de fibra

Otro aspecto que se evaluó fue el desgaste provocado en los discos de hierro fundido por los distintos materiales ensayados. La figura 49 muestra las formulaciones con sus repeticiones y sus medias particulares, también resalta la variabilidad en las repeticiones de cada compuesto.



**Figura 49.** Grafica del desgaste provocado a los discos por las diferentes formulaciones

En la figura 50 se muestran los promedios para el desgaste provocado por las diferentes formulaciones y las cantidades de fibra agregadas en dichos materiales, en este caso la formulación que menos desgastó a su correspondiente disco fue FC en comparación con los compuestos elaborados. La tendencia que se observó fue que a mayor porcentaje de fibras de agave menor desgaste presentaron los discos.

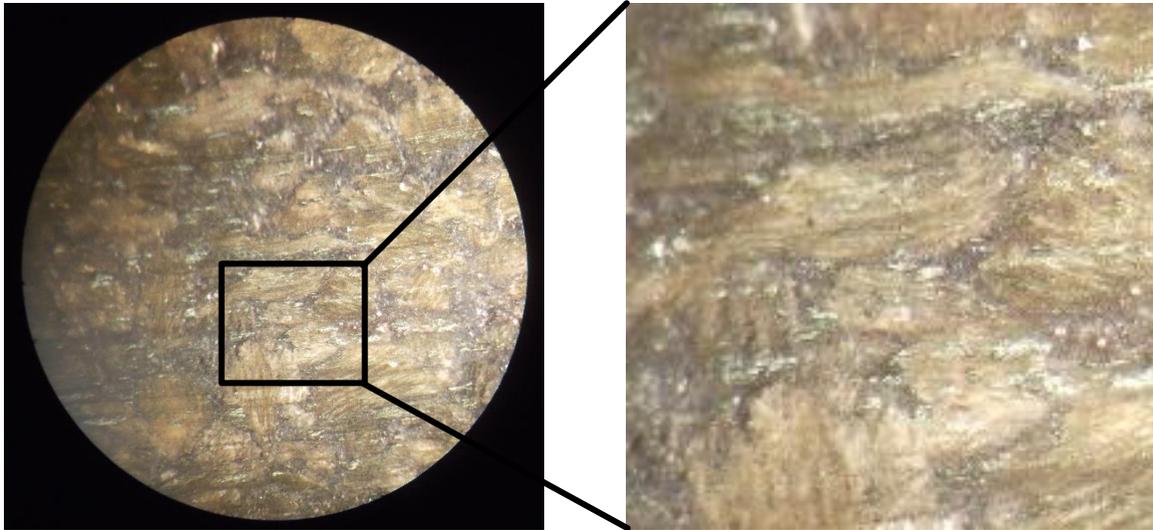


**Figura 50.** Promedio de pérdida de material de los discos provocado por las diferentes formulaciones relacionándola con la cantidad de fibra

#### 4.5 Análisis micrográficos de las superficies de los pares tribológicos ensayados

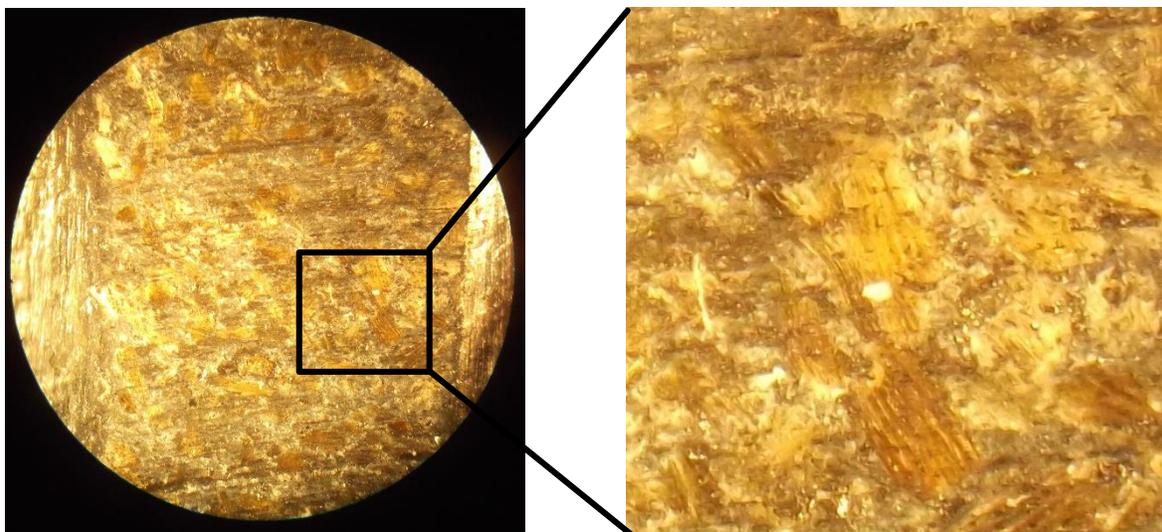
##### 4.5.1 Micrografías de la superficie de los pines ensayados

En la figura 51 se muestra la distribución de las fibras en el compuesto F2 el cual se reforzó con 44% de fibras, de la misma forma se distinguen las líneas de deslizamiento que formaron los surcos en la superficie de rozamiento, se destaca la resistencia de las fibras, las cuales no se cortaron ni se desprendieron (acercamiento).



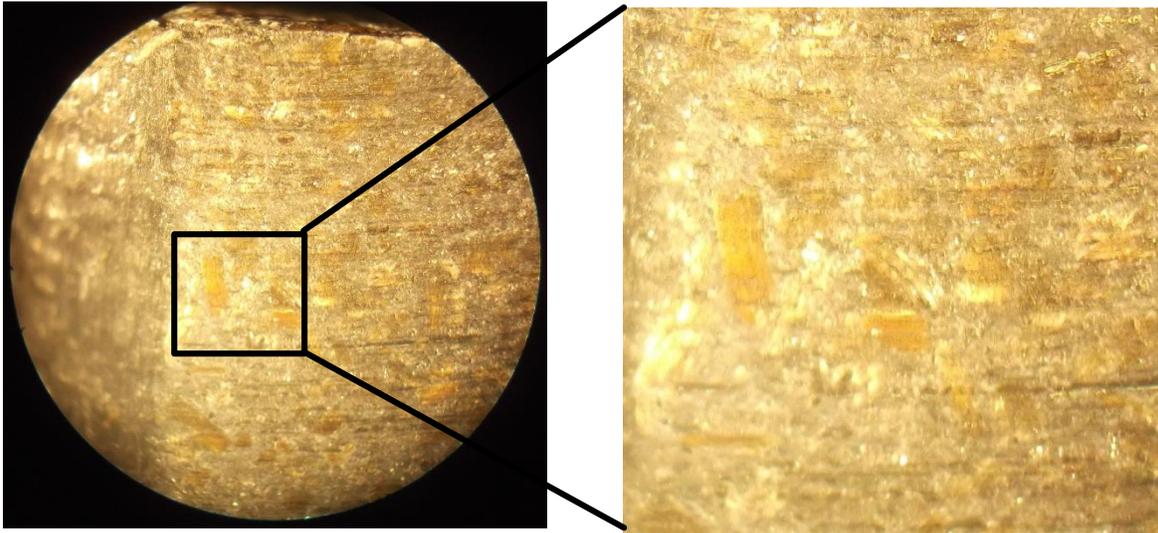
**Figura 51.** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F2

En la figura F4 se muestra la superficie de la formulación F4 después de la prueba no se observan defectos o desprendimiento de las fibras, por otra parte si se aprecian los surcos en la dirección del deslizamiento, esto probablemente se deba a las diferentes propiedades mecánicas de las fases. En el acercamiento se logra distinguir las fibras de agave con un leve desgaste.



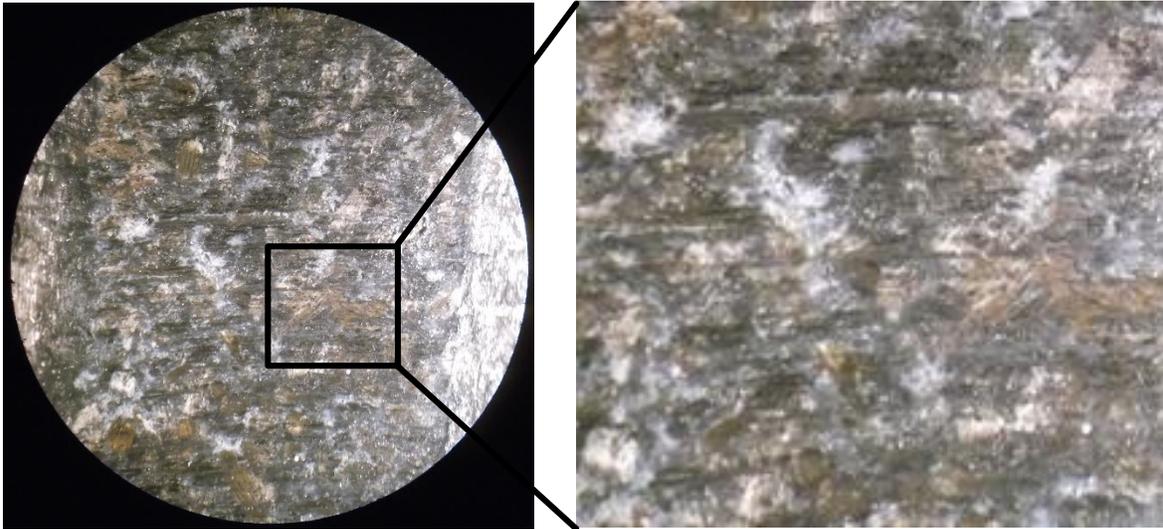
**Figura 52.** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F4

En la figura 53 se muestra la superficie de la formulación F1 después del ensayo, en el acercamiento de la misma figura se observa la distribución de las fibras (27%) y las líneas inherentes al deslizamiento, también se evidencia poco daño a las fibras y algunos surcos que se formaron



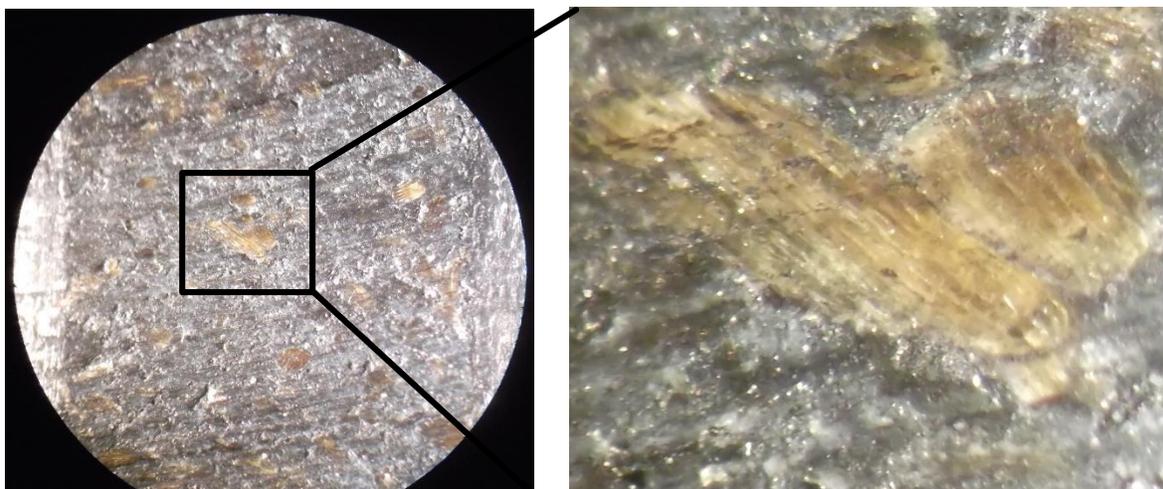
**Figura 53.** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F1

En la figura 54 se muestra la superficie después del ensayo de la formulación F6 la cual se reforzó con 27% de fibras de agave, en la misma figura se observa la distribución de las fibras, también se distingue que hubo desprendimiento de material, esto podría haber ocurrido por la baja carga de grafito (5%) el cual aporta propiedades para estabilizar el coeficiente de fricción, también se observan líneas más profundas en el sentido del deslizamiento. En el acercamiento es posible notar la irregularidad de la superficie que aparenta haber sufrido desgaste abrasivo



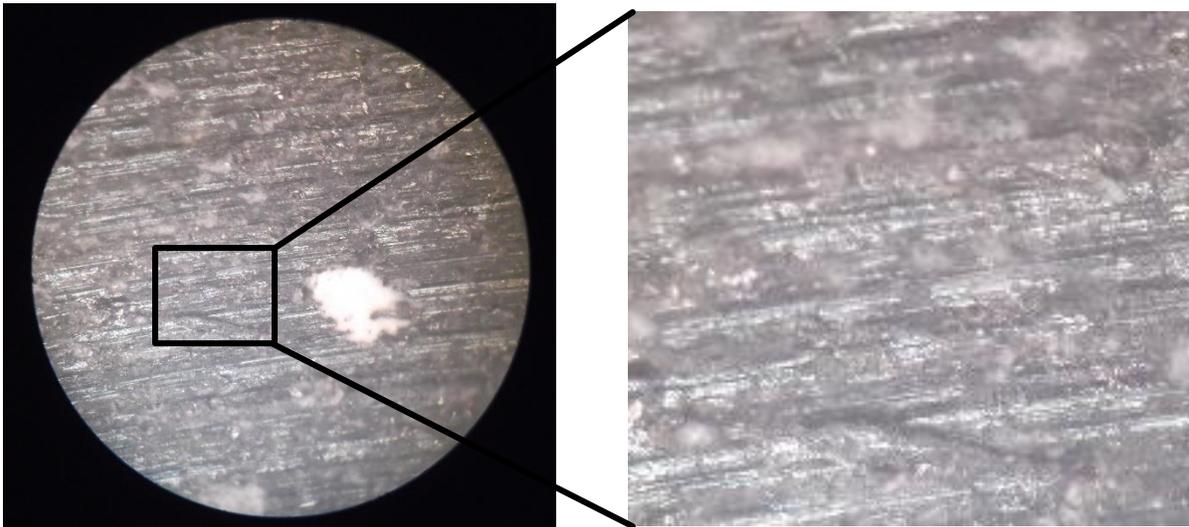
**Figura 54.** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F6

En la figura 55 se muestra la superficie después del ensayo de la formulación F3 la cual se reforzó con 13.5% de fibras de agave, en la imagen se observa la distribución de las fibras, también se distingue que hubo desprendimiento de material o posiblemente también son defectos de fabricación de las muestras, otra explicación pudiera ser que se esté presentando desgaste por partícula dura o también denominada de tercer cuerpo. En el correspondiente acercamiento es posible notar la irregularidad de la superficie alrededor de las fibras.



**Figura 55** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F3

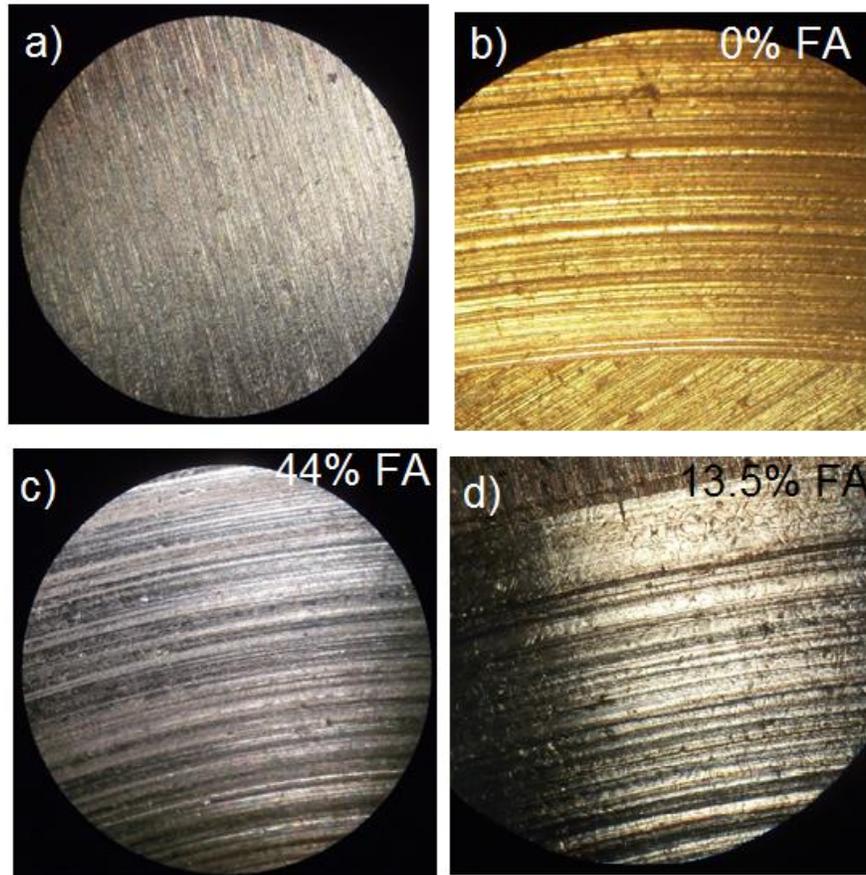
En la figura 56 se muestra la superficie del material F5 posterior al ensayo, este material no se reforzó con fibras de agave y mostró un desgaste parejo, es decir, no se aprecian surcos en el sentido del deslizamiento, esto podría explicarse por la ausencia de material que haga la función de un abrasivo, esto se aprecia de mejor manera en la imagen aumentada que denota líneas de deslizamiento paralelas y con menos profundidad,



**Figura 56.** Micrografía óptica de la distribución de las fibras de agave y del tipo de desgaste sufrido para la muestra F5

#### 4.5.2 Micrografías de las superficies de los discos ensayados

En la figura 57 es posible comparar las superficies de los discos de hierro fundido, la figura 57 a) muestra el disco antes del ensayo, el cual contaba con una rugosidad promedio de  $0.61 \mu\text{m}$ , en la figura 57 b) se observa la superficie del disco que fue ensayado con la formulación F5, se aprecia que las líneas de desgaste son menos profundas y con un tamaño relativamente similar, para el caso del disco que se sometió a rozamiento con la formulación F2 (figura 57 c) denota un desgaste más irregular con presencia de surcos con mayor profundidad, es evidente el desgaste abrasivo de dos cuerpos que se asemeja al tipo de desgaste que haría una lija; el caso de la superficie mostrada en la figura 57 d) (que se ensayó con la formulación F3) es similar debido a que también presentó desgaste abrasivo, sin embargo las líneas del desgaste son menores en profundidad.



**Figura 57.** Comparación de las superficies de los discos mediante micrografías ópticas a) disco antes de la prueba b) disco gastado por la formulación F5, c) disco gastado por la formulación F2 y d) disco gastado por la formulación f3

\_\_\_\_\_

-

\_\_\_\_\_

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Las fibras de *Agave angustifolia* Haw se pueden someter a procesos de limpieza relativamente agresivos (lavado a presión y secado directo al sol) sin que resulte de este procedimiento un daño aparente en la superficie de la misma, de este modo el tiempo empleado por gramo de fibra y seca se redujo a la mitad.

El molde diseñado y construido en este trabajo mostro un buen desempeño al momento de la fabricación de las muestras esto se demostró con los ciclos de compactación que fueron regulares y muy parecidos entre sí.

Seis diferentes formulaciones de compositos reforzados con fibras de *Agave angustifolia* Haw fueron fabricados con éxito mediante el proceso de moldeo por compresión uniaxial de placa caliente, la morfología interna de las fases se equipara con la de un material comercial, también se observó una buena compatibilidad entre las fases esto se concluye al analizar las micrografías donde se observa a las fibras de refuerzo que están completamente cubiertas por la resina termofija.

En cuanto al comportamiento tribológico se observó que de todas las formulaciones la que destacó fue F2, la cual mostró un coeficiente de fricción promedio de 0.4, seguida por F1, F3, F5 y F6 que prácticamente tuvieron el mismo coeficiente de rozamiento (0.35), el caso de F4 fue la excepción ya que no se apegó a la tendencia de las demás formulaciones. Otro aspecto a destacar es que todas las formulaciones elaboradas reportaron un coeficiente superior al de la formulación comercial, esta última obtuvo un  $\mu$  promedio de 0.27.

En la evaluación del desgaste del composito F2 y F1 consiguieron desgastarse menos que las otras formulaciones (6 mg) incluyendo a la formulación comercial. F5 no se reforzó con las fibras y fue la que más desgaste sufrió (13 mg), con esto se concluye que las fibras de agave si cumplen con la función reforzante del material fricción.

Respecto al desgaste que provocan las formulaciones en el disco de hierro fundido, todas ellas son más agresivas con la superficie del disco en comparándolas con el material comercial, el análisis también mostró que hubo una correlación entre el desgaste provocado y la cantidad de fibras de refuerzo, es decir, que entre más fibra contenía el composito menos daño ocasionaba a la superficie de los discos.

Los fenómenos de desgaste que se presentaron en las superficies en contacto fueron principalmente por abrasión y por tercer cuerpo, presentando desprendimiento de material en el composito de fricción y generando surcos en la superficie del disco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Madrid, G., Robles Pérez, E. & Juárez Pérez, C. A., 2009. Estudio de casos y controles de Mesotelioma Maligno Pleural en Mexico. *American Journal of Industrial Medicine*.
- Aigbodion, V. S. y otros, 2010. Development of Asbestos Free Brake Pad Using Bagasse. *Tribology in industry*.
- Askeland, D. R., 1998. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. tercera ed. Mexico: Internacional Thomson Editores.
- Berners-Lee, M. & Clark, D., 2010. what's the carbon footprint... a new car?. *The guardian*, 23 septiembre.
- Blau, P. J., 2001. *Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives*, Tennessee: ORNL.
- Brijendra, G. & Ashish, J. M., 2015. Review of Automotive Brake Friction Materials. *Scientific Journal of Impact Factor*.
- Brostow, W., Deborde, J.-L., Jacklewicz, M. & Olsynki, P., 2003. Tribología con énfasis en polímeros: fricción resistencia al rayado y desgaste. *Journal of materials Education*.
- Caballero Caballero, M., Montes Bernabé, J. L. & Silva Rivera, M. E., 2014. "Proceso para obtención de fibra útil del bagazo de agave". *Desarrollos de Ingeniería Agrícola en América Latina*.
- Chan, D. & Stachowiak, G. W., 2004. Review of automotive brake friction materials. *Journal of Automobile Engineering*.
- Contreras, D. F., 2011. *Obtención y caracterización estructural de composites*, Oaxaca: CIIDIR Oaxaca.
- Cortés Martínez, C. i., 2009. *Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del Agave angustifolia Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del Mezcal*, Oaxaca: CIIDIR OAXACA.
- Díaz del Castillo, R. F., 2007. *Tribología: Fricción, desgaste y lubricación*, Cuautitlan: UNAM.
- Gujrathi, T. & Damale, A., 2015. A review on friction materials of automobile disc. *International Journal Of Engineering, Education And Technology*.
- Holman, J. P., 1999. *Transferencia*. Mexico: COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V..

- Ibhadode, A. O. A. & Dagwa, I. M., 2008. Development of Asbestos-Free. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Idris, U., Aigbodion, V., Abubakar, I. & Nwoye, C., 20013. Eco-friendly asbestos free brake-pad: Using banana peels. *Journal of King Saud University*.
- Ikpambese, K. K., Gundu, D. T. & Tuleun, L. T., 2014. Evaluation of palm kernel fibers (PKFs) for production. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*.
- Liew, K. W. & Umar, N., 2012. Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Materials and Design*.
- Martínez, G. M. y otros, 2013. Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista internacional de contaminación ambiental*.
- Martinez, R. J., 2007. *Caracterizacion de la reactividad puzolanica de materiales*, Oaxaca: CIIDIR Oaxaca.
- Mysalmy , K. & Ragendran, I., 2011. Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short. *El sevier*.
- Nagesh, S. N., Siddaraju, C., Prakash, S. V. & Ramesh, M. R., 2014. Characterization of brake pads by variation in composition of friction materials. *Science direction*.
- Palma, F., Pérez, P. & Meza, V., 2016. *Diagnóstico de la Cadena de Valor Mezcal en las Regiones de Oaxaca*, oaxaca: s.n.
- Ruzaidi, C. M., Kamarudin, H., Shamsul, J. B. & Abdullah, M. M. A., 2011. Comparative Study on Thermal, Compressive, and Wear properties of. *Trans Tech Publications*.
- Schey, J. A., 2002. *Procesos de manufactura*. Primera edición ed. Mexico, D.F.: McGRAW-HILL.
- Stachowiak, G. W. & Batchelor, A. W., 2014. *ENGINEERING TRIBOLOG* Y. cuarta ed. Estados unidos: Elsevier.
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A. & Bermúdez, J., 2006. Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *Revista Tecnológica ESPOL*, Issue ISSN : 0257-1749.
- william, F. & Javad Hashemi, P., 2006. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Cuarta edición ed. Mexico: McGraw Hill interamericana.
- Yun, R., Filip, P. & Lu, Y., 2010. Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. *Elsevier*.

