

CARACTERÍSTICAS TRIBÓLOGICAS DE UNA RESINA DE POLIESTER INSATURADO EN CONTACTO  
DESLIZANTE.

ANDRÉS MAURICIO URIBE ZULUAGA

SANTIAGO MORENO JARAMILLO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

CARACTERISITICAS TRIBÓLOGICAS DE UNA RESINA DE POLIESTER INSATURADO EN CONTACTO  
DESLIZANTE.

ANDRÉS MAURICIO URIBE ZULUAGA

SANTIAGO MORENO JARAMILLO

Trabajo para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Director:

SANTIAGO BETANCOURT PARRA.

Ingeniero Mecánico Ph.D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Firma  
Presidente del jurado

---

Firma  
Presidente del jurado

---

Firma  
Presidente del jurado

Medellín, Abril de 2014

## DEDICATORIA

Dedico este gran logro a Dios quien siempre me ha dado la fuerza, fortaleza y virtud de seguir adelante a pesar de las adversidades; a mis padres Lucía Jaramillo y Walter Moreno quienes sin su apoyo y sacrificio no hubiera sido posible mi estudio, además de su formación ética que me ha permitido crecer como ser íntegro. A mis hermanos y a los amigos que se han convertido en mis hermanos con el tiempo por su apoyo incondicional.

A mis profesores Santiago Betancourt Parra por ser un ser una persona incondicional dispuesta a ayudarme en todo mi proceso de formación y Gustavo Suarez Guerrero por ser un apoyo y estar atento en todo mi proceso educativo.

"Perder es ganar un poco"

Francisco Maturana

**Santiago Moreno Jaramillo**

Con todo mi cariño y mi amor para Dios, y todas aquellas personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, especialmente a mis padres Álvaro León Uribe y Luz Teresa Zuluaga, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre en mi corazón y todo mi agradecimiento.

"En el libro de la vida, lo aprendido no se olvida"

Anónimo

**Andrés Mauricio Uribe Zuluaga**

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros agradecimientos a:

Santiago Betancourt Parra, Ph. D. Ingeniero Mecánico y director de este proyecto por su gran aporte y ayuda durante todo el proceso de ejecución de nuestro trabajo de grado, gracias a sus conocimientos, paciencia y dedicación este trabajo pudo salir adelante de forma satisfactoria.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, y en particular al grupo de investigación en nuevos materiales (GINUMA) por la confianza para desarrollar este proyecto. A las personas que de una manera u otra dieron su aporte desde los laboratorios de materiales de la Universidad, con equipos herramientas y conocimiento.

Al MSc. Carlos Correa por su aporte en la fabricación de las probetas de poliéster insaturado y asesor durante la primera parte del trabajo de grado, sin su dedicación y paciencia no hubiera sido posible esta parte.

Al profesor Carlos Rodríguez por su colaboración y dedicación en el montaje y perfeccionamiento del software para la experimentación, gracias por su apoyo en este proceso.

A todos ellos y más, muchas gracias por todo el apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	12
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	13
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	19
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
CAPÍTULO 4. MODELO DE COMPORTAMIENTO.....	56
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	64
CAPITULO 6. ANEXOS.....	65
ANEXO 1. ALCANCE DEL PROTOCOLO DE USO Y MANTENIMIENTO TRIBÓMETRO PIN-DISCO UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.....	65
ANEXO 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL TRIBÓMETRO PIN-DISK LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES UPB.....	67
ANEXO 3. PROCEDIMIENTO DE USO.....	74
ANEXO 4. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO.....	79
ANEXO 5. FALLAS Y CONSECUENCIAS.....	80
ANEXO 6. PROPIEDADES FÍSICAS ACERO AISI-SAE 1020.....	81
CAPITULO 7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Condiciones de trabajo experimental.	21
Tabla 2.2. Aplicación de la escala de dureza Rockwell para diferentes materiales.	26
Tabla 2.3. Valor de la Rugosidad Ra en $\mu\text{m}$ con equivalencia a su clase.	32
Tabla 2.4. Variación de parámetros de experimentación	35
Tabla 2.5. Variación de los contra cuerpos con respecto a las variables.	35
Tabla 3.1. Condiciones de laboratorio para ensayos de dureza.	36
Tabla 3.2. Valores de dureza del acero.	37
Tabla 3.3. Valor dureza PMMA.	37
Tabla 3.4. Datos de salida y cálculo COF.	40
Tabla 3.5. Promedio de la media geométrica de los coeficientes de fricción del acero y sus condiciones.	42

## LISTA DE TABLAS DE ANEXOS

Tabla 6.1. Ficha técnica del motor.	67
Tabla 6.2. Propiedades del rodamiento del brazo Pin-Disk	72
Tabla 6.3. Sistema celda de carga y dimensiones.	72
Tabla 6.4. Condiciones de uso dadas por el fabricante	73
Tablas 6.5. Tabla de fallas y consecuencias del equipo	80
Tabla 6.6. Propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1020.	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de fuerzas de fricción.	15
Figura 1.2. Desgaste W, en función del tiempo t.	16
Figura 2.1.1 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.	19
Figura 2.2. Moldes usados para la fabricación de los pines de UP; compresión en caliente.	20
Figura 2.3. Prensa de termo-compresión para el proceso de curado de los pines.	22
Figura 2.4. Durómetro Barcol para dureza de elastómeros.	24
Figura 2.5. Durómetro Rockwell Laboratorio de Resistencia de Materiales Universidad Pontificia Bolivariana.	25
Figura 2.1.2 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.	27
Figura 2.6. Cortadora laser para el corte de pines de poliéster insaturado y contra cuerpos de Acrílico.	28
Figura 2.7. Corte de pines en molde de resina de poliéster insaturado.	28
Figura 2.8. Corte del contra cuerpo acrílico (PMMA).	29
Figura 2.9. Imagen de pin de poliéster insaturado (UP) unido a portapines de aluminio.	30
Figura 2.10. Balanza densimétrica para pesos de pines.	31
Figura 2.11. Diagrama para determinación de la rugosidad Ra.	32
Figura 2.1.3 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.	34
Figura 3.1. Temperatura de curado vs dureza en escala HRR resina de poliéster (UP).	38
Figura 3.2. Dureza vs Temperatura de curado resina de poliéster (UP).	39
Figura 3.3. Velocidad vs fricción, a carga baja contra cuerpo acero.	43
Figura 3.4. Velocidad vs fricción, a carga media contra cuerpo acero.	44
Figura 3.5. Velocidad vs fricción, a carga alta contra cuerpo acero.	45
Tabla 3.6. Promedio de la media geométrica de los coeficientes de fricción del PMMA y sus condiciones.	46
Figura 3.7. Velocidad vs fricción, a carga baja contra cuerpo acrílico.	47
Figura 3.8. Velocidad vs fricción, a carga media contra cuerpo acrílico.	48
Figura 3.9. Velocidad vs fricción, a carga alta contra cuerpo acrílico.	49
Figura 3.10. Análisis desgaste, carga baja en acero.	51
Figura 3.11. Análisis desgaste, carga media acero.	51
Figura 3.12. Análisis desgaste, carga alta acero.	52
Figura 3.13. Análisis desgaste, carga baja en acrílico (PMMA).	53
Figura 3.14. Análisis desgaste, carga media en acrílico (PMMA).	54
Figura 3.15. Análisis desgaste, carga alta en acrílico (PMMA).	55
Figura 4.1. Temperatura de curado contra desgaste.	56
Figura 4.2. Velocidad de deslizamiento contra coeficiente de fricción.	57
Figura 4.3. Desgaste contra velocidad de deslizamiento y temperatura de curado.	57
Figura 4.4. Modelo teórico experimental del comportamiento de la resina poliéster insaturado en el acero.	58

Figura 4.5. Relación desgaste, velocidad de deslizamiento y temperatura de curado.	59
Figura 4.6 Relación velocidad de deslizamiento y fricción.	59
Figura 4.7 Relación velocidad de deslizamiento y fricción.	60
Figura 4.8. Relación temperatura de curado y desgaste	60
Figura 4.9 Relación Velocidad de deslizamiento, temperatura de curado y desgaste	61
Figura 4.10 Modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina poliéster insaturado.	62
Figura 4.11. Modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina.	63

#### **LISTA DE FIGURAS ANEXAS**

Figura 6.1. Sistema de transmisión de potencia.	67
Figura 6.2. Sistema pin disk.	71
Figura 6.3. Sistema de encendido de switches tribómetro UPB	75
Figura 6.4. Interfaz del programa sistema pin disco	75
Figura 6.5. Montaje de la celda de carga.	76

## RESUMEN

En este trabajo de grado se hace una comparación de las propiedades tribológicas de una resina de poliéster insaturado en contacto deslizante, mediante la fabricación de una serie de pines de  $\frac{1}{4}$ " elaborados de la misma resina, un vaciado y mezclado manual en un molde cilíndrico, para su curado en una prensa de termocompresión, a 80°C, 100°C y 120°C, y su posterior maquinado en un torno y lograr la homogenización de su superficie.

Por otro lado se seleccionan los materiales que entran a actuar como contra cuerpos para los pines de resina; el criterio de selección se basa en la selección de dos materiales que cumplan con la condición de que entre sus propiedades mecánicas, las durezas sean mayor y menor, que la de los pines de poliéster insaturado. Estos materiales, componen los discos del contra cuerpo.

La caracterización tribológica se hace mediante el ensayo pin disco. Del ensayo se obtienen una serie de valores del coeficiente de fricción mediante un tiempo de experimentación de 600 segundos, posterior a la experimentación se mide el desgaste o adhesión que haya experimentado el pin el proceso, medidos mediante una balanza.

Las condiciones experimentales de carga y velocidad son variables, varían entre 3 rangos de operación, definidos como alta, media y baja.

Para cada combinación de variables entre material del contra cuerpo, temperatura de curado, carga y velocidad, se realizaron 3 ensayos durante un tiempo de 600 segundos, del cual para cada lapso de tiempo se obtuvo un valor del coeficiente de fricción dinámico, al concluir el ensayo se realizó la comparación respectiva del peso inicial vs el peso perdido como método experimental para determinar el desgaste y obtener la última variable de análisis.

Como resultado de los experimentos, se fabrica un modelo de comportamiento, en donde en un mapa conceptual se representa la influencia de las variables de experimentación en los cambios de magnitud para la fricción y el desgaste, identificadas durante el análisis de resultados.

El hecho de identificar la influencia de estas variables en la fricción de la resina de poliéster insaturado, permite además proponer el posible comportamiento tribológico de otros polímeros termoestables bajo la influencia de variables similares en condiciones similares.

**Palabras clave:** Coeficiente de fricción, resina poliéster insaturado, desgaste, adhesión.

## INTRODUCCIÓN

El coeficiente de fricción, se conoce como aquel es termino adimensional que relaciona la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos o más cuerpos en contacto. A pesar, del hecho de que los coeficientes de fricción (estáticos y dinámicos) se pueden medir en condiciones de laboratorio, el tiempo y condiciones asociadas a los materiales afectan las mediciones de los dichos coeficientes; sin embargo, muchos investigadores se han dedicado a elaborar tablas en donde reportan los resultados de los posibles coeficientes de fricción a partir de medidas de ensayo entre 2 cuerpos. La obtención y uso de estos coeficientes, es un asunto complejo en el cual se deben tener todas las variables de experimentación que depende de diferentes variables, haciendo poco útil dichas tablas para aplicaciones industriales.

La presente propuesta, se concentrará en determinar el comportamiento tribológico de un material termoestable, específicamente una resina de poliéster insaturado en contacto deslizante, con diferentes contra cuerpos y para la cual se estudiará el efecto de variables como: las condiciones de curado, la dureza del contra cuerpo, la velocidad de deslizamiento, la magnitud de la carga aplicada, entre otras.

El análisis de dichos factores se hará empleando para el análisis un tribómetro tipo Pin Disco recientemente adquirido por la Universidad Pontificia Bolivariana. Al finalizar esta investigación se podrá identificar con mayor claridad la respuesta del material en términos de fuerzas de fricción y características del desgaste de la superficie del cuerpo.

Todos los equipos empleados durante la fabricación y experimentación se encuentran en el laboratorio de Resistencia de materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General.**

Determinar el comportamiento tribológico de una resina de poliéster insaturado sometida a contacto deslizante, utilizando un tribómetro Pin-Disco.

### **Objetivos específicos**

- Establecer el efecto de la variación de las temperaturas de curado de las resinas de poliéster insaturado (UP) sobre el comportamiento tribológico de la resina en contacto deslizante.
- Identificar la influencia de al menos 2 de las variables del ensayo tribológico (velocidad de deslizamiento, carga, contra cuerpo, tiempo de deslizamiento) sobre el comportamiento tribológico de la resina de poliéster insaturado.
- Determinar un modelo de comportamiento del comportamiento tribológico (fricción y desgaste) de la resina de poliéster insaturado, producido durante el contacto deslizante con diferentes contra cuerpos.
- Establecer un protocolo de uso y mantenimiento para el tribómetro Pin-Disco, de la Universidad Pontificia Bolivariana.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se pretende dar una introducción con respecto a todas las bases teóricas necesarias para el desarrollo de este trabajo. De esta forma se empieza hablando de la tribología como principio base e hipótesis para el desarrollo de los objetivos a trabajar. Se continua hablando acerca del desgaste y fricción que tienen los diferentes materiales, de forma que se comprenda cómo interactúan los cuerpos y los contra cuerpos entre sí, son sus mecanismos de acción, además de comprender como se pueden reconocer según sus cualidades o aplicaciones dentro de la industria, Es necesario conocer cada uno de los puntos que se plantean como hipótesis en este trabajo para poder dar juicios válidos y correspondientes en las conclusiones por lo cual el marco teórico que se pretende explicar tiene que estar relacionado con los temas a ejecutar.

### 1.1 TRIBOLOGÍA

El concepto de “tribología”, se usó por primera vez en el año 1966, en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de Gran Bretaña, por lo que en ese año, es donde se reconoce el nacimiento de la tribología, como una nueva disciplina científica, en la que interactúa con ciencias tales como la física, la química, la metalurgia, la economía, la ciencia de materiales, la matemática y la computación en general [1].

La tribología, comienza a ser reconocida como una fuente de gran potencial con el fin de economizar recursos energéticos, financieros, y materias primas; incentivando la investigación en áreas como la fricción, la lubricación y el desgaste para su aplicación en toda industria donde se encuentren presenten elementos en movimiento (pares de fricción) y en donde la fricción y el desgaste, están presentes. Entre los elementos de mayor relevancia en investigaciones de tribología, se destacan elementos de máquinas, aditivos lubricantes, polímeros, metales, cerámicos, recubrimientos y tratamientos superficiales. [1, 2]

En tal sentido diferentes autores plantean procedimientos y sistemas tribológicos los cuales permiten la modelación de sistemas tribológicos y la modelación de tribosistemas de la siguiente manera:

- Modelación de sistemas tribológicos.

Los modelos deben ser elaborados con base en principios físicos conocidos. Para esto se pretende determinar claramente las características de los contactos tribológicos que se producen. [3]

- Modelación de tribosistemas.

Para la modelación de tribosistemas, se debe tener en cuenta el efecto de la rugosidad superficial, y se debe garantizar la posibilidad de calcular la fricción en la superficie de contacto, así mismo, factores como la aparición de partículas, impurezas, suciedades y demás productos del desgaste que pueden influenciar cambios considerables en el tribosistema. [4]

Se debe tener en cuenta que hay dos formas para trabajar estos procedimientos:

- 1.1.1. Seleccionando empíricamente los factores que intervienen en donde debe incluirse la caracterización de la superficie, y una posterior investigación a nivel de laboratorio, donde procesados los datos se conforma un modelo teórico práctico, de manera empírica.
- 1.1.2 Formulación del modelo basada en principios físicos conocidos y su posterior comprobación con los datos experimentales obtenidos, en donde se debe comprobar luego de procesarse, para su posterior aplicación en la práctica.

## 1.2 FRICCIÓN Y DESGASTE

### 1.2.1 Definición: el fenómeno de la fricción.

Se define la fricción como la resistencia al movimiento relativo entre dos materiales que están en contacto. En 1781, tras varios ensayos, fue Coulomb quien emitió la hipótesis de que la fricción entre dos materiales se debe a las rugosidades superficiales que éstos presentan. Es por eso que se intenta racionalizar la resistencia al deslizamiento entre 2 cuerpos como ley universal. [5]

- I. La fuerza de fricción es directamente proporcional a la carga normal aplicada.
- II. La fuerza de fricción es independiente del área de contacto aparente.

El coeficiente de fricción " $\mu$ ", es el parámetro representativo, éste expresa la pérdida de energía cinética y que se debe básicamente a dos fenómenos. Por un lado, el de deformación de las superficies en

contacto, y por otro, el de disipación de calor. Matemáticamente, el coeficiente de fricción  $\mu$  es el cociente entre la fuerza de fricción y la fuerza normal:[5]

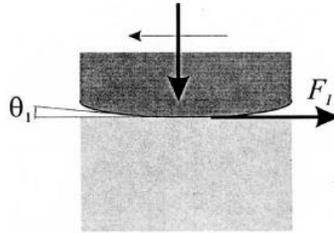


Figura 1.1. Diagrama de fuerzas de fricción. [1]

$$\mu_s = \frac{F_s}{P} \quad (1)$$

$$\mu_k = \frac{F_k}{P} \quad (2)$$

Dónde:

- $\mu_s$ : Coeficiente de fricción estático.
- $\mu_k$ : Coeficiente de fricción dinámico.
- $F_s$ : fuerza estática.
- $F_k$ : Fuerza dinámica.
- $\Theta$ : Angulo de contacto

Los coeficientes de fricción que comúnmente aparecen tabulados, se obtienen mediante una serie de ensayos experimentales, dentro de los cuales cabe resaltar dos:

- Cara con cara
- Pin-Disco

Los cuales censan a través de una celda de carga la tensión ejercida como consecuencia de la oposición al movimiento entre 2 superficies.

### 1.2.2 El fenómeno del desgaste.

El desgaste se define como la pérdida progresiva de material producida por el movimiento relativo entre las superficies y/o sustancias en contacto directo con la misma.

En el desgaste, el acto de ruptura se localiza en un volumen determinado de material, el cual es removido de la zona de rozamiento en forma de partículas de desgaste. La magnitud del desgaste es usualmente valorada por la disminución en dimensiones del cuerpo en una dirección perpendicular a la superficie de deslizamiento. En la figura 1, se representa un comportamiento típico del desgaste en función del tiempo de operación, se observa, que el desgaste, no es constante, y su proceso se compone de 3 etapas. [6]

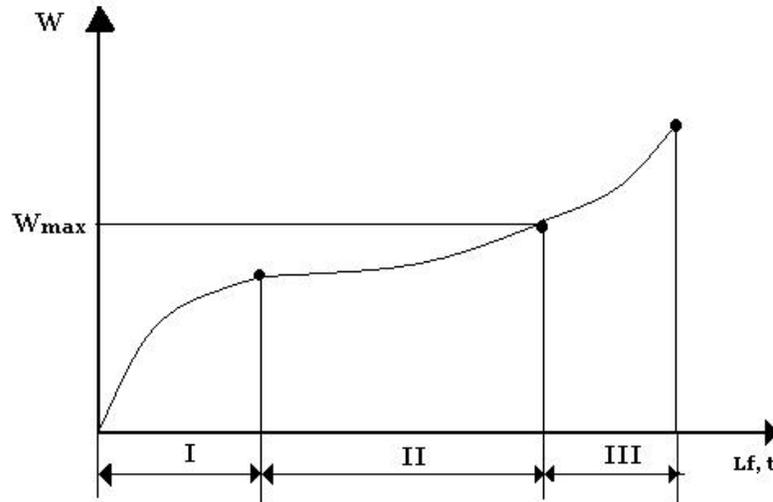


Figura 1.2. Desgaste  $W$ , en función del tiempo  $t$ .

La primera etapa, de asentamiento, es una etapa de no equilibrio del proceso que sigue una función exponencial y representa solo una porción del total de operación del par deslizante.

La segunda etapa del proceso, se caracteriza por valores constantes del régimen de desgaste, por lo que no sigue una función lineal en ningún momento.

La tercera etapa, de desgaste catastrófico, se caracteriza por estar en incremento constante, y no es aplicable a las superficies en rozamiento.

“El desgaste tiene lugar en las partes de la superficie donde hay una fuerte interacción entre los cuerpos en rozamiento, o sea, en los enlaces de las asperezas, que si se suman dan lugar al área real de contacto entre dos cuerpos. En condiciones estables de desgaste, el área real de contacto, no varía en ningún momento” [6].

En aplicaciones industriales, el desgaste es un factor fundamental para tener en cuenta al momento de mantener los equipos en funcionamiento óptimo, ya que en su gran mayoría, los equipos funcionan gracias al movimiento relativo entre las piezas que lo componen, por tanto, el desgaste se conoce como un factor determinante para la vida útil de un gran número de equipos industriales, articulaciones y frenos en sistemas dinámicos.

El desgaste se clasifica en una serie de mecanismos, que componen el fenómeno desde su causa origen.  
[1]

### 1.2.3 Mecanismos de desgaste[1, 2]

Desgaste mecánico: Se produce por procedimientos mecánicos, sin la actuación de sustancias que provoquen efectos de naturaleza química. A su vez, dentro de este grupo se encuentran diferentes procesos:

- Erosión. Es producida por el ataque de un fluido portador de partículas abrasivas a una superficie determinada. Es imprescindible el movimiento relativo entre el fluido y la superficie.
  
- Adhesión: En este caso, la superficie más blanda sufre arranque de material por parte de la más dura debido a las interacciones entre las microrugosidades de cada una. Este material arrancado, que queda atrapado entre ambas superficies, va creciendo progresivamente absorbiendo nuevas partículas desgastadas, pudiendo llegar incluso al límite de producirse microsoldaduras. Si forzamos a estas superficies a moverse tangencialmente, parte de las uniones se deformarán de manera que se producirán más arranques de fragmentos de la superficie más blanda.
  
- Abrasión. El desgaste se produce debido a la puesta en contacto de un material duro con otro más blando, en cuyo caso hablamos de “abrasión de dos cuerpos”. Sin embargo, existe otra forma de abrasión que se produce cuando el daño es producido por alguna partícula

abrasiva ajena al contacto, a menudo contaminantes. En tal caso, hablamos de “abrasión de tres cuerpos” [7].

- Fatiga superficial. Si las superficies en cuestión sufren algún tipo de carga cíclica, el material próximo a la superficie puede generar grietas que con los sucesivos ciclos de carga se irán propagando y ramificando.

Desgaste químico: Se produce si los efectos del desgaste mecánico, definidos anteriormente, se combinan con un desgaste cuyo origen es un agente químico externo. Al ocurrir esto, los efectos son sinérgicos, es decir, se da lugar a una pérdida de material y degradación superficial mucho mayor que si simplemente sumamos los dos mecanismos observados independientemente. La corrosión o la oxidación son dos ejemplos de este mecanismo de desgaste. [8]

#### 1.2.4 Relación entre el desgaste y la fricción

La fricción y el desgaste son dos fenómenos que están relacionados, debido a la influencia que puede producir uno sobre otro.

En el desgaste se producen partículas que quedan atrapadas entre las superficies que están en contacto, influyendo en la fricción. Además, en las uniones se generan temperaturas muy altas en períodos cortos de tiempo, afectando al proceso de deformación y, por lo tanto, al desgaste. [9]

El calor que se genera durante el proceso, genera altas temperaturas, dependiendo a su vez de las condiciones de funcionamiento, de la carga, velocidad y rapidez con la que se elimine el calor, por lo que dependerá de las propiedades térmicas de las superficies que están en contacto, la fricción está relacionada con el contacto superficial, donde es notable la influencia de la naturaleza de las superficies, su composición y microestructura. [10, 11]

Por otro lado, observar cómo evoluciona la fricción en un sistema ayuda a distinguir procesos o cambios en los mecanismos de desgaste, por lo que su observación en conjunto brinda una información valiosa sobre el comportamiento tribológico del material; por tanto, la fricción y el desgaste deben considerarse fenómenos relacionados pero no equivalentes, aunque no sean independientes. El desgaste puede dar lugar a modificaciones superficiales que influyan sobre la fricción, tales como formación de películas y cambios de rugosidad. Por su parte, la fricción, mediante un efecto de calentamiento o de esfuerzos de tracción, puede modificar el comportamiento del material y, por tanto, influir en el desgaste [9].

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este capítulo se definen y describen los métodos, los procesos de fabricación, los equipos y los ensayos realizados durante el desarrollo de la caracterización tribológica de la resina de poliéster insaturado (UP). Se describen los detalles de la fabricación de las probetas de resina poliéster insaturado variando su temperatura de curado (80°C, 100°C y 120°C), hasta la formación de los pines de ¼", procedimiento que permite la evaluación de algunas propiedades mecánicas y tribológicas del material antes de ser sometido a contacto deslizante. Además de los procesos para la fabricación y determinación de las propiedades físicas como dureza y acabado superficial de los materiales que serán sometidos como contra cuerpos como lo son el acrílico (PMMA) y el acero AISI 1020. Es necesario para comprender los materiales una base teórica donde se identifiquen las propiedades de los materiales.

En el diagrama de la Figura 2.1.1, se muestra la metodología experimental, mediante la cual se obtienen los datos para el análisis de la caracterización tribológica de la resina y su efecto en el desgaste.

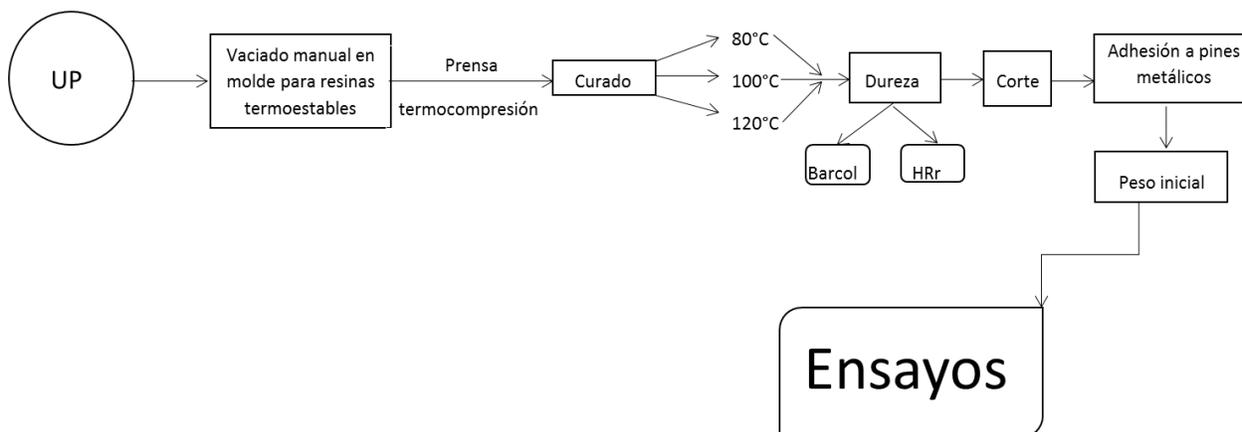


Figura 2.1.1 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.

### 2.1 Vaciado en moldes de resina termoestables

En un molde macho y hembra con el espacio hueco intermedio correspondiente a la pieza. Consta de 2 partes principales:

- La cavidad: Es el hueco que queda entre ambos moldes cuando se ensamblan y es la parte que trabaja y corresponde a la forma de la pieza, debiendo cumplir los requisitos que ésta impone en calidad de superficie, dimensiones, forma y espesor.

- **Sistemas de calefacción:** El conjunto de molde-contramolde puede calentarse según el material en que esté construido. La circulación de fluido por un circuito en serpentín es preferible a todas las demás soluciones. Este método tiene la ventaja de que permite una auténtica regulación de la temperatura, pudiendo añadir o extraer calor según lo demande el momento de la reacción, cuya exotermia puede recalentar peligrosamente el molde.

### 2.1.1 Moldes

Son realizados para este tipo de procesos por fabricantes de moldes específicos, para el caso de fabricación se usó el molde de la Figura 2.2. Su acabado superficial debe ser mayor o igual al acabado que se pretenda tener para los materiales a fabricar en su escala de rugosidad. [13]



Figura 2.2. Moldes usados para la fabricación de los pines de UP; compresión en caliente.

La mezcla para la fabricación de la resina de la cual se sacaron los pines a las diferentes temperaturas de curado se realizó con los siguientes elementos:

- **Resina Cristalán 870:** Resina de poliéster isoftálica, de alta resistencia química. Desarrollada para un amplio rango de aplicaciones críticas donde se requiera una combinación de propiedades mecánicas y alta resistencia química.

Usualmente es usado para la construcción bañeras, pozuelos, lavamanos, laminados, tanques, piscinas y toboganes. [14]

- Metiletilacetona (Mek): La butanona o también, metiletilcetona o mek es un compuesto químico orgánico de la familia de las cetonas. En condiciones ambiente, se presenta en forma de líquido incoloro inflamable, de olor dulzón y penetrante. En la naturaleza, se encuentra como sustancia en el reino vegetal, producido por algunos árboles y presente en pequeñas cantidades en frutos y vegetales. Es un producto industrial, utilizado como base disolvente en diversas aplicaciones y como intermediario de síntesis del peróxido de metil-etil cetona, usado en la catálisis de alguna reacción de polimerización. En el medioambiente, se encuentra como producto derivado de la combustión de carburantes de los motores de medios de locomoción. [15]

La mezcla adecuada de 10 gr del poliéster insaturado, conociendo las propiedades del metiletilacetona, corresponde a las condiciones con las cuales se trabajó; para lo cual, la relación pide un 99% de Cristalán 870 y 1% de MEK (acelerante ya mencionado) respectivamente.

Con esta proporción y con las dimensiones del molde, se permite un espesor de las resinas de 4 mm, lo cual permite realizar los pines de forma adecuada.

## 2.2 Prensa de termo-compresión

Este equipo es usado durante el proceso de fabricación de los pines de poliéster insaturado a las cuales se les hacía un curado a diferentes temperaturas de curado de 80°C, 100°C y finalmente a 120°C, esto con la intención de determinar un delta de temperatura y demostrar la principal hipótesis, la cual da referencia a la variabilidad del coeficiente de fricción dinámico que tienen los materiales según se modifique cualquiera de sus propiedades o las condiciones a las cuales sean sometidos durante el ensayo Pin-Disco. [16]

La prensa de termo-compresión se usa durante el curado del pin (resina de poliéster insaturado) para esto las condiciones ambiente del laboratorio son:

<b>Condiciones de laboratorio</b>	
<b>Temperatura (°C)</b>	24 ± 1
<b>Humedad relativa (%)</b>	60 ± 5

Tabla 2.1. Condiciones de trabajo experimental.

Para nuestro caso la prensa no realizó la función de comprimir; solo de calentar.

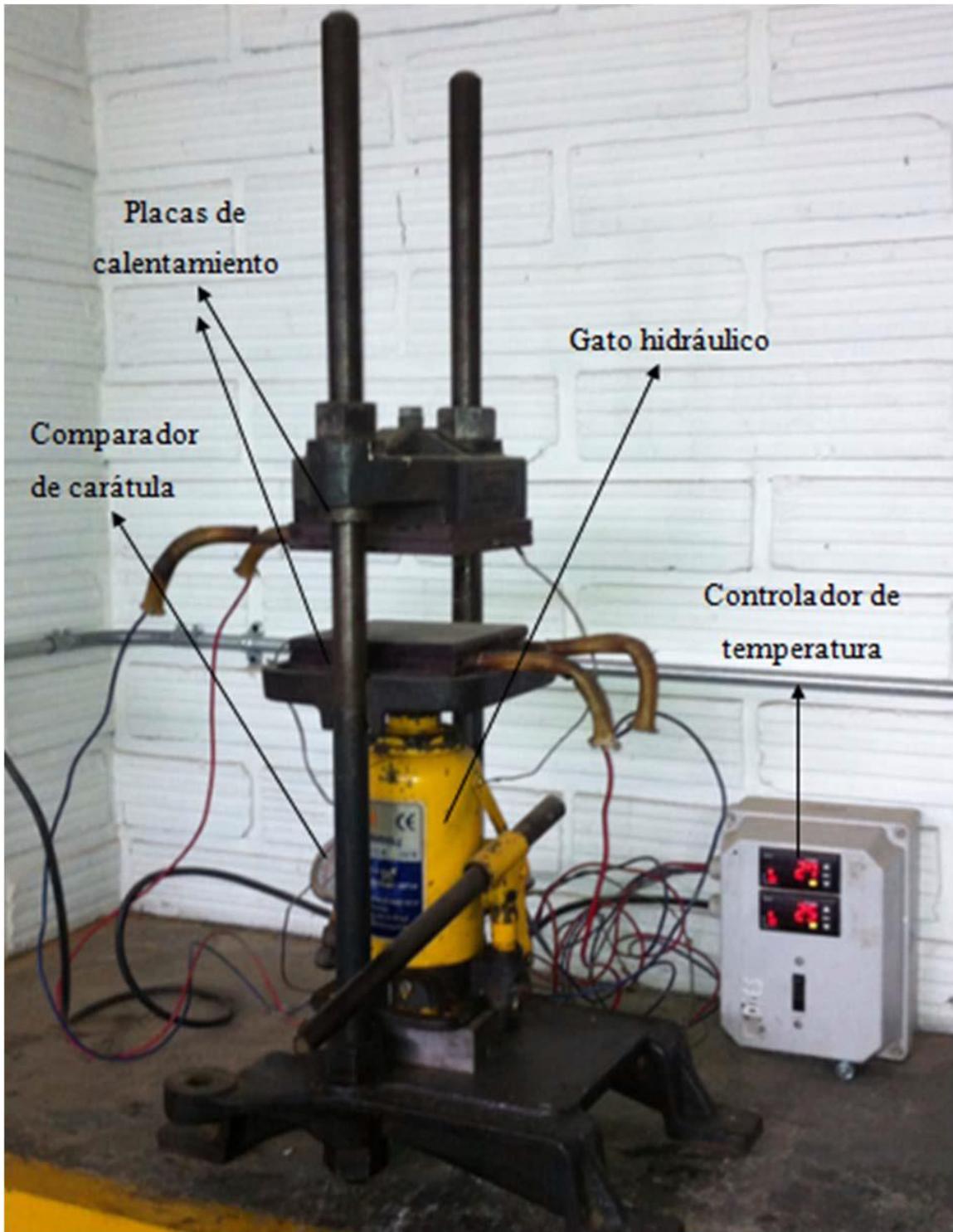


Figura 2.3. Prensa de termo-compresión para el proceso de curado de los pines. [17]

## 2.3 Pruebas de dureza

Se realizan con diferentes instrumentos, a diferentes escalas, de acuerdo a las propiedades mecánicas del material.

### 2.3.1 Dureza escala Barcol:

El método Barcol es una forma de evaluar la dureza de un material a través de la medida de la resistencia a la penetración de una punta de acero forzada por un empuje adicional del operario. En el instrumento de medición, llamado es el durómetro Barcol, hay una escala entre 0 y 100 Barcol.

Este método de medición es usado para obtener la dureza de planchas de metales de baja dureza, como plomo o laminas delgadas, polímeros, gomas y cuero. Además de eso, se usa para medir el nivel de curado de resinas.

Está normalizado por la norma ASTM D2583 (Standard Test Method sea Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor) y por la ASTM B648 (Standard Test Method sea Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Barcol Impressor). [18, 19]

Para la dureza en la escala Barcol se aplica para los cuerpos y contra cuerpos de baja dureza que se trabajaron durante esta experimentación como es el caso de la resina de poliéster insaturado con sus diferentes temperaturas de curado, además para el acrílico (PMMA); de esta forma se pueden hacer relaciones entre los materiales y predecir ciertos comportamientos en el desgaste de los mismos.

El durómetro que se usó para realizar las pruebas de dureza en escala Barcol fue un durómetro Barcol portatil-Barber Colman company No. Serial 1250-DB-100-01. [20]



Figura 2.4. Durómetro Barcol para dureza de elastómeros. [21]

### 2.3.2. Dureza HRB

El ensayo consiste en disponer un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos un esfuerzo que varía desde 60 a 150 kg-f a compresión. Se retira la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice. También se puede encontrar la profundidad de la penetración con los valores obtenidos del durómetro si se conoce el material.

Para evitar errores significativos el espesor de la probeta del material en cuestión debe ser al menos diez veces la profundidad de la huella. También decir que los valores por debajo de 20 y por encima de 100 normalmente son muy imprecisos y debería hacerse un cambio de escala.

El cambio de escala viene definido por tablas que incluyen cifras relativas al material, puesto que no es lo mismo analizar cobre que acero. Estas tablas proporcionan información sobre qué escala usar para no dañar la máquina o el penetrador, que suele ser muy caro. [22]

La dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente

cualquier metal o aleación. Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 in, y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de  $120^\circ \pm 30'$  y vértice redondeado formando un casquete esférico de radio 0,20 mm (Brale), el cual se utiliza para los materiales más duros.



Figura 2.5. Durómetro Rockwell laboratorio de Resistencia de Materiales Universidad Pontificia Bolivariana.

Para la determinación de las escalas Rockwell que se deben usar en la caracterización de las durezas de los materiales a los cuales se le realizaron este ensayo es necesario tener en cuenta la siguiente tabla tomada de la norma ASTM E-18:

<b>Simbolo de la escala</b>	<b>Características de la punta del Durómetro</b>	<b>Fuerza total de la prueba (Kg-f)</b>	<b>Aplicaciones típicas de las escalas</b>
B	1/16 in. Bola de diamante	100	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleación de aluminio, acero maleable etc.
R	1/2 in. Bola de acero	60	Rodamientos metálicos y otros materiales suaves.

Tabla 2.2. Aplicación de la escala de dureza Rockwell para diferentes materiales. [22]

Se pueden identificar en la tabla 2.2 las dos escalas usadas en los ensayos de dureza, las cuales son las determinantes para los tipos de materiales que se usaron durante el ensayo Pin-Disk, la escala Rockwell R con punta de acero (HRR) la cual es la más indicada para los elastómeros, es decir, la resina de poliéster insaturado para los pines y los discos de acrílico (PMMA) los cuales son usados como contra cuerpo.

La otra escala se puede ver en la tabla 2.2 es la Rockwell B con punta de tungsteno (HRB) es utilizada para los contra cuerpos de acero AISI-1020, la cual es la más apropiada para este tipo de materiales según la tabla de la norma ASTM E-18.

El durómetro que se usó para realizar las pruebas de dureza en escala Rockwell fue un Durómetro Universal digital-Instrom No. Serial 0930P6632. [20]

Continuando con la metodología de fabricación de los contra cuerpos es necesario seguir las especificaciones que se dan en la Figura 2.1.2. La cual representa el proceso mediante el cual se obtuvo las probetas de acero 1020 y acrílico usadas como material de contra cuerpo para la experimentación.

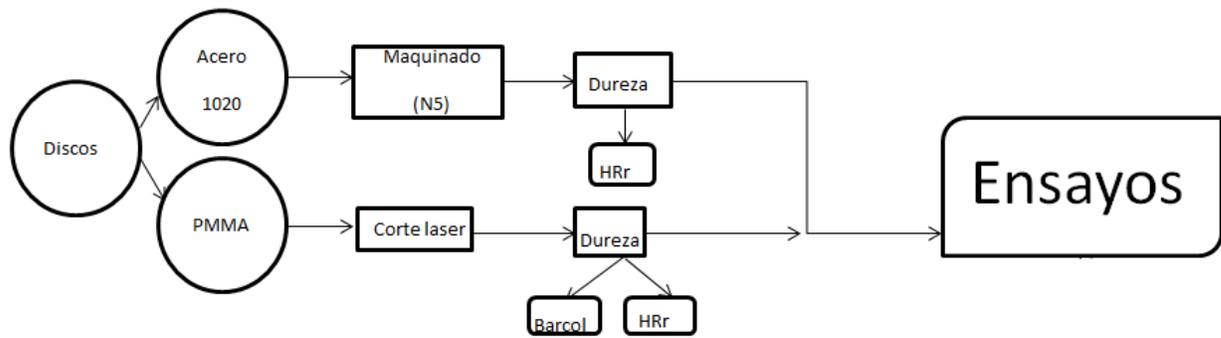


Figura 2.1.2 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.

## 2.4 Corte

Es el primer paso para empezar con la fabricación tal y como se ve en la figura 2.1.2. Para poder realizar el corte de los pines de poliéster insaturado y de los discos para los contra cuerpos de acrílico (PMMA), es necesario determinar un sistema que no altere las propiedades de los materiales de forma que la dureza o condiciones de curado sigan siendo las mismas a través de los diferentes procesos hasta llegar a la experimentación, es por eso que se selecciona el corte laser como medio para el corte de estas piezas, de forma que se garantice precisión en las medidas de las piezas y se garantice igualdad en las condiciones iniciales.

Se debe tener en cuenta las características de la máquina de forma que se garantice un corte pulido y que no afecte las propiedades de las piezas:

- Modelo: GLC-9060
- Área de trabajo: 900x600 mm
- Potencia: AC 110 V (+-10%) 60 Hz
- Potencia máxima del láser: 70 W
- Numero de serial: GI-10311
- Potencia bruta: 1500 W

Esta máquina es una cortadora laser industrial, utilizada normalmente para el área textil en el corte de cueros, telas y algunos plásticos. Para cada tipo de material la potencia del láser tiene que variar según especificaciones o potencia que se necesite para poder realizar el corte ideal, puesto que muy poca potencia no logra el corte y mucha potencia puede generar que el material se queme.



Figura 2.6. Cortadora laser para el corte de pines de poliéster insaturado y contra cuerpos de Acrílico.

Dado el espesor y tipos de materiales para los cuales se pretende hacer el corte, fue necesario usar la potencia máxima del láser, correspondiente a 70 Watts como se indica anteriormente. Para los pines de poliéster insaturado se hace un diseño previo de círculos con un diámetro de  $\frac{1}{4}$  in, según salen de los moldes, el cual corresponde a un cilindro de diámetro 2 in y un espesor de 0.16 in, como se muestra en la figura 2.7:

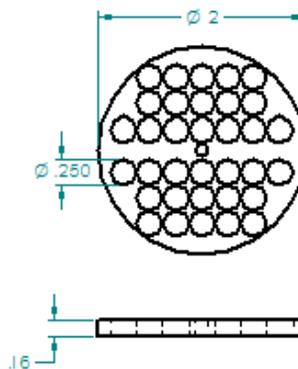


Figura 2.7. Corte de pines en molde de resina de poliéster insaturado.

Conociendo la semejanza en la magnitud de la dureza del acrílico (PMMA) y la resina de poliéster insaturado, se determina usar el mismo proceso de corte por medio de la cortadora laser, es decir, a la máxima potencia, sabiendo que este cuenta con un espesor de 4 mm, semejante al de poliéster insaturado. Además se hace un recorte circular a las placas de Acrílico (PMMA) con un radio de 70 mm, con un agujero de 5 mm en el centro el cual aporta como guía en la ubicación de los contra cuerpos en el porta muestras del tribómetro Pin-Disco.

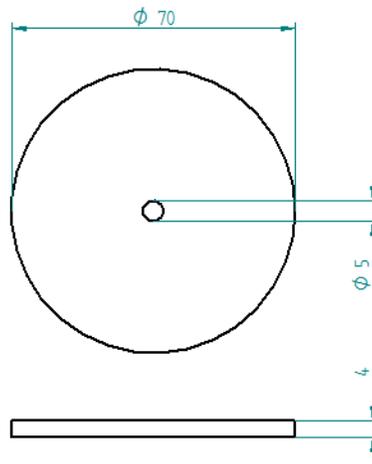


Figura 2.8. Corte del contra cuerpo acrílico (PMMA).

#### 2.4 Adhesión a los pines

El cianoacrilato durante el proceso de fabricación de los pines para realizar los ensayos es usado para la unión entre los portapines de aluminio y los elementos cortados de poliéster insaturado (UP), de forma que se genere una adhesión entre ellos fuerte asegurando así una buena estabilidad durante las pruebas sin que se presenten fenómenos de vibración o ruido que afecte los ensayos correspondientes bajo cualquier condición o contra cuerpo que sea expuesto el pin.

El cianoacrilato es generalmente una resina acrílica, que polimeriza rápidamente en presencia de agua formando cadenas largas y fuertes. Son líquidos incoloros y de baja viscosidad. El metil-2-cianoacrilato se usa como componente del pegamento de cianoacrilato y su calentamiento provoca la despolimerización, produciendo elementos gaseosos muy irritantes para los pulmones y los ojos. El n-butil-cianoacrilato es un éter, insoluble en agua, incoloro y líquido. Su empleo principal es como componente de cianoacrilatos de uso médico.

La fuerza adhesiva de este compuesto depende de la polimerización de monómeros de cianoacrilato formándose uniones muy fuertes. Los ácidos débiles inhiben débilmente la polimerización, sin embargo los ácidos fuertes la paran completamente. La ruptura de este polímero puede hacerse con acetona.

El cianoacrilato y el algodón reaccionan porque el algodón está constituido primariamente de celulosa, la cual posee muchos grupos hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), iniciándose una reacción de polimerización muy exotérmica.

El cianoacrilato puede ser sintetizado por reacción de formaldehído, obteniéndose así un prepolímero, el cual por calentamiento es despolimerizado en un líquido monómero. Dicho monómero puede ser modificado para obtener distintos compuestos de longitudes de cadena diferentes.

Algunos pegamentos son 100% etil cianoacrilato y otros tienen una mezcla en su composición. [22]



Figura 2.9. Imagen de pin de poliéster insaturado (UP) unido a portapines de aluminio.

## 2.5 Toma de pesos

Este procedimiento es realizado para determinar el desgaste del pin frente al contra cuerpo, es por esta razón que se toma el peso antes de iniciar la experimentación y después de terminar la experimentación. Esta medida es tomada en gr, de forma que la diferencia entre estos dos pesos nos permite determinar fenómenos de adhesión del contra cuerpo frente al pin de poliéster insaturado normalmente identificado por la dureza de los materiales o pérdida de material del pin de poliéster insaturado frente al contra cuerpo. Estos resultados se determinan por medio de la Balanza densimétrica Shimadzu AX200.



Figura 2.10. Balanza densimétrica para pesos de pines.

## 2.6 Maquinado

La rugosidad del material está dada por el valor de la media aritmética del perfil el cual equivale a los valores absolutos de las desviaciones del perfil, en los límites de la longitud básica  $l$ . Es el parámetro más común en la medida de la rugosidad tal como se ve en la siguiente figura:

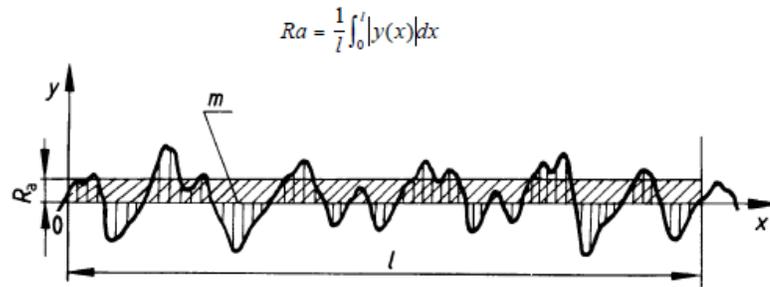


Figura 2.11. Diagrama para determinación de la rugosidad  $Ra$ . [23]

Con la siguiente información se pretende realizar un análisis de rugosidad de los contra cuerpos de acero AISI 1020, con acabado  $Ra$  equivalente a N5 el cual relaciona su rugosidad según la siguiente información [22]:

Valor de rugosidad $Ra$ en $\mu m$	Clase de rugosidad
0,4	N5

Tabla 2.3. Valor de la Rugosidad  $Ra$  en  $\mu m$  con equivalencia a su clase. [24]

Como se observa en la tabla 2.3, se buscó que el material tuviera una rugosidad baja en este caso N5 para tener comportamientos más estables y poderse determinar valores del coeficiente de fricción de forma estables o con comportamientos logarítmicos en sus curvas de experimentación, lo cual ayuda a determinar valores precisos y predictivos a través de las condiciones seleccionadas para los experimentos en ejecución.

Para llegar a estos acabados se realizó un proceso de maquinado de los discos de acero AISI 1020 por medio de Fresadoras de control numérico (CNC), con el cual se manejan las variables de velocidad y paso de las herramientas, lo cual ayuda a cumplir con las expectativas de llegar a esta clase de rugosidad. Finalmente después de terminar con el maquinado se realiza una inspección visual con una galga de comparación para acero al carbón (acero con el cual se está trabajando y galgas de comparación normalizadas bajo parámetros de maquinado) para determinar su rugosidad final.

## 2.7 Ensayos

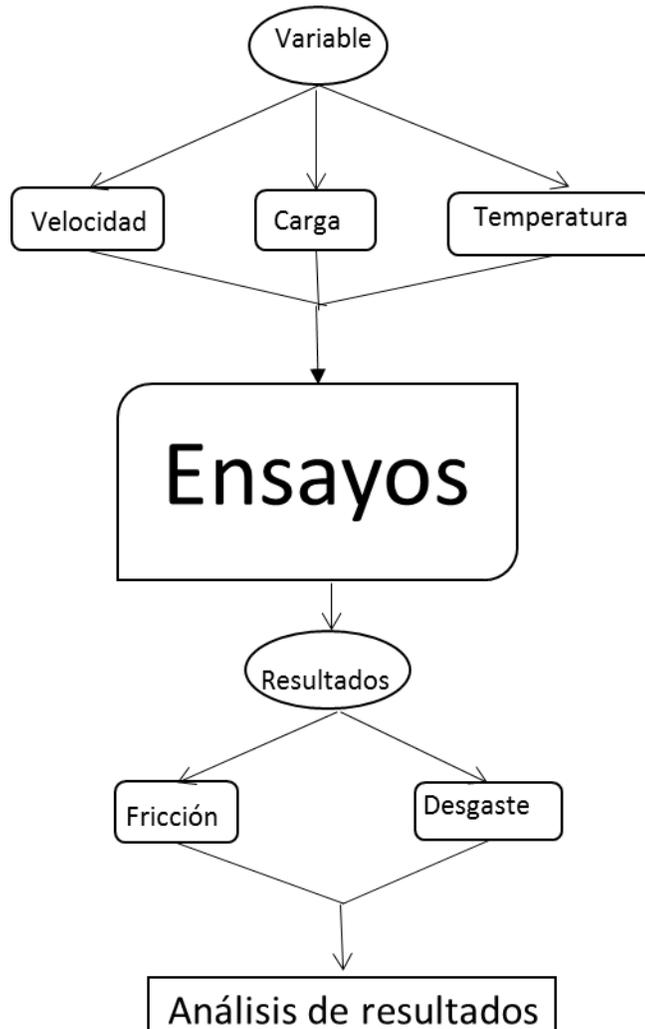


Figura 2.1.3 Diagrama desarrollo de la metodología para el trabajo experimental.

Para la experimentación, se sigue el procedimiento ilustrado en la figura 2.1.3, correspondiente a la distribución de los ensayos a partir de la combinación de parámetros y variables escogidas para los ensayos sobre el tribómetro Pin-Disco, el cual nos permite realizar la respectiva experimentación. Esto con el fin de relacionar las características de un material con otro por medio de los ensayos tribológicos, es necesario conocer los límites y condiciones de uso, de esta forma se protege el equipo y se adquieren resultados precisos evitando que factores externos alteren los resultados.

Precisamente, la fricción se ve afectada drásticamente por los siguientes parámetros: la temperatura de curado de la resina, la velocidad de deslizamiento, la magnitud de carga del peso muerto, y material del contra cuerpo.

Para cada una de las variables mencionadas, se definen rangos de trabajo, dentro de los cuales entran a variar las experimentaciones.

	<b>Alta</b>	<b>Media</b>	<b>Baja</b>
<b>Velocidad [RPM]</b>	360	720	1080
<b>Temperatura de curado [°C]</b>	80	100	120
<b>Carga[Gr]</b>	1000	520	313

Tabla 2.4.Variación de parámetros de experimentación.

<b>Material Contra cuerpo</b>	<b>Blando</b>	<b>Duro</b>
	Acrílico PMMA	Acero 1020

Tabla 2.5. Variación de los contra cuerpos con respecto a las variables.

De acuerdo a estos rangos, el proceso experimental combina cada una de las variaciones de los parámetros con el fin de generar una matriz experimental; cabe destacar que los experimentos para cada variable se realizaron 3 veces, para lo cual se ejecutaron no menos de 162 ensayos con un tiempo de cada ensayo de 8 a 15 minutos.

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante la experimentación que tiene como objetivo la caracterización tribológica de la resina de poliéster insaturada sometida a contacto deslizante y su efecto en el desgaste, siguiendo los estándares y procedimientos en el capítulo de metodología.

Las características tribológicas se obtienen mediante el análisis de los resultados analizados, consignados en una matriz, en donde se ubica la distribución de los resultados obtenidos para la fricción y el desgaste, según la combinación de parámetros y variables de experimentación,

#### 3.1 Dureza

Las condiciones de dureza se tomaron con las siguientes condiciones de laboratorio tabla 3.1. Siguiendo la norma ASTM E-18 2011 [20]:

<b>Temperatura (°C)</b>	24 ± 1
<b>Humedad relativa (%)</b>	60 ± 5

Tabla 3.1. Condiciones de laboratorio para ensayos de dureza.

##### 3.1.1 Mediciones en acero.

Las mediciones de dureza en el acero, se realizaron siguiendo los parámetros descritos en la norma, y cada medida con el durómetro se realizó 5 veces, en solo una escala, la escala B, usada para mediciones en materiales tales como aleaciones de cobre, de aluminio y aceros suaves.

Se realizó la prueba en 5 puntos diferentes del disco del contra cuerpo, y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.2.

<b>Norma:</b>	<b>ASTM E-18</b>
<b>Material:</b>	<b>Acero AISI 1020</b>
<b>Escala:</b>	<b>HRB</b>
1.	96,6
2.	96,4
3.	97,3
4.	96,5
5.	97,8
Promedio	96,92

Tabla 3.2. Valores de dureza del acero.

### 3.1.2 Dureza acrílico PMMA.

Los ensayos de dureza se hicieron de manera análoga a los procedimientos, cumpliendo con las normas de la medición Barcol y Rockwell, en la escala R, usada normalmente en aplicaciones que involucran materiales de baja dureza o bajo espesor.

A pesar de ser un procedimiento análogo al del acero, el rango de dureza del material, permite lectura de mediciones en la escala Barcol, los resultados obtenidos en el proceso se muestran en la tabla 3.3.

<b>Norma:</b>	<b>ASTM E-18</b>	
<b>Material:</b>	<b>PMMA</b>	
<b>Escala:</b>	<b>Barcol</b>	<b>HRR</b>
1.	48	123
2.	52	124
3.	52	124
4.	48	124
5.	52	124
Promedio	50,4	123,8

Tabla 3.3. Valor dureza PMMA.

### 3.1.3 Dureza resina poliéster insaturado UP.

Luego del proceso de formación de las probetas de resina de poliéster insaturado, se obtienen una serie de discos de 7,5 cm de diámetro, que para la obtención de sus valores de dureza, se hace un procedimiento análogo al de los materiales anteriores; sin embargo, en el caso de la resina, existe una variable asociada, la temperatura de curado del material.

Al ser la resina de poliéster insaturado un polímero termoestable, sus propiedades varían bajo la influencia del calor; entre esas propiedades mecánicas, la dureza es el objeto de análisis y para ello se miden las durezas de cada uno de los discos a diferentes temperaturas de curado en la escala R, de frecuente uso para polímeros, con el fin de analizar la influencia de la temperatura de curado en los cambios de la dureza para cada uno de los discos.

Dureza escala HRR.

Para cada una de las probetas se realizaron 5 mediciones en puntos diferentes alrededor de la probeta, obteniendo valores de dureza, los cuales son promediados, y desde ese valor único, se hace el análisis.

[24]

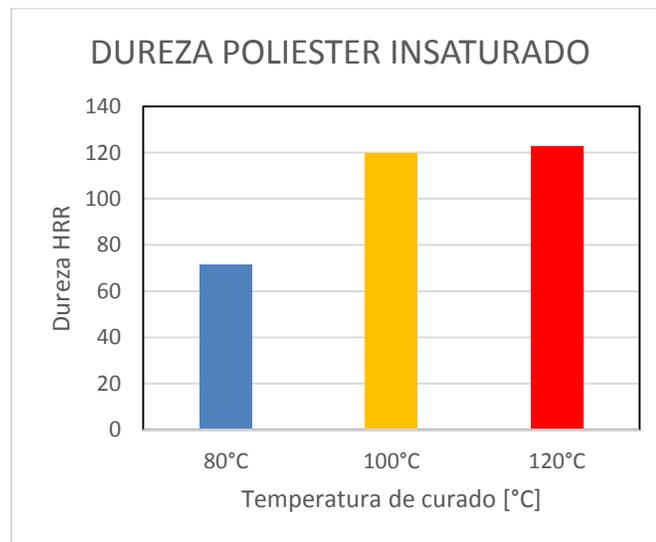


Figura 3.1. Temperatura de curado vs dureza en escala HRR resina de poliéster (UP).

A medida que aumenta la temperatura de curado de la resina, aumentan los valores de la dureza, el cambio de la temperatura de curado de 80°C a 100°C indica un aumento exponencial, cambiando de 71

HRR a 119 HRR, aumentando en un 40% la dureza del material, mientras que el cambio en la dureza entre el curado a 100°C y 120°C, no provoca cambios significativos, pues como se aprecia en la figura 3.1, la diferencia entre durezas es de 1HRR, situación que da indicios a una homogeneidad en el comportamiento de la dureza cuando la temperatura de curado de la resina está entre 100 y 120°C.

### 3.2 Dureza escala Barcol.

Procedimiento análogo al ejecutado con la dureza Rockwell, se realizan 5 mediciones para cada una de las probetas de resina UP a su temperatura de curado correspondiente, sin embargo, el medidor de dureza no registro valores para la resina curada a 80°C, puesto que el valor estaba por debajo de la escala Barcol, estos valores se registran en la figura 3.2.

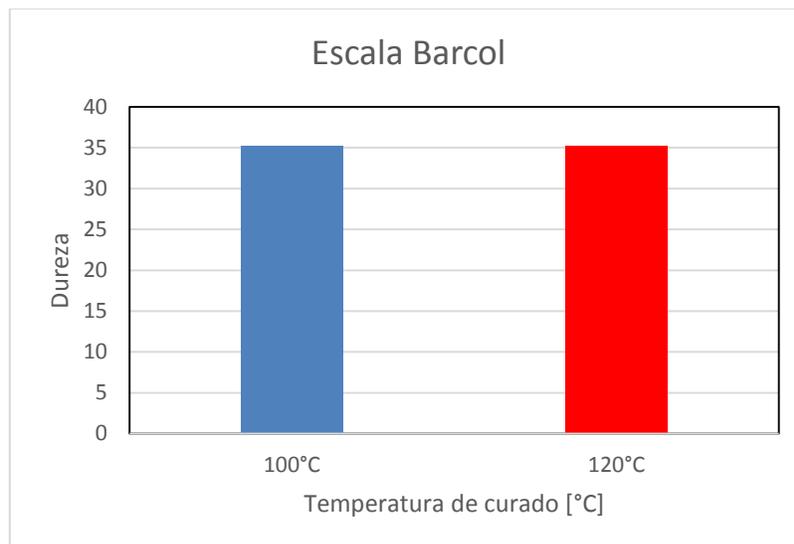


Figura 3.2. Dureza vs Temperatura de curado resina de poliéster (UP).

El hecho de no poder registrar el valor de la dureza de la probeta curada a 80°C con el durómetro Barcol, indica que su valor está por debajo de la escala en la que se midieron las probetas curadas a 100° y 120°, representando un valor de dureza mucho menor.

Los valores de la dureza en el curado a 100 y 120°C, están representados por el mismo valor 35,2; valor que representa una homogeneidad en el comportamiento de la dureza, en donde se estabiliza cuando la temperatura de curado aumenta. [25]

### 3.3 Coeficiente de fricción.

Se analizará el comportamiento del coeficiente de fricción según las condiciones de las variables de experimentación, es decir, entender la influencia de variables como la velocidad de deslizamiento, la magnitud de la carga, la temperatura de curado de la resina o el material del contra cuerpo, en las variaciones de magnitud de la fricción.

El proceso de experimentación entrega 162 resultados, 81 para cada material de contra cuerpo, en donde para cada asociación de variables con los materiales de contracuerpo, se hicieron tres experimentos.

Como se explicó en la metodología, capítulo 2, el tribómetro entrega como resultado de salida una serie de valores en 2 columnas (Tabla 3.4), la columna 1, corresponde al tiempo de experimentación y la segunda al valor de la fuerza de fricción en ese instante. Para cada valor de la fuerza, se calcula el coeficiente de fricción y la media geométrica de los coeficientes obtenidos, procedimiento análogo para los tres experimentos.

Tiempo (s)	Fuerza 1 (Lb-F)	COF 1	Fuerza 2 (Lb-F)	COF 2	Fuerza 1 (Lb-F)	COF 3
1	0,405	0,17	0,518	0,21	0,524	0,22
2	0,404	0,17	0,514	0,21	0,524	0,22
3	0,401	0,17	0,518	0,21	0,525	0,22
4	0,402	0,17	0,519	0,21	0,544	0,22
5	0,405	0,17	0,515	0,21	0,535	0,22
6	0,406	0,17	0,513	0,21	0,534	0,22

Tabla 3.4. Datos de salida y calculo COF.

El coeficiente de fricción para cada valor de la fuerza, se calculó mediante la siguiente formula:

$$COF = Ff * 4,45/9,8$$

Dónde:

- Ff: es la fuerza de fricción detectada por la celda de carga [Lb-f.]
- 4,45: Factor de conversión de Lb-F a Newton.
- 9,8: Gravedad teórica [ $\frac{m}{s^2}$ ].

El número de valores de fuerza corresponde al número de coeficientes obtenidos, a partir de los cuales se obtiene la media geométrica para obtener un valor representativo de la fricción en cada experimento.

Como de cada combinación de variables de experimentación se hicieron tres experimentos, se obtuvieron tres valores de media geométrica, los cuales se promedian, para obtener un coeficiente de fricción promedio que representa el valor de la fricción producto del contacto deslizante entre la resina y el material del contra cuerpo, a condiciones específicas.

### 3.4 Caracterización tribológica.

La caracterización tribológica del material se hace a partir del análisis de datos y gráfico de la influencia de las variables de experimentación en cada uno de los materiales del contra cuerpo.

En el análisis gráfico, los gráficos de línea representan el seguimiento de los puntos y nunca una tendencia, pues para la experimentación, se hicieron tres ensayos, datos insuficientes para generar una tendencia.

Para la caracterización tribológica a partir de los resultados obtenidos, se genera una matriz con los resultados y sus variables correspondientes, con el fin de hacer un análisis a partir de las similitudes o diferencias en los resultados cuando cambian las variables. Con el objetivo establecer una idea preliminar del comportamiento tribológico de la resina en el material y entender la influencia de las variables usadas en la experimentación.

### 3.4.1 Acero.

Con los resultados obtenidos mediante el promedio de la media geométrica de los valores del coeficiente de fricción de los 3 ensayos correspondientes a cada una de las pruebas, teniendo en cuenta la variación de los parámetros de experimentación, se construye una matriz donde se consignan los coeficientes promedio y las condiciones de experimentación, producto de la fricción producida mediante el contacto deslizando con el acero.

Curado [°C]	Velocidad Baja	Velocidad media	Velocidad Alta	Condición de carga
80°C	0,17	0,35	0,2	Baja
	0,14	0,51	0,27	Media
	0,21	0,27	0,25	Alta
100°C	0,24	0,35	0,79	Baja
	0,18	0,28	0,46	Media
	0,23	0,17	0,3	Alta
120°C	0,18	0,39	0,28	Baja
	0,27	0,31	0,43	Media
	0,34	0,3	0,33	Alta

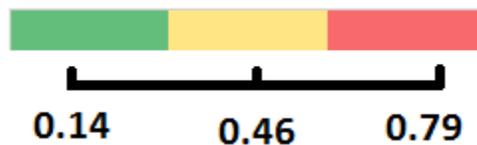


Tabla 3.5. Promedio de la media geométrica de los coeficientes de fricción del acero y sus condiciones.

A partir de los valores representados en la tabla 3.5, se pueden apreciar comportamientos típicos del comportamiento de la fricción previos al análisis de la influencia de las variables de experimentación.

Se puede apreciar entonces, que en general, la fricción contra el acero, es menor cuando la velocidad de deslizamiento es baja, y aumenta a medida que la temperatura de curado crece. [24]

Para la caracterización del efecto de las variables de experimentación y de las condiciones de los materiales en contacto deslizando, se escoge una de las variables asociadas a las condiciones de

experimentación (carga, velocidad y temperatura de curado), en este caso la carga, para a partir de ella, graficar las demás variables y encontrar relaciones que permitan establecer la influencia de las condiciones de experimentación y del material sobre las variaciones en el coeficiente de fricción.

Al escoger la variable carga, para la caracterización del comportamiento tribológico de los pines de resina UP en contacto deslizante con el acero, aparecerán 3 tipos de gráficas, correspondientes cada uno de los rangos de carga (alto, medio y bajo). En cada una de ellas, se grafica el efecto del aumento de la velocidad en la fricción, para cada una de las temperaturas de curado. [26]

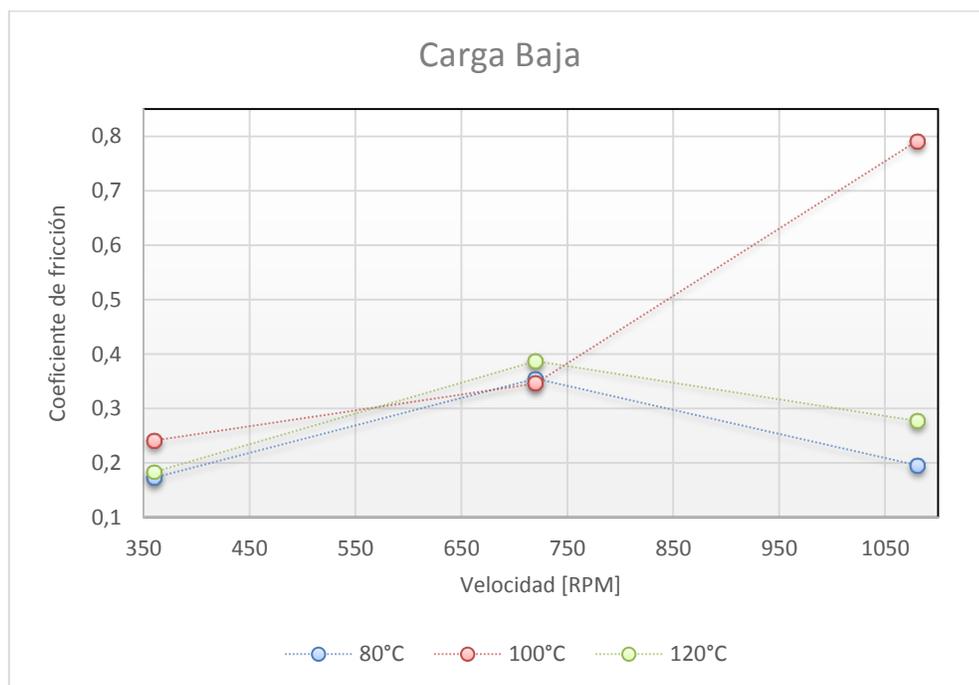


Figura 3.3. Velocidad vs fricción, a carga baja contra cuerpo Acero.

Tal y como se aprecia en la figura 3.4, el comportamiento tribológico de la resina, en la transición de velocidad entre los rangos bajo a medio, presenta un comportamiento homogéneo para las todas las temperaturas de curado experimentales (80°C, 100°C, 120°C), comportamiento que demuestra, que a medida que aumenta la velocidad de del contacto deslizante, existe un crecimiento en la fricción para todas las temperaturas de curado. [27]

Mientras tanto, la transición de velocidad entre los rangos medio y alto, no presenta un comportamiento homogéneo para todos los ensayos, pues se aprecia un crecimiento significativo para el curado a 100°C,

mientras que las probetas de 120°C y 80°C, presentan un decrecimiento en la fricción, que hace se comporte de manera similar a la velocidad baja

Los valores de fricción para la velocidad baja de las tres temperaturas de curado, se encuentran entre 0,18-0,24, y entre 0,34-0,38, para la velocidad media, valores muy cercanos que indican similitud en el comportamiento tribológico de la resina en contacto deslizante, girando entre el rango bajo a medio.

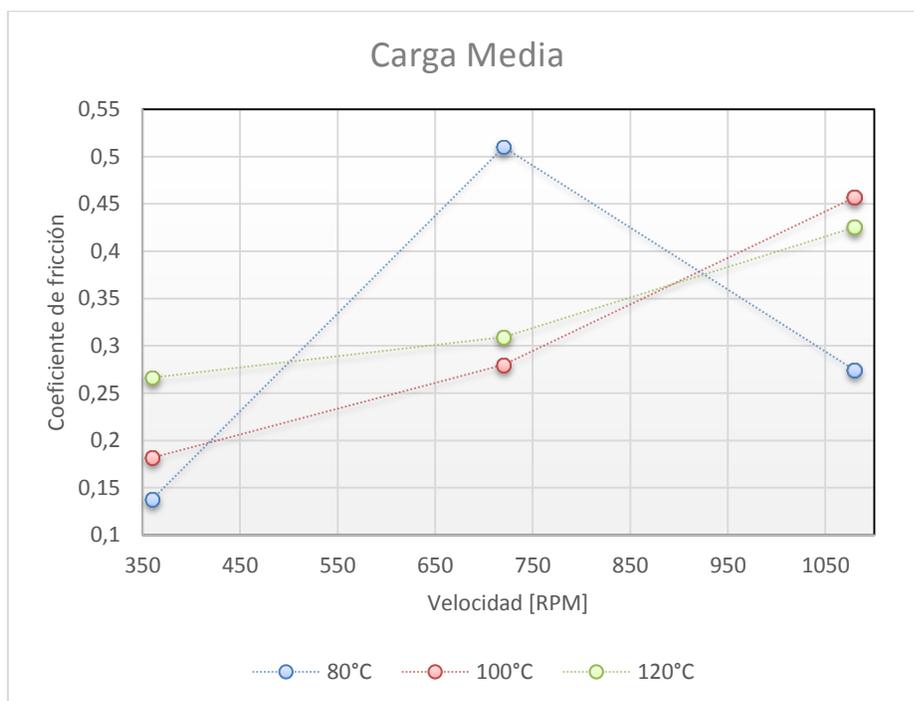


Figura 3.4. Velocidad vs fricción, a carga media contra cuerpo Acero.

En la gráfica 3.4, la fricción no muestra un comportamiento homogéneo, pues mientras que para el curado a 100°C y 120°C, a medida que aumenta la velocidad, la fricción experimenta aumentos desde todas sus transiciones de velocidad, para el curado a 80°C, el aumento de la velocidad provoca un crecimiento desde la transición de baja a media, y un decrecimiento desde media a alta.

Particularmente, el contacto deslizante a velocidad baja, permite evidenciar que bajo esas condiciones, a medida que aumenta la temperatura de curado de la resina, la fricción aumenta, además en la tabla 3.3, se evidencia que las durezas de la resina en condición de velocidad baja, aumentan según la temperatura de curado crece.

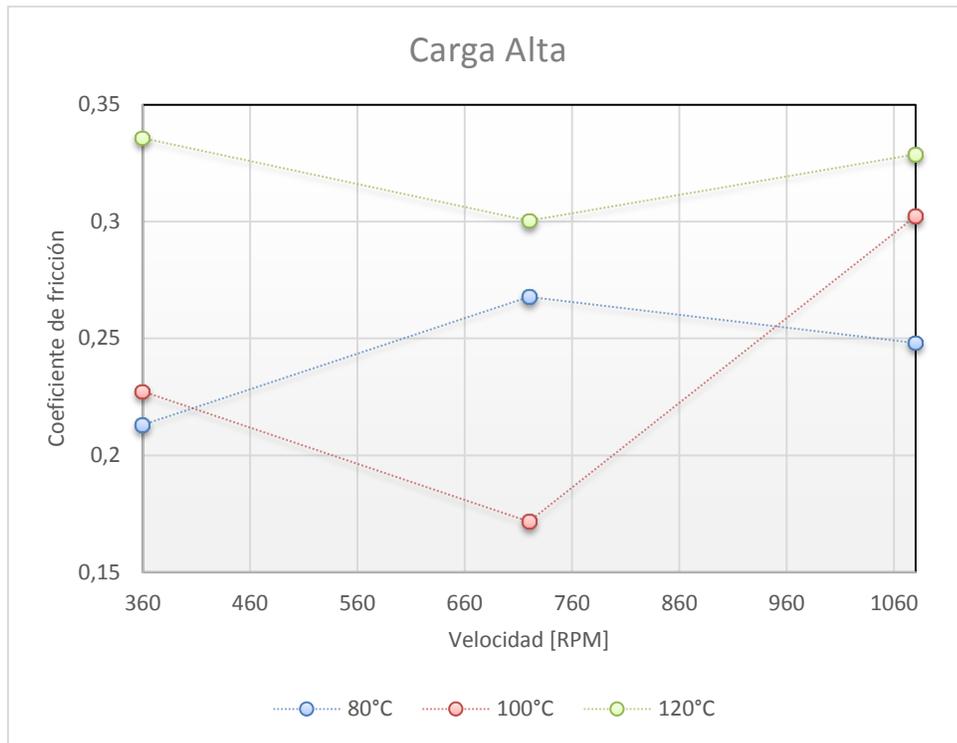


Figura 3.5. Velocidad vs fricción, a carga alta contra cuerpo acero.

En la figura 3.5, se aprecia que el comportamiento tribológico de la resina a carga alta en el acero, no tiene un comportamiento homogéneo que relacione las condiciones de velocidad con el cambio en la fricción, sin embargo, con la condición de velocidad media, el coeficiente de fricción, experimenta aumentos mientras la temperatura de curado de la resina aumenta.

Con la condición de carga alta, la fricción experimenta los valores más altos para cada velocidad, cuando la temperatura de curado de la resina es de 120°.

### 3.4.2 PMMA

De manera análoga al procedimiento con el acero, se hace el análisis de la influencia de las variables fricción, velocidad y temperatura de curado, para cada una de las condiciones de carga elegidas para el análisis.

T Curado °C	Velocidad baja	Velocidad Media	Velocidad Alta	Condición de carga
80°C	0,30	0,65	0,70	Baja
	0,25	0,53	0,34	Media
	0,22	0,63	0,37	Alta
100°C	0,20	0,38	0,38	Baja
	0,22	0,58	0,42	Media
	0,26	0,70	0,40	Alta
120°C	0,46	0,25	0,19	Baja
	0,30	0,66	0,29	Media
	0,61	0,63	0,23	Alta

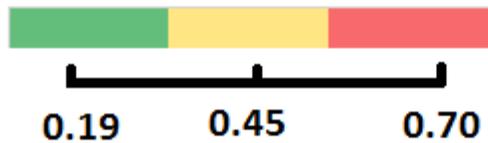


Tabla 3.6. Promedio de la media geométrica de los coeficientes de fricción del PMMA y sus condiciones.

En el PMMA, a partir de los resultados de la tabla 3.6, se observa en general que:

- La fricción alcanza los valores más altos con la condición de velocidad media.
- Con la condición de velocidad alta, el curado a 120°C, es el que expresa los valores menores en la fricción.
- En el curado a 80°C y 120°C, la fricción es menor cuando la velocidad de deslizamiento es baja.
- En general la velocidad media en el PMMA, es en donde los valores de la fricción alcanzan sus mayores expresiones en magnitud.

Teniendo en cuenta el análisis previo, se procede a analizar la influencia de las variables, bajo las condiciones de carga.

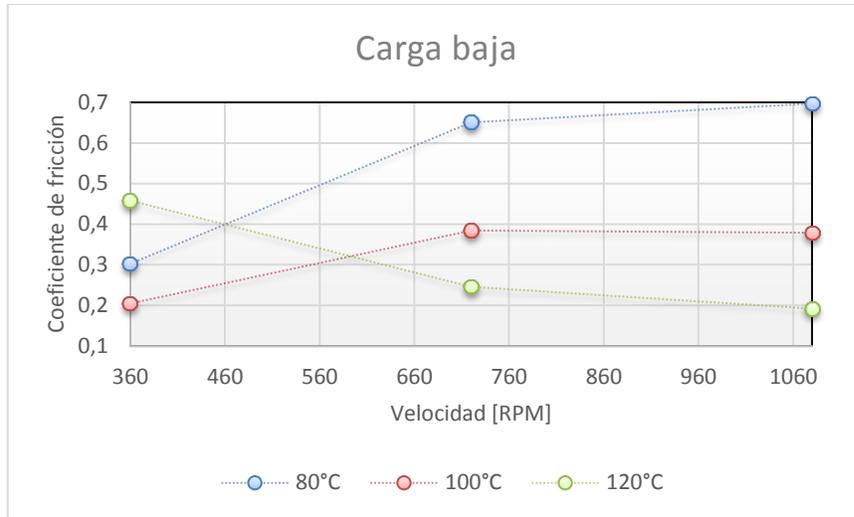


Figura 3.7. Velocidad vs fricción, a carga baja contra cuerpo Acrílico.

Para la condición de carga baja en el PMMA, se observan dos tipos comportamientos, figura 3.6, que aunque similares, en las probetas en el curado a 80° y 100°C, la fricción experimenta aumentos mayores en la transición de velocidad baja a media, y un aumento menor en la velocidad media a alta, el curado a 120°C en cambio, disminuye en mayor proporción en la transición de velocidad baja a media, que de media a alta, situación que aunque expresa comportamientos inversos, evidencia el hecho de que existe un comportamiento homogéneo en la fricción en la transición de velocidad media a alta, donde disminuyen las variaciones en magnitud.

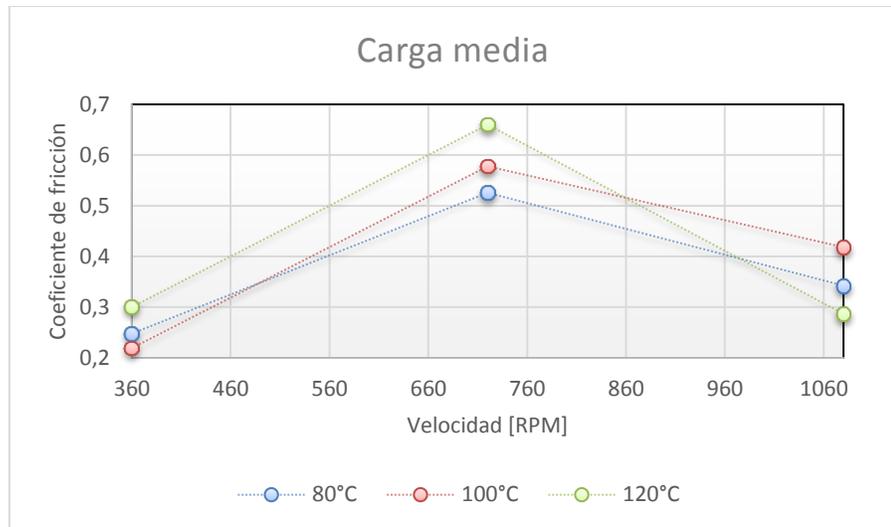


Figura 3.8. Velocidad vs fricción, a carga media contra cuerpo Acrílico.

Como se aprecia en la figura 3.7, la carga media en el acrílico provoca el mismo comportamiento para las tres temperaturas de curado, aumentos en la fricción en la transición de velocidad baja a media, y disminución en la transición de media a alta.

A pesar de tener el mismo comportamiento para las temperaturas de curado, los valores de fricción para cada una de las velocidades, no tienen un patrón que representen una homogeneidad el valor más alto de la fricción para cada condición de velocidad, pues para cada condición, cambia la temperatura de curado que representa el valor de mayor fricción. [28]

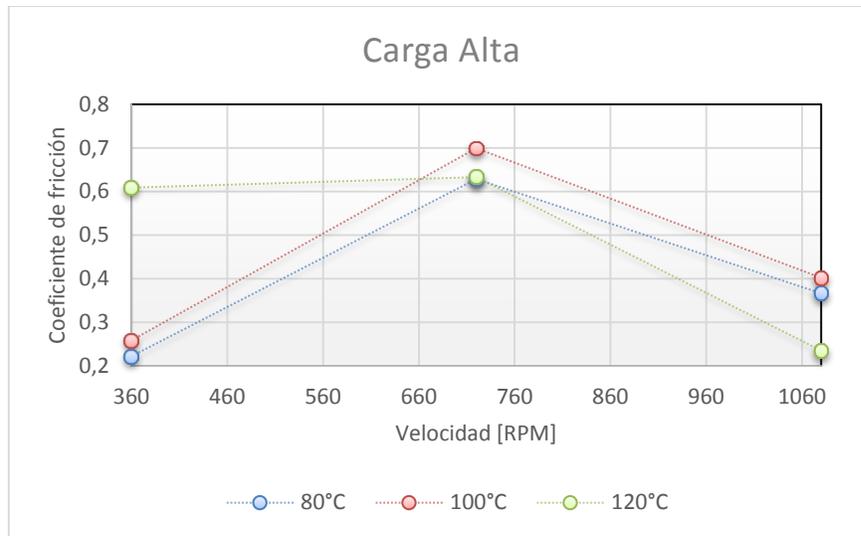


Figura 3.9. Velocidad vs fricción, a carga alta contra cuerpo Acrílico.

La condición de carga alta, provoca dos tipos de comportamiento representados en la figura 3.8, en el curado a 80°C y 120°C, la fricción experimenta crecimientos en la transición de velocidad baja a media y un decrecimiento en la transición de media a alta, en la velocidad media es el punto donde la fricción es mayor.

El curado a 120°C, la fricción experimenta cambios mínimos en la transición de velocidad baja media, sin embargo a transición de velocidad media a alta provoca una significativa disminución en la fricción en donde el valor cae desde 0,63 a 0,22.

Para las tres temperaturas de curado la condición de carga alta, tiene el mismo comportamiento en la transición de velocidad media a alta, la fricción disminuye significativamente desde donde alcanza el valor más alto a velocidad media, hasta su valor más bajo a velocidad alta.

### 3.5 Análisis del desgaste

El análisis del desgaste, se hace de manera similar al del coeficiente de fricción, en donde bajo las variaciones de la condición de carga, se analizara la variación e influencia de las variables de experimentación y el material del contra cuerpo en el desgaste de los pines de resina UP.

En el eje horizontal de cada gráfica se ubica la velocidad [rpm] del ensayo, en el axial se ubica el desgaste [gr], y cada línea corresponde a la temperatura de curado de la resina.

Los valores positivos en las escalas de las gráficas, ubicadas en el eje horizontal positivo, representan el valor de la pérdida de masa del pin, mientras que los valores negativos, ubicados en eje horizontal negativo representan adhesión o ganancia en masa de los pines.

Previo al análisis del desgaste en el material, se deben tener las condiciones de la dureza de cada uno de los materiales en contacto, tanto del contra cuerpo como de cada uno de los pines en su condición de curado respectiva.

Para todos los experimentos el desgaste, se calculó a partir de la diferencia entre la masa inicial del pin (previo a la experimentación) y la masa final (posterior a la experimentación). [29]

#### 3.5.1 Acero AISI 1020

En el análisis de la dureza, precisamente en el acero, se evidencia que es un material que destaca por su rigidez, sobre todo en comparación con materiales poliméricos, razón por la cual, previo al análisis de resultados, se espera los pines de resina solo experimenten pérdida de masa

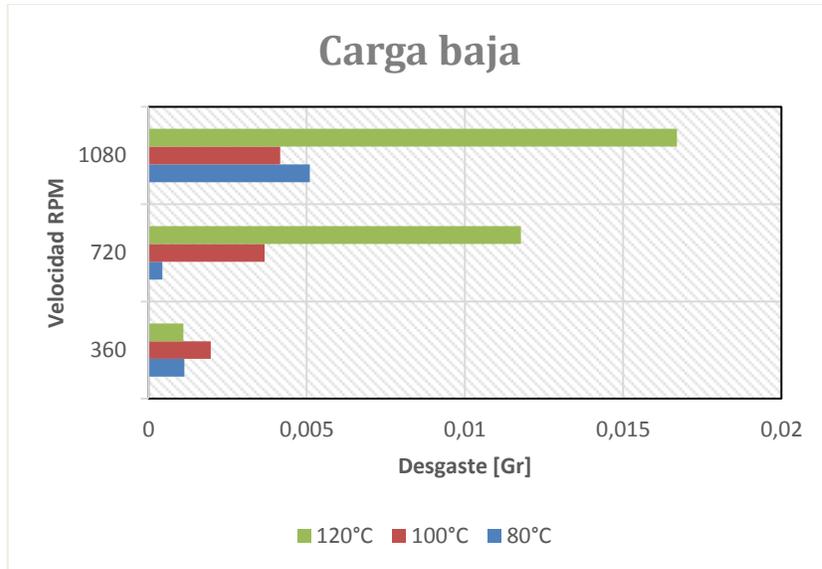


Figura 3.10. Análisis desgaste, carga baja en Acero.

En la figura 3.9, se puede observar, que el desgaste es mayor, a medida que la velocidad de deslizamiento aumenta, sin embargo, el curado a 120°C, experimenta cambios de mayor magnitud conforme la velocidad crece

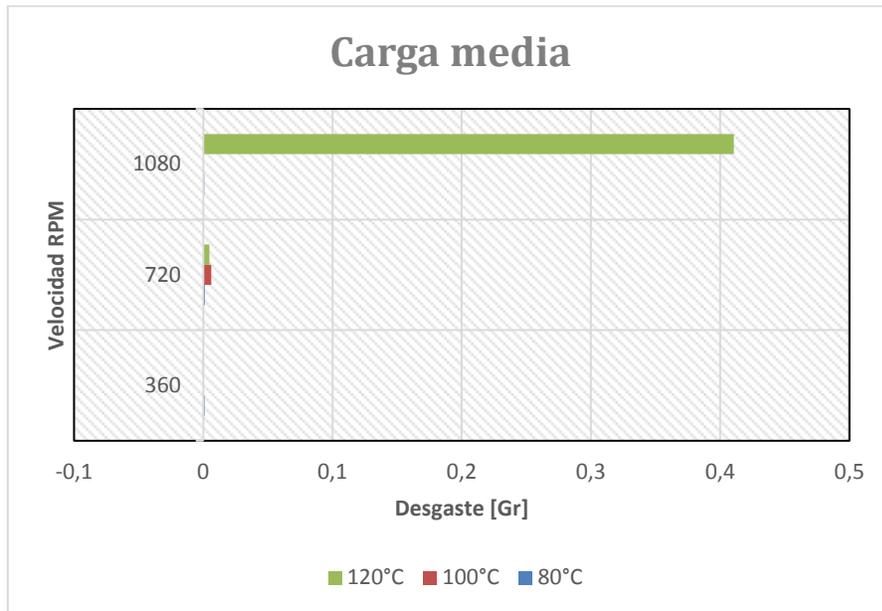


Figura 3.11. Análisis desgaste, carga media Acero.

Para analizar el desgaste de los pines en el acero a carga media, cabe destacar, de que a excepción del curado a 120°C, en los demás experimentos, se evidenció en la figura carencia de desgaste en las mediciones, figura 3.10, en donde el producto de la diferencia entre la masa inicial y final entrega como resultados, valores pérdida de masa en microgramos.

Sin embargo, cuando la temperatura de curado asciende en conjunto de la velocidad de deslizamiento hasta su punto mas alto (120°C, 1020 RPM), el desgaste experimenta un aumento exponencial producto del contacto deslizante entre los dos cuerpos que experimentan su maximo valor de dureza a la velocidad mas alta.

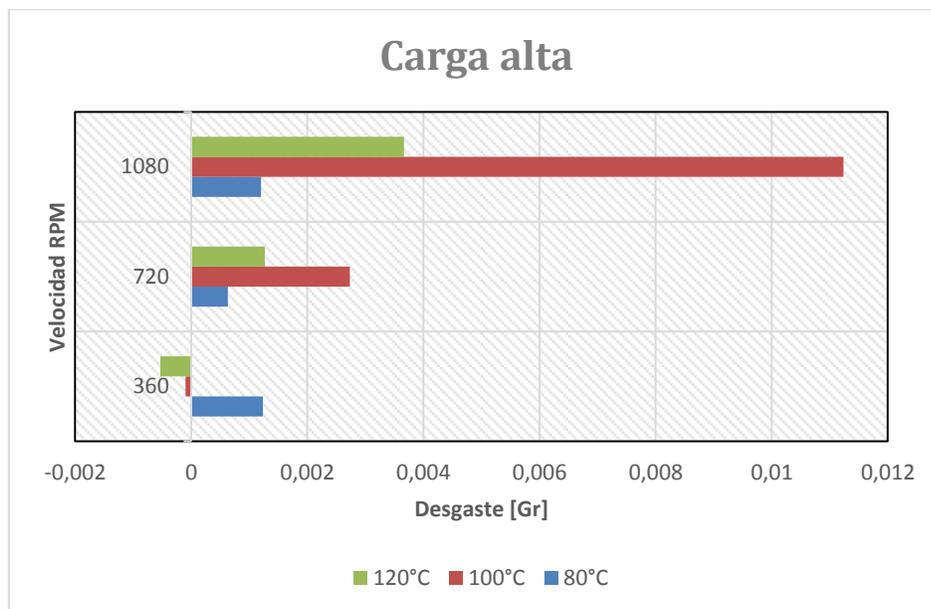


Figura 3.12. Análisis desgaste, carga alta acero.

La condición de carga alta, experimenta fenómenos de desgaste para todas las variaciones en velocidad, como se observa en la figura 3.11, sin embargo, también presenta fenómenos de adhesión de material, a baja velocidad, motivo que indica que en el contacto deslizante, la velocidad baja, favorece las propiedades del material y del ambiente para adquirir más de otras partículas.

También se observa, que a medida que aumenta la velocidad, la adhesión desaparece, fenómeno que indica el hecho que el aumento de la velocidad a condiciones de carga alta, aumenta el desgaste de los pines de resina en el contacto deslizante.

### 3.5.2 Acrílico (PMMA).

El desgaste producido mediante el PMMA como contra cuerpo en el contacto deslizante, se produce bajo unas condiciones de dureza variables, derivadas de la variación en la dureza de los pines según su temperatura de curado.

Como resultado de las variaciones en la relación de dureza entre el pin y el disco, se producen fenómenos de desgaste y adhesión, que serán analizados según la influencia de las variables de experimentación.

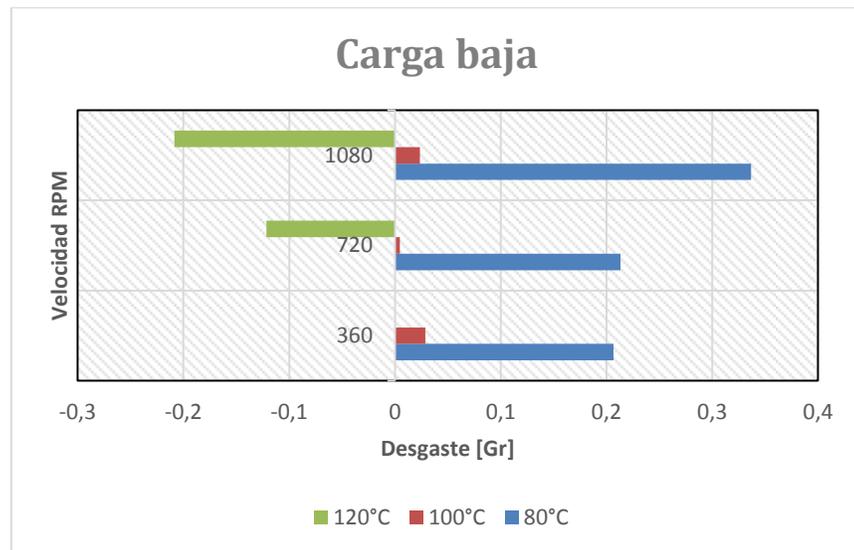


Figura 3.13. Análisis desgaste, carga baja en Acrílico (PMMA).

Con la condición de carga baja, a partir de la figura 3.12, se aprecian las siguientes situaciones:

- Solo se produce adhesión en el curado a 120°C, fenómeno que aumenta a medida que se incrementa la velocidad de deslizamiento
- El desgaste, se produce en los pines curados a 80°C y 100°C, aunque en diferentes proporciones, el desgaste a 80°C, alcanza valores muchos mayores de hasta 0,35 g, en comparación al 0,4 gr máximo de desgaste en el curado a 100 ° C.
- El curado a 80°C, presenta aumentos en el desgaste a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento.

Como se observa en el análisis de la dureza, los pines curados a 100°C y 120°C, adquieren mayor dureza en general, hecho que se visualiza en el bajo desgaste y el fenómeno de adhesión. [30]

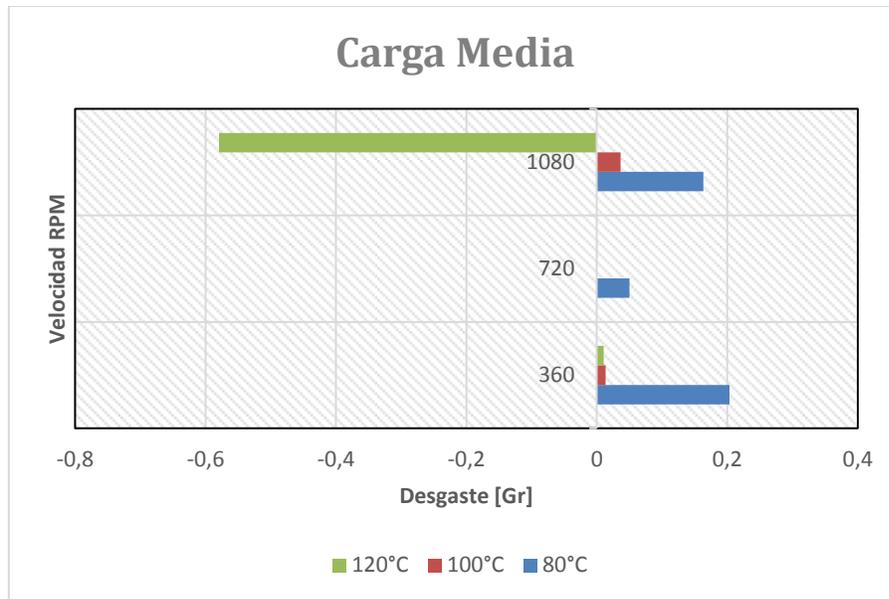


Figura 3.14. Análisis desgaste, carga media en Acrílico (PMMA).

En condiciones de carga media, como se aprecia en el figura 3.13, la influencia de la velocidad no produce variaciones significativas en el desgaste, sin embargo:

- Cuando la velocidad es alta, el fenómeno de adhesión se incrementa significativamente con el curado a 120°C.
- No existe un patrón repetitivo que represente el comportamiento del desgaste, pues sus variaciones en general no destacan bajo la influencia de ninguna de las variables de experimentación.
- El curado a 80°C, representa los mayores valores de dureza.

Como en carga baja, la influencia de la dureza de los pines curados a 100°C y 120°C, se deriva en valores de desgaste mínimos y en el fenómeno de adhesión a 120°C y velocidad alta, donde la dureza es mayor.

[31]

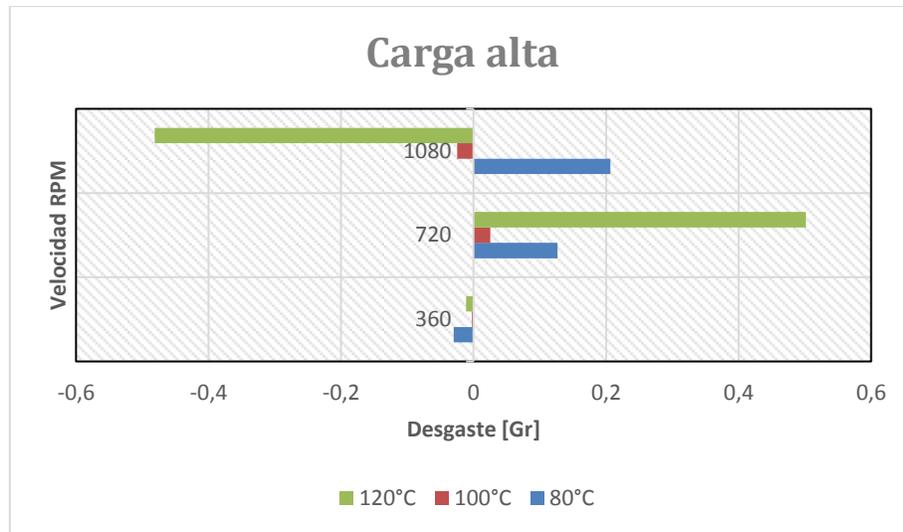


Figura 3.15. Análisis desgaste, carga alta en Acrílico (PMMA).

Como se observa en la gráfica 3.14, la condición de carga alta, presenta fenómenos de adhesión y desgaste, condición única que presenta valores de desgaste para el curado a 120°C, entre otros fenómenos, el contacto deslizante a carga alta:

- No existe un comportamiento homogéneo que relacione las variaciones de los valores obtenidos en el desgaste con alguna de las variables de experimentación.
- Como en las cargas anteriores, el curado a 120°C, a velocidad alta, presenta fenómenos de adhesión.

A pesar de no identificar un comportamiento homogéneo para esta condición de carga, aparece el fenómeno de adhesión en el curado a 120°C, curado que representa el mayor valor de dureza de los pines.

## CAPÍTULO 4. MODELO DE COMPORTAMIENTO

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se identificaron una serie de comportamientos originados a partir de la influencia de las variables de experimentación, ya sea en la magnitud de los coeficientes de fricción, o en el de desgaste generado en los resultados, producto del contacto deslizante.

Para la construcción del modelo del comportamiento de la resina poliéster insaturado en contacto deslizante, se propone la construcción de un mapa conceptual en donde se aísle la influencia de las variables de experimentación en los resultados obtenidos.

De manera análoga al procedimiento para el análisis de resultados (capítulo 3), la inclusión de la influencia de las variables de experimentación se analiza específicamente para el contra cuerpo en contacto, para desde ese punto, establecer relaciones que reflejen la tendencia de los resultados obtenidos en el contacto deslizante en un material determinado, a medida que cambian las variables de experimentación, para finalizar con su inclusión en el mapa conceptual que representa el modelo de comportamiento.

### 4.1. Acero AISI SAE 1020

A partir de los resultados obtenidos mediante el contacto deslizante en el acero, para el desgaste y la fricción, se identifican tendencias y fenómenos propios del material en el contacto deslizante con la resina. Entre esos fenómenos, desde los resultados, se destaca:

- El rango de temperatura como variable fundamental en el aumento del desgaste. A medida que disminuye el rango de temperatura, el desgaste de las probetas de resina poliéster insaturado, aumenta, tal y como se muestra en la figura 4.1

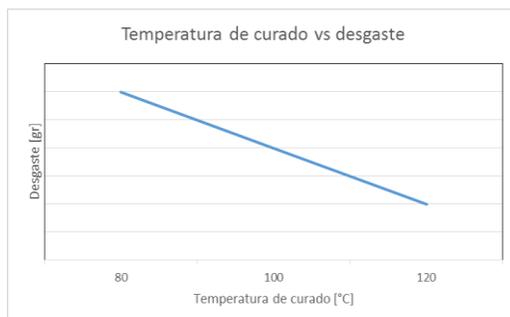


Figura 4.1. Temperatura de curado contra desgaste.

- La velocidad de deslizamiento como variable independiente y además proporcional a los cambios en la fricción, transformando la fricción en una variable dependiente de la velocidad de deslizamiento, figura 4.2

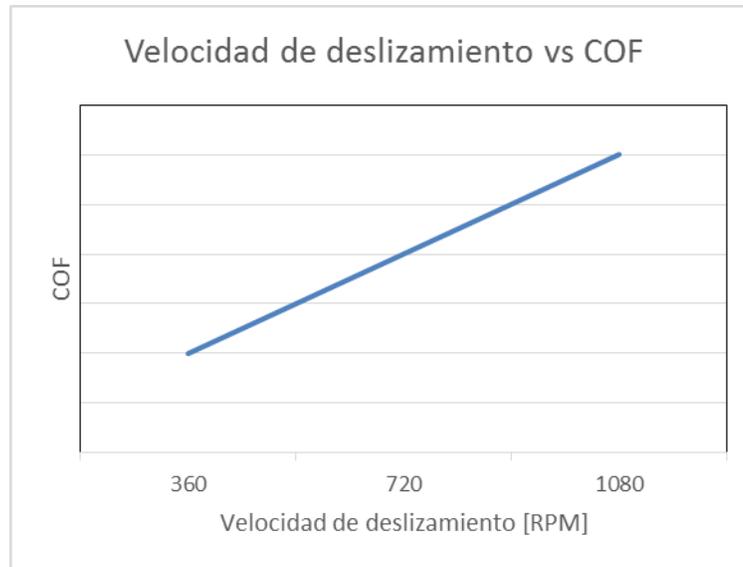


Figura 4.2. Velocidad de deslizamiento contra coeficiente de fricción.

- El hecho de que la velocidad de deslizamiento aumente, no implica necesariamente un aumento en el desgaste, sin embargo, si la velocidad de deslizamiento aumenta en simultáneo al rango de la temperatura de curado, el desgaste aumenta, tal y como se observa en la figura 4.3.

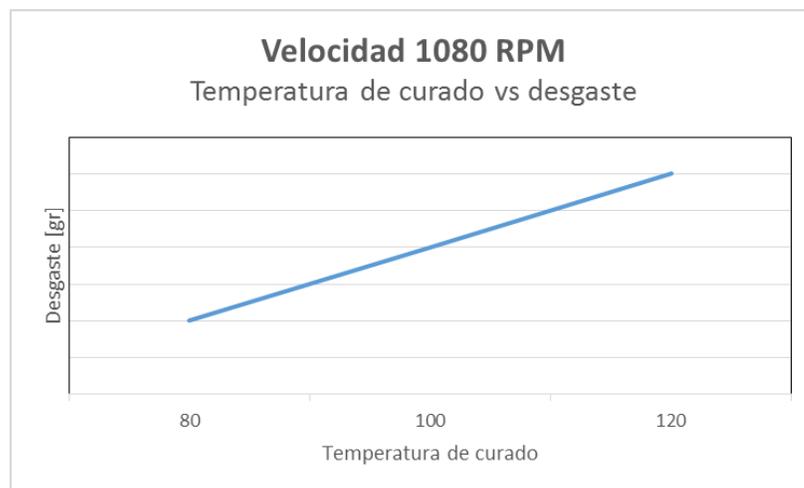


Figura 4.3. Desgaste contra velocidad de deslizamiento y temperatura de curado.

Luego de identificar las tendencias en los resultados, se asocian los fenómenos en las variables de experimentación a partir de los resultados, y se unen, para construir el modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina de poliéster instaurado, de la siguiente forma (figura 4.4):

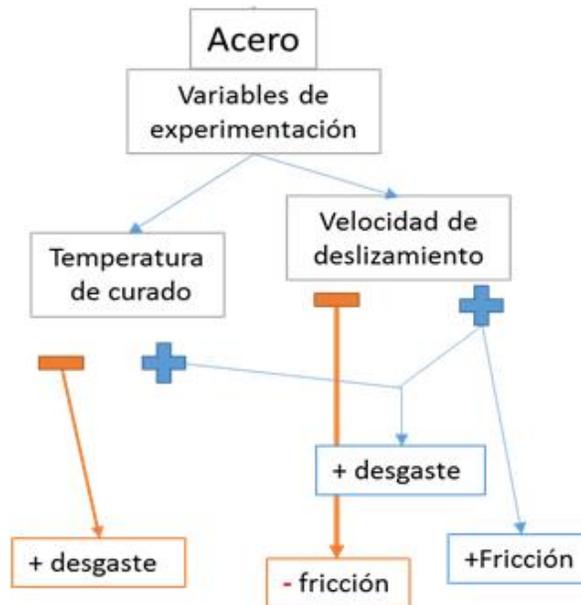


Figura 4.4. Modelo teórico experimental del comportamiento de la resina poliéster insaturado en el acero.

## 4.2 PMMA

De manera análoga al procedimiento con el acero, con el contra cuerpo PMMA, se presentan una serie de tendencias en los resultados, relacionados con fenómenos propios del material en el contacto deslizante. Entre esos hechos y demás fenómenos, se destaca:

- La reducción del desgaste en el momento que se presentan aumentos en simultáneo de la velocidad de deslizamiento y la temperatura de curado, figura 4.5. [32]

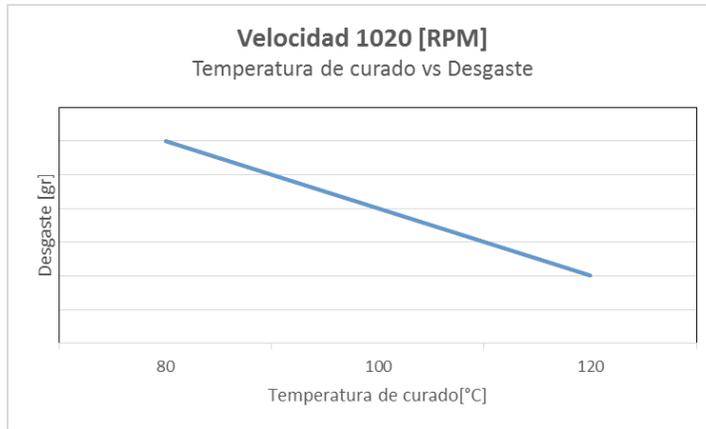


Figura 4.5. Relación desgaste, velocidad de deslizamiento y temperatura de curado.

- La relación entre la velocidad de deslizamiento y la fricción, se presenta en forma de aumentos en la fricción, en donde a medida que se aleja del rango medio de velocidad, la fricción experimenta disminuciones en la magnitud de la fricción, es decir, los valores de más altos de la fricción en el PMMA, se presentan con la condición de velocidad media, figura 4.6. [33]

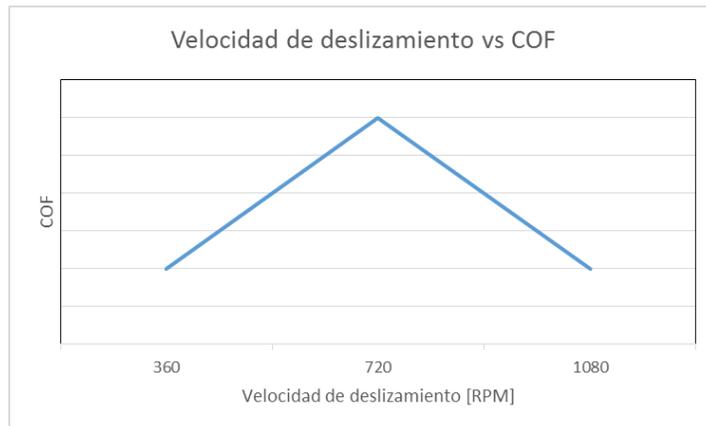


Figura 4.6 Relación velocidad de deslizamiento y fricción.

- Sin embargo, en el momento en que la velocidad de deslizamiento disminuye, la fricción disminuye, figura 4.7.

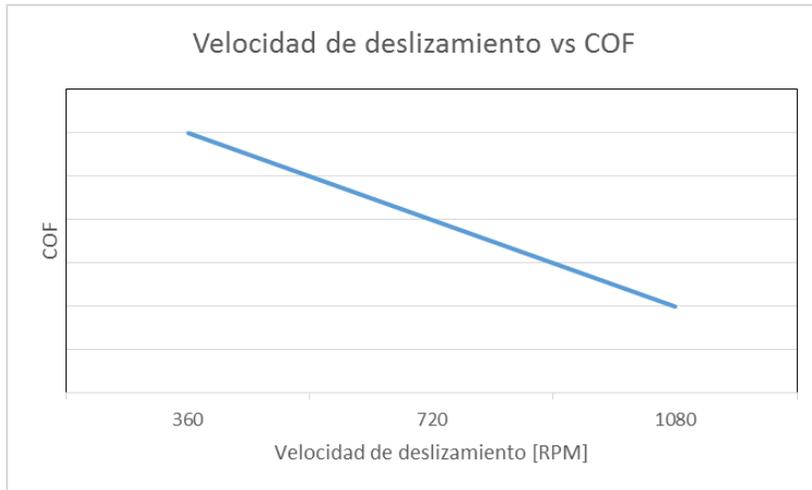


Figura 4.7 Relación velocidad de deslizamiento y fricción.

- La temperatura de curado se presenta como un factor determinante en la constitución de la dureza de las probetas de resina poliéster insaturado, razón por la que además se convierte en un factor determinante para la constitución del desgaste en el contacto deslizante con el PMMA, como se muestra en la figura 4.8, a medida que aumenta la temperatura de curado, el desgaste aumenta.

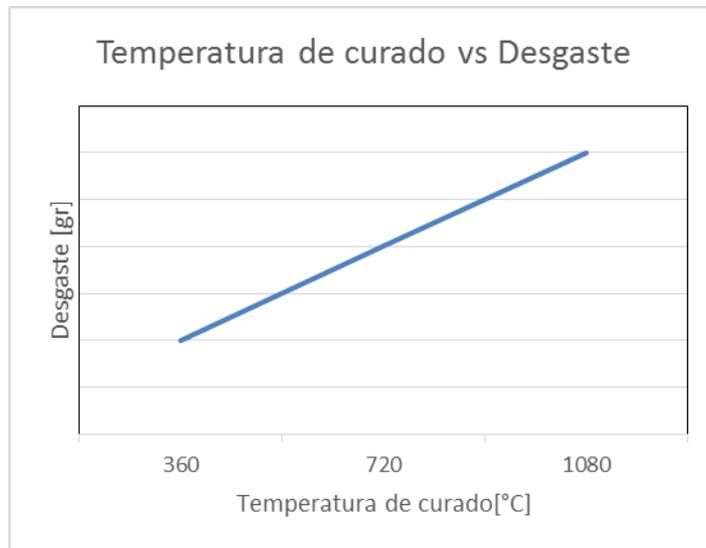


Figura 4.8. Relación temperatura de curado y desgaste

- Sin embargo, como se representa en la figura 4.9, si la temperatura de curado crece en conjunto con la velocidad de deslizamiento, el desgaste disminuye.

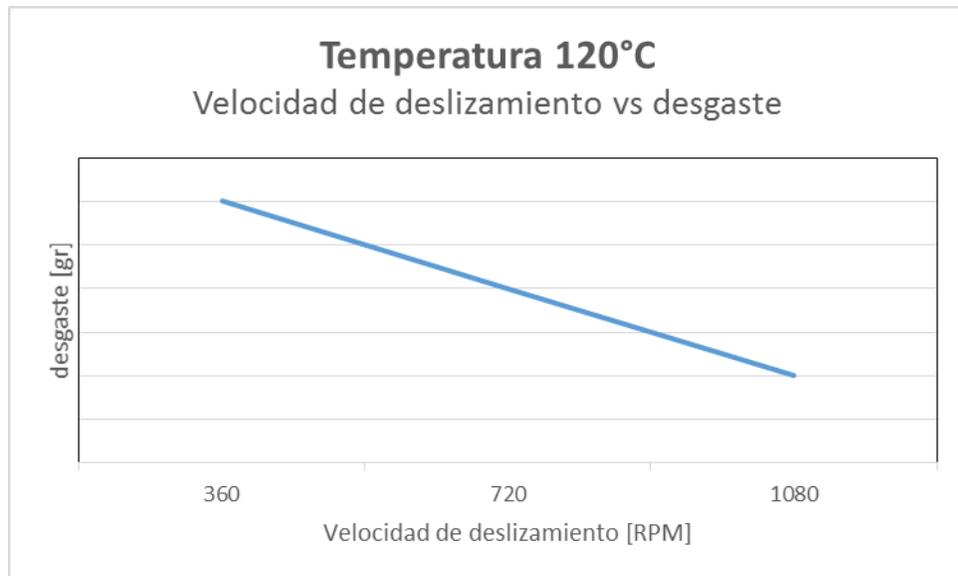


Figura 4.9 Relación Velocidad de deslizamiento, temperatura de curado y desgaste

Con los resultados, relaciones y fenómenos encontrados a partir de los resultados obtenidos en la experimentación, se construye el modelo teórico experimental para la el PMMA, en donde se relacionan cada uno de los elementos anteriormente mencionados, figura 4.10.

Con la construcción del modelo teórico para cada uno de los materiales relacionados en el contacto deslizante con la resina poliéster insaturado, se forman los dos brazos que constituyen el modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina poliéster insaturado en contacto deslizante con acero AISI 1020, y PMMA, figura 4.11.

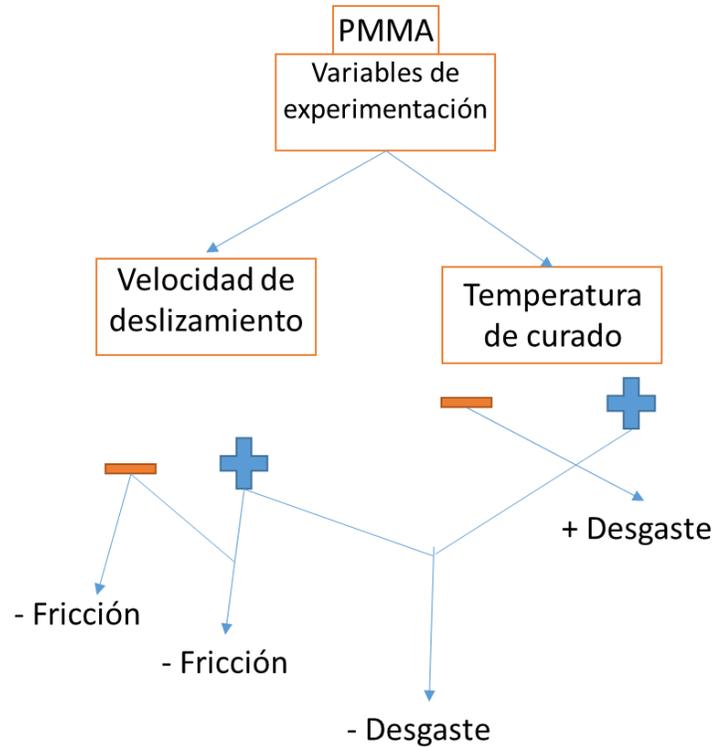


Figura 4.10 Modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina poliéster insaturado.

#### 4.3. Modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina poliéster insaturado en contacto deslizante.

Luego de obtener el modelo teórico experimental de los dos materiales usados como contra cuerpo que componen la experimentación, se hace la recopilación respectiva en un mapa conceptual, en donde se identifica el principal efecto de las variables de experimentación producto del contacto deslizante de la resina poliéster insaturado con los materiales de contra cuerpo. [34]

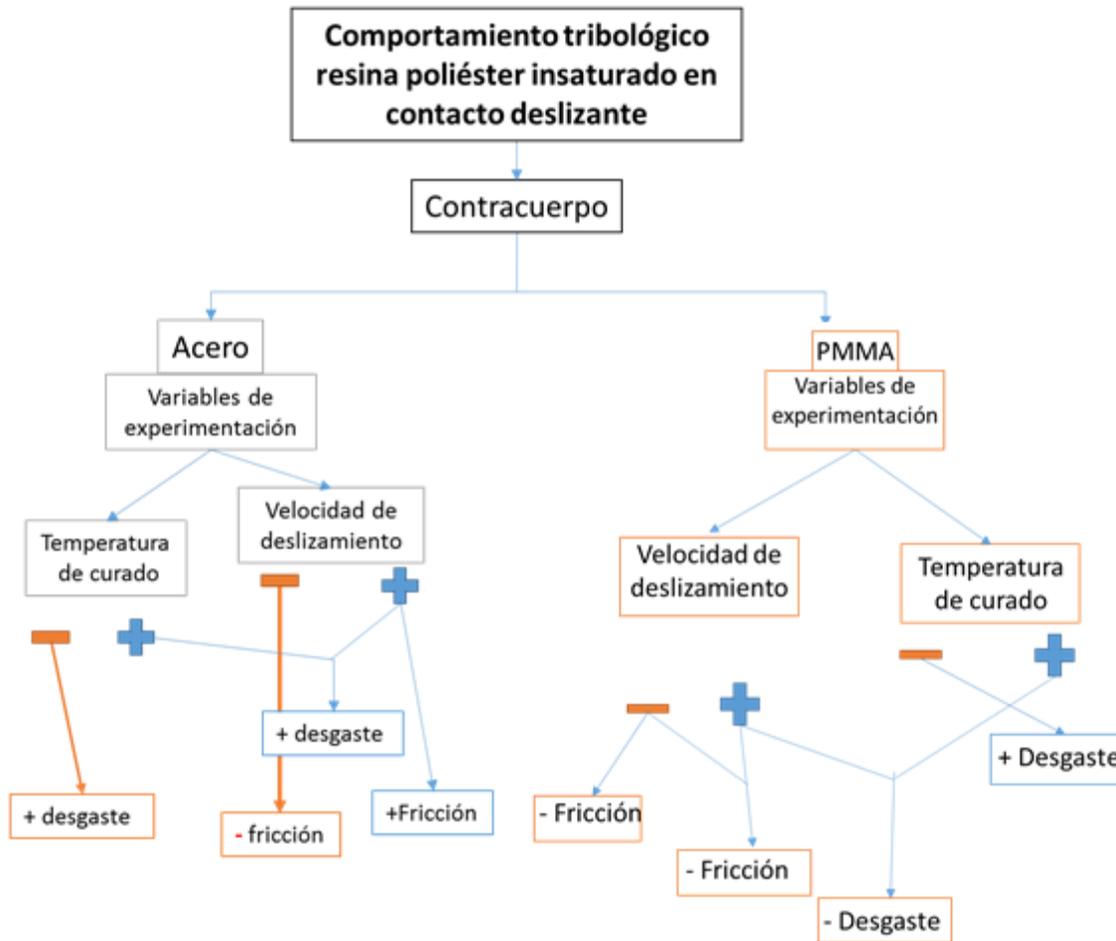


Figura 4.11. Modelo teórico experimental del comportamiento tribológico de la resina.

En el análisis de resultados, no se identificaron las variaciones producidas por la influencia del aumento de la carga, por tanto en el diagrama del modelo teórico experimental, no se incluye en las variables de experimentación del diagrama, sin embargo no se excluye del análisis de resultados, ni se exige su influencia en las variaciones del comportamiento tribológico de la resina, ya que solo se incluyen en el diagrama las variables cuya influencia se identificó en el análisis de resultados.[31]

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- La temperatura de curado de los pines de resina UP, es una variable que influye directamente en el aumento de fricción y desgaste en el acero como contra cuerpo, adhesión y muy baja fricción con el PMMA como contra cuerpo, pues La dureza del poliéster insaturado aumenta, conforme la temperatura de curado crece, sin embargo en diferente proporción, pues de 80° a 100°, crece considerablemente, y de 100° a 120°, no muestra cambios significativos.
- La velocidad de deslizamiento, es una variable que a medida que aumenta, en conjunto con la temperatura experimenta fenómenos de adhesión en mayor proporción cuando el contra cuerpo es PMMA, sin embargo, bajo la misma condición, pero con el cambio de contra cuerpo al acero, experimenta fenómenos de desgaste en mayor proporción.
- En el contacto deslizante, la fricción presenta su punto de mayor estabilidad a velocidad media en acero, pues las variaciones en la fricción son mínimas bajo la influencia del aumento de la carga o de la temperatura de curado.
- Por medio del análisis del modelo de comportamiento, se pueden predecir comportamientos del contacto deslizante basados en la bibliografía adquirida, de esta forma es pertinente deducir que el desgaste del pin de poliéster insaturado frente al contra cuerpo de acero tiende a tener mayor desgaste del material basados en su diferencia tan alta en durezas; Además la similitud de durezas entre la temperatura de curado de 100°C del pin de poliéster insaturado con respecto al contra cuerpo de Acrílico (PMMA) genera fenómenos normalmente de adhesión entre los dos materiales.
- En el análisis de carga media del acero, no existe un patrón que describa un comportamiento homogéneo en la magnitud de los coeficientes de fricción para cada velocidad según el aumento en las temperaturas de curado.

## CAPITULO 6. ANEXOS

### ANEXO 1. ALCANCE DEL PROTOCOLO DE USO Y MANTENIMIENTO TRIBÓMETRO PIN-DISCO UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

#### 6.1.1 Alcance

El procedimiento de uso y mantenimiento del equipo Pin-Disco de la Universidad Pontificia Bolivariana se realiza con el fin de aclarar cuáles son los pasos y protocolos para el funcionamiento del equipo, de forma que esté logre interpretar condiciones y datos correctos al momento de la experimentación, es por esto que se deben interponer condiciones de laboratorio además del manejo específico de este equipo, las condiciones del laboratorio son:

- Uso adecuado de la indumentaria solicitada por el personal de la Universidad, tal como bata de laboratorio, gafas en caso de experimentación en la cual haya exposición de partículas.
- Devolución adecuada de la dotación para el uso del tribómetro de la Universidad.
- Conocer el protocolo previo para el ingreso a los laboratorios.
- Tener clara las variables que interfieren en el procedimiento y como es su debida medición.
- Conocer la maquina previamente, sus sistemas y subsistemas de forma que se pueda atender cualquier solicitud de uso.

El sistema Pin-Disco es uno de los equipos de tribología más usados por su amplia y sencilla manera de obtener los resultados con relación a otras configuraciones. Este sistema mide la fuerza de fricción que experimenta un pin en contra con cuerpo de forma esférica o cilíndrica, que se somete a una determinada carga aplicada sobre un disco que gira a una velocidad angular la cual puede transformarse en lineal para conocer el recorrido total que se obtiene en la experimentación. Las dimensiones del pin y del disco dependen del tipo de ensayo a realizar y de la aplicación que se deba simular bajo ciertas condiciones de operación del equipo. Para este caso el disco cuando se usa en el portadiscos no puede sobrepasar un diámetro de 9 cm y el pin debe ser menor a  $\frac{1}{4}$  in. El sistema Pin-Disco ofrece un mejor control sobre las condiciones experimentales de los ensayos, además permite efectuar experimentos bajo condiciones de operación casi estables, en las cuales se controla la velocidad de movimiento del

disco, se mide en tiempo real el coeficiente de fricción y la fuerza de fricción a lo largo de la prueba, se registran los datos de tiempo de duración del ensayo, distancia recorrida o número de ciclos totales.

Además el tribómetro está conformado por un brazo que va unido a un portapines, un plato portamuestras de 100 mm de diámetro, un dinamómetro electrónico que mide la fuerza de fricción y un sistema de control que permite cambiar la señal eléctrica a mecánica. Los resultados se registran automáticamente a través del software instalado en el computador.

El conjunto de pesas para calibrar el sistema pesan 1, 2, 5 y 10 N, combinándose entre sí, se debe tener en cuenta que la carga máxima no debe sobrepasar los 10N.

El pin disk diseñado por INGEQ tiene un funcionamiento elemental fácil y práctico el cual está compuesto principalmente de 4 sistemas que están intercomunicados entre sí, los cuales son:

- Transmisión de potencia
- Guías del sistemas Pin-Disco
- Celda de carga

Una de las condiciones de operación de la máquina que el usuario puede manipular son las diferentes geometrías de las probetas.

#### 6.1.1.1 Función primaria:

Hallar los coeficientes y fuerzas de fricción de los diferentes materiales y compuestos que se encuentran en la industria de forma que se conozcan y se expandan aún más las propiedades con las cuales se desea trabajarlo ciertos parámetros puesto que el coeficiente de fricción de todos los materiales es variable según las condiciones a las cuales se trabaja.

#### 6.1.1.2 Funciones secundarias:

- Obtener un porcentaje de desgaste del material bajo condiciones de rozamiento.
- Obtener la temperatura luego del contacto del disco y el material.
- Determinar la huella de desgaste a las cuales son sometidos los materiales.
- Adquisición de los datos del coeficiente y fuerza de fricción variables en el tiempo.

## ANEXO 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL TRIBÓMETRO PIN-DISK LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES UPB

### 6.2.1 Sistema de transmisión de potencia

Velocidad nominal del motor (RPM)	1650
Potencia motor (Hp)	0,5
Conexión del motor	4 polos trifásico
Variador de frecuencia	Incorporado al motor

Tabla 6.1. Ficha técnica del motor.

Este sistema tal y como se muestra en la tabla 6.1. está compuesto por el motor y las piezas que transmitirán el giro de la muestra, consta principalmente de un motor de 1650 RPM nominal, con una potencia  $\frac{1}{2}$  Hp, este motor es Siemens trifásico de 4 polos, el cual está diseñado para trabajar también a 1800 RPM al ajustar correctamente el variador de frecuencia que viene incorporado al motor, el motor es el encargado de la transmisión de velocidad y está conectado a un eje el cual sirve como acople entre el porta discos y motor de forma que todo el movimiento sea uniforme en estas 3 piezas. La conexión entre el acople y el eje del motor está dada por un cuñero de  $\frac{1}{4}$  in., y un prisionero de  $\frac{1}{4}$  in. Ajustados entre estas mismas piezas, por lo cual es primordial hacer que éstas siempre estén apretadas a la hora de arrancar el equipo. [35]

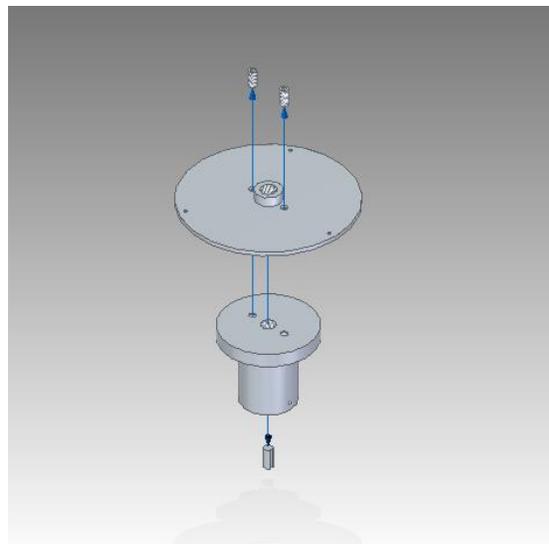


Figura 6.1. Sistema de transmisión de potencia.

En la parte superior como se observa en la figura 6.1, se encuentra el portamuestras sujeto al acople por tornillos de  $\frac{1}{2}$  -13 UNC, de forma que estas dos piezas queden totalmente sujetas y no se genere ruido en la transmisión del movimiento. El portamuestras mostrado en la parte superior es la pieza clave del sistema, de forma que se cumpla con los requisitos característicos para realizar los ensayos de forma adecuada. La forma precisa para poder sujetar las muestras al portamuestras es por unos prisioneros de  $\frac{1}{4}$ -20 UNC los cuales tienen una configuración en delta la cual le da más agarre y menos ruido a la muestra a la hora de realizar el ensayo. En el centro del portamuestras se puede ver un agujero roscado de 1-8 UNC el cual está diseñado para poner otro portamuestras de piezas más pequeñas de forma que estas puedan estar lubricadas o no. Este portamuestras puede contener muestras desde 60 mm de diámetro hasta 110 mm, las cuales se pueden sujetar en una configuración en delta o una configuración cuadrada con prisioneros de  $\frac{1}{4}$ -20 UNC.

El sistema de transmisión de velocidad genera un movimiento ajustado a las revoluciones solicitadas para realizar los diferentes ensayos, donde se puede variar estas de forma que el rango de ensayos sea mucho mayor, se debe ser muy cuidadoso cuando se trabaje en este sector, puesto que la calibración de las piezas necesitan cumplir con perpendicularidad con el pin de muestras, ya que es la clave de los ensayos, por lo tanto el sistema viene calibrado y es bueno cuando se piense hacer ajustes sean suaves y nunca golpear el portamuestras. Además es bueno que no se le den sobrecargas al motor con los pesos ya acondicionados del sistema (2 Kg en el brazo para variar pesos de aplicación sobre las muestras), puesto que la configuración del motor ya está diseñada para trabajar a medio caballo de fuerza. [35]

### 6.2.2 Cálculo motor

Para determinar la carga aplicada que actúa sobre el motor, la cual debe vencer el mismo para poder lograr este. Es necesario definir todo el peso del sistema que va a estar por encima de este y siendo este el torque a vencer por el motor.

Para el volumen del disco se trabajará con el radio mayor del mismo, el cual será montado en el sistema.

$$R=0,15 \text{ m}$$

$h=0,0035$  m (espesor)

$$Volumen\ disco = \pi \cdot R^2 \cdot h$$

$$Volumen\ disco = \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,0035$$

$$Volumen\ disco = 2,12 \times 10^{-4} m^3$$

Este volumen en el acero AISI-SAE A-36 es equivalente a un peso de 1947,04 g, el cual cumple con la condición primaria de no sobrepasar los dos kilogramos.

El resto del cuerpo está compuesto por un cono y por un cilindro, los dos son macizos y unidos entre sí. Se calculará su volumen de forma sencilla.

$$Volumen\ cono = \pi \cdot R^2 \cdot \frac{h}{3}$$

$$Volumen\ cono = \pi \cdot 0,05^2 \cdot \frac{0,10}{3}$$

$$Volumen\ cono = 2,61 \times 10^{-4} m^3$$

$$Volumen\ cilindro = \pi \cdot R^2 \cdot h$$

$$Volumen\ cilindro = \pi \cdot 0,02^2 \cdot 0,15$$

$$Volumen\ cilindro = 1,884 \times 10^{-4} m^3$$

Después de conocerse el volumen de todo el cuerpo se determinará el total (en  $cm^3$ ) y conociendo la densidad del material se hallará la carga a la cual está sometida el sistema además de sumar los dos kilogramos de la muestra y el torque que debe vencer el motor para funcionar.

$$Volumen\ total = 661,4\ cm^3$$

$$Peso\ total = 661,4\ cm^3 \cdot 7,87 \frac{g}{cm^3} + 2000\ g$$

$$Peso\ total = 7205,22\ g = 7,205\ kg$$

Para hallar el punto de inercia donde es aplicada la carga del montaje se usó Solid-Edge ST3 y se puede identificar que este está a 0,0143 m del centro del disco y así se podrá determinar el torque al que está sometido el piñón.

$$\tau = 72,05 \text{ N} \cdot 0,0143 \text{ m} = 1,03 \text{ N} - \text{m}$$

Finalmente se hallará la potencia necesaria que debe pedir el motor para poder vencer este torque, sabiendo que se piensa usar un motor de 3600 RPM se hará el siguiente cálculo.

$$\tau = (9550 \cdot \text{Pot}(kW)) / \text{RPM}$$

$$\text{Pot}(kW) = (1,03) \cdot \frac{3600 \text{ RPM}}{9550}$$

$$\text{Pot} = 0,38 \text{ kW} = 0,52 \text{ Hp}$$

### 6.2.3 Sistema guías

Es un sistema convencional y básico que consta principalmente de dos sistemas de transmisión de movimiento dados por un tornillo de 1/2-13 UNC, de forma que éste último genera el desplazamiento del brazo y de la celda de carga. Este sistema es lineal y está guiado por medio de dos barras al lado de cada tornillo de forma que se garantice el desplazamiento lineal. Los soportes de las guías en el sistema deben estar en contacto con la base del sistema, de forma que se garantice que no se generen esfuerzos flexionantes sobre las guías, ya que los pesos de las bases móviles del sistema de transmisión de movimiento que son piezas muy robustas no dañen la linealidad del sistema.

Este sistema de guías tiene la misma acción de funcionamiento que una prensa, el cual por medio de los tornillos unidos por la manivela mueven las bases móviles de forma que se ajusten los sistemas a las condiciones que se quieran, y siempre garantizando perpendicularidad entre la celda de carga y el transductor. Esto se hace para poder censar bien los esfuerzos que se generan a la hora de realizar el ensayo, estos sistemas cuentan con un buen desplazamiento de forma que se puedan hacer ensayos en diferentes puntos de la muestra sujeta sobre el portamuestras. [35]

#### 6.2.4 Sistema Pin Disk

Este sistema es el que cuenta con más ajuste de piezas (8 en total, más las pesas que se consideren necesarias para el ensayo). Por lo cual hay que garantizar una calibración de toda la tornillería previamente, para que de esta forma que no se generen ruidos y brincos a la hora de realizar el ensayo. Este sistema cuenta con una pieza conectada a las guías, la cual está sujeta entre el porta brazos (ajustada con un rodamiento SKF M-35) y las guías; esta pieza es denominada el rodamiento, la cual permite ajustar la altura de brazo con respecto a la pieza, debido a que estas pueden tener un espesor variable; con esta altura se puede garantizar que haya un ajuste plano entre el pin y la muestra sobre el porta muestras, además en su parte superior está conectada de forma que el brazo pueda girar libremente sobre su eje y finalmente pueda generar el movimiento.

Este sistema consta de dos juegos de pesas, uno en la parte trasera del brazo y otro aplicado en el portapines del mismo, de forma que se pueda aplicar una carga sobre las muestras y además balancear el sistema de forma que se logre un equilibrio estático en éste. Se debe tener mucho cuidado con estas pesas ya que están balanceando el sistema y es primordial garantizar esto antes de empezar a realizar la experimentación con el equipo.

En la parte inferior delantera del brazo se puede ubicar el porta pines el cual está diseñado para poder generar el rozamiento con la muestra y generar el movimiento mencionado anteriormente, el pin sugerido para este sistema es de 1/8 in, de forma que estos puedan ser cambiados y tener diferentes formas según se necesite en la experimentación, es necesario que esta pieza esté bien sujeta a la hora de realizar el ensayo dado que es la encargada de transmitir la fuerza (figura 6.2).

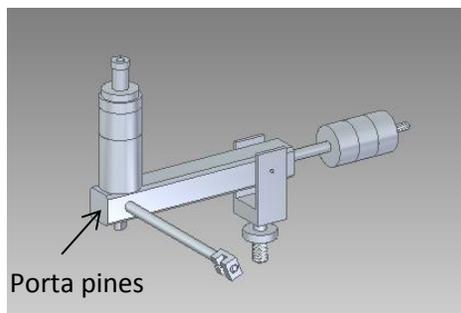


Figura 6.2. Sistema pin disk.

### 6.2.5 Rodamiento rígido de bolas

Este rodamiento es usado para el giro del brazo el cual da el censo con la celda de carga por medio del transductor es importante tener en cuenta las condiciones de fabricante del rodamiento, las cuales se muestran en la Tabla 6.2:

Diámetro interno (mm)	15
Diámetro externo (mm)	24
Espesor (mm)	5
Carga dinámica (kN)	1,56
Velocidad referencia (RPM)	60000
Límite de velocidad (RPM)	30000
Referencia comercial (SKF)	61802-2Z

Tabla 6.2. Propiedades del rodamiento del brazo Pin-Disk. [36]

### 6.2.6 Sistema Celda de Carga

Este sistema esta balanceado de forma que se generen esfuerzos perpendiculares a la celda de carga y esta pueda censar las fuerzas que se generan sobre las muestras, este sistema tiene un movimiento generado por las guías del sistema de forma que pueda estar ubicado sobre varios puntos de las muestras, siempre y cuando se garantice la perpendicularidad con el transductor del brazo. En necesario tener en cuenta la Tabla 6.3.

<b>Tornillo de carga (in/mm)</b>	<b>Tornillo de ajuste (in/mm)</b>	<b>Capacidad Celda de carga</b>
0,17/4,3	0,17/4,3	3 mV/V @10 Lb

Tabla 6.3. Sistema celda de carga y dimensiones. [37]

Las especificaciones de la carga están dadas por el fabricante, y se deben configurar según la necesidad y aplicación a las cuales estas van a estar sometidas, a continuación se darán estas especificaciones en la Tabla 6.4:

Excitación	10 Vdc (15 V max)
Salida	3 mV/v
Calibración	NIST Traceable
Desviación lineal	$\pm 0,03$ % FS
Error por histéresis	$\pm 0,02$ % FS
Error por repetibilidad	$\pm 0,01$ % FS
Error por arrastre (Después de 20 minutos)	$\pm 0,15$ % FS
Balance cero	$\pm 1$ % FS
Rango de tiempo operacional	-55 a 90 °C
Rango de tiempo por compensado	-15 a 65 °C
Efectos térmicos	$\pm 0,0015$ % RDG/°F max
Sobrecarga segura	$\pm 150$ % de la capacidad
Sobrecarga ultima	$\pm 400$ % de la capacidad
Resistencia de entrada	350 + 50/-3,5 $\Omega$
Resistencia de salida	350 /-3,5 $\Omega$
Material	Acero de alto carbón

Tabla 6.4. Condiciones de uso dadas por el fabricante [37]

### ANEXO 3. PROCEDIMIENTO DE USO

Para poder realizar el montaje de las pruebas, se sigue un estricto procedimiento para evitar inconvenientes. El montaje del disco en el porta muestras debe quedar centrado. Los discos no pueden tener un espesor mayor a 8 mm, un diámetro mínimo de 70 mm y máximo de 95 mm. De esta forma se garantiza que el brazo no quede inclinado y que las superficies en contacto coincidan y sean paralelas; Luego los pines de ¼ in se deben unir con un adherente resistente (cianocrilato) a una varilla del mismo diámetro la cual es puesta en el porta pin, ubicado en el brazo. Se debe hacer un balance de forma que el brazo quede estático, donde se organizan las 3 pesas de 800 gr; garantizando que no se genere momento y así se procede a coordinar las demás variables.

Estas variables son determinadas por el operario según la necesidad que se tenga u objeto de la experimentación, las variables a definir son velocidad angular del disco que es determinada por un variador de frecuencia conectado al motor, esta velocidad puede ir desde 400 RPM hasta 1650 RPM hasta un máximo de 1800 RPM en caso de que se necesite, luego se determina la carga a la cual se aplica del pin sobre el disco (muestra) donde no se debe exceder de 2000 gr para no generar pandeo de las muestras y ya las 2 últimas variables son el material del pin y disco definidas previamente.

El tiempo para el montaje de todo el sistema no puede ser excedido de 10 minutos de forma que estos pasos deben ser seguidos a la perfección y ser puntuales para evitar contratiempos. Además tener en cuenta que todas las variables son predeterminadas desde antes de las pruebas para hacer las cosas más ágiles, después del tiempo de montaje se definen el tiempo de la prueba, para realizar las pruebas puede que se demore desde 30 minutos hasta pruebas de 1 hora, de forma que se logre el cometido de lograr huellas sobre el material de la muestra y pesar posteriormente el pin para saber cuánto fue el material perdido. Para esto también se debe tener un máximo de 2 operarios para hacer montajes ágiles y de forma que estos dos definan las variables evitando torpezas en todo.

#### 6.3.1 Obtención de resultados:

6.3.1.1 Se comienza abriendo el sistema de control del equipo, ya abierto, conectar el sistema a la energía del mismo a la fuente ubicada a su lado derecho en vista cara a cara de 250 V, luego se deben encender los switches para energizar todo el sistema de control esto se logra al

acomodarlos hacia arriba en la caja de fusibles blanca que se observa en la figura 3 y finalmente se debe presionar el botón verde para encender el variador de frecuencia.



Figura 6.3. Sistema de encendido de switches tribómetro UPB.

6.3.1.2 Conectar el ordenador a la fuente de energía de 110 V dentro del tablero de control y proceder a encender el ordenador determinado para la tarea, con la contraseña de acceso: “pindisco”, y posteriormente abrir el archivo “Toma datos-Pindisco” ubicado en el escritorio del ordenador. La interfaz del programa es una hoja de cálculo de Microsoft Excel, la cual muestra una interfaz muy amigable y que se debe iniciar con la orden de habilitar macros en el inicio del programa.

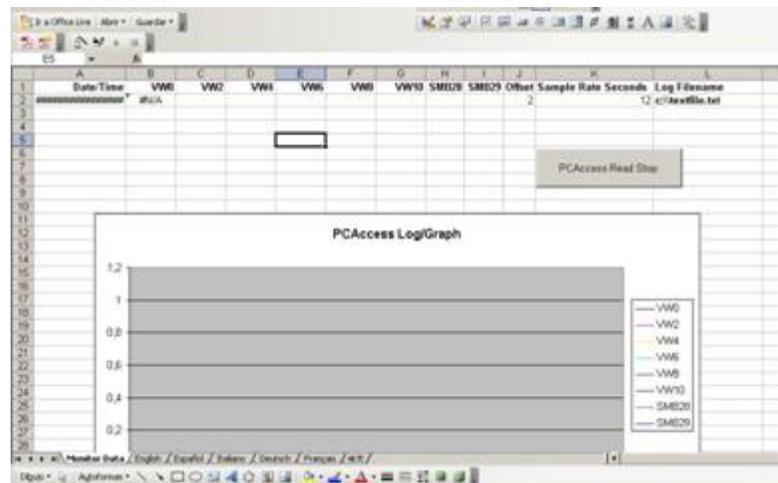


Figura 6.4. Interfaz del programa sistema pin disco

6.3.1.3 Listo para comenzar el programa, se debe terminar de ensamblar el sistema, para ello, se ubica el ordenador cerca del sistema de control, se accede el tiempo de duración de la prueba al dar inicio al software de obtención de resultados, luego se deben fijar los tornillos del PLC SIMATIC S7-200 ubicado en la parte superior del sistema, posteriormente se debe conectar el puerto USB 2.0 por medio del cable que va al transformador de datos Multi-Master cable al ordenador. Sin colocar la carga se debe ensamblar el pin, el disco, y balancear el brazo de forma que no genere momento.

El pin se ensambla en la parte superior del brazo del tribómetro con una llave hexagonal de  $\frac{1}{4}$  in. Pero se debe determinar si la prueba es de desgaste, conociendo si esta es así lo primero es tomar el peso inicial del pin, luego de determinar este peso con cianocrilato (pega loca) se debe pegar el pin en una varilla del mismo diámetro para ser ensamblado en el brazo. El disco es ensamblado en el portamuestras grande o pequeño según sea el tamaño de la muestra y este debe ser apretado con una llave hexagonal de  $\frac{5}{64}$  in. Por el lado de la lija de 500, luego 800 y finalmente de 2000, procurando siempre que coincidan el centro del disco y el portamuestras. Cuando se haya balanceado el brazo por medio del sistema de pesas de 800 gr, se debe poner el nivel sobre el brazo de modo que las superficies queden completamente paralelas, y finalmente acomodar el rodamiento de elevación del brazo de forma que este quede a la altura adecuada.

6.3.1.4 Conectar la celda de carga al porta celda de manera exacta al brazo por medio de sus dos tornillos de cabezas de estrella y rosca de  $\frac{1}{4}$  UNC, se debe tener especial cuidado con la celda de carga, ya que al ser un elemento muy sensible, perturbaciones fuertes pueden causar su descalibración, la forma más adecuada de apretar la celda es que los tornillos lo hagan gradualmente para evitar así cargas sobre esta, finalmente el transductor debe quedar totalmente perpendicular a la celda de carga.



Figura 6.5. Montaje de la celda de carga.

6.3.1.5 Listo el montaje de los sensores y el programa, se comienzan a definir cada uno de los parámetros de experimentación ajenos al material del pin y del disco, velocidad, carga, radio.

6.3.1.6 Para definir la velocidad de trabajo del tribómetro, en el tablero de control, hay un variador de velocidad, particularmente en el tribómetro UPB, la escala se configura de la siguiente forma.

$$1 \text{ Hz} = 60 \text{ R.P.M}$$

$$6 \text{ HZ} = 360 \text{ R.P.M (velocidad mínima tribómetro U.P.B)}$$

Para dar encendido al motor se debe hacer con el botón verde exterior al sistema de control marcado como Start motor.

6.3.1.7 Posicionando el pin en el centro del disco y luego variando la distancia entre ellos, se puede elegir el radio de trabajo, la distancia entre el pin y centro del disco, es el radio elegido. El radio se puede medir desde dos puntos específicamente:

- La primera forma es teniendo el pin en el centro de la pieza y desde el tornillo guía que tiene el transductor de la celda de carga se puede medir cuanto es la apertura hasta el punto que se quiere por medio de un pie de rey.
- La segunda forma es directamente medir con un pie de rey medir desde el centro de la pieza hasta el centro del portapines en su posición final.

Cuando este en el centro se mide la distancia de la guía móvil, mantener siempre en posición la guía móvil del brazo con la guía móvil de la celda, conectar la celda de carga al PLC.

6.3.1.8 La carga se distribuye en lo alto del brazo justo encima de donde se hizo el ensamble del pin teniendo en cuenta la suma de los pesos individuales de cada una de las pesas, los pesos no se deben descargar en el disco antes de comenzar la experimentación, para ello utilice el sistema cilindro pistón, para mantener sin descargarlo en el disco hasta el momento de la experimentación.

6.3.1.9 Listo el ensamble del tribómetro, en el programa del ordenador, se comienza la recopilación de datos por medio del botón “Play” de la interfaz, desde el tablero de control, presionar el botón verde “Start Motor”, luego de que el motor inicie, ya el programa comienza la recopilación de datos, se elige, el nombre del archivo y el tiempo de muestreo, y en el momento en el que el sistema comience a registrar, se debe soltar la carga.

6.3.1.10 El tribómetro trabaja hasta que transcurra el tiempo de muestreo seleccionado por el usuario, mientras trabaja muestra gráficamente las variaciones de la fuerza en el tiempo.

Cuando el tiempo de muestreo concluya el programa importa los datos obtenidos a una nueva hoja de cálculo, distribuidos en 2 columnas, Columna 1 tiempo, columna 2 fuerza, ya en esta hoja de cálculo se debe eliminar el tiempo muerto, en el que el sistema registro sin carga y mientras logro estabilidad, ya con los datos obtenidos se comienzan a realizar todos los análisis pertinentes al caso y objeto del experimento.

## ANEXO 4. PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO

Es necesario saber que la máquina tiene 2 tipos de repuestos, comerciales y no comerciales, de los cuales los comerciales son la parte de tornillería y ajuste de la máquina, pero el resto de la maquina cuenta con piezas diseñadas bajo estricta construcción para así lograr la función precisa y lograr su cometido, es por eso que se debe ser muy preciso a la hora de definir las variables y realizar un excelente montaje.

Es necesario que el mantenimiento de la máquina siempre sea preventivo, diseñado para máximo 6 meses después de su entrega y cerca de 2 meses después de su ultimo mantenimiento de forma que la maquina siempre este ajustada y se eviten contratiempos.

### 6.4.1 Lubricación:

Los procesos de lubricación se deben hacer cada vez que se haga uso del equipo para evitar dificultades durante la operación:

- Mantener lubricado el sistema de guías con aceites del tipo GL según la API (American Petroleum Institute), de forma que no se incorporen sólidos en los dientes de los tornillos de transmisión de las guías y se genere el procedimiento adecuado. [38]
- Lubricar el rodamiento del acople con el motor con aceite tipo GL según la API (American Petroleum Institute) para el correcto funcionamiento de la transmisión de potencia.

### 6.4.2 Cambio de repuestos:

Para realizar cambios o modificaciones en la máquina es necesario consultar el catálogo de INGEQ S.A. o pedir la debida asistencia para evitar una mala selección o fabricación de éstos, dado que comercialmente solo se encuentra el rodamiento del acople. [35]

## ANEXO 5. FALLAS Y CONSECUENCIAS

Fallas	Consecuencias
No se debe ajustar el pin muy cerca de la parte externa de la muestra expuesta sobre el disk.	Cuando estos casos suceden no se debe permitir el arranque de la máquina, puesto que normalmente las muestras con las que se trabajan tienen una rugosidad desconocida generando así brincos en el pin y al momento de caer nuevamente puede golpear las paredes del porta muestras (Disco), generando así el daño de la misma al igual que el brazo portador del disk además de la descalibración del sistema.
Nunca poner en funcionamiento la máquina sin celda de carga.	Cuando no es puesta la celda de carga y acomodada sobre el brazo el arrastre que genera el porta muestras o fuerza de fricción arrastra el porta pines hacia el borde de este generando así choques entre los dos, además este golpe puede alcanzar mayor fuerza y potencia según la velocidad que alcance el motor. Esto puede generar descalibración de la máquina y daños en los portapines o portamuestras.
No poner más de 2 kg de carga sobre las muestras.	Al generarse un sobrepeso en el brazo, se genera una fuerza transversal a la muestra, esta fuerza al ser excesiva no permite que el motor de la maquina arranque generando daños en el motor ya que el torque de arranque es demasiado y finalmente puede hasta dañar el motor, es por eso que no es bueno poner más de 2 kg.

Tablas 6.5. Tabla de fallas y consecuencias del equipo.

**ANEXO 6. PROPIEDADES FÍSICAS ACERO AISI-SAE 1020**

Dureza (HB)	111
Esfuerzo de fluencia (MPa)	205
Esfuerzo máximo (MPa)	380
Elongación (%)	25
Reducción de área (%)	50
Módulo de elasticidad (GPa)	205
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7,87
Composición química	0.18-0.23% C, 0.3-0.6% Mn, 0.04% P max, 0.05% S max.

Tabla 6.6. Propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1020. [39]

## CAPITULO 7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Según la experiencia obtenida durante la experimentación y búsqueda de información necesaria durante el trabajo realizado se plantean las siguientes recomendaciones:

- Determinar que variables pueden afectar el coeficiente de fricción de las resinas de poliéster insaturados a parte de su temperatura de curado, de forma que se establezca otros modelos teóricos-experimentales del análisis tribológico entorno a la variabilidad de sus propiedades, estas variables pueden estar dadas por cargas o aditivos que se usan en la industria para el mejoramiento de estos materiales.
- La rugosidad de las superficies en contacto es un fenómeno que afecta directamente la fricción en el contacto deslizando, por lo cual se recomienda a manera de experimentación una medición inicial y final de esta característica para determinar su influencia en el comportamiento tribológico de los materiales en contacto.
- Durante el contacto deslizando la fricción que se produce genera aumento de la temperatura en los cuerpos que interactúan, factor que puede afectar sus propiedades mecánicas y por ende su comportamiento tribológico, por lo tanto este factor como afecta directamente debe ser tenido en cuenta durante el análisis experimental.
- Realizar una investigación técnica-comercial, de forma que se puedan realizar trabajos enfocados a la industria, teniendo en cuenta las variables que se usaron en la experimentación.

## REFERENCIAS

- [1]. Gutiérrez Gómez, E. (2004). Desarrollo del poliéster insaturado : un inventario de aplicaciones (p.178). Medellín: Gañán Rojo, Piedad Felisinda. doi: Bilbiotecas UPB.
- [2] Darío Hernán Mesa Grajales. (n.d.). Principios de tribología con énfasis en desgaste.
- [3] Unal, H., Mimaroglu, a., & Arda, T. (2006). Friction and wear performance of some thermoplastic polymers and polymer composites against unsaturated polyester. *Applied Surface Science*, 252(23), 8139–8146. doi:10.1016/j.apsusc.2005.10.047
- [4] Blau, P. J. (2009). Friction, science and technology; From concepts to applications.
- [5]. Blau, P. J. (2008). The significance and use of the friction coefficient  $\mu$ , 34(2001), 585–591.
- [6] Martínez Pérez, F. (1997). LA TRIBOLOGIA Ciencia y técnica para el mantenimiento. (p. 213). Ciudad México.
- [7] Gee, M. G., Gant, a., & Roebuck, B. (2007). Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals. *Wear*, 263(1-6), 137–148. doi:10.1016/j.wear.2006.12.046
- [8] Numata, T., Nanao, H., Mori, S., & Miyake, S. (2003). Chemical analysis of wear tracks on magnetic disks by TOF-SIMS. *Tribology International*, 36(4-6), 305–309. doi:10.1016/S0301-679X(02)00202-5
- [9] Cid, M. J. R. (2008). Estudio del comportamiento tribológico a alta temperatura de Inconel 600 contra acero en presencia de lubricantes iónicos.
- [10]. Yu, Z., Choo, H., Feng, Z., & Vogel, S. C. (2010). Influence of thermo-mechanical parameters on texture and tensile behavior of friction stir processed Mg alloy. *Scripta Materialia*, 63(11), 1112–1115. doi:10.1016/j.scriptamat.2010.08.016
- [11] Journal, I., Transfer, M., Laboratories, R., Technolo, I., & En, M. (n.d.). Heat transfer and friction correlation for compact louvered \_n!and!tube heat exchangers.
- [13] En línea: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/3410-Moldes-para-transferencia-de-termoestables.html> (20/02/2014)

- [14] En línea: [http://www.exdequin.com.co/index.php?page=shop.browse&category\\_id=6&option=com\\_virtuemart&Itemid=25](http://www.exdequin.com.co/index.php?page=shop.browse&category_id=6&option=com_virtuemart&Itemid=25)(20/02/2014)
- [15] Ketone, M. E. (2002). RECOMENDACIONES MÉDICAS Exámenes médicos Efectos crónicos sobre la salud Riesgo de cáncer Riesgo para la reproducción Otros efectos a largo plazo.
- [16] Kouhikamali, R., & Sharifi, N. (2012). Experience of modification of thermo-compressors in multiple effects desalination plants in Assaluyeh in IRAN. *Applied Thermal Engineering*, 40, 174–180. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.02.002
- [17] Vargas Robledo, David. (2013). TESIS ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE MATERIALES FENOLICOS CON mATERIALES CARBONOSOS, EN CONTACTO DESLIZANTE CON DISCOS DE FRENO. Pag. 38.
- [18] En línea: <http://www.astm.org/Standards/D2583.htm>(08/04/2014)
- [19] En línea: <http://www.astm.org/Standards/B648.htm>
- [20] En línea: <http://www.tecnimetsalsa.es/durometro%20Barcol%20portatil.htm> (12/02/2014)
- [21] En línea: <http://www.hardnesstester.es/6-barcol-impresor.html> (12/02/2014)
- [22] Rio, L. Del, Wong, L., & Biomateriales, C. De. (2005). Cianoacrilato de alquilo.
- [23] Require-, G., Re-, G., Bar, R., Vessels, P., Bar, R., Bar, R., Plate, N. A., et al. (2014). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials 1 , 2, 1–37. doi:10.1520/E0018-12.2
- [24] Bassani, R., Levita, G., Meozzi, M., & Palla, G. (2001). Friction and wear of epoxy resin on inox steel : remarks on the influence of velocity , load and induced thermal state, 247, 125–132.
- [25] Satapathy, B. K., & Bijwe, J. (2006). Composite friction materials based on organic fibres: Sensitivity of friction and wear to operating variables. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(10), 1557–1567. doi:10.1016/j.compositesa.2005.11.002
- [26] W.R. Tyfour, J.H. Breynon and A. Kapoor, The Steady State Behaviour of Pearlitic Rail Steel Under Dry Rolling Sliding Contact Conditions, *Wear*, Vol. 180, 1995, pp. 79-89.
- [27] Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge, New York, Cambridge University Press.

- [28] Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel, ASTM D-4417.
- [29] Holmberg, K., Andersson, P., & Erdemir, A. (2012). Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, 47, 221–234. doi:10.1016/j.triboint.2011.11.022
- [30] Lewis, R., Carré, M. J., Abu Bakar, a., & Tomlinson, S. E. (2013). Effect of surface texture, moisture and wear on handling of rugby balls. *Tribology International*, 63, 196–203. doi:10.1016/j.triboint.2012.07.002
- [31] Archard, J. F. (1957). Elastic deformation and the laws of friction. *Proc RoySoc A* 243: 190–205.
- [32] He, F. J., Fang, Y. Z., & Jin, S. J. (2014). The study of corrosion–wear mechanism of Ni–W–P alloy. *Wear*, 311(1-2), 14–20. doi:10.1016/j.wear.2013.12.024
- [33] Hong, U. S., Jung, S. L., Cho, K. H., Cho, M. H., Kim, S. J., & Jang, H. (2009). Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices. *Wear*, 266(7-8), 739–744. doi:10.1016/j.wear.2008.08.008
- [34] Vidal, C., Infante, V., & Vilaça, P. (2014). Fatigue behaviour at elevated temperature of friction stir channelling solid plates of AA5083-H111 aluminium alloy. *International Journal of Fatigue*, 62, 85–92. doi:10.1016/j.ijfatigue.2013.10.012
- [35] IngeQ Manual de funcionamiento tribómetro UPB (2012).
- [36] En línea: <http://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row/index.html?prodid=1010081802&imperial=false> (20/02/2014)
- [37] LCEB Load Cell Specifications. (2012). Catalogo LCEB, 15.
- [38] En línea: <http://www.api.org/search/search-results?keyword=oil%20gl>
- [39] En línea: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1> (07/04/2014)