



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Unidad Zacatenco

ESTUDIO TRIBOLÓGICO EN LA INTERFAZ HERRAMIENTA DE CORTE-ACERO SAE 1018 Y HERRAMIENTA DE CORTE-ALUMINIO 6061-T6 EN UNA MÁQUINA PERNO SOBRE DISCO

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

Ing. Daniel Ortega Velázquez

DIRECTOR 1:

Dr. Ezequiel A. Gallardo Hernández

DIRECTOR 2:

Dra. Marisa Moreno Ríos



Ciudad de México, enero del 2017

Dedicatoria

A mis padres Luz María y Víctor por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis hermanos Andrés, David y Livier por ser parte importante de mi vida y representar la unión familiar que tenemos. A ustedes que son un ejemplo de desarrollo profesional y por llenar mi vida de alegrías y amor cuando lo requiero.

A mis sobrinos Andrés Saúl, Minerva Dominique y Gael para que vean en mí un ejemplo a seguir.

A Serena por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas; por tu comprensión, paciencia y amor, dándome ánimos de fuerza y valor para seguir adelante.

A mi abuela María Guadalupe por el apoyo, esfuerzo e inspiración por la vida; y a todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Dr. Ezequiel A. Gallardo Hernández, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto, aporte de ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a este grupo de investigación.

También me gustaría agradecer los consejos recibidos a lo largo de los últimos años por otros profesores de la SEPI, que de una manera u otra han aportado su granito de arena a mi formación y la culminación de este proyecto.

Agradezco infinitamente al Instituto Politécnico Nacional todas las facilidades otorgadas para completar mis estudios de posgrado. Esto me permitió adquirir nuevos conocimientos además de gozar como alumno en mi tan amada institución.

Al Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, al Dr. Juan Vicente Méndez Méndez por el apoyo en la preparación y toma de imágenes de AFM.

A la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas y al personal del Laboratorio de Electroquímica y Corrosión, en especial a la Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta, gracias por su apoyo.

Al Instituto de Física de la UNAM y al personal del Laboratorio Central de Microscopía Electrónica, en especial al Dr. José Reyes Gasga, I.Q. Samuel Tehuacanero Núñez y Pedro Mexía, gracias por su gran paciencia y apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber financiado mis estudios de posgrado.

Y, por último, pero no menos importante, estaré eternamente agradecido con mis compañeros de trabajo del grupo de Tribología, en particular Eduardo Martínez, Carlos Nava, Alan Domínguez, Guillermo Montiel y Leonardo Farfán. El ambiente de trabajo creado es simplemente perfecto, su visión, motivación y optimismo me han apoyado en momentos muy críticos de la tesis. Gracias a cada uno de ustedes.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VIII
Resumen	1
Abstract	2
Objetivo general	3
Objetivos particulares	3
Justificación	4
Introducción	5
1 Marco teórico	6
1.1 Teoría de corte	6
1.1.1 Modelo de corte ortogonal	7
1.1.2 Relación de fuerzas	8
1.2 Lubricación	9
1.2.1 Curva de Stribeck	10
1.2.2 Lubricación al límite	11
1.2.3 Aditivos para lubricante	11
1.3 Biolubricantes	11
1.3.1 Aplicaciones	12
1.3.2 Aceite de Jatropha Curcas	13
1.3.2.1 Propiedades del aceite de Jatropha Curcas	13
1.4 Fluidos utilizados en el proceso de maquinado	14
1.4.1 Formulación de los fluidos para proceso de corte	14
1.4.1.1 Aceite Mobilmet S122	15
1.5 Modelo de voltaje para la obtención de coeficiente de fricción	15
2 Revisión de literatura	17

2.1	<i>Efectos del uso de los biolubricantes</i>	20
2.2	<i>Estabilidad de la emulsión (fluido de corte)</i>	21
2.3	<i>Regulación del uso de emulsiones</i>	22
3	<i>Desarrollo experimental</i>	23
3.1	<i>Máquina perno sobre disco</i>	23
3.2	<i>Materiales</i>	24
3.2.1	Probetas de disco	25
3.3	<i>Selección de la herramienta de corte</i>	25
3.4	<i>Circuito eléctrico</i>	26
3.4.1	Adquisición de datos LABVIEW	26
3.5	<i>Emulsiones</i>	27
3.6	<i>Potencial electroquímico</i>	27
3.7	<i>Parámetros de prueba</i>	29
3.8	<i>Procedimiento experimental</i>	30
4	<i>Resultados</i>	31
4.1	<i>Coefficiente de fricción</i>	31
4.2	<i>Microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM)</i>	38
4.3	<i>Rugosidad AFM</i>	43
5	<i>Análisis y discusión de resultados</i>	48
	<i>Conclusiones</i>	53
	<i>Trabajos futuros</i>	54
	<i>Referencias</i>	55

Índice de figuras

Figura 1 Sección transversal del proceso de maquinado [6].....	6
Figura 2 Proceso de torneado [6].....	6
Figura 3 Herramienta de corte [6]	7
Figura 4 Parametros de corte para operacion de torneado [6]	7
Figura 5 Corte ortogonal en 3D [6]	7
Figura 6 Corte ortogonal en 2D [6]	7
Figura 7 Fuerzas que actúan sobre la viruta [6].....	8
Figura 8 Fuerzas que actúan sobre la herramienta [6]	8
Figura 9 Diagrama de fuerzas en el que se muestran las relaciones geométricas [6]	9
Figura 10 Caracterización de los regímenes de lubricación acorde a la curva de Stribeck [15].....	10
Figura 11 Representación esquemática de una molécula de triglicérido [20]	12
Figura 12 Semilla de <i>Jatropha Curcas</i> [23].....	13
Figura 13 Planta de <i>Jatropha Curcas</i> [24].....	13
Figura 14 Diagrama de balance de energía [33]	16
Figura 15 Clasificación de los fluidos de corte	19
Figura 16 Esquema de una superficie maquinada con la interacción de fluidos de corte [54]	21
Figura 17 Diagrama máquina perno sobre disco.....	24
Figura 18 Equipo utilizado	24
Figura 19 Disco dimensionado	25
Figura 20 Características del inserto [67]	25
Figura 21 Porta inserto	26
Figura 22 Diagrama circuito eléctrico.....	26
Figura 23 Programa de adquisición de datos	27
Figura 24 Celda galvánica.....	28
Figura 25 Toma de potencial electroquímico para acero SAE 1018.....	28
Figura 26 Toma de potencial electroquímico para el acero SAE 1018/CW-TiN	29
Figura 27 Medición de conductividad en aceite de <i>Jatropha Curcas</i>	29
Figura 28 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición seca para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....	32
Figura 29 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición seca para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....	32
Figura 30 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Mobilmet S122 para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....	33
Figura 31 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Mobilmet S122 para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....	33

<i>Figura 32 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Jatropa Curcas para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 33 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Jatropa Curcas para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 34 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición seca para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 35 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición seca para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 36 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Mobilmet S122 para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 37 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Mobilmet S122 para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN</i>	<i>36</i>
<i>Figura 38 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Jatropa Curcas para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 39 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Jatropa Curcas para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN</i>	<i>37</i>
<i>Figura 40 Gráfica comparativa de coeficiente de fricción promedio</i>	<i>38</i>
<i>Figura 41 Microscopia óptica acero SAE 1018 a 50x en condición seca</i>	<i>39</i>
<i>Figura 42 Microscopia óptica aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 43 SEM acero SAE 1018 a 50x en condición seca.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 44 SEM aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca</i>	<i>39</i>
<i>Figura 45 SEM acero SAE 1018 a 110x en condición seca.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 46 SEM aluminio 6061-T6 a 110x en condición seca</i>	<i>39</i>
<i>Figura 47 Microscopia óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x en condición seca</i>	<i>39</i>
<i>Figura 48 Microscopia óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 49 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x en condición seca</i>	<i>40</i>
<i>Figura 50 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x en condición seca</i>	<i>40</i>
<i>Figura 51 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x en condición seca</i>	<i>40</i>
<i>Figura 52 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x en condición seca</i>	<i>40</i>
<i>Figura 53 Microscopia óptica acero SAE 1018 a 50x Mobilmet S122</i>	<i>40</i>
<i>Figura 54 Microscopia óptica aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmet S122.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 55 SEM acero SAE 1018 a 50x Mobilmet S122</i>	<i>40</i>
<i>Figura 56 SEM aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmet S122</i>	<i>40</i>
<i>Figura 57 SEM acero SAE 1018 a 110x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 58 SEM aluminio 6061-T6 a 110x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 59 Microscopia óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x Mobilmet S122.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 60 Microscopia óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmet S122.....</i>	<i>41</i>

<i>Figura 61 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 62 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 63 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 64 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x Mobilmet S122</i>	<i>41</i>
<i>Figura 65 Microscopía óptica acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 66 Microscopía óptica aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 67 SEM acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 68 SEM aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 69 SEM acero SAE 1018 a 110x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 70 SEM aluminio 6061-T6 a 110x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 71 Microscopía óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 72 Microscopía óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas</i>	<i>42</i>
<i>Figura 73 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x Jatropha Curcas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 74 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x Jatropha Curcas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 75 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x Jatropha Curcas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 76 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x Jatropha Curcas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 77 Gráfica comparativa de rugosidad promedio</i>	<i>44</i>
<i>Figura 78 Superficie en 3D de acero SAE 1018 trabajada en condición seca</i>	<i>44</i>
<i>Figura 79 Superficie aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca</i>	<i>44</i>
<i>Figura 80 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada en condición seca</i>	<i>45</i>
<i>Figura 81 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca</i>	<i>45</i>
<i>Figura 82 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada en condición seca</i>	<i>45</i>
<i>Figura 83 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca</i>	<i>45</i>
<i>Figura 84 Superficie en 3D de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>46</i>
<i>Figura 85 Superficie en 3D de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>46</i>
<i>Figura 86 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>46</i>
<i>Figura 87 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>46</i>
<i>Figura 88 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>46</i>
<i>Figura 89 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122</i>	<i>47</i>
<i>Figura 90 Superficie acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>47</i>
<i>Figura 91 Superficie aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>47</i>
<i>Figura 92 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>47</i>
<i>Figura 93 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>47</i>
<i>Figura 94 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>48</i>
<i>Figura 95 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas</i>	<i>48</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Propiedades fisicoquímico del aceite de Jatropha [25, 27]</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2 Aplicación de los fluidos de corte [61].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3 Propiedades mecánicas acero SAE 1018.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4 Propiedades mecánicas aluminio 6061-T6.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5 Características de discos después del maquinado</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6 Mezclas de emulsiones.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7 Potenciales electroquímicos para cada material</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 8 Potencial electroquímico para cada par de materiales.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 9 Conductividad de soluciones</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 10 Condiciones de prueba para la experimentación</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 11 Resultados de coeficiente de fricción promedio.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 12 Resultados de rugosidad por AFM</i>	<i>43</i>

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento tribológico de una emulsión hecha de agua con aceite de *Jatropha Curcas* como fluido de corte usando una maquina perno sobre disco. Las pruebas se realizaron en condición seca y lubricada en discos de acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6, utilizando un cortador de carburo de tungsteno con recubrimiento de nitruro de titanio como perno. Como lubricante se utilizó una emulsión de 95% agua 5% aceite de *Jatropha Curcas* y una emulsión de 95% agua 5% Mobilmet S122. Los coeficientes de fricción fueron medidos por medio de una celda de carga y adicionalmente correlacionados con un modelo matemático de fricción propuesto por otro autor como un método alternativo. Por otra parte, el desgaste y las características morfológicas se evaluaron por medio de imágenes de microscopia óptica, SEM y AFM. De acuerdo a los resultados obtenidos, se encontró que la emulsión de agua/*Jatropha Curcas* probada presento mejores características tribológicas que la emulsión agua/Mobilmet S122, lo que conlleva a un mejor rendimiento de corte.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the tribological behavior of an emulsion made of water with *Jatropha Curcas* oil as cutting fluid using a pin on disc tester. The tests were performed in dry condition and lubricated in disc of steel SAE 1018 and aluminium 6061-T6, using a tungsten carbide cutter with titanium nitride coating as a pin. Two lubricants were used to prepare the emulsions: 95% water-5% *Jatropha Curcas* oil and 95% water-5% Mobilmet S122. The friction coefficients were measured experimentally and additionally correlated with a mathematical model as an alternative method of friction assessment. Moreover, wear and morphological characteristics of both disc and tool specimens were evaluated by optical microscopy, SEM and AFM. According to the results, it was found that the emulsion water/*Jatropha Curcas* presented better tribological characteristics than the water/Mobilmet S122, which could lead to a better cutting performance.

Objetivo general

Obtener el coeficiente de fricción a partir de pruebas experimentales en seco y con emulsión lubricante para discos de acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6, utilizando como perno un inserto de carburo de tungsteno con recubrimiento de nitruro de titanio en una máquina tribológica de configuración perno sobre disco.

Objetivos particulares

1. Revisar literatura.
2. Obtener el coeficiente de fricción en condición seca para acero SAE 1018/inserto WC-TiN y aluminio 6061-T6/inserto WC-TiN.
3. Obtener los coeficientes de fricción en condición lubricada (agua-Mobilmet S122 y agua-Jatropha Curcas) para acero SAE 1018/inserto WC-TiN y aluminio 6061-T6/inserto WC-TiN.
4. Adquirir datos de corriente a través de la instrumentación diseñada.
5. Determinar el coeficiente de fricción a partir de la variación de corriente.

Justificación

Las funciones de los fluidos de corte sirven para enfriar y lubricar en un proceso de maquinado con arranque de viruta, ya que reduce la fricción entre las superficies en contacto, además de disipar el calor generado [1].

Los aceites minerales producen un impacto en los ecosistemas, debido a que representan un gasto en el tratamiento de los fluidos de corte posterior a su uso [2]. Actualmente, existen tratamientos biológicos para separar los residuos inmersos en los fluidos de corte utilizados en la industria.

En los últimos años el desarrollo de lubricantes ecológicos que sustituyan a los productos convencionales y la reducción de las reservas de petróleo han tomado importancia para los gobiernos, imponiendo nuevas regulaciones cada vez más estrictas sobre el uso y el tratamiento de lubricantes, incentivando cada vez menos el uso de productos de origen mineral [2].

Los aceites vegetales se han convertido en la principal fuente de elaboración de biolubricantes; ya que son renovables, no tóxicos, y son de fácil biodegradabilidad.

Se han realizado varias investigaciones donde los autores utilizaron diferentes fluidos aplicados en procesos de manufactura con el fin de encontrar mejores alternativas y de menor impacto al ambiente. Los biolubricantes fueron identificados como una buena alternativa en los procesos de remoción de material, ya que en cada caso se obtuvo mejor resultado que con aceite de origen mineral [3, 4].

Explorar el uso de lubricantes biodegradables, renovables y reciclables en los procesos de manufactura con arranque de viruta, se manifiesta en términos económicos de reducción de tiempo y dinero, ya que esto se verá reflejado en un aumento de la vida útil de la herramienta y mejor aprovechamiento de los recursos.

Introducción

Se estima que el consumo de lubricantes utilizados en el sector metalmecánico en la Unión Europea para operaciones de maquinado y corte es de 450 mil toneladas anuales [5]. La incorporación de biolubricantes en distintos sectores industriales se ha visto limitada en aplicaciones con alto grado de especificación técnica (motores de combustión interna, maquinados de alta precisión, sistemas hidráulicos, etc.), donde los consumidores finales siguen optando por usar lubricantes convencionales debido al vacío de información que aún persiste en uso, aplicación y efecto de biolubricantes. Sin embargo, los biolubricantes cuentan con buenas características ambientales, son biodegradables, cuentan con bajos niveles de toxicidad y pueden ofrecer propiedades tribológicas superiores.

Por otro lado, en el capítulo uno, se presenta la revisión de literatura; donde se describen las características de los biolubricantes, los efectos al utilizarlos en procesos de manufactura, la estabilidad de la emulsión, además de la revisión de algunas normas ASTM de uso y tratamiento de lubricantes en general. En el capítulo dos, se establece la teoría de corte, conceptos básicos de lubricación, aditivos, aplicaciones de los biolubricantes, propiedades del aceite de *Jatropha Curcas*, fluidos de corte y el modelo utilizado para la obtención del coeficiente de fricción. En el tercer capítulo, se detallada la metodología experimental como lo es la caracterización de las probetas, equipos a utilizar, los parámetros de prueba que se utilizan para la correcta aplicación y experimentación. En el capítulo cuatro y cinco, se presentan y se discuten los resultados obtenidos.

1 Marco teórico

1.1 Teoría de corte

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se utiliza una herramienta de corte para remover material de una pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente tenga la forma de la pieza deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación y corte del material de trabajo para generar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. En la figura 1 se ilustra la sección transversal de un proceso de maquinado con desprendimiento de viruta.

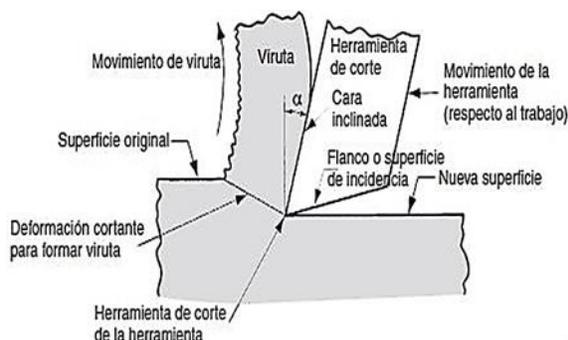


Figura 1 Sección transversal del proceso de maquinado [6]

El torneado utiliza una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza revolucionada para dar forma a un cilindro (figura 2), el movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la pieza de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo.

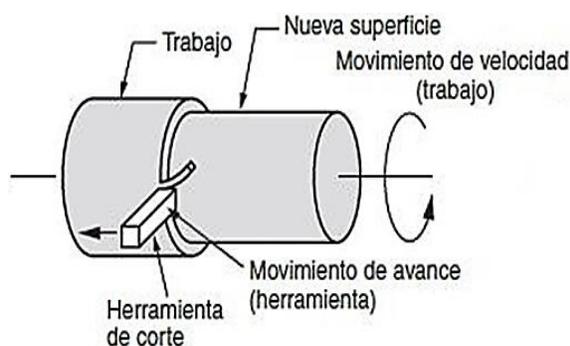


Figura 2 Proceso de torneado [6]

Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está regularmente fabricada de un material mucho más duro que el material de trabajo. En la herramienta, el filo sirve para separar viruta del material de trabajo, así mismo, la herramienta contiene una cara inclinada y un flanco o superficie de incidencia que contribuyen al desalojo constante de la viruta. Generalmente la punta de la herramienta esta redondeada con cierto radio llamado radio de nariz, como se ilustra en la figura 3 [6].

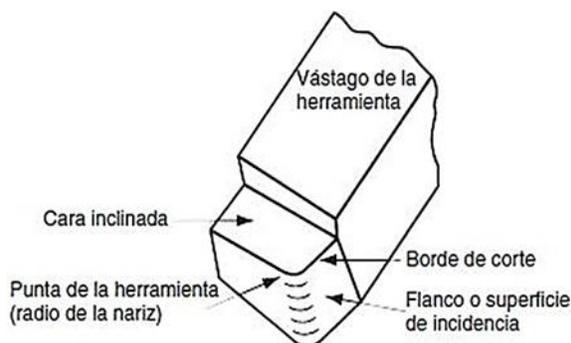


Figura 3 Herramienta de corte [6]

Para realizar una operación de maquinado se requiere de los siguientes parámetros como es velocidad de corte (v), avance (f) y profundidad de corte (d), ver figura 4.

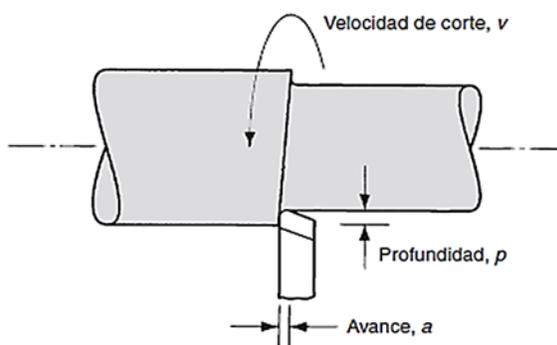


Figura 4 Parametros de corte para operacion de torneado [6]

1.1.1 Modelo de corte ortogonal

El corte ortogonal usa por definición una herramienta en forma de cuña, en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. Al penetrar la herramienta contra el material se forma una viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado plano de corte; éste forma un ángulo α con la superficie de trabajo [7]. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, ver figura 5 y 6.

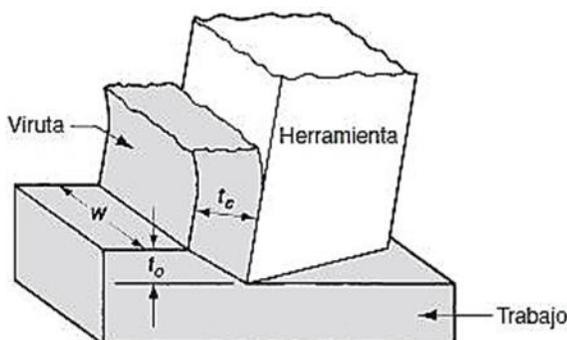


Figura 5 Corte ortogonal en 3D [6]

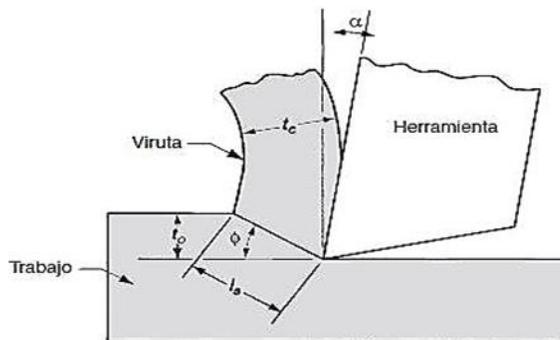


Figura 6 Corte ortogonal en 2D [6]

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos que son el ángulo de inclinación y el del claro o de incidencia.

1.1.2 Relación de fuerzas

Se pueden definir varias fuerzas respecto al modelo de corte ortogonal. Con base en estas fuerzas, se puede definir el esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y algunas otras relaciones. Considerando las fuerzas que actúan en la viruta durante el corte ortogonal como se observa en la figura 7. Las fuerzas que se aplican en la herramienta (figura 8) contra la viruta se pueden separar en dos componentes mutuamente perpendiculares, fuerza de fricción y fuerza normal a la fricción [8].

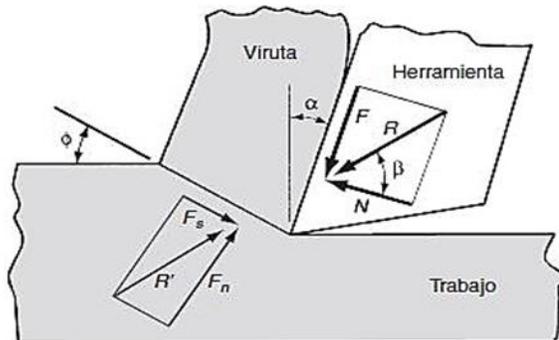


Figura 7 Fuerzas que actúan sobre la viruta [6]

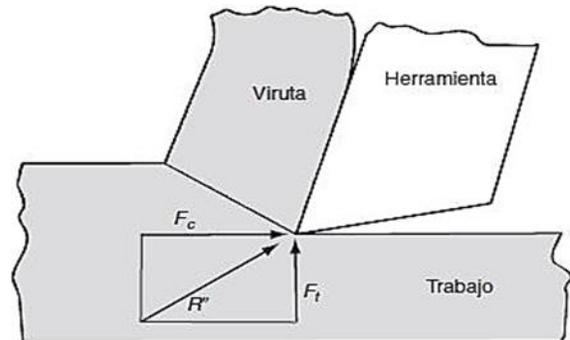


Figura 8 Fuerzas que actúan sobre la herramienta [6]

La fuerza de fricción F es la que resiste el flujo de la viruta a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. La fuerza normal a la fricción N , es perpendicular a la fuerza de fricción; con estas dos componentes se puede definir el coeficiente de fricción μ entre la herramienta y la viruta [9]:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad \dots\dots(1)$$

La fuerza de fricción y la fuerza normal se pueden sumar vectorialmente para formar una fuerza resultante R , la cual se orienta en un ángulo β , llamado ángulo de fricción. El ángulo de fricción se relaciona con el coeficiente de fricción de la manera siguiente [9]:

$$\mu = \tan \beta \quad \dots\dots(2)$$

La fuerza cortante F_s , es la fuerza que causa la deformación de corte que ocurre en el plano de corte, y la fuerza normal a la cortante, F_n , es normal a la fuerza cortante. Por lo tanto, con la fuerza cortante se puede obtener el esfuerzo cortante que actúa a lo largo del plano de corte entre la herramienta de trabajo y la viruta:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad \dots\dots(3)$$

Entonces A_s , es el área del plano de corte y se puede calcular de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \phi} \quad \dots\dots(4)$$

El esfuerzo cortante representa el nivel de esfuerzo requerido para realizar las operaciones de maquinado. Por lo tanto, este esfuerzo es igual a la resistencia cortante del material de trabajo bajo las condiciones en las que ocurre el corte. La suma vectorial de las dos fuerzas componentes F_S y F_N da por resultado la fuerza resultante R [10].

La fuerza de corte F_C , que va en la dirección del corte, es la misma en dirección de la velocidad de corte v , y la fuerza de empuje F_T , es perpendicular a la fuerza de corte y está asociada con el espesor de la viruta antes del corte t_0 [10].

Es posible deducir ecuaciones para relacionar cuatro fuerzas componentes que no pueden medirse utilizando dos fuerzas que pueden medirse en el corte, como se ilustra en el diagrama de fuerzas de la figura 9.

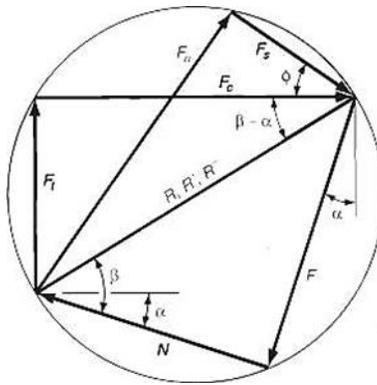


Figura 9 Diagrama de fuerzas en el que se muestran las relaciones geométricas [6]

$$F = F_C \sin \alpha + F_T \cos \alpha \quad \dots\dots(5)$$

$$N = F_C \cos \alpha - F_T \sin \alpha \quad \dots\dots(6)$$

$$F_S = F_C \cos \phi - F_T \sin \phi \quad \dots\dots(7)$$

$$F_N = F_C \sin \phi + F_T \cos \phi \quad \dots\dots(8)$$

Si la fuerza de corte y la fuerza de empuje son conocidas, se puede usar estas cuatro ecuaciones para calcular estimaciones de la fuerza cortante, la fuerza de fricción y la fuerza normal a la de fricción, y con base en estos estimados se puede determinar el esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción [11, 12].

1.2 Lubricación

Los lubricantes son sustancias que se utilizan para reducir al mínimo la fricción, el desgaste de las piezas móviles, y soportar cargas dinámicas y estáticas. Además, pueden servir para distribuir el calor, eliminar los contaminantes, mejorar la eficiencia y la vida útil de los sistemas mecánicos. Los lubricantes generalmente se pueden clasificar como sólido, líquido, o gaseoso [13].

El uso de lubricantes líquidos está presente en la mayoría de aplicaciones, que van desde líquidos automotrices, a los aceites industriales, y aceites de proceso. Dentro del mercado de la lubricación, hay un gran número de aplicaciones que requieren lubricantes formulados especialmente que han dado lugar a más de 10,000 diferentes lubricantes que satisfacen más del 90% de todas las aplicaciones de lubricantes en todo el mundo [14].

La importancia de los lubricantes y sistemas de lubricación sostenibles no se puede apreciar plenamente hasta que se comprenden las consecuencias de no usar un lubricante apropiado o un correcto sistema de lubricación.

1.2.1 Curva de Stribeck

La curva de Stribeck es una representación gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción como una función de la relación λ de espesor de la película lubricante interfacial y rugosidad de la superficie en un cojinete hidrodinámico [15].

Los regímenes de lubricación para el deslizamiento de las superficies lubricadas se clasifican en lubricación solida/limite, lubricación mixta y lubricación hidrodinámica.

La lubricación al límite es el régimen de lubricación con el mayor contacto de aspereza entre las superficies debido a la presencia de una delgada e insipiente película de lubricante. La lubricación mixta es el régimen de la lubricación donde se mezclan el régimen al límite e hidrodinámico ambas son propiedades en la curva de Stribeck. La lubricación hidrodinámica es el régimen de lubricación en donde las dos superficies se separan por la interposición permanente de una película de lubricante; de tal forma que las superficies no se tocan, aunque tengan movimiento relativo; ver figura 10.

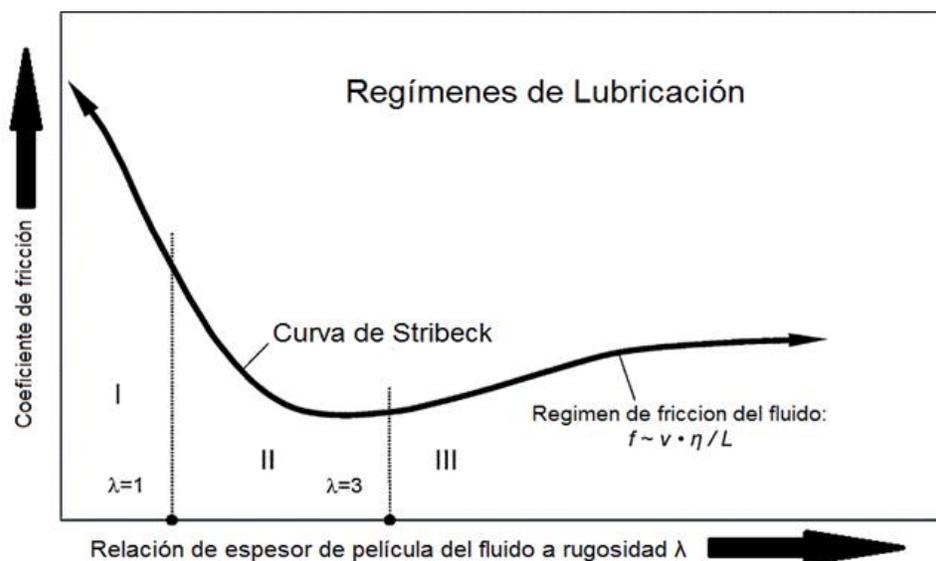


Figura 10 Caracterización de los regímenes de lubricación acorde a la curva de Stribeck [15]

1.2.2 Lubricación al límite

La lubricación al límite es el régimen de lubricación con el mayor contacto de aspereza entre las superficies que se producen debido a la presencia de una delgada película de fluido. La lubricación al límite es un proceso complejo y es controlado por aditivos en el aceite que forman una delgada capa molecular (monocapa) de película de fluido a través de adsorción física, quimisorción, y reacciones triboquímicas sobre las superficies de contacto [16]. Uno de los aditivos de lubricación al límite más comunes son los ácidos grasos que se adhieren a las superficies metálicas y forman una monocapa fuertemente empaquetada [17, 18]. Esta monocapa ayuda a reducir los contactos de asperezas que conducen a altos valores de fricción y el desgaste.

1.2.3 Aditivos para lubricante

Los aditivos para lubricantes son generalmente productos químicos orgánicos u organometálicos (aditivos detergente-dispersantes y su función principal es prevenir la formación de costras y deposiciones de contaminantes resinosos, la función de dichos aditivos radica fundamentalmente en que los mismos mantienen una fina suspensión dentro del aceite), que se añaden a los aceites para mejorar la capacidad de lubricación y la durabilidad del aceite. Los propósitos específicos de los aditivos son mejorar las características de desgaste y fricción, mejorar la resistencia a la oxidación, reducir al mínimo la corrosión, control de la contaminación por los productos de la reacción con las partículas de desgaste y otros desechos, reducir el descenso excesivo de la viscosidad del lubricante a altas temperaturas, reducir el punto de congelación e inhibir la generación de espuma.

Los aditivos cuidadosamente seleccionados son extremadamente eficaces en la mejora del comportamiento tribológico de un lubricante. La mayoría de los fabricantes de aditivos mantienen en absoluto secreto los detalles de sus productos ya que esto permite a cada empresa en la industria de la lubricación, tener su propia ventaja competitiva única. Muchos de los paquetes de aditivos más comunes utilizados en las formulaciones de lubricantes son aditivos antidesgaste, aditivos de presión extrema, inhibidores de oxidación, inhibidores de corrosión, detergentes y dispersantes, mejoradores de viscosidad, y los inhibidores de la espuma [19].

1.3 Biolubricantes

Los biolubricantes son productos líquidos o semisólidos extraídos de las plantas constituidos por glicéridos de los ácidos grasos, ver figura 11. La estructura química de los aceites vegetales es relativamente uniforme en comparación con la de los aceites minerales. La composición de los biolubricantes se expresa en términos de sus bloques de construcción, llamados "ácidos grasos", que son propios de cada tipo de planta [20].

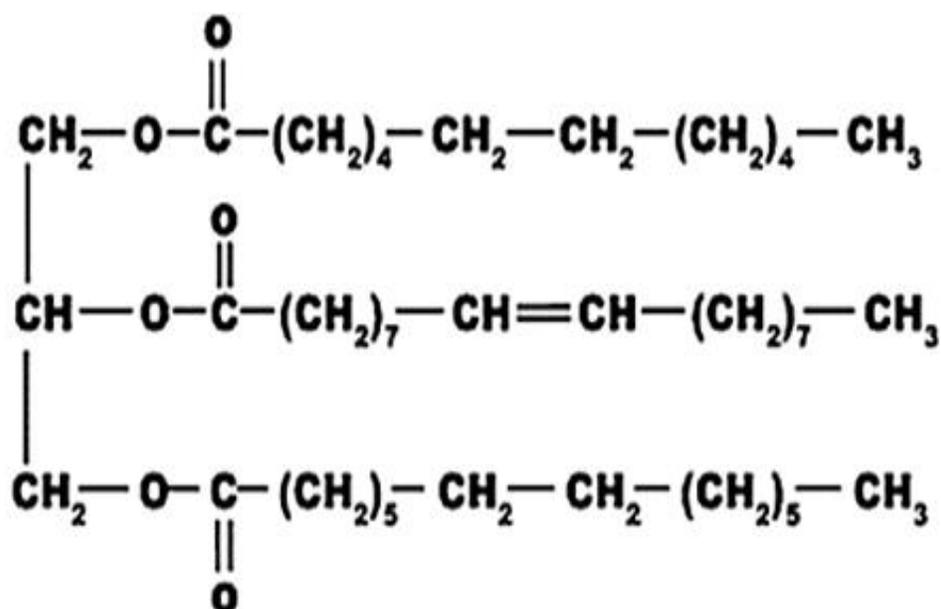


Figura 11 Representación esquemática de una molécula de triglicérido [20]

Los beneficios de usar biolubricantes en diferentes aplicaciones son: alto punto de inflamación de los ésteres resultando en menor emisión de óxidos de carbono, en comparación con el aceite mineral, también alto índice de viscosidad ya que presentan una alta linealidad en su estructura molecular e interacciones intermoleculares a altas temperaturas, son totalmente libres de compuestos aromáticos. Al ser utilizados en maquinados, ofrecen mayor vida útil de la herramienta cuando esta se usa como lubricante de corte de metal, producto de una mayor tendencia de humectación por los ésteres polares presentes, que a la vez resulta en una reducción de la fricción. Por otro lado, tienen una mejor compatibilidad con la piel, por lo que son menos los problemas dermatológicos asociados cuando se usan como fluidos de trabajo para metales. Por último, los aceites vegetales son renovables, biodegradables y no tóxicos para el ecosistema [20, 21].

Las limitaciones de usar biolubricantes en diferentes aplicaciones son que a baja temperatura la mayoría de los aceites vegetales tienen una considerable cantidad de ácidos grasos saturados en su composición, lo que restringe el uso. Su compatibilidad con el sellado no es buena, y también exhiben tendencia al goteo debido a su baja viscosidad. Así también, existen problemas con la oxidación y estabilidad hidrolítica. La saturación de los filtros, la formación de espuma, y la mala protección contra la corrosión son los otros problemas que limitan su aplicación. Por último, el rango de viscosidad es limitado ya que tienen un estrecho rango de viscosidad para ser utilizado como lubricantes potenciales [20, 21].

1.3.1 Aplicaciones

En la actualidad las aplicaciones de los biolubricantes han aumentado considerablemente ya que recientes investigaciones demostraron que tienen un adecuado rendimiento al aplicarse en su totalidad o como aditivo en aplicaciones de capa al límite e hidráulicas [22], como son:

- ✓ Motores de combustión interna de 2 y 4 tiempos.
- ✓ Fluidos hidráulicos.
- ✓ Procesos de remoción de material.
- ✓ Transmisiones hidráulicas.
- ✓ Fabricación de grasas.
- ✓ Compresores.
- ✓ Maquinaria agrícola.

1.3.2 Aceite de *Jatropha Curcas*

El aceite de *Jatropha Curcas* es de origen vegetal y se obtiene de la semilla de la planta de *Jatropha Curcas*, ver figura 12 y 13, que pertenece a la familia de las Euphorbiaceae y se da de forma silvestre en el territorio nacional.



Figura 12 Semilla de *Jatropha Curcas* [23]



Figura 13 Planta de *Jatropha Curcas* [24]

Esta planta puede llegar a tener una vida superior a los 40 años, soporta climas extremos como lo son suelos áridos y desérticos ya que no requiere de un consumo abundante de agua, soporta largas temporadas de sequías; también crece en climas tropicales y semitropicales, en zonas a nivel del mar y hasta los 1600 m.

Además, la planta de *Jatropha Curcas* también es utilizada para reforestar, apoyar e incentivar la agricultura; por otra parte, la planta es capaz de producir semillas tóxicas y no tóxicas lo que significa una forma potencial de aprovechar el residuo de la semilla para la elaboración de otros productos derivados [25, 26]. En México se cultiva de manera extensa en los estados de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Monterrey, Morelos, Sinaloa y Veracruz para la producción de biodiesel.

1.3.2.1 Propiedades del aceite de *Jatropha Curcas*

Las propiedades fisicoquímicas del aceite de *Jatropha Curcas*, puede variar por los procesos de refinación y la zona de cultivo de la planta; siendo la refinación de gran ayuda ya que remueve gran concentración de agua, compuestos volátiles, partículas contaminantes y disminuye la acidez, ver tabla 1 [25, 27].

Tabla 1 Propiedades fisicoquímico del aceite de *Jatropha* [25, 27]

Parámetro	Aceite de <i>Jatropha Curcas</i>
Peso Especifico	0.860-0.933
Azufre (S)	0.13
Viscosidad (cSt)	37.00-54.80 @ 30°C
Punto de Fluidez (°C)	-3
Punto de Turbidez (°C)	2
Punto de Inflamación (°C)	210-240
Índice de Cetano	38-51
Índice Calorífico (MJ/Kg)	37.83-42.05

1.4 Fluidos utilizados en el proceso de maquinado

Un fluido para proceso de maquinado es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos son [28, 29]:

- ✓ La generación de calor en las zonas de corte y fricción.
- ✓ Fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-pieza de trabajo.
- ✓ Disipación del calor.
- ✓ La reducción de la fricción

Los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como:

- ✓ Lavado de las virutas.
- ✓ Reducción de la temperatura de la pieza de trabajo para un manejo más fácil.
- ✓ Disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia.
- ✓ Mejorar la estabilidad dimensional de la pieza de trabajo.
- ✓ Optimizar el acabado superficial.

1.4.1 Formulación de los fluidos para proceso de corte

Existen cuatro categorías básicas de fluidos para corte de acuerdo con su formulación química [30, 31, 32]:

- ✓ Aceites para corte: Son fluidos basados en aceites derivados del petróleo, de origen animal, marino o vegetal. Los aceites minerales son los principales debido a su abundancia y generalmente por sus características lubricantes deseables.

- ✓ Aceites emulsificados: Son fluidos que forman suspensiones de pequeñas gotas de aceite en agua. El fluido se hace mezclando aceite en agua, y se utiliza un agente emulsificante para promover la mezcla y estabilidad de la emulsión.
- ✓ Fluidos semiquímicos: Son fluidos químicos que contienen pequeñas cantidades de aceite emulsificado para incrementar las características lubricantes del fluido para corte.
- ✓ Fluidos químicos: Son sustancias químicas disueltas en agua, más que aceites en emulsión. Las sustancias químicas disueltas son compuestas de azufre, cloro o fósforo y agentes humectantes. Las sustancias químicas se destinan a suministrar algún grado de lubricación a la solución. Los fluidos químicos tienen buenas propiedades refrigerantes, pero sus cualidades lubricantes son menores que las de los otros tipos de fluidos.

1.4.1.1 Aceite Mobilmet S122

El aceite Mobilmet S122 es un aceite de corte soluble en agua. Es un fluido para servicio moderado que contiene jabones, sulfonatos, agentes de acoplamiento y estabilizadores para controlar el olor. El aceite ofrece un enfriamiento mejorado con menos humo y reducción del manchado para metales ferrosos y no ferrosos. Proporciona un mejor terminado superficial y tolerancias más cerradas, con reducción de rechazos en los sistemas de calidad. Así mismo, con el uso de este producto, se incrementa la vida de la herramienta. En operaciones severas, se reduce el soldado de partículas.

1.5 *Modelo de voltaje para la obtención de coeficiente de fricción*

Y. Meng, H. Jiang, Q. Chang y P. L. Wong, establecieron un modelo teórico basado en la idea de que cuando se aplica una carga a un par de placas paralelas, y se polariza el material dieléctrico entre ellas o se generan efectos electroquímicos, el resultado es un cambio en sus propiedades y por lo tanto en su comportamiento de fricción [33].

Considerando el balance entre la energía de entrada y la energía consumida en un tribosistema [33], ver figura 14. Si no se aplica un potencial eléctrico adicional, como en situaciones comunes, la energía de entrada se transforma, $F * v$ (F representa la fuerza de fricción y v la velocidad de deslizamiento) en calor, daño en las superficies, emisión de fonones, electrones, etc. Todo esto se expresa como energía de consumo P_c . Cuando un voltaje externo es aplicado a un circuito compuesto de electrodos y lubricante conductivo (solución acuosa), una energía eléctrica adicional es introducida en el sistema, $U * I$ (U es el voltaje aplicado e I la corriente eléctrica) [33].

Entretanto, la entrada de energía eléctrica resulta en un efecto Joule $R * I^2$ (R es la resistencia del circuito) y posibles reacciones electroquímicas en las superficies. Acorde con la ley de Faraday de electroquímica [34], el potencial electroquímico de reacción esta expresado por [33]:

$$P_e = \sum_{j=1}^n k_j v_j = I \sum_{j=1}^n k_j \alpha_j \quad \dots\dots\dots(9)$$

La derivada parcial de la energía libre total electroquímica (G) de una especie, con respecto al número de moles con los que participa, cuando otros factores (T, P , etc.) son constantes, se denomina potencial electroquímico del metal. Este potencial es análogo del potencial químico de una especie, pero en este caso están incluidas las contribuciones química y eléctrica en la energía libre de Gibbs [35].

Cuando un metal se sumerge en un electrolito, como resultado del intercambio de cargas eléctricas en la interface metal-solución electrolítica, por ejemplo, transporte de cationes desde el metal hacia el electrolito y viceversa, o la adsorción de iones o moléculas polares de la solución sobre la superficie metálica, surge un salto de potencial, llamado potencial de electrodo (P. E.). Su valor absoluto no se puede calcular ni medir. Por lo tanto, para determinar el valor del P.E. es necesario armar una celda electrolítica de un electrodo (el metal de interés) y otro electrodo de referencia (E. R.), sumergirlos en el mismo conductor iónico y medir el voltaje del circuito externo [35].

Este voltaje se reconoce también como fuerza electromotriz (FEM). Los valores de los electrodos son medidos habitualmente con respecto del valor del electrodo de hidrógeno saturado (SHE por sus siglas en inglés, Saturated Hydrogen Electrode) [35].

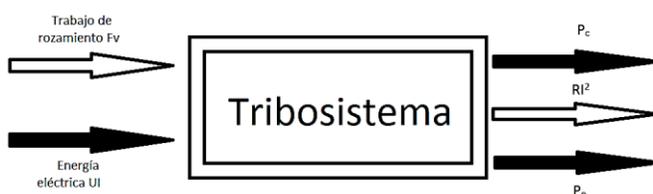


Figura 14 Diagrama de balance de energía [33]

Tomando en cuenta todas estas condiciones para que el modelo sea lo más aproximado, considerando la ley de la conservación de la energía proponen el siguiente modelo [33]:

$$\dot{\mu} = A\dot{i} + 2B\dot{I}i \quad \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n k_j \alpha_j - U}{Nv} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$B = \frac{R}{Nv} \quad \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

A =Constante

B =Constante (s/mA^2)

$\dot{\mu}$ =Coeficiente de fricción

\dot{I} =Derivada de la corriente con respecto al tiempo (A/s)

N =Carga (N)

$\sum_{j=1}^n k_j \alpha_j$ =Poder electroquímico del material (v)

Se efectuaron una serie de experimentos para comprobar si el modelo teórico es adecuado para obtener el coeficiente de fricción por medio de la variación de corriente. Utilizaron tres diferentes tipos de tribopares esfera de Si_3N_4 /disco de acero, esfera de Si_3N_4 /disco de latón y esfera de SiO_2 /disco de acero, el lubricante es agua desmineralizada con partículas de zinc teniendo una relación de 1:99 en peso [33].

La máquina con la cual desarrollaron la experimentación fue con el modelo Cameron-Plint TE67 perno sobre disco, los parámetros de prueba que utilizaron fueron carga 10-105N, velocidad de deslizamiento 25-260 mm/s, tiempo de la prueba 1800s, la fuente de poder suministra un voltaje de CD y el parámetro fue desde 0-15v. Se concluyó que el modelo matemático propuesto puede ser aplicado para la obtención del coeficiente de fricción ya que los datos experimentales se aplican a este modelo. El modelo puede describir la dependencia del coeficiente de fricción en la corriente con una razonable exactitud [33]. El modelo se puede aplicar en condición seca debido a que se tienen todos los datos para aplicarlo el potencial electroquímico en esta condición es cero.

2 *Revisión de literatura*

En la última década, la economía, el medio ambiente y las nuevas legislaciones globales han generado conciencia sobre el consumo de energía y el impacto ambiental asociado a procesos industriales y de manufactura que existen actualmente [36].

El costo de la energía en la manufactura se ha incrementado considerablemente debido a la fuerte alza en los precios y a la creciente demanda en la producción. El consumo en la industria está directamente relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero, que contribuye al cambio climático global.

Uno de los objetivos primarios de la manufactura sustentable es el de reducir el consumo de energía en los procesos. Una estrategia es ahorrar energía con la adaptación de nuevos materiales o nuevos procesos para reducir los tiempos de operación, otra es optimizar los procesos de manufactura que ya existen con el objetivo de reducir el consumo de energía.

En Estados Unidos, el sector manufacturero es responsable de generar 1.6 mil millones de dólares en su PIB en el año 2006, que representa alrededor del 12.2% del PIB total de dicho país. Este sector gasta miles de millones de dólares en productos y servicios como insumos [37]. Con respecto al consumo de energía eléctrica en la industria manufacturera, 54% de energía eléctrica se utiliza en procesos de producción [38]. Situación similar ocurre en Europa. Por ejemplo, Alemania consume alrededor del 25% de la energía eléctrica de la unión europea, el sector industrial tiene el mayor consumo de más del 43% [39].

Por otro lado, el consumo energético está directamente relacionado con entornos sustentables. La eficiencia energética puede ser mejorada por sustitución de procesos, cambio en el combustible, manejo y reciclaje de la materia prima.

Estudios de impacto ambiental de máquinas herramienta en los procesos de remoción de material (por ejemplo, torneado y fresado), indican que más del 99% del impacto se deben al consumo de energía eléctrica [40]. Lo anterior se ve reflejado en la interacción de la herramienta con la pieza a manufacturar, las fuerzas de corte en el proceso han sido estudiadas por décadas para conocer la energía mínima requerida para remover material con la herramienta. Los modelos de P. L. B. Oxley y E. J. A. Armarego son utilizados para teoría de corte ortogonal, predecir las fuerzas y la estimación de energía basada en las fuerzas de corte [41, 42].

Otros, como F. Draganescu et al, han intentado establecer la relación entre la energía en la punta de la herramienta y la eficiencia de la unidad principal de accionamiento del husillo bajo diferentes condiciones de corte [43], el modelo es complicado y no se aplica para la mayoría de las maquinas herramienta.

T. Gutowski propone el concepto de exergía, que se describe como la unidad energética del proceso en la manufactura [44]. La exergía está basada en el equilibrio térmico y la velocidad de transformación.

En 1907, Taylor y White descubrieron el uso del agua como refrigerante y que la velocidad de corte se podía incrementar en un 40% mediante la aplicación continua de agua en el maquinado de acero con una herramienta de alta velocidad. A pesar de su excelente capacidad de enfriamiento, el agua carece de buenas propiedades para lubricar, además de producir corrosión en las maquinas herramienta y en la pieza de trabajo [45]. Desde entonces, nuevas formulaciones de fluidos de corte se han venido desarrollando para asegurar una buena refrigeración en conjunto con propiedades lubricantes que mejoren eficazmente el acabado superficial, así como reducir las fuerzas de corte y la energía de consumo en el proceso de maquinado.

En función a las operaciones de maquinado a realizar y el tipo de acabado superficial deseado; las propiedades del fluido de corte que se necesita debe ser para enfriar, lubricar o ambas. La efectividad de los fluidos de corte depende de diversos factores, como las operaciones de maquinado, parámetros de corte y el método de aplicación del fluido.

Las funciones principales de un fluido de corte son refrigerar y lubricar tanto la pieza de trabajo como la zona de corte de la herramienta en el proceso de maquinado [46]. Un refrigerante, enfría la herramienta y la pieza de trabajo cuando se opera a velocidad de corte y temperaturas altas de corte; como resultado, se minimiza la distorsión de la pieza de trabajo. La capacidad del refrigerante para mantener la temperatura por debajo del valor de reblandecimiento térmico del material, que prolonga significativamente la vida útil de la herramienta. Además, disminuye el desgaste de la herramienta inducido por la temperatura, básicamente como lo es la propagación de grietas y la adhesión de material en la herramienta [47].

Un lubricante, reduce la fricción, por consiguiente, el calor generado se reduce. En un corte a baja velocidad, las propiedades del lubricante ayudan a reducir la fricción en la zona de corte. Como resultado, las virutas que se producen son más delgadas y con un rizado más firme, lo que minimiza el calor generado en la zona de corte, así como reducir al mínimo el consumo de energía en el proceso [48].

Generalmente, los fluidos de corte se pueden dividir en 3 clases principales [45], ver figura 15.

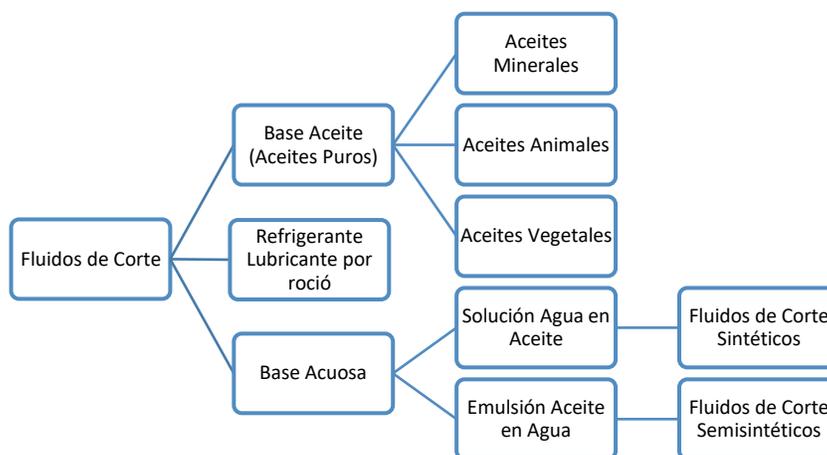


Figura 15 Clasificación de los fluidos de corte

Se han realizado extenuantes investigaciones sobre biolubricantes en diferentes procesos de manufactura, por ejemplo, M. A. Xavier y M. Adithan investigaron la influencia de los fluidos de corte en el desgaste de la herramienta y el acabado superficial durante el proceso de torneado de acero AISI 304 con una herramienta de carburo usando tres tipos de fluidos de corte (aceite de coco, aceite mineral y aceite sintético). El avance influye en el acabado superficial con el 61.54% mientras que la velocidad influye en el desgaste con el 46.49%, sin importar el tipo de fluido de corte utilizado. El comportamiento relativo de la efectividad de los fluidos de corte para reducir el desgaste de la herramienta y mejorar el acabado superficial, el desempeño fue mejor cuando se utilizaron emulsiones biolubricantes en comparación con las convencionales [29].

De Chiffre y Belluco estudiaron el desempeño de los fluidos de corte en el proceso de torneado, fresado y taladrado en acero inoxidable austenítico entre otros materiales. Ellos consideraron varios parámetros como

la vida del filo, la vida útil de la herramienta de corte y la calidad del producto. Se utilizaron dos grupos de fluidos de corte, el primero a base de agua y el segundo aceite directo (aceite mineral, aceite sintético y aceite vegetal). Los resultados revelaron que en el acero inoxidable austenítico, las fuerzas de corte son bajas con el aceite vegetal ya que contiene una gran cantidad de ácidos grasos lo que permite que sea bajo comparado con el aceite mineral. Por lo que De Chiffre y Belluco concluyen que la vida de la herramienta es mayor en todos los procesos de corte; aumentando el desempeño hasta en un 300% en el proceso de taladrado [49].

Por ejemplo, F. C. Andres comparo el desempeño relativo de cinco emulsiones utilizando el método de golpeteo o tapping torque test utilizando la norma ASTM D5619. Los aceites base fueron petróleo nafténico, 50/50 petróleo nafténico y mezcla de aceite parafínico, aceite de canola, aceite de soya y aceite sintético. Estos fluidos fueron probados en acero SAE 1018 usando una herramienta de corte templada sin recubrimiento. Los aceites vegetales tienen significativamente una mayor eficiencia al torque por golpeteo en relación con los aceites a base de petróleo; los tres aceites vegetales probados muestran un 12% a 14% de incremento en eficiencia relativa en comparación con el aceite mineral soluble de acuerdo a la norma ASTM empleada. El aceite de canola y el de soya mostraron la misma eficiencia relativa [50].

Salete Martins por su parte formulo un fluido de corte a base de aceite de castor para el proceso de rectificado. El desgaste de la piedra abrasiva y la rugosidad en la pieza de trabajo fueron seleccionadas para evaluar el desempeño de la formulación. La prueba fue realizada en acero SAE 8640 utilizando un vitrificado de rueda CBN. Los resultados muestran que el desgaste de la rueda y la rugosidad de la pieza de trabajo fueron reducidas utilizando el fluido a base de aceite de castor comparado nuevamente con otros fluidos para corte (aceite semi sintético, mineral, etc.) [51].

2.1 Efectos del uso de los biolubricantes

Los principales problemas que presentan los biolubricantes, son: pobre propiedad a baja temperatura, baja resistencia a la degradación por oxidación, generación de hongos, deficiente dispersión de contaminantes, etc. [3, 52]; por lo que limitan su uso en diferentes aplicaciones.

La estabilidad de oxidación de un lubricante está condicionada a los triglicéridos base, para los biolubricantes esta propiedad es limitada debido a la reducida carencia de enlaces dobles insaturados. Los enlaces insaturados de carbono-carbono funcionan como sitios activos para muchas reacciones, que incluye la oxidación. La mayoría de biolubricantes a base de triglicéridos contiene ácidos grasos insaturados, lo cual los hace susceptibles a la oxidación [53].

Uno de los principales problemas a resolver en los biolubricantes es la oxidación, en particular la propuesta que se presenta de utilizar biolubricantes en máquinas herramientas, pudiera generar corrosión a los

componentes de dichas maquinas, debido al aumento en el pH al generar una emulsión biolubricante-agua en el proceso de manufactura. Cabe mencionar que ocurren reacciones químicas en contacto con materiales ferrosos, como los son, fisorción y quimisorción [54]; que degradan el material y puede afectar a los distintos elementos mecánicos. El proceso físico químico puede observarse en la figura 16.

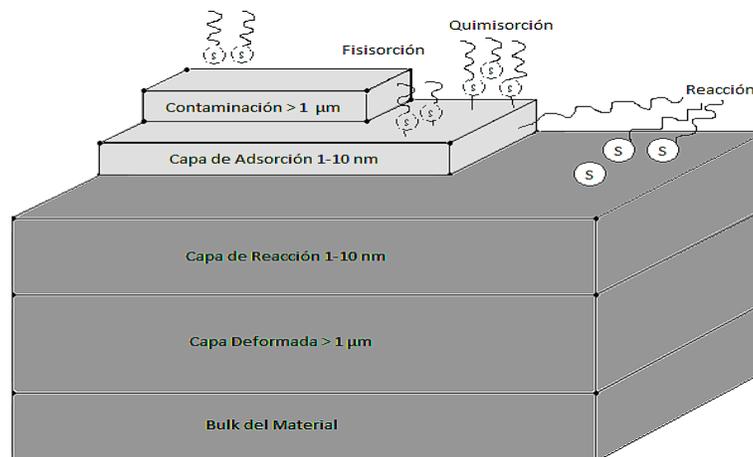


Figura 16 Esquema de una superficie maquinada con la interacción de fluidos de corte [54]

S. Z. Erhan realizó un estudio de aproximación sistemática para mejorar la oxidación y el comportamiento del flujo en frío de aceites bioderivados, usando una combinación sinérgica de aditivos y aceites vegetales con alto contenido oleico y fluidos sintéticos. Resultados mostraron que a mayor temperatura existe una estabilidad de oxidación más alta esto se debe a que los aceites vegetales contienen porcentajes muy alto de ácidos grasos [26].

En general, el valor del pH de los fluidos de corte a base de agua (emulsión o solución) debe ser moderadamente alcalino en un rango de pH=8.0 a 9.5 para reducir la corrosión de los elementos de la máquina herramienta y reducir la proliferación de microorganismos; el pH menor a 8.0 produce corrosión en la máquina y pieza de trabajo e inestabilidad en la emulsión. Reportes indican que un pH arriba de 9.5 en la emulsión puede provocar irritación en la piel si esta es expuesta de manera constante [54, 55, 56].

Otra limitante del uso de las emulsiones es el rápido envejecimiento de los fluidos de corte a base de agua y la colonización de microorganismos, según Brinksmeier, dos efectos causados por el crecimiento microbiano tienen que ser considerados con respecto al desempeño de los fluidos de corte, la formación de biopelículas y el metabolismo de los microorganismos. La biopelícula es la zona ideal para la proliferación de bacterias y hongos [54, 57, 58].

2.2 Estabilidad de la emulsión (fluido de corte)

El tamaño habitual de la gota en la emulsión para un proceso de manufactura va desde 0.1 a 2.0 μm , esto depende de los parámetros de maquinado y la composición del fluido de corte. Además, también el

envejecimiento conduce al cambio en la composición de la misma y por lo tanto cambio en el tamaño de la gota [54, 59].

J. Jhon propone que la estabilidad de una emulsión depende del tamaño de las gotas producidas durante la formación de la emulsión, esto con el fin de producir un diámetro promedio de algunas micras con un agitador magnético que genera una velocidad rotacional de 2500 RPM durante 10 minutos; ya que el volumen influye en la eficacia para crear la emulsificación. La estabilidad de la emulsión fue evaluada por apariencia y observación de las fases de separación. Sin embargo, las emulsiones fueron moderadamente estables ya que la fase de separación fue hasta después de 48 horas, el tamaño de gota para las emulsiones estuvo en un rango entre 7 y 10 μm [60].

La estabilidad de la emulsión y el tamaño de gota dependen directamente de la concentración de aceite soluble comercial en la emulsificación, la relación típica para agua-aceite es de 30:1 [45], por lo que L. S. Foulds categorizo los aceites de fluidos de corte de acuerdo a su apariencia, uso y dilución, ver tabla 2 [61].

Tabla 2 Aplicación de los fluidos de corte [61]

Tipo de Aceite	Apariencia	Uso	Dilución
Aceites Puros	Aceitosa, sin agua	Material de alta resistencia, inhibición de la corrosión	No requerida
Aceite soluble emulsionable	Color lechoso, acuosa	Refrigerante y lubricante, inhibición de la corrosión.	Si, 2-3%
Aceite semi sintético soluble	Translucida	Refrigerante y menor lubricación que aceites acuosos	Si, 1-3%
Aceites sintéticos	Transparente acuosa	Excelente refrigeración, mínima lubricación	Si, 1-5%

2.3 Regulación del uso de emulsiones

La norma ISO 6743-7:1986, establece la clasificación detallada de la familia M (Metalmecánica), que pertenece a la clase L (Lubricantes, aceites industriales y productos relacionados) [62].

Cuando se utilizan emulsiones, existen aspectos que deben tomarse en consideración a fin de no poner en peligro la estabilidad y el rendimiento de la emulsión. El pH del agua es de importancia, ya que es su propiedad más importante en la elaboración de emulsiones para manufactura. Se dice que la dureza del agua depende del contenido de calcio, magnesio y sales solubles, la dureza del agua debe estar entre 5 y 20 °dH (grados de dureza alemana). Si el agua es demasiado dura, los emulsionantes reaccionan con el calcio y sales de magnesio, lo que conduce a la formación de jabones insolubles en agua (que se mueven en la superficie de la emulsión) y a la vez reduce el contenido de emulsionante y acorta la vida útil de la emulsión drásticamente. Al contrario, el agua blanda promueve la formación de espuma [63].

Por otro lado, la norma ASTM D2272, proporciona un método para determinar la estabilidad a la oxidación de los aceites [64]. Mientras que la norma ASTM D1401, propone un método para determinar la estabilidad de dilución y las características de separación sujetas a contaminación y turbulencia [65]. En la norma ASTM D2619, se puede observar información sobre la estabilidad relativa de fluidos hidráulicos en diferentes condiciones de prueba. Fluidos hidráulicos inestables por hidrólisis por ácidos y contaminantes insolubles pueden causar un mal funcionamiento del sistema hidráulico debido a la corrosión [66].

Al cambiar el fluido para el corte, siempre se debe limpiar cuidadosamente el depósito en donde este se encuentra, ya que las bacterias contaminan inmediatamente la nueva emulsión, reduciendo significativamente la vida útil. El tratamiento del fluido para corte posterior a su uso es costoso, debido a que implica la separación del aceite del agua, ya sea químicamente (sal o separación por ácido), por ultrafiltración (tecnología de membranas) o por vaporización e incineración [63].

En el grupo de tribología de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación en la ESIME Unidad Zacatenco se han realizado varias investigaciones utilizando el aceite de *Jatropha Curcas* para conocer sus propiedades tribológicas en distintas aplicaciones, como aditivo en mezclas con lubricante ATF, lubricante para motor de combustión interna y emulsión biolubrificante aplicada en un proceso de manufactura con corte de viruta; en donde el aceite de *Jatropha Curcas* mostró la mejor propiedad anti vibraciones (anti-shudder), una ligera reducción en el coeficiente de fricción del aceite mineral para una mezcla de 9:1, disminución del desgaste en el flanco de la herramienta de corte en un 46%, apoya en la ruptura de la viruta, mejora la vida útil de la herramienta bajo ciertos parámetros de corte.

3 *Desarrollo experimental*

3.1 *Máquina perno sobre disco*

La máquina perno sobre disco es un equipo tribológico basado en la norma ASTM G99, el cual es utilizado para reproducir desgaste por deslizamiento en pares de materiales, ya sea en condición seca o lubricada. La máquina tribológica perno sobre disco, ver figura 17 y 18, consiste de un brazo con un porta perno que se sujeta con un espárrago metálico que permite ajustar la altura del perno con la probeta de disco. El brazo se equilibra por medio de contrapesos colocados en la parte posterior del brazo, el equilibrio se logra con la ayuda de un pivoteo en la parte central. Lo que garantiza únicamente aplicar la carga normal deseada. Al mismo tiempo, es posible ajustar la posición del perno sobre el disco con apoyo del brazo para ajustar el diámetro de la huella de corte. El disco se sujeta con un cabezal giratorio (porta disco), localizado dentro de una tina para contener lubricante. El movimiento que se aplica se genera por medio de un motor de velocidad variable. Para evaluar la fuerza de fricción producida entre el disco y el inserto se recurre a una celda de carga,

la cual registra a través de un programa la adquisición de datos. La emulsión se encuentra en un recipiente y se vierte sobre el inserto y el disco por medio de gravedad proporcionando un flujo constante.

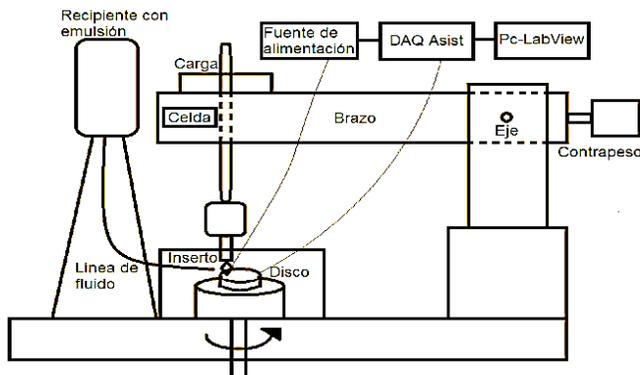


Figura 17 Diagrama máquina perno sobre disco



Figura 18 Equipo utilizado

3.2 Materiales

Se seleccionaron dos materiales comerciales para fabricar las probetas de disco, los materiales fueron acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6, ambos son de uso común en la industria, como es en componentes de máquinas, y en la fabricación de carretes para pesca, sistemas de supresión de sonido (silenciadores). Ambos presentan características distintas como se muestra en la tabla 3 y 4.

Tabla 3 Propiedades mecánicas acero SAE 1018

Propiedades Mecánicas	
Densidad	0.284 lb/in ³
Dureza	126 HB (71 HRb)
Esfuerzo de fluencia	53700 PSI
Esfuerzo máximo	63800 PSI
Elongación máxima	15% en 2"
Reducción de área	40%
Módulo de Elasticidad	29700 KSI

Tabla 4 Propiedades mecánicas aluminio 6061-T6

Propiedades Mecánicas							
Aluminio 6061-T6	Resistencia (KSI)		Tensión		Corte	Fatiga	Módulo
	Ultimo	Fluencia	Elongación en 2 pulgadas		Ultimo de Corte	Límite de fatiga	Módulo de elasticidad
			1/16" Espesor	1/2" Diámetro	Resistencia KSI	KSI	KSI x 10 ³
	45	40	12	17	30	14	10

3.2.1 Probetas de disco

Se maquinaron discos para obtener las características geométricas que se observan en la tabla 5 y en la figura 19, se puede observar la geometría de la probeta de disco y las características finales de la misma. La preparación de la superficie se realizó con un lijado hasta un grano 500 para que la superficie fuera homogénea. El valor de dureza se obtuvo con un micro durómetro de precisión LECO LM700 estableciendo un promedio ya que se realizaron 50 mediciones por material, la rugosidad se obtuvo con ayuda de un rugosímetro MITUTOYO SJ-210 realizando 10 mediciones por probeta y reportando un valor promedio.

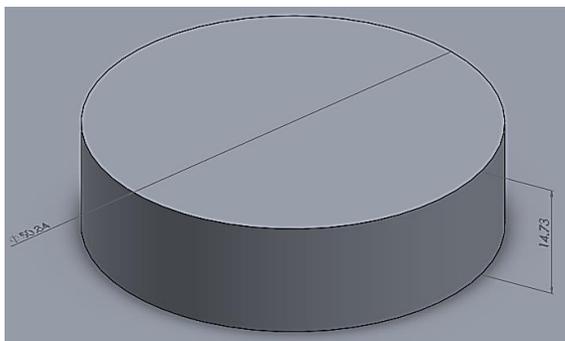


Figura 19 Disco dimensionado

Tabla 5 Características de discos después del maquinado

Características	SAE 1018	Aluminio 6061-T6
Diámetro (mm)	50.84	50.84
Espesor (mm)	14.73	14.73
Dureza (Hv) 0.5 grs	213.3	107.35
Rugosidad Ra (µm)	0.100	0.185

3.3 Selección de la herramienta de corte

La herramienta utilizada fue de la marca BOEHLERIT WNMG080408-MP LC225K con las características ilustradas en la figura 20, el inserto posee un recubrimiento de TiN, debido a que es utilizado en trabajos de acabado y desbaste a altas y bajas velocidades con mayor resistencia al desgaste [67].

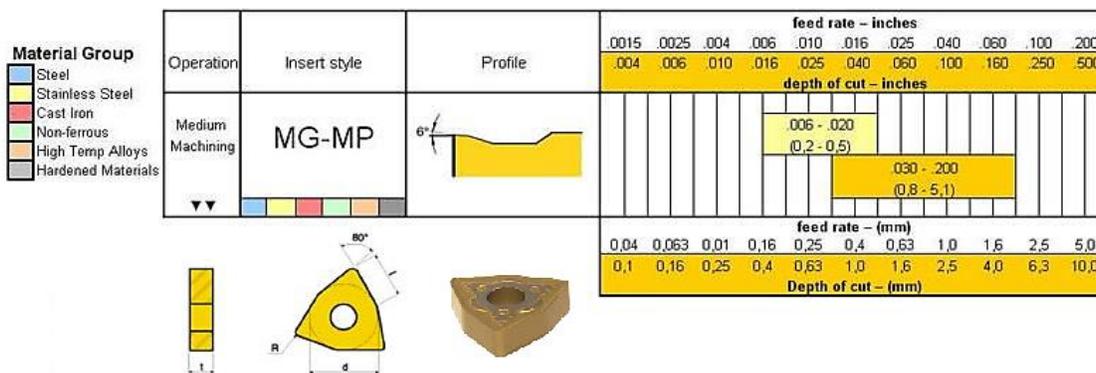


Figura 20 Características del inserto [67]

Por otro lado, para sujetar el inserto fue necesario diseñar un porta inserto con las características ilustradas en la figura 21. La finalidad de diseñar un porta herramienta fue para garantizar un ángulo de entre 6 y 8° de inclinación entre el inserto y la probeta de disco, lo que ayudara a que únicamente se genere contacto entre el filo de corte y la superficie del disco.

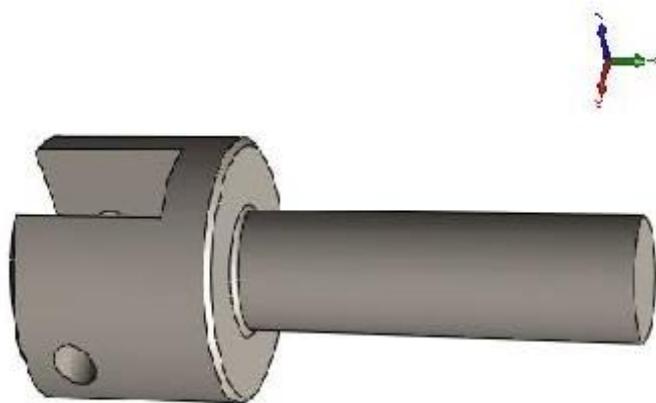


Figura 21 Porta inserto

3.4 Circuito eléctrico

Se aplicó un voltaje de corriente directa en el contacto entre la herramienta y el disco como se observa en la figura 22. Para ello se utilizó una fuente de voltaje regulable ESCORT EPS-3030T, el objetivo es obtener la corriente que se consume por el corte y establecer las características del coeficiente de fricción con respecto al voltaje, resistencia y corriente suministrados. Fue necesario aislar eléctricamente utilizando thermofit en el disco y el porta inserto con respecto a los demás elementos para no generar un corto circuito.

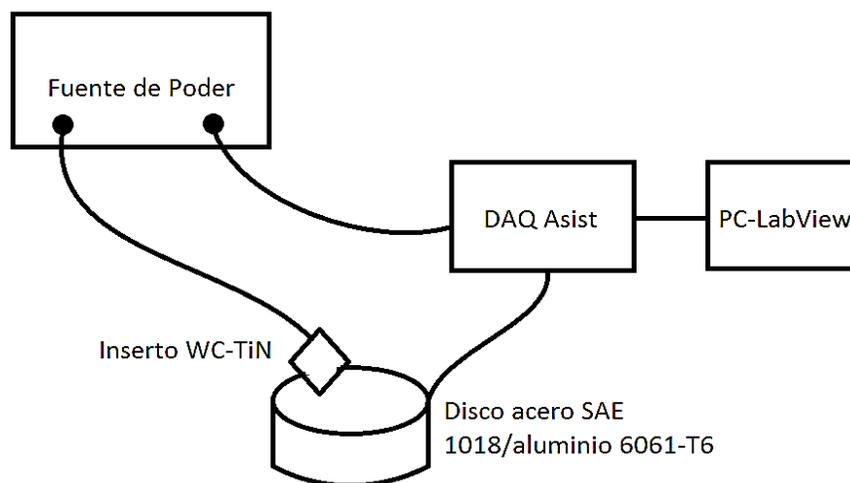


Figura 22 Diagrama circuito eléctrico

3.4.1 Adquisición de datos LABVIEW

Para obtener los datos de variación de corriente fue necesario implementar un sistema de adquisición, utilizando una tarjeta NATIONAL INSTRUMENT modelo NI USB-9219 y el software LABVIEW 2010, en la figura 23 se ilustra la programación realizada.

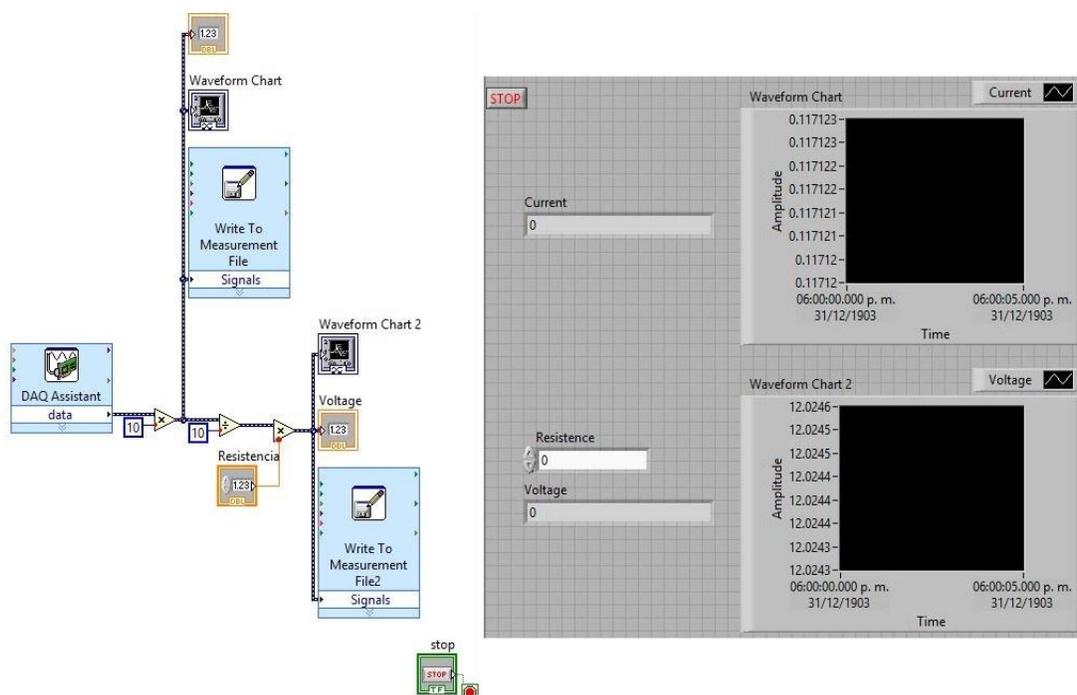


Figura 23 Programa de adquisición de datos

3.5 Emulsiones

Se prepararon emulsiones a base acuosa para dos tipos de lubricantes Mobilmet S122 y Jatropa Curcas, para homogenizar la mezcla fue utilizado un equipo de agitación magnética, en la tabla 6 se muestran la relación en porcentajes, su estabilidad y si contiene emulsificante; esto con la finalidad de evaluar el desempeño del coeficiente de fricción.

Tabla 6 Mezclas de emulsiones

Lubricantes	Aceite (%)	Agua (%)	Estabilidad (hrs)	Emulsificador
MOBILMET S122	5	95	Estable	SI
Jatropa Curcas	5	95	360 hrs	NO

3.6 Potencial electroquímico

Para obtener el potencial electroquímico de un material es necesario tener un parámetro de referencia; ya que, es desconocido dicho valor del material a estudiar. Para obtener dicho valor se tiene que realizar un arreglo de celda galvánica como se muestra en la figura 24.

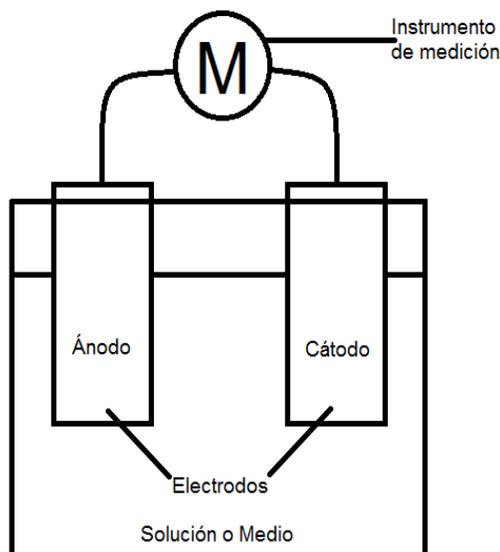


Figura 24 Celda galvánica

El procedimiento consistió en verter en un recipiente ácido sulfúrico (H_2SO_4) y un electrodo de referencia de hidrógeno (H), ya que su potencial electroquímico es cero. El electrodo se conecta como ánodo a una fuente de poder marca MATRIX MPS-3003LK-3 y como cátodo se utiliza una rejilla metálica, estos dos objetos se introducen en el recipiente que contiene la solución; aplicando un voltaje de 12v para que en el electrodo de hidrogeno se genere una pequeña burbuja para obtener los potenciales de los otros materiales. Una vez cargado el electrodo con hidrogeno se procede a realizar la toma de potenciales para cada material (acero SAE 1018, aluminio 6061-T6 e inserto CW-TiN), como se observa en la figura 25; obteniendo los siguientes valores en la tabla 7.

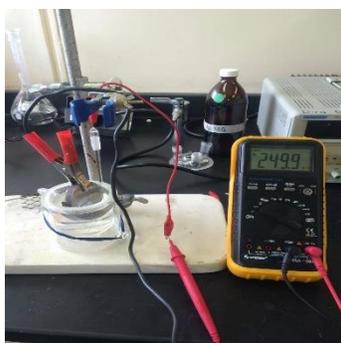


Figura 25 Toma de potencial electroquímico para acero SAE 1018

Tabla 7 Potenciales electroquímicos para cada material

Potencial Electroquímico (mv)	
Acero SAE 1018	249.25
Aluminio 6061-T6	343.45
Inserto CW-TiN	40.75

Posteriormente se toma la lectura de los potenciales electroquímicos en los distintos medios o soluciones para los pares de materiales, ver figura 26; los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8 Potencial electroquímico para cada par de materiales



Figura 26 Toma de potencial electroquímico para el acero SAE 1018/CW-TiN

Potencial Electroquímico (mv)		
Medio Acido (H₂SO₄)	Acero SAE 1018/CW-TiN	202.6
	Aluminio 6061-T6/CW-TiN	307.8
Mobilmet S122	Acero SAE 1018/CW-TiN	81.5
	Aluminio 6061-T6/CW-TiN	380
Jatropha Curcas	Acero SAE 1018/CW-TiN	361.1
	Aluminio 6061-T6/CW-TiN	217

La medición de la conductividad eléctrica fue realizada para los dos tipos de emulsiones con el equipo YSI 3200 en el cual se aplica una diferencia de potencial; obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la tabla 9. Se realizó la medición de estos valores, utilizando como parámetro de referencia agua destilada, ver figura 27.



Figura 27 Medición de conductividad en aceite de Jatropha Curcas

Tabla 9 Conductividad de soluciones

Conductividad (μS) @ 19 °C	
Agua destilada	70
Mobilmet S122	999.9
Jatropha Curca	840.1

3.7 Parámetros de prueba

Una serie de pruebas preliminares fueron realizadas para encontrar los parámetros adecuados de prueba, a fin de adquirir un coeficiente de fricción estable, mismos que se presentan en la tabla 10.

Tabla 10 Condiciones de prueba para la experimentación

Parámetros de prueba		
Presión de contacto (GPa)	Acero SAE 1018	3.07
	Aluminio 6061-T6	1.76
Carga (N)	Acero SAE 1018	5.886
	Aluminio 6061-T6	

Voltaje (v)	Acero SAE 1018	5, 7.5, 10,12
	Aluminio 6061-T6	
Tiempo (s)	Acero SAE 1018	600
	Aluminio 6061-T6	300
Velocidad de deslizamiento ($\frac{m}{s}$)	Acero SAE 1018	0.0574, 0.0785, 0.09915, 0.1189
	Aluminio 6061-T6	
Distancia de deslizamiento (m)	Acero SAE 1018	213.3
	Aluminio 6061-T6	105.72
Temperatura del fluido (°C)	Emulsión MOBILMET S122	19-21
	Emulsión Jatropha Curcas	
Humedad (%)		36

3.8 Procedimiento experimental

Se estableció una metodología experimental siguiendo y utilizando los parámetros de prueba que fueron consolidados en pruebas de arranque previamente realizadas. El procedimiento a seguir queda descrito de la siguiente forma:

1. Limpiar la maquina perno sobre disco, para eliminar cualquier partícula de polvo o cualquier otro residuo contaminante que pueda influir en la interface disco-inserto.
2. Nivelar la superficie de la máquina perno sobre disco, para evitar problemas de vibración, mala aplicación de la carga, movimiento de la máquina que afecte al censado de la fuerza, etc.
3. Colocar el disco en el porta disco y el porta insertos en el porta perno para nivelar el brazo de la máquina, ajustando la altura del espárrago con la rosca. Este paso es indispensable ya que al nivelar de forma correcta se aplica la carga de forma puntual y perpendicular.
4. Aislar eléctricamente el disco y el porta insertos.
5. Seleccionar la velocidad a la que girara el disco con el control de variación de velocidad de la máquina y checar la velocidad de giro con un tacómetro laser.
6. Colocar la carga seleccionada.
7. Colocar la celda de carga en posición para la obtención de datos.
8. Realizar las conexiones correspondientes para cerrar el circuito eléctrico.
9. Conectar de forma adecuada las terminales en la fuente de alimentación y tarjeta de adquisición NI, para adquirir los datos de variación de corriente.
10. Posteriormente se debe ajustar el voltaje para cada prueba.
11. Correr el programa para comenzar la captura de datos al inicio de cada prueba.
12. Una vez terminada la adquisición de datos, se procesan para obtener coeficientes de fricción por medio de sensor de fuerza y el circuito eléctrico. Se realizó un análisis microscópico óptico y SEM, y, por último, se midió la rugosidad con apoyo de la técnica de AFM.

4 Resultados

4.1 Coeficiente de fricción

En la tabla 11, se presentan los resultados de coeficientes de fricción promedio obtenidos por ambos métodos de las pruebas inserto sobre disco. Para las dos condiciones de lubricante mineral (Mobilmet S122) y vegetal (Jatropha Curcas); incluyendo los parámetros de variación de voltaje.

Tabla 11 Resultados de coeficiente de fricción promedio

Voltaje (v)	Condición	Acero SAE 1018		Aluminio 6061-T6	
		Celda de Carga	Corriente	Celda de Carga	Corriente
5	Seca	0.71	0.42	0.88	0.70
	Mobilmet S122	0.27	0.32	0.63	0.58
	Jatropha Curcas	0.23	0.33	0.72	0.56
7.5	Seca	0.69	0.29	0.97	0.82
	Mobilmet S122	0.32	0.30	0.64	0.80
	Jatropha Curcas	0.36	0.23	0.78	0.69
10	Seca	0.78	0.46	1.08	0.90
	Mobilmet S122	0.45	0.27	0.81	0.71
	Jatropha Curcas	0.39	0.27	0.84	0.71
12	Seca	0.79	0.64	1.03	0.81
	Mobilmet S122	0.38	0.33	1.00	0.67
	Jatropha Curcas	0.43	0.34	0.90	0.71

En la gráfica de la figura 28, se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga que se produce en el corte del material en condición seca; para este caso es acero SAE 1018 y un inserto WC-TiN.

Así mismo, en las curvas de la figura 29 se aprecia el comportamiento del coeficiente de fricción obtenido por la variación de corriente; este comportamiento corresponde para los cuatro voltajes utilizados que son 5, 7.5, 10 y 12 volts respectivamente.

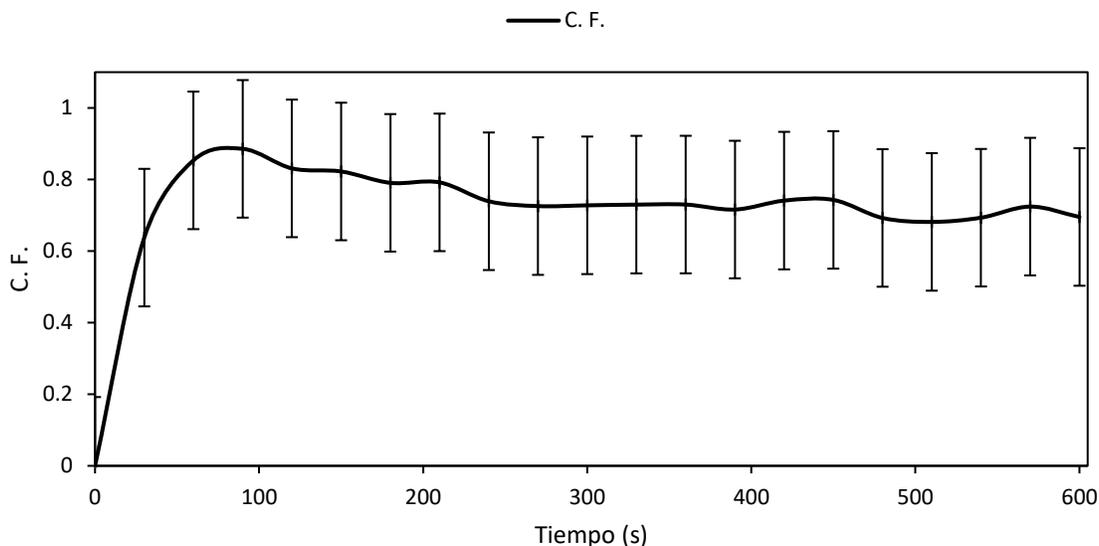


Figura 28 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición seca para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

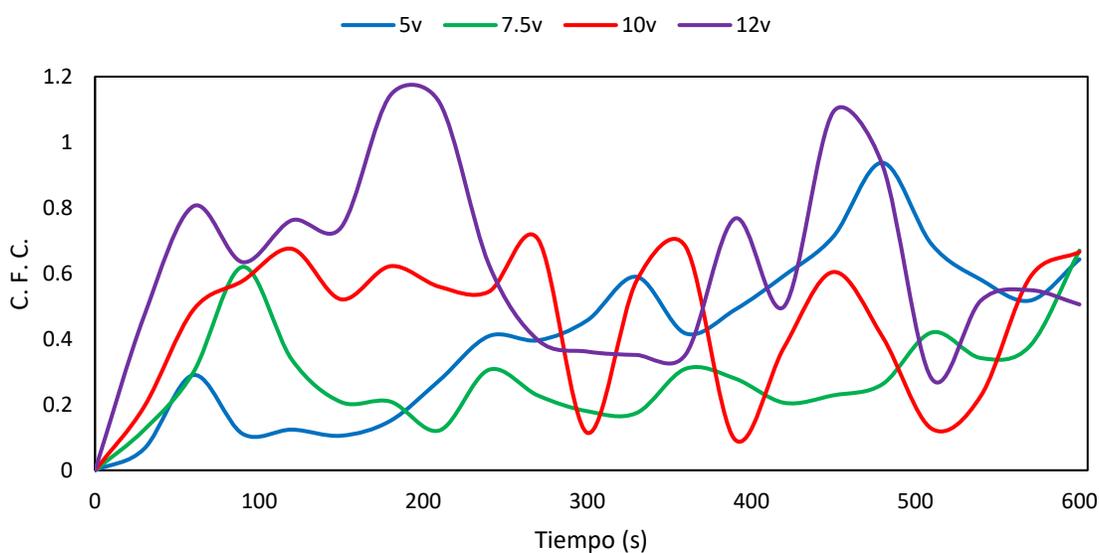


Figura 29 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición seca para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

En condición lubricada utilizando la emulsión de aceite Mobilmet S122, en la gráfica de la figura 30 se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga que se produce en el corte del material (acero SAE 1018 y un inserto WC-TiN). En las curvas de la figura 31 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción obtenido por variación de corriente que corresponde a los voltajes utilizados que son 5, 7.5, 10 y 12 volts respectivamente.

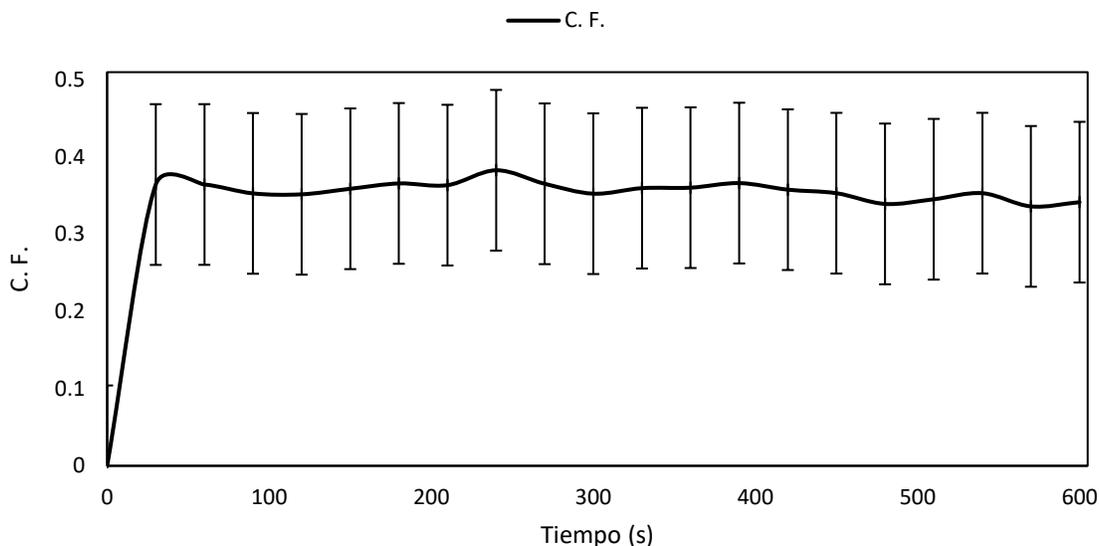


Figura 30 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Mobilmet S122 para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

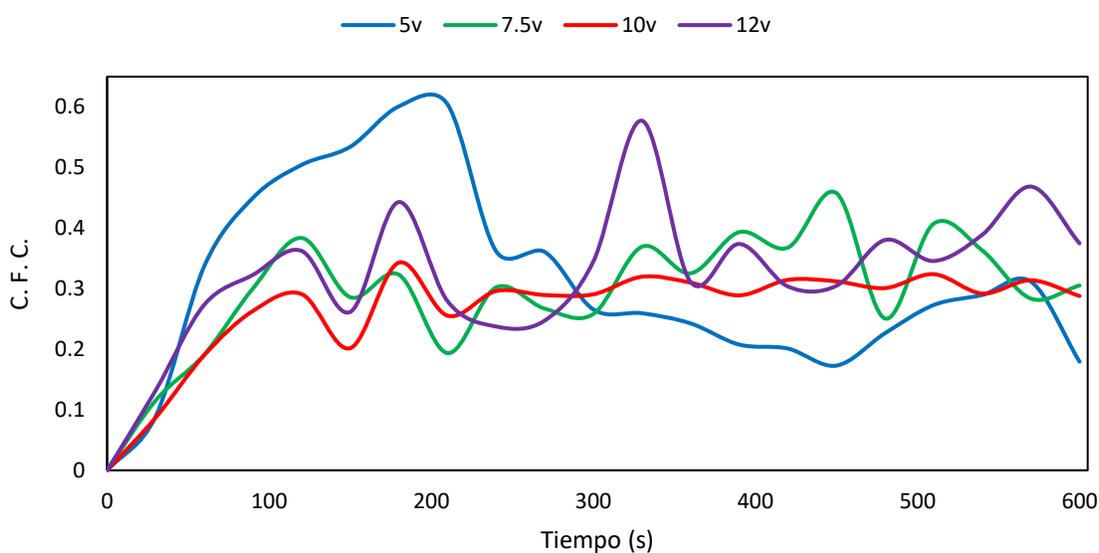


Figura 31 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Mobilmet S122 para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

En condición lubricada utilizando la emulsión de aceite de Jatropha Curcas, las curvas de la figura 32, se observa el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en el corte del material para el acero SAE 1018 y un inserto WC-TiN. En la gráfica de la figura 33 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción adquirido por variación de corriente que corresponde a los voltajes utilizados a 5, 7.5, 10 y 12 volts.

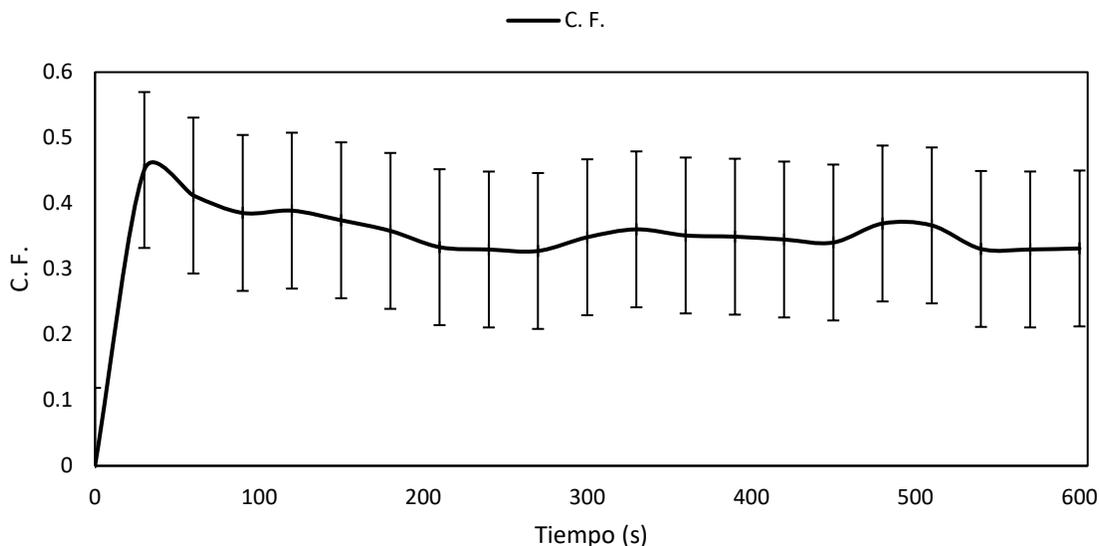


Figura 32 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada *Jatropha Curcas* para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

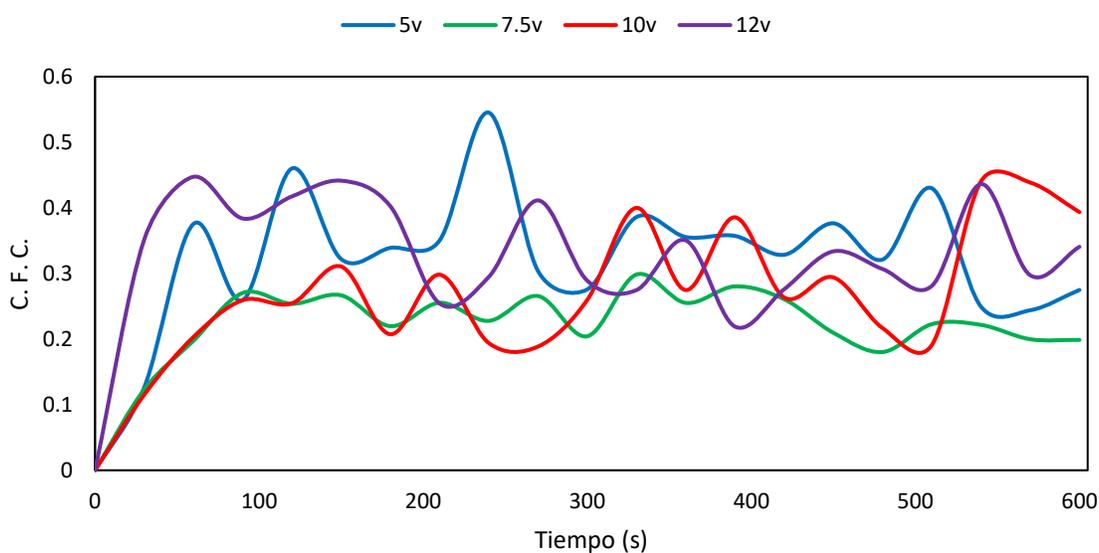


Figura 33 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada *Jatropha Curcas* para acero SAE 1018 v.s. inserto CW-TiN

En la gráfica de la figura 34, se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga que se produce en el corte del material en condición seca; para este caso es aluminio 6061-T6 y un inserto WC-TiN. Así mismo, en las curvas de la figura 35 se aprecia el comportamiento del coeficiente de fricción obtenido por la variación de corriente; este comportamiento corresponde para los cuatro voltajes utilizados que son 5, 7.5, 10 y 12 volts respectivamente.

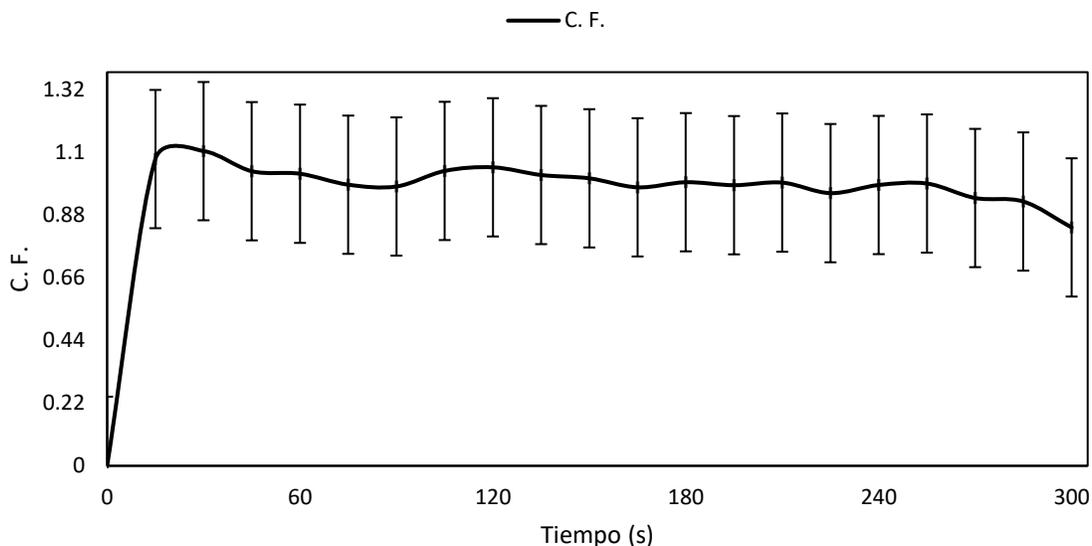


Figura 34 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición seca para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

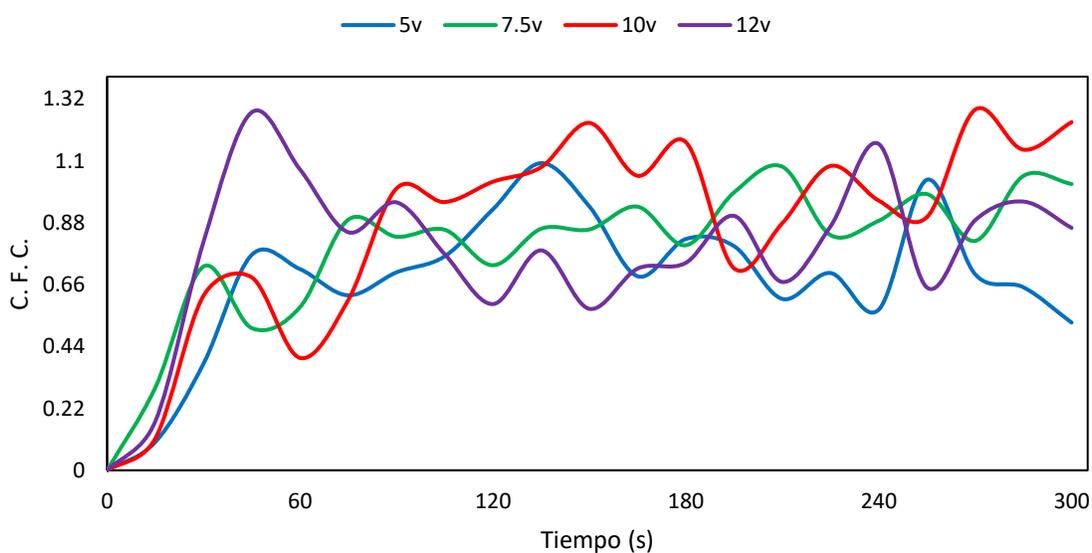


Figura 35 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición seca para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

En condición lubricada utilizando la emulsión de aceite Mobilmet S122, la gráfica de la figura 36, se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga que se produce en el corte del material (aluminio 6061-T6 y un inserto WC-TiN).

En las curvas de la figura 37 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción obtenido por variación de corriente que corresponde a los voltajes utilizados que son 5, 7.5, 10 y 12 volts respectivamente.

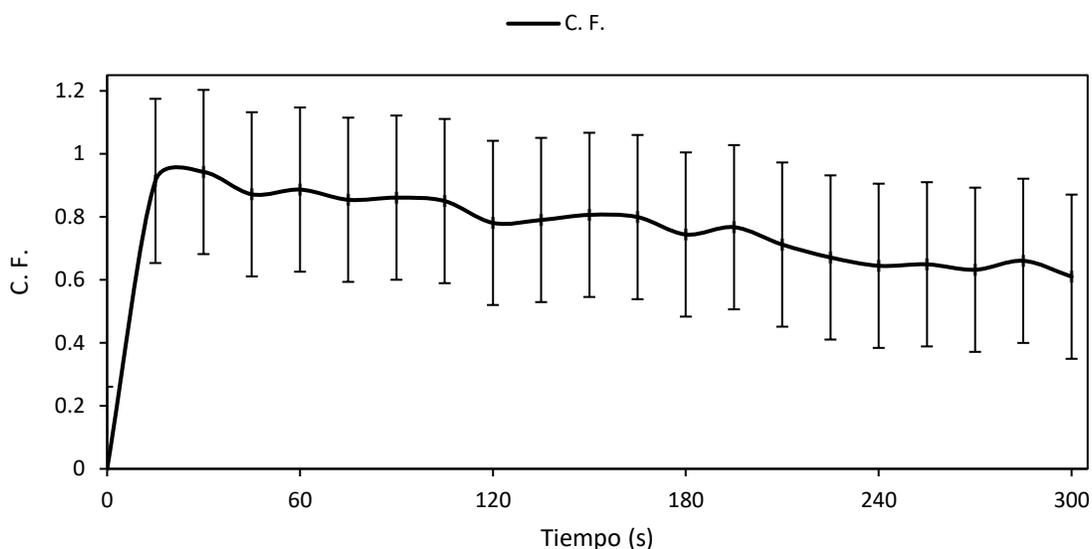


Figura 36 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada Mobilmet S122 para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

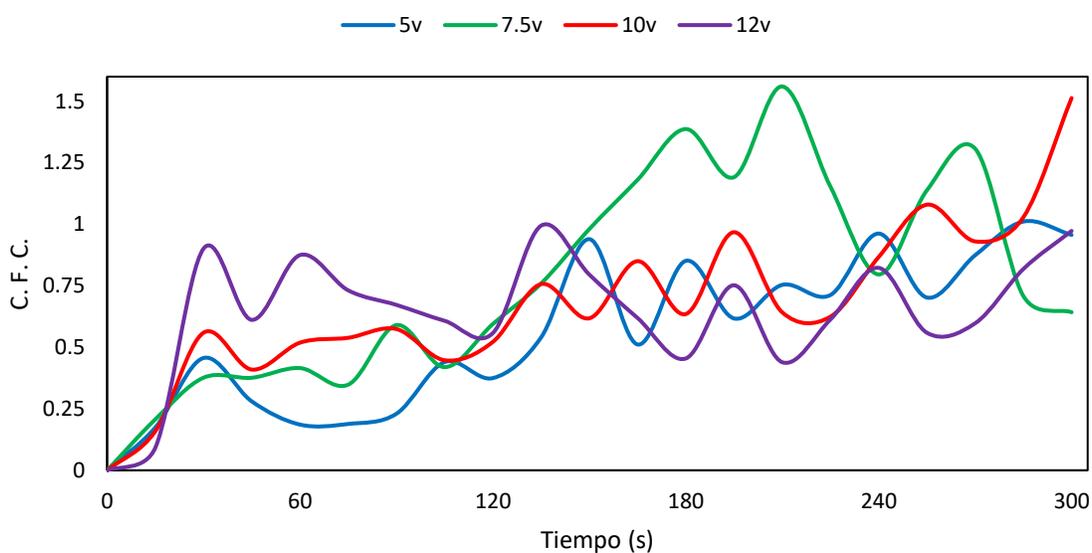


Figura 37 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada Mobilmet S122 para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

En condición lubricada utilizando la emulsión de aceite de Jatropha Curcas, las curvas de la figura 38, se observa el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en el corte del material para el aluminio 6061-T6 y un inserto WC-TiN.

En la gráfica de la figura 39 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción adquirido por variación de corriente que corresponde a los voltajes utilizados a 5, 7.5, 10 y 12 volts.

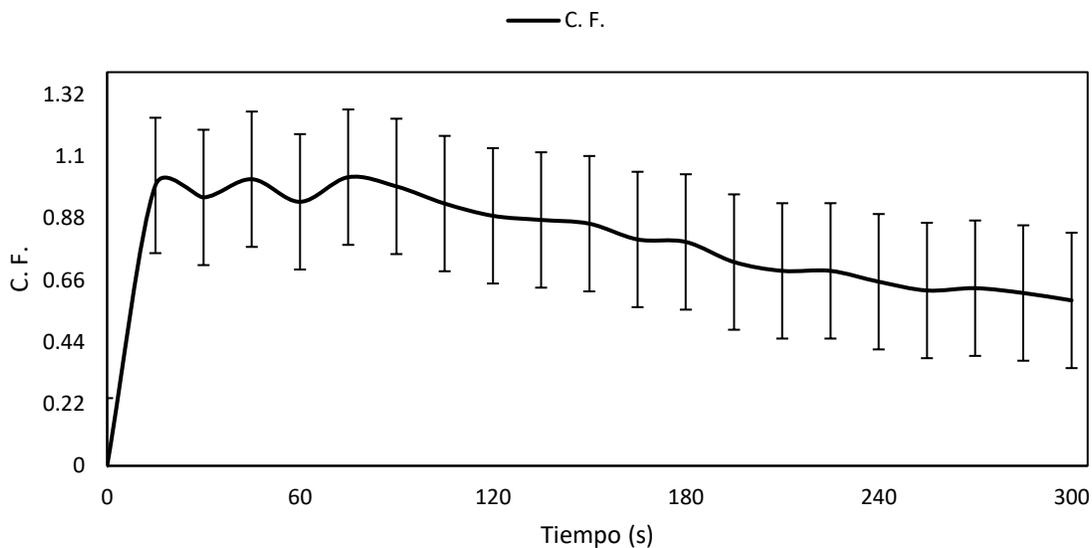


Figura 38 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga en condición lubricada *Jatropha Curcas* para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

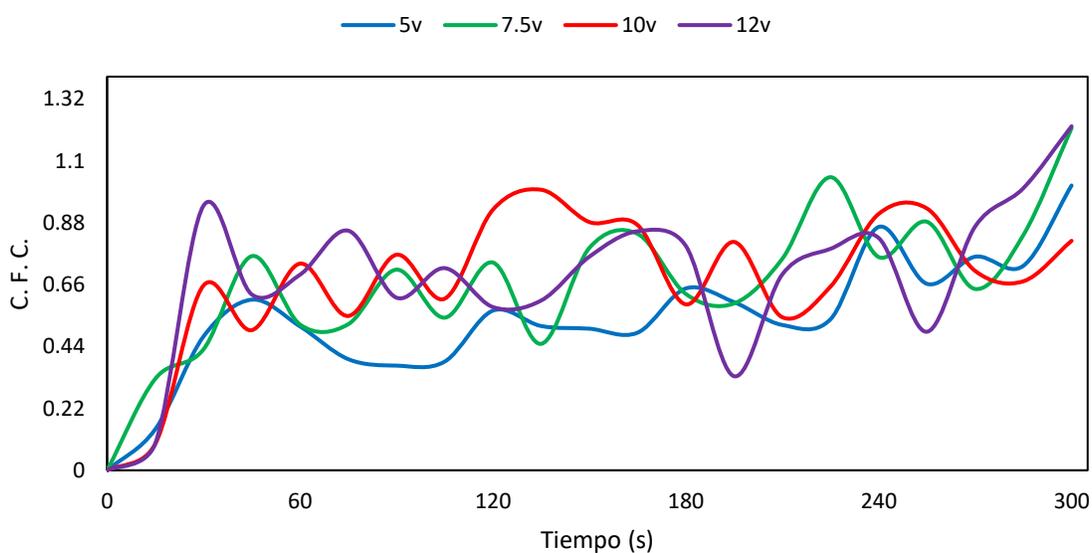


Figura 39 Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción por corriente en condición lubricada *Jatropha Curcas* para aluminio 6061-T6 v.s. inserto CW-TiN

En la gráfica de la figura 40, es posible observar el promedio de los coeficientes de fricción. Se presenta el resultado para cada condición de prueba y voltaje.

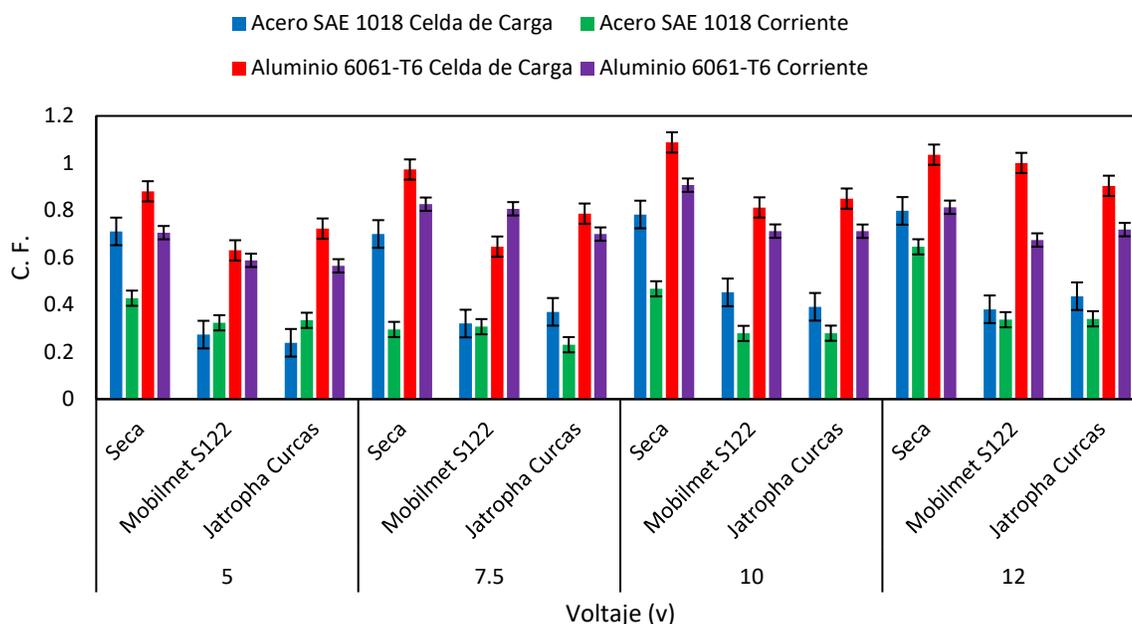


Figura 40 Gráfica comparativa de coeficiente de fricción promedio

4.2 Microscopia óptica y electrónica de barrido (SEM)

Se realizó la toma de imágenes de microscopia óptica con apoyo del equipo AXIOVERT 25 con un aumento de 50x, como se muestra en las figuras 41, 42, 47, 48, 53, 54, 59, 60, 65, 66, 71 y 72; para microscopia electrónica de barrido SEM se utilizó el equipo JEOL JSM-5600 LV, utilizando un aumento de 50x y 110x para los discos, así como 170x y 550x para los insertos, las imágenes se aprecian en las figuras 43 a 46, 49 a 52, 55 a 58, 61 a 64, 67 a 70, 73 a 76. Estas técnicas de microscopia se aplicaron para evaluar los mecanismos de desgaste generados en la zona de prueba del disco como en el inserto.

Para condición seca en el acero SAE 1018 y el aluminio 6061-T6 se obtuvieron imágenes con detalles de los mecanismos de desgaste que ocurrieron en el corte del disco y en la herramienta de corte, esto se aprecia en las imágenes de las figuras 41 a 52.

En condición lubricada con aceite Mobilmet S122 en el acero SAE 1018 y el aluminio 6061-T6 se consiguieron imágenes con complementos de los mecanismos de desgaste que ocurrieron en el corte del disco y en la herramienta de corte, para los diferentes aumentos que se ven en las figuras 53 a 64.

Para el aceite de Jatropha Curcas en el acero SAE 1018 y el aluminio 6061-T6 en las imágenes se aprecian detalles de los mecanismos de desgaste que ocurrieron en el corte del disco y en la herramienta de corte de las figuras 65 a 76.

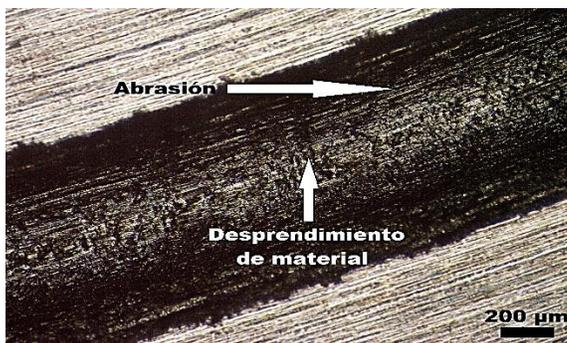


Figura 41 Microscopia óptica acero SAE 1018 a 50x en condición seca



Figura 42 Microscopia óptica aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca

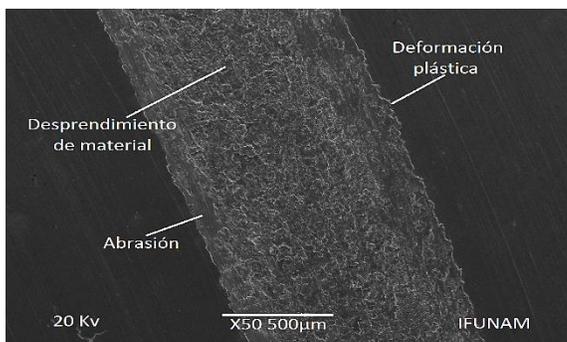


Figura 43 SEM acero SAE 1018 a 50x en condición seca

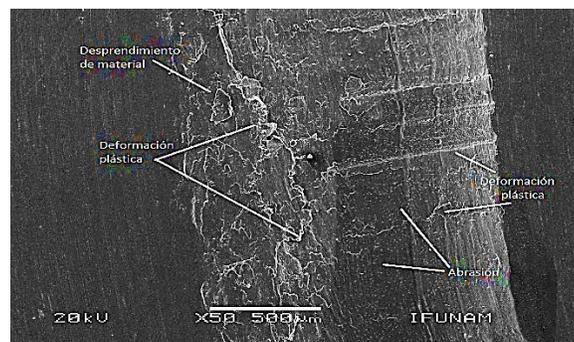


Figura 44 SEM aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca

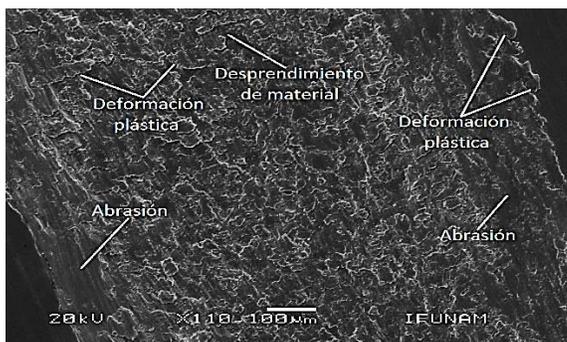


Figura 45 SEM acero SAE 1018 a 110x en condición seca

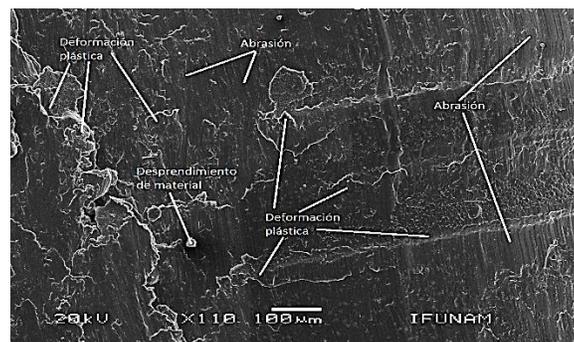


Figura 46 SEM aluminio 6061-T6 a 110x en condición seca



Figura 47 Microscopia óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x en condición seca

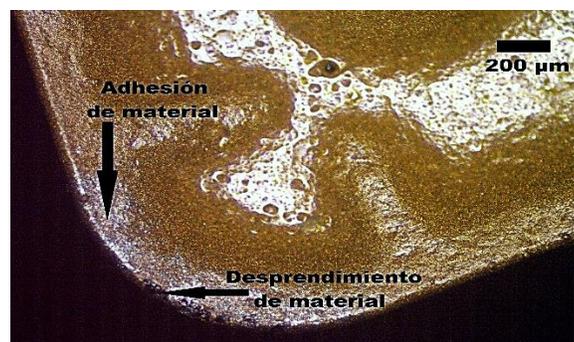


Figura 48 Microscopia óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x en condición seca

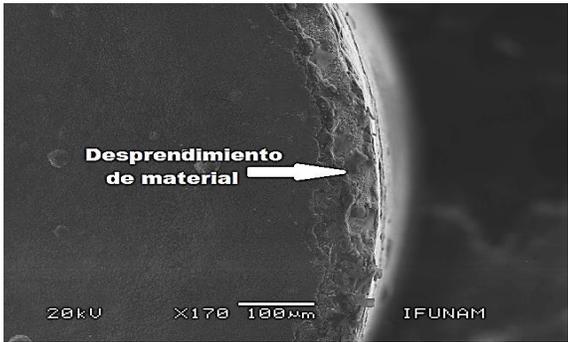


Figura 49 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x en condición seca

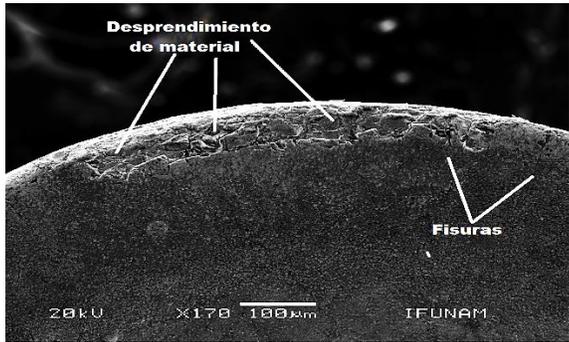


Figura 50 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x en condición seca

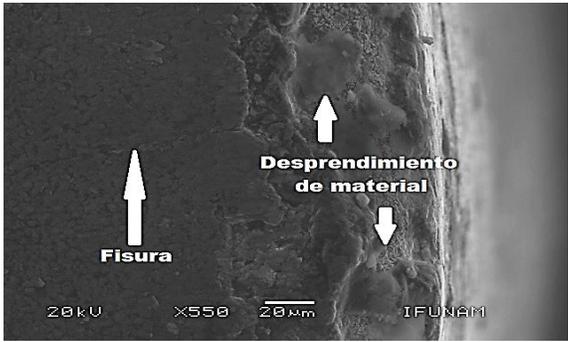


Figura 51 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x en condición seca

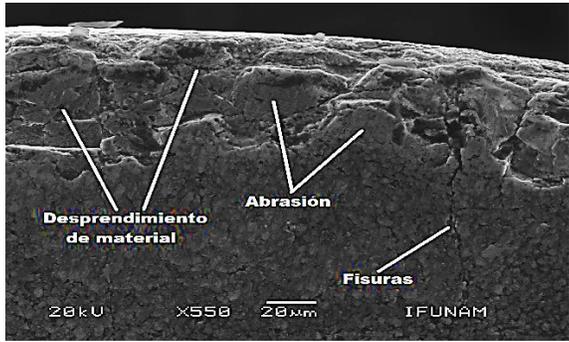


Figura 52 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x en condición seca

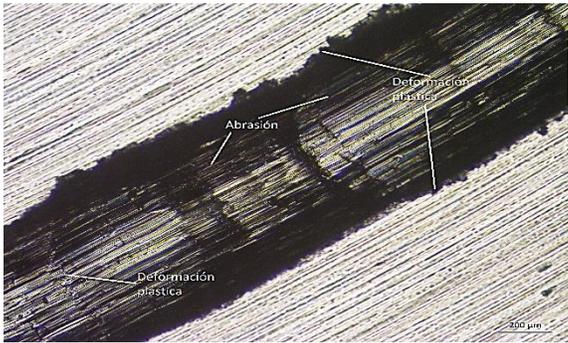


Figura 53 Microscopia óptica acero SAE 1018 a 50x Mobilmet S122

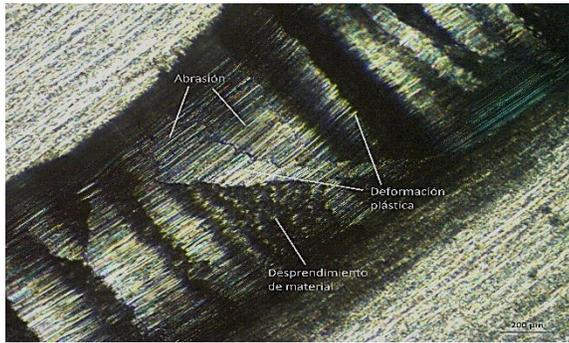


Figura 54 Microscopia óptica aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmet S122

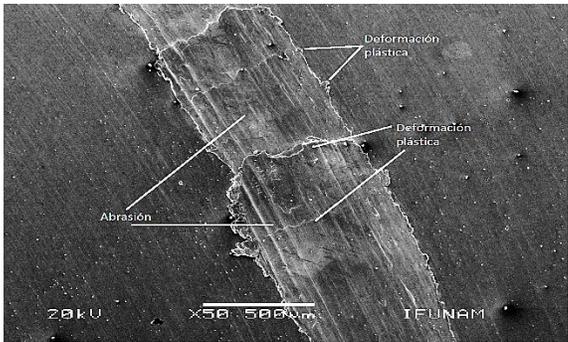


Figura 55 SEM acero SAE 1018 a 50x Mobilmet S122

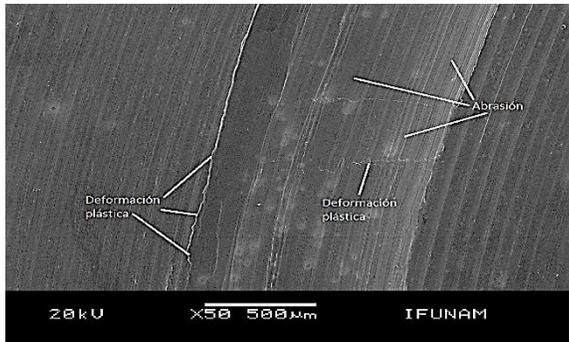


Figura 56 SEM aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmet S122

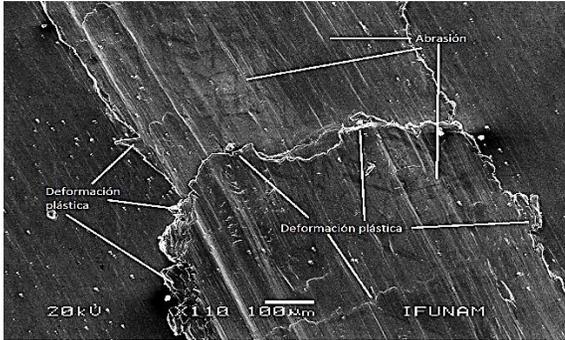


Figura 57 SEM acero SAE 1018 a 110x Mobilmeter S122

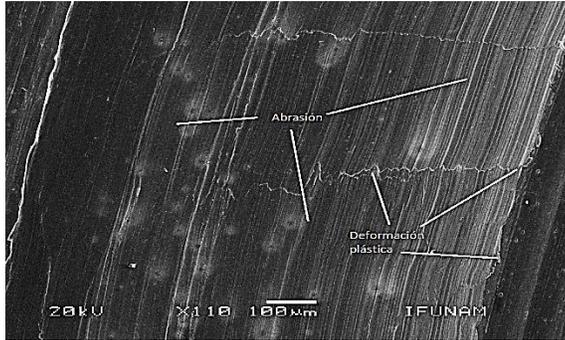


Figura 58 SEM aluminio 6061-T6 a 110x Mobilmeter S122

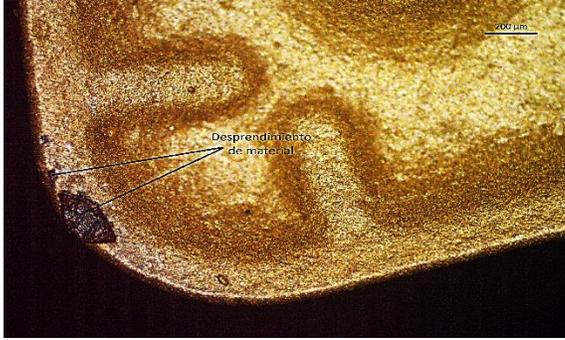


Figura 59 Microscopía óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x Mobilmeter S122

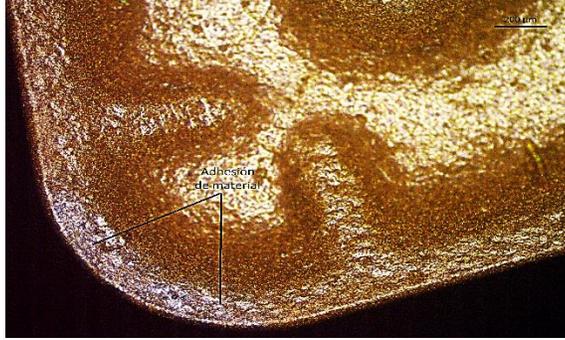


Figura 60 Microscopía óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x Mobilmeter S122

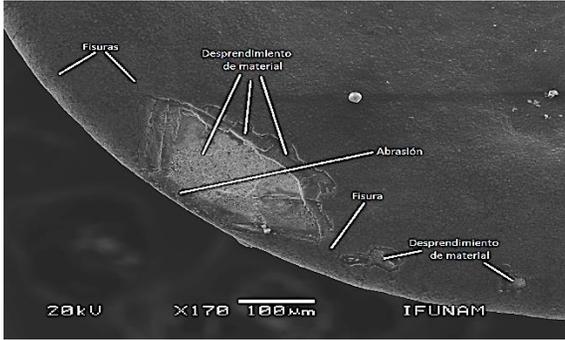


Figura 61 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x Mobilmeter S122

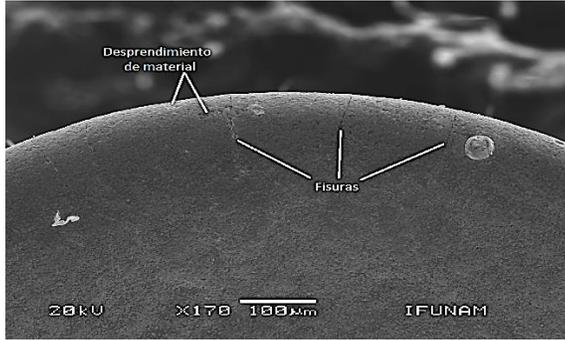


Figura 62 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x Mobilmeter S122

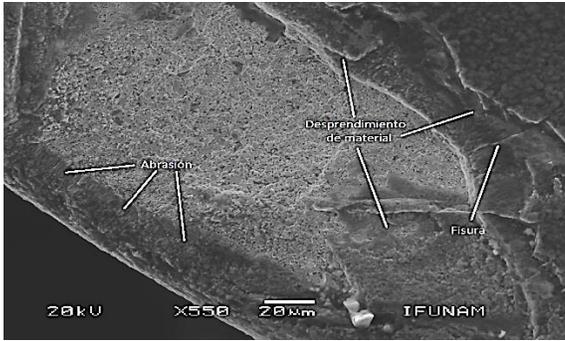


Figura 63 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x Mobilmeter S122

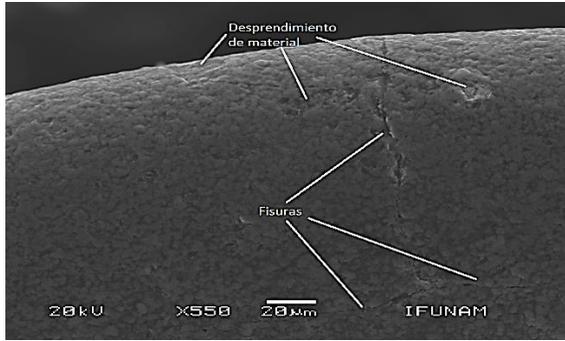


Figura 64 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x Mobilmeter S122

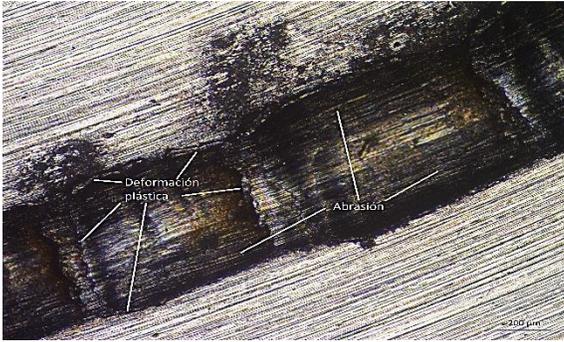


Figura 65 Microscopia óptica acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas

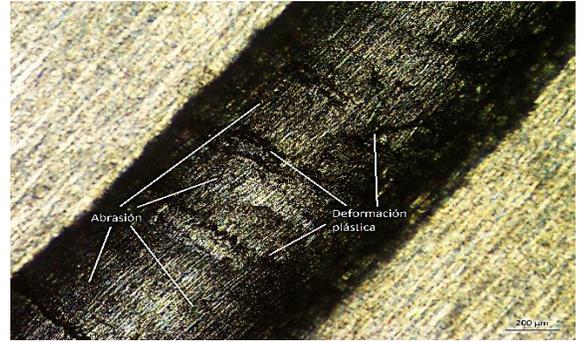


Figura 66 Microscopia óptica aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas

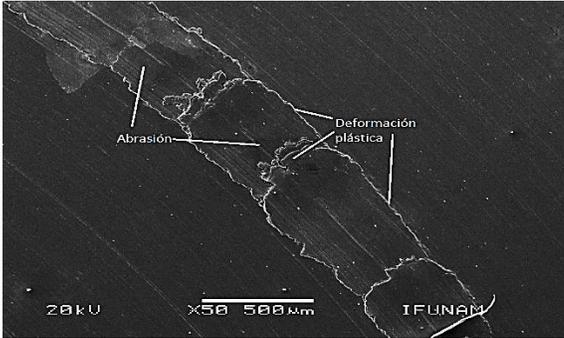


Figura 67 SEM acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas

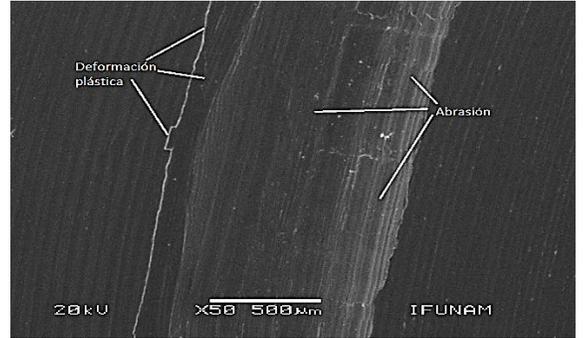


Figura 68 SEM aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas

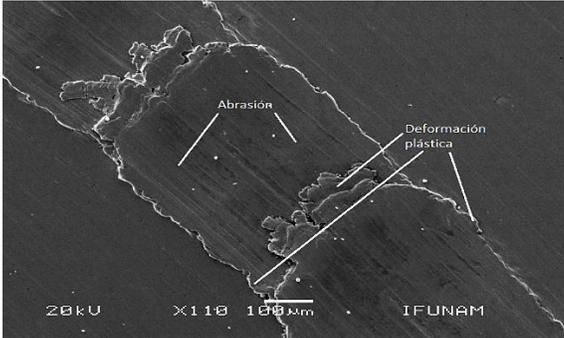


Figura 69 SEM acero SAE 1018 a 110x Jatropha Curcas

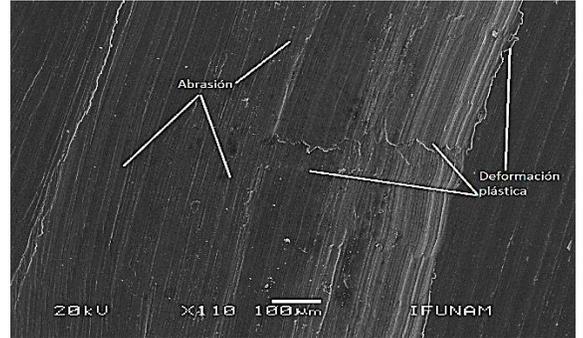


Figura 70 SEM aluminio 6061-T6 a 110x Jatropha Curcas

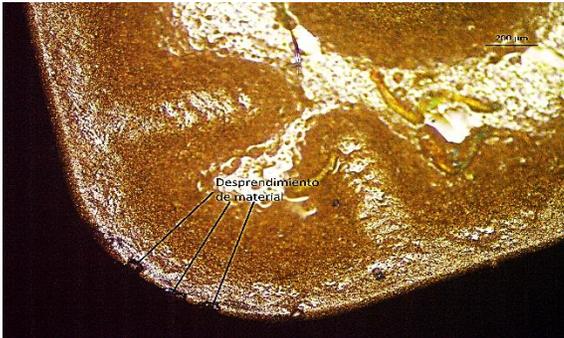


Figura 71 Microscopia óptica inserto v.s. acero SAE 1018 a 50x Jatropha Curcas



Figura 72 Microscopia óptica inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 50x Jatropha Curcas

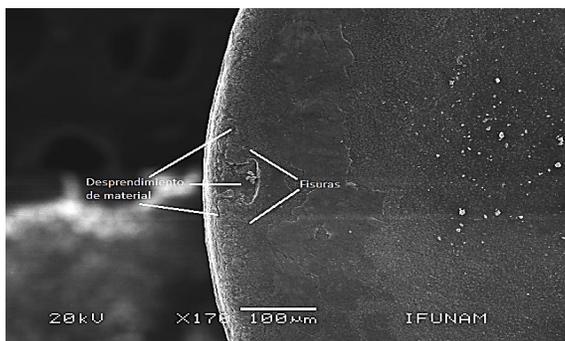


Figura 73 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 170x *Jatropha Curcas*

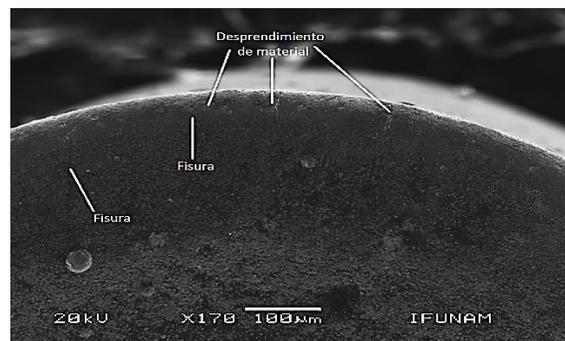


Figura 74 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 170x *Jatropha Curcas*

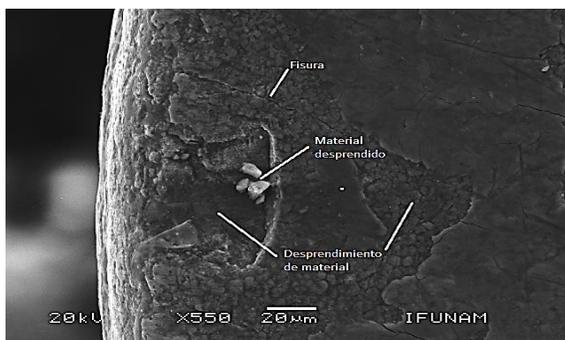


Figura 75 SEM inserto v.s. acero SAE 1018 a 550x *Jatropha Curcas*

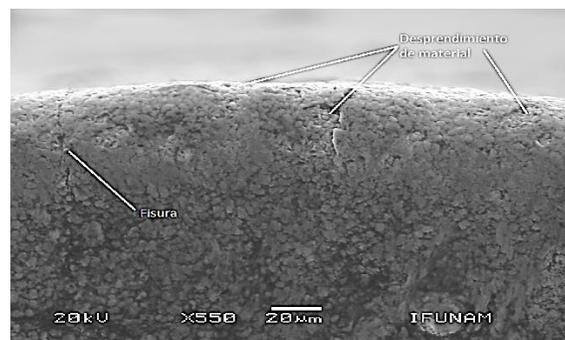


Figura 76 SEM inserto v.s. aluminio 6061-T6 a 550x *Jatropha Curcas*

4.3 Rugosidad AFM

En la tabla 12, se presentan los resultados de rugosidad obtenidos para las pruebas inserto sobre disco. Para las dos condiciones y ambos lubricantes mineral (Mobilmet S122) y vegetal (*Jatropha Curcas*), estos valores de rugosidad fueron tomados con apoyo de la técnica de AFM para comparar las distintas condiciones de trabajo. Así como comparar ambas emulsiones y establecer cual propicia un mejor acabado superficial.

Tabla 12 Resultados de rugosidad por AFM

Material	Rugosidad Ra (nm)		
	Seco	Mobilmet S122	<i>Jatropha Curcas</i>
Acero SAE 1018	242	79.18	83.026
Aluminio 6061-T6	87.004	56.875	73.863

En la gráfica de la figura 77, es posible observar el promedio de la rugosidad en la superficie de corte. Se presenta el resultado para cada condición de prueba y cada material.

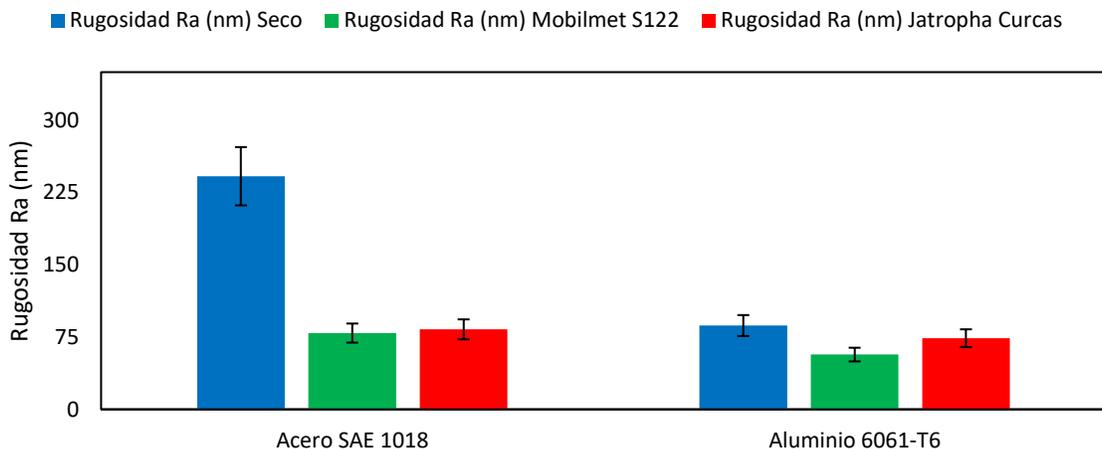


Figura 77 Gráfica comparativa de rugosidad promedio

Se realizaron tomas de imágenes de AFM con apoyo del equipo Bruker Multimode 5, con la finalidad de obtener los datos de rugosidad, topografía y perfilometría después de la prueba para tener una comparación entre condición seca y lubricada, para cada material después de las pruebas, la condición de la superficie para cada material y perfilometría de las huellas se pueden apreciar en las imágenes de las figuras 78 a 95.

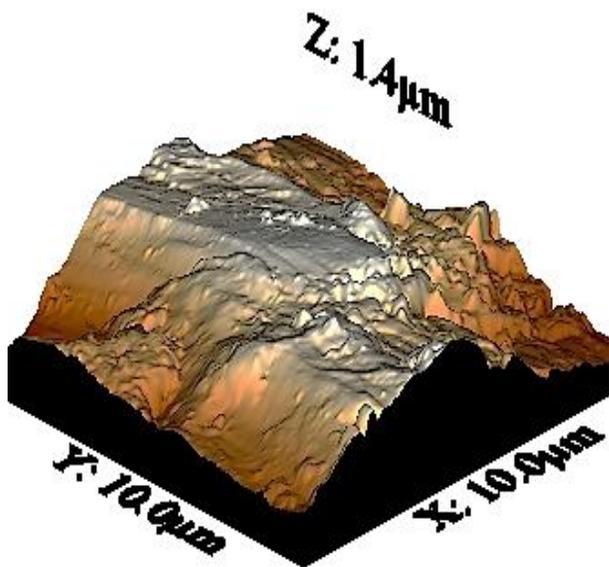


Figura 78 Superficie en 3D de acero SAE 1018 trabajada en condición seca

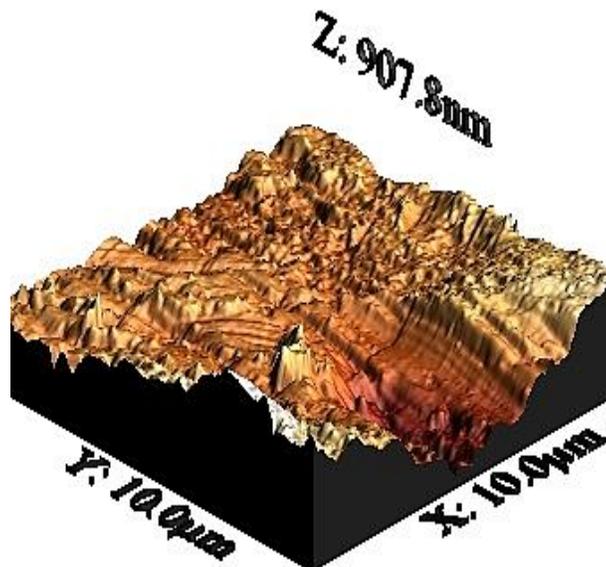


Figura 79 Superficie aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca

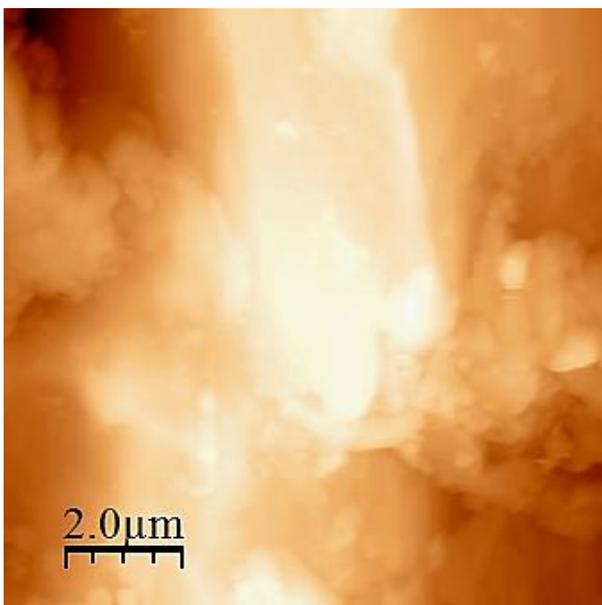


Figura 80 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada en condición seca

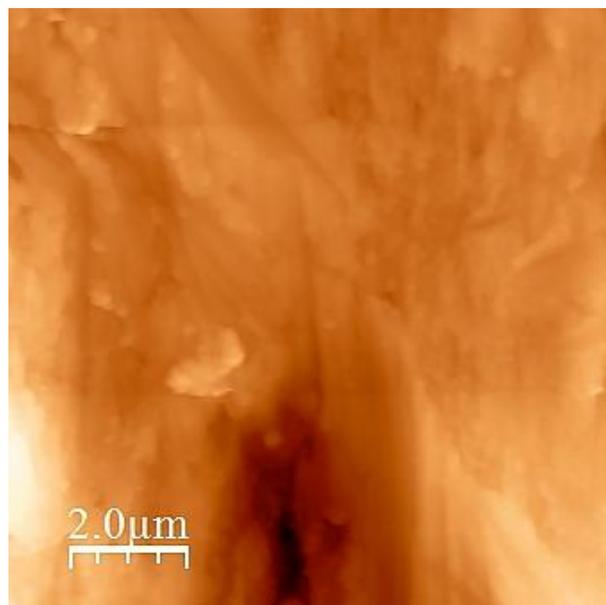


Figura 81 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca

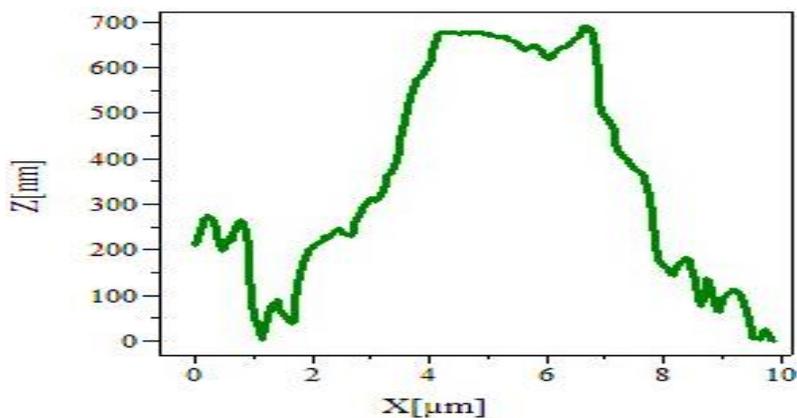


Figura 82 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada en condición seca

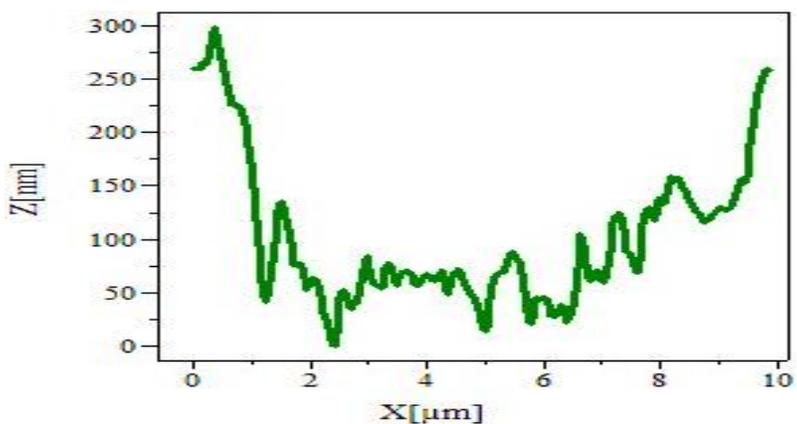


Figura 83 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada en condición seca

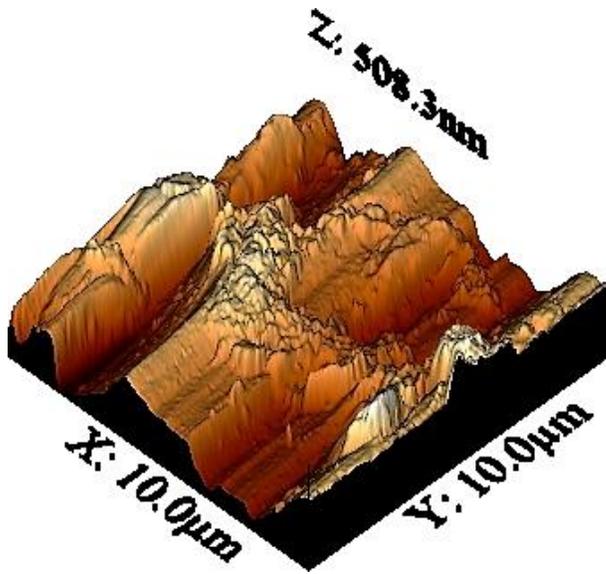


Figura 84 Superficie en 3D de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122

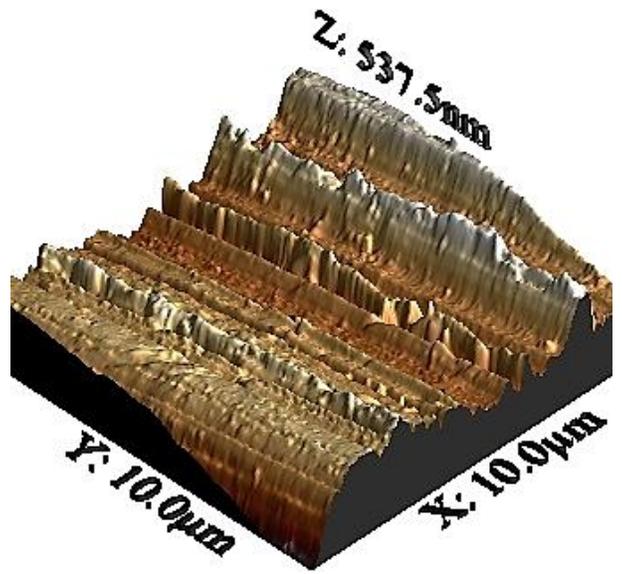


Figura 85 Superficie en 3D de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122

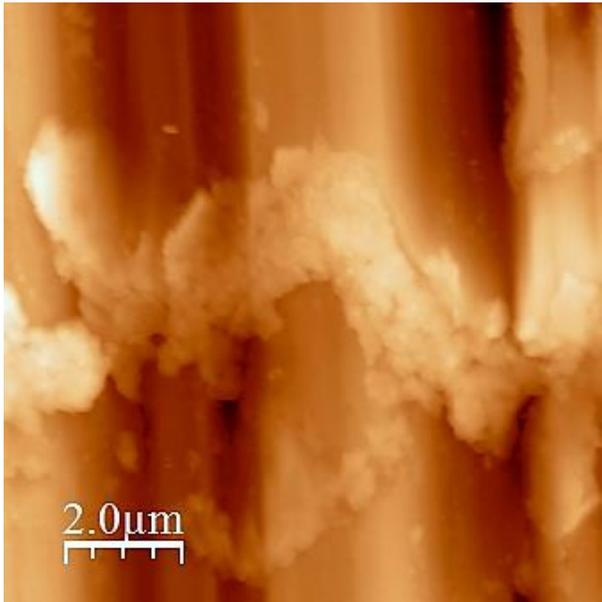


Figura 86 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122

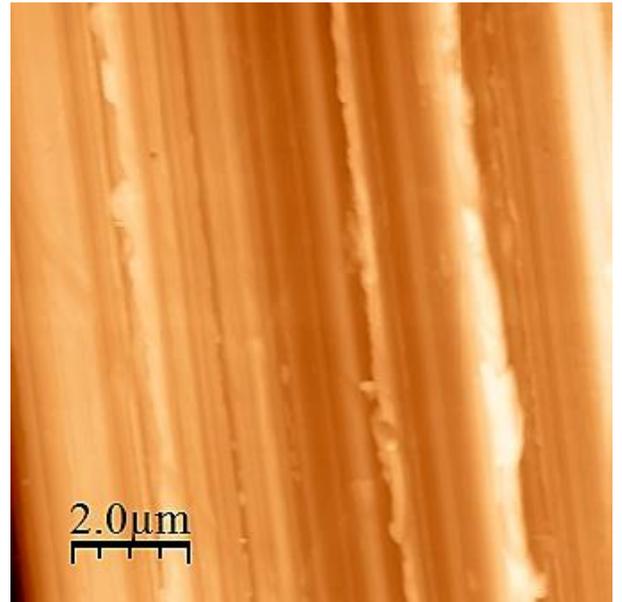


Figura 87 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122

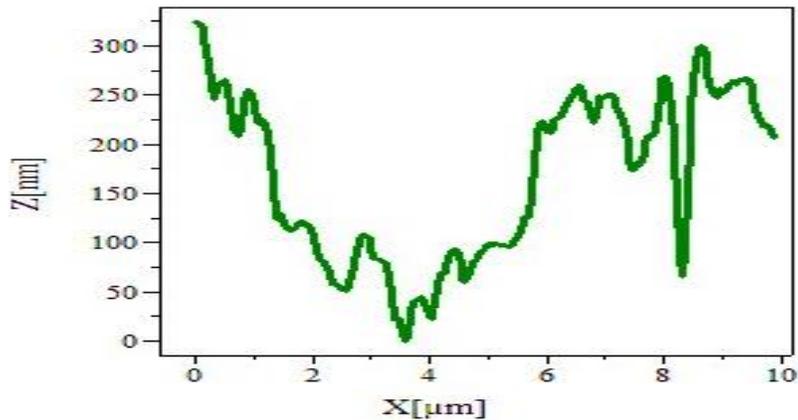


Figura 88 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada con Mobilmet S122

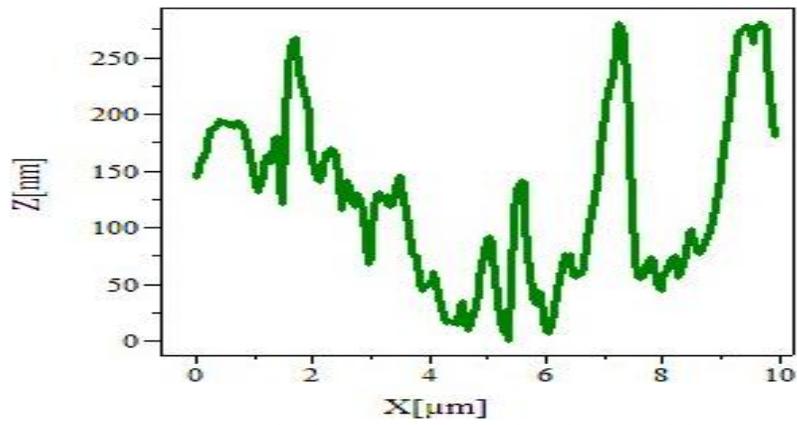


Figura 89 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada con Mobilmet S122

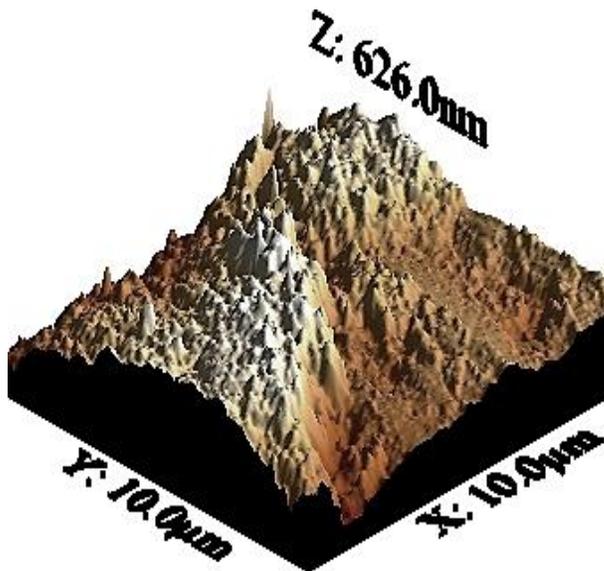


Figura 90 Superficie acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas

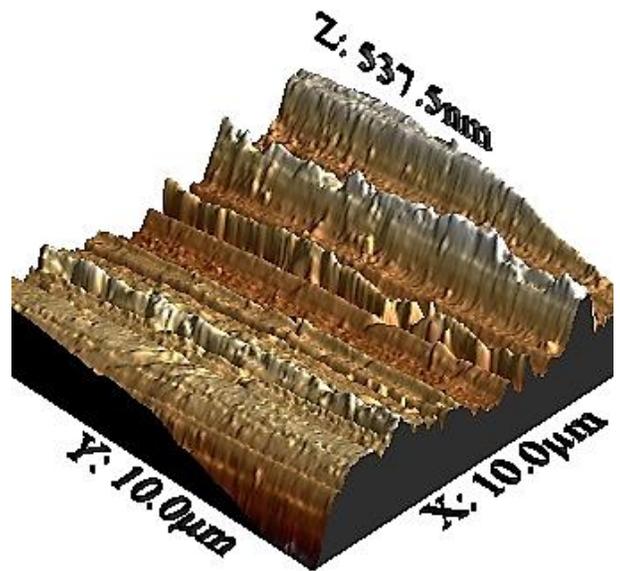


Figura 91 Superficie aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas

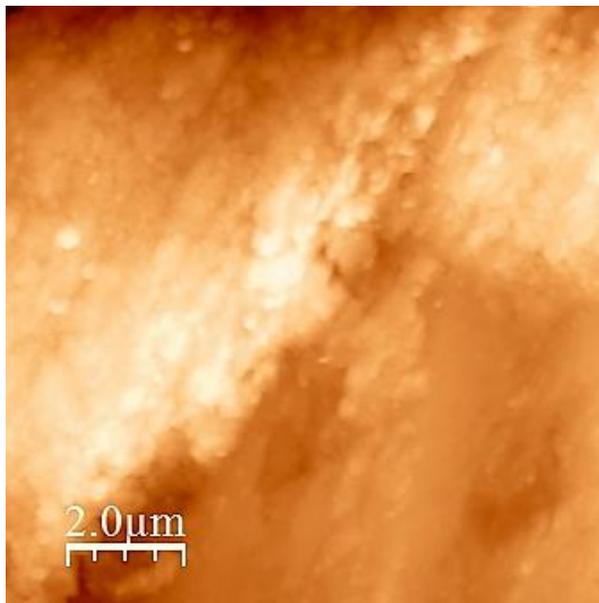


Figura 92 Superficie en 2D de acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas

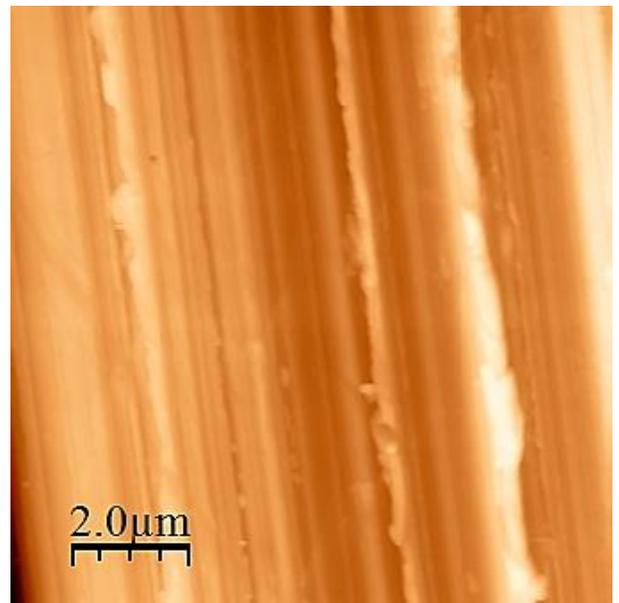


Figura 93 Superficie en 2D de aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas

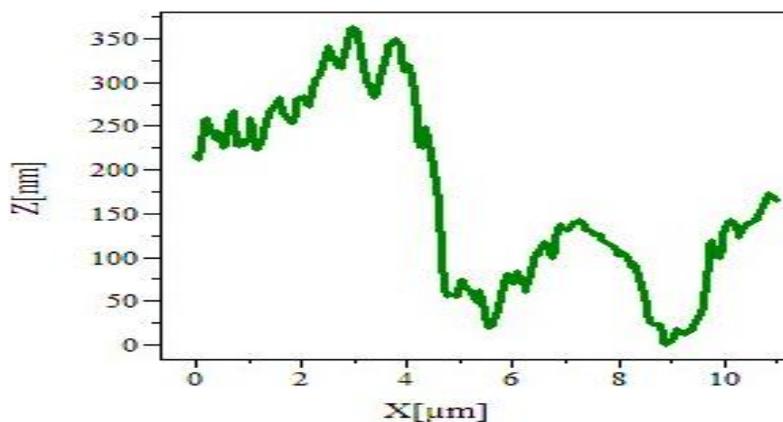


Figura 94 Perfilometría de acero SAE 1018 trabajada con Jatropha Curcas

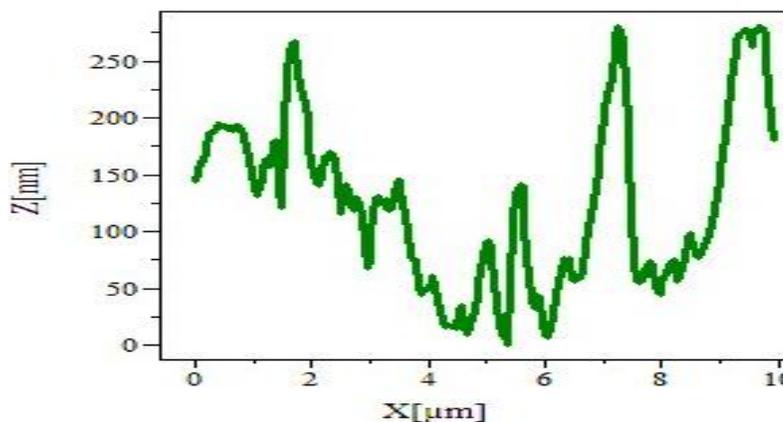


Figura 95 Perfilometría de aluminio 6061-T6 trabajada con Jatropha Curcas

5 *Análisis y discusión de resultados*

Los resultados promedio de fricción obtenidos muestran que el coeficiente de fricción aumenta cuando las pruebas fueron llevadas con material de aluminio comparadas con el acero, ver gráfico de la figura 40. Esto puede deberse a la diferencia de dureza de los diferentes materiales (ver tabla 5), puesto que las condiciones de carga y velocidad son las mismas, ver tabla 10. Es decir, en este caso la herramienta penetra más si la dureza es menor y a las propiedades o características micro estructurales propias de cada material.

Para condición lubricada en la gráfica de la figura 40 utilizando aceite Mobilmet S122 el coeficiente de fricción también es menor para acero que para aluminio. Mientras que en las pruebas llevadas a cabo con Jatropha Curcas, el coeficiente de fricción es menor en dos de las pruebas y en las dos pruebas restantes el coeficiente es muy similar en comparación con el aceite convencional. Sin embargo, esta pequeña variación se puede atribuir a que el aceite de Jatropha Curcas tiene una mejor propiedad de lubricidad.

Los resultados de fricción obtenidos con flujo de corriente muestran un aumento en el coeficiente de fricción cuando las pruebas fueron llevadas a cabo con aluminio compradas con el acero, en condición seca y Mobilmet S122. Al contrario, al comparar las pruebas realizadas con aluminio y Jatropha Curcas, el coeficiente

de fricción aumenta en relación con el acero como se observa en el gráfico de la figura 40. Esto puede deberse al mayor consumo de corriente en la zona de contacto de la herramienta con el aluminio al ser más dúctil que el acero, lo cual aumenta la resistencia en el circuito puesto que es directamente proporcional al voltaje suministrado e inversamente proporcional a la corriente.

En la gráfica de la figura 28 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción por celda de carga, pues muestra una conducta estable al utilizar el método por celda de carga. Sin embargo, en la gráfica de la figura 29 el comportamiento del coeficiente de fricción por variación de corriente es inestable para los cuatro voltajes (5v, 7.5v, 10v y 12v), esto puede deberse a que en el corte existen zonas con deformación plástica del material, acumulación de residuos (viruta) y vibración en el sistema. Por otra parte, al utilizar el voltaje de 10v en el periodo de tiempo de 50s hasta 250s se muestra un comportamiento en el coeficiente de fricción relativamente estable. Lo anterior, se derivó de pruebas que se realizaron en condición seca.

La figura 30 refleja el comportamiento del coeficiente de fricción utilizando la celda de carga en condición lubricada con la emulsión Mobilmet S122, donde se observa que el coeficiente de fricción disminuye considerablemente y se mantiene de manera estable. Por otro lado, en la figura 31 se puede observar que el coeficiente de fricción no presenta demasiadas variaciones, sin embargo, los coeficientes de fricción obtenidos por los voltajes 5v y 12v son más inestables, al contrario de los voltajes a 7.5v y 10v, los cuales presentan una mejor estabilidad a lo largo de toda la prueba.

Ahora bien, para condición lubricada con la emulsión Jatropha Curcas en la gráfica de la figura 32 es posible percibir que el comportamiento del coeficiente de fricción es estable durante toda la prueba, esto puede deberse a que una de las principales propiedades de los biolubricantes es tener una excelente lubricidad, la cual se refleja en un comportamiento más estable para el coeficiente de fricción con los diferentes voltajes aplicados (5v, 7.5v, 10v y 12v), como se muestra en la figura 33. Los voltajes a 7.5v y 10v son los que presentan una mejor tendencia de estabilidad, no obstante, los coeficientes de fricción obtenidos por 5v y 12v muestran una variación superior en gran parte de la curva. Esto puede deberse al acumulamiento de viruta en la zona de corte, a la deformación plástica del material y al aumento de la resistencia al corte.

Del mismo modo, tratándose de las pruebas realizadas con aluminio 6061-T6 contra el inserto WC-TiN, es posible observar que, para condición seca, el coeficiente de fricción es alto debido a que el aluminio 6061-T6 presenta una mayor ductilidad, lo cual produce que el inserto se atasque y exista un incremento en la resistencia al corte por parte del material (ver figura 34); sin embargo, los coeficientes de fricción obtenidos por variación de corriente exhiben cambios que pueden ser generados a causa de la inexistencia de lubricación, como se muestra en la figura 35.

Por otra parte, para condición lubricada con la emulsión Mobilmet S122, el comportamiento del coeficiente de fricción es estable, aunque va decayendo a lo largo de la prueba (véase figura 36). Sin embargo, en la gráfica de la figura 37 el comportamiento del coeficiente de fricción se muestra estable para tres de los cuatro voltajes (5v, 10v y 12v), lo cual puede deberse a que la emulsión de aceite Mobilmet S122, contiene aditivos entre los cuales destacan los dispersantes.

En cambio, al utilizar la emulsión de aceite de Jatropha Curcas el comportamiento del coeficiente de fricción es similar al obtenido con la emulsión Mobilmet S122 (ver figura 38), no obstante, en la gráfica de la figura 39 es posible observar que los coeficientes de fricción son estables en mayor lapso de tiempo de la prueba, gracias a un corte más suave en la interacción disco-inserto.

En condición seca para acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6, se puede apreciar que existe un daño severo en la zona de trabajo como se observa en la figura 41 y 42. En las imágenes de SEM para acero SAE 1018 se observan zonas muy dañadas con desprendimiento de material y deformación plástica (figura 43 y 45), mientras que en las imágenes en aluminio 6061-T6 presenta deformación plástica severa (figura 44 y 46).

De manera similar se visualiza que en el inserto WC-TiN, presenta un daño superficial severo en el flanco de corte cuando se trabajó con acero SAE 1018 y disminuye considerablemente en aluminio 6061-T6 esto se aprecia en las figuras 47 y 48. Sin embargo las imágenes de las figuras 49 y 51 de SEM muestran desprendimiento de material del recubrimiento y el material base en la mayoría de la zona del filo de corte del inserto para las pruebas con acero SAE 1018; y con aluminio 6061-T6 se aprecia desprendimiento de material solamente del recubrimiento y se observan fisuras en el mismo como se muestra en las figuras 50 y 52.

En condición lubricada utilizando la emulsión de Mobilmet S122 para acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6 en las figuras 53 y 54, se puede apreciar que el daño en la zona de trabajo se reduce considerablemente en comparación a la condición seca; caso contrario en las imágenes de SEM se puede observar de manera más clara que para acero SAE 1018 donde se presentan zonas con abrasión y deformación plástica en las figuras 55 y 57, en aluminio 6061-T6 los mecanismos de desgaste son abrasión y deformación plástica como se observa en la figura 56 y 58, visualmente se considera que estos mecanismos son menores en el aluminio.

En el inserto WC-TiN se observa un daño superficial en el recubrimiento del flanco de corte cuando se trabajó con acero SAE 1018 figura 59 y con aluminio 6061-T6 el inserto presenta adhesión de material figura 60. En las imágenes de SEM se muestra desprendimiento de material del recubrimiento, abrasión y fisuras en la zona del filo de corte del inserto para las pruebas con acero SAE 1018 como se observa en las figuras 61 y 63; con aluminio 6061-T6 en las figuras 62 y 64 se aprecia desprendimiento de material, solamente del recubrimiento y fisuras en el mismo.

En la emulsión de *Jatropha Curcas* en acero SAE 1018 y aluminio 6061-T6 para las imágenes ópticas de las figuras 65 y 66, se aprecia que el daño disminuye en comparación con la emulsión de Mobilmet S122; por otro lado, las imágenes de SEM muestran de manera más clara que para acero SAE 1018 existe abrasión y deformación plástica del material, aunque esta es menor en comparación con la emulsión mineral como se observa en las figuras 67 y 69, y en aluminio 6061-T6 los mecanismos de desgaste son abrasión y deformación plástica del material que se observan en las figuras 68 y 70.

Para el inserto WC-TiN se observa un daño superficial en el recubrimiento del flanco de corte cuando se trabajó con acero SAE 1018 (figura 71) y con aluminio 6061-T6 el inserto presenta adhesión de material (figura 72). Las imágenes de SEM presentan desprendimiento de material del recubrimiento y fisuras en la zona del filo de corte del inserto para las pruebas con acero SAE 1018 en las figuras 73 y 75; con aluminio 6061-T6 se observa desprendimiento de material solamente del recubrimiento y fisuras en las figuras 74 y 76.

Los resultados de AFM obtenidos muestran que la rugosidad aumenta en condición seca cuando las pruebas fueron llevadas a cabo con material de acero en comparación con aluminio, ver gráfico de la figura 77. Esto puede deberse a la diferencia de dureza de los diferentes materiales, puesto que las condiciones de carga y velocidad son las mismas. Para condición lubricada utilizando aceite Mobilmet S122 la rugosidad también es menor para aluminio, mientras que en las pruebas llevadas a cabo con *Jatropha Curcas*, se muestra que la rugosidad disminuye para el aluminio, ver figura 77.

Sin embargo, la rugosidad al utilizar Mobilmet S122 para ambos materiales es menor en comparación con el aceite de *Jatropha Curcas* (figura 77), esto se puede deber a que el aceite Mobilmet S122 contiene aditivos y agentes dispersantes que apoyan a desalojar partículas abrasivas de la zona de corte; por lo que el aceite de *Jatropha Curcas* no contiene este tipo de aditivos.

En condición seca se aprecia que los acabados superficiales son muy inferiores en comparación con las condiciones lubricadas, ya que presentan abrasión severa, deformación plástica y desprendimientos de material. Sin embargo en condición lubricada es muy apreciable la diferencia de la calidad superficial al utilizar la emulsión Mobilmet S122 y *Jatropha Curcas*; en ambos materiales se presentan protuberancias en las superficies, la única diferencia es la abrasión para cada una de las emulsiones, siendo muy evidente este fenómeno al usar la emulsión Mobilmet S122; el aceite de *Jatropha Curcas* presenta una menor abrasión debido a que una de las propiedades de los biolubricantes es que tienen muy buena lubricidad, ver figuras 78 y 79, 84 y 85, 90 y 91, respectivamente.

Al comprar ambos lubricantes, en las imágenes de microscopía óptica, SEM y AFM, se observan cambios ligeros en las superficies, aunque el régimen de lubricación es el mismo (lubricación al límite) ya que existe contacto entre las superficies y una delgada capa de película lubricante, esto puede ser debido a que los

biolubricantes tienen una excelente propiedad de lubricidad en comparación con los aceites minerales. Esto queda comprobado con la revisión de literatura en donde varios autores mencionan que es una de las características principales de los biolubricantes [3, 4, 18, 20, 21].

La perfilometría obtenida muestra que en condición seca para acero SAE 1018 presenta una gran variación en la rugosidad, ya que el corte producido genera mayor imperfección en el acabado superficial (véase figura 82). Por otro lado, para aluminio 6061-T6, las imperfecciones son menores y, por lo tanto, el acabado es mejor.

En la gráfica de las figuras 88 y 89, al utilizar Mobilmet S122, las imperfecciones y la rugosidad disminuyen, aunque presentan zonas de abrasión, por ejemplo, en el acero SAE 1018 existe una abrasión con canales más pronunciados y profundos y, por el contrario, en aluminio 6061-T6, la abrasión es más fina, ya que presentan espacios más pequeños entre surcos.

Sin embargo, este fenómeno se aprecia de la misma forma para aluminio 6061-T6 utilizando *Jatropha Curcas* en la gráfica de la figura 94, mientras que en acero SAE 1018, el acabado superficial y la perfilometría son más deplorables, lo anterior, se debe al acumulamiento de material (ver figura 95).

Los resultados de coeficiente de fricción obtenidos por el modelo matemático son aceptables debido a que siempre existe paso de corriente por el sistema, sin embargo, cabe resaltar que el modelo matemático no considera al cien por ciento todas las variables reales de un sistema, al ser demasiado complejo el determinar y controlar el total de estas variables como lo es humedad, temperatura, vibraciones, etc.; en cambio, al utilizar la celda de carga, misma que se emplea como un instrumento de referencia para establecer una comparativa y determinar si los datos por corriente son acertados, a pesar de que el sensor de fuerza de la celda de carga es demasiado sensible. De ahí, que se pueda permitir o no el paso de vibraciones y censar cosas distintas a las requeridas, por lo que la celda de carga es un método establecido por norma para utilizarse en la máquina perno sobre disco.

Conclusiones

La máquina tribológica perno sobre disco es propicia para representar el contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte de un torno; las pruebas no son complicadas, permitiendo desarrollar un análisis de fricción y desgaste, de manera económica y relativamente rápida. Con respecto al modelo matemático propuesto por Y. Meng, H. Jiang, Q. Chang y P. L. Wong fue posible obtener el coeficiente de fricción siendo este un método alternativo para determinar el comportamiento del coeficiente de fricción en materiales metálicos en contacto por deslizamiento en la máquina perno sobre disco. De esa manera, los ensayos demostraron que la instrumentación funciona para determinar la variación de corriente que fluye por el sistema y realizar la obtención de datos para ser procesados.

Con respecto a las pruebas realizadas con aceite de *Jatropha Curcas* se observó que el coeficiente de fricción se estabiliza y se reduce ligeramente en la interfaz de corte para el acero SAE 1018; mientras que en el aluminio 6061-T6 el coeficiente de fricción se incrementó ligeramente. De tal manera que, la emulsión de agua con *Jatropha Curcas* mostró buenos resultados en el corte esto se debe a que el aceite presentó una mejor lubricidad en comparación con la emulsión de Mobilmet S122; esto indica que podría ser una alternativa factible como biolubricante de corte.

Asimismo, la emulsión de aceite de *Jatropha Curcas* presentó abrasión para ambos materiales tanto en acero SAE 1018 como en aluminio 6061-T6 obteniendo valores muy similares en rugosidad, aunque los valores más bajos fueron con la emulsión de aceite Mobilmet S122; lo que indica una mejor lubricidad por parte del aceite vegetal a pesar de no poseer ningún tipo de aditivo.

En definitiva, las pruebas mostraron que el aceite de *Jatropha Curcas* reduce el coeficiente de fricción, mejora los acabados superficiales en la pieza de trabajo y reduce el daño en la herramienta de corte en comparación con el aceite Mobilmet S122. Sin embargo, es necesario evaluar el uso de la emulsión de aceite de *Jatropha Curcas* en otros procesos de remoción de material como son fresado, cepillado y taladrado.

Trabajos futuros

- ∞ Obtener el comportamiento tribológico del aceite de Jatropha Curcas utilizando un emulsificante que mejore la estabilidad de la mezcla.
- ∞ Obtener la temperatura que se genera en la zona de corte en condición seca y lubricada, utilizando diferentes emulsiones de biolubricantes y aceite mineral.
- ∞ Determinar el comportamiento tribológico del aceite Jatropha Curcas con aditivos que mejoren sus propiedades físico-químicas, conjuntamente efectuar la experimentación para otros aceites vegetales.
- ∞ Realizar investigación de desgaste, compatibilidad con polímeros, oxidación, biodegradabilidad, toxicidad y pH, para utilizar el aceite de Jatropha Curcas en máquinas de remoción de material.

Referencias

- [1] A. Cambiella, J. M. Benito, C. Pazos, J. Coca; “Interfacial properties of oil-in-water emulsions designed to be used as metalworking fluids”; *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*; vol. 305; p. 112–119; 2007.
- [2] C. Cheng, D. Phipps, R. M. Alkhattar; “Treatment of spent metalworking fluids”; *Water Research*; vol. 39; p. 4051–4063; 2005.
- [3] Y. M. Shashidhara, S. R. Jayaram; “Vegetable oils as a potential cutting fluid-An evolution”; *Tribology International*; vol. 43; p. 1073–1081; 2010.
- [4] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, Y. Nukman; “Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals-A review”; *International Journal of Machine Tools and Manufacture*; vol. 52; p. 1-12; 2012.
- [5] Visto en http://www.protlcuem.gob.mx/swb/work/models/economia/Resource/968/1/images/investigaciondemercadoBIOLUBRICANTES_CERASVEGETALES.pdf; última visita mayo 2016.
- [6] M. P. Groover; “Fundamentos de manufactura moderna”; 3a Edición; Mc Graw Hill; 2007.
- [7] *Metals Handbook; Machining* ASM International; 9a. Edition; vol. 16; Materials Park; Ohio; 1989.
- [8] M. C. Shaw; “Metal Cutting Principles”; 2nd Edition; Oxford University Press Inc; Oxford, Inglaterra, 2005.
- [9] T. J. Drozda, C. Wick; “Tool and Manufacturing Engineers Handbook”; *Machining. Society of Manufacturing Engineers*; 4th Edition; vol. 1; 1983.
- [10] R. B. Aronson; “Multi Talented Machine Tools”; *Manufacturing Engineering*; p. 65-75; 2005.
- [11] F. Y. Mason, N. B. Freeman; “Turning Centers Come of Age”; *Special Report 773; American Machinist*; p. 97-116; 1985.
- [12] M. E. Merchant; “Mechanics of the Metal Cutting Process II: Plasticity Conditions on Orthogonal Cutting”; *Journal of Applied Physics*; vol. 16; p. 318-324; 1945.
- [13] P. L. Menezes, S. P. Ingole, M. Nosonovsky, M. Kailas, M. R. Lovell; “Tribology for Scientists and Engineers”; Springer; p. 295-389; 2013.
- [14] T. Mang, W. Dresel, J. Wiley & Sons; “Lubricants and lubrication”; Wiley-VCH; 2nd Edition; 2007.
- [15] R. Wasche, M. Woydt; “Encyclopedia of Lubricants and Lubrication: Stribeck Curve”; Springer; p. 1998-2005; 2014.

- [16] B. Bhushan; "Principles and applications of tribology"; J. Wiley & Sons; 2nd Edition; 2013.
- [17] A. Willing; "Lubricants based on renewable resources-an environmentally compatible alternative to mineral oil products"; Chemosphere; vol. 43; p. 89-98; 2001.
- [18] N. J. Fox, B. Tyrer, G. W. Stachowiak; "Boundary lubrication performance of free fatty acids in sunflower oil"; Tribology Letters; vol. 16; p. 275-281; 2004.
- [19] T. E. Fischer, S. Bhattacharya, R. Salher, J. L. Lauer, Y. J. Ahn; "Lubrication by a smectic liquid crystal"; Tribology Transactions; vol. 31; p. 442-448; 1988.
- [20] R. L. Goyan, R. E. Melley, P. A. Wissner, W. C. Ong; "Biodegradable lubricants"; Lubricating Engineering; vol. 54; p. 10-17; 1998.
- [21] M. P. Schneider; "Plant-oil-based lubricants and hydraulic fluids"; Journal Science of Food and Agriculture; vol. 86; p. 1769-1780; 2006.
- [22] K. R. Sathwik Chatra, N. H. Jayadas, Satish V. Kailas; "Natural oil-based lubricants"; Green Tribology; Green Energy and Technology; p. 287-328; 2012.
- [23] Visto en https://es.wikipedia.org/wiki/Jatropha_curcas#/media/File:J_curcas_seed_ies.jpg; última visita mayo 2016.
- [24] Visto en <http://sipse.com/novedades/quintana-roo-esta-interesado-en-producir-biodiesel-165838.html>; última visita mayo 2016.
- [25] L. I. Farfán Cabrera; "Comportamiento tribológico del aceite de Jatropha aplicado en mezclas como lubricante ATF (Automatic Transmission Fluid) y lubricante para motor de combustión interna"; IPN; p. 1-6; 2014.
- [26] S. Z. Erhan, B. K. Sharma, J. M. Perez; "Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants"; Industrial Crops and Products; vol. 24; p. 292-299; 2006.
- [27] J. M. Herrera; "El piñón mexicano: Una alternativa bioenergética para México"; Revista Digital Universitaria; vol. 8; 2007.
- [28] E. Kuram, B. Ozcelik, E. Demirbas, E. Sik; "Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force"; Proceedings of the WCE 2010; London, UK; vol. 2; 2010.
- [29] M. A. Xavier, M. Adithan; "Determining the influence of cutting fluid son tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel"; Journal of Material Processing Technology; vol. 209; p. 900-909; 2009.

- [30] P. VamsiKrishna, R. R. Srikant, D. Nageswara Rao; "Experimental investigation on the performance of nano boric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel"; International Journal of Machine Tools and Manufacture; vol. 50; p. 911-916; 2010.
- [31] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, N. R. Dhar; "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid"; Journal of Materials Processing Technology; vol. 209; p. 5573-5583; 2009.
- [32] R. F. Avila, A. M. Abrao; "The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel"; Journal of Materials Processing Technology; vol. 119; p. 21-26; 2001.
- [33] Y. Meng, H. Jiang, Q. Chang, P. L. Wong; "Modeling of the voltage-controlled friction effect"; Science in China; vol. 45; p. 1219-1224; 2002.
- [34] J. Bockris, A. K. N. Reddy, M. Gamboa-Aldeco; "Modern Electrochemistry"; Plenum Press; New York; vol. 2; 2002.
- [35] R. García Inzunza; "Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales"; UABC; p. 25-26; 2014.
- [36] S. Anderberg, S. Kara; "Impact of energy efficiency on computer numerically controlled machining"; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture; vol. 224; p. 531-541; 2009.
- [37] Z. M. Bi, L. Wang; "Optimization of Machining Processes from the Perspective of Energy Consumption: A Case Study"; Journal of Manufacturing Systems, vol. 31; p. 420-428; 2012.
- [38] Energy Agency NRW; Energy in companies; 2011; <http://www.eanrw.de/unternehmen/>.
- [39] C. Hermann, L. Bergmann, S. Thiede, A. Zein; "Energy labels for production machine: an approach to facilitate energy efficiency in production systems"; In Proceedings of the 40th CIRP international seminar on manufacturing systems; 2007.
- [40] S. Kara, W. Li; "Unit process energy consumption models for material removal processes"; Manufacturing Technology; vol. 60; p. 37-40; 2011.
- [41] P. L. B. Oxley; "Development and Application of a Predictive Machining Theory"; Machining Science and Technology; vol. 2; p. 165-189; 1998.
- [42] E. J. A. Armarego; "Appraisal of Empirical Modelling and Proprietary Software Databases for Performance Prediction of Machining Operations"; Machining Science and Technology; vol. 141; p. 479-510; 2000.

- [43] F. Draganescu, M. Gheorghe, C. V. Doicin; "Models of Machine Tool Efficiency and Specific Consumed Energy"; *Journal of Materials Processing Technology*; vol. 141; p. 9-15; 2003.
- [44] T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez; "Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes"; *Proceedings of 13th CIRP International Conference on LCE*; Leuven; 2006.
- [45] S. Debnath, M. M. Reddy, Q. Sok Yi; "Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review"; *Journal of Cleaner Production*; vol. 83; p. 33-47; 2014.
- [46] G. T. Smith; "Cutting Tool Technology"; *Industrial Handbook*; Springer; London; UK; p. 381-430; 2008.
- [47] J. J. Eppert, K. L. Gunter, J. W. Sutherland; "Development Of Cutting Fluid Classification Systems Using Cluster Analysis"; *Tribology Transport*; vol. 44; p. 375-382; 2001.
- [48] J. A. Schey; "Introduction to Manufacturing Processes"; Third Edition; McGraw Hill; Singapore, 2000.
- [49] L. De Chiffre; "Investigations of cutting fluid performance using different machining operations"; *Lubrication*; p. 8-20; 2002.
- [50] F. C. Andres, "Experimental comparison of vegetable and petroleum base oils in Metal working fluids using the tapping torque test"; In: *Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation*; Denver; 2004.
- [51] A. Salette Martins; "Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact"; *Journal of Material Processing Technology*; vol. 179; p. 9-185; 2006.
- [52] M. Sokovic, K. Mijanovic; "Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes"; *Journal of Materials Processing Technology*; vol. 109; p. 181-189; 2001.
- [53] N. J. Fox, G. W. Stachowiak; "Vegetable oli-based lubricants-A review of oxidation"; *Tribology International*; vol. 40; p. 1035-1046; 2007.
- [54] E. Brinksmeier, D. Meyer, A. G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann; "Metalworking fluids- Mechanisms and performance"; *CIRP Annals-Manufacturing Technology*; p. 24; 2015.
- [55] J. P. Byers; "Metalworking Fluids"; CRC Taylor and Francis; Boca Raton; FL; 2006.
- [56] K. H. Tiedemann, G. Zoellner, M. Adam, D. Becker, W. Boveleth, E. Eck, C. Eckert, H. G. Englitz, J. Geier, P. Koch, H. Lessmann, J. Müller, R. Nöring, M. Rucker, A. Rothe, A. Schmidt, T. Schumacher, W. Uter, I. Warfolomeow, C. Wirtz; "Empfehlungen für die Epikutantestung bei Verdacht auf Kontaktallergie durch Kühlschmierstoffe"; *Derm Beruf*; vol. 2; p. 50:180-189; 2002.

- [57] C. Ortiz, P. S. Guimet, H. A. Videla; "Relationship between Biofilms and Corrosion of Steel by Microbial Contaminants of Cutting-oil Emulsions", *International Biodeterioration*; vol. 26; p. 315-326; 1990.
- [58] E. A. Trafny, R. Lewandowski, K. Kozłowska, I. Z. Marciniak, M. Stepinska; "Microbial Contamination and Biofilms on Machines of Metal Industry Using Metalworking Fluids with or without Biocides"; *International Biodeterioration & Biodegradation*; vol. 99; p. 31-38; 2015.
- [59] B. Glasse, C. Assenhaimer, R. Guardani, U. Fritsching; "Turbidimetry for the Stability Evaluation of Emulsions Used in Machining Industry"; *The Canadian Journal of Chemical Engineering*; vol. 92; p. 324-329; 2014.
- [60] J. Jhon, M. Bhattacharya, P. C. Raynor, "Emulsions containing vegetable oils for cutting fluid application"; *Colloids and Surfaces A*; vol. 237; p. 141-150; 2004.
- [61] L. S. Foulds; "Cutting Fluids", *Handbook of Occupational Dermatology*; p. 691-700; 2000.
- [62] ISO 6743-7:1986.
- [63] F. Klocke, A. Kuchle; "Cutting Fluids"; *Manufacturing Processes 1*; Springer; RWTH edition; 2011.
- [64] ASTM D2272.
- [65] ASTM D1401.
- [66] ASTM D2619.
- [67] Visto en <http://boehlerit-drehen.epaperplus.at/#/58>; última visita junio 2016.