

COMPARACIÓN DE LUBRICANTES EN EL COMPORTAMIENTO
TRIBOLÓGICO DEL PAR BRONCE-ACERO A DIFERENTES PRESIONES Y
VELOCIDADES USANDO UN TRIBOMETRO DE DESLIZAMIENTO
BLOQUE-ANILLO

Juan Carlos Chamorro Piarpuzán

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali
2014

COMPARACIÓN DE LUBRICANTES EN EL COMPORTAMIENTO
TRIBOLÓGICO DEL PAR BRONCE-ACERO A DIFERENTES PRESIONES Y
VELOCIDADES USANDO UN TRIBOMETRO DE DESLIZAMIENTO
BLOQUE-ANILLO

Juan Carlos Chamorro Piarpuzán

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

John Jairo Coronado Marín, Ph.D.

Codirector

Sara Aida Rodríguez, Ph.D.

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali

2014

Nota de Aceptación:

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar el título de Ingeniero Mecánico.

JOHN JAIRO CORONADO M
Director del Proyecto

SARA AIDA RODRIGUEZ P
Co-Director del Proyecto

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, 2014.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme vida y salud que me permitieron terminar una etapa muy importante de mi vida.

A mis padres por su esfuerzo, apoyo y su confianza en la realización de mis sueños. Soy afortunado por contar siempre con su amor, comprensión y ejemplo.

A mis hermanos por su acompañamiento y amistad.

A Dayra Noguera por su comprensión, paciencia y el ánimo recibido durante toda esta etapa de formación.

Agradezco de manera especial y sincera a mis profesores Sara Rodríguez y John Jairo Coronado, por la confianza depositada y por permitirme hacer parte de su grupo de trabajo, por orientarme y aconsejarme no solamente para el desarrollo de esta tesis, sino también para mi vida profesional. De verdad que estaré eternamente agradecido con Ustedes.

A mis amigos que me apoyaron, me aconsejaron y me permitieron entrar en su vida durante estos años de convivir dentro y fuera del salón de clase. Uriel Noguera, Carlos Luna, Gregory Zetty, Javier Iván Caicedo, Octavio Andes Castaño, Diego Fernando Ararat, Muchas gracias.

A los integrantes del GIFS, por sus comentarios constructivos y correctivos.

A Don Ernesto por su colaboración en la fabricación de las probetas para los ensayos en el tribómetro de deslizamiento.

A los miembros del Jurado de esta tesis por sus valorables sugerencias a la versión original del manuscrito, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

A todas las personas que de una u otra manera aportaron para el desarrollo y culminación de este proyecto.

A todos ellos, muchas gracias...

Contenido

1	Introducción.....	10
2	Objetivos	12
3	Marco teórico y antecedentes	13
3.1	Tribología.....	13
3.1.1	Factores que intervienen en el proceso tribológico	13
3.2	Desgaste.....	15
3.2.1	Tipos de desgaste	16
3.2.2	Desgaste por Deslizamiento	17
3.2.3	Ensayo tribológico	17
3.3	Lubricación	19
3.3.1	Lubricantes comúnmente usados en ingenios azucareros.....	22
3.3.2	Lubricante de alto rendimiento grado alimenticio (L3).....	24
4	Materiales y métodos	31
4.1	Tribómetro de desgaste por deslizamiento	31
4.1.1	Variador de frecuencia	34
4.1.2	Sistema de adquisición de datos.....	37
4.1.3	Celda de carga.....	38
4.1.4	Calibración de la celda de carga	39
4.2	Construcción de probetas para ensayos de deslizamiento y calibración ..	41
4.2.1	Construcción de anillos de Acero AISI 1045 y Acero AISI 4140	42
4.2.2	Construcción de bloques de Bronce SAE 67 y Acero AISI O1.....	42
4.2.3	Calibración tribómetro	43
4.3	Calculo del coeficiente de fricción.....	43

4.4	Diseño de experimento	45
4.5	Caracterización del material	48
4.5.1	Composición química	48
4.5.2	Dureza.....	49
4.5.3	Análisis metalográfico de probetas.....	49
4.5.4	Rugosidad	49
4.5.5	Pérdida de masa	50
4.5.6	Análisis de la superficie de desgaste	50
5	Resultados	51
5.1	Resultados de calibración.....	51
5.2	Caracterización de material	52
5.2.1	Dureza.....	52
5.2.2	Análisis metalográfico de probetas.....	53
5.2.3	Rugosidad	55
5.2.4	Pérdida de masa	56
5.2.5	Coeficiente de fricción	60
5.3	Análisis estadístico	66
5.3.1	Coeficiente de fricción	66
5.3.2	Pérdida de masa	72
5.3.3	Análisis de potencia consumida	78
5.4	Análisis de la superficie de desgaste	84
6	Conclusiones.....	94
7	Recomendaciones.....	96
8	Referencias	97

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación lubricantes [3].....	22
Tabla 2 Propiedades de los lubricantes en estudio [14] [12] [13].....	25
Tabla 3. Parámetros variador de frecuencia.	36
Tabla 4 Aspectos importantes en el diseño de experimento.....	46
Tabla 5. Tratamientos en el diseño de experimentos.	46
Tabla 6. Selección del número de réplicas.	47
Tabla 7. Composición química acero AISI 1045	48
Tabla 8. Composición química de bronce SAE 67	48
Tabla 9. Parámetros de operación rugosímetro.....	50
Tabla 10. Dureza Acero AISI 1045.	52
Tabla 11. Dureza Bronce SAE 67.	53
Tabla 12. Rugosidad de los materiales antes de las pruebas.....	55
Tabla 13. Rugosidad de los materiales después de las pruebas.	55
Tabla 14. Análisis de varianza.	66
Tabla 15. Pruebas formales para los supuestos del modelo.	68
Tabla 16. Análisis de varianza de la pérdida de masa anillo.	73
Tabla 17. Pruebas formales para los supuestos del modelo.	75
Tabla 18. Análisis de varianza de la pérdida de masa bloque.	75
Tabla 19. Pruebas formales para los supuestos del modelo.	77
Tabla 20 Parámetros del guijo y chumacera usados en los cálculos de potencia .	78
Tabla 21 Fracción de potencia consumida por cada maza	78
Tabla 22 Potencia consumida.....	78
Tabla 23 Fuerza y velocidad del guijo.....	79
Tabla 24. Potencia causada por fricción.	80
Tabla 25 Potencia ahorrada entre los tipos de lubricantes.	81

Tabla 26 Potencia ahorrada en las chumaceras de las masas de los 6 molinos típicos de un Ingenio.....	82
Tabla 27 Porcentaje de energía ahorrada y costos	83
Tabla 28 Composición química EDS Acero 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3	93

Lista de Figuras

Figura 1. Variación de μ con V [4].....	14
Figura 2 Configuración bloque-anillo	18
Figura 3 Regímenes de lubricación en función de la fricción f y del parámetro adimensional $\eta v/F$ [4].....	20
Figura 4. Tribómetro de desgaste por deslizamiento.	32
Figura 5. Sistema de aplicación de la carga [19].	32
Figura 6. Porta-bloques y porta-anillos.	33
Figura 7. Componentes tribómetro de desgaste por deslizamiento.	34
Figura 8. Conexión Torno – variador de frecuencia. [27].	36
Figura 9 Conexión sistema de adquisición de datos – celda de carga. Adaptado de [27].	38
Figura 10 Celda de carga.	39
Figura 11. Montaje Calibración celda de carga, (a) conexión sistema de adquisición de datos, (b) montaje pesos.....	40
Figura 12. Peso vs microdeformación.....	40
Figura 13. Dimensiones bloque y anillo [2].	41
Figura 14. Diagrama de cuerpo libre en el punto de contacto y el porta-bloques [2].	44
Figura 15. Datos calibración tribómetro.	52
Figura 16. Microestructura a 400X del Acero 1045.	54
Figura 17 Microestructura a 100X del bronce SAE 67	54
Figura 18. Interacción entre desgaste anillo, carga y lubricante; a) velocidad 0,13m/s b) velocidad 0,25m/s.	57

Figura 19. Interacción desgaste anillo, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa	58
Figura 20. Interacción desgaste bloque, carga y lubricante. a) 0,13 m/s b) 0,25 m/s	59
Figura 21. Interacción desgaste bloque, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa.	60
Figura 22. Comparación del coeficiente de fricción según el nivel de carga.....	60
Figura 23. Comparación del coeficiente de fricción según el nivel de velocidad. ..	61
Figura 24. Comparación del coeficiente de fricción según el tipo de lubricante.....	62
Figura 25 diagrama de Stribeck.....	63
Figura 26. Interacción coeficiente de fricción, carga y lubricante. a) 0,13m/s b) 0,25m/s	63
Figura 27. Interacción coeficiente de fricción, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa	64
Figura 28. Efecto de la carga y la velocidad en el coeficiente de fricción y la pérdida de masa	65
Figura 29, Gráficos para los supuestos del modelo.	67
Figura 30. Gráficos para los supuestos del modelo (Masa perdida del anillo).	74
Figura 31. Gráficos para los supuestos del modelo (Masa perdida del bloque)	77
Figura 32. 5X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2	85
Figura 33 SEM 50 X AISI Acero 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2.....	86
Figura 34 SEM 200X AISI Acero 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2.....	86
Figura 35. 5X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2	87
Figura 36 SEM 50 X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2	88
Figura 37 SEM 200X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2	88
Figura 38. 5X Acero 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3	89
Figura 39 SEM 50X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3.....	90
Figura 40 SEM 200X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3.....	90
Figura 41 5X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3	91
Figura 42 SEM 50X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3	92

Figura 43 SEM 200X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3	92
Figura 44 EDS Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3	93

Resumen

En este estudio se compararon tres tipos de lubricantes sintéticos (L1, L2) actualmente usados en la lubricación del par guijo-chumacera de los molinos de caña de azúcar, y un lubricante de alto rendimiento grado alimenticio (L3), diseñado para la misma aplicación. Se analizó el comportamiento tribológico del par bronce SAE 67–acero AISI 1045, materiales comúnmente usados en el montaje guijo-chumacera y se realizaron pruebas experimentales en el tribómetro de deslizamiento con configuración bloque-anillo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle de acuerdo con la norma ASTM G 77. Se usaron presiones de 8 y 4 MPa y velocidades de 0,13 y 0,25m/s. Se midió el coeficiente de fricción y pérdida de masa para cada condición. Los resultados muestran que el tribómetro está en condiciones óptimas para ser operado, debido a que en las pruebas realizadas de calibración se obtuvo valores dentro del rango establecido por la norma ASTM D2714. Con respecto al desgaste de los materiales evaluados el anillo de acero AISI 1045 presentó menor desgaste con el lubricante L3 para los dos niveles de carga y velocidad, en el caso del bloque de bronce SAE 67 presentó menor desgaste con el lubricante L1. Los menores coeficientes de fricción se presentaron para las siguientes condiciones velocidad 0,25 m/s, carga 4 MPa, se presentó un menor coeficiente de fricción con el lubricante L3, por su parte para una condición velocidad 0,13 m/s, carga 8 MPa, se presentó un menor coeficiente de fricción con el lubricante L1

Las superficies desgastadas de los anillos y bloques se analizaron con ayuda del estereoscopio y microscopía electrónica de barrido para comparar la degradación superficial en las condiciones ensayadas. Se encontró evidencia de surcos típicos de abrasión y marcas de desgaste adhesivo y por deformación.

1 Introducción

El sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, gracias al clima privilegiado de la región, se puede sembrar y cosechar caña durante todos los meses del año. Esta condición agroclimática, ha llevado a que la región se especialice en el cultivo y ostente el liderazgo en productividad a nivel mundial [1].

Actualmente el proceso de molienda de la caña de azúcar se realiza usando un tren de molienda que está constituido por varios molinos, los cuales extraen jugo uno tras otro hasta que la caña preparada se reduce a bagazo. Con ayuda de cilindros oleo neumáticos que aplican una fuerza sobre el eje que se apoyan sobre cojinetes de bronce más conocidos como chumaceras, los ejes tienen la posibilidad de flotar para ajustarse al cambio de molienda y evitar que se fracturen debido a una variación brusca de carga. La velocidad de rotación del eje normalmente está entre los 4 y 7 RPM y funcionan durante las 24 horas al día en los ingenios colombianos [2].

El aumento continuo en el precio del petróleo así como la necesidad de disminuir el consumo energético ha fomentado el desarrollo de los lubricantes sintéticos nuevos de alto desempeño que brinden mayores beneficios que los obtenidos actualmente.

Una forma directa de disminuir el consumo de energía es reducir el coeficiente de fricción entre los elementos en contacto. El coeficiente de fricción es uno de los parámetros más importantes que estudia la tribología porque permite evaluar las pérdidas de energía que se generan, tomar las acciones correctivas orientadas a mejorar la eficiencia y lubricación del sistema y aumentar la vida útil de los componentes del par tribológico, tema de gran preocupación para los ingenios en torno a las necesidades operativas y a las dificultades técnicas a las que deben enfrentarse obligando a la industria a evaluar todos sus procesos productivos, esto con el fin de encontrar un alto

grado de eficiencia y economía en la operación de los molinos. Por esta razón, este trabajo fue encaminado a caracterizar tribológicamente diferentes tipos de lubricantes a diferentes presiones y velocidades, en materiales típicamente usados en el par eje-chumacera. Para este fin se usó un banco de ensayos experimentales bajo la norma ASTM G77, obteniendo resultados comparativos del coeficiente de fricción y del desgaste.

2 Objetivos

General

- Comparar el desempeño de los lubricantes sintéticos L1, L2 y de alto rendimiento grado alimenticio L3 en el par tribológico bronce-acero, usando un tribómetro de deslizamiento bloque-anillo.

Específicos

- Realizar la calibración del tribómetro bajo la norma ASTM G77.
- Caracterizar mecánica y microestructuralmente los materiales en estudio.
- Comparar pérdida de masa de los materiales para cada aceite evaluado por medio de la realización de pruebas de deslizamiento experimentales.
- Comparar el coeficiente de fricción en la etapa estable en el par para cada aceite evaluado por medio de la realización de pruebas de deslizamiento experimentales.
- Analizar el efecto de la carga y la velocidad en el coeficiente de fricción y la pérdida de masa.
- Caracterizar los mecanismos de desgaste del par tribológico en cada condición evaluada.

3 Marco teórico y antecedentes

3.1 Tribología

La lubricación es una ciencia íntimamente relacionada con los estudios sobre la fricción, el desgaste, los materiales empleados en la fabricación de los equipos y su diseño, las condiciones de operación, y su posterior mantenimiento. La interacción entre todos los aspectos señalados anteriormente se conoce con el nombre de tribología y es definida como el estudio y la tecnología de los sistemas en movimiento y en contacto mutuo [3].

Etimológicamente la palabra tribología se deriva de los términos griegos “Tribos” que significa frotamiento o deslizamiento y “Logos” que significa tratado o estudio.

3.1.1 Factores que intervienen en el proceso tribológico

Velocidad

La velocidad tiene un efecto marcado en el desgaste, e influye en el coeficiente de fricción. Para los metales y otros sólidos cristalinos el coeficiente de fricción varía con la velocidad, como se muestra en la Figura 1 [4].

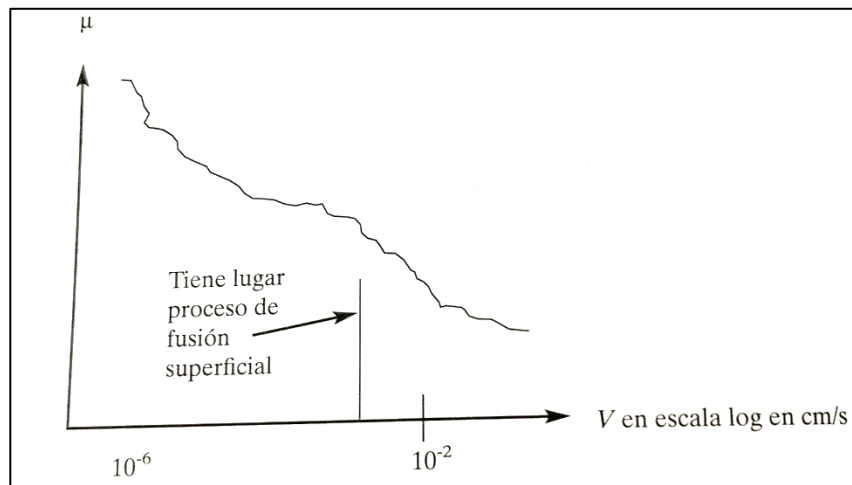


Figura 1. Variación de μ con V [4].

La velocidad de deslizamiento varía a velocidades imperceptiblemente bajas (0,01 cm/s) a otras mayores (125 cm/s), lo cual cubre aplicaciones prácticas. A velocidades elevadas (más de 2500 cm/s) pueden ocurrir procesos de fusión en las superficies lo cual puede provocar disminución del coeficiente de fricción. Algunos investigadores han observado que si la velocidad se incrementa gradualmente con el tiempo, el desgaste tiende a disminuir en forma significativa. Esto está asociado a la variación que experimenta la rugosidad superficial de los materiales en contacto; pero, a su vez el comportamiento está íntimamente relacionado con las características estructurales de los materiales [4].

Temperatura

El calor generado en el proceso se debe generalmente a la fricción, la variación de la temperatura generada puede afectar física y químicamente el comportamiento de las superficies de los materiales. El efecto de la temperatura en el coeficiente de fricción no es significativo, hasta que el valor de la temperatura sea lo suficientemente elevado para incrementar la velocidad de oxidación de la superficie [5].

Medio ambiente

El medio ambiente tiene un efecto decisivo en la fricción y el desgaste, ya que influye en la determinación del llamado “tercer cuerpo”, el cual está formado por la materia que enlaza los cuerpos de fricción. En ocasiones como el caso de la lubricación, el tercer cuerpo se forma “artificialmente”. Cuando el medio ambiente es agresivo, el tercer cuerpo cambia el mecanismo de desgaste. Las capas formadas debido a la acción del medio ambiente podrán ser producto de procesos de adsorción o absorción [4].

Carga

El efecto de la carga es determinado principalmente por la variación del área de contacto con la carga. Para cargas bajas, la fricción está gobernada por la presencia de óxidos, por lo que esta presenta bajos valores. Para cargas grandes, el rompimiento de la película de óxido y el surcado de la superficie del material provoca un aumento en el coeficiente de fricción, para cargas aún más altas, la fricción tiende nuevamente a disminuir con el campo de tensiones hidrostáticas, provocando un aumento en la plasticidad del material [6].

3.2 Desgaste

Es el deterioro progresivo de material como consecuencia del uso o roce y se presenta cuando en un proceso las capas superficiales de un sólido se rompen como resultado de una acción mecánica de otro, cuerpo por ejemplo, si el otro cuerpo presenta una acción de movimiento se ve reflejado en forma de fricción y normalmente aquel proceso es conocido como desgaste por fricción.

3.2.1 Tipos de desgaste

Desgaste abrasivo: la abrasión es un desgaste causado por la acción de numerosas asperezas duras de una superficie que choca sobre otra. Las asperezas pueden resultar de la irregularidad y rugosidad general de la superficie más dura, o porque el material tiene empotrado en él partículas duras que sobresalen de la superficie para formar y remover partículas de desgaste, resultando una progresiva pérdida de material. Este tipo de desgaste produce marcas de rayado longitudinal en la dirección de movimiento relativo [7].

Desgaste por fatiga: es un desgaste típico de los engranajes o pares donde ocurre contacto por rodadura. Es afectado por las condiciones superficiales, como la presencia de esfuerzos residuales, la dureza y la microestructura. Para este tipo de desgaste se suelen usar tratamientos superficiales como la nitruración y la cementación [4].

Desgaste corrosivo: aunque este tipo de desgaste lo causa el medio ambiente, puede ser acelerado si aquélla se combina con esfuerzos mecánicos. Este tipo de desgaste es típico de las instalaciones mineras y metalúrgicas [4].

Desgaste erosivo: es una acción de desgaste gradual causada por el flujo de un fluido o el choque de partículas abrasivas sueltas contra la superficie [7].

Cavitación: es una forma especial de corrosión-erosión que tiene lugar debido a la formación de burbujas de vapor en un líquido y un colapso posterior cerca de la superficie metálica [4].

Fretting: es un tipo de desgaste que ocurre cuando dos superficies vibran una contra la otra, durante este mecanismo se rompen las películas protectoras

naturales que normalmente las separan y forman partículas de desgaste que desbastan las superficies [7].

3.2.2 Desgaste por Deslizamiento

Cuando dos superficies sólidas están en contacto con cierta velocidad relativa las superficies pueden experimentar una degradación o pérdida del material que se conoce en la literatura como desgaste por deslizamiento, durante el contacto las asperezas de estas superficies pueden adherirse fuertemente formando uniones entre ellas, este micromecanismo de desgaste es conocido como adhesión. El deslizamiento producirá un desprendimiento preferencial del material de la superficie más blanda. Si el material es dúctil, la deformación que se produce antes de la separación de la partícula es mucho mayor, la partícula que ha sido separada de la aspereza puede permanecer unida a la otra aspereza como material transferido de una superficie a otra o puede ser liberada como partícula de desgaste [8]

3.2.3 Ensayo tribológico

Debido a la gran versatilidad de los ensayos tribológicos es necesario tener en cuenta varias recomendaciones. Debido a que el resultado del ensayo está fuertemente relacionado, no sólo a las características de los materiales del par, sino también a todo el sistema mecánico y su entorno, el proceso de selección de la prueba más apropiado para un propósito específico es fundamental para hacer interpretaciones significativas.

El criterio más básico e importante para garantizar la pertinencia de una prueba de modelo es la estrecha reproducción de los mecanismos de desgaste que aparecen en la aplicación durante las condiciones de servicio. La imitación del mecanismo de desgaste real es decisiva para la fricción y el

comportamiento de desgaste de los materiales ensayados. El mecanismo de desgaste, o conjunto de mecanismos de desgaste que un material probado está expuesto, están determinadas por las propiedades de la superficie de contacto del material junto con todos los parámetros de prueba [9].

Con el fin de simular las condiciones de operación de los molinos de caña, es decir la presión nominal, velocidad de deslizamiento constantes, y probar diferentes tipos de lubricantes, la mejor opción de acuerdo a las similitudes operativas de las condiciones de servicio, es la prueba basadas en la configuración bloque-anillo (ASTM G77) como se ilustra en la Figura 2. Una de las características importante de esta prueba es que es muy flexible, pues cualquier material con que pueden fabricarse los bloques y los anillos pueden ser probados. Además, la prueba se puede ejecutar con varios lubricantes o atmósferas de gas, según se desee, para simular las condiciones de servicio. La configuración de un anillo estacionario cargado contra un bloque deslizante, o viceversa, como es el caso de la configuración utilizada en el equipo, donde se simula la chumacera con un bloque de bronce SAE 67 estático cargado y el guijo con un anillo de acero AISI 1045 deslizante. Se usa principalmente para realizar mediciones de fricción. El contacto puede ser inicialmente del punto o tipo de línea, y luego crece de forma continua a medida que avanza el desgaste [9], permitiendo evaluar y caracterizar los pares tribológicos a nivel de laboratorio.

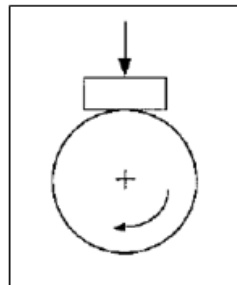


Figura 2 Configuración bloque-anillo

3.3 Lubricación

El propósito de la lubricación consiste en reducir la fricción, el desgaste y el calentamiento en elementos de máquinas, así como arrastrar partículas de desgaste que surgen del proceso. Se define un lubricante como cualquier sustancia que, cuando se inserta entre las superficies móviles, logra estos propósitos [10].

Es condición necesaria que el lubricante presente un esfuerzo de corte tangencial menor que el de las dos superficies originalmente en contacto de tal manera que condicione el lubricante al cortante y así disminuir el coeficiente de fricción [4].

2.3.6 Regímenes de lubricación

Como se observa en la Figura 3 se presentan tres etapas de lubricación: de película completa (I), de película mixta (II) y de lubricación marginal o límite (III) correlacionando la fricción f con importantes factores, tales como: La carga actuante F la velocidad de desplazamiento v y la viscosidad del lubricante η .

La lubricación de película completa describe una situación en la cual las superficies en los cojinetes están totalmente separadas por una película lubricante, con lo que se elimina cualquier contacto, si F aumenta, o v o η disminuyen, h se estrecha con posible contacto entre superficies. En esta etapa, la resistencia a la fricción es la resistencia interna al cortante en la capa de lubricante. La lubricación marginal se presenta a elevados valores de F y muy bajos para v o η describe una situación en la cual, por razones de geometría, de asperezas superficiales, de exceso de carga o de carencia de lubricante, la superficie de los cojinetes entra físicamente en contacto debido a que se reduce el espesor del lubricante a pocas capas moleculares,

ocurriendo desgaste por adhesión o por abrasión, se presentan valores elevados de fricción. La lubricación de película mixta describe una combinación de película parcial de lubricante, además de algún contacto entre asperezas entre superficies, la carga actuante hace que la aproximación de entre las superficies de los cuerpos sea aproximadamente igual a las irregularidades promedio de las superficies, presenta un nivel bajo de fricción [11].

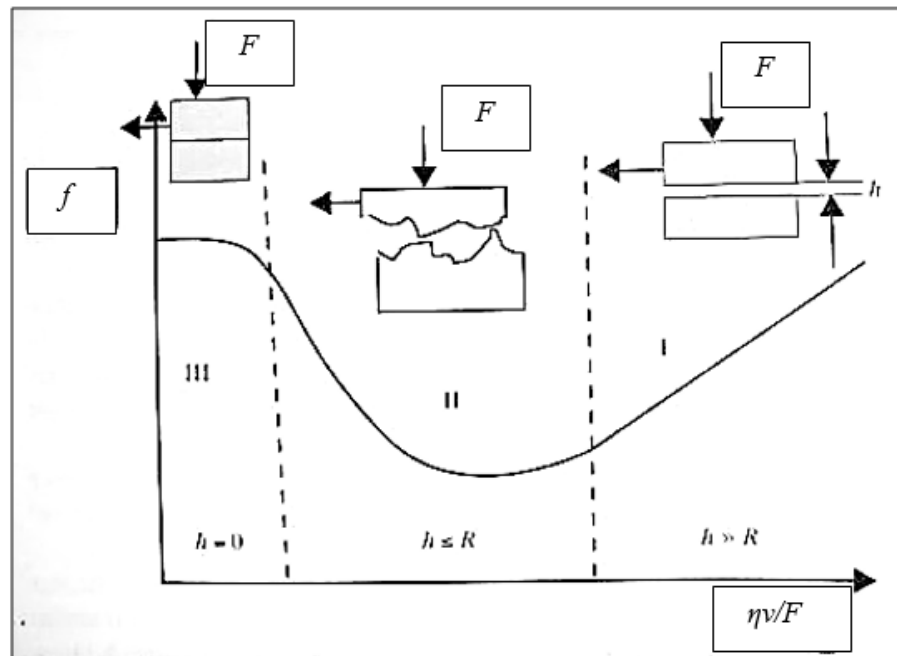


Figura 3 Regímenes de lubricación en función de la fricción f y del parámetro adimensional $\eta v/F$ [4].

La lubricación de película completa se puede presentar por tres mecanismos: lubricación hidrodinámica, lubricación hidrostática y lubricación elasto-hidrodinámica.

La lubricación hidrodinámica se presenta cuando las superficies de soporte de carga del cojinete se encuentran separadas por una película fluida de lubricante relativamente gruesa, para prevenir el contacto de metal con metal. La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción de lubricante a presión, aunque puede ocurrir, sino de la existencia de un suministro

adecuado todo el tiempo. La presión de la película es creada por la propia superficie en movimiento al jalar el lubricante hacia una zona cuneiforme a una velocidad suficientemente alta como para crear la presión necesaria, a fin de separar las superficies contra la carga en el cojinete. La lubricación hidrodinámica también se llama de película completa o fluida [10].

La lubricación hidrostática se obtiene al introducir el lubricante, que a veces es aire o agua, en el área del soporte de carga a una presión suficientemente alta para separar las superficies con una película de lubricante relativamente gruesa. Por lo tanto, a diferencia de la lubricación hidrodinámica, esta no requiere movimiento de una superficie en relación con otra [10].

La lubricación elasto-hidrodinámica es el fenómeno que ocurre cuando se introduce un lubricante entre las superficies en contacto rodante, como en los engranes acoplados o en cojinetes de rodamiento. Resulta más difícil formar una película completa de lubricante, ya que las superficies no concordantes tienen tendencia a expulsar el fluido, en vez de atraparlo. A bajas velocidades, estas uniones funcionarían con lubricación marginal y pueden resultar en una elevada tasa de desgaste, con posible rozadura y raspadura [11].

Clasificación de los lubricantes:

En la Tabla 1 se observa la clasificación de los lubricantes según su génesis y según su estado físico.

Según su génesis	Orgánicos; de origen animal o vegetal
	Minerales; procedentes del petróleo
	Sintéticos; obtenidos por procedimientos químicos
Según su estado físico	Lubricantes líquidos
	Lubricantes semi – sólidos (grasas)
	Lubricantes sólidos
	Lubricantes gaseosos

Tabla 1. Clasificación lubricantes [3].

3.3.1 Lubricantes comúnmente usados en ingenios azucareros

A continuación se presenta una descripción de dos de los lubricantes que se utilizan actualmente en la lubricación del eje y la chumacera de los molinos de caña de azúcar.

3.3.1.1 Lubricante sintético (L1)

Los lubricantes L1 son grasas de tipo gel formulado con un sistema espesante inorgánico, no jabón. Ellos contienen un fluido de base de alta viscosidad, especialmente diseñado para proporcionar una presión extrema (EP) y antidesgaste para el lubricante.

Contiene mezclas de propiedades de los lubricantes sólidos en combinación con aditivos EP químicos. Estos reaccionan de forma sinérgica en condiciones de lubricación límite para proporcionar una excelente protección a las superficies metálicas [12].

Ventajas:

- Minimiza el potencial de taponamiento eventual de las líneas de distribución de lubricantes comúnmente asociados con las grasas convencionales.
- Fácilmente bombeable, buena distribución de lubricante en aplicaciones cerradas y semicerradas.
- Altamente tixotrópico, presenta una forma estable en reposo, pero se convierte en un líquido cuando se agita. Gracias a esta propiedad se propaga fácilmente y de manera uniforme llevándose tanto el calor como contaminantes.
- Formulado para responder a las preocupaciones medio ambientales, libre de solventes, plomo, antimonio y bario.

3.3.1.2 Lubricante sintético (L2)

Es un lubricante formulado a partir de bases minerales altamente refinadas y un excelente y desarrollado paquete de aditivos especiales (mejoradores de las propiedades de adherencia y modificadores de fricción) que le proporcionan un máximo rendimiento en las operaciones de los ingenios azucareros. Formulado con un alto porcentaje de aditivos de extrema presión de tercera generación, los cuales le dan un alto desempeño, aun en ambientes altamente contaminados y en condiciones extremas de carga (soporta cargas de hasta 800 Kg-f). Este aceite ha sido especialmente diseñado para satisfacer las demandas de las chumaceras, bronce y coronas de los molinos de caña de azúcar de cualquier tipo de ingenio, sin importar la rata de molienda que tengan. Gracias al efecto de su película de alta resistencia a las cargas y viscosidad estable, tiene mayor tiempo de residencia que los productos convencionales en los mecanismos lubricados [13].

Ventajas:

- Forma una película altamente adhesiva en toda la superficie a lubricar.
- No contiene asfaltos.
- Es amigable con el medio ambiente.
- Protege contra la corrosión de cojinetes y engranajes.
- Puede ser bombeada por diferentes sistemas centralizados de lubricación.
- Minimiza el consumo de lubricante.
- Reduce costos operativos.

3.3.2 Lubricante de alto rendimiento grado alimenticio (L3)

Es un lubricante sintético de alto rendimiento, alta viscosidad diseñado para uso grandes rodamientos de agujas / axiales de ingenios azucareros. Las características del producto le dan propiedades que ayudan en la lubricación límite que se presenta en los engranajes con carga pesada y de velocidad baja [14].

El producto está formulado con bases y aditivos cuidadosamente seleccionados para evitar el desgaste, la oxidación y la corrosión.

Ventajas:

- Máxima protección de los engranajes contra el desgaste y los golpes de carga, incluida la protección contra micro-picaduras.
- Excelentes propiedades lubricantes (que reduce las temperaturas de trabajo, en comparación con lubricantes tipo asfáltico).
- Alta adhesividad restante en su lugar incluso en equipos verticales.
- Alta capacidad de carga.

- Excelente protección contra la corrosión y resistencia a la oxidación.
- Compatible con los metales no ferrosos.
- Excelente viscosidad/temperatura de comportamiento (alto índice de viscosidad)

Según *NSF International* [15] este producto es aceptable como un lubricante con contacto accidental con alimentos (H1) para su uso en y alrededor de las áreas de procesamiento de alimentos. Tales compuestos pueden ser usados en equipos de procesamiento de alimentos como una película protectora anti-óxido, como un agente de liberación en juntas o sellos de cierres de tanques, y como lubricante para ciertas partes de las máquinas y equipos en el lugar donde hay una exposición potencial de la parte lubricada con la comida. La cantidad utilizada debe ser la mínima, necesaria para lograr el efecto técnico deseado en el equipo.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades de los lubricantes en estudio.

Lubricante	L1	L2	L3
Apariencia	oscuro y opaco	caramelo claro	transparente y sin partículas
Viscosidad grado ISO, ASTM D 2422	6000	-	-
Gravedad específica, ASTM D1298 @ 15,6 °C	0,937-0,947	0,91	
Viscosidad @ 40° C, mm ² /s (cSt), ASTM D445	5943	23000	15500
Viscosidad @ 100° C, mm ² /s (cSt) ASTM D445	145	2200	448,7
Corrosión del cobre, ASTM D 4048	1B	-	1A
Test de 4 Esferas/ Índice de carga de desgaste Kg ASTM D 2596	70	-	62,3
Test de 4 Esferas/ carga de soldadura Kg ASTM D 2596	800	880	-
Test FZG , en acuerdo con DIN 51 354, Método A/2.76/50	>12	-	-
Punto de inflamación , ASTM D92, COC, °C	232	250-260	-
Prueba de oxidación, ASTM D 1743	-	-	aprobado

Tabla 2 Propiedades de los lubricantes en estudio [14] [12] [13].

Antecedentes.

Los trabajos e investigaciones desarrollados alrededor de análisis de desgaste por deslizamiento y aspectos tribológicos se basan principalmente en propiedades de lubricantes y diferentes aspectos de los materiales objetos de estudio.

Córdoba [16], realizó el diseño y la construcción de un tribómetro especializado con capacidad para determinar el coeficiente de fricción, la temperatura de contacto, además cuenta con un variador de velocidad y un sistema de adquisición de datos en línea. Este tribómetro se construyó para simular las condiciones de operación del eje y la chumacera de los molinos de caña de azúcar.

Holguin y Coronado [17] realizaron pruebas de desgaste por deslizamiento y la caracterización tribológica, entre los pares: acero AISI 1045 y bronce: SAE 67 y SAE 64, Nacional y Americano. De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que el mejor par tribológico fue el de acero AISI 1045 con el bronce SAE 67, por su menor pérdida de masa. Por otro lado, el bronce Nacional presentó menor coeficiente de fricción.

Rivas *et. al.* [2] usaron un tribómetro de desgaste por deslizamiento normalizado tipo bloque–anillo, para reproducir las condiciones de operación de los molinos de caña y se ensayaron diferentes combinaciones de materiales para la chumacera: bronce SAE 67 y 64, con diferentes lubricantes: grasa de alta presión y aceite asfáltico. De acuerdo a los resultados obtenidos se pudo concluir que el aceite presentó menor coeficiente de fricción comparado con la grasa. El coeficiente de fricción fue menor para el bronce SAE 67 y el bloque SAE 64 presentó menor pérdida de masa.

Hoguín *et. al.* [18] analizaron tres procedimientos de soldadura utilizados para reconstruir los ejes desgastados de molinos azucareros: dos procesos de

soldadura por arco sumergido y una proceso de soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW). Usaron anillos de material de soldadura, bloques de bronce SAE 67 y aceite como lubricante. Los depósitos de soldadura que presentan una fuerte adhesión en la superficie desgastada mostraron pérdida de masa más alta que los materiales que presentaron mecanismos de desgaste por adhesión. Los materiales ensayados presentaron dureza similar pero diferente tensión de fluencia y el coeficiente de endurecimiento. Se encontró una relación entre el desgaste, coeficiente de endurecimiento por deformación, y el esfuerzo de fluencia. El depósito de soldadura que presenta el más alto coeficiente de endurecimiento mostró la pérdida de masa más alta, con evidencia de adhesión severa en la superficie desgastada.

Gomez *et. al.* [19] realizaron pruebas de desgaste por deslizamiento deslizamiento en condición lubricada bajo una presión nominal de 8,14 MPa y una velocidad relativa de 0,13 m/s de tres materiales con dureza inicial idéntica de 91 HRC y microestructuras perlítica, ferrítico-perlítica y carburo esferoidal con matriz ferrítica. Los materiales presentaban diferente esfuerzo de fluencia y coeficiente de endurecimiento por deformación. Se encontró una relación entre el desgaste, el coeficiente de endurecimiento y el esfuerzo de fluencia. Cuando el esfuerzo de fluencia se incrementa, la pérdida de masa decrece, y cuando el endurecimiento por deformación se incrementa, la pérdida de masa se incrementa.

Mora [20] realizó una serie de pruebas tribológicas en una configuración anillo-bloque, para los anillos se utilizó acero ASTM 4140 y para los bloques bronce SAE 40. Realizó pruebas en seco y lubricadas con grasas tipo Alimex-1, S-350 y Top 5, para cuatro valores de carga 20, 40, 60 y 80 N una velocidad constante de 800 rpm. Obteniendo como resultado, que al aumentar la carga se aumenta el desgaste tanto en las pruebas con lubricación como en las que no cuentan con ella, pero al realizar la comparación las pruebas lubricadas reducen el desgaste hasta en un 95%.

Cubillán y Liccionis [21] estudiaron los efectos de la carga normal y la velocidad de deslizamiento, sobre el desgaste deslizante del par tribológico AISI 4340 y AISI D-2, empleando un tribómetro en la configuración geométrica bloque sobre anillo ("Block on Ring"), según norma ASTM D2714-88. Todos los ensayos se realizaron al aire y en ausencia de lubricantes. Las cargas normales aplicadas fueron de 44.5, 89, 133.5 y 178 N, las velocidades de deslizamiento de 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 m/s y la distancia deslizada fija de 55.977 m. Se determinó que la tasa de desgaste en los bloques aumento por efecto del aumento de la carga de forma lineal en algunos de los ensayos y que disminuyó por efecto del aumento de la velocidad en forma exponencial en todos los ensayos. Se encontró que el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga normal aplicada. El coeficiente de fricción se mantuvo estable, es decir, invariable para cada una de las categorías de velocidad constante al aumentar la carga. La técnica de microscopía electrónica se utilizó para determinar los mecanismos de desgaste, permitiendo encontrar la presencia de un acentuado proceso de adhesión en los anillos para baja velocidad y un proceso mixto de adhesión y de laminación a alta velocidad. Se encontraron pequeñas zonas indicativas de un desgaste adhesivo ligero en los bloques y zonas claramente definidas con la presencia de adhesión a medida que aumenta la carga aplicada.

Cadenas *et. al.* [22] realizaron ensayos de desgaste siguiendo la norma ASTM D2714-88, que especifica una configuración "Bloque sobre Anillo", en un tribómetro modelo FALEX N°1, el material empleado en los bloques fue un acero AISI 1020 el cual sirvió como material base o substrato, fueron recubiertos con una aleación base níquel, posteriormente, fue tratado térmicamente mediante llama oxiacetilénica. Para la fabricación de los anillos se utilizó un acero para herramientas AISI D-2 bonificado. Los ensayos de desgaste se realizaron empleando una carga normal que se varió en cuatro

niveles: 44,5, 89, 178 y 267 N, respectivamente. La velocidad de deslizamiento, también fue ensayada a cuatro niveles: 0,10, 0,20, 0,40 y 0,50 m/s. Para las condiciones evaluadas en este estudio, se encontró que el recubrimiento con tratamiento térmico tiene desde 1,15 veces más resistencia al desgaste, para el menor nivel de carga aplicada y mayor velocidad de deslizamiento y, hasta 50 veces más resistencia al desgaste para el mayor nivel carga aplicada y mayor velocidad de deslizamiento, comparado con el recubrimiento sin tratamiento térmico. Se encontró la presencia de los fenómenos de adhesión, oxidación, abrasión de tres cuerpos y deterioro cíclico. En el recubrimiento con tratamiento térmico, el mecanismo de desgaste predominante fue el de adhesión y oxidación, mientras que su contraparte presentó oxidación, microcorte y abrasión de tres cuerpos.

Forlerer *et. al.* [23] evaluaron la resistencia al desgaste en dos materiales de matriz polimérica reforzados con partículas cerámicas, utilizados en restauraciones dentales. Se realizaron ensayos de desgaste tipo "block-on-ring", según la norma ASTM G77/97. Se desgastó el material contra anillos de dureza de 60 HRC y $R_a=1,9 \mu\text{m}$, con lubricación pasiva con H_2O desmineralizada a 37°C . Los ensayos se realizaron con cargas de 133N y 266 N, a una velocidad de 0,11 m/s, a lo largo de 66 metros y simultáneamente se midió el coeficiente de fricción. Luego del ensayo se determinó el ancho y la profundidad de la huella y se realizaron observaciones por microscopía óptica y SEM. Se observan diferencias en el ancho de la huella, el coeficiente de fricción y a la carga normal utilizada en el ensayo, a medida que aumenta el coeficiente de fricción aumenta el ancho de huella y viceversa. Resultando más resistente al desgaste el que contiene un material de refuerzo más homogéneo y de menor diámetro promedio. El material B es más resistente al desgaste que el material A bajo carga de 266 N (cargas altas). Las diferencias en el tamaño y la forma del refuerzo junto con las propiedades viscoelastoplásticas de la matriz son el factor determinante de las diferencias

en la resistencia al desgaste. Estas diferencias no fueron observables en ensayos realizados a 133 N

Chen *et. al.* [24] realizaron estudios sobre los efectos de la velocidad de deslizamiento y la carga normal sobre coeficientes de fricción de auto-acoples Si₃N₄ y SiC, usando configuración pin-on-disk a velocidades de deslizamiento de 30 a 120 mm / s, cargas normales de 1 a 14 N en condiciones ambiente. Los resultados mostraron que, para los dos tipos de cerámicas, el coeficiente de fricción aumenta con la disminución tanto de la velocidad de deslizamiento y el aumento de carga normal, para cargas altas. El coeficiente de fricción es independiente de la carga normal cuando la carga normal es baja. La película de lubricación de Si₃N₄ presentó mayor capacidad de carga que el de SiC. Curvas Stribeck indicaron que, para la cerámica Si₃N₄, la lubricación hidrodinámica cambia en lubricación límite abruptamente cuando el número Sommerfeld es bajo; mientras que para la cerámica de SiC auto-acoplado, la lubricación hidrodinámica cambiará en lubricación mixta y luego en lubricación límite gradualmente cuando el número sommerfeld es bajo.

So y Hu [25] usaron configuración ball-on-disk lubricado con algunos tipos de aditivos de extrema presión (EP) y antidesgaste o modificadores de fricción (FM), las huellas de desgaste límite en las bolas se pueden determinar para determinadas cargas y velocidades de deslizamiento. Por el hecho de que el tamaño límite de las huellas decrece al incrementar la velocidad de deslizamiento o al disminuir la carga aplicada, la habilidad de la capa química de lubricante de transmitir carga puede obtenerse extrapolando los datos a una condición de velocidad de deslizamiento cero.

4 Materiales y métodos

En este estudio se compararon tres tipos de lubricantes (L1, L2) actualmente usados en la lubricación del guijo-chumacera de los molinos de caña de azúcar, y un lubricante de alto rendimiento grado alimenticio (L3), diseñado para la misma aplicación. Se analizó el comportamiento tribológico del par bronce SAE 67 – acero AISI 1045, materiales comúnmente usados en el montaje guijo-chumacera y se realizaron pruebas experimentales en el tribómetro de deslizamiento con configuración bloque-anillo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle de acuerdo con la norma ASTM G 77 [26] a una presión nominal de 8 y 4 MPa y una velocidad de 0,13 y 0,25m/s. Se midió el coeficiente de fricción y pérdida de masa para cada condición y se correlacionó los resultados.

4.1 Tribómetro de desgaste por deslizamiento

Actualmente el laboratorio de tribología de la escuela de ingeniería mecánica cuenta con un tribómetro de desgaste por deslizamiento que consta de un eje montado sobre un rodamiento de bolas en el extremo donde recibe la potencia de un torno de 3,6 HP a través de una junta cardánica y en el otro extremo descansa sobre dos rodillos cónicos, a su vez este eje transmite el movimiento al anillo que representa el guijo de un eje de molienda. Ver Figura 4.



Figura 4. Tribómetro de desgaste por deslizamiento.

La carga normal se transmite al alojamiento del bloque mediante un pin que viene acoplado a una palanca (Figura 5, Figura 6). La magnitud de la carga depende del peso montado en el porta pesos, el cual se engancha en el extremo de la palanca para lograr que la carga aplicada sea constante en todo momento.

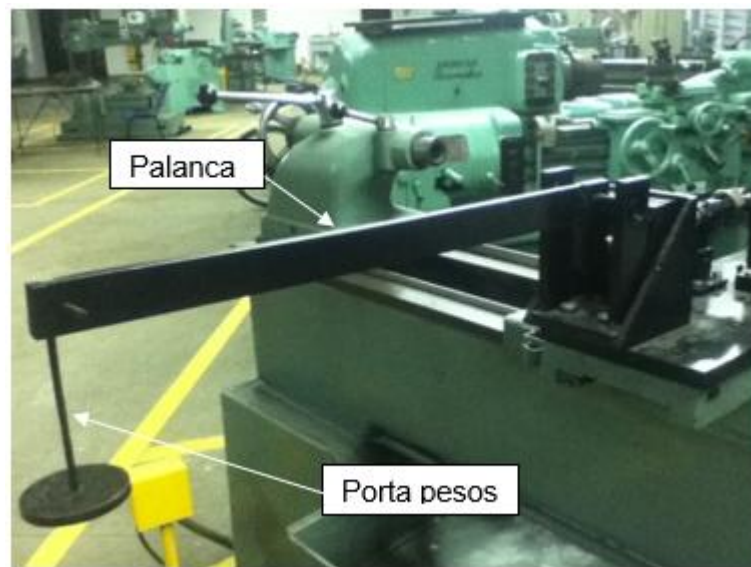


Figura 5. Sistema de aplicación de la carga [19].

El alojamiento del bloque (porta-bloques) es pivotado para asegurar que la cara frontal del bloque permanezca constantemente en contacto con el anillo de acero durante la prueba. El eje donde se coloca el anillo tiene un escalón con una pequeña marca que sirven de tope para que al montar los anillos queden en la misma posición siempre y garantizar una menor excentricidad entre el anillo y el eje. Ver Figura 6.

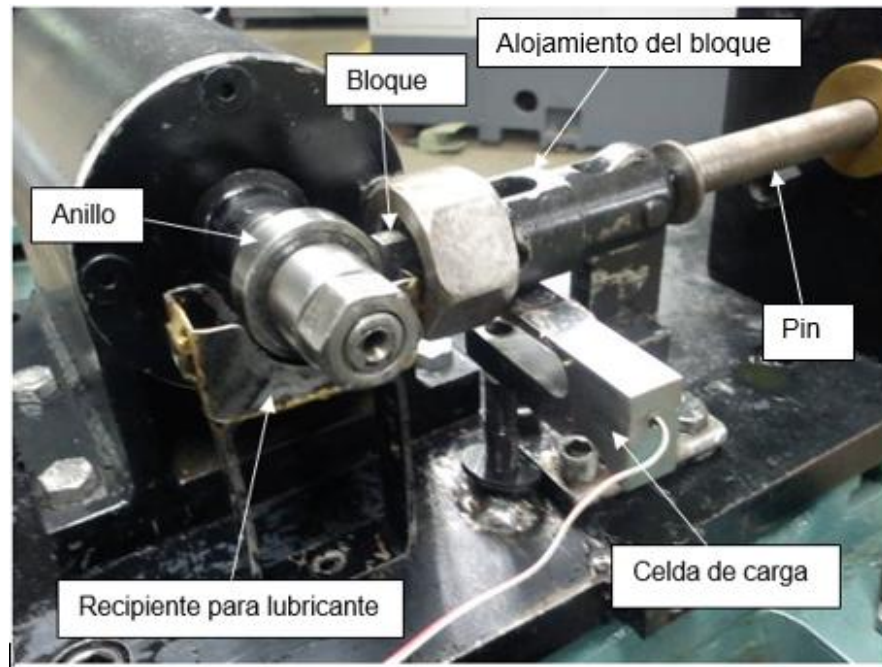


Figura 6. Porta-bloques y porta-anillos.

El tribómetro también cuenta con un sistema de adquisición de datos, una fuente de voltaje regulable, un variador de frecuencia que se adapta al torno donde opera el tribómetro. Ver Figura 7.



Figura 7. Componentes tribómetro de desgaste por deslizamiento.

4.1.1 Variador de frecuencia

Se usó un variador de la marca Siemens de La serie MICROMASTER 420 que es una gama de convertidores de frecuencia (variadores) para modificar la velocidad de motores trifásicos. Controla de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Opera bajo el principio de que la velocidad sincrónica de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia suministrada y el número de polos del motor, de acuerdo con la relación:

$$RPM = \frac{120 * f}{p} \quad (1)$$

Donde:

RPM = Revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro CA (Hercio)

p = Numero de polos.

Debido a sus extensas listas de parámetros es ideal para una gran gama de aplicaciones de control de motores, en la Tabla 3 se visualizan los parámetros necesarios para la realización de las pruebas y el cual se configuró teniendo en cuenta datos técnicos del motor del torno así como las velocidades, tiempos de aceleración y desaceleración deseadas, al inicio, durante y al finalizar la pruebas.

Para la realización de las pruebas se varió el parámetro P1080 que corresponde a la frecuencia mínima del motor, para obtener las velocidades deseadas, teniendo en cuenta la gama de velocidades en el torno que se mantuvo fijo en la escala 212 rpm durante las pruebas, estas fueron: frecuencia de 21,3 para una velocidad de 0,13 m/s, y una frecuencia de 42,5 para una velocidad de 0,25 m/s. posteriormente se verificaron estas velocidades con un tacómetro Lutron DT-2236.

El variador de frecuencia se conecta directamente al torno como se observa en la Figura 8.

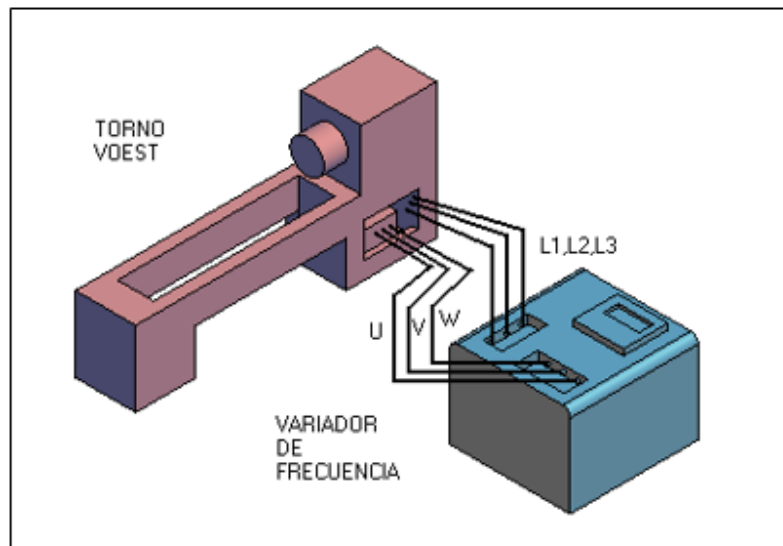


Figura 8. Conexión Torno – variador de frecuencia. [27].

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN	SELECCIÓN
P0010	Comenzar puesta en servicio rápida	1
P01001	Funcionamiento para Europa/ Norte América	1
P0304	Tensión nominal del motor	220 V
P0305	Corriente nominal del motor	9,4 A
P0307	Potencia nominal del motor	3,6 HP
P0310	Frecuencia nominal del motor	60 Hz
P0311	Velocidad nominal del motor	1680 RPM
P0700	Selección de la fuente de comandos	1
P1000	Selección de consigna de frecuencia	1
P1080	Frecuencia mínima del motor	20 - 45 Hz
P1082	Frecuencia máxima del motor	72 - 75 Hz
P1120	Tiempo de aceleración	30 seg
P1121	Tiempo de desaceleración	30 seg
P3900	Fin de puesta en servicio rápida	1

Tabla 3. Parámetros variador de frecuencia.

4.1.2 Sistema de adquisición de datos

Se usó el sistema de adquisición de datos *Dynamic strain recorder* DC-104R el cual permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores).

Para la realización de las pruebas se utilizó este dispositivo para adquirir y almacenar los datos y las microdeformaciones que suministraba la celda de carga.

Se realizó la conexión como se observa en la Figura 9, se ingresa al programa y se va a “set” y se despliega la ventana donde se selecciona la referencia del sistema que se está usando y el puerto. En este punto se selecciona el canal a usar “Channel No 1” y la escala que se desea. Luego se balancea el sistema con la opción “balance”, al balancear el canal marca cero “0” lo que significa que nuestro sistema está listo para usar.

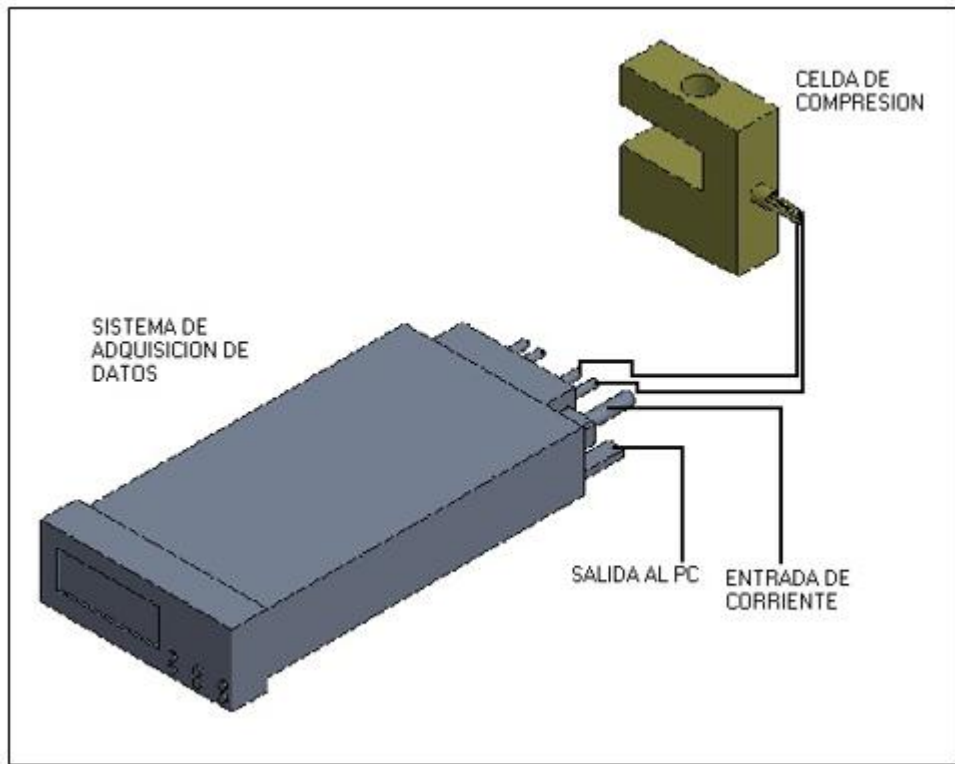


Figura 9 Conexión sistema de adquisición de datos – celda de carga. Adaptado de [27].

4.1.3 Celda de carga

Teniendo en cuenta los requerimientos de espacio y montaje en el tribómetro, así como la carga máxima de 100 Newtons aproximadamente, se diseñó una celda de carga tipo c (ver Figura 10) y se realizaron cálculos teóricos y simulaciones en elementos finitos para determinar las dimensiones finales para obtener unas microdeformaciones alrededor de las 800 microdeformaciones, que son medibles con un deformímetro (*strain gage*).

Posteriormente se tomó una barra de sección cuadrada de 10 x 5cm acero AISI 1020, se cortó en la segueta mecánica y se llevó a una barra de 7,5 x 3 cm y se realizó la perforación en el centro de mecanizado con una fresa de $\frac{1}{2}$

in y una longitud de 5 cm, finalmente se realizó una perforación y se roscó en la parte inferior con un machuelo métrico de paso 10 para su montaje en el equipo.

A continuación se rectificó y se pulió la superficie donde se pegó el deformímetro (*strain gage*) para medir las microdeformaciones que son almacenadas en el sistema de adquisición de datos y se visualizan en el computador en tiempo real.



Figura 10 Celda de carga.

4.1.4 Calibración de la celda de carga

Este procedimiento se realiza acoplando dos ganchos a la celda: uno para sostenerla y otro para colgar diferentes pesos, se conecta al sistema de adquisición de datos (ver Figura 11 a). Teniendo todo listo se empieza a colocar pesos gradualmente (ver Figura 11 b) hasta llegar a 170N y se observan las microdeformaciones en el sistema de adquisición de datos, se tabula el peso en newtons vs. microdeformaciones y se obtiene la Figura 12.

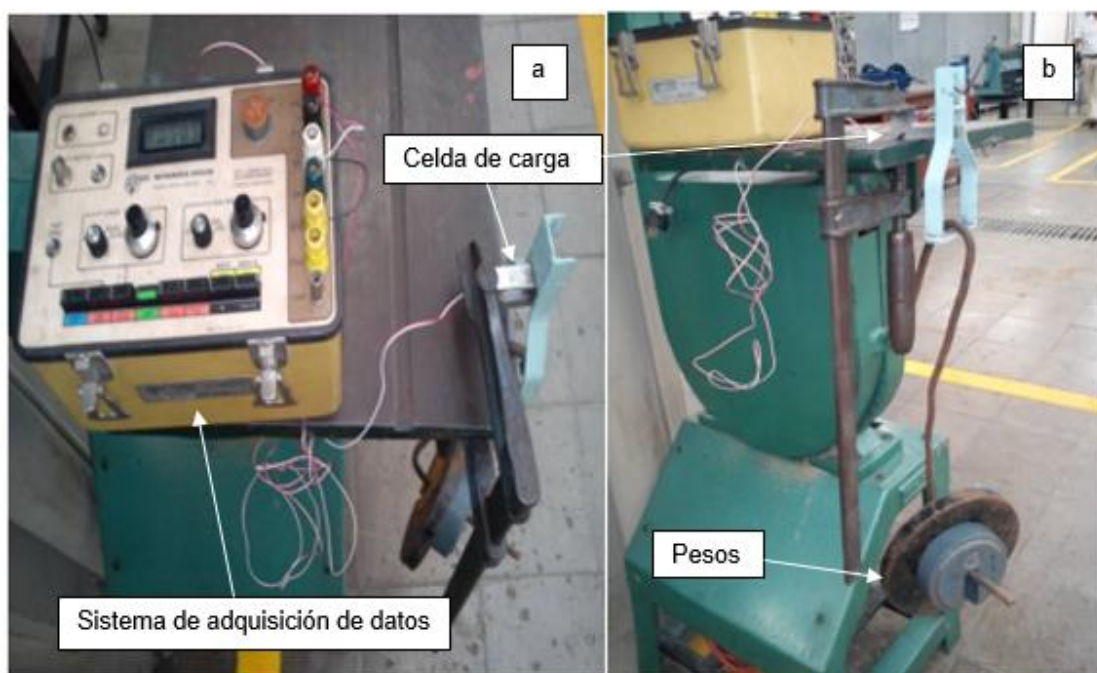


Figura 11. Montaje Calibración celda de carga, (a) conexión sistema de adquisición de datos, (b) montaje pesos.

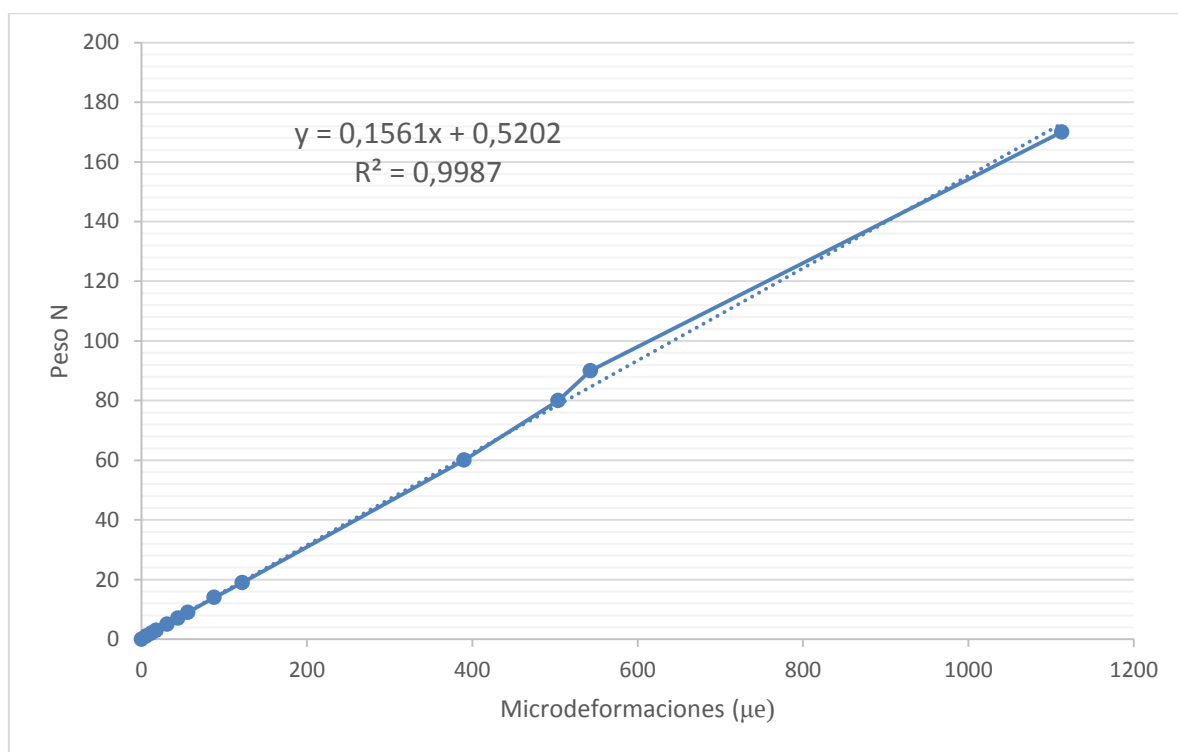


Figura 12. Peso vs microdeformación.

Se observa un comportamiento lineal, lo que indica que la celda se encuentra en buen estado, y se obtiene la siguiente ecuación $y = 0,1561x + 0,5202$, con esta ecuación se puede conocer la fuerza aplicada a partir de los datos de microdeformación que se observan en el sistema de adquisición de datos.

4.2 Construcción de probetas para ensayos de deslizamiento y calibración

Las probetas para los ensayos tribológicos son las mismas usadas en calibración, se diferencian por los materiales usados. Los bloques son de bronce SAE 67 y los anillos son de acero SAE-AISI 1045.

Se elaboran según las dimensiones designadas en la norma ASTM D 2714-88 (ver Figura 13), se tiene en cuenta acabado final con la rugosidad que pide la norma ASTM G77 [26].

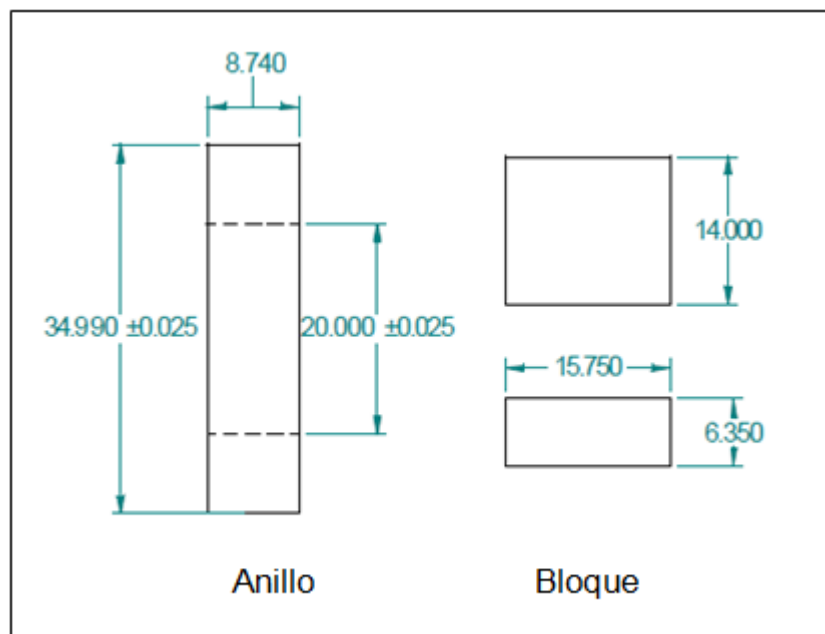


Figura 13. Dimensiones bloque y anillo [2].

4.2.1 Construcción de anillos de Acero AISI 1045 y Acero AISI 4140

Para el caso del acero AISI 1045 así como para el acero AISI 4140 se compró una barra cilíndrica sólida de $1\frac{1}{2}$ in de diámetro por 50 cm de longitud, se montó en el torno, se centró y se refrentó posteriormente se perforó con una broca de $\frac{1}{2}$ in para comenzar a realizar el diámetro interno, luego se realizó el mismo proceso con una broca de 16mm. Finalmente se llegó al diámetro interno requerido mecanizando con un buril.

Posteriormente se cilindró en el torno para llegar a un diámetro exterior de 35mm y para garantizar un buen acabado se realiza este proceso a una velocidad de 460 RPM.

Ya hecho este proceso se realiza el corte de cada anillo con un buril de 3.3 mm de espesor, se realiza cortes cada 12mm y se cortan anillos con espesor requerido de 8.7mm.

4.2.2 Construcción de bloques de Bronce SAE 67 y Acero AISI O1

Para la construcción de los bloques de SAE 67 se utilizó una barra de sección cuadrada de 25mm por 500mm de largo y se mecanizó en el centro de mecanizado y se obtuvo una barra de sección cuadrada de 16 x 14,5 mm. Posteriormente se cortó la barra en bloques de 7mm de espesor en la segueta mecánica y se llegó a las medidas finales en rectificadora plana.

Para el caso de los bloques de acero AISI O1 se consiguió una barra de diámetro de 1 in y de 15cm de longitud, se le dio un diámetro de 21mm en el torno mecánico y se obtuvo una sección cuadrada de 16 x 14,5 mm en el centro de mecanizado. Posteriormente se cortó la barra en bloques de 7 mm de espesor en la segueta mecánica y se llegó a las medidas finales en la rectificadora plana.

4.2.3 Calibración tribómetro

Para la calibración, la máquina es operada usando un anillo de acero SAE 4620 carburizado con dureza de 60 HRC que rota sobre un bloque de acero para herramienta SAE O1 con dureza de 30 HRC, con lubricación (aceite mineral blanco, Viscosidad a 37,8 °C de 63 a 65 cSt). La velocidad del anillo es 72 ± 1 rpm. Los especímenes son sujetados a 68 kg (150 lb) de carga normal; la duración debe ser 5000 ciclos. Las variables a encontrar son: la fuerza de fricción después de un cierto número de revoluciones, el promedio del ancho de huella que deja el desgaste del anillo sobre el bloque y la pérdida de peso del bloque al final de la prueba. Debido a que el acero SAE 4620 no se consigue comercialmente, se optó por utilizar SAE 4140 carburizado con dureza de 60 HRC.

Los equipos más relevantes para esta prueba son el tribómetro de desgaste por deslizamiento, balanza analítica con una precisión de 0,1 mg, un microscopio para medir el ancho de huella con una precisión de 0,01 mm.

El tribómetro estará en condiciones aceptables cuando los resultados obtenidos sobre la calibración estén dentro de los siguientes límites: la medida de desgaste (ancho) este entre 1,70 y 2,90 mm; la fuerza de fricción después de 4500 rpm debe estar entre 66 y 97 N (15,0 y 22,0 lbf) [28].

4.3 Calculo del coeficiente de fricción

Para el cálculo del coeficiente de fricción se utilizaron las variables mostradas en la Figura 14, y la ecuación (3).

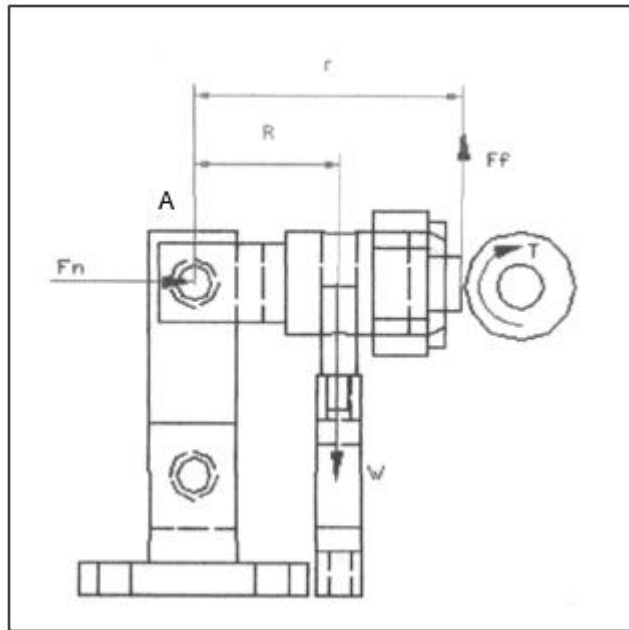


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre en el punto de contacto y el porta-bloques [2].

Se realizó $\sum M_A = 0$ y se obtuvo las siguientes ecuaciones:

$$F_f * r = W * R \quad (2)$$

$$\mu F_n * r = W * R \quad (3)$$

$$\mu = \frac{W}{F_n} * \frac{R}{r} \quad (4)$$

Donde:

F_n = carga aplicada en el bloque o normal.

r = radio de giro de la fuerza de fricción.

R = radio de giro de la fuerza de reacción.

W = reacción en el brazo debida al torque.

$F_f =$ fuerza de fricción en el par.

Para el tribómetro de desgaste por deslizamiento de la escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad del Valle, F_n es la carga aplicada, W es la fuerza registrada en la celda de compresión, $R = 42$ mm y $r = 78$ mm.

4.4 Diseño de experimento

Para el análisis y diseño del experimento se tendrá como variable de respuesta el coeficiente de fricción. Las mediciones de esta variable se obtendrán de los ensayos experimentales.

Las variables experimentales independientes, conocidas como factores, de las que se desea saber cómo influyen o afectan al coeficiente de fricción, son: tipo de lubricante, velocidad de deslizamiento y carga aplicada. Los valores o atributos, conocidos como niveles, de cada factor se presentan en la Tabla 4.

Teniendo en cuenta que las condiciones de operación de los molinos de caña son de altas presiones y velocidades lentas, parámetros sobre los cuales no se pueden intervenir ya que están asociados al proceso de molienda y que dan como resultado un régimen de lubricación límite, por tal motivo se seleccionaron dos velocidades dentro de este régimen de lubricación las cuales fueron 0,13 y 0,25 m/s equivalente a las que se obtienen con frecuencia de rotación de 5 y 10 RPM respectivamente, que son velocidades dentro del rango de operaciones de los molinos, así mismo se seleccionaron las cargas netas de 4 y 8 MPa que también se encuentran dentro del rango de operación de los molinos

Factores	Niveles	Etiqueta	Valor
Velocidad	Velocidad baja	V1	0,13 m/s
	Velocidad alta	V2	0,25 m/s
Carga	Carga Nominal baja	C1	4 MPa
	Carga Nominal alta	C2	8 MPa
Lubricante	Lubricante Sintético	L1	
	Lubricante Sintético	L2	
	Lubricante de alto rendimiento grado alimenticio	L3	

Tabla 4 Aspectos importantes en el diseño de experimento.

De acuerdo al número de niveles por factor, se tiene un total de $3 \times 2 \times 2 = 12$ tratamientos. Estos tratamientos hacen referencia a las posibles combinaciones de los niveles de cada factor, las cuales se muestran en la Tabla 5.

Lubricante	Velocidad	Carga
L1	V1	C1
L1	V2	C2
L1	V1	C2
L1	V2	C1
L2	V1	C1
L2	V2	C2
L2	V1	C2
L2	V2	C1
L3	V1	C1
L3	V2	C2
L3	V1	C2
L3	V2	C1

Tabla 5. Tratamientos en el diseño de experimentos.

Determinación del tamaño del experimento

Debido a la restricción de recursos económicos y de tiempo, es necesario establecer un número de replicaciones de cada una de las condiciones estudiadas que permita reducir al mínimo el error experimental. Aunque el diseño factorial considerado para este estudio corresponde a uno de tres factores, la selección del número de réplicas que se toman, se realizó llevando a cabo el procedimiento cuando el diseño factorial corresponde a uno de dos factores, ya que para el caso de tres factores el procedimiento es complejo. Fueron seleccionados los factores Lubricante y Velocidad para la realizar el procedimiento.

Se establecieron los siguientes valores para los componentes necesarios en el cálculo de la selección de la muestra, basados en trabajos realizados.

- Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$
- Potencia de la prueba esperada: $1 - \beta = 0,95$
- Estimación de σ^2 [29]= 0,009888889
- Diferencia mínima entre las medidas de los tratamientos, considerando los factores lubricante y velocidad, tal que si un valor excede esta diferencia, la hipótesis nula $h_0 = \mu_{11} = \mu_{12} = \mu_{21} = \mu_{22} = \mu_{31} = \mu_{32}$, se rechaza.

Con estos valores establecidos y los que se obtiene en la Tabla 6 al asignarle valores a n se tiene:

n	Φ	v1	v2	β	1 - β
3	23225,22	2	6	$\approx 0,00$	≈ 1

Tabla 6. Selección del número de réplicas.

De esta manera se obtiene con 3 réplicas la prueba de hipótesis tiene una potencia mayor al 95%, es decir, la probabilidad de rechazar la hipótesis nula H_0 cuando es falsa es mayor que 95%.

Conociendo el número de réplicas (3) y de tratamientos (12) que se consideran en el estudio, a través del software estadístico Minitab, se llevó a cabo la aleatorización de los diferentes tratamientos del experimento, para la realización de las 36 pruebas.

4.5 Caracterización del material

4.5.1 Composición química

De acuerdo a la información dada por el fabricante el Acero AISI 1045 fue suministrado laminado en caliente y/o forjado, con una resistencia a la tracción entre 60 y 62 kg/mm²

En la Tabla 7 y Tabla 8 se encuentran la composición química suministrada por el proveedor para cada material de ensayo.

ACERO	CARBONO (%)	AZUFRE (%)	MANGANESO (%)	SILICIO (%)	FOSFORO (%)
AISI 1045	0,45	0,035max	0,70	0,30	0,030 max

Tabla 7. Composición química acero AISI 1045

BONCE	COBRE (%)	ESTAÑO (%)	PLOMO (%)	ZINC (%)	NIQUEL (%)	FOSFORO (%)	HIERRO (%)	ANTIMONIO (%)
SAE 67	75.00-79.00	7.00-9.00	0,13 – 0,16	3	2	0.05	0.25	0.5

Tabla 8. Composición química de bronce SAE 67

4.5.2 Dureza

En el caso de los anillos de acero AISI 1045 se realizó la prueba de dureza con un durómetro Rockwell, usando una carga de 100kg, se tomaron 15 datos de dureza.

Para el bronce se tomaron 15 datos en el durómetro Brinell con un indentador de 2,5 mm y una carga de 62,5 Kgf, posteriormente se midió el diámetro del casquete en la superficie con ayuda del microscopio óptico, y se compararon las medidas del diámetro con tablas equivalentes de dureza.

4.5.3 Análisis metalográfico de probetas

Para el acero AISI 1045 se tomaron muestras de material, las cuales fueron pulidas y atacadas con Nital al 5%, para observar su microestructura con la ayuda de un microscopio óptico marca Advanced Optical.

El bronce no fue atacado, para observar con más claridad la dispersión de plomo que hay en la matriz.

4.5.4 Rugosidad

Usando un rugosímetro MITUTOYO SJ 201P, se obtienen los datos de rugosidad antes y después del proceso de desgaste. Usando los parámetros mostrados en la Tabla 9, teniendo en cuenta la geometría y acabado superficial de las probetas.

Parámetros de operación	Valores
parámetro	Ra
Longitud de muestreo (Cutoff)	0,8
Numero de longitud de muestreo	1
Rango de medida	Auto
Perfil/filtro de medición	R-profile/PC50
Longitud Pre recorrido y pos recorrido	ON

Tabla 9. Parámetros de operación rugosímetro.

4.5.5 Pérdida de masa

Los bloques y anillos se pesaron en la balanza analítica Vibra 220/0,0001g antes y después de la realización de la pruebas experimentales, se tuvo en cuenta la limpieza correspondiente de cada probeta en el Limpiador Ultrasónico UD50SH-2L antes y después de la respectivas pruebas.

4.5.6 Análisis de la superficie de desgaste

Con ayuda del estereoscopio marca Advanced Optical y usando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5910LV se identificaron los mecanismos de desgaste.

5 Resultados

5.1 Resultados de calibración

Teniendo cada uno de los accesorios listos, debidamente instalados, configurados y en el caso de la celda de carga debidamente calibrada, se procede a realizar la calibración del tribómetro de desgaste por deslizamiento con el que cuenta la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle de acuerdo a la norma ASTM D2714 [28].

Para garantizar un 95 % de precisión en los resultados estos deben estar en los siguientes márgenes de error: en la medida de desgaste, la diferencia entre los sucesivos resultados obtenidos por la misma operación con el mismo equipo, operando bajo las mismas condiciones con materiales idénticos por el mismo tiempo y la correcta y normal operación del método de evaluación, no exceda 0,73 mm. Se observó y midió la huella de desgaste en el microscopio óptico y las medidas se encuentran entre 2.3 y 2.8 mm, hay que destacar que se presentó bordes cónicos en la huella pero están dentro de un coeficiente de variación < al 10% valores que están dentro de los límites de la norma.

La fuerza de fricción durante las pruebas de calibración debe estar entre 66 N y 97N, adicionalmente la diferencia entre dos pruebas no debe exceder los 29 N (6,6 lbf). En la Figura 15, se observa que la fuerza de fricción se encuentra entre 65 N y 93 N después de los 4500 ciclos. Por lo tanto, de acuerdo a la norma ASTM D2714 se concluye que el tribómetro está en condiciones para ser operado.

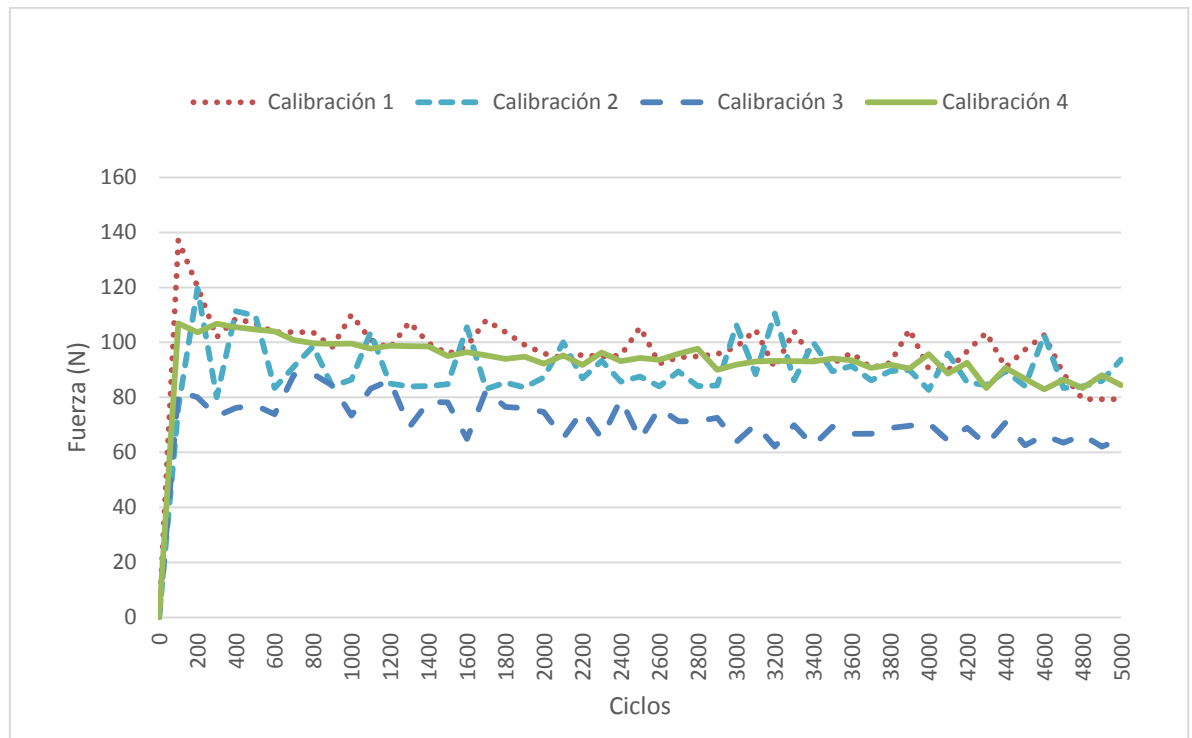


Figura 15. Datos calibración tribómetro.

5.2 Caracterización de material

5.2.1 Dureza

Los valores mostrados en la Tabla 10 son resultado de las mediciones de dureza que se realizaron a los anillos de acero AISI 1045, con intervalo de confianza del 95%.

Material	Dureza (HRC)
Acero AISI 1045	$36,93 \pm 0,733$

Tabla 10. Dureza Acero AISI 1045.

Los valores mostrados en la Tabla 11 son resultado de las mediciones de dureza que se realizaron a los bloques de bronce SAE 67, con intervalo de confianza del 95%.

Material	Dureza (BHN)
Bronce SAE 67	69,14 ± 2,51

Tabla 11. Dureza Bronce SAE 67.

5.2.2 Análisis metalográfico de probetas

En la Figura 16 se muestra la microestructura del acero AISI 1045, se observa granos de ferrita (fase blanca) y perlita laminar fina (fase oscura) que consiste en capas alternadas de ferrita y Fe_3C (cementita).

La metalografía realizada al bronce SAE 67 (ver Figura 17), indica que este tipo de bronce contiene gran cantidad de plomo poco distribuido, ver Tabla 8; el plomo es un material blando por lo tanto entre más cantidad de plomo y menos estaño tenga el bronce, éste baja su dureza.

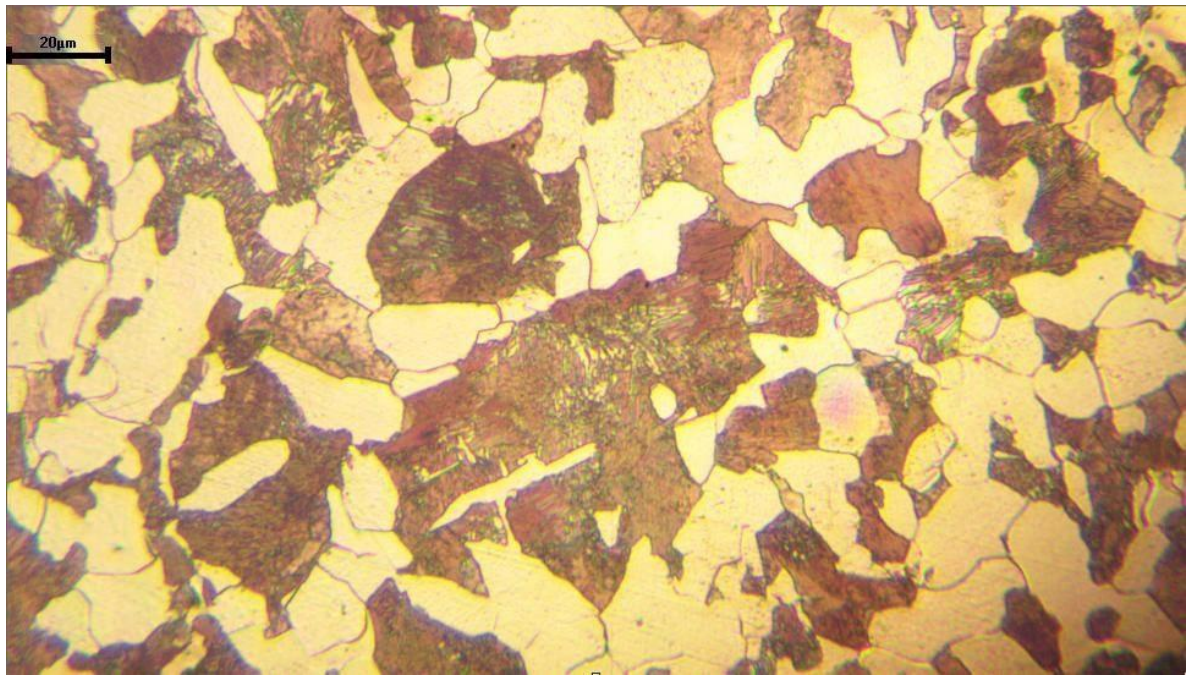


Figura 16. Microestructura a 400X del Acero 1045.

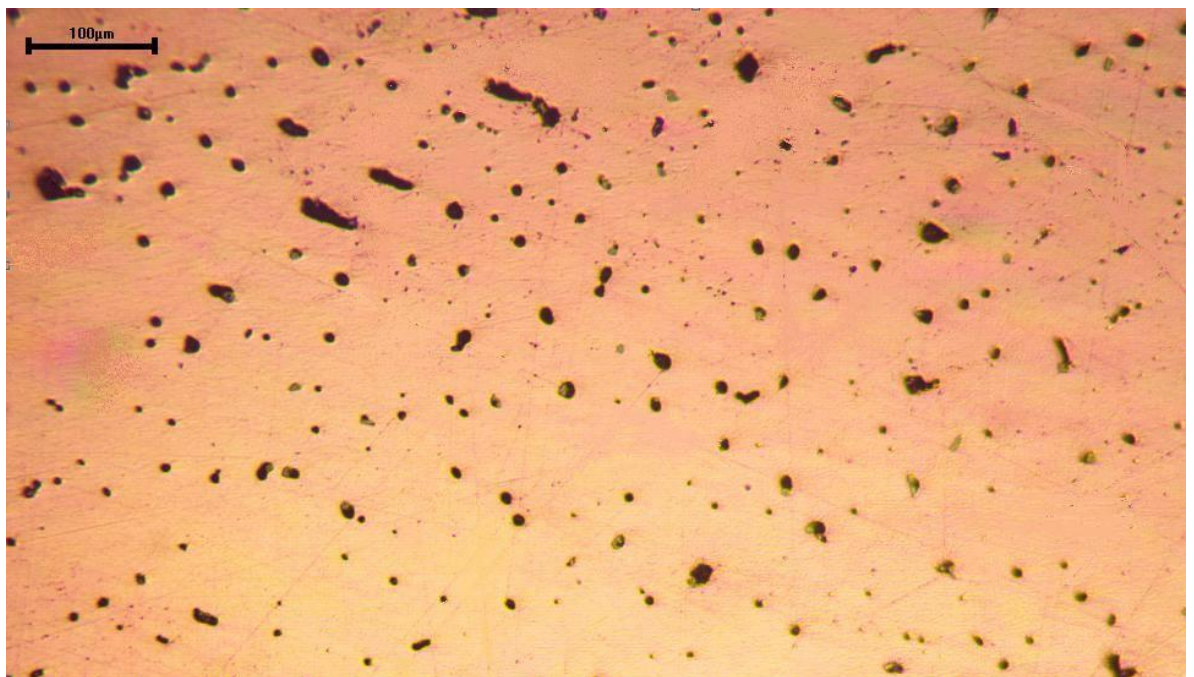


Figura 17 Microestructura a 100X del bronce SAE 67

5.2.3 Rugosidad

En las Tabla 12 y Tabla 13, se observan los resultados de las mediciones de rugosidad antes y después de las pruebas para los materiales en estudio.

Ra (μm)	AISI 1045	SAE 67
Inicial	$0,094 \pm 0,0196$	$0,145 \pm 0,015$

Tabla 12. Rugosidad de los materiales antes de las pruebas.

Condición	AISI 1045 Ra (μm)	SAE 67 Ra (μm)
C1 V1 L1	$0,423 \pm 0,028$	$1,61 \pm 0,03$
C1 V1 L2	$0,560 \pm 0,163$	$1,26 \pm 0,025$
C1 V1 L3	$0,493 \pm 0,309$	$1,24 \pm 0,12$
C1 V2 L1	$0,603 \pm 0,113$	$1,17 \pm 0,045$
C1 V2 L2	$0,560 \pm 0,138$	$1,45 \pm 0,02$
C1 V2 L3	$0,277 \pm 0,151$	$1,21 \pm 0,13$
C2 V1 L1	$0,890 \pm 0,074$	$1,21 \pm 0,028$
C2 V1 L2	$1,503 \pm 0,245$	$1,3 \pm 0,03$
C2 V1 L3	$0,620 \pm 0,054$	$1,02 \pm 0,103$
C2 V2 L1	$0,610 \pm 0,102$	$1,13 \pm 0,02$
C2 V2 L2	$0,55 \pm 0,041$	$0,94 \pm 0,03$
C2 V2 L3	$0,610 \pm 0,091$	$1,49 \pm 0,123$

Tabla 13. Rugosidad de los materiales después de las pruebas.

5.2.4 Pérdida de masa

En la Figura 18, se observa la pérdida de masa en el anillo con respecto al tipo de lubricante usado y la carga, se observa que para una velocidad de 0,13 m/s (ver Figura 18 a), los tres lubricantes presentan un aumento del desgaste al aumentar la carga, resultados que concuerdan con el estudio realizado por Mora [20], el cual hace referencia al aumento del desgaste para un aumento de carga en cuatro niveles diferentes de carga a velocidad constante, por su parte autores como Cubillán y Liccioni [21] y Cadenas [22] también coinciden en los resultados donde encuentran aumento del desgaste para un aumento de carga en cuatro niveles con velocidad variable.

Al aumentar la velocidad a 0,25 m/s (ver Figura 18 b), los lubricantes L1 y L3 presentan un comportamiento opuesto, este comportamiento está relacionado con los aditivos EP: (Extrema presión), que disminuyen el desgaste de las superficies metálicas de deslizamiento, favoreciendo la adherencia del lubricante. Estos aditivos, reaccionan químicamente y forman capas mono y polomoleculares que se reconstruyen constantemente en los sitios de altas presiones por efectos de la fricción. De esta manera impiden el contacto metal-metal, evitando los rompimientos o soldaduras de los mismos [3].

En ambos niveles de velocidad, el lubricante L3 presentó menor desgaste. Para una condición de carga 4 MPa, velocidad 0,25 m/s, L2 presentó una pérdida de masa ligeramente menor.

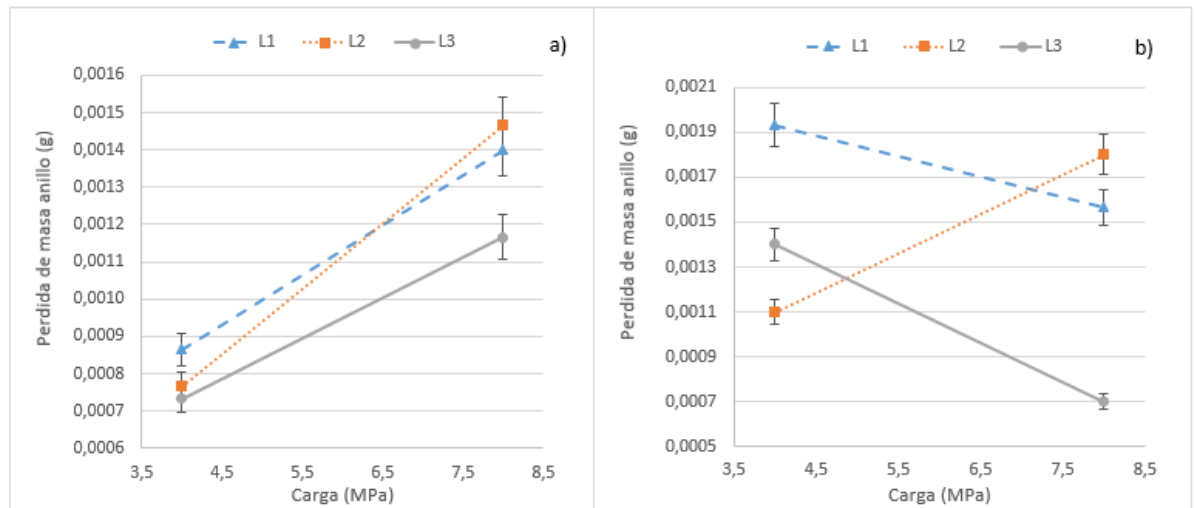


Figura 18. Interacción entre desgaste anillo, carga y lubricante; a) velocidad 0,13m/s b) velocidad 0,25m/s.

En la Figura 19, se observa la pérdida de masa en el bloque con respecto al tipo de lubricante usado y la carga, se observa que para una carga de 4 MPa (ver Figura 19 a), se encontró una tendencia a aumentar el desgaste cuando aumenta la velocidad, comportamiento consecuente a lo reportado por Cadenas [22] donde hacen referencia al aumento del desgaste para en aumento de cuatro niveles de velocidad y carga variable.

Cuando la carga aumenta a 8 MPa (Figura 19 b) se presenta el mismo comportamiento excepto para el lubricante L3 que presenta un comportamiento opuesto, cabe resaltar que este lubricante presentó gran adhesividad en la realización de las pruebas y concuerda con la ficha técnica del producto, esta característica produce una capa mono-molecular delgada que separa las superficies de contacto, esta capa se forma mediante adsorción del lubricante o, más precisamente, aditivos del lubricante sobre la superficie desgastada produciendo una disminución de la fricción bajo condiciones límites de lubricación [30].

Para cargas bajas el lubricante L2 presentó un menor desgaste, sin embargo L3 presenta un comportamiento similar a la misma carga y presenta un menor desgaste para cargas altas.

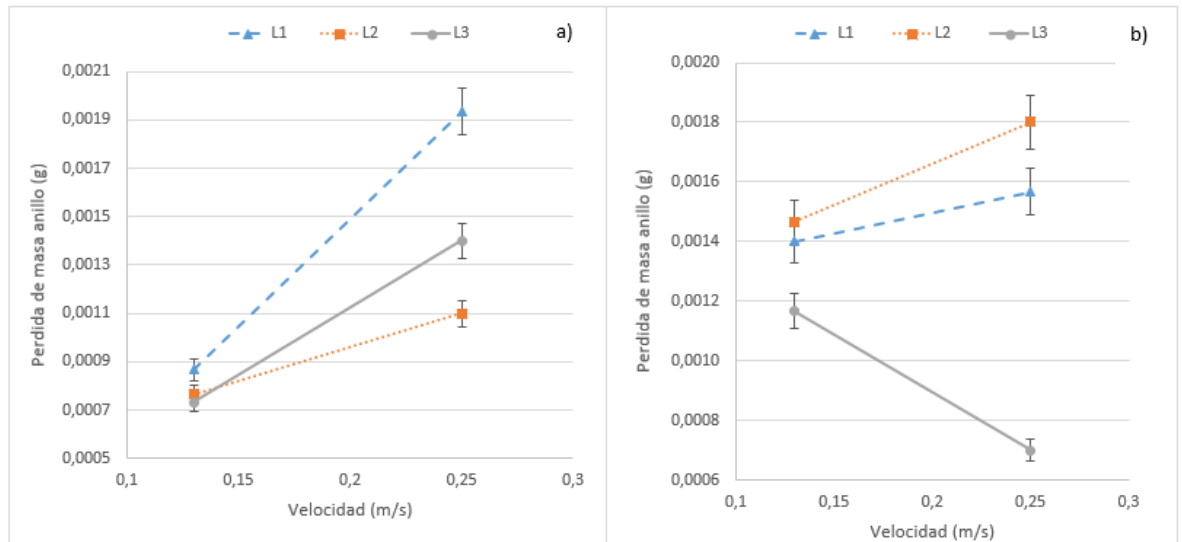


Figura 19. Interacción desgaste anillo, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa

En el caso de la pérdida de masa en los bloques, la Figura 20 muestra el comportamiento con respecto al lubricante y carga, se observa en la Figura 20 a y Figura 20 b, un aumento del desgaste cuando aumenta la carga para los 3 lubricantes, resultados que coinciden con Mora [20], Cubillán [21] y Cadenas [22]. L1 presenta un menor desgaste en ambos niveles de velocidad.

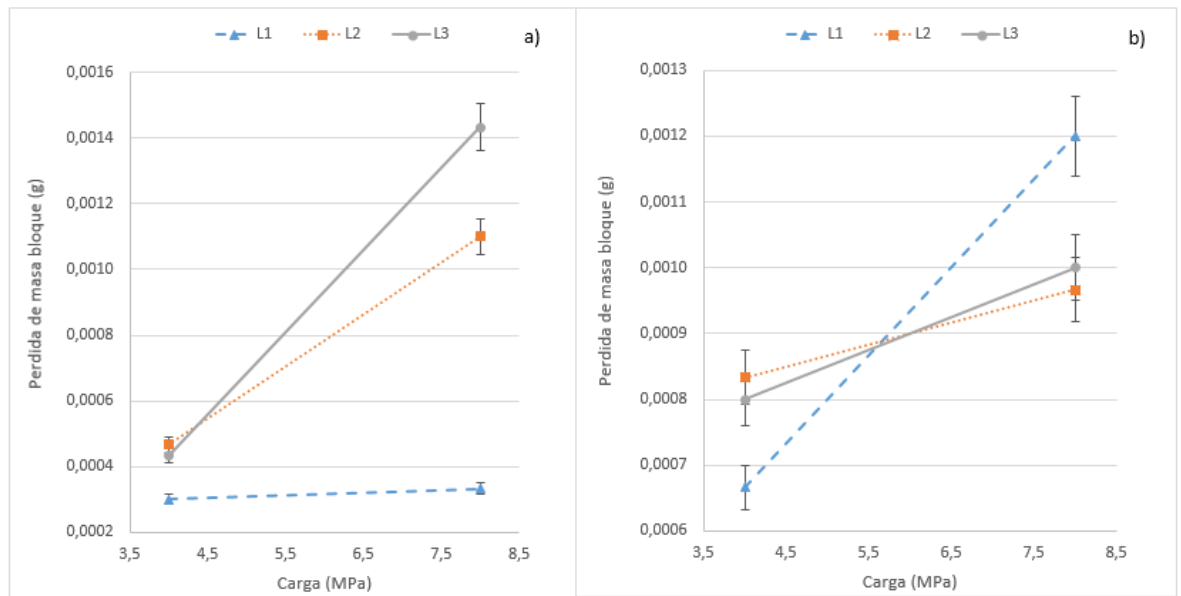


Figura 20. Interacción desgaste bloque, carga y lubricante. a) 0,13 m/s b) 0,25 m/s

En la Figura 21 a, se observa que para una velocidad alta se presenta un aumento en el desgaste, comportamiento consecuente a lo reportado por Cadenas [22] donde hacen referencia al aumento del desgaste para en aumento de cuatro niveles de velocidad y carga variable.

Al aumentar la carga a 8 MPa (ver Figura 21 b), L2 presenta pequeña variación en el desgaste y L3 presenta un comportamiento opuesto disminuye el desgaste al aumentar la velocidad, al igual que en el caso de los anillos y se debe a las propiedades de adherencia de lubricante.

L1 presenta menor desgaste para los dos niveles de carga.

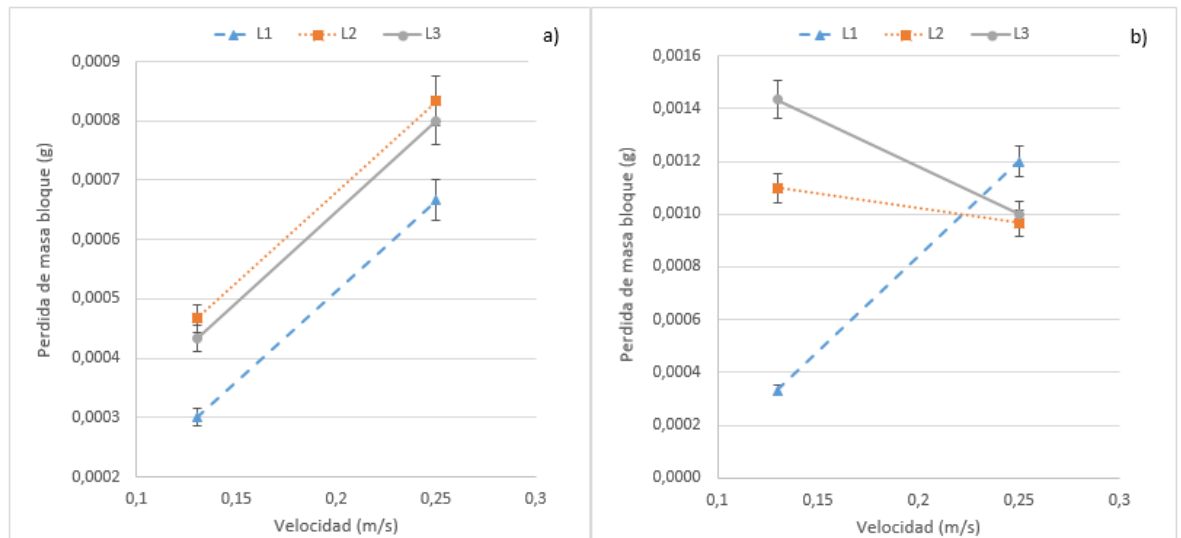


Figura 21. Interacción desgaste bloque, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa.

5.2.5 Coeficiente de fricción

En el siguiente análisis se observa el comportamiento que presenta el coeficiente de fricción respecto a los diferentes factores principales (carga, velocidad y lubricante) considerados en el estudio.

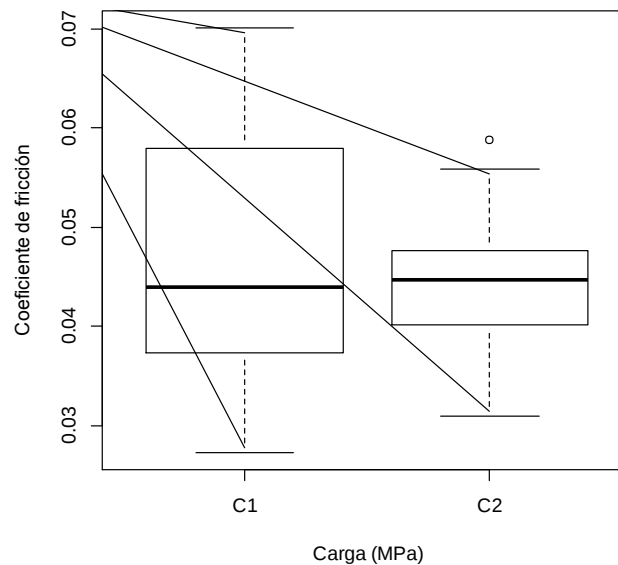


Figura 22. Comparación del coeficiente de fricción según el nivel de carga

En la Figura 22, se puede ver que al considerar un nivel de carga baja, los datos de coeficiente de fricción obtenidos presentan una mayor dispersión, en comparación con los datos obtenidos al considerar un nivel de carga alta. En ambos niveles de carga se presenta una distribución asimétrica en los datos. Se observa que el nivel medio (mediana) en ambos niveles de carga es similar, sin embargo, dado el nivel de dispersión de los datos, no podría asegurarse que no existen diferencias en los niveles de carga a los cuales se sometió el par tribológico. Al considerar un nivel de carga alta se presenta un dato atípico, el cual pudo deberse a efectos no controlables al momento de realizar las mediciones.

En la Figura 23 se observa que la dispersión de los datos de coeficiente de fricción es mayor cuando se considera un nivel de velocidad alta. En ambos niveles de velocidad se presenta una distribución asimétrica en los datos. De acuerdo al comportamiento de los datos en cada nivel de velocidad, se puede pensar que este factor produce cambios en el coeficiente de fricción al aumentar el nivel de velocidad, ya que las medianas de los nivel son diferentes.

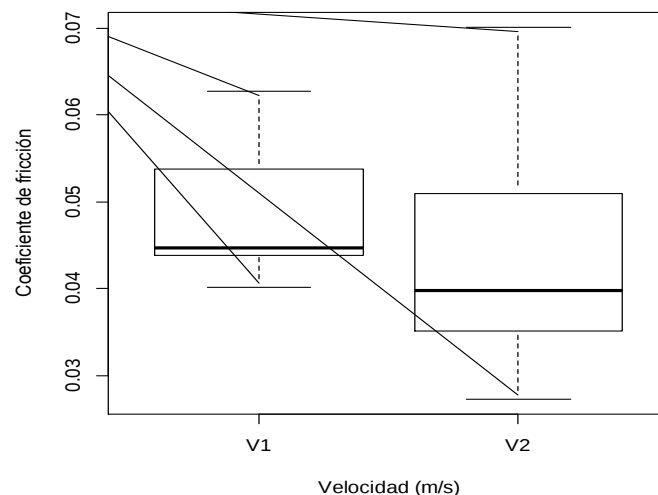


Figura 23. Comparación del coeficiente de fricción según el nivel de velocidad.

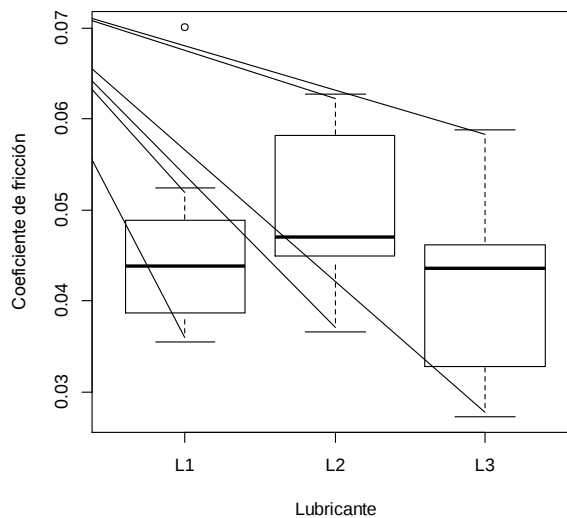


Figura 24. Comparación del coeficiente de fricción según el tipo de lubricante.

Al observar la Figura 24, los datos obtenidos al considerar el lubricante L1 presentan una distribución más simétrica en comparación a los datos obtenidos al tomar mediciones con los lubricantes L2 y L3, además, se presenta un dato atípico, el cual pudo deberse a efectos no controlables al momento de realizar las mediciones. La dispersión de los datos es mayor cuando se consideran los tipos de lubricante L2 y L3. De acuerdo a los valores de las medianas en cada tipo de lubricante, pueden existir diferencias en el coeficiente de fricción al cambiar de lubricante, sin embargo, estas diferencias no son muy significativas.

En la Figura 25 se observa la distribución de cada condición de las pruebas en el diagrama de Stribeck, se observa q los 3 lubricantes se mantienen en el régimen de lubricación limite a pesar de las variaciones de carga y velocidad, el lubricante L2 se observa un poco desplazado a la derecha debido a su alta viscosidad en comparación a los otros lubricantes, la condición que presentó un menor coeficiente de fricción fue carga 4MPa, velocidad 0,25m/s y lubricante L3, al contrario la condición que presentó mayor coeficiente de fricción fue carga 4MPa, velocidad 0,13m/s y lubricante L2.

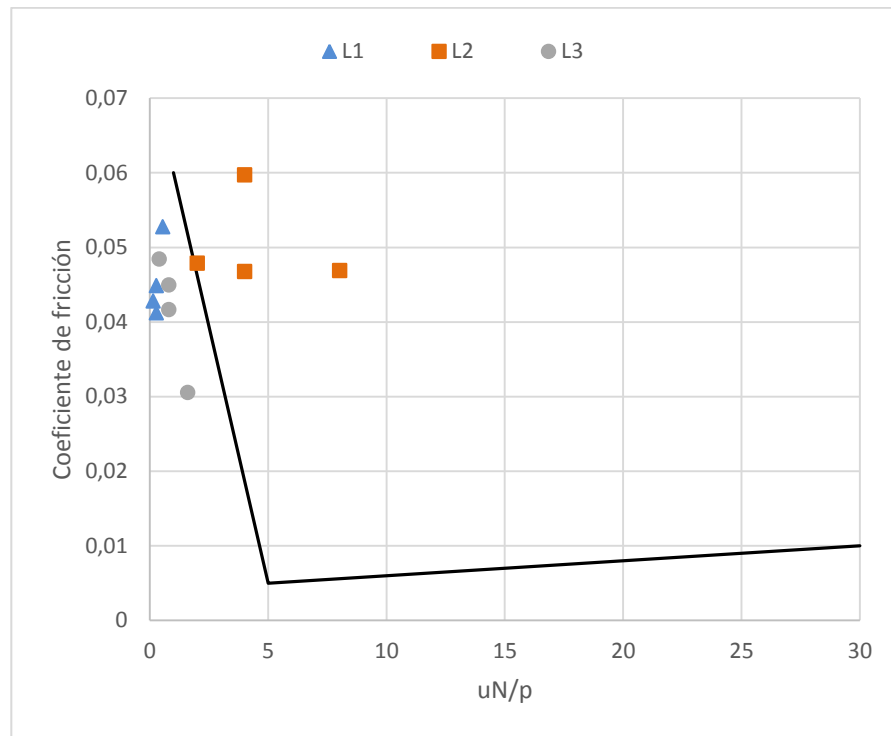


Figura 25 diagrama de Stribeck

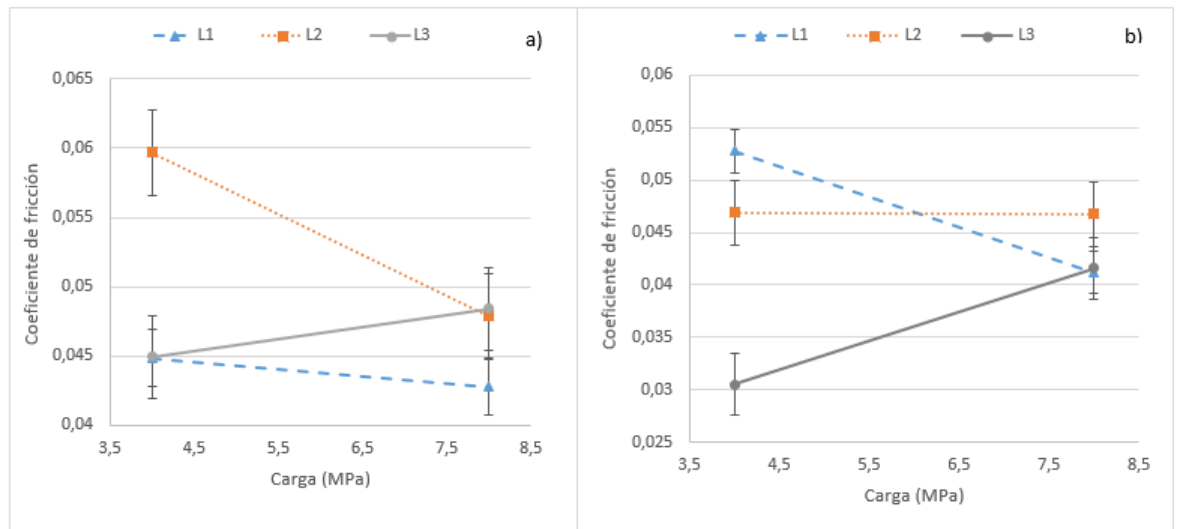


Figura 26. Interacción coeficiente de fricción, carga y lubricante. a) 0,13m/s b) 0,25m/s

En la Figura 26 a y Figura 26 b, se muestra que al aumentar el nivel de carga, el coeficiente de fricción disminuye cuando se consideran los tipos de

lubricante L1 y L2, coincide con Cubillán [21] donde hace referencia a la disminución del coeficiente de fricción al aumentar en cuatro niveles de carga. En el caso del lubricante L3, se ve afectado por los cambios de carga, este comportamiento puede presentarse debido a que la capa de lubricante L3 disminuye con el aumento de la carga ocasionando el rompimiento de la película y produciendo deformación y surcado de la superficie del material y a su vez aumento en el coeficiente de fricción.

En la Figura 27 a y Figura 27 b, se puede observar que el comportamiento del coeficiente de fricción para los lubricante L2 y L3, concuerda con estudios realizados por Pérez et al. [31] y Cubillán [21] donde se hace referencia de como la disminución de la velocidad de deslizamiento conduce a un incremento en el coeficiente de fricción debido a que ocurren procesos de fusión en las superficies.

Al considerar un nivel de velocidad y carga bajo, el que presenta menor coeficiente de fricción es L3. Cuando el nivel de carga es alto, el lubricante que presenta menor coeficiente de fricción es L1.

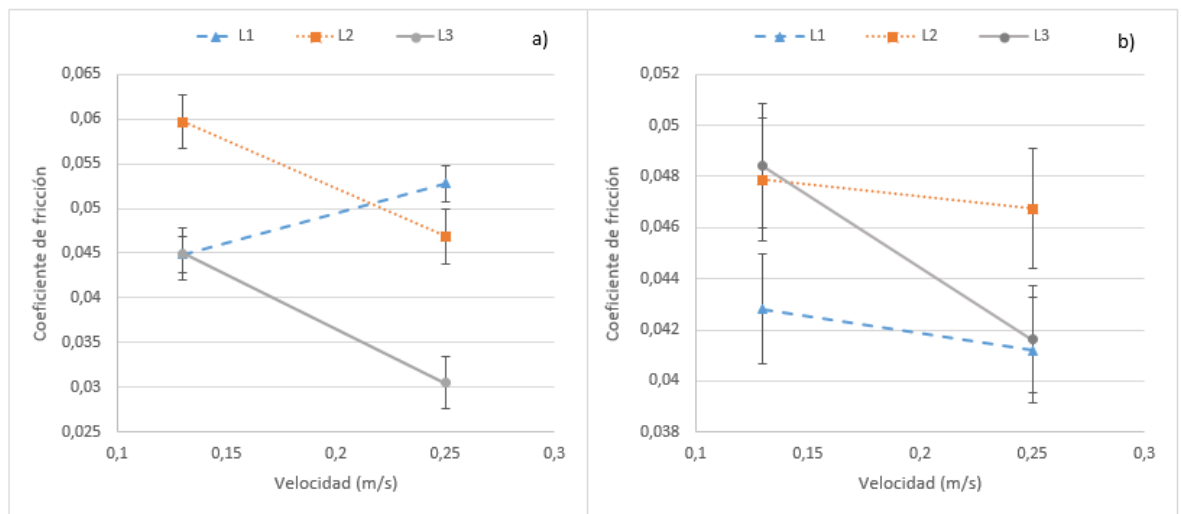


Figura 27. Interacción coeficiente de fricción, velocidad y lubricante. a) 4 MPa b) 8 MPa

En la Figura 28 se observa el coeficiente de fricción y la pérdida de masa para las condiciones de carga y velocidad (C1, C2, V1, V2) evaluadas para cada lubricante (L1, L2, L3), se observa una tendencia a disminuir la pérdida de masa al aumentar el coeficiente de fricción, resultados que concuerdan con estudios realizados por Holguín y Coronado [17], donde hacen referencia a este comportamiento inverso entre el coeficiente de fricción y la pérdida de masa para diferentes tipos de materiales.

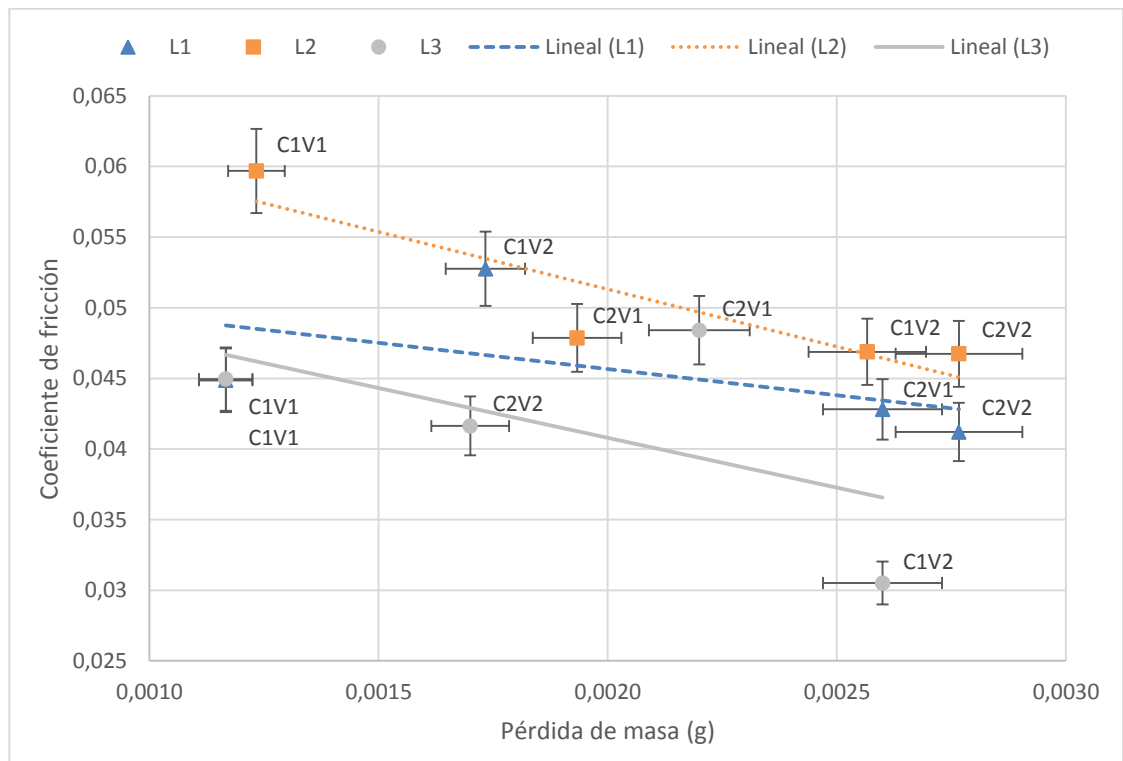


Figura 28. Efecto de la carga y la velocidad en el coeficiente de fricción y la pérdida de masa

5.3 Análisis estadístico

5.3.1 Coeficiente de fricción

Para determinar que efectivamente los efectos, tanto de los factores principales como de las interacciones son significativos, es necesario llevar a cabo un análisis de varianza (ANOVA).

<i>Fuente de Variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Lubricante (A)	2	0,0004786	2,39E-04	3,308	0,0538
Velocidad (B)	1	0,000208	2,08E-04	2,867	0,1028
Carga (C)	1	0,0000302	3,03E-05	0,418	0,524
AB	2	0,0003046	1,52E-04	2,106	0,1437
AC	2	0,0003755	1,88E-04	2,596	0,0954
BC	1	0,0000242	2,42E-05	0,335	0,5684
ABC	2	0,0001897	9,49E-05	1,311	0,2881
Error	24	0,001736	7,23E-05		
Total	35				

Tabla 14. Análisis de varianza.

La Tabla 14 indica que ninguno de los efectos producidos por los factores principales y las interacciones entre estos factores, afectan significativamente al coeficiente de fricción ($Valor - p > 0,05$), esto quiere decir que al aplicar cualquiera de los lubricantes, velocidades, cargas y sus posibles combinaciones consideradas en el montaje del par tribológico bloque-anillo, no

se producen diferencias significativas en el coeficiente de fricción, por tanto, se esperaría que las variaciones en las mediciones del coeficiente de fricción sean mínimas. Sin embargo, podría pensarse que el efecto producido por el tipo de lubricante es significativo, ya que el valor-p de este factor es muy cercano al nivel de confianza ($\alpha = 0,05$)

Ahora se prueba la adecuación del modelo, con el fin de determinar si los resultados obtenidos son confiables. En la Figura 29 se presenta un análisis gráfico de los supuestos del modelo.

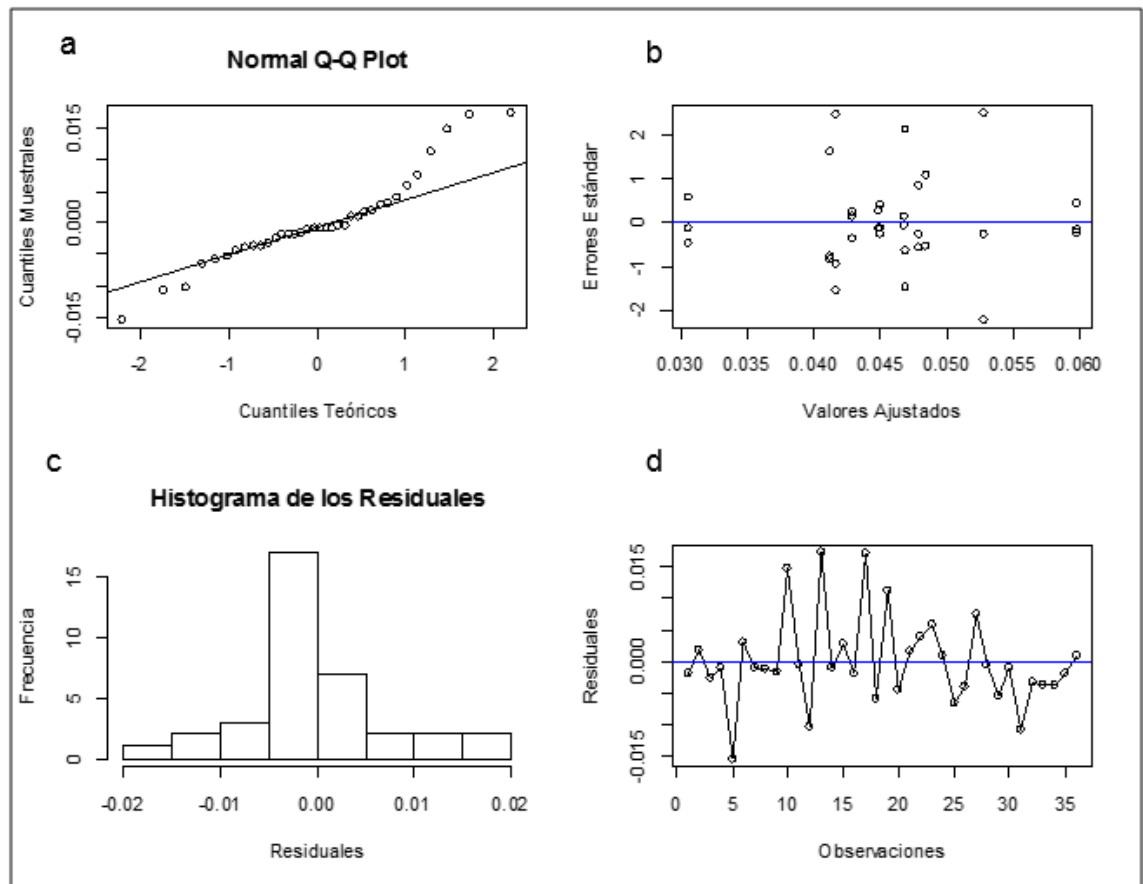


Figura 29, Gráficos para los supuestos del modelo.

En la Figura 29 a, se grafican los cuantiles muestrales contra los cuantiles teóricos de la distribución normal obtenidos a partir de los residuales del

modelo ajustado, esta figura es utilizada para analizar el supuesto de normalidad en los errores. Este supuesto se cumple si los cuantiles muestrales aparecen sobre la línea recta, indicando un buen ajuste sobre los cuantiles teóricos de la distribución normal, situación que no se presenta en este caso, ya que los valores extremos no caen sobre la línea recta, mostrando una distribución con colas pesadas, lo mismo se puede apreciar en el histograma de los residuales (ver Figura 29 c). Con respecto al supuesto de varianza constante en los errores, en la Figura 29 b, se grafican los valores ajustados contra los errores estándar, debido a que en la figura se presenta una dispersión de los datos alrededor de cero y no una tendencia particular, se podría pensar que este supuesto se cumple. En la Figura 29 d, se grafican los valores de los residuales en el orden en que fueron obtenidos, como se puede observar una repartición aleatoria de estos residuales por encima y por debajo del valor de cero, se podría pensar que el supuesto de errores incorrelacionados se cumple. Las anteriores explicaciones implican que el supuesto de media (promedio) cero en los errores se cumple.

Al parecer, el único supuesto que se estaría incumpliendo es el de normalidad. Para corroborar lo que se ha dicho, se llevan a cabo pruebas más formales sobre los residuales del modelo, que se consideran estimadores de los errores.

Supuesto	Prueba	Valor-p
Normalidad	Shapiro-Wilk	0,014
Varianza constante	Levene	0,575
Errores incorrelacionados	Wald-Wolfowitz	0,906

Tabla 15. Pruebas formales para los supuestos del modelo.

De acuerdo a la información de la Tabla 15, efectivamente el supuesto de normalidad no se cumple, ya que el valor-p de la prueba de normalidad es

menor que el nivel de significancia, que es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula dado que es verdadera. Esto pudo deberse a los valores extremos obtenidos al realizar las mediciones de coeficiente de fricción, generando una distribución de colas pesadas como se menciona en el análisis gráfico. Los supuestos de varianza constante y de errores incorrelacionados se cumplen ($Valor - p > 0,05$).

Para corregir esta inconsistencia debida a que el supuesto de normalidad en los errores no se cumple, se hace necesario aplicar una transformación a los valores de la variable de respuesta (coeficiente de fricción) y a estos valores transformados se les realiza el análisis de varianza. Al realizar este procedimiento se encontró que la transformación tomando el logaritmo natural y la raíz cuadrada de los valores, el problema no se corrige, sin embargo, cuando se aplica el inverso de la raíz cuadrado y la inversa de los valores del coeficiente de fricción, el supuesto de normalidad se cumple, aunque el resultado obtenido no es muy contundente. Debido a lo anterior y a que al realizar este tipo de transformaciones la interpretación de los resultados es compleja, el análisis se mantiene sobre los resultados iniciales, es decir, sin considerar la transformación.

La decisión anterior se toma con base a que en el ANOVA, cuando se trabaja con muestras pequeñas, tienden a ocurrir fluctuaciones significativas, por lo que la aparición de una desviación moderada de la normalidad no implica necesariamente una violación seria del supuesto Montgomery, [32]. Lo anterior indica que el ANOVA es robusto ante el incumplimiento del supuesto de normalidad, es decir, los resultados obtenidos por el ANOVA no se ven afectados por pequeñas variaciones relacionadas a la hipótesis de normalidad del modelo. Diferentes estudios de simulación, en los que se utilizan varias distribuciones no normales, han demostrado que la tasa de falsos positivos (error tipo II) no se ve afectada en gran medida por esta violación de la

hipótesis Schmider, et al. [33], Glass et al. [34], Harwell et al. [35], Lix et al. [36]. De acuerdo a la información de la Tabla 15 y el supuesto de normalidad en este caso presenta desviaciones moderadas, por tanto, los resultados que se obtuvieron son válidos.

Aunque el efecto producido por el factor Lubricante no es significativo sobre el coeficiente de fricción, podría pensarse lo contrario, ya que como se dijo anteriormente el valor-p de este factor es muy cercano al nivel de confianza. Por tal motivo, se realiza la prueba de comparación múltiple de Duncan, con el fin de determinar qué pares de medias de los lubricantes podrían ser diferentes.

Las hipótesis a contrastar son:

$$H_0: \mu_i = \mu_j \quad vs. \quad H_a: \mu_i \neq \mu_j$$

Con $i, j = L1, L2, L3; i \neq j$.

Ahora se organizan los promedios de coeficiente de fricción, según el tipo de lubricante, de manera ascendente:

$$\mu_{L3} = 0,041373901 \quad \mu_{L1} = 0,045407865 \quad \mu_{L2} = 0,050291853$$

El estadístico de prueba, denominado rango mínimo de significación, viene dado por:

$$R_p = r_\alpha(p, f) S_{\bar{y}_i}, \quad p = 2, 3, \dots, a$$

Donde $r_\alpha(p, f)$ se obtienen a través de las tablas de los rangos significativos, $\alpha = 0,05$ es el nivel de significancia, f son los grados de libertad del error, p es

el número de medias entre la diferencia de la media más grande y más pequeña consideradas y $S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MS_E}{n}} = \sqrt{\frac{0,000086917}{12}} = 0,0026913$

Se acepta que no hay diferencia significativa entre la media mayor y la media menor de p medias, si se verifica que:

$$|\mu_i - \mu_j| \leq R_p$$

Y serán consideradas iguales también todas las medias comprendidas entre ellas.

Entonces, ahora se prueban las diferencias observadas entre las medias, empezando con la más grande contra la menor, y se comparan con el rango mínimo de significación R_p respectivo.

A través de la tabla de rangos significativos de Duncan (Anexo 1), se obtienen los siguientes valores:

$$r_{0,05}(2, 33) = 2,877$$

$$r_{0,05}(3, 33) = 3,024$$

Al hacer las comparaciones se obtiene:

$$\mu_{L3} \text{ vs. } \mu_{L2} \Rightarrow R_2 = r_{0,05}(3, 33) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} = 0,00814 \Rightarrow |\mu_{L3} - \mu_{L2}| = 0,00892$$

$$> 0,00814$$

$$\mu_{L3} \text{ vs. } \mu_{L1} \Rightarrow R_2 = r_{0,05}(2, 33) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} = 0,00774 \Rightarrow |\mu_{L3} - \mu_{L1}| = 0,00403$$

$$< 0,00774$$

$$\mu_{L1} \text{ vs. } \mu_{L2} \Rightarrow R_2 = r_{0,05}(2, 33) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} = 0,00774 \Rightarrow |\mu_{L1} - \mu_{L2}| = 0,00488$$

$$< 0,00774$$

De esta manera, el resultado obtenido indica que existen diferencias entre la aplicación del lubricante L2 y el lubricante L3. Es de esperar que independiente de las condiciones experimentales los resultados obtenidos de coeficiente de fricción para estos dos lubricantes serán distintos. L3 presenta un menor coeficiente en la mayoría de condiciones experimentales evaluadas.

5.3.2 Pérdida de masa

A continuación se realiza el análisis de varianza (ANOVA) de la pérdida de masa tanto de anillo como del bloque, con el fin de determinar si los efectos producidos por los factores principales (carga, velocidad y lubricante) y sus interacciones sobre la pérdida de masa del anillo y del bloque, son significativos.

<i>Fuente de Variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Lubricante (A)	2	1,20E-06	6,01E-07	0,411	0,667
Velocidad (B)	1	1,10E-06	1,10E-06	0,755	0,394
Carga (C)	1	4,20E-07	4,23E-07	0,289	0,596
AB	2	4,00E-07	2,01E-07	0,138	0,872
AC	2	1,12E-06	5,61E-07	0,384	0,685
BC	1	1,03E-06	1,03E-06	0,708	0,408
ABC	2	5,40E-07	2,69E-07	0,184	0,833
Error	24	3,51E-05	1,46E-06		
Total	35				

Tabla 16. Análisis de varianza de la pérdida de masa anillo.

La Tabla 16 indica que ninguno de los efectos producidos por los factores principales y las interacciones entre estos factores, afectan significativamente la pérdida de masa del anillo, es decir, al aplicar cualquiera de los lubricantes, velocidades, cargas y sus posibles combinaciones consideradas en el montaje del par tribológico bloque-anillo, no se producen diferencias significativas en la pérdida de masa del anillo, por tanto, se esperaría que las variaciones en las mediciones de pérdida de masa del anillo sean mínimas. Esto se pudo observar en el análisis gráfico.

Ahora se prueba la adecuación del modelo a través de un análisis gráfico de los residuales y utilizando pruebas formales. En la Figura 30 se presenta un análisis gráfico de los supuestos del modelo.

En la Figura 30 a, se grafican los cuantiles muestrales contra los cuantiles teóricos de la distribución normal obtenidos a partir de los residuales del modelo ajustado, esta figura es utilizada para analizar el supuesto de normalidad en los errores. Se observa que los cuantiles muestrales tienden a sobreponerse sobre la línea recta, indicando un buen ajuste a la distribución normal. El histograma de frecuencias (Figura 30 c) no muestra claramente una

distribución normal en los residuales, esto puede deberse a los pocos datos que se tienen. Con respecto al supuesto de varianza constante en los errores, en la Figura 30 b, se grafican los valores ajustados contra los errores estándar, puede apreciarse que la dispersión de estos datos tiene una forma de cono que se abre a medida que aumenta el valor ajustado, esto podría indicar el incumplimiento de este supuesto. En la Figura 30 d, se grafican los valores de los residuales en el orden en que fueron obtenidos, como se puede observar una repartición aleatoria de estos residuales por encima y por debajo del valor de cero, se podría pensar que el supuesto de errores incorrelacionados se cumple. Las anteriores explicaciones implican que el supuesto de media (promedio) cero en los errores se cumple.

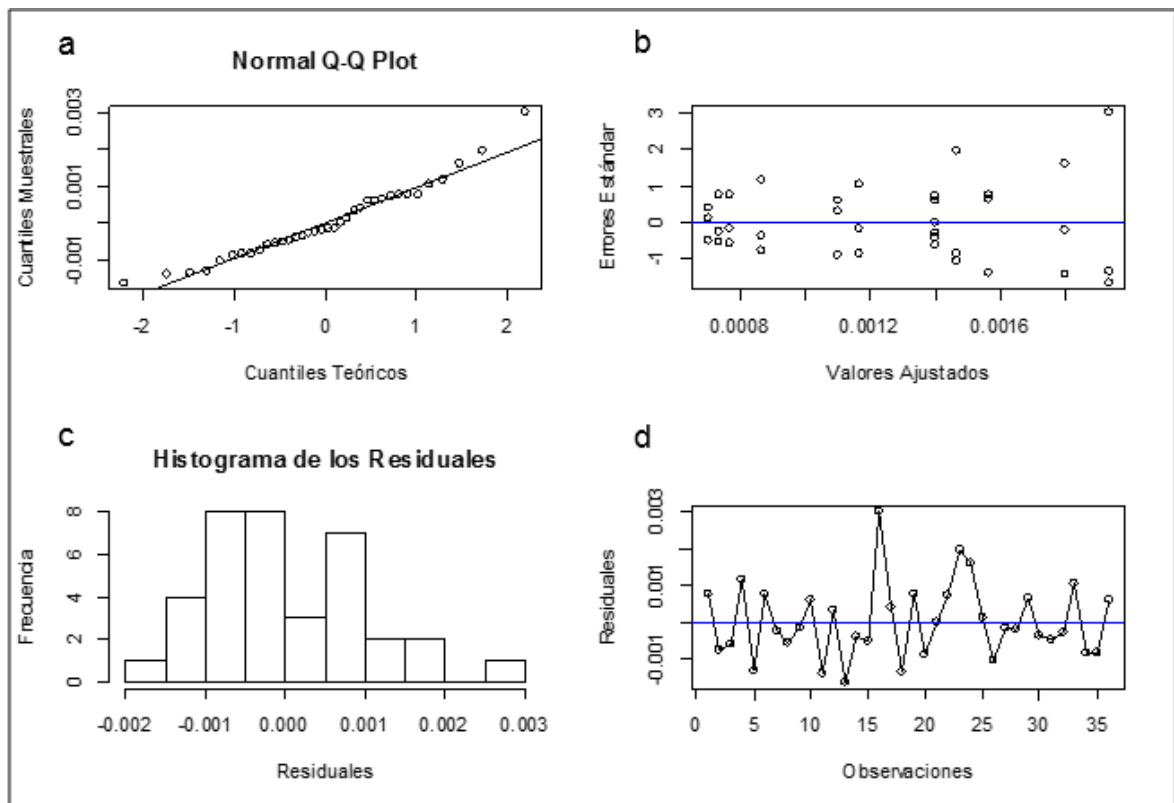


Figura 30. Gráficos para los supuestos del modelo (Masa perdida del anillo).

El único supuesto que se estaría incumpliendo es el de varianza constante. Para corroborar lo que se ha dicho, se llevan a cabo pruebas más formales sobre los residuales del modelo.

Supuesto	Prueba	Valor-p
Normalidad	Shapiro-Wilk	0.1814
Varianza constante	Bartlett	0.0839
Errores incorrelacionados	Wald-Wolfowitz	0.6163

Tabla 17. Pruebas formales para los supuestos del modelo.

De acuerdo a la información de la Tabla 17, el supuesto de varianza constante en los residuales se cumple, ya que el valor-p de la prueba de Bartlett es mayor que el nivel de significancia. Los supuestos de normalidad y de errores incorrelacionados se cumplen ($Valor - p > 0,05$). Lo anterior confirma que el modelo es adecuado y por lo tanto sus resultados son confiables estadísticamente.

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor-p
Lubricante (A)	2	5,51E-07	2,75E-07	0,403	0,673
Velocidad (B)	1	4,90E-07	4,90E-07	0,717	0,406
Carga (C)	1	1,60E-06	1,60E-06	2,347	0,139
AB	2	6,95E-07	3,48E-07	0,508	0,608
AC	2	1,57E-07	7,86E-08	0,115	0,892
BC	1	1,60E-07	1,60E-07	0,234	0,633
ABC	2	6,95E-07	3,48E-07	0,508	0,608
Error	24	1,64E-05	6,84E-07		
Total	35				

Tabla 18. Análisis de varianza de la pérdida de masa bloque.

Los resultados obtenidos en la Tabla 18, muestran la misma conclusión que el análisis de varianza realizado para la pérdida de masa del anillo, de esta manera se tiene que ninguno de los efectos producidos por los factores principales y las interacciones entre estos factores, afectan significativamente

la pérdida de masa del bloque, es decir, al aplicar cualquiera de los lubricantes, velocidades, cargas y sus posibles combinaciones consideradas en el montaje del par tribológico bloque-anillo, no se producen diferencias significativas en la pérdida de masa del bloque. Esto también se pudo observar en el análisis gráfico.

A continuación se analiza la adecuación del modelo obtenido. En la Figura 31 se presenta un análisis gráfico de los supuestos del modelo.

En la figura del Q-Q Plot (Figura 31 a), al parecer se presentan inadecuaciones en el supuesto de normalidad, ya que los valores extremos no caen sobre la línea recta, mostrando una distribución con una cola inferior pesada, tal cual como se muestra en el histograma de frecuencias (Figura 31 c). Con respecto al supuesto de varianza constante en los errores, en la Figura 31 b, puede apreciarse que la dispersión de los datos tiene una forma de cono que se abre a medida que aumenta el valor ajustado, esto podría indicar el incumplimiento de este supuesto. En la Figura 31 d, se grafican los valores de los residuales en el orden en que fueron obtenidos, se puede ver que la repartición de los datos por encima y por debajo del valor de cero no es del todo aleatorio, se podría pensar que el supuesto de errores incorrelacionados no se cumple. Las figuras muestran que el supuesto de media (promedio) cero en los errores se cumple.

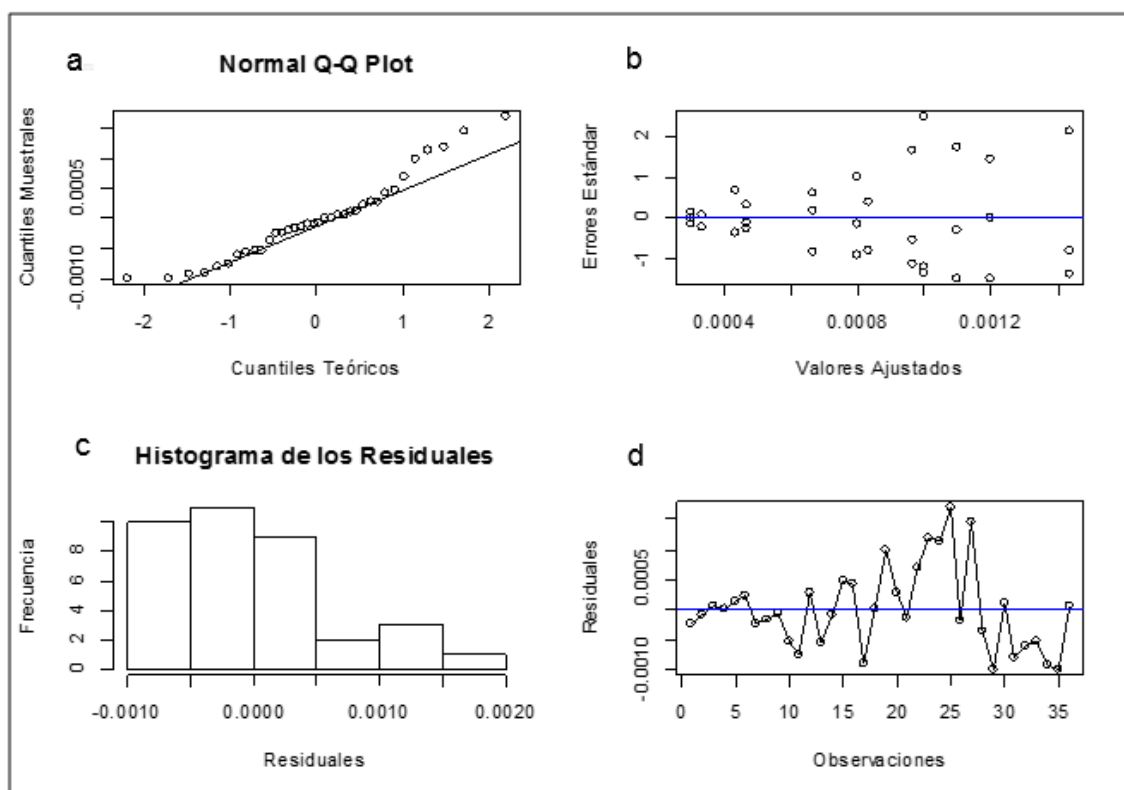


Figura 31. Gráficos para los supuestos del modelo (Masa perdida del bloque)

Para verificar los resultados en el análisis gráfico de los supuestos del modelo, se llevan a cabo pruebas más formales.

Supuesto	Prueba	Valor-p
Normalidad	Shapiro-Wilk	0.0692
Varianza constante	Bartlett	0.305
Errores incorrelacionados	Wald-Wolfowitz	0.0573

Tabla 19. Pruebas formales para los supuestos del modelo.

De acuerdo a la información de la Tabla 19, al contrario de los resultados obtenidos en el análisis gráfico, todos los supuestos del modelo se cumplen, esto confirma que el modelo es adecuado y por lo tanto sus resultados son confiables.

5.3.3 Análisis de potencia consumida

Las Tabla 20, Tabla 21 Tabla 22, muestran los parámetros que se presentan en un guijo y una chumacera en un Ingenio, necesarios para los cálculos posteriores.

Parámetros del guijo y chumacera				
RPM	Presión(PSI)	Diámetro pistón (pulg)	Diámetro guijo (pulg)	No de chumaceras x maza
5	3000	16	19	2
10	1000	16	19	2

Tabla 20 Parámetros del guijo y chumacera usados en los cálculos de potencia

Fracción potencia consumida por maza	
Masa principal	1
Masa auxiliar 1	0.3
Masa auxiliar 2	0.6

Tabla 21 Fracción de potencia consumida por cada maza

Potencia consumida x molino (kw)	600
Numero de molinos	6
Potencia consumida x molinos (kw)	3600

Tabla 22 Potencia consumida

Las formulas (5) y (6) permiten calcular la fuerza y la velocidad mostradas en la Tabla 4.21.

$$\text{Fuerza (lbf)} = \text{Presión (psi)} \times \text{Área (pulg}^2\text{)} \quad (5)$$

$$\text{Velocidad de deslizamiento (pie/min)} = (\pi \times D \times n) / 12 \quad (6)$$

Donde:

$$\pi = 3.141592654$$

D (pulg) = Diámetro guijo

n = rpm

Fuerza Máxima (lbf)	603185,79
Fuerza Mínima (lbf)	201061,93
Velocidad del eje máxima (pie/min)	49,742
Velocidad del eje mínima (pie/min)	24,870

Tabla 23 Fuerza y velocidad del guijo

$$\text{Potencia (HP)} = (F \times v \times \mu) / 33000 \quad (7)$$

Dónde: F = Fuerza (lbf)

v = Velocidad (pie/min)

μ = coeficiente de fricción

Por medio de la fórmula (7) se calculó la potencia causada por fricción, ver Tabla 24.

Condición	Potencia (HP)	Potencia (Kw)
C1 V1 L1	6,798	5,070
C1 V1 L2	9,044	6,744
C1 V1 L3	6,810	5,079
C1 V2 L1	19,458	14,510
C1 V2 L2	21,758	16,225
C1 V2 L3	22,005	16,410
C2 V1 L1	15,990	11,924
C2 V1 L2	14,207	10,595
C2 V1 L3	9,248	6,896
C2 V2 L1	37,461	27,935
C2 V2 L2	42,496	31,690
C2 V2 L3	37,849	28,225

Tabla 24. Potencia causada por fricción.

Como ya se tiene la potencia para cada condición, se calculó la diferencia o ahorro de potencia entre los tipos de lubricantes (L1, L2 y L3) en las mismas condiciones de carga (C1, C2) y velocidad (V1, V2), ver Tabla 25.

Condición	Comparación Lubricantes	Diferencia (Kw)
C1V1	L2-L1	1,674
	L3-L1	0,009
	L2-L3	1,665
C2V1	L2-L1	1,715
	L3-L1	1,900
	L3-L2	0,184
C1V2	L1-L2	1,329
	L1-L3	5,028
	L2-L3	3,699
C2V2	L2-L1	3,755
	L3-L1	0,289
	L2-L3	3,465

Tabla 25 Potencia ahorrada entre los tipos de lubricantes.

La Tabla 26, muestra la potencia ahorrada por todas las mazas de los seis molinos de caña de azúcar, teniendo en cuenta que cada molino tiene una maza principal y dos mazas auxiliares, de las cuales una de las mazas auxiliares consumen un 30% y la otra 60% de la potencia consumida por la maza principal de cada molino. Generalmente hay doce chumaceras de mazas principales, doce de las mazas que consumen 30% y doce de las mazas que consumen 60%. La fórmula (8) permite calcular la potencia ahorrada en los seis molinos del ingenio por maza, al final nos muestra el total de potencia ahorrada en el ingenio en todos los molinos.

$$P = N \times \Delta \times z \quad (8)$$

Dónde: P = potencia ahorrada por maza de los seis molinos

N = Numero de chumaceras por maza de los seis molinos

Δ = Ahorro de potencia por chumacera entre dos pares tribológicos

z = Fracción de potencia consumida por maza

Condición	Comparación Lubricantes	Potencia ahorrada			Total
		Masa principal	Masa auxiliar 1	Masa auxiliar 2	
C1V1	L2-L1	20,094	6,028	12,056	38,178
	L3-L1	0,109	0,033	0,065	0,207
	L2-L3	19,985	5,995	11,991	37,971
C2V1	L2-L1	20,583	6,175	12,350	39,108
	L3-L1	22,795	6,838	13,677	43,310
	L3-L2	2,211	0,663	1,327	4,201
C1V2	L1-L2	15,949	4,785	9,569	30,303
	L1-L3	60,333	18,100	36,200	114,632
	L2-L3	44,384	13,315	26,630	84,330
C2V2	L2-L1	45,057	13,517	27,034	85,608
	L3-L1	3,473	1,042	2,084	6,598
	L2-L3	41,584	12,475	24,950	79,010

Tabla 26 Potencia ahorrada en las chumaceras de las masas de los 6 molinos típicos de un Ingenio

La Tabla 27 muestra la energía que se ahorraría el ingenio de acuerdo con la que consume actualmente por los seis molinos, por usar un determinado lubricante en lugar de otro con el que se está comparando y además permite saber los Kw/hora ahorrados en un año y el ahorro de dinero que ello acarrearía. El valor del kw/hora oscila entre 180 y 200 pesos.

Condición	Comparación Lubricantes	% Energía ahorrada	KW-h/año	Costo (\$/año)
C1V1	L2-L1	1,060	334438,990	66887797,945
	L3-L1	0,006	1811,339	362267,739
	L2-L3	1,055	332627,651	66525530,206
C2V1	L2-L1	1,086	342590,014	68518002,769
	L3-L1	1,203	379393,123	75878624,552
	L3-L2	0,117	36803,109	7360621,783
C1V2	L1-L2	0,842	265454,125	53090825,089
	L1-L3	3,184	1004180,681	200836136,101
	L2-L3	2,342	738726,555	147745311,012
C2V2	L2-L1	2,378	749924,372	149984874,353
	L3-L1	0,183	57800,495	11560099,011
	L2-L3	2,195	692123,877	138424775,342

Tabla 27 Porcentaje de energía ahorrada y costos

Al comparar el dinero ahorrado que se cita en la tabla anterior por usar un lubricante en lugar del otro, se observa que para la condición de carga $C1 = 4$ Mpa y $V1 = 0,13$ m/s se presentó un ahorro de 66887797 y 66887797 con la aplicación del lubricante L3 y L1 respectivamente en lugar del lubricante L2.

Para la condición $C2 = 8$ Mpa y $V1 = 0,13$ m/s se presentó un ahorro para el lubricante L1 de 68518002 y 75878624 en comparación con el lubricante L2 y L3 respectivamente.

Para la condición $C1 = 4$ MPa y $V2 = 0,25$ m/s se presentó un ahorro para el lubricante L3 de 200836136 y 147745311 en comparación con el lubricante L1 y L2 respectivamente.

Para la condición $C2 = 8$ MPa y $V2 = 0,25$ m/s se presentó un ahorro para el lubricante L1 de 149984874 con respecto al lubricante L2, por su parte el

lubricante L3 presentó un ahorro de 138424775 en comparación con el lubricante L2.

5.4 Análisis de la superficie de desgaste

Se identificó los mecanismos de desgaste para las condiciones que presentaron un coeficiente de fricción más alto 0,05968 como es el caso para el lubricante L2 con una carga neta de 4 MPa y una velocidad de 0,13 m/s, y un coeficiente de fricción más bajo 0,03051 para el lubricante L3 con una carga neta de 4 MPa y una velocidad de 0,25 m/s.

Para los anillos (ver Figura 32) de la condición lubricante L2 con una carga neta de 4 MPa y una velocidad de 0,13 m/s correspondiente a un coeficiente de fricción mayor de 0,05968 presentan marcas de desgaste con mayor degradación (surcos más definidos) y una pérdida de masa menor de 0,0008 g en comparación con la otra condición analizada.

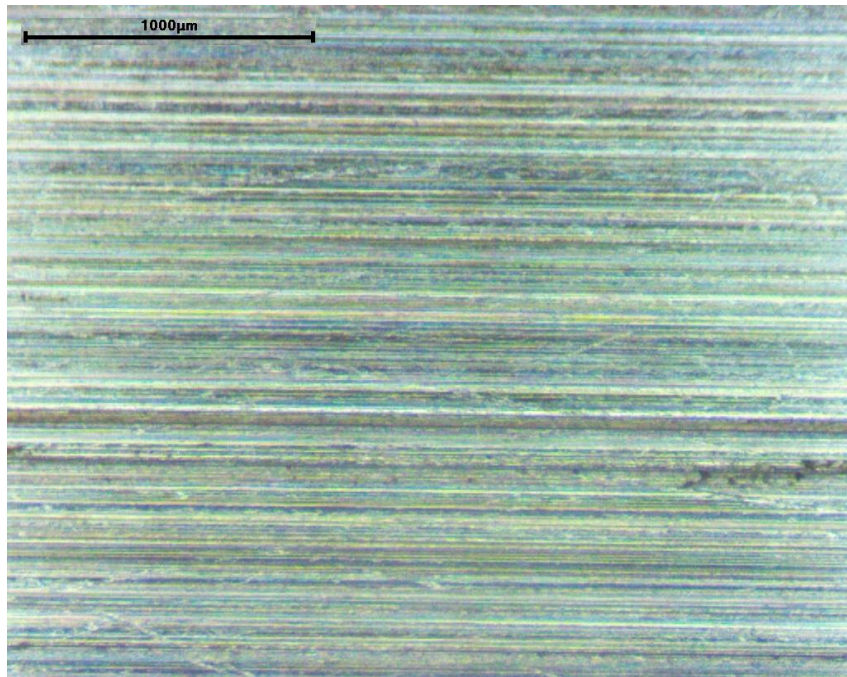


Figura 32. 5X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2

Las figuras Figura 33 y Figura 34 muestran los resultados obtenidos de la superficie desgastada usando microscopía electrónica de barrido (SEM) de los anillos de acero AISI 1045 usados para las pruebas, se observa surcos típicos de abrasión y marcas de desgaste por deformación produciendo una baja pérdida de masa.

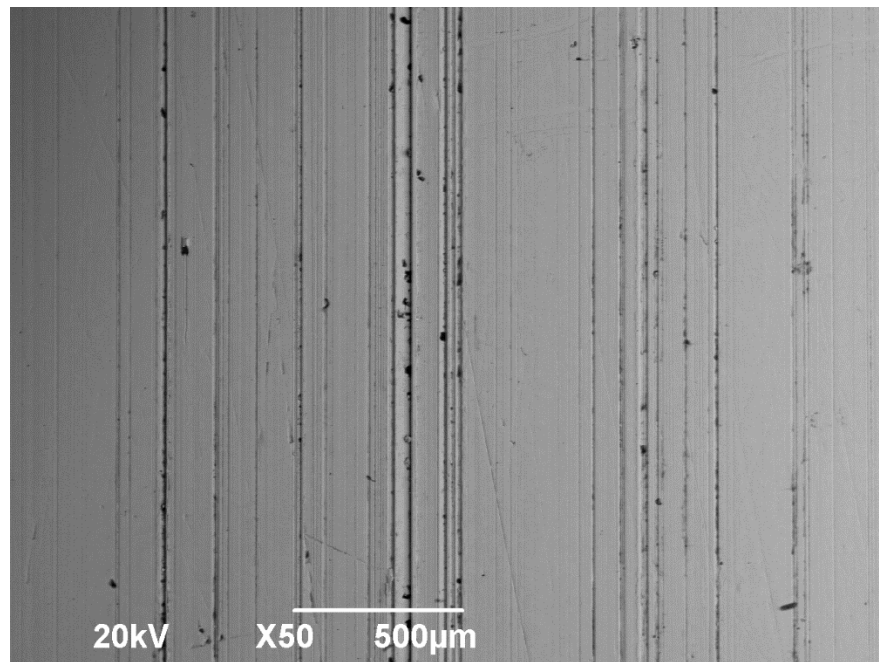


Figura 33 SEM 50 X AISI Acero 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2

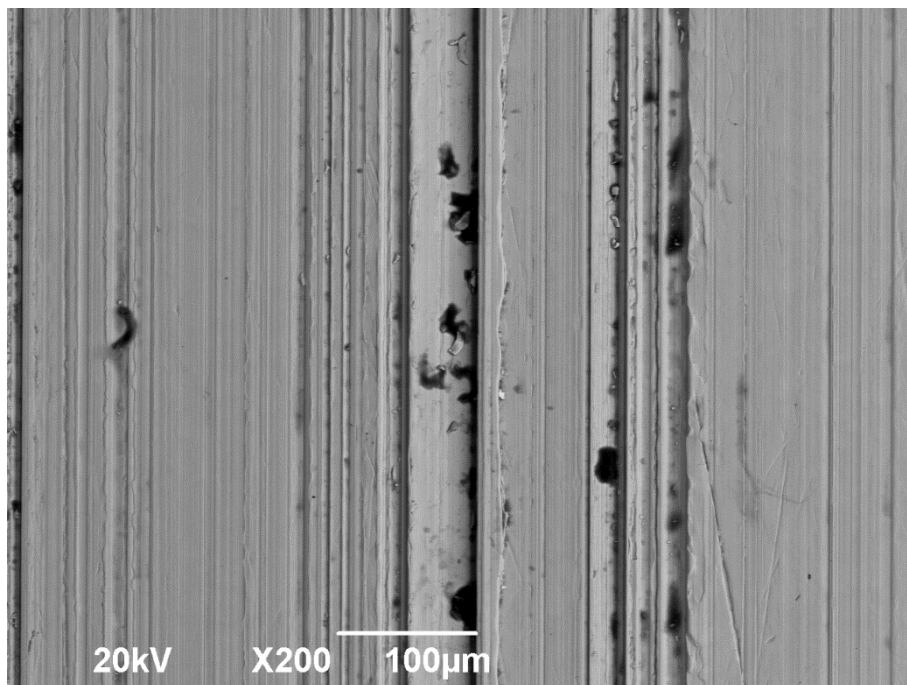


Figura 34 SEM 200X AISI Acero 1045 condición 4MPa 0,13m/s L2

Para el caso de los bloques de bronce para la misma condición (ver Figura 35) se presentó una menor huella de desgaste y menor pérdida de masa de 0,0005 g en comparación con la otra condición analizada.

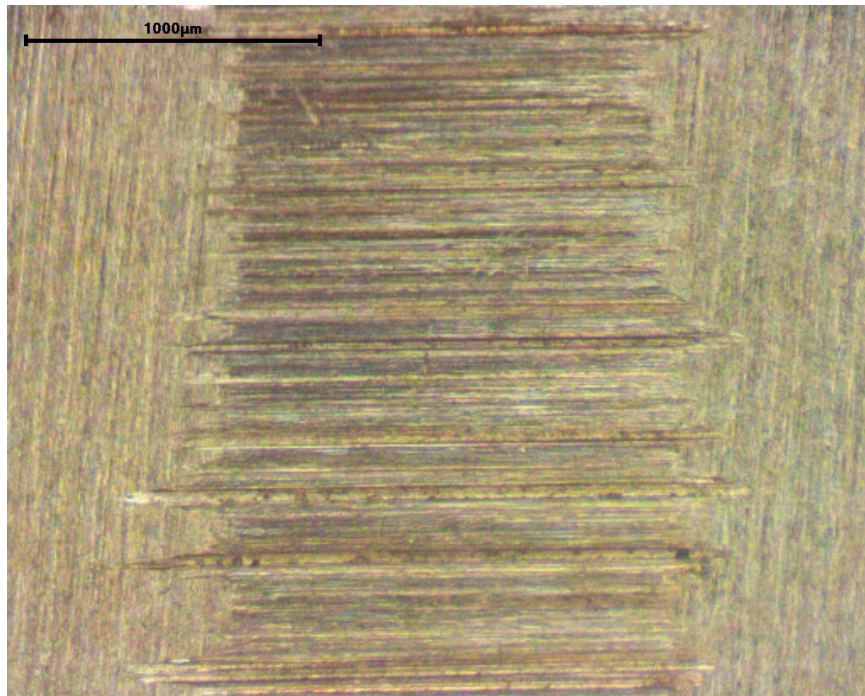


Figura 35. 5X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2

Las figuras Figura 36 y Figura 37 muestran los resultados obtenidos usando microscopía electrónica de barrido (SEM) de la superficie de los bloques de bronce SAE 67 usados para las pruebas, se observa marcas de desgaste por deformación acompañados de surcos típicos de abrasión.

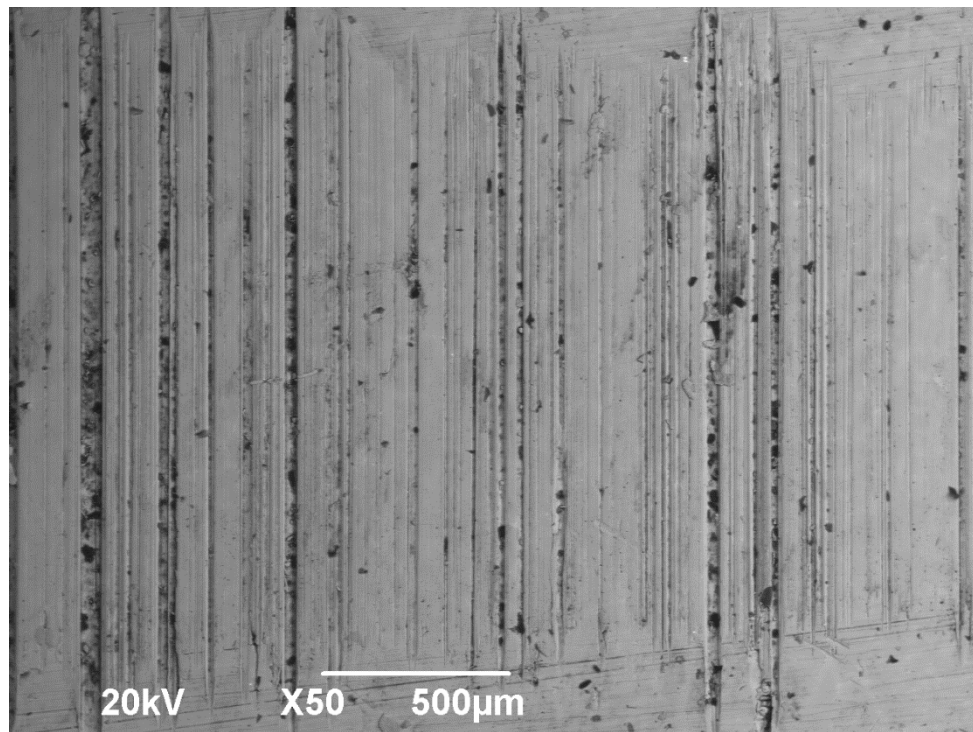


Figura 36 SEM 50 X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2

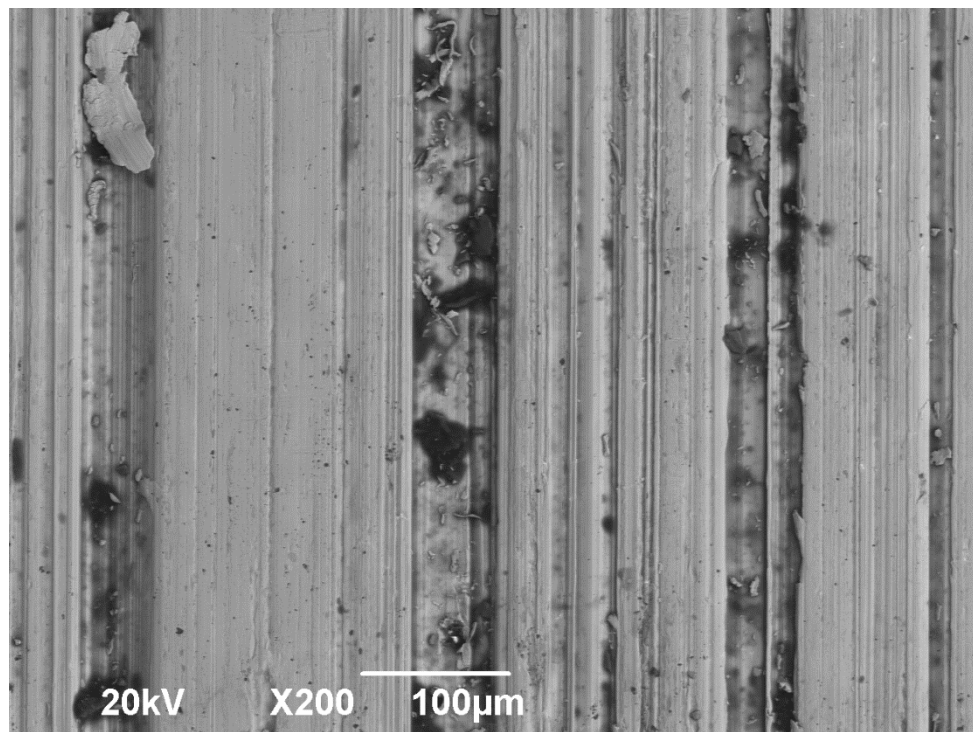


Figura 37 SEM 200X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,13m/s L2

Para los anillos (ver Figura 38) de la condición lubricante 3 con una carga neta de 4 MPa y una velocidad de 0,25 m/s correspondientes a un coeficiente de fricción 0,03051 se presentan marcas de desgaste menos profundas lo cual indica que la película de lubricante en esta condición, separó más la superficies en contacto, se presenta un mayor desgaste de 0,0014g en comparación con la otra condicono analizada.

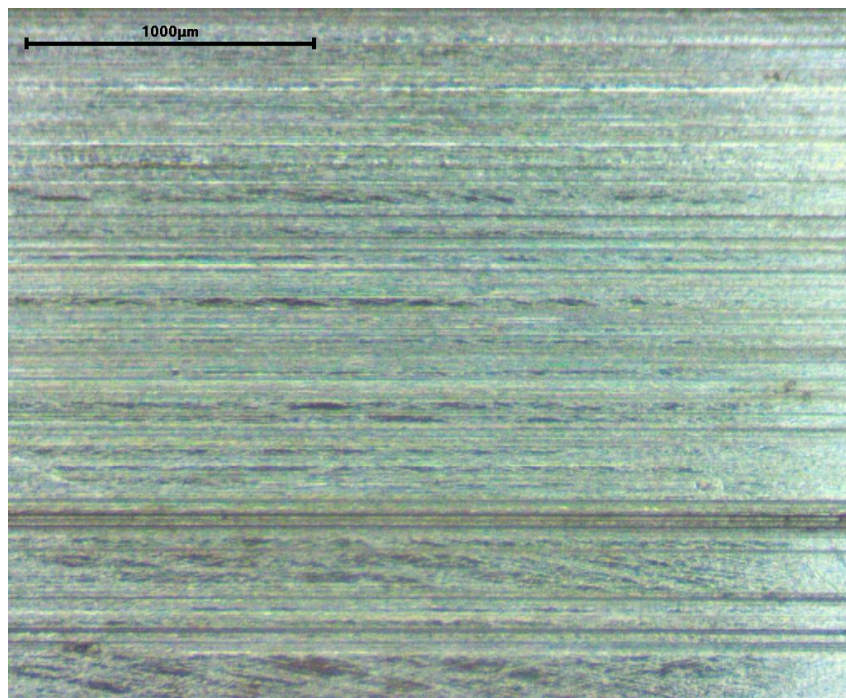


Figura 38. 5X Acero 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3

Las figuras Figura 39 y Figura 40 muestran los resultados obtenidos de la superficie desgastada usando microscopía electrónica de barrido (SEM) de los anillos de acero AISI1045 usados para las pruebas, se observan surcos poco profundos debido a la deformación plástica y zonas lisas donde se desprendió el material por adhesión. Se observan muchas zonas con regiones de color oscuro, las cuales fueron analizadas con EDS donde se encontró alto porcentaje de

carbono como se muestra en la Tabla 28. Esto indica evidencia de lubricante que se adhiere a los valles de los surcos disminuyendo el coeficiente de fricción.

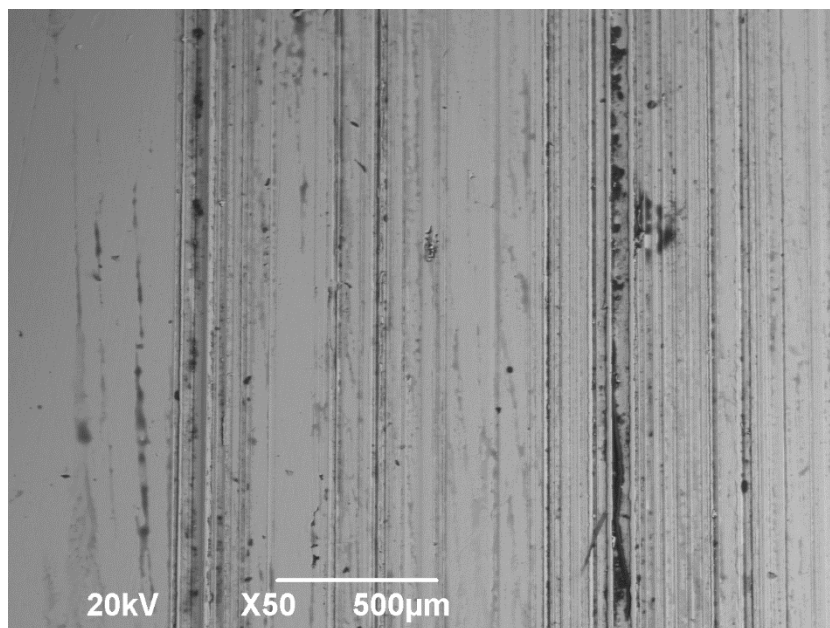


Figura 39 SEM 50X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3

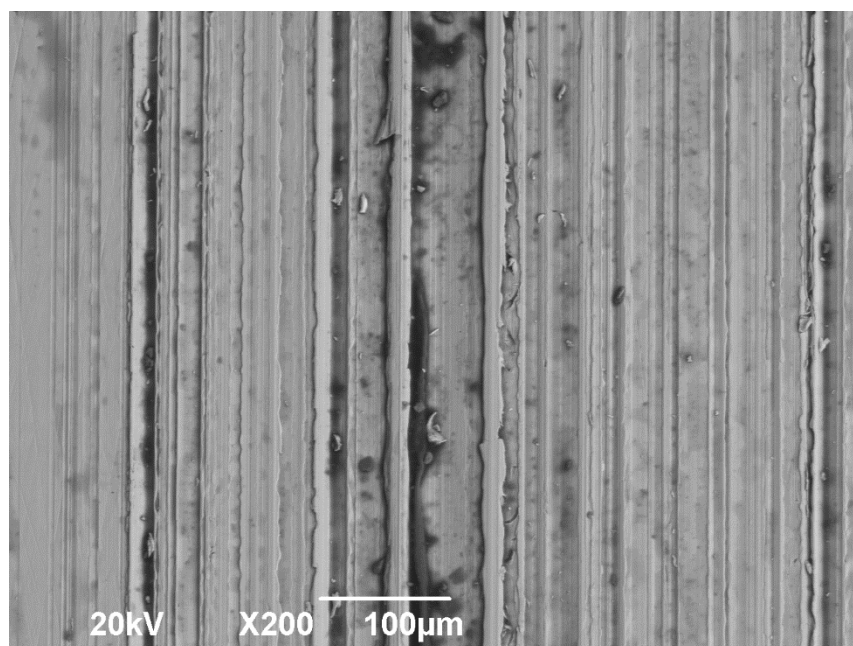


Figura 40 SEM 200X Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3

Para el caso de los bloques de bronce (ver Figura 41) para la misma condición presentaron surcos menos profundos, una mayor huella de desgaste, y un mayor desgaste 0,0008g en comparación con la otra condición analizada.

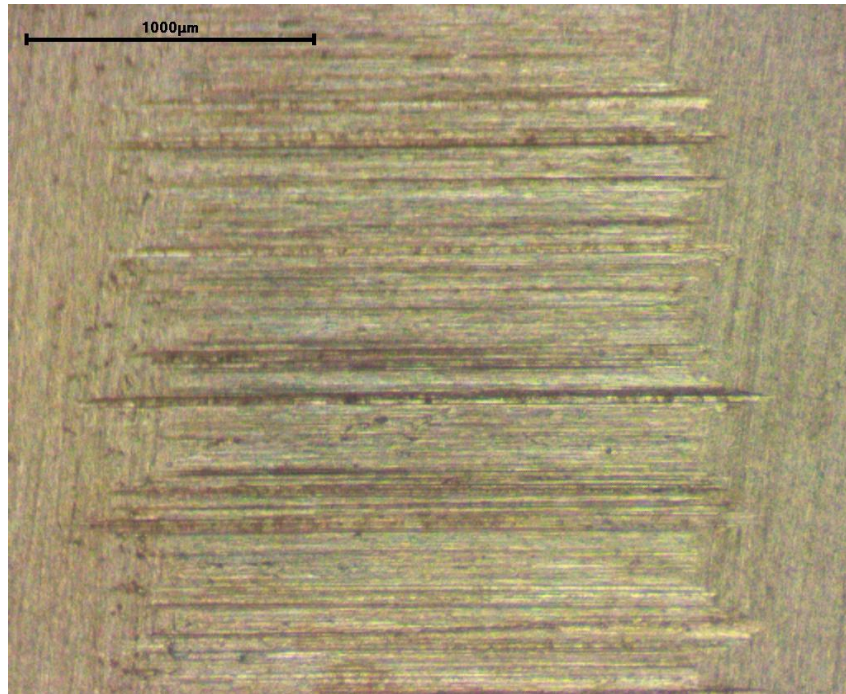


Figura 41 5X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3

En la Figura 42 y Figura 43 muestran los resultados obtenidos usando microcopia electrónica de barrido de la superficie desgastada de los bloques de bronce SAE 67 usados para las pruebas, donde se presentaron surcos típicos de abrasión. Al igual que el anillo se observan muchas zonas con regiones de color oscuro. Esto indica evidencia de lubricante que se adhiere a los valles de los surcos disminuyendo el coeficiente de fricción.

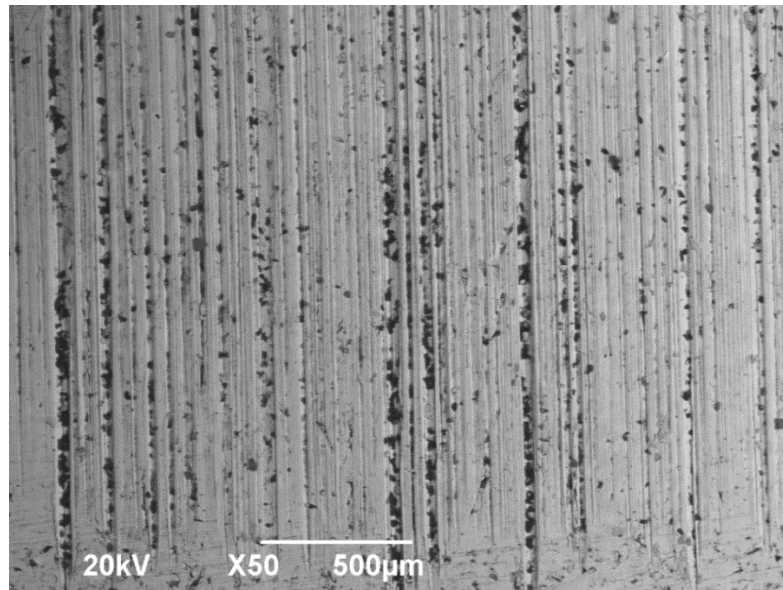


Figura 42 SEM 50X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3

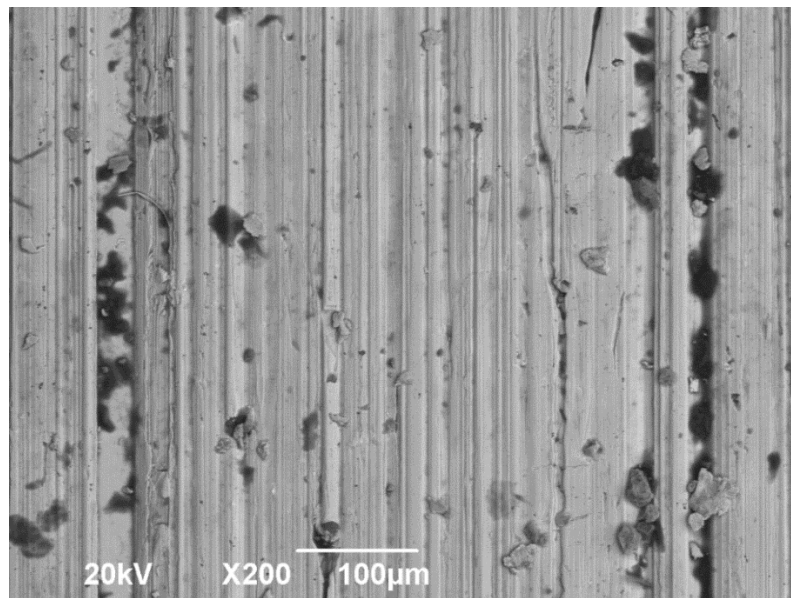


Figura 43 SEM 200X Bronce SAE 67 condición 4MPa 0,25m/s L3

En la Figura 44 se observa el micro-análisis químico realizado a un anillo de la condición que presentó menor coeficiente de fricción y se muestra la composición química encontrada en las partículas (spectrum), se observa que en los spectrum 1 y 2 gran contenido de carbono lo que indica una presencia de lubricante a pesar de la limpieza pertinente realizada, el spectrum 3 representa el material base y concuerda con la composición química del acero AISI 1045.

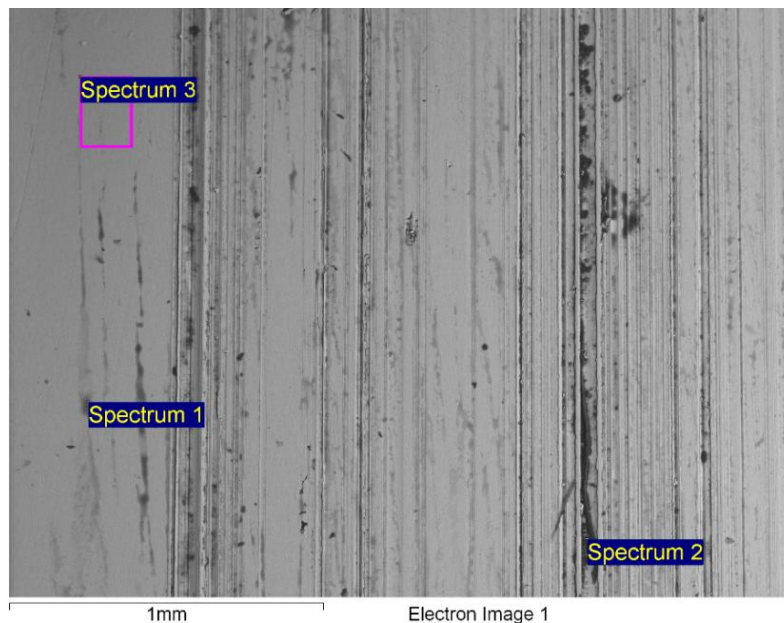


Figura 44 EDS Acero AISI 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3

Spectrum	% C	% O	% Mg	% Al	% Si	% Mn	% Fe	% Cu
1	56.59	4.26			0.49	0.31	38.35	
2	72.00	9.83	1.03	0.72	2.05		14.09	0.29
3						0.83	99.17	

Tabla 28 Composición química EDS Acero 1045 condición 4MPa 0,25m/s L3

6 Conclusiones

En este estudio se comparó tres tipos de lubricantes (L1, L2) actualmente usados en lubricación del eje y la chumacera de los molinos de caña de azúcar, y un lubricante de alto rendimiento grado alimenticio (L3), diseñado para la misma aplicación. Se analizó el comportamiento tribológico del par bronce-acero a una presión nominal de 8 y 4 MPa y una velocidad de 0,13 y 0,25m/s usando un tribómetro de deslizamiento bloque-anillo. Los materiales usados para las pruebas fueron acero AISI 1045 para el caso de los anillos y bronce SAE 67 para el bloque. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Se concluyó que el tribómetro está en condiciones óptimas para ser operado, debido a que en las pruebas realizadas de calibración, la fuerza de fricción se registró entre 65 y 93 N después de los 4500 ciclos y se obtuvo una huella de desgaste con medidas entre 2.3 y 2.8 mm, valores dentro del rango establecido por la norma ASTM D2714.

Con respecto al anillo, se presentó menor desgaste con el lubricante L3 para los dos niveles de carga y velocidad, en el caso del bloque se presentó menor desgaste con el lubricante L1.

Los menores coeficientes de fricción se presentaron para las siguientes condiciones:

- Para velocidad 0,25 m/s, carga 4 MPa, se presentó un menor coeficiente de fricción con el lubricante L3,
- Para una condición velocidad 0,13 m/s, carga 8 MPa, se presentó un menor coeficiente de fricción con el lubricante L1

Se pudo concluir que el lubricante de alto rendimiento grado alimenticio L3 es una buena opción para la lubricación de molinos de caña debido a que

presenta el menor coeficiente de fricción para la condición de velocidad de 0,25m/s, carga 4 MPa, y para la condición más crítica velocidad de 0,25km/s, carga 8 MPa presentó una menor pérdida de masa con respecto a los otros lubricantes estudiados.

Con respecto al análisis de la superficie desgastada se puede concluir que la configuración que presentó menor coeficiente de fricción, presentó desgaste adhesivo y marcas de desgaste menos profundas, con evidencia de lubricante adherido en los surcos y presentó un mayor desgaste en comparación con la otra condición analizada. Para la condición de mayor coeficiente de fricción se presentaron surcos típicos de abrasión y marcas de desgaste por deformación produciendo una baja pérdida de masa.

7 Recomendaciones

El maquinado de los anillos y bloque debe realizarse cuidadosamente, de tal forma que el anillo sea lo más concéntrico posible y el bloque que tengan sus caras a escuadra, para asegurar un perfecto contacto entre ellos y obtener resultados más satisfactorios.

Se recomienda realizar un estudio de impacto ambiental de los aceites usados para saber si son adecuados en esas condiciones.

Es importante realizar un análisis de parámetros como la temperatura y composición química de los lubricantes debido a la influencia de los mismos en el desgaste, coeficiente de fricción y lubricación.

8 Referencias

- [1] Asocaña, «Sector azucarero colombiano,» [En línea]. Available: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx>. [Último acceso: 14 08 2014].
- [2] J. J. Coronado , J. S. Rivas y A. León Gómez , «Estudio tribologico en chumaceras y ejes de molino de caña de azucar,» *Dyna*, nº 144, pp. 1-8, 2004.
- [3] D. Cabrera Venegas, de *Los lubricantes definiciones, usos y aplicaciones* , Ediciones Z, p. 3.
- [4] F. Martínez Pérez, *Tribología Integral*, México, D.F.: LIMUSA, 2011.
- [5] I. M. Hutchings, *Tribology friction and wear of engineering materials*, 1992.
- [6] J. K. Appeldoorn, E. R. Booser, R. D. Brown y W. E. Cambell, «Boudary lubrication,» de *Boudary lubrication*, New York, United Engineering Center, 1969, p. 16.
- [7] M. P. Groover, «Fricción, desgaste y lubricación,» de *Fundamentos de manufactura moderna* , PRENTICE-HALL , p. 102.
- [8] A. M. Acevedo, *Desarrollo de una metodologia para pruebas de erosión*, Mexico: Universidad autónoma nuevo león, 2004.
- [9] B. Bhushan, «Friction and Wear Measurement Techniques,» de *Modern tribology handbook*, CRC Press LLC, 2001, pp. 505-506.
- [10] R. G. Budynas y K. Nisbett, «Cojinetes de contacto delizante y lubricación,» de *Diseño en ingeniería mecanica de Shigley*, McGRAW-HILL, p. 598.

- [11] R. L. Norton, «Cojinetes y lubricación,» de *Diseño de máquinas* , PRENTICE HALL, pp. 646-651.
- [12] Castrol, «Castrol Product Data,» [En línea]. Available: <http://www.castrol.com.ua/catalog/Molub-Alloy%208031.pdf>. [Último acceso: 17 06 2013].
- [13] G. d. pacifico, «Grasas del pacifico,» [En línea]. Available: http://grasasdelpacifico.com/1-ficha_tecnica_resist_sugar_oil_pluss.pdf. [Último acceso: 27 06 2013].
- [14] Castrol, «Material Safety Data Sheet,» [En línea]. Available: [http://msdspds.bp.com/usds/amersdsf.nsf/0/F9214CD49F04333A80257A8C00538279/\\$file/153792Product%20SU%200003%20SM%20H1.pdf](http://msdspds.bp.com/usds/amersdsf.nsf/0/F9214CD49F04333A80257A8C00538279/$file/153792Product%20SU%200003%20SM%20H1.pdf). [Último acceso: 21 junio 2013].
- [15] «NSF International / Nonfood Compounds Registration Program,» [En línea]. Available: http://www.nsf.org/business/nonfood_compounds/index.asp?program=NonFoodComReg. [Último acceso: 14 06 2013].
- [16] E. Córdoba Palacios, *Diseño y construccion de una maquina para pruebas de desgaste adhesivo*, Cali, 2003.
- [17] C. A. Holguin Velez y J. J. Coronado , «Estudio del desgaste por deslizamiento en bronce,» *Revista Facultad de Ingenieria*, nº 41, pp. 98-107, 2007.
- [18] J. J. Coronado, C. A. Holguín y S. A. Rodríguez , «Sliding wear of weld layers whit application to cane mill shaft rebuilding,» *Journal of Engineering Tribology* , vol. 224, pp. 1238-1291, 2010.

- [19] J. A. Gomez Cabrera , J. J. Coronado y S. A. Rodríguez , «Effect to strain hardening coefficient on sliding wear of steels,» de *19 th International Conference on Wear of Materials* , Oregon, U.S.A., 2013.
- [20] J. A. Mora Vega , Caracterizacion tribológica del par bronce-acero en un contacto anillo-bloque, Jalapa : Universidad Veracruzana , 2012.
- [21] A. Cubillán y O. Liccionis , *Estudio de la resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación*, Caracas: Universidad Central de Venezuela , 2002.
- [22] P. Cadenas, M. Rodriguez y M. H. Staia , «Efecto del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base níquel depositado por HVOF,» *Revista de metalurgia* , vol. 43, nº 1, pp. 50-62, 2007.
- [23] E. Folerer, S. Calderón y M. M. Barreiro, «Resistencia al desgaste en dos materiales compuestos de matriz polimerica,» *jornadas SAM-CONAMET*, vol. 1, nº 1, pp. 1197-1204, 2001.
- [24] M. Chen, K. Kato y K. Adachi, «The comparisons of sliding speed and normal load effect on friction coefficients of self-mated Si₃N₄ and SiC under water lubrication,» *Tribology International*, vol. 35, pp. 129-135, 2002.
- [25] H. So y C. C. Hu, «Determination of load carrying ability of chemical films developed in sliding point contact,» *Tribology international* , vol. 38, nº 1, pp. 435-441, 2005.
- [26] ASTM G77, *Standard Method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test*, 1996.

- [27] C. A. Holguín Velez, *Caracterización tribológica del par bronce-acero AISI 1045 recubierto con soldaduras utilizadas en la recuperación de ejes de molienda*, Cali: Universidad del Valle, 2006.
- [28] ASTM D2714, *Standard test methods for calibration and operation of the falex block-on-ring Friction and wear testing machine*.
- [29] C. P. Concha Polarczyk y M. I. Trujillo Rojas, *Caracterización tribológica de lubricantes en chumaceras de molinos de caña de azúcar*, Santiago de Cali: Universidad del Valle, 1999.
- [30] G. Stachowiak y A. Batchelor, *Engineering tribology*, Butterworth Heinemann.
- [31] F. Pérez Martínez, «Influencia de la velocidad de deslizamiento en el consumo de potencia de las chumaceras de los molinos de caña,» *Limusa*, pp. 65-135, 2002.
- [32] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, Mexico D.F.: Editoria Limusa S.A., 2004.
- [33] E. Schmider, M. Ziegler, E. Danay, L. Beyer y M. Buhner, «Reinvestigating the Robustness of ANOVA Against Violations of the Normal Distribution Assumption,» *Methodology*, vol. 6, nº 4, pp. 147-151, 2010.
- [34] G. Glass, P. Peckham y J. Sanders, «Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance,» *Review of Educational Research*, vol. 42, nº 3, pp. 237-288, 1972.
- [35] M. Harwell, E. Rubinstein, W. Hayes y C. Olds, «Summarizing Monte Carlo Results in Methodological Research: The One- and Two-Factor Fixed

Effects ANOVA Cases,» *Journal of Educational Statistics*, vol. 17, nº 4, pp. 315-339, 1992.

- [36] L. Lix, J. Keselman y H. J. Keselman, «Consequences of Assumption Violations Revisited: A Quantitative Review of Alternatives to the One-Way Analysis of Variance "F" Test,» *Review of Educational Research*, Vol. 66, No. 4 (Winter, 1996), pp. 579-619 , vol. 66, nº 4, pp. 579-619, 1996.
- [37] D. NORMEN, *DIN 50 320 Systematic Analysis of Wear Processes*, 1979.
- [38] M. Shaw y M. Fred, *Analysis and Lubrication of bearings*, United states of america: McGraw-Hill, 1949.
- [39] K. H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Netherlands: Elsevier science publishers B.V., 1987.