

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE LOS BRONCES
UTILIZADOS EN LOS MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

DANIEL FELIPE PÉREZ MEJÍA



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO DE CALI

2019

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE LOS BRONCES
UTILIZADOS EN LOS MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR**

DANIEL FELIPE PÉREZ MEJÍA

**Proyecto de grado para optar por el título de:
Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR: M. Sc. ADOLFO LEÓN GÓMEZ PERLAZA

CODIRECTOR: Ph. D. JOHN JAIRO CORONADO MARÍN

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO DE CALI

2019

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar al título de Ingeniero Mecánico

ADOLFO LEÓN GÓMEZ PERLAZA
DIRECTOR

JOHN JAIRO CORONADO MARÍN
CODIRECTOR

JURADO EVALUADOR 1

JURADO EVALUADOR 2

Santiago de Cali, 2019.

DEDICATORIA

A Dios por todas sus bendiciones, por la salud y por permitirme culminar mi carrera de pregrado como Ingeniero Mecánico.

A mis padres por todo su amor y apoyo incondicional, por brindarme todos los medios para poder estudiar en una buena universidad y por todo lo que hacen y se sacrifican por mí.

A mi hermana por su amor, acompañamiento en el día a día y su amistad.

A mis abuelos Aristides Mejía, Gladys Victoria (Q.E.P.D) y María Constain (Q.E.P.D) por todas sus enseñanzas, amor y apoyo.

A mi tía Lucía Pérez y familia por ayudarme a formar como persona y profesional, siempre estaré agradecido con ustedes por todo el apoyo y el amor que me brindaron.

A todos mis buenos amigos que me ha regalado la vida durante mi formación personal y académica, con ustedes los sacrificios, el trabajo duro, la motivación, las experiencias y los buenos momentos han hecho de mí una persona feliz y agradecida con la vida.

A todos aquellos profesores y profesionales que aportaron en mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad del Valle por la formación personal y profesional durante estos 5 años de estudio, los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica por sus conocimientos y enseñanzas y a todo el personal universitario que de una u otra forma contribuyó en esta etapa de mi vida.

A mis directores Adolfo León Gómez y John Jairo Coronado por depositar su confianza en mí y brindarme las herramientas y su conocimiento para poder culminar este proyecto.

A Cenicaña por la buena formación profesional y personal durante mi pasantía en la empresa y por permitirme adoptar uno de sus proyectos como mi trabajo de grado.

A los Ingenieros Mecánicos Sebastián Saltaren, William Ojeda, Julián Montes y Felipe Ospina por todos los conocimientos que compartieron conmigo, las críticas constructivas y por contribuir de una u otra forma en la realización de este proyecto.

A los Ingenieros Electrónicos Julio Calpa y Juan Manuel Armero por sus conocimientos y la buena disposición para contribuir con este trabajo.

Al Estadístico Héctor Chica por sus conocimientos y apoyo brindado en el análisis de los resultados.

A los jurados por su valioso tiempo y críticas constructivas en pro de la mejora de este proyecto.

A CONALBRONCES por proveer el material para realizar las pruebas experimentales.

A todas aquellas personas que hicieron realidad este proyecto, a todos ustedes muchas gracias...

Tabla de contenido

LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABLAS	8
RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1 MOLIENDA DE CAÑA	16
3.2 MOLINOS.....	17
3.2.1 Componentes de los molinos: mazas.....	18
3.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LAS CHUMACERAS	26
3.4 TRIBOLOGÍA.....	28
3.4.1 Lubricación	29
3.4.2 Fricción	32
3.4.3 Desgaste	33
4. METODOLOGÍA Y MATERIALES	36

4.1	LÍNEA BASE DE BRONCES Y LUBRICANTES DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL	36
4.2	EQUIVALENCIA MOLINO-TRIBÓMETRO	37
4.2.1	Velocidades	38
4.2.2	Fuerza normal del experimento.....	41
4.3	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	43
4.3.1	Etapas del diseño de experimentos	43
4.3.2	Elección de los factores, niveles y rangos	44
4.3.3	Selección de la variable de respuesta	46
4.3.4	Selección del diseño experimental	46
4.4	METODOLOGÍA SEGÚN EL STANDARD ASTM G-77	46
4.5	SELECCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	47
4.5.1	Motor	48
4.5.2	Acople flexible.....	48
4.6	ESTRUCTURA BASE	50
4.7	SISTEMA DE CONTROL DEL TRIBÓMETRO	51
4.7.1	Variador de frecuencia.....	52
4.7.2	Distribución de elementos	53
4.8	CELDA DE CARGA	54
4.9	RECIPIENTE PARA LUBRICACIÓN	54
4.10	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	55
4.10.1	Construcción de probetas para ensayos de desgaste.....	55
4.10.2	Composición química de los bronce.....	55
4.10.3	Pérdida de masa de anillos y bloques.....	56
4.10.4	Limpieza de probetas	56

4.10.5	Coeficiente de fricción	57
4.10.6	Caracterización de las huellas de desgaste.....	59
4.10.7	Caracterización de la viscosidad del lubricante	61
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
5.1	PÉRDIDA DE MASA	63
5.1.1	Análisis estadístico	64
5.1.2	Resultados.....	70
5.2	COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	75
5.2.1	Análisis estadístico	76
5.2.2	Resultados.....	82
5.3	CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA DE DESGASTE	87
5.3.1	Bronce UNS C-93800.....	87
5.3.2	Bronce UNS C-93700.....	92
5.4	CARACTERIZACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE	96
5.5	RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO Y LUBRICACIÓN DE LOS MOLINOS	99
6.	CONCLUSIONES.....	102
7.	RECOMENDACIONES.....	104
8.	REFERENCIAS.....	105
9.	ANEXOS	108
9.1	CÁLCULO TEÓRICO DE LAS VELOCIDADES DE LOS MOLINOS	108
9.2	ESTADO DEL ARTE DE ENSAYOS DE DESGASTE CON EL PAR BRONCE-ACERO.....	111

9.3	PLANOS DE FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA BASE	113
9.3.1	Análisis estático.....	114
9.3.2	Análisis modal	117
9.4	DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS SOBRE EL TABLERO ELÉCTRICO	120
9.5	FICHA TÉCNICA DE LA CELDA DE CARGA.....	122
9.6	PLANOS PARA DEL RECIPIENTE DE LUBRICANTE	125
9.7	PLANOS DEL BLOQUE Y DEL ANILLO PARA ENSAYOS DE DESGASTE	128
9.8	INFORMACIÓN ADICIONAL DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO: PÉRDIDA DE MASA	129
9.9	INFORMACIÓN ADICIONAL DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO: COEFICIENTE DE FRICCIÓN 133	
9.10	TABLA DE VOLUMEN PERDIDO DE ACUERDO CON UN ANCHO DE HUELLA DETERMINADO.....	137

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CAUSAS DE FALLA PRESENTADAS EN CHUMACERAS DE MOLINOS DE CAÑA DE AZÚCAR. FUENTE:(VIASCÁN, 2017)	12
FIGURA 2. CHUMACERAS DE BRONCE: (A) EN BUEN ESTADO Y CON POCO DESGASTE, (B) CON DESGASTE ADHESIVO Y ABRASIVO, (C) CON DESGASTE ABRASIVO SEVERO. FUENTE: (VIASCÁN, 2017)	13
FIGURA 3. MOLINO DE 4 MAZAS TIPO FLETCHER SMITH. FUENTE: (REIN, 2012)	18
FIGURA 4. MAZA DE UN MOLINO Y SUS PARTES. FUENTE: (BOLAÑOS, RIVAS, & CORONADO, 2006)	19
FIGURA 5. DIAGRAMA DE CORTANTE, MOMENTO FLECTOR, TORQUE Y ESFUERZO COMBINADO (VON MISES) PARA UN EJE DE MAZA SUPERIOR. FUENTE: (REIN, 2012)	20
FIGURA 6. EJE CON REDONDEOS SOMETIDO A (A) FLEXIÓN, (B) TORSIÓN. FUENTE: PETERSON (PILKEY & PILKEY, 1997)	20
FIGURA 7. GUIJO DE UN MOLINO DE CAÑA DE UN INGENIO DEL VALLE DEL CAUCA. (FUENTE: CENICAÑA)	21
FIGURA 8. TEJA DE BRONCE DE UN MOLINO DE UN INGENIO AZUCARERO DE COLOMBIA. (FUENTE: CENICAÑA)	22
FIGURA 9. MICROESTRUCTURA DEL BRONCE UNSC-93700 (SAE 64). FUENTE: (ASSOCIATION INC., 2018)	24
FIGURA 10. MICROESTRUCTURA DEL BRONCE UNSC-93800 (SAE 67). FUENTE: (CHAMORRO, 2014)	25
FIGURA 11. CHUMACERA REFRIGERADA EN LA CAJA. FUENTE: (CORONADO ET AL., 2005)	26
FIGURA 12. CONDUCTOS DE REFRIGERACIÓN Y LUBRICACIÓN (A) CAJA, (B) TEJA SUPERIOR. FUENTE:(CORONADO ET AL., 2005)	27
FIGURA 13. CHUMACERA REFRIGERADA EN LA TEJA. FUENTE:(CORONADO ET AL., 2005)	27
FIGURA 14. (A) CUERPO DE ACERO DE LA TEJA, (B) TEJA SUPERIOR.(CORONADO ET AL., 2005)	28
FIGURA 15. DIAGRAMA FRICCIÓN VS VELOCIDAD DE UN COJINETE DE DESLIZAMIENTO. FUENTE: (NORTON, 2011).31	
FIGURA 16. GEOMETRÍAS EMPLEADAS COMÚNMENTE EN ENSAYOS DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO (A) PIN-EN-DISCO, (B) BLOQUE-SOBRE-ANILLO, (C) PIN-EN-PLACA RECIPROCANTE, (D) DISCOS ROTATORIOS, (E) ANILLO-SOBRE-ANILLO. FUENTE: (HUTCHINGS & SHIPWAY, 2017A)	34
FIGURA 17 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUERZA NORMAL.	41
FIGURA 18.CURVA DE CALIBRACIÓN DE LA CELDA. (FUENTE: AUTOR)	42
FIGURA 19. POSICIÓN DEL ACOPLA EN EL TRIBÓMETRO.	49
FIGURA 20. TRIBÓMETRO EN CONDICIONES INICIALES.	50
FIGURA 21. ESTRUCTURA BASE FINALIZADA.	51
FIGURA 22. SISTEMA DE CONTROL DEL MOTOR.....	52

FIGURA 23. CELDA DE CARGA.	54
FIGURA 24. BALANZA ANALÍTICA.	56
FIGURA 25. LIMPIADOR ULTRASÓNICO.	57
FIGURA 26. DIAGRAMA DE FUERZAS EN LA INTERFASE BLOQUE-ANILLO. FUENTE:(J. J. CORONADO, J. S. RIVAS, 2004)	58
FIGURA 27. VOLUMEN PERDIDO DEL BLOQUE BASADO EN EL ANCHO DE LA HUELLA. (FUENTE: ASTM G-77).....	59
FIGURA 28. ESTEREOSCOPIO PARA MEDIR ANCHO DE LAS HUELLAS DE DESGASTE.....	61
FIGURA 29. VISCOSÍMETRO PARA PRUEBAS DE VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE.	62
FIGURA 30. GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	66
FIGURA 31. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA PÉRDIDA DE MASA DEL BLOQUE.	67
FIGURA 32. GRÁFICA DE EFECTOS COMBINADOS PARA COEFICIENTE DE FRICCIÓN, (A) BRONCE-LUBRICACIÓN, (B) VELOCIDAD-CARGA.	69
FIGURA 33. PÉRDIDA DE MASA VS CARGA A LUBRICACIÓN NORMAL Y A VELOCIDAD DE (A) 44 RPM, (B) 88 RPM....	72
FIGURA 34. PÉRDIDA DE MASA VS CARGA A LUBRICACIÓN CONTAMINADA Y A VELOCIDAD DE (A) 44 RPM, (B) 88 RPM.	73
FIGURA 35. PÉRDIDA DE MASA VS LUBRICACIÓN A VELOCIDAD DE 44 RPM (A) CARGA BAJA 176 N, (B) CARGA ALTA 813 N.	74
FIGURA 36. PÉRDIDA DE MASA VS LUBRICACIÓN A VELOCIDAD DE 88 RPM (A) CARGA BAJA 176 N, (B) CARGA ALTA 813 N.	74
FIGURA 37. GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	77
FIGURA 38. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA COEFICIENTE DE FRICCIÓN.	79
FIGURA 39. GRÁFICA DE EFECTOS COMBINADOS PARA COEFICIENTE DE FRICCIÓN, (A) BRONCE-LUBRICACIÓN, (B) VELOCIDAD-CARGA.	80
FIGURA 40. COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS CARGA A LUBRICACIÓN NORMAL Y A VELOCIDAD DE (A) 44 RPM, (B) 88 RPM.	84
FIGURA 41. COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS CARGA A LUBRICACIÓN CONTAMINADA Y A VELOCIDAD DE (A) 44 RPM, (B) 88 RPM.	85
FIGURA 42. COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS LUBRICACIÓN A VELOCIDAD DE 44 RPM (A) CARGA BAJA 176 N, (B) CARGA ALTA 813 N.....	86
FIGURA 43. COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS LUBRICACIÓN A VELOCIDAD DE 88 RPM (A) CARGA BAJA 176 N, (B) CARGA ALTA 813 N.....	86

FIGURA 44. 2X BRONCE C-93800 A 44 RPM Y CARGA 176N (A) LUBRICADO, (B) CONTAMINADO. (FUENTE: AUTOR)	89
FIGURA 45. 2X BRONCE C-93800 A 88 RPM Y CARGA 813 N (A) CONTAMINADO, (B) LUBRICADO. (FUENTE: AUTOR)	91
FIGURA 46. 5X BRONCE C-93700 A 44 RPM Y CARGA BAJA (A) LUBRICADO, (B) CONTAMINADO. (FUENTE: AUTOR)	94
FIGURA 47. 5X BRONCE C-93700 A 88 RPM Y CARGA ALTA (A) CONTAMINADO, (B) LUBRICADO. (FUENTE: AUTOR)	95
FIGURA 48. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD CON LA TEMPERATURA. (FUENTE: AUTOR)	98
FIGURA 49. GEOMETRÍA CAD DE LA ESTRUCTURA BASE.	114
FIGURA 50. CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO.	115
FIGURA 51. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ESTÁTICA, (A) DEFORMACIÓN TOTAL [MM], (B) ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON MISES.	116
FIGURA 52. DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS MÓDULOS EMPLEADOS EN ANSYS.	117
FIGURA 53. DEFORMACIÓN TOTAL: (A) MODO 1 AXIAL EJE X, (B) MODO 2: AXIAL EJE Z, (C) MODO 3: TORSIONAL EN Y. (FUENTE: ANSYS).....	119

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE LUBRICANTES LÍQUIDOS. FUENTE: (NORTON, 2011)	30
TABLA 2. COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE PARES DE MATERIALES. FUENTE: (NORTON, 2011)	33
TABLA 3. BRONCES Y LUBRICANTES UTILIZADOS EN MOLINOS DEL SECTOR. (FUENTE: CENICAÑA)	36
TABLA 4. FICHA TÉCNICA DEL LUBRICANTE. (FUENTE: SIMCA GROUP (“FICHA TÉCNICA RESIST SUGAR OIL PLUSS,” N.D.)).....	37
TABLA 5. TAMAÑOS ESTÁNDAR DE LOS MOLINOS WALKER. FUENTE: (REIN, 2012)	38
TABLA 6. MOLINOS CONVENCIONALES EN INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA. (FUENTE: CENICAÑA)	39
TABLA 7. VELOCIDADES EQUIVALENTES SEGÚN EL TAMAÑO DEL MOLINO. (FUENTE: AUTOR).....	40
TABLA 8. PESO ADICIONADO Y FUERZA REGISTRADA EN LA CELDA DE CARGA.	42
TABLA 9. PAUTAS GENERALES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FUENTE: (MONTGOMERY, 2004)	44
TABLA 10. FACTORES DE DISEÑO Y SUS RESPECTIVOS NIVELES. (FUENTE: AUTOR).....	44
TABLA 11. ESCENARIOS EXPERIMENTALES.....	45
TABLA 12. FICHA TÉCNICA DEL MOTORREDUCTOR 2.	48
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACOPLES FLEXIBLES. (FUENTE: INTERMEC SA)	49
TABLA 14. VARIADOR DE FRECUENCIA SELECCIONADO. (FUENTE: SEW EURODRIVE)	53
TABLA 15. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS BRONCES.	55
TABLA 16. PARÁMETROS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE.	63
TABLA 17. ANOVA DE LA PÉRDIDA DE MASA DEL BLOQUE.	65
TABLA 18. ANÁLISIS POST-ANOVA DE LA PÉRDIDA DE MASA DEL BLOQUE.	70
TABLA 19. PÉRDIDA DE MASA DEL BLOQUE PARA LOS BRONCES C-93800 Y C-93700.	71
TABLA 20. ANOVA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	76
TABLA 21. ANÁLISIS POST-ANOVA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.	81
TABLA 22. COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL BRONCE C-93800 Y C-93700.	82
TABLA 23. VOLUMEN PERDIDO POR HUELLA DE DESGASTE PARA EL C-93800.....	88
TABLA 24. VOLUMEN PERDIDO POR HUELLA DE DESGASTE PARA EL C-93700.....	92
TABLA 25. VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE BASE. (FUENTE: AUTOR)	97
TABLA 26. VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE CONTAMINADO CON JUGO DE PRIMERA EXTRACCIÓN AL 30% DEL VOLUMEN. (FUENTE: AUTOR).....	97

TABLA 27. MODOS DE VIBRACIÓN DE LA ESTRUCTURA	118
TABLA 28. SLICE BRONCE-VELOCIDAD DE PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	129
TABLA 29. SLICE BRONCE-CARGA PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	129
TABLA 30. SLICE BRONCE-LUBRICACIÓN PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	130
TABLA 31. SLICE VELOCIDAD-CARGA PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	131
TABLA 32. SLICE VELOCIDAD-LUBRICACIÓN PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	131
TABLA 33. SLICE CARGA-LUBRICACIÓN PÉRDIDA DE MASA. (FUENTE: SAS)	132
TABLA 34. SLICE BRONCE-RPM COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	133
TABLA 35. SLICE BRONCE-CARGA COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	133
TABLA 36. SLICE BRONCE-LUBRICACIÓN COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	134
TABLA 37. SLICE RPM-CARGA COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	134
TABLA 38. SLICE RPM-LUBRICACIÓN COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	135
TABLA 39. SLICE CARGA-LUBRICACIÓN COEFICIENTE DE FRICCIÓN. (FUENTE: SAS)	136

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento tribológico exhibido por el par bronce-acero utilizado en las chumaceras y en los ejes de los molinos de caña de azúcar, mediante ensayos de desgaste por deslizamiento con el tribómetro de configuración bloque-anillo propiedad de la Universidad del Valle y que está basado en la norma ASTM G77. Se utilizó fundición de bronce UNS C-93700 y UNS C-93800 para los bloques (comercialmente denominados como SAE 64 y SAE 67 respectivamente) y acero AISI 1045 para los anillos, los cuales fueron analizados bajo diversas condiciones de velocidad, carga y lubricación. El par con el bronce C-93800 presentó un coeficiente de fricción 32% menor comparado con el bronce C-93700 con lubricación, lo que significa menor cantidad de energía perdida por calor y fricción, mientras que, el C-93700 presentó un 47% menos de pérdida de masa comparado con el C-93800, siendo un bronce óptimo cuando se requiere una tasa de desgaste baja. Para el escenario de lubricación contaminada con jugo de caña de primera extracción y en una proporción de 30% del volumen, el bronce C-93800 se afectó significativamente, incrementando el coeficiente de fricción y pérdida de masa en alrededor de 2 y 9 veces respectivamente del valor obtenido con lubricación sin contaminación. Por el contrario, el comportamiento tribológico del par con el bronce C-93700 bajo la misma condición de contaminación con jugo, obtuvo una menor pérdida de masa y volumen comparado con el otro bronce. Adicionalmente, se caracterizó la viscosidad del lubricante más empleado en los ingenios (*Sugar Oil Pluss*) y se encontró que esta disminuye considerablemente con el aumento de la temperatura, para el lubricante base y el contaminado. El lubricante contaminado tiene una viscosidad cinemática de 33763 cSt a 25 °C y 14765 cSt a 40 °C, mientras que el lubricante base presentó valores de 87960 y 47138 cSt (3 y 4 veces mayor respectivamente). Lo anterior demuestra la importancia de tener un sistema efectivo de sellado para evitar filtración de jugo y materia extraña en las chumaceras de los molinos de caña de azúcar.

Palabras clave: Desgaste por deslizamiento, desgaste abrasivo, lubricación contaminada, bronce UNSC-93700, bronce UNSC-93800, coeficiente de fricción, pérdida de masa.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo donde la industria crece a pasos agigantados, de igual manera lo hacen las exigencias en el rendimiento de los componentes de máquinas, pues actualmente se requiere que estos tengan el mejor desempeño posible para cada aplicación, a través de mejores diseños, sistemas más eficientes y mejoramiento en las propiedades mecánicas de los materiales.

En Colombia, el sector agroindustrial es una de las mayores fuentes de desarrollo económico, pues se destaca en la producción y exportación de café de alta calidad, algodón, papa, yuca, azúcar, entre otros. Para el último trimestre del año 2017, la producción azucarera registró un aporte significativo en la actividad económica de la región del suroccidente colombiano. Se estimó un incremento de 13,1% en la recolección de caña de azúcar debido a la oferta de nuevas variedades, para un acumulado anual de 5,0% (DANE, 2017). Lo anterior demuestra que el sector agrícola desempeña un rol importante en la economía de la región y del país.

En el proceso de elaboración del azúcar existe diversidad de equipos industriales como picadoras, desfibradoras, molinos, centrifugas, evaporadores, intercambiadores de calor de tubo y coraza, condensadores, entre otros, los cuales contribuyen a realizar las tareas específicas de cada proceso. Luego de la preparación de la caña de azúcar llevada a cabo por picadoras y/o desfibradoras, está el proceso de molienda, comprendido generalmente por un tándem de 6 molinos, que se encargan de extraer el jugo de la caña el cual contiene la sacarosa. Las mazas de los molinos se encuentran alojadas y apoyadas sobre tejas de bronce, que vienen en diferentes configuraciones y especificaciones. Por lo tanto, el buen diseño y desempeño de estos componentes juegan un rol importante en la vida útil de la chumacera.

El fenómeno de desgaste se presenta en todas las piezas que estén en contacto o movimiento relativo con la superficie de otros componentes, particularmente en la interfase teja-guijo se presenta desgaste por deslizamiento y abrasión. Por otra parte, el mantenimiento y adecuada lubricación de estos componentes del molino son factores importantes para tener en cuenta, por el fenómeno de *lubricación límite* (Coronado, Mora, & Rivas, 2005) que se presenta en estos casos. Este tipo de lubricación se caracteriza por

la dificultad que tiene el lubricante para separar por completo ambos cuerpos del contacto, es decir, la película de lubricante es muy delgada y se presenta contacto metal-metal. Lo anterior, hace que la lubricación sea compleja y de no ser eficiente, se pueden presentar fallas prematuras en los componentes. Es por esta razón que todo el par (cuerpo, contra cuerpo y medio) son el objeto de estudio, es decir, guijo-teja y lubricante respectivamente. Es ahí donde radica la importancia de elegir el material adecuado para ambos componentes y de saber cuáles propiedades mecánicas son requeridas para la aplicación (resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, conductividad térmica y eléctrica, entre otras (Groover, 2007)).

La Figura 1 presenta los casos más comunes de falla en las chumaceras de los molinos, de acuerdo con información obtenida en varios ingenios de México y Centroamérica (Viascán, 2017) :

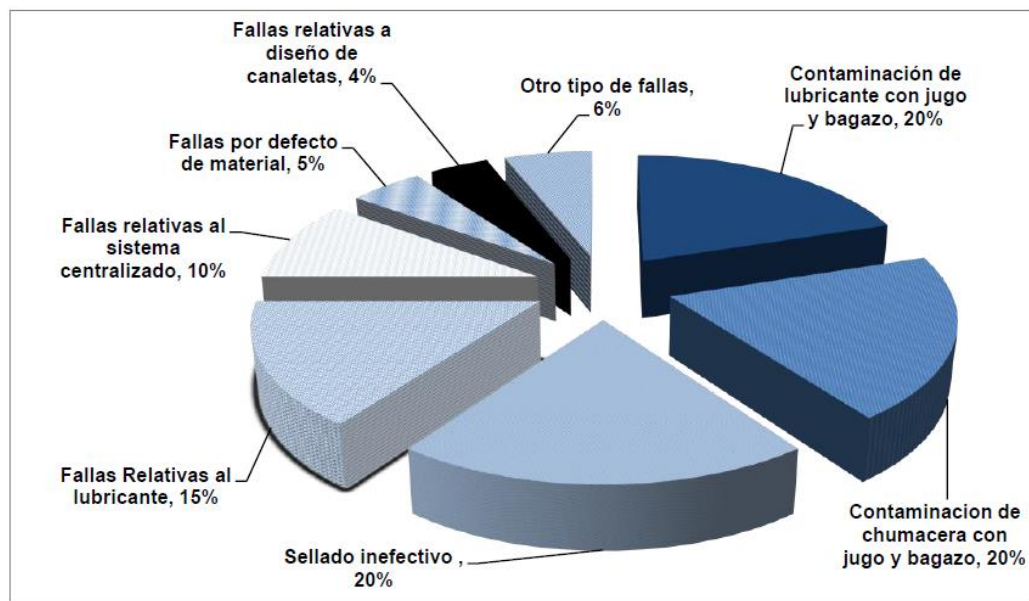


Figura 1. Causas de falla presentadas en chumaceras de molinos de caña de azúcar. Fuente:(Viascán, 2017)

De acuerdo con lo anterior el 20% de las fallas se deben a la ineficiencia en el sistema de sellado, lo que conlleva a efectos nocivos como la contaminación con bagazo y jugo en el

lubricante (20%) y la chumacera (20%) (ver Figura 2), para un 60% del total de fallas de chumaceras de molinos.

(a)



(b)



(c)



Figura 2. Chumaceras de bronce: (a) En buen estado y con poco desgaste, (b) Con desgaste adhesivo y abrasivo, (c) Con desgaste abrasivo severo. Fuente: (Viascán, 2017)

La Figura 2¹ ilustra el fenómeno de desgaste en los bronce de los molinos, debido a una combinación de los factores mencionados anteriormente. Esto demuestra la importancia de estudiar el fenómeno de desgaste en este tipo de componentes, lo cual contribuiría a un correcto funcionamiento de los molinos, con menor cantidad de paradas no programadas por mantenimiento y cambio de piezas. Además, contribuir a una mayor vida útil de estos componentes ahorraría costos por mantenimiento, aportando al crecimiento competitivo de los ingenios colombianos.

En el presente trabajo de investigación se hace una recolección de información para conocer los tipos de bronce y lubricantes comúnmente utilizados en los ingenios del sector. Se adecuó y se puso en marcha el tribómetro en configuración bloque-sobre anillo bajo la norma ASTM G-77 (en el cual se realizaron las pruebas de desgaste de acuerdo con las condiciones y materiales seleccionados), se reportan y se discuten los resultados obtenidos a partir de la experimentación y por último se presentan sugerencias de mejores prácticas de mantenimiento y operación para los molinos azucareros.

¹ Si el lector desea observar más fotografías sobre el desgaste producido en los bronce de los molinos azucareros, consultar la referencia (Viascán, 2017) y demás artículos a los que el autor hace referencia.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento tribológico de bronce y lubricantes para molinos utilizados en la industria azucarera colombiana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El objetivo general se lleva a cabo mediante la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Establecer la línea base de los bronce y lubricantes utilizados actualmente en los molinos de caña del sector azucarero.
- Desarrollar un diseño experimental para considerar los tipos de bronce con los cuales se realizarán los ensayos en el tribómetro empleando diversas condiciones de lubricación.
- Explorar el comportamiento exhibido por bronce durante ensayos tribológicos, con lubricantes contaminados.
- Caracterizar la microestructura de un bronce seleccionado, bajo las diversas condiciones de lubricación (con y sin contaminación).
- Proponer mejores prácticas para el mantenimiento y lubricación de molinos, de acuerdo con los resultados obtenidos.

3. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los conceptos teóricos básicos para el entendimiento del trabajo propuesto, con el fin de familiarizar al lector con el tema de investigación. Cabe resaltar que son sólo definiciones introductorias, por lo cual no se profundizará lo suficiente en cada ítem.

3.1 MOLIENDA DE CAÑA

La molienda es el proceso que sucede al de preparación de la caña (proceso donde se realiza la reducción de tamaño de la caña para la adecuada extracción), aquí es donde se separa el jugo que contiene la sacarosa del resto de la caña que se compone principalmente de fibra (Rein, 2012).

La caña de azúcar se compone principalmente por tres componentes:

1. Fibra (15%)
2. Sólidos disueltos (15%), los cuales se conocen con el nombre de Brix
3. Agua (70%)

Estos a su vez se dividen en otros subcomponentes cuya información se encuentra en el capítulo 5 de (Rein, 2012).

El término *extracción* se utiliza como indicador de desempeño² de los molinos y expresa el porcentaje de sacarosa extraída en relación con la que se encontraba inicialmente en la caña. La ecuación que expresa lo mencionado anteriormente es:

$$E = 100 \cdot \frac{\dot{m}_{S,RJ}}{\dot{m}_{S,C}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde E es la extracción de sacarosa, $\dot{m}_S$ es el flujo másico de sacarosa y los subíndices RJ y C corresponden a jugo crudo (también conocido como jugo diluido) y caña respectivamente.

3.2 MOLINOS

Los molinos son los que se encargan de realizar el proceso de extracción de sacarosa de la caña de azúcar. Anteriormente los molinos convencionales se conformaban de 3 mazas: la maza superior y las mazas cañera y bagacera. En este tipo de molinos la maza cañera y bagacera se encuentran sobre el mismo nivel, mientras que la maza superior es “flotante” (Rein, 2012). Actualmente es más común encontrar molinos a los cuales se les ha adaptado una maza adicional (ver Figura 3).

En la industria azucarera colombiana solamente hay un ingenio que opera con molinos de 3 mazas mientras que los otros 12 lo hacen con configuración de 4 mazas.

² Para consultar otras mediciones del desempeño en los molinos y la teoría de molienda, remitirse al capítulo 5 de (Rein, 2012).

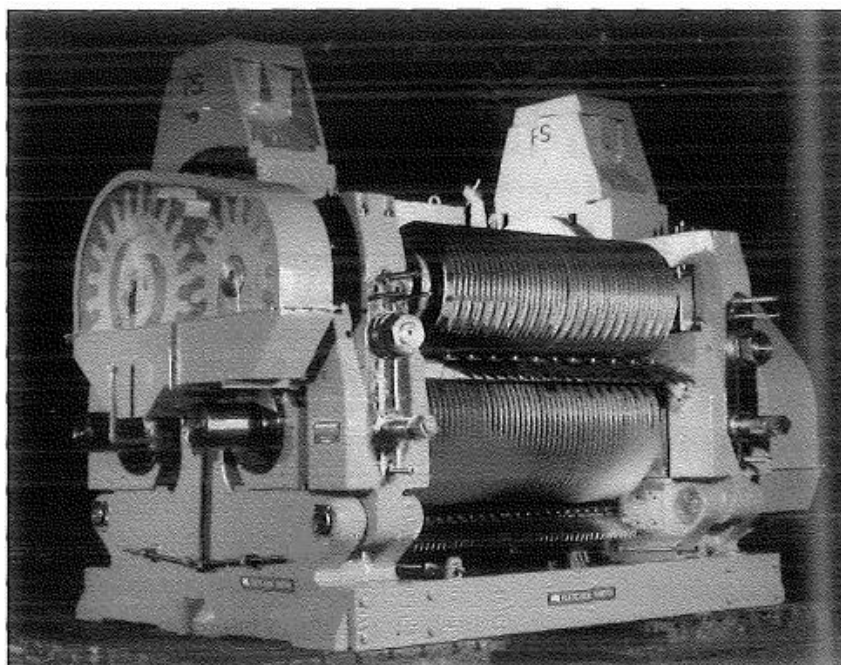


Figura 3. Molino de 4 mazas tipo Fletcher Smith. Fuente: (Rein, 2012)

La “cuarta maza” se acopla a los molinos con el fin de cumplir una función de soporte en la alimentación de la caña hacia las mazas cañera-superior, de ahí su nombre alternativo de maza alimentadora.

3.2.1 Componentes de los molinos: mazas

Dada la esencia de este trabajo, se presentarán únicamente los componentes que son objeto de estudio y que involucran el fenómeno de desgaste, es decir, los ejes de las mazas y las chumaceras en las que se apoyan los guijos.

Se entiende por maza (ver Figura 4) al elemento que se aloja en la cureña o bastidor, los cuales se fabrican como un eje de acero al cual se le ajusta un casco (generalmente de hierro fundido) por medio de contracción térmica. Este elemento está compuesto por:

1. Eje
2. Guijos
3. Casco
4. Brida

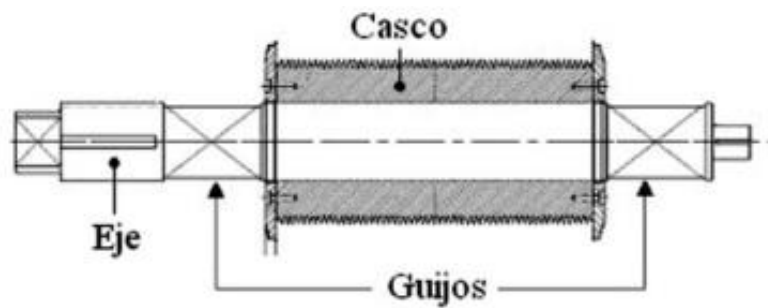


Figura 4. Maza de un molino y sus partes. Fuente: (Bolaños, Rivas, & Coronado, 2006)

3.2.1.1 Ejes

Los ejes están sometidos a cargas fluctuantes de torsión y flexión (ver Figura 5), por ende, los fenómenos de fatiga toman protagonismo. Los ejes de los molinos normalmente están fabricados en acero AISI 1045, ya que su contenido de carbono (%C) y buena ductilidad lo hacen un material apto para tal aplicación.

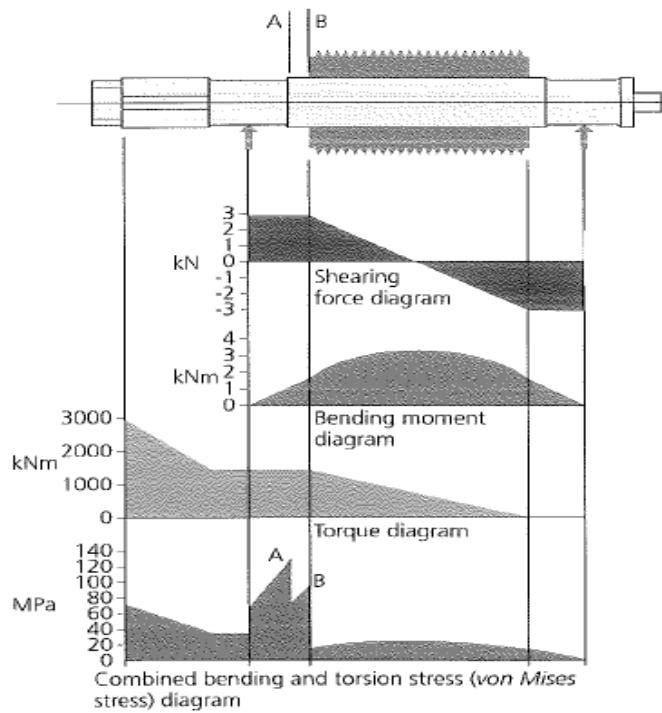


Figura 5. Diagrama de cortante, momento flector, torque y esfuerzo combinado (Von Mises) para un eje de maza superior. Fuente: (Rein, 2012)

De acuerdo con el diagrama, se observa en la Figura 5 que los esfuerzos máximos se presentan en los puntos A y B, en el cambio de sección del guijo y en la interfase casco-eje respectivamente, ambos en el lado de accionamiento del motor.

La geometría de los ejes contiene diversos cambios de sección que actúan como concentradores de esfuerzo y afectan la resistencia a fatiga de este componente. Para los redondeos se tiene:

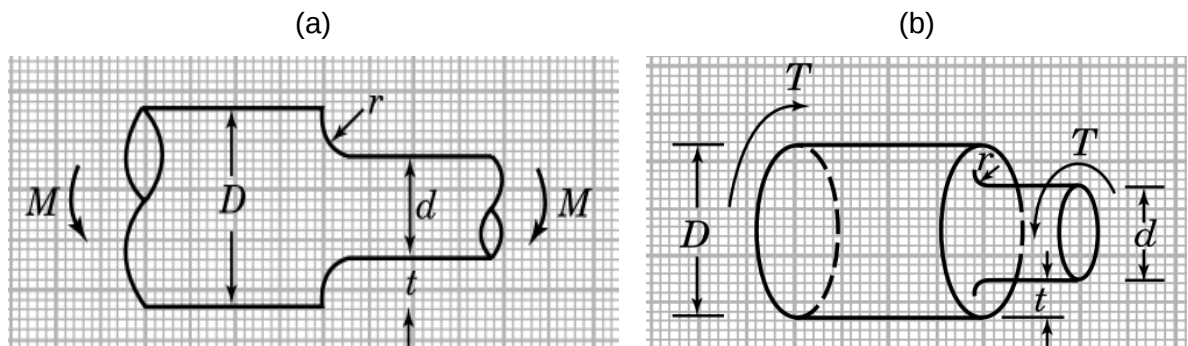


Figura 6. Eje con redondeos sometido a (a) Flexión, (b) Torsión. Fuente: Peterson (Pilkey & Pilkey, 1997)

Para los redondeos o codos en los ejes (ver Figura 6), generalmente se usan relaciones de $D/d = 1$ y $r/d = 0,1$, a lo que corresponde un factor de concentración de esfuerzos $K_t = 1,35$ a flexión y $K_{ts} = 1,175$ a torsión (usando las *tablas 3.11 y 3.13 de* (Pilkey & Pilkey, 1997)). Por otra parte, las ranuras y cuñeros en ejes cilíndricos pueden tener un factor de concentración de esfuerzo de $K_t = 1,79$ a flexión y $K_{ts} = 1,7$ a torsión (capítulo 2 de (Pilkey & Pilkey, 1997)).

3.2.1.2 Guijos

Los guijos son la zona del eje que se soportan sobre chumaceras o “tejas” de bronce (ver Figura 7), sus dimensiones se limitan por la función que cumplen de resistir flexión y transmitir potencia. Generalmente su longitud está entre 1,2 y 1,25 veces su diámetro y a su vez este está entre 50% y 60% del diámetro de la maza (Rein, 2012).



Figura 7. Guijo de un molino de caña de un ingenio del Valle del Cauca. (Fuente: Cenicaña)

3.2.1.3 Cojinetes

Generalmente los cojinetes utilizados en los molinos de caña de azúcar son piezas de construcción hueca de fundición entera de bronce (ver Figura 8) o comprendida por carcasas soporte de acero en donde se alojan las “tejas”. Las presiones admisibles en estos componentes se encuentran entre 9,0 y 11,0 Mpa, valor que depende de su diseño y lubricación (Rein, 2012).



Figura 8. Teja de bronce de un molino de un ingenio azucarero de Colombia. (Fuente: Cenicaña)

Los cojinetes que son a base de cobre se han utilizado para operación ante cargas elevadas desde los primeros motores a vapor. La microestructura de los materiales para cojinetes a base de cobre tiene un impacto significativo en el comportamiento ante desgaste. Existe una gran variedad de bronce los cuales pueden ser utilizados como material para cojinetes. Estas aleaciones normalmente se clasifican en los siguientes grupos (Glaeser, 1983):

1. Bronces aleados con estaño
2. Bronces aleados con estaño y plomo
3. Bronces de aluminio
4. Cobre al berilio

A continuación, se describen las primeras dos aleaciones, pues son el enfoque investigativo para este proyecto³.

Bronces aleados con estaño

Este tipo de bronce contiene una concentración en peso entre 5-15 % de estaño (Sn) y una pequeña cantidad de zinc (Zn). Se utiliza fósforo (P) para desoxidar la aleación, formando una fase de fosfuro de cobre (Cu_3P) lo cual incrementa la resistencia de esta. No obstante, estudios *de Gee et al* han comprobado que la presencia de fósforo incide en las reacciones de la superficie y en su lubricación. Cuando fósforo es añadido a la aleación, el desempeño con algunos lubricantes ante régimen de lubricación límite (condición a la que los cojinetes normalmente están sometidos) no es tan efectivo (Taylor, Gee, Vaessen, & Begelinger, 1971).

³ Para mayor información sobre los otros tipos de bronce, propiedades de los cojinetes y los mecanismos de desgaste, se recomienda al lector consultar la referencia (Glaeser, 1983).

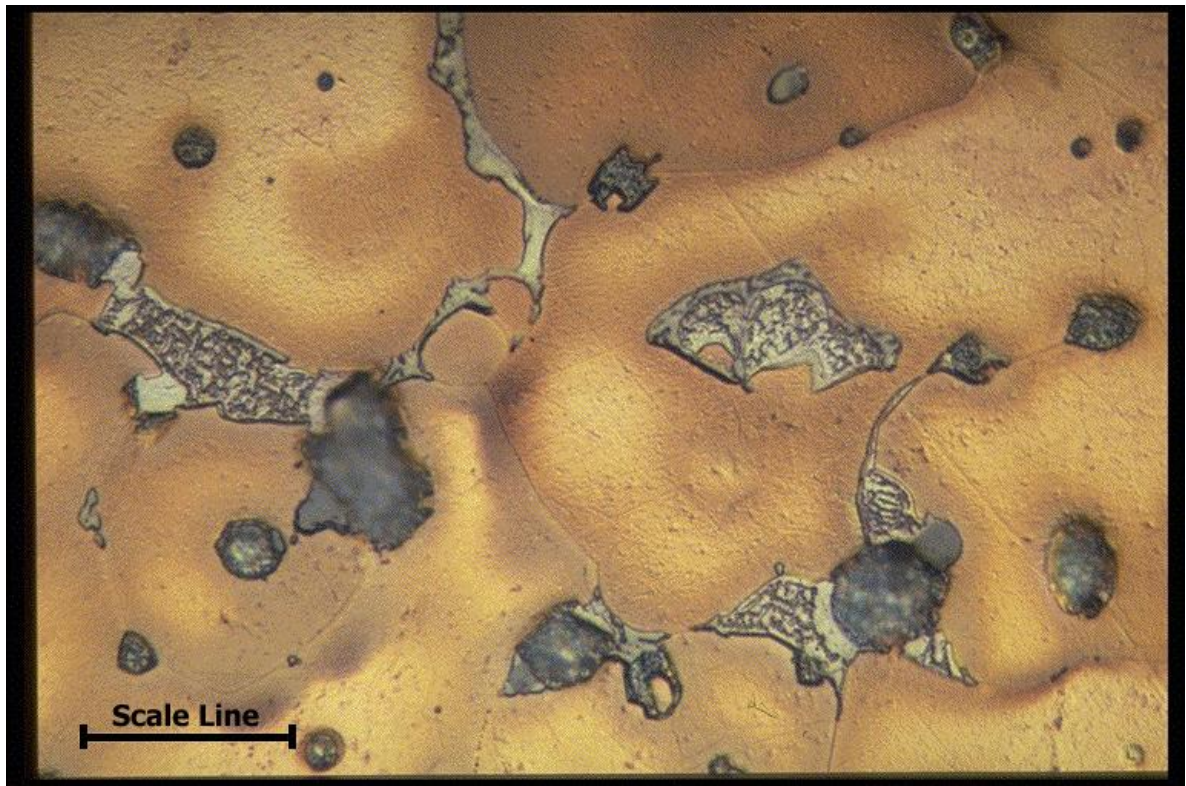


Figura 9. Microestructura del bronce UNSC-93700 (SAE 64). Fuente: (Association Inc., 2018)

La Figura 9 muestra la microestructura del bronce C-93700, cuya composición es de 78-82% Cu, 9,8-11% Sn, 0,7% Zn. Las áreas de color gris claro uniformemente dispersas se conocen como fase delta (δ), la cual es una fase intermetálica dura ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) y aumenta la dureza del material. La adición de estaño fomenta la dureza de la aleación, mientras que añadir zinc desplaza al estaño y fomenta la formación de fase δ (Glaeser, 1983).

Bronces aleados con estaño y plomo

Estos tipos de bronce contienen plomo (Pb), el cual es insoluble en el cobre cuando ambos son fundidos. El plomo crea una fase dispersa en forma de nódulos (ver Figura 10) en su microestructura, lo cual provee un mecanismo de lubricación sólida ya que se esparce sobre la superficie cuando hay deslizamiento y reduce la adhesión por contacto. (Glaeser, 1983)

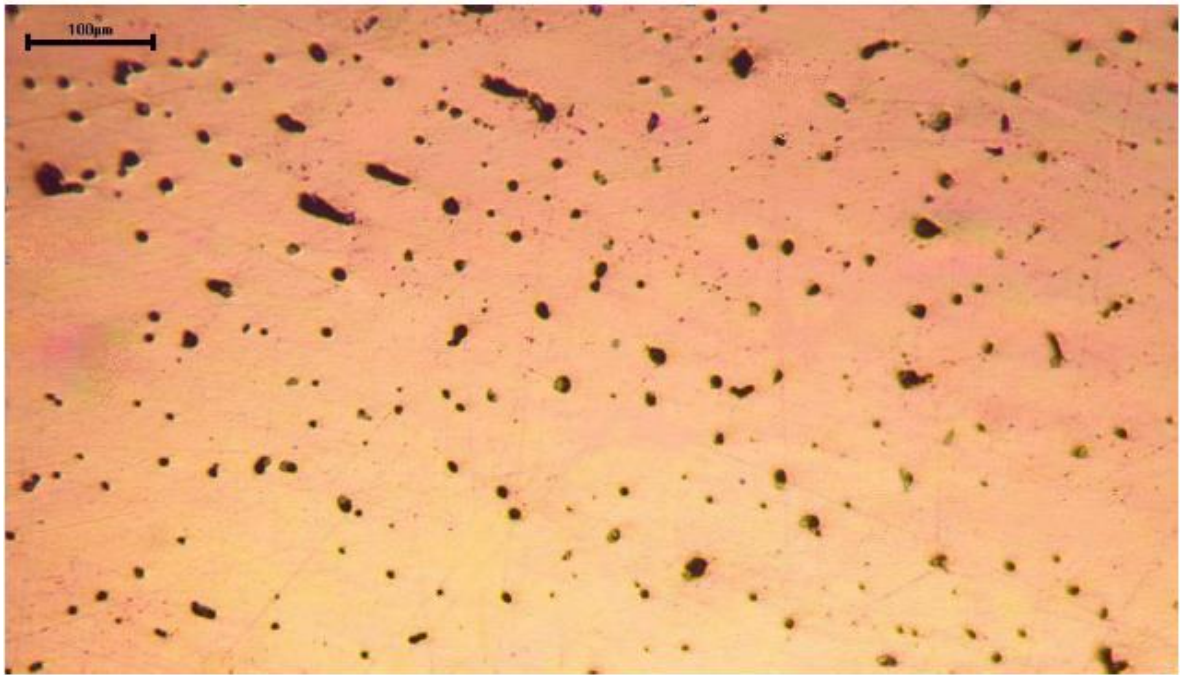


Figura 10. Microestructura del bronce UNSC-93800 (SAE 67). Fuente: (Chamorro, 2014)

En la Figura 10 se muestra la microestructura de un bronce C-93800 (75-79% Cu. 7-9% Sn. 7% Pb y 3% Zn) en donde se aprecia la fase dura δ y el plomo libre uniformemente distribuido. Generalmente el plomo se agrega en una concentración entre 1-10%, pero se puede adicionar hasta un aproximado de 20% (Glaeser, 1983). Cuando el plomo desplaza al estaño en la aleación, la fase δ se reduce lo que ocasiona un decremento en la dureza. Por esta razón los bronce con alto contenido de plomo son escasamente utilizados para aplicaciones de impacto, cargas oscilantes de gran magnitud y operación a altas temperaturas; pero se prefieren en aplicaciones donde se presente desgaste por lubricación ineficiente o la pérdida de lubricante sea minimizado y que permita desalineaciones entre el eje y el cojinete (Glaeser, 1983).

A lo largo del documento se referenciarán los bronce UNS C-93700 y UNS C-93800 como C-93700 y C-93800 por cuestiones prácticas. No obstante, es de importancia que el lector conozca que la denominación comercial SAE 64 y SAE 67 no está vigente, pues la ASTM y SAE unificaron la codificación de los materiales con el sistema unificado de numeración (UNS).

3.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LAS CHUMACERAS

Las chumaceras pueden refrigerarse de diversas maneras, la Figura 11 presenta una de ellas:

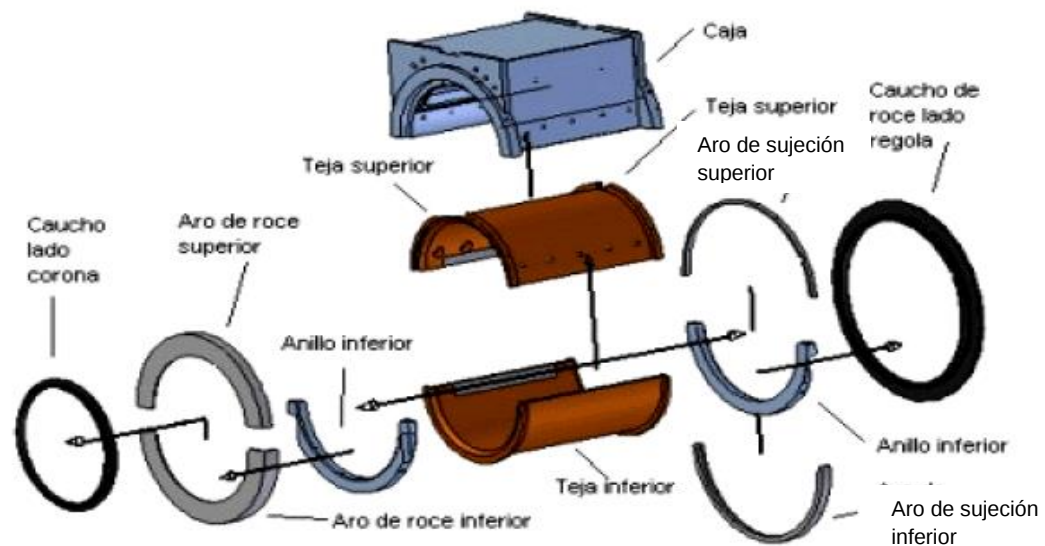


Figura 11. Chumacera refrigerada en la caja. Fuente: (Coronado et al., 2005)

El diseño de la Figura 11 consiste en una chumacera que se conforma de una caja, la cual está en contacto directo con la teja que tiene conductos de lubricación. La caja (ver Figura 12a) aloja el circuito de refrigeración, donde circula el agua que entra en contacto directo con la teja para disipar el calor durante la operación. Al igual que la caja, la teja tiene conductos de lubricación (ver Figura 12b), los cuales se encuentran en los costados de esta, por la que circula el lubricante y reduce la fricción en operación (Coronado et al., 2005).



Figura 12. Conductos de refrigeración y lubricación (a) Caja, (b) Teja superior. Fuente:(Coronado et al., 2005)

Los canales que se observan en la caja son para que el agua de refrigeración permanezca en contacto directo con la teja superior. La teja superior tiene como función soportar la presión que ejerce el guijo, el lubricante ingresa por la caja y fluye hacia la teja, entrando de forma radial a las pestañas (Coronado et al., 2005).

Existe otro tipo sistema de refrigeración el cual se muestra a continuación:

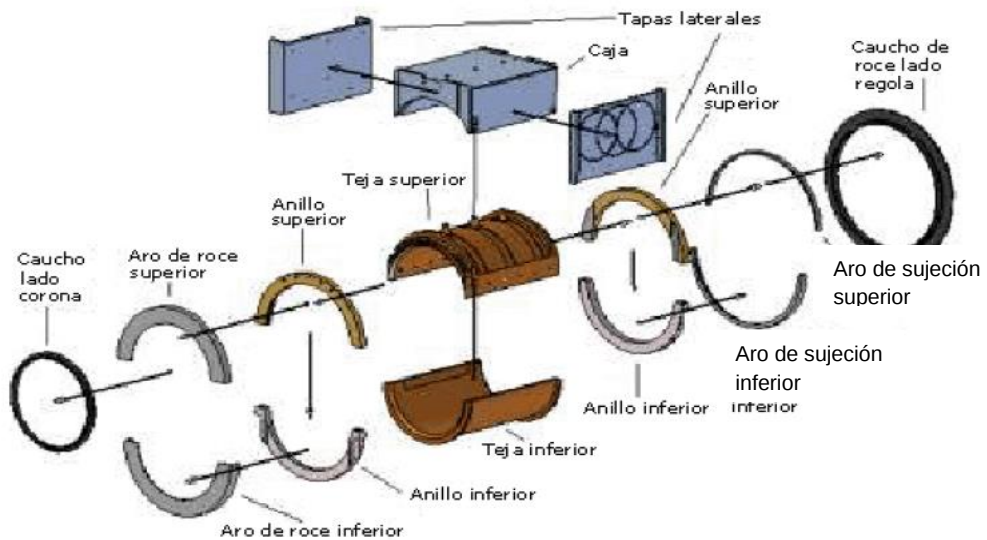


Figura 13. Chumacera refrigerada en la teja. Fuente:(Coronado et al., 2005)

La diferencia con este sistema de la Figura 13 respecto al anterior es la forma en que se refrigera la teja, pues la refrigeración es interna y la teja tiene un cuerpo de acero que la aloja. La caja soporta la presión que ejerce el eje y el desplazamiento axial. La siguiente figura ilustra de mejor manera el sistema:

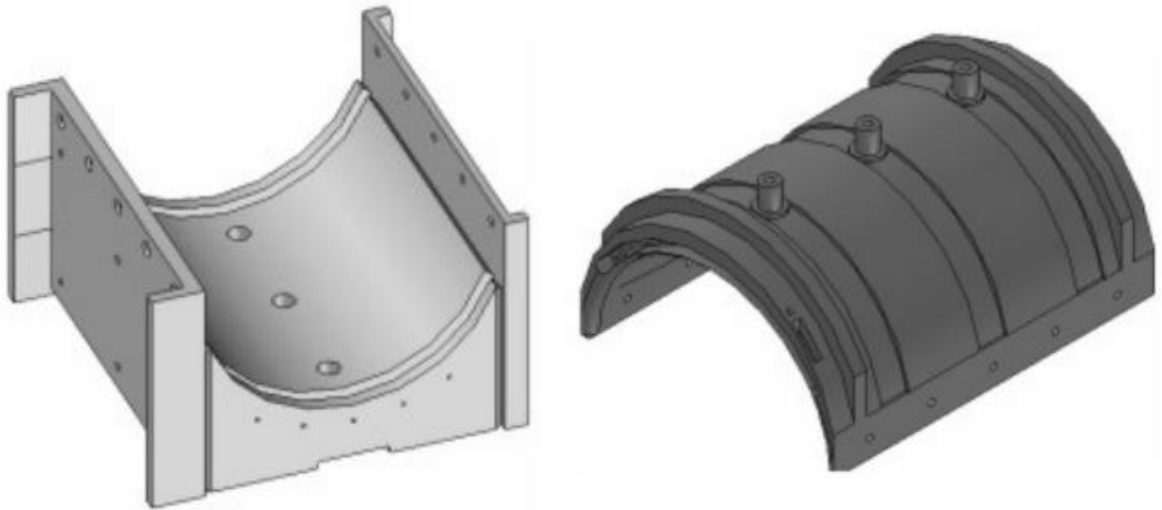


Figura 14. (a) Cuerpo de acero de la teja, (b) Teja superior. (Coronado et al., 2005)

La refrigeración se realiza de forma vertical por los 3 orificios que contiene la teja, los cuales van conectados al cuerpo de acero, el lubricante también ingresa por los costados de la teja la cual está conectada con la caja mediante tapas laterales (Coronado et al., 2005).

3.4 TRIBOLOGÍA

La tribología es la ciencia que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo. Incluye el estudio y la aplicación de los principios de fricción, lubricación y desgaste (“Home - Tribology and Lubrication Engineering Society | STLE,” 2018).

3.4.1 Lubricación

Para los elementos mecánicos que cuyas superficies se encuentran en contacto con otros elementos, es necesario emplear lubricantes. Los lubricantes son necesarios para reducir la fricción, impedir el desgaste, proteger la superficie contra corrosión e incluso se utilizan como medio de refrigeración (SKF, 2018) .

3.4.1.1 Tipos de lubricantes

Existen tres tipos de lubricantes:

4. Líquidos
5. Sólidos
6. Gaseosos

Los *lubricantes líquidos* se utilizan con mayor frecuencia pues son incompresibles, soportan altas cargas de operación y su baja resistencia al corte reduce el coeficiente de fricción (ver Tabla 1 para lubricantes generalmente utilizados y su respectiva aplicación).

Los *lubricantes sólidos* se utilizan en aplicaciones donde los líquidos no se mantienen en la superficie, no se pueden aplicar fácilmente o cuando carecen de algunas propiedades como resistencia a altas temperaturas. Los *gaseosos* se utilizan para aplicaciones especiales como cojinetes neumáticos (Norton, 2011).

Tabla 1. Tipos de lubricantes líquidos. Fuente: (Norton, 2011)

Tipo	Propiedades	Usos típicos
Aceites derivados del petróleo (aceites minerales)	Capacidad de lubricación básica, pero los aditivos generan gran mejora. Acción lubricante deficiente a altas temperaturas	Muy amplios y generales
Poliglicoles	Lubricantes bastante buenos; no forman sedimentos con la oxidación	Líquido para frenos
Silicios	Capacidad de lubricación deficiente, sobre todo contra el acero. Buena estabilidad térmica	Sellos de hule. Amortiguadores mecánicos
Clorofluorocarbonos	Buenos lubricantes, buena estabilidad térmica	Compresores de oxígeno. Equipo de procesos químicos
Éteres de polifenil	Intervalo líquido muy amplio. Excelente estabilidad térmica. Capacidad de lubricación aceptable	Sistemas de deslizamiento a altas temperaturas
Ésteres de fosfatos	Buenos lubricantes—Acción de presión extrema	Fluido hidráulico y lubricante
Ésteres dibásicos	Buenas propiedades de lubricación. Resistencia mayores temperaturas que los aceites minerales	Motores de propulsión

Fuente: E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, 1965, reimpreso con autorización de John Wiley & Sons, Inc.

3.4.1.2 Tipos de lubricación

Existen tres regímenes de lubricación:

1. Límite
2. Mixta
3. De película completa

El régimen de película completa se subdivide a su vez en lubricación *hidrodinámica*, *elasto-hidrodinámica* (EHD) e *hidrostática*⁴.

⁴ Para conocer más acerca de cada tipo de lubricación y algunas ecuaciones que determinan su comportamiento, dirigirse a la referencia (Norton, 2011).

Lubricación límite

Este régimen de lubricación es el menos deseable de los mencionados anteriormente (ver Figura 15) debido a que la película de lubricante es muy delgada, por lo que las superficies en movimiento relativo presentan contacto metal-metal (Norton, 2011).

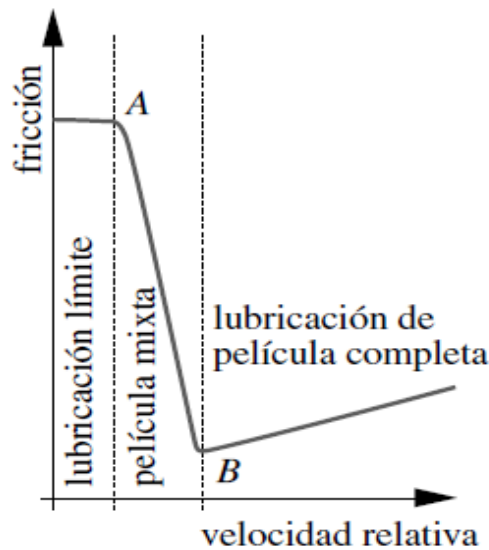


Figura 15. Diagrama fricción vs velocidad de un cojinete de deslizamiento. Fuente: (Norton, 2011).

Del gráfico se observa que a medida que la velocidad relativa se incrementa, la película de lubricante se distribuye de manera tal (a partir del punto B) que crea una interfase lo suficientemente gruesa para separar por completo ambas superficies y reducir la fricción (Norton, 2011).

Cabe resaltar que esta condición es la que se presenta en los molinos de caña de azúcar, exactamente en las chumaceras, lo que acelera su desgaste y la formación de grietas por fatiga (Viascán, 2017). Por lo tanto, es la única que se define en este documento

3.4.2 Fricción

La fricción se define como la fuerza cortante que se requiere para cortar las asperezas superficiales y así permitir un movimiento de deslizamiento (Norton, 2011). La ecuación que describe la fricción por deslizamiento de Coulomb está descrita por:

$$f = \mu F \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde f es la fuerza de fricción, F la fuerza normal que presiona mutuamente los cuerpos en contacto y μ el coeficiente de fricción dinámico (ver Tabla 2 para coeficientes de fricción estáticos y dinámicos entre pares de materiales diversos).

Se distingue dos tipos de fricción:

- Fricción Estática
- Fricción Dinámica

El primero se define como la fuerza necesaria para poner en movimiento a un cuerpo en estado de reposo con respecto a otro; mientras que el segundo, es la fuerza (considerada de magnitud constante) que se opone al movimiento una vez iniciado este (Norton, 2011).

Tabla 2. Coeficientes de fricción de pares de materiales. Fuente: (Norton, 2011)

Material 1	Material 2	Estático		Dinámico	
		Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
acero dulce	acero dulce	0.74		0.57	0.09
acero dulce	hierro fundido		0.183	0.23	0.133
acero dulce	aluminio	0.61		0.47	
acero dulce	latón	0.51		0.44	
acero duro	acero duro	0.78	0.11–0.23	0.42	0.03–0.19
acero duro	babbitt	0.42–0.70	0.08–0.25	0.34	0.06–0.16
teflón	teflón	0.04			0.04
acero	teflón	0.04			0.04
hierro fundido	hierro fundido	1.10		0.15	0.07
hierro fundido	bronce			0.22	0.077
aluminio	aluminio	1.05		1.4	

Fuente: *Mark's Mechanical Engineers' Handbook*, T. Baumeister, ed., McGraw-Hill, Nueva York

3.4.3 Desgaste

El desgaste se define como el daño que se produce en una superficie sólida, se manifiesta en forma de pérdida progresiva de material y se debe al movimiento relativo entre su superficie con otro material o sustancias (ASTM G-77, 2017).

3.4.3.1 Tipos de desgaste

El desgaste por deslizamiento se produce debido al movimiento relativo en el plano tangencial de contacto entre dos superficies (ASTM G-77, 2017). Se clasifican dos tipos de desgaste el *Adhesivo* y *Abrasivo*⁵ (Hutchings & Shipway, 2017a).

⁵ Se conocen diversos tipos de desgaste, sin embargo, se mencionan los que comúnmente se presentan en la interfase molino-chumacera.

Desgaste adhesivo

Este término suele ser utilizado para describir el desgaste por deslizamiento, sin embargo, en ocasiones no se usa correctamente. La adhesión juega un papel importante sobre el desgaste por deslizamiento, pero sólo es uno de muchos procesos físicos y químicos que están involucrados (Hutchings & Shipway, 2017a). Cuando hay desgaste por deslizamiento severo, los 3 fenómenos que se pueden presentar son: *raspadura*, *estriación* y *desprendimiento de material* (Hutchings & Shipway, 2017a).

La siguiente figura ilustra diversos métodos experimentales usados para estudiar este tipo de desgaste:

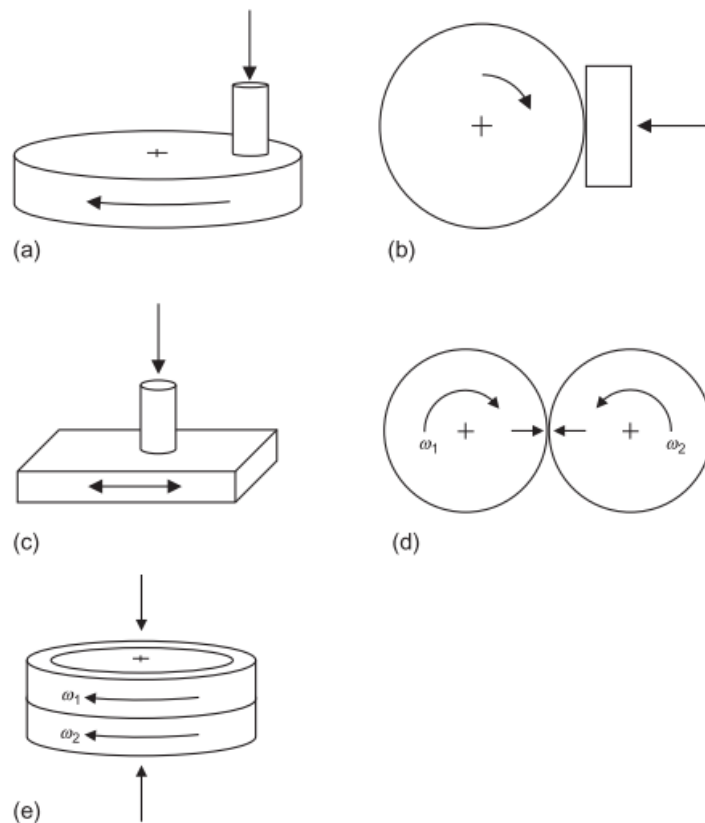


Figura 16. Geometrías empleadas comúnmente en ensayos de desgaste por deslizamiento (a) pin-en-disco, (b) bloque-sobre-anillo, (c) pin-en-placa recíprocante, (d) discos rotatorios, (e) anillo-sobre-anillo. Fuente: (Hutchings & Shipway, 2017a)

Los pares experimentales más comunes emplean un pin o bloque presionados contra un disco en la cara plana (Figura 16a) o incluso apoyados sobre el borde (Figura 16b). En la mayoría de geometrías el contacto es asimétrico, es decir, que la naturaleza del contacto experimentada por un cuerpo del par no es la misma que experimenta el otro (Hutchings & Shipway, 2017a).

Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste se caracteriza por la remoción o el desplazamiento del material de una superficie debido a partículas duras o protuberancias duras de una superficie opuesta, la cual se encuentra en movimiento y en contacto con la otra (Hutchings & Shipway, 2017b) .

Existe abrasión de dos y tres cuerpos, el primero hace referencia al desgaste que se presenta entre dos superficies con asperezas pertenecientes a ellas, mientras que en la abrasión de tres cuerpos las partículas duras son libres e ingresan entre dos superficies que ya están en movimiento (Hutchings & Shipway, 2017b).

4. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este estudio se evaluó el comportamiento tribológico del par acero-bronce mediante el uso del tribómetro bloque-sobre anillo, basado en la norma ASTM G77 y en el cual se analizó el desgaste que se presenta en la interfase de estos elementos. Se utilizaron anillos de acero AISI 1045 y bloques de bronce UNS C-93700 y UNS C-93800, los cuales son los materiales comúnmente utilizados en la industria azucarera para los ejes de los molinos y chumaceras respectivamente.

El par acero-bronce fue evaluado ante dos condiciones de carga y velocidad. Adicionalmente, se evaluó el comportamiento del par bajo condición de lubricación, empleando el lubricante *Sugar Oil Pluss* (utilizado en gran mayoría de los ingenios del sector azucarero de Colombia).

Durante los ensayos se registró la fuerza tangencial, luego se calculó el coeficiente de fricción y pérdida de masa en cada corrida y se correlacionaron los resultados.

4.1 LÍNEA BASE DE BRONCES Y LUBRICANTES DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL

Se realizó una investigación de los diversos ingenios azucareros del sector para determinar qué material de bronce es utilizado en las chumaceras de los molinos y cuáles lubricantes emplean para lubricación de estos. De lo anterior se recolectó la siguiente información:

Tabla 3. Bronces y lubricantes utilizados en molinos del sector. (Fuente: Cenicaña)

Ingenio Piloto	Bronce en chumaceras	Lubricante
1	TM-23 y SAE 64	Sugar Oil Pluss
2	SAE 64 y SAE 67	Sugar Press BR 32K
3	SAE 64 y SAE 67	Sugar Oil Pluss
4	SAE 64 y SAE 67	Bel Ray Sugar Clear Gear & Bearing, Laapsa Sugar Press
5	SAE 67	SUGAR PRESS 32000

De acuerdo con la información reunida para los 5 ingenios del sector, se optó por elegir los bronce *UNS C-93700* y *UNS C-93800*, que corresponden al SAE 64 y SAE 67 respectivamente. Por otra parte, el lubricante que se eligió fue el *Sugar Oil Pluss*.

La siguiente tabla muestra las propiedades del lubricante mencionado anteriormente:

Tabla 4. Ficha técnica del lubricante. (Fuente: simca group ("FICHA TÉCNICA RESIST SUGAR OIL PLUSS," n.d.))

ESPECIFICACIONES:	NORMAS REFERENCIA ASTM	VALOR TÍPICO
Apariencia	-	Líquido Viscoso altamente adhesivo
Gravedad específica a 15.6°C / 15.6°C	D 1298	0,91
Viscosidad a 40°C, cSt	D 445	55000
Viscosidad a 100°C, cSt	D 445	2000
Punto de Inflamación, °C	D 92	230
Color	N.A.	Caramelo
EP Desempeño, Carga de soldadura, kg - f	D 2596	800

Una vez establecida la línea base de los materiales y lubricantes utilizados, se procede a calcular las velocidades y cargas que serán empleadas en los ensayos de desgaste, las cuales se explican en la sección 4.2.

4.2 EQUIVALENCIA MOLINO-TRIBÓMETRO

Se encontraron los parámetros de operación del tribómetro de desgaste por deslizamiento equivalentes a un molino de caña, con el fin de obtener resultados que se acerquen a las condiciones encontradas en el proceso.

4.2.1 Velocidades

Para el cálculo de la velocidad equivalente a utilizar en el giro del anillo del tribómetro, fue necesario conocer de antemano la geometría característica de los molinos del sector azucarero.

En proceso, las mazas de mayor diámetro favorecen la capacidad de molienda, mientras que las de mayor longitud favorecen la extracción del jugo. El balance de las condiciones de resistencia y competitividad ha sido abordado por diversos autores mencionados por Rein (Rein, 2012), en donde se concluye que la proporción óptima para los cascos es:

$$l = 2d \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

d es el diámetro externo de la maza

l es la longitud del casco

La Tabla 5 presenta el tamaño estándar para los molinos de caña tipo *Walker* tanto para el molino como para los guijos:

Tabla 5. Tamaños estándar de los molinos Walker. Fuente: (Rein, 2012)

Tamaño nominal del molino $d \times l$ en mm	Tamaño nominal del guijo $d \times l$ en mm
870 × 1525	425 × 530
870 × 1650	425 × 530
915 × 1830	450 × 580
1015 × 1980	510 × 610
1100 × 2134	535 × 660
1180 × 2300	565 × 700
1250 × 2500	620 × 760
1300 × 2550	660 × 800
1400 × 2750	735 × 900

De la tabla se discierne que las dimensiones del guijo en cuanto al diámetro son aproximadamente del 50 a 60% el diámetro de la maza, esto es:

$$D_{guijo} = \frac{1}{2} D_{maza} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Debido a que las chumaceras de bronce en las que se apoyan los guijos resisten una presión nominal entre 9,0 y 11,0 MPa la longitud de los guijos está acotada por:

$$L_{guijo} = (1,2 - 1,25) D_{guijo} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Se realizó una lista con las dimensiones de los molinos comúnmente utilizados en la industria azucarera colombiana, a partir de los cuales se calculan las velocidades respectivas para cada caso:

Tabla 6. Molinos convencionales en industria azucarera colombiana. (Fuente: Cenicaña)

Caso	Molinos							
	Longitud casco		D ext		D medio		D guijo	
	[in]	[m]	[in]	[m]	[in]	[m]	[in]	[m]
Caso 1	54	1,372	27	0,686	25	0,635	13,5	0,343
Caso 2	60	1,524	30	0,762	28	0,711	15	0,381
Caso 3	66	1,676	33	0,838	31	0,787	16,5	0,419
Caso 4	72	1,829	36	0,914	34	0,864	18	0,457
Caso 5	78	1,981	39	0,991	37	0,940	19,5	0,495
Caso 6	84	2,134	42	1,067	40	1,016	21	0,533

Una vez conocidas las relaciones geométricas de los molinos y teniendo en cuenta que estos giran a una velocidad de 3 a 6 rpm, se procedió a calcular la equivalencia de velocidades, obteniendo así el rango de velocidad al que debería girar el anillo del tribómetro dependiendo del tamaño y la velocidad de operación del molino:

Tabla 7. Velocidades equivalentes según el tamaño del molino. (Fuente: Autor)

Caso	Velocidades molino				Velocidad anillo	
	rpm	ω [rad/s]	Vt maza [m/s]	Vt guijo [m/s]	ω [rad/s]	rpm
Caso 1	3	0,314	0,100	0,054	3,078	29,391
	4	0,419	0,133	0,072	4,104	39,189
	5	0,524	0,166	0,090	5,130	48,986
	6	0,628	0,199	0,108	6,156	58,783
Caso 2	3	0,314	0,112	0,060	3,420	32,657
	4	0,419	0,149	0,080	4,560	43,543
	5	0,524	0,186	0,100	5,700	54,429
	6	0,628	0,223	0,120	6,840	65,314
Caso 3	3	0,314	0,124	0,066	3,762	35,923
	4	0,419	0,165	0,088	5,016	47,897
	5	0,524	0,206	0,110	6,270	59,871
	6	0,628	0,247	0,132	7,524	71,846
Caso 4	3	0,314	0,136	0,072	4,104	39,189
	4	0,419	0,181	0,096	5,472	52,251
	5	0,524	0,226	0,120	6,840	65,314
	6	0,628	0,271	0,144	8,208	78,377
Caso 5	3	0,314	0,148	0,078	4,446	42,454
	4	0,419	0,197	0,104	5,928	56,606
	5	0,524	0,246	0,130	7,410	70,757
	6	0,628	0,295	0,156	8,892	84,909
Caso 6	3	0,314	0,160	0,084	4,788	45,720
	4	0,419	0,213	0,112	6,384	60,960
	5	0,524	0,266	0,140	7,980	76,200
	6	0,628	0,319	0,168	9,576	91,440

Para este proyecto investigativo se eligieron los molinos del caso 5 y 6, cada uno con una velocidad de operación de 3 y 6 rpm (sombreado en amarillo). El promedio de las velocidades de giro del anillo son 44 y 88 rpm para los niveles bajo y alto respectivamente. En la sección de ANEXOS 9.1 se explican las relaciones que se utilizaron para hacer los cálculos correspondientes de las velocidades.

4.2.2 Fuerza normal del experimento

Para determinar la fuerza normal a utilizar en cada una de las corridas experimentales, se realizó un montaje (ver Figura 17) ubicando una celda de carga de tal manera que se obtuviera la lectura de la fuerza en el punto comprendido entre el bloque y el anillo.

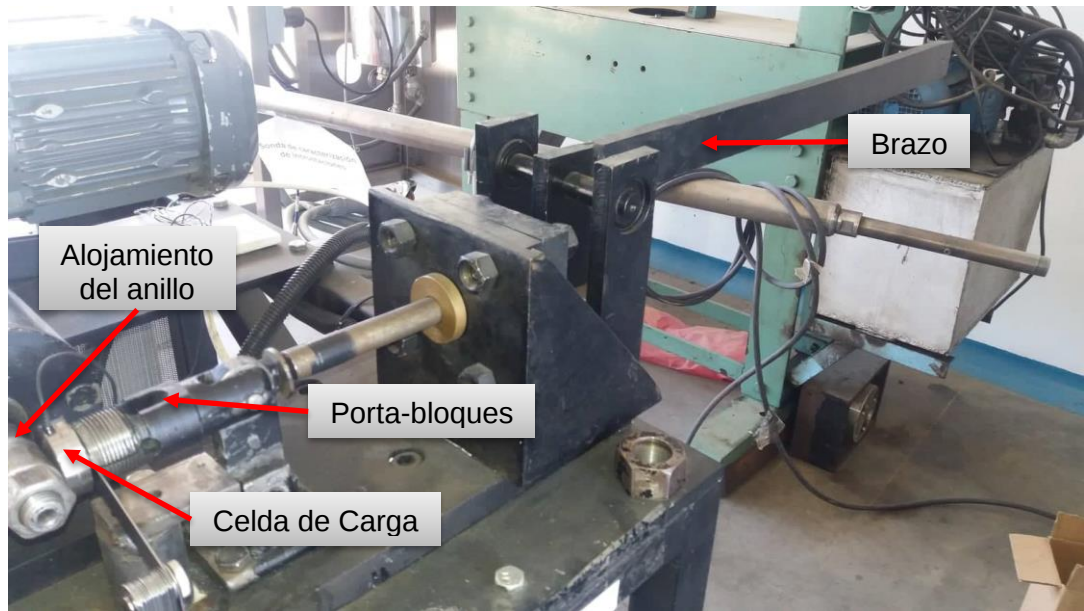


Figura 17 Medición experimental de la fuerza normal.

Se eligieron dos valores a partir de una curva de calibración elaborada experimentalmente. La Tabla 8 relaciona los valores registrados en la celda de carga para un peso conocido aplicado en el brazo:

Tabla 8. Peso adicionado y fuerza registrada en la celda de carga.

Peso adicionado [Kg]	Fuerza normal [N]
2,24	175,89
6,96	812,56
9,52	1152,48
11,54	1404,99
16,22	1994,27

Cabe aclarar que el peso base correspondiente a 2,24 kg es el peso propio del brazo del tribómetro, cuya contribución se tuvo en cuenta en el momento de colocar cada peso sobre este. La Figura 18 muestra la gráfica que relaciona los datos de la tabla anterior:

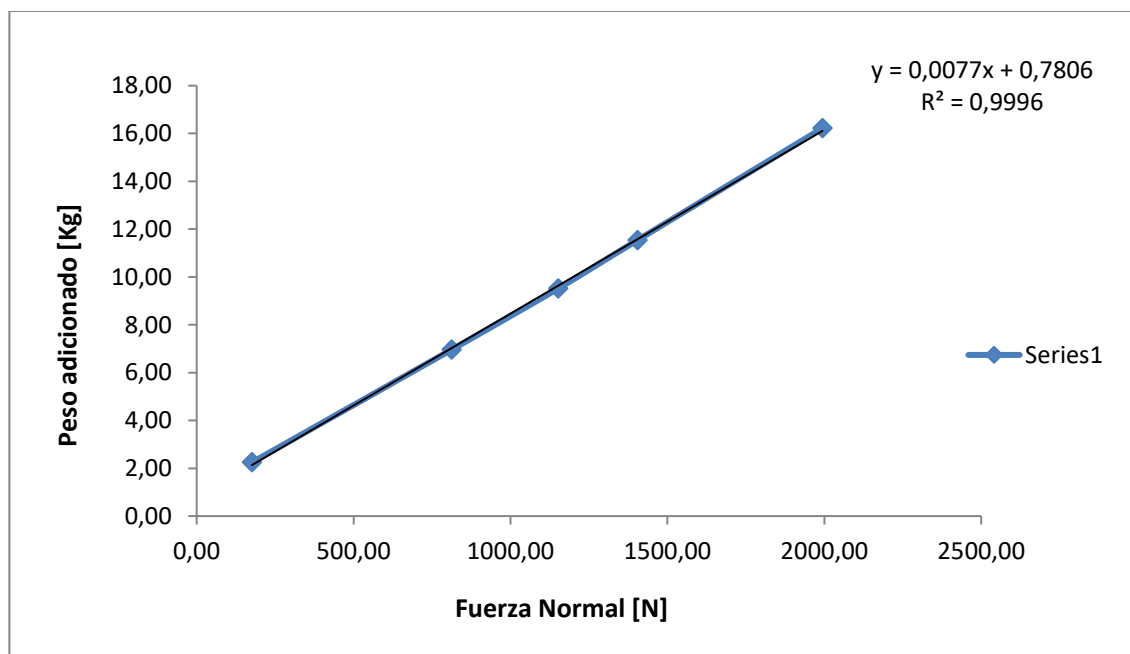


Figura 18. Curva de calibración de la celda. (Fuente: Autor)

Con esta información se obtuvo la ecuación de la recta que predice la fuerza normal que se ejerce sobre el bloque al colocar una carga arbitraria conocida con una precisión de 99,96%.

Se eligieron dos niveles (bajo y alto) de fuerza normal aplicada, los cuales son 175,89 y 812,56 N respectivamente, correspondientes al peso propio del brazo (2,24 kg) y a un peso colocado de 4,72 kg (6,96 kg totales de peso).

El nivel alto de 813 N se eligió por ser una fuerza que ejerce una presión similar a la de las chumaceras y que ha sido utilizado en el estudio realizado por (Rivas, Coronado, & Gómez, 2006). El nivel bajo de fuerza normal se eligió bajo el criterio de ser la fuerza mínima que se puede ejercer sobre el bloque.

4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En esta sección se detalla el diseño de experimentos que se llevó a cabo, así como la recopilación de información de estudios anteriores en el tema, con el fin de tener un panorama más claro sobre el problema planteado en este proyecto de investigación.

4.3.1 Etapas del diseño de experimentos

Todo experimento de carácter científico e investigativo necesita de una buena planeación: tener claro el caso de estudio que se va a desarrollar, cómo se realizará la recolección de los datos y tener idea de cómo puede ser el análisis de estos. El diseño de experimentos involucra diversas etapas (ver Tabla 9) a partir de las cuales una vez ejecutadas, otorgan coherencia y confiabilidad a los datos obtenidos en la experimentación; garantizando que las conclusiones e inferencias establecidas acerca del problema de estudio sean válidas y objetivas (Montgomery, 2004).

Tabla 9. Pautas generales del diseño de experimentos. Fuente: (Montgomery, 2004)

1. Identificación y exposición del problema.	} Planeación previa al experimento
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos. ^a	
3. Selección de la variable de respuesta. ^a	
4. Elección del diseño experimental.	
5. Realización del experimento.	
6. Análisis estadístico de los datos.	
7. Conclusiones y recomendaciones.	

^a En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

La identificación y exposición del problema se presentó en la sección INTRODUCCIÓN y las etapas 5 a 7 se exponen en las secciones posteriores ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES respectivamente.

4.3.2 Elección de los factores, niveles y rangos

Los factores de diseño que fueron considerados son: lubricación, velocidad, fuerza y material del bloque (ver Tabla 10). Los factores constantes son el material del anillo y el tipo de lubricante, para los cuales se seleccionó el acero AISI 1045 y el lubricante *Sugar Oil Pluss* respectivamente.

Tabla 10. Factores de diseño y sus respectivos niveles. (Fuente: Autor)

Velocidad	Material bloque	Tipo de lubricación	Carga
44 rpm (Baja)	C-93700	Lubricado (Sugar Oil Pluss)	176 N (Baja)
88 rpm (Alta)	C-93800	Contaminado (Jugo de primera extracción)	813 N (Alta)

Para el nivel de lubricación contaminado se utilizó jugo de primera extracción en una proporción 30% del volumen, con un pH entre 5-6 y brix (Bx) entre 16 y 20%.

De acuerdo con los niveles que fueron determinados para cada factor, se obtuvo el número de corridas experimentales que corresponden a la combinatoria de cada una de las condiciones: $2^4 = 16$

Son 16 experimentos base para una sola réplica en cada combinación de factores (el número de repeticiones se determina en la sección 4.3.4).

Los escenarios que resultan producto de la combinación de los factores de diseño se muestran a continuación:

Tabla 11. Escenarios experimentales.

Bronce	Velocidad [rpm]	Carga [N]	Lubricación
C-93800	44	176	Lubricado
	44	813	Lubricado
	88	176	Lubricado
	88	813	Lubricado
	44	176	Contaminado
	44	813	Contaminado
	88	176	Contaminado
	88	813	Contaminado
C-93700	44	176	Lubricado
	44	813	Lubricado
	88	176	Lubricado
	88	813	Lubricado
	44	176	Contaminado
	44	813	Contaminado
	88	176	Contaminado
	88	813	Contaminado

4.3.3 Selección de la variable de respuesta

Las variables de respuesta seleccionadas para el experimento son la pérdida de masa del bloque y el coeficiente de fricción dinámico, este último se calcula a partir de la fuerza tangencial registrada por la celda de carga durante los ensayos de desgaste. Los resultados obtenidos se reportan y se discuten en el capítulo 5.

4.3.4 Selección del diseño experimental

En esta etapa del diseño se determinó el número de repeticiones para cada uno de los experimentos base, de acuerdo con la información reportada en ANEXOS 9.2, de estudios previos relacionados con el desgaste por deslizamiento y que involucra en su gran mayoría el par bronce-acero. Una cantidad de tres repeticiones fue determinada para cada caso base, teniendo un total de 48 experimentos.

4.4 METODOLOGÍA SEGÚN EL STANDARD ASTM G-77

Para la realización de los ensayos de desgaste se empleó la norma ASTM G-77, la cual corresponde a la caracterización de la resistencia al desgaste de los materiales mediante un tribómetro de desgaste por deslizamiento en configuración bloque-anillo.

El procedimiento se describe brevemente a continuación:

1. Limpiar superficies con cuidado, utilizando solvente sin contenido de cloro de forma ultrasónica.
2. Pesar anillo y bloque con balanza analítica de precisión (mínimo 0,1 mg).
3. Sujetar el bloque con el porta-muestras.
4. Posicionar anillo.

5. Centrar ambos cuerpos aplicando leve presión sobre la palanca. Asegúrese de que los bordes del bloque sean paralelos a los del anillo y que las superficies estén perfectamente alineadas.
6. Si son pruebas lubricadas, limpiar todos los elementos que vayan a estar en contacto con el lubricante. Llenar recipiente a una altura de 6,4 mm (0,25 in) por encima del borde inferior del anillo.
7. Colocar el peso deseado en el brazo de carga.
8. Poner el contador de revoluciones en cero.
9. Encender el equipo.
10. Durante las pruebas, medir fuerza de fricción, temperatura del o lubricante (si se requiere) y si se desea el desplazamiento vertical del bloque.
11. Detener equipo manual o automáticamente en el número de revoluciones deseado (5400 o 10800)
12. Remover los cuerpos, limpiarlos nuevamente con ultrasonido y pesarlos.
13. Medir el ancho de la huella de desgaste en el centro y aproximadamente a 1 mm alejado de cada borde. Las medidas deben tener una precisión de 0,025mm (0,001 in).

4.5 SELECCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS

Para poder llevar a cabo la investigación, se requirió la puesta en marcha del tribómetro, el cual no se encontraba en óptimas condiciones para su uso y operación.

Se emplearon diversos elementos mecánicos, modificaciones y diseño de algunas partes que garantizaran la puesta a punto del tribómetro y que se mencionan a continuación:

4.5.1 Motor

Se seleccionó el accionamiento con el objetivo de cumplir con las velocidades periféricas encontradas en los molinos de caña y adicionalmente que cumpliera los requerimientos de la norma ASTM G77.

Las características generales del moto-reductor son: ("Motorreductores de ejes perpendiculares SPIROPLAN® W..DR.. | SEW-EURODRIVE," n.d.):

Tabla 12. Ficha técnica del motorreductor 2.

Motorreductor SEW W30 DRS71M4	
Característica	Valor
Velocidad de entrada [rpm]	1690
Velocidad de salida [rpm]	69
Índice de reducción	24,50
Par de salida [N/m]	56
Potencia nominal [kW]	0,55
Tensión del motor [V]	220/440
Frecuencia del motor [Hz]	60
Eje de salida [mm]	20

Se seleccionó el motorreductor mostrado en la Tabla 12, cumpliendo con las velocidades de giro del anillo de 44 y 88 rpm mediante el uso de un variador de frecuencia a 36,5 y 72,4 Hz respectivamente.

4.5.2 Acople flexible

Se seleccionó un acople tipo flexible que cumpliera con los requerimientos de potencia, rpm y desalineaciones de ensamble. En la Tabla 13 se resalta el acople seleccionado:

Tabla 13. Características de los acoples flexibles. (Fuente: Intermec SA)



INTERFLEX No.	Dimensiones mm				Torque nominal [Tn] lb-in	Torque de diseño [Tn] lb-in	Hueco máximo manzana escalonada	Hueco máximo manzana liza	RPM Máximas permisibles
	L	A	B	M					
GE14	34	30	30	23	66	133	-	16	19.000
GE19	64	40	30	39	89	177	19	24	14.000
GE24	76	55	40	46	310	620	24	32	10.600
GE28	88	65	50	56	841	1.682	28	38	8.500
GE38	111	78	66	66	1.682	3.363	38	45	7.100
GE42	123	94	75	73	2.345	4.691	42	55	6.000
GE48	137	104	85	81	2.744	5.487	48	60	5.600
GE55	156	118	98	92	3.319	6.638	55	70	4.750
GE65	180	134	115	115	3.761	7.523	65	75	4.250
GE75	205	160	135	120	8.629	17.257	75	90	3.550
GE90	240	200	160	140	21.240	42.480	90	100	2.800

El acople seleccionado es de referencia GE28 de la marca INTERFLEX® con un torque nominal de 841 lb-in $\approx$ 95 N m, el cual cumple con las especificaciones del par máximo que puede entregar el motorreductor (496 lb-in $\approx$ 56 N m). El montaje y ensamble se puede observar en la Figura 19.



Figura 19. Posición del acople en el tribómetro.

4.6 ESTRUCTURA BASE

El tribómetro se encontraba inicialmente como se muestra en la Figura 20, lo que requirió diseñar y construir una estructura en la cual se soportara el equipo con su motorreductor y demás elementos.



Figura 20. Tribómetro en condiciones iniciales.

Se utilizaron perfiles tubulares de sección cuadrada para la construcción de la estructura que se muestra en la Figura 21. En la sección de ANEXOS 9.3 se muestra en detalle los planos de cada una de las piezas utilizadas para la construcción de la estructura, además de un análisis estático y modal empleando el software de simulación *ANSYS, Inc* (Canonsburg, Pennsylvania, USA).



Figura 21. Estructura base finalizada.

4.7 SISTEMA DE CONTROL DEL TRIBÓMETRO

Se dispuso de un tablero eléctrico (ver Figura 22), en donde se alojó el variador de frecuencia, el panel de control y las conexiones necesarias que permiten modificar y controlar la velocidad de giro del motor, llevar el registro del número de revoluciones o ciclos de cada ensayo y medir la fuerza por medio de la celda de carga.



Figura 22. Sistema de control del motor.

4.7.1 Variador de frecuencia

La siguiente fórmula indica la velocidad a la que gira un motor de inducción (Pulido, 2000):

$$N = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [r.p.m]} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

N es la velocidad de giro del motor en rpm, f es la frecuencia y p es el número de pares de polos que posee el motor.

Para poder variar la velocidad de operación del motor, se empleó un variador de frecuencia. Este elemento (como su nombre lo indica) modifica la frecuencia y por lo tanto la velocidad de un motor de inducción asíncrono, es decir, genera una corriente alterna a la frecuencia y tensión necesarias para accionar el motor. El variador de frecuencia

permite modificar el valor de esta para que el motor gire a mayor o menor velocidad independientemente de la frecuencia de la red de alimentación (Pulido, 2000).

Se utilizó el variador *MOVITRAC® LTE-B⁺* (el modelo sombreado en amarillo) de la compañía *SEW Eurodrive*, la Tabla 14 muestra las características generales de este:

Tabla 14. Variador de frecuencia seleccionado. (Fuente: SEW Eurodrive)

Tensión de conexión VCA: 1x 200 – 240 ± 10 %
Frecuencia de red Hz: 50 – 60 ± 5 %

Modelo de MOVITRAC® tipo LTE-B ⁺	Rango de potencia kW	Corriente nominal de salida A	Tamaño	Dimensiones An x Al x Pr en mm
0004-2B1-1-40	0,37	2,3	1	161 x 232 x 179
0008-2B1-1-40	0,75	4,3		
0015-2B1-1-40	1,5	7	2	188 x 257 x 186,5
0015-2B1-4-40	1,5	7		
0022-2B1-4-40	2,2	10,5		
0040-2B1-4-40	4	15	3S	210,5 x 310 x 228,7

4.7.2 Distribución de elementos

Los elementos se distribuyeron sobre una placa base, a la cual se atornillaron las guías que posicionan los elementos respectivos del circuito.

En la sección de ANEXOS 9.4 se puede encontrar la distribución de cada elemento sobre la placa base y un *sketch* del tablero eléctrico.

4.8 CELDA DE CARGA

Se utilizó una celda de carga *FC-2311-0000-0650-L* de *Mouser Electronics* (“FC23 Compression Load Cell,” n.d.) (ver Figura 23) para obtener la fuerza de reacción producida en el porta-bloques como resultado del contacto entre el anillo y el bloque. Se realizó la respectiva calibración con pesos conocidos (sección 4.2.2) y se programó en el PLC para almacenar los datos en cada ensayo experimental. En ANEXOS 9.5 se presenta la ficha técnica y dimensiones de la celda de carga.



Figura 23. Celda de carga.

4.9 RECIPIENTE PARA LUBRICACIÓN

Se rediseñó el recipiente encargado de almacenar y suministrar el lubricante durante las pruebas, por medio de la unión de láminas de acrílico transparente; lo que permite observar y garantizar en cada prueba el mismo nivel de llenado. En los ANEXOS 9.6 se muestran los planos de la geometría que se elaboró mediante el software CAD *Autodesk Inventor* (San Rafael, California, USA).

4.10 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En esta sección se describen los equipos y ecuaciones utilizadas para manufacturar las probetas y procesar los datos obtenidos en cada ensayo de desgaste.

4.10.1 Construcción de probetas para ensayos de desgaste

Se realizó la manufactura de los anillos de acero AISI 1045 y los bloques de bronce C-93700 y C-93800, teniendo en cuenta las dimensiones recomendadas por la norma (ASTM G-77, 2017). En los ANEXOS 9.7 se encuentran los planos de cada una de las probetas.

4.10.2 Composición química de los bronce

La Tabla 15 muestra la composición química de cada bronce, la cual fue suministrada por el proveedor:

Tabla 15. Composición química de los bronce.

ELEMENTO	Bronce	
	C-93800	C-93700
%Cobre (Cu)	75,0-79,0	78,0-82,0
%Estaño (Sn)	6,30-7,50	9,8-11,0
%Plomo (Pb)	13,0-16,0	8,0-11,0
%Zinc (Zn)	0,7	0,7 MAX
%Níquel (Ni)	0,7	0,7 MAX
%Hierro (Fe)	0,15	0,15 MAX
%Fósforo (P)	0,05	0,05 MAX
%Antimonio (Sb)	0,003	0,50 MAX

4.10.3 Pérdida de masa de anillos y bloques

Se utilizó una balanza analítica *METTLER TOLEDO* (ver Figura 24) con una precisión de 0.1 mg de acuerdo con lo estipulado en la norma (ASTM G-77, 2017), para registrar el peso de las probetas antes y después del ensayo, una vez realizado un proceso de limpieza usando ultrasonido.

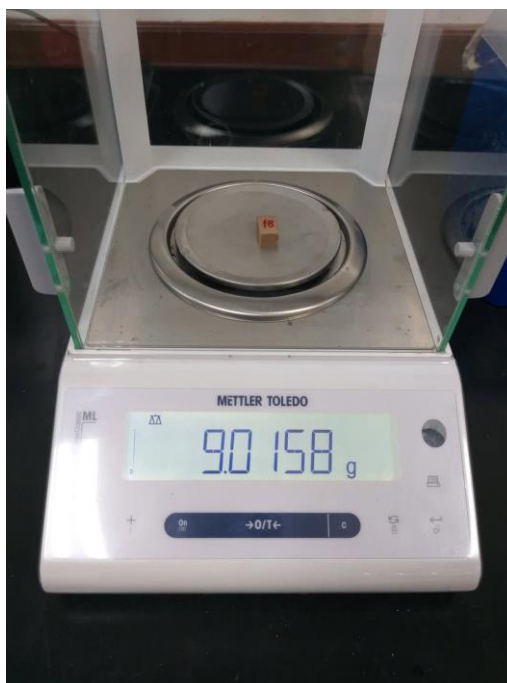


Figura 24. Balanza analítica.

4.10.4 Limpieza de probetas

Se utilizó el limpiador ultrasónico *BRANSON 3510* (ver Figura 25) para realizar la limpieza de cada probeta (anillos y bloques) antes de registrar el peso inicial (previo a cada ensayo) y el peso final posterior al mismo.



Figura 25. Limpiador Ultrasónico.

El tiempo de limpieza en el equipo fue entre 5-15 minutos dependiendo de la cantidad de impurezas presentes en las probetas, presentando valores más altos cuando se contaminaban considerablemente con lubricante y material particulado post-ensayo.

4.10.5 Coeficiente de fricción

Para calcular el coeficiente de fricción de cada prueba, se utilizó el siguiente diagrama de cuerpo libre (DCL) del porta-bloques:

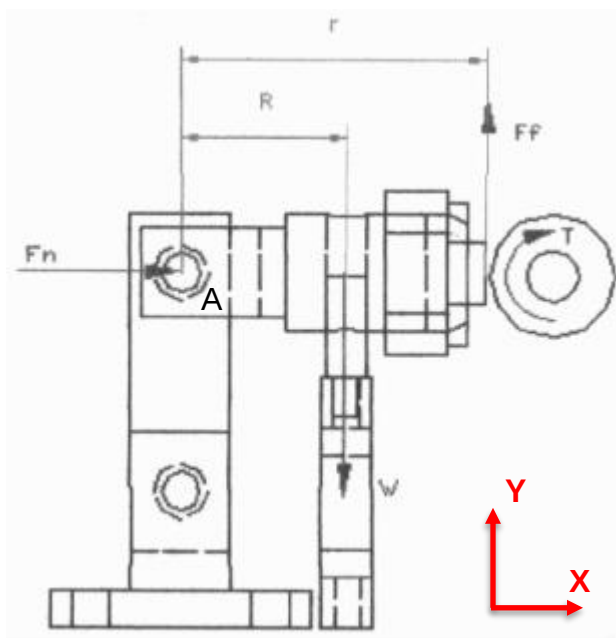


Figura 26. Diagrama de fuerzas en la interfase bloque-anillo. Fuente:(J. J. Coronado, J. S. Rivas, 2004)

Donde: F_n = Fuerza normal aplicada en el bloque.

μ = Coeficiente de fricción.

W = Reacción en el porta-bloques debida al torque del anillo (fuerza registrada por la celda).

F_f = Fuerza de fricción en la interfase bloque-anillo.

R = Radio de giro de W

r = Radio de giro de F_f

Al realizar sumatoria de fuerzas en Y y de momentos en el pivote A se tiene que:

$$\sum F_y = -W + F_f = 0 \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$\sum M_A = -(W \times R) + (F_f \times r) = 0 \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$\sum M_A = (\mu \times F_n) \times r = W \times R \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$\mu = \frac{W}{F_n} \times \frac{R}{r} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Una vez obtenido los datos registrados por la celda de carga, se aplica la ecuación 10 para hallar el coeficiente de fricción. Para este caso en particular las distancias de giro R y r son 30 y 78 mm respectivamente.

4.10.6 Caracterización de las huellas de desgaste

Para determinar el volumen perdido para cada bronce [mm³] fue necesario medir el ancho de la huella de todos los bloques (ver Figura 27), para luego ser empleada usando la fórmula de la norma ASTM G-77 (ASTM G-77, 2017):

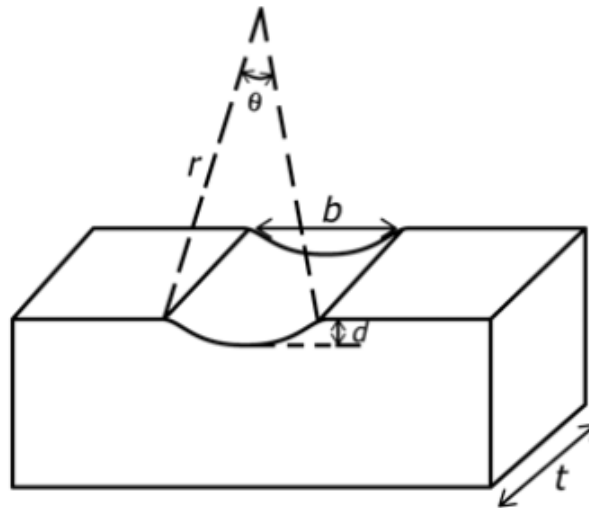


Figura 27. Volumen perdido del bloque basado en el ancho de la huella. (Fuente: ASTM G-77)

Donde t = ancho del bloque[mm]

r = radio del anillo [mm]

$D = 2r$ = diámetro del anillo [mm]

b = ancho promedio de la huella [mm]

θ = ángulo sector [radianes]

d = profundidad de la huella [mm]

se tiene entonces:

$$b = D \sin \frac{\theta}{2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\text{Volumen de la huella} = \frac{D^2 t}{8} (\theta - \sin \theta) \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\text{Donde } \theta = 2 \sin^{-1} \frac{b}{D}$$

Entonces:

$$\text{Volumen de la huella} = \frac{D^2 t}{8} \left[2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right] \quad \text{Ecuación (13)}$$

Para medir el ancho de la huella b se utilizó el estereoscopio *Nikon SMZ 745T* junto con el software *NIS Elements* para procesar las imágenes capturadas de las superficies.



Figura 28. Estereoscopio para medir ancho de las huellas de desgaste.

Para cada bloque se tomó el promedio de las 3 medidas: desde el centro y a ~1 mm del borde derecho e izquierdo, a las condiciones de diseño evaluadas en cada ensayo.

4.10.7 Caracterización de la viscosidad del lubricante

Se utilizó el viscosímetro *Brookfield TC500* para caracterizar el lubricante y dar soporte para el cumplimiento del objetivo específico 5, en donde se recomiendan mejores prácticas de mantenimiento y lubricación. Se obtuvieron las medidas del lubricante base y contaminado a temperatura ambiente (25 °C), 40, 50 y 60°C.

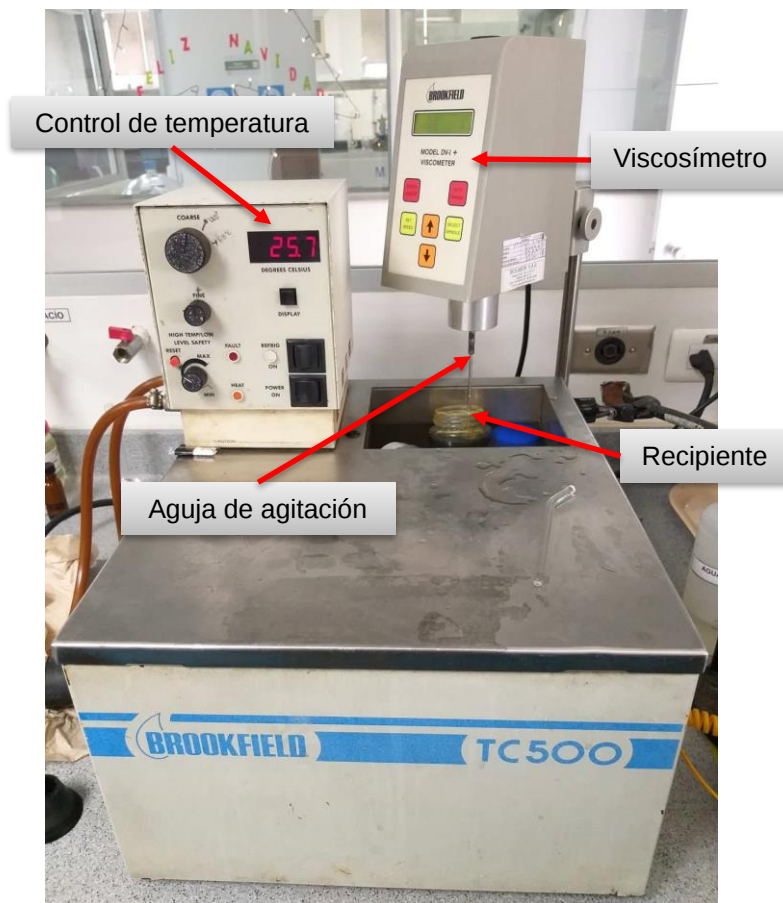


Figura 29. Viscosímetro para pruebas de viscosidad del lubricante.

Para todas las pruebas se utilizaron recipientes plásticos de 250 ml asegurando que la aguja quedara inmersa según lo recomendado. Para las pruebas con el lubricante contaminado, se utilizaron 175 ml de lubricante y 75 ml de jugo de primera extracción, correspondiendo a una proporción de 70% y 30% en volumen según lo establecido en el diseño de experimentos.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros que se usaron para cada ensayo de desgaste bajo las diversas condiciones de velocidad, carga y lubricación se muestran a continuación:

Tabla 16. Parámetros de los ensayos de desgaste.

Parámetro	Valor
Material de los bloques	C-93700 y C-93800
Material del anillo	Acero AISI 1045
Velocidad del anillo [Rpm]	44 y 88 rpm
Lubricante	<i>Sugar Oil Pluss</i> (Limpio y contaminado)
Carga [Newton]	176 y 813
Distancia [Revoluciones]	5400
Número de repeticiones c/condición	3

Los resultados obtenidos para ambos bronce serán analizados con mayor detenimiento en las secciones 5.1 y 5.2.

Se realizó un análisis estadístico de las variables de respuesta: pérdida de masa y coeficiente de fricción, utilizando el software *SAS* (*Cary, Carolina del Norte, USA*) y *Minitab*[®] (*State College, Pennsylvania, USA*).

5.1 PÉRDIDA DE MASA

La pérdida de masa de los anillos y bloques se obtuvo de acuerdo con lo descrito en la sección 4.10.3. Solamente se realizó el análisis estadístico y de resultados para la pérdida de masa del bloque, ya que los bronce son el objeto central del proyecto. Adicionalmente, la pérdida de masa del anillo fue menor a 1 mg en la mayoría de pruebas, por lo tanto la norma permite no reportar estos resultados si así se desea (ASTM G-77,

2017). Sin embargo, cabe resaltar que la pérdida de masa del anillo fue mayor cuando se utilizó bronce C-93700 en el par, comparado con el bronce C-93800

5.1.1 Análisis estadístico

Fue necesario emplear una transformación de la variable de respuesta con el fin de tener un modelo estadísticamente confiable. El modelo al cual se ajustaron los datos obtenidos es de forma logarítmica (ln):

$$LN (PM) = Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_4 \dots$$

Donde Y es la variable de respuesta

a, b, c etc. son coeficientes,

X_n son los factores de diseño

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para la pérdida de masa del bloque, con el objetivo de determinar los efectos principales y de segundo orden más significativos sobre esta variable:

Tabla 17. ANOVA de la pérdida de masa del bloque.

Prueba Tipo III de Efectos Fijos				
Efecto	Num GL	Den GL	Valor F	Pr > F
bronce	1	34	1,32	0,2594
velocidad	1	34	1,68	0,2034
carga	1	34	6,77	0,0136
lubricacion	1	34	2,78	0,0516
bronce*velocidad	1	34	0,02	0,8763
bronce*carga	1	34	1,43	0,2408
bronce*lubricacion	1	34	3,66	0,0241
velocidad*carga	1	34	0,81	0,3746
velocidad*lubricacion	1	34	0,10	0,7493
carga*lubricacion	1	34	3,42	0,0733

Según la Tabla 17 se observa que ninguno de los efectos de los factores principales es significativo, puesto que el valor $-p > 0,05$, a excepción del efecto de la carga y lubricación, los cuales tienen un valor $-p$ de 0,014 y 0,052 respectivamente. Por lo tanto, se considera que incrementar el valor de la carga y cambiar el modo de lubricación son los factores más determinantes en la pérdida de masa de los bloques, si se analizan de manera aislada.

Ahora, si se analizan los efectos de segundo orden (efecto combinado de 2 factores) se observa que el efecto *bronce-lubricación* y *carga-lubricación* son los más significativos, con un valor $-p$ de 0,02 y 0,07 respectivamente, este último para un nivel de confianza del 90% ($\alpha = 0,1$). No obstante, como es levemente mayor al nivel de significancia utilizado en el análisis ($\alpha = 0,05$) se concluye que *carga-lubricación* no afecta de manera tan significativa a la pérdida de masa como lo hace el factor *bronce-lubricación*.

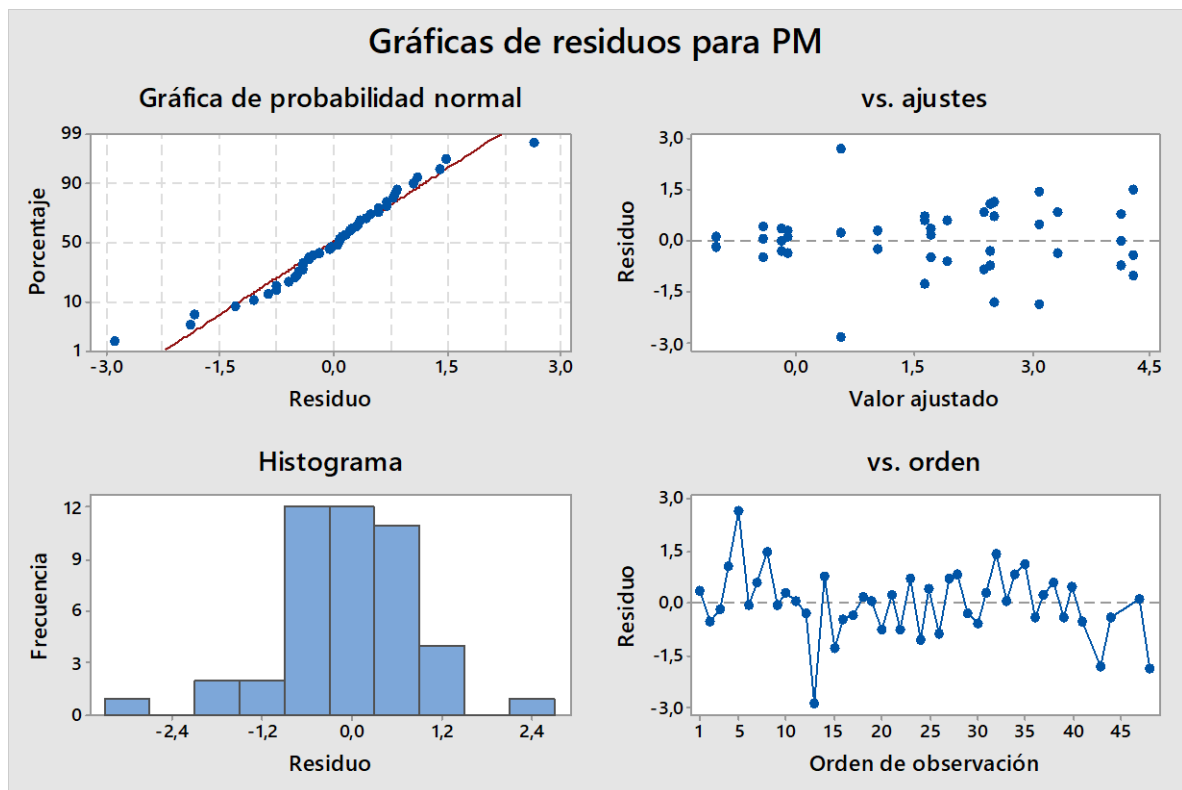


Figura 30. Gráficas de residuos para pérdida de masa de bloque.

Como se observa en la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Figura 30a), los datos con la transformación de Box-Cox se ajustan sobre la línea recta, por lo que el supuesto de normalidad se cumple. El histograma de frecuencias de la Figura 30c, muestra una escala $[-2,4, 2,4]$ en el residuo y los datos forman una campana levemente corrida hacia la derecha, indicando que la distribución es normal.

Por otra parte, para el supuesto de varianza constante, en la Figura 30b se muestran los residuos de los datos experimentales contra los valores ajustados del modelo, estos tienden a acercarse al residuo cero, lo que indica el cumplimiento de este supuesto. Por último, en la Figura 30d se grafican los residuales en el orden en que fueron observados, como la distribución de los datos es aleatoria y estos no tienen una tendencia marcada, el supuesto de residuos no correlacionados entre sí, se cumple.

Por lo tanto, el modelo con la transformación de Box-Cox cumple todos los supuestos mencionados anteriormente. De esta manera los resultados obtenidos se pueden considerar estadísticamente confiables para esta variable de respuesta.

Para observar en qué proporción los factores del ANOVA influyen en la pérdida de masa, se presenta la siguiente gráfica:

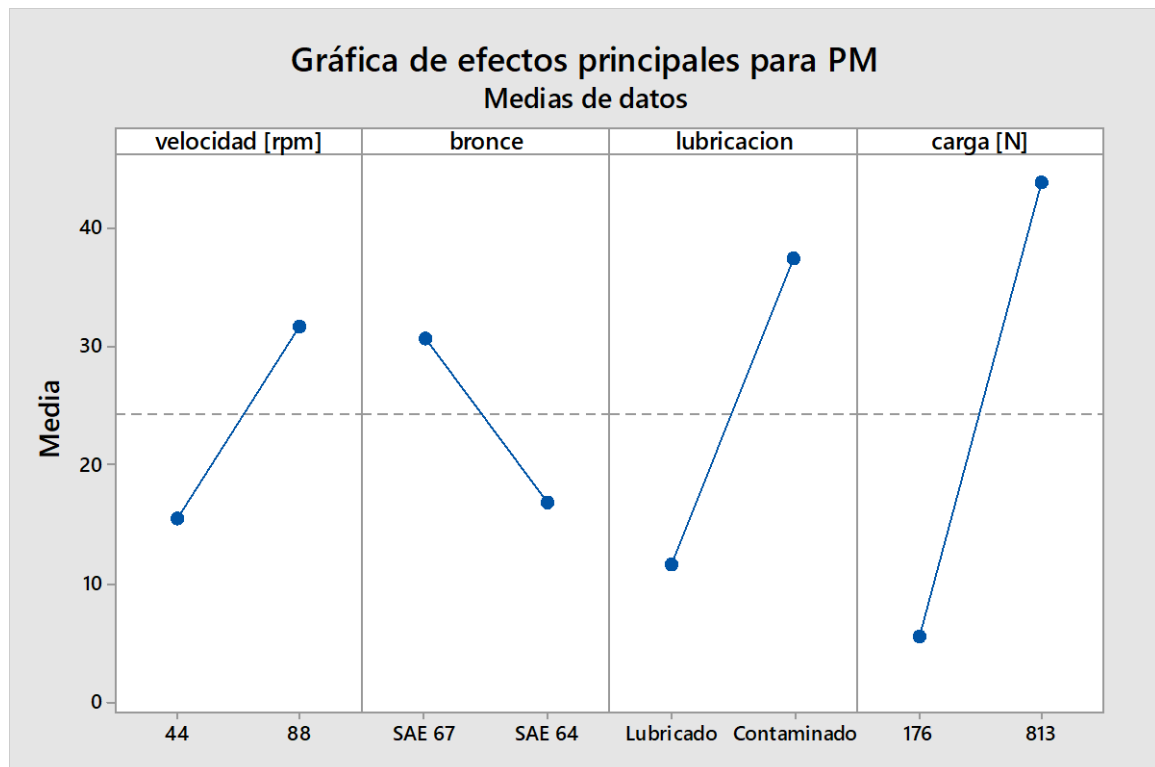
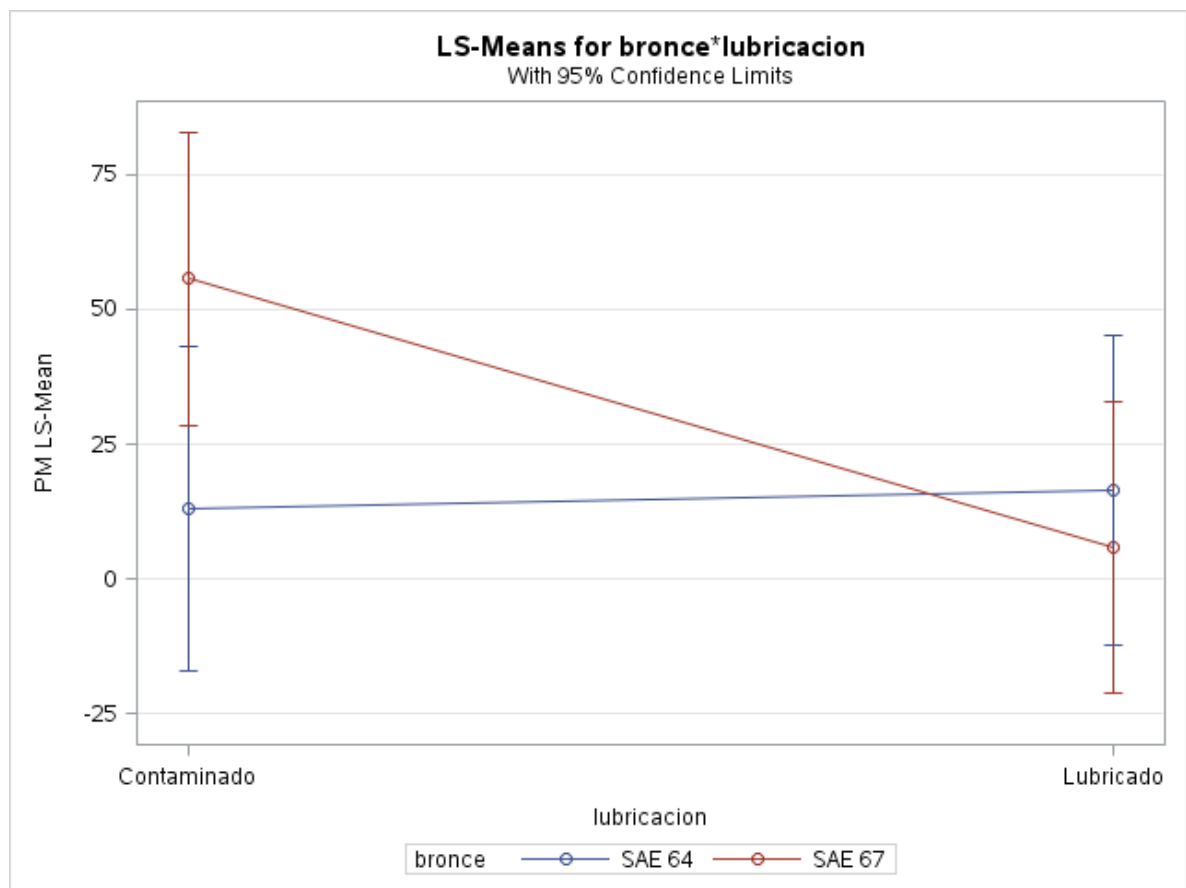


Figura 31. Gráfica de efectos principales para pérdida de masa del bloque.

En la Figura 31 se observa claramente que el efecto más significativo sí es la carga y la lubricación, pues son las rectas que presentan la pendiente más inclinada. Lo anterior, representa que el cambio de la pérdida de masa del bloque es considerable con respecto a la media, pues se pasa de un valor de 5 mg con 176 N de carga a 45 mg aproximadamente cuando se incrementa la carga a 813 N. Cuando varía la lubricación la pérdida de masa pasa de 10 a 35 mg aproximadamente.

El efecto de la velocidad es el que sigue en orden de importancia, con una pendiente menos inclinada con respecto a los otros dos factores. Por último, está el tipo de bronce, el efecto menos influyente en esta variable de respuesta, debido a que los valores de pérdida de masa del bloque cuando se utiliza C-93800 (SAE 67) o C-93700 (SAE 64) no presentan un cambio considerable con respecto a la media.

Se presentan las siguientes gráficas para los efectos combinados *bronce-lubricación* y *carga-lubricación* (ver Figura 32a y Figura 32b), con el objetivo de cuantificar el nivel de significancia con respecto a lo que establece el ANOVA:



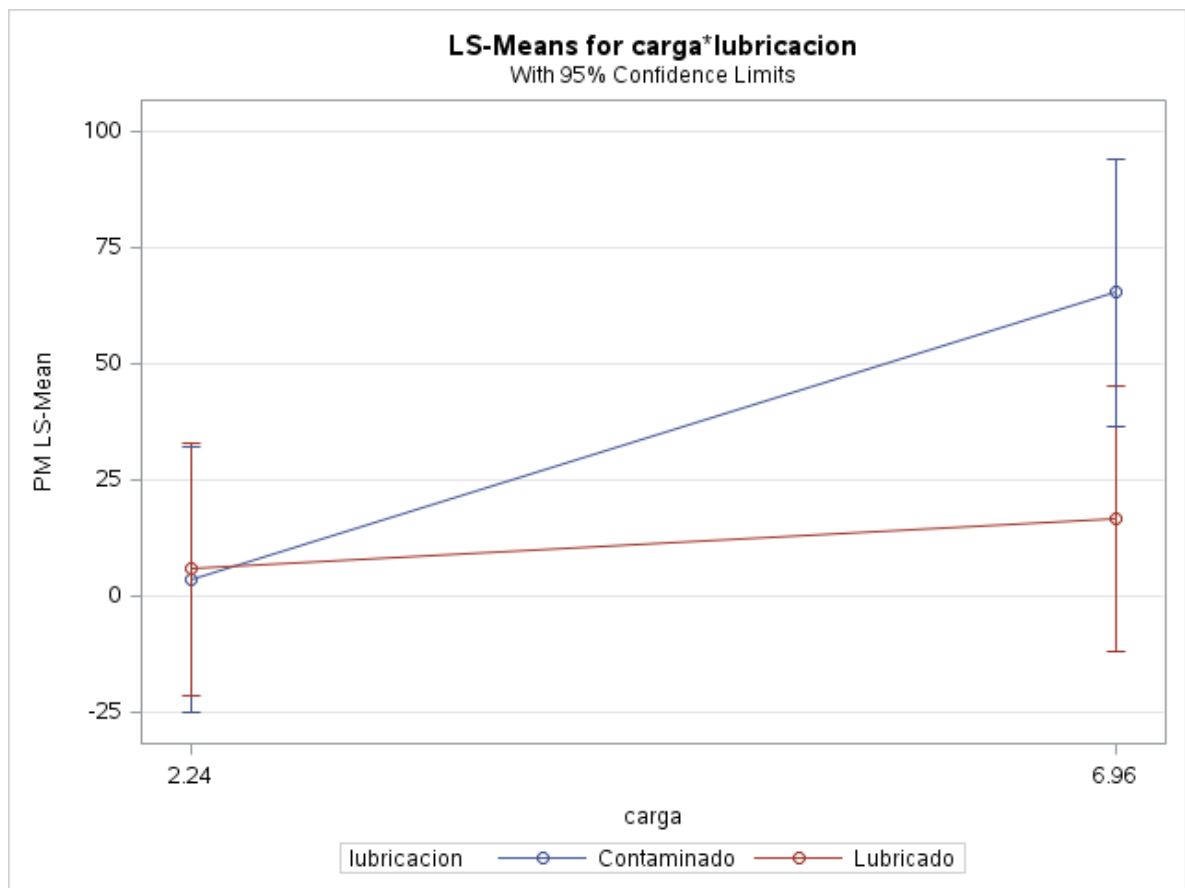


Figura 32. Gráfica de efectos combinados para coeficiente de fricción, (a) bronce-lubricación, (b) velocidad-carga.

En la Figura 32a se observa que el efecto del bronce y la lubricación se hace más representativo para el C-93800 (SAE 67), debido a que la gráfica tiene una pendiente más inclinada comparada con la del C-93700 (SAE 64). Esto se demuestra al observar el cambio que tiene la pérdida de masa al pasar de una lubricación contaminada a una lubricación óptima (recta roja), mientras que para la recta azul el cambio de nivel de lubricación no afecta de manera considerable la pérdida de masa, pues los datos se mantienen casi constantes.

En la Figura 32b se observa que el efecto de elevar la carga para una lubricación óptima (recta roja), incrementa la pérdida de masa del bloque aproximadamente de 12 mg a 25 mg. Sin embargo, para la lubricación contaminada (recta azul), incrementar la carga de 176 a 813 N (de 2,24 a 6,96 kg) incrementa la pérdida de masa en mayor proporción.

Finalmente se presenta el post-ANOVA con la prueba de Tukey-Krammer, la cual establece las conclusiones del modelo para la pérdida de masa:

Tabla 18. Análisis post-ANOVA de la pérdida de masa del bloque.

Tukey-Kramer para Factores de Diseño (Alpha=0.05)											
bronce	Estimado		velocidad	Estimado		carga	Estimado		lubricacion	Estimado	
SAE 67	30.7792	A	88	31.8250	A	176	40.8766	A	Contaminado	34.3775	A
SAE 64	14.7747	A	44	13.7288	A	813	4.6772	B	Lubricado	8.1763	B

De la Tabla 18 se concluye que la carga y la lubricación son los únicos factores representativos sobre la pérdida de masa del bloque, debido a que el valor estimado de los mínimos cuadrados para los dos niveles evaluados presenta diferencias estadísticas (tiene dos letras diferentes “A” y “B”). Por otra parte, los factores bronce y velocidad no presentan diferencias estadísticas en sus niveles, por lo tanto, el efecto sobre la variable de respuesta no es tan significativo.

5.1.2 Resultados

La Tabla 19 muestra la pérdida de masa del bronce C-93800 y bronce C-93700, como resultado de las diversas condiciones de operación empleadas en los ensayos de desgaste por deslizamiento:

Tabla 19. Pérdida de masa del bloque para los bronce C-93800 y C-93700.

Bronce	Velocidad [rpm]	Carga [N]	Lubricación	Promedio [mg]	Desv Est.
C-93800	44	176	Lubricado	0,83	0,35
	44	813	Lubricado	5,60	0,44
	88	176	Lubricado	0,36	0,17
	88	813	Lubricado	11,99	0,94
	44	176	Contaminado	1,77	2,77
	44	813	Contaminado	62,35	0,76
	88	176	Contaminado	5,14	1,13
	88	813	Contaminado	73,05	1,32
C-93700	44	176	Lubricado	0,65	0,46
	44	813	Lubricado	11,03	1,21
	88	176	Lubricado	12,35	1,59
	88	813	Lubricado	28,29	0,70
	44	176	Contaminado	2,85	0,37
	44	813	Contaminado	7,18	0,60
	88	176	Contaminado	0,90	0,36
	88	813	Contaminado	22,37	1,69

Para el bronce C-93800 con contaminación del lubricante con 30% (volumen) de jugo de primera extracción, se incrementa la pérdida de masa en promedio cerca de 8 veces comparado con la condición normal. Por otra parte, cuando se incrementa la carga para la condición de velocidad de 88 rpm y se suma el efecto de la contaminación, la pérdida de masa se incrementa de 0,36 mg a 5,14 mg y de 11,99 mg a 73,05 mg (en promedio se incrementa 22 veces con la carga).

Con base en los resultados, se infiere que el escenario más crítico para este bronce es a velocidades de operación de 88 rpm y 813 N de carga, con contaminación del lubricante. Por otra parte, el escenario que presentó menor desgaste fue a una velocidad de 88 rpm y una carga de 176 N con condiciones óptimas de lubricación (desgaste promedio de 0,36 mg).

Para el bronce C-93700 la pérdida de masa (Δm) se incrementa en promedio 1,5 veces con el efecto de la contaminación y en promedio 12 veces al aumentar la carga de operación, comportamiento similar al obtenido con el bronce C-93800. Sin embargo, el efecto de estas condiciones no impacta de manera significativa como ocurre con el otro tipo de bronce.

Por lo tanto, el escenario más crítico en las pruebas para el bronce C-93700, es a velocidad de 88 rpm y una carga de 813 N, con la lubricación óptima (desgaste promedio de 28,29 mg). Mientras que, el escenario más favorable es a las condiciones de velocidad de 44 rpm y carga de 176N con una lubricación efectiva (0,65 mg de desgaste).

Se presentan a continuación el efecto de la carga y se contrasta la pérdida de masa de ambos bronce para las 2 velocidades evaluadas:

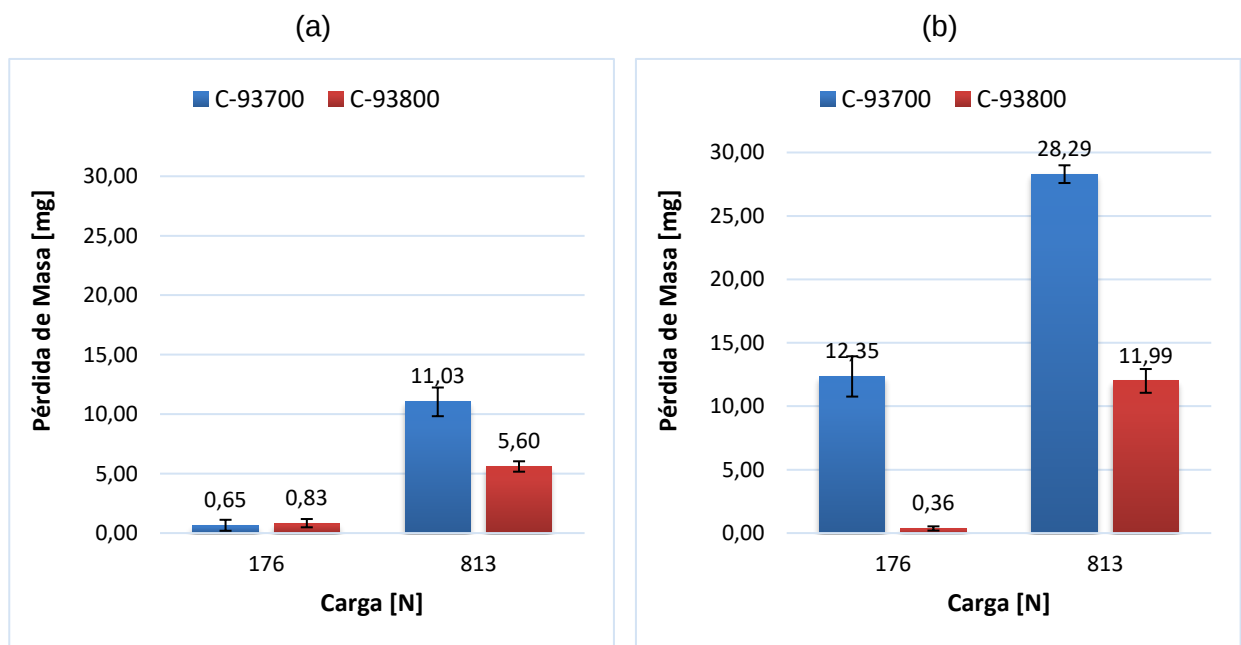


Figura 33. Pérdida de masa vs carga a lubricación normal y a velocidad de (a) 44 rpm, (b) 88 rpm.

El efecto de la carga sobre ambos bronce es el más determinante, pues la pérdida de masa es cerca de 17 y 7 veces mayor para el C-93700 y C-93800 respectivamente a 44 rpm de velocidad del anillo (3 rpm en molinos), mientras que, a 88 rpm de velocidad la pérdida de masa se incrementa cerca de 2,3 y 33 veces para el C-93700 y C-93800

respectivamente. El bronce C-93800 tiene en promedio 64% menos de pérdida de masa que el C-93700, esto se puede explicar con base en su composición química, el cual presenta un alto contenido de plomo (10-15% Pb). Lo anterior hace que ante condiciones de fricción y desgaste por deslizamiento, los nódulos de plomo se extienden en la superficie del bronce y actúan como mecanismo de auto lubricación o lubricación sólida (Glaeser, 1983).

El efecto de la carga para una lubricación contaminada es:

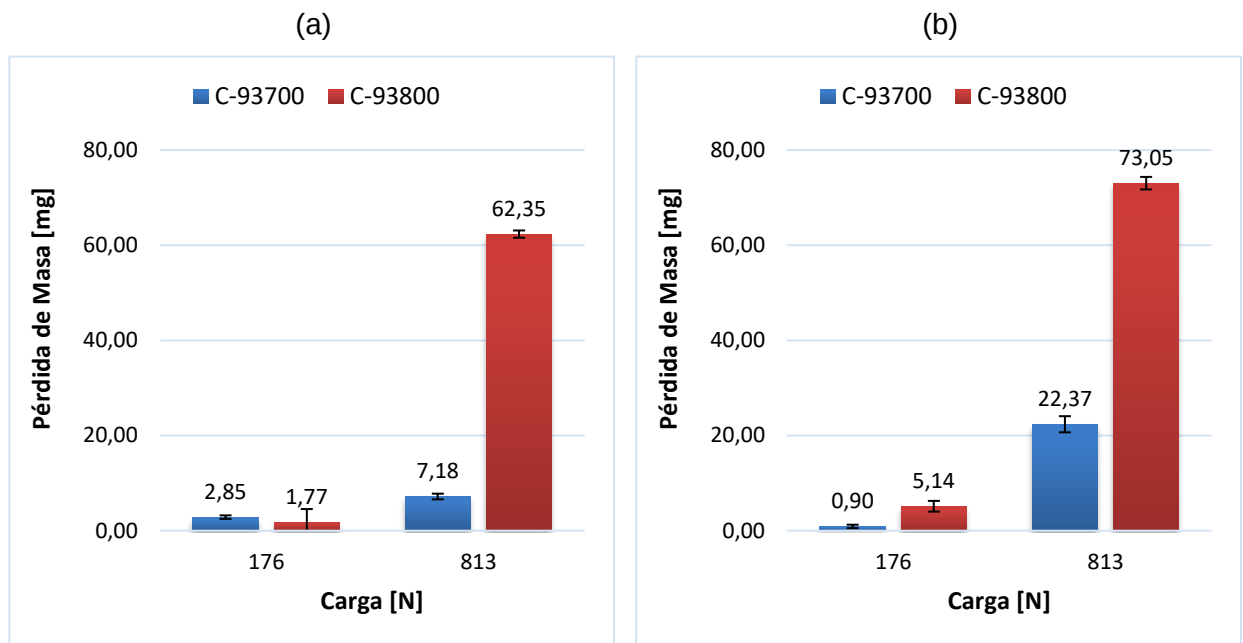


Figura 34. Pérdida de masa vs carga a lubricación contaminada y a velocidad de (a) 44 rpm, (b) 88 rpm.

La gráfica evidencia el efecto significativo que tiene la carga sobre el desgaste. Por otra parte, se puede apreciar que el C-93800 en promedio presentó 4,3 veces mayor desgaste comparado con el C-93700, debido a que este último es un bronce con alto contenido de estaño con presencia de fases duras en su microestructura (Glaeser, 1983) que se oponen más al micro corte causado por la materia extraña que contamina el lubricante, por ende hay menor pérdida de masa. Analizando el efecto de la lubricación sobre ambos tipos de bronce, se presentan los siguientes gráficos:

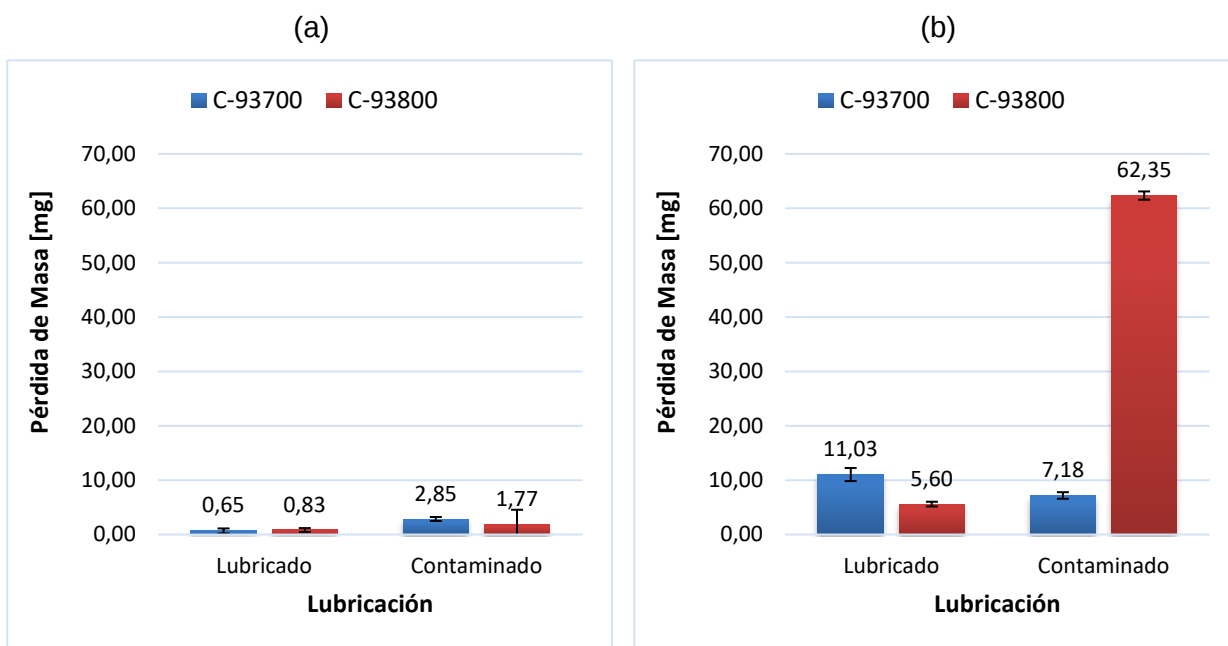


Figura 35. Pérdida de masa vs lubricación a velocidad de 44 rpm (a) Carga baja 176 N, (b) Carga alta 813 N.

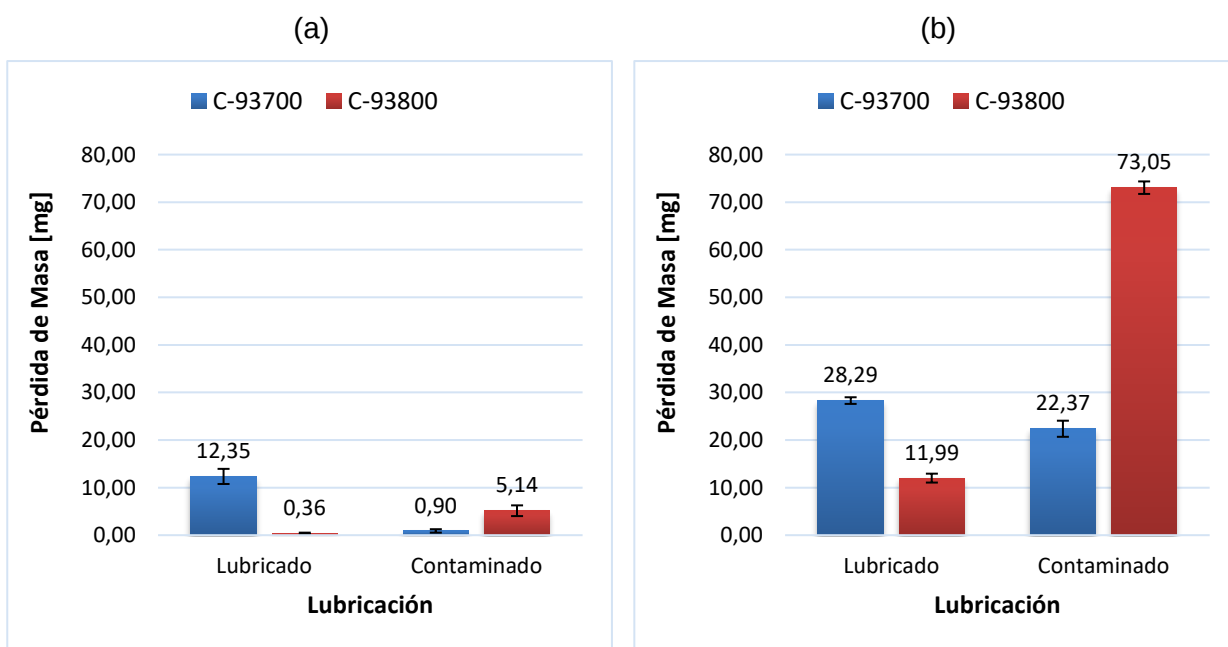


Figura 36. Pérdida de masa vs lubricación a velocidad de 88 rpm (a) Carga baja 176 N, (b) Carga alta 813 N.

Se puede observar en ambas figuras que el efecto de la lubricación es más representativo en el bronce C-93800 que en el C-93700. Como consecuencia de la gran diferencia de pérdida de masa entre los valores con lubricación base y contaminada con jugo para las dos velocidades y a las diferentes cargas de operación evaluadas. Mientras que, para el bronce C-93700 la pérdida de masa tiende a disminuir para todos los escenarios evaluados.

Se observó gran variación entre repeticiones para los ensayos con lubricación contaminada, dado que el jugo de primera extracción del ingenio piloto contenía partículas de fibra, materia mineral, entre otros componentes insolubles. Como consecuencia de esta variación en su composición y posible diferencia en los grados brix (Rein, 2012) (cantidad de sólidos disueltos), se estima que en cada prueba las condiciones de contaminación no fueron exactamente las mismas; causando así una fluctuación notable en los resultados obtenidos. Adicionalmente el pH del jugo varió entre 5 y 6, siendo 5 un valor característico de la caña que entra a proceso con deterioro previo, lo que soporta lo establecido anteriormente.

Sin embargo, con la transformación de ajuste logarítmico de Box-Cox que se realizó para pérdida de masa en la sección anterior (5.1.1), se obtuvieron resultados y desviaciones más ajustadas.

5.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Esta variable de respuesta se obtiene luego de procesar matemáticamente los datos registrados por la celda de carga (fuerza en el porta-bloques). Se promediaron los valores obtenidos de cada prueba entre los 4500 y 5400 ciclos, puesto que es en este intervalo de tiempo donde el par se ha estabilizado (Holguín & Coronado, 2007) (ASTM G-77, 2017).

5.2.1 Análisis estadístico

El modelo al cual se ajustó la variable la siguiente forma:

$$(CF) = Y = \beta X + \epsilon$$

Donde Y es la variable de respuesta

β son los coeficientes que acompañan a los factores,

X son los factores de diseño

ϵ son los residuos del modelo

Para el coeficiente de fricción también se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para determinar cuáles de los factores principales y secundarios del modelo son los más significativos para esta variable de respuesta:

Tabla 20. ANOVA del coeficiente de fricción.

Prueba Tipo III de Efectos Fijos				
Efecto	Num GL	Den GL	Valor F	Pr > F
bronce	1	34	24,14	<,0001
velocidad	1	34	0,12	0,7320
carga	1	34	3,53	0,0687
lubricacion	1	34	0,84	0,3672
bronce*velocidad	1	34	1,10	0,3012
bronce*carga	1	34	0,00	0,9683
bronce*lubricacion	1	34	6,47	0,0157
velocidad*carga	1	34	4,31	0,0456
velocidad*lubricacion	1	34	0,40	0,5300
carga*lubricacion	1	34	1,18	0,2846

En la Tabla 20 se observa que los factores principales bronce y carga inciden de manera determinante sobre el coeficiente de fricción, con un valor-p de 0,0001 y 0,07 respectivamente, siendo el bronce el más influyente. Para los efectos de segundo orden, los factores *bronce-lubricación* y *velocidad-carga* presentaron un valor -p de 0,02 y 0,04 respectivamente, siendo el primero el más influyente.

A continuación, se analiza la adecuación del modelo al conjunto de datos experimentales, para determinar si los resultados obtenidos son confiables. La siguiente figura muestra una gráfica cuatro en uno de los residuos del modelo:

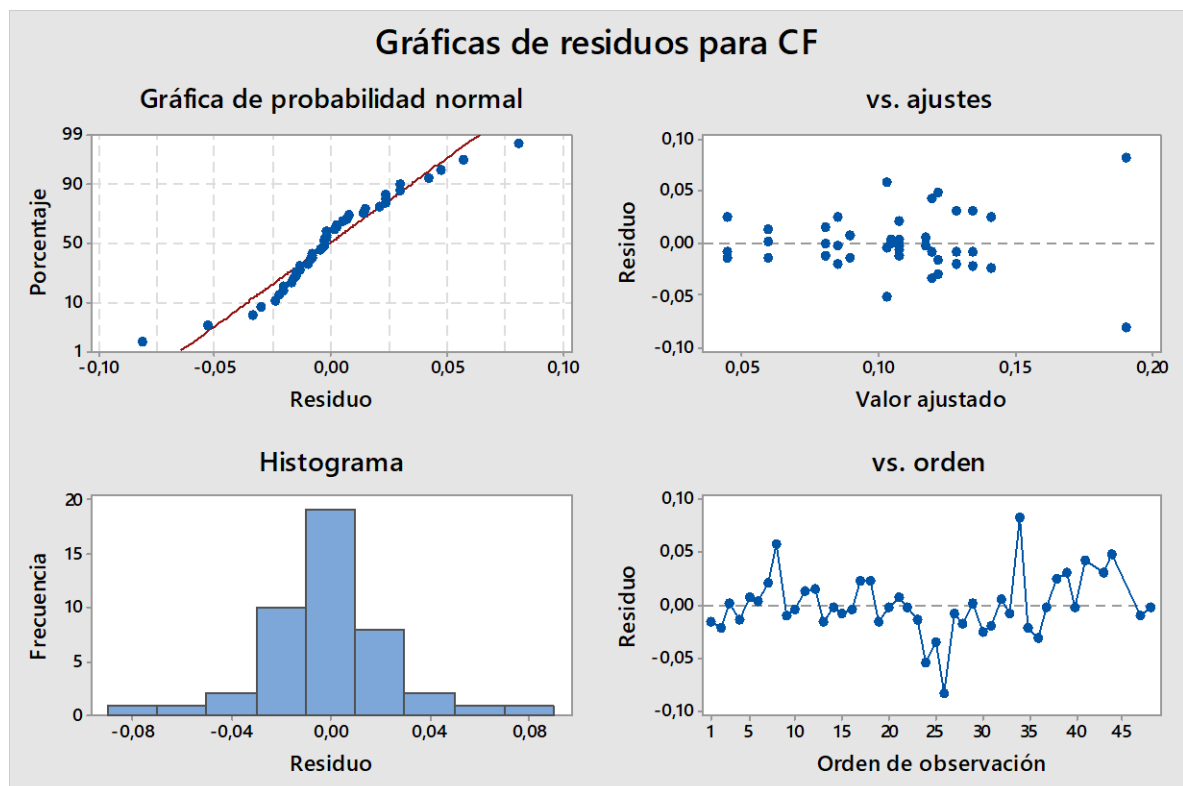


Figura 37. Gráficas de residuos para coeficiente de fricción.

Como se observa en la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Figura 37a), los datos tienden a sobreponerse en la línea recta, exceptuando los dos puntos de ambos extremos, indicando una distribución normal de los datos. Lo anterior se puede corroborar con el histograma de frecuencias (Figura 37c), ya que la mayoría de los datos tienen un

residuo cercano a cero y se encuentran centrados sobre la media, por lo tanto, tienen una distribución normal.

Por otra parte, la Figura 37b grafica los residuos de los datos experimentales contra los valores ajustados del modelo, mostrando una tendencia alrededor de cero (excepto por los dos puntos del extremo derecho), por ende, se puede determinar que el supuesto de varianza constante en los errores se cumple. Por último, en la Figura 37d se grafican los residuales en el orden en que fueron observados, como se tiene una distribución aleatoria de los datos por encima y por debajo de cero, se cumple el supuesto de que los residuos no están correlacionados entre sí.

Por lo tanto, el modelo cumple todos los supuestos mencionados anteriormente y los resultados obtenidos son estadísticamente confiables.

Para observar en qué proporción los factores representativos descritos en el ANOVA influyen en el coeficiente de fricción, se presenta la siguiente gráfica:

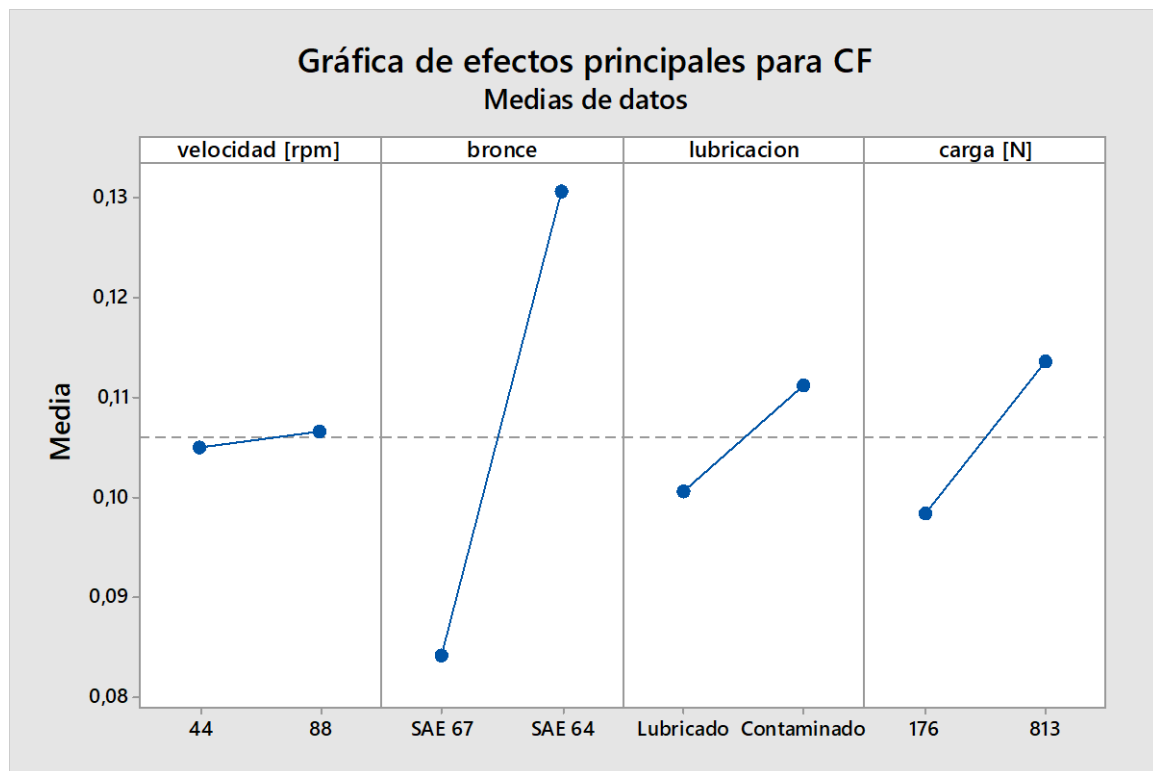


Figura 38. Gráfica de efectos principales para coeficiente de fricción.

En la Figura 38 se observa claramente que el efecto más significativo sí es el tipo de bronce que se utiliza, pues es la recta que presenta la pendiente más grande. Lo anterior representa que el cambio del coeficiente de fricción es considerable con respecto a la media, pues se pasa de un valor de 0,13 con el bronce C-93700 a 0,085 con el bronce C-93800.

Los efectos de carga y lubricación son los que siguen en nivel de significancia, con pendientes menos inclinadas con respecto al tipo de bronce. Por último, está el efecto de la velocidad, el valor menos influyente en esta variable de respuesta, ya que el cambio con respecto a la media no es considerable, es decir, los valores de coeficiente de fricción para 44 y 88 rpm de velocidad se encuentran aproximadamente sobre la media.

Se presentan las siguientes gráficas para los efectos combinados *bronce-lubricación* y *velocidad-carga* (ver Figura 39a y Figura 39b), con el objetivo de cuantificar el nivel de significancia con respecto a lo que establece el ANOVA:

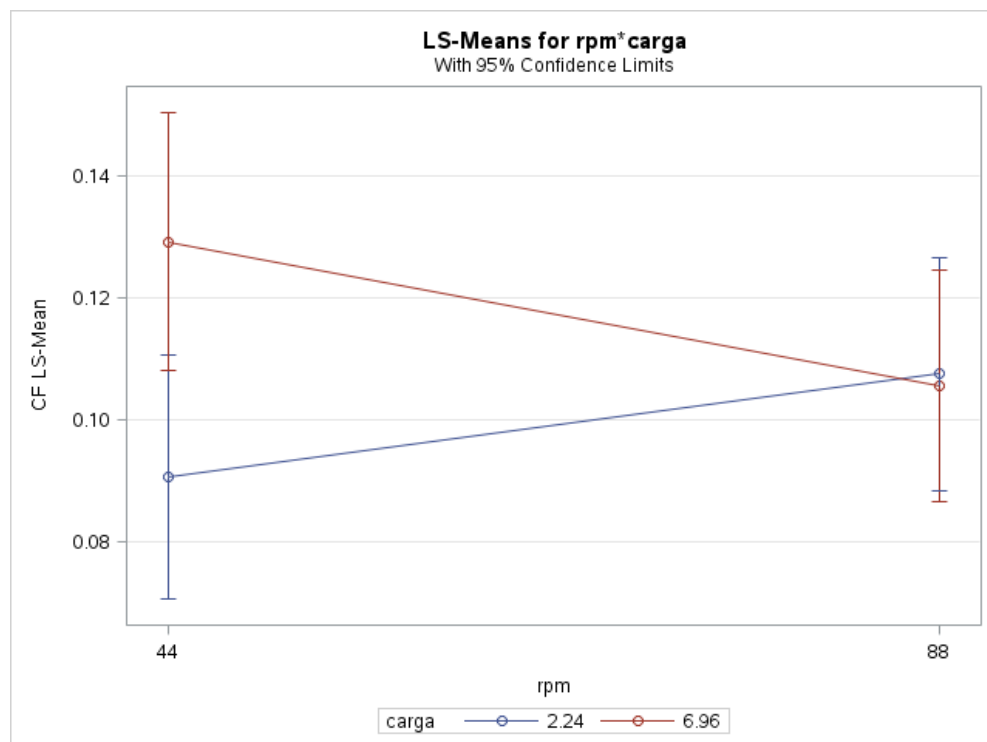
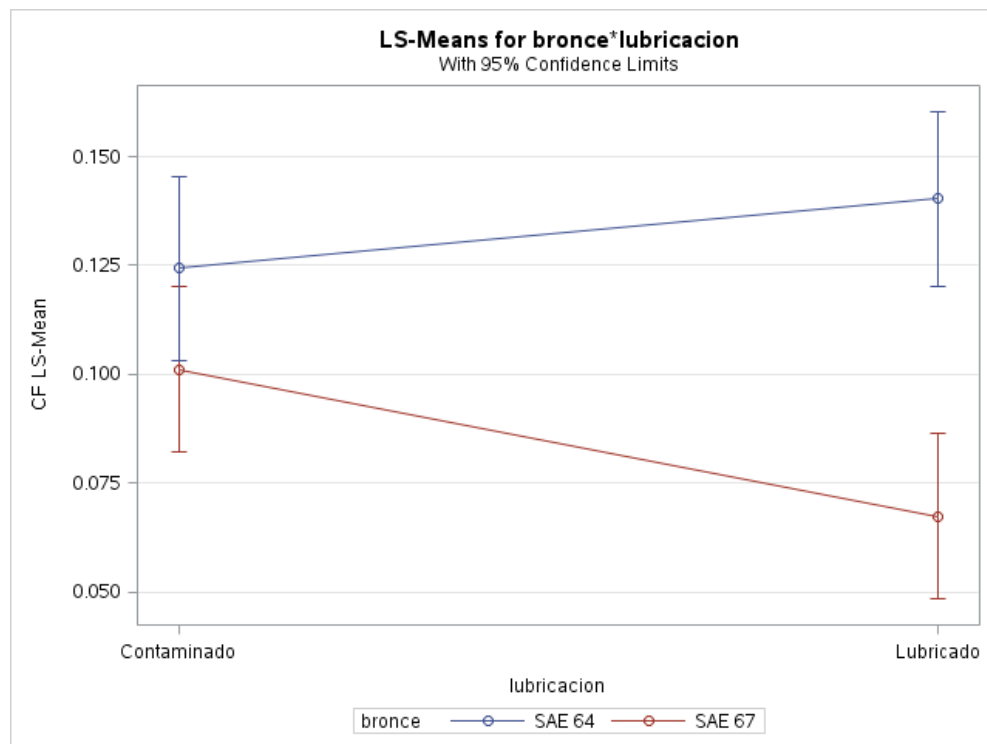


Figura 39. Gráfica de efectos combinados para coeficiente de fricción, (a) bronce-lubricación, (b) velocidad-carga.

En la Figura 39a se observa que el efecto del bronce y la lubricación se hace más representativo para el C-93800 (SAE 67), debido a que la gráfica abarca dos franjas, mientras que, para el bronce C-93700 (SAE 64) solo abarca una franja. Lo anterior se manifiesta en una variación del coeficiente de fricción en mayor proporción cuando se pasa de lubricación contaminada a lubricación normal para el bronce C-93800 comparado con el C-93700.

En la Figura 39b se observa que el efecto de elevar la velocidad para una carga de 175 N (2.24 kg) incrementa el coeficiente de fricción de 0,09 a 0,11 aproximadamente. Por el contrario, el coeficiente de fricción es inversamente proporcional a la velocidad para una carga de 813 N (6,96 kg), debido a que se pasa de 0,13 a 0,11 aproximadamente.

Finalmente se presenta el post-ANOVA con la prueba de Tukey-Kramer, la cual establece las conclusiones del modelo para el coeficiente de fricción:

Tabla 21. Análisis post-ANOVA del coeficiente de fricción.

Prueba Tukey-Kramer para Factores de Diseño (Alpha=0.05)											
bronce	Estimado		velocidad	Estimado		carga	Estimado		lubricacion	Estimado	
SAE 67	0.1324	A	88	0.1100	A	176	0.1175	A	Contaminado	0.1128	A
SAE 64	0.08430	B	44	0.1066	A	813	0.09916	A	Lubricado	0.1039	A

De la Tabla 21 se concluye que el tipo de bronce es el único factor representativo sobre el coeficiente de fricción, debido a que el valor estimado de los mínimos cuadrados para los dos niveles evaluados presenta diferencias estadísticas (denotadas por letras “A” y “B”). Por otra parte, los factores de carga, lubricación y velocidad no presentan diferencias estadísticas en sus niveles, por lo tanto, el efecto sobre el coeficiente de fricción no es tan significativo.

5.2.2 Resultados

En la Tabla 22 se presenta el coeficiente de fricción de los bronce C-93800 y C-93700 para los 16 escenarios evaluados:

Tabla 22. Coeficiente de fricción del bronce C-93800 y C-93700.

Bronce	Velocidad [rpm]	Carga [N]	Lubricación	Promedio	Desv Est.
C-93800	44	176	Lubricado	0,0444	0,0207
	44	813	Lubricado	0,0852	0,0224
	88	176	Lubricado	0,0596	0,0148
	88	813	Lubricado	0,0805	0,0139
	44	176	Contaminado	0,0895	0,0130
	44	813	Contaminado	0,1044	0,0026
	88	176	Contaminado	0,1078	0,0185
	88	813	Contaminado	0,1243	0,0321
C-93700	44	176	Lubricado	0,1194	0,0386
	44	813	Lubricado	0,1440	0,0395
	88	176	Lubricado	0,1344	0,0268
	88	813	Lubricado	0,1218	0,0415
	44	176	Contaminado	0,1076	0,0036
	44	813	Contaminado	0,1417	0,0339
	88	176	Contaminado	0,1285	0,0263
	88	813	Contaminado	0,1174	0,0047

Para el bronce al plomo (C-93800) se evidencia coeficientes de fricción bajos (0,0843 en promedio), con valores muy cercanos a los obtenidos en estudios previos realizados por Rivas et al. (Rivas et al., 2006) y Holguín et al. (Holguín & Coronado, 2007).

El escenario más favorable es operar a una velocidad de 44 rpm en el anillo (equivalente a 3 rpm en los molinos) y 813 N de carga con lubricación eficiente (fricción promedio 0,0444).

Por otra parte, cuando se tiene fundición de bronce C-93800, es fundamental evitar operar a una velocidad de 88 rpm en el anillo (equivalente a 6 rpm en los molinos) y 813 N de carga cuando existe lubricante contaminado (fricción promedio de 0,1243).

Para el bronce con alto contenido de estaño (C-93700) se obtuvieron resultados de coeficiente de fricción más altos comparados con el bronce C-93800. Lo anterior concuerda con los estudios previos realizados sobre desgaste por deslizamiento en bronce (J. J. Coronado, J. S. Rivas, 2004) (Rivas et al., 2006), en donde se evaluó el comportamiento tribológico de ambos tipos de bronce con diversos lubricantes.

El escenario más favorable es operar a velocidad y carga baja, sorprendentemente bajo lubricación contaminada pues es donde se obtuvo el menor coeficiente de fricción promedio 0,1076. Lo anterior puede deberse a reacciones químicas o comportamientos que se presentan cuando el jugo entra en contacto con el bronce, este último al tener más dureza superficial y no contener plomo en su microestructura, se comporta mejor en todos los escenarios de lubricación contaminada, es decir, el efecto no es significativo para el bronce C-93700.

Por otro lado, el escenario menos favorable es aquel donde se tiene óptima lubricación y se opera a velocidad baja y carga alta (fricción 0,1440). Aunque los resultados de lubricación a lubricación contaminada no varían de tal manera como en el bronce C-93800, nuevamente los resultados parecen indicar que el tipo de lubricante empleado en los ingenios no tiene tan buena afinidad con el C-93700 como con el bronce C-93800.

En las siguientes graficas (ver Figura 40 y Figura 41) se muestra el efecto de la carga sobre el coeficiente de fricción a las dos velocidades y condiciones de lubricación evaluadas:

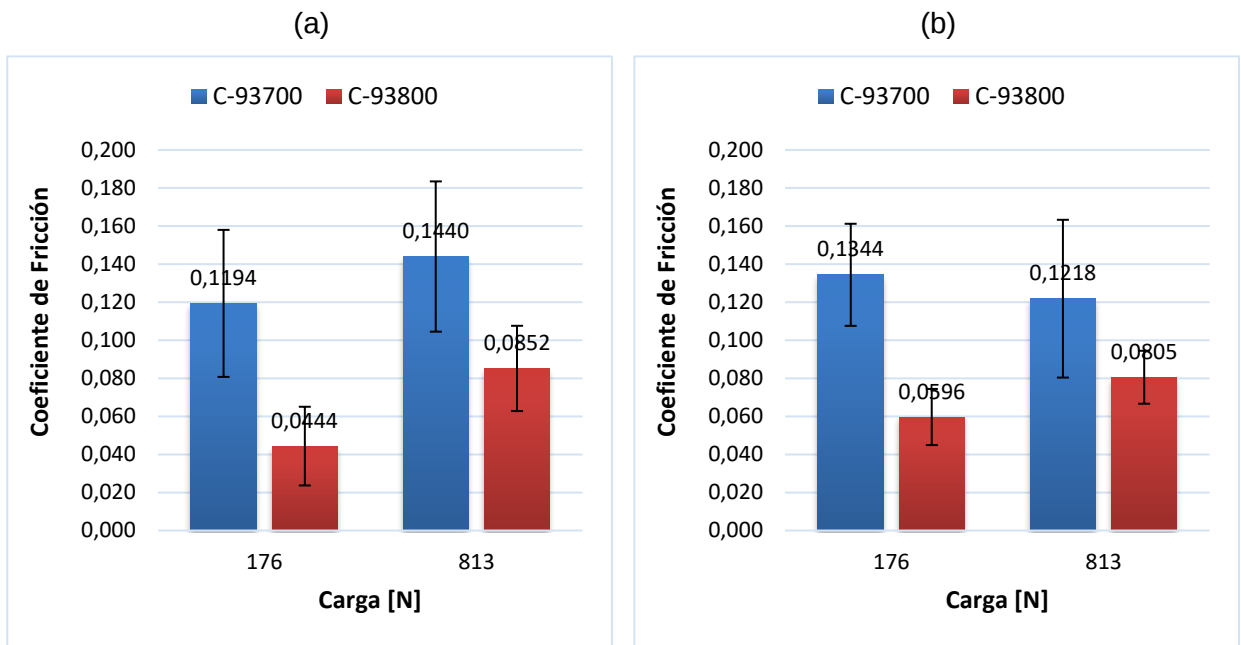


Figura 40. Coeficiente de fricción vs carga a lubricación normal y a velocidad de (a) 44 rpm, (b) 88 rpm.

Se puede observar que el efecto de aumentar la carga se manifiesta en un incremento de los coeficientes de fricción para ambos bronce. Para ambas velocidades y valores de carga, el coeficiente de fricción es mayor con el C-93700 que con el C-93800, lo anterior se soporta con los resultados obtenidos en estudios previos (Rivas et al., 2006)(J. J. Coronado, J. S. Rivas, 2004).

También se observa que a velocidad de 44 rpm (correspondiente a velocidad de deslizamiento de 0,154 m/s) y 813 N de carga, el coeficiente de fricción es cerca de 2 veces y 1,6 mayor para el bronce C-93800 y C-93700 respectivamente. Lo anterior concuerda con lo establecido en el estudio de (Chamorro, 2014), para la condición de velocidad baja y carga variable con el bronce C-93800 empleando 3 tipos de lubricantes.

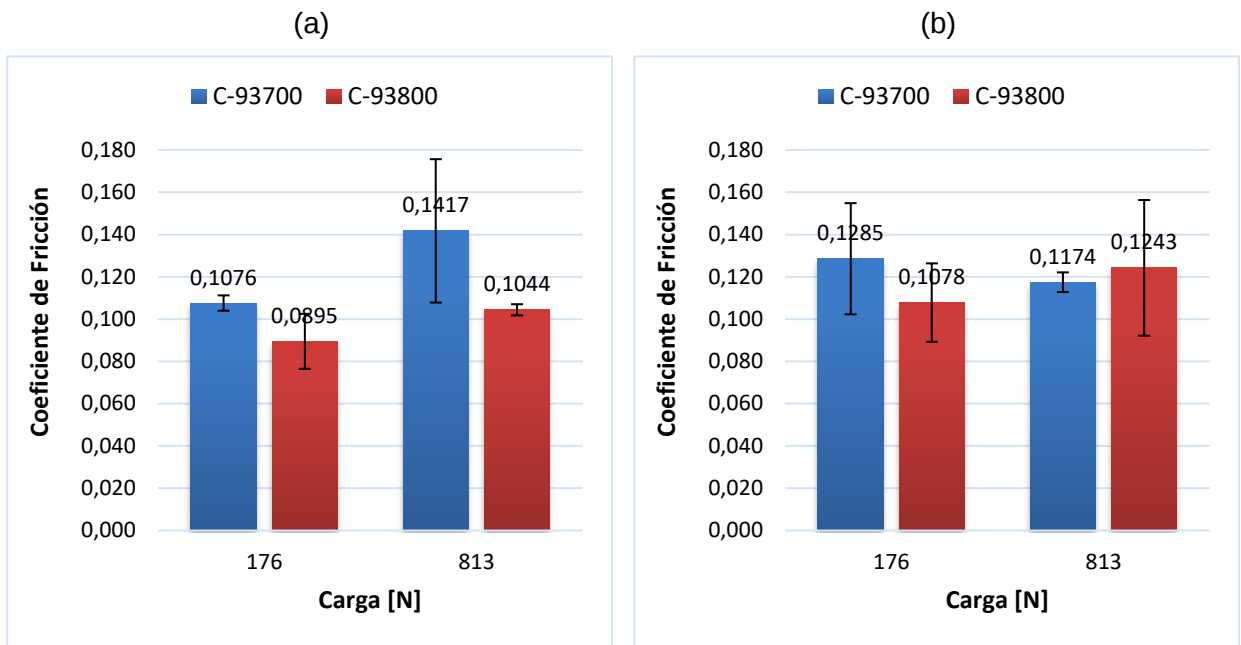


Figura 41. Coeficiente de fricción vs carga a lubricación contaminada y a velocidad de (a) 44 rpm, (b) 88 rpm.

Para el caso de lubricación contaminada al aumentar la carga también incrementa el coeficiente de fricción. Sin embargo, para el C-93700 a 88 rpm de velocidad, la fricción disminuye con el incremento de la carga para ambos casos de lubricación (Figura 40b y Figura 41b). Lo anterior se puede deber a que el lubricante contiene aditivos de extrema presión (aditivos EP) y que el bronce tiene una mayor dureza superficial, lo que hace que se desempeñe mejor a altas velocidades y cargas, aunque la magnitud del coeficiente de fricción es menor para el C-93800.

Las siguientes gráficas (ver Figura 42 y Figura 43) muestran la interacción de la lubricación con el coeficiente de fricción:

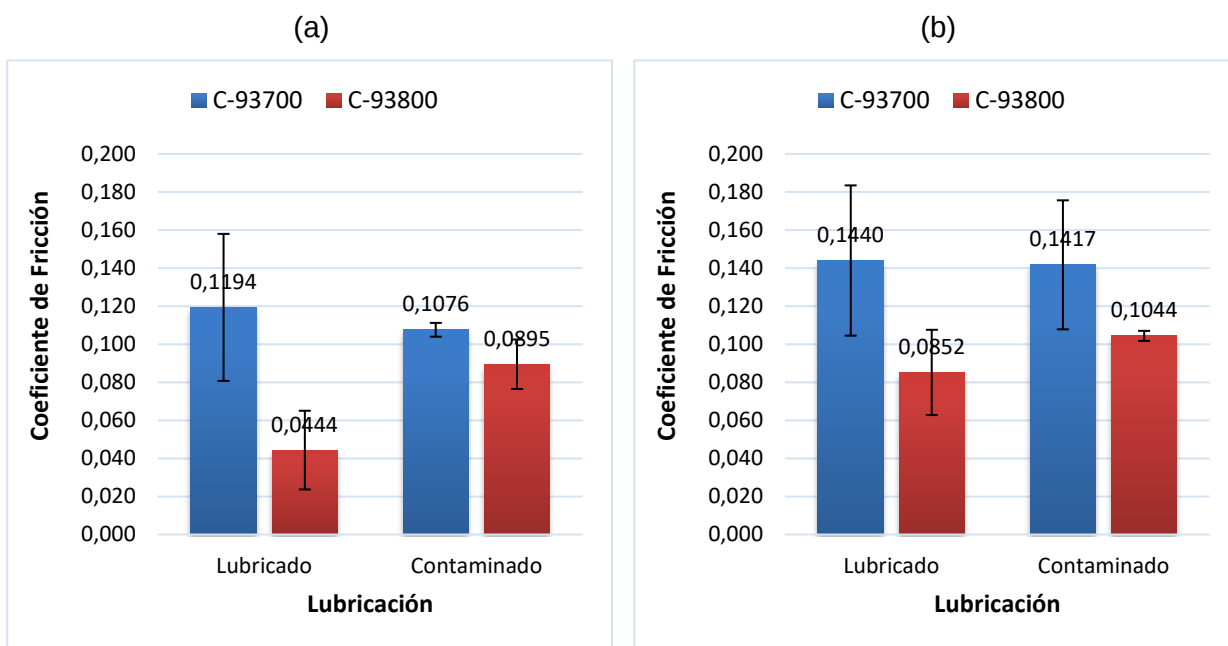


Figura 42. Coeficiente de fricción vs lubricación a velocidad de 44 rpm (a) Carga baja 176 N, (b) Carga alta 813 N.

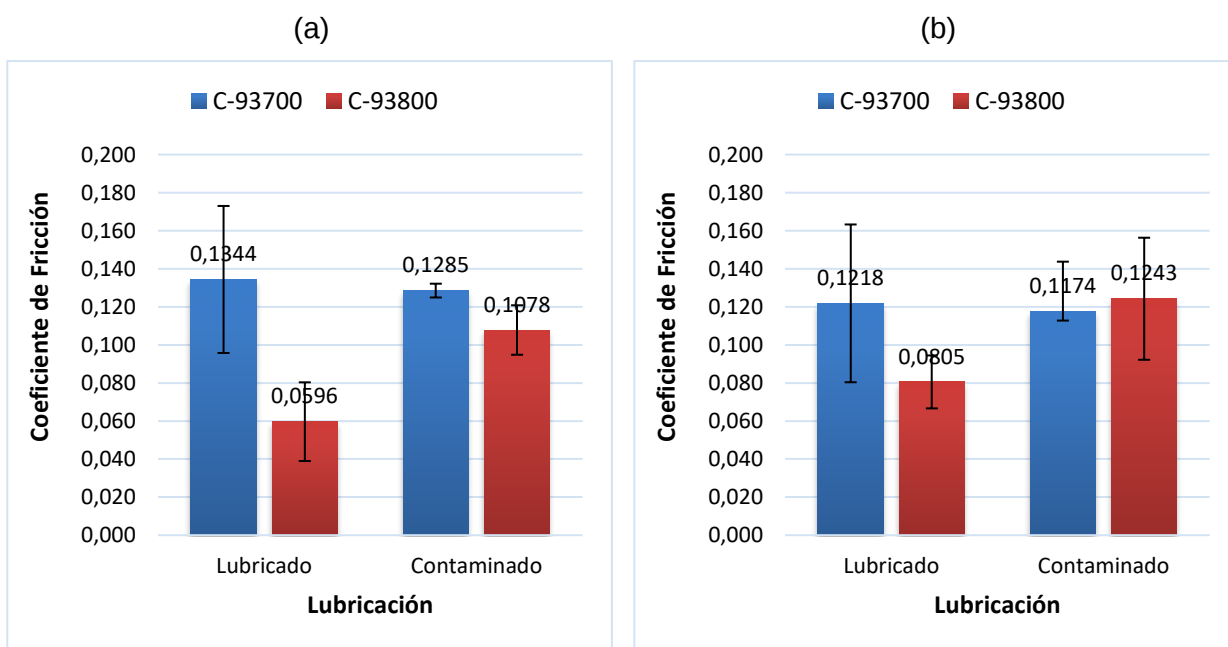


Figura 43. Coeficiente de fricción vs lubricación a velocidad de 88 rpm (a) Carga baja 176 N, (b) Carga alta 813 N.

Se observa que, al igual como sucede con la pérdida de masa, el bronce C-93800 se ve gravemente afectado por el efecto de la contaminación del lubricante con el jugo, pues en todos los escenarios el coeficiente de fricción se eleva cerca de 2 veces. Por otra parte, para el C-93700 el efecto de la contaminación no es significativo y a ambas velocidades y cargas se presenta el comportamiento inverso, el coeficiente de fricción disminuye en promedio 11%.

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA DE DESGASTE

El volumen perdido se calcula de acuerdo con lo establecido en la norma (ASTM G-77, 2017) una vez conocido el ancho de la huella, el cual se determinó con una precisión de 0.005 mm utilizando el estereoscopio. Posteriormente se tomaron fotografías para caracterizar las huellas de desgaste de los bronce para los escenarios más representativos.

5.3.1 Bronce UNS C-93800

Luego de medir el ancho de cada huella como se explicó en la sección 4.10.6, se tomaron fotografías de las diversas superficies de desgaste y se compararon para observar cualitativamente el efecto de los factores de diseño para este tipo de bronce.

La siguiente tabla muestra el volumen perdido para todas las condiciones analizadas:

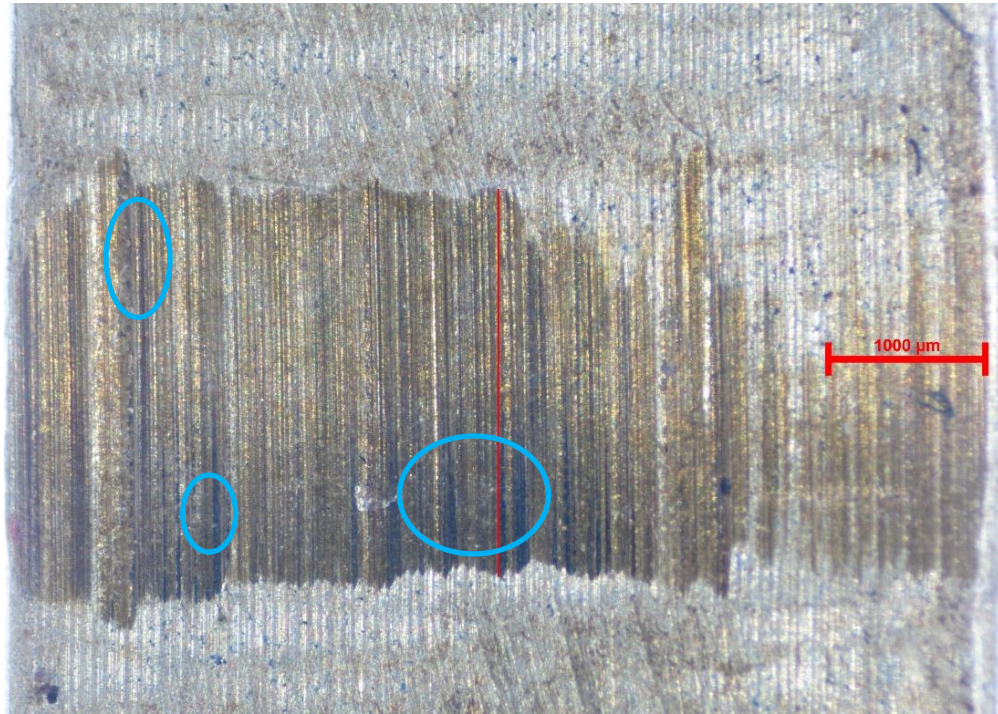
Tabla 23. Volumen perdido por huella de desgaste para el C-93800

Velocidad [rpm]	Lubricación	Carga [N]	Ancho Prom. Huella [mm]	Volumen Prom. [mm3]	Desv Est.
88	Lubricado	176	1,756	0,1640	0,0104
44	Lubricado	813	2,953	0,7972	0,2005
44	Lubricado	176	1,762	0,2098	0,1735
88	Lubricado	813	3,779	1,9436	1,4136
88	Contaminado	176	2,972	1,2202	0,4506
44	Contaminado	176	3,129	1,2096	1,0267
88	Contaminado	813	6,841	14,3710	14,6367
44	Contaminado	813	6,219	8,2414	4,7231

Los valores de la Tabla 23 son similares a los reportados en las tablas de la norma ASTM G-77. En los ANEXOS 9.8 (ver Tabla 1) aparecen diversos valores para un ancho de huella determinado. Como se observa, se pierde aproximadamente 14 mm³ de volumen por operar a velocidad de 88 rpm y 813N de carga con lubricante contaminado, mientras que el mejor escenario es el de velocidad de 88 rpm y 176 N de carga a condiciones normales de lubricación (0,16 mm³). Lo anterior concuerda con lo obtenido en la sección 5.1.

De acuerdo con la mejor y peor condición de operación para el bronce C-93800 (ver Figura 44 y Figura 45 respectivamente), se caracterizaron las huellas de desgaste de los bloques. Para el caso más favorable se tiene:

(a)



(b)

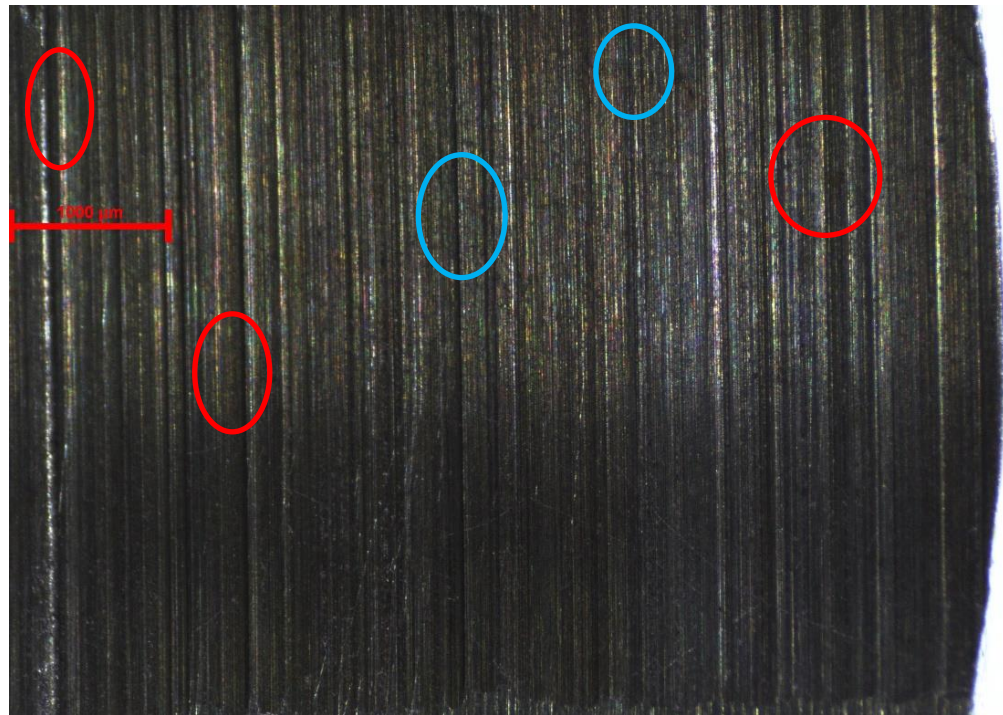
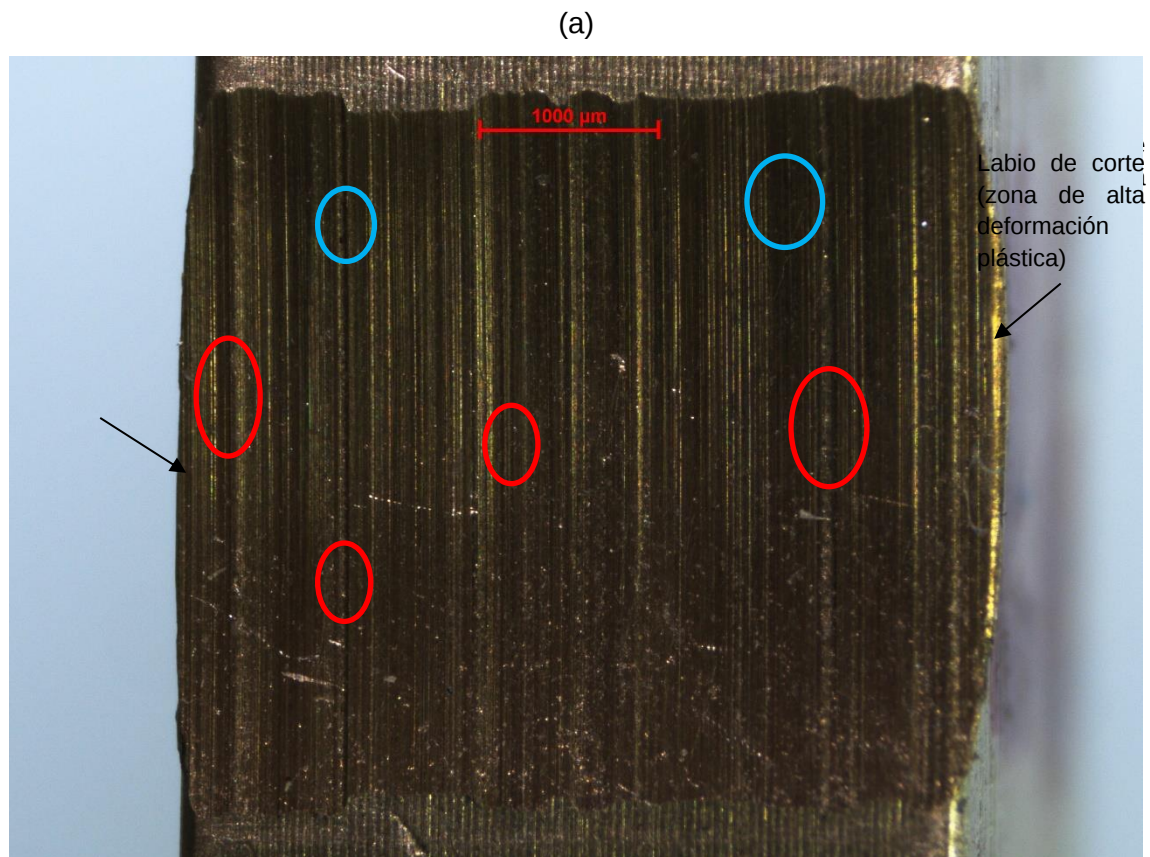


Figura 44. 2X Bronce C-93800 a 44 rpm y carga 176N (a) Lubricado, (b) Contaminado. (Fuente: Autor)

En ambas figuras (Figura 44a y b) se observan marcas de desgaste por el deslizamiento relativo del anillo-bloque, acompañados de surcos típicos de abrasión y zonas oscuras en donde se ha acumulado el lubricante empleado (marcas azules) (Chamorro, 2014). En la Figura 44a se observa una huella de ancho $\sim 2,5$ mm, mientras que en la Figura 44b el efecto de la contaminación del lubricante aumenta el ancho de la huella a $\sim 4,4$ mm, por ende, el volumen perdido por el bronce. Adicionalmente, se forman surcos de gran profundidad (marcas rojas), acompañados de gran deformación plástica del material comparado con el estado base.

Cuando se contamina el lubricante se pasa de una pérdida de masa promedio de 0,83 mg a 1,77 mg (se eleva cerca de 2 veces) y de un coeficiente de fricción de 0,0444 a 0,0895 (se eleva al doble de su valor base). Por ende, es muy importante tener una lubricación eficiente y un sistema de sellado eficaz para así evitar la filtración de jugo en las chumaceras de los molinos.

Para el caso menos favorable del bronce al plomo se tiene:



(b)

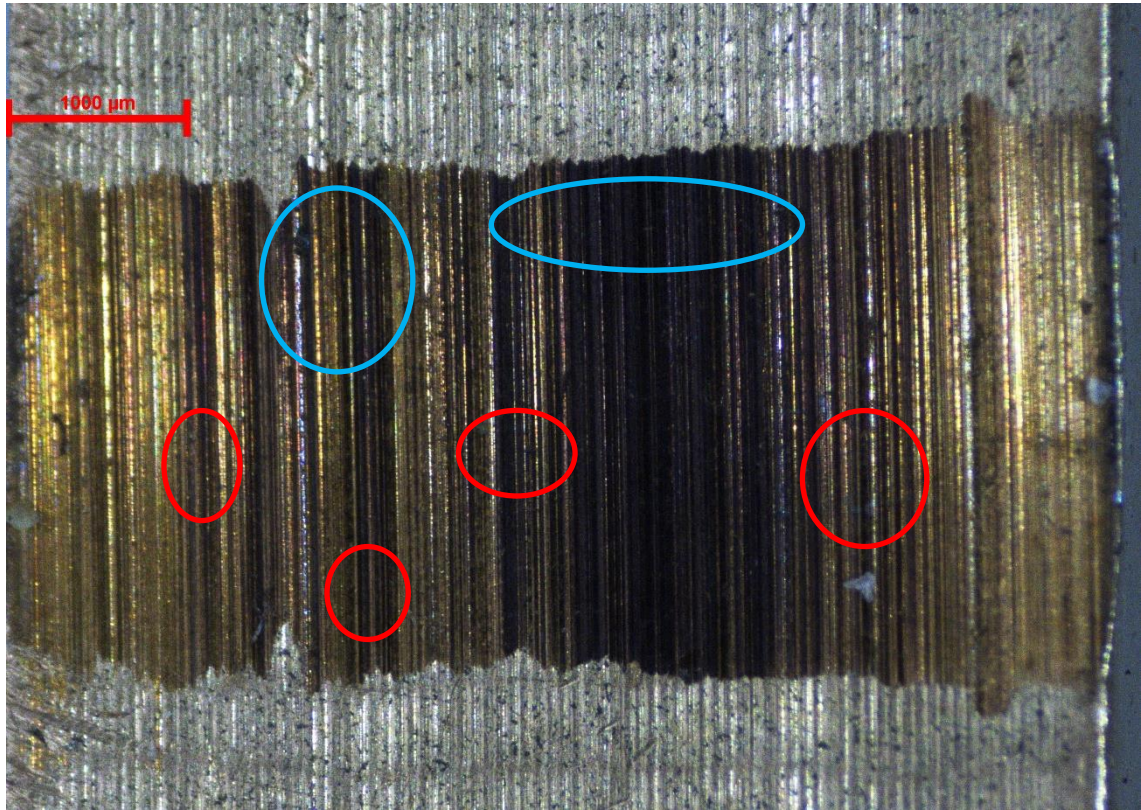


Figura 45. 2X Bronce C-93800 a 88 rpm y carga 813 N (a) Contaminado, (b) Lubricado. (Fuente: Autor)

Como se observa en la Figura 45a cuando la carga y la velocidad son altas y existe contaminación del lubricante, se observa una huella de desgaste de ~5,5 mm. También se producen surcos de desgaste por deslizamiento, con la diferencia que la cantidad de surcos profundos por desgaste abrasivo severo es mayor (zonas en rojo). Por otra parte, la gran deformación plástica que sufre el bronce es notoria por los labios de corte que se forman en ambos extremos (señaladas con flechas). Aunque hay zonas donde se acumula el lubricante (zonas en azul), principalmente en la profundidad de los valles, el lubricante se retiene menos si se compara con la Figura 45b.

Cuando se evita la contaminación del lubricante con jugo de caña (ver Figura 45b), manteniendo la condición de velocidad y carga, se obtiene una huella de ancho ~2,95 mm y con menor cantidad de surcos profundos por desgaste, hay mayor retención del lubricante y poca deformación plástica (apenas notoria en el borde derecho). Por lo tanto, la existencia de lubricación eficiente hace que la pérdida de masa disminuya de 73,05 mg

a 11,99 mg (se reduce 6 veces) y el coeficiente de fricción de 0,1243 a 0,0805 (se reduce 1,5 veces comparado con el caso contaminado).

5.3.2 Bronce UNS C-93700

Para este bronce aleado con estaño también se calculó el volumen perdido por huella de desgaste y se caracterizaron las superficies de los bloques. La siguiente tabla muestra el volumen perdido promedio por el bronce C-93700 para cada condición de prueba evaluada:

Tabla 24. Volumen perdido por huella de desgaste para el C-93700.

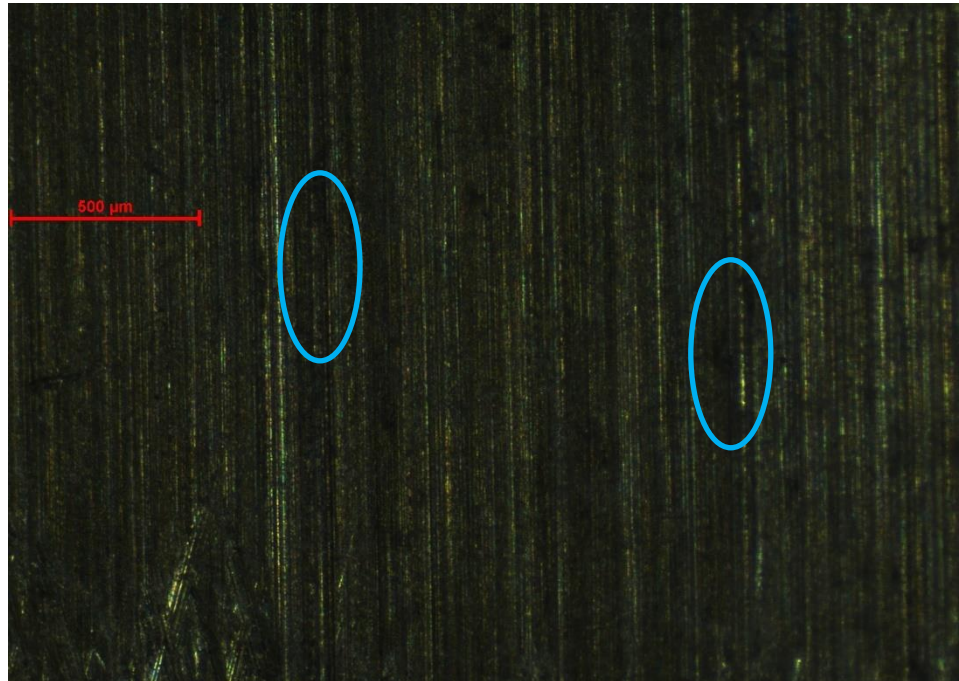
Velocidad [rpm]	Lubricación	Carga [N]	Ancho Prom. Huella [mm]	Volumen Prom. [mm ³]	Desv Est.
88	Lubricado	176	3,935	2,4449	1,6293
44	Lubricado	813	3,836	2,1089	1,4602
44	Lubricado	176	1,597	0,1310	0,0496
88	Lubricado	813	4,930	4,0553	2,3776
88	Contaminado	176	1,610	0,1388	0,0662
44	Contaminado	176	2,924	0,6950	0,8424
88	Contaminado	813	4,820	4,7949	3,9084
44	Contaminado	813	3,251	1,1098	0,4645

Se observa que para 5 de las 8 condiciones evaluadas, el volumen perdido por el bronce C-93700 fue menor que el del C-93800. Lo anterior, concuerda con el estudio realizado por Coronado et al. (J. J. Coronado, J. S. Rivas, 2004), donde se concluye que el bronce C-93700 se desgastó menos que el bronce C-93800 usando aceite y grasa como lubricante. Los escenarios más y menos favorables difieren con respecto a los de coeficiente de fricción, ya que en cuestión de volumen perdido (relacionado con pérdida de masa) operar a 44 rpm (velocidad de deslizamiento 0,15 m/s), carga baja y lubricado

se pierde sólo $0,13 \text{ mm}^3$. Por el contrario, cuando se opera a 88 rpm (velocidad de deslizamiento $0,31 \text{ m/s}$) carga alta y con lubricante contaminado se pierde aproximadamente $4,8 \text{ mm}^3$ de volumen.

Desde el punto de vista del volumen perdido se tiene que la superficie de desgaste del mejor escenario tiene la siguiente característica:

(a)



(b)

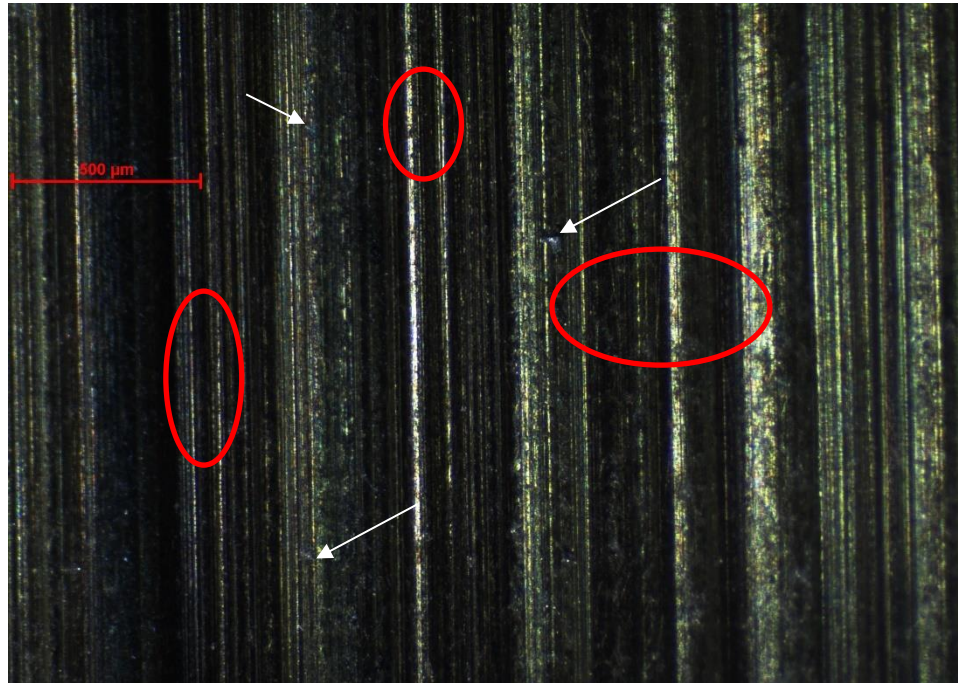


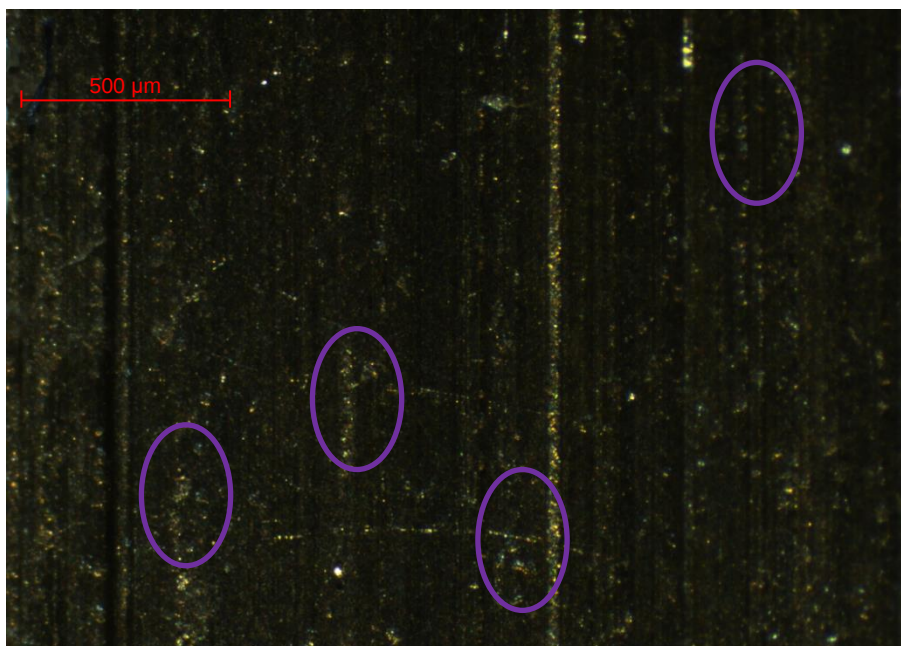
Figura 46. 5X Bronce C-93700 a 44 rpm y carga baja (a) Lubricado, (b) Contaminado. (Fuente: Autor)

Si se observa la Figura 46a la superficie está poco desgastada en comparación con la del bronce C-93800 a la misma condición (ver Figura 44a), con un ancho de huella de ~1,7 mm, sin surcos de abrasión profundos y con lubricante acumulado en las zonas demarcadas con azul. Se obtuvo una pérdida de masa y coeficiente de fricción promedio de 0,65 mg y 0,1194 respectivamente.

No obstante, cuando el lubricante se contamina (ver Figura 44b) la superficie cambia, debido a que se forman surcos de desgaste grandes (zonas rojas) por el efecto de abrasión severa causada por el jugo y aumenta el ancho de la huella (~3,9 mm). Asimismo, la pérdida de masa y el coeficiente de fricción cambian, aumentando a 2,85 mg (se eleva 4,4 veces) y disminuyendo a 0,1076 (se reduce 1,1 veces) respectivamente, comparado con el caso sin contaminación. Por otra parte, se observa material residual (señalados con flechas blancas) debido al desgaste por deslizamiento entre la superficie del anillo sobre el bloque, lo que hace que el material libre que se desprende quede en la zona de contacto y acelere la tasa de desgaste.

Para el escenario menos favorable desde el punto de vista del volumen perdido se tiene que:

(a)



(b)

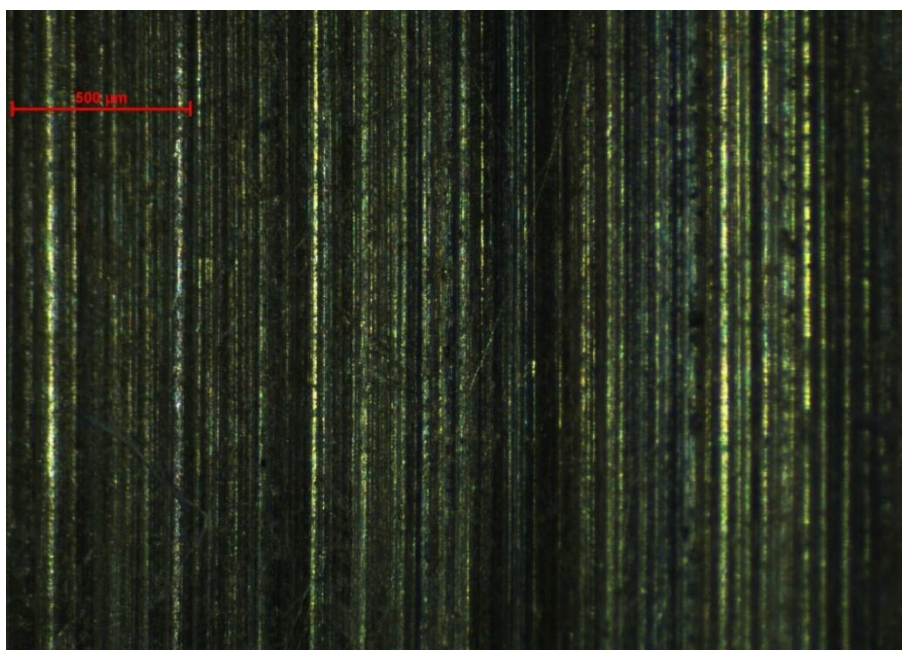


Figura 47. 5X Bronce C-93700 a 88 rpm y carga alta (a) Contaminado, (b) Lubricado. (Fuente: Autor)

Cuando el lubricante se contamina con jugo de caña, se tiene una superficie menos afectada por el desgaste abrasivo (Figura 47a), con un ancho de huella promedio de ~6 mm y con presencia de algunos surcos de mayor profundidad. Se distinguen varias zonas reflectivas (demarcadas con morado) lo cual puede ser material que se desprendió del mismo bronce o jugo de caña, pues el aspecto de este último es de color turbio y de color marrón claro. El coeficiente de fricción es 0,1174 (1,03 veces menor comparado con una lubricación eficiente) y la pérdida de masa 22,37 mg (1,3 veces menor). Comparado con el bronce C-93800 cuando se contamina el lubricante, el bronce C-93700 no se ve seriamente afectado desde el punto de vista del coeficiente de fricción, pero sí en la pérdida de masa.

Cuando no existe contaminación del lubricante (Figura 47b), se observa una superficie con alto desgaste y surcos profundos, con acumulación de lubricante en algunas zonas y con un ancho de huella de ~5 mm. La pérdida de masa y coeficiente de fricción promedio fueron de 28,29 mg y 0,1218. Lo anterior sugiere poca afinidad entre el lubricante y el bronce C-93700 en escenarios de lubricación óptima, debido a que este bronce se desgasta más que el C-93800.

5.4 CARACTERIZACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE

La Tabla 25 muestra la viscosidad del lubricante base evaluada a diferentes temperaturas mediante pruebas que se realizaron con el viscosímetro. Como es de esperarse, la viscosidad disminuye con el aumento de temperatura, es decir, son inversamente proporcionales.

Tabla 25. Viscosidad del lubricante base. (Fuente: Autor)

Temperatura [°C]	Viscosidad dinámica [cP]	Viscosidad cinemática [m²/s]	Viscosidad cinemática [cSt]
25	87960	0,0968	96759
40	47138	0,0519	51854
50	11184	0,0123	12303
60	9150	0,0101	10065

De acuerdo con la ficha técnica del lubricante de la sección 4.1, reportan 55000 cSt de viscosidad @ 40 °C con lo que se obtiene un error relativo de 5,7% con respecto al valor obtenido en la prueba a la misma temperatura. Se concluye entonces que para establecer las características del lubricante se tiene un error aceptable.

Para el caso contaminado se obtuvo:

Tabla 26. Viscosidad del lubricante contaminado con jugo de primera extracción al 30% del volumen. (Fuente: Autor)

Temperatura [°C]	Viscosidad dinámica [cP]	Viscosidad cinemática [m²/s]	Viscosidad cinemática [cSt]
25	33763	0,0371	37141
40	14765	0,0162	16242
50	11855	0,0130	13041
60	10887	0,0120	11977

Se observa que a temperatura de 25 °C se tiene una viscosidad casi 3 veces menor con respecto al caso base (~2,6 veces) y su valor sigue decreciendo con el aumento de la temperatura. Es importante observar que a 50 y 60°C los valores de viscosidad son similares a los del lubricante base, es decir, tienden a converger a temperaturas más altas.

Lo anterior demuestra que tener un sistema de sellado en las chumaceras de los molinos es muy importante para conservar la integridad de lubricante y evitar que entre en

contacto con el jugo. Cabe resaltar que el lubricante y el jugo forman una fase heterogénea, por ende, hay incertidumbre en la medición de viscosidad porque se puede presentar el caso en que el valor obtenido sea de una de las 2 fases y no en la interfase de la mezcla.

Por último, se muestra la gráfica de Viscosidad vs Temperatura en donde se contrastan ambos casos de lubricación (base y contaminada al 30% con jugo de caña):

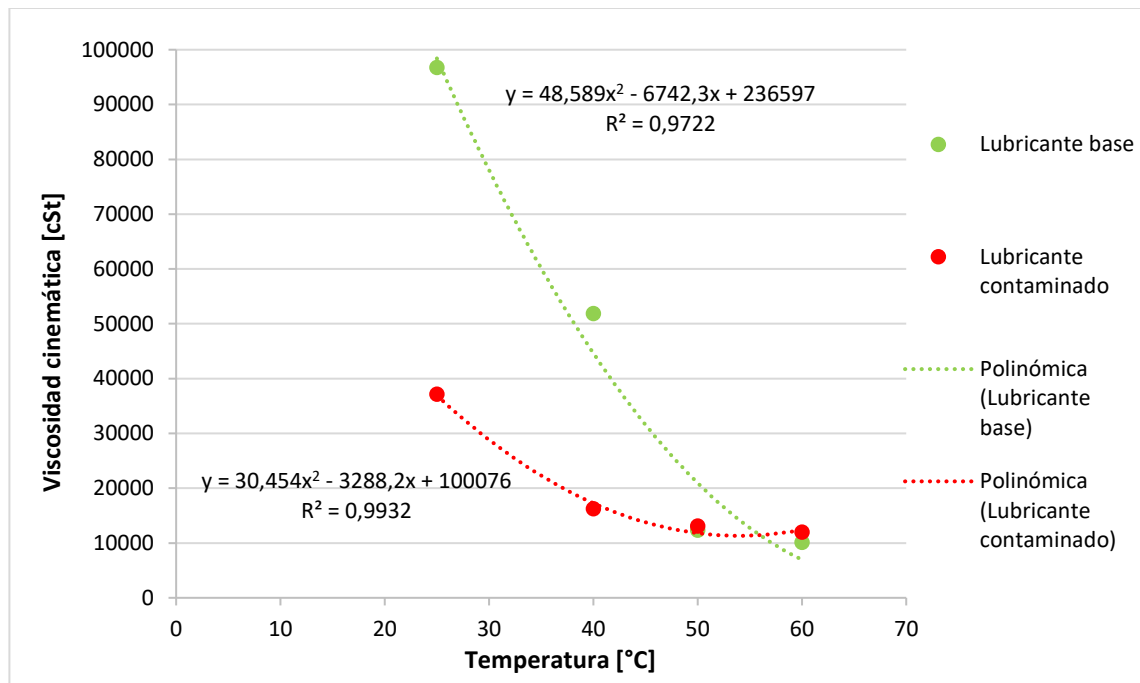


Figura 48. Variación de la viscosidad con la temperatura. (Fuente: Autor)

De la Figura 48 se observa que la viscosidad de ambos lubricantes se ajusta a un modelo polinómico de grado 2. Lo anterior concuerda con (Frank, M., 2005), donde se establece que la variación de la viscosidad de los fluidos con la temperatura disminuye con este comportamiento, siendo una expresión cuadrática la que se ajusta más entre los límites de temperatura evaluados. Si se compara la curva del lubricante base (en verde) con la del lubricante contaminado (en rojo), se observa que para las dos primeras temperaturas (25 y 40 °C) la viscosidad del primero es cerca de 3 y 4 veces mayor respectivamente.

Por el contrario, para las temperaturas de 50 y 60°C se tiene una convergencia de ambos lubricantes ya que sus valores de viscosidad son similares.

Estos resultados permiten soportar la importancia del sellado en la chumacera de los molinos que evite la filtración del jugo. El jugo altera la composición del lubricante y su funcionalidad, afectando el comportamiento físico del desgaste en términos de coeficiente de fricción y pérdida de masa, siendo más relevante en fundiciones de bronce C-93800. Por otra parte, podría considerarse que, frente a una condición de contaminación, la fundición C-93700 presentó un mejor comportamiento que se observó en los resultados estadísticos.

5.5 RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO Y LUBRICACIÓN DE LOS MOLINOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se realizan algunas recomendaciones para mejorar tanto la lubricación como el mantenimiento y la operación en los molinos.

Para las condiciones operacionales se tiene:

- Teniendo en cuenta que en los ingenios se incrementa la tasa de molienda en operación día a día, elevar la velocidad de 3 a 6 rpm hace que la tasa de desgaste sea 1,3 y 9 veces mayor para el bronce C-93800 y C-93700 respectivamente.
- Se propone realizar investigaciones en pro de operar los molinos con presiones más bajas a las recomendadas en sus cabezotes hidráulicos y que no afecten en el desempeño de extracción del jugo. Contribuyendo a una menor tasa de desgaste en las chumaceras, menores consumos energéticos y sin afectar en la función principal del molino.
- El escenario más beneficioso para los bronce C-93800 y C-93700, es a condición de baja velocidad, baja carga y lubricación eficiente. Sin embargo, trabajar los molinos a baja carga afecta en su función de extraer jugo. Por lo tanto, se

recomienda ajustar los molinos para que operen a velocidades más bajas para las tasas de caña y condiciones de fibra del ingenio, revisar las presiones hidráulicas que no se encuentren en valores altos a los recomendados y trabajar en mejorar el sellado, que evite la filtración del jugo.

- Debido a que el bronce C-93700 presentó menor tasa de desgaste y fricción frente a los escenarios de lubricante contaminado, se recomienda usar este bronce si el ingenio presenta fallas en el sellado de las chumaceras o si presenta condiciones de diseño en los equipos que favorecen la contaminación de lubricante con jugo. De no presentarse estas fallas de sellado, es recomendable usar bronce C-93800.

Las recomendaciones de lubricación son:

- Verificar constantemente el espesor de las tejas de bronce, para tener un control sobre el desgaste progresivo que van adquiriendo estos componentes. De esta manera, si se nota un cambio notable entre revisiones, considerar bombear lubricante con mayor frecuencia para atenuar la tasa de desgaste.
- Utilizar sistemas de sellado herméticos para evitar dispersión del lubricante en zonas indeseables y así tener un ahorro en la cantidad de lubricante que se emplea en operación.
- Se pueden utilizar sellos de poliuretano o tipo brida para evitar el ingreso de jugo de caña y por ende que el lubricante se contamine.

Por último, las recomendaciones de mantenimiento son:

- Realizar mantenimiento preventivo según especificaciones de los fabricantes, para que los componentes tengan una mayor vida útil en operación.
- Realizar mantenimiento predictivo como tintas penetrantes y ultrasonido para verificar defectos superficiales en los ejes, chumaceras, entre otros componentes de los molinos.

- Tener en cuenta que, cuando se han presentado escenarios de contaminación del lubricante, los cambios de las tejas de bronce no se deben realizar a los 6 meses sino con menor frecuencia, ya que probablemente estas han sufrido desgaste abrasivo severo producto de dicha contaminación.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo oportuno a los componentes cuando se presentan anomalías en la operación, para evitar futuras fallas por uso o inadecuada operación de estos, como resultado el desempeño en la estación de molinos se ve afectado.

6. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se logró cuantificar el efecto de la contaminación del lubricante en la interfase chumacera-guijo de los molinos de caña de azúcar, mediante ensayos de desgaste por deslizamiento empleando el tribómetro en configuración bloque-anillo.

Se concluye que el bronce C-93800 se comporta mejor en términos de coeficiente de fricción, ya que este valor fue 32% menor comparado con el C-93700. Mientras que, el C-93700 presentó un valor 47% menor en pérdida de masa comparado con el C-93800.

El mejor escenario para el C-93800 y C-93700, es aquel donde se opera a velocidad de giro del anillo de 44 rpm (equivalente a 3 rpm en los molinos), carga de 176 N y lubricación eficiente. Lo anterior se debe a que se obtuvieron valores bajos para ambas variables de respuesta (coeficientes de fricción y pérdida de masa).

Cuando existe contaminación del lubricante con jugo de caña en una proporción de volumen 30%, el bronce C-93800 se ve enormemente afectado en todos los escenarios evaluados, ya que la fricción se eleva al doble y la tasa de desgaste se acelera cerca 8,4 veces. Mientras que para el bronce C-93700 se observó que no es afectado significativamente por la contaminación.

Para la pérdida de masa el factor más influyente fue la carga y la lubricación debido a que, sin importar el tipo de bronce, el valor de esta variable se incrementó. Los efectos combinados, *carga-lubricación* y *bronce-lubricación* inciden de manera significativa comparado con las demás combinaciones de las variables de diseño, pues el valor -p fue menor al $\alpha = 0.05$ (confiabilidad 95%).

En términos de coeficiente de fricción, el factor más influyente es el tipo de bronce que se utiliza, pues se tiene coeficientes de fricción promedio de 0,0843 empleando un C-93800 en lugar del C-93700 (0,1269 en promedio). El efecto combinado *velocidad-carga* y *bronce-lubricación* inciden de manera significativa comparada con las demás combinaciones.

La condición más crítica tanto en fricción como en pérdida de masa para el bronce C-93800, es operar a velocidad 88 rpm de giro del anillo (6 rpm en los molinos), carga

normal de 813 N y con contaminación de lubricante. Por lo tanto, se sugiere tener un buen sistema de sellado en las chumaceras para evitar que el jugo de caña se filtre, acelere la tasa de desgaste y se incremente la energía perdida por fricción.

Para el bronce C-93700, la condición más crítica en términos de fricción fue operar a velocidad de giro de 44 rpm (3 rpm en los molinos), carga normal de 813 N y lubricado. Por otro lado, en cuestión de pérdida de masa el escenario crítico fue a velocidad 88 rpm de giro del anillo (6 rpm en molinos), carga normal de 813 N y con lubricación óptima.

Se observó que todas las superficies de desgaste tienen surcos de desgaste abrasivo, con evidencia de lubricante adherido en estos. Para el C-93800 aparecen surcos profundos cuando se contamina el lubricante y se produce un efecto de “lavado” del plomo, por lo que la fricción aumenta. Por el contrario, la superficie del bronce C-93700 presentó menor pérdida de masa, disminuyó la cantidad y profundidad de los surcos de desgaste.

Por último, se encontró que la variación de la viscosidad del lubricante con el aumento de la temperatura se ajusta a una expresión polinómica de segundo orden, entre los límites de temperatura evaluados.

Para el caso base y contaminado, la viscosidad disminuye conforme aumenta la temperatura (inversamente proporcionales). Por lo tanto, es relevante tener un buen sistema de refrigeración y sellado. Se sugiere que el sistema de sellado sea tipo brida o tipo faja, este último consiste en una espuma de poliuretano pegada con adhesivo de alto rendimiento, para evitar entrada de partículas extrañas y jugo a las chumaceras.

7. RECOMENDACIONES

Se deben mantener las tolerancias de fabricación definidas en la norma ASTM G77. Las caras de ambos cuerpos deben quedar paralelas entre sí y perfectamente alineadas para obtener una huella rectangular.

Debe procurarse que los broncees sean del mismo origen, ya que la composición química varía con la colada y la forma en que se realiza la fundición, de lo contrario se obtendrían diferencias en los resultados obtenidos.

Se sugiere realizar estudios exploratorios monitoreando la temperatura y analizar la composición química tanto de los broncees y anillos como del lubricante, para ver como estas variables se ven afectadas luego de entrar en contacto con el jugo de caña.

8. REFERENCIAS

- Association Inc., C. D. (2018). Copper & Copper Alloy Microstructures: Copper Tin Alloys. Retrieved February 5, 2019, from https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/cu_tin.html
- ASTM G-77, U. B. (2017). Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. *Wear*, 14(Reapproved 2017), 1–7. <https://doi.org/10.1520/G0077-17>
- Bolaños, C. C., Rivas, J. S., & Coronado, J. J. (2006). Caracterización de las propiedades mecánicas y microestructurales de soldaduras empleadas en la recuperación de ejes Characterization of mechanical properties and micro-structural features of welds used for rebuilding shafts, 33–43. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n36/n36a03.pdf>
- Chamorro, J. C. (2014). *COMPARACIÓN DE LUBRICANTES EN EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL PAR BRONCE-ACERO A DIFERENTES PRESIONES Y VELOCIDADES USANDO UN TRIBOMETRO DE DESLIZAMIENTO BLOQUE-ANILLO*. Universidad del Valle. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ojo.2014.48035>
- Coronado, J. J., Mora, W., & Rivas, J. S. (2005). Design of two bearings with sealing system for the top roll shaft of sugar cane mill, 1–8.
- DANE. (2017). *Boletín Económico Regional/Suroccidente/ IV trimestre 2017*. Retrieved from http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/ber_suroccidente_

tri4_2017.pdf

FC23 Compression Load Cell. (n.d.). Retrieved January 5, 2019, from https://co.mouser.com/datasheet/2/418/NG_DS_FC23_A-1130240.pdf

FICHA TÉCNICA RESIST SUGAR OIL PLUSS. (n.d.). Retrieved January 4, 2019, from <http://www.simcagroup.com/wp-content/uploads/2014/09/Resist-Sugar-Oil-Pluss.pdf>

Frank, M., W. (2005). *Fluid Mechanics.pdf* (4th). Mc Graw Hill. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.010>

Glaeser, W. A. (1983). Properties_Heavy_Loaded_Copper_701-4.Pdf. *Journal of Metals*.

Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera Ed). Mc Graw-Hill.

Holguín, C., & Coronado, J. (2007). Estudio del desgaste por deslizamiento en bronce
Study of the sliding wear in bronzes, 98–107.

Home - Tribology and Lubrication Engineering Society | STLE. (2018). Retrieved January 22, 2018, from <https://www.stle.org/>

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017a). Sliding wear. In *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (Second, pp. 107–164). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00005-2>

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017b). Wear by hard particles. In *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (Second, pp. 165–236). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6)

J. J. Coronado, J. S. Rivas, A. L. G. (2004). ESTUDIO TRIBOLÓGICO EN CHUMACERAS Y EJES DE MOLINO DE CAÑA DE AZÚCAR.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2th ed.). Limusa Wiley.
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00005-2)

Motorreductores de ejes perpendiculares SPIROPLAN® W..DR.. | SEW-EURODRIVE.
(n.d.). Retrieved June 19, 2018, from https://www.sew-eurodrive.es/productos/motorreductores/motorreductores_estandar/motorreductores_de_ejes_perpendiculares_wdr_spiroplan/motorreductores_de_ejes_perpendiculares_wdr_spiroplan.html

Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas - un enfoque integrado* (4th ed.).
<https://doi.org/201334114>

Pilkey, W. D., & Pilkey, D. F. (1997). *Peterson's Stress Concentration Factors*.
<https://doi.org/10.1002/9780470211106>

Pulido, M. Á. (2000). *CONVERTIDORES DE FRECUENCIA, CONTROLADORES DE MOTORES Y SSR*. (Boixareu Editores, Ed.). Barcelona: Marcombo.

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar. Ingeniería de la caña de azúcar*. Verlag Dr. Albert Bartens KG. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Rivas, J. S., Coronado, J. J., & Gómez, A. L. (2006). Tribological aspects for the shafts and bearings of sugar cane mills. *Wear*, 261(7–8), 779–784.
<https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2006.01.026>

SKF. (2018). Lubricación. Retrieved April 19, 2018, from

<http://www.skf.com/co/products/bearings-units-housings/principles/bearing-selection-process/bearing-lubrication/index.html>

Taylor, P., Gee, A. W. J. De, Vaessen, G. H. G., & Begelinger, A. (1971). Influence of Phosphorus on the Load Carrying Capacity under Boundary Lubrication Conditions of Copper-6 Tin. *Tribology Transactions*, (January 2015), 116–123. <https://doi.org/10.1080/05698197108983233>

Viascán, G. A. (2017). Análisis de factores técnicos para controlar los costos asociados del desgaste prematuro de bronce en molinos de caña de azúcar, por medio de la optimización de la lubricación, 1–19.

9. ANEXOS

9.1 CÁLCULO TEÓRICO DE LAS VELOCIDADES DE LOS MOLINOS

Una vez establecido el tamaño estándar de los molinos de caña de los ingenios del sector azucarero en la sección 4.2.1 Velocidades, se procedió a calcular la velocidad tangencial de las mazas y guijos bajo el supuesto que la velocidad angular ω del molino es la misma que la del guijo (no sus velocidades tangenciales):

$$\omega_{molino} = \frac{V_{tangencial\ maza}}{r_{externo\ maza}} = \frac{V_{tangencial\ guijo}}{r_{guijo}}$$

Según Rein (Rein, 2012) la velocidad de giro de la maza se calcula con el diámetro medio de esta y no con el diámetro externo, para lo cual generalmente se utiliza esta expresión:

$$D_{medio\ maza} = D_{externo\ maza} - 2\ in$$

Si se asume un valor de velocidad angular de 3 rpm y un tamaño de molino del caso 6 (ver sección 4.2.1, Tabla 6 para geometrías de los molinos), La velocidad tangencial del guiño es:

$$V_{tangencial\ guiño} = \frac{V_{tangencial\ maza}}{r_{medio\ maza}} \times r_{guiño} = \frac{\omega_{molino}}{r_{guiño}}$$

$$V_{tangencial\ guiño} = \frac{3\ rpm \times \left(\frac{2\pi\ rad}{60\ seg}\right)}{\frac{0,533\ m}{2}} = 0,084\ m/s$$

Para que las condiciones de los ensayos de desgaste se aproximen a la de los molinos, se asegura que la velocidad tangencial del anillo sea la misma que la del guiño. Con un diámetro externo del anillo de 35 mm (según ASTM G-77) la velocidad de giro del este para las pruebas es:

$$V_{tangencial\ guiño} = V_{tangencial\ anillo}$$

$$0,084 \frac{m}{s} = \omega_{anillo} \times r_{anillo}$$

$$\omega_{anillo} = \frac{0,084\ m/s}{0,035\ m / 2} = 4,8 \frac{rad}{s} \times \left(\frac{60\ seg}{2\pi\ rad}\right)$$

$$\omega_{anillo} = 45,84\ rpm$$

Lo anterior se realizó previamente para todas las geometrías de los molinos, para los experimentos se seleccionó el promedio de las velocidades de giro del anillo para un

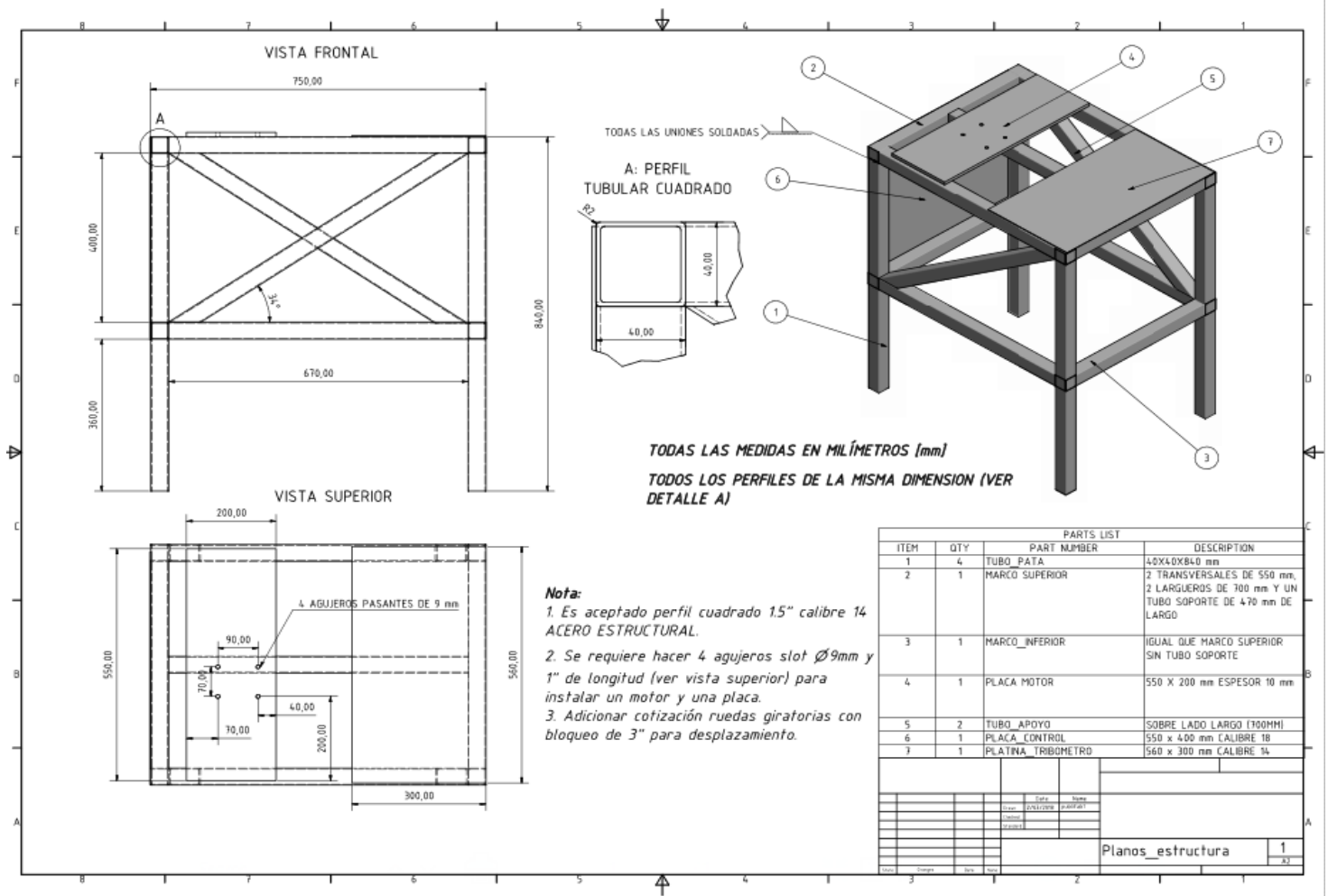
equivalente de 3 y 6 rpm de los molinos de los casos 5 y 6 (ver sección 4.2.1, Tabla 7).
Obteniendo entonces un valor promedio de 44 rpm para velocidad baja y 88 rpm para
velocidad alta.

9.2 ESTADO DEL ARTE DE ENSAYOS DE DESGASTE CON EL PAR BRONCE-ACERO

Año	↓	Autor (es)	Anillo / Disco	Bloque / Pin	Lubricante	Número de muestras	Fuerza / Presión	Velocidad	Duración	Resultados
2014		J.C. Chamorro	Anillo Acero AISI 1045 (	Bloques SAE 67	Sintético 1 Sintético 2 grado alimenticio	3 repeticiones para cada combinación (12 muestras)	4 y 8 Mpa	0.13 y 0.25 m/s	Información no disponible	*Menor desgaste de anillo con lubricante 3 * Menor desgaste de bloque con lubricante 1 * Menor fricción a 0.25 m/s con carga 4 Mpa y lubricante 3 * Menor fricción a 0.13 m/s con carga 8 Mpa y lubricante 1 * Al principio presenta alto desgaste, luego de un tiempo se estabiliza * El desgaste es lineal con la fuerza aplicada * Agua destilada + 5% MoS2 exhibió mejor comportamiento que el de 3% MoS2
2013		A. B. Aher, S.R. Nimbalkar et al.	Disco Acero Inox. 304 (165 x 8 mm)	Pines compuesto de bronce con politetrafluoretileno (PTFE)	Agua destilada + MoS2	2 repeticiones (8 muestras)	100.91 109.049 113.07 117.189 [N]	0.12 m/s	Información no disponible	* El desgaste es lineal con la fuerza aplicada * Agua destilada + 5% MoS2 exhibió mejor comportamiento que el de 3% MoS2 Rugosidad, pérdida de masa y coeficiente de fricción.
2011		S. M. Muzzakir, Harish Hirani, et al.	Bronce al fósforo (50 x 50 mm)	No aplica	SM 175 SM 85 SM 120	inicialmente eran 12, experimentaron con 9 por defectos de fabricación en 3 cojinetes	5000 N	10 m/s	c/ prueba 3 horas	* Lubricante SM 85 bajo rendimiento comparado con los otros 2. * SM 120 el mejor por contener aditivos EP.
2007		J. Coronado, C. Holguín	Acero AISI 1045 (35 x 8.7 mm)	Bloques SAE 67 Bronce americano Bronce nacional	Acetite	Información no disponible	8.14 Mpa	60.37 (0.1265 m/s)	Aprox. 90 minutos (5400 revoluciones)	* Bronce nacional presentó menor coeficiente de fricción * SAE 67 fue el de menor pérdida de masa y desgastó menos el anillo * Bronce americano produjo mayor desgaste en el anillo por su dureza y menor contenido de pb
2006		J. Coronado et al.	Anillo Acero AISI 1045 rolado en caliente (35.5 x 8.8 mm)	Bloques SAE 64 SAE 67	Grasa Acetite asfáltico	Información no disponible	814 N	0.13 m/s	Aprox. 90 minutos (5400 revoluciones)	* Desgaste adhesivo en superficie del eje causada por ingreso de materia extraña a la chumacera * Deterioro del eje causado por mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo * Acetite asfáltico mejor que la grasa * SAE 67 reduce consumo de potencia, mayor pérdida de masa * SAE 64 menor pérdida de masa, mayor potencia consumida

Año	↓↑	Autor (es)	Anillo / Disco	Bloque / Pin	Lubricante	Número de muestras	Fuerza / Presión	Velocidad	Duración	Resultados
2004		JJ Coronado, et al.	Anillo Acero AISI 1045 (35 x 8.7 mm)	Bloques SAE 64 SAE 67	Grasa Aceite asfáltico	3 repeticiones para cada combinación (12 muestras)	8.14 Mpa	60.37 (0.1255 m/s)	Aprox. 90 minutos (5400 revoluciones)	*Menor pérdida de masa en ambos broncees cuando se usa aceite * SAE 64 menor pérdida de masa que el SAE 67 para ambos lubricantes * SAE 67 causa mayor pérdida de masa en anillo que el SAE 64
1971		A.W. J. de Gee et al.	Acero AISI 1045 (75 mm)	Pines 4 aleaciones Cu- 6 Sn expuestas al ambiente en diferentes periodos de tiempo	2 tipos de parafina	Información no disponible	100 a 400 kgf	75, 250 y 350 rpm	Información no disponible	*Cambios mínimos en la composición del cojinete influyen significativamente sobre el comportamiento tribológico del par cojinete-lubricante * agregar fósforo a la composición química reduce la capacidad de carga 2 veces *debajo del punto crítico, la tasa de desgaste es independiente de la velocidad

9.3 PLANOS DE FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA BASE



9.3.1 Análisis estático

9.3.1.1 Elaboración de la geometría

Antes de realizar la construcción de la estructura base se verificó que la misma fuera apta para soportar el peso de los distintos elementos que iban a ser colocados sobre ella. Primero se realizó la geometría con la ayuda del software CAD *Autodesk® Inventor®* (ver Figura 49), se realizó cada pieza por aparte y se ensamblaron con las restricciones correspondientes.



Figura 49. Geometría CAD de la estructura base.

9.3.1.2 Simulación

Una vez elaborada la geometría se empleó el software de simulación y diseño 3D *ANSYS, Inc.* para analizar los esfuerzos y desplazamientos de la estructura mediante el módulo *Static Structural*. La Figura 50 muestra las condiciones de borde que se utilizaron para la geometría importada de material *Structural Steel*.

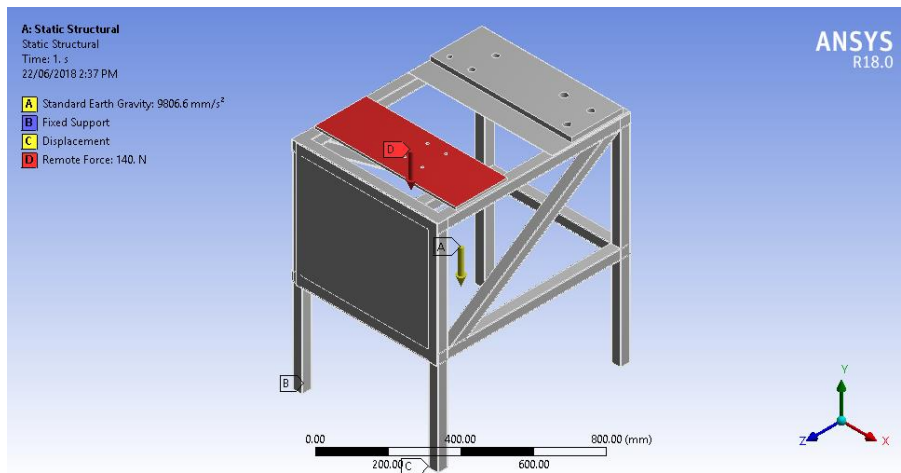


Figura 50. Condiciones de borde del modelo.

En donde:

- A es la fuerza inercial debida a la gravedad (considerada de magnitud 9,806 m/s² en dirección -Y) que tiene en cuenta el peso propio de la estructura.
- B es un apoyo fijo en un tubular base
- C son apoyos con grados de libertad en el eje X y Z (los 3 tubular base restantes)
- D es la fuerza ejercida por el peso del motor (aproximadamente 14 kg).

El tamaño empleado en los elementos de malla fue el que tiene el software por defecto, debido a que es una geometría poco compleja y no de gran tamaño, con pocos cambios de sección o concentradores de esfuerzo que necesiten de un mayor refinamiento de malla en esas ubicaciones, entre otros factores.

9.3.1.3 Resultados

Luego de definir las condiciones de borde del problema y enmallar el modelo, se procedió a solucionar el problema mediante la iteración que hace el mismo software para resolver las ecuaciones que describen cada uno de los elementos de la malla.

La Figura 51 representa los resultados correspondientes (a) la deformación total [mm] y (b) la distribución de esfuerzos de Von Mises (esfuerzo equivalente que tiene en cuenta los efectos estáticos, torsionales y flectores).

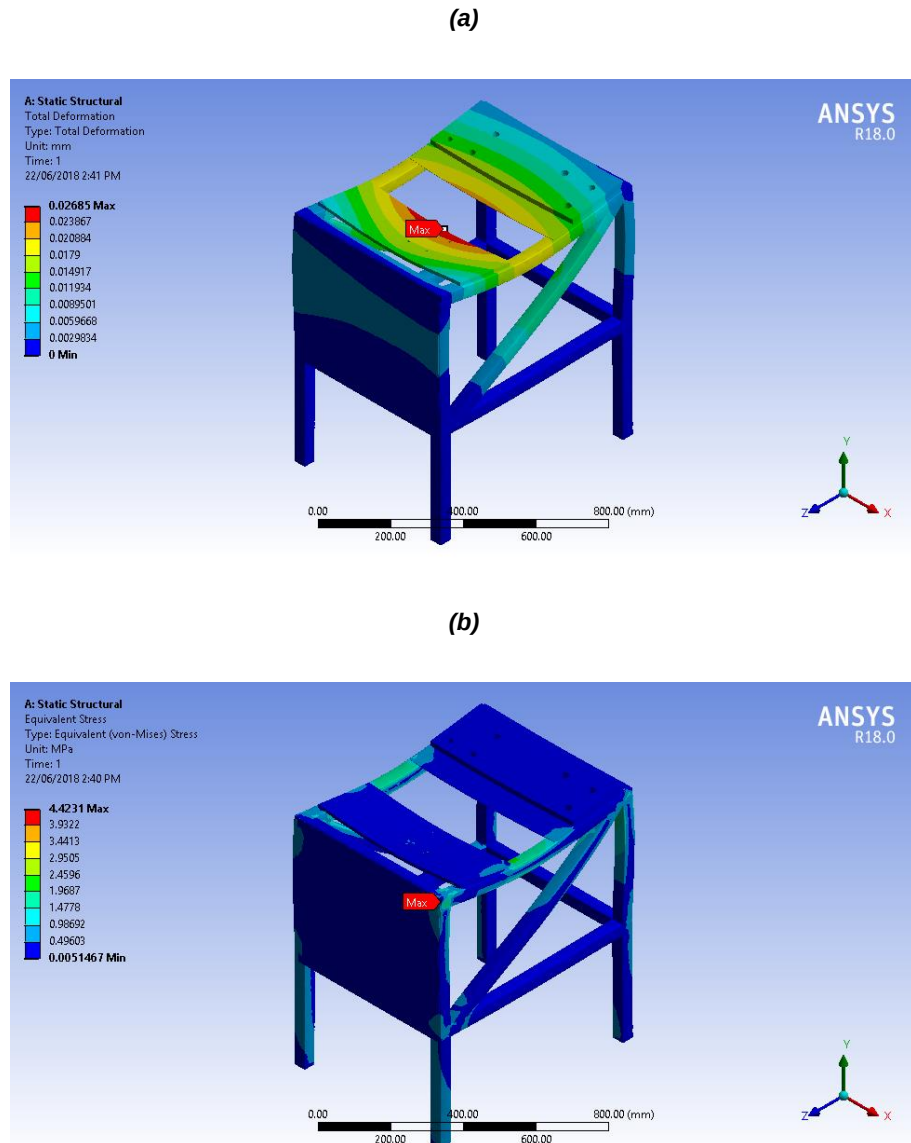


Figura 51. Resultados de la simulación estática, (a) Deformación total [mm], (b) Esfuerzo equivalente de Von Mises.

De la Figura 51a se observa que el desplazamiento total máximo se presenta en el borde derecho de la placa que sostiene el motorreductor con una magnitud de 0,02685 mm por lo que no se considera representativo. Por otra parte, la Figura 51b muestra que el

esfuerzo máximo equivalente de Von Mises se presenta en la zona interna de la unión de los dos tubulares superiores del lado izquierdo, con una magnitud no mayor a 5 MPa. Por lo tanto, se concluye que la base está bien diseñada estáticamente y no presentará ningún problema.

9.3.2 Análisis modal

Una vez realizado el análisis estático, se enlazaron estos resultados con el módulo *Modal* del programa (ver Figura 52) con el fin de realizar un barrido por los modos de vibración de la estructura para verificar que estos se encuentren alejados de la frecuencia de operación del motor.

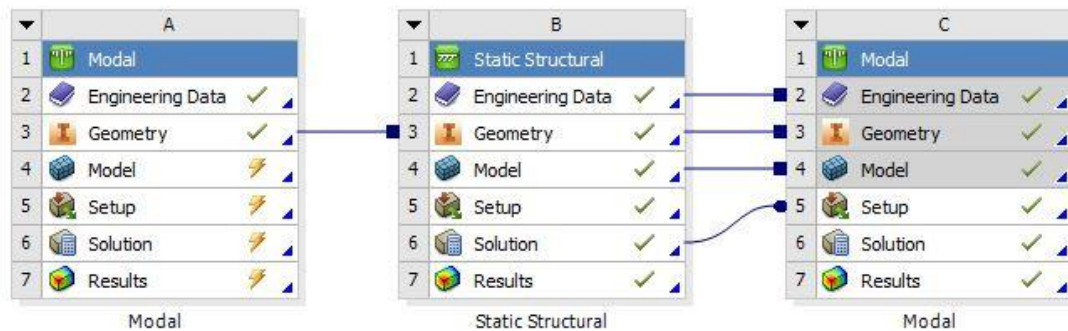


Figura 52. Diagrama de flujo de los módulos empleados en Ansys.

9.3.2.1 Resultados

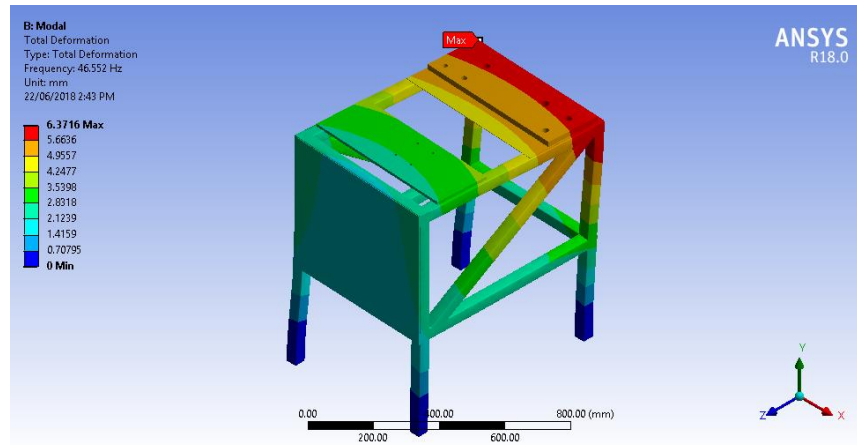
Luego de solucionar el modelo, los resultados obtenidos en la simulación principalmente fueron los modos de vibrar de la estructura y las frecuencias a las que estos se alcanzan.

Tabla 27. Modos de vibración de la estructura

Mode ⁶	Frequency [Hz]
1	46,552
2	62,09
3	89,309
4	163,06
5	236,88
6	277,59

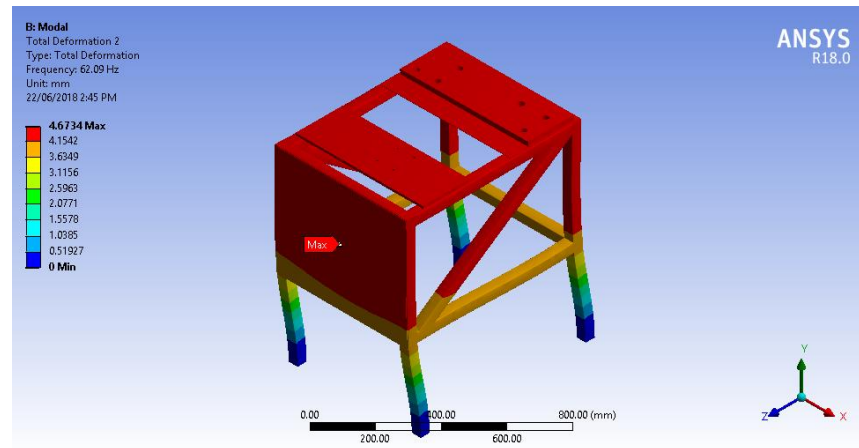
Según lo obtenido en la Tabla 27 se puede afirmar que para todos los modos de vibrar de la estructura la frecuencia se encuentra alejada de los 60 Hz nominales del motor. Sin embargo, para el modo 2 (movimiento axial en el eje z) se evidencia que está muy cerca de la frecuencia del sistema. Los desplazamientos [mm] como consecuencia de los primeros 3 modos de vibración (*i.e.* movimiento axial en el eje X, axial en el eje Z y rotacional en Y) se muestran en la Figura 53.

(a)



⁶ Aunque Ansys permite ver n modos de vibración según lo defina el usuario, sólo se plantearon los primeros 6 modos.

(b)



(c)

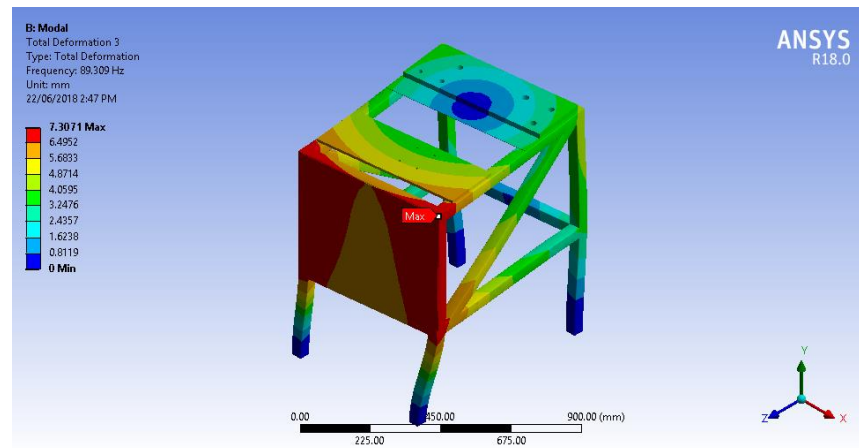
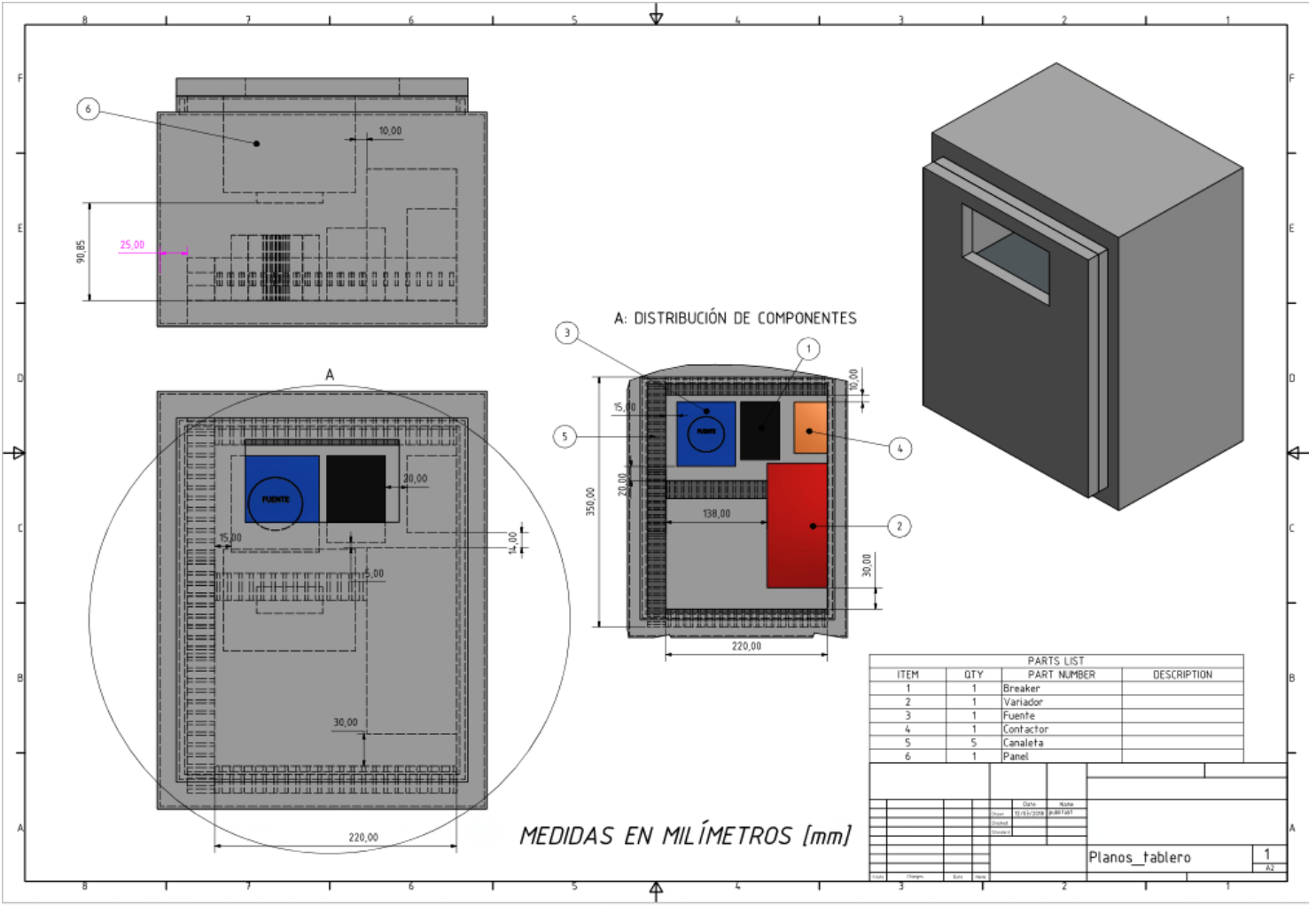


Figura 53. Deformación total: (a) Modo 1 axial eje X, (b) Modo 2: axial eje Z, (c) Modo 3: torsional en Y. (Fuente: Ansys)

De lo anterior se puede concluir que en caso de que la estructura entre en resonancia con estas frecuencias vibratorias las magnitudes de desplazamientos para el modo axial en X. Y y torsional son de 6,37 mm, 4,67 mm y 7,30 mm respectivamente. Por lo tanto, la estructura no presenta dificultades de índole estática ni vibratoria.

9.4 DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS SOBRE EL TABLERO ELÉCTRICO



Los elementos que se utilizaron para el sistema de control fueron:

- Tablero eléctrico de control
- Placa base para fijación de elementos
- Fuente de 24 V DC
- Contactor
- Breakers
- Cables de conexión
- Guías o rieles de posición
- Tornillos de lámina ¼ "
- Tags o etiquetas para nomenclatura de las conexiones
- PLC para programar las funciones de los ensayos de desgaste
- Canaletas



9.5 FICHA TÉCNICA DE LA CELDA DE CARGA

Todo tomado de ("FC23 Compression Load Cell," n.d.)

STANDARD RANGES

Range	lbf
0 to 0050	*
0 to 0100	*
0 to 0250	*
0 to 0500	*
0 to 1000	*
0 to 2000	*

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Supply Voltage: 5.0V, Ambient Temperature: 25°C (unless otherwise specified)

PARAMETERS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Span (Uncompensated)	95	100	105	mV	1
Span (Unamplified)	95	100	105	mV	1
Span (Amplified)	3.8	4.0	4.2	V	1
Zero Force Output (Uncompensated)	-50	0	50	mV	1
Zero Force Output (Unamplified)	-20	0	20	mV	1
Zero Force Output (Amplified)	0.3	0.5	0.7	V	1
Accuracy (non linearity, hysteresis, and repeatability)	-1		1	%Span	2
Input Resistance (Unamplified)		3		kΩ	
Input Resistance (Uncompensated)		2.2		kΩ	
Output Resistance (Unamplified & Uncompensated)		2.2		kΩ	
Temperature Error – Span (Amplified & Unamplified)	-2.5	±1	2.5	%Span	3
Temperature Error – Zero (Amplified & Unamplified)	-2.5	±1	2.5	%Span	3
Supply Voltage (Uncompensated)	2	3.3	6.7	V	1
Supply Voltage (Unamplified)	2	5	10	V	1
Supply Voltage (Amplified)	4.5	5	5.5	V	1
Response Time (10% to 90%)		1.0		ms	
Long Term Stability (1 year)		±1		%Span	
Maximum Overload			2.5X	Rated	
Compensated Temperature	0		50	°C	
Operating Temperature	-40		+85	°C	
Storage Temperature	-40		+85	°C	
Isolation Resistance (250Vdc)	50			MΩ	
Deflection at Rated Load			0.05	mm	
Humidity	0		90	%RH	
Weight		47.23		grams	

For custom configurations, consult factory.

Notes

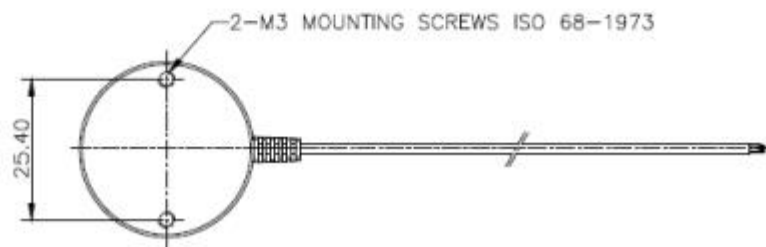
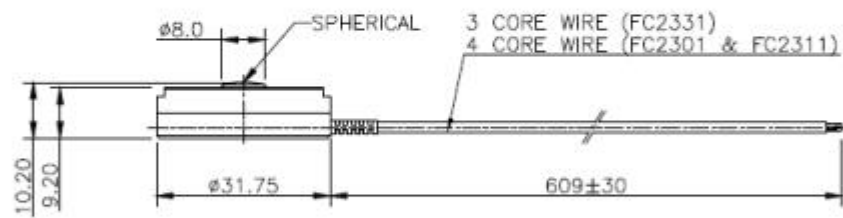
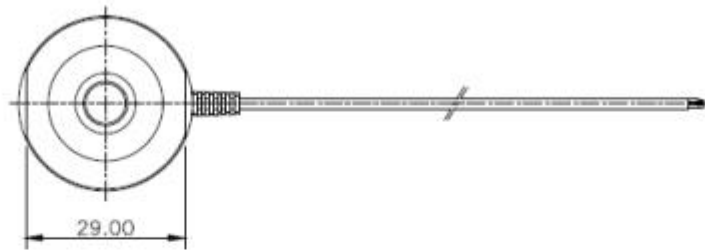
1. Ratiometric to supply.
2. Best fit straight line.
3. Maximum temperature error over compensated range with respect to 25°C.

CE Compliance

IEC61000-4-2: [4kV/ 4 kV (Air/Contact)]

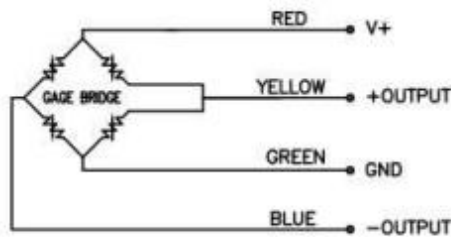
IEC61000-4-3: (3 V/m)

DIMENSIONS

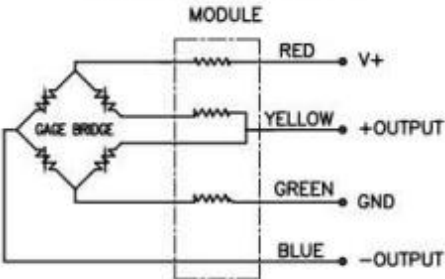


CONNECTIONS

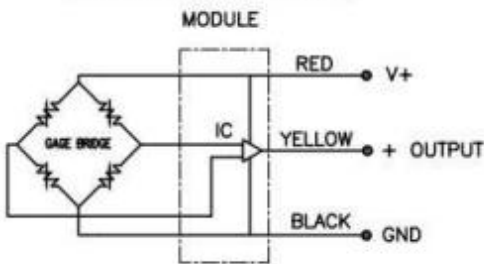
FC2301:
MILLIVOLT OUTPUT VERSION



FC2311:
MILLIVOLT OUTPUT VERSION

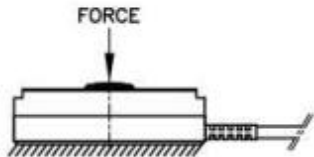


FC2331:
AMPLIFIED OUTPUT VERSION

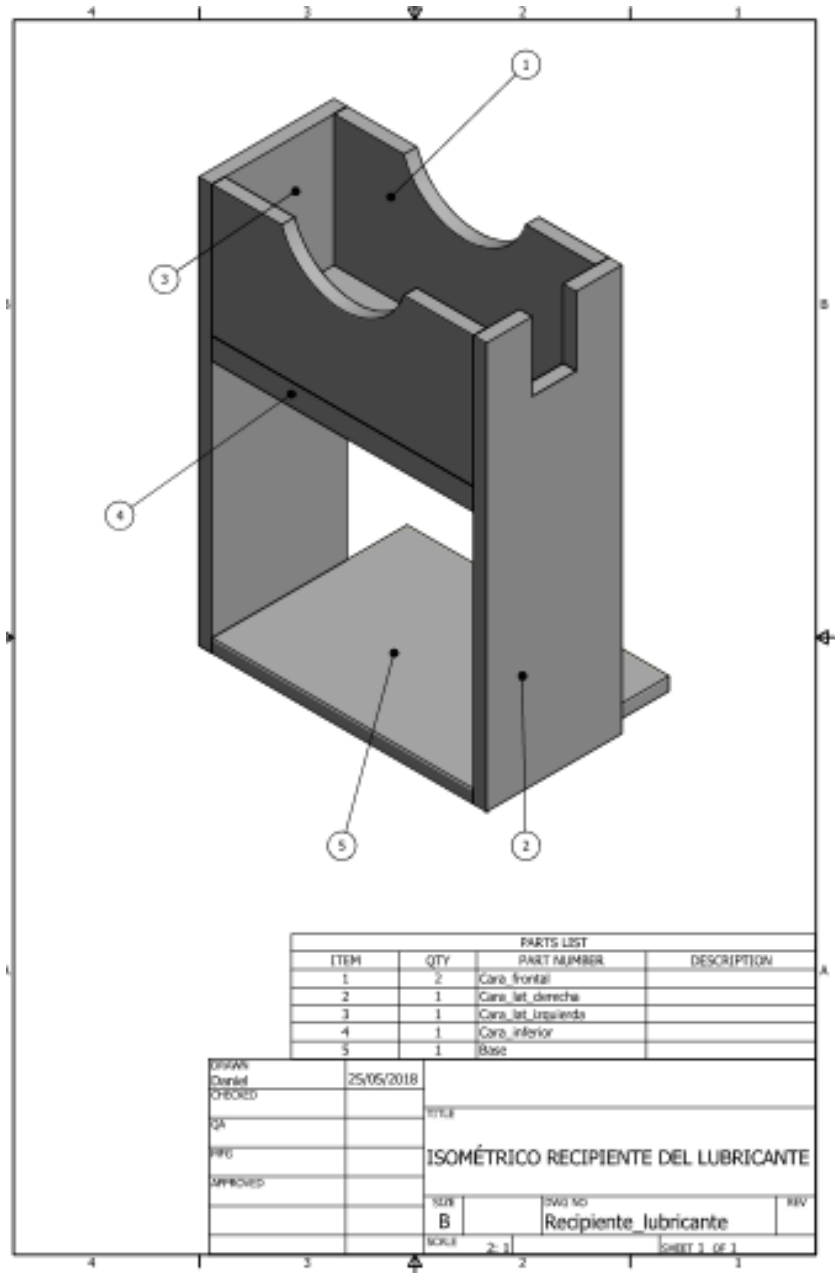


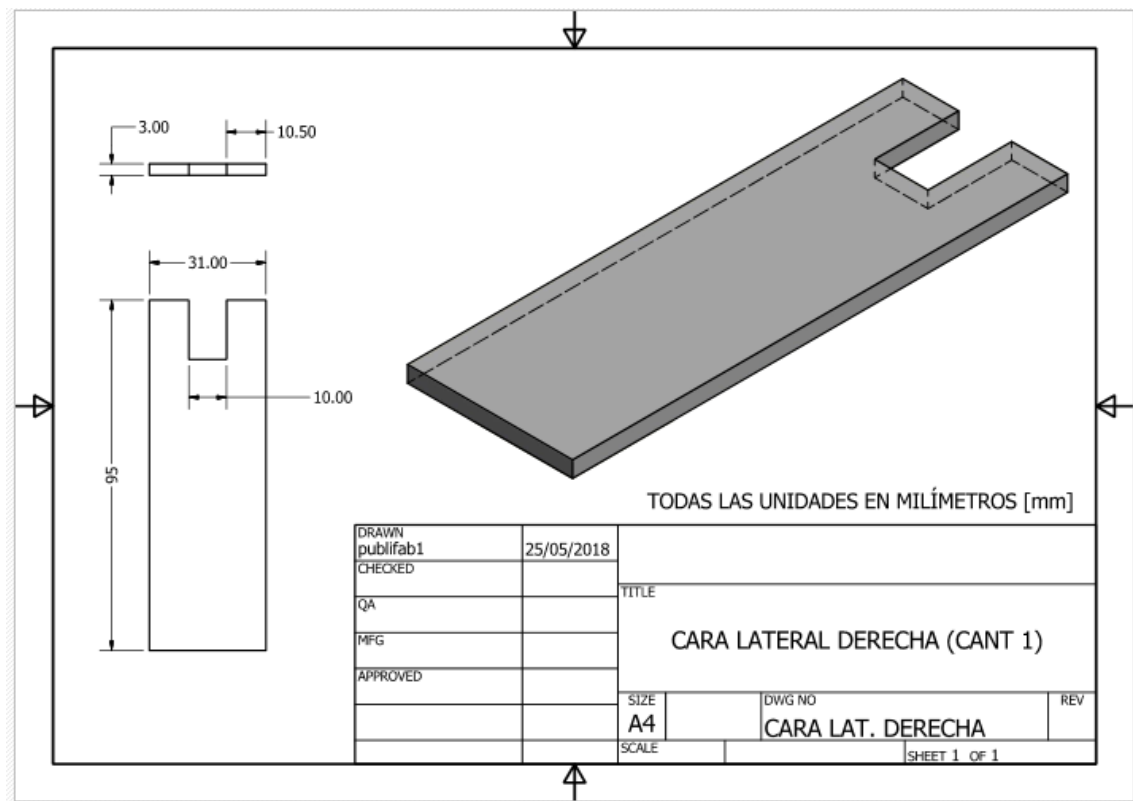
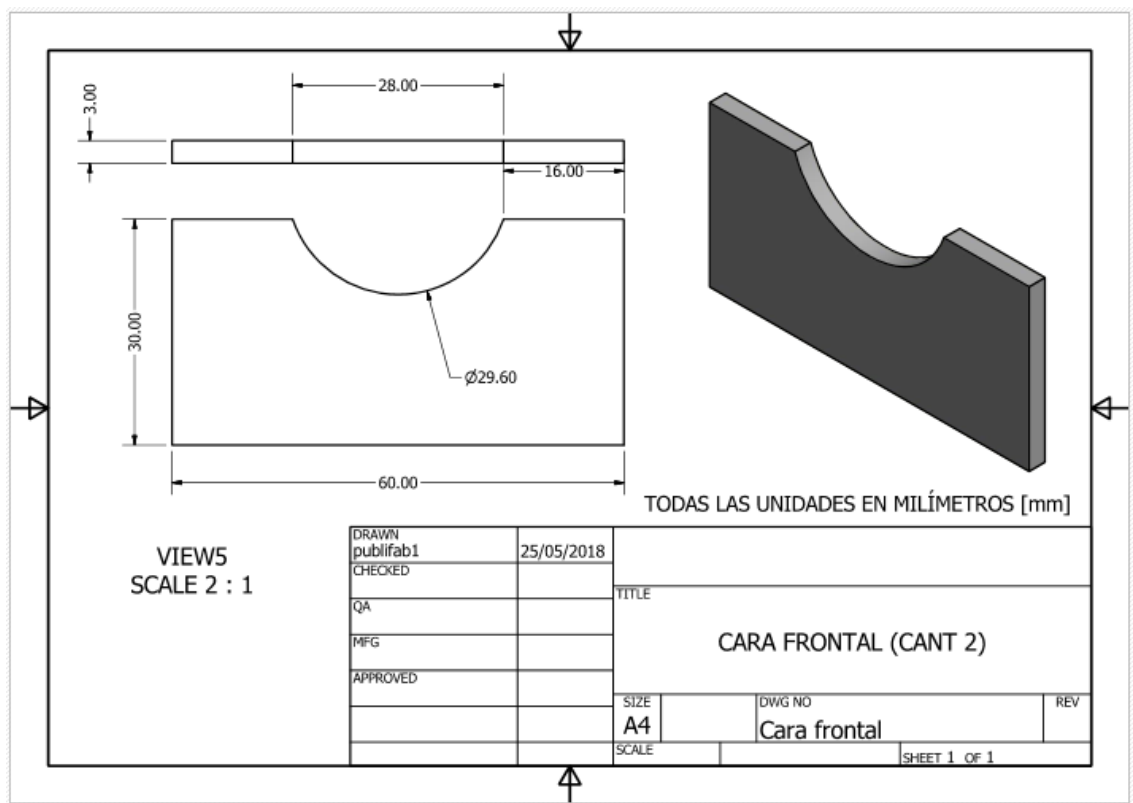
WIRE NOTE:

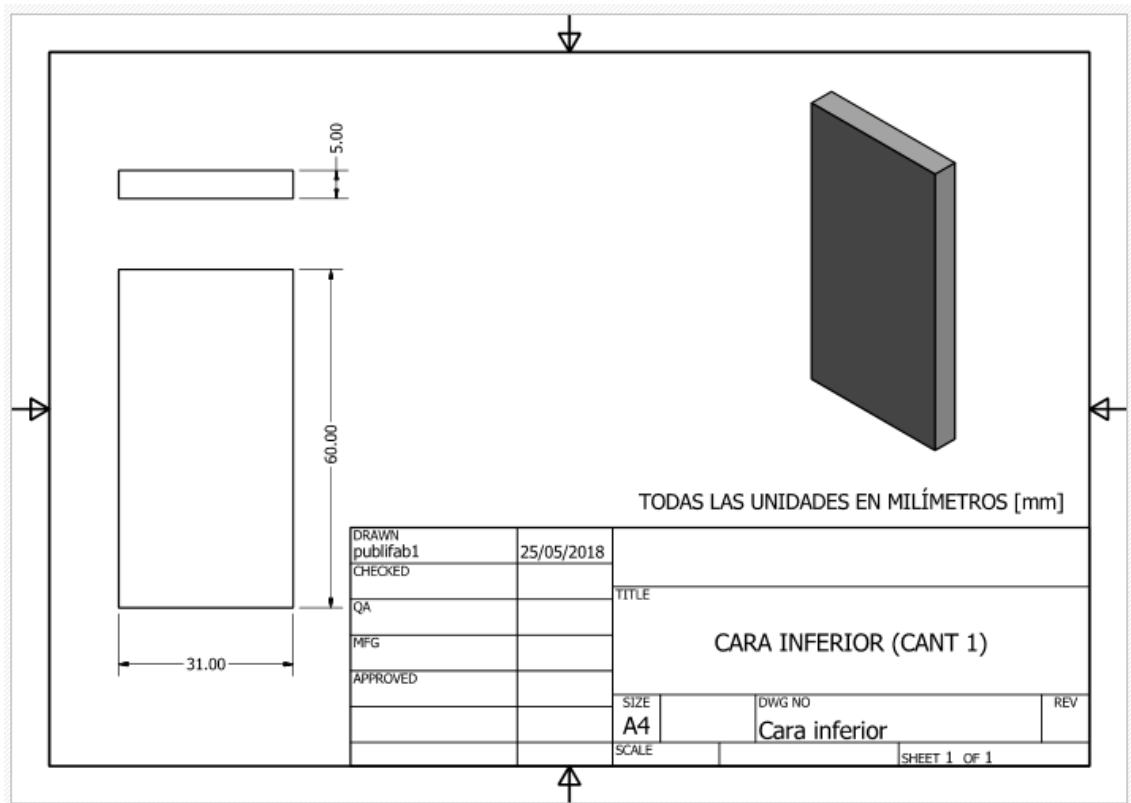
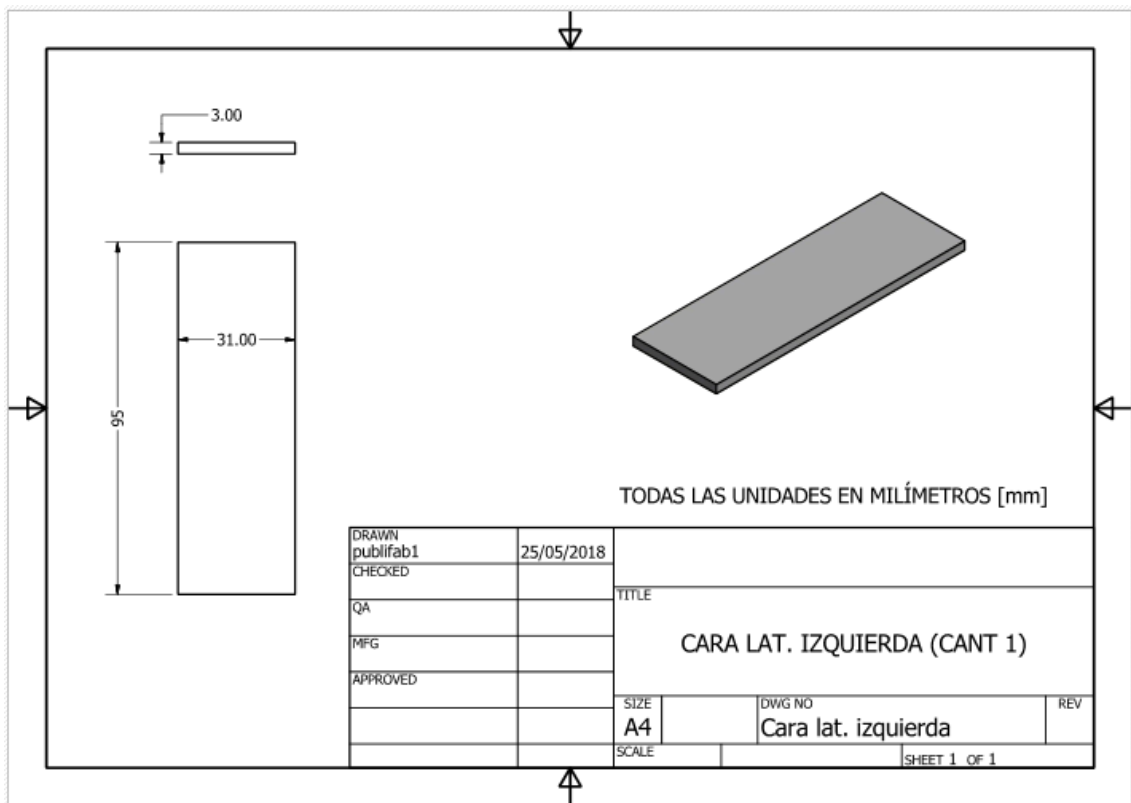
P/N	WIRE CONNECTIONS
FC2301	4 CORE WIRE (AWG32 OR AWG34, 125°C, 300V)
FC2311	YELLOW: +OUTPUT
FC2311	BLUE: -OUTPUT
FC2311	RED: V+
FC2311	GREEN: GND
FC2331	3 CORE WIRE (AWG32 OR AWG34, 125°C, 300V)
FC2331	RED: V+
FC2331	YELLOW: +OUTPUT
FC2331	BLACK: GND



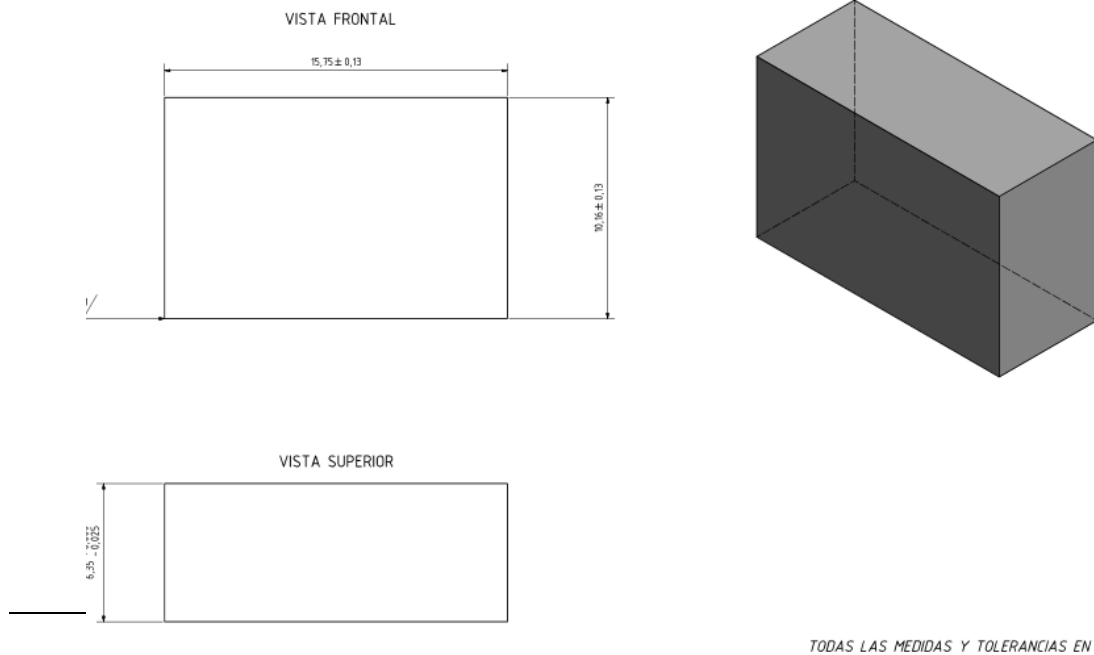
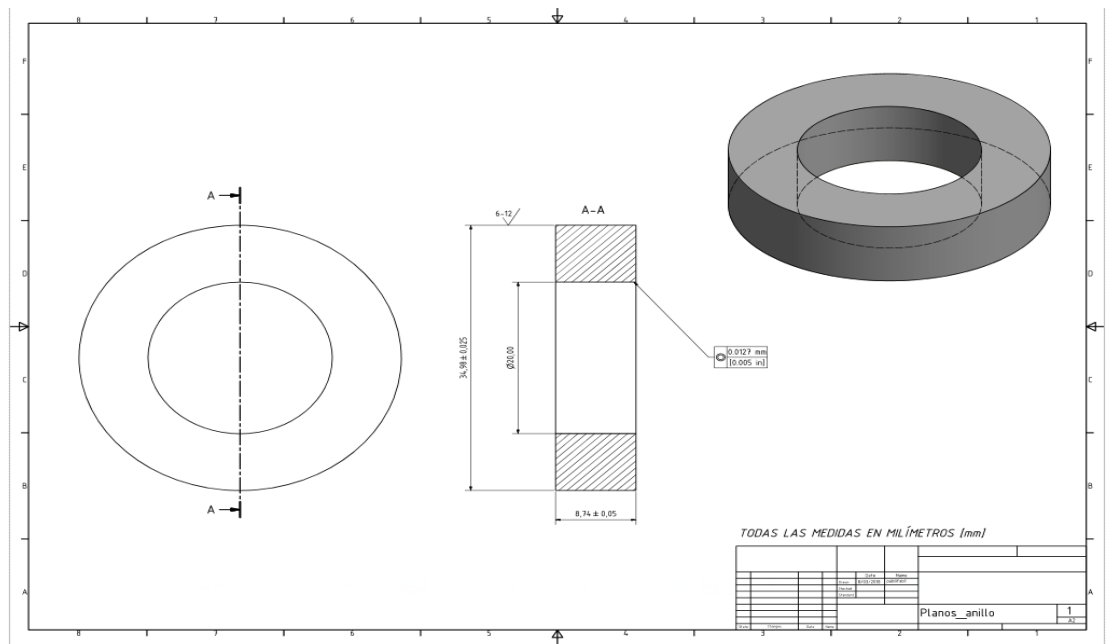
9.6 PLANOS PARA DEL RECIPIENTE DE LUBRICANTE







9.7 PLANOS DEL BLOQUE Y DEL ANILLO PARA ENSAYOS DE DESGASTE⁷



⁷ Por modificaciones realizadas al eje que aloja los anillos en el tribómetro, estos se maquinaron con conicidad de diámetro externo de 19.51mm e interno de 17.85 mm.

9.8 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO: PÉRDIDA DE MASA

Para poder observar con mayor detenimiento los resultados del a, el software proporciona particiones (*Slice*) del análisis inicial de los efectos de segundo orden, empleando comparaciones con los mínimos cuadrados (*LS-means*). Para el factor bronce-rpm se tiene:

Tabla 28. Slice bronce-velocidad de pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronce*rpm Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronce*rpm Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	velocidad	Estimate		Slice	velocidad	Estimate	
bronce C-93700	88	24,9167	A	bronce C-93800	88	38,7333	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			A
bronce C-93700	44	4,6327	A	bronce C-93800	44	22,8250	A

Se concluye que para ambos tipos de bronce el efecto de la velocidad no es significativo, pues no hay diferencias relevantes en el valor estimado de los mínimos cuadrados (en el software ambos bronce a diferentes velocidades tienen la misma letra “A”).

Para el factor bronce-carga se tiene:

Tabla 29. Slice bronce-carga pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronce*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronce*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	carga	Estimate		Slice	carga	Estimate	
bronce C-93700	813	24,5699	A	bronce C-93800	813	57,1833	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			
bronce C-93700	176	4,9795	A	bronce C-93800	176	4,3750	B

Se observa que el bronce C-93700 no se ve afectado en gran proporción si se opera a una u otra carga. Por otra parte, el bronce C-93800 es más susceptible a este cambio en la carga de operación, por lo que el programa denota una condición con “A” y otra con “B”, es decir, que existe una amplia diferencia entre los mínimos cuadrados de estas dos condiciones. Esto se pudo notar claramente en la sección 5.1 en donde los valores de pérdida de masa para el bronce al plomo se incrementaban en gran proporción comparado con el otro bronce.

Para el factor bronce-lubricación se tiene:

Tabla 30. Slice bronce-lubricación pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronce*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronce*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	lubricacion	Estimate		Slice	lubricacion	Estimate	
bronce C-93700	Lubricado	16,4860	A	bronce C-93800	Contaminado	55,6917	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			
bronce C-93700	Contaminado	13,0634	A	bronce C-93800	Lubricado	5,8667	B

Nuevamente se observa que la interacción de los factores se hace más relevante cuando se tiene el bronce C-93800 en lugar del 64. Adicionalmente se observa la gran diferencia entre mínimos cuadrados para el bronce al plomo, lo que sugiere que es muy susceptible a la contaminación del lubricante con el jugo, mientras que, el bronce al estaño no se ve perjudicado.

Para el factor rpm-carga se tiene:

Tabla 31. Slice velocidad-carga pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for rpm*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for rpm*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	velocidad	Estimate		Slice	velocidad	Estimate	
carga 176	88	7,4667	A	carga 813	88	56,1833	A
carga 176			A	carga 813			A
carga 176	44	1,8878	A	carga 813	44	25,5699	A

Se concluye que la interacción entre las velocidades y cargas no tienen un efecto relevante sobre las variables de respuesta, debido que no se presentan diferencias notables entre los mínimos cuadrados. Es decir, que se puede operar a diversas velocidades y cargas y sus posibles combinaciones y la pérdida de masa no se verá perjudicada.

Para el factor rpm- lubricación se tiene

Tabla 32. Slice velocidad-lubricación pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for rpm*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for rpm*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	velocidad	Estimate		Slice	velocidad	Estimate	
lubricacion Contaminado	88	45,6667	A	lubricacion Lubricado	88	17,9833	A
lubricacion Contaminado			A	lubricacion Lubricado			A
lubricacion Contaminado	44	23,0884	A	lubricacion Lubricado	44	4,3693	A

Se observa que la interacción entre estos dos factores no es significativa, es decir, que se puede presentar los diversos casos de velocidad y lubricación y la pérdida de masa no se afecta en mayor medida (diferencia poco relevante entre mínimos cuadrados).

Tabla 33. Slice carga-lubricación pérdida de masa. (Fuente: SAS)

T Grouping for carga*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0.05)				T Grouping for carga*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	carga	Estimate		Slice	carga	Estimate	
lubricacion Contaminado	813	65,2672	A	lubricacion Lubricado	813	16,4860	A
lubricacion Contaminado				lubricacion Lubricado			A
lubricacion Contaminado	176	3,4878	B	lubricacion Lubricado	176	5,8667	A

Por último, observa que a condiciones normales de lubricación la carga no tiene un efecto significativo, mientras que, para el caso en que se contamina el lubricante sí. Lo anterior sugiere que se debe evitar que se filtre jugo en las chumaceras de los molinos, para que así se pueda variar la carga de operación sin correr riesgo de que estas sufran gran pérdida de masa.

9.9 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO: COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Al analizar el *slice* de cada uno de los factores de diseño se conoce con exactitud en cuales casos los efectos actúan en mayor medida. Para el factor bronce-rpm se tiene:

Tabla 34. Slice bronce-rpm coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronce*rpm Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronce*rpm Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	velocidad	Estimate		Slice	velocidad	Estimate	
bronce C-93700	44	0,1392	A	bronce C-93800	88	0,08775	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			A
bronce C-93700	88	0,1255	A	bronce C-93800	44	0,08086	A

El coeficiente de fricción no se ve grandemente afectado cuando se emplea un tipo de bronce a cualquier velocidad de giro, ya que no existen diferencias significativas en los mínimos cuadrados. Lo anterior se confirma observando que para cada caso están denotados con la misma letra “A”

Para el factor bronce-carga se tiene:

Tabla 35. Slice bronce-carga coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronce*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronce*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	carga	Estimate		Slice	carga	Estimate	
bronce C-93700	813	0,1417	A	bronce C-93800	813	0,09328	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			A
bronce C-93700	176	0,1230	A	bronce C-93800	176	0,07533	A

Este caso es igual que el anterior, no importa el tipo de bronce que se utilice y a qué carga se opera, el efecto sobre el coeficiente de fricción no es significativo. No se observan diferencias notables en los mínimos cuadrados.

Para el factor bronce-lubricación se tiene:

Tabla 36. Slice bronce-lubricación coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for bronze*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for bronze*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	lubricacion	Estimate		Slice	lubricacion	Estimate	
bronce C-93700	Lubricado	0,1403	A	bronce C-93800	Contaminado	0,1012	A
bronce C-93700			A	bronce C-93800			
bronce C-93700	Contaminado	0,1244	A	bronce C-93800	Lubricado	0,06744	B

Al igual que como ocurre con la pérdida de masa, el coeficiente de fricción no se afecta cuando se usa el bronce C-93700 a diferente lubricación. Por el contrario, cuando se emplea el bronce al plomo C-93800 la diferencia de mínimos cuadrados es amplia, por ende, el coeficiente de fricción si se ve afectado significativamente.

Para el factor rpm-carga se tiene:

Tabla 37. Slice rpm-carga coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for rpm*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for rpm*carga Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	rpm	Estimate		Slice	rpm	Estimate	
carga 176	88	0,1076	A	carga 813	44	0,1293	A
carga 176			A	carga 813			A
carga 176	44	0,09074	A	carga 813	88	0,1057	A

La interacción entre la velocidad de giro y la carga de operación no incide en mayor medida sobre el coeficiente de fricción, ya que no hay diferencias significativas entre los mínimos cuadrados para cada caso.

Para el factor rpm-lubricación se tiene:

Tabla 38. Slice rpm-lubricación coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for rpm*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for rpm*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	rpm	Estimate		Slice	rpm	Estimate	
lubricacion Contaminado	88	0,1142	A	lubricacion Lubricado	44	0,1087	A
lubricacion Contaminado			A	lubricacion Lubricado			A
lubricacion Contaminado	44	0,1114	A	lubricacion Lubricado	88	0,09909	A

Se observa que cuando hay buena lubricación el efecto de la velocidad sobre el coeficiente de fricción no es relevante. De igual manera en el caso de que se presentara contaminación del lubricante, porque no se observan diferencias amplias en los mínimos cuadrados.

Para el factor carga-lubricación se tiene:

Tabla 39. Slice carga-lubricación coeficiente de fricción. (Fuente: SAS)

T Grouping for carga*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)				T Grouping for carga*lubricacion Least Squares Means Slice (Alpha=0,05)			
LS-means with the same letter are not significantly different.				LS-means with the same letter are not significantly different.			
Slice	carga	Estimate		Slice	carga	Estimate	
lubricacion Contaminado	813	0,1167	A	lubricacion Lubricado	813	0,1183	A
lubricacion Contaminado			A	lubricacion Lubricado			
lubricacion Contaminado	176	0,1089	A	lubricacion Lubricado	176	0,08943	B

En el escenario de lubricación contaminada el coeficiente de fricción no se afecta cuando se varía la carga, en cambio, cuando la lubricación es normal no es recomendable variar los niveles de carga ya que el coeficiente si se ve afectado de manera determinante. Por lo tanto, si hay diferencias entre los mínimos cuadrados

9.10 TABLA DE VOLUMEN PERDIDO DE ACUERDO CON UN ANCHO DE HUELLA DETERMINADO.

Tabla tomada de ASTM G-77

TABLE 1 Block Scar Widths and Volumes for Blocks 6.35-mm Wide Mated Against Rings 34.99 mm in Diameter

Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)
0.30	0.0008	1.01	0.0312	1.72	0.1541	2.42	0.4295	3.12	0.9212	3.83	1.7062
0.31	0.0009	1.02	0.0321	1.73	0.1568	2.43	0.4348	3.13	0.9301	3.84	1.7196
0.32	0.0010	1.03	0.0331	1.74	0.1595	2.44	0.4402	3.14	0.9391	3.85	1.7331
0.33	0.0011	1.04	0.0340	1.75	0.1623	2.45	0.4456	3.15	0.9481	3.86	1.7467



TABLE 1 *Continued*

Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)
0.34	0.0012	1.05	0.0350	1.76	0.1651	2.46	0.4511	3.16	0.9572	3.87	1.7603
0.35	0.0013	1.06	0.0360	1.77	0.1679	2.47	0.4567	3.17	0.9663	3.88	1.7740
0.36	0.0014	1.07	0.0371	1.78	0.1708	2.48	0.4622	3.18	0.9755	3.89	1.7878
0.37	0.0015	1.08	0.0381	1.79	0.1737	2.49	0.4679	3.19	0.9847	3.90	1.8017
0.38	0.0017	1.09	0.0392	1.80	0.1766	2.50	0.4735	3.20	0.9940	3.91	1.8156
0.39	0.0018	1.10	0.0403	1.81	0.1796	2.51	0.4792	3.21	1.0034	3.92	1.8296
0.40	0.0019	1.11	0.0414	1.82	0.1826	2.52	0.4850	3.22	1.0128	3.93	1.8437
0.41	0.0021	1.12	0.0425	1.83	0.1856	2.53	0.4908	3.23	1.0223	3.94	1.8578
0.42	0.0022	1.13	0.0437	1.84	0.1887	2.54	0.4966	3.24	1.0318	3.95	1.8720
0.43	0.0024	1.13	0.0448	1.85	0.1917	2.55	0.5025	3.25	1.0414	3.96	1.8863
0.44	0.0026	1.15	0.0460	1.86	0.1949	2.56	0.5085	3.26	1.0511	3.97	1.9007
0.45	0.0028	1.16	0.0472	1.87	0.1980	2.57	0.5145	3.27	1.0608	3.98	1.9151
0.46	0.0029	1.17	0.0485	1.88	0.2012	2.58	0.5205	3.28	1.0706	3.99	1.9296
0.47	0.0031	1.18	0.0497	1.89	0.2045	2.59	0.5266	3.29	1.0804		
0.48	0.0033	1.19	0.0510	1.90	0.2077	2.60	0.5327	3.30	1.0903	4.00	1.9442
0.49	0.0036	1.20	0.0523	1.91	0.2110	2.61	0.5389	3.31	1.1003	4.01	1.9589
0.50	0.0038	1.21	0.0536	1.92	0.2144	2.62	0.5451	3.32	1.1103	4.02	1.9736
0.51	0.0040	1.22	0.0550	1.93	0.2177	2.63	0.5514	3.33	1.1204	4.03	1.9884
0.52	0.0043	1.23	0.0563	1.94	0.2211	2.64	0.5577	3.34	1.1305	4.04	2.0033
0.53	0.0045	1.24	0.0577	1.95	0.2246	2.65	0.5641	3.35	1.1407	4.05	2.0183
0.54	0.0048	1.25	0.0591	1.96	0.2281	2.66	0.5705	3.36	1.1510	4.06	2.0333
0.55	0.0050	1.26	0.0606	1.97	0.2316	2.67	0.5770	3.37	1.1613	4.07	2.0484
0.56	0.0053	1.27	0.0620	1.98	0.235	2.68	0.5835	3.38	1.1717	4.08	2.0636
0.57	0.0056	1.28	0.0635	1.99	0.2387	2.69	0.5900	3.39	1.1822	4.09	2.0788
0.58	0.0059	1.29	0.0650			2.70	0.5967	3.40	1.1927	4.10	2.0941
0.59	0.0062	1.30	0.0665	2.00	0.2423	2.71	0.6033	3.41	1.2033	4.11	2.1095
0.60	0.0065	1.31	0.0681	2.01	0.2460	2.72	0.6100	3.42	1.2139	4.12	2.1250
0.61	0.0069	1.32	0.0696	2.02	0.2497	2.73	0.6168	3.43	1.2246	4.13	2.1406
0.62	0.0072	1.33	0.0712	2.03	0.2534	2.74	0.6236	3.44	1.2353	4.14	2.1562
0.63	0.0076	1.34	0.0728	2.04	0.2572	2.75	0.6305	3.45	1.2462	4.15	2.1719
0.64	0.0079	1.35	0.0745	2.05	0.2610	2.76	0.6374	3.46	1.2571	4.16	2.1877
0.65	0.0083	1.36	0.0761	2.06	0.2648	2.77	0.6443	3.47	1.2680	4.17	2.2036
0.66	0.0087	1.37	0.0778	2.07	0.2687	2.78	0.6513	3.48	1.2790	4.18	2.2195
0.67	0.0091	1.38	0.0796	2.08	0.2726	2.79	0.6584	3.49	1.2901	4.19	2.2355
0.68	0.0095	1.39	0.0813	2.09	0.2765	2.80	0.6655	3.50	1.3013	4.20	2.2516
0.69	0.0099	1.40	0.0831	2.10	0.2805	2.81	0.6727	3.51	1.3125	4.21	2.2678
0.70	0.0104	1.41	0.0849	2.11	0.2846	2.82	0.6799	3.52	1.3238	4.22	2.2840
0.71	0.0108	1.42	0.0867	2.12	0.2886	2.83	0.6872	3.53	1.3351	4.23	2.3003
0.72	0.0113	1.43	0.0885	2.13	0.2927	2.84	0.6945	3.54	1.3465	4.24	2.3167

0.73	0.0118	1.44	0.0904	2.14	0.2969	2.85	0.7019	3.55	1.3580	4.25	2.3332
0.74	0.0123	1.45	0.0923	2.15	0.3011	2.86	0.7093	3.56	1.3695	4.26	2.3498
0.75	0.0128	1.46	0.0942	2.16	0.3053	2.87	0.7168	3.57	1.3811	4.27	2.3664
0.76	0.0133	1.47	0.0962	2.17	0.3096	2.88	0.7243	3.58	1.3928	4.28	2.3831
0.77	0.0138	1.48	0.0981	2.18	0.3139	2.89	0.7319	3.59	1.4045	4.29	2.3999
0.78	0.0144	1.49	0.1001	2.19	0.3182	2.90	0.7395	3.60	1.4163	4.30	2.4168
0.79	0.0149	1.50	0.1022	2.20	0.3226	2.91	0.7472	3.61	1.4281	4.31	2.4338
0.80	0.0155	1.51	0.1042	2.21	0.3270	2.92	0.7549	3.62	1.4401	4.32	2.4508
0.81	0.0161	1.52	0.1063	2.22	0.3315	2.93	0.7627	3.63	1.4521	4.33	2.4679
0.82	0.0167	1.53	0.1084	2.23	0.3360	2.94	0.7706	3.64	1.4641	4.34	2.4851
0.83	0.0173	1.54	0.1106	2.24	0.3405	2.95	0.7785	3.65	1.4762	4.35	2.5024
0.84	0.0179	1.55	0.1127	2.25	0.3451	2.96	0.7864	3.66	1.4884	4.36	2.4197
0.85	0.0186	1.56	0.1149	2.26	0.3497	2.97	0.7944	3.67	1.5007	4.37	2.5371
0.86	0.0192	1.57	0.1172	2.27	0.3544	2.98	0.8025	3.68	1.5130	4.38	2.5547
0.87	0.0199	1.58	0.1194	2.28	0.3691	2.99	0.8106	3.69	1.5254	4.39	2.5723
0.88	0.0206	1.59	0.1217	2.29	0.3638			3.70	1.5379	4.40	2.5899
0.89	0.0213	1.60	0.1240	2.30	0.3686	3.00	0.8188	3.71	1.5504	4.41	2.6077
0.90	0.0221	1.61	0.1264	2.31	0.3735	3.01	0.8270	3.72	1.5630	4.42	2.6255
0.91	0.0228	1.62	0.1287	2.32	0.3783	3.02	0.8353	3.73	1.5757	4.43	2.6434
0.92	0.0236	1.63	0.1311	2.33	0.3833	3.03	0.8437	3.74	1.5884	4.44	2.6614
0.93	0.0243	1.64	0.1336	2.34	0.3882	3.04	0.8520	3.75	1.6012	4.45	2.6795
0.94	0.0251	1.65	0.1360	2.35	0.3932	3.05	0.8605	3.76	1.6141	4.46	2.6977
0.95	0.0259	1.66	0.1385	2.36	0.3983	3.06	0.8690	3.77	1.6270	4.47	2.7159
0.96	0.0268	1.67	0.1410	2.37	0.4034	3.07	0.8776	3.78	1.6401	4.48	2.7343
0.97	0.0276	1.68	0.1436	2.38	0.4085	3.08	0.8862	3.79	1.6531	4.49	2.7527
0.98	0.0285	1.69	0.1462	2.39	0.4137	3.09	0.8948	3.80	1.6663	4.50	2.7712
0.99	0.0294	1.70	0.1488	2.40	0.4189	3.10	0.9036	3.81	1.6795	4.51	2.7897
1.00	0.0303	1.71	0.1514	2.41	0.4242	3.11	0.9124	3.82	1.6928	4.52	2.8084
4.53	2.8272	4.91	3.6032	5.28	4.4849	5.66	5.5303	6.03	6.6946	6.41	8.0512
4.54	2.8460	4.92	3.6253	5.29	4.5105	5.67	5.5599	6.04	6.7282	6.42	8.0892
4.55	2.8649	4.93	3.6476	5.30	4.5363	5.68	5.5895	6.05	6.7618	6.43	8.1274
4.56	2.8839	4.94	3.6699	5.31	4.5621	5.69	5.6192	6.06	6.7956	6.44	8.1656
4.57	2.9030	4.95	3.6923	5.32	4.5881	5.70	5.6491	6.07	6.8295	6.45	8.2040
4.58	2.9221	4.96	3.7148	5.33	4.6141	5.71	5.6790	6.08	6.8636	6.46	8.2425
4.59	2.9414	4.97	3.7375	5.34	4.6403	5.72	5.7091	6.09	6.8977	6.47	8.2811



TABLE 1 Continued

Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Block Scar Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)	Width (mm)	Volume (mm ³)
4.60	2.9607	4.98	3.7601	5.35	4.6665	5.73	5.7392	6.10	6.9319	6.48	8.3198
4.61	2.9801	4.99	3.7829	5.36	4.6929	5.74	5.7695	6.11	6.9663	6.49	8.3586
4.62	2.9996			5.37	4.7193	5.75	5.7999	6.12	7.0008	6.50	8.3976
4.63	3.0192	5.00	3.8058	5.38	4.7458	5.76	5.8303	6.13	7.0354	6.51	8.4367
4.64	3.0389	5.01	3.8288	5.39	4.7725	5.77	5.8609	6.14	7.0701	6.52	8.4759
4.65	3.0587	5.02	3.8519	5.40	4.7992	5.78	5.8916	6.15	7.1049	6.53	8.5153
4.66	3.0785	5.03	3.8750	5.41	4.8261	5.79	5.9224	6.16	7.1398	6.54	8.5547
4.67	3.0984	5.04	3.8983	5.42	4.8530	5.80	5.9533	6.17	7.1749	6.55	8.5943
4.68	3.1185	5.05	3.9216	5.43	4.8800	5.81	5.9844	6.18	7.2100	6.56	8.6340
4.69	3.1386	5.06	3.9451	5.44	4.9072	5.82	6.0155	6.19	7.2453	6.57	8.6739
4.70	3.1588	5.07	3.9686	5.45	4.9344	5.83	6.0467	6.20	7.2807	6.58	8.7138
4.71	3.1790	5.08	3.9922	5.46	4.9618	5.84	6.0781	6.21	7.3162	6.59	8.7539
4.72	3.1994	5.09	4.0160	5.47	4.9892	5.85	6.1095	6.22	7.3519	6.60	8.7941
4.73	3.2199	5.10	4.0398	5.48	5.0168	5.86	6.1411	6.23	7.3876	6.61	8.8344
4.74	3.2404	5.11	4.0637	5.49	5.0444	5.87	6.1728	6.24	7.4235	6.62	8.8749
4.75	3.2610	5.12	4.0877	5.50	5.0722	5.88	6.2045	6.25	7.4595	6.63	8.9154
4.76	3.2818	5.13	4.1118	5.51	5.1001	5.89	6.2364	6.26	7.4956	6.64	8.9562
4.77	3.3026	5.14	4.1360	5.52	5.1280	5.90	6.2684	6.27	7.5318	6.65	8.9970
4.78	3.3235	5.15	4.1603	5.53	5.1561	5.91	6.3006	6.28	7.5681	6.66	9.0379
4.79	3.3444	5.16	4.1847	5.54	5.1842	5.92	6.3328	6.29	7.6046	6.67	9.0790
4.80	3.3655	5.17	4.2092	5.55	5.2125	5.93	6.3651	6.30	7.6411	6.68	9.1202
4.81	3.3867	5.18	4.2338	5.56	5.2409	5.94	6.3976	6.31	7.6778	6.69	9.1615
4.82	3.4079	5.19	4.2584	5.57	5.2694	5.95	6.4301	6.32	7.7146	6.70	9.2030
4.83	3.4293	5.20	4.2832	5.58	5.2979	5.96	6.4628	6.33	7.7515	6.71	9.2446
4.84	3.4507	5.21	4.3081	5.59	5.3266	5.97	6.4956	6.34	7.7886	6.72	9.2863
4.85	3.4722	5.22	4.3330	5.60	5.3554	5.98	6.5285	6.35	7.8258	6.73	9.3281
4.86	3.4938	5.23	4.3581	5.61	5.3843	5.99	6.5615	6.36	7.8630	6.74	9.3701
4.87	3.5155	5.24	4.3833	5.62	5.4133			6.37	7.9004	6.75	9.4122
4.88	3.5373	5.25	4.4085	5.63	5.4424	6.00	6.5946	6.38	7.9380	6.76	9.4544
4.89	3.5592	5.26	4.4339	5.64	5.4716	6.01	6.6278	6.39	7.9756		
4.90	3.5811	5.27	4.4593	5.65	5.5009	6.02	6.6611	6.40	8.0134		