



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

EVALUACIÓN DE LA RATA DE DESGASTE EN EL MATERIAL DE PALETAS DE UNA BOMBA HIDRÁULICA MEDIANTE NORMA ASTM G 77

Nairo Julián Rodríguez Ballesteros

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento Ingeniería Mecánica
Bogotá, Colombia
2015

EVALUATION OF WEAR RATE ON MATERIAL VANE OF HYDRAULIC PUMP BY STANDARD ASTM G 77

Nairo Julián Rodríguez Ballesteros

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Director:

M. Ing. EDGAR ESPEJO MORA

Línea de Investigación:

Mecanismos de falla de elementos de máquinas

Grupo de Investigación:

AFIS (Análisis de Falla, Integridad y Superficies)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Bogotá, Colombia

2015

“Por muy grande que haya sido el esfuerzo, la satisfacción siempre es mayor”

Chinogizbo

A mis padres por su apoyo incondicional, a mis hermanos por sus palabras de aliento, a mis amigos y compañeros que me acompañaron en el logro de esta meta, a Tatiana por su amor y por ser un soporte en el desarrollo de este proyecto y en especial a Dios por darme la satisfacción de ver el resultado de tanto esfuerzo.

Agradecimientos

Edgar Espejo Mora, Ingeniero Mecánico, M. Ing., Director de la tesis, quien con sus valiosos aportes, dedicada colaboración e interés en adquirir y transmitir su conocimiento, hizo posible el desarrollo y culminación de éste proyecto.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, por brindarme el espacio y los medios necesarios para contribuir en mi formación profesional y personal.

Resumen

En el desarrollo de la investigación se evaluó la tasa de desgaste en los materiales (bronce C93700 y resina fenólica reforzada con fibras de Aramida) de las paletas de una bomba hidráulica de referencia BLACKMER ML, bajo el método estándar ASTM G77-2010, "Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test". A partir de un análisis experimental del contacto par tribológico probetas "block on ring" bajo cinco niveles de carga (5, 10, 15, 20 y 25 N), se obtuvo datos de entrada esenciales para el cálculo del comportamiento y coeficiente de desgaste, el método de cálculo se adaptó a la geometría de las paletas, a las condiciones dinámicas, a las condiciones de carga y ampliado por la inclusión de la lubricación parcial en el desarrollo experimental, en general en los dos materiales después de ensayados predominó el desgaste adhesivo.

Para analizar el comportamiento del desgaste calculado con los resultados experimentales, se simuló por elementos finitos en "solidWorks" las condiciones de carga estática sobre la paleta, se analizó el comportamiento de los esfuerzos y se relacionó con la tasa de desgaste para predecir la vida útil; se tomaron los registros históricos de falla MTBF "mean time between failure" (tiempo medio entre fallas) por modo de falla de desgaste, se realizó un análisis estadístico de estos datos, lo que permitió generar una curva de supervivencia la cual sirvió para evaluar el resultado de los ensayos y cálculos de la vida útil de las paletas. En el caso particular del bronce la vida útil calculada para las paletas se ajustó a la curva de supervivencia generada por los históricos de falla, el criterio de vida de las paletas de bronce se puede aplicar como herramienta en la gestión de mantenimiento de las bombas hidráulicas BLACKMER ML, pudiendo programar con antelación la intervención de cambio de paletas.

Palabras clave: (Coeficiente de desgaste, ensayo de desgaste, standard ASTM G77, desgaste adhesivo, bronce C93700, resina fenólica reforzada con fibras de Aramida, fundición nodular)

Abstract

In developing research rate wear on the material (bronze C93700 and phenolic resin reinforced with aramid fibers) of the blades of a hydraulic pump, reference BLACKMER ML, under the standard method ASTM G77-2010, "Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test", was evaluated. From an experimental analysis of specimens contact tribological pair "block on ring" load under five levels (5, 10, 15, 20 and 25 N), input key data for calculating the coefficient and wear behavior was obtained the calculation method was adapted to the geometry of the blades, to dynamic conditions, load conditions and expanded by the inclusion of partial lubrication experimental development in general in the two materials tested after predominance adhesive wear.

To analyze the behavior of wear calculated with the experimental results were simulated by finite elements "SolidWorks" the conditions of static load on the vane, the behavior of efforts was analyzed and related to the wear rate to predict the lifetime ; historical records of MTBF fault it took for failure mode of wear, a statistical analysis of these data was performed, allowing generate a survival curve which was used to evaluate the results of tests and calculations of the lifetime of the vanes. In the particular case Bronze lifetime calculated for the paddles was adjusted to the survival curve generated by historical fault, the criterion of life bronze blades can be applied as a tool in managing maintenance of hydraulic pumps BLACKMER ML and can be programmed in advance intervention shift paddles

Keywords: (Wear Coefficient, wear test, ASTM G77, adhesive wear, bronze C93700, phenolic resin reinforced with aramid fibers, ductile iron)

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	V
Abstract.....	VI
Lista de figuras.....	X
Lista de Fotos	XII
Lista de tablas	XII
Introducción.....	1
1. Marco teórico.....	3
1.1 Desgaste por deslizamiento.....	3
1.1.1 Desgaste adhesivo.....	4
1.1.1.1 Desgaste adhesivo leve	5
1.1.1.2 Desgaste adhesivo severo	6
1.1.2 Desgaste abrasivo	6
1.1.3 Variables que Influencian el Desgaste	7
1.1.3.1 Carga normal	7
1.1.3.2 Esfuerzos de contacto.....	8
1.1.3.3 Rugosidad.....	9
1.1.4 Velocidad de desgaste	10
1.2 Ensayo bajo standard ASTM G77.....	11
1.2.1 Ensayo “Block on Ring”	12
1.3 Bombas hidráulicas	13
1.3.1 Bombas de paletas	14
2. Desarrollo experimental.....	16
2.1 Cálculo de las fuerzas normales sobre las paletas	18
2.1.1 Fuerzas para la paleta de bronce	19
2.1.1.1 Presión de contacto entre la paleta de bronce y el anillo.....	20
2.1.2 Cálculo de las fuerzas normales en las probetas	21
2.1.2.1 Huella de contacto bloque de bronce y anillo	21

2.1.3	Fuerza sobre las paletas.....	22
2.2	Diseño experimental.....	23
2.2.1	Condiciones y resultados de la prueba piloto.....	24
2.2.2	Experimento unifactorial para el bronce.....	24
2.2.3	Experimento unifactorial para el material compuesto.....	26
2.2.4	Aleatorización.....	27
2.3	Obtención de probetas.....	28
2.4	Caracterización de las probetas ensayadas y del material.....	29
2.4.1	Rugosidad inicial de las probetas.....	29
2.4.1.1	Rugosidad en el Bronce.....	30
2.4.1.2	Rugosidad en el material compuesto.....	30
2.4.1.3	Rugosidad del hierro fundido (Anillo).....	31
2.4.2	Dureza.....	32
2.4.2.1	Dureza en el Bronce.....	32
2.4.2.2	Dureza en el Material Compuesto.....	32
2.4.2.3	Dureza en el anillo.....	33
2.4.3	Metalografía y Microfotografía.....	33
2.4.3.1	Metalografía al Bronce.....	34
2.4.3.2	Metalografía al material compuesto.....	35
2.4.3.3	Metalografía al material del anillo.....	35
2.4.4	Caracterización química.....	36
2.4.4.1	Composición química del bronce.....	36
2.4.4.2	Espectroscopia infrarroja del material compuesto.....	37
2.4.4.3	Composición química del material del anillo de la bomba.....	37
2.5	Modelo matemático ajustado al desgaste.....	38
2.6	Resumen de los parámetros de los materiales.....	39
3.	Resultados de las pruebas.....	40
3.1	Desgaste en el tribómetro “block on ring”.....	40
3.1.1	Desgaste en el bronce.....	40
3.1.1.1	Selección de probetas para caracterización de resultados.....	41
3.1.1.2	Comportamiento del desgaste en el bronce.....	42
3.1.1.3	Análisis ANOVA de los datos de desgaste en el bronce.....	43
3.1.1.4	Coefficiente de desgaste del bronce.....	44
3.1.1.5	Caracterización de la huella de desgaste del bronce.....	47
3.1.1.6	Rugosidad en la huella de desgaste del bronce.....	48
3.1.2	Desgaste en el material de compuesto.....	49
3.1.2.1	Selección de probetas para caracterización de resultados.....	50
3.1.2.2	Comportamiento del desgaste en el compuesto.....	52
3.1.2.3	Análisis ANOVA de los datos de desgaste en el compuesto.....	53
3.1.2.4	Coefficiente de desgaste del compuesto.....	54
3.1.2.5	Caracterización de la huella de contacto del compuesto.....	56
3.1.2.6	Rugosidad en la huella de desgaste en el compuesto.....	58
3.2	Resumen de resultados por tratamiento.....	58
4.	Modelado por elementos finitos.....	60
4.1	Análisis estático de esfuerzo de las paletas de la bomba hidráulica.....	60
4.1.1	Asignación de materiales.....	61

4.1.2	Relación de posición	62
4.1.3	Asignación de contactos	62
4.1.4	Sujeciones	63
4.1.5	Aplicación de cargas	64
4.1.6	Mallado	65
4.1.6.1	Refinación de la malla.....	66
5.	Validación de los resultados de las pruebas de desgaste y la simulación	67
5.1	Análisis de tensiones “Von Misses”.....	67
5.1.1	Análisis de esfuerzos en la simulación de las paletas de Bronce	67
5.1.2	Análisis de esfuerzos en la simulación de paletas de compuesto	69
5.2	Criterio de vida Útil de las paletas de la bomba hidráulica	70
5.2.1	Estimación de la vida útil de las paletas de bronce	71
5.2.1.1	Consideración A.....	72
5.2.1.2	Consideración B.....	73
5.2.2	Estimación de la Vida útil de las paletas de compuesto	75
5.2.2.1	Consideración A.....	77
5.2.2.2	Consideración B.....	77
6.	Análisis de Resultados	80
6.1	Comportamiento de desgaste del bronce.....	80
6.1.1	Rugosidad y coeficiente de desgaste del bronce	83
6.1.2	Superficies de desgaste del bronce.....	84
6.1.3	Análisis del criterio de vida de las paletas de bronce	85
6.2	Comportamiento de desgaste del compuesto	86
6.2.1	Rugosidad y Coeficiente de desgaste del compuesto	88
6.2.2	Superficies de desgaste del compuesto	89
6.2.3	Análisis del criterio de desgaste en las paletas de material compuesto....	90
7.	Conclusiones.....	92
	Anexo A: Datos y fotos de desgaste del bronce	95
	Anexo B: Caracterización de huella de desgaste en las probetas de bronce.....	104
	Anexo C: Datos y fotos de desgaste del material compuesto	114
	Anexo D: Caracterización de huella de desgaste en probetas de compuesto.....	123
	Bibliografía	133

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Modos de desgaste	3
Figura 1-2: Influencia de la carga sobre el desgaste de deslizamiento	5
Figura 1-3: Desgaste abrasivo a dos y tres cuerpos.....	6
Figura 1-4: Desgaste de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero	9
Figura 1-5: Variación de la rata de desgaste con la distancia o el tiempo durante el deslizamiento.....	11
Figura 1-6: “Block on Ring”	12
Figura 1-7: Conjunto para pruebas de desgaste según standard ASTM G77	13
Figura 1-8: Clasificación de bombas.....	14
Figura 1-9: Bomba de paletas deslizantes.....	15
Figura 2-1: Rotor, paletas y anillo de la bomba hidráulica	18
Figura 2-2: Contacto convexo-cóncavo	20
Figura 2-3: Dimensiones de probetas.....	28
Figura 2-4: Rugosidad del anillo probeta	33
Figura 2-5: Espectrofotografía Infrarroja - Compuesto.....	37
Figura 2-6: Variación de la rata de desgaste con la distancia el deslizamiento [4]....	38
Figura 3-1: Valores individuales de desgaste vs niveles de fuerza para el bronce....	43
Figura 3-2: Probabilidad Normal de la pérdida de peso de los ensayos de desgaste del bronce	44
Figura 3-3: Valores individuales de K vs fuerza	46
Figura 3-4: Probabilidad normal de K para el bronce.....	46
Figura 3-5: Inspección de la zona desgastada de la probeta 19 de bronce ensayada a 5 N.....	47
Figura 3-6: Rugosidad en huellas de contacto Bronce por nivel de fuerza.....	49
Figura 3-7: Geometría de las huellas y volumen perdido.....	51
Figura 3-8: Valores individuales de desgaste vs niveles de fuerza para los bloques de compuesto.....	52
Figura 3-9: Probabilidad Normal.....	53

Figura 3-10:	Valores individuales de K vs Fuerza	55
Figura 3-11:	Probabilidad Normal de K para los bloques de compuesto	55
Figura 3-12:	Inspección de la zona desgastada de la probeta 24 de compuesto	56
Figura 3-13:	Rugosidad en huellas de desgaste de compuesto por nivel de fuerza	58
Figura 4-1:	Conjunto Bomba de paletas.....	60
Figura 4-2:	Relaciones de posición.....	62
Figura 4-3:	Asignación de contacto entre anillo y paleta	63
Figura 4-4:	Sujeción en el conjunto Anillo Rotor Paleta.....	64
Figura 4-5:	Aplicación de carga sobre la paleta	65
Figura 4-6:	Mallado Paleta.....	65
Figura 4-7:	Refinado de malla de la paleta.....	66
Figura 5-1:	Contacto paleta bronce – anillo.....	67
Figura 5-2:	Esfuerzos de Von Mises sobre la paleta de bronce	68
Figura 5-3:	Presión de Contacto de la paleta de bronce	68
Figura 5-4:	Contacto paleta compuesto – anillo	69
Figura 5-5:	Esfuerzos de Von Mises sobre la paleta de compuesto	70
Figura 5-6:	Presión de Contacto en la paleta de material compuesto	70
Figura 5-7:	Tendencia de desgaste en el Bronce.....	72
Figura 5-8:	Perfil de ataque de la paleta	72
Figura 5-9:	Tendencia de desgaste en el bronce	74
Figura 5-10:	Gráfica de revisión general de distribución para MTBF de las paletas de bronce, para el modo de falla de desgaste	75
Figura 5-11:	Tendencia de desgaste del material compuesto.....	76
Figura 5-12:	Perfil de ataque de la paleta de material compuesto.....	77
Figura 5-13:	Tendencia de desgaste en el material compuesto	78
Figura 5-14:	Gráfica de revisión general de distribución para MTBF de las bombas de paletas de material compuesto, para el modo de falla de desgaste	79
Figura 6-1:	Tendencia Lineal del desgaste del bronce	81
Figura 6-2:	a) Rugosidad b) coeficiente de desgaste del bronce.....	83
Figura 6-3:	Función de supervivencia de la paleta de bronce	85
Figura 6-4:	Rata de desgaste del material compuesto	87
Figura 6-5:	a) Rugosidad b) coeficiente de desgaste del material compuesto.....	88
Figura 6-6:	Función de supervivencia de la paleta de material compuesto	91

Lista de fotos

	<u>Pág.</u>
Foto 2-1: Tribómetro “block on ring” Universidad Nacional de Colombia	16
Foto 2-2: Secado, lavado y pesado de las probetas	17
Foto 2-3: Montaje para pruebas de desgaste bajo standard ASTM G77.....	18
Foto 2-4: Anillo y paleta de una bomba hidráulica Blackmer ML.....	28
Foto 2-5: Banco de lija de la Universidad Nacional.....	29
Foto 2-6: Topología inicial de las probetas de bronce.....	30
Foto 2-7: Topología inicial de las probetas de material compuesto.....	31
Foto 2-8: Rugosidad del anillo probeta	31
Foto 2-9: Metalografía del material del anillo	35
Foto 2-10: Microfotografía compuesto	34
Foto 2-11: Metalografía del material del anillo	35
Foto 3-1: Huellas de contacto de probetas sometidas a 5 N.....	42
Foto 3-2: Microfotografía en la zona de desgaste de la probeta 19 a 5 N.....	48
Foto 3-3: Materialografía en la zona de desgaste de la probeta 24 a 5 N	57
Foto 6-1: Máquina “block on ring”	82
Foto 6-2: SEM huellas de desgaste de probetas a) 5 N b) 10 N c) 15 N d) 20 N e) 25 N	84
Foto 6-3: SEM huellas de desgaste de probetas de compuesto	89
Foto 6-4: Modos de falla a) Desgaste b) Fractura.....	91

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 2-1: Propiedades físicas de los materiales [18].....	19
Tabla 2-2: Condiciones geométricas y volumétricas del anillo y la paleta.....	19
Tabla 2-3: Resultados de fuerzas sobre las probetas.....	22
Tabla 2-4: Parámetros para la prueba piloto.....	23
Tabla 2-5: Peso perdido en el bloque de bronce.....	24
Tabla 2-6: Peso perdido en el bloque de material compuesto.....	24
Tabla 2-7: Desviación estándar para la prueba piloto del bronce entre niveles.....	25
Tabla 2-8: Relación del factor fuerza para el bronce.....	25
Tabla 2-9: Desviación estándar para la prueba piloto del compuesto entre niveles.....	26
Tabla 2-10: Relación del factor fuerza para el material compuesto.....	27
Tabla 2-11: Aleatorización de tratamiento de las probetas.....	27
Tabla 2-12: Dureza de bloque Bronce.....	32
Tabla 2-13: Dureza de bloque de material compuesto.....	33
Tabla 2-14: Dureza anillo.....	33
Tabla 2-15: Composición química Bronce porcentaje en peso.....	36
Tabla 2-16: Composición química del material del anillo-bomba (% en peso).	38
Tabla 2-17: Parámetros de los materiales sometidos a Desgaste.....	39
Tabla 3-1: Pérdida de peso de bloques de Bronce normalizados (0,1).....	40
Tabla 3-2: Datos en rojo excluidos para el análisis estadístico, ensayo a fuerza de 5 N sobre el bloque de bronce.....	42
Tabla 3-3: ANOVA para prueba de pérdida de peso de los bloques de bronce.....	44
Tabla 3-4: Coeficiente de desgaste de los cinco niveles de fuerza para los bloques de bronce.....	45
Tabla 3-5: Pérdida de peso de bloques de compuesto.....	50
Tabla 3-6: Datos en rojo excluidos para el análisis estadístico, ensayo a 5 N.....	51

Tabla 3-7:	ANOVA para prueba de pérdida de peso de los bloques de compuesto	53
Tabla 3-8:	Coeficiente de desgaste de los cinco niveles de fuerza para los bloques de compuesto.....	54
Tabla 3-9:	Resultados de pérdida de peso y coeficiente de desgaste en el bronce	.59
Tabla 3-10:	Resultados de pérdida de peso y coeficiente de desgaste en el compuesto.....	59
Tabla 4-1:	Propiedades de materiales usados para el cálculo de esfuerzos en las paletas.....	61
Tabla 6-1:	Resultados de desgaste y coeficiente de desgaste de los ensayos en el bronce.....	80
Tabla 6-2:	Resultados de desgaste y coeficiente de desgaste de los ensayos en el material compuesto	86

Introducción

El desgaste es uno de los problemas más comunes en la industria, ocasionando pérdidas económicas por paradas de planta. El tiempo de vida útil y confiabilidad de muchos productos manufacturados están determinadas por su resistencia a la fricción y al desgaste, o sea, por las propiedades tribológicas del par o pares mecánicos en contacto, por lo cual el sistema debe ser diseñado de tal forma que se pueda obtener un alto rendimiento y confiabilidad [1].

El objetivo general del presente proyecto fue generar un criterio para determinar la rata de desgaste en las paletas de una bomba hidráulica de marca BLACKMER serie ML, además como objetivos específicos se realizó mediante el método standard ASTM G77 – 2010 “Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test”, la evaluación del comportamiento al desgaste de dos pares tribológicos entre paletas y anillo de una bomba hidráulica, variando la fuerza de contacto en los pares tribológicos en 5 niveles. Aplicando un modelo matemático se calculó la rata de desgaste que permitió estimar la vida útil de las paletas, el estudio experimental se soportó mediante un modelamiento en elementos finitos que permitió observar el comportamiento de los esfuerzos en las paletas de la bomba Blackmer.

EL desarrollo de un criterio de vida útil de las paletas permitió pronosticar el punto futuro de falla; con base en un plan de mantenimiento, justo antes de que falle el componente se puede programar un mantenimiento preventivo para intervenir la bomba y reemplazar las paletas.

El capítulo uno inicia con una descripción teórica de los aspectos relevantes en el desarrollo del proyecto, por lo tanto se incluyen apartados tales como desgaste, tipos de desgaste y variables que lo influncian.

En el capítulo dos se expone inicialmente el desarrollo experimental basado en la prueba piloto, con la cual se determinó el número de réplicas adecuado; seguidamente se describen los pasos y los aspectos importantes en la obtención de las probetas, luego se detalla las condiciones y tópicos relevantes en la ejecución de los ensayos de desgaste.

En el capítulo tres se relacionan los resultados de los ensayos de desgaste, ajustados al modelo matemático que permitió determinar la rata de desgaste, terminando con un resumen de resultados por tratamiento y generando una tabla en la cual se relacionan los resultados y comportamientos relevantes en las diferentes probetas analizadas.

En el capítulo cuatro se aborda el modelamiento en elementos finitos de los esfuerzos en las paletas de la bomba, se hizo un estudio del comportamiento estático de las paletas analizando los esfuerzos normales que tienen relevancia en el fenómeno de desgaste (esfuerzos de contacto).

En el capítulo cinco se realiza la validación de los resultados de desgaste y simulación en finitos, se correlacionan los resultados con los históricos de falla de las paletas de la bomba hidráulica, esto con el fin de generar los criterios de vida útil.

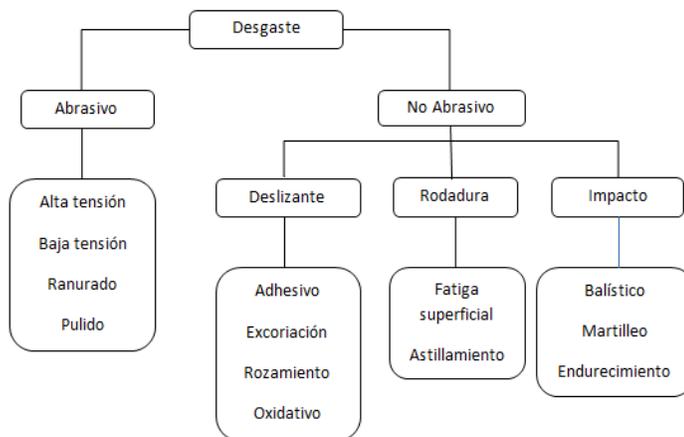
El capítulo seis correspondiente al sexto, se destina al análisis de los resultados de los ensayos de desgaste y de los criterios de vida útil, tanto del bronce como del material compuesto.

1. Marco teórico

En el presente capítulo se abordará la teoría del desgaste por deslizamiento y sus mecanismo de desgaste, adhesivo y abrasivo, variables influyentes, carga, esfuerzos de contacto, rugosidad, velocidad de desgaste, ensayo según standard ASTM G77- 2010 “Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test y las propiedades de las bombas de paletas.

El desgaste al igual que la corrosión y la fatiga, es uno de los principales modos de falla de elementos mecánicos, el desgaste se puede definir como el daño superficial sufrido por el contacto tribológico de un par de materiales sometidos a condiciones de carga. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y por consiguiente la disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias; en la figura 1.1 se especifican dos categorías con sus respectivos modos de desgaste.

Figura 1-1: Modos de desgaste. [2]



1.1. Desgaste por deslizamiento

El desgaste por deslizamiento es aquel en el cual hay un movimiento relativo entre dos superficies en contacto con una carga aplicada, en el desgaste por deslizamiento están presentes mecanismos de desgaste adhesivo, formación y crecimiento de grietas sub-

superficiales por fatiga, formación de películas superficiales por procesos triboquímicos y desgaste abrasivo por microcorte o surcado.

1.1.1 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se presenta cuando dos cuerpos entran en contacto interactuando mutuamente, por lo que algunas asperezas de las caras sufren deformación por las fuerzas inherentes del proceso. Así mismo el material base puede desprenderse si las condiciones de contacto son lo suficientemente fuertes, generando en cierto tiempo partículas o residuos de desgaste que incluso se pueden transferir de un material a otro.

En algunas condiciones de contacto no existe pérdida de material en el sistema, pero si hay daño superficial, condición que ocurre cuando se presenta una falla o daño grave en la superficie denominada como agarrotamiento, equivalente a un desgaste severo llamado “scuffing” donde se sueldan algunas asperezas por la acción del calor.

Se puede identificar una serie de situaciones antes de constituir la formación de partículas de desgaste adhesivo como lo son:

- Deformación de los contactos de las asperezas.
- Remoción de las capas de óxido.
- Formación de uniones o empalmes adhesivos.
- Falla adhesiva de las uniones y transferencia de material.
- Modificación de los fragmentos durante la transferencia.
- Remoción de fragmentos de transferencia.
- Pérdida de partículas de desgaste.

Durante el deslizamiento relativo de las superficies se puede presentar, un flujo plástico o una fractura en el material, las tasas de desgaste que se registran en estos procesos se encuentra en función de las propiedades específicas de cada uno de los elementos presentes. El material removido por el proceso de desgaste adhesivo puede ser estimado con el modelo de Archard [3]; aunque también depende de algunas características como la forma, contacto entre cuerpos, temperatura, reactividad química, las condiciones ambientales, entre otras.

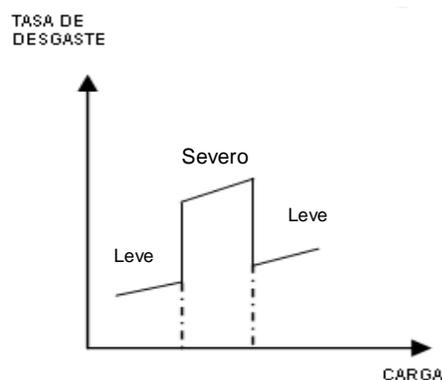
En las fallas por desgaste se presenta pérdida de progresiva de material, de la superficie de las piezas; donde el material perdido forma residuos o virutas que puede quedar en las zonas desgastadas, o pueden ser limpiados por el fluido lubricante de la maquina o arrastrados por otro fluido de operación. Por lo tanto producto del desgaste, esta perdiéndose capacidad de carga

1.1.1.1 Desgaste adhesivo leve

En condiciones de contacto bajo atmosfera normal, la superficies se cubren con una capa de grasas, vapores o productos que pueden reaccionar químicamente, formando óxidos, los cuales pueden ser penetrados fácilmente por las asperezas duras de la contracara causando una adhesión entre las mismas. Una vez que penetran la fina capa de óxido en uno o ambos componentes, se ponen al descubierto de inmediato algunas superficies libres de impurezas, las cuales tienden a unirse con la cara opuesta, por lo tanto se dice que el desgaste adhesivo leve se presenta siempre y cuando las condiciones no sean lo suficientemente severas en la remoción de la capa de óxido; lo anterior también sucede cuando la carga aplicada es moderada y las superficies que interactúan tienen una escasa o pobre adhesión.

En la Figura 1-2 se observa que a valores pequeños de carga se presenta un desgaste adhesivo leve, al incrementar estos parámetros el desgaste pasa de leve a severo, aumentando más los parámetros se tiene otro cambio abrupto del desgaste severo al desgaste leve.

Figura 1-2: Influencia de la carga sobre el desgaste de deslizamiento, [4].



1.1.1.2. Desgaste adhesivo severo

Se tiene que la tasa de desgaste adhesivo severo es mucho mayor que la del desgaste adhesivo suave y se presenta cuando se tienen cargas medias o cuando la capa de óxido es estable en las superficies correspondientes. Existen valores de carga críticos que establecen la transición del desgaste adhesivo severo al suave, como se presenta en la Figura 1.2. Así mismo, en caso de que sean cargas grandes, ocurre un incremento de la temperatura, facilitando nuevamente que predomine la capa de óxido provocando el efecto reversible en el que se presenta el desgaste suave aun cuando el desgaste severo se haya iniciado.

1.1.2 Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo se define como la pérdida de masa debida a la interacción entre partículas o asperezas duras que son frotadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella. La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste adhesivo es el grado de desgaste entre los cuerpos involucrados, menor en el desgaste adhesivo, ya sea por la naturaleza, tipo de material, composición química, o por la configuración geométrica.

Como se muestra en la figura 1.3, existen dos tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo de dos cuerpos o a tres cuerpos. El desgaste abrasivo a dos cuerpos, es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, mientras que en la abrasión a tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo.

Figura 1-3: Desgaste abrasivo a dos (Izquierda) y tres cuerpos (Derecha)



Autores como [3], [5] y [6], discutieron el hecho, que solo una parte del volumen del surco producido por partículas duras, es inmediatamente removido como partículas de desgaste fuera del material, el resto se localiza en el borde en forma de proa. En

materiales con microconstituyentes de plasticidad limitada, el mecanismo de microcorte acaba por ser característico, para una severidad de bajo desgaste, se evidencia el microscurado y hay una transición para microfractura cuando alguna variable del sistema promueve aumento de severidad.

1.1.3 Variables que Influyen el Desgaste

En el proceso de desgaste intervienen muchas variables, relacionadas con la geometría del par tribológico, propiedades metalúrgicas, condiciones de carga, variables como el trabajo ejercido, la masa de cada cuerpo, las propiedades del material y la temperatura de la interfase, pueden ser consideradas como variables de entrada del tribosistema. Por otro lado, estas pueden ser el resultado final del proceso, se pueden transformar en variables de salida del tribosistema. Un análisis completo del desgaste es complejo, interviniendo factores como dureza, tenacidad, estructura, composición química, carga, velocidad, rugosidad de la superficie, distancia recorrida, condiciones de lubricación, vibraciones, calor generado, atmósfera y corrosión entre otros menos significativos [7].

1.1.3.1 Carga normal

Muchos estudios concluyen que el desgaste aumenta con la carga, la teoría de [3] predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga. Posteriormente [8] ha demostrado que pequeños aumentos de la carga provocan las llamadas transiciones, las cuales registran cambios bruscos en la Tasa de Desgaste; además encontró, que generalmente existe una dependencia lineal entre la Tasa de Desgaste y la carga, siempre que no haya cambios de régimen de desgaste. [9] afirma que la Tasa de Desgaste varía proporcionalmente con la carga. [10], por su parte, afirma que el desgaste aumenta casi proporcionalmente con la carga, aunque esta relación es afectada por el calor friccional producido en la intercara de contacto.

A medida que se aumenta la carga se supera el límite de fatiga de una considerable porción de las asperezas del material, en consecuencia, el desgaste tomaría lugar a través de un mecanismo de fatiga. Finalmente, para cargas más altas se producirían contactos plásticos. Basados en lo anterior, mientras no se alcance el límite elástico de las asperezas, el área real de contacto no sería dependiente de la carga y podría

considerarse al desgaste como función de la presión aparente. Al alcanzarse el estado de deformación plástica en las asperezas, el desgaste ya no sería dependiente de la presión aparente, sino dependiente de la carga, como ha sido observado por diferentes investigadores.

1.1.3.2 Esfuerzos de contacto

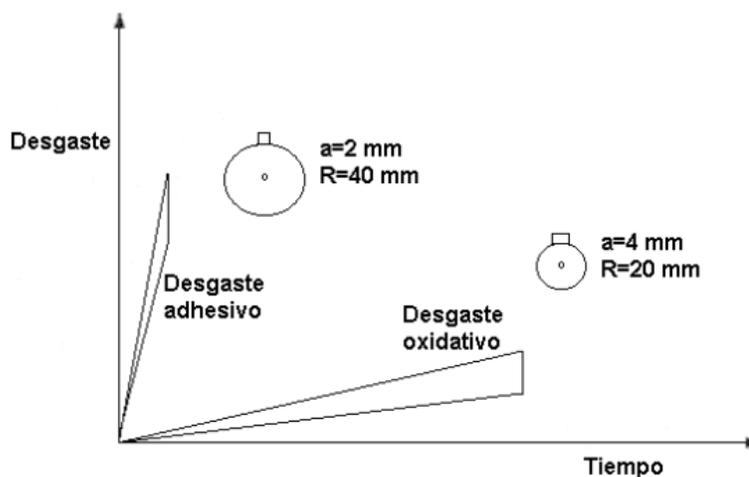
Este fenómeno sucede en elementos de máquinas que transmiten cargas a través de superficies que presentan contactos en áreas limitadas. Estos esfuerzos son causados por la presión de un sólido elástico sobre otro, en zonas puntuales o a lo largo de una línea, si los elementos fueran totalmente rígidos, las áreas de contacto se anularían y los esfuerzos serían infinitos. Debido a la elasticidad de los materiales, éstos se deforman bajo la acción de las cargas, produciéndose áreas finitas de contacto que soportan grandes esfuerzos. (Por lo tanto, a pesar de que los elementos son diseñados para tener suficiente resistencia mecánica, tienden a fallar en la zona de contacto, en donde son mayores los esfuerzos.)

Los esfuerzos de contacto ejercen un efecto importante sobre la rata de desgaste. Experimentos realizados por [3] y posteriormente [11] demostraron que la tasa de desgaste, en términos del volumen desgastado por unidad de tiempo, es constante una vez que se estabilizan las condiciones de operación. Esta situación no era esperada en virtud de que los experimentos fueron realizados con probetas de una geometría tal que el área aparente de contacto aumentaba a lo largo del ensayo. Bajo esas circunstancias el desgaste es independiente de esta variable y por tanto de la presión (aparente). Como contraparte se pueden citar resultados que demuestran la influencia de las dimensiones relativas en el fenómeno de desgaste, se discute la naturaleza de la fricción y su relación con diversos procesos de desgaste. Se muestra que en el proceso de contacto interactúan asperezas superficiales, generando adherencia, debido a las fuerzas interatómicas [12]. Según [13], el contacto genera transformaciones microestructurales de cohesiones localizadas que conducen al daño de las superficies.

En la Figura 1-4, se observa el gráfico de un ensayo de desgaste, de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero SAE 1045. (Aire seco, $F_n = 20$ N, $v = 1$ m/s), que

para presiones aparentes altas produce desgaste adhesivo (severo); mientras que a presiones aparentes bajas produce desgaste oxidativo (suave).

Figura 1-4: Desgaste de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero SAE 1045. Aire seco, $F_n = 20 \text{ N}$, $V = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Es muy posible que la validez de la relación lineal del desgaste con la carga y su independencia del área aparente, este restringida a aquellas condiciones donde la mayoría de los contactos interasperezas sean de tipo plástico. En las instancias donde los contactos sean mayoritariamente elásticos la presión si pudiese ser un parámetro relevante; pudiendo ser controlada por aumentos de área o disminuciones de la carga.

1.1.3.3 Rugosidad

Otra variable de importancia, acerca de la cual ha existido cierta controversia, es la rugosidad de las superficies en contacto.

Trabajos demuestran que superficies muy lisas ($0,10 \mu\text{m}$ a $1,60 \mu\text{m}$) promueven el desgaste [14]. En [15] se observó que la tasa específica de desgaste aumentó linealmente con la rugosidad superficial de la cara del otro elemento en contacto (contracara). En [10] se propone que aumentar rugosidad hace aumentar las tasas de desgaste, pero que las superficies muy lisas ven restringida su capacidad de detener contaminantes, los cuales pudieran tener efectos lubricantes lo que favorece el desgaste adhesivo.

Durante el deslizamiento e independientemente de la rugosidad original de las superficies de trabajo, al finalizar el asentamiento, se obtiene para cada superficie una rugosidad que depende de las características de los materiales del par y de las condiciones de fricción, la cual se conserva en toda la etapa del trabajo; bajo una estabilidad del régimen de fricción en el proceso de asentamiento, la rugosidad inicial se transforma alcanzando una rugosidad de estabilización [16].

1.1.4. Velocidad de desgaste

El cálculo de la velocidad de desgaste se reduce al establecer una relación entre la intensidad del desgaste y las propiedades físicomecánicas de los materiales, las condiciones de carga y las características microgeométricas de la superficie deslizante [17].

El mecanismo de daño superficial dependerá de la relación entre las propiedades de contacto. En el período denominado de desgaste estacionario se puede aplicar una expresión llamada la ecuación de Archard [3], en la cual el volumen perdido V es proporcional a la carga aplicada W e inversamente proporcional a la dureza del material H , s es la distancia de deslizamiento, estos son relacionados a través de una constante K , que es característica del proceso y reúne los efectos de esas variables.

Esa expresión se indica en (1)

$$V = \frac{KWs}{H} \quad (1)$$

Donde

V : Volumen de material removido [mm^3]

K : Coeficiente de desgaste

W : Carga normal a la superficie [N]

s : Distancia de deslizamiento [mm]

H : Dureza del material [$\frac{N}{mm^2}$]

En estudios realizados por [18], se relaciona el volumen de material desgastado con el recorrido de fricción durante el periodo de desgaste. Este autor observó que durante el periodo de asentamiento el desgaste de los polímeros depende fundamentalmente de la rugosidad del contracara, ocurriendo el deterioro de la superficie con una elevada velocidad de desgaste, que disminuye en lo posterior debido al pulido del contracara.

El coeficiente de desgaste K representa el comportamiento de un tribosistema figura 1-5, pero aunque se plantea como una constante, depende de las condiciones particulares de trabajo.

Figura 1-5: Variación de la rata de desgaste con la distancia o el tiempo durante el deslizamiento [19].



En [20] se presenta un modelo de aproximación probabilística para pronosticar el desgaste, además señala que para desarrollar un modelo para predecir cuantitativamente la velocidad de desgaste, éste debe preservar un carácter aleatorio de todas las variables individuales que influyen en el proceso de desgaste; es importante estimar cuantitativamente la carga soportada por el contacto, de esta manera debe ser obtenida una descripción estadística de las características significantes de los materiales involucrados.

1.2 Ensayo bajo standard ASTM G77

El objetivo de este ensayo cubre los procedimientos de laboratorio para determinar la resistencia de los materiales de desgaste por deslizamiento. La prueba utiliza un bloque en contacto bajo presión con un anillo rotante con la finalidad de obtener resultados de

desgaste, de los cuales se pueden clasificar los pares de los materiales a prueba, de acuerdo a sus características de desgaste por deslizamiento bajo diversas condiciones.

Una característica importante de esta prueba es que es muy flexible. Todo material con el que se pueda fabricar los bloques y los anillos se pueden probar bajo el estándar ASTM G77. Por lo tanto, las combinaciones de materiales posibles son infinitas. Además, la prueba se puede ejecutar con varios lubricantes, líquidos o atmósferas de gas, según se desee, para simular las condiciones de servicio. Los resultados de las pruebas se presentan como las pérdidas de masas, tanto para el bloque como para el anillo. El par tribológico de mayor resistencia al desgaste tiene una menor pérdida de masa.

1.2.1 Ensayo “Block on Ring”

Hay muchas maneras de frotar dos sólidos juntos. Una de las pruebas más comunes es el bloque-sobre-anillo. La prueba esquemática se muestra en la Figura 1.6. La gran cantidad de configuraciones de muestra para el estudio de desgaste por deslizamiento, pueden ser atribuidas al menos a dos factores:

Factor 1: El deseo de simular un sistema tribológico en particular.

Factor 2: El deseo de facilitar la medición del desgaste en ambos miembros del sistema.

Figura 1-6: Block on Ring [21].

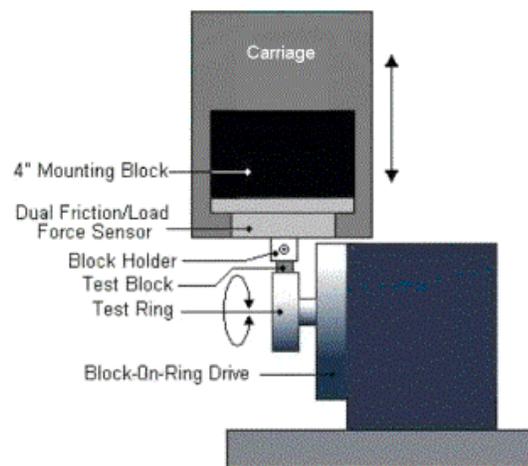


Este método de ensayo se realiza poniendo a contacto adhesivo un par tribológico, bloque y anillo, el anillo probeta de un diámetro de 35 mm y el ancho de 8,15 mm está montado sobre un eje horizontal. El bloque de prueba de 15,75 mm de longitud y diámetro de 6,35 mm se lleva a cabo en el soporte del bloque en el carro de carga. El bloque se mantiene en una posición estática, el anillo es montado con una velocidad

angular constante, el par tribológico se coloca en contacto suministrando una fuerza de presión al bloque figura 1-7.

La consistencia de las pruebas repetidas en el mismo par tribológico dependerá de la homogeneidad de materiales, equipo, material de la interacción, de la observación y competencia del operario de la máquina [1].

Figura 1-7: Conjunto para pruebas de desgaste según standard ASTM G77. [1]



El standard ASTM G77 no establece requisitos para las mediciones. Sin embargo, se recomienda evaluar el desgaste después de la prueba mediante la medición de la anchura de la cicatriz de desgaste en el bloque de ensayo o considerando la pérdida de masa después de las pruebas.

Es importante aclarar que en este ensayo se evaluará la resistencia al desgaste del par tribológico, es decir anillo y bloque en conjunto, no de cada uno por separado.

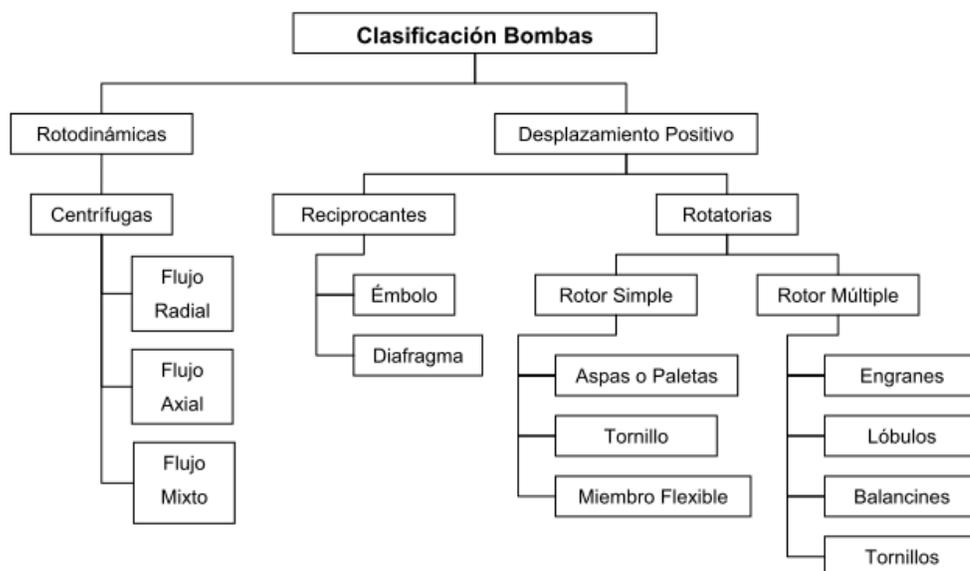
1.3 Bombas hidráulicas

Una bomba es un dispositivo mecánico usado para mover fluidos de una presión baja a una presión alta; esto se logra mediante la adición de energía al sistema, en definitiva

son máquinas que realizan un trabajo para mantener un líquido en movimiento, consiguiendo así aumentar la presión o energía cinética del fluido.

Cualquier equipo o sistema hidráulico sufre, por el uso constante, un desgaste cuyas causas son diversas: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por erosión, desgaste por fatiga, mala lubricación, oxidación del fluido, cavitación, etc. Existen infinidad de formas de clasificación de bombas pero fundamentalmente se pueden dividir en dos grandes grupos figura 1-8.

Figura 1-8: Clasificación de bombas.



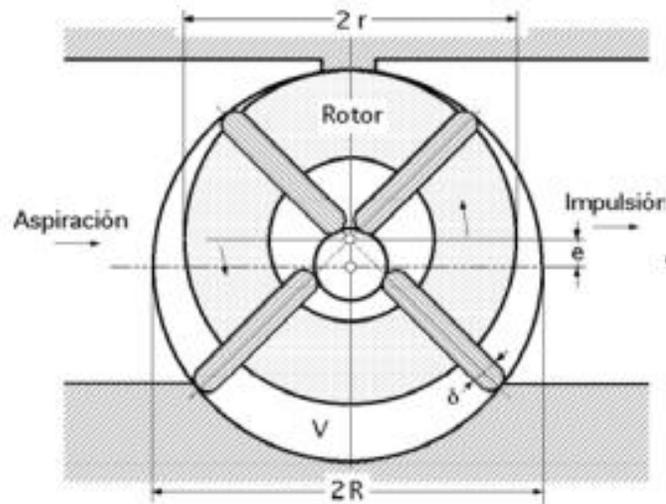
Las bombas rotodinámicas mueven el fluido debido a la transferencia de energía cinética rotacional de un motor, a través de un impulsor o hélice, en energía potencial (presión del fluido). Por otro lado, en las bombas de desplazamiento positivo el fluido que se desplaza siempre está contenido entre el elemento impulsor que puede ser un émbolo, un diente de engrane o un aspa, y la carcasa o el cilindro; de manera que mueva un volumen fijo por revolución excepto por las fugas entre las partes que confinan al fluido.

1.3.1 Bombas de paletas

Las bombas de paletas consisten en un conjunto de paletas alojadas en un rotor cilíndrico hueco con ranuras radiales en las que oscilan, por la fuerza centrífuga.

El rotor va dispuesto en forma excéntrica respecto a la superficie interior del estator que es cilíndrica, debido a lo cual, las paletas, durante la rotación del rotor, son proyectadas contra la pista interior del anillo, por acción de la fuerza centrífuga y de la presión del fluido, entrando en contacto tribológico, el empuje que resulta de estas acciones permite un contacto controlado entre las paletas y la pista interior del anillo, figura 1-9, [22].

Figura 1-9: Bomba de paletas deslizantes. [22]



En [23] se utilizó el método estándar para indicar las características de desgaste lubricado de acuerdo con ASTM D 2882 / DIN 51 389, en una bomba de paletas Vickers V 104C. Desarrollaron una teoría matemática basada en la descripción de fenómenos de desgaste adhesivo y abrasivo por la hipótesis de la energía de cizallamiento e incluye la modelización estocástica de las superficies rugosas de contacto. En [24] experimentalmente demostraron el ajuste del modelo propuesto en [23], encontrando una buena correlación entre la carga y el desgaste en el anillo, asociado con una distribución de temperatura para el sistema de desgaste en la bomba de paleta Vickers V 104C.

En el desarrollo de la investigación se pretendió reproducir con el ensayo ASTM G77, las condiciones de desgaste entre el anillo de fundición gris de hierro y dos tipos de materiales para paletas, bronce C93700 y compuesto fenólico reforzado con fibras de Aramida, que son utilizadas para las bombas Blackmer ML en el bombeo de hidrocarburos.

2. Desarrollo experimental

El desarrollo de la parte experimental se inició con el cálculo teórico de las fuerzas que actúan en las paletas de la bomba hidráulica, los valores calculados dieron un rango de fuerzas para la prueba piloto, dicha prueba permitió conocer el comportamiento de los pares tribológicos; analizando los datos obtenidos se realizó el diseño experimental estadístico y se determinó el número necesario de réplicas.

Para reproducir el fenómeno de desgaste de los pares tribológicos del material de paletas de la bomba y el anillo, se acudió a ensayos “block and ring” standard ASTM G77 [1]. Los ensayos para la prueba piloto se realizaron en el tribómetro bloque-anillo del área de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Se trata de un equipo de aplicación de carga radial, que dispone de un motor de VOGES de 2 HP a 3450 RPM, foto 2-1, que transmite potencia por poleas a un eje que lleva montado el anillo probeta y al cual se le aplica la carga radial del bloque probeta. La lubricación del contacto se realizó mediante un sistema de humectación, constante para todos los ensayos.

Foto 2-1: Tribómetro “block on ring” Universidad Nacional de Colombia.

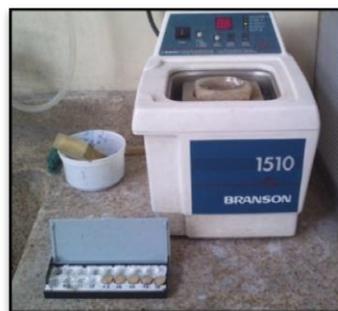


De la prueba piloto se estableció un procedimiento para la determinación del desgaste en las pruebas finales, estas se realizaron mediante la evaluación de la pérdida de peso de las probetas. Se empleó una balanza analítica de precisión de 0,1 mg foto 2-2a, en cada probeta de bronce se prepararon las caras de los bloques con papel de lija grano 1200 para garantizar una rugosidad uniforme, se limpió antes de pesarse, en lavado ultrasónico de acetona foto 2-2b con una duración de 10 minutos cada uno. Tras el baño de acetona las probetas se secaron en aire caliente y se dejaron 5 minutos en reposo para que la temperatura adquirida tras el secado no alterara la precisión de la balanza [25]; para los bloques del compuesto el tratamiento fue diferente debido a la absorción de humedad de la matriz de material compuesto: en primer lugar se prepararon las caras de los bloques con papel de lija grano 1200 para garantizar una rugosidad uniforme, se lavaron en acetona por 10 minutos, se secaron en un horno a 75°C por 20 minutos para eliminar la humedad foto 2-2c, se dejaron 20 minutos en reposo para que la temperatura no alterara la precisión de la balanza foto 2-2d, luego se pesaron y se registraron los pesos iniciales.

Foto 2-2: Secado, lavado y pesado de las probetas. a- Balanza analítica, b- lavado ultrasónico, c- horno para deshidratado, d- Probetas en deshidratado.



a



b



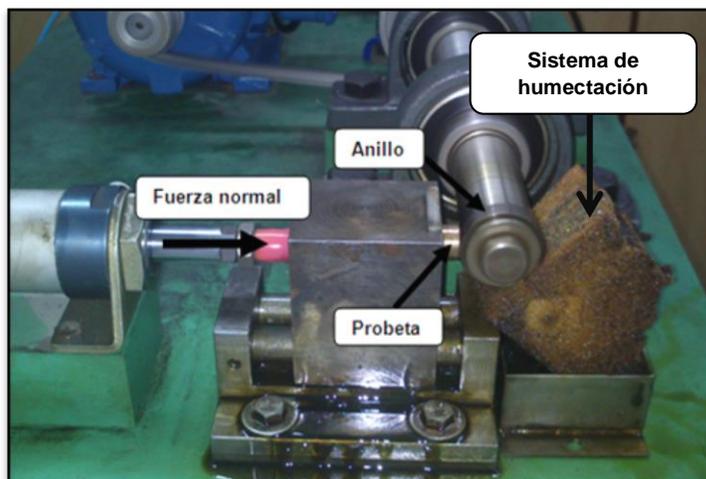
c



d

Aplicando el standard ASTM G77, la configuración de montaje, el anillo, el bloque y la fuerza normal se presentan en la foto 2-3.

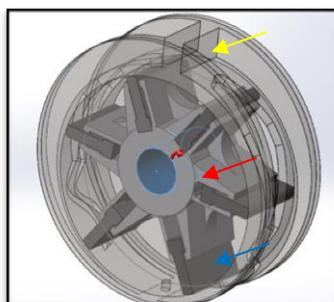
Foto 2-3: Montaje para pruebas de desgaste bajo standard ASTM G77.



2.1 Cálculo de las fuerzas normales sobre las paletas

Al aplicar una fuerza normal F a los elementos (anillo-paletas), éstos se deforman y la línea de contacto se convierte en una huella o superficie de contacto, que afectan directamente el comportamiento del desgaste [26]. En el análisis de fuerzas sobre las paletas solo se tuvo en cuenta la fuerza centrífuga; la fuerza generada por el peso de la paleta se despreció, ya que en la mitad del recorrido la fuerza del peso se suma y en la otra mitad se resta, luego para obtener una rata de desgaste promedio se puede hacer esta aproximación. Considerando las condiciones geométricas figura 2-1, tabla 2-2 y las propiedades de los materiales tabla 2-1 se tienen los siguientes datos:

Figura 2-1: Rotor, paletas y anillo de la bomba hidráulica; la flecha roja indica el rotor, la flecha amarilla el anillo y la flecha azul la paleta.



Los valores registrados en la tabla 2-1, fueron tomados de la base de datos de propiedades de materiales del software solidworks 2010, esto se realizó con el fin de crear unos cálculos de referencia para el modelamiento de los esfuerzos que posteriormente se realizaron en este software.

Tabla 2-1: Propiedades físicas de los materiales [27].

	MODULO DE ELASTICIDAD (N/m ²)	COEFICIENTE DE POISSON	DENSIDAD (kg/m ³)	MASA (kg)
Anillo	1,9X10 ¹¹	0,27		
Paleta bronce	1,1X10 ¹¹	0,33	8300	0,6734
Paleta de material compuesto	54X10 ⁹	0,38	1386	0,1136

Tabla 2-2: Condiciones geométricas y volumétricas del anillo y la paleta

Radio del anillo	$r_A = 0,257m$
Volumen de la paleta	$V_p = 0,000081144 m^3$
Ancho de la paleta	$l_p = 0,092 m$

2.1.1. Fuerzas para la paleta de bronce

La fuerza centrífuga que expulsa las paletas contra el anillo está dada por (2.1) [11].

$$F = m\omega^2r \quad (2.1)$$

Dónde:

La masa de la paleta (m) es: 0,6734 kg

La velocidad del rotor (ω) es: 600 rpm = $62.832 \frac{Rad}{s}$

La distancia del radio al centro de masa de la paleta (r) es: 0,101 m para el radio máximo y 0,091 m para el radio mínimo

Considerando las condiciones de operación de la bomba, se reemplazó en (2.1), y se obtuvo la fuerza máxima sobre la paleta de bronce.

$$F_{Br_{max}} = 0,6734 \text{ kg} * \left(62.832 \frac{Rad}{s}\right)^2 * 0,101 \text{ m}$$

$$F_{Br_{max}} = 268,34 \text{ N}$$

Considerando las condiciones de operación de la bomba, se reemplazó en la ecuación 2.1 y se obtuvo la fuerza mínima sobre la paleta de bronce.

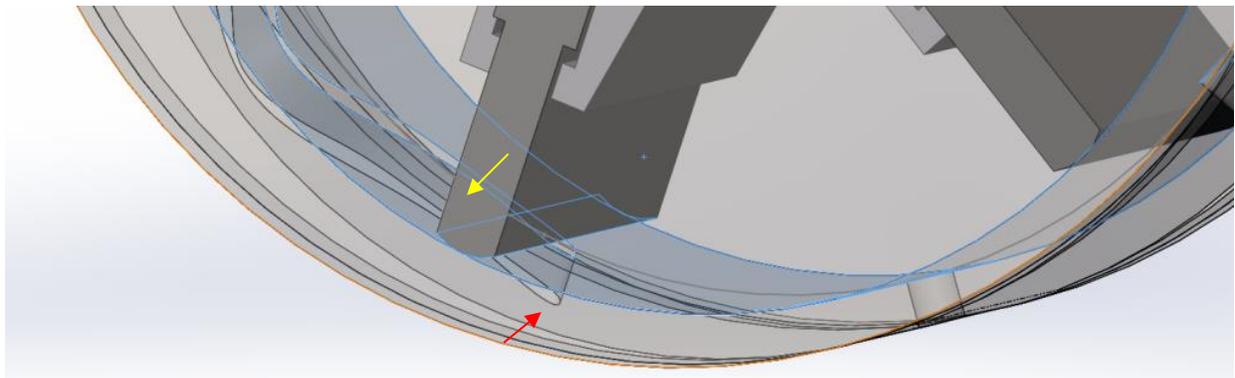
$$F_{Br_{min}} = 0,6734 \text{ kg} * \left(62.832 \frac{\text{Rad}}{\text{s}}\right)^2 * 0,091 \text{ m}$$

$$F_{Br_{min}} = 241,92 \text{ N}$$

2.1.1.1 Presión de contacto entre la paleta de bronce y el anillo

Teniendo en cuenta que el contacto entre paleta y anillo es de características convexo-cóncavo figura 2-2, el ancho de huella de contacto entre el anillo y la paleta viene dado por la (2.2) [28].

Figura 2-2: Contacto convexo-cóncavo; flecha roja superficie de contacto del anillo de la bomba hidráulica cóncava, flechas amarillas superficie de contacto de la paleta convexa.



$$W = 4 \sqrt{\frac{F}{\pi b} \frac{\left(\frac{1-\theta_1^2}{E_1}\right) + \left(\frac{1-\theta_2^2}{E_2}\right)}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)}} \quad (2.2)$$

Donde

F: fuerza de contacto entre anillo y paleta

θ_1 : coeficiente de poisson paleta bronce

θ_2 : coeficiente de poisson anillo fundicion nodular

E_1 : modulo de elasticidad de la paleta de bronce
 E_2 : modulo de elasticidad del anillo fundicion nodular
 W : ancho de huella
 b : longitud de huella
 r_1 : radio del perfil de contacto de la paleta
 r_2 : radio del perfil de contacto del anillo de la bomba

Reemplazando en (2.2), se obtiene el ancho de huella.

$$W = 5,19 \times 10^{-5} \text{ m}$$

La presión de contacto máxima entre paleta y anillo viene dado por (2.3) [17].

$$P_{C_{MAX}} = \frac{4 F}{\pi W b} \quad (2.3)$$

Reemplazando el ancho de huella en (2.3), se obtiene la presión de contacto máxima.

$$P_{C_{MAX}} = 71,55 \text{ MPa}$$

2.1.2 Cálculo de las fuerzas normales en las probetas

Primero calculamos el área de contacto entre el bloque y el anillo del ensayo ASTM G77; considerando que es un contacto entre un cilindro y un plano, el radio r_2 de la ecuación 2.2 tiende a infinito por tanto $\frac{1}{r_2}$ tiende a cero [2], la ecuación 2.2 se reduce a la ecuación 2.4.

$$W = 4 \sqrt{\frac{F}{\pi b} \frac{\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}\right) + \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)}{\left(\frac{1}{r_1}\right)}} \quad (2.4)$$

2.1.2.1 Huella de contacto bloque de bronce y anillo

Cálculo de huella de contacto para el par tribológico bronce (bloque) fundición nodular (anillo); considerando que

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P * A \therefore A = b * W \rightarrow F = P * b * W$$

Donde P es la presión de contacto máxima expresada en $\frac{N}{m^2}$

Reemplazando la fuerza en la ecuación 2.4, se obtiene el ancho de huella en función de la presión.

Despejando y reemplazando se obtiene el ancho de huella, W .

$$W = 7,09 \times 10^{-5} \text{ m}$$

La fuerza necesaria que se debía aplicar a las probetas para obtener la misma presión máxima de contacto que se genera en las paletas de bronce de la bomba, se calculó bajo la siguiente relación:

$$F = P * A \rightarrow F = 71551874,59 * 7,09 \times 10^{-5} * 0,009$$

$$F = 45,69 \text{ N}$$

2.1.3. Fuerzas sobre las paletas

En la tabla 2-3 se muestra el resultado del cálculo de fuerzas en las paletas de bronce y material compuesto, además se muestra la relación de fuerza en las probetas mediante la presión de contacto.

Tabla 2-3: Resultados de fuerzas sobre las probetas

Material	Fuerza en paletas		Presión de contacto	Fuerza máxima en probetas
	F_{MAX}	F_{MIN}	$P_{C_{MAX}}$	F
Bronce	268,34 N	241,92 N	71,55 Mpa	45,69 N
Compuesto	45,29 N	40,81 N	22,38 MPa	7,09 N

2.2. Diseño experimental

De acuerdo al cálculo de fuerzas a emplear en el ensayo, se ajustaron las condiciones para la prueba piloto, como se muestran en la tabla 2-4.

Tabla 2-4: Parámetros para la prueba piloto.

Parámetros	Nivel 1	Nivel 2
Distancia de deslizamiento	2000 m	2000 m
Fuerza de contacto	10 N	50 N
Tipo de material bloque	Bronce	Compuesto
Tiempo de prueba	30 min	30 min
Lubricante	Valvulina API GL-1	Valvulina API GL-1

La rigurosidad del experimento y la representatividad de las pruebas en esta investigación, están directamente asociadas, no sólo con la calidad, sino también con la cantidad de observaciones que se realizaron.

Para la prueba piloto se sometieron a desgaste ocho pares tribológicos, cuatro de bloque de bronce- anillo de fundición nodular y cuatro de bloque de material compuesto- anillo de fundición nodular, bajo condiciones críticas de operación, teniendo en cuenta los resultados de las fuerzas, 7,09 N para el material compuesto y de 45,69 N para el bronce y tomando como referencia las condiciones del ensayo de desgaste en la investigación de D. Giraldo [29]. Se ajustó la fuerza para la prueba piloto en 10 N y 50 N con una distancia de deslizamiento de 2000 m, tabla 2-3; el tiempo de la prueba fue de 30 min, cada probeta se limpió antes de pesarse en un baño de acetona con ultrasonido con una duración de 10 minutos, después del baño de acetona las probetas se secaron en aire caliente y se dejaron 5 minutos en reposo, para que la temperatura adquirida tras el secado en aire caliente no alterara la precisión de la balanza [25].

2.2.1 Condiciones y resultados de la prueba piloto

En las tablas 2-5 y 2-6 se resumen los resultados de gravimetría de la prueba piloto.

Tabla 2-5: Peso perdido en el bloque de bronce.

BRONCE					
Clase probetas	PESO INICIAL (g)	Tiempo de prueba (min)	Fuerza de contacto (N)	Peso Final (g)	Peso perdido (g)
	14,2908	30	10	14,2899	0,0009
Probetas piloto	14,3657	30	10	14,3645	0,0012
	14,6729	30	50	14,6595	0,0134
	14,5432	30	50	14,5291	0,0141
					%error

Tabla 2-6: Peso perdido en el bloque de material compuesto.

COMPUESTO					
Clase probetas	PESO INICIAL (g)	Tiempo de prueba (min)	Fuerza de contacto (N)	Peso Final (g)	Peso perdido (g)
	1,8715	30	10	1,8688	0,0027
Probetas piloto	1,8514	30	10	1,8495	0,0019
	1,8687	30	50	1,8523	0,0164
	1,8617	30	50	1,8465	0,0152
					% error

2.2.2. Experimento unifactorial para el bronce

Se decidió adelantar el experimento con cinco niveles de carga, para lo cual era necesario determinar el número de réplicas, utilizando los resultados de la prueba piloto, (tabla 2.4). Se propuso las hipótesis tanto nula H_0 como alterna H_1 para la media de los niveles del factor bajo estudio [30]:

- Hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de la fuerza:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 = \text{al..menos ...una..}\tau_i \neq 0$$

Con los datos obtenidos en la prueba piloto se calculó la desviación estándar entre niveles tabla 2-7.

Tabla 2-7: Desviación estándar para la prueba piloto del bronce entre niveles.

FUERZA (N)	PESO PERDIDO (g)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g)	PROMEDIO DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g)
10	0,0009	0,00021213	0,00035355
10	0,0012		
50	0,0134	0,00049497	
50	0,0141		

Seleccionando un valor al nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y utilizando el apéndice V [30], se obtuvieron los valores consignados en la tabla 2-8 a partir de la ecuación 2.5

$$\Phi^2 = \frac{nD^2}{a\sigma^2} \quad (2.5).$$

Donde

Φ^2 : Diferencia entre dos tratamientos.

n = Número de repeticiones

a = Número de niveles

D = Diferencia entre tratamientos, se escoge dos veces la desviación estándar

σ : Desviación estándar

Tabla 2-8: Relación del factor fuerza para el bronce, en rojo el número de probetas a ensayarse.

n	Φ^2	Φ	D	$v1=(a-1)$	$V2=a(n-1)$	β	potencia (1- β)
2	8,0E-01	0,89442719	0,00070711	4	5	< 0,80	<0,20
3	1,2E+00	1,09544512	0,00070711	4	10	0,75	0,25
4	1,6E+00	1,26491106	0,00070711	4	15	0,55	0,45
5	2,0E+00	1,41421356	0,00070711	4	20	0,4	0,6
6	2,4E+00	1,54919334	0,00070711	4	25	0,27	0,73

Donde

V1: Grados de libertad (a-1).

V2: Denominador de los grados de libertad a(n-1).

β : Probabilidad de rechazar la hipótesis.

Del factor relacionado en la tabla 2.8, se señala una potencia $(1-\beta)$ de 0,73, es decir que cuando exista una diferencia de dos veces la desviación estándar, habrá una probabilidad del 73 % para que el modelo la detecte, esta probabilidad es igual a la utilizada en [29]. En conclusión se elige un número de repeticiones $n=6$; por lo que para los cinco niveles de fuerza se necesitaron 30 probetas de bronce.

2.2.3 Experimento unifactorial para el material compuesto

Tomando como referencia los cálculos de fuerzas mínimas y máximas sobre las paletas de los dos materiales, se decidió adelantar las pruebas de desgaste con cinco niveles de carga (5, 10, 15, 20 y 25 N), para lo cual era necesario determinar el número de réplicas, utilizando los resultados de la prueba piloto (tabla 2-6). Se propusieron las hipótesis tanto nula H_0 como alterna H_1 para la media de los niveles del factor bajo estudio [30]:

- Hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de la fuerza:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 = \text{al..menos ...una..}\tau_i \neq 0$$

Con los datos obtenidos en la prueba piloto se calculó la desviación estándar entre niveles tabla 2-9.

Tabla 2-9: Desviación estándar para la prueba piloto del compuesto entre niveles.

FUERZA (N)	PESO PERDIDO (g)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g)	PROMEDIO DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g)
10	0,0027	0,00056569	0,00070711
10	0,0019		
50	0,0164	0,00084853	
50	0,0152		

Seleccionando un valor al nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y utilizando el apéndice V [30], se obtienen los siguientes valores consignados en la tabla 2-10 a partir de (2.5).

Tabla 2-10: Relación del factor fuerza para el material compuesto, en rojo el número de probetas a ensayarse.

N	Φ^2	Φ	D	$v1=(a-1)$	$V2=a(n-1)$	B	potencia $(1-\beta)$
4	1,6E+00	1,264911064	0,00141421	4	15	<0,27	<0,73
5	2,0E+00	1,414213562	0,00141421	4	20	<0,27	<0,73
6	2,4E+00	1,549193338	0,00141421	4	25	0,27	0,73
7	2,8E+00	1,673320053	0,00141421	4	30	0,2	0,8

Del factor relacionado en la tabla 2-9, se señala una potencia $(1-\beta)$ de 0,73, es decir que cuando exista una diferencia de dos veces la desviación estándar, habrá una probabilidad del 73 % para que el modelo la detecte, probabilidad igual a la de [29]. Se elige un número de repeticiones $n=6$; se necesitaron 30 probetas de material compuesto.

La experimentación se adelantó para los dos materiales con 5 niveles de carga (5, 10, 15, 20 y 25 N), aunque en la prueba piloto la fuerza máxima fue de 50 N, se decidió bajar el nivel máximo de carga a 25 N, ya que en la prueba piloto se observó sobrecalentamiento en las huellas de desgaste en el material de compuesto, tomando como referencia a [31], se tomó el nivel mínimo de 5 N y el máximo de 25 N, rango en el que se obtuvo respuesta en los dos materiales.

2.2.4. Aleatorización

La aleatorización consistió en asignar las probetas a los distintos niveles del tratamiento al azar, con la esperanza de que los efectos extraños se contrarresten entre las distintas probetas y observaciones que componen cada nivel de tratamiento [32]. Los resultados se muestran en la tabla 2-11 a y b

Tabla 2-11: Aleatorización de tratamiento de las probetas a) bronce (izquierda) b) material compuesto (derecha).

FUERZA	N° DE LA PROBETA ASIGNADA							FUERZA	N° DE LA PROBETA ASIGNADA						
5 N	3	5	11	19	24	28	5 N	5	11	19	20	24	25		
10 N	7	17	21	23	30	16	10 N	8	9	15	22	23	30		
15 N	2	8	13	18	25	27	15 N	2	10	12	13	27	28		
20 N	9	10	12	14	15	26	20 N	3	4	6	14	16	17		
25 N	1	4	6	20	22	29	25 N	1	7	18	21	26	29		

2.3 Obtención de probetas

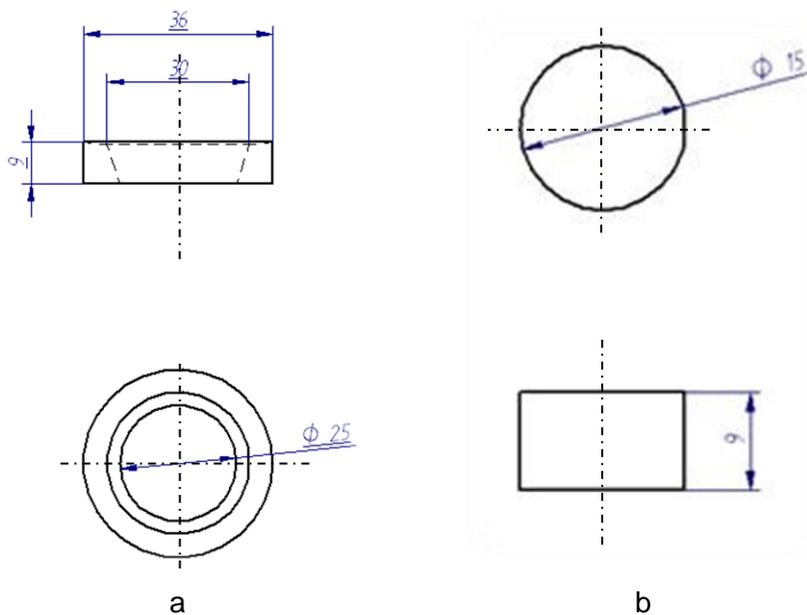
Para el desarrollo de la tesis se contó con los materiales necesarios para la fabricación de las probetas. De una bomba Blackmer ML se extrajo el anillo y las paletas para la fabricación del bloque y el anillo probeta, foto 2-4.

Foto 2-4: Anillo y paleta de una bomba hidráulica Blackmer ML.



Las dimensiones de las probetas estuvieron restringidas a las medidas del tribómetro del laboratorio figura 2-3, Con el material recuperado de la bomba de paletas se procedió a realizar el maquinado.

Figura 2-3: Dimensiones de probetas a) Anillo (izquierda) b) bloque (derecha)



2.4 Caracterización de las probetas ensayadas y del material

Se realizaron diferentes análisis a la superficie de contacto tales como, microscopia Confocal, microscopia SEM, dureza, metalografía, composición química y espectrometría infrarroja. Con la preparación de las superficies de las probetas se obtuvo una rugosidad uniforme, esto con el fin de restringir esta variable para que no afectara los resultados del experimento.

2.4.1. Rugosidad inicial de las probetas

La preparación de las superficies de las probetas se inició con un lijado grueso en los bancos de lija foto 2-5, hasta llegar a lija fina de 1200, garantizado un rayado en un solo sentido en la superficie de las probetas. El parámetro de medida de la rugosidad más utilizado es la rugosidad media Ra (desviación media aritmética del perfil), cuyo resultado se detalla a continuación.

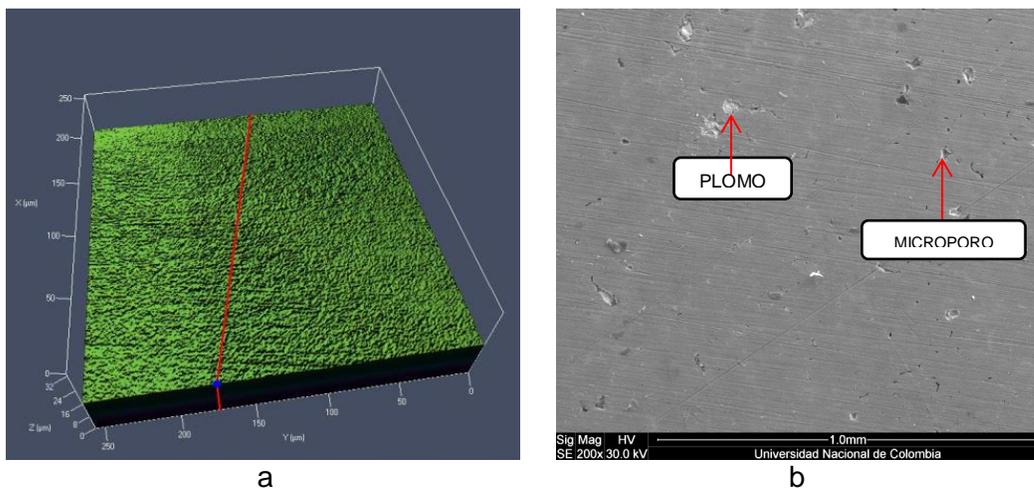
Foto. 2-5: Banco de lija Universidad Nacional



2.4.1.1 Rugosidad en el Bronce

La rugosidad media aritmética areal conseguida con el procedimiento de lijado en la superficie de las probetas de bronce fue en promedio $Ra\ 0.142\ \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $0,034\ \mu\text{m}$. Las superficies de las probetas, previas al ensayo presentan crestas e imperfecciones comunes por la preparación de la superficie foto 2.6a, en la microscopia electrónica de barrido (SEM) se muestran microporosidades e inclusiones de plomo inherentes del proceso de fabricación de las paletas de la bomba hidráulica foto 2.6b.

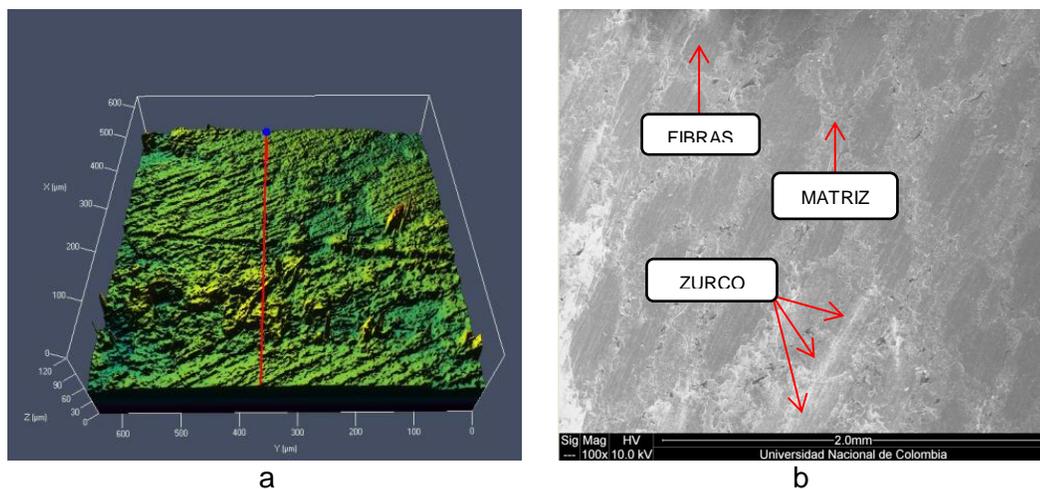
Foto 2-6: Topología inicial de las probetas de bronce a) imagen Confocal (izquierda) b) imagen SEM (derecha)



2.4.1.2 Rugosidad en el material compuesto

La rugosidad media aritmética areal conseguida con el procedimiento de lijado en la superficie de las probetas de material compuesto fue en promedio $Ra\ 3,0108\ \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $0,3159\ \mu\text{m}$. Las superficies de las probetas previas al ensayo presentan crestas e imperfecciones comunes por la preparación de la superficie foto 2-7a, en la microscopia electrónica de barrido (SEM) se muestra surcos inherentes del proceso de lijado foto 2-7b.

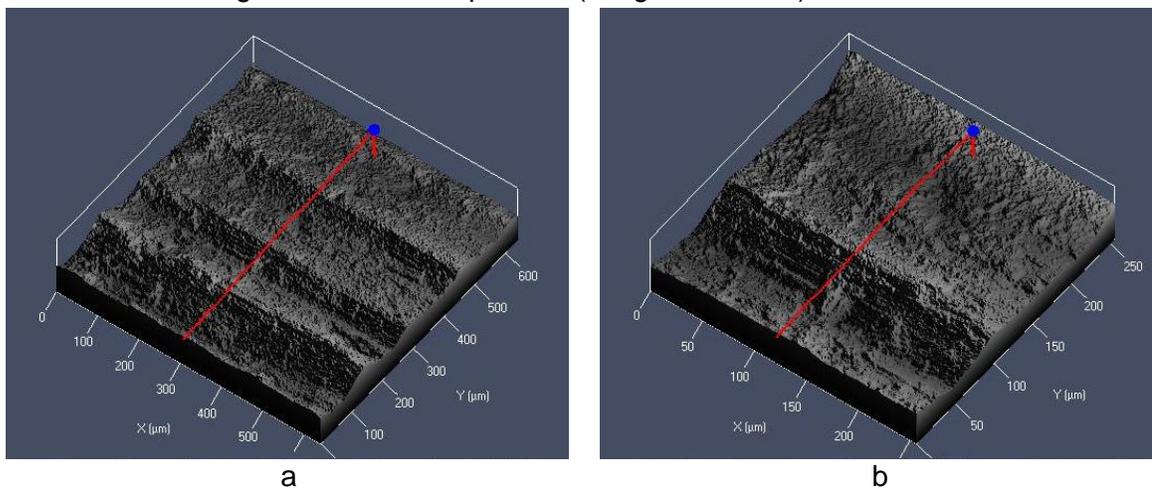
Foto 2-7: Topología inicial de las probetas de material compuesto a) imagen confocal (izquierda) b) imagen SEM (derecha)



2.4.1.3 Rugosidad hierro fundido (Anillo)

La rugosidad aritmética areal que se obtuvo después del procedimiento de maquinado del anillo, fue en promedio de R_a 4,734 μm . En la foto 2-8 a y b, se observan imperfecciones mixtas (Rugosidades y Ondulaciones) en la superficie de la pieza, en la dirección en la cual se produjo el arranque de material durante el maquinado.

Foto 2-8: Rugosidad del anillo probeta (imagen confocal).



2.4.2. Dureza

Se tomó la resistencia a la penetración del bronce en un durómetro marca WOLPERT modelo HT y la dureza del material compuesto en un durómetro WILSON modelo 3 TTBB, ambos equipos del laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia, bajo el ensayo de dureza Rockwell, que es un método que se basa en la medición de la profundidad de penetración de una herramienta bajo la acción de una carga predeterminada; para el bronce se tomó la medida bajo dureza Rockwell B y para el material compuesto se tomó la medida bajo dureza Rockwell R.

2.4.2.1 Dureza en el bronce

Las pruebas de dureza sobre el bronce, se realizaron aplicando una carga fija de 100 Kgf con un penetrador de punta de bola de 1/16" sobre la superficie lisa de la muestra, Las medidas de dureza se tomaron en la superficie del material en sección transversal, esta dirección fue tomada para tener un promedio más real de la lectura de dureza. Los resultados de las durezas se relacionan en la tabla 2-12.

Tabla 2-12: Dureza de bloque Bronce

MEDICIÓN	ROCKWELL B
1	70
2	72
3	69
4	67
5	70
Promedio	69,8
Desviación estándar	1,48

2.4.2.2 Dureza en el material compuesto

La dureza en el material compuesto se obtuvo en el durómetro WILSON TT, utilizando como referencia el standard ASTM D785 [7], la cual sugiere utilizar una bola de 0,5" para

cargar la probeta por un tiempo de 10 s, luego retirar la carga y esperar 15 segundos para registrar el valor de la dureza de la probeta en Rockwell R, (Tabla 2-13).

Tabla 2-13: Dureza de bloque de material compuesto

MEDICIÓN	ROCKWELL R
1	102
2	105
3	99
4	104
5	98
6	105
7	107
8	103
9	98
10	100
Promedio	102
Desviación. Estándar	3.21

2.4.2.3 Dureza en el anillo

Al material del anillo se le realizó prueba de dureza con una carga de 150 kgf con penetrador de punta de diamante [8], registrando en promedio 28,4 HRC, tabla 2-14

Tabla 2-14: Dureza anillo

MEDICIÓN	ROCKWELL C
1	27
2	26
3	31
4	28
5	30
Promedio	28,4
Desviación estándar	2,07

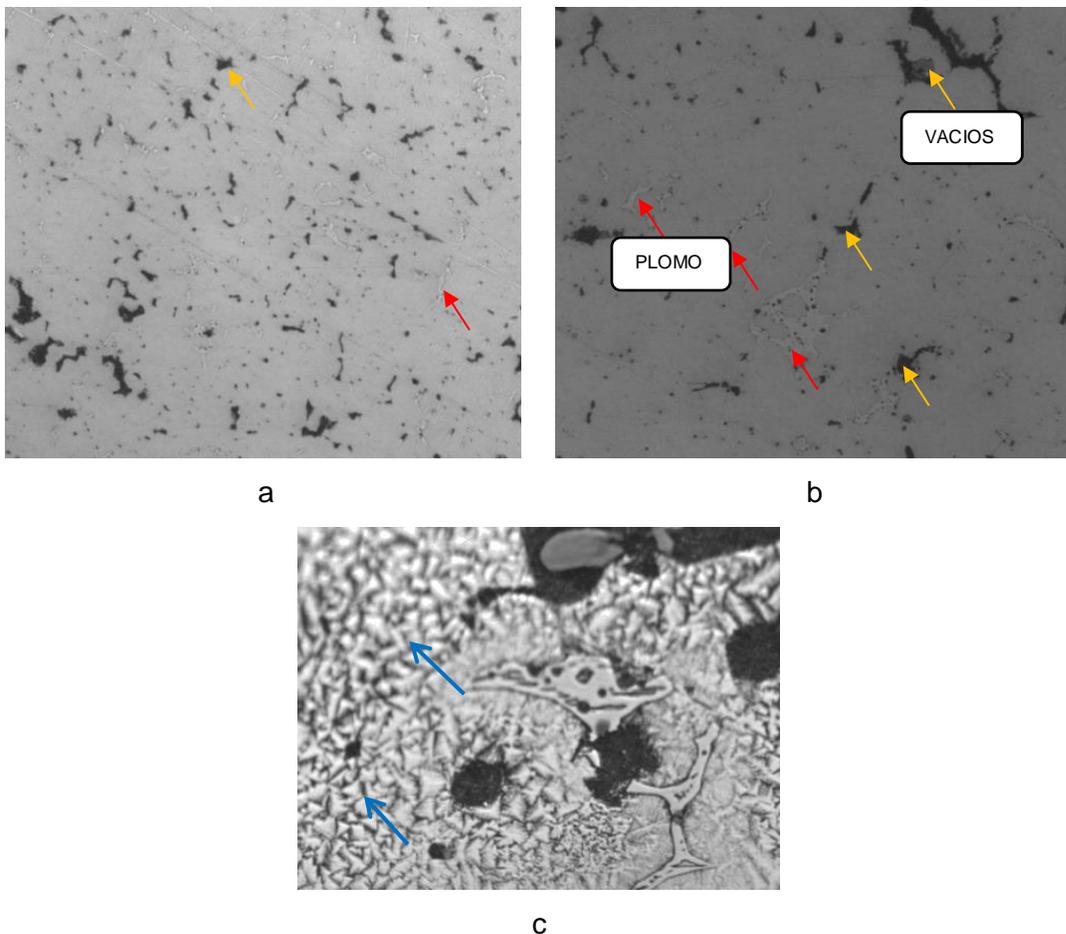
2.4.3. Metalografía y Microfotografía

Se realizó un análisis microscópico seguido de un estudio de la microestructura, en el bronce, el material compuesto y en el anillo.

2.4.3.1 Metalografía al Bronce

La metalografía se le realizó al Bronce, uno de los materiales de las paletas de la bomba hidráulica. En la foto 2-9 a y b, el bronce fue atacado con cloruro férrico para observar con más claridad la dispersión del plomo que se encuentra en la matriz. En la microestructura se observa segregación dendrítica típica de un material fundido en molde flechas azules foto 2-9 c, este material contiene plomo poco distribuido y formando aglomerados en la matriz (flechas rojas), la cual consiste de una solución sólida de cobre y estaño, se observa cavidades en negro (flechas amarillas), son vacíos que alojaban plomo, desalojados en el proceso de pulido.

Foto 2-9: Metalografía del bronce a) 100x b) 200x c) 800 Flechas amarillas son vacíos que alojaban plomo, flechas rojas son aglomerados de plomo, flechas azules granos de solución sólida de cobre con segregación dendrítica.

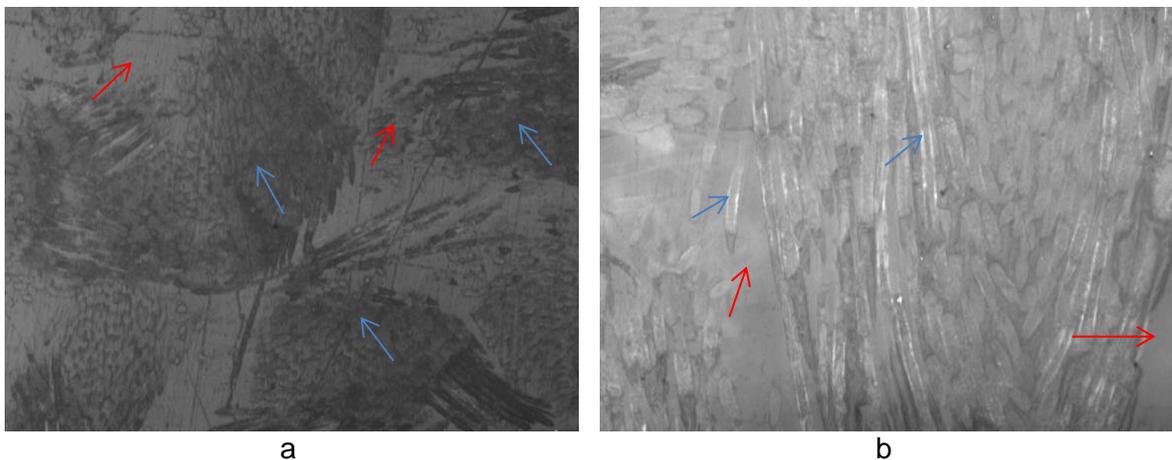


El plomo es un material blando, por tanto, entre más cantidad de plomo y menos estaño tenga el bronce, menor será su dureza. El plomo es un material lubricante sólido que disminuye el coeficiente de fricción de los materiales en contacto.

2.4.3.2 Microfotografía del material compuesto

En las microfotografías se observa un material reforzado con fibras largas, flechas azules, orientadas dentro de una matriz flechas rojas a la que se incorporan de distintas formas, foto 2-10. Las fibras como material de refuerzo aumentan la resistencia del compuesto principal (matriz), en general se observan fibras continuas y entretrejidas, distribuidas aleatoriamente.

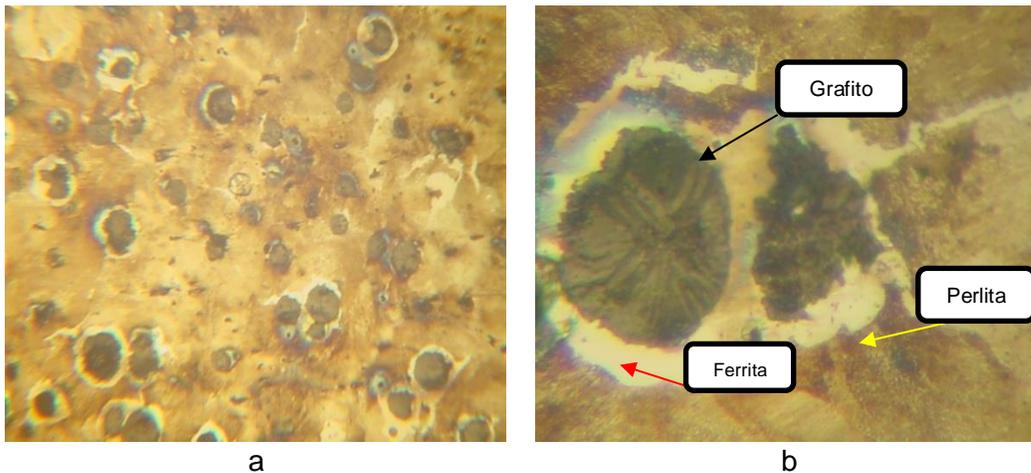
Foto 2-10: Microfotografía del material compuesto a) Microfotografía a 100x b) Microfotografía a 200x. Flechas rojas muestran la matriz fenólica, flechas azules muestran las fibras de Aramida con distribución aleatoria.



2.4.3.3 Metalografía material del anillo

La fundición nodular foto 2-11 tiene una estructura de colada que contiene partículas de grafito en forma de pequeños nódulos esferoidales flecha negra, rodeados de ferrita flecha roja, en una matriz metálica dúctil de perlita flecha amarilla [33]. Este tipo de fundición se caracteriza porque en ella el grafito aparece en forma de esferas minúsculas y así la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando se encuentra en forma laminar, esto da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que en la fundición gris ordinaria

Foto 2-11: Metalografía del material del anillo a) 100x b) 400x. Atacado con nital al 3%.



2.4.4 Caracterización química

Todos los materiales están integrados por átomos y/o moléculas, los que se organizan de diferentes maneras, dependiendo del material que se trate y el estado en el que se encuentra; A continuación se presenta los resultados de la composición química del bronce y de la espectroscopia del material compuesto.

2.4.4.1 Composición Química Para El Bronce

La composición química del bronce fue realizada por Guivaim Ltda, se relaciona la composición química del bronce, en la tabla 2-15.

El análisis químico realizado al material de las paletas de bronce, permitió verificar que el contenido de los elementos (% en peso) está dentro de los intervalos de composición química establecidos para un bronce al plomo C93700 designación UNS [34].

Tabla 2-15: Composición química Bronce (% en peso).

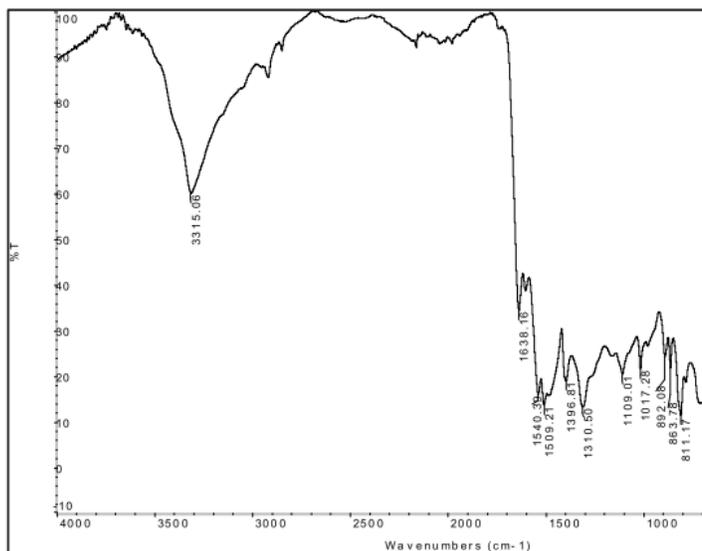
	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Sb	Si	S	P
Promedio	79,831	0,305	10,037	9,525	0,179	0,091	0,001	0,025	0,006

Es un bronce para uso de cojinetes de alta velocidad y alta presión, utilizado normalmente en bombas, impeler, aplicaciones resistentes a la corrosión, desgaste, entre otras.

2.4.4.2 Espectroscopia infrarroja del material compuesto

En la figura 2-5 se observan vibraciones comunes alrededor de 3200 y 3400 cm^{-1} , las cuales son atribuidas a los estiramientos del enlace OH, pequeñas vibraciones alrededor de 3060 y 2900 cm^{-1} asociados al estiramiento del enlace CH del anillo fenólico y al estiramiento CH de puentes metilénicos (CH_2) entre anillos aromáticos. Una señal alrededor de 1600 cm^{-1} la cual es característica de la elongación del enlace $\text{C}=\text{C}$ en el anillo aromático, un pico alrededor de 1500 cm^{-1} ocasionadas por la vibración del anillo aromático y las sustituciones en las posiciones orto para el anillo fenólico, vibraciones en las regiones, 820-855, y 912-917 cm^{-1} las cuales pueden ser asignadas a las sustituciones orto, para el anillo aromático y la deformación del anillo aromático respectivamente, una banda alrededor de 1008 cm^{-1} que se atribuye a la vibración de grupos aminos [15]. Este espectro es característico de una resina polifenólica, reforzada con fibras de Aramida.

Figura 2-5: Espectrofotografía Infrarroja - Compuesto



2.4.4.3 Composición química del material del anillo de la bomba

La composición química del bronce fue realizada en el Laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, se relaciona la composición química, en la tabla 2-1. El análisis químico realizado al material del anillo de la bomba, permitió verificar que el contenido de

los elementos (% en peso) está dentro de los intervalos de composición química establecidos para una fundición nodular ferrito perlítica, [33].

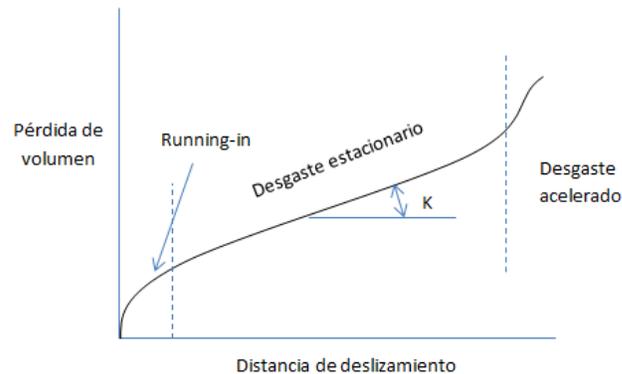
Tabla 2-16: Composición química del material del anillo-bomba (% en peso).

	Fe	C	Si	Mn	Cr	S	B	Al	P
Promedio	79,370	>4.572	<0,059	0,267	0,017	0,017	0,002	0,027	0,014
	Sn	Cu	Ti	V	Mo	Zn	Ni	Pb	Mg
	<0,001	0,055	0,009	0,010	0,006	0,024	0,013	>0,007	0,048

2.5. Modelo matemático ajustado al desgaste

Si se grafica la pérdida de masa de un tribosistema durante el tiempo (o la distancia recorrida), se obtiene una forma muy similar a la mostrada en la Figura 2-6. En el período denominado de desgaste estacionario se puede aplicar una expresión llamada la ecuación de Archard, que consiste en establecer las variables que participan en el fenómeno, y definir una constante K característica del proceso que reúna los efectos de esas variables.

Figura 2-6: Variación de la tasa de desgaste con la distancia del deslizamiento [29].



Esa expresión se indica en (2.6). En el período de desgaste estacionario se puede aplicar la ecuación de Archard [25], que establece las variables que intervienen en el fenómeno, y define una constante K característica del proceso que reúne los efectos de esas variables.

$$V = \frac{kWs}{H} \quad (2.6)$$

El coeficiente de desgaste K representa el comportamiento de un tribosistema pero, aunque se plantea como una constante, depende de las condiciones particulares de trabajo. Es posible establecer con más precisión la vida útil de los elementos que participan en el proceso de desgaste, si en el resultado de la experimentación se cuenta con el valor del coeficiente de desgaste K .

2.6. Resumen de los parámetros de los Materiales.

En la tabla 2-17 se muestran en resumen los resultados de los parámetros que influyen en el desgaste de los materiales a ser ensayados, estos datos son entrada para el desarrollo experimental.

Tabla 2-17: Parámetros de los materiales sometidos a Desgaste.

Material	Fuerza entre Paletas y anillo		Fuerza en probetas	Presión de Contacto	Dureza	Rugosidad	Numero de probetas
	Fmin (N)	Fmax (N)	Fmax (N)	Pcmax (MPa)	Rockwell	Ra (μm)	
Bronce	241,92	268,34	45,69	71,55	69.8 HRB	0,185	30
Compuesto	40,81	45,29	7,72	56,11	102 HRR	1,635	30
Anillo	--	--	--	--	28,4 HRC	4,734	2*

*Un anillo se utilizó en las pruebas de desgaste con las probetas de bronce y el otro con las probetas de compuesto.

3. Resultados de las pruebas

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste sobre las treinta probetas de bronce y las treinta probetas de compuesto, ensayadas en la máquina de desgaste en disco de la universidad nacional de Colombia. Se seleccionaron las probetas que mejor representaron cada combinación de variables para realizarles inspección óptica, confocal, SEM y materialografía cerca a las huellas de desgaste.

3.1 Desgaste en el tribómetro “block on ring”

Se realizaron ensayos de desgaste tipo "block on ring", standard ASTM G77 de 2010. Se desgastaron bloques de dos materiales (bronce y compuesto) contra anillos de fundición maleable ferrito perlítica, con dureza de 28,4 HRC bajo lubricación por humectación constante con lubricante valvulina API GL-1. Los ensayos se realizaron con cargas de 5N, 10N, 15N, 20N y 25 N durante un tiempo de treinta minutos, alcanzando una distancia de deslizamiento de 2000 m. Finalizada cada prueba se registró el cambio de peso en cada probeta.

3.1.1 Desgaste en el bronce

Se presenta una situación experimental con un factor de variación con cinco niveles y seis replicas, tabla 3-1. La respuesta que se obtuvo contiene variación aleatoria, atribuible a un número grande de factores que no se controlaron y que causaron la variación observable. Este tipo de variación está presente, aún bajo idénticas condiciones experimentales.

Tabla 3-1: Pérdida de peso de bloques de Bronce normalizados (0,1)

Niveles/Replicas	1	2	3	4	5	6
5N	0,24 %	0,51 %	0,58 %	0,78 %	1,28 %	2,74 %
10N	0,62 %	0,79 %	0,80 %	2,56 %	2,68 %	3,26 %
15N	0,53 %	1,04 %	1,15 %	1,61 %	2,58 %	2,94 %
20N	1,61 %	3,84 %	4,17 %	4,66 %	36,61 %	48,29 %
25N	1,12 %	1,23 %	1,48 %	1,6 %	1,82 %	2,31 %

3.1.1.1. Selección de probetas para caracterización de resultados

De los resultados y probetas obtenidos en los ensayos, se realizó una depuración descartando los datos que se salieron de las tendencias encontradas y se seleccionó para inspección, la probeta que para cada carga tuviese la huella más homogénea y cuya pérdida de peso estuviera lo más cerca a la media entre las réplicas representativas.

Para el caso de las probetas ensayadas a 5 N, en inspección visual se observó una huella irregular en la probeta 28, producto de la rotación de la probeta durante la prueba foto 3-1, por ello se descartó para caracterización de la huella. La probeta 11 registró una pérdida de peso de 0,0274 g, valor alejado de la media de los ensayos más representativos de las demás probetas, esto pudo estar influenciado por falta de lubricación o por fluctuaciones en el sistema neumático de aplicación de fuerza. Considerando el tamaño de las huellas de desgaste y el valor elevado de pérdida de peso de las probetas 3 y 11, no se tuvieron en cuenta en el análisis estadístico, tabla 3-2.

Las probetas 19 y 24 registraron huellas deformes, sin embargo el peso perdido estuvo cerca del valor promedio. Por la característica homogénea de la huella y por su valor cercano al promedio de 0,0053 g, la probeta 19 es la que mejor representa la prueba de desgaste para 5 N, por esta razón se escogió para la caracterización de la huella de desgaste.

La depuración de datos para el análisis estadístico y la selección de las probetas representativas a caracterizar a 10, 15, 20 y 25 N se muestran en el Anexo A.

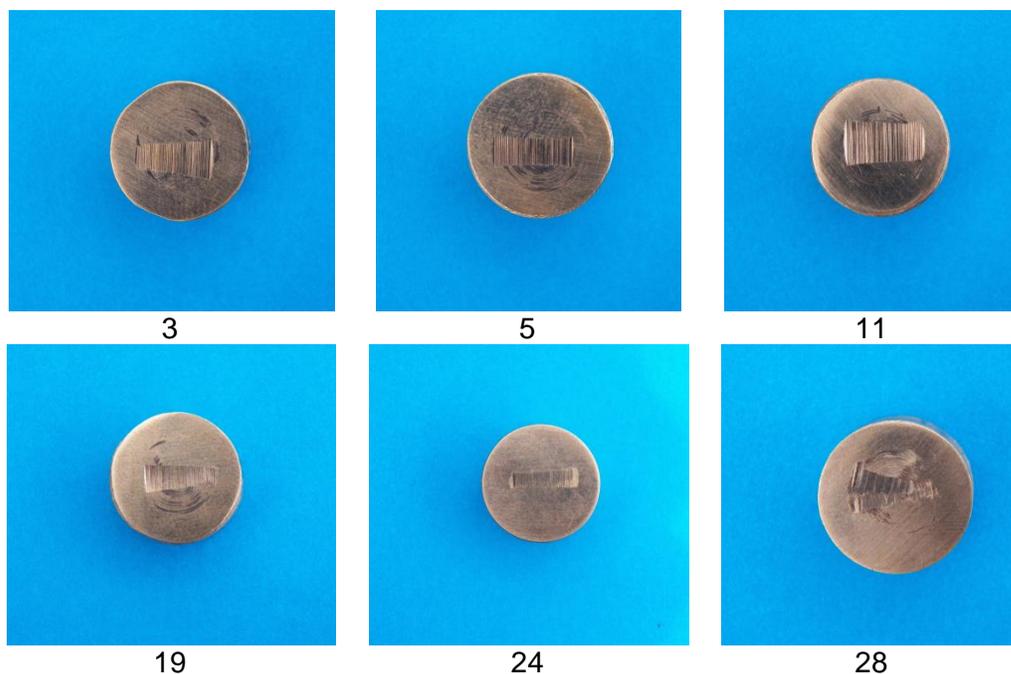
Para el nivel de 10 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 7, 16 y 30, quedaron para el análisis los datos de las probetas 17, 21 y 23, para el nivel de 15 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 13 y 27, quedaron para el análisis los datos de las probetas 2, 8, 18 y 25, para el nivel de 20 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 9 y 12, quedaron para el análisis los datos de las probetas 10, 14, 15 y 26 y para el nivel de 25 N se descartó el dato recolectado en el ensayo de la probeta 6, quedaron para el análisis los datos de las probetas 1, 4, 20, 22 y 29, los criterios de depuración se muestran en el anexo A.

Tabla 3-2: Datos en rojo excluidos para el análisis estadístico, ensayo a fuerza de 5 N sobre el bloque de bronce.

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
3	14,2636	5	14,2508	0,0128
5	15,107	5	15,0992	0,0078
11	14,3825	5	14,3551	0,0274
19	13,993	5	13,9879	0,0051
24	14,0982	5	14,0958	0,0024
28	14,0393	5	14,0335	0,0058
Promedio	14,309375		14,3041	0,005275
Desviación estándar	0,53348982		0,53190842	0,00223215

Nota: Para el cálculo del promedio y de la desviación estándar no se tuvo en cuenta los datos de las probetas 3 y 11.

Foto 3-1: Huellas de contacto de probetas sometidas a 5 N

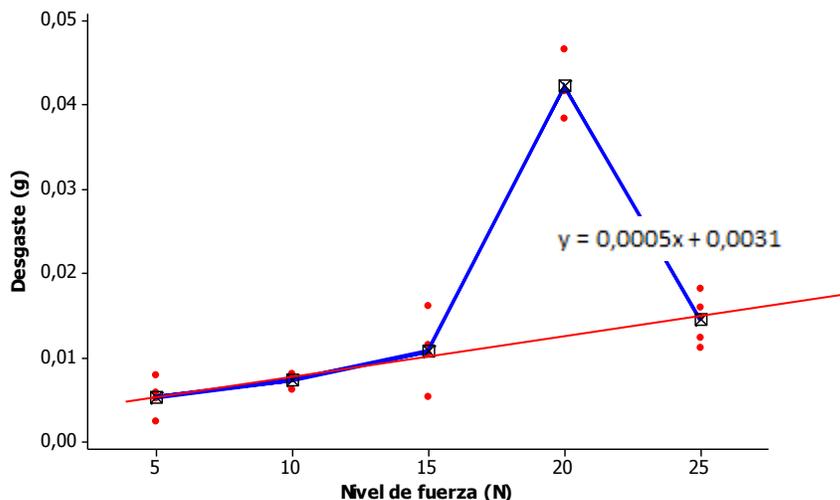


3.1.1.2. Comportamiento del desgaste en el bronce.

Para cuantificar la resistencia de desgaste se empleó la técnica de diferencia de peso (antes y después del ensayo) utilizando una balanza de precisión. Los resultados reportados resultaron de al menos tres datos efectivos del ensayo para cada nivel. Con

los datos seleccionados en cada uno de los niveles (5N, 10N, 15N, 20N, 25N), se graficó el comportamiento de la pérdida de masa en los ensayos de bronce, figura 3-1.

Figura 3-1: Valores individuales de desgaste vs niveles de fuerza para los bloques de bronce.



Nota: En la línea de tendencia en rojo, se generó teniendo en cuenta los promedios de 5, 10, 15 y 25 N.

La variación de la tasa de desgaste con la carga normal se muestra en la figura 3-1. La tasa de desgaste se incrementó continuamente con la carga normal mostrando un incremento excesivo a 20 N, bajo esta condición de carga el bronce tuvo un comportamiento de desgaste acelerado, esto pudo estar influenciado por la condición de rigidez de la máquina “block on ring” modificada por la carga que aplica el sistema neumático sobre las probetas, pudiendo entrar todo el sistema en resonancia, aumentando la vibración, siendo este un factor propicio para el desgaste acelerado, la condición de desgaste estacionario se recuperó bajo la carga de 25 N.

Debido a que el valor de la pérdida de peso a 20 N se salió de la tendencia marcada por las demás cargas, se excluyeron estos resultados para hallar la línea de tendencia mostrada en la figura 3-1.

3.1.1.3 Análisis ANOVA de los datos de desgaste en el Bronce

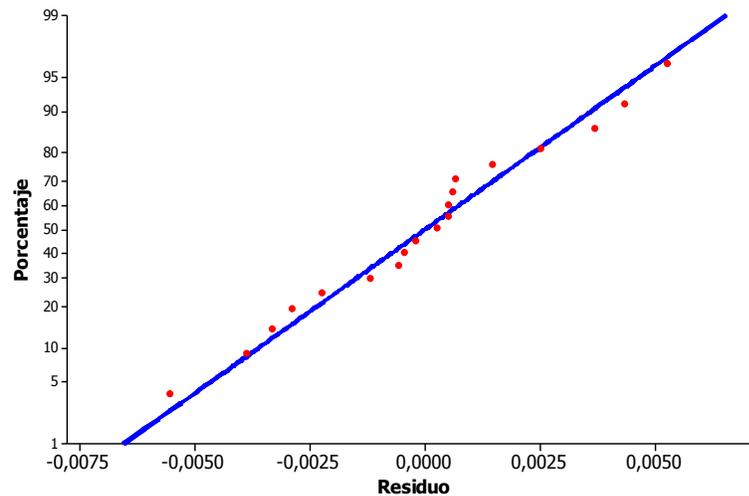
Para analizar las hipótesis planteadas en el diseño del experimento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) tabla 3-3, que permitió comparar los diferentes niveles bajo la variable cuantitativa de fuerza.

Tabla 3-3: ANOVA para prueba de pérdida de peso de las bloques de bronce.

FUENTE	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F - VALOR	P - VALOR
NIVELES	4	0,0028490	0,0007123	70,33	0
ERROR	14	0,0001418	0,0000101		
TOTAL	18	00,0029908			

Al ser el p-valor menor que el nivel de significancia 0,005, se tiene soporte para rechazar la hipótesis Nula H_0 , bajo esta condición se puede concluir que los niveles de fuerza afectan la tasa de desgaste.

En la figura 3-2, se muestra que el comportamiento de los resultados en general se encuentra alrededor de la línea media, lo que quiere decir que no hay ninguna desviación significativa de la presunción de normalidad para los residuales.

Figura 3-2: Probabilidad Normal de la pérdida de peso de los ensayos de desgaste del bronce.

Nota: En la gráfica se excluyeron los datos que se salieron de la tendencia en cada nivel de carga 5, 10, 15, 20 y 25 N.

3.1.1.4. Coeficiente de desgaste del bronce

La dispersión de los valores del coeficiente de desgaste, tabla 3-4, estuvo sujeta a diferentes causas, a las cuales se le hace referencia como fuentes de variabilidad (masa de cada cuerpo, las propiedades del material, geometría del par tribológico, propiedades

metalúrgicas, condiciones de carga, vibraciones, calor generado, atmósfera, cambios de las propiedades de los materiales), que no se controlaron en su totalidad en las pruebas de laboratorio.

El volumen del material que se eliminó por desgaste V en $[cm^3]$ es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento s en $[cm]$ y a la carga normal aplicada W en $[N]$, y es inversamente proporcional a la dureza H del más suave de los dos materiales, ecuación 2.6, la dureza se expresa en $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$ para obtener el coeficiente de desgaste adimensional.

$$V = \frac{KW_s}{H} \quad (2,6)$$

Tabla 3-4: Coeficiente de desgaste de los cinco niveles de fuerza para los bloques de bronce

FUERZA (N)	5	10	15	20	25
	--	--	0,0184	--	0,0118
COEFICIENTE DE DESGASTE (Adimensional)	0,0375	--	0,0084	0,0461*	0,0153
	--	0,0192	--	--	--
	0,0245	0,0189	0,0258	0,0501*	0,0142
	0,0115	0,0149	0,0166	0,0560*	0,0107
	0,0278	--	--	0,0193*	0,0175
Promedio	0,0253	0,017713264	0,0173	--	0,0139
Desviación estándar	0,0107	0,002432406	0,0071	--	0,0027
		Promedio general	0,01633		
		Desviación estándar general	0,0020		

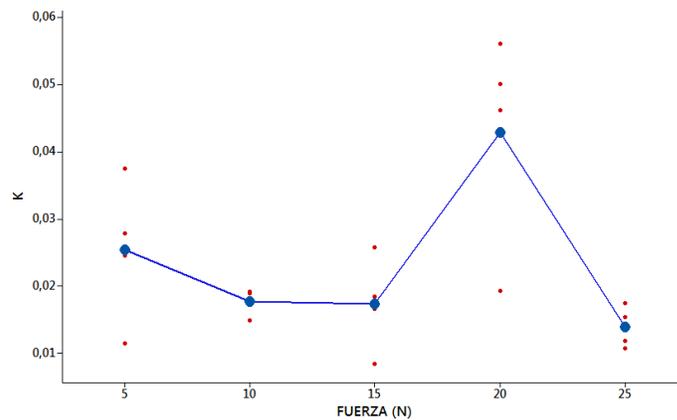
Nota: -- Datos eliminados por estar fuera de tendencia en cada nivel. * Datos no se tuvieron en cuenta por estar fuera de tendencia marcada por las demás cargas.

El promedio general del coeficiente de desgaste K representa el comportamiento del tribosistema tabla 3-4 pero, aunque se plantea como una constante, depende de las condiciones particulares de trabajo. La figura 3-3, muestra una alta dispersión en los

niveles de 5 N y 20 N, atribuibles a las variables que no se controlaron en las pruebas de laboratorio.

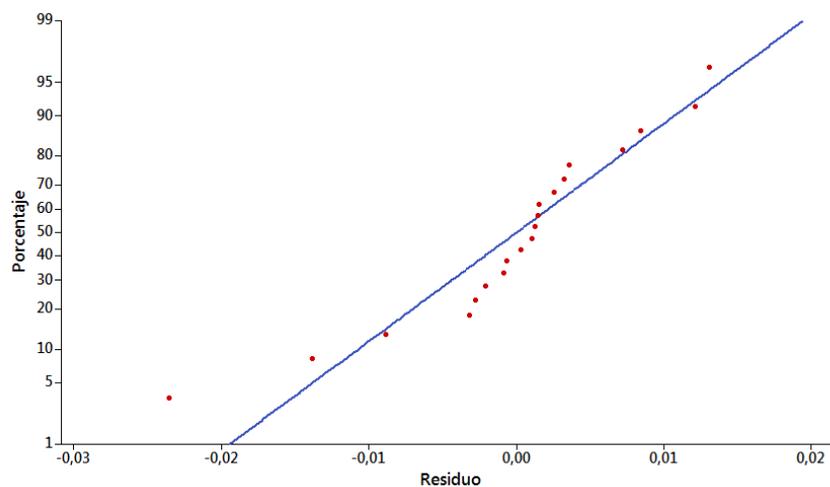
Ya que los datos para 20 N se salen de la tendencia marcada por las demás cargas, no se tuvieron en cuenta para el cálculo del coeficiente de desgaste promedio general tabla 3-4.

Figura 3-3: Valores individuales de K vs fuerza para bloques de bronce



El gráfico 3-4, muestra que el comportamiento de los resultados en general se encuentra alrededor de la línea media, indicando que los residuos se distribuyen normalmente, sin embargo se observa un valor atípico correspondiente a un dato del nivel de fuerza 20N coeficiente de desgaste 0,0193, registrado por la probeta 9, valor que puede estar influenciado por variables aleatorias.

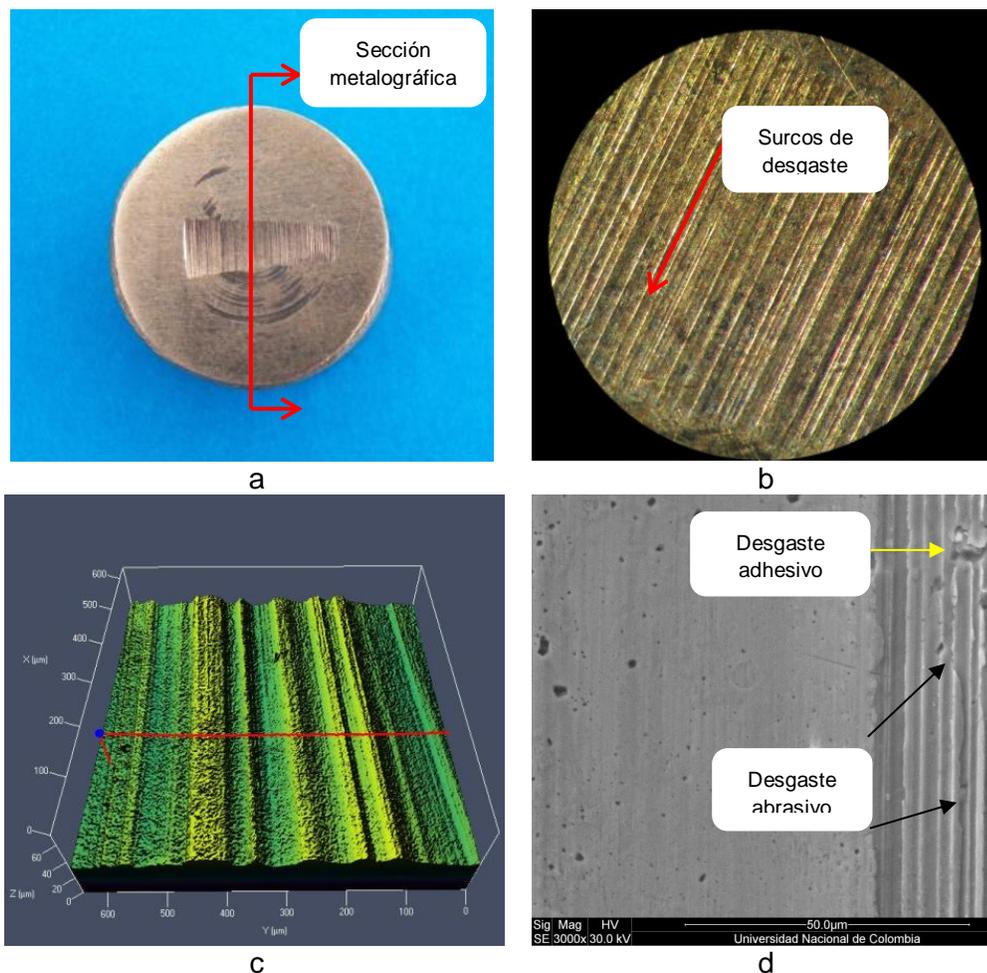
Figura 3-4: Probabilidad normal de K para el bronce



3.1.1.5 Caracterización de la huella de desgaste del bronce

Para la probeta 19 que fue la escogida a inspeccionar para la carga de 5 N, en la Figura 3-5 se puede apreciar que el desgaste ocasionado durante el ensayo produjo una huella que permitió visualizar la morfología y realizar la caracterización mediante diferentes técnicas (Inspección óptica, Confocal, SEM y metalografía), las cuales permitieron identificar los mecanismos de desgaste que se presentaron en los ensayos.

Figura 3-5: Inspección de la zona desgastada de la probeta 19 de bronce ensayada a 5 N. a) Foto general, b) estereoscopia a 90X, c) Confocal, d) SEM

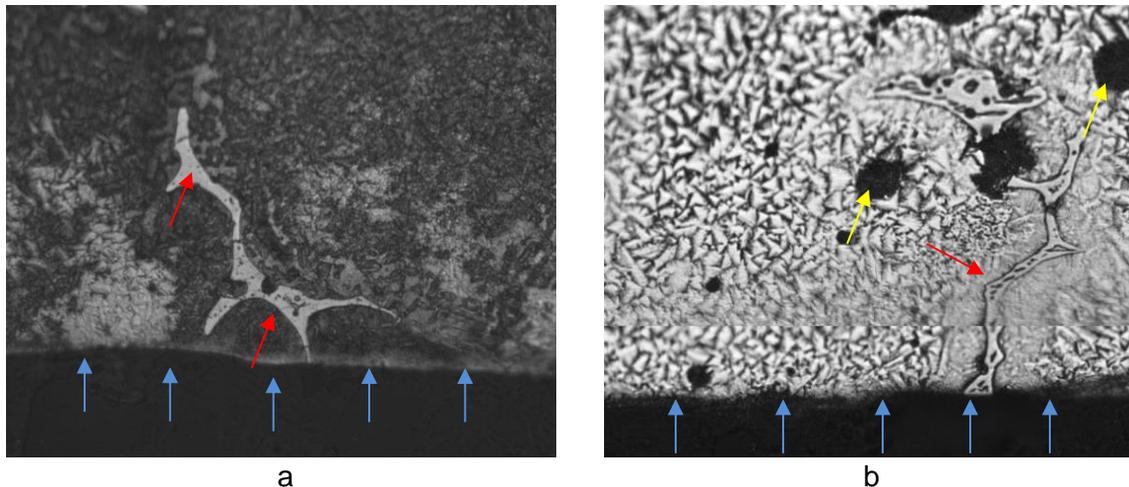


En la figura 3-5 se observa una geometría de huella no uniforme (a), debida a la probable desalineación entre bloque y anillo durante la prueba, condición debida a la falta de rigidez del equipo. Se hace evidente la aparición de desgaste del tipo arado (b), longitud entre picos de alrededor de 50 a 100 µm (c), se observan canales claramente

diferenciados en un solo sentido, se presenta un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo, donde este último predomina). En general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión, considerando también una acumulación de material desgarrado en el borde de los surcos de desgaste, identificando mecanismos de abrasión (d). La caracterización de las huellas de las probetas de los otros niveles se muestra en el Anexo B.

La metalografía se realizó, en una sección metalográfica como la ilustrada en la figura 3-5 a, con el objetivo de ver la huella de desgaste de perfil. En la foto 3-2 se puede notar que no hay deformación plástica superficial a gran escala, cambio microestructural o fases especialmente desgastadas. Las metalografías de las demás probetas de bronce analizadas para las otras cargas se muestran en el anexo B.

Foto 3-2: Microfotografía en la zona de desgaste de la probeta 19 ensayada a 5 N. Flechas rojas señalan aglomerados de plomo, las flechas amarillas señalan cavidades que alojaban plomo, flechas azules señalan que no se produjo deformación plástica, atacadas con cloruro férrico.



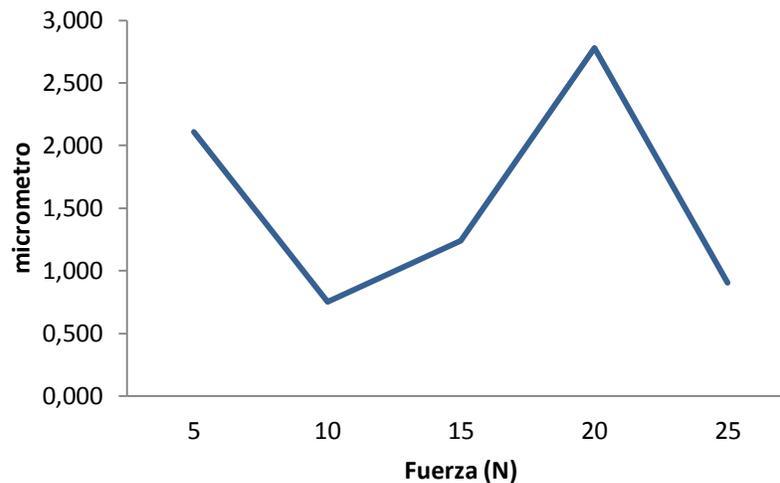
3.1.1.6 Rugosidad en la huella de desgaste del bronce

Durante el contacto tribológico entre las piezas sometidas a desgaste, se obtiene para cada superficie una rugosidad que depende de las características de los materiales del par y de las condiciones de carga. El determinar los parámetros de rugosidad superficial es muy importante para cada caso concreto de condiciones de carga. Ya que en muchos

casos permite disminuir exigencias de acabado superficiales y evitar operaciones de maquinado.

A los bloques se les realizaron mediciones de rugosidad superficial a lo largo del eje transversal de la huella de desgaste, esto fue útil para verificar la relación de rugosidad por nivel de carga, figura 3-6.

Figura 3-6: Rugosidad área en huellas de contacto del Bronce por nivel de fuerza



3.1.2 Desgaste en el material de compuesto

Al igual que en los resultados obtenidos en el bronce, en el compuesto también se obtuvo una variación aleatoria, atribuible a un número grande de factores, que no se controlaron y que causaron la variación observable Tabla 3-5 , Este tipo de variación está presente, aún bajo idénticas condiciones experimentales.

Debido a la absorción del lubricante de los bloques de compuesto, no se pudo realizar la medición de pérdida de peso mediante la balanza analítica, por lo que se procedió a medir las huellas de desgaste, procedimiento amparado por el standard ASTM G77 de 2010, y a graficarlas en “solidWorks” para calcular el volumen perdido en los ensayos figura 3-7. Con la relación de volumen inicial de los bloques de compuesto antes de someterlos a desgaste y con el peso inicial de estos, se calculó la densidad del material compuesto; con el volumen perdido en las huellas de desgaste y la densidad del material se calculó el peso perdido en los bloques después de los ensayos, tabla 3-5

Tabla 3-5: Pérdida de peso de bloques de compuesto normalizado de (0,1)

Niveles/Replicas	1	2	3	4	5	6
5 N	0,27 %	0,47 %	0,08 %	0,04 %	0,04 %	0,03 %
10 N	0,47 %	0,22 %	0,18 %	0,09 %	0,11 %	0,08 %
15 N	0,39 %	0,32 %	0,42 %	0,26 %	0,08 %	0,14 %
20 N	0,77 %	0,63 %	0,56 %	0,35 %	0,20 %	0,28 %
25 N	4,61 %	6,01 %	0,39 %	0,36 %	0,28 %	0,31 %

3.1.2.1. Selección de probetas para caracterización de resultados

Los criterios de selección para este material fueron similares a los utilizados con el bronce, mediante la caracterización de la huella de desgaste en solidWorks, figura 3-7 y verificando los resultados de pérdida de peso, se realizó una selección de las probetas que mejor comportamiento tuvieron en las pruebas. En la Tabla 3-6 se muestran los resultados obtenidos en la prueba a 5 N. Para el nivel de 10 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 8, 9 y 15, quedaron para el análisis los datos de las probetas 22, 23 y 30, para el nivel de 15 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 2, 10, 12 y 13, quedaron para el análisis los datos de las probetas 27 y 28, para el nivel de 20 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 3, 4, 6 y 14, quedaron para el análisis los datos de las probetas 16 y 17 y para el nivel de 25 N se descartaron los datos recolectados en los ensayos de las probetas 1 y 7, quedaron para el análisis los datos de las probetas 18, 21, 26, y 29, los criterios de depuración se muestran en el anexo C. Las probetas seleccionadas en cada nivel de carga se utilizaron para el análisis estadístico y para la caracterización mediante SEM, confocal, inspección visual y materialografía, Anexo D.

Para el caso de las probetas ensayadas a 5N, se observó una diferencia en cuanto a tamaño de huella en las probetas 5 y 11, las cuales registraron altos valores de desgaste, por encima del valor promedio del nivel (0,000475 g). En el restante de probetas se observó homogeneidad en la geometría de las huellas, los valores de peso perdido están cercanos al valor promedio del nivel (0,000475 g). Por las características de la huella y por su valor cercano al promedio, la probeta 24 fue la que mejor representó la prueba de desgaste a 5 N.

Tabla 3-6: Datos en rojo excluidos para el análisis estadístico, ensayo a 5 N sobre bloque de compuesto.

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	Volumen Inicial Bloques (mm^3)	Densidad Compuesto ($\frac{gr}{mm^3}$)	F (N)	Volumen perdido (mm^3)	Peso perdido (gr)
5	1,9713	1447,24323	0,00136211	5	1,97	0,0027
11	2,2568	1608,1065	0,00140339	5	3,35	0,0047
19	2,1331	1557,98777	0,00136914	5	0,56	0,0008
20	1,9686	1447,24323	0,00136026	5	0,26	0,0004
24	2,2257	1611,71149	0,00138097	5	0,30	0,0004
25	2,3508	1643,4495	0,00143039	5	0,23	0,0003
Promedio	2,16955	1565,098	0,00138519		0,3375	0,000475
Desviación estándar	0,16094915	86,1240911	3,1305E-05		0,15107945	0,00022174

Figura 3-7: Geometría de las huellas y volumen perdido , calculado para 5N

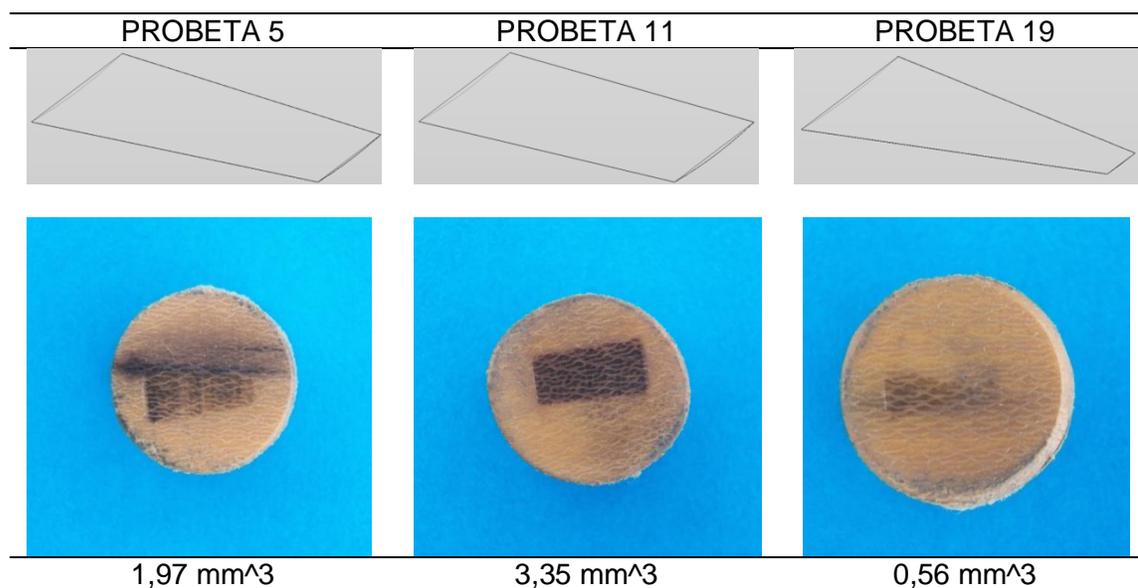
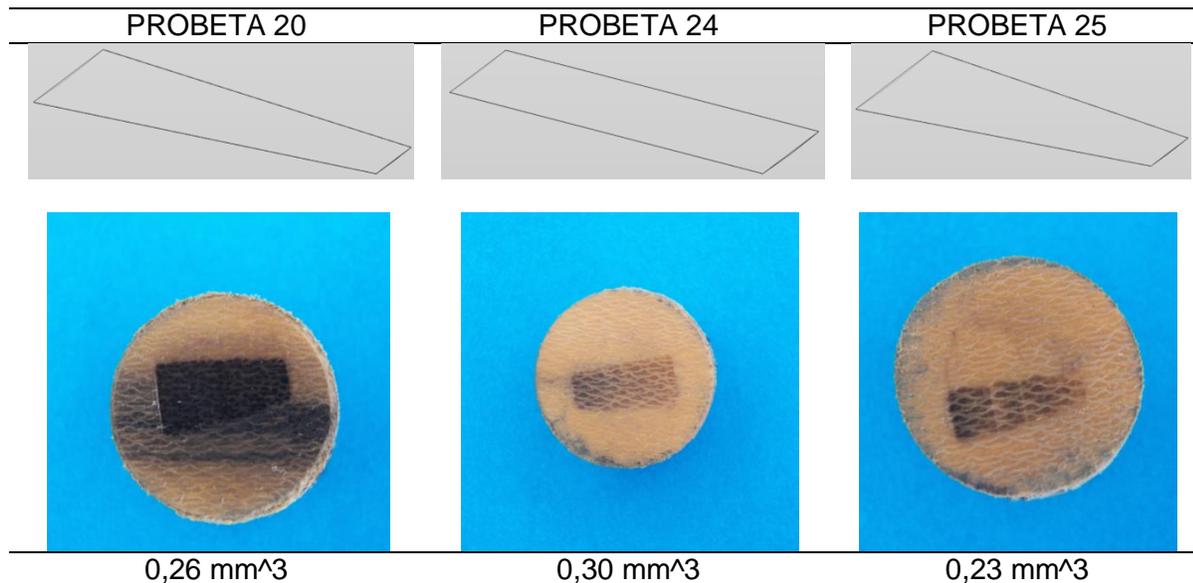
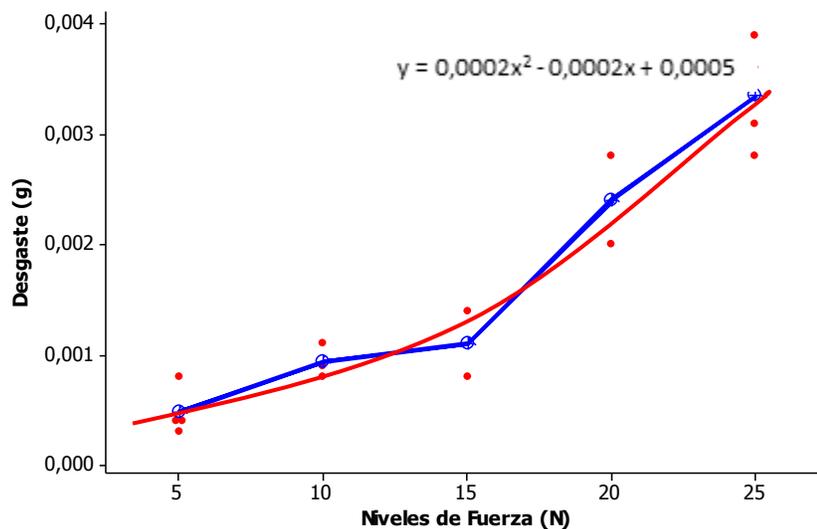


Figura 3-7: Geometría de las huellas y volumen perdido (Continuación)

3.1.2.2. Comportamiento del desgaste en el compuesto.

Realizando el análisis descrito en el numeral 3.1.1.2 en cada uno de los niveles, se graficó el comportamiento de la pérdida de peso en los ensayos del compuesto, figura 3-8, en la cual se observa una tendencia de aumento de pérdida de peso con respecto al incremento de la fuerza normal, siguiendo una ley exponencial.

Figura 3-8: Valores individuales de desgaste vs niveles de fuerza para los bloques de compuesto.

3.1.2.3. Análisis ANOVA de los datos de desgaste en el compuesto

Para analizar las hipótesis planteadas en el diseño del experimento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) tabla 3-7, que permitió comparar los diferentes niveles bajo la variable cuantitativa de fuerza.

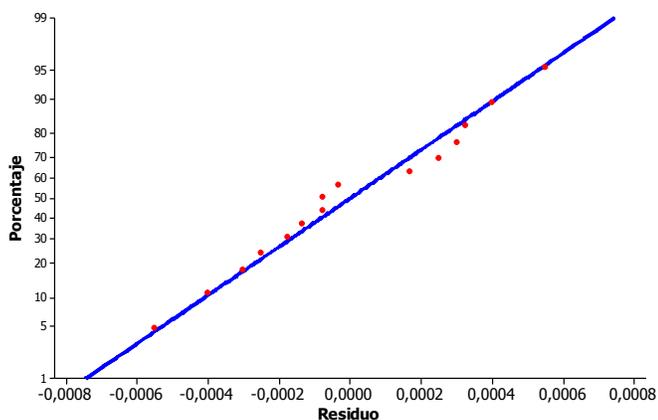
Tabla 3-7: ANOVA para prueba de pérdida de peso de los bloques de compuesto

FUENTE	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADOS MEDIOS	F - VALOR	P - VALOR
NIVELES	4	0,0000204	0,0000051	35,73	0
ERROR	10	0,0000014	0,0000001		
TOTAL	14	0,0000218			

Al ser el p-valor menor que el nivel de significancia 0,005, se tiene soporte para rechazar la hipótesis Nula H_0 , bajo esta condición se puede concluir que los niveles de fuerza afectan la tasa de desgaste.

Para conocer más a fondo cómo se comportó cada variable durante el estudio, y para comprobar los resultados obtenidos en el ANOVA, se realizó un análisis gráfico de probabilidad normal, figura 3-9, donde se muestra el comportamiento de los resultados depurados, en general se encuentran alrededor de la línea media, lo que quiere decir que no hay ninguna desviación significativa de la presunción de normalidad para los residuales.

Figura 3-9: Probabilidad Normal de la pérdida de peso de los ensayos de desgaste del compuesto



Nota: En la gráfica se excluyen los datos que se salieron de la tendencia en cada nivel de carga

3.1.2.4. Coeficiente de desgaste del compuesto

La dispersión de los valores del coeficiente de desgaste, tabla 3.8, está sujeta a diferentes causas, a las cuales se le hace referencia como fuentes de variabilidad, (masa de cada cuerpo, las propiedades del material, geometría del par tribológico, condiciones de carga, velocidad de rotación, vibraciones, calor generado, atmósfera y cambios de las propiedades de los materiales), fuentes de variabilidad que no se controlaron en su totalidad en las pruebas de laboratorio. El coeficiente de desgaste se calculó bajo la ecuación 2.6.

Tabla 3-8: Coeficiente de desgaste de los cinco niveles de fuerza para los bloques de compuesto

FUERZA (N)	5	10	15	20	25
	--	--	--	--	--
	--	--	--	--	--
COHEFICIENTE DE DESGASTE (Adimensional)	0,1150	--	--	--	0,1170
	0,0530	0,0706	--	--	0,1092
	0,0621	0,0858	0,0424	0,0741	0,0840
	0,0493	0,0607	0,0695	0,1053	0,0930
Promedio	0,0698	0,0723	0,0559	0,0897	0,1008
Desviación estándar	0,0305	0,0126	0,0191	0,0220	0,0150
		Promedio general	0,0777		
		Desviación estándar general	0,0176		

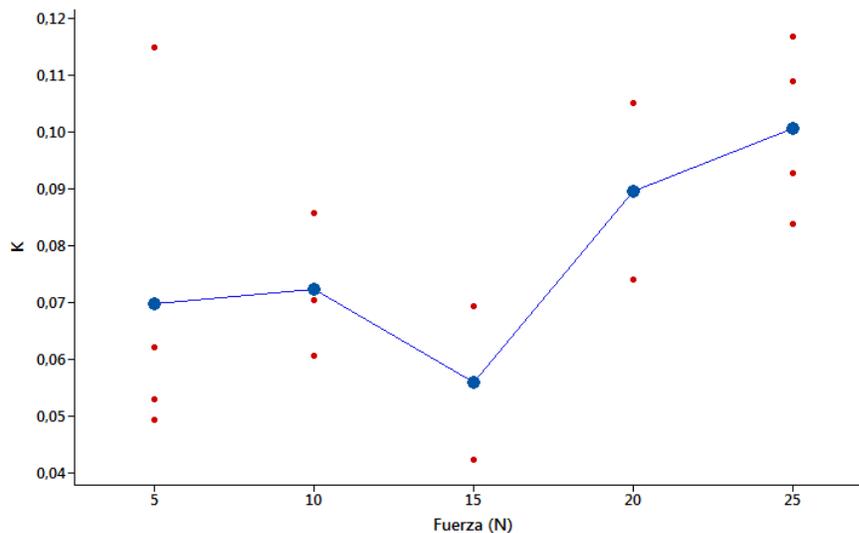
Nota: -- Datos eliminados por estar fuera de tendencia en cada nivel.

La figura 3-9, muestra dispersión en cada nivel de fuerza, atribuibles a la cantidad de variables que no se controlaron en las pruebas de laboratorio, en el nivel de fuerza de 5 N la variación es mucho mayor a la mostrada en los otros niveles.

El promedio general del coeficiente de desgaste K representa el comportamiento del tribosistema tabla 3-8 pero, aunque se plantea como una constante, depende de las condiciones particulares de trabajo. La figura 3-9, muestra una alta dispersión en los

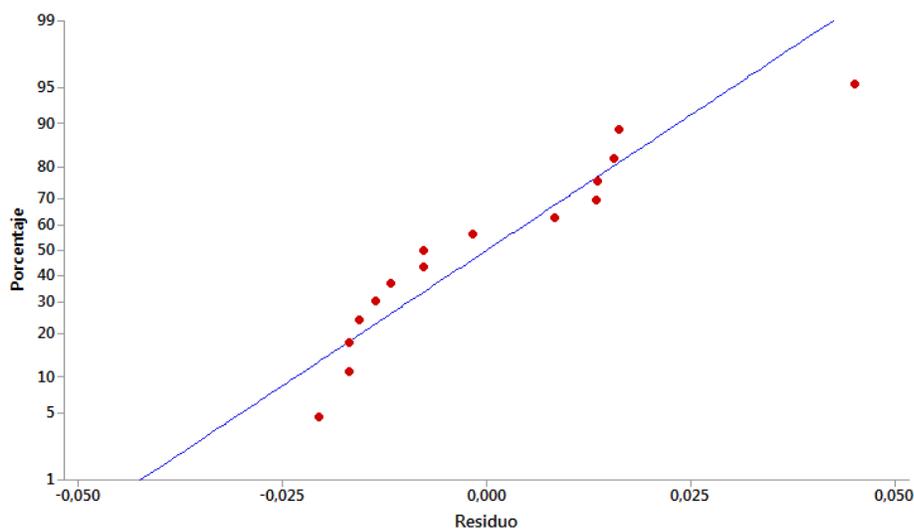
niveles de 5 N, 15 y 20 N, atribuibles a la cantidad de variables que no se controlaron en las pruebas de laboratorio

Figura 3-10: Valores individuales de K vs Fuerza para bloques de compuesto



El grafico 3-11, muestra que el comportamiento de los resultados en general se encuentran alrededor de la línea media, sin embargo se observa un valor atípico, correspondiente a un dato del nivel de fuerza 5N coeficiente de desgaste 0,115020658, registrados por la probeta 19.

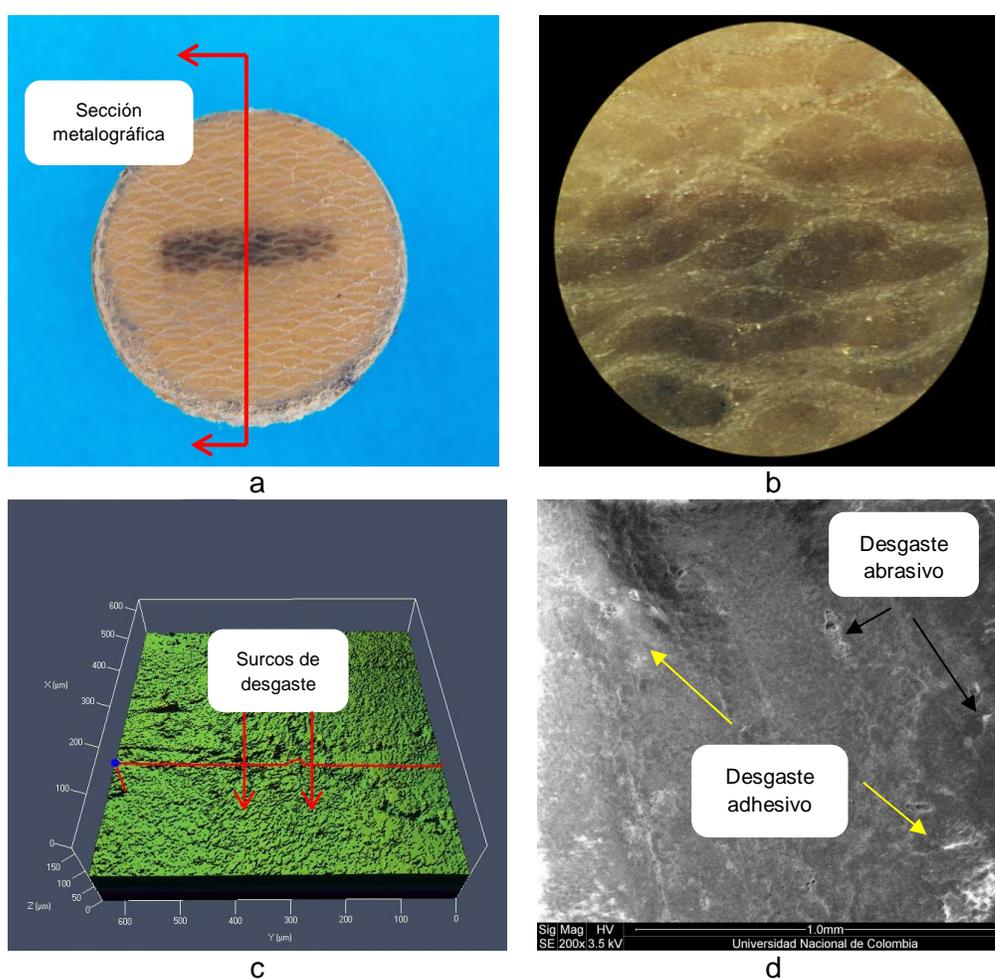
Figura 3-11: Probabilidad Normal de K para los bloques de compuesto



3.1.2.5. Caracterización de huella de contacto

Para la probeta 24 que fue la escogida a inspeccionar para la carga de 5 N, en la figura 3-12 se puede apreciar que el desgaste ocasionado durante el ensayo produjo una huella que permitió visualizar la morfología y realizar la caracterización, está se realizó mediante diferentes técnicas (Inspección óptica, confocal, SEM y materialografía), las cuales permitieron identificar los mecanismos de desgaste que se presentaron en los ensayos.

Figura 3-12: Inspección de la zona desgastada de la probeta 24 de compuesto ensayada a 5 N. a) foto general, b) estereoscopia a 90X, c) confocal, d) SEM

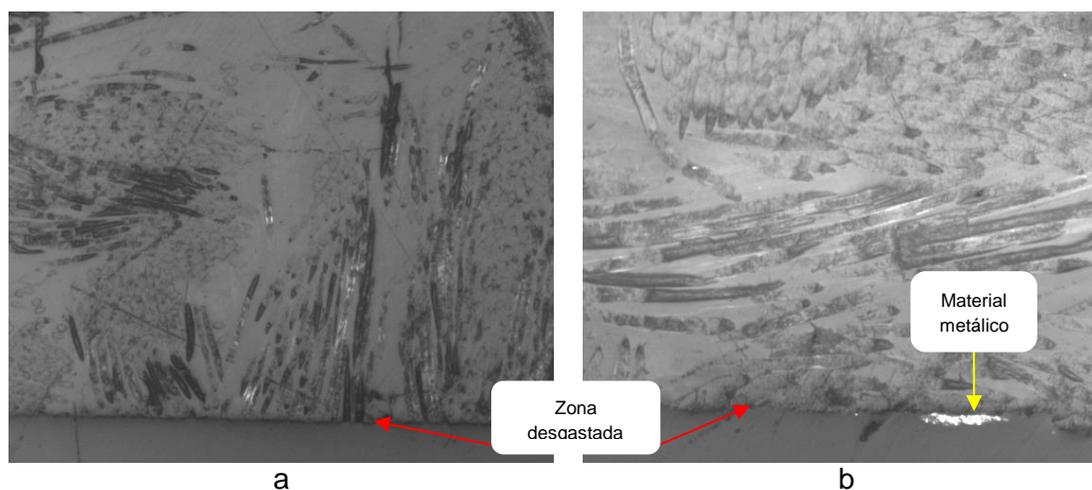


En la figura 3-11a se observa en general la huella resultante después de ser sometida la probeta a desgaste bajo una fuerza de 5 N, la cual es aproximadamente homogénea, en la figura 3-11b se observa el diseño del tejido, el cual no fue alterado con el proceso de desgaste, en la figura 3-11c se muestra un rugosidad media aritmética areal R_a de 1,103

μm , en la figura 3-11d se observa una deformación plástica en las superficies, se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido, se presenta un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión, considerando también material desgarrado, identificando mecanismos de abrasión. La caracterización de las huellas de las probetas de los otros niveles se muestran en el Anexo D.

La materialografía se realizó en una sección como la mostrada en la figura 3-9, con el objetivo de ver la huella de desgaste de perfil. En la foto 3-3, se puede notar que no hay deformación plástica superficial a gran escala, cambio microestructural, o quemado del compuesto. En algunas zonas se encontró metal del anillo adherido a la superficie desgastada Foto 3-3. Las materialografías de las demás probetas de compuesto analizadas para las otras cargas, se muestran en el anexo D.

Foto 3-3: Materialografía en la zona de desgaste de la probeta 24 ensayada a 5 N. a) 100X, b)200X



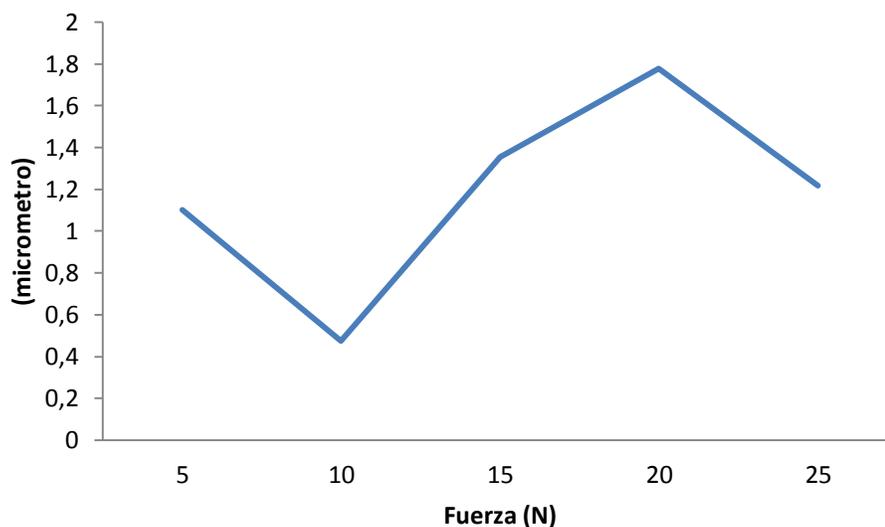
Como se puede observar, se presentó adherencia de material metálico a la contracara de del polímero, un indicio de la adhesión presente en el contacto, la presencia de escombros metálicos posiblemente esté ligada a los mecanismos de desgaste abrasivo y al rompimiento de uniones debido a la adhesión. La matriz de la resina es termoestable, no se presenta deformaciones ni degradación por temperatura en la zona de desgastada.

3.1.2.6 Rugosidad en la huella de desgaste en el compuesto

Durante el contacto tribológico entre las piezas sometidas a desgaste, se obtiene para cada superficie una rugosidad que depende de las características de los materiales del par y de las condiciones de carga figura 3-13. El determinar los parámetros óptimos de rugosidad superficial es muy importante para cada caso concreto de condiciones de carga. Ya que en muchos casos permite disminuir exigencias de acabado superficiales y evitar operaciones de maquinado.

A los bloques se les realizaron mediciones de rugosidad superficial a lo largo del eje longitudinal, a través de la huella de desgaste, esto fue útil para verificar la profundidad de la huella y la forma.

Figura 3-13: Rugosidad areal media aritmética en huellas de desgaste de compuesto por nivel de fuerza



3.2 Resumen de resultados por tratamiento

Para un mejor análisis y entendimiento de los resultados obtenidos en los ensayos y pruebas realizadas, se presenta organizada en las siguientes tablas 3-9 y 3-10, los resultados de las pruebas obtenidos en las probetas de bronce y compuesto.

Tabla 3-9: Resultados de pérdida de peso y coeficiente de desgaste en el bronce

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	FUERZA F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)	Coeficiente de desgaste
5	15,107	5	15,0992	0,0078	0,0375
19	13,993	5	13,9879	0,0051	0,0245
24	14,0982	5	14,0958	0,0024	0,0115
28	14,0393	5	14,0335	0,0058	0,0278
17	14,1402	10	14,1322	0,008	0,0192
21	14,9989	10	14,991	0,0079	0,0189
23	14,4192	10	14,413	0,0062	0,0149
2	14,8642	15	14,8527	0,0115	0,0184
8	14,4086	15	14,4033	0,0053	0,0084
18	14,2349	15	14,2188	0,0161	0,0258
25	14,1772	15	14,1668	0,0104	0,0166
10	14,2368	20	14,1984	0,0384	0,0461
14	14,2261	20	14,1844	0,0417	0,0501
15	14,4073	20	14,3607	0,0466	0,0560
26	14,374	20	14,3313	0,0161	0,0193
1	14,4085	25	14,3962	0,0123	0,0118
4	13,9815	25	13,9655	0,016	0,0153
20	15,0852	25	15,0704	0,0148	0,0142
22	14,3747	25	14,3635	0,0112	0,0107
29	14,1692	25	14,151	0,0182	0,0175
Promedio	14,3872		14,3707	0,0150	0,0232
Desv. Estándar	0,35233		0,3536	0,0125	0,0136

Tabla 3-10: Resultados de pérdida de peso y coeficiente de desgaste en el compuesto

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	FUERZA F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)	Coeficiente de desgaste
19	2,1331	5	2,1323	0,0008	0,1150
20	1,9686	5	1,9683	0,0004	0,0530
24	2,2257	5	2,2253	0,0004	0,0621
25	2,3508	5	2,3504	0,0003	0,0493
22	2,1344	10	2,1335	0,0009	0,0706
23	2,2087	10	2,2076	0,0011	0,0858
30	2,1767	10	2,1759	0,0008	0,0607
27	2,1767	15	2,1759	0,0008	0,0424
28	1,9467	15	1,9453	0,0014	0,0695
16	2,1757	20	2,1737	0,0020	0,0741
17	2,1952	20	2,1924	0,0028	0,1053
18	2,2347	25	2,2308	0,0039	0,1170
21	2,0244	25	2,0208	0,0036	0,1092
26	2,2521	25	2,2514	0,0028	0,0840
29	2,1749	25	2,1723	0,0031	0,0930
Promedio	2,1585		2,1570	0,0016	0,0794
Desv. estándar	0,1073		0,1074	0,0012	0,02435

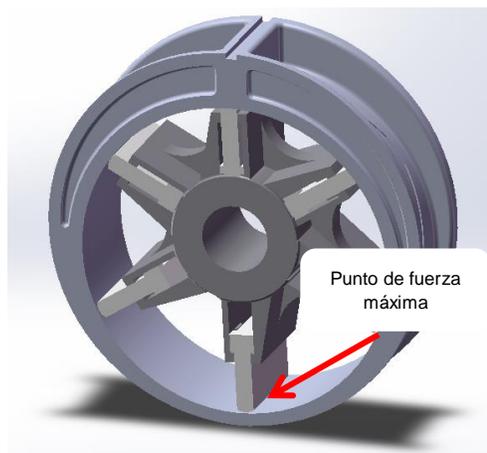
4. Modelado por elementos finitos

La simulación de esfuerzos en las paletas de la bomba hidráulica se realizó en un software de sistema de diseño asistido por ordenador (CAD). “SolidWorks Simulation” utiliza la formulación de desplazamientos del método de elementos finitos, para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes, permite modelar y estudiar el comportamiento de piezas o complejos ensamblajes y realizar análisis estáticos, pandeo, dinámicos, no lineales, fluidos, transmisión de calor, etc.

4.1 Análisis estático de esfuerzo en las paletas de la bomba hidráulica.

El estudio estático se realizó en la paleta de la bomba hidráulica, teniendo como referencia la posición de la paleta donde las fuerzas son máximas, figura 4-1, la simulación estática en “solidWorks”, calculó desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad.

Figura 4-1: Conjunto Bomba de paletas



En el análisis estático lineal se consideraron las siguientes suposiciones:

- **Suposición estática.** Las cargas permanecen constantes sin variación en el tiempo. Esta suposición permite ignorar las fuerzas inerciales y de amortiguación debido a pequeñas aceleraciones y velocidades poco significativas.
- **Suposición de linealidad.** La relación entre cargas y respuestas inducidas es lineal. Si se duplican las cargas, la respuesta del modelo (desplazamientos, deformaciones unitarias y tensiones) también se duplica. Se puede realizar la suposición de linealidad ya que:
 - Los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga.
 - Las condiciones de contorno no varían durante la aplicación de las cargas, las cargas son constantes en cuanto a magnitud, dirección y distribución, no cambian mientras se deforma el modelo.

4.1.1 Asignación de materiales

Se seleccionó materiales de la base de datos de “solidWorks” para modelar el par tribológico en contacto, Tabla 4-1. Las propiedades de material definidas para contactos 3D se aplican a caras en contacto durante la simulación. El tipo de modelo del material empleado es un Isotrópico elástico lineal. En el material compuesto la suposición de isotropismo se sustenta en el hecho de tener un tejido tridimensional, ver foto 2-10.

Tabla 4-1: Propiedades de materiales usadas para el cálculo de esfuerzos en las paletas

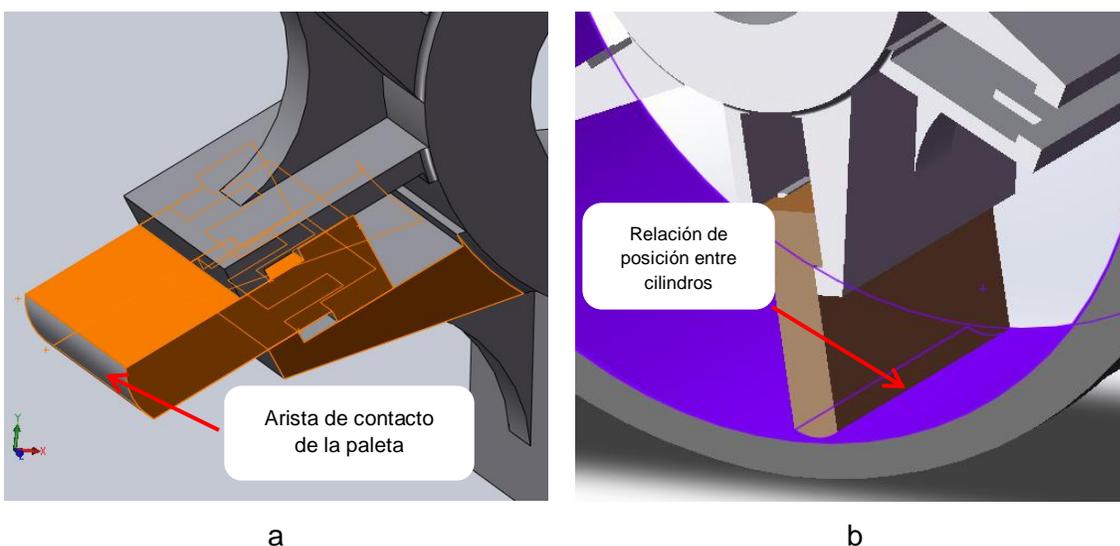
	MODULO DE ELASTICIDAD (N/m ²)	COEFICIENTE DE POISSON	DENSIDAD (Kg/m ³)	Masa (Kg)
ANILLO	1,9X10 ¹¹	0,27	--	--
PALETA BRONCE	1,1X10 ¹¹	0,33	8300	0,6734
PALETA COMPUESTO	70X10 ⁶	0,38	1389	0,1136

4.1.2. Relación de posición.

Se utilizó las relaciones de posición en “SolidWorks” para restringir los movimientos de los componentes, en este caso se restringió el movimiento de la paleta dentro del canal del rotor, figura 4-2a el cual solo le permite un movimiento de expulsión generado por la fuerza centrífuga, el anillo de la bomba restringe la salida de la paleta a medida que el rotor gira.

Se asignó una relación de posición tangencial entre la arista de ataque de la paleta sobre el anillo figura 4-2 b, estableciendo una relación entre cilindros; se restringió los grados de libertad de todos los nodos de la superficie exterior del interior del anillo. La relación de posición tangencial se aplicó para toda el área frontal en contacto con la paleta, de esta forma se obtuvieron esfuerzos de contacto sobre la arista de la paleta.

Figura 4-2: Relaciones de posición

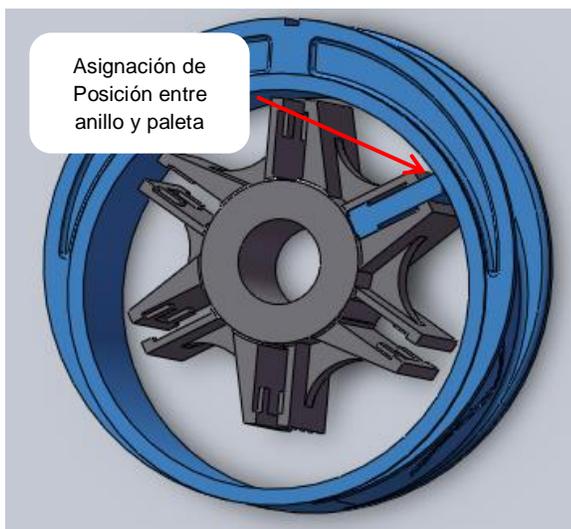


4.1.3 Asignación de contactos

“SolidWorks Simulation” ofrece opciones para analizar componentes de contacto como parte del análisis de esfuerzos. Se asignó una condición de contacto entre los componentes que se tocan (Anillo – Paleta), se definió un contacto entre la paleta y el anillo, utilizando la opción sin penetración figura 4-3, considerando que los componentes

o sólidos seleccionados no se penetran entre si durante la simulación, independientemente de su condición de contacto.

Figura 4-3: Asignación de contacto entre anillo y paleta.

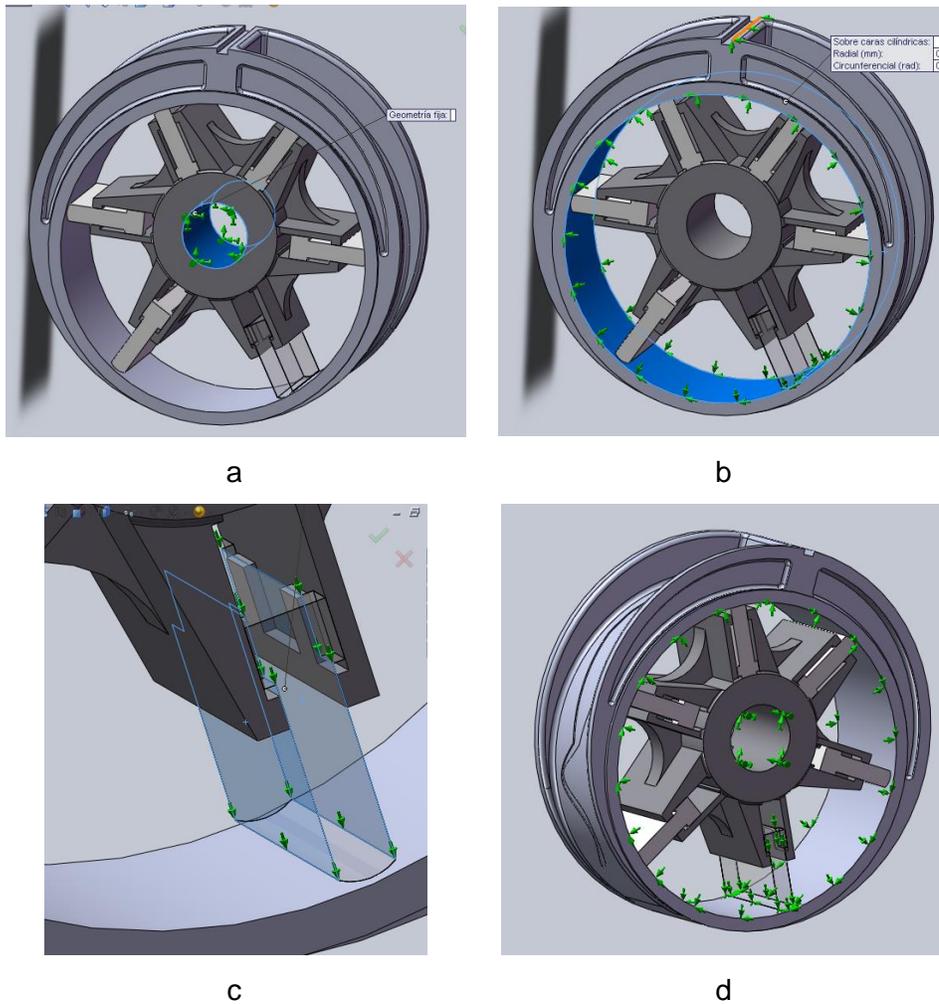


4.1.4 Sujeciones

“SolidWorks” posee dos tipos de sujeciones muy importantes, Geometría Fija (Apoyo Fijo o Empotramiento) y Rodillo/Control Deslizante (Apoyo de Patín), las sujeciones permiten prescribir desplazamientos entre piezas, las restricciones se pueden localizar en una cara o arista del sólido dependiendo del tipo de apoyos que tenga el elemento y dependiendo del tipo de análisis.

Para este caso en especial se utilizaron dos tipos de restricciones en los elementos; para el rotor de la bomba y el anillo se utilizó una restricción fija, figura 4-4 a y figura 4-4 b, este tipo de restricción establece todos los grados de libertad de traslación en cero, al usar este tipo de restricción, no se necesita geometría de referencia. Para la paleta se utilizó una restricción deslizante sobre caras planas figura 4-4 c, permitiendo solo el movimiento de traslación en dirección de expulsión de las paletas por la fuerza centrífuga hacia el anillo.

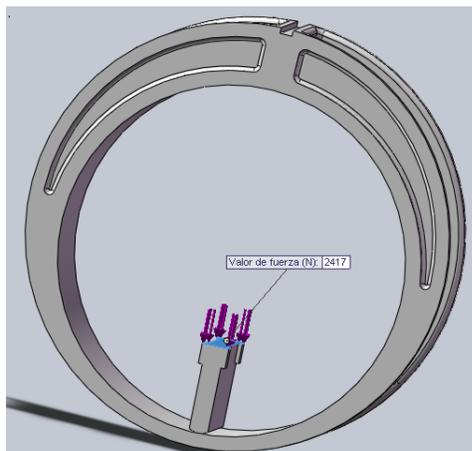
Figura 4-4: Sujeción en el conjunto Anillo Rotor Paleta a) Sujeción de geometría fija en el rotor, b) sujeción de geometría fija en el anillo, c) sujeción de restricción deslizante sobre caras planas en la paleta, d) conjunto con restricciones de movimiento.



4.1.5 Aplicación de cargas

Al igual que las restricciones, las cargas se pueden colocar en aristas o caras, sobre la cara superior de la paleta se aplicó la fuerza máxima a la cual es sometida en operación figura 4-5, para el bronce la fuerza normal calculada fue 268,34 N y para el compuesto la fuerza normal calculada fue de 45,29 N.

Figura 4-5: Aplicación de carga sobre la paleta

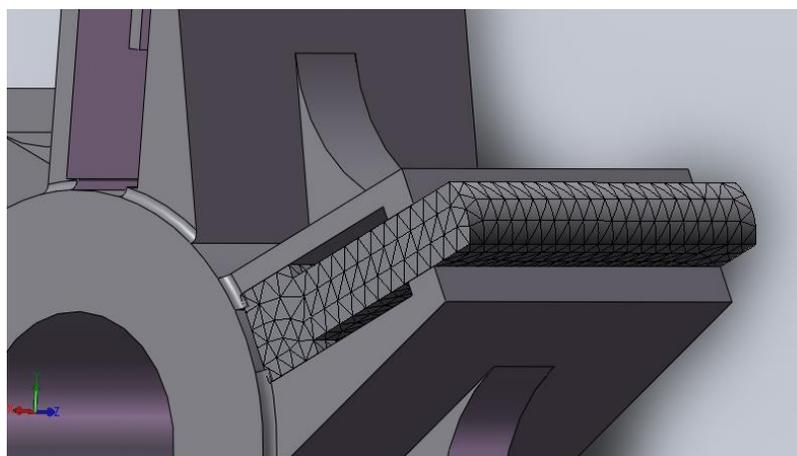


4.1.6 Mallado

El mallado es una parte muy importante en el proceso de simulación, ya que gracias a éste es posible discretizar el modelo y resolver las ecuaciones planteadas en el problema por medio de nodos.

El mallado divide el modelo en piezas más pequeñas denominadas elementos. Según las cotas geométricas del modelo, "SolidWorks Simulation" sugiere un tamaño de elemento predeterminado (en este caso 0,1797 pulg), utilizando elementos triangulares figura 4-6, que puede modificarse según sea necesario.

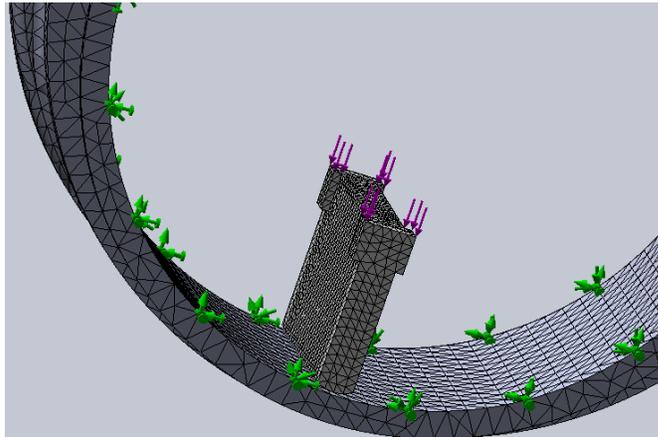
Figura 4-6: Mallado Paleta



4.1.6.1 Refinación de la Malla

Este proceso es de suma importancia, ya que permite obtener valores más confiables del esfuerzo máximo en la zona crítica del modelo en estudio; esto se consigue seleccionando la paleta en estudio, para ser refinada y así disminuir el tamaño de los mismos y aumentar el número de elementos. En la figura 4-7 se puede observar el modelo con la refinación de la malla en la paleta,

Figura 4-7: Refinado de malla de la paleta



Con todos los parámetros necesarios para la simulación, el software ensambló y resolvió el sistema algebraico de ecuaciones lineales que representó el sistema físico, es decir, se realizó la solución numérica del conjunto de ecuaciones diferenciales parciales y algebraicas del sistema.

5. Validación de resultados de las pruebas de desgaste y la simulación

Los estudios estáticos de elementos finitos suponen que las cargas son constantes o se aplican muy lentamente hasta que alcanzan sus valores completos. Debido a esta suposición, la velocidad y aceleración de cada partícula del modelo se supone nula. Como resultado, los estudios estáticos desprecian las fuerzas de inercia y amortiguación.

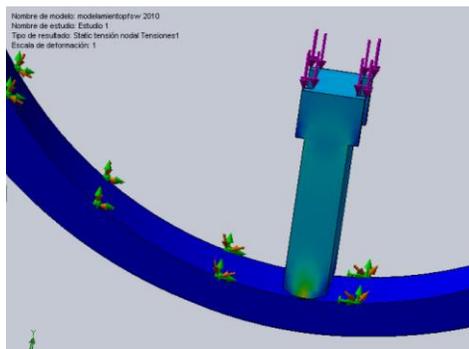
5.1. Análisis de tensiones “Von mises”

Este análisis se empleó para identificar los esfuerzos equivalentes de “Von mises” máximos en las paletas de (bronce y compuesto), en “solidWorks”, los resultados de tensión de “Von Mises” utilizan contornos de color para mostrar las tensiones calculadas durante la solución para el modelo.

5.1.1 Análisis de esfuerzos en la simulación de las paletas de Bronce

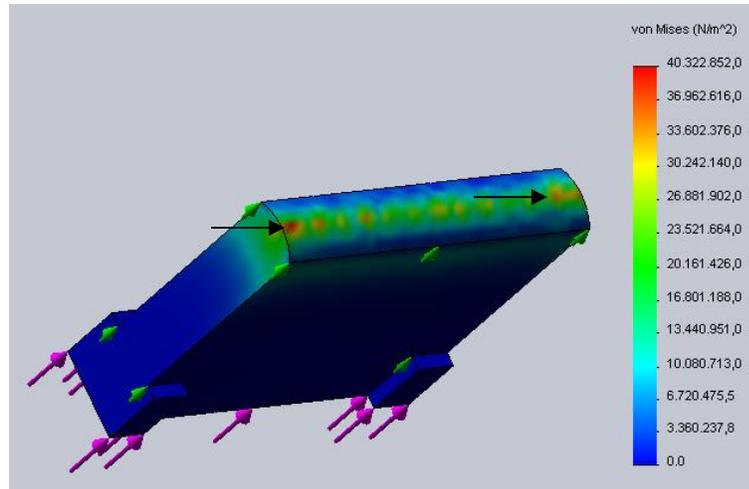
Las ecuaciones presentadas en el capítulo 2 (fuerza normal, presión de contacto, ancho de huella), son válidas para cargas normales a las superficies de contacto en reposo figura 5-1, en este numeral se muestra los resultados obtenidos en la simulación estática.

Figura 5-1: Contacto paleta bronce – anillo



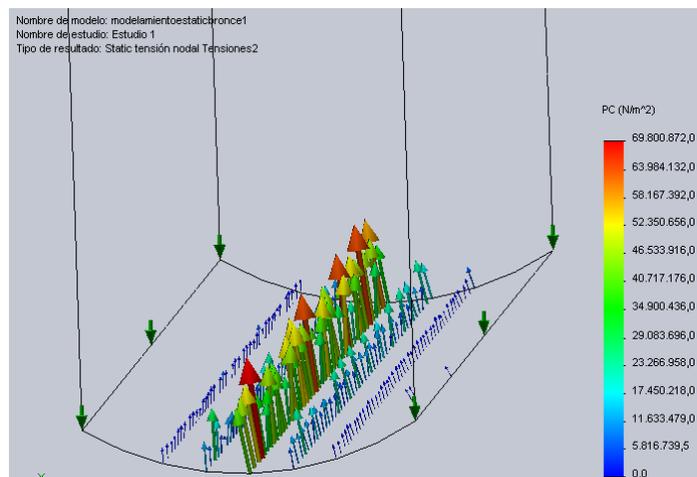
La simulación se realizó sometiendo la paleta a la mayor fuerza que se genera en una revolución, para el caso del bronce fue de 268,34 N. En los resultados se observó puntos de concentración de esfuerzos máximos de 40,32 MPa figura 5-2, Las tensiones mostradas calculadas no sobrepasaron el límite elástico del bronce 102.3 MPa

Figura 5-2: Esfuerzos de von mises sobre la paleta de bronce



En el cálculo estático analítico que se realizó en el capítulo 2, el valor de la presión de contacto de la paleta fue de 71,5 MPa, en la simulación con elementos finitos el resultado de la presión de contacto fue 69,80 MPa, figura 5-3, lo que indica que entre el cálculo analítico y la simulación hay una desviación del 2,3%.

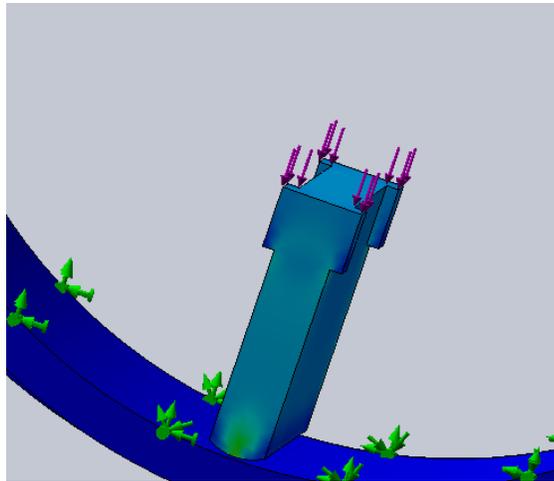
Figura 5-3: Presión de Contacto de la paleta de bronce



5.1.2 Análisis de esfuerzos en la simulación de paletas de compuesto

Al igual que las ecuaciones utilizadas para la paleta de bronce, se utilizan los resultados de los cálculos estáticos del compuesto capítulo 2 (fuerza normal, presión de contacto, ancho de huella), que son válidas para cargas normales a las superficies de contacto en reposo, figura 5-4 en este numeral se muestran los resultados obtenidos en la simulación estática.

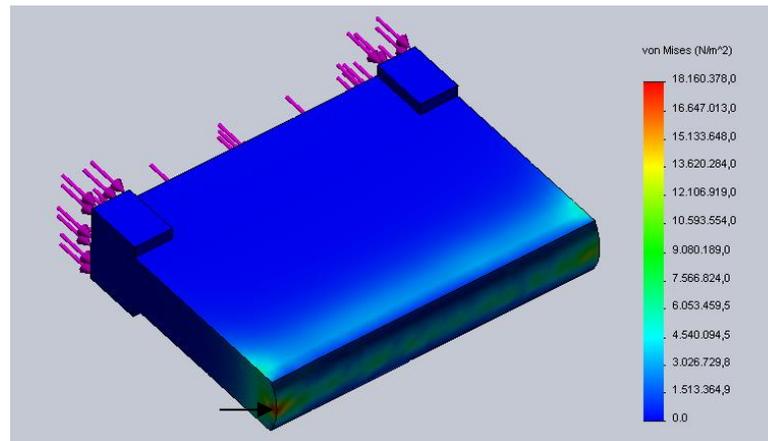
Figura 5-4: Contacto paleta compuesto – anillo



La simulación se realizó sometiendo la paleta a la mayor fuerza que se genera en una revolución, para el caso del compuesto fue de 45,29 N.

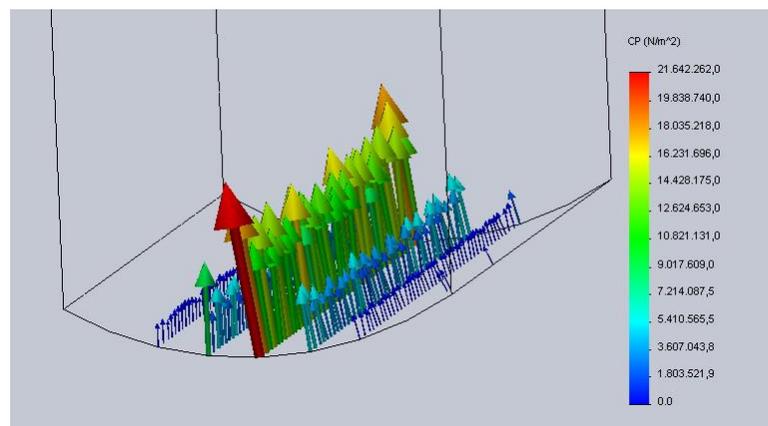
En los resultados se observan puntos de concentración de esfuerzos compresivos máximos de 18,1 MPa, figura 5-5, Las tensiones mostradas calculadas no sobrepasan el límite elástico del compuesto 120 MPa.

Figura 5-5: Esfuerzos de von mises sobre la paleta de compuesto



En el cálculo estático analítico que se realizó en el capítulo 2, el valor de la presión de contacto de la paleta de compuesto fue de 22,38 MPa, en la simulación con elementos finitos el resultado de la presión de contacto fue 21,64 MPa, figura 5-6.

Figura 5-6: Presión de Contacto en la paleta de material compuesto



5.2 Criterio de vida útil de las paletas de la bomba hidráulica.

Considerando los resultados obtenidos en la simulación de elementos finitos, más los resultados de desgaste de los ensayos mediante las ecuaciones de contacto mostradas en el capítulo 2, y con el historial de fallas de las bombas blackmer ML, se realizó el análisis que se describe a continuación sobre la vida útil de las paletas.

5.2.1 Estimación de la vida útil de las paletas de bronce.

La presión de contacto que se obtuvo en la simulación de elementos finitos para la paleta de bronce fue de 69,80 MPa, considerando esta presión en la relación de contacto entre el anillo y el bloque probeta con las ecuaciones del capítulo 2, se obtiene un valor de fuerza que permite estimar la rata de desgaste, al relacionarse con los ensayos de desgaste.

Se calculó el ancho de la huella de contacto para la presión de contacto de 69,8 MPa, y las propiedades de los materiales involucrados según tabla 4-1:

$$W = 16 * \frac{P \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{\pi \left(\frac{1}{r_1} \right)}$$

$$W = 16 * \frac{69,80 \times 10^6 \left(\frac{1 - 0,27^2}{1,9 \times 10^{11}} \right) + \left(\frac{1 - 0,33^2}{1,1 \times 10^{11}} \right)}{\pi \left(\frac{1}{0,015} \right)}$$

$$W = 6,92 \times 10^{-5} \text{ m}$$

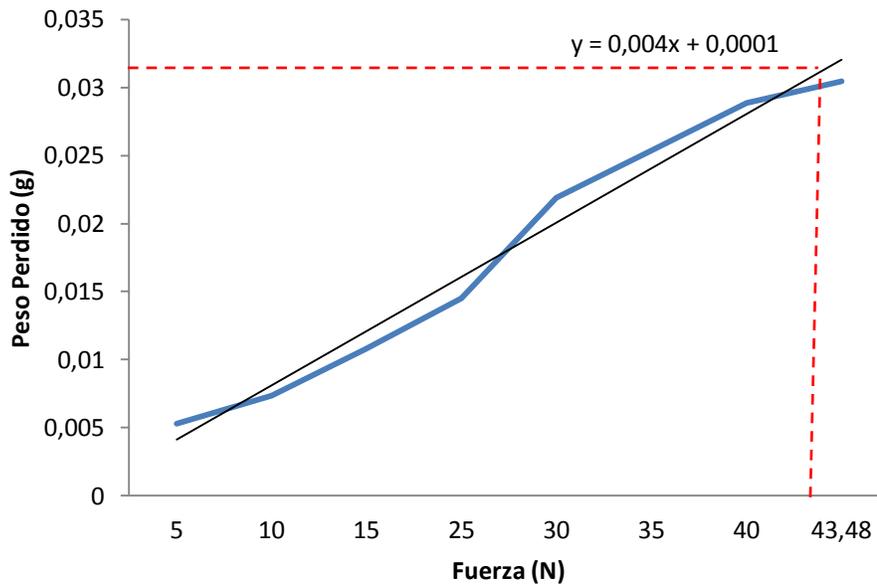
La fuerza necesaria que se debería aplicar a las probetas del ensayo “block on disk” para obtener la misma presión de contacto que se generó en la simulación en finitos sobre la paleta de bronce de la bomba es:

$$F = P * A \rightarrow F = 69800000 * 6,92 \times 10^{-5} * 0,009$$

$$F = 43,48 \text{ N}$$

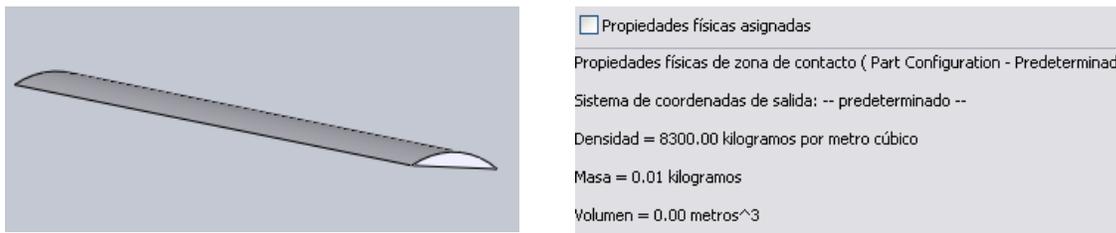
Proyectando el valor de desgaste para 43,48 N a partir de los resultados de las probetas de desgaste, se obtiene un valor de pérdida de peso de 0,030468522 g, figura 5-7, con este valor se calculó la vida útil de las paletas de bronce.

Figura 5-7: Tendencia de desgaste en el Bronce.



En “solidWorks” se modeló el radio de contacto de la paleta de bronce figura 5-8 para calcular la masa del sólido de contacto, teniendo en cuenta que el criterio de mantenimiento para la sustitución de las paletas en operación está ligado a la pérdida total de la línea de contacto de la paleta con el anillo, se consideró que la paleta al perder la masa mostrada en la figura 5-8, estaría en condición para ser reemplazada.

Figura 5-8: Perfil de ataque de la paleta



5.2.1.1 Consideración A

Las consideraciones que se tuvieron en cuenta para desarrollar el criterio de vida útil de las paletas se enfocaron en la presión de contacto, [35], al estudiar el fenómeno de desgaste, demostró la influencia de la presión sobre la intensidad del desgaste para

superficies asentadas, donde la relación entre presión de contacto e intensidad de desgaste se comporta de forma lineal.

Teniendo en cuenta el criterio de [35] y los resultados obtenidos en los ensayos en las probetas de bronce con comportamiento normal de desgaste, se consideró la presión de contacto máxima uniforme en toda la zona de contacto de la paleta, además se consideró constante en el tiempo.

Considerando la rata de desgaste del bronce de 0,031 g cada 30 min y el peso de 10 g para el perfil de ataque de la paleta, se calculó la vida útil de la paleta (V_{up}) con (5.1), dando como tiempo de operación 9677.41 minutos equivalentes a 6.72 días.

$$V_{up} = \frac{\text{Masa del perfil de ataque} * \text{tiempo del ensayo al desgaste de las probetas}}{\text{peso perdido de las probetas ensayadas}} \quad (5.1)$$

$$V_{up} = 6.72 \text{ Dias}$$

5.2.1.2 Consideración B

Para este criterio se tomó como base la presión de contacto media modelada en elementos finitos, la razón de esto es que las partículas de desgaste, provocan un cambio en la forma de la cara de contacto de la paleta, dando lugar a una mayor área de contacto y en consecuencia una menor presión de contacto en el tiempo.

La presión media de contacto que se registró en la simulación fue de 34,9 MPa, aplicando las ecuaciones de capítulo 2,

$$W = 16 * \frac{P \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{\left(\frac{1}{r_1} \right)}$$

$$W = 16 * \frac{34,9 \times 10^6 \left(\frac{1 - 0,27^2}{1,9 \times 10^{11}} \right) + \left(\frac{1 - 0,33^2}{1,1 \times 10^{11}} \right)}{\left(\frac{1}{0,015} \right)}$$

$$W = 3,46 \times 10^{-5} \text{ m}$$

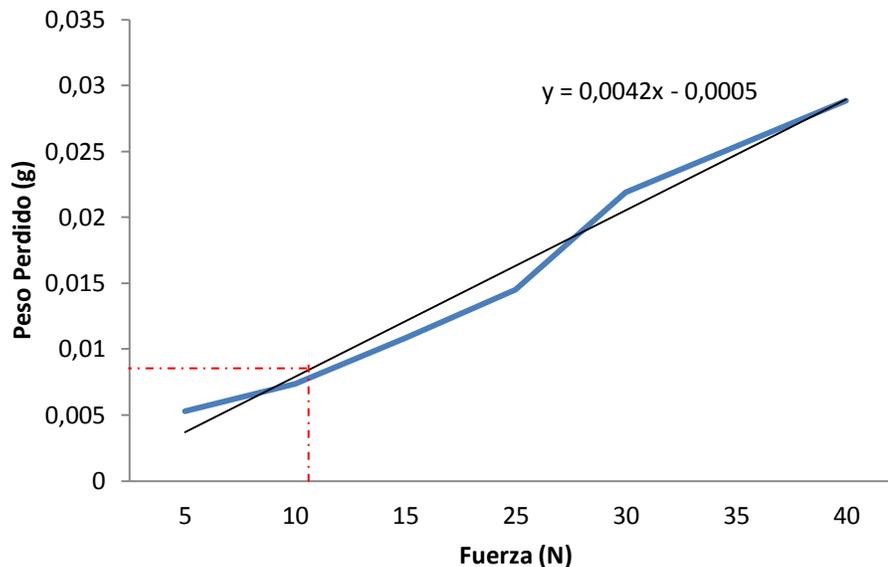
La fuerza necesaria que se debe aplicar a las probetas para obtener la misma presión de contacto, que se generó en la simulación en finitos sobre la paleta de bronce de la bomba es:

$$F = P * A \rightarrow F = 34900000 * 3,46 \times 10^{-5} * 0,009$$

$$F = 10,8 \text{ N}$$

Proyectando el valor de desgaste para 10.8 N se obtiene un valor de pérdida de peso de 0,008 g, con este valor se calcula la vida útil de las paletas de bronce.

Figura 5-9: Tendencia de desgaste en el bronce

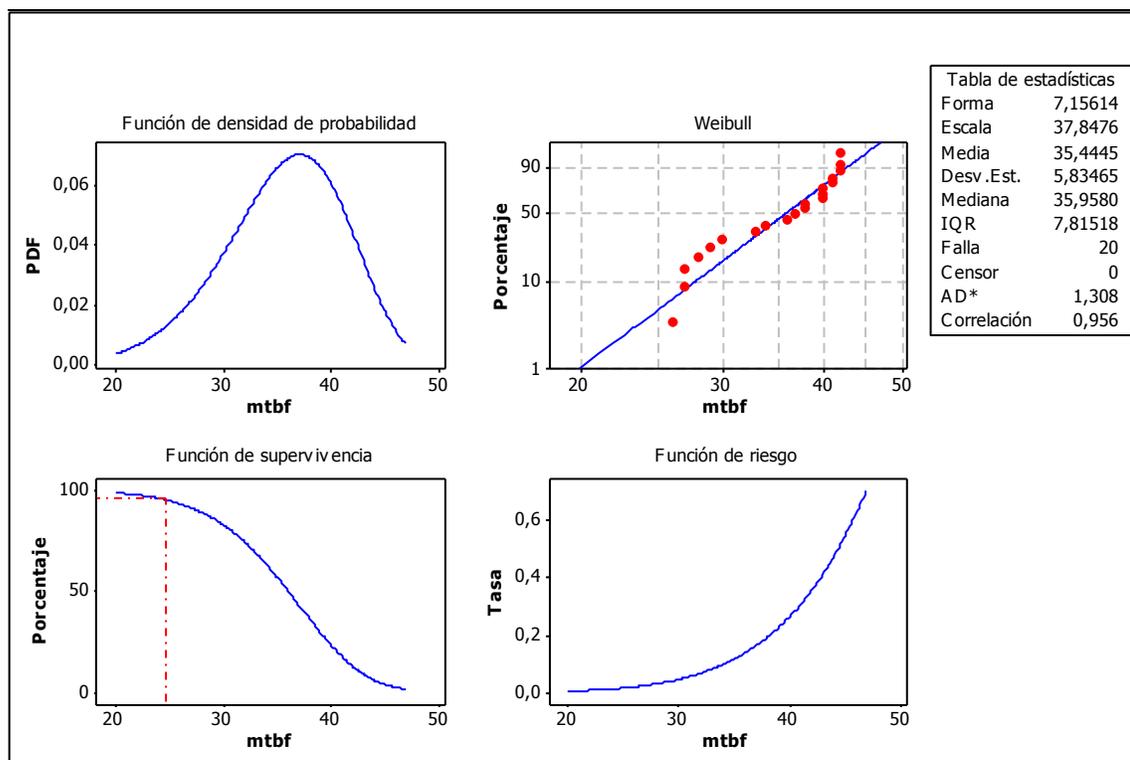


En la figura 5-10 se observa la gráfica de función de probabilidad de los datos registrados en los históricos de falla de la bomba hidráulica Blackmer ML, bajo el modo de falla de desgaste de paletas, los datos de falla se ajustaron por Weibull, obteniendo un parámetro de forma de 7,15 y un parámetro de escala de 37,84, con un compartimento de normalidad ajustado a la recta. La función de probabilidad acumulada muestra una vida útil de las paletas cercana a los 50 días, tiempo en el cual la probabilidad de supervivencia es cercana al 0%.

Considerando la rata de desgaste del bronce de 0,008 g cada 30 min y la masa del perfil de ataque de 10 g, se estimó la vida útil de la paleta en 26.04 días a partir de la ecuación 5,1. Teniendo en cuenta que el ciclo de vida de un repuesto empieza a monitorearse

desde tiempo cero hasta su punto de falla, se realizó un análisis comparativo del estimado de vida útil de la paleta de bronce con el registro de fallas (MTBF) por modo de falla de desgaste, figura 5-10.

Figura 5-10: Gráfica de revisión general de distribución para MTBF de las paletas de bronce, para el modo de falla de desgaste.



Analizando los datos históricos de falla (MTBF) de las paletas de bronce de la bomba hidráulica figura 5-10, se pudo observar que los resultados obtenidos bajo el criterio B, se ajustaron a la función de supervivencia de las paletas, a los 26,04 días de operación la paletas estarán en su etapa de supervivencia cercana al 100%, después del día 26 la curva presenta un punto de quiebre de la pendiente decreciendo rápidamente y por tanto aumentado el riesgo de falla por desgaste en las paletas, se debe considerar cual es el riesgo permisible para programar la intervención para cambio de paletas.

5.2.2 Estimación de la Vida útil de las paletas de compuesto

La presión de contacto que se obtuvo en la simulación de elementos finitos para la paleta de material compuesto fue de 21,6 MPa, considerando esta presión en la relación de

contacto entre el anillo y el bloque probeta con las ecuaciones del capítulo 2, se obtiene un valor de fuerza que permite estimar la rata de desgaste.

$$W = 16 * \frac{21642262}{\pi} \frac{\left(\frac{1 - 0,27^2}{1,9 \times 10^{11}}\right) + \left(\frac{1 - 0,3897^2}{54 \times 10^9}\right)}{\left(\frac{1}{0,015}\right)}$$

$$W = 3,40 \times 10^{-5} \text{ m}$$

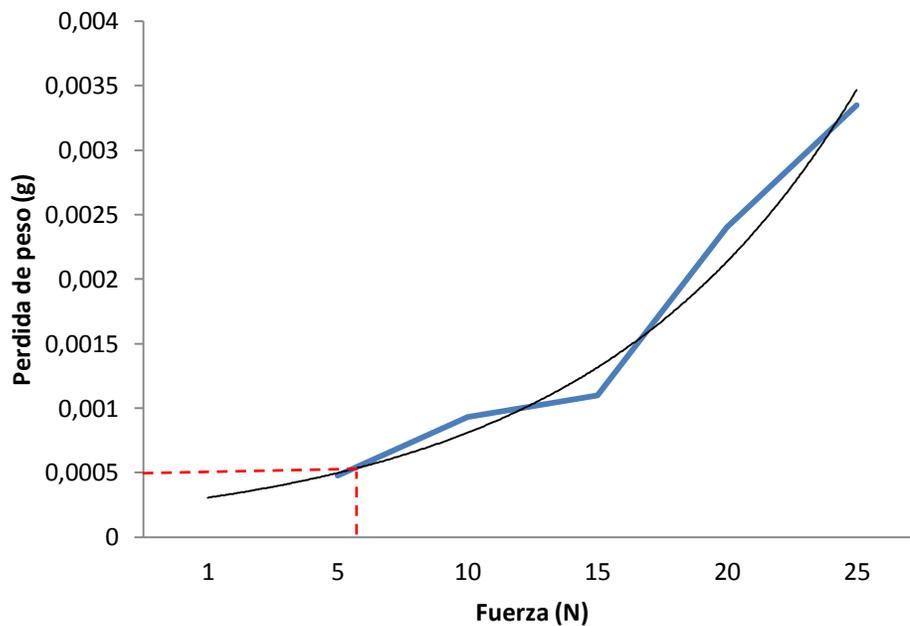
La fuerza necesaria que se debe aplicar a las probetas para obtener la misma presión de contacto que se genera en la simulación en finitos sobre la paleta de material compuestos de la bomba es:

$$F = P * A \rightarrow F = 21642262 * 3,40 \times 10^{-5} * 0,009$$

$$F = 6,62 \text{ N}$$

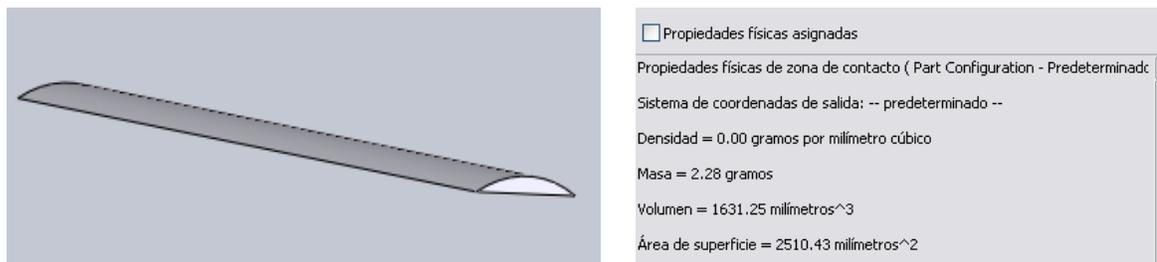
Proyectando el valor de desgaste para 6,62 N se obtiene un valor de pérdida de peso de 0,000475 g, figura 5-11, con este valor se calcula la vida útil de las paletas de material compuesto.

Figura 5-11: Tendencia de desgaste del material compuesto



En “solidWorks” se modelo el radio de contacto de la paleta de material compuesto para calcular la masa del solido de contacto figura 5-12.

Figura 5-12: Perfil de ataque de la paleta de material compuesto



5.2.2.1 Consideración A

Las consideraciones que se tuvieron en cuenta para desarrollar el criterio de vida útil de las paletas se enfocaron en la presión de contacto, [35] al estudiar el fenómeno de desgaste, demostró la influencia de la presión sobre la intensidad del desgaste para superficies asentadas, donde la relación entre presión de contacto e intensidad de desgaste se comporta de forma lineal. Teniendo en cuenta el criterio de [35] y los resultados obtenidos en los ensayos en las probetas de material compuesto con comportamiento normal de desgaste, se consideró la presión de contacto máxima uniforme en toda la zona de contacto de la paleta, además se consideró constante en el tiempo.

Considerando la rata de desgaste del material compuesto de 0,000475 g cada 30 min y el peso de 2,28 g para el perfil de ataque de la paleta, se calculó la vida útil de la paleta (V_{up}) con la ecuación 5.1, dando como tiempo de operación 144000 minutos equivalentes a 100 días.

5.2.2.2 Consideración B

Para este criterio se tomó como base la presión de contacto media, la razón de esto, es que las partículas de desgaste, provocan un cambio en la forma de la punta de paleta, dando lugar a una mayor área de contacto y en consecuencia una menor presión de contacto en el tiempo.

La presión media de contacto que se registró en la simulación fue de 10,82 MPa, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$W = 16 * \frac{P \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{\pi \left(\frac{1}{r_1} \right)}$$

$$W = 16 * \frac{10821131 \left(\frac{1 - 0,27^2}{1,9 \times 10^{11}} \right) + \left(\frac{1 - 0,3897^2}{54 \times 10^9} \right)}{\pi \left(\frac{1}{0,015} \right)}$$

$$W = 1,70 \times 10^{-5} \text{ m}$$

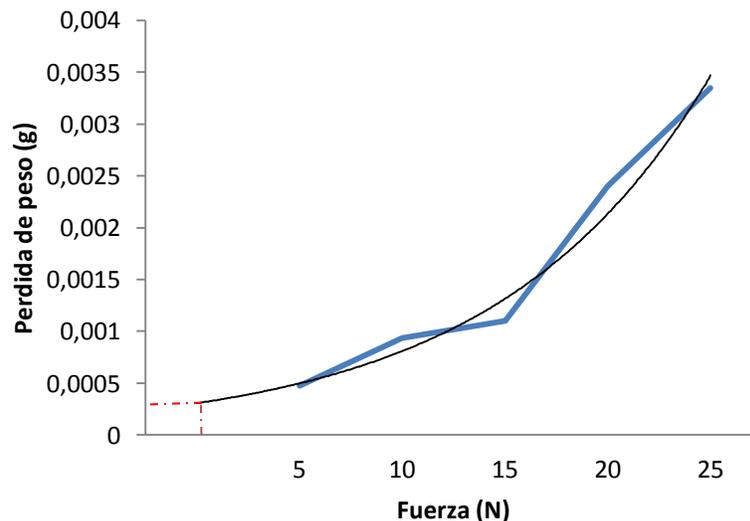
La fuerza necesaria que se debe aplicar a las probetas, para obtener la misma presión de contacto que se genera en la simulación en finitos sobre la paleta de material compuesto de la bomba es:

$$F = P * A \rightarrow F = 10821131 * 1,65 \times 10^{-5} * 0,009$$

$$F = 1,65 \text{ N}$$

Proyectando el valor de desgaste para 1,65 N se obtiene un valor de pérdida de peso de 0,0002 g, con este valor se calcula la vida útil de las paletas de material compuesto.

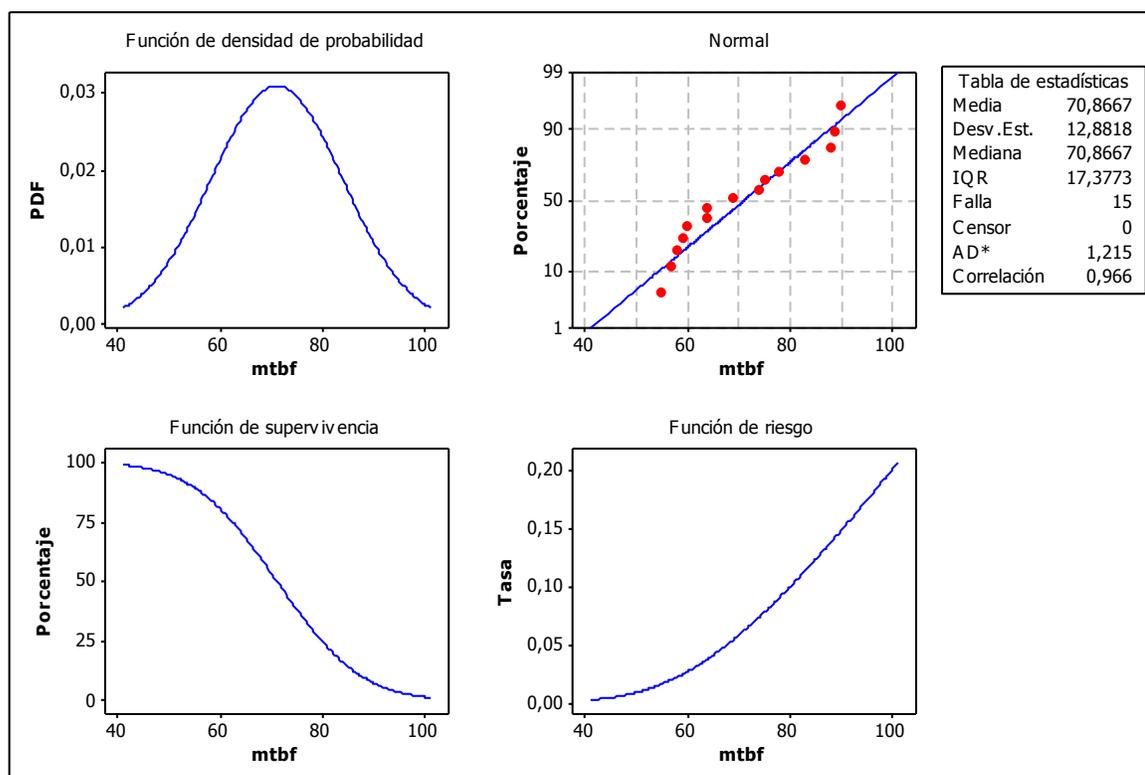
Figura 5-13: Tendencia de desgaste en el material compuesto.



Considerando la rata de desgaste del bronce de 0,0002 g cada 30 min y el peso de 2,28 g para el perfil de ataque de la paleta, se calculó la vida útil de la paleta (V_{up}) con la ecuación 5.1, dando como tiempo de operación 342000 minutos equivalentes a 237,5 días.

Analizando los datos de históricos de falla (MTBF) de las paletas de material compuesto de la bomba hidráulica, se puede observar que los resultados de la simulación en elementos finitos bajo al criterio B, no se ajustaron a la función de supervivencia definida por los históricos de falla, el valor de supervivencia está por debajo del resultado del criterio de vida útil calculado de 237,5 días.

Figura 5-14: Gráfica de revisión general de distribución para MTBF de las bombas de paletas de material compuesto, para el modo de falla de desgaste.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se evalúa el comportamiento general de los resultados de desgaste y simulación en elementos finitos de los dos tipos de materiales de las paletas de una bomba hidráulica. Para los dos materiales, bronce y compuesto, se puede comenzar afirmando que para una carga muy pequeña, la mayoría de los contactos serían de tipo elástico y las asperezas estarían sometidas a esfuerzos por debajo de su límite de fatiga, por lo tanto no sufrirían desgaste. En la medida que se aumenta la carga se ira superando el límite de fatiga de una porción del material en contacto, en consecuencia, el desgaste tomaría lugar a través de un mecanismo de fatiga. Finalmente, para cargas más altas se producirían contactos plásticos, bajo mecanismos de falla abrasivos y adhesivos [36].

6.1 Comportamiento del desgaste del bronce.

Para cuantificar la pérdida de peso en las probetas se empleó la técnica de diferencia de peso antes y después del ensayo utilizando una balanza de precisión. Los resultados reportados fueron tomados de al menos tres datos efectivos del ensayo para cada nivel de carga, tabla 6-1.

Tabla 6-1: Resultados de desgaste y coeficiente de desgaste de los ensayos en el bronce.

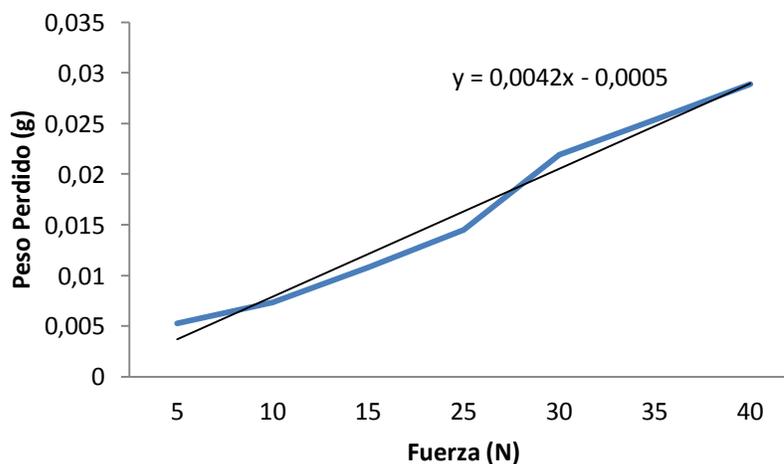
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	FUERZA F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)	Coeficiente de desgaste
5	15,107	5	15,0992	0,0078	0,03751044
19	13,993	5	13,9879	0,0051	0,024526057
24	14,0982	5	14,0958	0,0024	0,011541674
28	14,0393	5	14,0335	0,0058	0,027892379
17	14,1402	10	14,1322	0,008	0,019236123
21	14,9989	10	14,991	0,0079	0,018995672
23	14,4192	10	14,413	0,0062	0,014907996
2	14,8642	15	14,8527	0,0115	0,018434618
8	14,4086	15	14,4033	0,0053	0,008495954
18	14,2349	15	14,2188	0,0161	0,025808465

Tabla 6-1: Resultados de desgaste y coeficiente de desgaste de los ensayos en el bronce (Continuación).

25	14,1772	15	14,1668	0,0104	0,016671307
10	14,2368	20	14,1984	0,0384	0,046166696
14	14,2261	20	14,1844	0,0417	0,050134146
15	14,4073	20	14,3607	0,0466	0,056025209
26	14,374	20	14,3313	0,0161	0,019356349
1	14,4085	25	14,3962	0,0123	0,011830216
4	13,9815	25	13,9655	0,016	0,015388899
20	15,0852	25	15,0704	0,0148	0,014234731
22	14,3747	25	14,3635	0,0112	0,010772229
29	14,1692	25	14,151	0,0182	0,017504872
Promedio	14,3872		14,37078	0,01509	0,0232717
Desv. Estándar	0,35233322		0,35368628	0,0125486	0,013683647

En la Figura 6-1 se ilustra el perfil de desgaste de los ensayos de las probetas de bronce siguiendo una tendencia lineal, esto sugiere que el bronce tuvo un comportamiento de desgaste denominado estacionario o desgaste lineal estabilizado, ajustado a la teoría de [3], en la cual predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga, y a la teoría de [8] en la que demostró que generalmente existe una dependencia lineal entre la Tasa de Desgaste y la carga, siempre que no haya cambios de régimen de desgaste.

Figura 6-1: Tendencia Lineal del desgaste del bronce



En general en los ensayos realizados en las probetas de bronce se evidenciaron varios comportamientos que pudieron influenciar los resultados:

- **Origen de las huellas de desgaste:** El sistema neumático utilizado para aplicar la carga en las probetas contra el anillo, no garantizaba un contacto fijo, las fluctuaciones que se generaban en el sistema neumático permitieron que las probetas rotaran durante los ensayos, creándose huellas asimétricas.
- **Rata excesiva de desgaste a 20 N:** la rata de desgaste en las probetas de bronce se incrementó continuamente con el aumento de la carga normal, siguiendo una tendencia lineal, comportamiento que se ajusta a lo mostrado por [37], sin embargo el comportamiento a 20 N se salió tendencia definida por los otros niveles de carga, lo cual revela posiblemente una transición en el régimen de desgaste.

El comportamiento de desgaste a 20 N, pudo estar influenciado por la falta de rigidez de la máquina “block on ring”, foto 6-1; al calibrar el sistema neumático para la aplicación de carga, probablemente se modificó la rigidez de la máquina, pudiendo entrar en resonancia con el motor eléctrico, generando vibraciones influyentes en el exceso de desgaste, en especial con la carga de 20 N. En los otros niveles, se observó un comportamiento lineal sin diferencias entre las pendientes para cada valor de carga normal, sin embargo se debe considerar el estado estructural de la máquina como una condición que estuvo relacionada con la variabilidad de datos que hizo descartar probetas en el resto de niveles de carga.

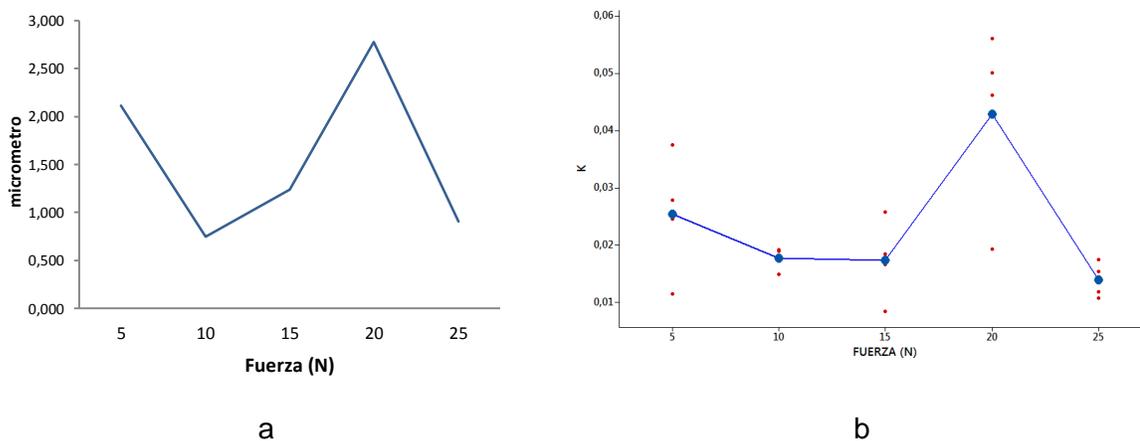
Foto 6-1: Máquina “block on ring”, Diseño estructural



6.1.1 Rugosidad y coeficiente de desgaste

La rugosidad promedio R_a de las superficies de las huellas de desgaste es graficada como una función de la fuerza de contacto, figura 6-2a. En general no se observa un comportamiento definido para la rugosidad en función de la carga, hay que considerar que todos los ensayos realizados en el bronce tuvieron el mismo anillo de contacto; para la carga de 5 N, el anillo no se había sometido a desgaste, por lo tanto el valor registrado de rugosidad se generó en la transición del período de acomodamiento, al régimen de estado estable. En el rango de carga de 10 a 20 N la rugosidad aumentó drásticamente y luego a 25 N decreció a un valor relativamente bajo. La baja rugosidad en las huellas de desgaste es encontrada frecuentemente en metales durante el período de acomodamiento y ha sido asociado normalmente a la formación de capas de óxido entre las zonas de contacto, lo que reduce las fuerzas adhesivas y lleva a un régimen de desgaste estacionario [19].

Figura 6-2: a) Rugosidad b) coeficiente de desgaste del bronce

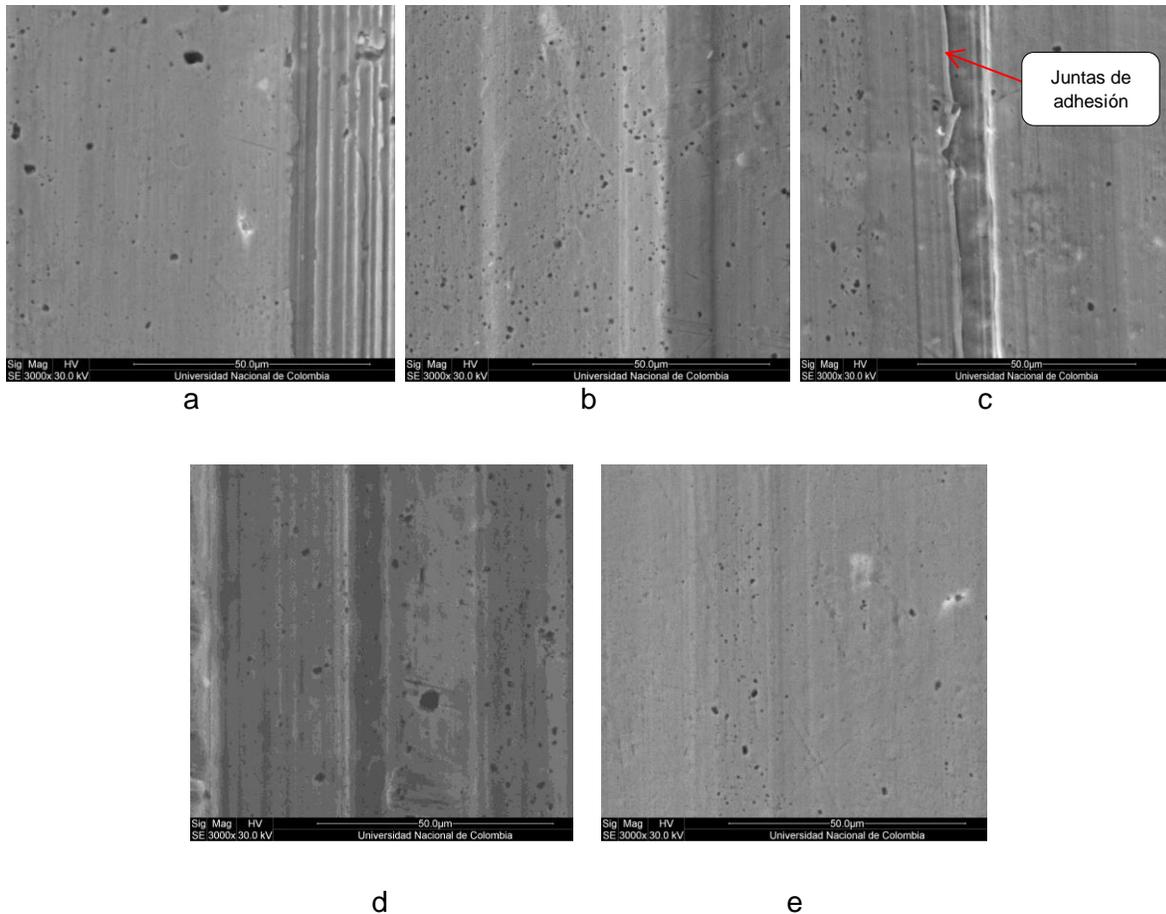


En tribosistemas con superficies pulidas la alta rata de desgaste se explica por la fuerte adhesión que se presenta en un área casi equivalente al área aparente de contacto [38], [5] y [39]. El rango de rugosidades que se obtuvo en los ensayos, se relacionó con el incremento del valor de K y se le atribuyo, al hecho de que la influencia del mecanismo de desgaste abrasivo aumento con la rugosidad, aunque el mecanismo predominante fue la adhesión [38] y [39].

6.1.2 Superficies de desgaste.

Las superficies de desgaste de las probetas de bronce para las diferentes cargas normales se muestran en la foto 6-2.

Foto 6-2: SEM huellas de desgaste de probetas a) 5 N b) 10 N c) 15 N d) 20 N e) 25 N



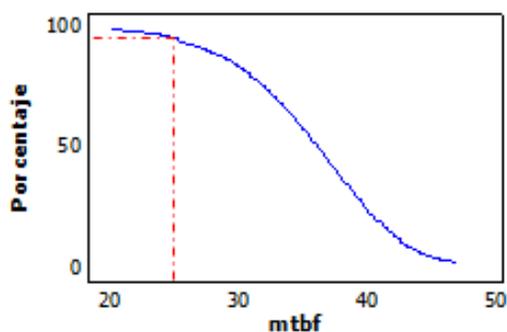
Con la carga normal de 20 N foto c, se observa una intensa formación de juntas de adhesión en la superficie de la huella de desgaste en comparación con las superficies de las huellas de desgaste de las otras cargas. El desgaste adhesivo fue causado por la fuerza adhesiva fuerte que se desarrolló entre los materiales en contacto, al ir aumentando la fuerza de contacto se rompen uniones generando desprendimiento de pequeños fragmentos de los metales. En el caso de bronce estas partículas se transfirieron al metal más duro (anillo), [6]. Algunas partículas de bronce transferidas al anillo pueden transferirse de nuevo al bronce generando zonas de desgaste abrasivo

[40]. La microscopía electrónica sobre la superficie de desgaste en general mostró un mecanismo de desgaste adhesivo acompañado de zonas puntuales donde se presentó un mecanismo de desgaste abrasivo.

6.1.3 Análisis del criterio de vida de las paletas de bronce

En base al standard ASTM G77 para ensayos de desgaste y mediante la simulación en finitos de la paleta de la bomba hidráulica, se tuvo criterio para determinar el tiempo de vida útil de las paletas; teniendo en cuenta que la presión de contacto entre el par tribológico varía en el tiempo por el cambio de área de contacto, se consideró la presión de contacto media calculada por la modelación en finitos, como soporte de entrada para formar el criterio de vida útil de las paletas. El área de contacto es un factor que ejerce un efecto importante sobre la tasa de Desgaste. Se puede citar resultados que demuestran la influencia de las dimensiones relativas en el fenómeno de desgaste [12]. Es posible que la validez de la relación lineal del desgaste con la carga dependa del área y presión de contacto, considerando la relación de desgaste lineal y su dependencia de la presión de contacto, se relacionó el valor de la presión media calculado por elementos finitos para obtener el valor de vida útil de las paletas, MTBF de 26,04 días, valor que se ajustó a la curva de supervivencia generada por los datos históricos de falla de las paletas figura 6-3.

Figura 6-3: Función de supervivencia de la paleta de bronce



Nota: MTBF de datos históricos de falla de una bomba de paletas blackmer ML.

Si la rapidez del desgaste se conoce o puede estimarse a partir de los datos, es posible construir un conjunto de límites de control sesgados en torno de la línea de la tendencia

de vida útil de las paletas. Si los valores muestrales de vida útil de las paletas se localizan dentro de estos límites, el desgaste de la paleta estará bajo control. Cuando la línea de la tendencia excede el MTBF máximo registrado en los históricos, la paleta deberá reemplazarse.

6.2. Comportamiento de desgaste del compuesto

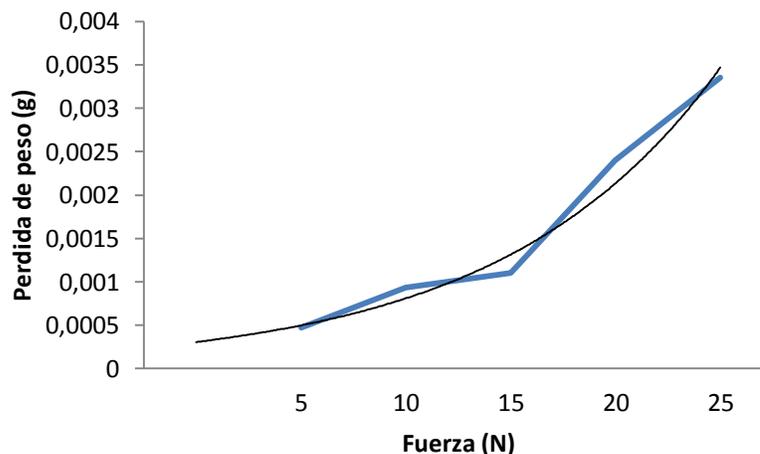
Para cuantificar la pérdida de peso en las probetas de material compuesto se empleó la técnica de registro de peso inicial, cálculo de densidad del material y medición de la huella de desgaste para determinar el volumen y peso perdido durante la pruebas de desgaste, tabla 6-2.

Tabla 6-2: Resultados de desgaste y coeficiente de desgaste de los ensayos en el material compuesto.

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	FUERZA F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)	Coeficiente de desgaste
19	2,1331	5	2,1323	0,0008	0,1150
20	1,9686	5	1,9683	0,0004	0,0530
24	2,2257	5	2,2253	0,0004	0,0621
25	2,3508	5	2,3504	0,0003	0,0493
22	2,1344	10	2,1335	0,0009	0,0706
23	2,2087	10	2,2076	0,0011	0,0858
30	2,1767	10	2,1759	0,0008	0,0607
27	2,1767	15	2,1759	0,0008	0,0424
28	1,9467	15	1,9453	0,0014	0,0695
16	2,1757	20	2,1737	0,0020	0,0741
17	2,1952	20	2,1924	0,0028	0,1053
18	2,2347	25	2,2308	0,0039	0,1170
21	2,0244	25	2,0208	0,0036	0,1092
26	2,2521	25	2,2514	0,0028	0,0840
29	2,1749	25	2,1723	0,0031	0,0930
Promedio	2,1585		2,1570	0,0016	0,0794
Desv. estándar	0,1073		0,1074	0,0012	0,0243

En la Figura 6-4 se ilustra el perfil de desgaste de los ensayos de las probetas de material compuesto siguiendo una tendencia exponencial, esto sugiere que el compuesto tuvo un comportamiento de desgaste acelerado [41]. Sin embargo la vida útil de las paletas de material compuesto es más larga que la del bronce, aunque la rata de desgaste del compuesto tiene un comportamiento acelerado en el rango de carga de 5 N a 25 N, el valor promedio de pérdida de peso del bronce es 9,37 veces mayor que el del material compuesto,

Figura 6.4: Rata de desgaste del material compuesto.



En general en los ensayos realizados en las probetas de bronce se evidenciaron varios comportamientos que pudieron influenciar los resultados:

- **Origen de las huellas de desgaste:** Al igual que en los ensayos en el bronce, el sistema neumático utilizado para aplicar la carga en las probetas de material compuesto contra el anillo, no garantizaba un contacto fijo, las fluctuaciones que se generaban en el sistema neumático permitieron que las probetas rotaran durante los ensayos, creándose huellas asimétricas.
- **Variabilidad en los datos de desgaste:** El comportamiento de desgaste de todos los ensayos, pudo estar influenciado por la falta de rigidez de la máquina “block on ring”; al calibrar el sistema neumático para la aplicación de carga, probablemente se modificó la rigidez de la máquina, pudiendo entrar en resonancia con el motor eléctrico, generando vibraciones influyentes en la variación de desgaste en cada nivel de carga. Se debe considerar el estado estructural de la máquina como una condición que estuvo relacionada con la variabilidad de datos, que los hizo descartar en todos los niveles de carga.
- **Tendencia exponencial de desgaste:** este comportamiento en general se relaciona con el desgaste severo; un pequeño incremento en un intervalo de carga causa un gran incremento en la rata de desgaste. En este caso al ocurrir

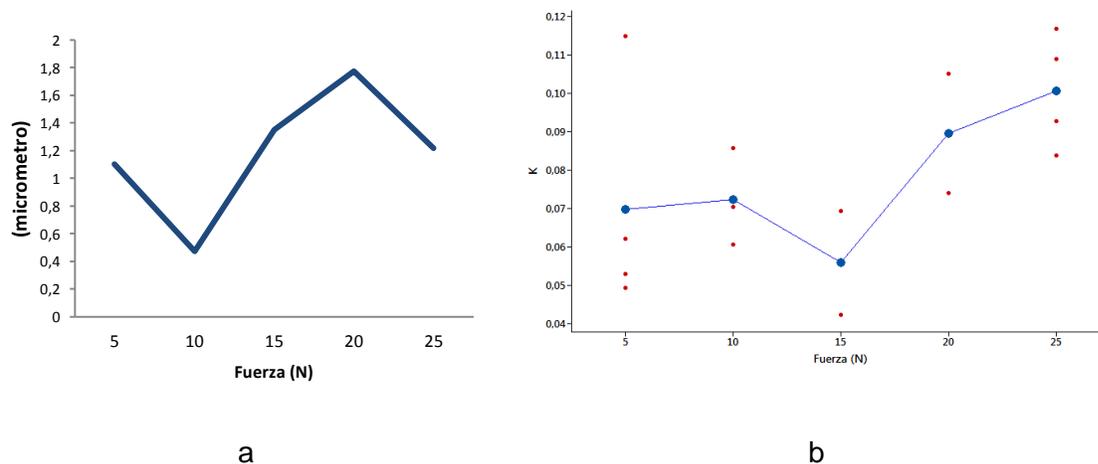
una aceleración del proceso de desgaste, conlleva a un daño catastrófico y falla del material [27]. Esta tendencia pudo estar influenciada por la sobrecarga ya que las probetas fueron sometidas a desgaste con valores de carga por encima del valor máximo de fuerza al que normalmente es sometida una paleta en una bomba hidráulica. Las sobrecargas, errores humanos, medio ambiente agresivo, deficiente lubricación y otras son las causas que provocan la tendencia exponencial o desgaste catastrófico [42].

6.2.1 Rugosidad y Coeficiente de desgaste del compuesto

La rugosidad promedio R_a de las superficies de las huellas de desgaste es graficada como una función de la fuerza de contacto.

En general no se observa un comportamiento definido para la rugosidad en función de la carga, figura 6-5a, hay que considerar que todos los ensayos realizados en el material compuesto tuvieron el mismo anillo de contacto; para la carga de 5 N, el anillo no se había sometido a desgaste, por lo tanto el valor registrado de rugosidad se generó en la transición del período de acomodamiento, al régimen de estado estable. En el rango de carga de 10 a 20 N la rugosidad aumentó drásticamente y luego a 25 N decreció a un valor relativamente bajo. En el material compuesto se incrementó la tasa de desgaste con el aumento de la rugosidad, figura 6-5b. En [19] se obtuvieron resultados semejantes en experiencias realizadas con siete plásticos comerciales (entre ellos el HDPE, el Nylon y el Teflón).

Figura 6-5: a) Rugosidad R_a b) coeficiente de desgaste del material compuesto

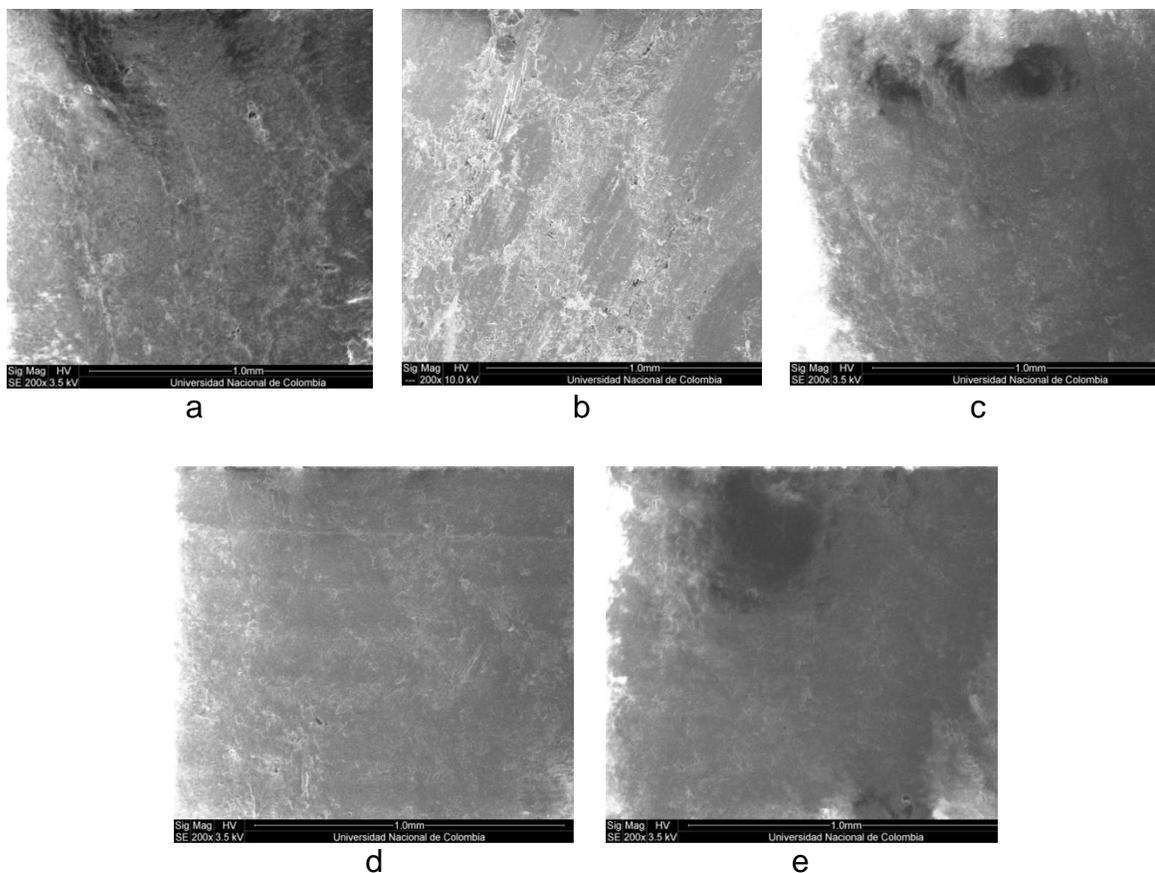


En el rango de rugosidades de las experiencias realizadas, el incremento en el valor del coeficiente de desgaste y en la rugosidad puede estar influenciado por el mecanismo de desgaste abrasivo, aunque el mecanismo predominante siga siendo la adhesión [38] y [39].

6.2.2 Superficies de desgaste de material compuesto.

Las superficies de desgaste de las probetas de material compuesto para las diferentes cargas normales se muestran en la foto 6-3.

Foto 6-3: SEM huellas de desgaste de probetas a) 5 N b) 10 N c) 15 N d) 20 N e) 25 N



La estructura del material compuesto juega un papel muy importante en el comportamiento del desgaste. Este material tiene una matriz polimérica reforzada con fibras de aramida distribuidas aleatoriamente, esta orientación es en general, consecuencia de los procesos de conformado del compuesto estructural [43], convirtiéndolo en un material con propiedades resistentes al desgaste. En general la

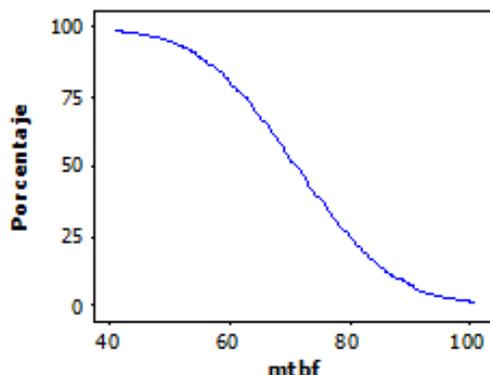
adhesión es el fenómeno predominante en el desgaste por deslizamiento de los materiales compuestos [29]. El desgaste abrasivo favoreció el aumento de la rugosidad en las zonas de las fibras de refuerzo. Estos aspectos encontrados como consecuencia en la rugosidad, coinciden con las descripciones de [39], [38] y [44]. En este último trabajo inclusive se afirma que aunque el desgaste abrasivo de los polímeros no es el fenómeno predominante en los ensayos “pin-on-disk”, se ha mostrado que existe un incremento considerable en las ratas de desgaste con el aumento de la rugosidad de la contracara durante el deslizamiento polímero-acero.”

6.2.3 Análisis del criterio de desgaste en las paletas de material compuesto

En base al ASTM G77 para ensayos de desgaste y mediante la simulación en finitos de la paleta de la bomba hidráulica, se tuvo criterio para determinar el tiempo de vida útil de las paletas; teniendo en cuenta que la presión de contacto entre el par tribológico varía en el tiempo por el cambio de área de contacto, se consideró la presión de contacto media calculada por la modelación en finitos, como soporte de entrada para formar el criterio de vida útil de las paletas. El área de contacto es un factor que ejerce un efecto importante sobre la rata de Desgaste. Se puede citar resultados que demuestran la influencia de las dimensiones relativas en el fenómeno de desgaste [12], la superficie de los polímeros suele experimentar un daño severo y una tasa de desgaste elevada en su deslizamiento contra materiales más duros, sin embargo, los polímeros se comportan mejor cuando deslizan contra metales que cuando lo hacen contra sí mismos. Esto es debido al mecanismo por el cual se forma una capa de transferencia del polímero al metal que puede tener un efecto autolubricante, [45].

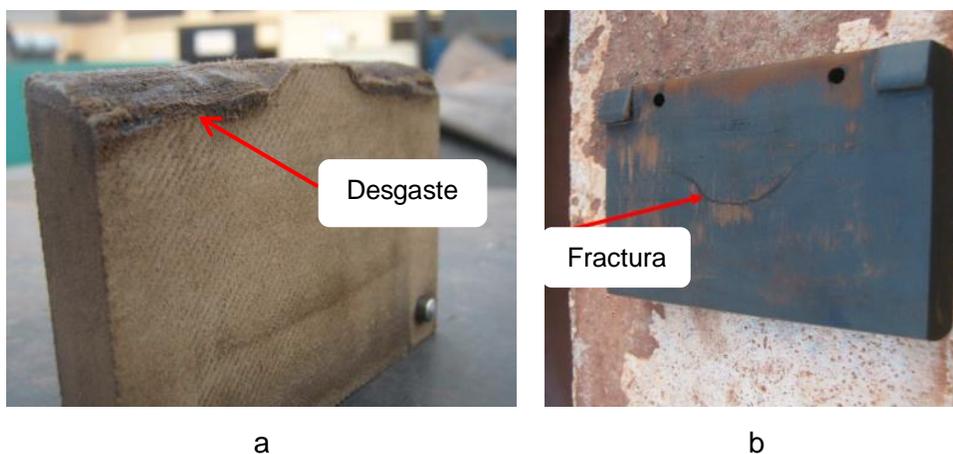
En base al standard ASTM G77 para ensayos de desgaste y mediante la simulación en finitos de la paleta de la bomba hidráulica, se tuvo criterio para determinar el tiempo de vida de las paletas de material compuesto, se consideró la presión de contacto media calculada por la modelación en finitos, como soporte para el criterio de vida útil de las paletas, arrojando como resultado un MTBF de 237,5 días, valor que se encuentra por fuera del límite máximo de la curva de supervivencia, figura 6-6.

Figura 6-6: Función de supervivencia de la paleta de material compuesto.



La rata de desgaste excesiva que presentan las paletas de la bomba hidráulica en operación, puede estar ligada a otros parámetros influyentes en el desgaste, las ratas de desgaste de los materiales compuestos dependen en buena medida de su comportamiento mecánico. En operación la paleta es sometida a muchas variables que en el ensayo no fueron replicadas (temperatura, material de trabajo, ciclos de operación, vibraciones, etc). Se debe tener en cuenta que en el histórico de falla de las paletas se registró el modo de falla por fractura de paletas foto 6-4, como modo falla por desgaste en paletas, estos datos alteraron estadísticamente el modelo de supervivencia de las paletas por desgaste. El ensayo realizado en la maquina “block on ring” probablemente se hubiera ajustado a la curva de supervivencia de la paleta, si los históricos de falla estuvieran depurados por el modo de falla de desgaste.

Foto 6-4: Modos de falla a) Desgaste b) Fractura.



7. Conclusiones

- La variación aleatoria que se obtuvo en los ensayos es atribuible a la falta de rigidez del tribómetro, sin embargo la caracterización de las huellas permitió darle manejo a los datos más representativos.
- Los principales mecanismos de falla identificados en los bloques de bronce fueron los de adhesión y abrasión. Esto resultó en un régimen de desgaste estacionario bajo las fuerzas de 5N 10N 15N Y 25N, en el cual las tasas de desgaste fueron estables y las superficies se mantuvieron con una baja rugosidad.
- En los bloques de bronce, bajo la fuerza de 20 N el régimen de desgaste resultó acelerado y en la superficie se aumentó la rugosidad, los principales mecanismos de falla identificados fue el abrasivo y el adhesivo con arranque de material, además se presentaron altas temperaturas de contacto que generaron coloración en las probetas indicando recalentamiento, sin embargo no se observaron alteraciones en la microestructura.
- El estudio metalográfico y de composición química del bronce permitió determinar que las paletas se fabricaron por fundición; las condiciones de desgaste en las paletas de bronce de la bomba hidráulica se podrían mejorar si las paletas se fabricaran por laminación, ya que se eliminarían los microporos que se generan por fundición y que actúan como concentradores de esfuerzos beneficiando el desgaste.
- Los principales mecanismos de falla identificados en los bloques de material compuesto fueron los de adhesión y abrasión. Esto resultó en un régimen de desgaste acelerado bajo todos los niveles de carga, en el cual las tasas de desgaste fueron estables por nivel y las superficies se mantuvieron con una baja rugosidad.

- El comportamiento exponencial de los resultados de desgaste en el material compuesto se atribuye a la sobrecarga a la que fueron sometidas las probetas, generando alta temperatura de contacto provocando coloración en los bordes de la huella indicando recalentamiento, sin embargo no se observó cambio microestructural en la matriz ni en la fibra, esto sugiere un comportamiento característico de un material termoestable.
- Las zonas de desgaste en las probetas de bronce y material compuesto muestran un corte limpio producido por el anillo probeta; con la metalografía y la microfotografía se descartó deformación plástica en la zona de contacto, y dio un soporte para el modelamiento lineal en elementos finitos.
- La presión de contacto obtenida en el modelamiento en elementos finitos se ajustó a los cálculos obtenidos manualmente, lo que permitió relacionarlos para el cálculo de la vida útil de las paletas de la bomba hidráulica.
- La vida útil calculada para las paletas de bronce, se ajustó a la curva de supervivencia generada por los históricos de falla, lo que permite proponer una intervención programada para cambio de paletas después de los 26 días de operación.
- Los históricos de falla para las paletas de material compuesto, tienen relacionados registros de mecanismos de falla distintos al modo de falla por desgaste, lo que no permitió relacionar de forma confiable los datos calculados de rata de desgaste, con la curva de supervivencia.
- La adhesión es el fenómeno predominante en el desgaste por deslizamiento del material compuesto, y en este proceso de desgaste por deslizamiento sobre acero se transfiere material que se adhiere a la contracara. Al aumentar la rugosidad se incrementa la influencia del desgaste abrasivo.

- La tendencia de desgaste del bronce, concuerdan con los resultados mostrados por [17], en ensayos con lubricación, al aumentar la carga se aumenta el desgaste.
- El coeficiente de desgaste que se obtuvo para el compuesto no se asemeja al coeficiente de desgaste de materiales similares, calculados por [31], el valor de coeficiente de desgaste es propio de las condiciones sistema tribológico, así como de las propiedades mecánicas de los materiales.

Anexo A. Datos y fotos de desgaste del bronce

A.1 ANÁLISIS DE DATOS BRONCE

Tabla A-1: Peso perdido en las probetas de bronce

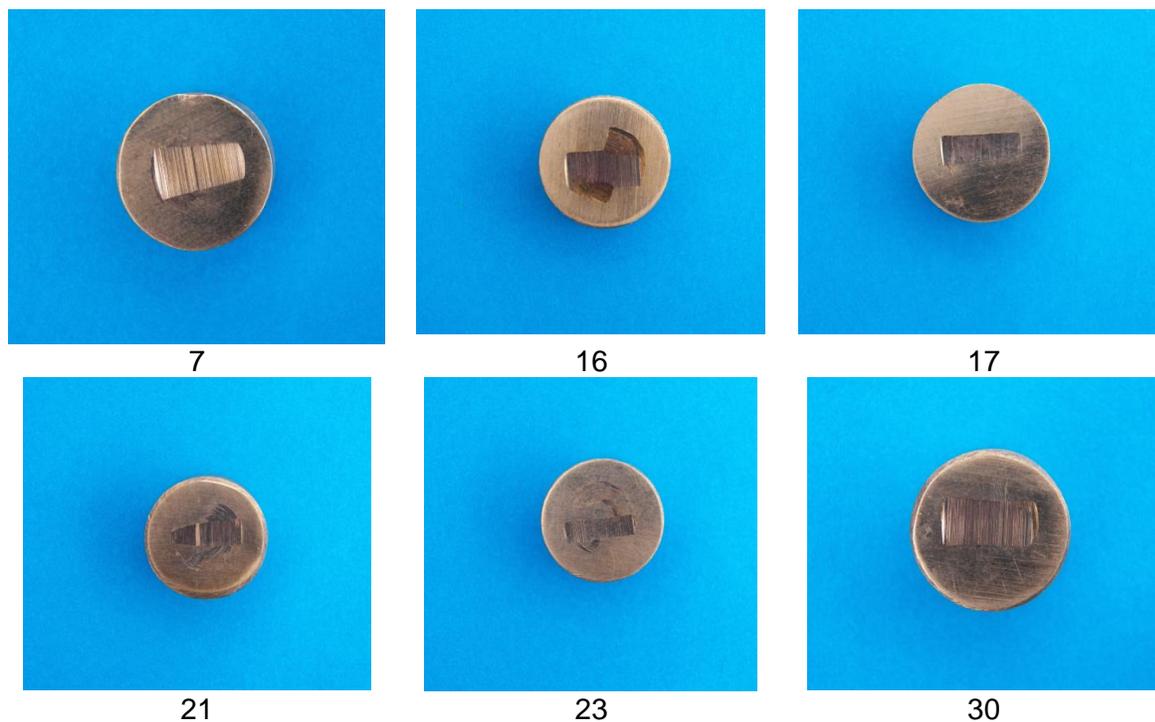
Niveles/Replicas	1	2	3	4	5	6
5 N	0,0128	0,0078	0,0274	0,0051	0,0024	0,0058
10 N	0,0268	0,0326	0,008	0,0079	0,0062	0,0256
15 N	0,0115	0,0053	0,0258	0,0161	0,0104	0,0294
20 N	0,4829	0,0384	0,3661	0,0417	0,0466	0,0161
25 N	0,0123	0,016	0,0231	0,0148	0,0112	0,0182

A.1.1 Resultados de pruebas de desgaste a 10 N en el bronce.

Tabla A-2: Fuerza de 10 Newton. En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

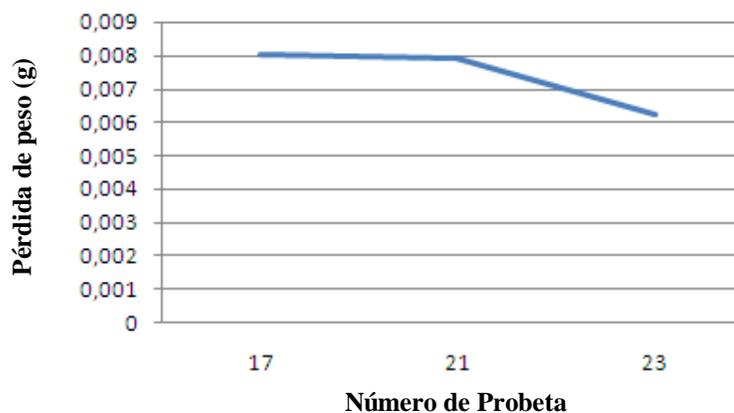
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
7	14,4099	10	14,3831	0,0268
16	15,1714	10	15,1388	0,0326
17	14,1402	10	14,1322	0,008
21	14,9989	10	14,991	0,0079
23	14,4192	10	14,413	0,0062
30	14,3462	10	14,3206	0,0256

Foto A-1: Detalle de probetas sometidas a desgaste a 10N



En la inspección visual se observó una huella irregular en la probeta 16, ocasionada por la rotación de la probeta durante la prueba, lo cual provocó desprendimiento de material, se descartó para registros fotográficos. Las probetas 7 y 30 registraron una pérdida de peso de hasta 0,0268 g valor por fuera de la media, pudo estar influenciado por falta de lubricación, y por fluctuaciones en el sistema neumático. El tamaño de la huella de las probetas 17 21 y 23 tuvo condiciones geométricas similares y pesos cercanos al valor promedio. Por esta razón los datos de pérdida de peso en estas probetas fueron los analizados estadísticamente. Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio de 0,0073 g, la probeta 23 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 10 N.

Figura A-1: Peso perdido a 10 N de las probetas de mejor comportamiento

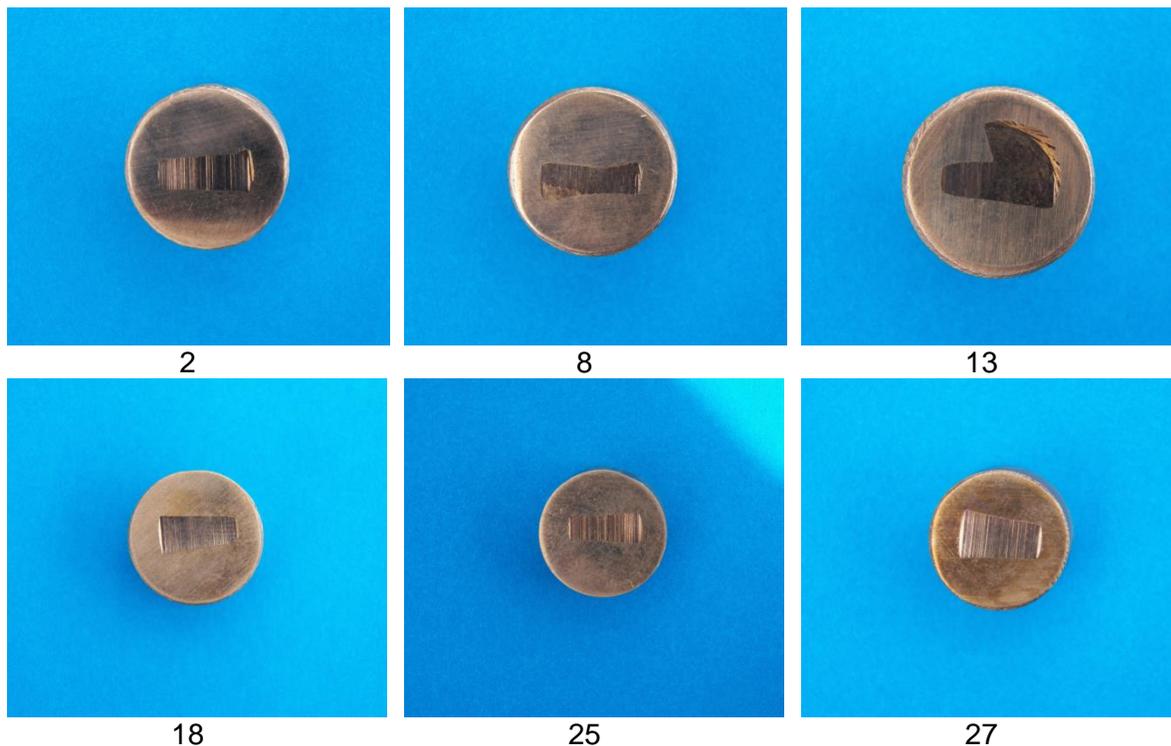


A.1.2 Resultados de pruebas de desgaste a 15 N en el bronce.

Tabla A-3: Fuerza de 15 Newton En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
2	14,8642	15	14,8527	0,0115
8	14,4086	15	14,4033	0,0053
13	14,0276	15	14,0018	0,0258
18	14,2349	15	14,2188	0,0161
25	14,1772	15	14,1668	0,0104
27	14,5271	15	14,4977	0,0294

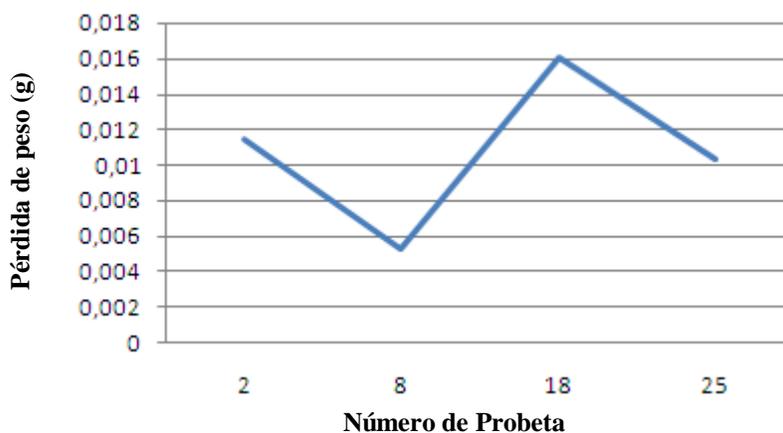
Foto A-2: Detalle de probetas sometidas a desgaste a 15N



En la inspección visual se observó una huella irregular en la probeta 13, ocasionada por la rotación de la probeta durante la prueba, lo cual provocó desprendimiento de material, se descartó para registros fotográficos. La probeta 27 registró una pérdida de peso de hasta 0,0294 g valor por fuera de la media, pudo estar influenciado por lubricación no homogénea, y por fluctuaciones en el sistema neumático. El tamaño de la huella de las

probetas 2 8 18 y 25 tiene condiciones geométricas similares y pesos cercanos al valor promedio, por esta razón los datos de pérdida de peso en estas probetas fueron los analizados estadísticamente. Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio 0,0108 g, la probeta 25 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 15 N.

Figura A-2: Peso perdido a 15 N de las probetas de mejor comportamiento

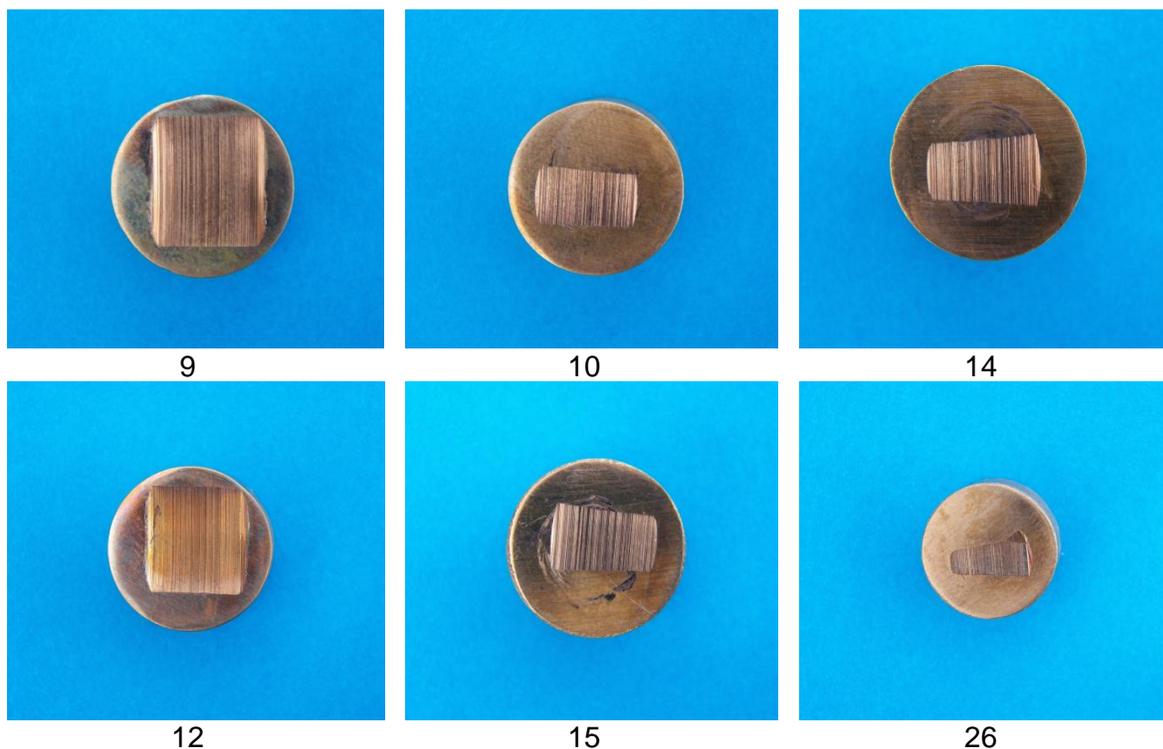


A.1.2 Resultados de pruebas de desgaste a 20 N en el bronce.

Tabla A-4: Fuerza de 20 Newton. En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
9	14,5968	20	14,1139	0,4829
10	14,2368	20	14,1984	0,0384
12	14,908	20	14,5419	0,3661
14	14,2261	20	14,1844	0,0417
15	14,4073	20	14,3607	0,0466
26	14,374	20	14,3313	0,0161

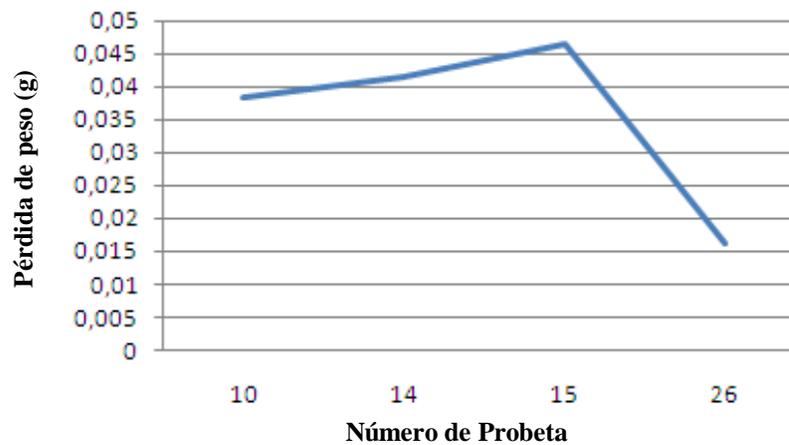
Foto A-3: Fotos de detalle de probetas sometidas a desgaste a 20N



En inspección visual se observó en las probetas 9 y 12 huellas con gran tamaño, pudieron estar influenciadas por lubricación no homogénea, por fluctuaciones en el sistema neumático o por alta temperatura de contacto, se observa indicios de recalentamiento en las dos probetas. El tamaño de la huella de las probetas 10 12 14 y 26 tuvo condiciones geométricas similares y pesos cercanos al valor promedio, por esta razón los datos de pérdida de peso en estas probetas fueron los analizados

estadísticamente. Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio 0,0357g, la probeta 10 fue la que mejor representa la prueba de desgaste para 20 N.

Figura A-3: Peso perdido a 20N de las probetas de mejor comportamiento

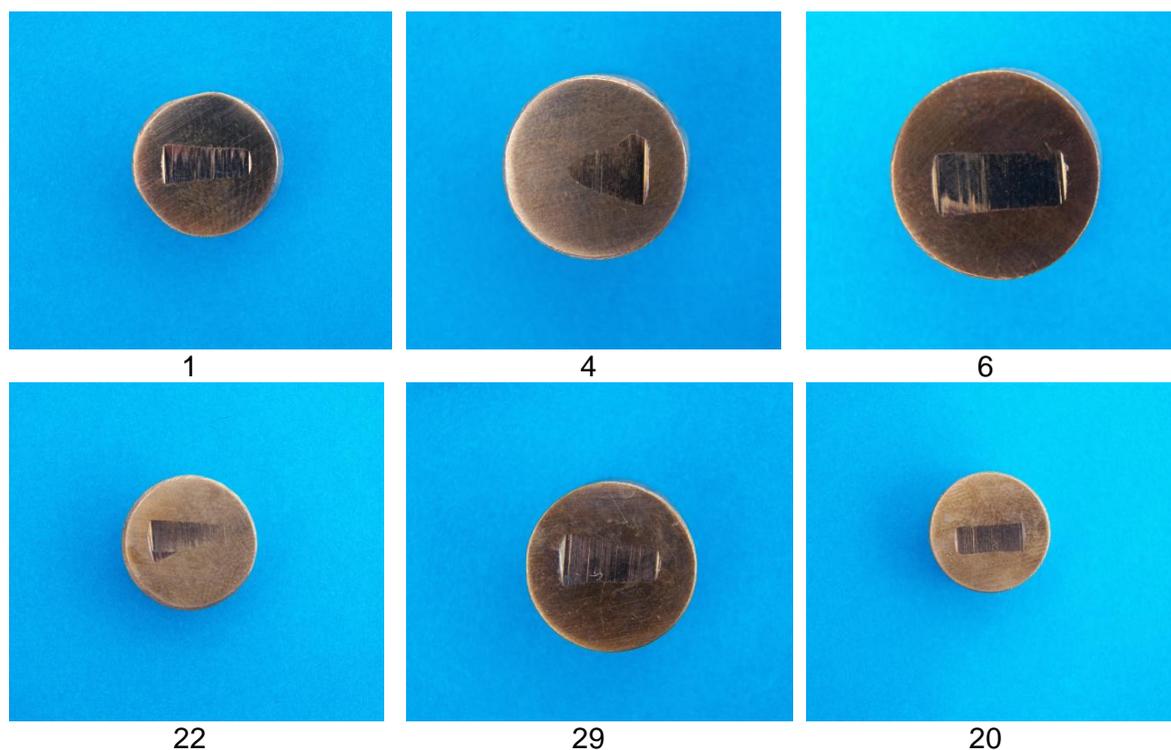


A.1.3 Resultados de pruebas de desgaste a 25 N en el bronce.

Tabla A-5: Fuerza de 25 Newton En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
1	14,4085	25	14,3962	0,0123
4	13,9815	25	13,9655	0,016
6	14,9839	25	14,9608	0,0231
20	15,0852	25	15,0704	0,0148
22	14,3747	25	14,3635	0,0112
29	14,1692	25	14,151	0,0182

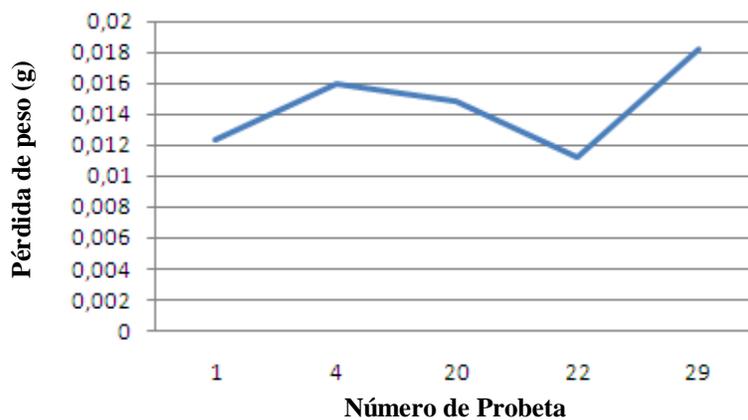
Figura A-4: Fotos de detalle de probetas sometidas a desgaste a 25N



En inspección visual se observa en la probeta 4 una huella atípica, se presenta por desalineación entre el anillo y la probeta, entre las posibles causas está, deformación del eje al aplicar la carga normal sobre el anillo, deformación de la estructura de la máquina (falta de rigidez), sin embargo el peso perdido está cercano al valor promedio. El tamaño de la huella de las probetas 1 22 20 y 29 tiene condiciones geométricas similares y pesos cercanos al valor promedio. En la probeta 6 se observa una huella de mayor tamaño que

las demás, posible influencia de la no homogeneidad en la lubricación, en la temperatura de operación. Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio 0,0145 g, la probeta 20 es la que mejor representa la prueba de desgaste para 25 N.

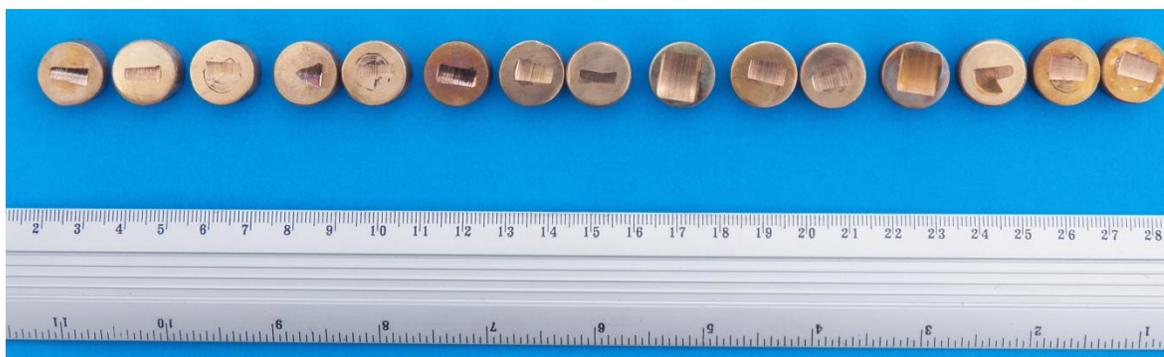
Figura A-5: Peso perdido a 25N de las probetas de mejor comportamiento



Anexo B: Caracterización de huella de desgaste en las probetas de bronce

B1. Caracterización huellas de desgaste en las probetas de bronce

Foto B-1: Huellas obtenidas sobre probetas de bronce después de las pruebas. (a) Probetas numeradas de 1 a 15 (b) Probetas numeradas de 16 a 30.



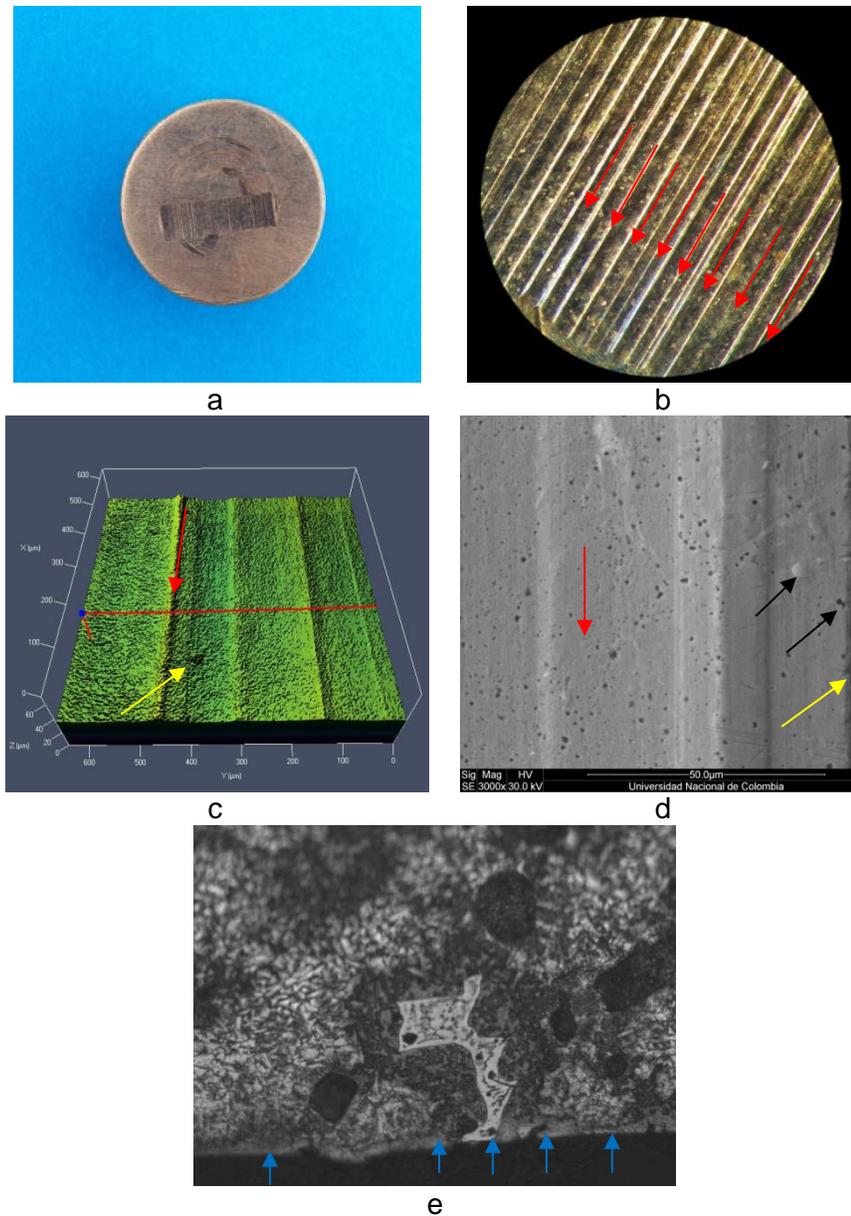
a



b

B.1.2. Materialografía de huella de desgaste en probeta de bronce a 10 N

Figura B-1: Caracterización de modo de falla de la probeta de bronce 23 ensayada a 10 Newton. a) Foto general b) estereoscopía c) confocal d) SEM e) Metalografía.

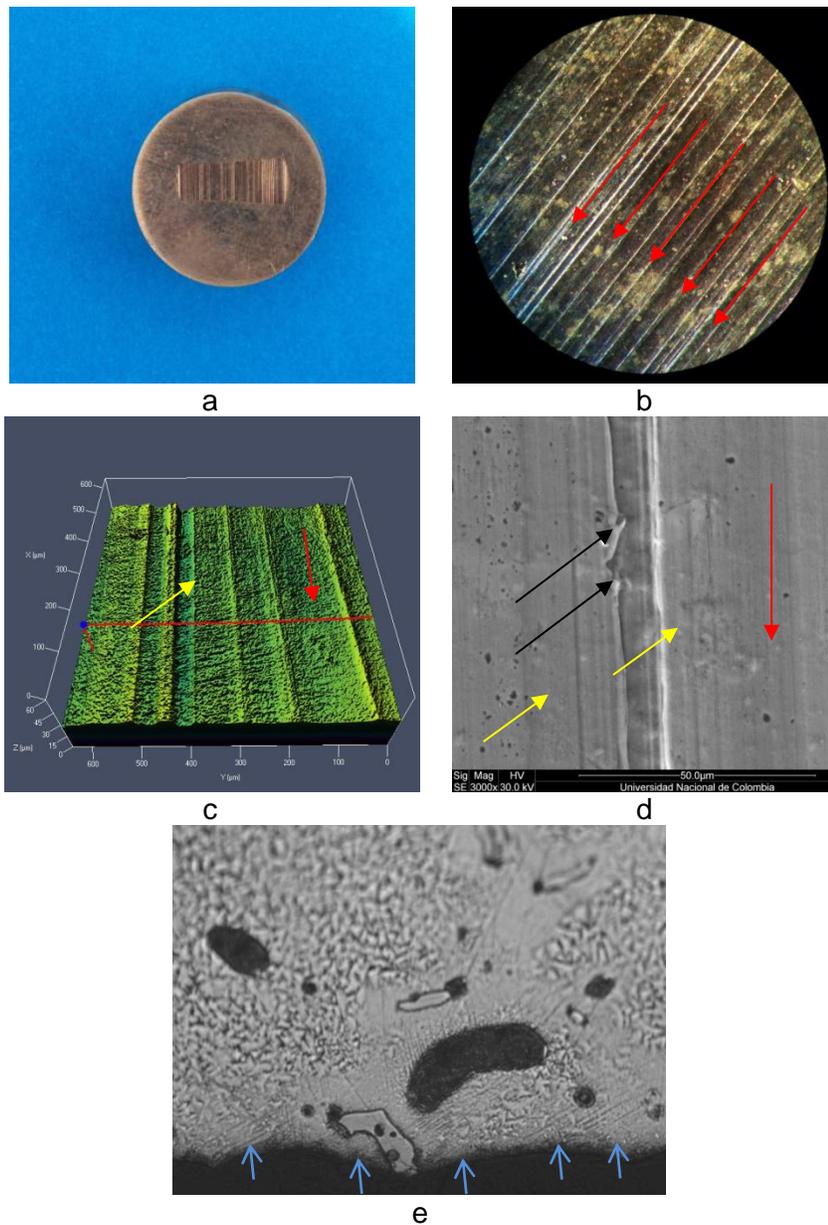


Se observó una geometría de huella uniforme (a), se hizo evidente la aparición de desgaste de tipo arado (b), longitud entre picos de alrededor de 180 μm (c), se observó canales claramente diferenciados en un solo sentido flechas rojas, en general se observó deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión flechas amarillas, considerando también una acumulación de material desgarrado en el fin de las zonas de

desgaste identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la metalografía a 800X (e) no se observó cambios estructurales en la zona de desgaste, se observó cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

B.1.3. Materialografía de huella de desgaste en probeta de bronce a 15 N

Figura B-2: Caracterización de modo de falla de la probeta de bronce 25 ensayada a 15 Newton. a) Foto general b) Estereoscopia c) Confocal d) SEM e) Metalografía.

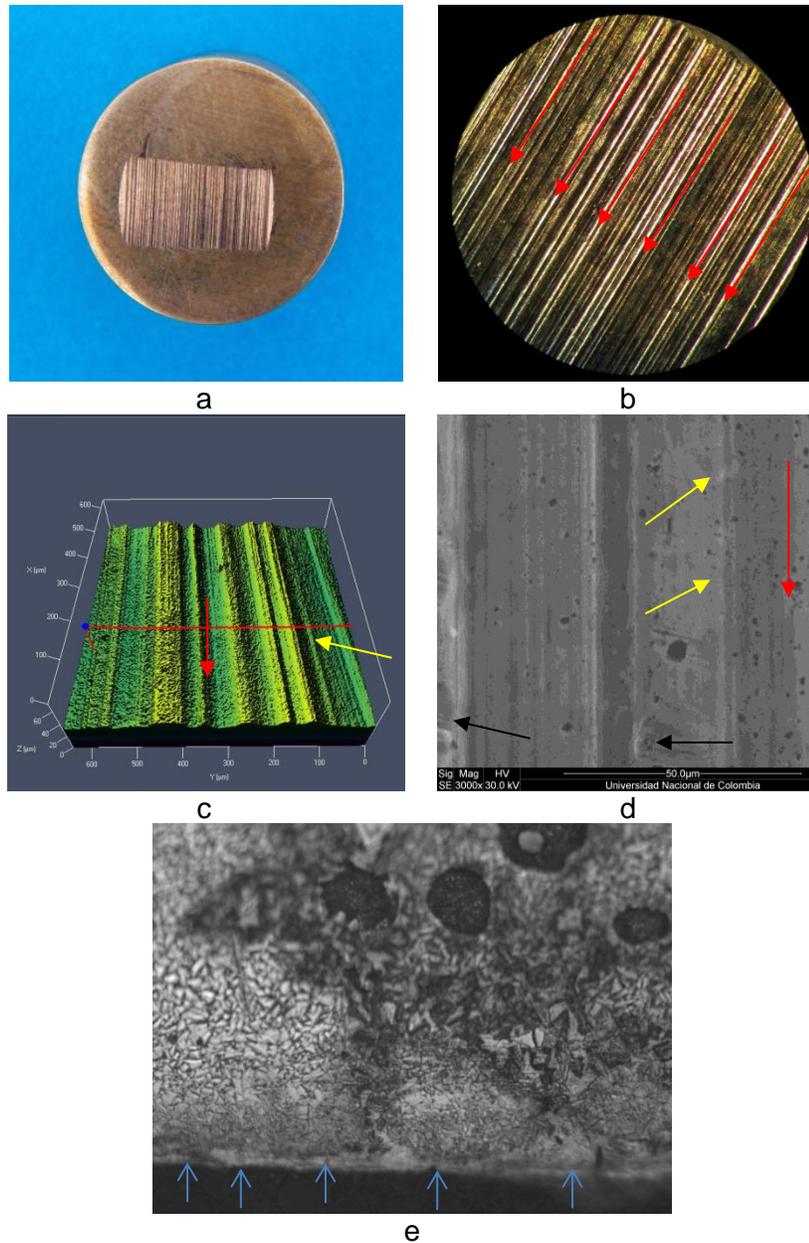


Se observa una geometría de huella no uniforme (a), debida a la probable desalineación entre bloque y anillo durante la prueba, condición debida a la falta de rigidez del equipo. Se hace evidente la aparición de desgaste del tipo arado (b), longitud entre picos varía entre 50 y 180 μm (c), se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido

flechas rojas, se presenta un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión flechas amarillas, considerando también una acumulación de material desgarrado en el fin de las zonas de desgaste identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la metalografía a 800X (e) no se observa cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

B.1.4. Materialografía de huella de desgaste en probeta de bronce a 20 N

Figura B-3: Caracterización de modo de falla de la probeta de bronce 10 ensayada a 20 Newton. a) Foto general b) estereoscopía c) SEM d) Metalografía.

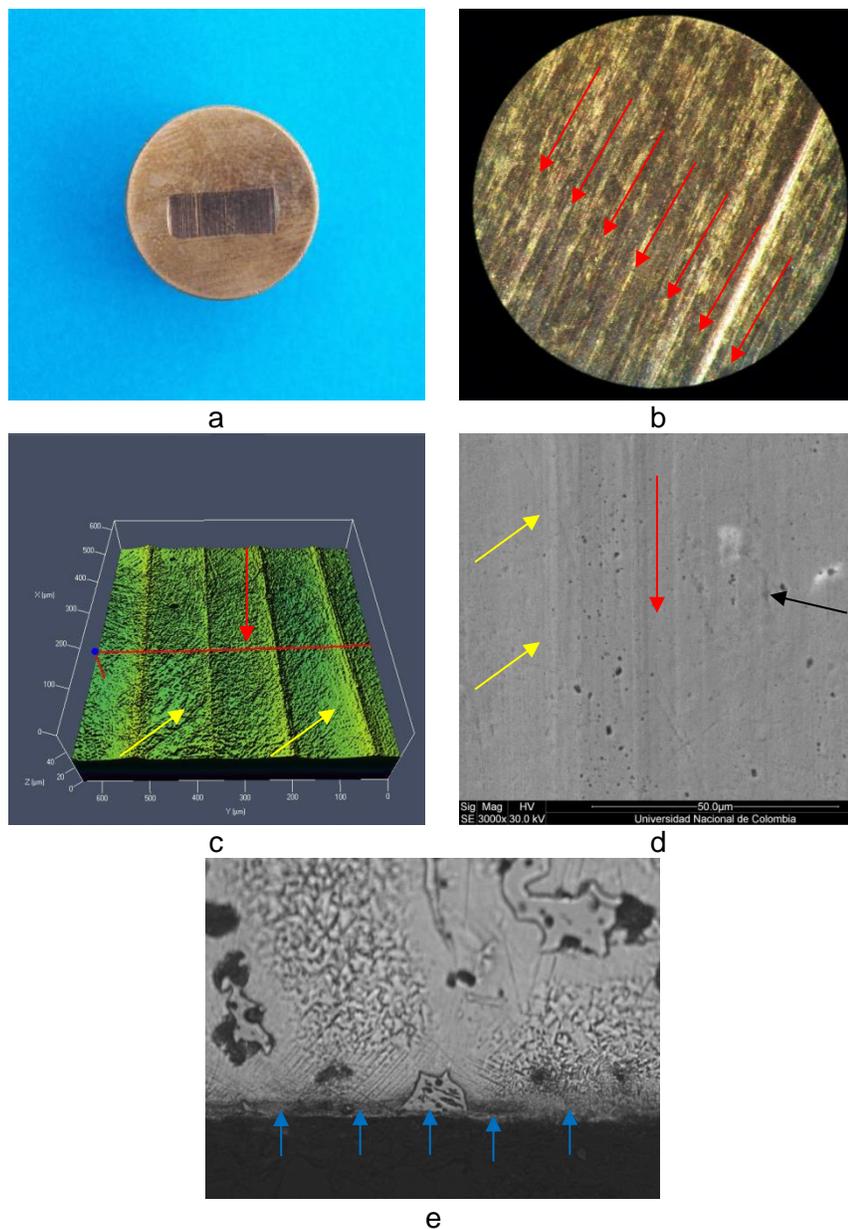


Se observa una geometría de huella uniforme (a). Se hace evidente la aparición de desgaste del tipo arado (b), longitud entre picos de alrededor de $50\ \mu\text{m}$ (c), se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido flechas rojas, se presenta un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observa

deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión flechas amarillas, considerando también una acumulación de material desgarrado en el fin de las zonas de desgaste identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la metalografía a 800X (e) no se observa cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

B.1.5. Materialografía de huella de desgaste en probeta de bronce a 25 N

Figura B-4: Caracterización de modo de falla de la probeta de bronce 20 ensayada a 25 Newton. a) Foto general b) Esteroscopia c) Confocal d) SEM e) Metalografía.



Se observa una geometría de huella uniforme (a). Se hace evidente la aparición de desgaste del tipo arado (b), longitud entre picos de alrededor de $180\ \mu\text{m}$ (c), se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido flechas rojas, se presenta un modo de falla adhesivo evidenciando los siguientes fenómenos aplastamiento por la presión

normal entre piezas, deformación plástica cortante superficial o arrastre de material, en general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión flechas amarillas, considerando también una acumulación de material desgarrado en el fin de las zonas de desgaste identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la metalografía a 800X (e) no se observa cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

Anexo C. Datos y fotos de desgaste del material compuesto

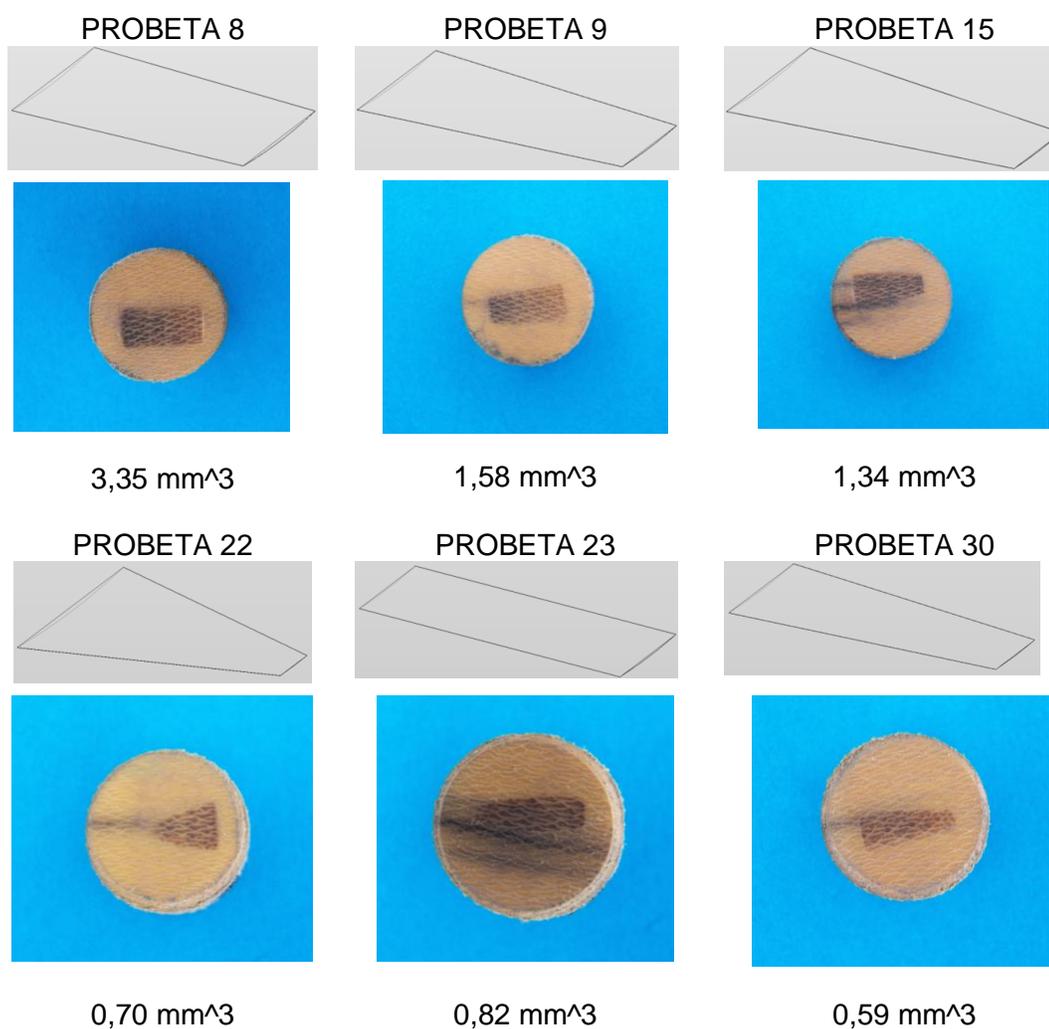
C1. ANALISIS DE DATOS DE DESGASTE DEL MATERIAL COMPUESTO

C.1.1 Resultados de pruebas de desgaste a 10 N del material compuesto

Tabla C-1: Peso perdido bajo la fuerza de 10 N. En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

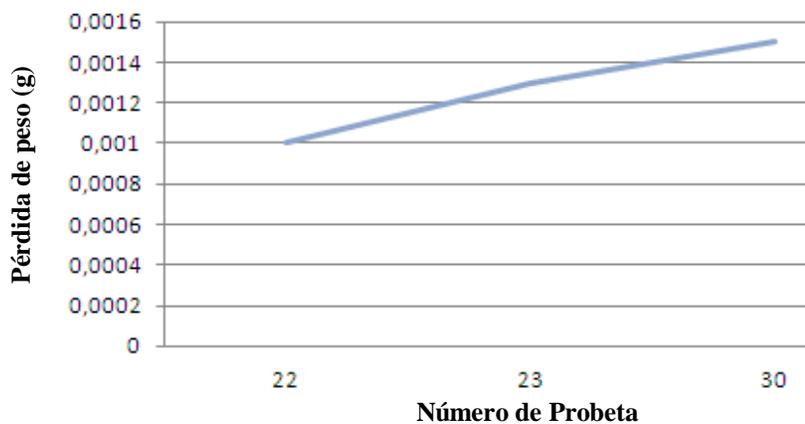
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
8	2,2134	10	2,2087	0,0047
9	2,2279	10	2,2257	0,0022
15	2,1785	10	2,1767	0,0018
22	2,1344	10	2,1335	0,0009
23	2,2087	10	2,2076	0,0011
30	2,1767	10	2,1759	0,0008

Foto C-1: Geometría de las huellas y volumen perdido a 10 N



Inspeccionando las huellas de las probetas se observó una diferencia en cuanto a tamaño de huella en las probetas 8, 9 y 15, las cuales registraron altos valores de desgaste lejos del valor promedio del nivel (0,0009g). En el resto de las probetas, aunque no se presentó homogeneidad en la geometría de las huella, los valores de peso perdido estuvieron cercanos al valor promedio del nivel (0,0009g). Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio (0,0009g), la probeta 23 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 10 N.

Figura C-1: Peso perdido a 10 N de las probetas de mejor comportamiento

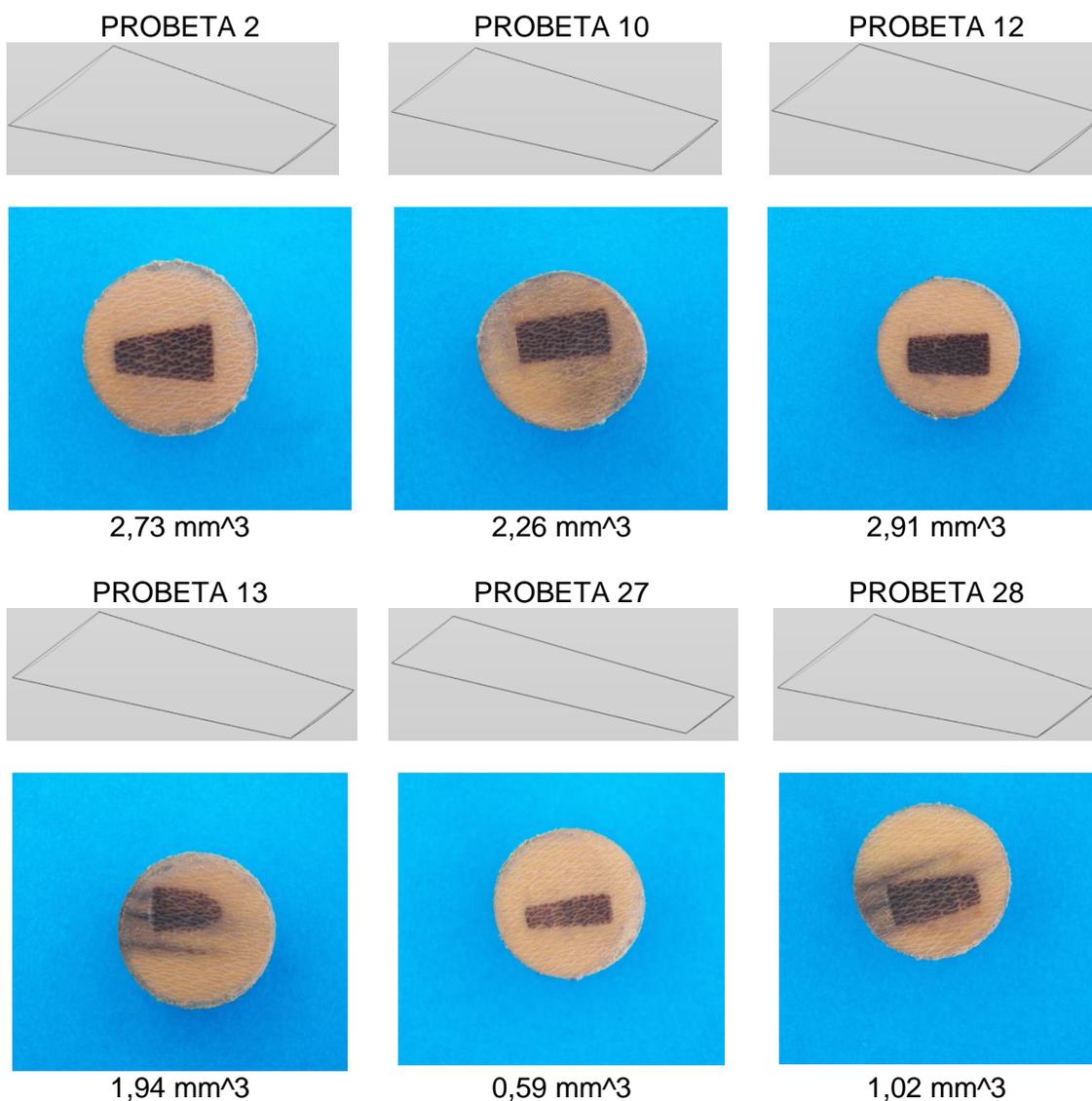


C.1.2 Resultados de pruebas de desgaste a 15 N del material compuesto

Tabla C-2: Peso perdido bajo la fuerza de 15 N. En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

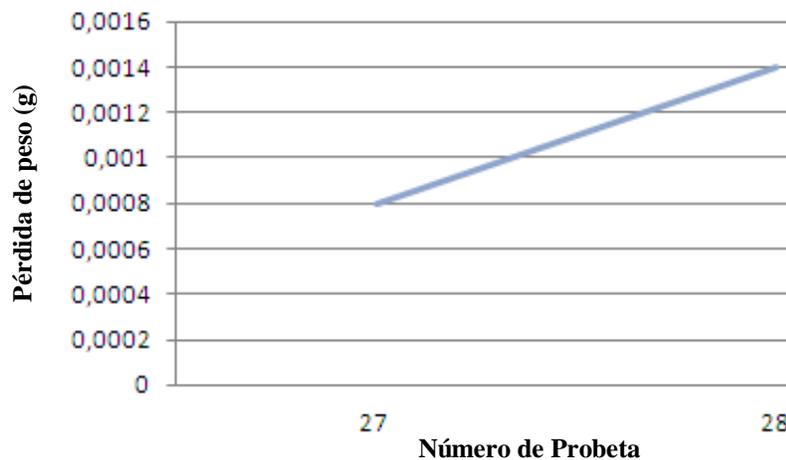
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
2	2,1991	15	2,1952	0,0039
10	2,354	15	2,3508	0,0032
12	2,1809	15	2,1767	0,0042
13	1,9493	15	1,9467	0,0026
27	2,1767	15	2,1759	0,0008
28	1,9467	15	1,9453	0,0014

Foto C-2: Geometría de las huellas y volumen perdido a 15 N



Inspeccionando las huellas de las probetas se observó una diferencia en cuanto a tamaño de huella en las probetas 2, 10, 12, 13 las cuales registraron altos valores de desgaste lejos del valor promedio del nivel (0,0011 g). En el resto de probetas aunque no se presentó homogeneidad en la geometría de las huella, los valores de peso perdido estuvieron cercanos al valor promedio del nivel (0,0011 g). Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio (0,0011 g), la probeta 28 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 15 N.

Figura C-2: Peso perdido a 15 N de las probetas de mejor comportamiento

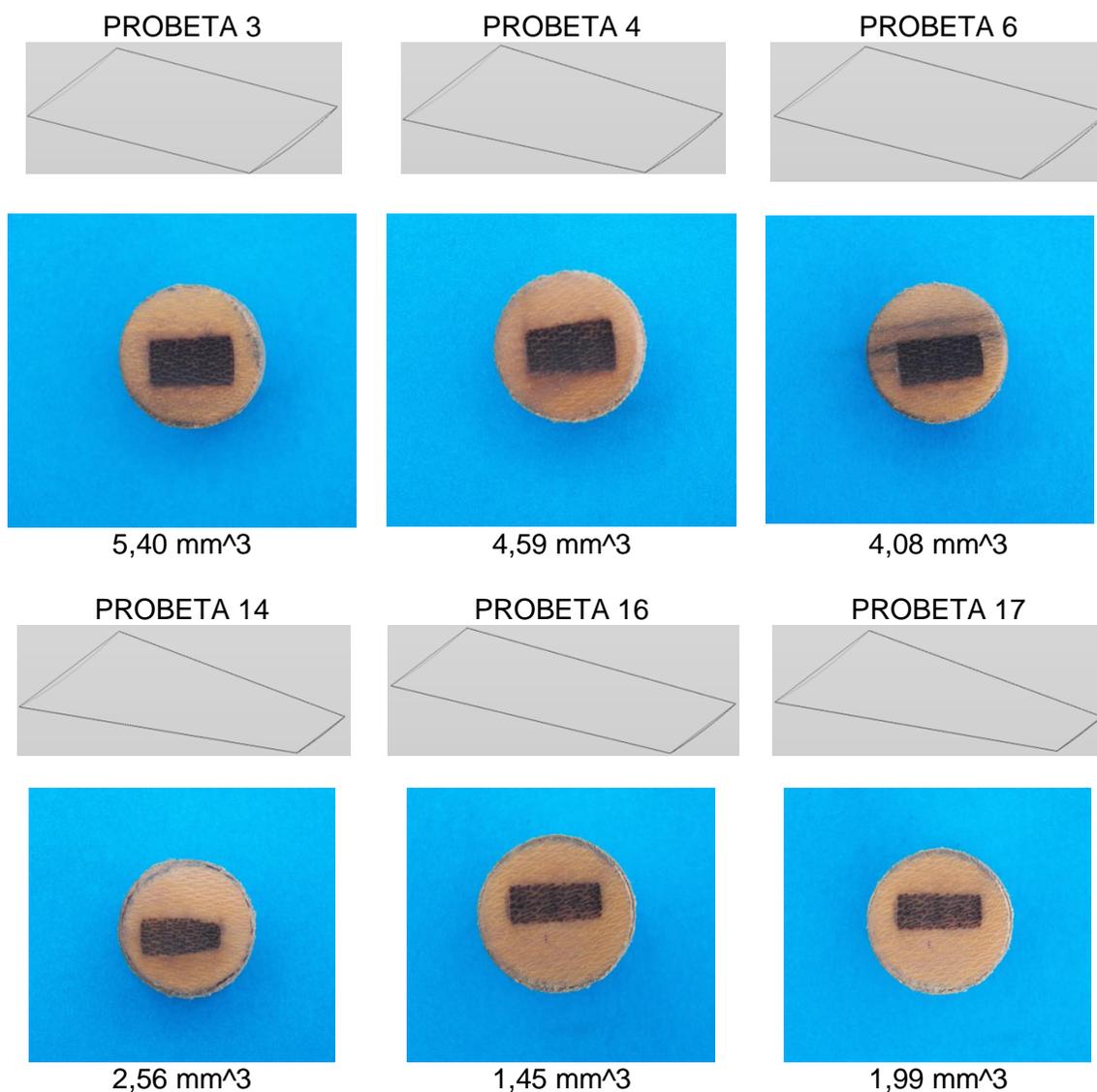


C.1.3 Resultados de pruebas de desgaste a 20 N del material compuesto

Tabla C-3: Peso perdido bajo la fuerza de 20 N, En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

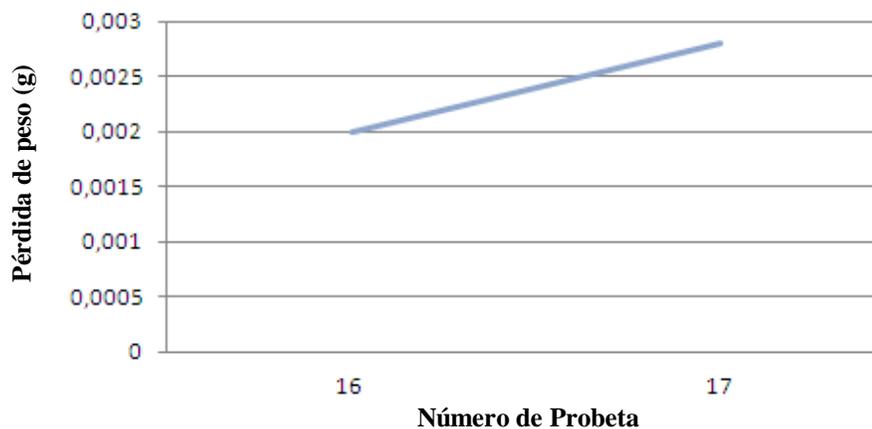
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
3	2,2424	20	2,2347	0,0077
4	2,1394	20	2,1331	0,0063
6	2,03	20	2,0244	0,0056
14	2,1784	20	2,1749	0,0035
16	2,1757	20	2,1737	0,0020
17	2,1952	20	2,1924	0,0028

Foto C-3: Geometría de las huellas y volumen perdido a 20N



Inspeccionando las huellas de las probetas se observó una diferencia en cuanto a tamaño de huella en las probetas 3, 4, 6, 14 las cuales registraron valores de desgaste lejos del valor promedio del nivel (0,0024 g). En el resto de probetas presentaron homogeneidad en la geometría de las huella, los valores de peso perdido estuvieron cercanos al valor promedio del nivel (0,0024 g). Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio (0,0024 g), la probeta 16 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 20 N.

Figura C-4: Peso perdido a 20 N de las probetas de mejor comportamiento

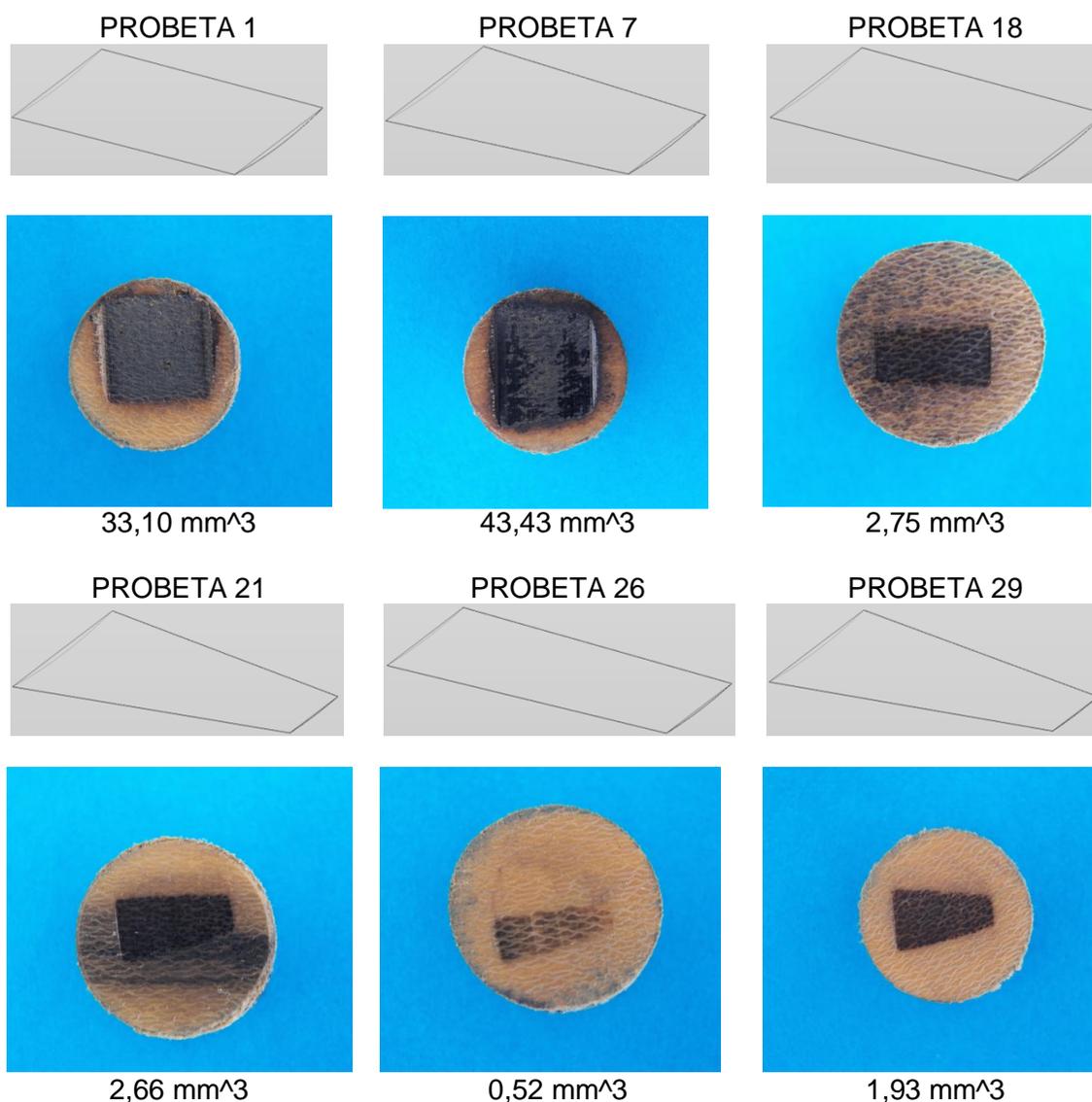


C.1.4 Resultados de pruebas de desgaste a 25 N del material compuesto

Tabla C-4: Peso perdido bajo la fuerza de 25 N. En rojo las probetas no consideradas en el análisis de datos

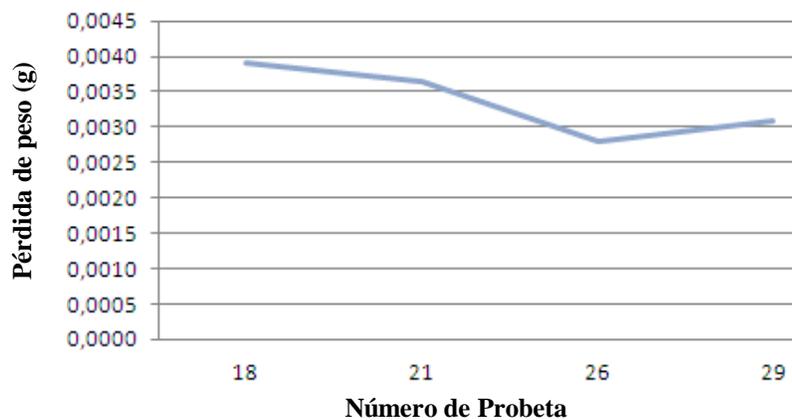
N° PROBETAS	PESO INICIAL (gr)	F (N)	Peso Final (gr)	Peso perdido (gr)
1	2,2218	25	2,1757	0,0461
7	2,1945	25	2,1344	0,0601
18	2,2347	25	2,2308	0,0039
21	2,0244	25	2,0208	0,0036
26	2,2521	25	2,2514	0,0028
29	2,1749	25	2,1723	0,0031

Foto C-4: Geometría de las huellas y volumen perdido a 25N



Inspeccionando las huellas de las probetas se observó una diferencia en cuanto a tamaño de huella en las probetas 1 Y 7 las cuales registraron altos valores de desgaste lejos del valor promedio del nivel (0,0034 g). En el resto de probetas aunque no se presenta homogeneidad en la geometría de las huella, los valores de peso perdido estuvieron cercanos al valor promedio del nivel (0,0034g). Por la característica geométrica de la huella y por su valor cercano al promedio (0,0034g), la probeta 18 fue la que mejor representó la prueba de desgaste para 25 N.

Figura C-5: Peso perdido a 25 N de las probetas de mejor comportamiento



Anexo D: Caracterización de huella de desgaste en las probetas de compuesto

D.1. Caracterización de huellas de desgaste del compuesto

La utilización de materiales orgánicos en componentes mecánicos ha tenido un acelerado desarrollo en las dos últimas décadas. Algunas de las aplicaciones más interesantes de materiales poliméricos son la fabricación de componentes para maquinaria como sellos hidráulicos, casquillos, cojinetes o sincronismos de precisión, por citar algunos casos.

Foto D-1: Huellas obtenidas sobre probetas de compuesto después de las pruebas. (a) Probetas numeradas de 1 a 15 (b) Probetas numeradas de 16 a 30.



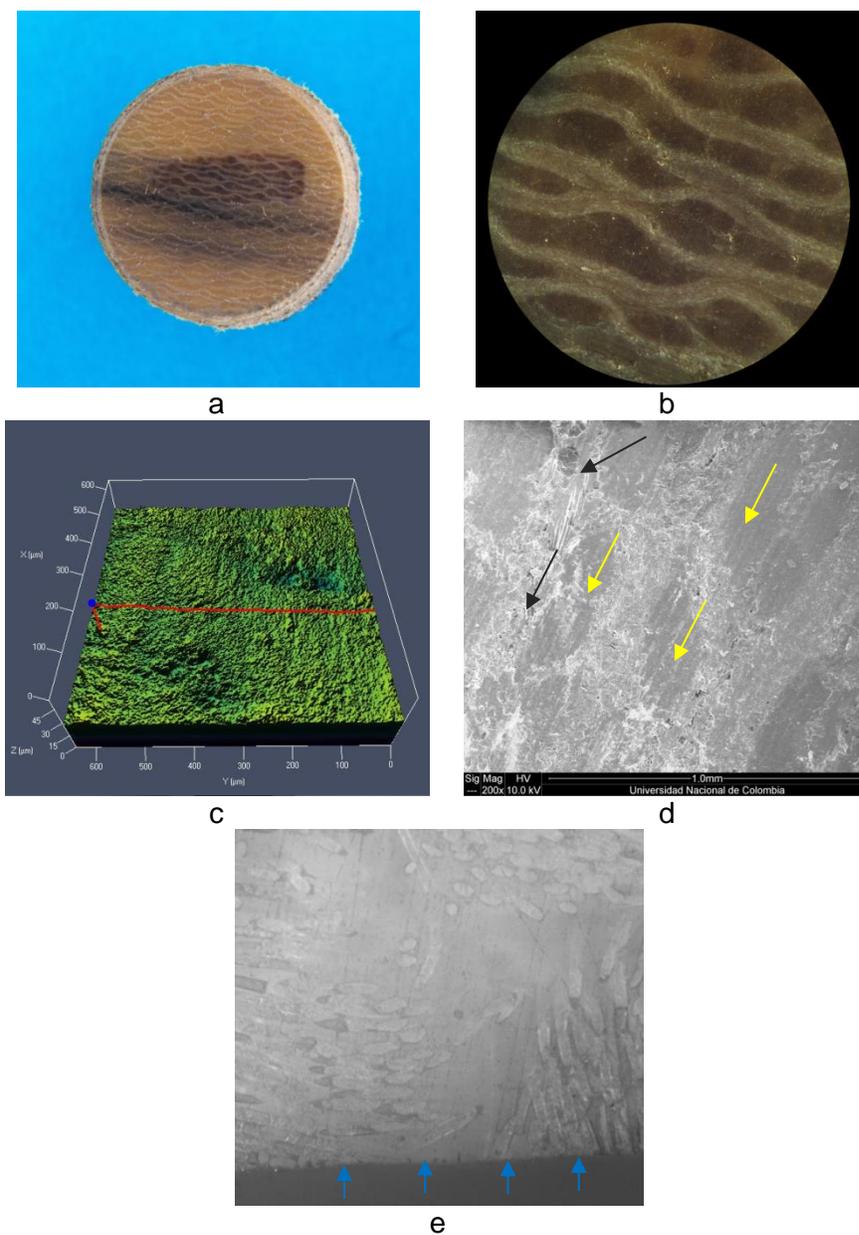
a



b

D.1.1. Materialografía de huella de desgaste en probeta de compuesto a 10 N

Figura D-1: Caracterización de modo de falla de la probeta de compuesto 23 ensayada a 10 Newton. a) Foto general b) Estereoscopía c) Confocal d) SEM e) Materialografía.

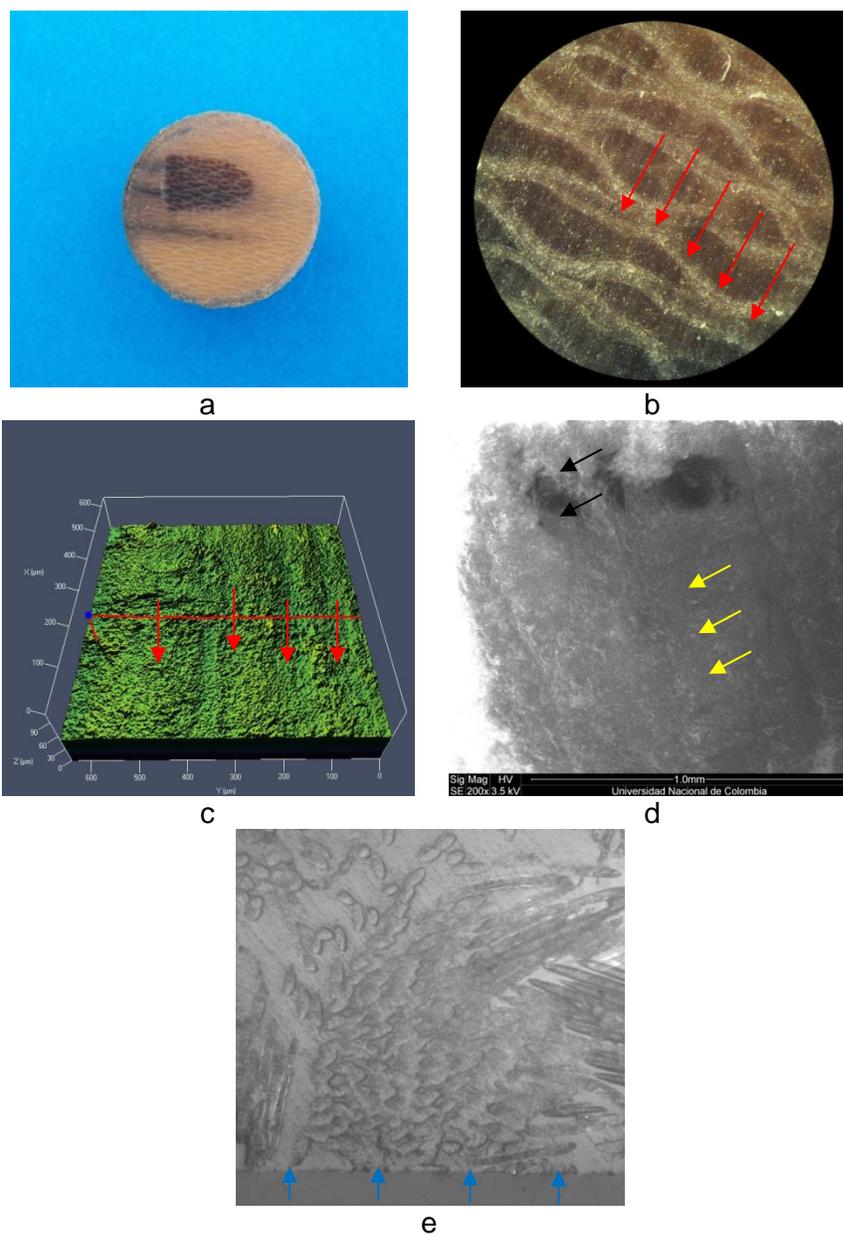


Se observó en general la huella resultante después de ser sometida la probeta a desgaste bajo una fuerza de 10N, en la figura b se observó el diseño del tejido, el cual no fue alterado con el proceso de desgaste, en la figura c se muestra una rugosidad media aritmética Ra de $0,474\mu\text{m}$, en la figura d se observó una deformación plástica en las

superficie, se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido, se presentó un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observó deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión (flechas amarillas), considerando también material desgarrado, identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la materialografía a 500X (e) no se observó cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

D.1.2. Materialografía de huella de desgaste en probeta de compuesto a 15 N

Figura D-2: Caracterización de modo de falla de la probeta de compuesto 28 ensayada a 15 Newton. a) Foto general b) Estereoscopia c) Confocal d) SEM e) Materialografía.

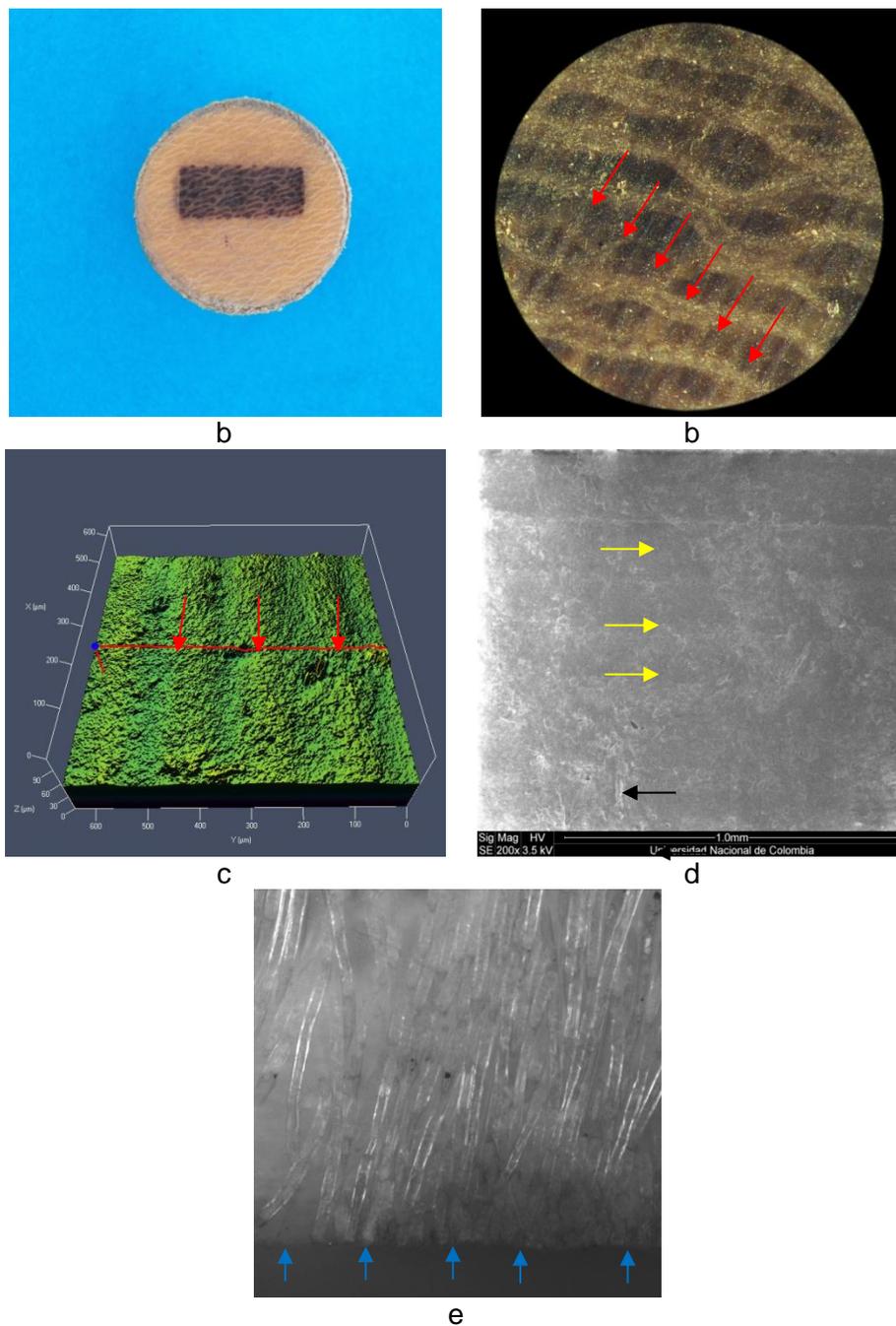


Se observó en (a) una huella deformada debido a la desalineación entre probetas, después de ser sometida a desgaste bajo una fuerza de 15N, en la figura b se observó el diseño del tejido, el cual no fue alterado con el proceso de desgaste, sin embargo se notó claramente surcos tallados por el anillo en el proceso de desgaste flechas rojas, en la

figura c se muestra un rugosidad media aritmética Ra de 1.353 μm , también se hacen evidentes los surcos flechas rojas, en la figura d se observó una deformación plástica en las superficie, se observaron canales claramente diferenciados en un solo sentido, se presentó un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observó deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión (flechas amarillas), considerando también material desgarrado, identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la materialografía a 500X (e) no se observó cambios estructurales en la zona de desgaste, se observaron cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

D.1.3. Materialografía de huella de desgaste en probeta de compuesto a 20 N

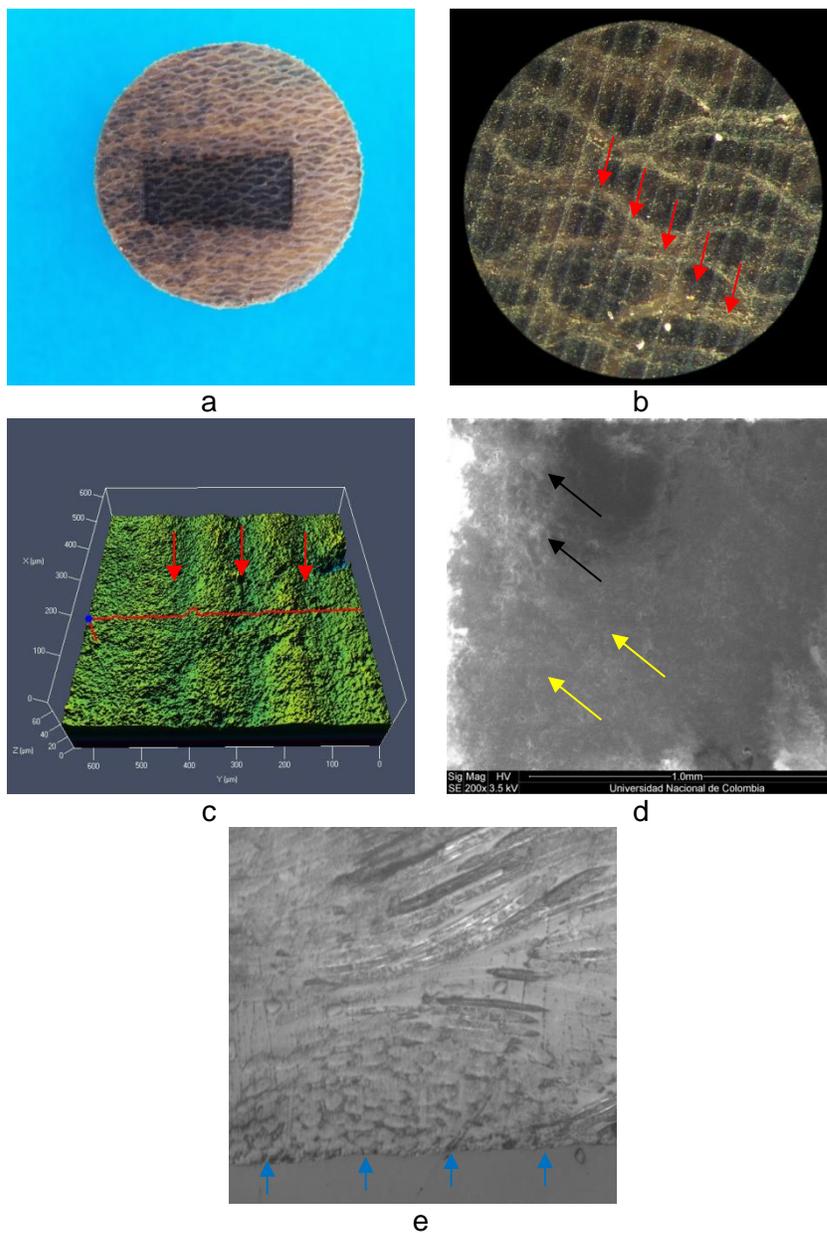
Figura D-3: Caracterización de modo de falla de la probeta de compuesto 16 ensayada a 20 Newton. a) Foto general b) estereoscopia c) Confocal d) SEM e) Materialografía.



Se observa en (a) una huella deforme debida a la desalineación entre probetas, después de ser sometida a desgaste bajo una fuerza de 20N, en la figura b se observa el diseño del tejido, el cual no fue alterado con el proceso de desgaste, sin embargo se notan claramente surcos tallados por el anillo en el proceso de desgaste flechas rojas, en la figura c se muestra una rugosidad media aritmética Ra de 1.773 μm , también se hacen evidentes los surcos flechas rojas, en la figura d se observa una deformación plástica en las superficie, se observan canales claramente diferenciados en un solo sentido, se presenta un modo de falla mixto (desgaste abrasivo y desgaste adhesivo), en general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión (flechas amarillas), considerando también material desgarrado, identificando mecanismos de abrasión, flechas negras (d). En la materialografía a 500X (e) no se observa cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

D.1.4. Materialografía de huella de desgaste en probeta de compuesto a 25 N

Figura D-4: Caracterización de modo de falla de la probeta de compuesto 18 ensayada a 25 Newton. a) Foto general b) Esteroscopia c) Confocal d) SEM e) Materialografía.



Se observa en (a) una huella deforme debida a la desalineación entre probetas, después de ser sometida a desgaste bajo una fuerza de 25N, en la figura b se observa el diseño del tejido, el cual no fue alterado con el proceso de desgaste, sin embargo se notan claramente surcos tallados por el anillo en el proceso de desgaste flechas rojas, en la

figura c se muestra una media rugosidad aritmética Ra de 1.216 μm , también se hacen evidentes los surcos flechas rojas, en general se observa deformación plástica superficial con arranque de material por adhesión (flechas amarillas), considerando también material desgarrado, en la figura d se observa una deformación plástica en las superficies, flechas negras (d). En la materialografía a 500X (e) no se observa cambios estructurales en la zona de desgaste, se observan cortes bien definidos en la huella, provocados por el anillo (flechas azules).

Bibliografía

[1] ASTM INTERNATIONAL, Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test D.B. Designation: G77 – 05 (Reapproved 2010).

[2] WILLIAMS, John. A. Wear and wear particles—some fundamentals, Tribology International, Cambridge 2005.

[3] ARCHARD, John. F. Contact and rubbing of flat Surface, J. Appl, Phys., 24,p 981, London 1953.

[4] FIGUEROA. Marco. G. Diseño mecánico integral y manufactura de los componentes mecánicos de máquina tribológica de cuatro bolas para ensayos lubricados. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad, Azcapotzalco 2009.

[5] WILLIAMS, Jhon. A. Engineering Tribology. Oxford University Press, Oxford 1994.

[6] MOORE, Michael. A. Swanson, P. The effect of particle shape on abrasive wear: A comparison of theory and experiment. Porc. Int. Conf. Wear Materials. ASME, 1983.

[7] ASM, METALS HANDBOOK. Friction, Lubrication and Wear Technology. Vol 18. E.U.A. 1992.

[8] WELSH, N.C. The dry wear of steels, Phil. Trans. Proc. Roy.Soc. A257, p.31. London 1965.

[9] KRAGELSKII, I.V. “Friction Wear Lubrication”, Tribology Handbook, Editorial Mir Publishers, V.1, Moscú, 1981.

[10] LIPSON, CH. Wear considerations in design, Prentice Hall, EE.UU, 1967.

[11] HIRST, W. Wear of unlubricated metals, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference on Lubrication and Wear, London, (1957–1958).

[12] GEE, A.W. Friction and wear as related to the composition, structure and properties of metals, *Int. Met. Rev.* P. 57-67, 1979.

[13] FATHALLAH R. INGLEBERT G. CASTEX L. Prediction of plastic deformation and residual stresses induced in metallic parts by shot peening *Mat. Sci Technol*, Vol 14. 1998.

[14] OBERLE, T. L. Properties influencing wear of metals, *Journal of metals*, V. 3, pp. 438-439G. (1951).

[15] BEGELINGER, A y DE GEE, A. W. J. Wear in lubricated journal bearings, *Wear of materials*, ASME 1977, *Source Book on Wear Control Technology*, Rigney, D. A. y Glaeser, W. A. (Editores), American Society for Metals, EE.UU., pp. 132-139, 1978.

[16] F. MARTÍNEZ. *La Tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento*, 2nd rev. Ed.. Limusa, México, D.F 1997.

[17] MORA J. A. *Caracterización tribológica del par bronce-acero en un contacto anillo-bloque*, Universidad Veracruzana Facultad De Ingeniería Mecánica Eléctrica. Veracruz 2012.

[18] J.K. LANCASTER, The effect of carbon fibre reinforcement on the friction and wear of polymers. Royal Aircraft establishment technical report. 1966.

[19] PÉREZ, C. *Estudio del desgaste por deslizamiento en seco en un equipo "Pin-on-disk"*. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1999.

[20] STOLARSKI T.A. A Probabilistic Approach to Wear Prediction, (*En Journal of applied Physics*, 1990), pp 1143-1149, 1990.

[21] BUNDINSKI K.G. *Guide to Friction, Wear and Erosion Testing*. ASTM INTERNATIONAL Standards Worldwide, 2007.

[22] Y. INAGUA. Theoretical analysis of mechanical efficiency in Vane pump. Technical paper, *JTEKT Engineering journal English edition* N° 1007E , 2010.

- [23] R. GELLRICH, A. KUNZ B, G. BECKMANN, E. BROSZEIT B, Theoretical and practical aspects of the wear of vane pumps Part A. Adaptation of a model for predictive wear calculation, University for Technology, Economy and Social Science, Zittaul 1994.
- [24] R. GELLRICH, A. KUNZ B, G. BECKMANN, E. BROSZEIT B, Theoretical and practical aspects of the wear of vane pumps Part B. Analysis of wear behaviour in the Vickers vane pump test, University for Technology, Economy and Social Science, Zittaul 1994.
- [25] GARCÍA A, NORIEGA A, CORTIZO J.L, SIERRA J.M, HIGUERA A. Diseño de experimentos y su aplicación en la investigación de la predicción del desgaste de recubrimientos Ni-Cr-B-Si, Dpto. Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo, 2010.
- [26] BUDYNAS R.G. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Octava Edición, Mc Graw Hill, 2008
- [27] OSCAR R. ALFREDO A. Estudio de la resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación, Universidad Central de Venezuela, 2002.
- [28] NORTON, Robert L.. Diseño de Máquinas. México: Ed. Prentice-Hall (Pearson), 1999.
- [29] GIRALDO D. Estudio del desgaste por deslizamiento en seco de algunos plásticos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2002.
- [30] MONTGOMERY D.C. Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición, Limusa Wiley, 2002
- [31] B. SADIK, E. ATIK, S. KÖKSAL. Tribological properties of polymer-based journal bearings. ELSERVIER materials and desing. 2008

[32] KUEHL R.O. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones- Thomson learning, Mexico, 2001.

[33] ASM HANDBOOK, Metallography and Microstructures Volume 9. ASM International. 1992.

[34] ASM HANDBOOK, Properties and selection: Nonferrous alloys and special –purpose materials Volume 2. ASM International. 1992.

[35] KRAGELSKY, I.V. “Friction Wear Lubrication”, Tribology Handbook, Editorial Mir Publishers, V.1, Moscú, 1981.

[36] OSCAR R. ALFREDO A. Estudio de la resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación, Universidad Central, Venezuela, 2002.

[37] J. MORA. Caracterización tribológica del par bronce-acero en un contacto anillo-bloque. Universidad veracruzana facultad de ingeniería mecánica eléctrica. Venezuela 2012.

[38] HUTCHINGS, I.M. Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Ed. Edward Arnold, a Division of Hodder Headline PLC, London, 1992.

[39] ZUM, K.H. Microstructure and Wear of Materials. Tribology series 10 Netherlands: Ed. Elsevier Science Publishing Company Inc., Netherlands, 1987.

[40] JHONSON, K.L Contact mechanics. Cambridge University Press, p 374-396, Cambridge, 1985.

[41] PHILLIP B. A, JOHN F. Surface Physics in Tribology. Cleveland State University, Cleveland, 2001.

[42] RICHARD B.E. CRC handbook of lubrication, Theory and Practice of Tribology. General Electric Company, Schenectady, New York, 1983.

[43] PETERS, S.T. "Handbook of composites" Chapman & Hall, UK, 1998.

[44] VAZIRI, M., et al. An investigation of the Wear of Polymeric Materials. Wear, 122, 1988.

[45] GONZALO O. S. Resistencia al desgaste y a la abrasión de polímeros técnicos y nanocomposites., Cartagena, Septiembre de 2013.