

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ANÁLISIS DE FALLA DE COJINETES DE BIELA DE CAMIONES
DE 2300 HP PARA MINERÍA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Emilio Carlos Zapata Velarde

ASESOR: Dr. Francisco Rumiche Zapata

RESUMEN

Los cojinetes de biela de los motores diesel de los camiones de acarreo de una mina de tajo abierto en el Perú deben presentar un buen estado hasta las 14000 horas de operación, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Sin embargo, en la práctica se han producido constantes fallas y desgaste prematuro alrededor de las 5000 horas de trabajo.

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo estudiar las características del material y los mecanismos de falla o desgaste de los cojinetes de biela seleccionados para la investigación. Estudiar el material contribuye al análisis de la causa-raíz de la falla de los cojinetes, ya que existen otros factores que también pueden ocasionar las fallas, como malas prácticas de mantenimiento, una inadecuada lubricación, severas condiciones de operación, un diseño incorrecto, entre otros.

La metodología consistió en seleccionar las muestras representativas para llevar a cabo el estudio, recopilar información de literatura especializada, inspeccionar visualmente los cojinetes, realizar los ensayos de laboratorio correspondientes para determinar las propiedades de los cojinetes: ensayos de metalografía, ensayos de microscopía electrónica de barrido y ensayos de microdureza.

El análisis se ha realizado a tres cojinetes: un cojinete en buen estado (Cojinete 1) y dos cojinetes con desgaste severo (Cojinete 2 y Cojinete 3). El cojinete en buen estado, Cojinete 1, se ha tomado como referencia para caracterizar el material. Por otro lado, los cojinetes con desgaste severo, Cojinete 2 y Cojinete 3, han sido utilizados para determinar y estudiar los mecanismos de desgaste y, asimismo, realizar los ensayos de laboratorio para comparar las características del material con las del Cojinete 1.

Finalmente, se han planteado conclusiones y recomendaciones, desde el punto de vista del material, en base a los ensayos de laboratorio realizados y los mecanismos de desgaste analizados.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN DEL TEMA DE TESIS	2
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPITULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
1.1 Ubicación de los cojinetes de biela	4
1.2 Funciones de cojinetes de biela	4
1.2.1 Lubricidad	4
1.2.2 Transferencia de calor	5
1.2.3 ‘Embedability’ y ‘Conformability’	5
1.2.4 Resistencia a la fatiga	6
1.2.5 Superficie de desgaste reemplazable.....	6
1.3 Materiales y estructuras de cojinetes de biela	7
1.3.1 Materiales y estructura según el fabricante	7
1.3.1.1 Capa de Estaño (‘Tin Flash’)	8
1.3.1.2 Capa de Plomo-Estaño (‘Lead-Tin’).....	8
1.3.1.3 Capa de Cobre (‘Copper Bond’)	8
1.3.1.4 Capa de Aluminio (‘Aluminum’).....	8
1.3.1.5 Capa de Acero (‘Steel’).....	8
1.3.2 Materiales y estructura según SAE	9
1.3.2.1 Capa de Estaño (‘Flash’)	9
1.3.2.2 Capa de Plomo-Estaño (‘Overlay’)	10
1.3.2.3 Capa de Níquel (‘Nickel Dam’)	10
1.3.2.4 Capa de Cobre-Plomo (‘Lining’)	11
1.3.2.5 Capa de Acero (‘Steel Back’)	11
1.3.3 Denominación de las capas de los cojinetes seleccionados.....	11

1.4 Mecanismos de desgaste en cojinetes de biela	12
1.4.1 Desgaste adhesivo	12
1.4.2 Desgaste abrasivo	13
1.4.3 Erosión por cavitación.....	16
1.4.4 'Fretting corrosion'.....	17
1.5 Análisis causa- raíz del desgaste excesivo o falla de cojinetes de biela	18
CAPITULO 2. ANÁLISIS DE FALLA.....	19
2.1 Recopilación de información.....	20
2.1.1 Selección de muestras	20
2.1.2 Estadísticas de fallas de cojinetes de biela	21
2.2 Caracterización del material del cojinete de biela	22
2.2.1 Registro fotográfico	22
2.2.2 Ensayo de metalografía	22
2.2.3 Microscopía electrónica de barrido.....	24
2.2.4 Análisis químico	24
2.2.5 Ensayo de microdureza	24
2.3 Análisis del material de los cojinetes de biela con desgaste	25
2.3.1 Inspección visual	25
2.3.1.1 Inspección visual a nivel macro	25
2.3.1.2 Inspección visual asistida con estereoscopio.....	25
2.3.2 Ensayo de metalografía	25
2.3.3 Microscopía electrónica de barrido	25
2.3.4 Ensayo de microdureza.....	25
CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
3.1 Caracterización del material del cojinete de biela: Cojinete 1	26
3.1.1 Registro fotográfico	26
3.1.2 Ensayo de metalografía	27
3.1.2.1 Medición de los espesores de capa	27

3.1.2.2 Microestructura del acero	31
3.1.3 Microscopía electrónica de barrido	33
3.1.3.1 Análisis de elementos en la Capa 1	34
3.1.3.2 Análisis de elementos en la Capa 2.....	35
3.1.3.3 Análisis de compuestos en la Capa 2 ('Puntos negros')	36
3.1.3.4 Análisis de compuestos en la Capa 2 ('Puntos grises').....	38
3.1.3.5 Análisis de elementos en la Capa 3.....	39
3.1.3.6 Análisis de elementos en la Capa 4.....	40
3.1.3.7 Análisis de compuestos en la Capa 4.....	41
3.1.3.8 Análisis de elementos en la Capa 5.....	42
3.1.4 Análisis químico	43
3.1.5 Ensayo de microdureza	44
3.2 Análisis del material de los cojinetes de biela con desgaste	45
3.2.1 Análisis del Cojinete 2.....	45
3.2.1.1 Inspección visual a nivel macro	45
3.2.1.2 Inspección visual asistida con estereoscopio.....	48
3.2.1.3 Ensayo de metalografía	49
3.2.1.3.1 Metalografía en una zona alejada del desgaste	49
3.2.1.3.2 Microestructura del acero.....	53
3.2.1.3.3 Metalografía en la zona de desgaste.....	53
3.2.1.4 Microscopía electrónica de barrido	54
3.2.1.4.1 Análisis de la 'Zona 1' de erosión por cavitación	55
3.2.1.4.2 Análisis de la 'Zona 2' de erosión por cavitación	56
3.2.1.4.3 Análisis de la 'Zona 3' de erosión por cavitación	57
3.2.1.4.4 Análisis de la 'Zona 4' de erosión por cavitación	58
3.2.1.4.5 Análisis de la 'Zona 4' a mayores aumentos	59
3.2.1.4.6 Análisis de esferas en la 'Zona 4'	60
3.2.1.4.7 Análisis puntual en una 'Esfera' de la 'Zona 4'	61
3.2.1.5 Ensayo de microdureza	62

3.2.2 Análisis del Cojinete 3.....	63
3.2.2.1 Inspección visual a nivel macro	63
3.2.2.2 Inspección visual asistida con estereoscopio.....	65
3.2.2.3 Ensayo de metalografía	66
3.2.2.3.1 Metalografía en una zona alejada del desgaste	66
3.2.2.3.2 Microestructura del acero.....	69
3.2.2.4 Microscopía electrónica de barrido	70
3.2.2.4.1 Análisis de la 'Zona 1' de erosión por cavitación	71
3.2.2.4.2 Análisis de los 'Puntos negros' de la 'Zona 1'.....	72
3.2.2.4.3 Análisis de la 'Zona 2' de erosión por cavitación	74
3.2.2.4.4 Análisis de la 'Zona 3' de erosión por cavitación	75
3.2.2.4.5 Análisis de la 'Zona 3' a mayores aumentos	76
3.2.2.4.6 Análisis puntual en una 'Esfera' de la 'Zona 3'	77
3.2.2.5 Ensayo de microdureza	78
CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
CAPITULO 5. BIBLIOGRAFIA	80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la ubicación de los cojinetes de biela.....	4
Figura 2. Lubricación de los cojinetes de biela	5
Figura 3. Transferencia de calor generado en los cojinetes de biela	5
Figura 4. Propiedad de la capa de Plomo-Estaño de los cojinetes de biela.....	6
Figura 5. Materiales y estructura de los cojinetes de biela según el fabricante	7
Figura 6. Materiales y estructura de los cojinetes de biela según SAE.....	9
Figura 7. Capa de Estaño de los cojinetes de biela según SAE	10
Figura 8. Capa de Plomo-Estaño de los cojinetes de biela según SAE.....	10
Figura 9. Capa de Níquel de los cojinetes de biela según SAE	11
Figura 10. Desgaste adhesivo en cojinetes de biela	12
Figura 11a. Desgaste adhesivo por dilución de refrigerante.....	13
Figura 11b. Desgaste adhesivo por dilución de combustible.....	13
Figura 12. Partículas abrasivas.....	14
Figura 13. Desgaste abrasivo de cojinetes de biela	14
Figura 14. Desgaste abrasivo y adhesivo de cojinetes de biela	15
Figura 15. Desgaste abrasivo de cojinetes de biela	15
Figura 16a. Erosión por cavitación de cojinetes de biela.....	16
Figura 16b. Erosión por cavitación de cojinetes de biela.....	16
Figura 17. 'Fretting corrosion' en cojinetes de biela	17
Figura 18. Cojinetes seleccionados para el tema de tesis.....	20
Figura 19. Conjunto de cojinetes recopilados.....	20
Figura 20. Máquina de corte	23
Figura 21. Máquina para moldear	23
Figura 22. Lijado de la muestra	23
Figura 23. Pulido de la muestra	23
Figura 24. Muestra terminada	23
Figura 25. Microscopio óptico	23
Figura 26. Microscopio electrónico.....	24
Figura 27. Cara interior del Cojinete 1.....	26
Figura 28. Capas 1,2,3 y 4 del Cojinete 1	27
Figura 29. Capa 4 del Cojinete 1.....	29
Figura 30. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 1 a 200 aumentos	31
Figura 31. Microestructura similar a 250 aumentos encontrada en el Atlas ASM	31
Figura 32. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 1 a 1000 aumentos	32

Figura 33. Microestructura similar a 1000 aumentos encontrada en el Atlas ASM	32
Figura 34. Sección transversal del Cojinete 1 para el análisis de microscopía electrónica de barrido.....	33
Figura 35. Análisis de elementos de la Capa 1	34
Figura 36. Gráfica de elementos de la Capa 1 según niveles de energía.....	34
Figura 37. Análisis de elementos de la Capa 2	35
Figura 38. Gráfica de elementos de la Capa 2 según niveles de energía.....	35
Figura 39. Análisis de elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2.....	36
Figura 40. Gráfica de elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2 según niveles de energía	36
Figura 41. Análisis de elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2	38
Figura 42. Gráfica de elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2 según niveles de energía	38
Figura 43. Análisis de elementos de la Capa 3	39
Figura 44. Gráfica de elementos de la Capa 3 según niveles de energía	39
Figura 45. Análisis de elementos de la Capa 4	40
Figura 46. Gráfica de elementos de la Capa 4 según niveles de energía.....	40
Figura 47. Análisis de elementos de los 'Puntos brillosos' de la Capa 4.....	41
Figura 48. Gráfica de elementos de 'Puntos brillosos' de la Capa 4 según niveles de energía	41
Figura 49. Imagen de la Capa 4 y la Capa 5	42
Figura 50. Gráfica de elementos de la Capa 5 según niveles de energía.....	42
Figura 51. Inspección visual de la cara interior del Cojinete 2	45
Figura 52. Mecanismos de desgaste del Cojinete 2	46
Figura 53. Inspección visual de la cara exterior del Cojinete 2	47
Figura 54. Zona de erosión por cavitación severa del Cojinete 2	48
Figura 55. Otras zonas de erosión por cavitación del Cojinete 2.....	48
Figura 56. Metalografía de la Capa 1,2 y 3 del Cojinete 2 en una zona alejada del desgaste ...	49
Figura 57. Metalografía de la Capa 4 del Cojinete 2 en una zona alejada del desgaste	51
Figura 58. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 2.....	53
Figura 59. Metalografía en la sección transversal de la zona de erosión por cavitación del Cojinete 2 ...	53
Figura 60. Superficie de erosión por cavitación severa en el Cojinete 2.....	54
Figura 61. Análisis de la Zona 1 del Cojinete 2	55
Figura 62. Gráfica de elementos en la Zona 1 según niveles de energía en el Cojinete 2.....	55
Figura 63. Análisis de la Zona 2 del Cojinete 2	56
Figura 64. Gráfica de elementos en la Zona 2 según niveles de energía en el Cojinete 2.....	56
Figura 65. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 2	57
Figura 66. Gráfica de elementos en la Zona 3 según niveles de energía en el Cojinete 2.....	57
Figura 67. Análisis de la Zona 4 del Cojinete 2	58
Figura 68. Gráfica de elementos en la Zona 4 según niveles de energía en el Cojinete 2.....	58

Figura 69. Análisis de la Zona 4 del Cojinete 2 a 800 aumentos	59
Figura 70. Análisis de esferas en la Zona 4 del Cojinete 2.....	60
Figura 71. Gráfica de elementos en las esferas según niveles de energía en el Cojinete 2	60
Figura 72. Análisis de una 'Esfera' en la Zona 4 del Cojinete 2.....	61
Figura 73. Gráfica de elementos de una 'Esfera' según niveles de energía en el Cojinete 2.....	61
Figura 74. Inspección visual de la cara interior del Cojinete 3.....	63
Figura 75. Mecanismos de desgaste del Cojinete 2.....	64
Figura 76. Inspección visual de la cara exterior del Cojinete 3.....	65
Figura 77. Zona de erosión por cavitación severa del Cojinete 3	65
Figura 78. Zonas de erosión por cavitación del Cojinete 3.....	65
Figura 79. Metalografía de la Capa 1,2 y 3 del Cojinete 3 en una zona alejada del desgaste.....	66
Figura 80. Metalografía de la Capa 4 del Cojinete 3 en una zona alejada del desgaste	68
Figura 81. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 3.....	69
Figura 82. Superficie de erosión por cavitación severa en el Cojinete 3.....	70
Figura 83. Análisis de la Zona 1 del Cojinete 3	71
Figura 84. Gráfica de elementos en la Zona 1 según niveles de energía en el Cojinete 3.....	71
Figura 85. Análisis de 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3	72
Figura 86. Análisis a 1000 aumentos de 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3.....	73
Figura 87. Gráfica de elementos en los 'Puntos negros' según niveles de energía en el Cojinete 3.....	73
Figura 88. Análisis de la Zona 2 del Cojinete 3	74
Figura 89. Gráfica de elementos en la Zona 2 según niveles de energía en el Cojinete 3.....	74
Figura 90. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 3	75
Figura 91. Gráfica de elementos en la Zona 3 según niveles de energía en el Cojinete 3.....	75
Figura 92. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 3 a 800 aumentos	76
Figura 93. Análisis de una 'Esfera' de la Zona 3 del Cojinete 3.....	77
Figura 94. Gráfica de elementos de una 'Esfera' de la Zona 3 según niveles de energía	77

INDICE DE TABLAS

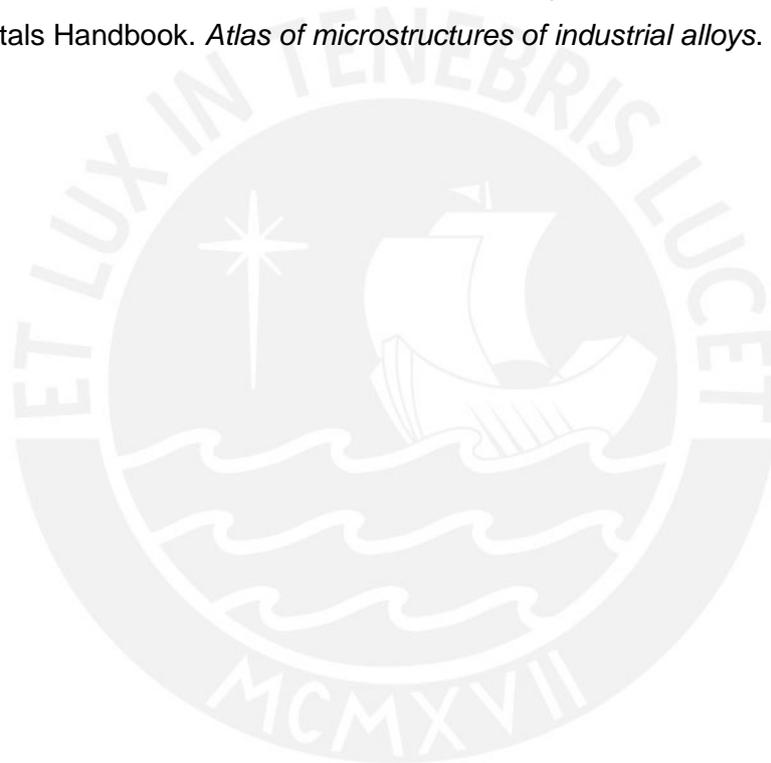
Tabla 1. Materiales y espesores de capa según fabricante	8
Tabla 2. Denominación de las capas de los cojinetes de biela	11
Tabla 3. Estadísticas de fallas de motor por cojinetes de biela	21
Tabla 4. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 1	28
Tabla 5. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 1	28
Tabla 6. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 1	29
Tabla 7. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 1	30
Tabla 8. Elementos de la Capa 1	34
Tabla 9. Elementos de la Capa 2	35
Tabla 10. Elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2	36
Tabla 11. Elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2	38
Tabla 12. Elementos de la Capa 3	39
Tabla 13. Elementos de la Capa 4	40
Tabla 14. Elementos de los 'Puntos brillosos' en la Capa 4	41
Tabla 15. Elementos de la Capa 5	43
Tabla 16. Porcentajes recomendados por ASM para aceros de bajo carbono	43
Tabla 17. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 1	44
Tabla 18. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 1	44
Tabla 19. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 1	44
Tabla 20. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 2	50
Tabla 21. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 2	50
Tabla 22. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 2	51
Tabla 23. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 2	52
Tabla 24. Elementos de la Zona 1 del Cojinete 2	55
Tabla 25. Elementos de la Zona 2 del Cojinete 2	56
Tabla 26. Elementos de la Zona 3 del Cojinete 2	57
Tabla 27. Elementos de la Zona 4 del Cojinete 2	58
Tabla 28. Elementos de las esferas en la Zona 4 del Cojinete 2	60
Tabla 29. Elementos de una 'Esfera en la Zona 4 del Cojinete 2	61
Tabla 30. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 2	62
Tabla 31. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 2	62
Tabla 32. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 2	62
Tabla 33. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 3	67
Tabla 34. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 3	67

Tabla 35. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 3	68
Tabla 36. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 3	69
Tabla 37. Elementos de la Zona 1 del Cojinete 3	71
Tabla 38. Elementos de los 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3	73
Tabla 39. Elementos de la Zona 2 del Cojinete 3	74
Tabla 40. Elementos de la Zona 3 del Cojinete 3	75
Tabla 41. Elementos de una 'Esfera' de la Zona 3 del Cojinete 3	77
Tabla 42. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 3	78
Tabla 43. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 3	78
Tabla 44. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 3	78



BIBLIOGRAFIA

1. CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000
2. SAE INTERNATIONAL. *Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis*, 1999
3. ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
4. ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys
5. ASTM E415-08. Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel.
6. ASTM E384-11e1. Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials
7. ASM Metals Handbook. *Atlas of microstructures of industrial alloys*. 8th Edition Vol.7



INTRODUCCIÓN

Los camiones de acarreo utilizados en el Perú para minería de tajo abierto tienen una capacidad de carga útil de hasta 350 toneladas métricas y una potencia de motor que puede llegar hasta los 4000 HP.

Debido a la elevada potencia de los motores diesel de estos camiones se producen altos torques y fuerzas, por lo que los componentes del motor, como los cojinetes de biela, deben ser fabricados de materiales adecuados para soportar las altas sollicitaciones que se presentan durante la operación.

Los cojinetes de biela, comúnmente llamados metales de biela, son cojinetes planos ubicados entre el eje cigüeñal y la biela. Su función principal es disminuir las fuerzas de fricción generadas por el movimiento rotativo entre el eje cigüeñal y la biela, evitando así un desgaste excesivo de los muñones del eje cigüeñal y de la biela.

Según el proveedor de camiones, los cojinetes de biela deben presentar un buen estado hasta las 14000 horas de operación, sin embargo, se han producido constantes fallas o desgaste prematuro alrededor de las 5000 horas. Existe entonces la necesidad de analizar el material de estos componentes, las causas comunes de falla y mecanismos de desgaste en estos componentes con la finalidad de ayudar al usuario a aproximarse a la causa – raíz.

En este contexto, el presente trabajo de tesis comprende la realización de una investigación sobre los mecanismos de falla o desgaste comunes y llevar a cabo ensayos de laboratorio a tres cojinetes de biela seleccionados de camiones de acarreo de 2300 HP y una capacidad de carga útil de 220 toneladas métricas de una compañía minera que opera en el Perú.

El trabajo a realizar involucra la selección de cojinetes que sean representativos de una muestra de cojinetes obtenidos del campo que presentaron desgaste severo. Además, inspeccionar visualmente y evaluar el tipo de desgaste, realizar la caracterización metalográfica, microscopia electrónica de barrido y ensayos de microdureza. Finalmente, el trabajo desarrollado comprende la evaluación de los resultados, el planteamiento de conclusiones sobre el material de los cojinetes y recomendaciones para evitar o disminuir las fallas.

JUSTIFICACIÓN DEL TEMA DE TESIS:

Como se mencionó anteriormente, los cojinetes de biela a analizar presentan un alto grado de desgaste prematuro con un número de horas de trabajo menor al nominal.

Esto obliga a reemplazar los cojinetes y realizar paradas de motor no programadas. Las paradas no programadas generan un impacto bastante grande en la producción, lo cual se ve reflejado en cuantiosas pérdidas económicas.

Es un problema de confiabilidad para el área de mantenimiento, ya que disminuye la disponibilidad de los equipos. Se requiere la adquisición de nuevos repuestos, se producen costos extraordinarios relacionados a materiales y equipos para realizar el mantenimiento correctivo, costos por mano de obra especializada y el tiempo perdido en labores no planificadas.

Además, una falla de los cojinetes de biela puede conllevar a fallas repentinas de la biela y en casos más críticos hasta una rotura del *monoblock* del motor, lo cual es considerado una falla catastrófica ya que produce un impacto mucho mayor en los costos y en la confiabilidad de los equipos.

OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general del presente tema de tesis es estudiar las características del material de los cojinetes de biela seleccionados para la investigación y los mecanismos de falla o desgaste asociados a estos componentes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Investigar en la literatura los materiales y estructuras comunes de cojinetes de biela.
- Investigar en la literatura sobre los mecanismos de desgaste que se presentan usualmente en cojinetes de biela.
- Caracterizar la estructura y composición química de cada una de las capas que conforman un cojinete de biela mediante ensayos de laboratorio.
- Determinar los mecanismos de desgaste de los cojinetes seleccionados para la investigación
- Analizar los cojinetes de biela defectuosos con ensayos de laboratorio.
- Interpretar los resultados y establecer conclusiones de la información obtenida experimentalmente y en base a la literatura revisada.

CAPITULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1 Ubicación de los cojinetes de biela:

Los metales de biela son cojinetes planos ubicados entre los muñones o puños del eje cigüeñal y los alojamientos de las bielas. En la Figura 1 se muestra el detalle:

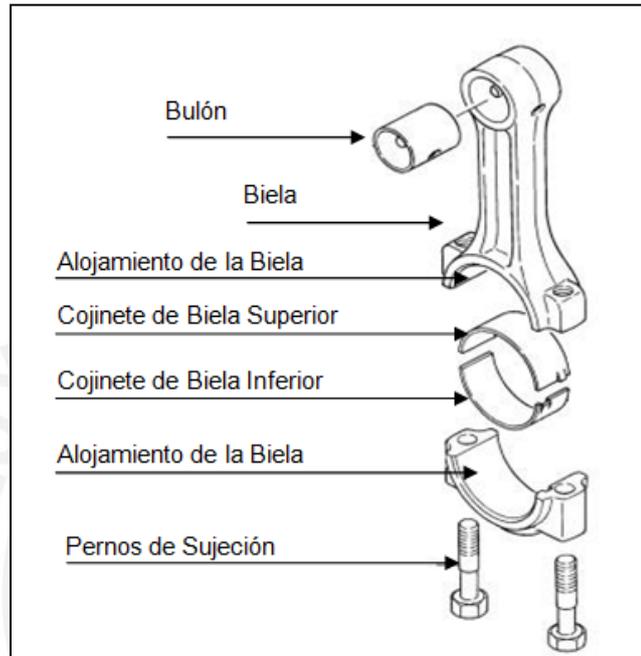


Figura 1. Esquema de la ubicación de los cojinetes de biela [1]

1.2 Funciones de los cojinetes de biela:

Los cojinetes de biela, como elementos de máquinas, son los apoyos de la biela con respecto al eje cigüeñal. Además, sus propiedades mecánicas les permiten desarrollar las funciones que se describen a continuación.

1.2.1 Lubricidad:

Los cojinetes de biela proveen una superficie de deslizamiento en momentos donde el espesor de la capa lubricante es reducida, por ejemplo, en el arranque del motor.

Esta propiedad permite al cojinete proteger al eje cigüeñal y a sí mismo cuando solo existe una pequeña cantidad de aceite residual entre ambas superficies. Debido a que la primera capa del cojinete es una capa 'anti-fricción' los muñones o puños del cigüeñal deslizan fácilmente minimizando la generación de calor. La Figura 2 presenta de manera esquemática la propiedad descrita.

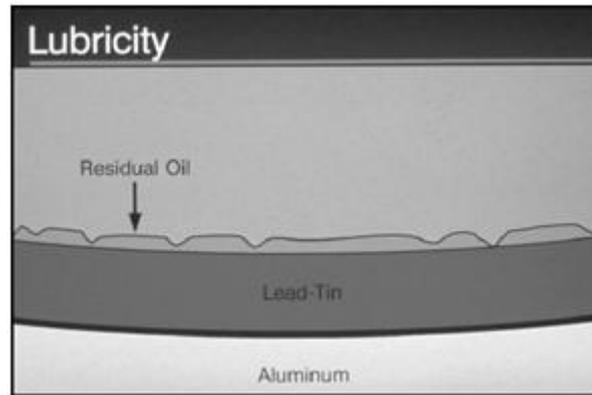


Figura 2. Lubricación de los cojinetes de biela [2].

1.2.2 Transferencia de calor:

El calor que se genera en la zona de rozamiento entre los muñones del cigüeñal y los cojinetes de biela, debido a la fricción, es únicamente removido por conducción a través del cojinete hacia la biela y el bloque del motor, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 3. Por este motivo es que los cojinetes son diseñados y construidos con materiales adecuados para poder transferir el calor, tales como el cobre o el aluminio.

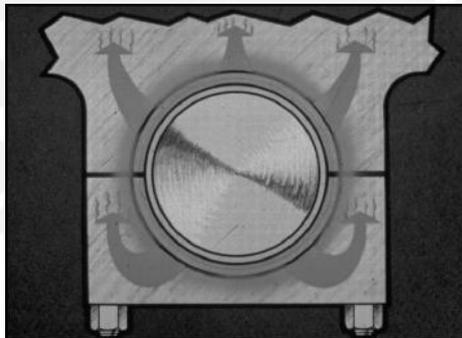


Figura 3. Transferencia de calor generado en los cojinetes de biela [3].

1.2.3 'Embedability' y 'Conformability':

Las partículas de desgaste siempre están presentes en los sistemas de lubricación, deben ser atrapadas por filtros adecuados y luego removidas del sistema.

Cuando los intervalos de cambio de aceite y filtros son muy prolongados, las partículas pueden sobre pasar o 'bypassear' los filtros. Si estas partículas penetran el área de los cojinetes son atrapadas por la capa Plomo-Estaño,

removiéndolas del sistema. Esta propiedad se conoce como '*Embedability*'. La capa Plomo-Estaño de los cojinetes permite que la superficie se adapte al perfil de los muñones del cigüeñal. Esta función se conoce como '*Conformability*'.

La Figura 4 muestra la sección transversal de un cojinete de biela con 400 aumentos de magnificación. Se puede apreciar la capa Plomo-Estaño con partículas negras atrapadas, protegiendo de esta manera al cigüeñal y al cojinete de desgaste abrasivo.

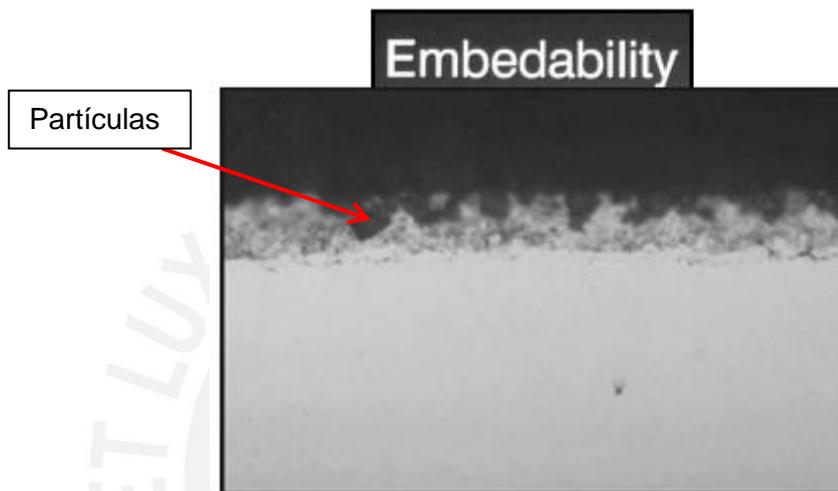


Figura 4. Propiedad de la capa de Plomo – Estaño de los cojinetes de biela [4].

1.2.4 Resistencia a la fatiga:

Las cargas que se presentan en los cojinetes de biela son fuerzas de compresión debido al movimiento recíprocante de los pistones, producto de la combustión. Asimismo, se producen fuerzas de fricción por el deslizamiento ocasionado por los movimientos rotativos del eje cigüeñal y de la biela. Los cojinetes deben poseer una adecuada resistencia a la fatiga para soportar estas cargas cíclicas.

1.2.5 Superficie de desgaste reemplazable:

Luego a miles de horas de operación, el desgaste natural remueve la capa superficial. Por este motivo las propiedades como la lubricidad y '*embedability*' que proporcionan los cojinetes se ven reducidas. El momento indicado para reemplazar los cojinetes por unos nuevos es cuando se produce esta situación.

1.3 Materiales y estructuras de cojinetes de biela:

Los cojinetes de biela están compuestos de varias capas, las cuales proporcionan las propiedades para cumplir las funciones descritas anteriormente. Es sumamente importante que las capas tengan el tamaño adecuado y sean de materiales que permitan a los cojinetes desempeñar las funciones de manera correcta, evitando fallas prematuras o desgaste excesivo. En la industria se utilizan comúnmente dos tipos de cojinetes: los de Aluminio y los de Cobre-Plomo.

1.3.1 Materiales y estructura según el fabricante:

Como primera fuente sobre el material se ha tomado información de un seminario sobre Análisis de Fallas del fabricante de los cojinetes. En la Figura 5 se muestra la sección transversal del cojinete y los elementos que componen su estructura:

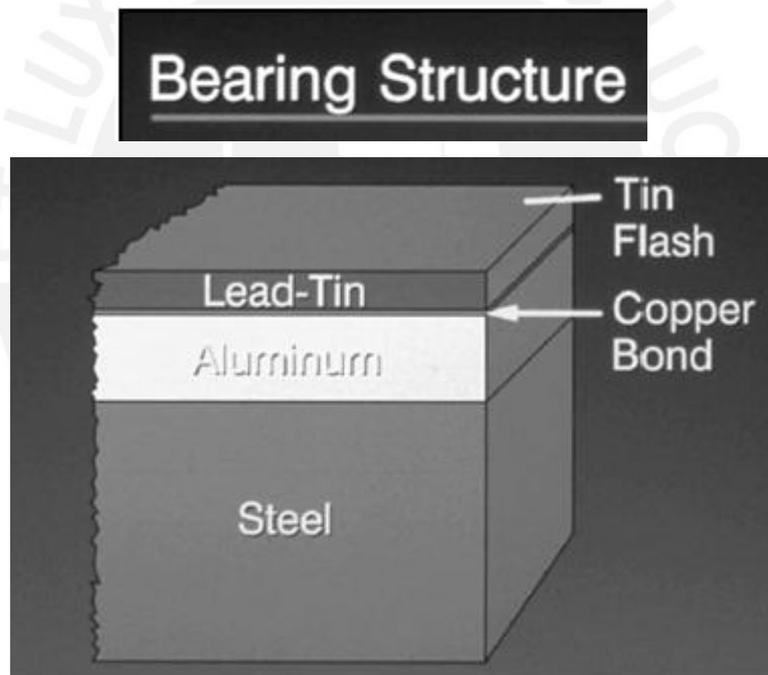


Figura 5. Materiales y estructura de los cojinetes de biela según el fabricante [5].

A continuación se describirán cada una de las capas en el siguiente orden: la capa de arriba en la Figura 5 ('Tin Flash') será la primera capa, mientras que la de abajo en la Figura 5 ('Steel') será la última capa.

1.3.1.1 Capa de Estaño ('Tin Flash'):

Es la capa más delgada, de aproximadamente 0.5 micras de espesor. Provee protección contra la corrosión al cojinete.

1.3.1.2 Capa de Plomo-Estaño ('Lead-Tin'):

Es una capa bastante suave que desempeña la función de lubricidad, 'embedability' y 'conformability'. Su espesor es de aproximadamente 20-30 micras.

1.3.1.3 Capa de Cobre ('Copper Bond'):

En inglés se le llama 'Bonding layer', es decir, la capa brinda buena adherencia entre la capa intermedia y la capa de Plomo-Estaño (Lead-Tin). Su espesor es de aproximadamente 2-3 micras.

1.3.1.4 Capa de Aluminio ('Aluminum'):

La cuarta capa es de Aluminio. Representa un 10% del espesor del cojinete y posee una resistencia adecuada para las cargas cíclicas. Además, es un buen conductor que transmite el calor rápidamente desde la superficie interior del cojinete hacia la capa de acero durante la operación.

1.3.1.5 Capa de Acero ('Steel'):

Como se puede apreciar en la Figura 5, la mayor parte de la estructura del cojinete está compuesta por acero, sin embargo el fabricante no especifica qué tipo de acero. El fabricante señala que ocupa aproximadamente el 90% del espesor del cojinete y le provee al metal de biela resistencia mecánica y conductividad térmica para la transferencia de calor hacia el alojamiento de la biela.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los materiales y los espesores de capa:

Material	Espesor de capa
Estaño ('Tin Flash')	0.5 - 1 μm
Plomo - Estaño ('Lead-Tin')	20 - 30 μm
Cobre ('Copper Bond')	2 - 3 μm
Aluminio ('Aluminum')	400 - 450 μm
Acero ('Steel')	≈ 3.6 mm

Tabla 1. Materiales y espesores de capa según fabricante.

1.3.2 Materiales y estructura según SAE:

Por otro lado, se ha investigado en la literatura otra fuente que haga referencia a los materiales y composiciones típicas en cojinetes de biela de motores diesel y se ha tomado información de una publicación de SAE (Society of Automotive Engineers).

Según SAE, los cojinetes de biela usados para motores diesel de camiones de flota pesada, son los cojinetes de Cobre- Plomo, es decir, la cuarta capa ('Lining' en la Figura 6) es de este tipo de aleación.

En la Figura 6 se puede apreciar los elementos de cada una de las capas y los espesores típicos de cada una de ellas. En total son seis capas, sin embargo tres de ellas son capas muy finas, de unas cuantas micras de espesor.

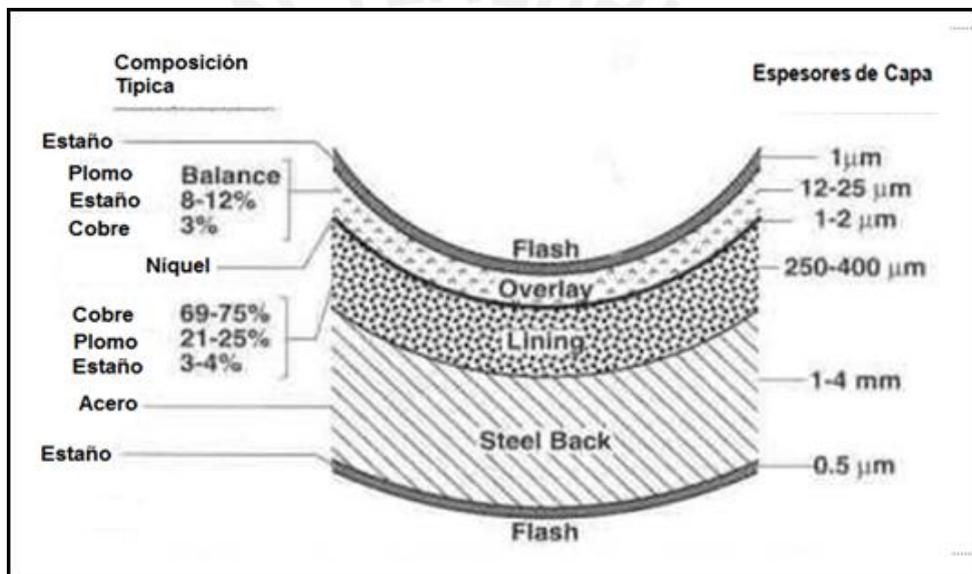


Figura 6. Materiales y estructura de los cojinetes de biela según SAE [6].

1.3.2.1 Capa de Estaño ('Flash'):

Es una capa muy fina de una micra de espesor ubicada en ambos extremos de la superficie del cojinete, interior y exterior, tal como se observa en la Figura 7. Su función es proteger al material de la corrosión ambiental y permite un almacenamiento prolongado bajo condiciones ordinarias.

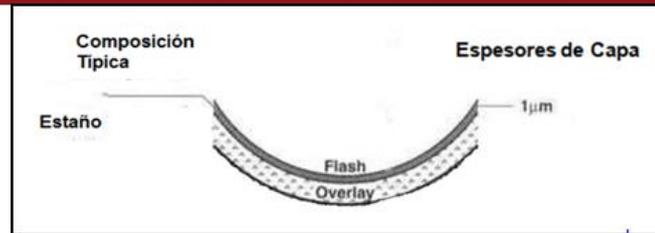


Figura 7. Capa de Estaño de los cojinetes de biela según SAE [7].

1.3.2.2 Capa de Plomo-Estaño ('Overlay'):

Es conocida también como capa anti-fricción. Su espesor es de 12 a 25 micras, como se puede apreciar en la Figura 8. Está compuesta por una aleación de Plomo-Estaño con un pequeño porcentaje de Cobre (85-89% de Plomo, 8-12% de Estaño, 3% de Cobre), la cual le proporciona propiedades para ser una capa deformable y que permita un ligero desgaste para que el cojinete se acomode al perfil del muñón del eje cigüeñal. El Estaño le provee una buena resistencia a la corrosión, ya que el Plomo por sí solo no es resistente. Además, el Estaño también le brinda la dureza adecuada a la capa.

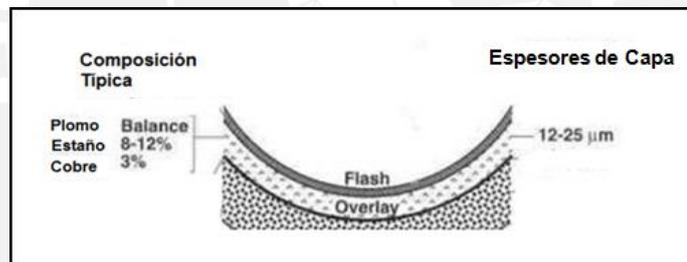


Figura 8. Capa de Plomo-Estaño de los cojinetes de biela según SAE [8].

1.3.2.3 Capa de Níquel ('Nickel Dam'):

Es una capa muy fina de 1 a 2 micras de espesor ubicada entre la capa Plomo-Estaño ('Overlay') y la capa Cobre-Plomo ('Lining'), tal como se observa en la Figura 9. Evita la difusión del Estaño de la capa Plomo-Estaño hacia la capa Cobre-Plomo a altas temperaturas.

El Estaño tiene una afinidad por el Cobre y si se difunde deja sin protección contra la corrosión a la capa Plomo-Estaño, ya que el Plomo sólo no es resistente a la corrosión. Asimismo, se forman componentes frágiles (Cu_3Sn). Por estas razones es que se añade un pequeño porcentaje de Cobre (3%) a la capa Plomo-Estaño por su afinidad por el Estaño, evitando así la difusión.

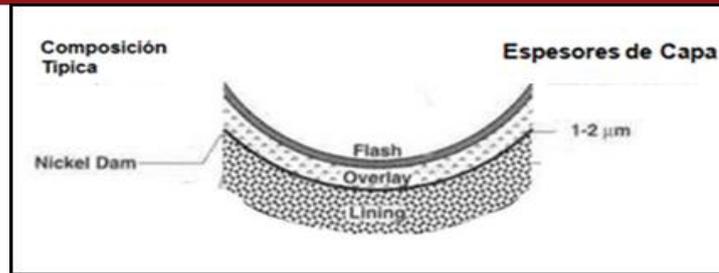


Figura 9. Capa de Níquel de los cojinetes de biela según SAE [9].

1.3.2.4 Capa de Cobre-Plomo ('Lining'):

Su espesor está en el rango de 250 a 400 micras. Sus componentes son el Cobre (69-75%), el Plomo (21-25%) y el Estaño (3-4%). Las características de esta capa le permiten desarrollar las funciones de transferencia de calor y resistencia a la fatiga que necesita el cojinete de biela.

1.3.2.5 Capa de Acero ('Steel Back'):

Su espesor oscila entre 1 a 4 milímetros y es de acero, sin embargo no se especifica el tipo de acero. Las características de esta capa deben permitirle poseer una buena resistencia mecánica y a la fatiga.

1.3.3 Denominación de las capas de los cojinetes seleccionados:

Debido a que muchos autores denominan de distintas formas a cada una de las capas que conforman a los cojinetes de biela, se presenta la Tabla 2 a manera de resumen de lo revisado según el fabricante, según SAE y las denominaciones que se utilizarán en el presente trabajo de tesis. De este modo se evitan las confusiones.

	Fabricante	SAE	Denominación a utilizar en el trabajo de Tesis
1)	Tin Flash	Flash	Capa 1
2)	Lead-Tin	Overlay	Capa 2
3)	Copper Bond	Nickel Dam	Capa 3
4)	Aluminum	Lining	Capa 4
5)	Steel	Steel Back	Capa 5

Tabla 2. Denominación de las capas de los cojinetes de biela.

1.4 Mecanismos de desgaste en cojinetes de biela:

1.4.1 Desgaste adhesivo:

El desgaste adhesivo se produce cuando dos superficies están en contacto sin una adecuada lubricación o enfriamiento, lo que genera calor debido a la fricción y eleva la temperatura de las superficies hasta su punto de fusión y el resultado es la adherencia de ambas superficies.

En los cojinetes puede llegar a ocurrir la fusión de la capa Plomo-Estaño, y de la de Aluminio inclusive, debido a altas temperaturas. Existen muchas posibles causas por las cuales se puede producir desgaste adhesivo:

1. Falta de lubricante en el cárter. Un bajo nivel de lubricante provoca que la bomba de aceite pierda succión.
2. Incorrecta viscosidad del lubricante o tipo de lubricante.
3. Falta de aditivos del lubricante
4. Dilución de combustible o de refrigerante.
5. Sobrecargas y altas velocidades
6. Desalineamiento de los cojinetes (montaje)
7. Juego excesivo

El desgaste adhesivo empieza con un 'pulida' de la capa de estaño. Luego si la temperatura sigue aumentando la capa Plomo-Estaño comienza a fundirse y se pueden observar manchas oscuras como las de la siguiente Figura 10:

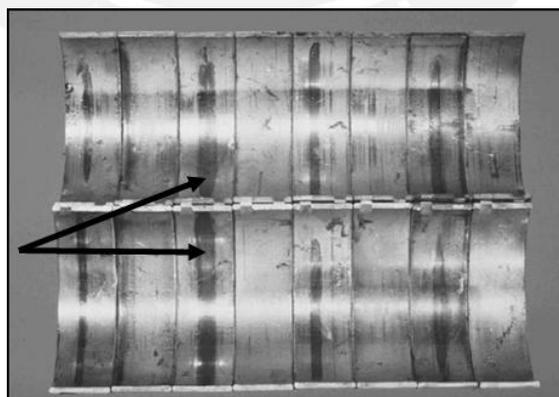


Figura 10. Desgaste adhesivo en cojinetes de biela [10].

Este caso representa falta de cantidad de lubricante debido a un flujo de aceite interrumpido. Por poca cantidad de aceite en el cárter o una baja presión de aceite,

el lubricante no llega con el flujo suficiente para lubricar los cojinetes y se genera un aumento significativo de la temperatura.

Las figuras 11a y 11b representan dos casos en los que la viscosidad del lubricante fue reducida por dilución de refrigerante y combustible en el aceite, respectivamente:

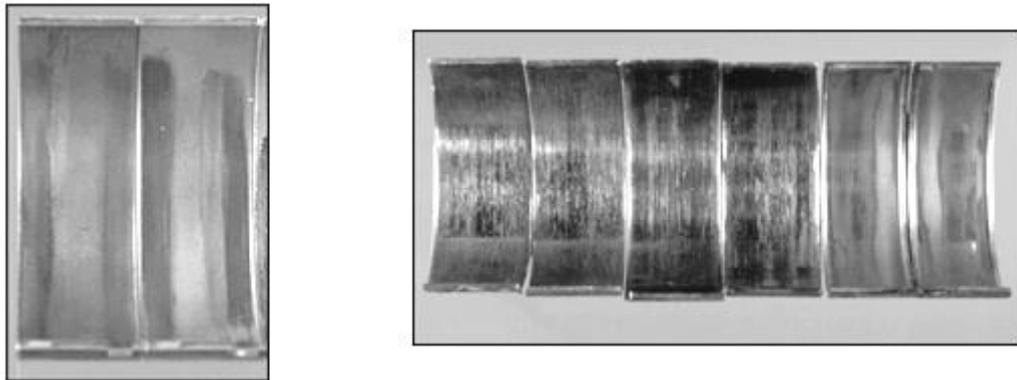


Figura 11a y Figura 11b. Desgaste adhesivo por dilución de refrigerante y combustible, respectivamente [11].

1.4.2 Desgaste abrasivo:

El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas extrañas o de desgaste se encuentran en rozamiento con el cojinete. También se puede producir por irregularidades en las superficies y de esta forma la de mayor dureza remueve material de la superficie más blanda. Si las partículas son duras se producen cortes y remoción de áreas en las capas del cojinete, por el contrario, si son blandas lo que ocurre es un rayado y quedan atrapadas en la capa Plomo-Estaño.

Las superficies permanecen a temperaturas normales al inicio del desgaste abrasivo, debido a que el lubricante remueve el calor de las superficies.

Sin embargo, cuando las partículas o superficies irregulares penetran la capa lubricante, se genera calor por fricción y el desgaste adhesivo puede iniciarse y acompañar al desgaste abrasivo. Hay muchas posibles causas para que se genere desgaste abrasivo, entre ellas:

1. Que durante el ensamblaje se hayan introducido contaminantes en los conductos del sistema de lubricación.
2. Un ineficiente sistema de filtros, que permite circular partículas de desgaste y carbón en el sistema.
3. Pobres acabados superficiales de los componentes.

4. Excesivo contenido elementos de desgaste natural de los componentes del motor acumulados en el aceite.

En la Figura 12 se muestran partículas abrasivas retiradas de un filtro en un sistema de lubricación:

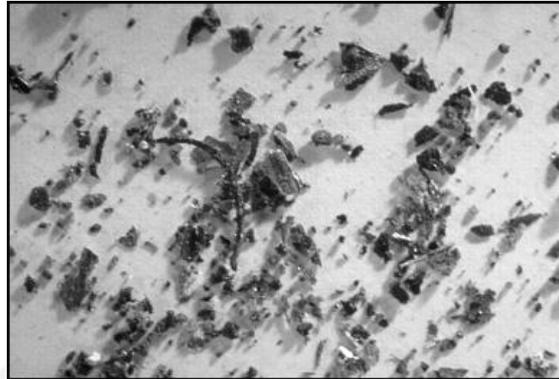


Figura 12. Partículas abrasivas [12].

En las Figuras 13 y 14 se muestra un caso con partículas grandes y abrasivas de hierro que fueron dejadas en el cigüeñal a manera de prueba:

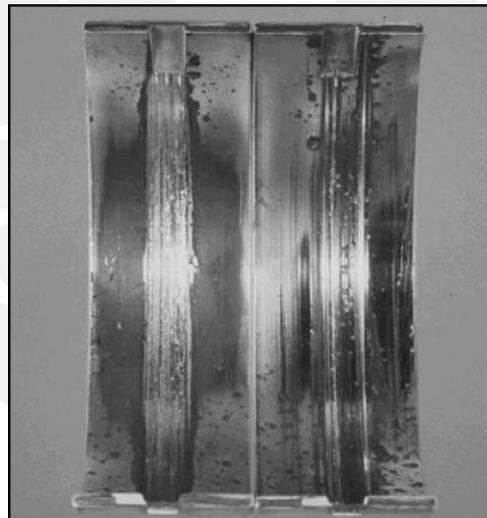


Figura 13. Desgaste abrasivo de cojinetes de biela [13].

Los cojinetes de la Figura 13 muestran desgaste abrasivo y además desgaste adhesivo. Se puede observar que la alta temperatura ha oscurecido la capa Plomo-Estaño.

En la Figura 14 se puede apreciar con mayor detalle el patrón típico del desgaste abrasivo.

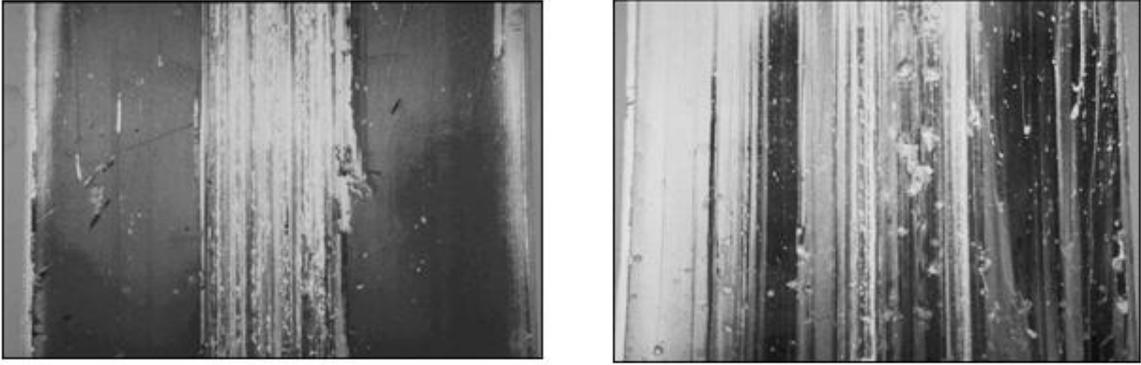


Figura 14. Desgaste abrasivo y adhesivo de cojinetes de biela [14].

Sin embargo, hay otros casos como el que se muestra en la Figura 15, donde el desgaste abrasivo es mucho menos severo que en los casos anteriores y son típicos cuando los filtros no funcionan correctamente:

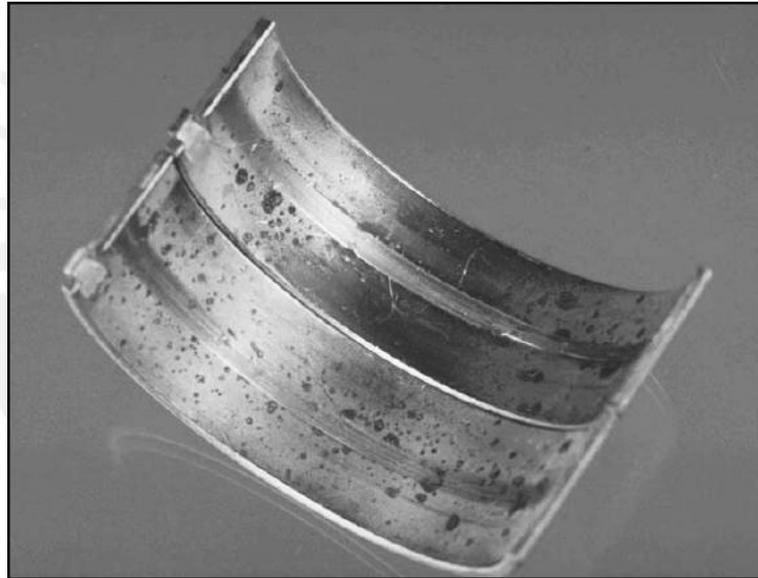


Figura 15. Desgaste abrasivo de cojinetes de biela [15].

1.4.3 Erosión por cavitación:

La erosión por cavitación se presenta cuando un fluido a altas velocidades sufre un cambio de presión que pueda tomar el valor de la presión de vapor del fluido, formándose así burbujas. Al entrar las burbujas en zonas de alta presión implosionan contra el cojinete de biela removiendo material y produciendo de esta forma el desgaste.

La capa Plomo – Estaño es blanda y puede presentar fisuras por fatiga debido a las repetitivas implosiones por cavitación en pequeñas áreas. Una erosión por cavitación más severa significa que las burbujas tienen un mayor tamaño o que se formaron grandes cantidades de burbujas o ambos factores.

Posibles causas de formación de burbujas para la erosión por cavitación:

- 1) Viscosidad inadecuada del lubricante
- 2) Intervalos de cambio de aceite muy prolongados que degradan el aceite
- 3) Niveles de lubricante inadecuados
- 4) Mal funcionamiento de la válvula By-Pass
- 5) Restricciones en la entrada de la bomba de aceite
- 6) Fugas de aire en la succión del aceite que permita entrar aire al sistema

Las figuras 16a y 16b presentan imágenes de erosión por cavitación que ha penetrado hasta la capa de Aluminio:

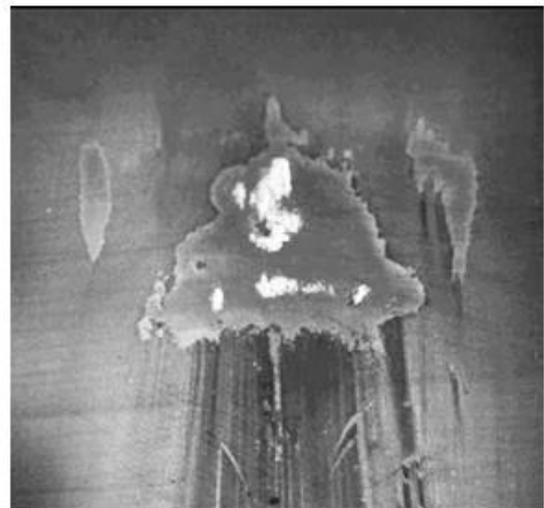
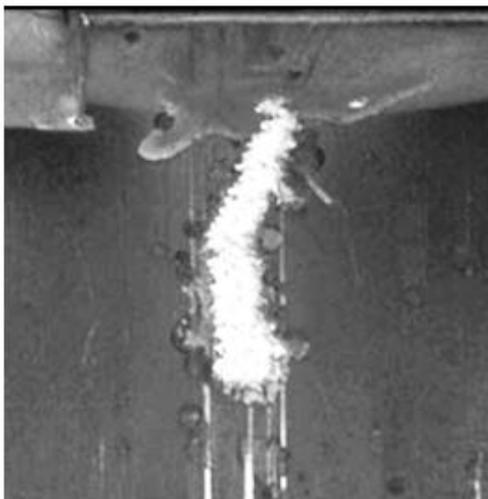


Figura 16a y 16b. Erosión por cavitación de cojinetes de biela [16].

1.4.4 'Fretting corrosion':

El desgaste por 'Fretting Corrosion' ocurre cuando los cojinetes de biela se mueven relativamente respecto a la biela en los alojamientos bajo altas cargas. Las causas pueden ser:

- 1) Cojinete de menor tamaño al adecuado
- 2) Agujero del alojamiento demasiado grande
- 3) Deficiente ajuste de los pernos de sujeción
- 4) Sobrecargas excesivas
- 5) Irregularidades del perfil del agujero del alojamiento
- 6) Partículas contaminantes en las caras exteriores del cojinete

En la Figura 17 se puede apreciar un cojinete con 'Fretting Corrosion':

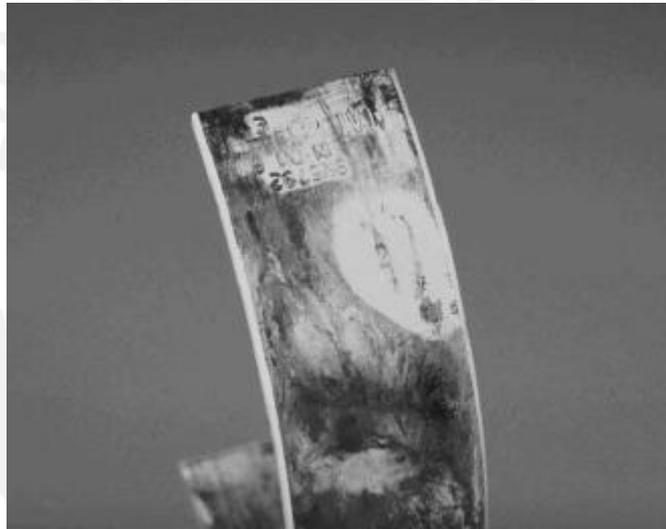


Figura 17. 'Fretting corrosion' en cojinetes de biela [17].

1.5 Análisis causa-raíz del desgaste excesivo o falla de cojinetes de biela:

En base a los mecanismos de desgaste revisados en la literatura se ha analizado las posibles causas por las que los cojinetes de biela pueden tener un desgaste excesivo o fallar en operación. En el presente trabajo de tesis se investigará el “MATERIAL”.

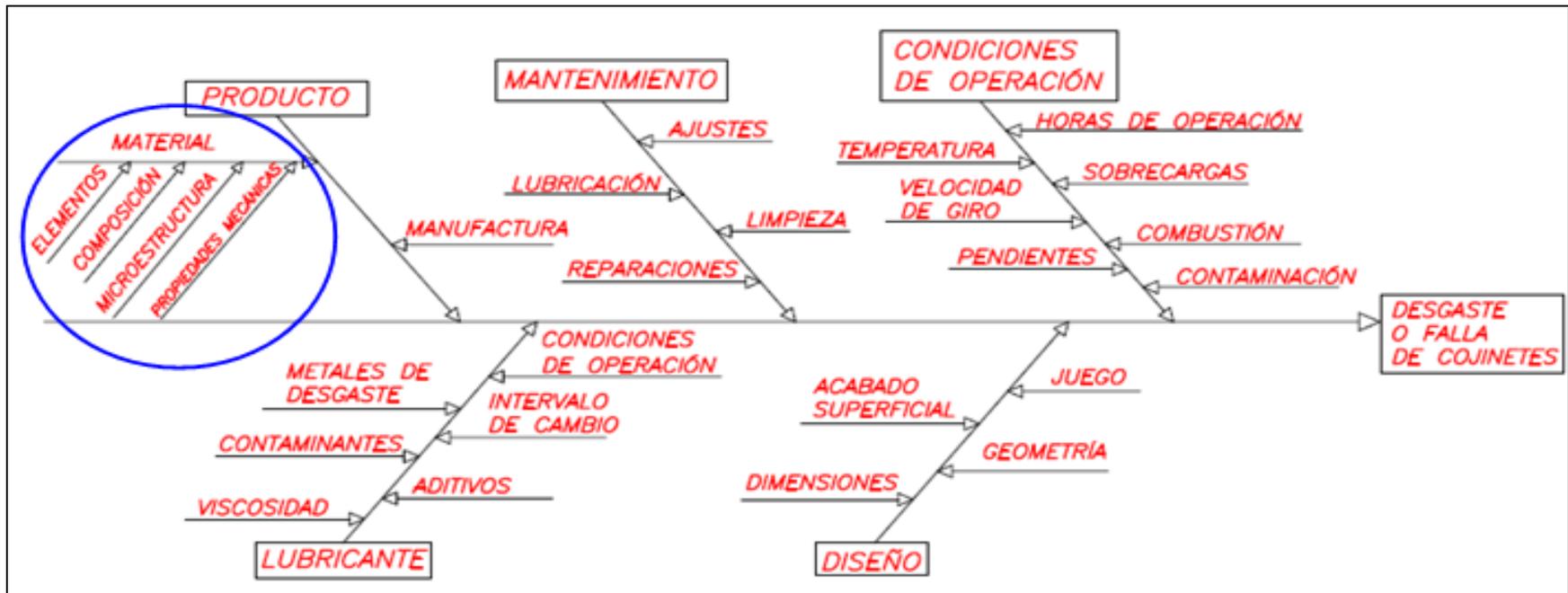


Diagrama 1. Diagrama Causa-Raíz del desgaste excesivo o falla de cojinetes de biela.

CAPITULO 2. ANÁLISIS DE FALLA

En el presente capítulo se relata el procedimiento experimental que se siguió para realizar el análisis del material de los cojinetes de biela. En primer lugar, se debe seleccionar las muestras a ser analizadas mediante ensayos de laboratorio. Una vez seleccionadas las muestras se establecen los ensayos que se van a realizar en cada cojinete. En el presente caso de estudio, se ha realizado una caracterización del material con un cojinete en buen estado y un análisis de dos cojinetes, representativos del conjunto de cojinetes recibidos, que presentaban patrones de desgaste.

El procedimiento experimental se desarrolló según la siguiente metodología:

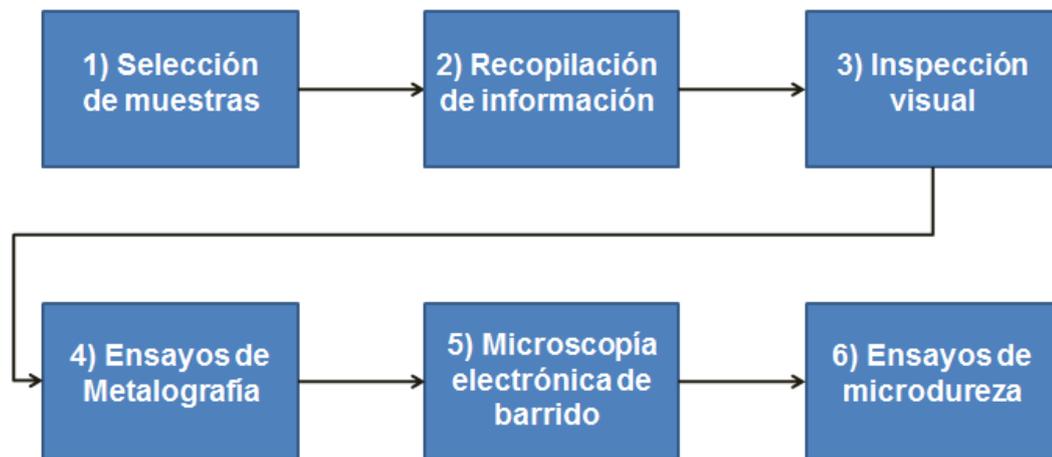


Diagrama 2. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio se debe establecer conclusiones en base a la literatura revisada sobre el material y los mecanismos de desgaste.

2.1 Recopilación de información

2.1.1 Selección de muestras:

En el presente trabajo se analizará el material de tres (03) cojinetes de biela de una compañía minera que opera en el Perú. Se obtuvieron 40 cojinetes de biela como una muestra representativa del grupo de cojinetes que presentan problemas. Se seleccionó uno (01) que se encontraba en buen estado, sin desgaste, con el fin de caracterizar el material. Este cojinete es descrito a lo largo del presente trabajo como “Cojinete 1”. Luego de una inspección visual se eligieron dos (02) cojinetes que presentaban los patrones de desgaste más frecuentes encontrados en la muestra de 40 cojinetes. Estos cojinetes se mencionan en adelante con el nombre de “Cojinete 2” y “Cojinete 3”. Las Figuras 18 y 19 muestran fotos de los tres (03) cojinetes seleccionados y del conjunto de 40 cojinetes recibidos.

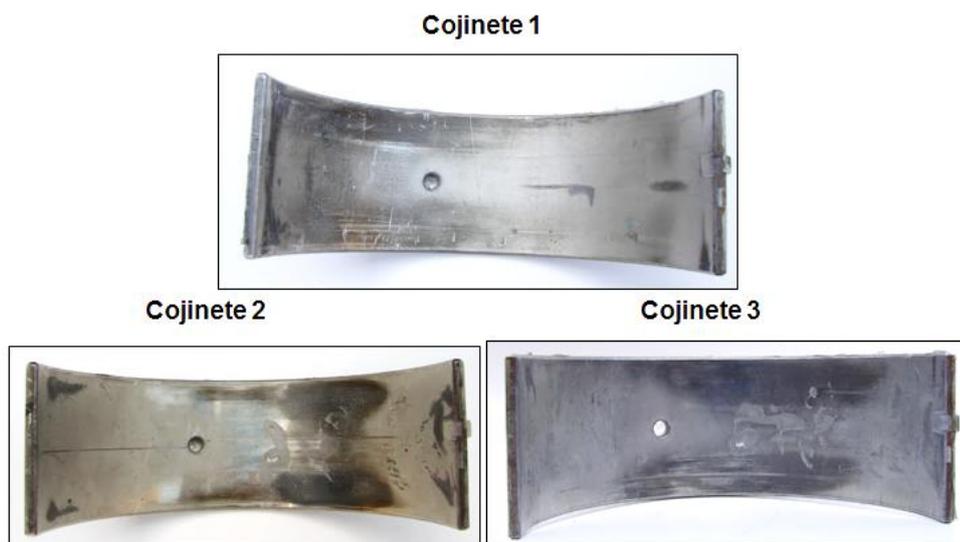


Figura 18. Cojinetes seleccionados para el tema de tesis.



Figura 19. Conjunto de cojinetes recopilados

2.1.2 Estadísticas de fallas de cojinetes de biela:

En la Tabla 3 se muestra la información recopilada por el personal de mantenimiento de la mina sobre las fallas de motor que se produjeron en el año 2010 en camiones de flota pesada debido al desgaste prematuro de los cojinetes.

Item	Equipo	Horas del Equipo	Fecha de instalación	Fecha de desinstalación	Horas del componente	Componente afectado	Categoría de la falla
1	TA131	9,700	6-Apr-10	22-Jun-10	1,750	Perfil del cigueñal	Mantenimiento
2	TA065	95,560	27-Feb-10	15-Jul-10	2,654	Perno de biela	Mantenimiento
3	TA124	72,682	28-Ago-09	18-May-10	5,687	Cojinetes de biela	Manufactura
4	TA085	76,547	13-Apr-10	25-Jul-10	1,933	Cojinetes de biela	Manufactura
5	TA070	82,653	20-Mar-09	14-Jun-10	8,972	Cojinetes de biela	Manufactura
6	TA072	80,427	2-Ago-10	25-Ago-10	491	Cojinetes de biela	Manufactura
7	TA080	79,620	11-Nov-08	2-Jul-10	12,006	Cojinetes de bancada	Manufactura
8	TA083	69,865	18-Jun-09	19-Sep-10	9,427	Cojinetes de bancada	Manufactura
9	TA095	31,475	17-Feb-10	20-Sep-10	4,578	Cojinetes de biela	Manufactura
10	TA120	15,642	13-Feb-10	26-Ago-10	4,002	Cojinetes de biela	Manufactura

Tabla 3. Estadísticas de fallas de motor por cojinetes de biela [18].

La Tabla 3 indica el código del equipo (Equipo), las horas del equipo, la fecha de instalación de los cojinetes, la fecha de retiro de los cojinetes debido a la falla del motor, las horas del componente, el componente afectado y la categoría asignada a la causa de la falla.

Las filas resaltadas en amarillo son las fallas de motor debido a cojinetes de biela. Cabe resaltar que el fabricante señala una duración o vida útil de los cojinetes de 14,000 horas, pero en la práctica ocurren fallas de cojinetes alrededor de las 5,000 horas de operación.

El departamento de mantenimiento de la mina realiza análisis de falla según lo encontrado en el momento de la falla y clasifica si es una falla por Mantenimiento o por Manufactura.

2.2 Caracterización del material del cojinete de biela:

A continuación se describe el procedimiento que se llevó a cabo para caracterizar el Cojinete 1.

2.2.1 Registro Fotográfico:

El registro fotográfico es muy importante en un análisis de falla, ya que permite obtener la información visual sobre la superficie de desgaste de los componentes, además de tener un historial sobre las zonas que se han analizado en los ensayos.

Para la fotografía se utilizó una cámara marca Sony modelo DSC-H5 con una apertura de foco de $f/8$, un tiempo de exposición de $1/40$ segundos y una sensibilidad ISO- 80

2.2.2 Ensayo de Metalografía:

Se realizó un ensayo de metalografía del Cojinete 1, con el fin de poder apreciar cada una de las capas que componen los cojinetes y medir los espesores de capa. Además, para la capa de acero se realizó un ataque químico con Nital al 5% para poder observar la microestructura del acero. El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales de la PUCP bajo las normas ASTM E3-11 y ASTM E407-07. [19]

Preparación de la probeta:

Corte:

Para el ensayo se necesitan preparar probetas de un tamaño aproximado de 12 milímetros de largo por 3 milímetros de ancho y 5 milímetros de altura. Por lo tanto, se requiere cortar con un disco abrasivo un pequeño pedazo del cojinete de biela, cuya sección transversal será colocada en la parte superior de la probeta para que pueda ser observada con el microscopio óptico.

Probeta:

El pedazo de metal cortado se coloca dentro del cilindro de la máquina para moldear con resina en polvo, se tapa y se ejerce con una palanca hasta 5000 psi y se calienta 30 minutos. Finalmente, se deja enfriar la pieza unos 20 minutos y se retira la probeta.

Pulido:

Luego la cara de la sección transversal del cojinete debe ser pulida finamente para

poder obtener una buena imagen en el microscopio. Primero se utilizan lijas número 240, 320, 400 y 600. Luego se utilizan platos giratorios de diamante de 6, 3 y 1 micra a 300-400 revoluciones por minuto para dar el acabado final de acuerdo a la norma ASTM E3-11.

Microscopio óptico:

Se utilizó un microscopio marca Leica modelo DCF 320 que posee cinco (05) lentes para analizar la probeta a los siguientes aumentos: 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x. Los resultados del ensayo se muestran en el capítulo 3.

En las Figuras 20, 21, 22, 23, 24 y 25 se muestra la secuencia para preparar la probeta que se requiere para la metalografía y los equipos utilizados para el corte, el montaje de la probeta, el lijado, el pulido y la microscopía óptica.



Figura 20. Máquina de corte.

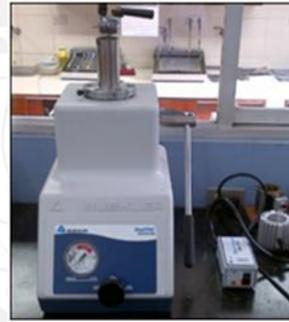


Figura 21. Máquina para moldear.



Figura 22. Lijado de la muestra.



Figura 23. Pulido de la muestra.

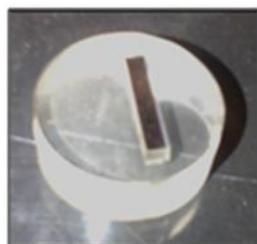


Figura 24. Muestra terminada.

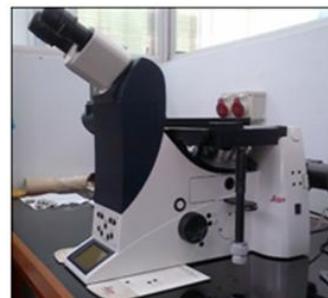


Figura 25. Microscopio óptico.

2.2.3 Microscopía electrónica de barrido:

Para el ensayo de microscopía electrónica de barrido, conocido en la industria como SEM (Scanning Electron Microscopy), se visitó el laboratorio de Microscopía Electrónica y Aplicaciones en el Perú. El equipo utilizado fue un microscopio electrónico marca FEI modelo Quanta 200 equipado con un detector EDX (Espectroscopia de energía dispersiva). Para este ensayo la probeta del Cojinete 1 fue la misma que la utilizada para la metalografía, previamente lijada y pulida otra vez. La Figura 26 muestra una imagen del equipo y de cómo se coloca la probeta dentro del mismo.



Figura 26. Microscopio electrónico.

2.2.4 Análisis químico:

Para realizar el análisis de la composición química de la capa de acero presente en los cojinetes, se cortó una muestra de 2cm por 2cm del metal y se envió al Laboratorio de Materiales PUCP para realizar un análisis bajo la norma ASTM E415-08 [20]. Los resultados se presentarán en el siguiente capítulo.

2.2.5 Ensayo de microdureza:

El ensayo de microdureza Vickers se realizó en el Laboratorio de Materiales de la PUCP bajo la norma ASTM E384-11e1 [21]. El equipo de microdureza utilizado fue el Zwick Roell ZHV. Las condiciones del ensayo fueron una carga de 500 gramos para la capa de acero y una carga de 200 gramos para la capa de Aluminio, debido a que esta última es más blanda. El indentador es un cono de diamante y el tiempo requerido para la penetración fue de 10 segundos.

2.3 Análisis del material de los cojinetes de biela con desgaste:

Para realizar el análisis del desgaste del Cojinete 2 y del Cojinete 3, se llevaron a cabo los mismos ensayos descritos en el punto 2.2, a excepción del análisis químico, puesto que el acero es del mismo lote de producción.

2.3.1 Inspección visual:

El análisis de las superficies de desgaste consiste primero en una inspección visual para ubicar las zonas dañadas. La información que se obtiene visualmente se relaciona con la teoría de mecanismos comunes de desgaste hallados en la literatura sobre cojinetes. Además, es muy importante identificar qué mecanismos de desgaste es el más perjudicial y que podría llevar a un inicio de la fractura del cojinete.

2.3.1.1 Inspección visual a nivel macro:

Se realizó una inspección visual a cada cojinete y se registraron fotografías con la cámara Sony modelo DSC-H5. Los diferentes mecanismos de desgaste serán apreciados en el siguiente capítulo.

2.3.1.2 Inspección visual asistida con estereoscopio:

Una vez identificadas las zonas de mayor desgaste se llevaron ambos cojinetes a un estereoscopio Leica para observar a 10 aumentos las superficies y obtener un registro fotográfico con mayor detalle.

2.3.2 Ensayo de metalografía:

Para el ensayo de metalografía del Cojinete 2 y Cojinete 3 se realizó el mismo procedimiento que para el Cojinete 1. La única diferencia es que para cada uno se hicieron dos probetas, una alejada de la zona de falla y una correspondiente a la sección transversal de la zona de la picadura de erosión por cavitación.

2.3.3 Microscopía electrónica de barrido:

Se realizó de la misma forma que para el Cojinete 1. Para ambos cojinetes 2 y 3 se analizó la zona de desgaste de erosión por cavitación, vista de planta, para obtener la morfología del daño y los elementos presentes.

2.3.4 Ensayo de microdureza:

Se realizó de la misma forma que para el Cojinete 1.

CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN RESULTADOS

3.1 Caracterización del material del cojinete de biela:

Cojinete 1

3.1.1 Registro Fotográfico:

La Figura 27 representa la cara interior, cóncava, del Cojinete 1. Como se mencionó anteriormente, este cojinete es el que presenta el mejor estado de las 40 muestras recopiladas. Por este motivo, se eligió para poder realizar la caracterización del material de los cojinetes.



Figura 27. Cara interior del Cojinete 1.

La zona señalada por la flecha roja es la que presenta mejor estado y de la cual se realizó la caracterización del cojinete de biela. El rectángulo muestra el área que se cortó transversalmente para el montaje de la probeta y la realización de los ensayos de metalografía, microdureza y microscopía electrónica de barrido.

3.1.2 Ensayo de Metalografía:

3.1.2.1 Medición de los espesores de capa

La Figura 28 muestra la imagen de las cuatro (04) primeras capas y los espesores de las tres (03) primeras capas que se pueden apreciar en la sección transversal del Cojinete 1.

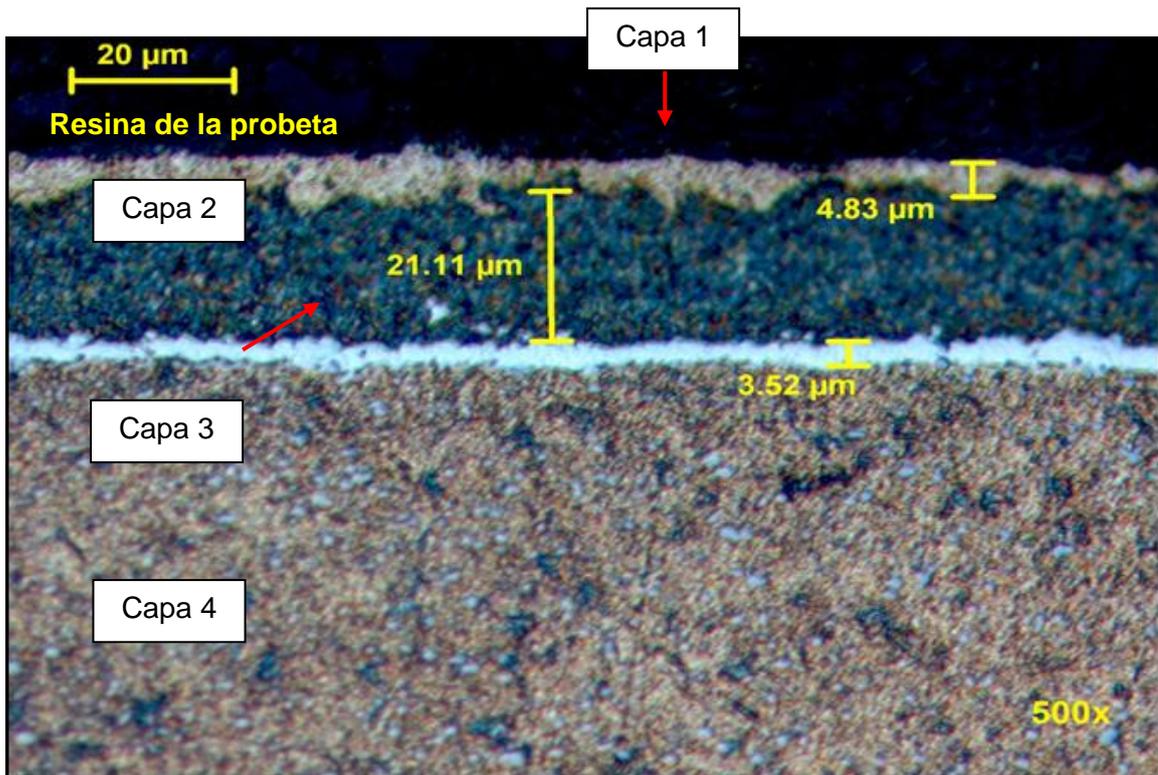


Figura 28. Capas 1,2, 3 y 4 del Cojinete 1.

Para determinar el espesor de las capas del cojinete se tomaron las medidas tal como lo muestra la Figura 28. Se realizaron 5 mediciones de cada una de las capas, recorriendo la sección transversal del cojinete de manera horizontal con el microscopio.

A continuación se muestran las tablas con los datos obtenidos:

Cojinete 1		
Espesor de la Capa 1:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	5.11
500x	20 μm	4.28
500x	20 μm	4.83
500x	20 μm	6.97
1000x	10 μm	6.00
Máximo		6.97
Mínimo		4.28
Promedio		5.44

Tabla 4. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 1.

Según el fabricante esta capa debe medir aproximadamente 0.5 micras. Según la publicación de SAE citada en la bibliografía el espesor de la Capa 1 debe ser aproximadamente 1 micra. El espesor promedio hallado en el cojinete número 1 es 5.44 micras y se encuentra por encima de ambos valores.

Cojinete 1		
Espesor de la Capa 2:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	24.70
500x	20 μm	21.11
500x	20 μm	21.73
500x	20 μm	22.5
1000x	10 μm	23.63
Máximo		24.7
Mínimo		21.11
Promedio		22.73

Tabla 5. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 1.

Según el fabricante esta capa debe tener un espesor entre 20 y 30 micras. Según SAE el espesor de la Capa 2 oscila entre 12 a 25 micras. El espesor promedio hallado en el cojinete número 1 es 22.73 micras y se encuentra dentro de ambos de los rangos señalados.

Cojinete 1		
Espesor de la Capa 3:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	3.45
500x	20 μm	4.07
500x	20 μm	4.42
500x	20 μm	3.52
1000x	10 μm	4.83
Máximo		4.83
Mínimo		3.45
Promedio		4.06

Tabla 6. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 1.

Según el fabricante esta capa debe tener un espesor entre 2-3 micras. Según SAE el espesor de la capa oscila entre 1-2 micras. El espesor promedio hallado en el Cojinete 1 es 4.06 micras y se encuentra ligeramente por encima a los rangos especificados.

La Figura 29 muestra las cinco (05) capas del cojinete de biela:

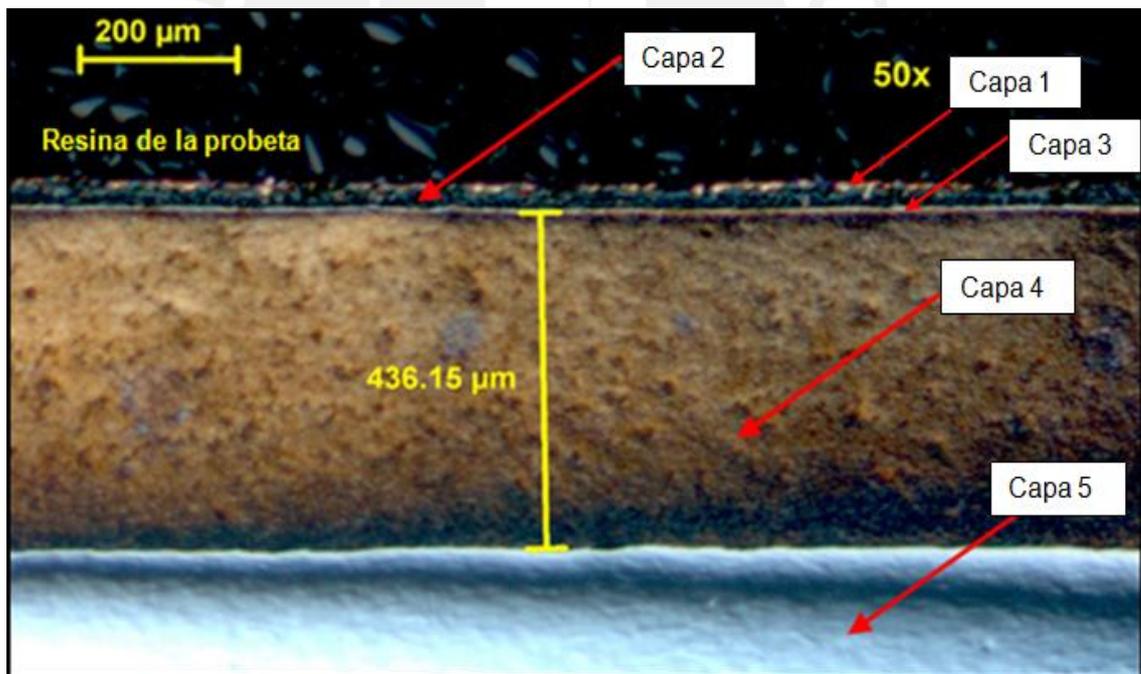


Figura 29. Capa 4 del Cojinete 1.

Se realizó el mismo procedimiento para medir el espesor de la Capa 4, obteniendo los siguientes resultados:

Cojinete 1		
Espesor de la Capa 4:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
50x	200 μm	436.15
50x	200 μm	444.44
50x	200 μm	458.87
50x	200 μm	450.23
100x	100 μm	428.69
Máximo		458.87
Mínimo		428.69
Promedio		443.68

Tabla 7. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 1.

Según el fabricante esta capa debe tener el 10% aproximadamente del espesor total del cojinete. Por otro lado, SAE indica que el espesor de la capa intermedia oscila en el rango de 250-400 μm . El espesor promedio hallado en el Cojinete 1 es 443.68 micras y se encuentra por encima de dicho rango.

3.1.2.2 Microestructura del acero:

Luego de medir el espesor de cada una de las capas se realizó un ataque químico con Nital al 3% para revelar la microestructura del acero. La Figura 30 muestra la microestructura del acero del Cojinete 1:

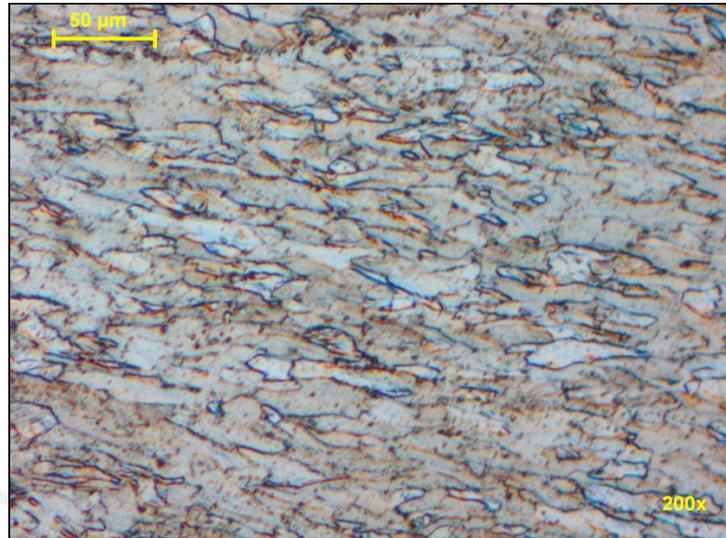


Figura 30. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 1 a 200 aumentos.

La microestructura corresponde a una matriz ferrítica de un acero de bajo contenido de carbono. El fabricante de los cojinetes señala que el acero es laminado y esto se puede apreciar en la forma de los granos de la ferrita y grado de orientación. Se investigó sobre esta microestructura en el Atlas ASM y se encontró la Figura 31 que representa de un acero de bajo carbono, laminado con una reducción del 30% del espesor de un acero de bajo contenido de carbono atacado con Nital 4% y observado a 250 aumentos.

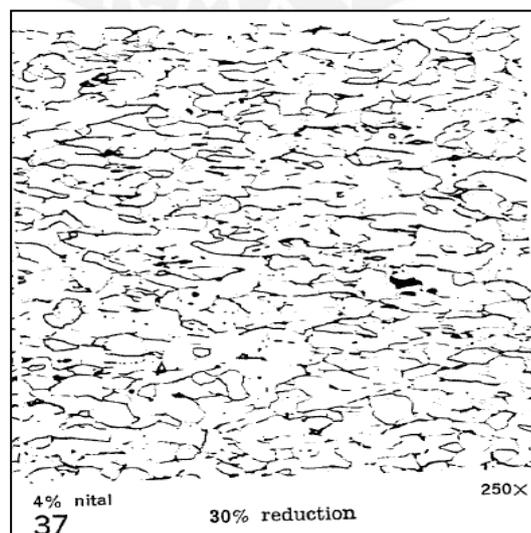


Figura 31. Microestructura similar a 250 aumentos encontrada en el Atlas ASM. [22]

La Figura 32 muestra la misma microestructura del acero del Cojinete 1 a 1000 aumentos. Se pueden apreciar pequeños carburos en los límites de grano de la ferrita.

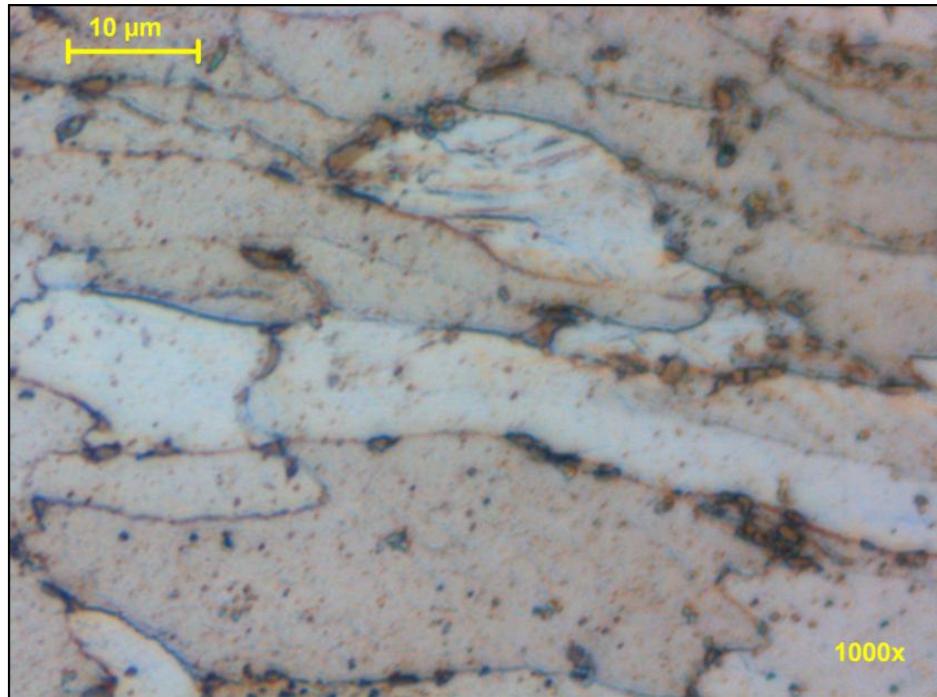


Figura 32. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 1 a 1000 aumentos.

Con el fin de corroborar nuevamente que se trata de una ferrita laminada, se muestra la Figura 33 obtenida del Atlas ASM correspondiente a un acero de bajo carbono laminado con reducción de 30% observado a 1000 aumentos.

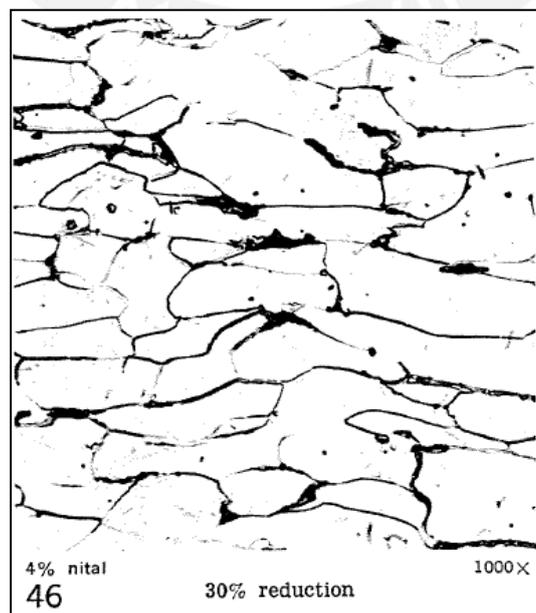


Figura 33. Microestructura similar a 1000 aumentos encontrada en el Atlas ASM. [23]

3.1.3 Microscopía electrónica de barrido:

Con el fin de determinar el material presente en cada una de las capas de los cojinetes, se realizó el ensayo de microscopía electrónica de barrido a la sección transversal del Cojinete 1. El análisis de los elementos que componen el cojinete puede ser puntual o de una pequeña área rectangular, como se podrá apreciar en las próximas imágenes. En la Figura 34 se muestran las cuatro (04) primeras capas del cojinete que fueron analizadas:

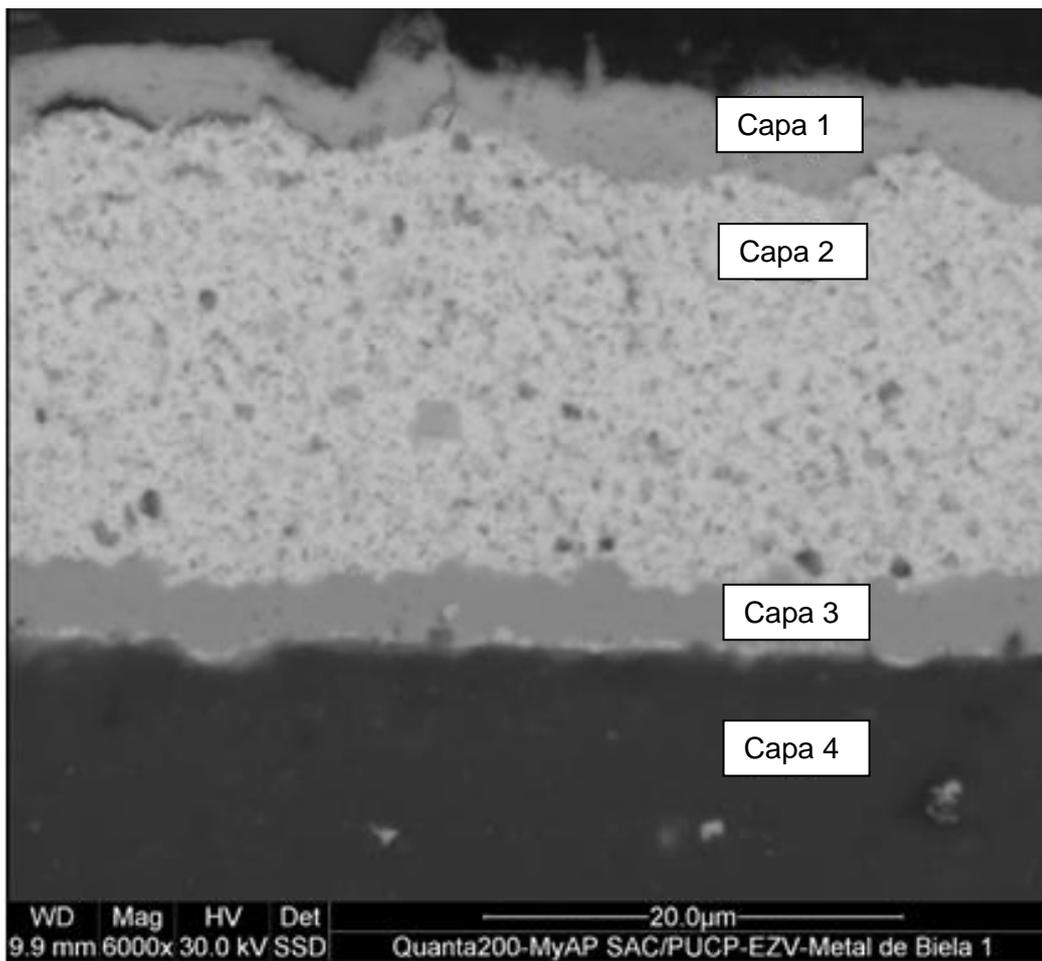
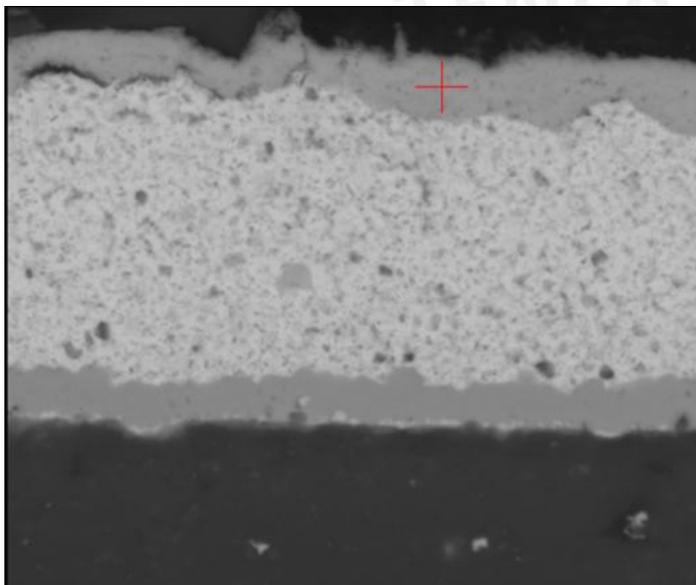


Figura 34. Sección transversal del Cojinete 1 para el análisis de microscopía electrónica de barrido.

3.1.3.1 Análisis de elementos en la Capa 1:

El elemento que predomina en la Capa 1 es el Estaño (Sn: 55.96%), también se puede observar un contenido de Aluminio (Al: 13.36%), Plomo (Pb: 8.02%), Silicio (Si: 6.46%) y Hierro (Fe: 1.86%). Además, una natural presencia de Oxígeno debido a la oxidación del material (O: 14.34%).

Esta capa debe de ser de Estaño para que le permita al cojinete poseer una buena protección contra la corrosión. Los otros elementos mencionados deben de provenir de las otras capas, lo que se comprobará en los siguientes análisis. La Figura 35 muestra el punto analizado y la Figura 36 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	14.34
Al	13.36
Si	6.46
Sn	55.96
Fe	1.86
Pb	8.02

Tabla 8. Elementos de la Capa 1.

Figura 35. Análisis de elementos de la Capa1.

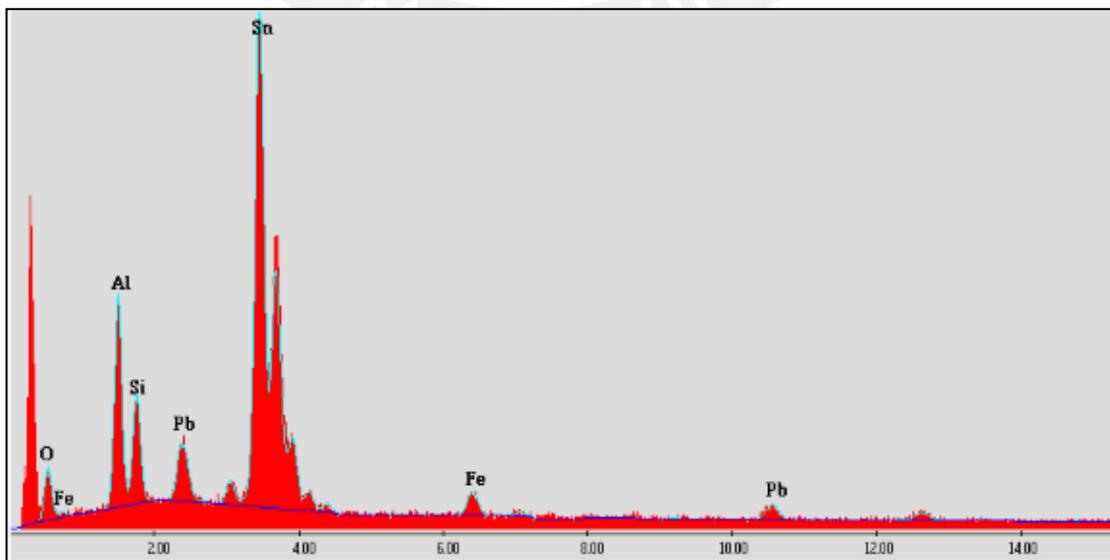
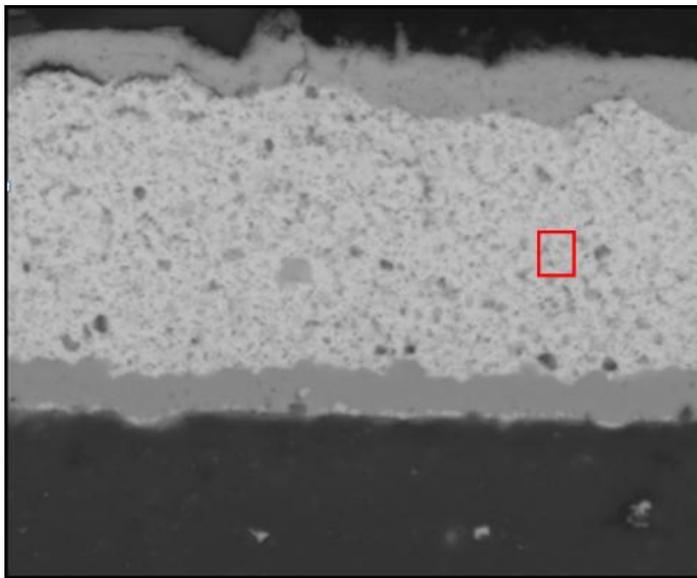


Figura 36. Gráfica de elementos de la Capa 1 según niveles de energía.

3.1.3.2 Análisis de elementos en la Capa 2:

En la Capa 2 se puede observar un alto contenido de Plomo (Pb: 65.60%) acompañado de un pequeño porcentaje de Estaño (Sn: 6.11%). Ambos elementos son los que componen la segunda capa según lo que señala el fabricante. Además, se puede apreciar un contenido de Aluminio (Al: 14.29%), de Silicio (Si: 3.92%) y de Hierro (Fe: 2.03%) similar a lo encontrado en el análisis de la Capa 1. La Figura 37 muestra el punto analizado y la Figura 38 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	8.05
Al	14.29
Si	3.92
Sn	6.11
Fe	2.03
Pb	65.60

Tabla 9. Elementos de la Capa 2.

Figura 37. Análisis de elementos de la Capa 2.

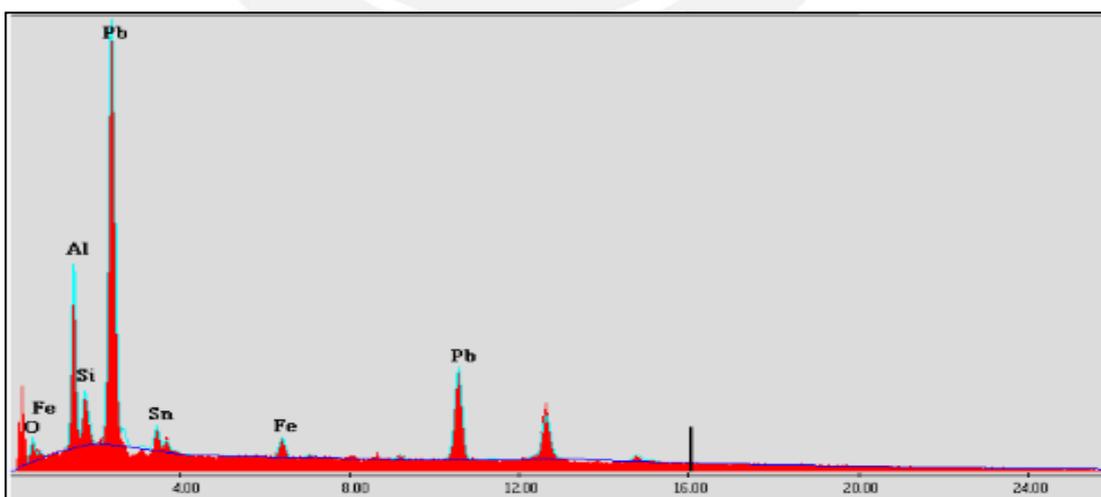
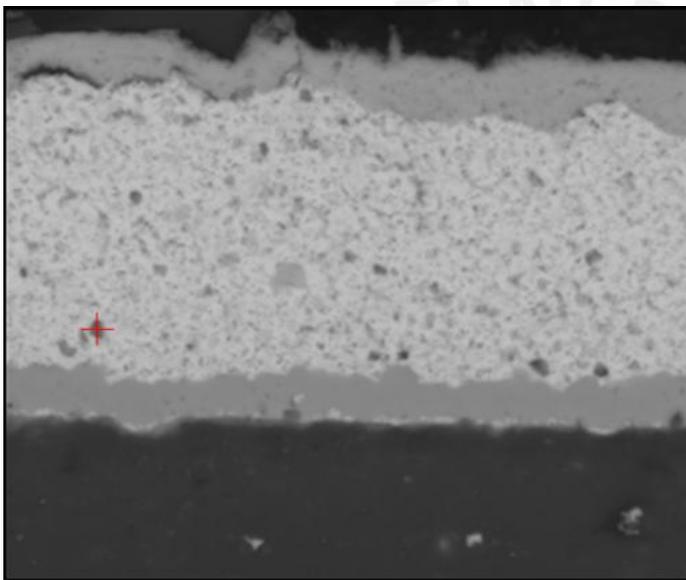


Figura 38. Gráfica de elementos de la Capa 2 según niveles de energía.

3.1.3.3 Análisis de compuestos en la Capa 2 ('Puntos negros'):

La Capa 2 presenta una gran cantidad de compuestos, los que se denominarán en el presente trabajo como 'Puntos negros'. Se realizó un análisis puntual para verificar qué elementos conforman estos componentes. En comparación con el análisis previo, se obtuvo que el nivel de Plomo disminuyó (Pb: 51.91%), el contenido de Estaño aumentó (Sn: 10.39%) y lo interesante es que se encontró un nuevo elemento; el Cobre con un 4.40% (Cu: 4.40%). Los porcentajes de Aluminio, Silicio y Hierro siguen siendo similares a los del análisis anterior: Al: 16.62%, Si: 3.54% y Fe: 2.37%, respectivamente. La Figura 39 muestra el punto analizado y la Figura 40 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	10.77
Al	16.62
Si	3.54
Sn	10.39
Fe	2.37
Cu	4.40
Pb	51.91

Tabla 10. Elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2.

Figura 39. Análisis de elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2.

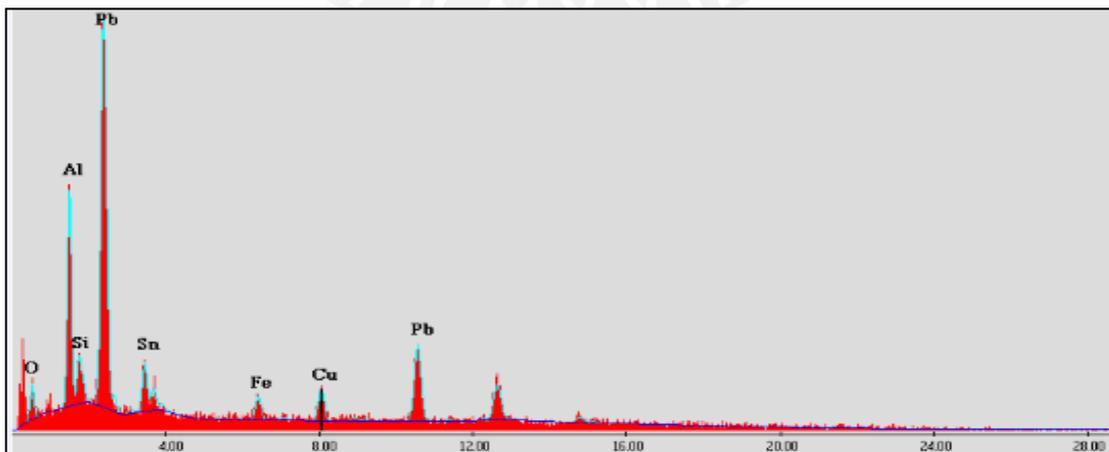


Figura 40. Gráfica de elementos de los 'Puntos negros' de la Capa 2 según niveles de energía.

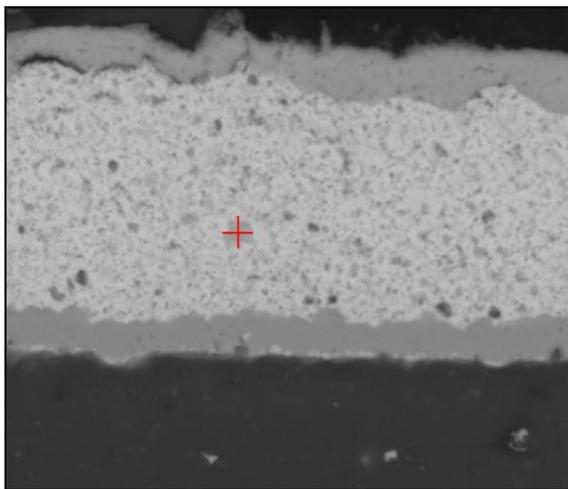
Una observación importante es que en la publicación citada en la bibliografía de SAE se hace referencia a un compuesto frágil que se forma por la alta afinidad que existe entre el Cobre y el Estaño ($\text{Cu}_3\text{-Sn}$). Este compuesto debilita el material de los cojinetes de biela de motores diesel y los lleva a fallar antes de lo esperado.

Además, la Capa 3 (Capa de Cobre según el fabricante) es la que separa a la Capa 2 (Capa Plomo-Estaño) de la Capa 4 (Capa de Aluminio) y debe proveer una buena adherencia entre ambas capas. Si el Cobre se difunde en la Capa 2 para formar los compuestos de Cobre-Estaño, se pierde la adherencia entre la Capa 2 y la Capa 4.



3.1.3.4 Análisis de compuestos en la Capa 2 ('Puntos grises'):

Una gran cantidad de 'Puntos grises' también se encuentran a lo largo de la capa Plomo-Estaño. Su composición es similar a la de los 'Puntos negros' solo que con un menor nivel de Plomo (Pb: 33.39%), mayor contenido de Estaño (Sn: 35.85%) y se sigue apreciando un pequeño porcentaje de Cobre (Cu: 0.79%). El Aluminio (Al: 13.63 %) y el Silicio (Si: 4.11%) se mantienen en cantidades muy aproximadas a las anteriores. La Figura 41 muestra el punto analizado y la Figura 42 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	10.09
Al	13.63
Si	4.11
Sn	35.85
Fe	2.14
Cu	0.79
Pb	33.39

Tabla 11. Elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2.

Figura 41. Análisis de elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2.

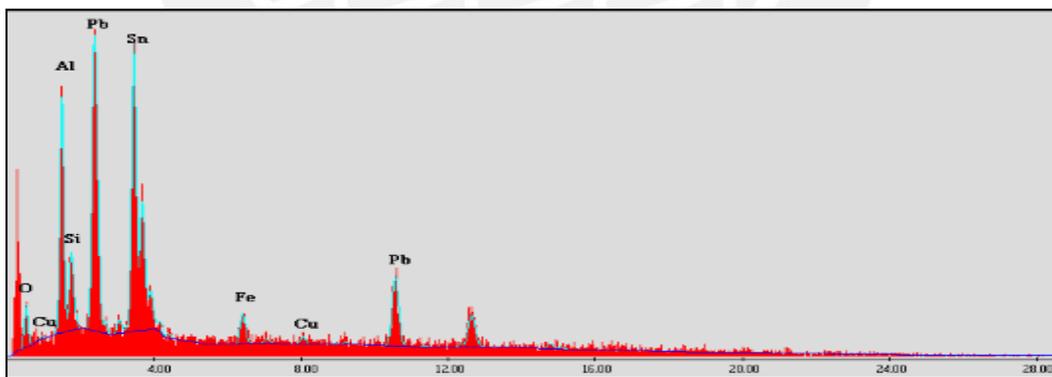
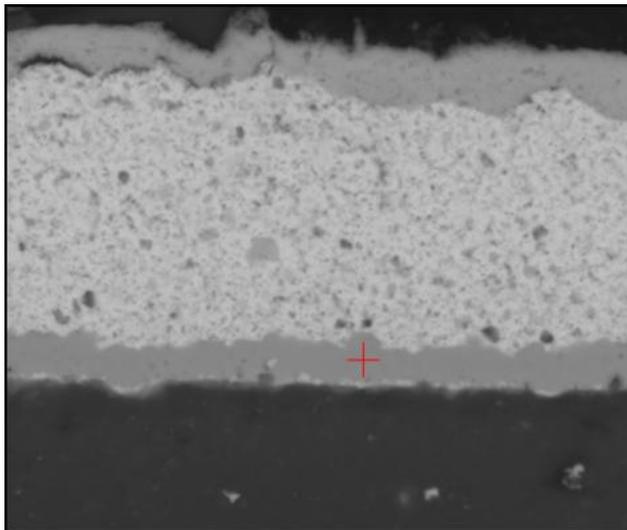


Figura 42. Gráfica de elementos de los 'Puntos grises' de la Capa 2 según niveles de energía.

3.1.3.5 Análisis de elementos en la Capa 3:

En la Capa 3 el contenido de Cobre es relativamente bajo (Cu: 8.64%), aun cuando el proveedor de camiones señala que es una capa exclusivamente de Cobre. En adición, podemos ver que hay una alta cantidad de Estaño (Sn: 36.00%). Es muy probable que este bajo porcentaje de Cobre sea motivo de la difusión del Cobre a la Capa 2 formando el compuesto frágil mencionado anteriormente de Cobre-Estaño (Cu₃-Sn). La Figura 43 muestra el punto analizado y la Figura 44 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	8.90
Al	21.96
Si	4.72
Sn	36.00
Fe	1.93
Cu	18.64
Pb	7.86

Tabla 12. Elementos de la Capa 3.

Figura 43. Análisis de elementos de la Capa 3.

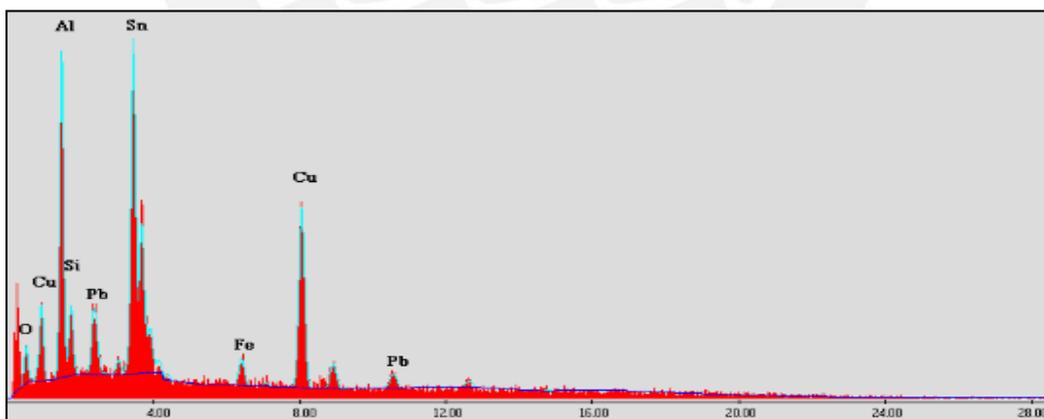
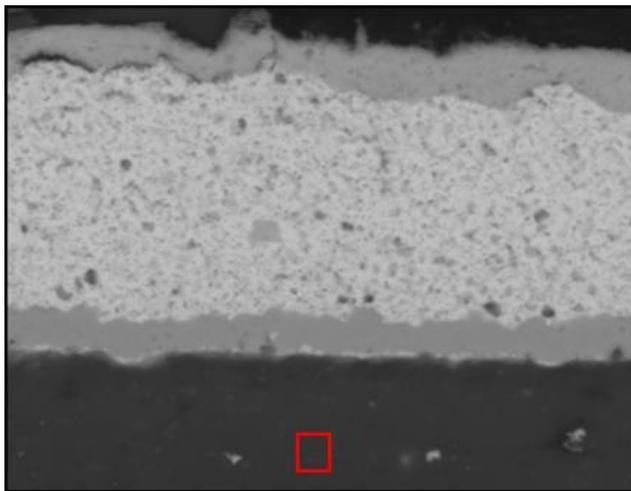


Figura 44. Gráfica de elementos de la Capa 3 según niveles de energía.

3.1.3.6 Análisis de elementos en la Capa 4:

La Capa 4 está constituida por un 74.00% de Aluminio, un 8.54% de Silicio, pequeños porcentajes de elementos como Estaño (Sn: 1.55%), Plomo (Pb: 3.80%), Cobre (Cu: 1.40%) y Hierro (Fe: 1.88%). Además, un elemento que no se había encontrado antes aparece en esta capa, el Zinc (Zn: 3.27%). La Figura 45 muestra el punto analizado y la Figura 46 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	5.55
Al	74.00
Si	8.54
Sn	1.55
Fe	1.88
Cu	1.40
Zn	3.27
Pb	3.80

Tabla 13. Elementos de la Capa 4.

Figura 45. Análisis de elementos de la Capa 4.

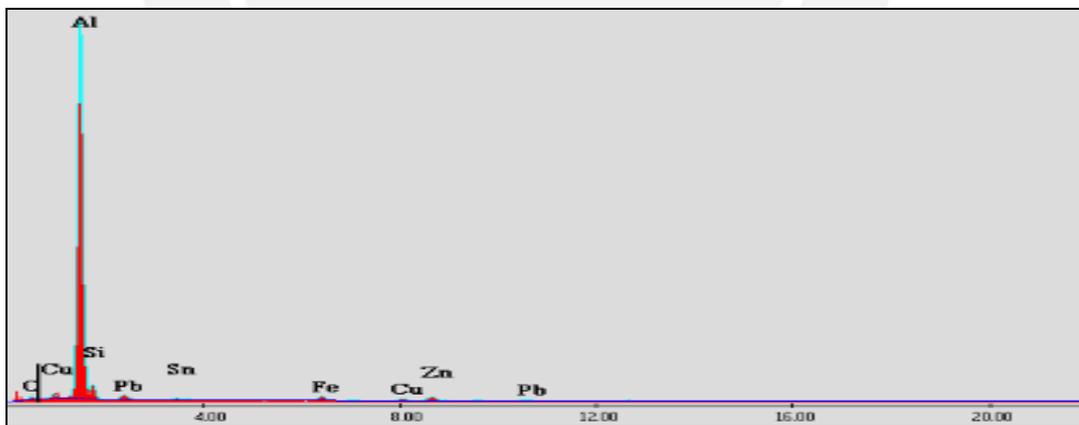
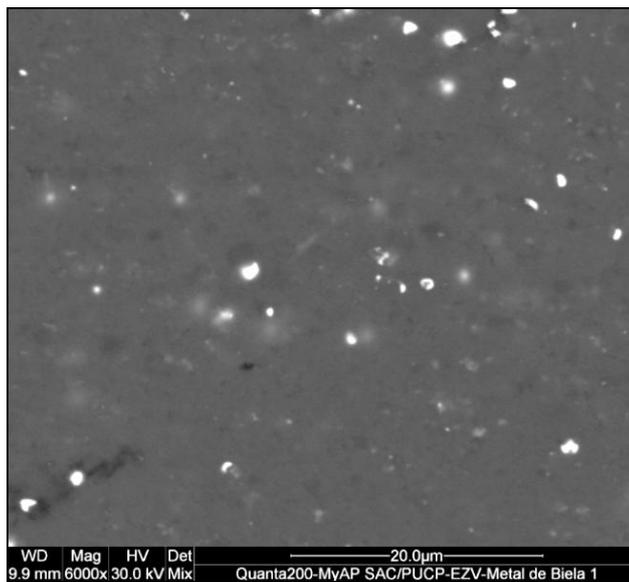


Figura 46. Gráfica de elementos de la Capa 4 según niveles de energía.

3.1.3.7 Análisis de compuestos en la Capa 4:

En la Capa 4 de Aluminio se pudieron apreciar muchos ‘Puntos brillosos’ como se puede ver en la siguiente figura, por lo tanto se realizó un análisis puntual. El nivel de Aluminio disminuyó a 51.96%, mientras que los contenidos de Silicio y Plomo aumentaron a 13.26% y 21.37%, respectivamente. Es probable que se estén formando compuestos entre el Aluminio y el Plomo. La Figura 47 muestra el punto analizado y la Figura 48 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	9.24
Al	51.96
Si	13.26
Fe	2.04
Zn	2.12
Pb	21.37

Tabla 14. Elementos de los ‘Puntos brillosos’ en la Capa 4.

Figura 47. Análisis de elementos de los ‘Puntos brillosos’ de la Capa 4.

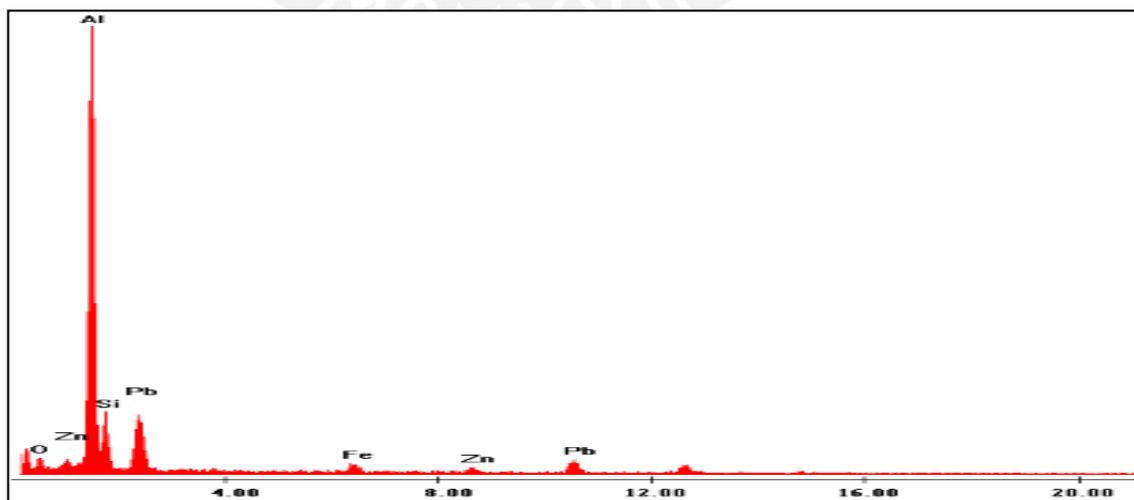


Figura 48. Gráfica de elementos de ‘Puntos brillosos de la Capa 4 según niveles de energía.

3.1.3.8 Análisis de elementos en la Capa 5:

En la Figura 49 se aprecian la Capa 4 de Aluminio (superior) y la Capa 5 de Acero (inferior). Como se señaló anteriormente se ven muchas partículas brillosas en la capa de Aluminio. Por otro lado, la composición química de la Capa 5 resultó en un alto contenido de Hierro y un pequeño contenido de Carbono (Ver Figura 50).

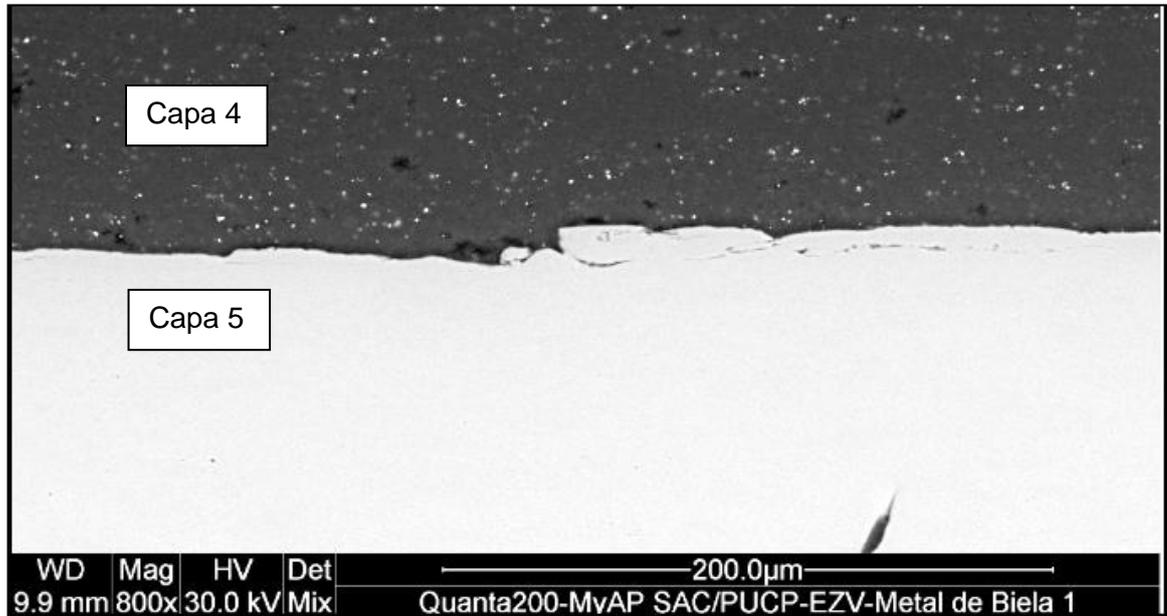


Figura 49. Imagen de la Capa 4 y la Capa 5.

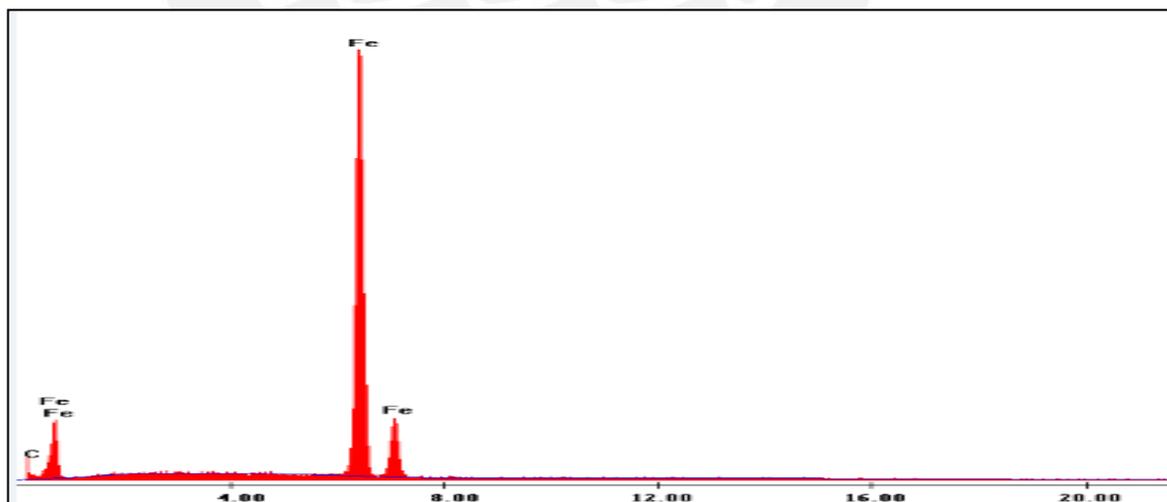


Figura 50. Gráfica de elementos de la Capa 5 según niveles de energía.

3.1.4 Análisis químico:

Con el ensayo de análisis químico se puede determinar la cantidad de Carbono presente en la Capa 5 y de esta forma caracterizar el material del acero. Además, se puede cuantificar los niveles de Manganeseo (Mn) y Silicio (Si); así como el contenido de las principales impurezas que son el Fósforo (P) y el Azufre (S). El ensayo se realizó a un pequeño pedazo de la superficie exterior del Cojinete 1. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Análisis químico

Elemento	%
C	0.08
Mn	0.44
Si	0.02
P	0.011
S	0.005
Ni	0.02
Cr	0.04
Mo	0.01
Cu	0.02

Tabla 15. Elementos de la Capa 5.

Es un acero de 0.08% de carbono, es decir, de bajo carbono. Esto muestra coherencia con la microestructura apreciada en la metalografía, un acero de matriz ferrítica.

El Atlas ASM de microestructuras proporciona una tabla con los rangos para aceros de bajo carbono:

Carbon	0.03 to 0.12%
Manganese	0.20 to 0.60%
Silicon	0.02 to 0.15%
Phosphorus	0.04% max
Sulfur	0.04% max

Tabla 16. Porcentajes recomendados por ASM para aceros de bajo carbono [24].

El Carbono, el Manganeseo y el Silicio están dentro de los rangos recomendados por ASM para acero de bajo carbono. Por otro lado, las impurezas como Fósforo y Azufre están por debajo de los límites permitidos.

3.1.5 Ensayo de microdureza:

El indentador del ensayo de microdureza no es lo suficientemente pequeño como para indentar específicamente cada una de las primeras tres (03) capas del cojinete de biela, las cuales tienen entre 3 a 25 micras de espesor. Sin embargo, lo que realmente interesa es la dureza y resistencia mecánica de la Capa 4 y la Capa 5, de Aluminio y de Acero, respectivamente. Debido a que la función de ambas capas es soportar las cargas y por ello tener una buena resistencia mecánica. A continuación los resultados:

Cojinete 1		Carga		200 gf
Capa 4 (Aluminio)				
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)	
1)	70	72.70	72.90	
2)	71	72.50	71.80	
3)	70	72.90	72.50	
4)	68	72.90	74.80	
5)	70	73.60	72.20	
Promedio	70	72.92	72.84	

Tabla 17. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 1.

Cojinete 1		Carga		500 gf
Capa 5 (Acero)				
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)	
1)	206	65.70	68.50	
2)	222	64.60	64.80	
3)	212	65.50	66.70	
4)	200	66.00	70.40	
5)	205	66.20	68.30	
Promedio	209	65.60	67.74	

Tabla 18. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 1.

La dureza promedio de la Capa 4 es de 70 HV y la de la Capa 5 es de 209 HV. La Tabla 19 muestra las equivalencias de dureza Rockwell, dureza Brinell y una aproximación del valor de resistencia a la tracción para el caso del acero.

Dureza Vickers (HV)	Dureza Brinell (HB)	Dureza Rockwell		Resistencia a la tracción N/mm ²
		HRB	HRC	
70	-	-	-	-
209	210	95	-	675

Tabla 19. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 1.

3.2 Análisis del material de los cojinetes de biela con desgaste:

3.2.1 Análisis del Cojinete 2:

3.2.1.1 Inspección visual a nivel macro:

La evaluación e inspección visual a nivel macro de las superficies de desgaste de los cojinetes de biela, registrando las imágenes con la cámara fotográfica descrita en el punto 2.2.1.

La Figura 51 corresponde a la inspección de la zona interior del Cojinete 2, esta es la parte convexa del metal que se encuentra en contacto con el muñón del eje cigüeñal. El orificio que se observa a la izquierda, en la zona media del cojinete, es por donde entra el lubricante. Una observación es que los mecanismos de desgaste se encuentran alejados del orificio por donde penetra el lubricante, mientras que la zona adyacente al orificio muestra un muy buen estado.



Figura 51. Inspección visual de la cara interior del Cojinete 2.

En la Figura 51 se pueden apreciar múltiples mecanismos de desgaste en el Cojinete 2. Con relación a lo investigado en la literatura sobre mecanismos comunes de desgaste, se puede afirmar que en este cojinete se presenta desgaste adhesivo y erosión por cavitación. Además, se observan diferentes grados de erosión por cavitación, siendo algunos muy severos y otros de menor grado pero que abarcan grandes áreas.

En la Figura 52 se muestra el detalle de cada uno de estos mecanismos de desgaste:

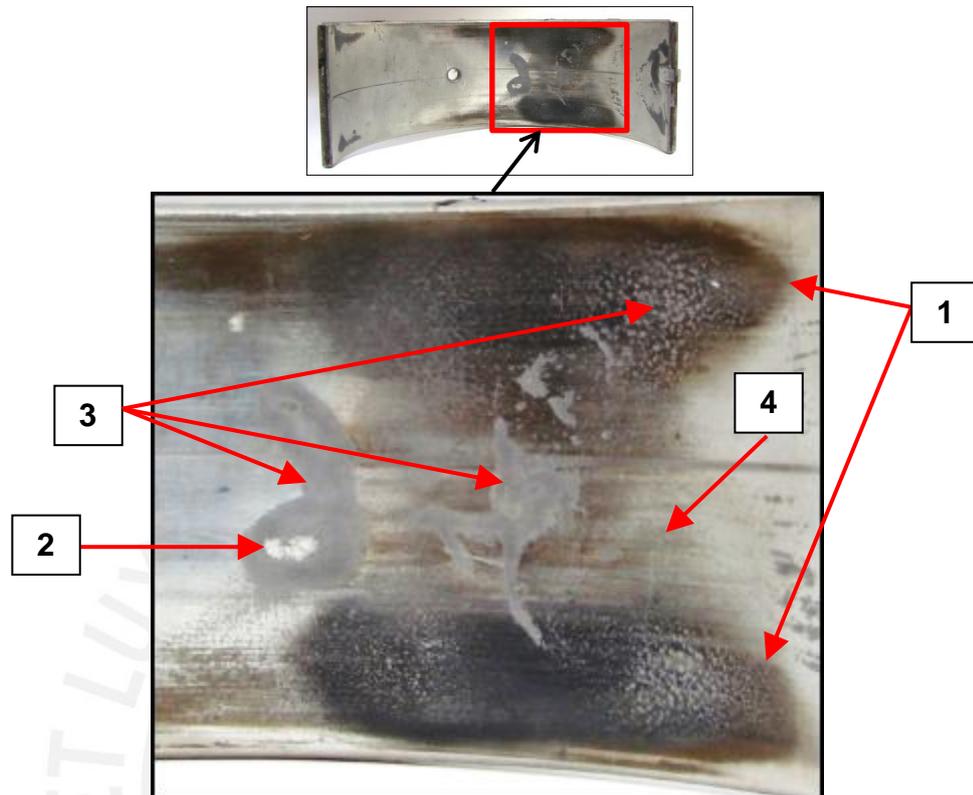


Figura 52. Mecanismos de desgaste del Cojinete 2.

1. Las zonas oscurecidas indican claramente que existió un desgaste adhesivo, porque se observan zonas que tiene un color marrón oscuro e incluso negro que indican altas temperaturas de operación y fusión de material.
2. Esta zona representa un desgaste típico de erosión por cavitación. Este tipo de picadura es el desgaste de mayor profundidad de remoción de material que se presenta en las capas del cojinete. Asimismo, esta picadura puede ser considerada como un concentrador de esfuerzos debido a la profundidad de la penetración. Posteriormente, se muestran los resultados de la metalografía correspondiente a una sección transversal de esta zona para medir la profundidad del daño.
3. Zonas de cavitación de menor penetración, pero que comprenden una mayor área de la Capa 2, de Plomo-Estaño. Además, donde existe desgaste adhesivo, también se ve signos de cavitación. Es común observar este tipo de desgaste alrededor de una picadura de erosión por cavitación, en la literatura del propio fabricante se puede observar una imagen idéntica.
4. Zona de ligero desgaste abrasivo, se puede ver un leve rayado del cojinete.

En la Figura 53 se puede apreciar claramente el mecanismo de desgaste denominado 'Fretting corrosion' que se presenta en la zona exterior del Cojinete 2. Dado que el Cojinete 2 posee un menor espesor debido al nivel de desgaste, esto produce un aumento en el movimiento relativo entre cojinete y la biela y origina el mecanismo 'Fretting corrosion'.



Figura 53. Inspección visual de la cara exterior del Cojinete 2.



3.2.1.2 Inspección visual asistida con estereoscopio:

En la Figura 54 se muestra la zona de desgaste de erosión por cavitación a 10 aumentos. Se puede ver el brillo de la capa de Aluminio y una morfología característica de este tipo de daño.



Figura 54. Zona de erosión por cavitación severa del Cojinete 2.

La Figura 55 muestra el detalle de otras zonas de erosión por cavitación:



Figura 55. Otras zonas de erosión por cavitación del Cojinete 2.

3.2.1.3 Ensayo de metalografía:

3.2.1.3.1 Metalografía en una zona alejada del desgaste:

La Figura 56 presenta la sección transversal del Cojinete 2 en una zona alejada de la zona afectada por los mecanismos de desgaste. La zona se ilustra con el rectángulo rojo de línea discontinua en la parte superior derecha de la Figura 52. Se muestran las cuatro (04) primeras capas y los espesores de las tres (03) primeras:

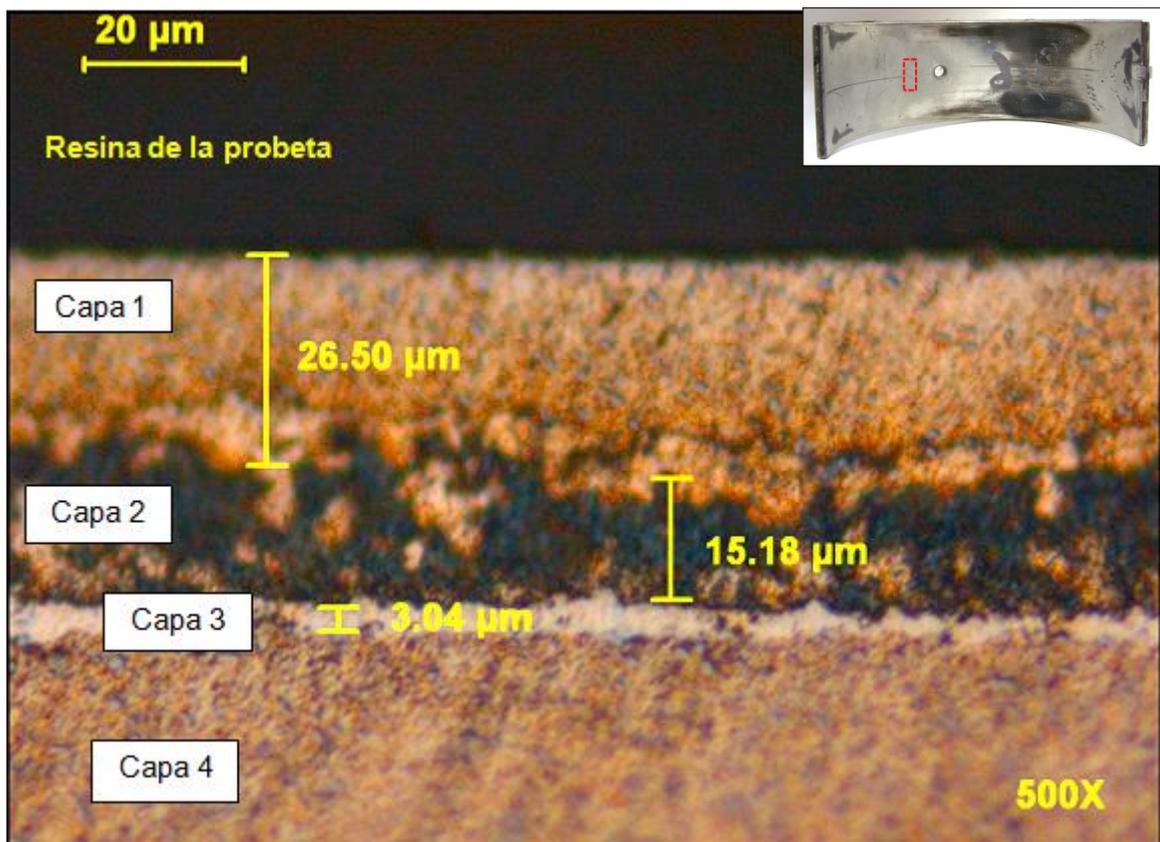


Figura 56. Metalografía de la Capa 1,2 y 3 del Cojinete 2 en una zona alejada del desgaste.

Para determinar el espesor de las capas del cojinete se tomaron las medidas tal como lo muestra la Figura 56. Se realizaron 5 mediciones de cada una de las capas, recorriendo la sección transversal del cojinete de manera horizontal con el microscopio.

Algo importante que se puede observar a 500 aumentos es que la Capa 2 presenta mucha variación en su espesor, lo cual puede traer problemas con las propiedades de dicha capa y por lo tanto del cojinete.

Cojinete 2		
Espesor de la Capa 1:		
Aumentos	Escala	Espesor (µm)
200x	50 µm	11.38
200x	50 µm	24.84
200x	50 µm	18.63
500x	20 µm	26.50
500x	20 µm	22.70
Máximo		26.50
Mínimo		11.38
Promedio		20.81

Tabla 20. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 2.

Según las recomendaciones del proveedor de camiones esta capa debería medir entre 0.5 a 1 micra. En la medición del Cojinete 1 se obtuvo 5.44 micras de espesor. En el caso del Cojinete 2 el resultado es en promedio 20.81 micras lo cual es demasiado para esta capa.

Cojinete 2		
Espesor de la Capa 2:		
Aumentos	Escala	Espesor (µm)
500x	20 µm	6.07
500x	20 µm	14.14
500x	20 µm	15.18
500x	20 µm	31.74
500x	20 µm	12.97
Máximo		31.74
Mínimo		6.07
Promedio		16.02

Tabla 21. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 2.

Según el fabricante esta capa debe oscilar entre 20-30 micras de espesor. En el Cojinete 1 se comprobó que efectivamente estaba dentro del rango, 22.73 micras. En este caso, el Cojinete 2 no se encuentra dentro del rango teniendo un espesor de 16.02 en promedio. Cabe resaltar que la varianza de esta capa es excesiva encontrándose espesores desde 6.07 micras hasta 31.74 micras.

Cojinete 2		
Espesor de la Capa 3:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	3.04
500x	20 μm	3.86
500x	20 μm	3.59
500x	20 μm	4.28
500x	20 μm	3.04
Máximo		4.28
Mínimo		3.04
Promedio		3.56

Tabla 22. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 2.

Según las recomendaciones del fabricante esta capa tiene entre 1 a 3 micras. El espesor promedio hallado en el Cojinete 1 es 4.06 micras y se encuentra ligeramente por encima a los rangos especificados. En este caso el espesor es aún más cercano al rango.

La Figura 57 muestra las mediciones realizadas en la Capa 4 del Cojinete 2.

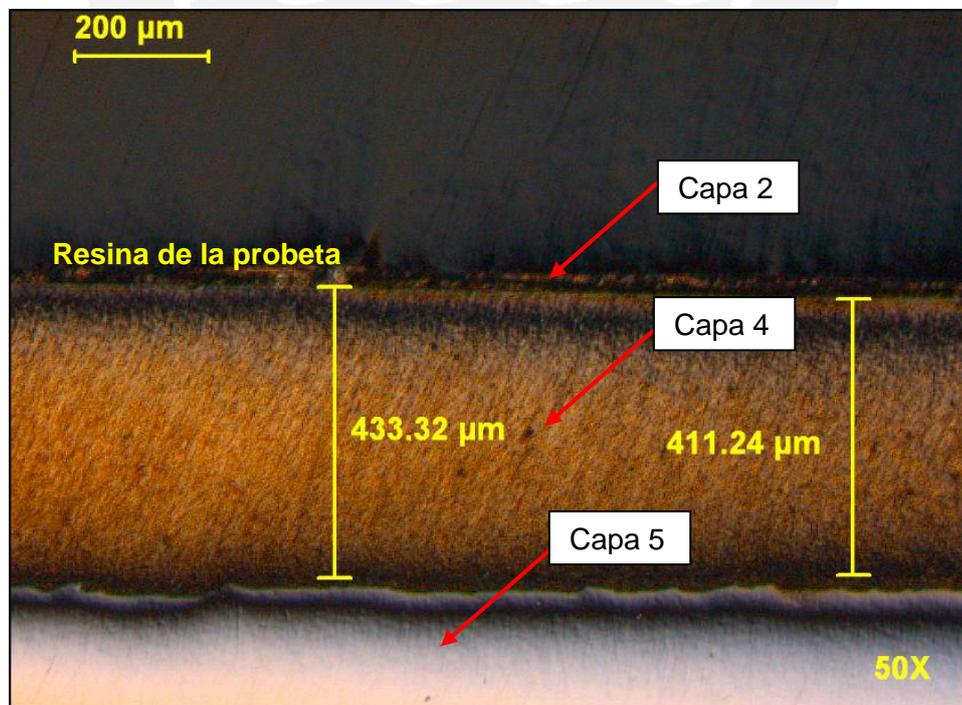


Figura 57. Metalografía de la Capa 4 del Cojinete 2 en una zona alejada del desgaste.

Para la medición de los espesores de capa se realizó una inspección tomando varias medidas a lo largo de la sección transversal de la probeta. A continuación los resultados:

Cojinete 2		
Espesor de la Capa 4:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
50x	200 μm	397.44
50x	200 μm	369.84
50x	200 μm	390.54
50x	200 μm	382.26
50x	200 μm	405.73
50x	200 μm	433.32
50x	200 μm	411.24
Máximo		433.32
Mínimo		369.84
Promedio		398.62

Tabla 23. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 2.

El espesor promedio de la Capa 4 está por debajo de lo medido para el Cojinete de biela número 1, en este caso es 398.62 micras versus las 443.68 micras de espesor que se obtuvo para el otro cojinete. Además, realizando las mediciones se observó mucha varianza entre los resultados, obteniendo muchos espesores por debajo de las 400 micras, incluso zonas de aproximadamente 370 micras.

3.2.1.3.2 Microestructura del acero:

Al igual que en el caso del Cojinete 1, luego de medir los espesores se atacó la misma muestra químicamente para apreciar la microestructura (Ver Figura 58).

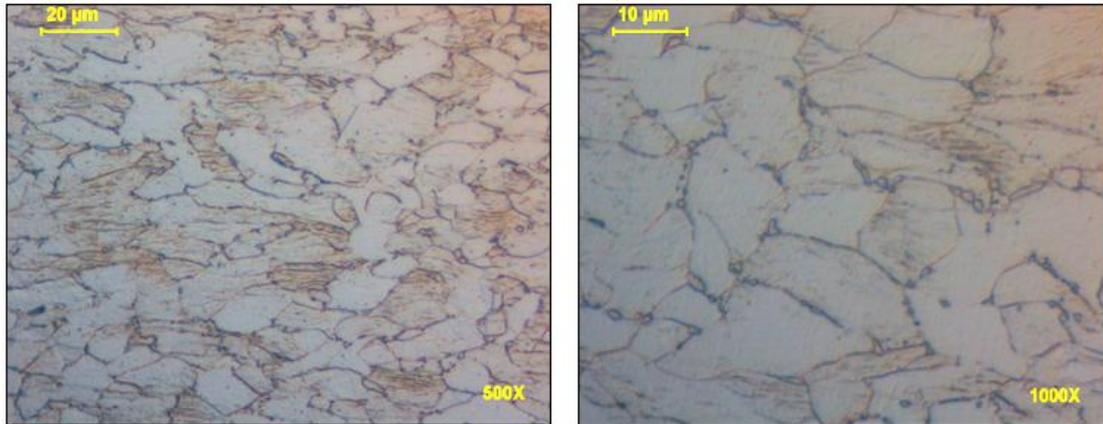


Figura 58. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 2.

Se encontró la misma microestructura de matriz ferrítica correspondiente a un acero de bajo contenido de carbono.

3.2.1.3.3 Metalografía en la zona de desgaste:

En la Figura 59 se muestra la sección transversal correspondiente a la picadura de la zona de erosión por cavitación más severa presente en el cojinete. Se puede observar una penetración total de la Capa 4. La profundidad es de 471.70 micras y la longitud del daño es de 1.224 milímetros:

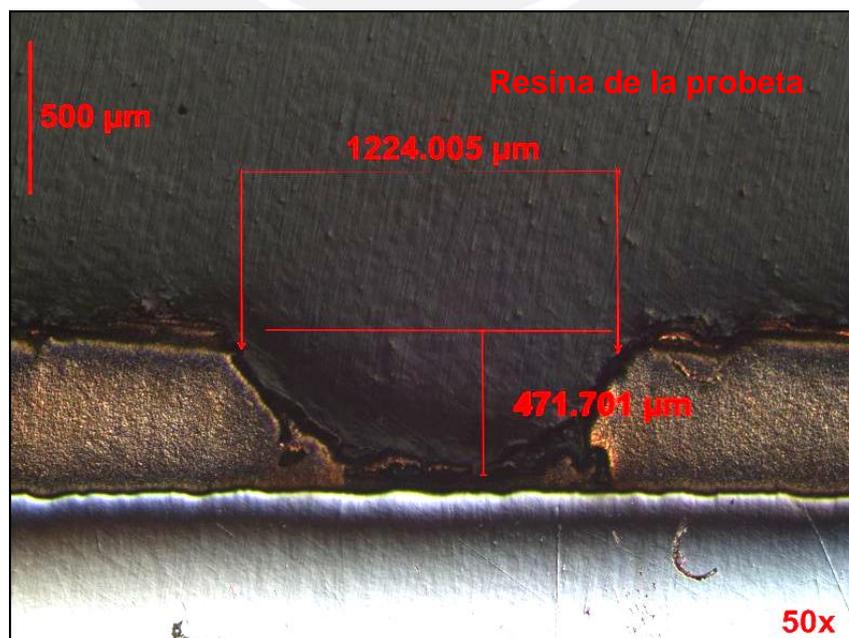


Figura 59. Metalografía en la sección transversal de la zona de erosión por cavitación del Cojinete 2.

3.2.1.4 Microscopía electrónica de barrido:

El Cojinete 2 presenta múltiples mecanismos de desgaste como se comentó en la sección de inspección visual. Dentro de ellos, el mecanismo que origina una mayor profundidad de penetración y daño en las capas del cojinete es la erosión por cavitación.

Por este motivo, se realizó el ensayo en esta zona para obtener la información de material y la morfología del desgaste. Se ha realizado el análisis de elementos en 4 zonas: Zona 1, Zona 2, Zona 3 y Zona 4. El orden de las zonas es según el proceso del daño en la superficie del Cojinete 2. La Figura 60 muestra la superficie de erosión por cavitación a 95 aumentos:

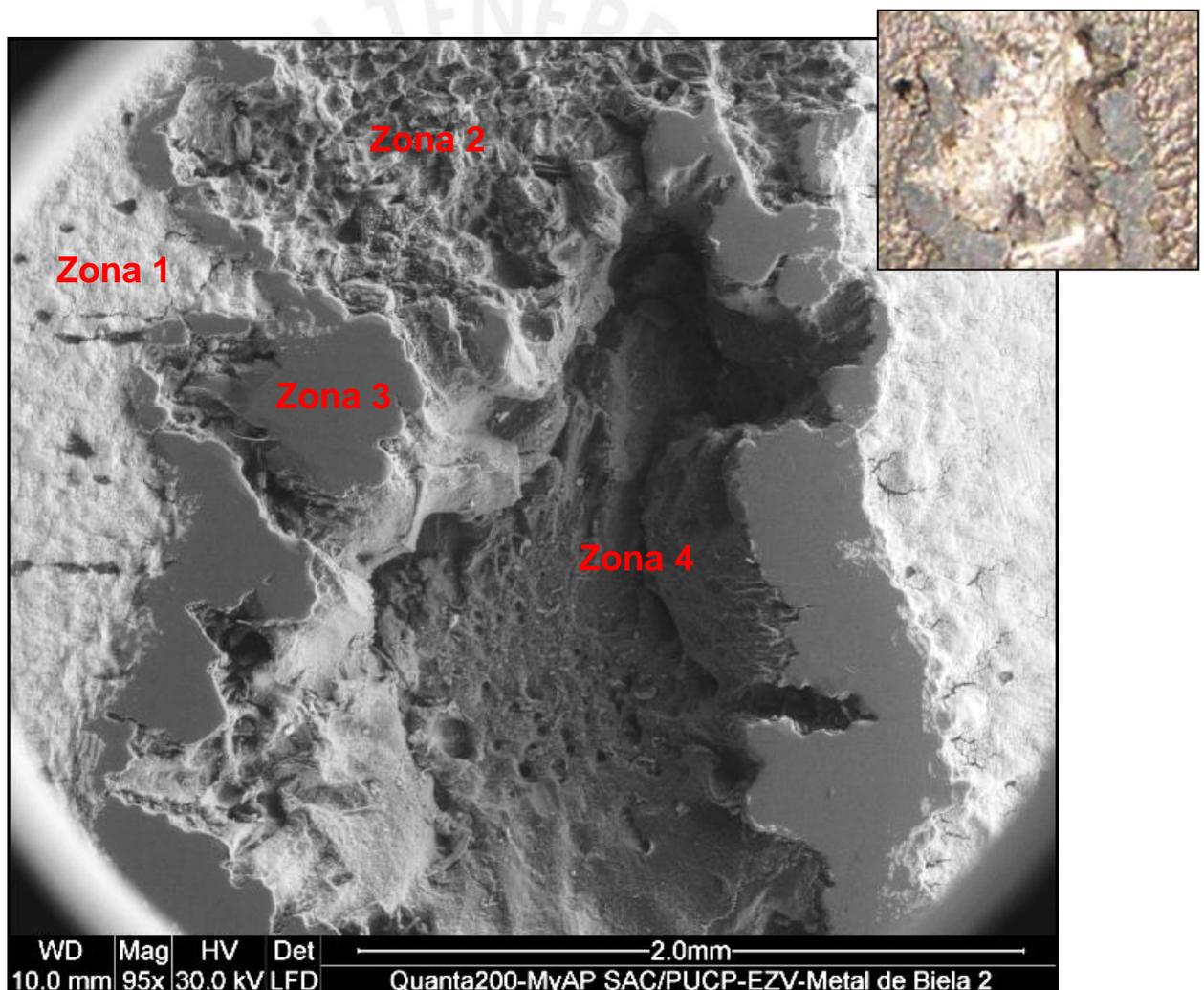


Figura 60. Superficie de erosión por cavitación severa en el Cojinete 2.

3.2.1.4.1 Análisis de la 'Zona 1' de erosión por cavitación:

La zona más clara y brillante es la que tiene menor profundidad, es la menos dañada por el fenómeno de cavitación. La morfología de la superficie es finamente gruesa. Del contenido de elementos se puede concluir que esta es la Capa 2 (Plomo-Estaño). Con relación a los demás elementos, están presentes los que se habían encontrado anteriormente en el Cojinete 1 y con porcentajes similares. Está presente el Cobre (Cu: 1.62%), elemento que forma compuesto con el Estaño y fragiliza el material. Es importante señalar que el contenido de Carbono (C: 24.19%) no debe ser tomado en cuenta, ya que la muestra ha sido constantemente manipulada y el Carbono puede provenir del contacto con las manos. La Figura 61 muestra el punto analizado y la Figura 62 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.

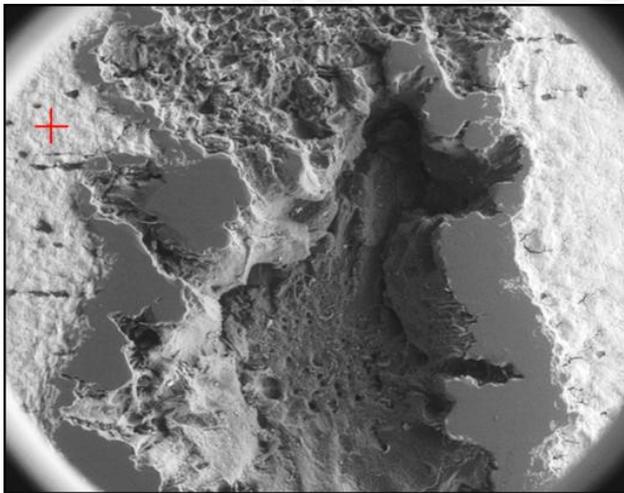


Figura 61. Análisis de la Zona 1 del Cojinete 2.

Element	Wt%
C	24.19
O	5.91
Al	2.03
Si	0.29
Sn	4.1
Fe	0.65
Cu	1.62
Pb	61.23

Tabla 24. Elementos de la Zona 1 del Cojinete 2.

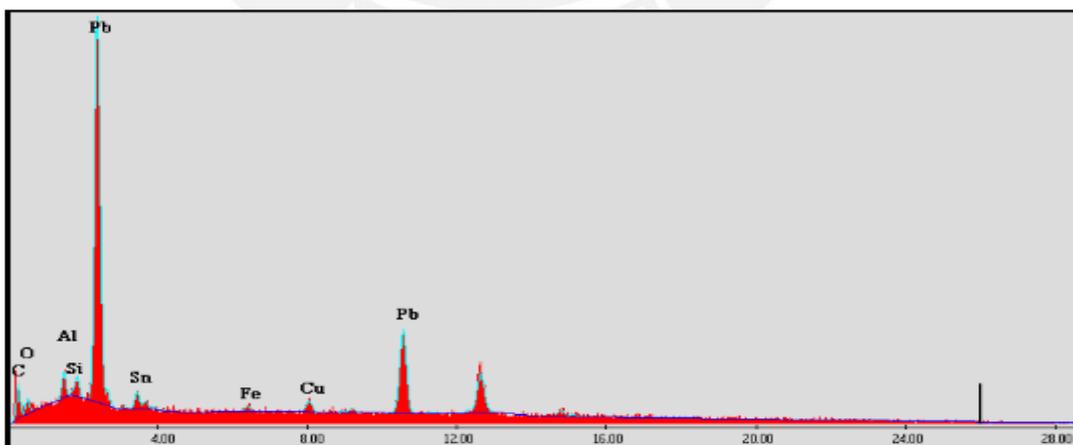
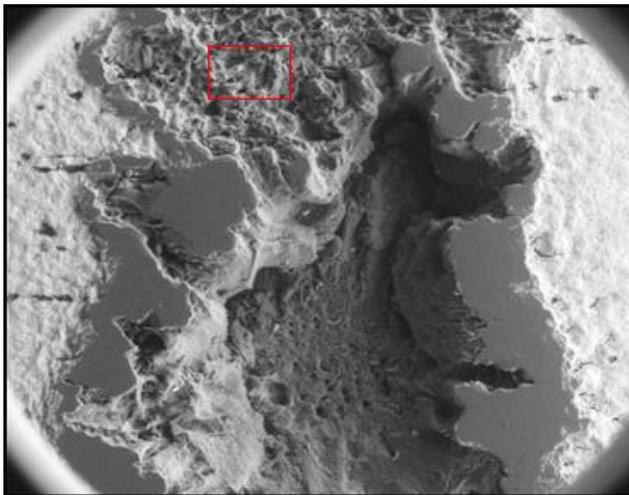


Figura 62. Gráfica de elementos en la Zona 1 según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.4.2 Análisis de la 'Zona 2' de erosión por cavitación:

La morfología del daño indica que luego de la zona brillante correspondiente a la Capa 2 (Plomo-Estaño), el desgaste va progresando hacia un patrón como el de la zona rectangular en rojo. Se analizó esta zona y efectivamente contiene Cobre y Aluminio, elementos que están presentes en la Capa 3 y Capa 4. La morfología de esta zona de desgaste es aún más grumosa que la anterior. La Figura 63 muestra el punto analizado y la Figura 64 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	16.16
Al	70.93
Si	5.43
Fe	1.61
Cu	1.28
Zn	3.59
Pb	1.00

Tabla 25. Elementos de la Zona 2 del Cojinete 2.

Figura 63. Análisis de la Zona 2 del Cojinete 2.

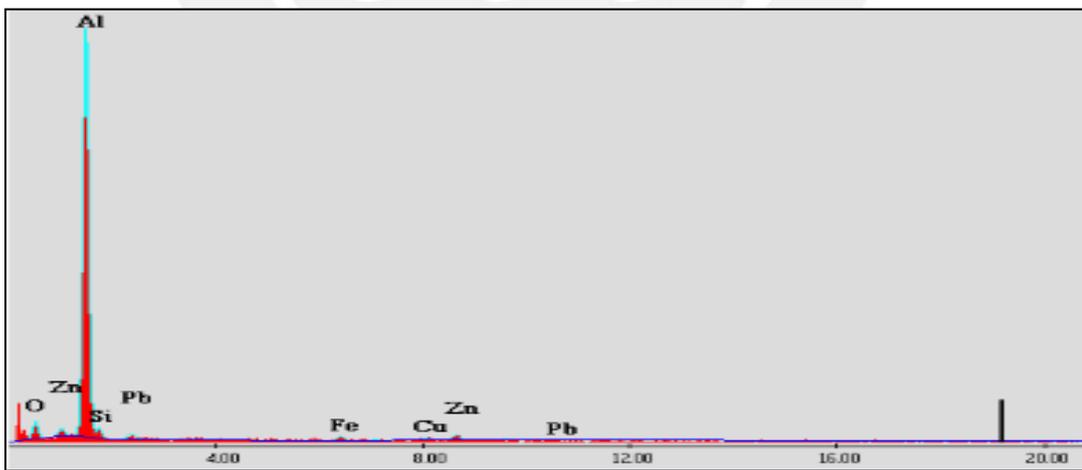
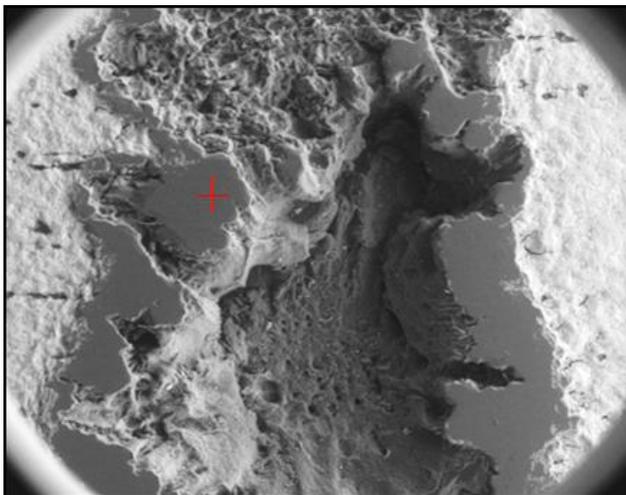


Figura 64. Gráfica de elementos en la Zona 2 según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.4.3 Análisis de la 'Zona 3' de erosión por cavitación:

Luego se realizó un análisis en una zona más opaca de color gris. Esta zona corresponde a la capa de Aluminio con un contenido de 81.44%. El mecanismo de erosión por cavitación es el único que penetra hasta la capa de Aluminio, lo cual indica que es un mecanismo muy agresivo para el material. En las zonas grises como la que señala el puntero color rojo ya se ha producido un desprendimiento prácticamente total de la Capa 2 (Plomo-Estaño). La Figura 65 muestra el punto analizado y la Figura 66 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	5.44
Al	81.44
Si	5.73
Fe	0.43
Cu	1.15
Zn	3.55
Pb	2.27

Tabla 26. Elementos de la Zona 3 del Cojinete 2.

Figura 65. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 2.

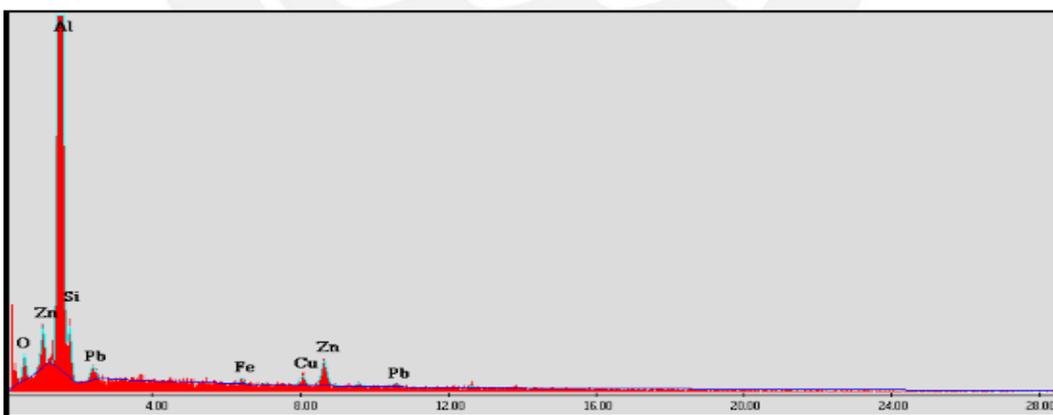
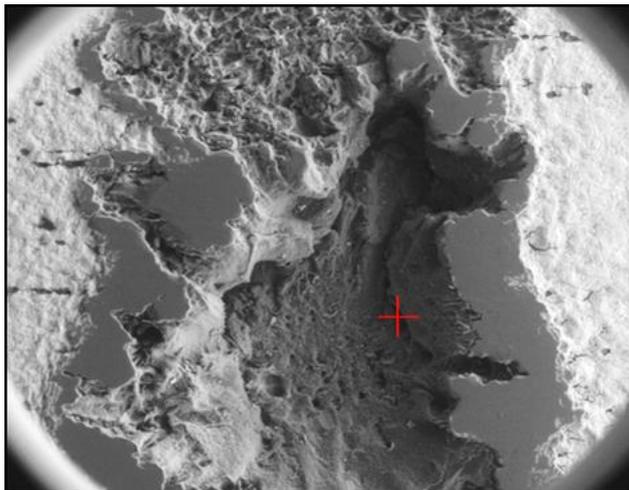


Figura 66. Gráfica de elementos en la Zona 3 según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.4.4 Análisis de la 'Zona 4' de erosión por cavitación:

Las zonas más oscuras de color negro indican una mayor profundidad de penetración del desgaste por cavitación. Se encuentran los mismos elementos y porcentajes similares a los de la Zona 3. La diferencia es el nivel de profundidad del daño y un mayor contenido de Hierro (Fe: 3.16%) que indica que el mecanismo de erosión por cavitación penetra hasta la Capa 5. La Figura 67 muestra el punto analizado y la Figura 68 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	9.69
Al	66.80
Si	4.26
Fe	3.16
Cu	2.40
Zn	5.45
Pb	8.25

Tabla 27. Elementos de la Zona 4 del Cojinete 2.

Figura 67. Análisis de la Zona 4 del Cojinete 2.

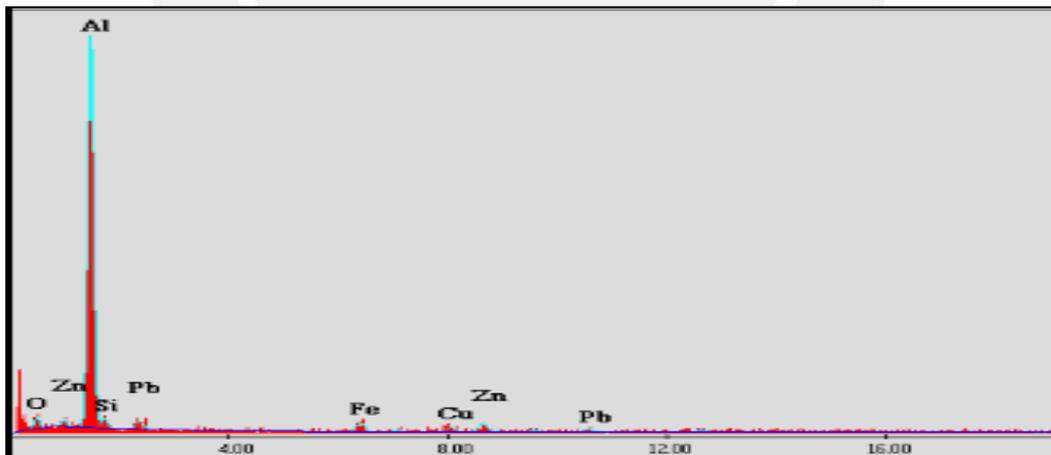


Figura 68. Gráfica de elementos en la Zona 4 según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.4.5 Análisis de la 'Zona 4' a mayores aumentos:

La erosión por cavitación severa puede presentarse de muchas formas. Por ejemplo, puede que se formen burbujas de tamaño muy pequeño, pero en una gran cantidad o que sean burbujas de un tamaño mayor, pero una menor cantidad. Ambos casos son perjudiciales para el cojinete, ya que estas burbujas implosionan con una gran velocidad y presión contra el metal generando la remoción de material. En la Figura 69 se puede apreciar claramente la morfología del desgaste por cavitación, se ven muchas zonas de desgaste que poseen una forma circular.

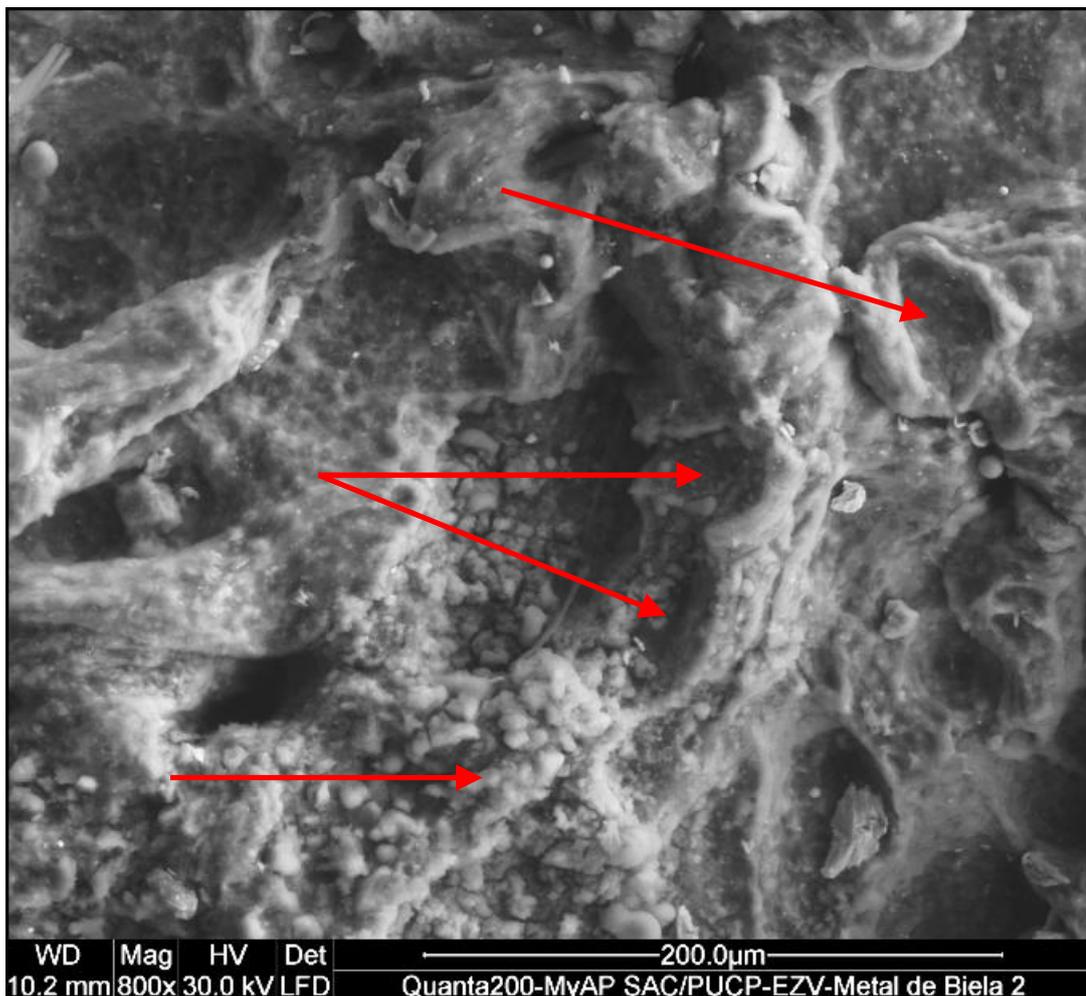


Figura 69. Análisis de la Zona 4 del Cojinete 2 a 800 aumentos.

3.2.1.3.6 Análisis de esferas en la 'Zona 4':

Se realizó un análisis en el tipo de zona más común, donde se aprecia la morfología del tipo de desgaste de erosión por cavitación. Se encontró un alto contenido de Aluminio (Al: 69.63%), Silicio (Si: 4.42%), Zinc (Zn: 3.98%), Plomo (Pb: 4.35%), Cobre (Cu: 1.42%) y nuevamente Hierro (Fe: 1.21%). Quedaría confirmado que la erosión por cavitación penetra fácilmente la Capa 4, de Aluminio. La Figura 70 muestra el punto analizado y la Figura 71 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.

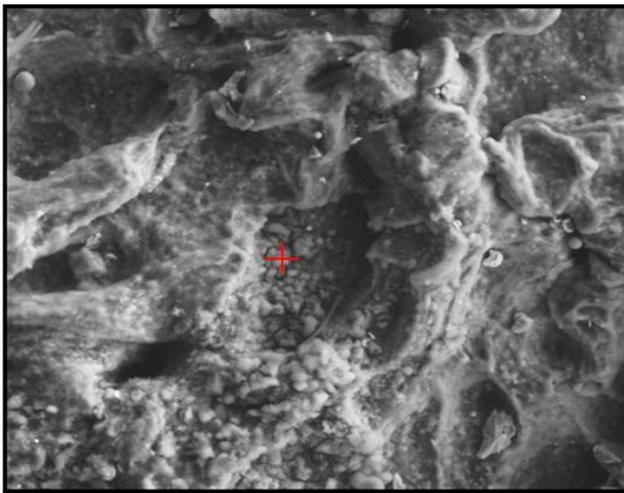


Figura 70. Análisis de esferas en la Zona 4 del Cojinete 2.

Element	Wt%
O	14.99
Al	69.63
Si	4.42
Pb	4.35
Fe	1.21
Cu	1.42
Zn	3.98

Tabla 28. Elementos de las esferas en la Zona 4 del Cojinete 2.

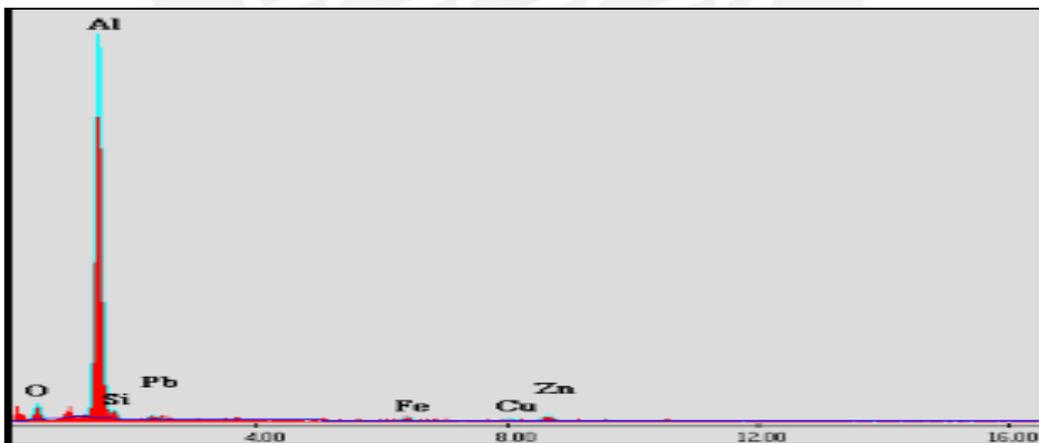


Figura 71. Gráfica de elementos de esferas según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.3.7 Análisis puntual en una 'Esfera' de la 'Zona 4':

En la Figura 64 se podían apreciar esferas casi perfectas en algunas zonas. Se realizó un análisis puntual para ver de qué elementos están constituidas dichas esferas. El resultado fue un contenido mucho más alto de Hierro (Fe: 20.90%), lo que ratifica que el mecanismo de erosión por cavitación ataca de forma agresiva a la Capa 5. La Figura 72 muestra el punto analizado y la Figura 73 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.

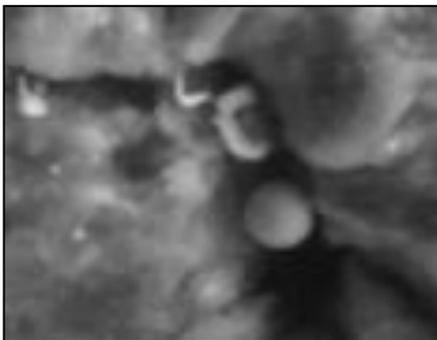


Figura 72. Análisis de una 'Esfera' en la Zona 4 del Cojinete 2.

Element	Wt%
C	27.23
O	5.68
Al	43.46
Fe	20.90
Zn	2.72

Tabla 29. Elementos de una 'Esfera en la Zona 4 del Cojinete 2.

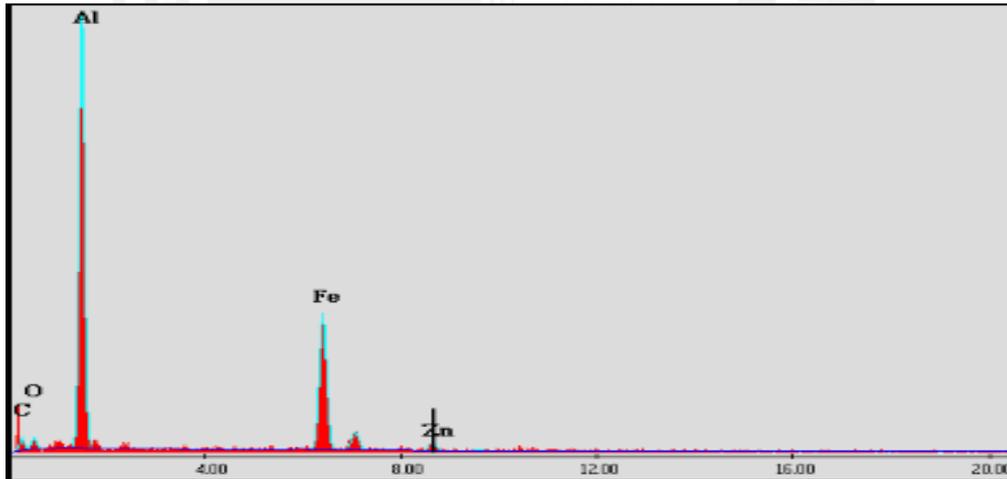


Figura 73. Gráfica de elementos de una 'Esfera' según niveles de energía en el Cojinete 2.

3.2.1.5 Ensayo de microdureza:

Cojinete 2		Carga		200 gf	
Capa 4 (Aluminio)					
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)		
1)	62	76.40	78.70		
2)	61	77.50	78.90		
3)	60	78.20	78.90		
4)	61	75.90	79.40		
5)	62	76.60	77.80		
Promedio	61	76.92	78.74		

Tabla 30. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 2.

Cojinete 2		Carga		500 gf	
Capa 5 (Acero)					
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)		
1)	202	65.70	69.70		
2)	200	65.70	70.60		
3)	202	66.70	68.70		
4)	206	66.90	67.40		
5)	205	66.20	68.30		
Promedio	203	66.24	68.94		

Tabla 31. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 2.

La dureza promedio de la Capa 4 es de 61 HV y la de la Capa 5 es de 203 HV. Estos valores son menores a los de la dureza de las capas del Cojinete 1. La Tabla 19 muestra las equivalencias de dureza Rockwell, dureza Brinell y una aproximación del valor de resistencia a la tracción para el caso del acero.

Dureza Vickers (HV)	Dureza Brinell (HB)	Dureza Rockwell		Resistencia a la tracción N/mm ²
		HRB	HRC	
61	-	-	-	-
203	203	94	-	662

Tabla 32. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 2.

3.2.2 Análisis del Cojinete 3:

3.2.2.1 Inspección visual a nivel macro:

La Figura 74 corresponde a la zona interior del Cojinete 3. Como en el caso anterior del Cojinete 2, se puede observar que los mecanismos de desgaste se encuentran alejados del orificio por donde penetra el lubricante, mientras que las zonas cercanas al orificio se encuentran en buen estado.

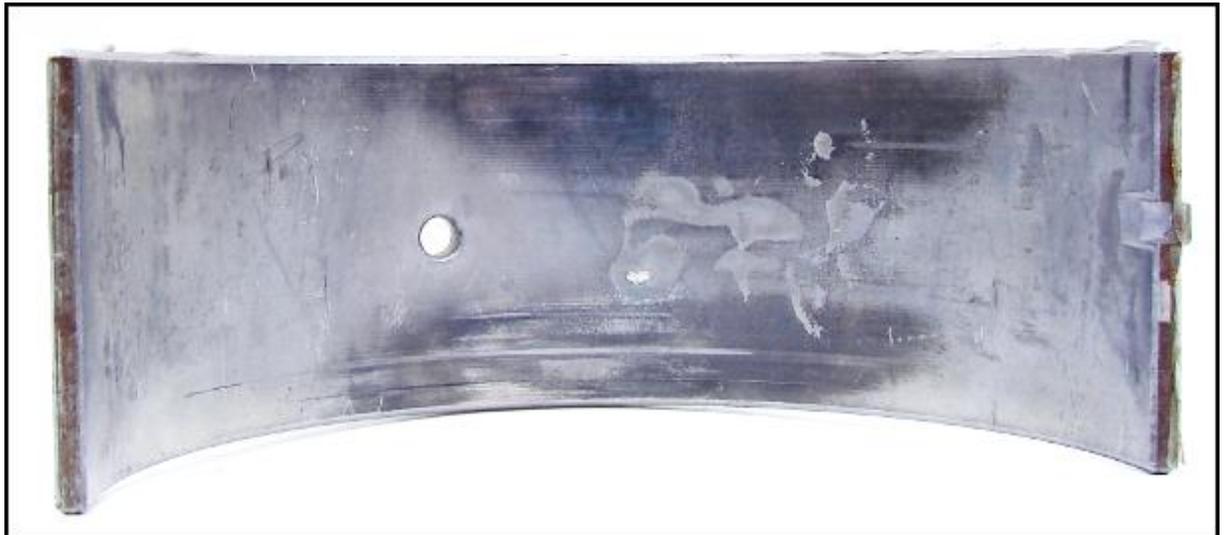


Figura 74. Inspección visual de la cara interior del Cojinete 3.

En el Cojinete 3 se pueden apreciar múltiples mecanismos de desgaste. Con relación a lo investigado en la literatura sobre mecanismos comunes de desgaste, se puede afirmar que el cojinete presenta principalmente desgaste adhesivo y erosión por cavitación.

En la Figura 75 se mostrará el detalle de cada uno de estos mecanismos y las observaciones.

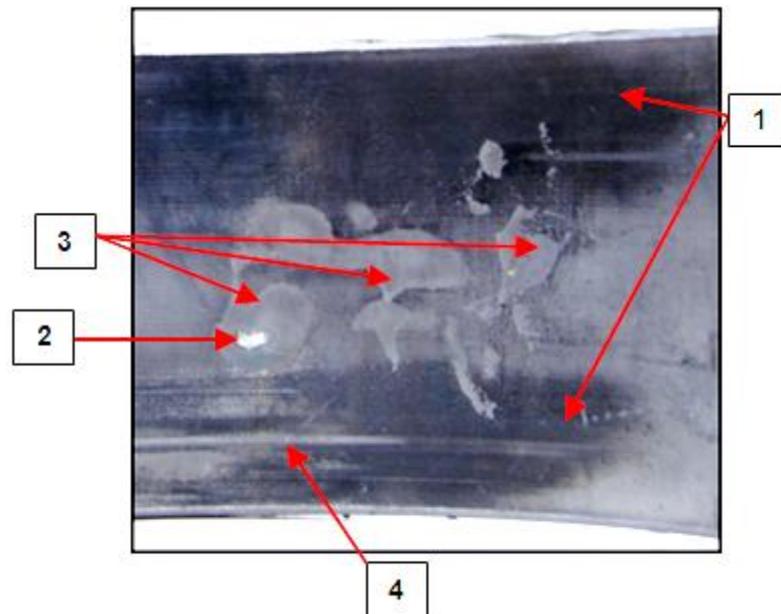


Figura 75. Mecanismos de desgaste del Cojinete 2.

1. Similar a las zonas oscurecidas del Cojinete 2 que indican que existió un desgaste adhesivo, porque se observan zonas que tiene un color casi negro que indican altas temperaturas de operación y fusión de material. Además, hay que notar que la posición del desgaste es similar a la del cojinete anterior, cercana a ambos extremos horizontales y al lado de la zona central del cojinete.
2. Esta picadura representa un desgaste típico de erosión por cavitación severa. La penetración es notable a comparación de otros mecanismos de desgaste.
3. Zonas de cavitación en menor grado de penetración, pero de mayor área de remoción de material de la Capa 2, de Plomo-Estaño.
4. Zona de ligero desgaste abrasivo, se puede ver un leve rayado del cojinete.

La Figura 76 muestra la zona exterior del Cojinete 3, la cual también presenta el mecanismo 'Fretting corrosion'.



Figura 76. Inspección visual de la cara exterior del Cojinete 3.

3.2.2.2 Inspección visual asistida con estereoscopio:

En la Figura 77 se muestra la zona de desgaste de erosión por cavitación a 10 aumentos. Se puede ver el brillo de la Capa 4, de Aluminio y una morfología característica de este tipo de daño.



Figura 77. Zona de erosión por cavitación severa del Cojinete 3.

En la Figura 78 se ilustran las zonas de erosión por cavitación severa y zonas adyacentes de menor grado de cavitación. Incluso en las zonas de los alrededores a la erosión por cavitación se pueden observar líneas verticales que indican una fatiga superficial del cojinete.



Figura 78. Zonas de erosión por cavitación del Cojinete 3.

3.2.2.3 Ensayo de metalografía:

3.2.2.3.1 Metalografía en una zona alejada del desgaste:

En la Figura 79 se muestra la sección transversal de una zona alejada de la zona afectada por desgaste en el Cojinete 3. La zona se ilustra con el rectángulo rojo de línea discontinua en la parte superior derecha de la Figura 74. Cabe resaltar que a lo largo de la sección transversal de la probeta del cojinete se encontró una remoción prácticamente total de la Capa 1, por este motivo solo se tomaron tres medidas de su espesor.

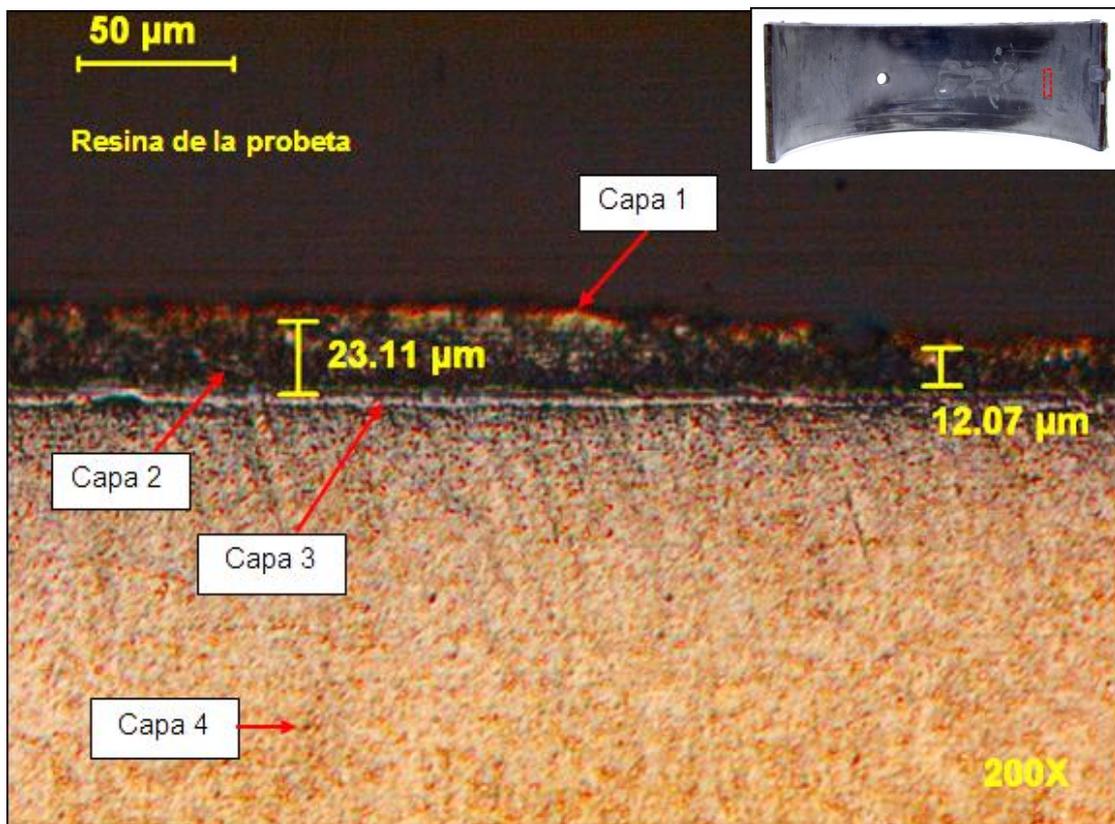


Figura 79. Metalografía de la Capa 1,2 y 3 del Cojinete 3 en una zona alejada del desgaste.

Cojinete 3		
Espesor de la Capa 1:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	8.56
500x	20 μm	6.90
500x	20 μm	3.86
Máximo		8.56
Mínimo		3.86
Promedio		6.44

Tabla 33. Espesor de la Capa 1 del Cojinete 3.

En la pocas zonas donde se pudo medir el espesor de la Capa 1, el espesor era bastante mayor al nominal, en promedio 6.44 micras.

Cojinete 3		
Espesor de la Capa 2:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
200x	50 μm	23.11
200x	50 μm	12.07
500x	20 μm	5.24
500x	20 μm	10.07
500x	20 μm	7.45
Máximo		23.11
Mínimo		5.24
Promedio		11.59

Tabla 34. Espesor de la Capa 2 del Cojinete 3.

La Capa 2 del Cojinete 3 presentaba mucha variación en las mediciones, un mínimo de 5.24 y un máximo de 23.11 micras. El promedio está por debajo a las recomendaciones de espesor para esta capa que es entre 20 y 25 micras.

Cojinete 3		
Espesor de la Capa 3:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
500x	20 μm	4.00
500x	20 μm	5.11
500x	20 μm	3.45
500x	20 μm	3.86
500x	20 μm	4.28
Máximo		5.11
Mínimo		3.45
Promedio		4.14

Tabla 35. Espesor de la Capa 3 del Cojinete 3.

El espesor promedio de la Capa 3 es similar al del Cojinete 1 y del Cojinete 2 y está ligeramente fuera del rango recomendado.

La Figura 80 muestra la medición del espesor de la Capa 4 del Cojinete 3:

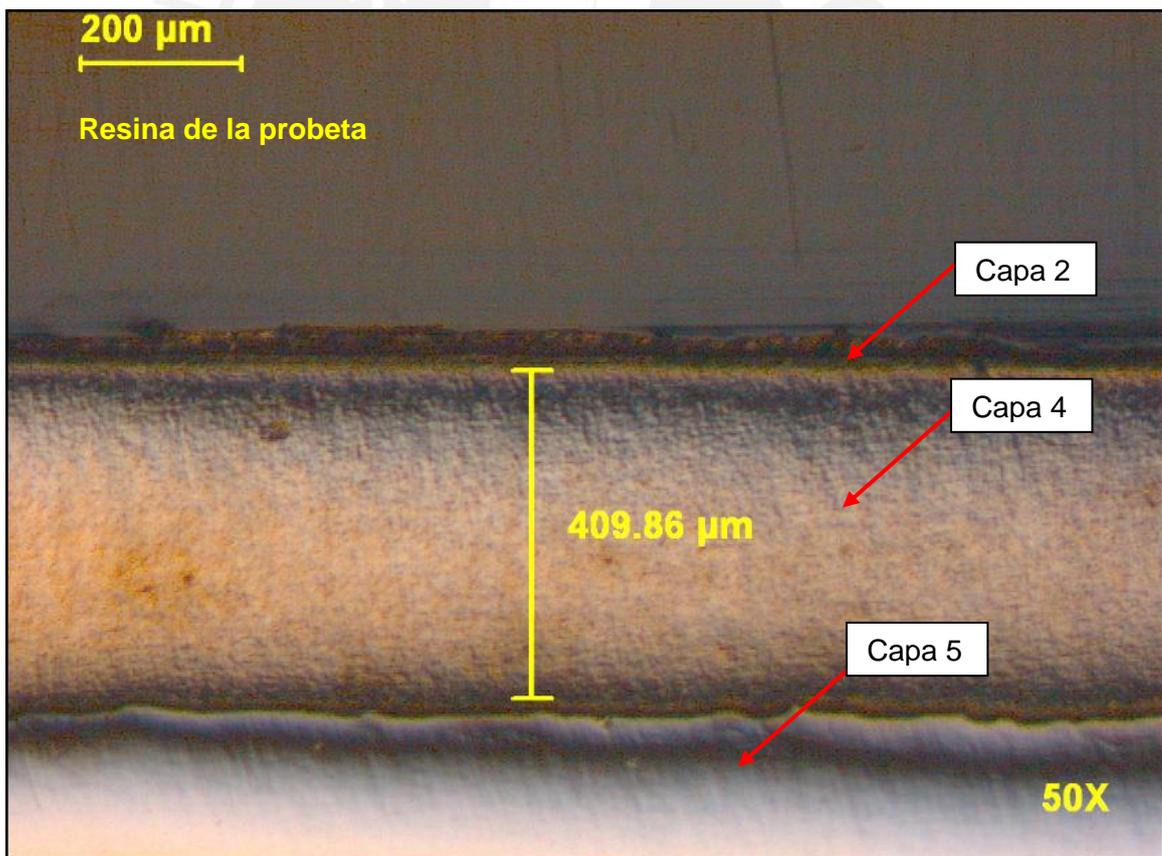


Figura 80. Metalografía de la Capa 4 del Cojinete 3 en una zona alejada del desgaste.

Cojinete 3		
Espesor de la Capa 4:		
Aumentos	Escala	Espesor (μm)
50x	200 μm	409.86
50x	200 μm	401.58
50x	200 μm	409.87
50x	200 μm	404.35
50x	200 μm	393.30
50x	200 μm	386.40
Máximo		409.86
Mínimo		386.40
Promedio		400.89

Tabla 36. Espesor de la Capa 4 del Cojinete 3.

El espesor de la Capa 4 presenta, al igual que en el caso del Cojinete 2, un nivel de varianza significativo, con valores que van desde 386.40 micras hasta 409.87. Además, el espesor promedio están por debajo de lo medido para el Cojinete 1, presentando 400.89 micras en comparación con 443.68 micras.

3.2.2.3.2 Microestructura del acero:

La Figura 81 presenta la microestructura del Cojinete 3. Es la misma microestructura que la del Cojinete 1 y Cojinete 2, una matriz ferrítica de bajo contenido de carbono.

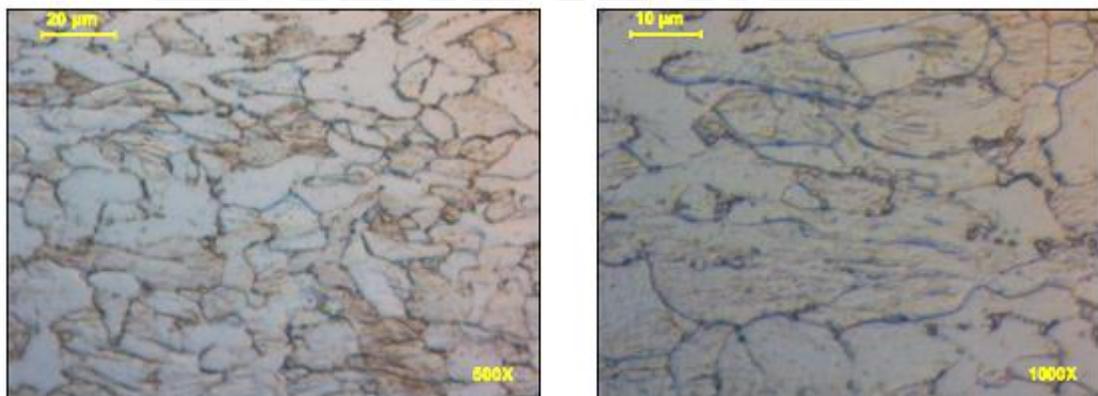


Figura 81. Microestructura de la Capa 5 del Cojinete 3.

3.2.2.4 Microscopía electrónica de barrido:

El Cojinete 3 presenta erosión por cavitación severa. Este mecanismo de desgaste es el que genera la mayor profundidad de penetración en las capas del cojinete. Por esta razón, se realizó el ensayo en la picadura para determinar el material y la morfología del desgaste. El análisis de elementos se realizó en 3 zonas: Zona 1, Zona 2 y Zona 3. El orden corresponde a la progresión del daño en el cojinete. A continuación se muestra la Figura 82 que corresponde a la superficie de erosión por cavitación del Cojinete 3:

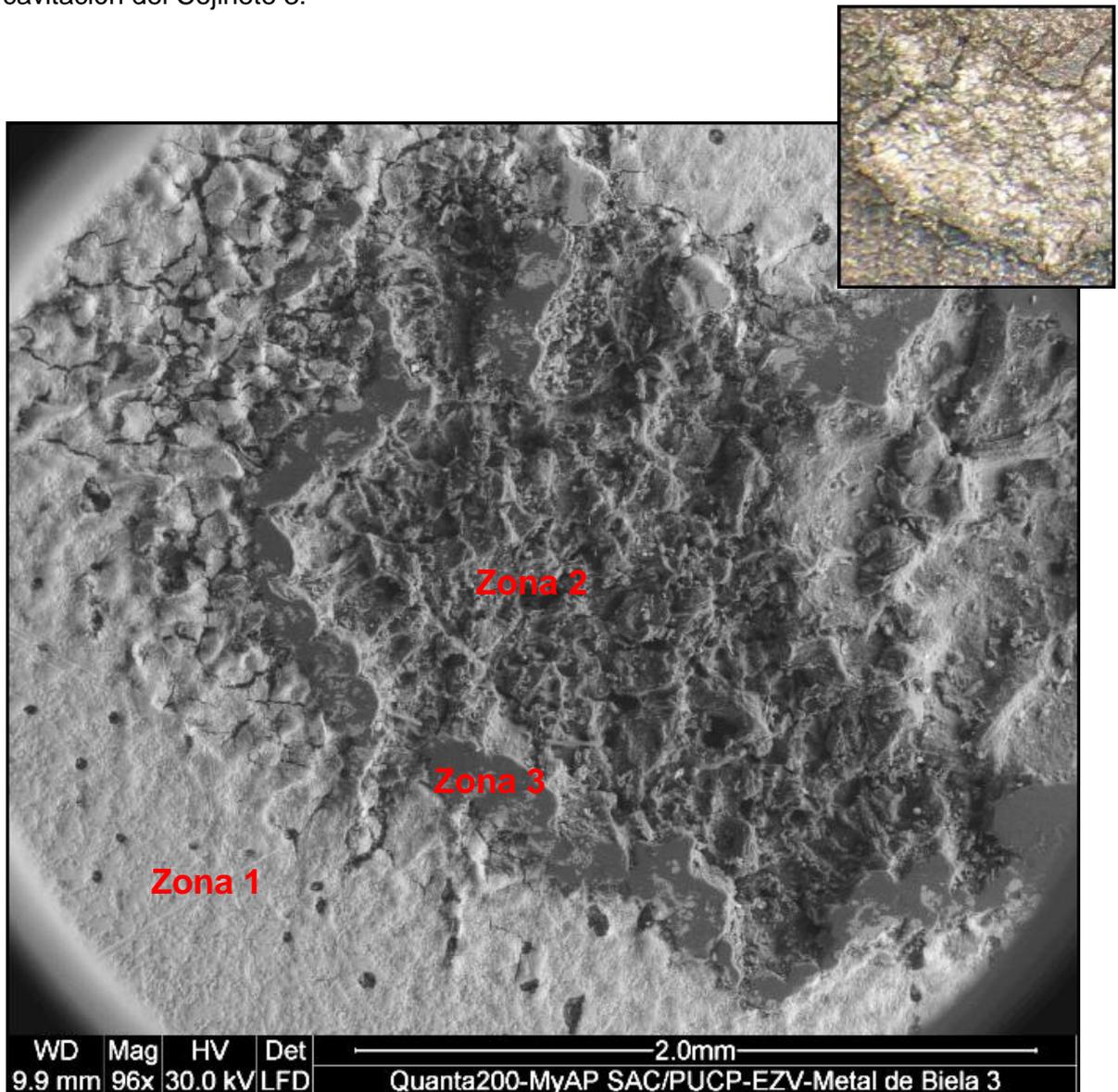
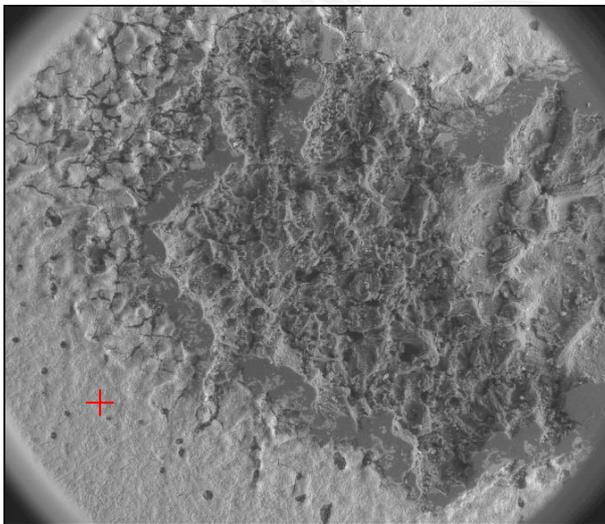


Figura 82. Superficie de erosión por cavitación severa en el Cojinete 3.

3.2.2.4.1 Análisis de la 'Zona 1' de erosión por cavitación:

El primer análisis se realizó en la zona de color más claro donde la textura del cojinete es grumosa y existe erosión por cavitación leve. Se observan muchos pequeños puntos grises y negros en esta capa los cuales se analizarán posteriormente.

Los elementos encontrados en esta zona son principalmente el Plomo (Pb: 67.75%) y el Estaño (Sn: 5.55%), por lo que no cabe duda que se trata de la Capa 2. Hay un pequeño contenido de Aluminio, Cobre y Hierro. El contenido de Cobre (Cu: 1.09%) se encuentra en las zonas de cavitación, esto ratifica que los compuestos Cobre-Estaño que se pueden formar fragilizan el material. La Figura 83 muestra el punto analizado y la Figura 84 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
C	19.54
O	4.79
Al	0.76
Sn	5.55
Fe	0.51
Cu	1.09
Pb	67.75

Tabla 37. Elementos de la Zona 1 del Cojinete 3.

Figura 83. Análisis de la Zona 1 del Cojinete 3.

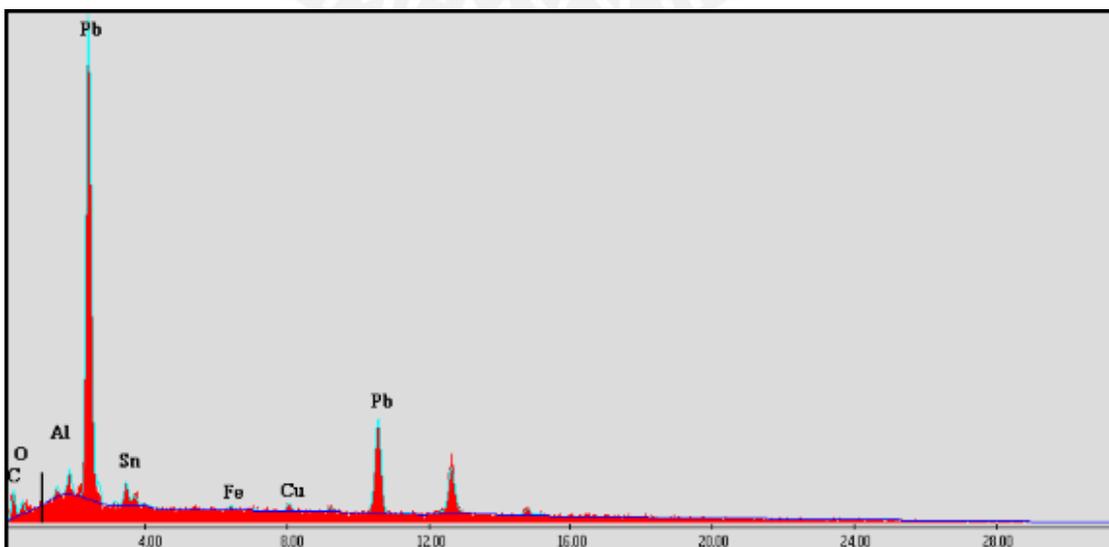


Figura 84. Gráfica de elementos en la Zona 1 según niveles de energía en el Cojinete 3.

3.2.2.4.2 Análisis de los 'Puntos negros' de la 'Zona 1':

Como se mencionó anteriormente, se encontraron muchos puntos negros en la zona que corresponde a la Capa 2 de Plomo-Estaño. En la Figura 85 se observa que luego esos puntos llegan a unirse y formar grietas y finalmente se remueve por completo la Capa 2 y 3 prácticamente en simultáneo y se deja al descubierto la Capa 4 de Aluminio, que es la zona gris. Se ha realizado una secuencia lógica de la progresión del daño en el cojinete.

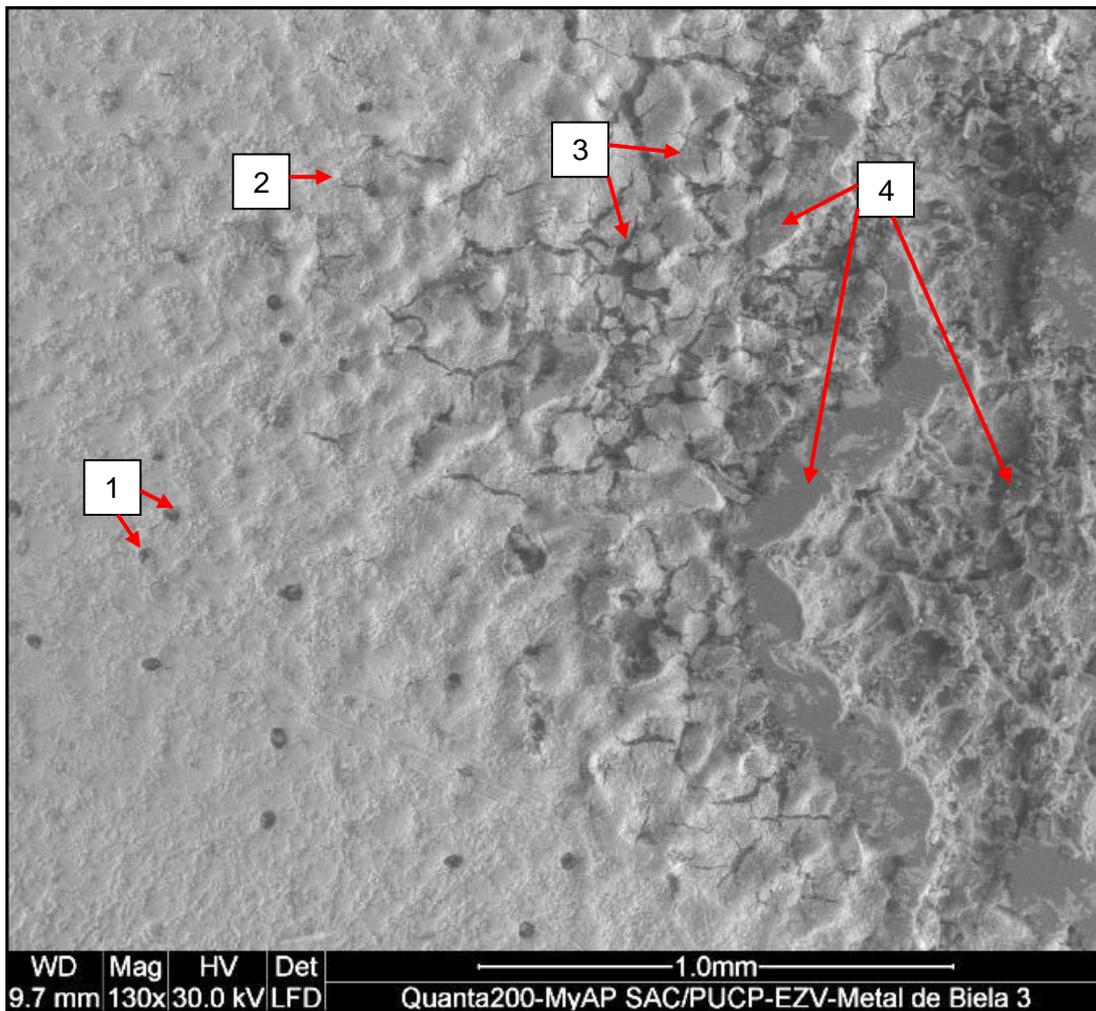
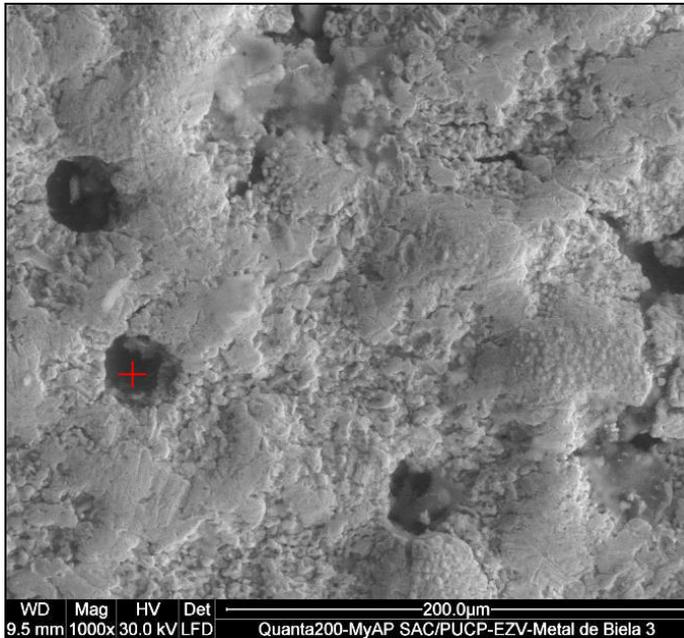


Figura 85. Análisis de 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3.

Se realizó a mayores aumentos el análisis puntual del agujero y se obtuvo un contenido alto de Aluminio (Al: 48.81%). Incluso la penetración llega a la Capa 5, pues se determinó un contenido de Hierro (Fe: 8.13%). La Figura 86 muestra el punto analizado y la Figura 87 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	13.37
Al	48.81
Si	2.82
Sn	3.99
Fe	8.13
Cu	3.80
Zn	4.09
Pb	14.99

Tabla 38. Elementos de los 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3.

Figura 86. Análisis a 1000 aumentos de 'Puntos negros' en la Zona 1 del Cojinete 3.

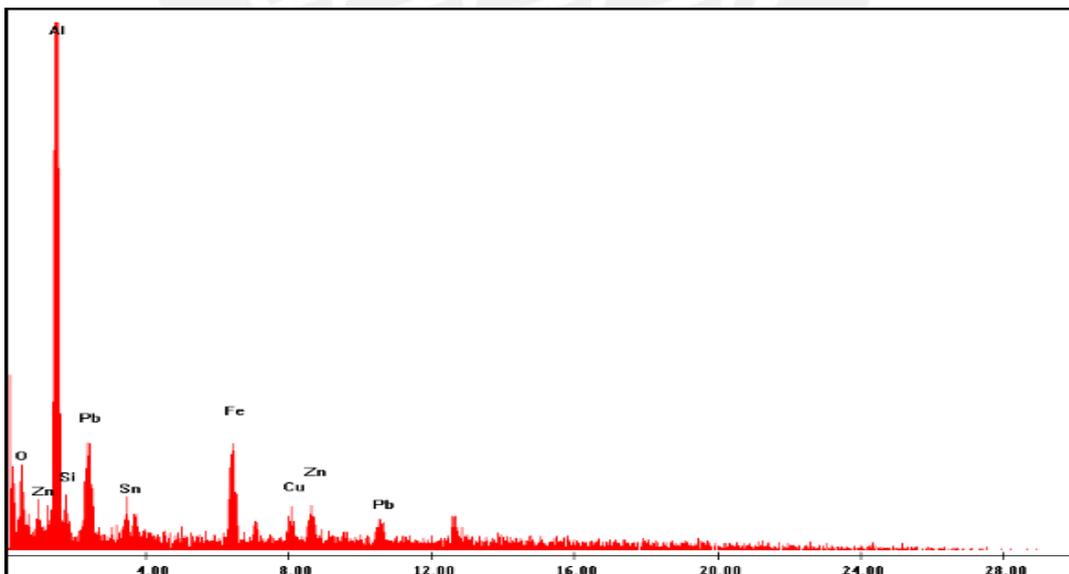
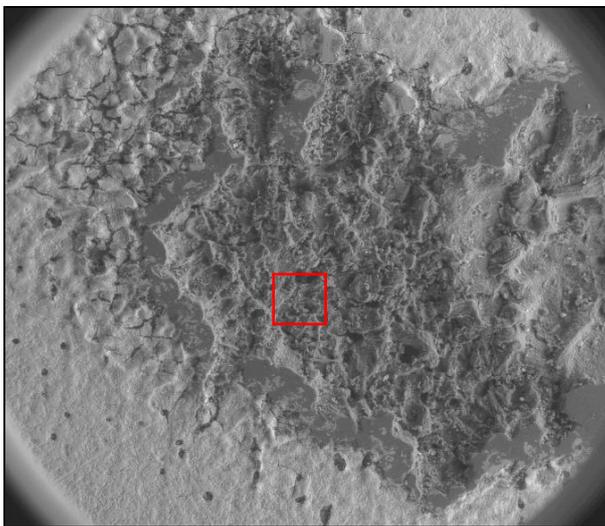


Figura 87. Gráfica de elementos en los 'Puntos negros' según niveles de energía en el Cojinete 3.

3.2.2.4.3 Análisis de la 'Zona 2' de erosión por cavitación:

Se analizó la zona que corresponde a una morfología de transición entre la zona clara de la Capa 2, Plomo- Estaño, y la Capa 4 de Aluminio. Resultados evidencian una zona de transición con porcentajes de Aluminio (Al: 36.68%), Plomo (Pb: 33.68%), Estaño (Sn: 8.15%) y Cobre (Cu: 5.10%). Además, un contenido de Hierro que indica que en algunas zonas se penetra hasta la última capa (Fe: 3.52%). La Figura 88 muestra el punto analizado y la Figura 89 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	9.62
Al	36.68
Si	1.92
Sn	8.15
Fe	3.52
Cu	5.10
Zn	1.32
Pb	33.68

Tabla 39. Elementos de la Zona 2 del Cojinete 3.

Figura 88. Análisis de la Zona 2 del Cojinete 3.

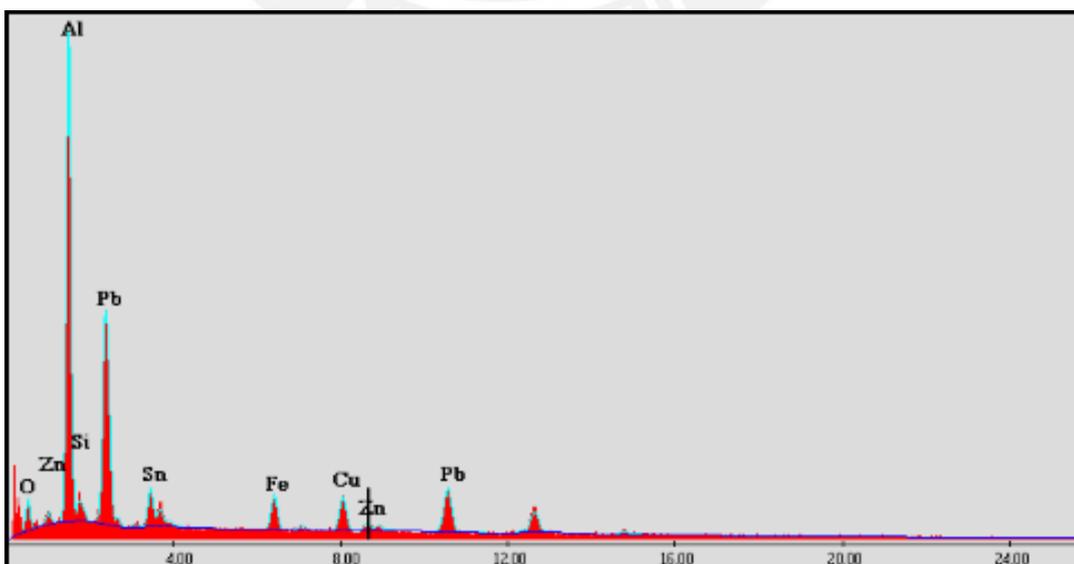
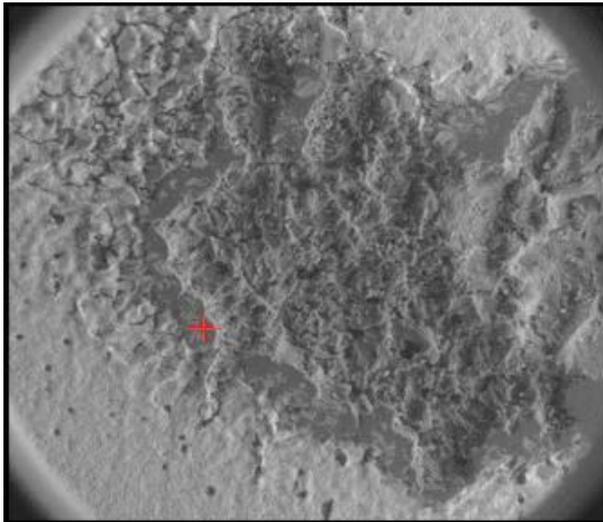


Figura 89. Gráfica de elementos en la Zona 2 según niveles de energía en el Cojinete 3.

3.2.2.4.4 Análisis de la 'Zona 3' de erosión por cavitación:

Se realizó un análisis puntual de la zona más opaca de color gris. Esta zona corresponde a la Capa 4, de Aluminio con un contenido de 81.44%. El porcentaje de Plomo y Estaño es muy bajo lo que indica la remoción prácticamente total de la Capa 2. La Figura 90 muestra el punto analizado y la Figura 91 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	5.30
Al	81.44
Si	9.76
Sn	1.60
Fe	1.09
Cu	1.99
Zn	3.27
Pb	4.37

Tabla 40. Elementos de la Zona 3 del Cojinete 3.

Figura 90. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 3.

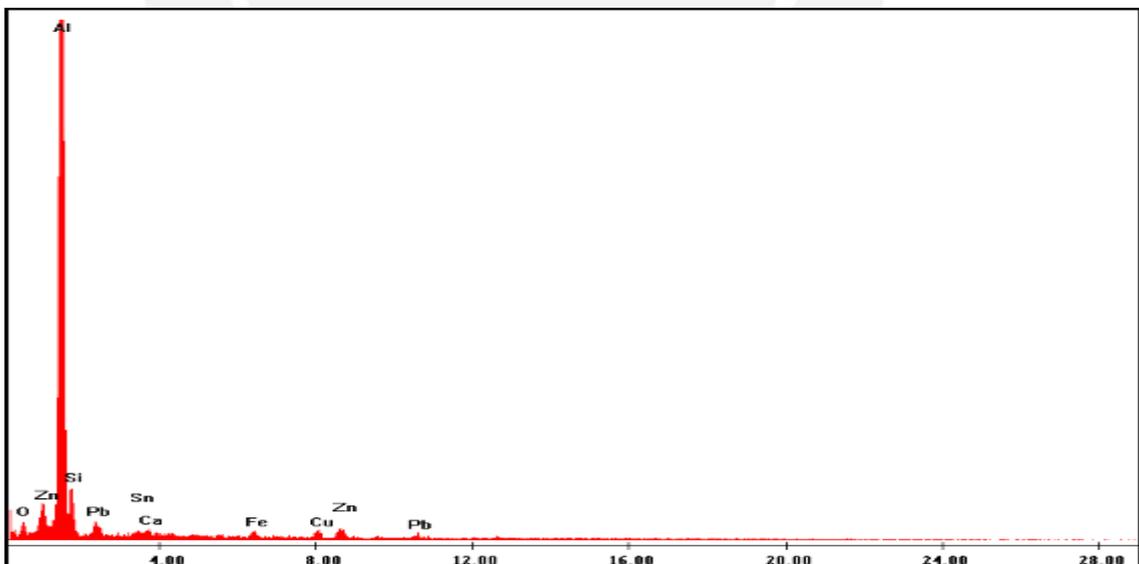


Figura 91. Gráfica de elementos en la Zona 3 según niveles de energía en el Cojinete 3.

3.2.2.4.5 Análisis de la 'Zona 3' a mayores aumentos:

En la Figura 92 se muestra el daño ocasionado por la erosión por cavitación, la morfología es muy parecida a la observada en el Cojinete 2 en la Figura 69. Se realizó un análisis de los elementos que componen una 'Esfera' brillante que se encontró en esta zona.

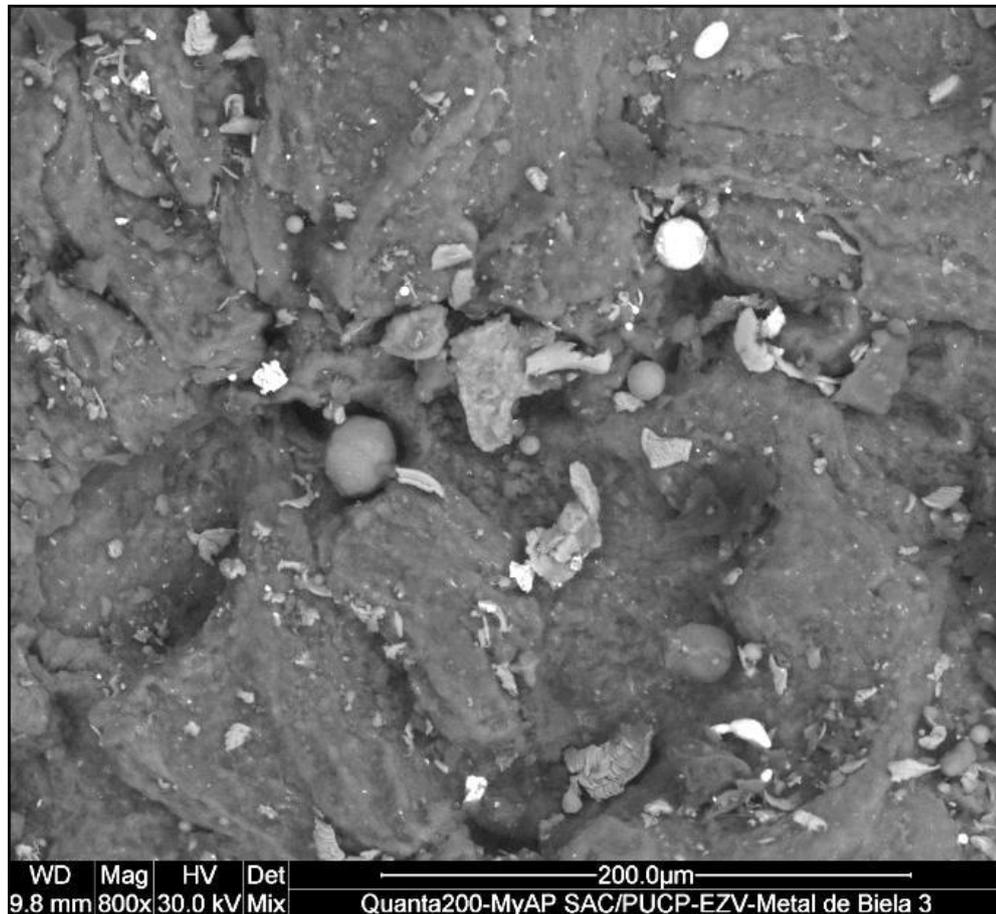
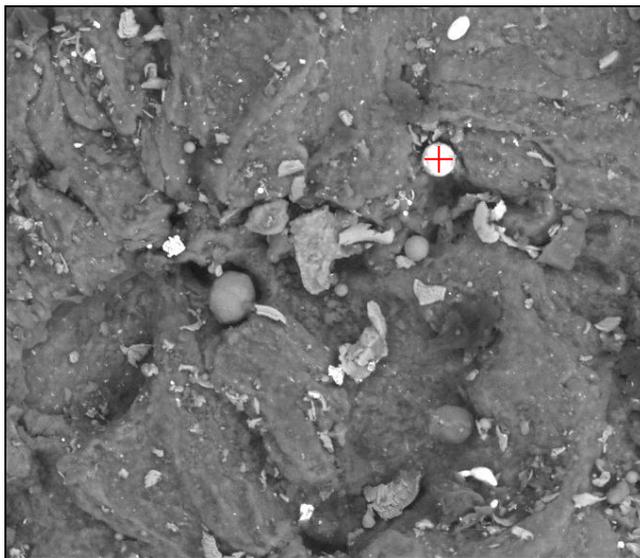


Figura 92. Análisis de la Zona 3 del Cojinete 3 a 800 aumentos.

Con la Figura 69 del Cojinete 2 y la Figura 92 del Cojinete 3 queda caracterizado el daño de erosión por cavitación a 800 aumentos bajo la técnica de microscopía electrónica de barrido para cojinetes de biela de motores diesel.

3.2.2.4.6 Análisis puntual en una 'Esfera' de la 'Zona 3':

El contenido de Hierro en las esferas brillantes es de 46.10% en peso. Es importante notar la forma que se obtiene en este tipo de mecanismo de desgaste, zonas daños que se asemejan a esferas casi perfectas. La Figura 93 muestra el punto analizado y la Figura 94 muestra los niveles de energía de los elementos en keV.



Element	Wt%
O	25.74
Al	25.27
Si	1.42
Fe	46.10
Zn	1.13

Tabla 41. Elementos de una 'Esfera' de la Zona 3 del Cojinete 3.

Figura 93. Análisis de una 'Esfera' de la Zona 3 del Cojinete 3.

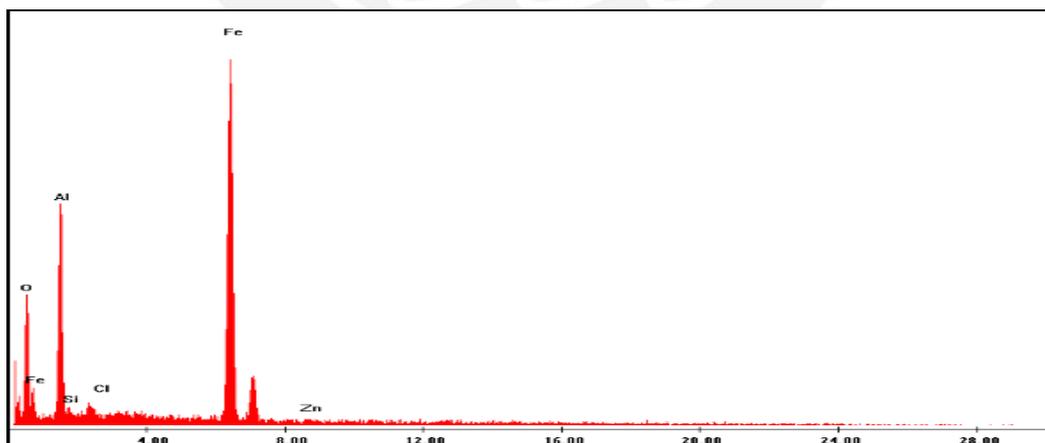


Figura 94. Gráfica de elementos de una 'Esfera' de la Zona 3 según niveles de energía en el Cojinete 3.

3.2.2.5 Ensayo de microdureza:

Cojinete 3		Carga	200 gf
Capa 4 (Aluminio)			
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)
1)	68	74.10	73.40
2)	72	69.40	74.30
3)	67	74.10	75.20
4)	68	72.00	75.70
5)	64	74.80	77.10
Promedio	68	72.88	75.14

Tabla 42. Dureza de la Capa 4 del Cojinete 3.

Cojinete 3		Carga	500 gf
Capa 5 (Acero)			
	Dureza (Vickers)	Dx (micras)	Dy (micras)
1)	214	65.5	66.2
2)	205	64.6	69.9
3)	215	64.6	66.9
4)	214	64.8	66.9
5)	218	64.4	66.2
Promedio	213	64.78	67.22

Tabla 43. Dureza de la Capa 5 del Cojinete 3.

La dureza promedio de la Capa 4 es de 68 HV y la de la Capa 5 es de 213 HV. Estos valores son similares a los valores de dureza de las capas del Cojinete 1. La Tabla 44 muestra las equivalencias de dureza Rockwell, dureza Brinell y una aproximación del valor de resistencia a la tracción para el caso del acero.

Dureza Vickers (HV)	Dureza Brinell (HB)	Dureza Rockwell		Resistencia a la tracción N/mm ²
		HRB	HRC	
68	-	-	-	-
213	213	95	-	682

Tabla 44. Equivalencias de dureza de la Capa 4 y la Capa 5 del Cojinete 3.

CAPITULO 4.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Desde el punto de vista del “Material”, señalado en el diagrama causa-raíz de falla de los cojinetes (Diagrama 1), y luego de haber analizado los mecanismos de desgaste, se concluye que:

1. Mediante el ensayo de metalografía se determinó que los valores de los espesores de capa de los Cojinetes 2 y 3 presentan mucha variación y promedios fuera de los rangos recomendados. Esto afecta a las propiedades de las capas y genera concentradores de esfuerzos, lo cual debilita al material y propicia el daño ocasionado en los cojinetes.
2. En el ensayo de microscopía electrónica de barrido que se realizó al Cojinete 1 se pudo apreciar que la Capa 3, tiene un contenido de Cobre menor a lo recomendado (Cu: 18.64%) y que en la Capa 2 existen compuestos que se forman entre el Estaño y el Cobre. En la literatura investigada también se mencionan este tipo de compuestos y se señala que fragilizan el material de los cojinetes.
3. En las zonas donde se inicia el daño de erosión por cavitación de los Cojinetes 2 y 3 se identificó un contenido de Estaño y de Cobre que probablemente es de los compuestos frágiles mencionados en el punto 2.
4. El mecanismo de desgaste más agresivo es la erosión por cavitación que penetra todas las capas hasta llegar a la Capa 5, de acero. Lo recomendable es identificar la causa por la que se produce este mecanismo de desgaste. En la literatura se mencionan muchas de ellas relacionadas al lubricante, como por ejemplo: Viscosidad del lubricante, presión de aceite, funcionamiento del sistema de lubricación. Una buena práctica es realizar mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite usado con ensayos de laboratorio.

Finalmente, en base al trabajo realizado se recomienda lo siguiente:

1. Informar al proveedor de equipos sobre los datos obtenidos del material mediante ensayos de laboratorio. Las diferencias entre los espesores de capa medidos y los recomendados por el fabricante son una evidencia de una manufactura inadecuada. Además, la formación de compuestos entre el Cobre y el Estaño denota una inadecuada selección de materiales para las capas respectivas, que fragilizan el material de los cojinetes y aumenta la probabilidad de falla de los mismos.
2. Realizar un seguimiento constante a los niveles de presión de aceite de los camiones, ya que cuando se dan picos negativos esto puede significar que se está produciendo el mecanismo erosión por cavitación. Además, con una menor presión de aceite en el motor se tiene una menor cantidad de lubricante, por lo tanto una menor protección contra el desgaste. En la industria existen programas para el monitoreo de los niveles de presión.
3. Considerar la opción de utilizar un aceite sintético para los motores diesel, ya que actualmente se usa un aceite mineral. El aceite sintético brinda una mayor protección contra el desgaste y puede disminuir los efectos del mecanismo de erosión por cavitación.

CAPITULO 5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] MARINE POWER LTD.

http://www.marinepower.co.uk/catalog/index.php?manufacturers_id=1&sort=3a&filter_id=91

[2] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.10

[3] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.12

[4] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.14

[5] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.17

[6] SAE INTERNATIONAL. *Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis*, 1999. p.2

[7] SAE INTERNATIONAL. *Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis*, 1999. p.2

[8] SAE INTERNATIONAL. *Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis*, 1999. p.2

[9] SAE INTERNATIONAL. *Million Mile Bearings: Lessons From Diesel Engine Bearing Failure Analysis*, 1999. p.2

[10] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.81

[11] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.84

[12] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.91

[13] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.92

- [14] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.93
- [15] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.95
- [16] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.111
- [17] CATERPILLAR INC. *Applied Failure Analysis: Engine Bearings*, SESV8001, 2000. p.115
- [18] Tabla de estadísticas de falla de cojinetes elaborada por los usuarios de la mina.
- [19] ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys
- [20] ASTM E415-08. Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel.
- [21] ASTM E384-11e1. Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials
- [22] ASM Metals Handbook. Atlas of microstructures of industrial alloys. 8th Edition Vol.7. p.4
- [23] ASM Metals Handbook. Atlas of microstructures of industrial alloys. 8th Edition Vol.7. p.6
- [24] ASM Metals Handbook. Atlas of microstructures of industrial alloys. 8th Edition Vol.7. p.231