



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO DE DESGASTE EN PIEZAS DE ACERO 17-4PH
FABRICADAS POR SLM

WEAR STUDY ON 17-4PH STEEL PIECES
MANUFACTURED BY SLM

Autor: Yanira Vidal Álvarez

Tutores: María Ángeles Castro Sastre

Ana Isabel Fernández Abia

(Julio, 2023)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN
INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo de Fin de Grado

–ALUMNO: Yanira Vidal Álvarez

TUTOR: María Ángeles Castro Sastre, Ana Isabel Fernández Abia

TÍTULO: Estudio de desgaste en piezas de acero 17-4PH fabricadas por SLM

CONVOCATORIA: Junio, 2023

RESUMEN:

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de desgaste de piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM, un método de fabricación aditiva.

En primer lugar, se realiza una revisión teórica sobre las propiedades del acero 17-4PH, el proceso de fabricación SLM, los parámetros que intervienen en él, los tipos de desgaste más comunes, y los ensayos de desgaste lineal y circular con sus respectivas normas.

También se han tenido en cuenta artículos previos que analizan cómo afecta la tecnología SLM a piezas de acero 17-4PH, así como los mecanismos de desgaste presentes en los aceros martensíticos, y la comparación del comportamiento tribológico entre piezas fabricadas con métodos tradicionales y por fabricación aditiva.

Por último, se ha llevado a cabo un experimento práctico en los laboratorios de la EIIIA de la Ule, donde se fabrican muestras cúbicas del acero estudiado. Estas muestras son sometidas a ensayos de desgaste en la Facultad de Ingenierías Industriales de la Uva. Posteriormente, se analizan las huellas producidas en cada pieza, así como la dureza o la pérdida de masa de cada una de ellas.

Palabras clave: Acero inoxidable, SLM, fabricación aditiva, desgaste, ensayo, dureza, coeficiente de rozamiento, pin-on-disc, tribología, tratamiento térmico, SEM, microscopio electrónico.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ACERO INOXIDABLE 17-4PH.....	10
3. TECNOLOGÍA SLM (SELECTIVE LASER MELTING).....	12
3.1. INTRODUCCIÓN.....	12
3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	12
3.3. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN.....	14
4. DESGASTE.....	16
4.1. TIPOS DE DESGASTE.....	17
4.2. TRIBOLOGÍA Y DESGASTE.....	24
4.3. ENSAYOS DE DESGASTE Y SUS NORMAS.....	24
4.3.1. ENSAYO DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO LINEAL ALTERNATIVO SOBRE BOLA. 25	
4.3.2. ENSAYO DE DESGASTE CON APARATO PIN-ON-DISK.....	29
5. TECNOLOGÍA SLM EN PIEZAS DE ACERO 17-4PH.....	33
6. EL DESGASTE EN ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.....	38
6.1. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL ACERO INOXIDABLE 17-4PH FABRICADO MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES DE FABRICACIÓN Y FABRICACIÓN ADITIVA BASADA EN LÁSER.....	40
6.1.1. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	41
6.1.1.1. MATERIALES Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS.....	41
6.1.1.2. PRUEBAS DE MICRODUREZA.....	43
6.1.1.3. PRUEBAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE.....	43
6.1.1.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	45
7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	50
7.1. INTRODUCCIÓN.....	50
7.2. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS.....	50
7.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	52
7.4. MEDICIÓN DE MICRODUREZA Y MACRODUREZA.....	57
7.5. ENSAYOS DE DESGASTE.....	60
7.5.1. PÉRDIDA DE MASA.....	62
7.5.2. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO.....	63
7.5.3. PENETRACIÓN.....	63
7.6. ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD.....	64
7.7. ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.....	65

8. RESULTADOS.....	68
8.1. DUREZA.....	68
8.1.1. MICRODUREZA.....	68
8.1.2. MACRODUREZA.....	69
8.2. ENSAYOS DE DESGASTE.....	72
8.2.1. PÉRDIDA DE MASA.....	72
8.2.2. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO.....	73
8.2.3. PENETRACIÓN.....	75
8.3. RUGOSIDAD.....	76
8.4. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS CON EL SEM.....	82
9. CONCLUSIONES.....	112
10. BIBLIOGRAFÍA.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 3.1. Esquema de una máquina SLM y sus partes. [3].....	13
Figura 3.2. Esquema del proceso de fabricación paso a paso de una máquina de tecnología SLM. [5]	14
Figura 3.3. Esquema representativo del proceso de fabricación por tecnología SLM. [6]	14
Figura 3.4. Tipos de estrategias de escaneo. [4].....	16
Figura 4.1. Defectos que puede causar el desgaste en una superficie. [8].....	17
Figura 4.2. Defecto causado por el desgaste abrasivo. [7]	18
Figura 4.3. Defecto causado por el desgaste adhesivo. [7], [11]	19
Figura 4.4. Progreso del desgaste de las superficies. [11]	20
Figura 4.5. Diferentes tipos de partículas de desgaste adhesivo. [11]	21
Figura 4.6. Defecto causado por el desgaste por erosión. [7]	22
Figura 4.7. Defecto causado por el desgaste por fatiga. [7]	22
Figura 4.8. Defectos causados por el desgaste de cavitación. [16].....	23
Figura 4.9. Defecto causado por el desgaste corrosivo. [17]	24
Figura 4.10. Esquema de la máquina de ensayo de desgaste por deslizamiento lineal alternativo sobre bola y sus partes. [20]	25
Figura 4.11. Posibles situaciones para la diferente resistencia al desgaste de las probetas esféricas y planas. [20]	27
Figura 4.12. Dibujo esquemático de un ensayo de desgaste pin-on-disc. [21]	30
Figura 5.1. Diferentes estrategias de escaneo usadas en SLM. (a) Escaneo lineal. (b) Escaneo concéntrico. (c) Escaneo hexagonal. [23].....	35
Figura 5.2. Rugosidad superficial de las muestras con diferentes distancias de desenfoque. (A) distancia de desenfoque de 6mm. (B) Distancia de desenfoque de 1mm. (C) Distancia de desenfoque de -6mm. (D) Distancia de desenfoque de -5mm. (E) Distancia de desenfoque de -4mm. (F) Distancia de desenfoque de -3mm. (G) Distancia de desenfoque de -2mm. (H) Distancia de desenfoque de -1mm. [24].....	37
Figura 5.3. Microestructuras de las muestras con diferentes distancias de desenfoque. (A) 6mm. (B) 1mm. (C) -6mm. (D) -5mm. (E) -4mm. (F) -3mm. (G) -2mm. (H) -1mm. [24]	38
Figura 6.1. Mecanismos de desgaste de los aceros inoxidables martensíticos durante el roce en contacto seco. [25].....	39
Figura 6.2. Formación de la ranura abrasiva. (a) y (b) En herramientas con austenita retenida en su microestructura. (c) y (d) Con una microestructura formada por partículas de carburo dispersas en una matriz martensítica. [25].....	40
Figura 6.3. Muestra resultante de disco de acero inoxidable 17-4PH. [26].....	42
Figura 6.4. Curvas de tensión de tracción para los materiales considerados. [26].....	43
Figura 6.5. (a) Esquema del ensayo de bola sobre disco. (b) Montaje del ensayo realizado. [26] ..	44
Figura 6.6. Perfil de desgaste típico del perfilómetro. [26]	44
Figura 6.7. Índices de desgaste obtenidos en los diferentes ensayos. [26]	45
Figura 6.8. Tendencia del coeficiente de rozamiento a lo largo de tiempo. (a) Muestras fabricadas por métodos aditivos. (b) Muestras fabricadas por métodos convencionales. [26]	47
Figura 6.9. Valor de CoF para LB-PBF y CM 17-4PH bajo diversas cargas aplicadas y condiciones de fricción. [26]	48
Figura 6.10. Imágenes ópticas de superficies desgastadas de especímenes de acero inoxidable 17-4PH en diversas condiciones: (a) LB-PBF en seco 10 N, (b) LB-PBF en seco 30 N, (c) LB-PBF lubricado 30 N, (d) CM seco 10 N, (e) CM seco 30 N, (f) CM lubricado 30 N. [26]	48

Figura 6.11. Imágenes SEM de superficies desgastadas de probetas LB-PBF y CM de acero inoxidable 17-4PH en diversas condiciones: (a) LB-PBF en seco 10 N, (b) LB-PBF en seco 30 N, (c) LB-PBF lubricado 30 N, (d) CM en seco 10 N, (e) CM en seco 30 N, y (f) CM lubricado 30 N. [26]..	49
Figura 7.1. Fotografía de la máquina de fabricación SLM de la Escuela de Ingenierías (Edificio MIC). [Imagen de elaboración propia].....	51
Figura 7.2. Fotografía de la placa con los ocho cubos de acero 17-4PH fabricados por SLM. [Imagen de elaboración propia]	51
Figura 7.3. Fotografía de la máquina de corte por hilo. [Imagen de elaboración propia]	52
Figura 7.4. Fotografía de la placa colocada en la máquina de corte por hilo. [Imagen de elaboración propia].....	53
Figura 7.5. Fotografía del horno en el que se llevaron a cabo los tratamientos térmicos. [Imagen de elaboración propia]	54
Figura 7.6. Fotografía de la máquina cortadora metalográfica. [Imagen de elaboración propia]..	55
Figura 7.7. Fotografía de la muestra de acero encapsulada en resina. [Imagen de elaboración propia].....	56
Figura 7.8. Fotografía de la pulidora metalográfica. [Imagen de elaboración propia]	56
Figura 7.9. Parámetros de la dureza Vickers. [UNE-EN ISO 6507-1]	58
Figura 7.10. Fotografía del microdurómetro utilizado en el laboratorio. [Imagen de elaboración propia].....	58
Figura 7.11. Fotografía de la punta de diamante incidiendo sobre la muestra. [Imagen de elaboración propia]	59
Figura 7.12. Fotografía de la huella producida por la punta de diamante. [Imagen de elaboración propia].....	59
Figura 7.13. Fotografía del macrodurómetro utilizado. [Imagen de elaboración propia]	60
Figura 7.14. Fotografía del tribómetro para realizar los ensayos de desgaste circular. [Imagen de elaboración propia].....	61
Figura 7.15. Fotografía del ensayo de desgaste circular en marcha. [Imagen de elaboración propia]	62
Figura 7.16. Fotografía de la báscula usada para pesar las muestras. [Imagen de elaboración propia].....	63
Figura 7.17. Fotografía del perfilómetro-rugosímetro utilizado para el análisis. [Imagen de elaboración propia].....	64
Figura 7.18. Condiciones de medida del rugosímetro-perfilómetro. [Imagen de elaboración propia]	65
Figura 7.19. Fotografía del SEM utilizado para el estudio de las muestras. [Imagen de elaboración propia].....	66
Figura 7.20. Fotografía del interior de la cámara del microscopio y de la muestra con la cinta de carbono. [Imagen de elaboración propia].....	67
Figura 7.21. Esquema del funcionamiento del SEM. [33]	67
Figura 8.1. Gráfico de comparación de los valores medios de la microdureza y macrodureza de las muestras. [Elaboración propia].....	71
Figura 8.2. Gráfico de comparación del valor promedio de la pérdida de masa de las muestras. [Elaboración propia].....	72
Figura 8.3. Gráfico de comparación del valor promedio de los coeficientes de rozamiento. [Elaboración propia].....	74
Figura 8.4. Gráfico de comparación de la penetración máxima obtenida en cada ensayo. [Elaboración propia].....	75

Figura 8.5. Perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia].....	77
Figura 8.6. Muestra con huella anormalmente grande debido a fallos en el ensayo. [Imagen de elaboración propia].....	78
Figura 8.7. Perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	79
Figura 8.8. Perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico a favor de capa. [Imagen de elaboración propia].....	80
Figura 8.9. Perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	81
Figura 8.10. Imágenes del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x60 y x70). [Imagen de elaboración propia].....	83
Figura 8.11. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x250). [Imagen de elaboración propia].....	84
Figura 8.12. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x330). [Imagen de elaboración propia].....	84
Figura 8.13. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	85
Figura 8.14. Espectro 4 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	85
Figura 8.15. Espectro 5 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	86
Figura 8.16. Distribución de los componentes en la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	86
Figura 8.17. Distribución de los componentes en la superficie de forma individual de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	87
Figura 8.18. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a contra capa (x70). [Imagen de elaboración propia].....	89
Figura 8.19. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a contra capa (x250 y x330). [Imagen de elaboración propia].....	90
Figura 8.20. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	91
Figura 8.21. Espectro 20 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	92
Figura 8.22. Espectro 21 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	92
Figura 8.23. Espectro 22 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	93
Figura 8.24. Distribución del oxígeno en la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia].....	94
Figura 8.25. Comparación de la distribución del oxígeno en las muestras a contra capa. (1) Sin TT. (2) Con TT. [Imagen de elaboración propia].....	94
Figura 8.26. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x70 y x250). [Imagen de elaboración propia].....	96
Figura 8.27. Imagen del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x330). [Imagen de elaboración propia].....	97

Figura 8.28. Imagen del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x1000). [Imagen de elaboración propia]	98
Figura 8.29. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	99
Figura 8.30. Espectros 32 y 33 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	100
Figura 8.31. Distribución de los componentes en la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	101
Figura 8.32. Distribución del aluminio en la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	101
Figura 8.33. Imágenes del SEM de la muestra sin TT y a favor de capa (x70, x250 y x330). [Imagen de elaboración propia]	103
Figura 8.34. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a favor de capa (x250). [Imagen de elaboración propia]	104
Figura 8.35. Espectro 39 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	105
Figura 8.36. Espectro 40 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	106
Figura 8.37. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a favor de capa (x330). [Imagen de elaboración propia]	107
Figura 8.38. Espectro 43 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	107
Figura 8.39. Espectro 44 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]	108
Figura 8.40. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a favor de capa (x1000). [Imagen de elaboración propia]	109
Figura 8.41. Comparación de los espectros generales de la superficie de las huellas (x70). (1) Muestra con TT a favor de capa. (2) Muestra sin TT a favor de capa. (3) Comparación de ambos. [Imagen de elaboración propia]	110
Figura 8.42. Comparación de la distribución de los componentes de todas las muestras analizadas. [Imagen de elaboración propia]	112

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. Propiedades del acero 17-4PH. [2]	11
Tabla 2.2. Procesamiento del acero 17-4PH. [2]	11
Tabla 2.3. Propiedades físicas del acero 17-4PH. [2]	11
Tabla 2.4. Denominaciones internacionales del acero 17-4PH. [1]	12
Tabla 3.1. Cómo afecta a las propiedades del material la variación de los parámetros de impresión. [4]	15
Tabla 5.1. Ventajas e inconvenientes de la utilización de SLM frente a técnicas tradicionales de fabricación. [22]	34
Tabla 6.1. Parámetros de proceso LB-PBF para el acero inoxidable 17-4PH proporcionados por la empresa fabricante. [26]	42
Tabla 7.1. Tratamientos térmicos aplicados.	55
Tabla 7.2. Parámetros de ejecución del ensayo	61
Tabla 8.1. Microdureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico y corte a favor de capa. [Elaboración propia]	68
Tabla 8.2. Microdureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico y corte perpendicular a la capa. [Elaboración propia]	68
Tabla 8.3. Microdureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico y corte a favor de capa. [Elaboración propia]	69
Tabla 8.4. Microdureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico y corte perpendicular la capa. [Elaboración propia]	69
Tabla 8.5. Macro dureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico. [Elaboración propia] ..	70
Tabla 8.6. Macro dureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico. [Elaboración propia] ..	70
Tabla 8.7. Valores promedio obtenidos de la pérdida de masa de las muestras. [Elaboración propia]	72
Tabla 8.8. Valores promedio obtenidos del coeficiente de rozamiento (CoF) en los ensayos. [Elaboración propia]	74
Tabla 8.9. Valores promedio de la penetración máxima obtenida en los ensayos. [Elaboración propia]	75
Tabla 8.10. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a favor de capa. [Elaboración propia]	77
Tabla 8.11. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a contra capa. [Elaboración propia]	79
Tabla 8.12. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a favor de capa. [Elaboración propia]	80
Tabla 8.13. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a contra capa. [Elaboración propia]	81

1. INTRODUCCIÓN.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se llevará a cabo un estudio de desgaste en piezas de acero inoxidable 17-4PH, las cuales han sido fabricadas por SLM (Selective Laser Melting).

En primer lugar, se seleccionará la geometría y la estrategia para la fabricación de las probetas. Una vez tomadas estas decisiones, se procederá a la fabricación de estas en el laboratorio de fabricación ubicado en el edificio MIC de la Universidad de León. Y como se ha dicho anteriormente, utilizando SLM, un método de fabricación aditiva.

Una vez fabricadas las probetas, se procederá a someterlas a ensayos de desgaste circular en las instalaciones de la facultad de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

Posteriormente, se realizará un análisis de las durezas de las piezas y se examinarán las probetas en el microscopio electrónico. Estos análisis permitirán examinar las huellas de desgaste generadas en las probetas, identificar posibles variaciones en sus propiedades y establecer conclusiones fundamentadas sobre su comportamiento frente al desgaste.

Por tanto, este estudio tiene como objetivo principal analizar el desgaste en piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas por SLM, considerando la estrategia de fabricación y geometría para la fabricación de las probetas, considerando sus propiedades y resistencia al desgaste.

2. ACERO INOXIDABLE 17-4PH.

El acero inoxidable 17-4PH, el cual ha sido el elegido para llevar a cabo este estudio, es caracterizado por sus buenas propiedades. Basándonos en ficha técnica [1] se detallan a continuación en las tablas 2.1., 2.2. y 2.3.

En rasgos generales, se trata de una aleación compuesta de cobre, precipitación de niobio, y acero inoxidable martensítico. Es material es endurecible por precipitación y destaca por su alta resistencia a la corrosión, al desgaste y su gran tenacidad. Además, posee un alto límite elástico y una resistencia a la compresión de hasta 1100-1300 MPa.

El uso del material en el rango de temperaturas bajas es totalmente posible. Especialmente la resistencia al impacto, la cual es excelente a temperaturas bajo cero. Su rendimiento es óptimo hasta aproximadamente 315°C. [2]

Maleabilidad	Bueno
Soldabilidad	Bueno
Propiedades mecánicas	Excelente
Resistencia a la corrosión	Bueno
Maquinabilidad	Malo a medio

Tabla 2.1. Propiedades del acero 17-4PH. [2]

Pulido	Posible
Conformación en frío	No posible
Procesamiento de mecanizado	Posible (depende de la dureza)
Recalcado en frío	No posible
Forja libre y de estampa	Posible

Tabla 2.2. Procesamiento del acero 17-4PH. [2]

Densidad (kg/cm³)	7,8
Resistencia eléctrica a 20°C (Ω mm² m)	0,71
Conductividad térmica a 20°C (W/ (m K))	16
Capacidad térmica específica a 20°C (J/ (kg K))	500
Magnetizabilidad	Disponible

Tabla 2.3. Propiedades físicas del acero 17-4PH. [2]

Este acero encuentra diversas aplicaciones en sectores como la construcción de plantas, industria química, industria de la madera, construcción naval, ingeniería mecánica, industria petrolera, tecnología médica, aeroespacial, industria agroalimentaria, generación de energía, construcción e industria del automóvil. Su versatilidad y resistencia lo hacen apto para ser utilizado en una amplia gama de industrias y aplicaciones.

Sus denominaciones internacionales son las reflejadas en la tabla 2.4.:

DIN EN 10088	17-4PH/ 1.4542/ 1.4548/ X5CrNiCuNb16-4/ X5CrNiCuNb17-4-4
AISI	AISI 630
ISO	15156-3
NACE	MR0103/ MR0175
AFNOR	Z7CNU15-05/ Z7CNU17-04
ASTM	A564 17-4PH/ A564M-13
JIS	SCS24/ SUS630
DIN 17440	1.4542/ 1.4548

Tabla 2.4. Denominaciones internacionales del acero 17-4PH. [1]

3. TECNOLOGÍA SLM (SELECTIVE LASER MELTING).

3.1. INTRODUCCIÓN.

Este tipo de fabricación utilizado, conocido como “Fusión Selectiva por Láser”, es una técnica dentro de los procesos aditivos en la que las piezas se crean mediante la aplicación de material capa por capa.

En nuestro caso, el material utilizado va a ser el acero inoxidable 17-4PH. Sin embargo, esta técnica también se puede llevar a cabo con otros metales, como el aluminio, acero, titanio, cromo-cobalto y algunos metales preciosos.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

En primer lugar, y según se explica en [3] y [4], se genera el modelo deseado en 3D por medio de herramientas software de diseño asistido por ordenador (CAD). A traes de este software, se establecen las capas que formarán el producto final. Estas capas se generan al dividir la pieza en láminas delgadas que se superponen una sobre otra. Cuanto más finas sean estas capas, mayor será la precisión del modelo resultante. En nuestro caso tendrán un grosor de 30 micrómetros en todas las piezas. Este proceso es conocido como rebanado (slicing).

El siguiente paso, se procede a la fabricación de la pieza utilizando un láser que incide sobre la superficie cubierta de polvo metálico. El calor del láser funde el polvo, permitiendo que se fusione con capas inferiores. El láser sigue diferentes trayectorias gracias al sistema de escaneo, el cual se compone de espejos y lentes.

El polvo de acero se va arrastrando con un rodillo en capas finas y uniformes sobre la superficie plana del émbolo de un pistón. Este pistón desciende una distancia equivalente al espesor de cada capa. El polvo se encuentra almacenado en una cámara contigua a la cámara de fabricación, y el pistón en dicha cámara se mueve en sentido ascendente la misma distancia. Otra opción sería depositar el polvo mediante una tolva, seguida de un desplazamiento del rodillo o una chuchilla para extender uniformemente el material sobre la superficie. En la figura 3.1. se muestra un esquema de la máquina de fabricación SLM y algunas de sus partes.

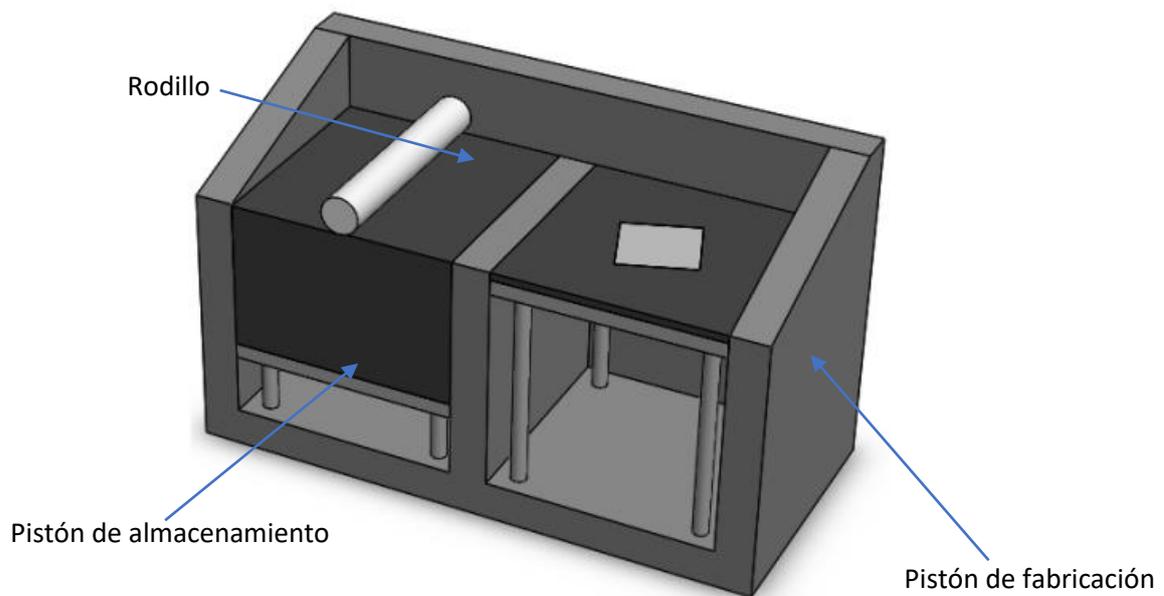


Figura 3.1. Esquema de una máquina SLM y sus partes. [3]

La cámara de fabricación se mantiene aislada herméticamente para garantizar una concentración de oxígeno mínima. De esta forma se evita que el metal fundido se oxide.

Al finalizarse la construcción, se separa la pieza de la placa y se retira el polvo sobrante que no se ha fundido. Después, si procede, se llevan a cabo los tratamientos de postproducción.

En las figuras 3.2. y 3.3. se puede ver de forma resumida y clara, el proceso de fabricación SLM.

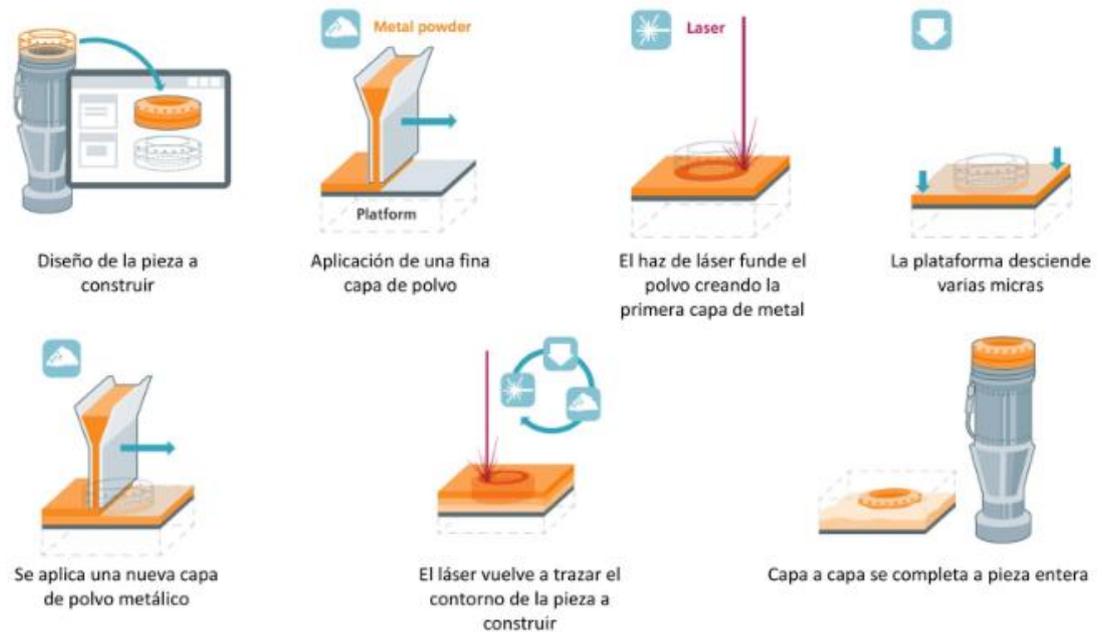


Figura 3.2. Esquema del proceso de fabricación paso a paso de una máquina de tecnología SLM. [5]

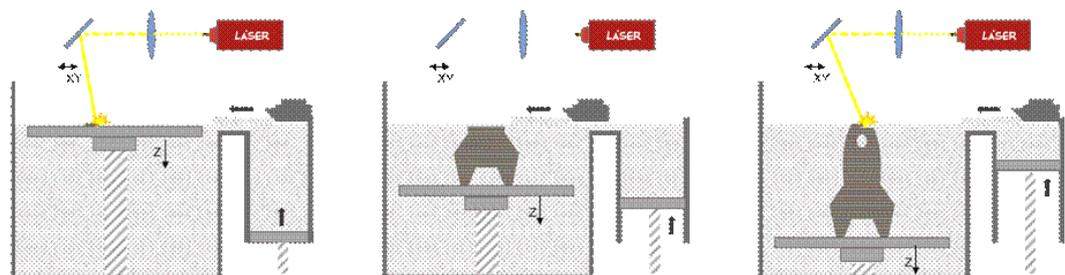


Figura 3.3. Esquema representativo del proceso de fabricación por tecnología SLM. [6]

3.3. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN.

Durante el proceso de fabricación de las piezas, se pueden modificar diversos parámetros, los cuales tendrán un impacto en las propiedades del objeto resultante. Entre ellos están la velocidad de escaneo (mm/s), la potencia del láser (W), la distancia entre pasadas paralelas del láser (mm) y el espesor de las capas (mm).

En la tabla 3.1. se indica cómo cada uno de los parámetros afecta a la densidad, resistencia a tracción y a compresión, dureza y porosidad de la pieza.

		Densidad	Resistencia Tracción	Resistencia Compresión	Dureza	Porosidad
Potencia (P)	Aumenta	↑	↑	↑	↑	↓
	Disminuye	↓	↓	↓	↓	↑
Velocidad escaneo (v)	Aumenta	↓	↓	↓	↓	↑
	Disminuye	↑	↑	↑	↑	↓
Distancia pasadas (h)	Aumenta	↓	↓	↓	↓	↑
	Disminuye	↑	↑	↑	↑	↓
Espesor capa (t)	Aumenta	↓	↓	↓	↓	↑
	Disminuye	↑	↑	↑	↑	↓

Tabla 3.1. Cómo afecta a las propiedades del material la variación de los parámetros de impresión. [4]

Es importante mencionar la adecuada superposición de las pasadas paralelas del láser en el proceso de fabricación. Si no se superponen correctamente, algunas áreas de la superficie de polvo pueden quedar sin fundir, lo que aumenta la porosidad de la pieza y afecta negativamente a sus propiedades.

Además, las estrategias de escaneo también influyen en el resultado final de la pieza, especialmente en su resistencia y en las tensiones residuales internas generadas. Estas tensiones surgen debido a las diferencias de temperatura que se generan entre las partes por las que está pasando el láser y las que ya están frías. Algunas de estas estrategias se muestran en la figura 3.4.

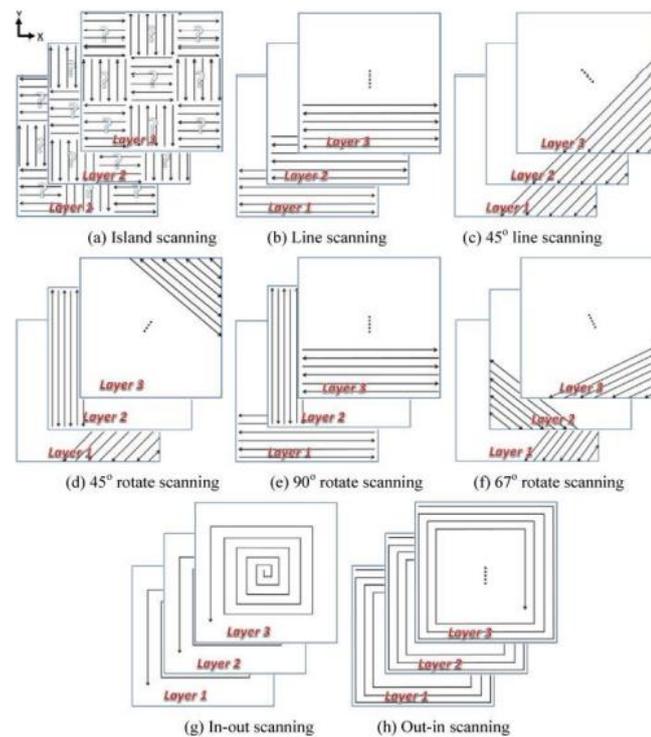


Figura 3.4. Tipos de estrategias de escaneo. [4]

4. DESGASTE.

El desgaste es el daño que se provoca en una superficie sólida, cuando entra en contacto con un medio sólido, líquido o gaseoso. Durante este contacto, se producen la remoción y pérdida irreversible de pequeñas partículas del material, lo que conlleva a una disminución en el volumen de la superficie afectada. [7] En la imagen 4.1. se muestran algunos ejemplos de los efectos que puede provocar el desgaste en una superficie.

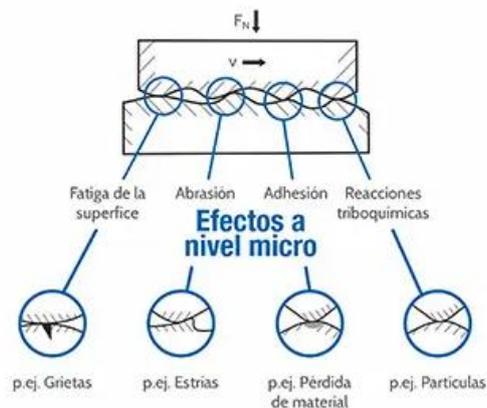


Figura 4.1. Defectos que puede causar el desgaste en una superficie. [8]

4.1. TIPOS DE DESGASTE.

Existen varios tipos de desgaste:

- **Abrasivo:** tiene lugar cuando una superficie dura con protuberancias se presiona contra otra más blanda, arrancando partículas de material. En este proceso, puede ocurrir que el material más duro se clave en la superficie más blanda, arrancando fragmentos de esta última y, por tanto, causando indentaciones o ranuras. También es posible que las irregularidades de la superficie blanda sean eliminadas o pulidas por el material más duro.

La abrasión es el tipo más común de desgaste, y puede llevar a la degradación o rotura de las piezas, repercutiendo así negativamente en costes. Es necesario identificar el tipo específico de abrasión que está teniendo lugar, para poder elegir el tratamiento o método de recuperación adecuado.

En primer lugar, existe la abrasión de dos cuerpos, que es la descrita anteriormente, donde no hay presencia de partículas contaminantes.

Por otro lado, la abrasión de tres cuerpos, que ocurre cuando una partícula contaminante, ya sea polvo o desgaste, entra en contacto entre las dos superficies. Si la partícula es de mayor tamaño que la densidad del lubricante líquido, se produce un rayado en la superficie, creando surcos similares a los causados por el lijado. Si las partículas son más finas, tiene lugar un pulido satinado en la superficie.

Para reducir el fenómeno de desgaste, se utiliza un revestimiento con características de resistencia superiores a las partículas que están generando dicho desgaste. Otra opción es emplear revestimientos

reforzados con una composición química mejorada o aplicar tratamientos térmicos para generar fases de mayor dureza. [9]

En el caso de que exista lubricación, las malas condiciones de esta y la contaminación de partículas en el fluido son las principales causas del desgaste abrasivo. Esto se debe a que las partículas que se generan actúan como nuevos cuerpos de desgaste abrasivo. Por lo tanto, es vital asegurar la limpieza del fluido durante su uso. Se recomienda el uso de sistemas de filtrado en sistemas de recirculación y vigilar la entrada de agentes externos que puedan arrastrar contaminación, como polvo del aire del ambiente. Es importante mantener una vigilancia constante durante las operaciones de mantenimiento para prevenir la entrada de contaminación externa. [10]

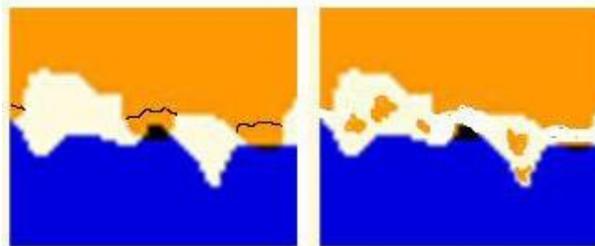


Figura 4.2. Defecto causado por el desgaste abrasivo. [7]

- **Adhesivo:** este tipo de desgaste se da entre materiales similares que se adhieren entre sí, transfiriendo moléculas que luego se arrancan y desprenden durante el movimiento relativo, tal y como se muestra en la figura 4.3. Este fenómeno suele tener lugar en superficies con una lubricación deficiente, donde las imperfecciones o partículas pueden interactuar entre sí. Cuando esto ocurre, la fuerte adherencia puede provocar soldadura en frío, lo que aumenta la rugosidad de las superficies y genera residuos a través de la transferencia de fragmentos de material. Hay que tener en consideración factores que fomentan el desgaste adhesivo, como la tendencia de ciertos materiales a formar sólidos o compuestos una vez que entran en contacto, la limpieza de las superficies que interactúan entre sí, el espesor de la película lubricante y parámetros específicos de operación como la carga y la velocidad. Es común que el desgaste adhesivo de lugar a otros tipos de desgaste. Las partículas pueden oxidarse a cargas muy altas, pero a cargas más bajas son metálicas. A medida que los materiales protectores se desgastan, se inicia el proceso de oxidación, al que sigue inmediatamente el proceso metálico. Durante la transición de estos dos procesos se produce un aumento de desgaste, que es proporcional a la carga aplicada y la distancia recorrida durante el contacto en este tiempo.

El desgaste adhesivo puede ser impulsado por diversas causas, como una carga inadecuada, temperaturas y presiones elevadas, aceleración o desaceleración en la zona de carga y humedad excesiva en la zona de carga. Como ya se ha mencionado, disponer de una adecuada lubricación de la superficie y suministro de aditivos para combatir el problema, así como tener en cuenta la temperatura máxima de funcionamiento a la hora de seleccionar lubricantes, ayudará a paliar estos problemas. Los rodamientos, cilindros, cajas de engranajes o pistones son algunos de los componentes que más se ven afectados por el desgaste adhesivo.

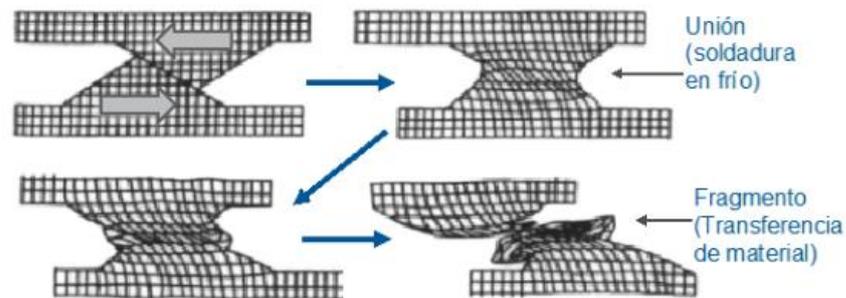
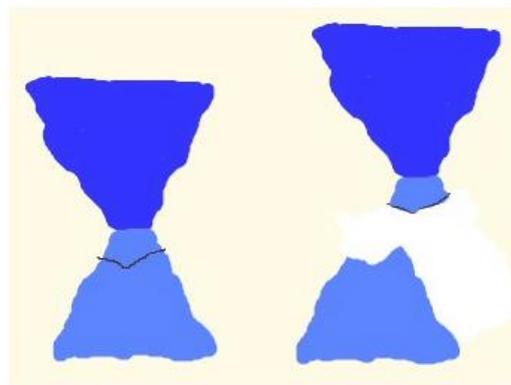


Figura 4.3. Defecto causado por el desgaste adhesivo. [7], [11]

Este tipo de desgaste se puede dar en diferentes niveles de severidad, mostrados a continuación (Fig 4.4.).

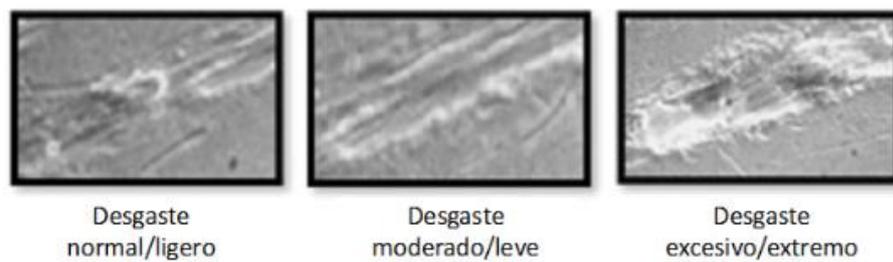


Figura 4.4. Progreso del desgaste de las superficies. [11]

El desgaste adhesivo normal o ligero se produce durante la pérdida inicial de pequeñas asperezas y puede manifestarse como un pulido de la superficie. Se da en la etapa inicial de desgaste adhesivo, y no suele apreciarse a simple vista, por lo que requiere una inspección más detallada.

El desgaste moderado/leve es más notable y forma líneas o marcas de color más oscuro. Además, pueden observarse tonos azulados en el componente debido a la naturaleza térmica del rayado en esta etapa. En esta etapa, se pueden observar daños extra debidos a la soldadura, como desplazamientos o desprendimientos del componente, dejando marcas superficiales. Es crucial vigilar y analizar cómo evoluciona este desgaste en esta fase, y tomar medidas planificadas para resolver el problema durante una interrupción programada del equipo.

Por último, el desgaste adhesivo puede llegar a su etapa más dañina y extrema, en la que el metal se desplaza y se acumula a lo largo de la superficie, adquiriendo una apariencia similar a barro. Esto conduce a raspaduras, grietas y superficies rasgadas. En casos extremos, la capa superficial se desprende de la subsuperficie debido a la fricción tangencial, lo que acelera significativamente el proceso de desgaste. Cuando se observa un desgaste adhesivo excesivo o severo, existe una alta probabilidad de fallo del equipo, por lo que se debe planificar su reemplazo inmediato. Es esencial identificar el patrón de desgaste presente para analizar adecuadamente la causa inicial del problema. Esto permitirá obtener resultados precisos y tomar medidas adecuadas para abordar el desgaste adhesivo en cada etapa.

Las inspecciones visuales son un método sencillo para detectar problemas relacionados con el desgaste adhesivo, pero solamente es eficaz para identificar el desgaste en etapas avanzadas. Sin embargo, la inspección con boroscopio es una herramienta de análisis visual avanzada que permite obtener detalles más precisos y detectar el desgaste adhesivo en etapas tempranas del proceso de generación.

Además de las inspecciones visuales, se recomienda realizar análisis de vibraciones, de aceite y utilizar herramientas de análisis espectrométrico, conteo de partículas (Figura 4.5.), análisis de humedad, densidad ferrosa, entre otros. Estas técnicas proporcionan detalles específicos sobre el volumen, tamaño, forma y posible fuente del problema. Es importante informar de cualquier anomalía observada durante las inspecciones visuales, para que la planificación y la acción detalladas puedan iniciarse rápidamente si es necesario. [11]



Figura 4.5. Diferentes tipos de partículas de desgaste adhesivo. [11]

- Por erosión: El desgaste erosivo es un fenómeno en el cual partículas sólidas impactan repetidamente sobre una superficie, produciendo la eliminación gradual del material. Cada impacto genera virutas de desgaste al cortar o fracturar una pequeña cantidad de material. Si este proceso se repite durante un tiempo prolongado, puede resultar en una pérdida notoria de material. [12] En la figura 4.6. se puede observar un esquema del proceso de desgaste por erosión.

Por otro lado, en los mecanismos lubricados, el desgaste erosivo ocurre debido a la pérdida gradual de material en las superficies que se mueven debido al impacto de partículas sólidas o metálicas en suspensión en el aceite. Estas partículas cambian su trayectoria cuando entran en contacto con la película lubricante, chocando y fatigando gradualmente las superficies. Aunque los aceites que cumplen con los estándares de limpieza ISO 4406 pueden minimizar el desgaste, siempre habrá partículas sólidas presentes en el aceite. Además, el desgaste erosivo también puede ocurrir debido al uso de aceites con viscosidad mayor o menor a la requerida, lo que puede generar fricción en las superficies y provocar desgaste por erosión. Aunque se puede minimizar, el desgaste erosivo no se puede evitar por completo en los mecanismos lubricados. [13]

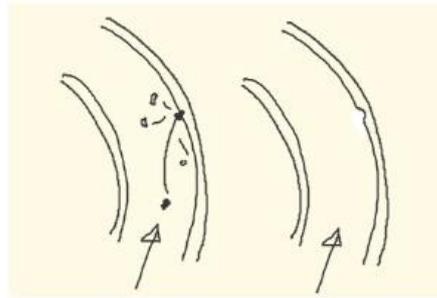


Figura 4.6. Defecto causado por el desgaste por erosión. [7]

- **Por fatiga:** se produce principalmente debido a fallos en las superficies de contacto después de un período de operación y aparece cuando una partícula queda atrapada entre dos superficies o se incrusta en una de ellas, lo que provoca la formación de grietas, dislocaciones o roturas. [7] Este fenómeno se muestra en la figura 4.7.

Este tipo de desgaste debilita la microestructura superficial a medida que surgen microgrietas.

Para prevenirlo, es crucial optimizar el estado de las superficies en cuestión. Es importante que tanto el acabado metalúrgico como el superficial sean de alta calidad. Durante los periodos de parada, se deben inspeccionar cuidadosamente las superficies y, si es necesario, se debe realizar una operación de restauración para llevarlas a su estado adecuado. Además, la aplicación de tratamientos superficiales de alta dureza, como la carburación o la nitruración, puede mejorar significativamente el comportamiento de las superficies frente al desgaste. [10]

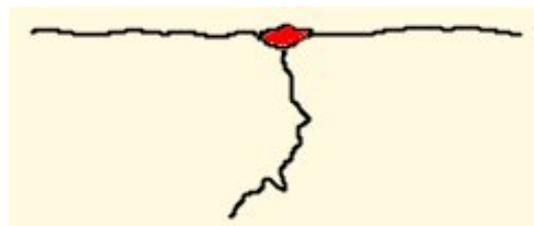


Figura 4.7. Defecto causado por el desgaste por fatiga. [7]

Otro tipo de desgaste menos común es el desgaste por cavitación, el cual se produce cuando una parte del fluido experimenta tensiones de tracción, lo que

provoca la formación de burbujas de vapor, seguidas de tensiones de compresión que hacen que estas burbujas de vapor implosionen. Este fenómeno requiere un alto movimiento relativo entre la superficie y el fluido. La cavitación afecta a equipos como turbinas, bombas, tuberías y demás dispositivos que transportan líquidos.

Tanto el desgaste por cavitación como los otros tipos de desgaste mencionados anteriormente generan grandes pérdidas económicas, especialmente en la industria, ya que hay que reponer continuamente las piezas dañadas. [14], [15]



Figura 4.8. Defectos causados por el desgaste de cavitación. [16]

También es importante mencionar también el desgaste corrosivo, que se produce cuando una superficie es dañada por un ataque químico, ya sea en forma de líquido o vapor.

El estado del lubricante juega un papel crítico en la aparición de este tipo de desgaste. Para evitar la corrosión de las superficies, es importante controlar la acidez del lubricante y prevenir la contaminación con otros fluidos que puedan alterar su acidez. La oxidación del lubricante puede generar acidez, mientras que la presencia de agua y óxidos puede actuar como catalizadores.

El desgaste corrosivo también puede ocurrir por un ataque localizado causado por ciertos aditivos del lubricante, especialmente si se utilizan de manera inadecuada. Por lo tanto, es importante seleccionar el lubricante adecuado y controlar la adición de aditivos para prevenir la corrosión relacionada con estos elementos. [10]



Figura 4.9. Defecto causado por el desgaste corrosivo. [17]

4.2. TRIBOLOGÍA Y DESGASTE.

La tribología es la ciencia interdisciplinaria que abarca el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación en la interacción de superficies en movimiento relativo, tanto en sistemas naturales como artificiales, como se menciona en [18].

Es importante destacar que la fricción y el desgaste no son propiedades inherentes de los materiales, sino respuestas específicas de un sistema tribológico específico.

En concreto, la fricción es la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse sobre otro con el cual está en contacto. Puede que se produzca entre cuerpos diferentes, lo que se conoce como fricción externa; o que se presente entre partículas de un mismo cuerpo, es decir, fricción interna. Para reducir este fenómeno, se emplean técnicas como el pulido de superficies o la aplicación de lubricantes [19].

4.3. ENSAYOS DE DESGASTE Y SUS NORMAS.

Existen diferentes tipos de ensayos de desgaste, como el ensayo de desgaste abrasivo, o llamado “*roll paper*”, y entre los más destacados y los tratados en este trabajo, entre ellos destacan el desgaste por deslizamiento lineal alternativo de bola sobre plano y el ensayo de desgaste con un aparato *pin-on-disk*.

4.3.1. ENSAYO DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO LINEAL ALTERNATIVO SOBRE BOLA.

Este ensayo está normalizado según la ASTM G133-05 [20]. Se puede aplicar en cerámicas, metales y otros materiales resistentes al desgaste.

En este ensayo, se utilizan dos muestras: una de forma plana y otra de forma esférica. La dirección del movimiento relativo entre las superficies de desplazamientos se invierte de forma periódica, de modo que el deslizamiento se produce hacia delante y hacia atrás en línea recta. La carga se aplica verticalmente hacia abajo a través de la probeta esférica contra la muestra plana, que se encuentra montada horizontalmente. En este ensayo, puede haber presencia o ausencia de lubricante. Dado que implica un deslizamiento alternativo en el que se producen cambios en la velocidad y la dirección del movimiento, no se mantienen condiciones de velocidad constante durante todo el ensayo.

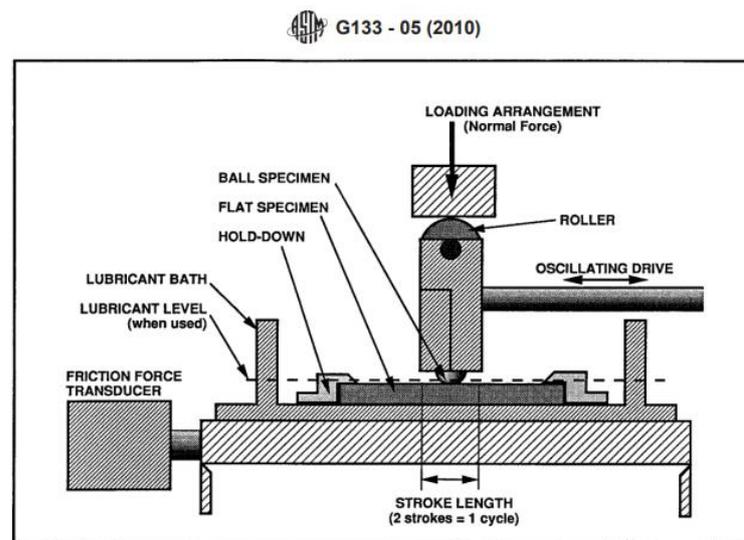


Figura 4.10. Esquema de la máquina de ensayo de desgaste por deslizamiento lineal alternativo sobre bola y sus partes. [20]

Los cambios dimensionales de las probetas se utilizan para calcular los volúmenes de desgaste. Las fuerzas de fricción se miden durante la prueba.

El procedimiento para llevar a cabo se resume con los siguientes pasos:

- 1) Limpiar las muestras antes y después de ser fijadas en el soporte.
- 2) Bajar suavemente la probeta esférica sobre la plana y comprobar que el movimiento alterativo es horizontal y paralelo a la superficie plana.

- 3) Aplicar la carga prescrita y ajustar la velocidad de oscilación deseada antes de encender el motor.
- 4) Sea el ensayo con o sin lubricante, se determinan los siguientes parámetros:
 - a. Procedimiento sin lubricante a temperatura ambiente:
 - i. Radio de la punta del pasador: 4,76 mm
 - ii. Fuerza normal: 25 N
 - iii. Longitud de carrera: 10 mm
 - iv. Frecuencia de oscilación: 5 Hz
 - v. Duración de la prueba: 16 min 40 s (distancia de deslizamiento: 100 mm)
 - vi. Temperatura ambiente: $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$
 - vii. Humedad relativa: 40-60 %
 - viii. Lubricación: no se aplica
 - b. Procedimiento con lubricante a temperatura elevada.
 - i. Radio de la punta del pasador: 4,76 mm
 - ii. Fuerza normal: 200 N
 - iii. Longitud de carrera: 10 mm
 - iv. Frecuencia de oscilación: 10 Hz
 - v. Duración de la prueba: 33 min 20 s (distancia de deslizamiento: 100 mm)
 - vi. Temperatura ambiente: $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
 - vii. Humedad relativa: 40-60 %
 - viii. Lubricación: inmersión total bajo el lubricante seleccionado.
- 5) Si se utiliza lubricante, se aplicará y se calentarán las probetas a la temperatura seleccionada.
- 6) Ajustar el temporizador o contador de ciclos.
- 7) Poner en marcha el equipo de registro de fricción e iniciar la prueba.
- 8) Después de la duración prescrita, parar el motor. Retirar la fuerza normal para volver a comprobar el punto cero en el sistema de registro.
- 9) Dejar enfriar las probetas y retirarlas. Limpiarlas de forma que no se alteren las características de la superficie.
- 10) Examinar la punta de la probeta esférica para asegurarse de que no ha rodado ni deslizado. Cualquier movimiento de la bola dentro del soporte o de la probeta plana, invalida los resultados.

A la hora de la medición y cálculo del desgaste, hay varias condiciones de desgaste posibles, las cuales se muestran en la siguiente figura (Fig 4.11.).

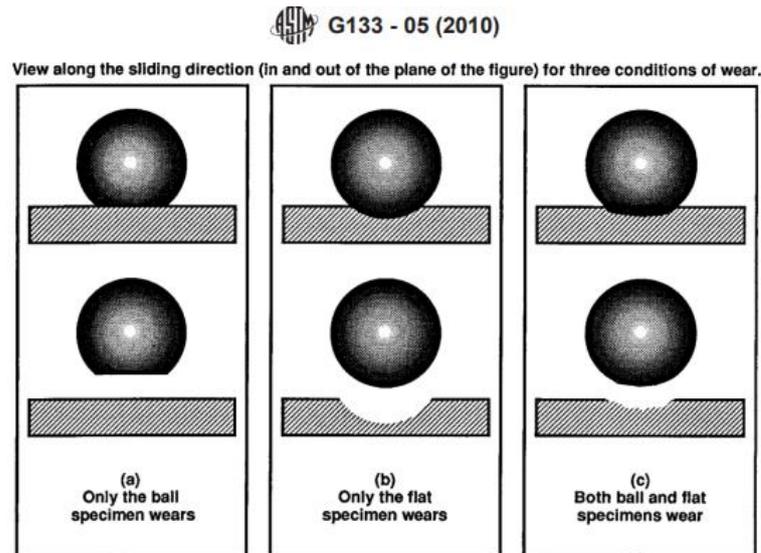


Figura 4.11. Posibles situaciones para la diferente resistencia al desgaste de las probetas esféricas y planas. [20]

En el caso (a), se observa que el material plano muestra una mayor resistencia al desgaste en comparación con el material esférico. En (b), el material de la bola es mucho más resistente al desgaste que el material plano. Y en la figura (c), se produce un desgaste medible tanto en el material de la bola como en el material plano.

Es importante destacar que la cicatriz que se forma en la probeta esférica no siempre es circular o plana. En casos en los que el extremo de la cicatriz parece plano, pero no circular, se calcula el valor promedio de las dimensiones máxima y mínima de la cicatriz, y se utiliza este valor como el diámetro efectivo de la cicatriz de la bola (D). Estas mediciones se pueden realizar utilizando un microscopio reflector.

El volumen de desgaste (V_p) para una cicatriz de desgaste de bola plana de diámetro efectivo D , es decir, como en el caso (a) de la figura, se calcula con la siguiente fórmula (4.1):

$$V_p = \left(\frac{\pi h}{6}\right) \cdot \left(\frac{3D^2}{4+h^2}\right) \quad (4.1)$$

Donde h = altura del material retirado, mm.

Suponiendo un volumen de desgaste esférico, la altura de material eliminado puede calcularse a partir de D , siguiendo la fórmula 4.2.

$$h = R - \left[R^2 - \left(\frac{D^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Donde R= radio original de la bola, mm.

Si se observa que la punta de la bola presenta un desgaste visible, pero el perfil de la huella de desgaste en la probeta plana indica que la bola no es totalmente plana, como se muestra en la figura (c), se debe anotar estos hechos. En este caso se debe medir el volumen de desgaste utilizando un método alterativo y describir detalladamente el método utilizado. En caso de que no sea posible realizar la medición, se debe mencionar la razón por la cual no se puede determinar el volumen de desgaste.

Si solo hay una ligera abrasión o uso pocos arañazos en la muestra de la bola, puede utilizarse el término “desgaste no medible”.

Si la punta de la bola está oscurecida por un depósito adherente de restos de desgaste, no se informará de la medida de desgaste, pero sí de la razón por las que no se puede realizar la medición.

Por otro lado, el volumen de desgaste de la probeta plana se puede calcular a partir de la longitud de la carrera y el área media de la sección transversal de la huella de desgaste. Esta área se puede medir en puntos equidistantes a lo largo de la longitud. En la mayoría de los casos, la anchura y la profundidad de la cicatriz de desgaste en la probeta plana serán relativamente uniformes en toda su longitud. Al calcular el volumen de desgaste en estas probetas, se pueden despreciar los pequeños errores geométricos asociados a los puntos de inversión de dirección en cada extremo de la pista.

El volumen de desgaste del plano se calcula a partir de la fórmula 4.3:

$$V_f = A \cdot L \quad (4.3)$$

Donde:

A= Área media de la sección transversal de la vía, mm^2 .

L= Longitud de la carrera, mm.

Una sección transversal de la huella de desgaste es el área del material eliminado de la superficie plana original vista en un plano normal a la superficie original y a la dirección del movimiento de deslizamiento. Estas se pueden obtener utilizando un instrumento de tipo estilete o su equivalente funcional.

Por último, se debe realizar un informe, donde se notifica sobre cualquier acontecimiento inusual, se hable sobre la caracterización de los materiales de las probetas, los parámetros usados, los resultados, etc.

4.3.2. ENSAYO DE DESGASTE CON APARATO PIN-ON-DISK.

El ensayo se rige por la norma ASTM G99-90 [21]. La cual expone lo siguiente. Para el ensayo de desgaste *pin-on-disc*, en español, clavija sobre disco, se necesitan dos muestras. Por un lado, un alfiler o clavija con la punta redondeada, que se coloca perpendicular a la otra, que normalmente es un disco circular plano. La máquina hace girar la probeta con forma de disco o la clavija alrededor del centro del disco. En ambos casos la trayectoria de deslizamiento es un círculo sobre la superficie del disco (este puede estar orientado vertical u horizontalmente).

La muestra se presiona contra el disco con una carga determinada, con un brazo y pesas. Se puede hacer también de forma hidráulica o neumática.

Los resultados del ensayo se presentan como pérdida de volumen en milímetros cúbicos para la bola y el disco por separado.

Cuando se ensayan dos materiales diferentes, es conveniente que se ensaye cada material en ambas posiciones, como pasador y como disco.

Existen dos métodos para determinar el volumen perdido. El primero consiste en realizar mediciones lineales de las piezas antes y después del ensayo, utilizando técnicas metrológicas adecuadas. El segundo método implica medir la pérdida de masa, que luego se convierte en pérdida de volumen utilizando un valor adecuado de densidad para la muestra. Sin embargo, este segundo método no se suele utilizar, pues la pérdida de masa suele ser demasiado pequeña como para medirla con precisión.

En función de la finalidad del ensayo, se seleccionará una distancia de deslizamiento determinada y para unos valores de carga y velocidad seleccionados.

Los resultados se pueden presentar en forma de gráficos del volumen de desgaste en función de la distancia de deslizamiento. Estos gráficos pueden mostrar relaciones tanto lineales, como no lineales.

En la siguiente figura (Fig 4.12.) se muestra un dibujo esquemático de un ensayo de desgaste *pin-on-disc*.

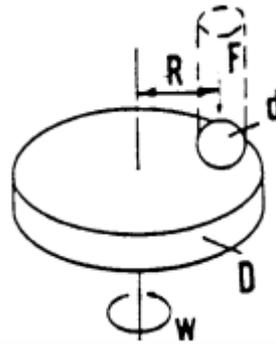


Figura 4.12. Dibujo esquemático de un ensayo de desgaste pin-on-disc. [21]

Para realizar esta prueba se requiere un motor de velocidad variable, capaz de mantener una velocidad constante bajo carga. Su vibración no debe afectar a la prueba. Estas velocidades de rotación suelen oscilar entre 0,3 y 3 rad/s.

La máquina también estará equipada con un contador de revoluciones y tendrá que apagar la máquina después de un número preseleccionado de revoluciones.

En un sistema convencional, el portamuestras fijo se encuentra conectado a un brazo de palanca que cuenta con un pivote. Al agregar pesos, se genera una fuerza de ensayo proporcional a la masa de dichos pesos aplicados. Es recomendable que el pivote del brazo esté ubicado en el plano de contacto de desgaste, con el fin de evitar fuerzas de carga adicionales debido al roce por deslizamiento.

Los instrumentos de medición lineal del desgaste deberán tener una sensibilidad de $2,5 \mu\text{m}$ o superior. Las balanzas utilizadas para medir la pérdida de masa deberán tener una sensibilidad de 0,1 mg o superior.

En relación con las muestras, estas pueden ser de cualquier material que permita la preparación de probetas con las dimensiones especificadas, capaces de soportar las tensiones aplicadas durante el ensayo sin experimentar fallas o flexiones excesivas. Los materiales que serán probados se describirán en función de sus dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura y dureza de indentación.

Los diámetros de las muestras varían en un rango de 2 a 10 mm. Para las muestras de disco, los diámetros típicos oscilan entre 30 y 100 mm, con un grosor que va de 2 a 10 mm. Se recomienda un acabado superficial con una rugosidad promedio de $0,8 \mu\text{m}$. Es importante tomar precauciones durante la preparación de la superficie para evitar daños que puedan afectar significativamente las propiedades del material.

Los parámetros que intervienen en la prueba son los siguientes:

- Carga en Newtons (N).

- Velocidad relativa de deslizamientos entre las superficies en metros por segundo (m/s).
- Distancia de deslizamiento acumulada en metros (m).
- Temperatura de los especímenes en lugares cercanos al punto de contacto.
- La atmósfera que rodea al contacto de desgaste.

A continuación, se enumerarán los pasos a seguir en el procedimiento de forma resumida.

1. Limpiar y secar las muestras con los productos adecuados. Las muestras de acero, las cuales son ferromagnéticas, que tengan magnetismo residual, deben desmagnetizarse.
2. Medir o pesar las muestras con la precisión adecuada.
3. Insertar el disco en la sujeción.
4. Insertar la probeta pin en el soporte, de manera que quede perpendicular al disco.
5. Agregar la masa apropiada al brazo de palanca para generar la fuerza seleccionada que ejerce presión sobre el pasador contra el disco.
6. Arrancar el motor y ajustar la velocidad al valor deseado mientras se mantiene el alfiler fuera de contacto con el disco. Parar el motor.
7. Ajustar el cuentarrevoluciones al número deseado.
8. Para iniciar el ensayo, se colocan las probetas en contacto bajo carga. El ensayo continúa sin interrupciones hasta que se alcance el número deseado de revoluciones. Es importante evitar interrupciones o reinicios durante el ensayo.
9. Retirar las muestras y limpiar los restos de desgaste sueltos. Observar la existencia de características en la cicatriz de desgaste o cerca de ella, como protuberancias, metal desplazado, manchas, etc.
10. Volver a medir las dimensiones del espécimen.
11. Repetir el ensayo con muestras adicionales con el fin de obtener datos suficientes para que los resultados sean estadísticamente significativos.

Por último, con respecto a esta norma, se realizarán los cálculos e informes correspondientes.

Las mediciones de desgaste deben indicarse como pérdida de volumen en milímetros cúbicos para el perno y el disco, por separado. Para el cálculo de las pérdidas de volumen se empleará la ecuación 4.4. Esta se aplica cuando el pasador presenta inicialmente una forma de extremo esférico con un radio R , mientras que el disco tiene una forma plana al comienzo. Cabe destacar que estas condiciones solo se aplican cuando uno de los dos componentes sufre un desgaste significativo.

$$\begin{aligned}
 & \text{Pérdida de volumen del pin con extremo esférico, mm}^3 = \\
 & = \frac{\pi \cdot (\text{diámetro de la cicatriz de desgaste, mm})^4}{64 \cdot (\text{radio de la esfera, mm})}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Suponiendo que no haya un desgaste significativo del disco.

La pérdida de volumen del disco se calcula como indica la fórmula 4.5 (suponiendo en este caso que no haya un desgaste significativo del pin):

$$\begin{aligned}
 & \text{Pérdida de volumen del disco, mm}^3 = \\
 & = \frac{\pi \cdot (\text{radio de desgaste de la pista, mm}) \cdot (\text{ancho de la pista, mm})^3}{6 \cdot (\text{radio de la esfera, mm})}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

En el caso de que el pasador tenga otras geometrías, se utilizarán las relaciones geométricas apropiadas.

En situaciones en las que tanto el pasador como el disco experimentan un desgaste significativo, se requerirá medir el perfil de profundidad del desgaste en ambos componentes. Una técnica adecuada para esto es el perfilado con palpador. El perfilado es el único método que permite determinar con precisión la forma final de las superficies desgastadas y calcular el volumen de material perdido debido al desgaste.

En el caso del desgaste del disco, se puede integrar el perfil medio de la pista desgastada para obtener el área de la sección transversal de la pista, y luego multiplicarla por la longitud media de la pista para obtener el volumen de desgaste del disco.

Por otro lado, en el caso del desgaste del pasador, el perfil de la huella desgastada puede medirse en dos direcciones ortogonales, promediando los resultados del perfil. Estos datos se utilizan en una figura de revolución calculada para determinar el volumen de desgaste del pasador.

Se utiliza la ecuación 4.6 para convertir la pérdida de masa en pérdida de volumen:

$$\text{Volumen perdido, mm}^3 = \frac{\text{masa perdida, g}}{\text{densidad, g/cm}^3} \cdot 1000
 \tag{4.6}$$

Si los materiales sometidos a ensayo presentan una considerable transferencia entre probetas sin pérdida del sistema, es posible que la pérdida de volumen no

refleje adecuadamente la cantidad real o la gravedad del desgaste. En estos casos, no debe utilizarse este método de ensayo para informar sobre el desgaste.

Para finalizar, es importante especificar adecuadamente los materiales ensayados. Como mínimo, el informe debe especificar el tipo de material, la forma, los tratamientos de transformación, el acabado superficial y los procedimientos de preparación de las muestras, y si procede, debe indicarse la dureza de indentación.

5. TECNOLOGÍA SLM EN PIEZAS DE ACERO 17-4PH.

La industria 4.0 y la innovación de sistemas de fabricación basados en capas aditivas han revolucionado el enfoque para la fabricación de piezas. Al eliminar la dependencia de técnicas sustractivas, se ha abierto una nueva dirección para fabricar componentes robustos y fiables rápidamente, lo que puede ahorrar costos considerables. La atención hacia la fabricación aditiva ha estado aumentando exponencialmente, y se espera que el mercado tenga un valor de \$32 mil millones para 2025 y casi \$60 mil millones para 2030. Las técnicas de AM basadas en láser como la sinterización directa de metal con láser (SMLS), la deposición de metal con láser (LMD) y la fusión selectiva con láser (SLM) han atraído mucha atención en los últimos años, siendo SLM la que ha recibido mayor atención debido a su capacidad para fabricar una amplia variedad de materiales y la libertad de fabricar diseños complejos, lo cual permite una gran flexibilidad para diversos componentes industriales [22].

Debido a la naturaleza aditiva de este proceso, existen muchas ventajas en comparación con las técnicas de fabricación tradicionales, como se muestra a continuación en la tabla 5.1.

Aplicación	Ventajas de SLM sobre las técnicas de fabricación tradicionales	Desventajas de SLM frente a las técnicas de fabricación tradicionales
Automoción: carcasa para componentes emisores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Canales de refrigeración integrados. • Características superficiales complejas para mejorar la eficiencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Largo tiempo de construcción. • Incapacidad para producir piezas a gran volumen a un costo razonable.
Aeroespacial: componentes únicos y complejos	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión. • Tolerancias dimensionales estrictas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acabado superficial rugoso. • Porosidad variable.
Biomedicina: implantes óseos	<ul style="list-style-type: none"> • Imitación de la porosidad de los huesos humanos. • Implementación de características sub-mm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos porosos aleatorios. • Estabilidad mecánica variable.
Herramientas y troqueles: fabricación de patrones y herramientas de corte.	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tenacidad por fusión y mecanismo de enfriamiento rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas tasas de producción. • Altos costos de los procesos secundarios necesarios.
HVAC: Intercambiadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad para crear diseños de paredes delgadas en capas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El acabado superficial rugoso aumenta la tasa de erosión de las paredes.

Tabla 5.1. Ventajas e inconvenientes de la utilización de SLM frente a técnicas tradicionales de fabricación. [22]

Como se ha mencionado anteriormente, los diferentes parámetros de escaneo están relacionados con la calidad final de las piezas fabricadas por procesos aditivos (SLM). Esto es de gran importancia, puesto que estas tecnologías de fabricación aún están en desarrollo y mejora en cuanto a velocidad de fabricación y calidad de las piezas debido a la fusión completa del polvo. Las piezas producidas pueden tener geometrías complejas que podrán ser usadas en áreas como la automoción o la industria aeroespacial.

En primer lugar y de acuerdo a [23], se va a dar importancia a la estrategia de escaneo. En la figura 3.4. se muestran los diferentes tipos que existen. Se van a

comparar tres de las estrategias más usadas. En primer lugar, como se muestra en la figura 5.1. (a), está el escaneo lineal, con una inclinación de 45° en una capa y de -45° en la siguiente, y así sucesivamente. En la figura 5.1. (b), se representa una trayectoria concéntrica, es decir, el láser bordea la figura desde el exterior hacia el interior de esta. Y, por último, la figura 5.1. (c), que muestra el escaneo hexagonal. Este es un tipo de estrategia de isla, la cual puede tomar diferentes geometrías. En este caso, la dirección lineal de cada trayectoria varía de una capa a otra, repitiéndose la posición de los hexágonos cada tres capas.

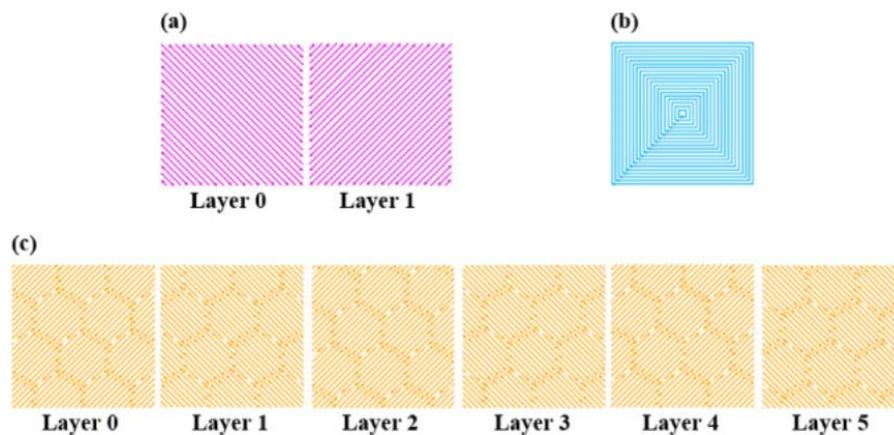


Figura 5.1. Diferentes estrategias de escaneo usadas en SLM. (a) Escaneo lineal. (b) Escaneo concéntrico. (c) Escaneo hexagonal. [23]

En el estudio de las muestras, se pudo observar que la porosidad seguía una función claramente exponencial, es decir, a menor número de poros, mayor es su tamaño. Se observa que la estrategia hexagonal es la más efectiva y adecuada en términos de porosidad, presentando un menor porcentaje de porosidad interna. Así como en las muestras de escaneo concéntrico aparecen menos poros, pero estos son de mayor tamaño. Los poros grandes e irregulares aparecen en el área donde el láser cambia bruscamente de dirección. Por lo que fabricar una pieza cilíndrica con esta estrategia puede ser bastante satisfactorio en cuanto a porosidad, ya que no se realizan notables cambios de dirección.

En cuanto a las propiedades mecánicas, las muestras concéntricas presentan un comportamiento más dúctil y menor dureza que con las otras dos estrategias, las cuales muestran un comportamiento tensil similar.

En referencia al acabado superficial resultante, las piezas fabricadas con la estrategia concéntrica muestran mayores rugosidades en la superficie superior, y las menores en las caras laterales. Las dos estrategias restantes presentan rugosidades similares entre ambas superficies. Estas también proporcionan

menos errores geométricos y dimensionales, por lo que son más recomendables para fabricar componentes grandes con altos requisitos geométricos y dimensionales. Aun así, las piezas se suelen someter a procesos posteriores para mejorar su acabado superficial y así cumplir con los requerimientos demandados.

El ajuste de otros parámetros que afecta a la calidad final de las piezas es en referencia al láser, como la potencia, la velocidad de escaneado o la distancia de desenfoque.

Según el artículo [24], la distancia de desenfoque es la distancia entre el plano focal (que proporciona el diámetro mínimo del haz láser) y la superficie de construcción, donde se esparce el polvo. La distancia de desenfoque puede ser positiva o negativa. Una distancia de desenfoque negativa se produce cuando la superficie de construcción está situada por encima del foco del rayo láser, y una distancia de desenfoque positiva se da cuando la superficie de construcción está situada por debajo del foco del rayo láser.

En la figura 5.2. se observan unas muestras con diferentes distancias de desenfoque, se pudo observar grandes diferencias en su rugosidad superficial.

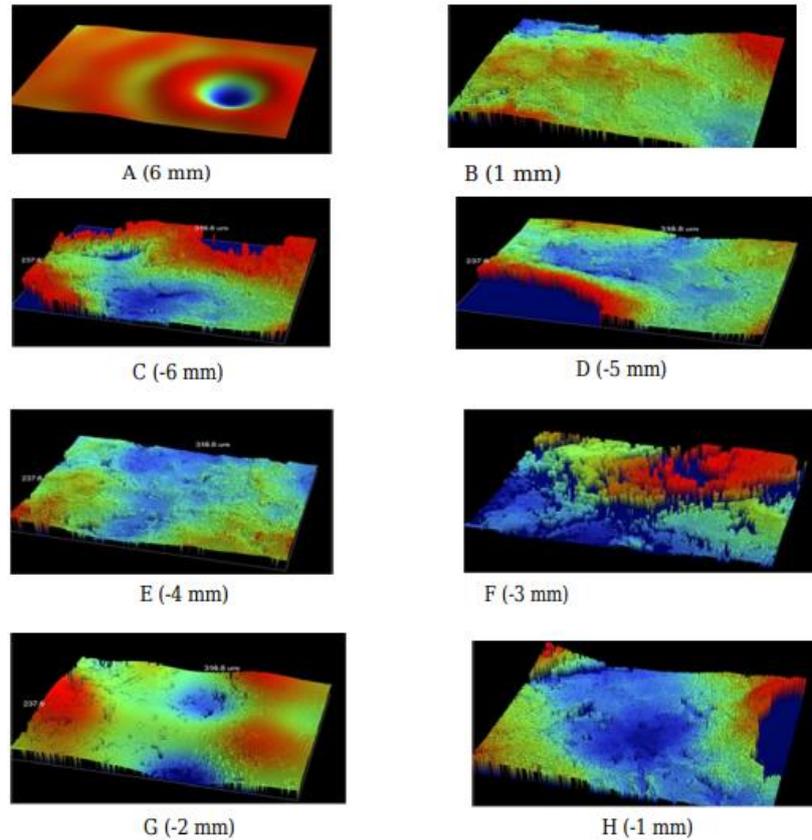


Figura 5.2. Rugosidad superficial de las muestras con diferentes distancias de desenfoco. (A) distancia de desenfoco de 6mm. (B) Distancia de desenfoco de 1mm. (C) Distancia de desenfoco de -6mm. (D) Distancia de desenfoco de -5mm. (E) Distancia de desenfoco de -4mm. (F) Distancia de desenfoco de -3mm. (G) Distancia de desenfoco de -2mm. (H) Distancia de desenfoco de -1mm. [24]

El color rojo indica que la superficie sobresale y tiene altura, y el azul indica la profundidad de esta. El verde representa la superficie lisa y más plana.

Por lo tanto, se puede observar que en el caso (E), con una distancia de desenfoco de -4mm, una superficie más homogénea, más lisa y sin apenas zonas rojas presentes.

En cuanto a la microestructura, se aprecia en la figura 5.3. que al igual que en el caso anterior, con una distancia de desenfoco de -4mm se obtiene una estructura interna más fina y homogénea. Aunque el caso (D) también es bastante aceptable.

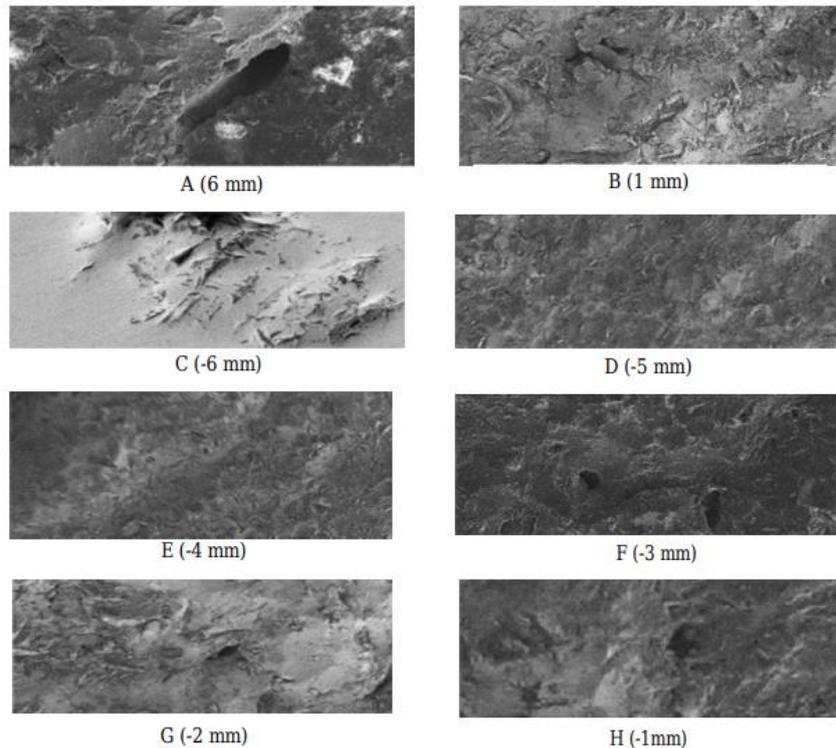


Figura 5.3. Microestructuras de las muestras con diferentes distancias de desenfoque. (A) 6mm. (B) 1mm. (C) -6mm. (D) -5mm. (E) -4mm. (F) -3mm. (G) -2mm. (H) -1mm. [24]

6. EL DESGASTE EN ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.

El acero inoxidable 17-4PH pertenece a este tipo de aceros martensíticos. Como se dijo anteriormente, debido a sus campos de aplicación, es conveniente que las piezas tengan una adecuada resistencia al desgaste. Para ello, es importante saber qué factores influyen en la tasa de desgaste, así como la presión de contacto, la velocidad de deslizamiento, etc.

Los fenómenos de desgaste que más ocurren en los aceros inoxidables martensíticos tratados y no tratados según el artículo [25], son el desgaste abrasivo y el adhesivo. En muchos casos también se observan delaminación y grietas superficiales y subterráneas. Los aceros inoxidables martensíticos tienen una alta dureza superficial y la presencia de carburos promueve la generación de partículas de escombros de desgaste. En la figura 6.1. se muestra el mecanismo de desgaste de estos aceros. Además, los tratamientos térmicos en los aceros inoxidables martensíticos como el templado o el revenido generan tensiones residuales en el material, lo que favorece la formación de fisuras.

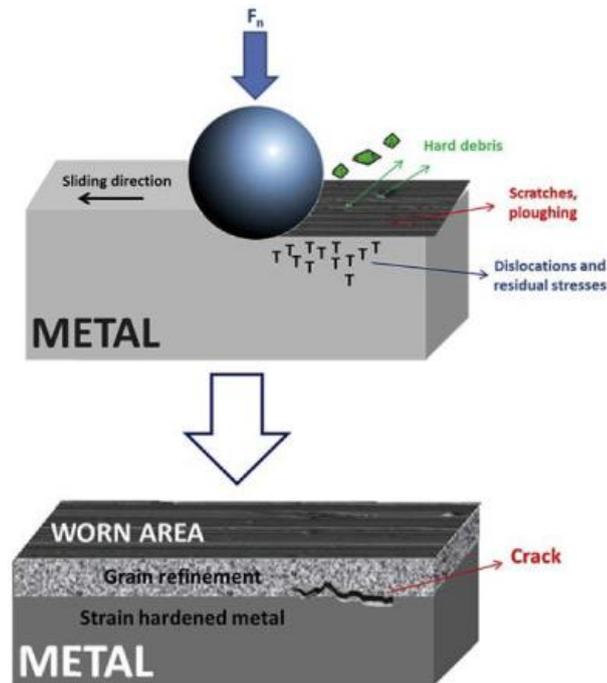


Figura 6.1. Mecanismos de desgaste de los aceros inoxidables martensíticos durante el roce en contacto seco. [25]

La microestructura del material desempeña un papel importante en el comportamiento al desgaste de estos aceros. Tanto la cantidad de austenita retenida como la presencia de carburos modifican su respuesta al desgaste, como se evidencia en la figura 6.2.

Ha sido demostrado que la transformación de la austenita retenida de las muestras estudiadas en martensita y el consiguiente endurecimiento, disminuyen el coeficiente de desgaste al aumentar la carga aplicada. Sin embargo, cuando el carburo está presente en la microestructura, y se extraen sus partículas, se aumenta el coeficiente de desgaste. Siendo la extracción de estas directamente proporcional al aumento de carga.

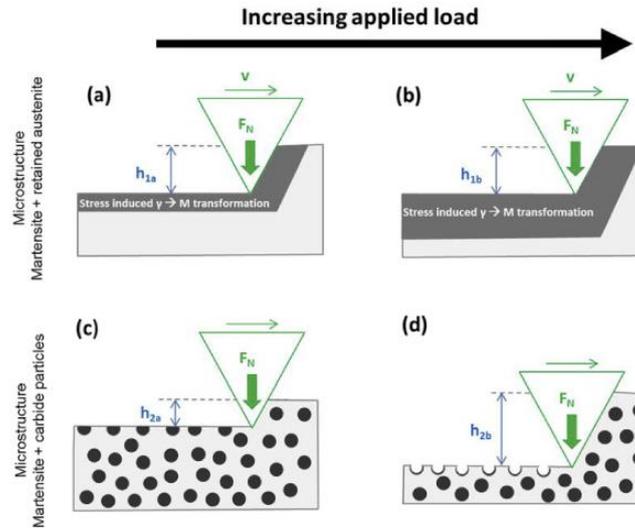


Figura 6.2. Formación de la ranura abrasiva. (a) y (b) En herramientas con austenita retenida en su microestructura. (c) y (d) Con una microestructura formada por partículas de carburo dispersas en una matriz martensítica. [25]

Para mejorar notablemente la resistencia al desgaste de los aceros inoxidable, se propone como excelente candidato el tratamiento superficial, el nitrado de plasma, especialmente para contactos secos.

6.1. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL ACERO INOXIDABLE 17-4PH FABRICADO MEDIANTE MÉTODOS TRADICIONALES DE FABRICACIÓN Y FABRICACIÓN ADITIVA BASADA EN LÁSER.

Relacionado con el apartado anterior de la tecnología SLM en piezas de acero 17-4PH, en el artículo [26] se hace una comparación del comportamiento tribológico de piezas de este acero inoxidable fabricadas por métodos de fabricación aditiva con sus homólogos forjados.

Entre varios materiales fabricados aditivamente, el acero inoxidable martensítico/austenítico de endurecimiento por precipitación (PH) de bajo carbono 17-4 ha llamado mucho la atención debido a sus excelentes propiedades mecánicas, como ya se ha mencionado previamente, destacan la alta resistencia a la tracción y al impacto, tenacidad a la fractura y resistencia a la corrosión.

Estudios recientes sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero 17-4PH fabricado por fusión de lecho en polvo con rayo láser (LB-PBF) después de varios tratamientos térmicos. Se informó de las propiedades de tracción del acero 17-4PH LB-PBF podrían ser comparables e incluso mejores que las de las muestras forjadas para la misma condición de tratamiento térmico.

Esto se atribuyó a la microestructura más fina del 17-4PH LB-PBF debido a la solidificación rápida durante la fabricación. Sin embargo, también se detectó una menor resistencia a la fatiga en el acero 17-4PH LB-PBF en comparación con los fabricados de forma tradicional, lo cual se debió a la presencia de rugosidad superficial o a porosidades internas.

La tasa de desgaste es un factor crítico que influye en la aplicación de las piezas fabricadas en un sistema en movimiento. Por lo que es importante comprender las propiedades de fricción y desgaste de las piezas fabricadas de forma aditiva en comparación con las forjadas. Algunos de los tipos de desgaste más comunes y relevantes son los explicados anteriormente, como el desgaste abrasivo, el adhesivo y la fatiga superficial. Respecto a estudios previos acerca del desgaste, se sabe que la carga y la distancia de deslizamiento juegan papeles muy importantes en la pérdida de volumen y la tasa de desgaste específica.

También se ha informado acerca de las pobres propiedades tribológicas del acero inoxidable 17-4PH debido a su menor dureza superficial en comparación con otros materiales de acero comunes para los cojinetes, como el acero al cromo con alto contenido en carbono 52100. Tanto la adición de nitrógeno mediante implantación térmica como el tratamiento de difusión de plasma a baja temperatura pueden mejorar las propiedades de resistencia al desgaste del acero mencionado.

El artículo tratado en este apartado se centra en el estudio y comparación de las propiedades de fricción y desgaste del acero inoxidable 17-4PH LB-PBF con los del acero forjado de forma convencional, para así evaluar si el 17-4PH LB-PBF podría ser una opción viable al acero forjado en términos de rendimiento tribológico.

6.1.1. MÉTODO EXPERIMENTAL.

6.1.1.1. MATERIALES Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS.

En primer lugar, se preparan las probetas forjadas de acero inoxidable 17-4PH fabricada mediante métodos convencionales y se denominan CM. Las muestras son de 7 mm de grosor y 70 mm de diámetro (figura 6.3.).

Por otro lado, se fabrican las probetas por fabricación aditiva LB-PBF en un entorno de argón, denominadas AM.

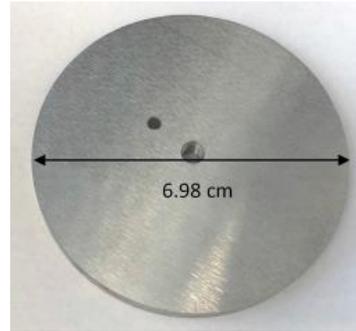


Figura 6.3. Muestra resultante de disco de acero inoxidable 17-4PH. [26]

Los parámetros de proceso proporcionados por la empresa fabricante de las muestras AM, son los mostrados en la tabla 6.1.

Potencia del láser (W)	Velocidad de exploración (mm/s)	Distancia de eclosión (μm)	Grosor de la capa (μm)
220	755,5	100	40

Tabla 6.1. Parámetros de proceso LB-PBF para el acero inoxidable 17-4PH proporcionados por la empresa fabricante. [26]

A continuación, se aplicó tratamiento térmico a todas las muestras. Primero, la puesta en solución (a 1050°C durante 30 minutos, con un enfriamiento al aire a temperatura ambiente). En segundo lugar, se mantienen las muestras a 482°C durante una hora, seguido de un enfriamiento con aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Se comparó la microestructura de las muestras del acero LB-PBF 17-4PH con la de las homólogas forjadas, y a pesar de ser similares, se compone de granos más finos. Esto se debe a la alta velocidad de enfriamiento durante el proceso de fabricación.

Por último, se esmeriló la superficie de las muestras para eliminar las rugosidades e imperfecciones.

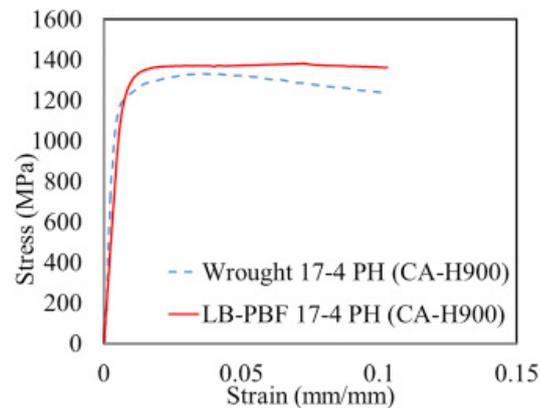


Figura 6.4. Curvas de tensión de tracción para los materiales considerados. [26]

Como se puede observar en la figura 6.4., la curva roja, la cual pertenece al límite elástico del acero 17-4PH fabricada por métodos aditivos, es superior a la azul, que representa al límite del acero forjado.

6.1.1.2. PRUEBAS DE MICRODUREZA.

Se procede a medir la microdureza utilizando un durómetro. La carga utilizada fue de 1 kgf durante 10 s. Para asegurar la fiabilidad se realizaron de 3 a 5 mediciones y se indica el valor medio.

6.1.1.3. PRUEBAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE.

Para realizar los ensayos de desgaste (esquema del ensayo en la figura 6.5.) se utilizaron bolas de acero al cromo con un diámetro de 10 mm, y estas tienen una dureza Rockwell C entre 60 y 67. Antes de comenzar se limpian muy bien tanto las bolas como las muestras con acetona y metanol para así evitar contaminantes.

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas en seco, con cargas de 10 N y 30 N, velocidad de deslizamiento lineal a 0,6 m/s durante 4000 s. Y para los ensayos con lubricantes, solo la carga de 30 N, a una velocidad de 0,1 m/s durante 4000 s. Por lo que la distancia de deslizamiento fue mayor en las pruebas en seco, lo cual se tuvo en cuenta posteriormente. A continuación, se analizó el desgaste de las muestras con un perfilómetro de aguja, y se limpiaron tanto la bola como el disco para pesarlos.

La tasa de desgaste se calculó a partir del perfil medido de las ranuras utilizando un perfilómetro de superficie de palpador con un radio de palpador de 2,5 μm .

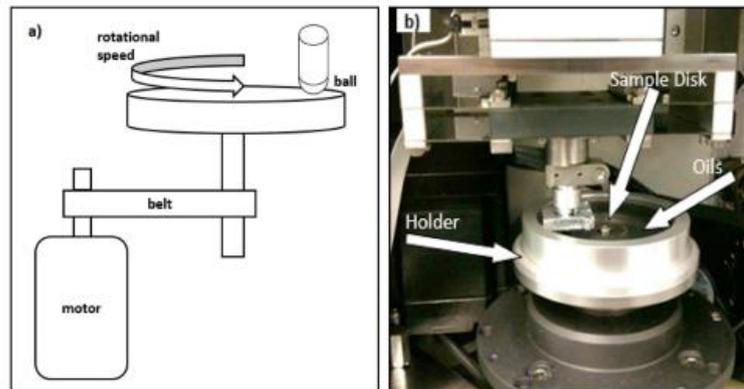


Figura 6.5. (a) Esquema del ensayo de bola sobre disco. (b) Montaje del ensayo realizado. [26]

Se trazan los datos para extraer el perfil de la ranura de desgaste, mientras que los datos de la superficie no desgastadas se ajustaron linealmente. Se realizaron tres barridos en cada espécimen para corroborar las medidas y se promediaron los resultados de cada una de ellas.

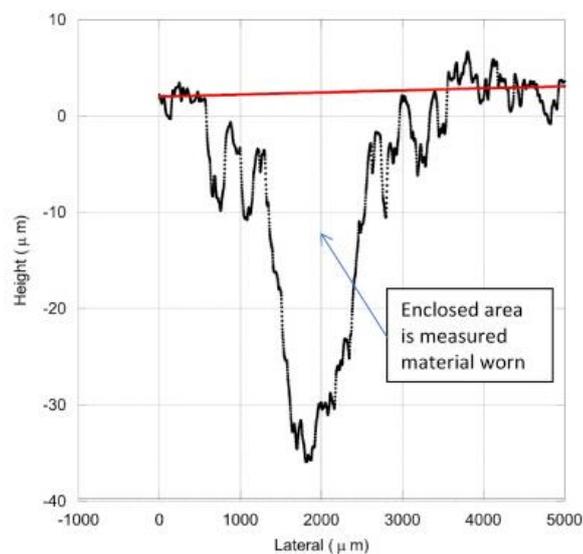


Figura 6.6. Perfil de desgaste típico del perfilómetro. [26]

En la figura 6.6. se puede observar el perfil de desgaste, donde se indica que el área encerrada debajo de la línea roja mide el material desgastado.

6.1.1.4.RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

a) Dureza.

Los resultados muestran que las piezas fabricadas por métodos aditivos tienen una mayor microdureza y un mayor límite elástico. Esto es debido a que tienen una microestructura más fina producida por la alta velocidad de enfriamiento durante el proceso LB-PBF.

A mayor dureza superficial, menor desgaste, por lo que las piezas fabricadas por LB-PBF cuya dureza es ligeramente superior, presentarán un menor desgaste que las piezas fabricadas por métodos tradicionales.

b) Desgaste.

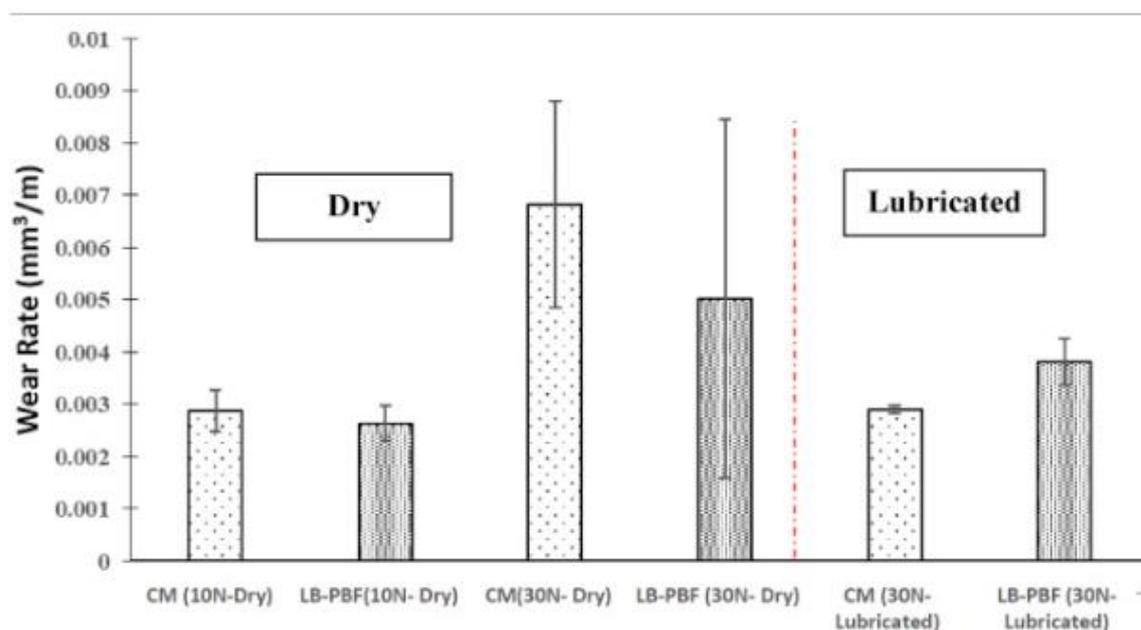


Figura 6.7. Índices de desgaste obtenidos en los diferentes ensayos. [26]

Como se puede observar en el gráfico de la figura 6.7., las cuatro primeras columnas representan el índice de desgaste del ensayo en seco. La primera, corresponde a la muestra con fabricada de forma tradicional (CM), en seco y aplicando 10 N; la segunda a la muestra fabricada por SLM (LB-PBF), en seco y con una carga de 10N. La tercera columna representa a la muestra CM, en seco y con una carga de 30 N; y la cuarta a la muestra LB-PBF, en seco y aplicando 30 N. En ambos casos (10 N y 30 N), el índice de desgaste es menor en las piezas

LB-PBF, ya medida que se aumenta la carga, la diferencia es más notable. Esto puede deberse, como se dijo anteriormente, a que las piezas fabricadas por métodos aditivos tienen una mayor dureza superficial. También puede haber algún tipo de error, como la formación de muchas partículas desgaste, y por eso en el caso del ensayo con 30 N hay tanta diferencia.

Sin embargo, los resultados cambian en los ensayos lubricados. En primer lugar, la pieza CM presenta una menor tasa desgaste que la LB-PBF, es decir, al contrario que en los ensayos en seco. Y evidentemente, el ensayo desgaste lubricado es menor que el seco con la misma carga (30 N).

En el estado seco, el desgaste adhesivo será mayor que en el lubricado. Una vez se añade el lubricante, se reduce la adherencia entre las superficies, y los mecanismos de desgaste principales serán la abrasión y la fatiga superficial.

Por lo tanto, en el estado lubricado, la tasa de desgaste es mayor en la muestra LB-PBF. Esto es debido a que es menos resistente a la fatiga superficial. También influye la rugosidad superficial de este tipo de piezas, ya que la capa de lubricante sobre la superficie es más fina.

c) Coeficiente de rozamiento (CoF)

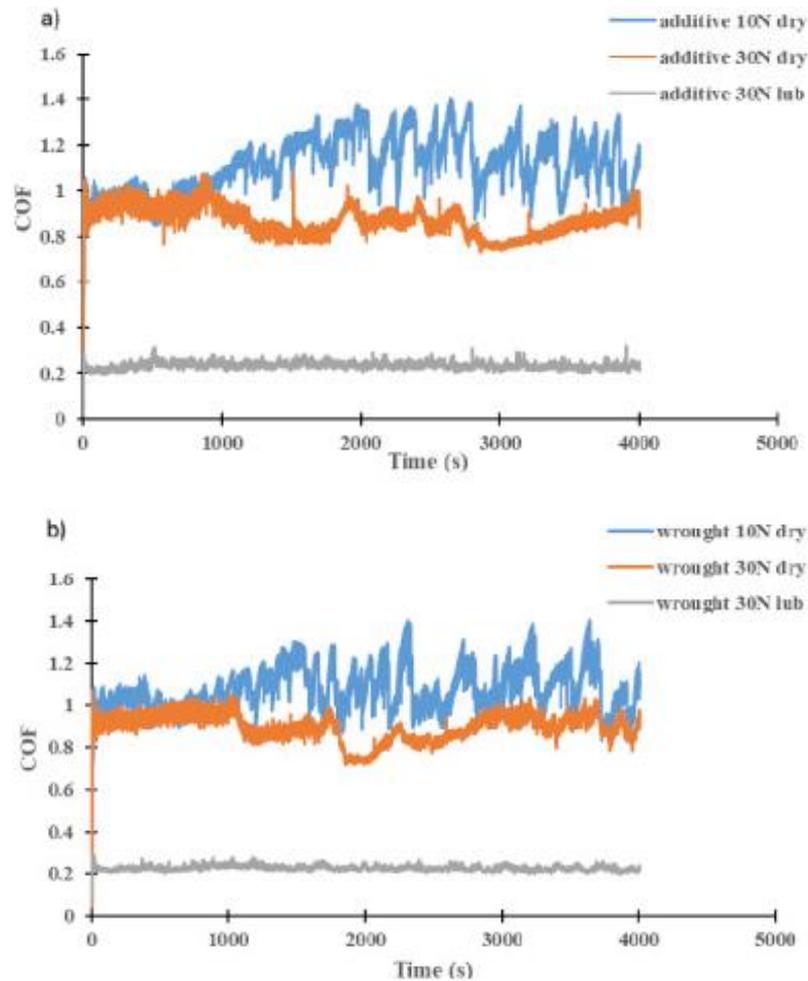


Figura 6.8. Tendencia del coeficiente de rozamiento a lo largo de tiempo. (a) Muestras fabricadas por métodos aditivos. (b) Muestras fabricadas por métodos convencionales. [26]

Según la figura 6.8., se observa que no hay gran diferencia entre el CoF de las muestras LB-PBF y CM, pero sí entre los ensayos secos y lubricados. Siendo el CoF bastante superior en los ensayos en seco, y suave y constante en la condición lubricada. La comparación de todos estos valores de CoF se refleja en la figura 6.9.

Este CoF se evalúa promediando la fricción de la prueba del tribómetro sobre disco medida entre 500 y 4000 s.

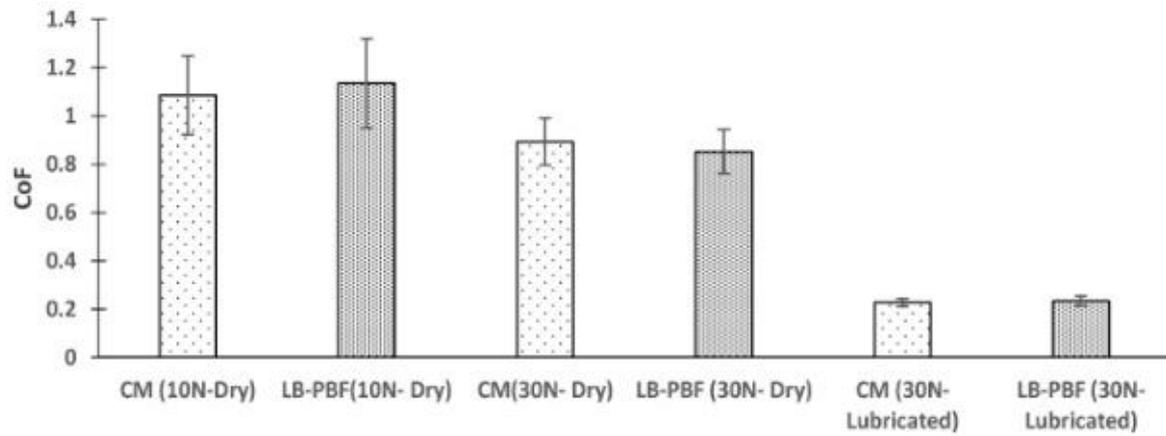


Figura 6.9. Valor de CoF para LB-PBF y CM 17-4PH bajo diversas cargas aplicadas y condiciones de fricción. [26]

d) Imagen óptica de la superficie.

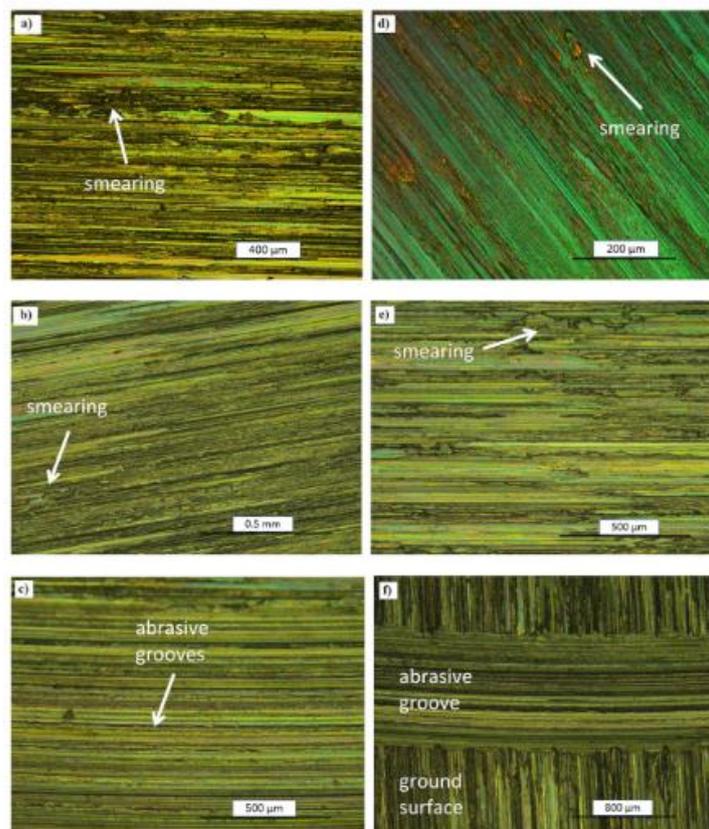


Figura 6.10. Imágenes ópticas de superficies desgastadas de especímenes de acero inoxidable 17-4PH en diversas condiciones: (a) LB-PBF en seco 10 N, (b) LB-PBF en seco 30 N, (c) LB-PBF lubricado 30 N, (d) CM seco 10 N, (e) CM seco 30 N, (f) CM lubricado 30 N. [26]

En las imágenes (a) y (d) de la figura 6.10., que son del ensayo en seco con una carga de 10 N, se puede observar una superficie menos desgastada en comparación con las imágenes (b) y (e), en las que la carga es de 30 N. Tanto (a), (b), (d) y (e) son en condición seca, y en ellas aparecen marcas de adherencia y rayado, esto se aprecia en las zonas donde la superficie parece estar manchada.

En las figuras (c) y (f), las superficies muestran menos desgaste que en las anteriores, y este parece estar dominado por la abrasión, como indican las claras marcas de los surcos.

En general, las imágenes son similares para LB-PBF y CM.

e) Análisis con microscopio electrónico de barrido (SEM).

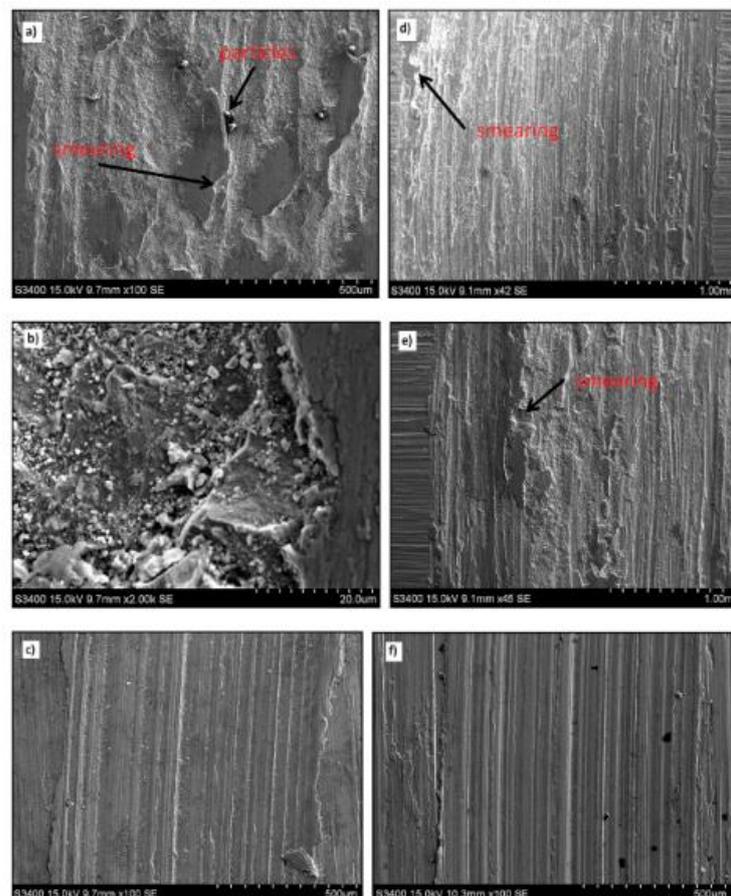


Figura 6.11. Imágenes SEM de superficies desgastadas de probetas LB-PBF y CM de acero inoxidable 17-4PH en diversas condiciones: (a) LB-PBF en seco 10 N, (b) LB-PBF en seco 30 N, (c) LB-PBF lubricado 30 N, (d) CM en seco 10 N, (e) CM en seco 30 N, y (f) CM lubricado 30 N. [26]

Las imágenes SEM de las superficies desgastadas de la figura 6.11. muestran que, en la condición seca, ambas probetas presentan desgaste adhesivo y por rozamiento, aunque la muestra LB-PBF parece estar más oxidada. Además, el espécimen CM tiene una superficie relativamente menos desgastada, lo que podría estar relacionado con la debilidad en la unión entre las capas del proceso LB-PBF o por la presencia de rugosidad y poros atrapados por el gas en la muestra. En la condición lubricada, ambas probetas presentan un desgaste similar dominado por la abrasión y menor que en la condición en seco.

7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

7.1. INTRODUCCIÓN.

La metodología experimental que se llevó a cabo en los laboratorios de la Escuela de Ingenierías de la Universidad de León y en los laboratorios de materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, consistió en la fabricación por SLM de 8 muestras de acero inoxidable 17-4PH, mediante estrategia hexagonal. De estas muestras, 4 fueron sometidas a tratamientos térmicos, mientras que las otras 4 no. A continuación, se realizaron ensayos de desgaste a las muestras, dividiéndolas en 4 grupos: dos con tratamientos térmicos y dos sin tratamientos. Los ensayos se llevaron a cabo en la superficie a favor de capa, y la superficie a contra capa. Finalmente, se midieron las durezas de las muestras y se analizaron las huellas utilizando un rugosímetro y con el microscopio electrónico.

7.2. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas serán cubos normalizados de 10x10x10mm. Estas se fabricaron por un método aditivo, concretamente por SLM (Selective Laser Melting), cuyo procedimiento fue explicado anteriormente. La estrategia elegida finalmente fue la hexagonal.



Figura 7.1. Fotografía de la máquina de fabricación SLM de la Escuela de Ingenierías (Edificio MIC). [Imagen de elaboración propia]

La máquina utilizada para la fabricación de las probetas es la que aparece a la izquierda de la figura 7.1., modelo Phoenix pro x100, de la marca 3D System. La longitud de onda de su láser (λ) es de 1070 nm, con una potencia de 50 W. A su izquierda se encuentra la máquina tamizadora, la cual está unida a la máquina de SLM a través de unos tubos que aspiran el polvo que no se ha fundido en el proceso, lo pasa por una tolva y lo mete en recipientes para poder aprovecharlo posteriormente.

Se obtuvo la placa mostrada en la figura 7.2., sobre la que se encuentran pegadas las ocho probetas de acero.



Figura 7.2. Fotografía de la placa con los ocho cubos de acero 17-4PH fabricados por SLM. [Imagen de elaboración propia]

Las manchas que se aprecian se deben al tratamiento aplicado para la relajación de tensiones. Este se realiza a 650°C dos horas en el horno, y a continuación se dejan enfriar al aire.

7.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Posteriormente se procede a la preparación las muestras para realizar los ensayos. En primer lugar, se separaron los cubos de la placa, los cuales tenían aproximadamente 1mm más para tener margen a la hora de realizar el corte. Esto se llevó a cabo con la máquina de corte por hilo (Fig 7.3.), que a través de microdescargas realiza el corte.



Figura 7.3. Fotografía de la máquina de corte por hilo. [Imagen de elaboración propia]

La máquina de electroerosión es usada para cortar metales como el grafito, el aluminio o el acero. Con el hilo, en este caso de latón con un diámetro de 0,25mm y se aprecia en la figura 7.4., se pueden cortar grosores de hasta 250mm (como indica el modelo, E250).



Figura 7.4. Fotografía de la placa colocada en la máquina de corte por hilo. [Imagen de elaboración propia]

El hilo se acerca unos $800\mu\text{m}$ a la placa. A continuación, se procede al corte de las piezas utilizando microdescargas. Durante este proceso, se rocía agua sobre la pieza y los cubos caen a medida que son separados de la placa.

Como se mencionó previamente, algunas de las piezas serán sometidas a tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación. Las que no van a ser tratadas térmicamente, pasarán directamente a la siguiente etapa, el corte.

Se aplicarán tratamientos térmicos a cuatro de las muestras, por lo que estos se llevan a cabo antes de cortarlas por la mitad.

Para evitar la formación de cascarilla alrededor de la pieza, se utiliza un horno con inyección de nitrógeno (Figura 7.5.).

Como se indica en la tabla 7.1., se sigue un proceso secuencial en el tratamiento de las muestras. En primer lugar, se realiza la relajación de tensiones, tratamiento aplicado a todas las muestras. Su objetivo es, minimizar las tensiones residuales presentes en la pieza, con el fin de reducir el riesgo de cambios dimensionales y fisuras durante su uso. Es importante destacar que este tratamiento no modifica la estructura del material ni afecta de forma significativa a su dureza [27]. A continuación, se lleva a cabo la etapa de puesta en solución. Esta consiste en calentar la pieza a una temperatura específica, en este caso a 1100°C, y mantenerla a esa temperatura durante el tiempo suficiente para que uno o más componentes entren en una solución sólida. Posteriormente, se realiza un enfriamiento rápido para preservar las propiedades de la solución [28]. Por último, se realiza el proceso de envejecimiento, que es un tratamiento de endurecimiento. En esta etapa, se busca aumentar la dureza y la resistencia de la aleación [29].



Figura 7.5. Fotografía del horno en el que se llevaron a cabo los tratamientos térmicos. [Imagen de elaboración propia]

Tratamiento térmico	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Enfriamiento
Relajación de tensiones	650	2	Al aire
Puesta en solución	1100	1	Al aire
Envejecimiento	480	1	Al aire

Tabla 7.1. Tratamientos térmicos aplicados.

A continuación, se procede al corte de las muestras utilizando la máquina cortadora mostrada en la figura 7.6. Las muestras necesarias para los ensayos deben ser de 5mm, por lo tanto, se procede a cortar los cubos por la mitad, teniendo en cuenta la superficie por la cual se realiza el corte. Esto es crucial, ya que algunos se desgastarán a favor de capa, mientras que otros lo harán en contra de esta.



Figura 7.6. Fotografía de la máquina cortadora metalográfica. [Imagen de elaboración propia]

Tras ser cortadas, las muestras fueron encapsuladas en resina, como se muestra en la figura 7.7., y posteriormente, desbastadas y pulidas en la pulidora de la figura 7.8. para que el metal quedase visto por los lados del encapsulado y con los mínimos defectos posibles.

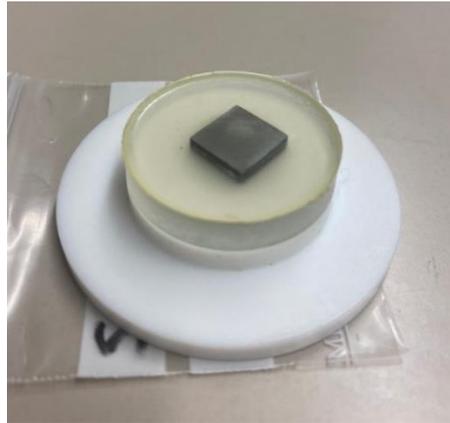


Figura 7.7. Fotografía de la muestra de acero encapsulada en resina. [Imagen de elaboración propia]

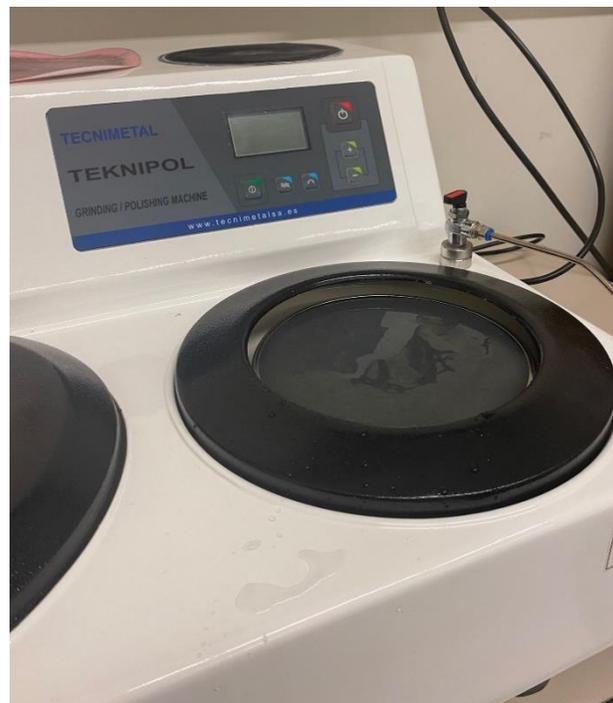


Figura 7.8. Fotografía de la pulidora metalográfica. [Imagen de elaboración propia]

Los discos de pulido utilizados tienen diferentes tamaños de grano. Se utilizaron varios tipos de discos, principalmente el P240, para pulir capas más gruesas, P800, P1200, P2500 y P4000 para un pulido más fino y superficial (cuanto mayor sea el número de este, más fino será el grano). La máquina pulidora cuenta con un chorro de agua que incide sobre el disco. Este va girando a la vez que pule la pieza, en este caso entre 300 y 400 rpm.

Con este último paso, las muestras ya están preparadas para la medición de las durezas y seguidamente para la realización de los ensayos de desgaste. Cabe destacar que, tras medir la dureza, la probeta será pulida de nuevo para quitar las huellas que ha dejado la punta de diamante sobre ellas y que no influyan en los resultados del ensayo, aunque estas sean prácticamente imperceptibles para la vista.

7.4. MEDICIÓN DE MICRODUREZA Y MACRODUREZA.

Tras tener las muestras preparadas, se procede a medir su dureza. Y de esta manera poder comprobar si los tratamientos térmicos aplicados anteriormente han influido en este parámetro.

En primer lugar, con el microdurómetro de la figura 7.10., se mide la microdureza Vickers de la probeta. Este consta de un cabezal con una punta de diamante (Fig. 7.11.), que es la que incide sobre la superficie aplicando una carga que, en este caso, es de 200 kg_f ($1961,33 \text{ N}$), durante 30 s. Tras retirar la punta, se aprecia la huella que deja sobre la pieza y se mide para así evaluar la deformación generada.

La dureza Vickers (fórmula 7.1) es proporcional al cociente obtenido al dividir la fuerza de ensayo entre el área de las caras de la huella, que es una pirámide recta de base cuadrada, con el mismo ángulo en el vértice que el indentador.

$$\begin{aligned} \text{Dureza Vickers} &= \text{Constante} \times \frac{\text{Fuerza de ensayo}}{\text{Área de la huella}} = 0,102 \times \frac{2 F \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \\ &= 0,1891 \frac{F}{d^2} \end{aligned} \tag{7.1}$$

La figura 7.9. muestra los parámetros de la dureza Vickers, siendo α el ángulo entre las caras opuestas en el vértice del indentador piramidal (136°), F la fuerza de ensayo en newtons (N), y d_1 y d_2 las longitudes de las diagonales de la huella.

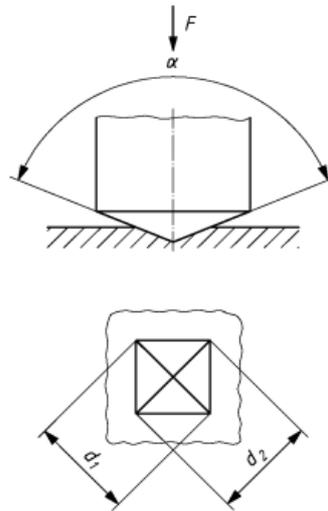


Figura 7.9. Parámetros de la dureza Vickers. [UNE-EN ISO 6507-1]

Una vez observada la huella (Fig. 7.12.), se miden las dos diagonales (d_1 y d_2), y el microdurómetro proporciona la dureza Vickers (HV), y en este caso también la conversión a dureza Rockwell C (HRC). Se realizaron diez mediciones en cada muestra, dejando entre huella y huella al menos dos dimensiones, y descartando la medida más alta y más baja de las obtenidas.



Figura 7.10. Fotografía del microdurómetro utilizado en el laboratorio. [Imagen de elaboración propia]

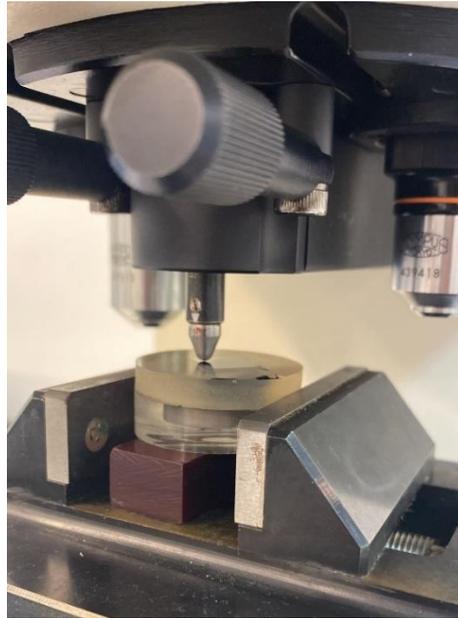


Figura 7.11. Fotografía de la punta de diamante incidiendo sobre la muestra. [Imagen de elaboración propia]

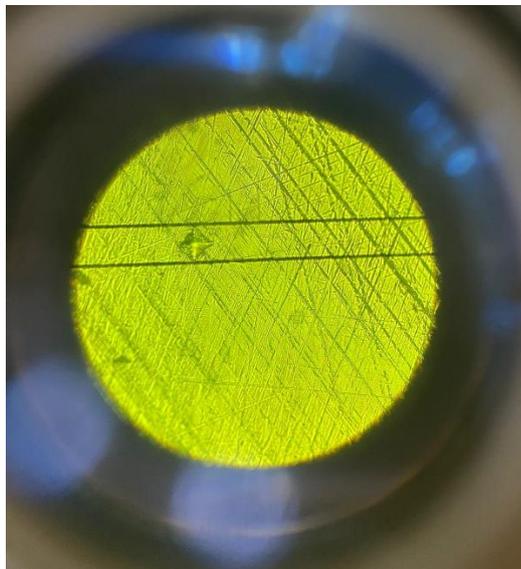


Figura 7.12. Fotografía de la huella producida por la punta de diamante. [Imagen de elaboración propia]

A continuación, se procede a medir la macrodureza de las piezas en el macrodurómetro de la figura 7.13. En este caso solo habrá distinción entre las que tienen tratamiento térmico y las que no. Ya que se hacen las medidas en los cubos sin cortar (a favor de la capa o en contra).

La carga aplicada es de 150 kg, y se repiten cuatro veces las mediciones, tres de ellas formando un triángulo equilátero y la cuarta en el centro de las anteriores, para ver que esta última sea aproximadamente una media de las otras tres. En este caso, el indentador tiene también una punta de diamante, ya que es así como la indica la norma.

El procedimiento consta de varios pasos. El primero de ellos es aplicar la precarga, que son 10 kg, y se hace de forma manual, girando la plataforma, hasta que una de las agujas de un indicador llegue a un punto concreto. A continuación, se baja la palanca que se encuentra en un lateral, y así aplicar toda la carga. Pasado unos segundos, cuando la máquina lo permita, hay que levantar la carga y el indicador nos proporcionará los datos de la deformación plástica que ha sufrido la pieza.



Figura 7.13. Fotografía del macrodurómetro utilizado. [Imagen de elaboración propia]

7.5. ENSAYOS DE DESGASTE.

Se procede a llevar a cabo los ensayos de desgaste circular. Estos se realizarán en las diferentes muestras: sin tratamiento térmico a favor de capa y a contra capa y con tratamiento térmico a favor y en contra de la capa. Se harán unos tres ensayos por cada tipo para así poder promediar los resultados y evitar grandes errores.

En la figura 7.14. se observa el tribómetro pin-on-disk manual que se utilizó para realizar todos los ensayos de desgaste. La marca del aparato es Microtest, el modelo SMT-A/0100, y el número de serie B0100-24.



Figura 7.14. Fotografía del tribómetro para realizar los ensayos de desgaste circular. [Imagen de elaboración propia]

El procedimiento se llevó a cabo con una bola de alúmina de 6 mm de diámetro, a 150 rpm, recorriendo una distancia de 200 m, lo cual conllevó unos 4200 s. Y el peso aplicado en el pin era de 2 N. Los parámetros establecidos para la ejecución del ensayo están reflejados en la tabla 7.2.

Parámetros de ejecución del ensayo	
Material de la bola	Alúmina
Material del disco	Acero inoxidable 17-4PH
Diámetro de la bola (mm)	6
Velocidad de giro (rpm)	150
Distancia recorrida (m)	200
Peso aplicado en pin (N)	2

Tabla 7.2. Parámetros de ejecución del ensayo.

Como se puede apreciar en la figura 7.15., el pin, que está sujeto a un brazo con contrapesos, se posiciona perpendicular a la muestra con una carga concreta. La muestra debe de estar sujeta al disco de la base con las mordazas. Una vez puesto en marcha el ensayo, por la acción del motor de la máquina, tanto el pin como la muestra giran entre sí, formándose la huella de desgaste en la probeta.



Figura 7.15. Fotografía del ensayo de desgaste circular en marcha. [Imagen de elaboración propia]

7.5.1. PÉRDIDA DE MASA.

Las muestras se pesaron en la báscula de la figura 7.16. antes y después de cada ensayo para así calcular la pérdida de masa. Al ser de alta precisión, es necesario cerrar la cabina de cristal con la pieza en el interior para aislarla y evitar cualquier alteración del exterior, así como no apoyarse o no causar movimientos cercanos a la báscula.

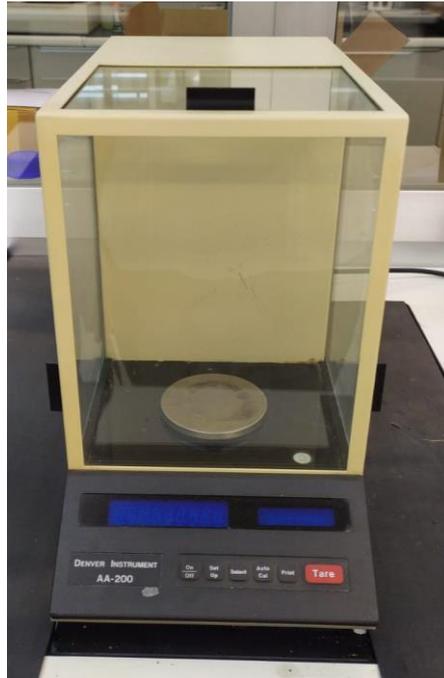


Figura 7.16. Fotografía de la báscula usada para pesar las muestras. [Imagen de elaboración propia]

7.5.2. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO.

Como su propia definición dice, este coeficiente indica la resistencia al movimiento relativo entre dos superficies. La fricción provoca desgaste, por lo que cuanto menor es el coeficiente de rozamiento, más fácil se deslizará una superficie sobre la otra [30].

Como se mencionó anteriormente, el rozamiento o fricción no son una propiedad del material, sino respuesta al sistema tribológico. Por lo que este parámetro depende de otros factores como la humedad, la velocidad de giro, la presión de contacto o el acabado superficial de la pieza.

En nuestro caso, se ha considerado el valor medio del coeficiente de rozamiento en los últimos 50 m del ensayo.

7.5.3. PENETRACIÓN.

La penetración que se ha tenido en cuenta es el promedio de las máximas profundidades alcanzadas durante los procesos en mm. Esta es la distancia máxima que el indentador se ha introducido o hundido sobre la superficie de la muestra durante el ensayo.

7.6. ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD.

A continuación, con el uso de un rugosímetro, se realiza un análisis de la rugosidad y el perfil de la huella causada por el ensayo de desgaste. En la figura 7.17. se muestra el perfilómetro-rugosímetro utilizado para el análisis del perfil de la huella en las muestras. Este consta, entre otros elementos, de un palpador, cuya punta tiene un radio de $2\ \mu\text{m}$ y un ángulo de 60° .



Figura 7.17. Fotografía del perfilómetro-rugosímetro utilizado para el análisis. [Imagen de elaboración propia]

En la figura 7.18. aparecen las condiciones de medida que se han establecido para realizar el análisis.

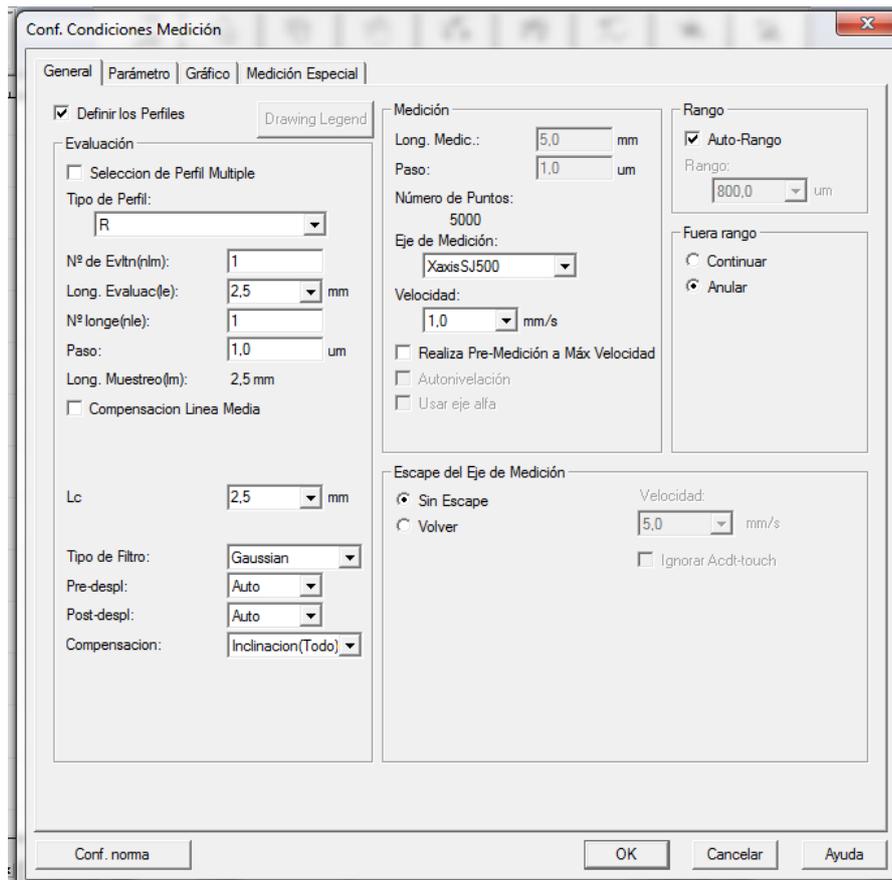


Figura 7.18. Condiciones de medida del rugosímetro-perfilómetro. [Imagen de elaboración propia]

El palpador avanza a una velocidad constante, registrando en la pantalla el perfil de la huella. Se llevaron a cabo dos mediciones para cada tipo de muestra: sin tratamiento térmico, tanto a favor de capa como a contra capa, y con tratamiento térmico, también en ambas direcciones. Cada medición se realizó en una pieza distinta, con el fin de obtener múltiples referencias y minimizar posibles errores significativos en el análisis.

7.7. ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

Se procede a analizar las muestras en el microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope). El modelo utilizado es el JSM-6480LV de la marca Jeol, el cual se muestra en la figura 7.19. Este tipo de microscopios emplean un haz de electrones para obtener imágenes de alta resolución (con un rango de aumentos entre 23 y 300000) y en apariencia tridimensional, lo que permite observar y caracterizar las texturas y composición química de las superficies.

Previamente a su análisis, las muestras se preparan con una cinta de carbono para conferirles conductividad, tal y como se puede ver en la figura 7.20. La distancia de trabajo es entre 10 y 13 mm. Una vez está todo preparado para iniciar el análisis, el haz de electrones acelerados mediante un cañón recorre la pieza, realizando un barrido en las direcciones x e y. Durante este proceso, los electrones interactúan entre sí y con los átomos de la muestra a distintas profundidades. Los choques generados por esta interacción provocan la emisión de electrones secundarios, los cuales son principalmente detectados y utilizados para formar las imágenes [31], [32].



Figura 7.19. Fotografía del SEM utilizado para el estudio de las muestras. [Imagen de elaboración propia]

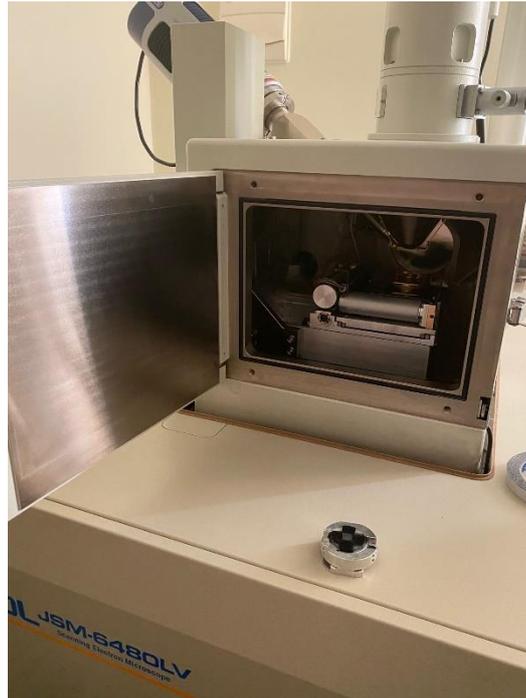


Figura 7.20. Fotografía del interior de la cámara del microscopio y de la muestra con la cinta de carbono. [Imagen de elaboración propia]

A continuación, en la figura 7.21. se puede ver un esquema del funcionamiento del SEM.

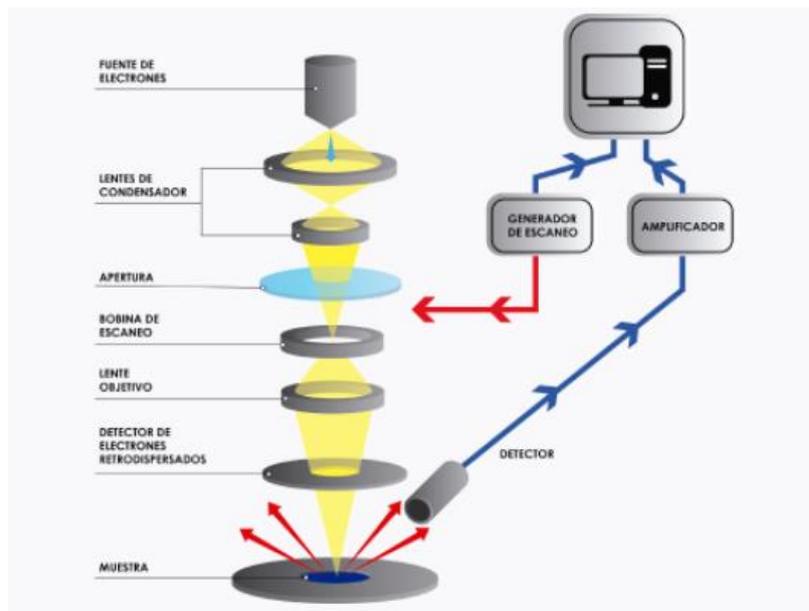


Figura 7.21. Esquema del funcionamiento del SEM. [33]

8. RESULTADOS.

8.1. DUREZA.

8.1.1. MICRODUREZA.

Las tablas 8.1., 8.2., 8.3. y 8.4. muestran los resultados obtenidos en la medición de la microdureza de las piezas.

Microdureza de las muestras sin tratamiento térmico y a favor de capa				
Nº de medición	d_1 (μm)	d_2 (μm)	HV	HRC
1	30,5	30,3	401,3	40,9
2	30,9	31,3	383,4	39,1
3	32,7	33,9	334,4	33,8
4	32,3	31,3	366,7	37,4
5	31,4	29,5	399,9	40,7
6	28,9	29,9	429	43,5
7	30,6	29,1	416,2	42,3
8	32,2	31,9	361	36,7
Valor medio			386,5 HV 200 /30	39,3 HRC

Tabla 8.1. Microdureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico y corte a favor de capa. [Elaboración propia]

Microdureza de las muestras sin tratamiento térmico y a contra capa				
Nº de medición	d_1 (μm)	d_2 (μm)	HV	HRC
1	30,3	30	407,9	41,5
2	32,4	31,4	364,4	37,1
3	32,2	30,9	372,5	38
4	34,9	33,3	318,9	32,1
5	30,6	29,3	413,4	42,1
6	29,5	29,7	423,3	43
7	29,7	29,9	417,6	42,5
8	31,8	31,8	366,7	37,4
Valor medio			385,6 HV 200 /30	39,2 HRC

Tabla 8.2. Microdureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico y corte perpendicular a la capa. [Elaboración propia]

Microdureza de las muestras con tratamiento térmico y a favor de capa				
Nº de medición	d_1 (μm)	d_2 (μm)	HV	HRC
1	30,4	30,8	396	40,4
2	30,1	30,5	403,9	41,1
3	29,9	30,2	410,7	41,8
4	31,5	31,7	371,4	37,9
5	30,8	30,1	399,9	40,7
6	30,5	31,2	389,6	39,7
7	30,6	30,4	398,6	40,6
8	29,5	30,3	414,8	42,2
Valor medio			398,1 HV 200 /30	40,6 HRC

Tabla 8.3. Microdureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico y corte a favor de capa. [Elaboración propia]

Microdureza de las muestras con tratamiento térmico y a contra capa				
Nº de medición	d_1 (μm)	d_2 (μm)	HV	HRC
1	30,4	30,5	399,9	40,7
2	30,5	30	405,3	41,3
3	28,7	29,6	436,4	44,2
4	29,5	29,2	430,5	43,6
5	30,3	30,8	397,3	40,5
6	30,2	29,8	412	42
7	29,3	30,1	420,4	42,7
8	29,9	29,8	416,2	42,3
Valor medio			414,8 HV 200 /30	42,2 HRC

Tabla 8.4. Microdureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico y corte perpendicular la capa. [Elaboración propia]

8.1.2. MACRODUREZA.

Las tablas 8.5. y 8.6. reflejan los resultados de las mediciones de la macrodureza de las muestras sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico, respectivamente.

Macro dureza de las muestras sin tratamiento térmico				
Nº de medición	1	2	3	4
HRC	21,8	30,5	32,5	30,8
Valor medio				28,9 HRC

Tabla 8.5. Macro dureza obtenida de la muestra sin tratamiento térmico. [Elaboración propia]

Macro dureza de las muestras con tratamiento térmico				
Nº de medición	1	2	3	4
HRC	29,5	32	32,9	36,9
Valor medio				32,8 HRC

Tabla 8.6. Macro dureza obtenida de la muestra con tratamiento térmico. [Elaboración propia]

En la figura 8.1. se presentan y comparan los valores medios de las durezas de las muestras. En la parte izquierda, de color rosa, se muestra la microdureza, mientras que, en la parte derecha, de color amarillo, se muestra la macrodureza, ambas medidas en la escala HRC. En primer lugar, en la figura se puede observar la comparación de los valores medios de las durezas de las muestras. En la primera columna se encuentra la muestra sin tratamientos térmicos y cortada a favor de capa, con un valor de 39,3 HRC. La siguiente columna corresponde a la muestra sin tratamientos térmicos y cortada a contra capa, con un valor de 39,2 HRC. En este caso, la diferencia de dureza entre la muestra cortada a favor de capa y cortada en contra de la capa es despreciable.

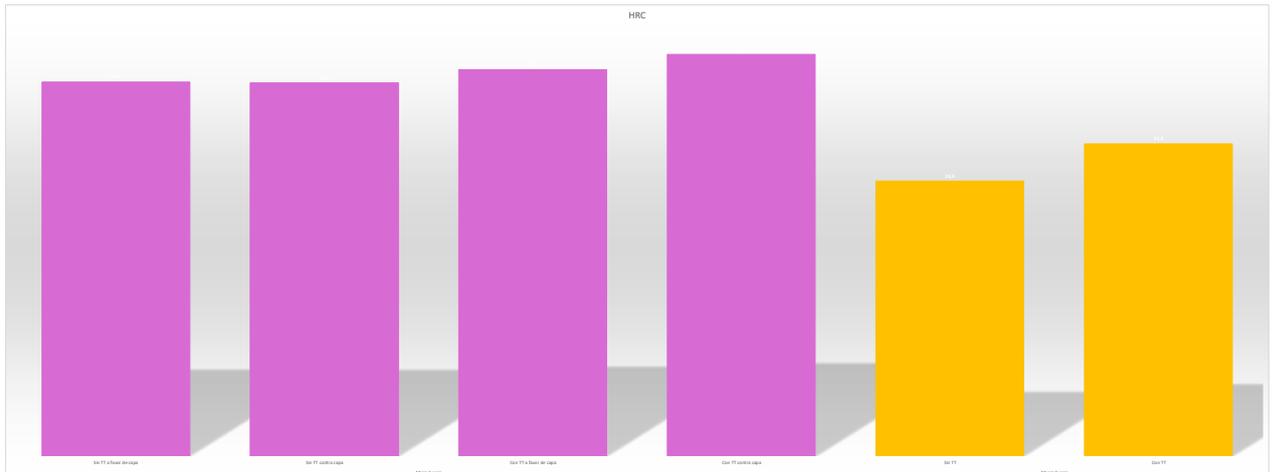


Figura 8.1. Gráfico de comparación de los valores medios de la microdureza y macrodureza de las muestras.
[Elaboración propia]

La tercera columna muestra la microdureza de la muestra tratada térmicamente y cortada a favor de capa, con un valor de 40,6 HRC. La columna siguiente corresponde a la muestra con tratamientos térmicos y cortada en contra de la capa, con un valor de 42,2 HRC. De nuevo, se observa muy poca diferencia de dureza entre estas dos muestras.

Las últimas dos columnas representan la microdureza, siendo la columna de la izquierda para la muestra sin tratamiento térmico (28,9 HRC) y la columna de la derecha para la muestra con tratamiento térmico (32,8 HRC).

En cuanto a la microdureza, se aprecia una diferencia mínima entre los resultados. Las piezas con tratamiento térmico muestran una microdureza ligeramente superior a las muestras sin tratamiento, aunque esta diferencia es mucho menor de lo esperado.

Por otro lado, la macrodureza de las muestras con tratamiento térmico también es mayor que la de las piezas sin tratamiento. Sin embargo, el efecto de los tratamientos térmicos es significativamente inferior a las expectativas.

Esta falta de eficacia de los tratamientos térmicos podría tener varias explicaciones. Entre ellas, podría deberse a la entrada de aire al horno por falta de aislamiento o una calibración incorrecta del equipo. No obstante, la razón más relevante en este caso podría ser debido al tamaño tan reducido de las muestras, que probablemente hayan vuelto a su estado inicial tras ser sometidas a los tratamientos térmicos indicados y es por eso por lo que las durezas son similares en todos los casos.

8.2. ENSAYOS DE DESGASTE.

8.2.1. PÉRDIDA DE MASA.

La figura 8.2. muestra la pérdida de masa promedio experimentada por las muestras, es decir, la cantidad de material que se desprendió de la superficie durante el ensayo. En esta figura se presentan los siguientes datos de izquierda a derecha: en primer lugar, las muestras sin tratamiento térmico y cortadas a favor de capa muestran una media de pérdida de masa de 0,0045 g; a continuación, se observa la pérdida de masa en las muestras sin tratamiento y cortadas a contra capa, con 0,007 g; en tercer lugar, se encuentran las muestras con tratamiento térmico y cortadas a favor de capa, con una pérdida de 0,0062 g; y por último las muestras con tratamiento térmico y a contra capa, presentan una pérdida de 0,007 g.



Figura 8.2. Gráfico de comparación del valor promedio de la pérdida de masa de las muestras. [Elaboración propia]

MUESTRA	PÉRDIDA DE MASA (g)
SIN TT CAPA	0,0045
SIN TT CONTRACAPA	0,007
CON TT CAPA	0,0062
CON TT CONTRACAPA	0,007

Tabla 8.7. Valores promedio obtenidos de la pérdida de masa de las muestras. [Elaboración propia]

Los resultados revelan que existe una diferencia en la pérdida de masa entre las piezas cortadas a favor y en contra de la capa, así como entre las piezas con y sin tratamiento térmico. Es importante destacar que la pérdida de masa es mayor en las piezas cortadas en contra de la capa en comparación con las piezas cortadas a favor de capa. Esto indica que el proceso de corte en contra de la capa puede generar un mayor desprendimiento de material de la superficie, debido posiblemente a que las piezas cortadas a contra capa presentan más asperezas o irregularidades en su superficie, lo que supone una mayor pérdida de masa.

Además, como ya se ha comentado anteriormente se observa que las piezas con tratamiento térmico también presentan una mayor pérdida de masa en comparación con las piezas sin tratamiento térmico. Esto sugiere que el tratamiento térmico puede tener un efecto en la adhesión del material, aumentando la propensión a la pérdida de masa durante el ensayo.

8.2.2. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO.

Los resultados se muestran en el gráfico de la figura 8.3. y en la tabla 8.8. Estos resultados muestran que las muestras con tratamientos térmicos presentan un coeficiente de rozamiento ligeramente menor en comparación con las muestras sin tratamiento térmico. Esta diferencia sugiere que las superficies tratadas térmicamente tienen una mejor capacidad de deslizamiento en contacto con la bola utilizada en el ensayo.

Es importante destacar que la fuerza aplicada durante el ensayo fue la misma para todas las muestras, al igual que las demás condiciones del ensayo. Por lo tanto, la diferencia en los coeficientes de rozamiento no puede atribuirse a la variación en estas condiciones.

Se puede inferir que el tratamiento térmico ha generado cambios en las propiedades de la superficie de las muestras, lo que ha influido en la reducción del coeficiente de rozamiento. Es posible que el tratamiento térmico haya modificado la rugosidad, la composición superficial o la estructura de la superficie de las muestras, lo que a su vez ha mejorado la capacidad de deslizamiento entre estas y la bola.



Figura 8.3. Gráfico de comparación del valor promedio de los coeficientes de rozamiento. [Elaboración propia]

MUESTRA	CoF
SIN TT CAPA	0,9263
SIN TT CONTRACAPA	0,9024
CON TT CAPA	0,7223
CON TT CONTRACAPA	0,8795

Tabla 8.8. Valores promedio obtenidos del coeficiente de rozamiento (CoF) en los ensayos. [Elaboración propia]

Los coeficientes de rozamiento más altos observados podrían deberse a la presencia de huellas con irregularidades excesivas en las muestras. Esta situación podría ser el resultado de un fallo en el proceso o una mala calibración de la máquina de ensayos, lo que generaría fuerzas de fricción mayores.

En el caso específico de la muestra sin tratamiento térmico y cortada en contra de la capa, se observó una marcada presencia de capa de óxido (Figura 8.17.). Esta capa de óxido puede ser un factor explicativo del alto valor del coeficiente de rozamiento.

La presencia de una capa de óxido en la superficie de la muestra puede generar una mayor resistencia al deslizamiento, lo que se traduce en un aumento del coeficiente de rozamiento. Esta capa de óxido puede formarse debido a la exposición de la muestra a condiciones ambientales desfavorables o a la presencia de impurezas en el material. Es importante considerar que la presencia de esta capa de óxido puede alterar las propiedades de la superficie, lo que a su vez afecta la fricción y el deslizamiento entre la muestra y la bola utilizada en el ensayo.

8.2.3. PENETRACIÓN.

Se aprecian los resultados de forma visual en la figura 8.4., y los valores numéricos en la tabla 8.9. Se observa que la penetración es mayor en las superficies que están cortadas a favor de la capa, lo que indica que el pin ha profundizado más en estas áreas. Por lo tanto, se puede inferir que las piezas cortadas a favor de la capa exhiben una mayor tenacidad y capacidad para soportar la deformación plástica en comparación con las piezas cortadas en contra de la capa.



Figura 8.4. Gráfico de comparación de la penetración máxima obtenida en cada ensayo. [Elaboración propia]

MUESTRA	PENETRACIÓN (mm)
SIN TT CAPA	0,114
SIN TT CONTRACAPA	0,0607
CON TT CAPA	0,103
CON TT CONTRACAPA	0,0834

Tabla 8.9. Valores promedio de la penetración máxima obtenida en los ensayos. [Elaboración propia]

La mayor penetración en las piezas cortadas a favor de la capa puede deberse a varios factores. En primer lugar, el corte a favor de la capa permite que las capas del material se separen más fácilmente, lo que facilita la deformación plástica y el desplazamiento del pin en la muestra. Esto implica que la resistencia al desplazamiento del material es menor en estas áreas. Además, el corte a favor de la capa puede minimizar la interacción entre las diferentes capas del material, lo que a su vez reduce la resistencia al avance del pin y

favorece una mayor penetración. Esto se debe a que las capas del material están más alineadas en la dirección del corte a favor de la capa, lo que permite una mayor facilidad de deslizamiento y deformación plástica.

En contraste, las piezas cortadas en contra de la capa presentan una menor penetración, lo que indica una mayor resistencia al avance del pin y una menor capacidad de deformación plástica. Esto puede ser atribuido a la interacción más intensa entre las capas del material, lo que genera una mayor resistencia al desplazamiento y una mayor tendencia a la fractura o a la formación de fisuras en la superficie.

8.3. RUGOSIDAD.

Las figuras 8.5., 8.6., 8.7. y 8.8. muestran de forma visual los resultados obtenidos de los diferentes tipos de probetas. Y las tablas 8.10., 8.11., 8.12. y 8.13. los valores de la profundidad y ancho de las huellas.

- MUESTRAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO A FAVOR DE CAPA

En la figura 8.5. (1), se observa claramente que la huella es mucho menos profunda y más estrecha en comparación con la de la figura 8.5. (2) y con las del resto de muestras. Esto puede ser debido a fallos en la calibración de la máquina durante algunos ensayos, lo que resultó en huellas de tamaños demasiado grandes o finas, como en este caso en particular.

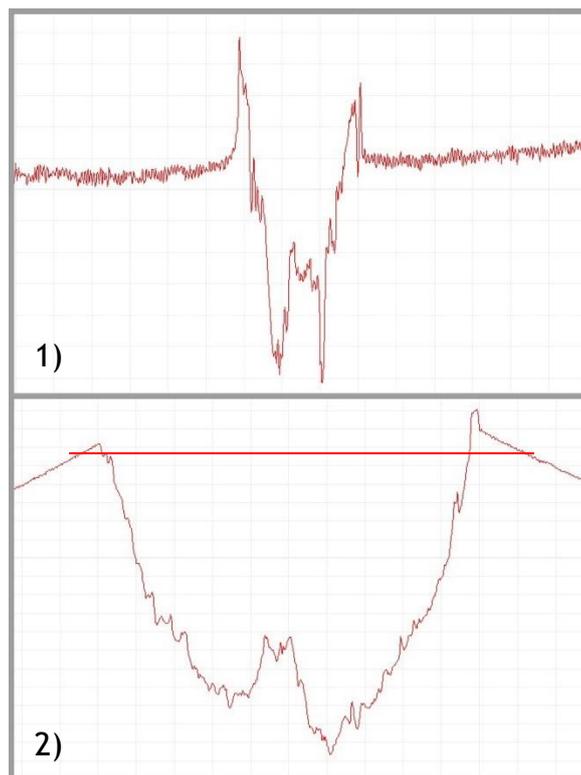


Figura 8.5. Perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

SIN TT A FAVOR DE CAPA 1	Profundidad de huella (μm)	3,9948
	Ancho de huella (mm)	0,321
SIN TT A FAVOR DE CAPA 2	Profundidad de huella (μm)	29,716
	Ancho de huella (mm)	0,988

Tabla 8.10. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a favor de capa. [Elaboración propia]

El área que se encuentra debajo de la línea roja en la Figura 8.5 (2) representa la cantidad de material que ha sido desgastado durante el ensayo. Esta área se utiliza como medida para cuantificar el desgaste experimentado por la muestra en estudio. El desgaste se produce debido a la interacción entre la superficie de la muestra y la carga o fuerza aplicada durante el ensayo. A medida que la carga se aplica repetidamente sobre la superficie, el material comienza a desgastarse y se produce una pérdida de material.

Al trazar la línea roja en la Figura 8.5 (2), se delimita el área que ha sido desgastada. Cuanto mayor sea el área desgastada, mayor será la cantidad de material que se ha perdido durante el ensayo y, por lo tanto, mayor será el desgaste sufrido por la muestra.

Para abordar los problemas encontrados, se tomaron medidas correctivas. Se realizaron ajustes, como modificar el tamaño de la bola, regular la ajustar la carga aplicada y regular ajustar la altura del brazo. Estas modificaciones buscaban obtener huellas más precisas y consistentes en términos de profundidad y anchura.

Es importante mencionar que se consideró la influencia de los ensayos anteriores que se realizaron con muestras de mayor altura. Esto podría haber tenido un impacto en el primer ensayo y haber contribuido a la obtención de una huella anormalmente grande, como la que se muestra en la figura 8.6.

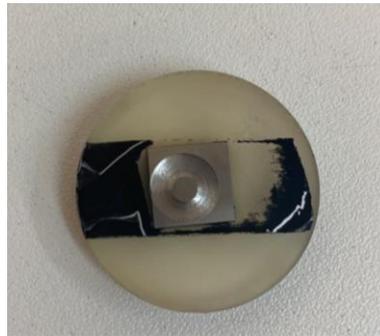


Figura 8.6. Muestra con huella anormalmente grande debido a fallos en el ensayo. [Imagen de elaboración propia]

- MUESTRAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO A CONTRA CAPA

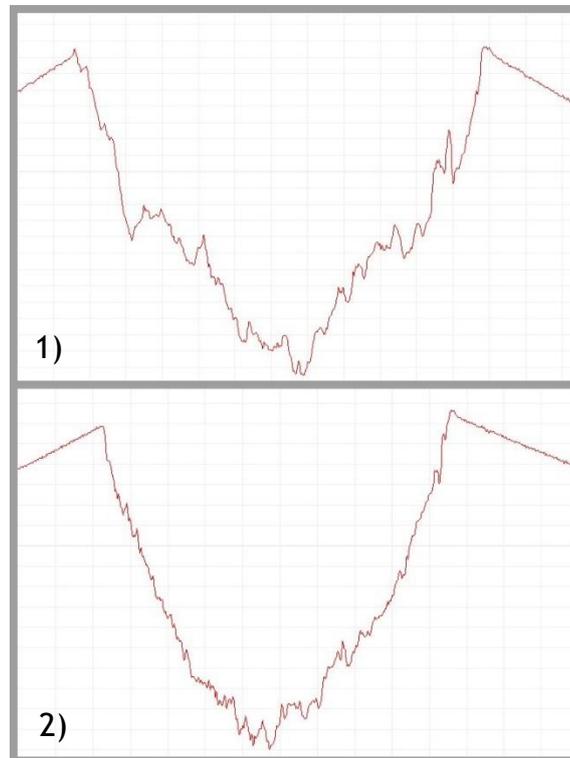


Figura 8.7. Perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

SIN TT A CONTRA CAPA 1	Profundidad de huella (μm)	38,2546
	Ancho de huella (mm)	1,1310
SIN TT A CONTRA CAPA 2	Profundidad de huella (μm)	29,1145
	Ancho de huella (mm)	0,9420

Tabla 8.11. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras sin tratamiento térmico y a contra capa. [Elaboración propia]

- MUESTRAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO A FAVOR DE CAPA

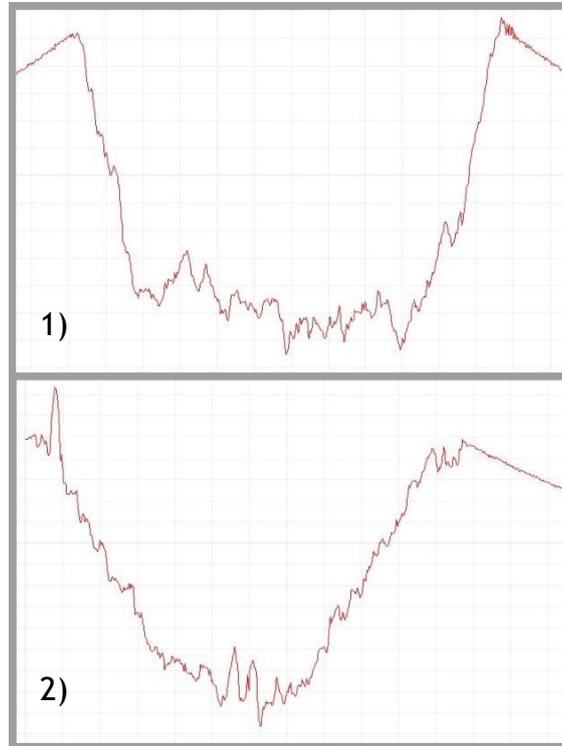


Figura 8.8. Perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

CON TT A FAVOR DE CAPA 1	Profundidad de huella (μm)	20,874
	Ancho de huella (mm)	1,141
CON TT A FAVOR DE CAPA 2	Profundidad de huella (μm)	23,0449
	Ancho de huella (mm)	1,034

Tabla 8.12. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a favor de capa. [Elaboración propia]

- MUESTRAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO A CONTRA CAPA

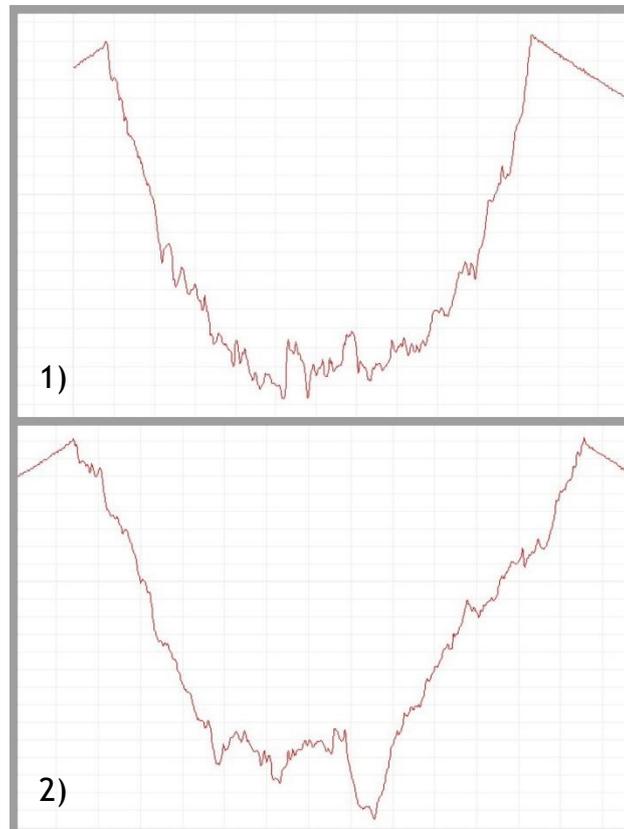


Figura 8.9. Perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

CON TT A CONTRA CAPA 1	Profundidad de huella (μm)	34,7389
	Ancho de huella (mm)	1,05
CON TT A CONTRA CAPA 2	Profundidad de huella (μm)	38,9266
	Ancho de huella (mm)	1,209

Tabla 8.13. Medidas de los perfiles de las huellas de las muestras con tratamiento térmico y a contra capa. [Elaboración propia]

Al observar los valores de dureza y los perfiles de las huellas, se puede apreciar que existe una diferencia mínima entre las muestras que recibieron tratamiento térmico y las que no. Esta falta de diferencia puede atribuirse al hecho de que, a pesar de haber seguido las condiciones de tratamiento recomendadas por el fabricante, los resultados esperados no se han logrado. Una posible explicación podría estar relacionada con el tamaño de las muestras, las cuales podrían haber experimentado un sobrevejecimiento y haber regresado a su estado inicial. El

sobreenvejecimiento se refiere a una condición en la cual el material, después de un proceso de tratamiento térmico, ha alcanzado su estado más estable en términos de propiedades y estructura. Sin embargo, si las muestras son de un tamaño inapropiado, es posible que el proceso de tratamiento térmico no haya sido suficientemente efectivo para lograr los cambios deseados en las propiedades del material. Esto puede deberse a la rapidez con la que se disipa el calor en muestras de menor tamaño, lo que afecta a la eficacia del tratamiento térmico.

8.4. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS CON EL SEM.

Los resultados obtenidos del análisis son los mostrados a continuación. Hay que destacar que los aumentos realizados han sido x70, x250, x330 y x1000.

Las superficies de las muestras han experimentado deformación plástica y tensiones alternas. También se ha observado que, debido al calor de la fricción, las superficies se oxidan, y la mayoría, se delaminan.

- MUESTRAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO A CONTRA CAPA.

En primer lugar, en la figura 8.10. se presenta la muestra con aumentos de x60 y x70, mostrando imágenes a ambos lados de la huella. En la figura 8.10. (2), se puede apreciar una superficie más lisa y homogénea, donde los surcos direccionales de abrasión son más evidentes. En contraste, en la figura 8.10. (1), la superficie es más irregular, con zonas significativas de acumulación de partículas, tal y como se ilustra en la figura 8.12. Estas áreas de acumulación de partículas presentan una mayor presencia de oxígeno, como se muestra en la figura 8.14. En comparación, la figura 8.15 representa la zona “espectro 5” indicada en la figura 8.13., localizada en la superficie más lisa donde la deformación plástica ha tenido lugar.

La diferencia en la presencia de oxígeno entre estas áreas sugiere una relación entre la acumulación de partículas y la presencia de oxígeno en la superficie. La presencia de oxígeno puede ser indicativa de reacciones químicas o de la formación de compuestos en estas zonas específicas de acumulación de partículas.

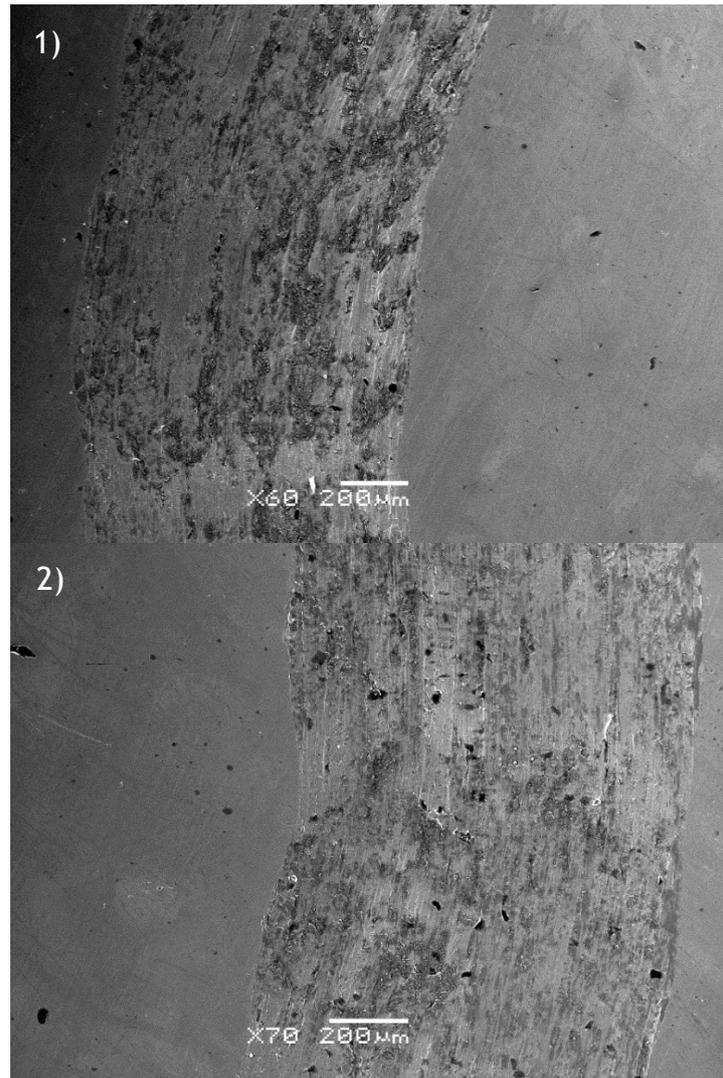


Figura 8.10. Imágenes del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x60 y x70). [Imagen de elaboración propia]

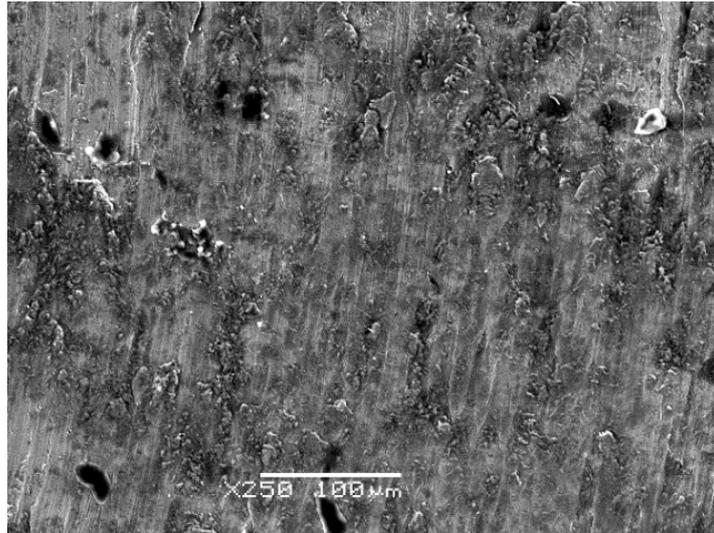


Figura 8.11. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x250). [Imagen de elaboración propia]

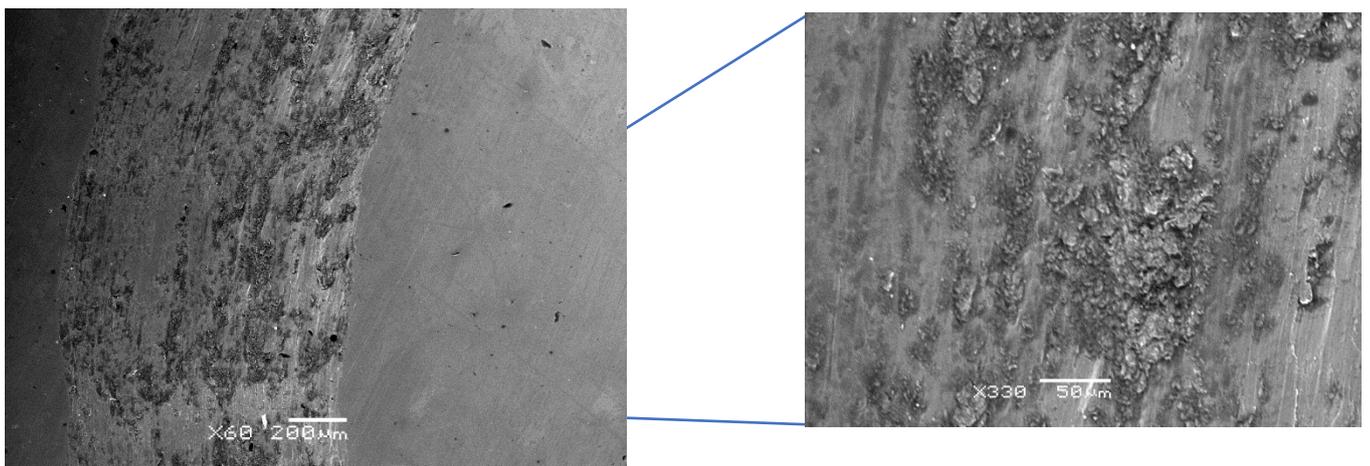


Figura 8.12. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a contra capa (x330). [Imagen de elaboración propia]

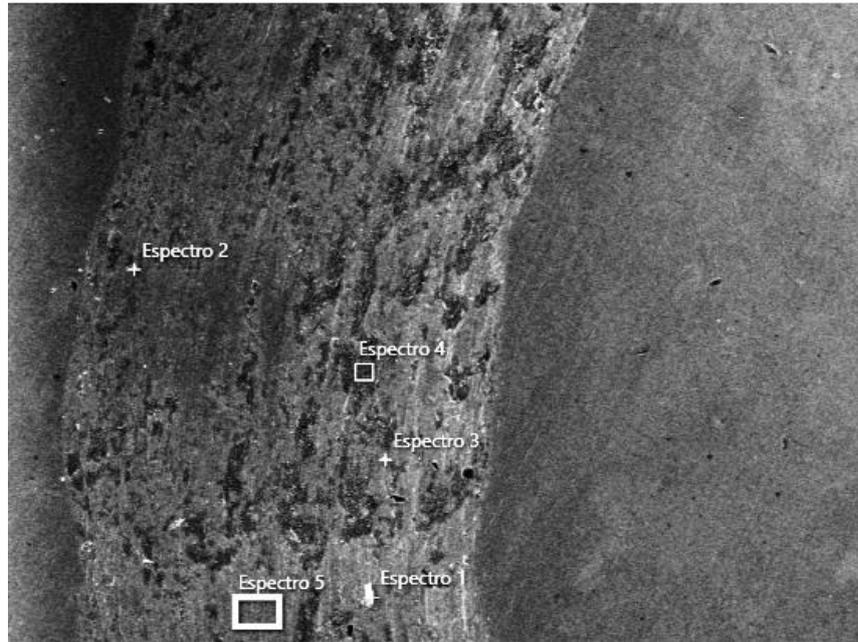


Figura 8.13. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

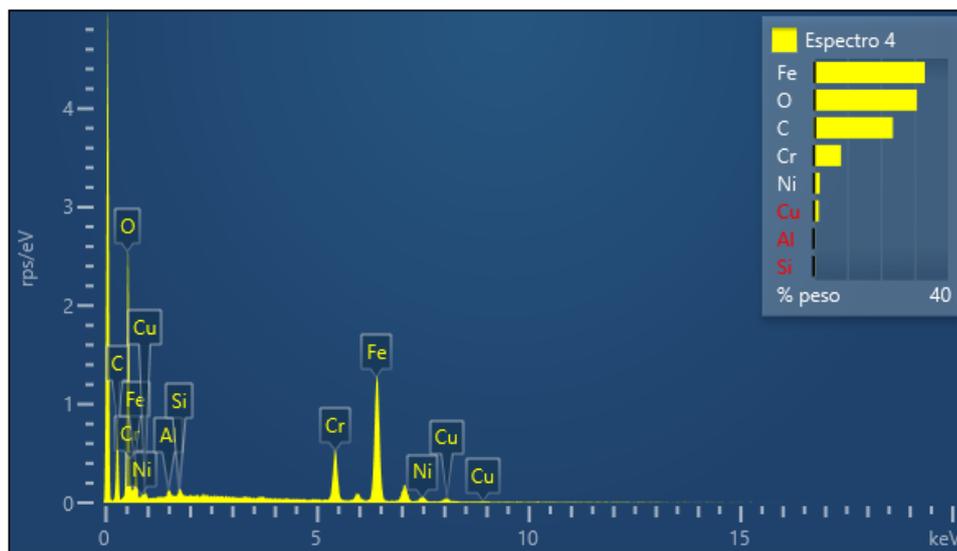


Figura 8.14. Espectro 4 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

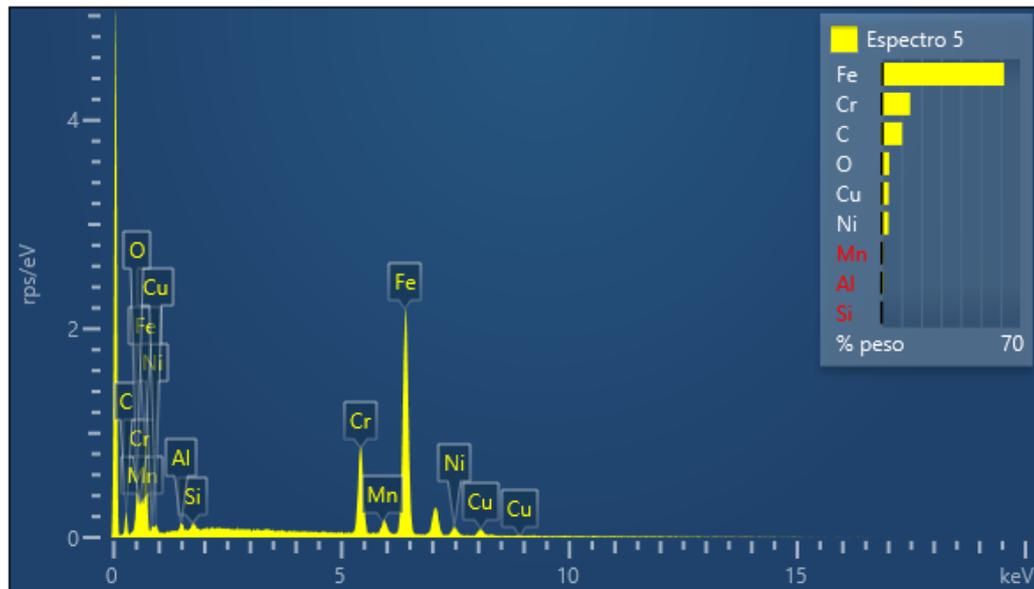


Figura 8.15. Espectro 5 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

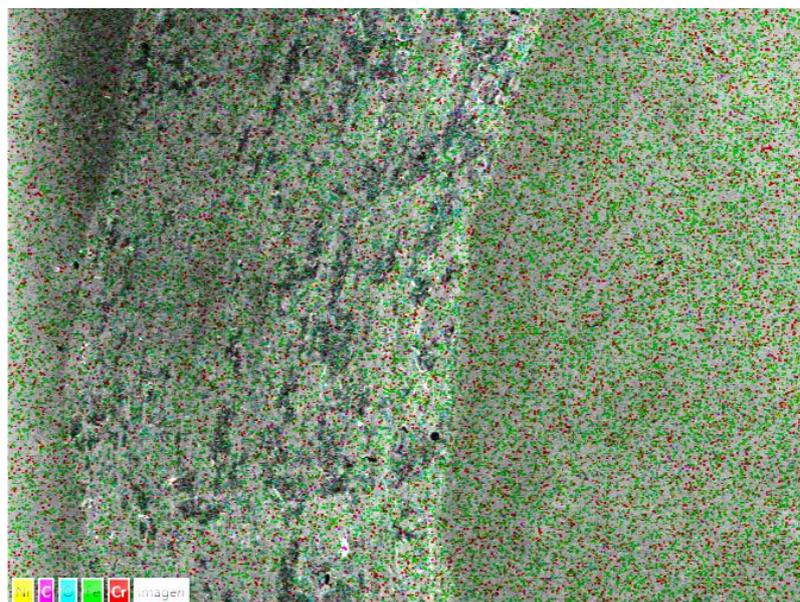


Figura 8.16. Distribución de los componentes en la superficie de la muestra sin TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

Estos hallazgos pueden tener implicaciones importantes en la comprensión del desgaste y la abrasión de las superficies estudiadas. La presencia de acumulación de partículas y la mayor concentración de oxígeno en ciertas áreas pueden

afectar la resistencia al desgaste y la capacidad de deformación plástica del material.

Es esencial tener en cuenta estos resultados al analizar la durabilidad y el rendimiento de los materiales en aplicaciones prácticas, ya que las características superficiales y la composición química pueden influir en su desempeño en entornos de desgaste y fricción.

Según se muestra en la figura 8.17., los elementos más predominantes son el hierro (Fe), seguido del cromo (Cr) y el carbono (C), que son los elementos característicos del acero inoxidable. Es interesante notar que el oxígeno presenta una presencia significativa en la superficie de la huella, mientras que su presencia es menor en el resto de la muestra. Esto puede indicar una mayor interacción entre el oxígeno y la superficie de la huella, posiblemente debido a reacciones químicas o a la formación de compuestos en esa región específica.

Además de los componentes mencionados, también se detecta la presencia de otros elementos como el cobre, el silicio y el níquel, aunque en menor cantidad.

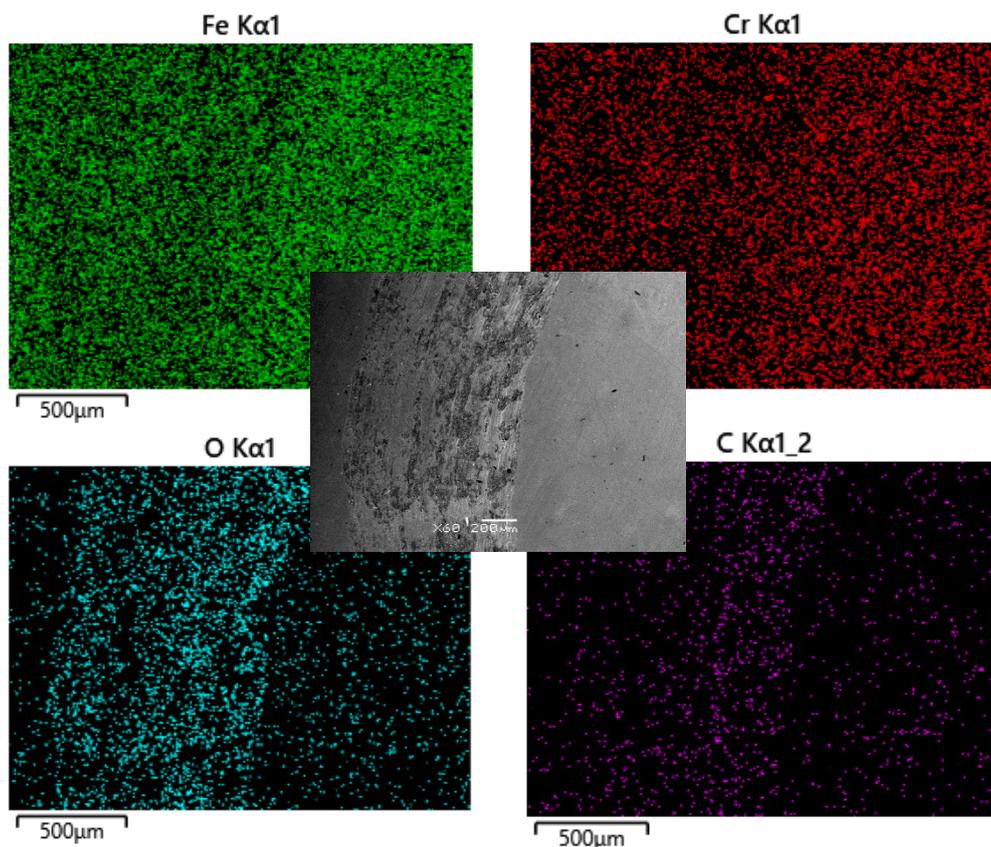


Figura 8.17. Distribución de los componentes en la superficie de forma individual de la muestra sin TT y a contra capa.
[Imagen de elaboración propia]

El análisis de la composición química de la superficie de la huella es importante para comprender las interacciones y los procesos que ocurren durante el ensayo.

Proporciona información valiosa sobre los elementos presentes y su distribución, lo cual puede ser útil para evaluar la resistencia al desgaste, la adhesión de partículas y otros fenómenos relacionados con el comportamiento de la muestra.

- MUESTRAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO A CONTRA CAPA.

En la figura 8.18. se presenta una comparación entre dos imágenes: la imagen (1) y la imagen (2). En la imagen (2), se puede observar que la huella y sus bordes son menos definidos y más difuminados en comparación con la imagen (1). Por otro lado, en la imagen (1) se puede apreciar con claridad los surcos direccionales de abrasión. Esta diferencia en la definición y nitidez de la huella puede indicar diferentes niveles de desgaste y alteración de la superficie. En la imagen (1), los surcos direccionales de abrasión son visibles, lo que sugiere un desgaste más pronunciado y una mayor interacción entre la muestra y el agente de desgaste. Por otro lado, en la imagen (2) la falta de definición de la huella y los bordes difuminados pueden indicar un desgaste menos agresivo o una menor intensidad de interacción entre la muestra y el agente de desgaste.

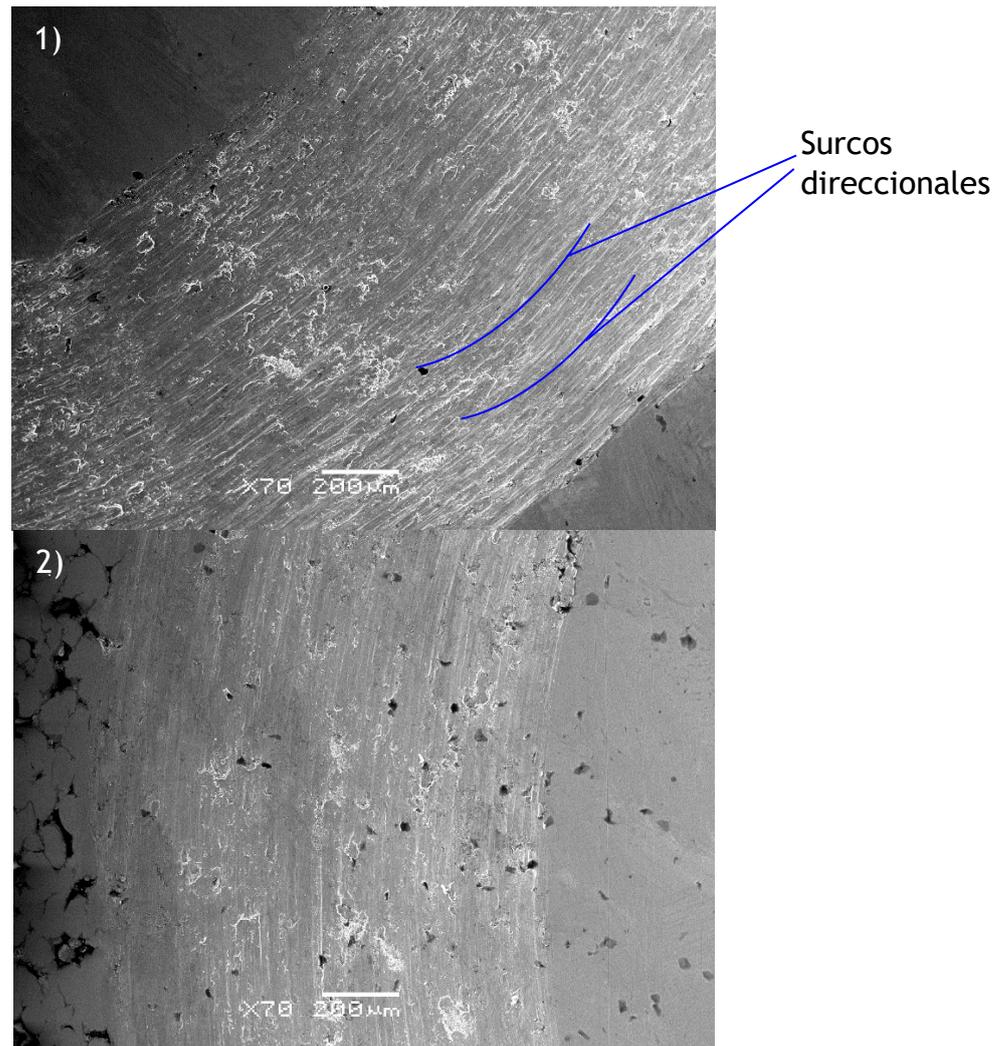


Figura 8.18. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a contra capa (x70). [Imagen de elaboración propia]

Estos resultados pueden tener implicaciones importantes en la evaluación del desgaste y la resistencia de los materiales. La presencia de surcos direccionales de abrasión en la imagen (1) puede indicar una mayor capacidad del material para soportar cargas y resistir el desgaste, mientras que una huella menos definida en la imagen (2) puede sugerir una menor resistencia al desgaste.

Con aumentos de x250 y x330 (fig. 8.19.), se puede observar que existen ciertas áreas con acumulación de partículas, similar al caso anterior de las muestras sin tratamiento térmico. Sin embargo, a diferencia de ese caso, la superficie en esta situación es más homogénea en general.

Al analizar con mayor detalle la imagen, se pueden identificar algunos defectos indicados en la figura 8.19. Uno de ellos es la presencia de salpicaduras (spall), que son desprendimientos de fragmentos del material causados por el efecto de cargas cíclicas. Estas salpicaduras suelen estar relacionadas con la nucleación y

propagación de grietas, lo que favorece su formación en ciertas áreas de la superficie. Además, se pueden apreciar marcas de manchado (smearing), que resultan durante la fricción o desgaste. Estas marcas son el resultado de la transferencia de material entre superficies de contacto [34], lo cual puede ocurrir debido a la deformación plástica y la interacción entre las asperezas de las superficies.

Estos defectos y marcas en la superficie son indicativos de los procesos de desgaste y fricción que ocurren durante el ensayo. La presencia de salpicaduras y marcas de manchado puede tener implicaciones en la resistencia al desgaste y la vida útil de los materiales.

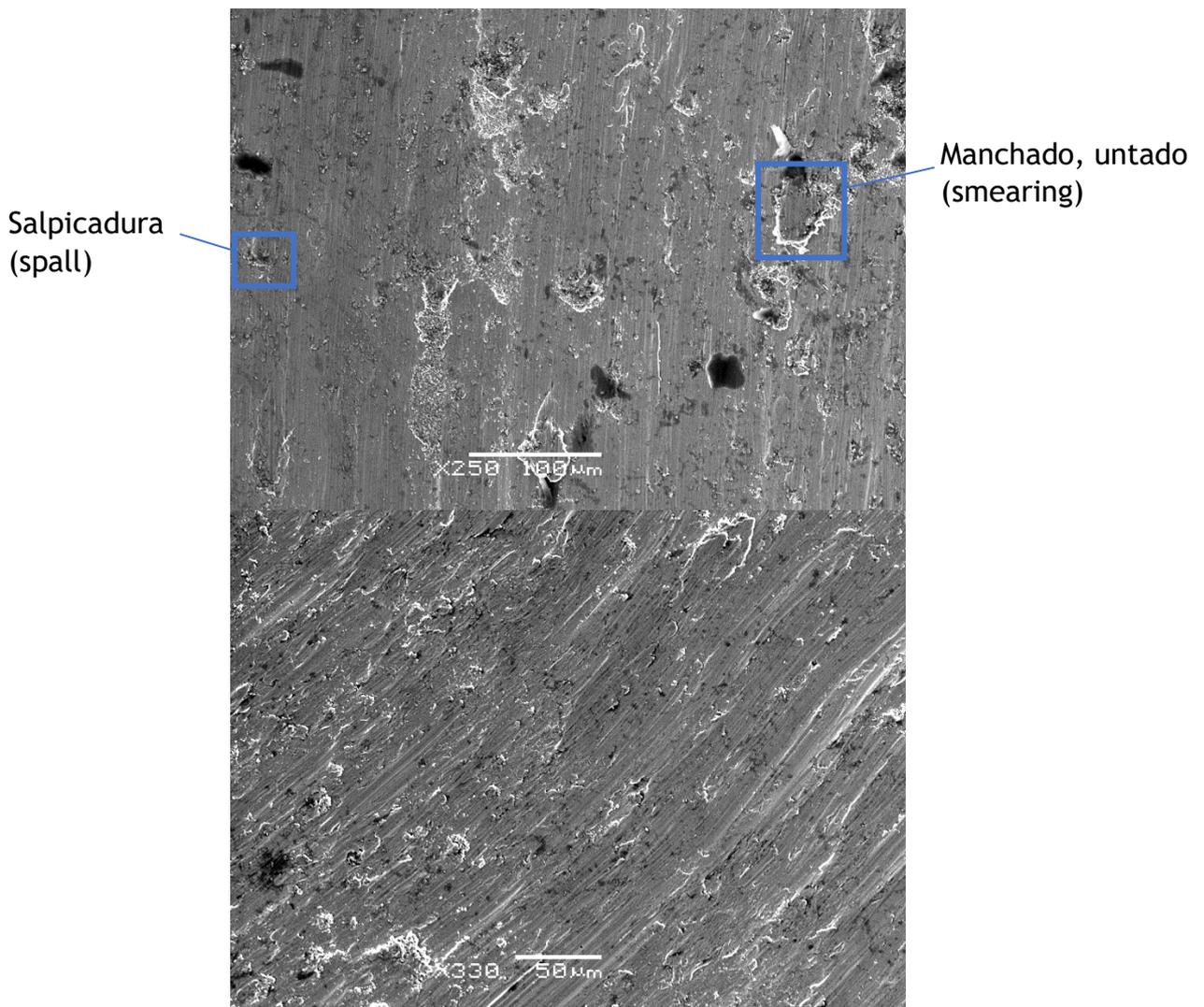
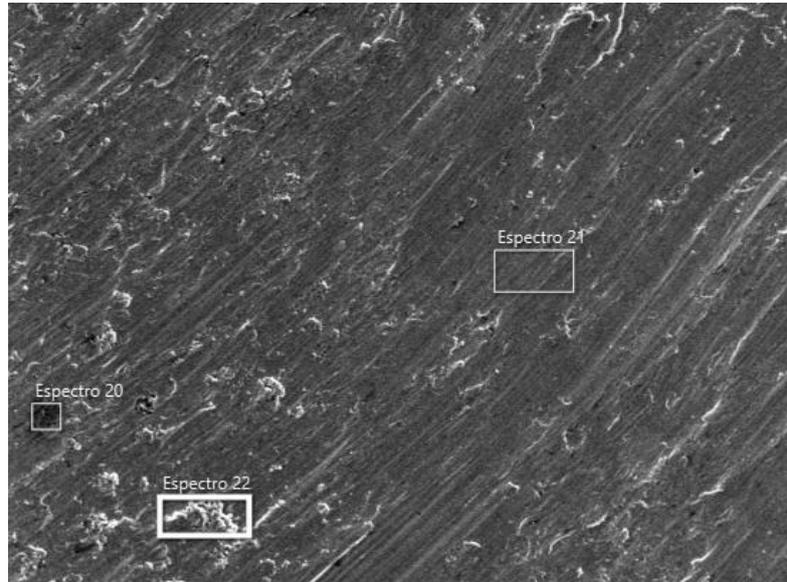


Figura 8.19. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a contra capa (x250 y x330). [Imagen de elaboración propia]

Se procede al análisis de las diferentes zonas destacadas de la superficie. Sobre estas zonas se realizan espectros identificados con los números 20, 21 y 22, tal como se muestra en la figura 8.20. Al examinar los espectros 20 y 21 en las figuras 8.21 y 8.22 respectivamente, se puede observar una composición típica y esperada para un acero inoxidable, sin ninguna alteración anormal o destacable.



*Figura 8.20. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra con TT y a contra capa.
[Imagen de elaboración propia]*

Por otro lado, en el espectro 22 de la figura 8.23., que corresponde a la zona con mayor acumulación de partículas, se puede apreciar cierta oxidación, aunque en menor medida en comparación con el caso de la muestra sin tratamiento térmico y a contra capa.

Este análisis de los espectros permite evaluar la composición química y la presencia de elementos en diferentes áreas de la superficie. Los espectros 20 y 21 confirman que la composición del acero inoxidable se mantiene sin alteraciones significativas en esas zonas específicas.

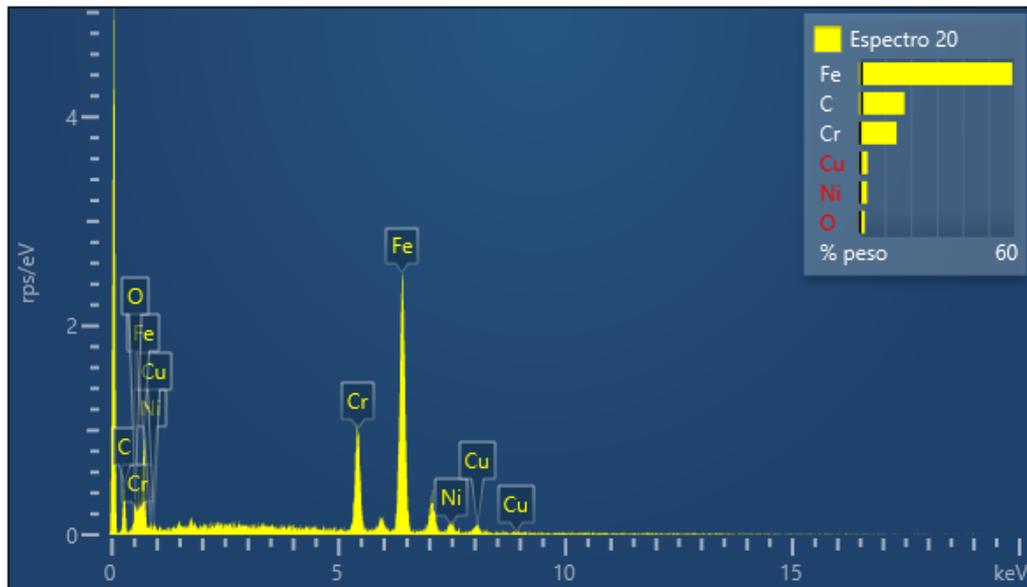


Figura 8.21. Espectro 20 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

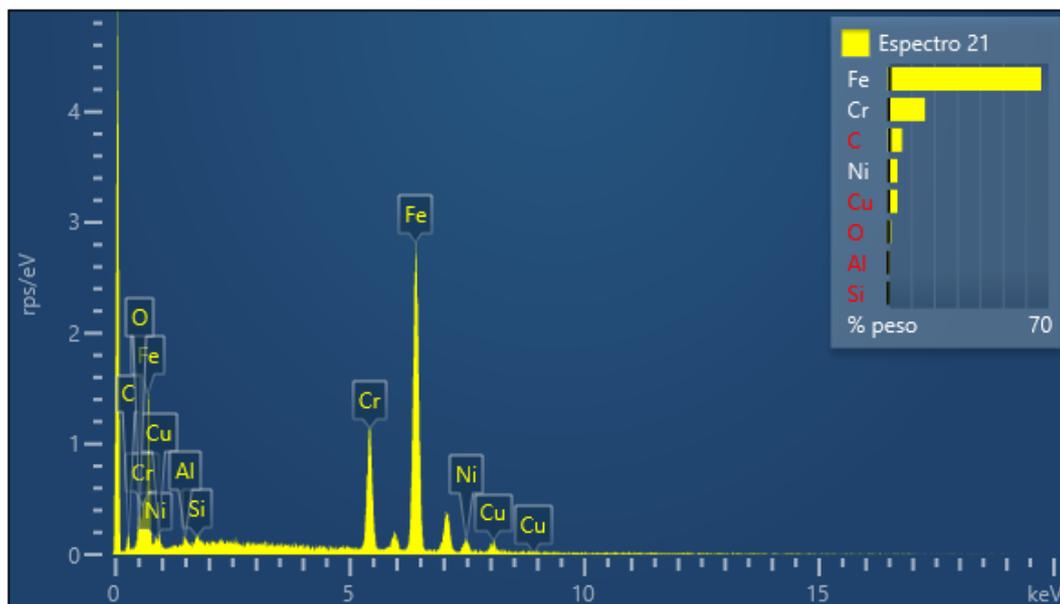


Figura 8.22. Espectro 21 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

Sin embargo, en el espectro 22 (Fig. 8.23), donde se registra una mayor acumulación de partículas se observa cierta oxidación. Esto indica la posible presencia de un entorno químico que favorece la oxidación en esa área

específica. Aunque la oxidación es menos pronunciada en comparación con la muestra sin tratamiento térmico y a contra capa, su presencia puede influir en las propiedades y la resistencia del material en esa región.

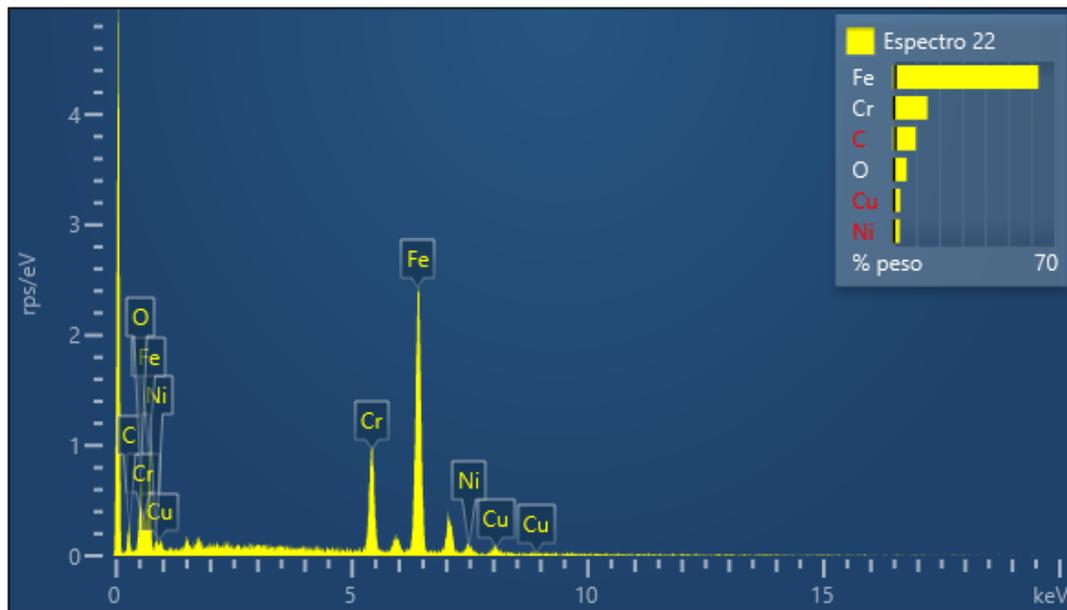


Figura 8.23. Espectro 22 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

En la figura 8.24. se presenta la distribución del oxígeno en la superficie de la muestra. Se puede observar que la distribución es homogénea en toda el área analizada. Esto contrasta con la muestra sin tratamiento térmico y a contra capa, como se muestra en la figura 8.17., donde la oxidación se concentra principalmente a lo largo del área de la huella generada por el desgaste. Al comparar las distribuciones del oxígeno que se muestran en la figura 8.25.

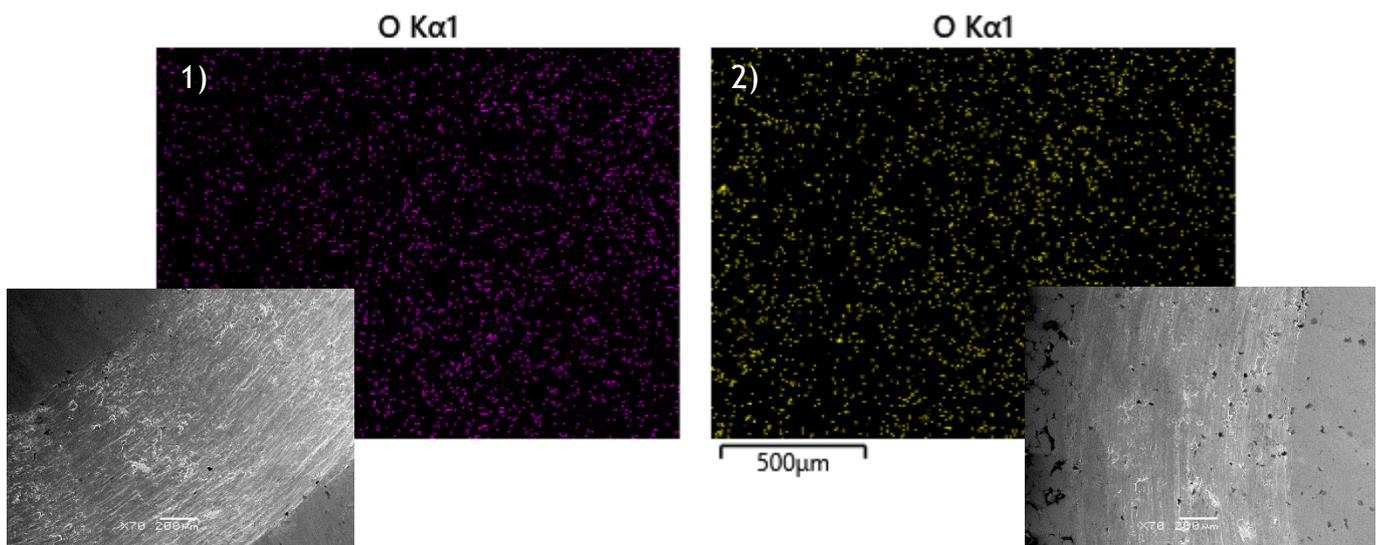


Figura 8.24. Distribución del oxígeno en la superficie de la muestra con TT y a contra capa. [Imagen de elaboración propia]

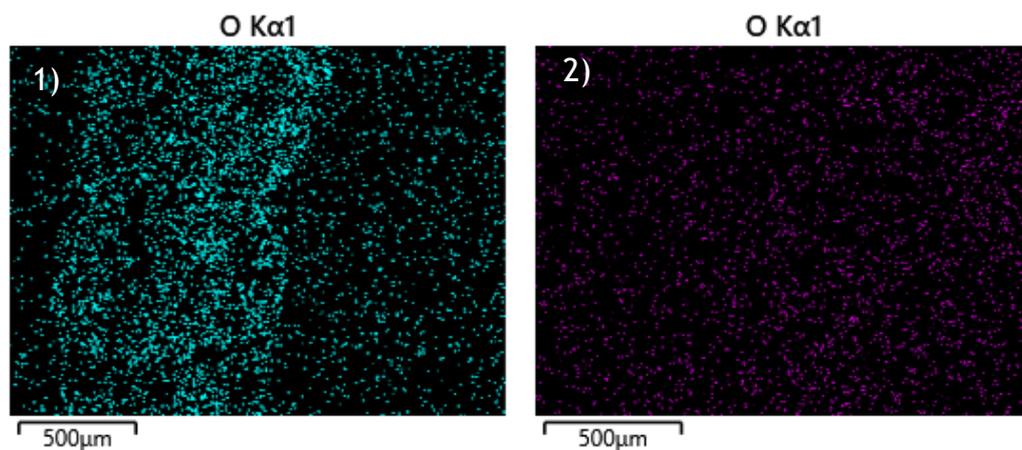


Figura 8.25. Comparación de la distribución del oxígeno en las muestras a contra capa. (1) Sin TT. (2) Con TT. [Imagen de elaboración propia]

Este comportamiento en cuanto al oxígeno puede tener un efecto en su distribución en la superficie del material. La homogeneidad en la distribución del oxígeno en la muestra tratada térmicamente puede indicar una menor concentración de óxidos en áreas específicas y una mayor resistencia a la oxidación en comparación con la muestra sin tratamiento térmico y a contra capa.

En resumen, al analizar las propiedades de las huellas en las muestras con y sin tratamiento térmico, se ha comprobado que no existen diferencias significativas en cuanto a propiedades generales. Sin embargo, se ha observado una mayor

resistencia al desgaste por oxidación en la muestra que ha recibido el tratamiento térmico.

Estos resultados parecen indicar que el tratamiento térmico ha tenido un impacto positivo en la capacidad de resistencia la desgaste por oxidación del material. Aunque no se han observado diferencias notables en otras propiedades, la mayor resistencia la desgaste por oxidación es un aspecto relevante, especialmente en aplicaciones donde la exposición a condiciones corrosivas es un factor importante.

- MUESTRAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO A FAVOR DE CAPA.

En la figura 8.26 se puede observar claramente el desgaste abrasivo en la huella generada por la bola de alúmina. Los surcos direccionales creados son fácilmente distinguibles, lo que indica el patrón de desgaste producido por la acción de la carga.

Además, en la figura se indica la presencia de zonas de delaminación, que corresponden al desprendimiento de capas de material de la superficie debido a la aplicación repetitiva de cargas. Estas zonas pueden ser el resultado de tensiones mecánicas y la acción de fuerzas cíclicas durante el ensayo, lo que provoca la separación de capas de material. La delaminación es un fenómeno común en ensayos de desgaste y puede ser el resultado de diferentes factores, como la estructura del material, la dureza y la resistencia a la fatiga. La presencia de estas zonas de delaminación en la figura 8.26 indica la presencia de desprendimiento de material y posible debilitamiento de la superficie debido al desgaste abrasivo. La presencia de zonas de delaminación indica una posible pérdida de integridad estructural y puede afectar la durabilidad y el rendimiento del material en aplicaciones reales.

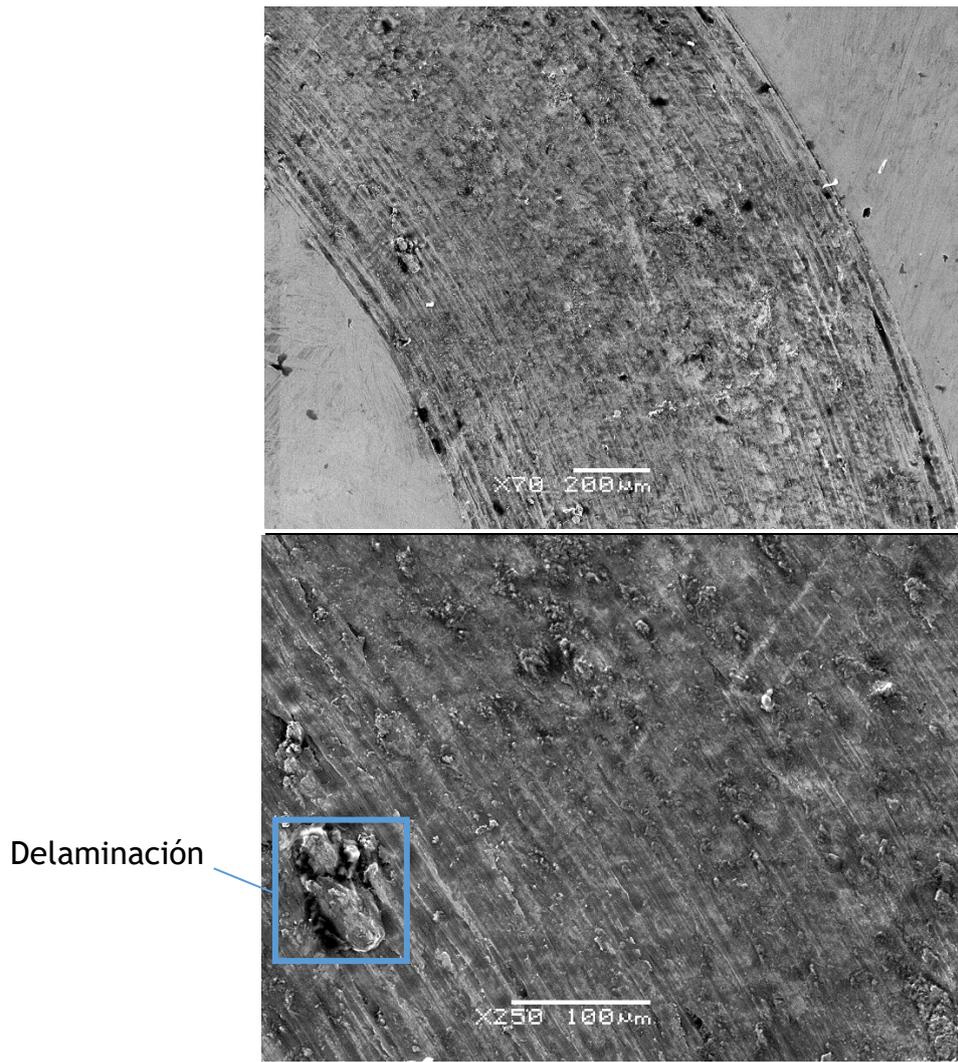


Figura 8.26. Imágenes del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x70 y x250). [Imagen de elaboración propia]

En la figura 8.27., con un aumento de x330, se ven unas motas blancas, llamadas debris (escombros). Estos debris son restos de material que se han desprendido durante el ensayo de desgaste. Durante el ensayo, la bola arrastra estos escombros y, a medida que se mueve, va marcando los surcos en la superficie del material.

La presencia de estos escombros es relevante porque está relacionada con el desgaste abrasivo. La capa de óxido superficial del material es más frágil que el metal subyacente, lo que significa que es más propensa a romperse bajo el efecto de las fuerzas aplicadas durante el ensayo. Por lo tanto, cuando los debris son arrastrados por la bola, tienden a romper el óxido presente en la superficie, lo que a su vez provoca un desgaste abrasivo en la muestra.

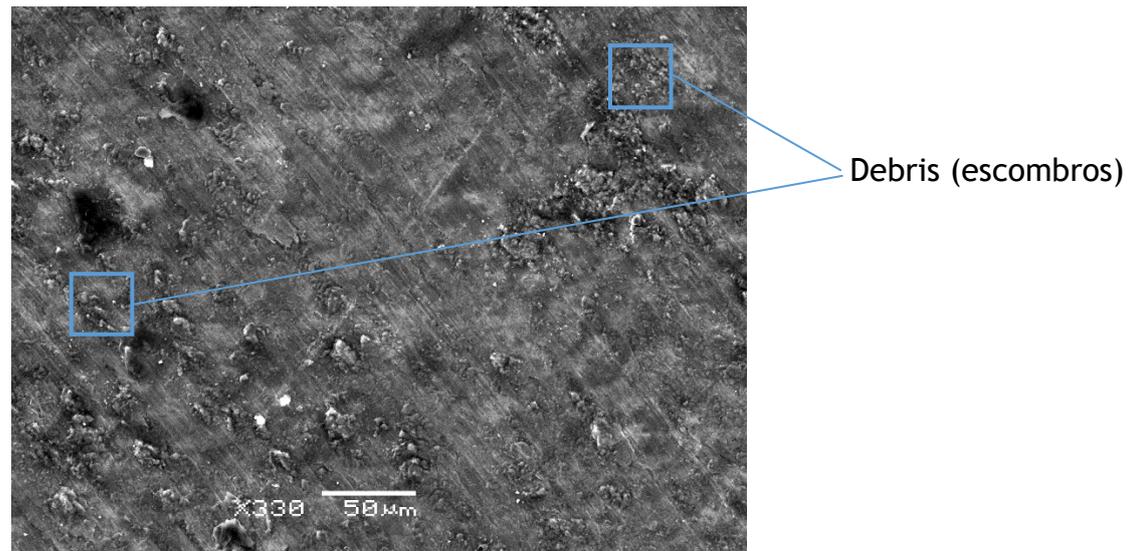


Figura 8.27. Imagen del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x330). [Imagen de elaboración propia]

Este proceso de desgaste abrasivo es un mecanismo común en ensayos de desgaste y puede tener implicaciones importantes para la durabilidad y el rendimiento del material en aplicaciones reales. La presencia de debris y la rotura del óxido superficial pueden conducir a un desgaste más rápido y a una disminución de la vida útil del material en situaciones donde haya fricción y contacto repetitivo con otros objetos o superficies.

En la figura 8.28., con un aumento x1000, se pueden observar grietas en la superficie del material. Estas grietas, conocidas como microfisuras, son el resultado de la aplicación repetida de fuerzas de cargas cíclicas durante el ensayo. Las cargas cíclicas generan tensiones en el material que pueden propagarse y dar lugar a la formación de estas microfisuras. Estas son una preocupación importante, ya que pueden contribuir al desgaste y falla del material. A medida que las cargas se aplican repetidamente, las microfisuras pueden propagarse y crecer, debilitando la estructura del material y aumentando su susceptibilidad al desgaste y la fractura.

Grietas (micro cracks)

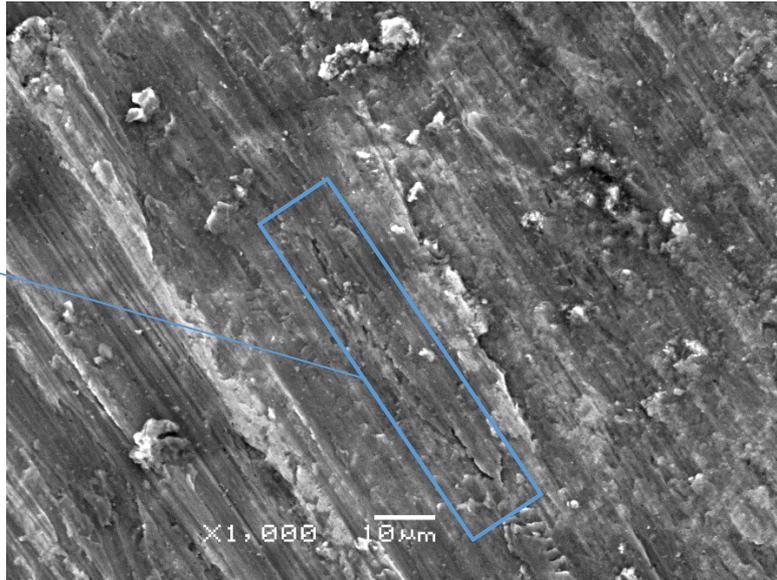
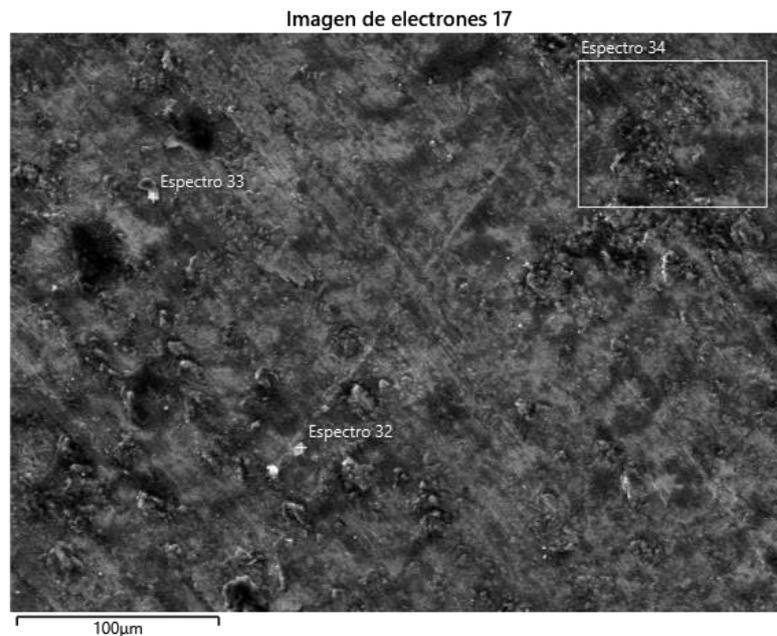


Figura 8.28. Imagen del SEM de la muestra con TT y a favor de capa (x1000). [Imagen de elaboración propia]

Para un análisis más detallado, se procede a examinar algunas zonas concretas de la huella. En la figura 8.29., se destacan los espectros 32 y 33, que corresponden a las motas blancas observadas en la superficie. Estas motas son áreas específicas de interés donde se realiza un análisis químico para determinar su composición. A continuación, en la figura 8.30. se presentan los respectivos espectros que muestran los resultados del análisis químico de las motas blancas. Estos espectros proporcionan información sobre los componentes y elementos presentes en esas áreas particulares de la superficie.



*Figura 8.29. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra con TT y a favor de capa.
[Imagen de elaboración propia]*

Este análisis detallado de las motas blancas y su composición puede ayudar a comprender mejor los mecanismos de desgaste y la respuesta del material a las cargas cíclicas. Además, puede ser útil para identificar posibles factores que contribuyen a la formación de microfisuras y el desgaste del material en condiciones específicas.

En contraste con las muestras con tratamiento térmico y a contra capa, en este caso se pueden observar restos de aluminio provenientes de la bola utilizada en el ensayo. Esta característica se aprecia claramente en la figura 8.31., donde se observa la presencia de pequeños fragmentos o residuos de aluminio en la superficie del material. La figura 8.32 proporciona una vista más detallada de estos restos de aluminio, mostrando puntos de mayor concentración del metal en la superficie. Estos puntos de mayor concentración son indicativos de las áreas donde se ha producido una transferencia de material entre la bola de aluminio y la muestra.

La presencia de restos de aluminio en la superficie puede tener diversas implicaciones. Por un lado, puede indicar una interacción más intensa entre la bola de aluminio y el material de la muestra, lo que puede generar un mayor desgaste y abrasión en esas áreas específicas. Además, la transferencia de aluminio puede influir en las propiedades de fricción y desplazamiento entre las superficies en contacto.

Es importante destacar que la presencia de restos de aluminio en la superficie del material puede ser considerada como un efecto no deseado, ya que puede

alterar las propiedades y el comportamiento del material. Por lo tanto, es necesario evaluar y controlar adecuadamente las condiciones del ensayo y los materiales utilizados para minimizar este tipo de transferencias y asegurar resultados más precisos y representativos.

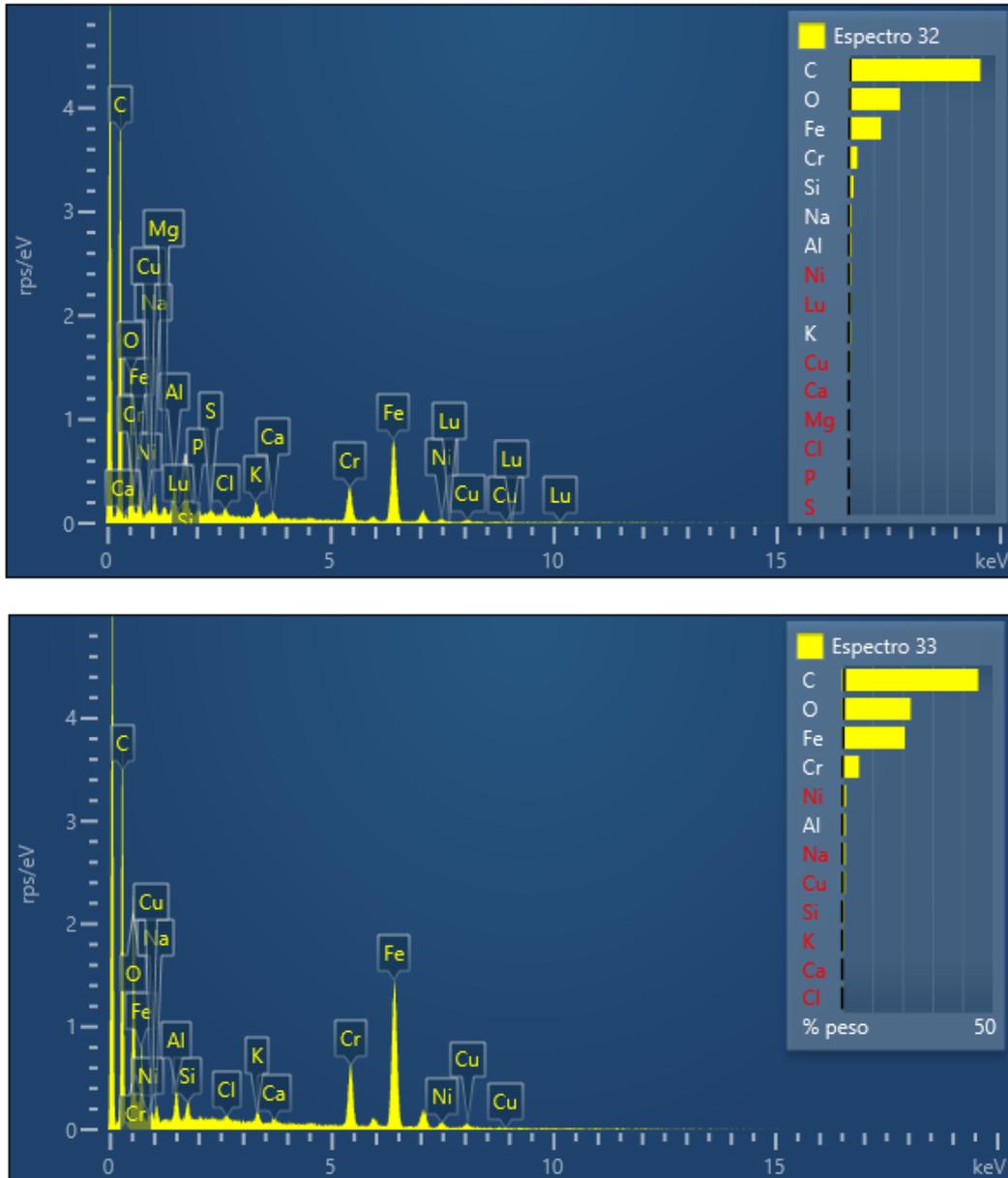


Figura 8.30. Espectros 32 y 33 de la composición de la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

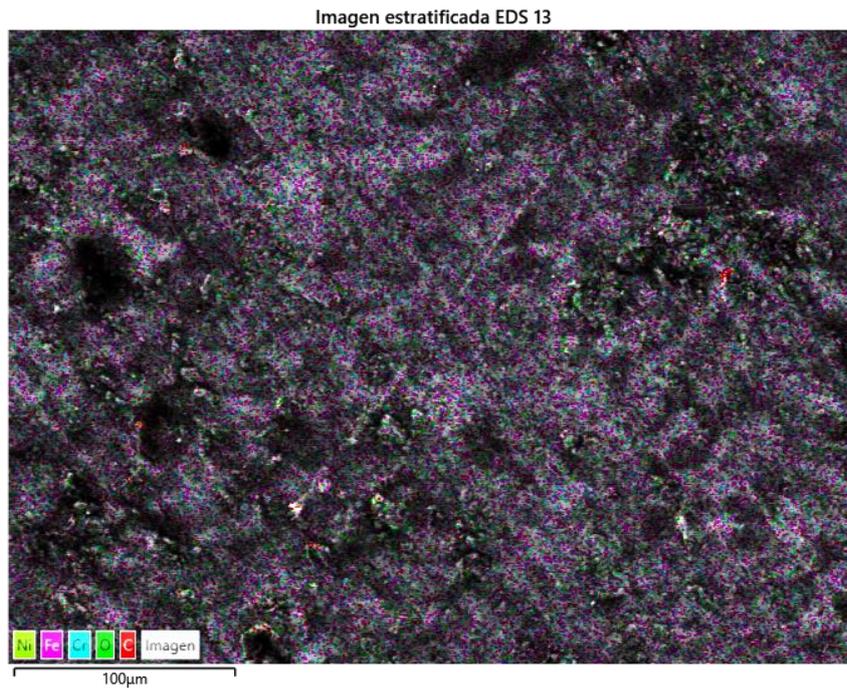


Figura 8.31. Distribución de los componentes en la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

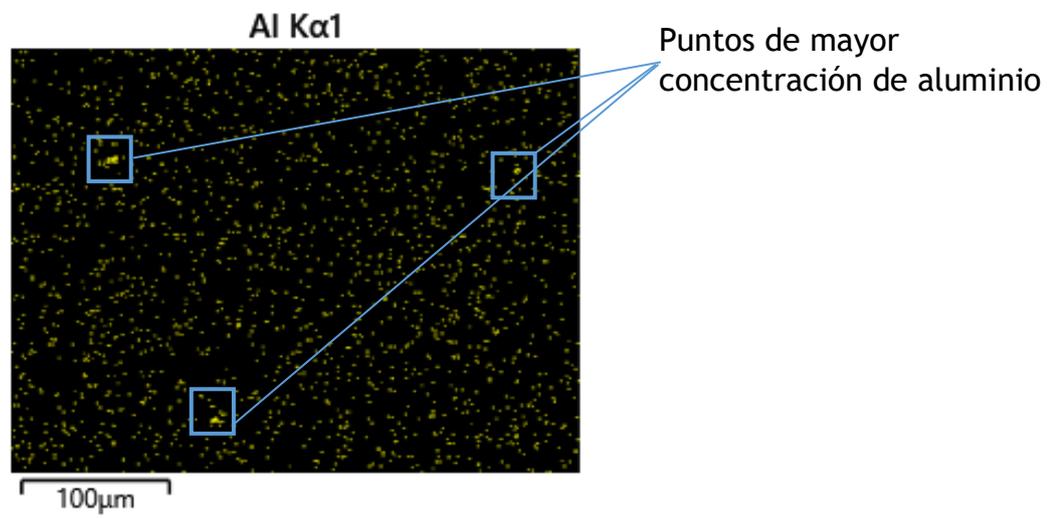


Figura 8.32. Distribución del aluminio en la superficie de la muestra con TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

- MUESTRAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO A FAVOR DE CAPA.

En la figura 8.33 se puede observar una muestra sin tratamiento térmico y cortada a favor de capa. Una característica destacable de esta muestra es su huella con escasa profundidad y anchura, lo cual también se puede apreciar en la figura 8.5. (1). Esta característica indica un posible fallo en la calibración de la máquina de ensayo, ya que las dimensiones de la huella no son consistentes con lo esperado.

Además, en la figura 8.33 se pueden observar zonas de delaminación, que son áreas donde se ha producido la separación o desprendimiento de capas de material de la superficie. Este fenómeno puede ser consecuencia de la aplicación repetitiva de cargas durante el ensayo y puede contribuir al desgaste y falla del material.

Asimismo, se pueden identificar zonas donde se acumulan partículas de óxido. Esto se debe a la ruptura de la capa de óxido superficial durante el ensayo, y las partículas resultantes son arrastradas por la bola de ensayo, depositándose en la superficie y formando acumulaciones visibles. Estas acumulaciones pueden afectar las propiedades de fricción y desgaste del material, así como su apariencia visual.

Es importante destacar que estos fenómenos observados en la muestra sin tratamiento térmico y a favor de capa indican posibles problemas en la integridad y el comportamiento del material. Estos problemas pueden afectar negativamente su resistencia al desgaste y la durabilidad. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis detallado y comprender las causas subyacentes de estos fenómenos para poder tomar medidas correctivas adecuadas y mejorar la calidad y rendimiento del material en futuros ensayos y aplicaciones prácticas.

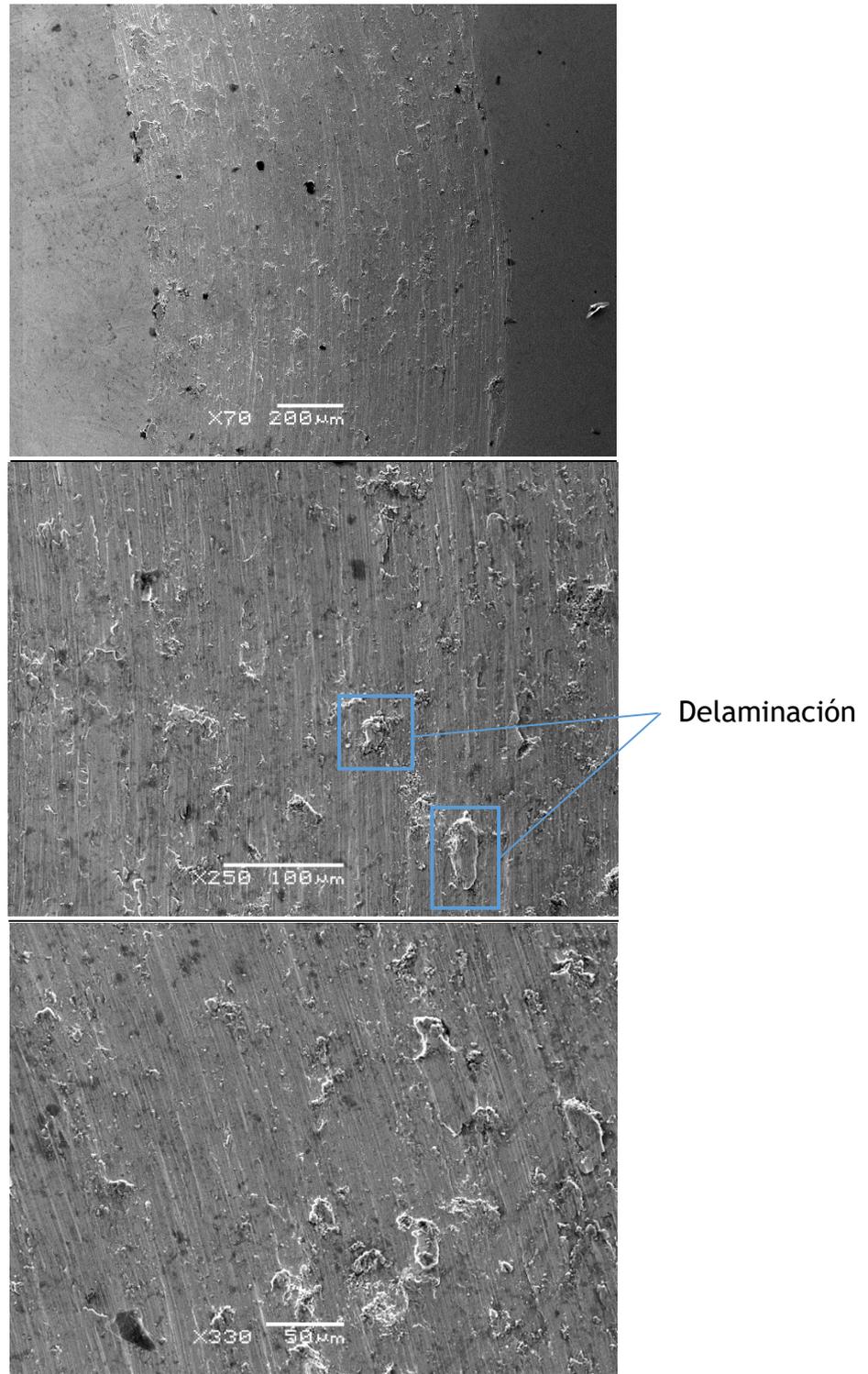


Figura 8.33. Imágenes del SEM de la muestra sin TT y a favor de capa (x70, x250 y x330). [Imagen de elaboración propia]

Resumiendo, la figura 8.33 muestra una muestra sin tratamiento térmico y cortada a favor de capa con una huella de escasa profundidad y anchura, indicando un posible fallo en la calibración de la máquina de ensayo. También se

observan zonas de delaminación y acumulación de partículas de óxido, lo que sugiere problemas en la integridad del material y su resistencia al desgaste. Estos aspectos deben considerarse al evaluar y mejorar las propiedades y el rendimiento del material.

En la muestra sin tratamiento térmico y a favor de capa, se han obtenido diferentes espectros que revelan información sobre la composición química de la superficie. Entre ellos, uno de los espectros más destacables es el espectro 39, el cual se muestra en la figura 8.34., en la cual se observa una mota negra. Este espectro se refiere a una zona específica de la muestra y su análisis proporciona detalles sobre los elementos presentes en esa área en particular. Al examinar el espectro 39, se aprecia que la mota negra contiene una gran cantidad de aluminio. Esto indica que, durante el ensayo, se produjo un desgaste significativo en la bola utilizada, lo cual generó la liberación y transferencia de partículas de aluminio hacia la superficie de la muestra.

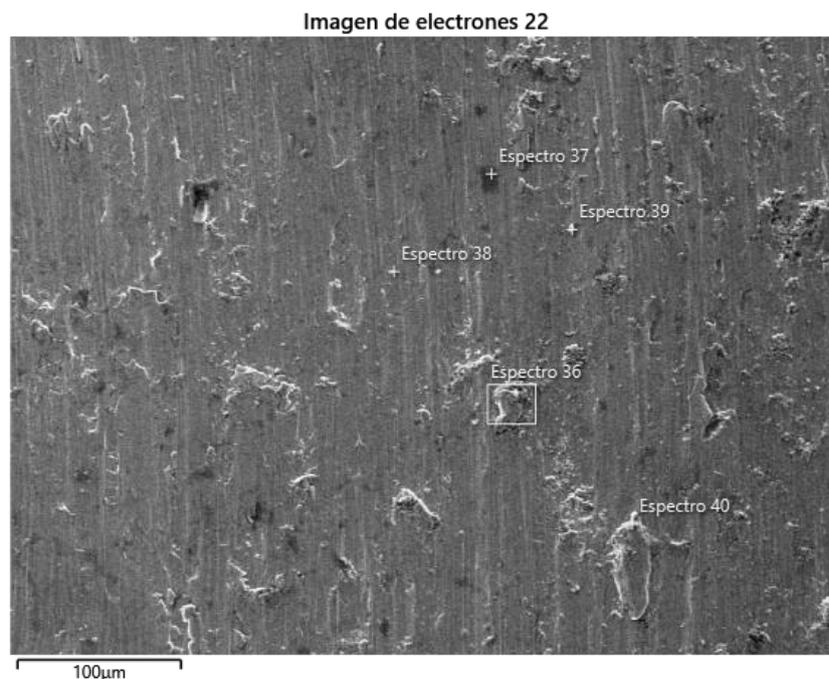


Figura 8.34. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a favor de capa (x250). [Imagen de elaboración propia]

La presencia de aluminio en la mota negra indica que el material de la bola se ha desgastado y ha dejado residuos en la superficie de la muestra. Este desgaste puede ser el resultado de la interacción entre la bola y la superficie de la muestra durante el ensayo, donde las cargas y el movimiento relativo entre ambos provocan la abrasión y el desprendimiento de partículas.

La detección de esta alta concentración de aluminio en la mota negra es relevante, ya que proporciona información sobre la interacción y el desgaste específico que ha ocurrido entre la bola y la muestra sin tratamiento térmico y a favor de capa.

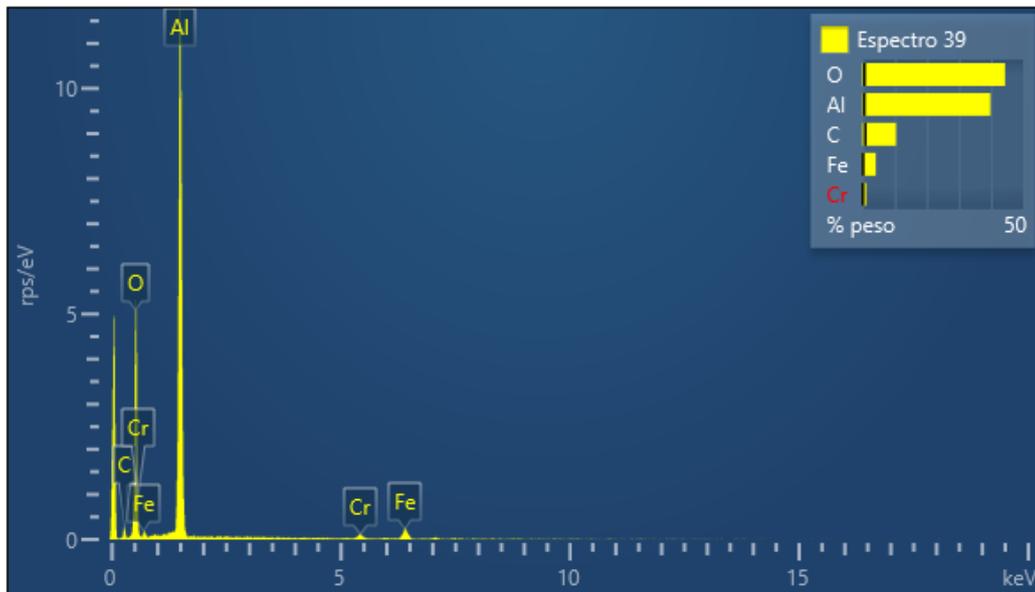


Figura 8.35. Espectro 39 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

Respecto al espectro 40, se puede ver en la figura 8.36. que la zona más blanca/brillante de la delaminación es donde se acumulan las partículas de óxido.

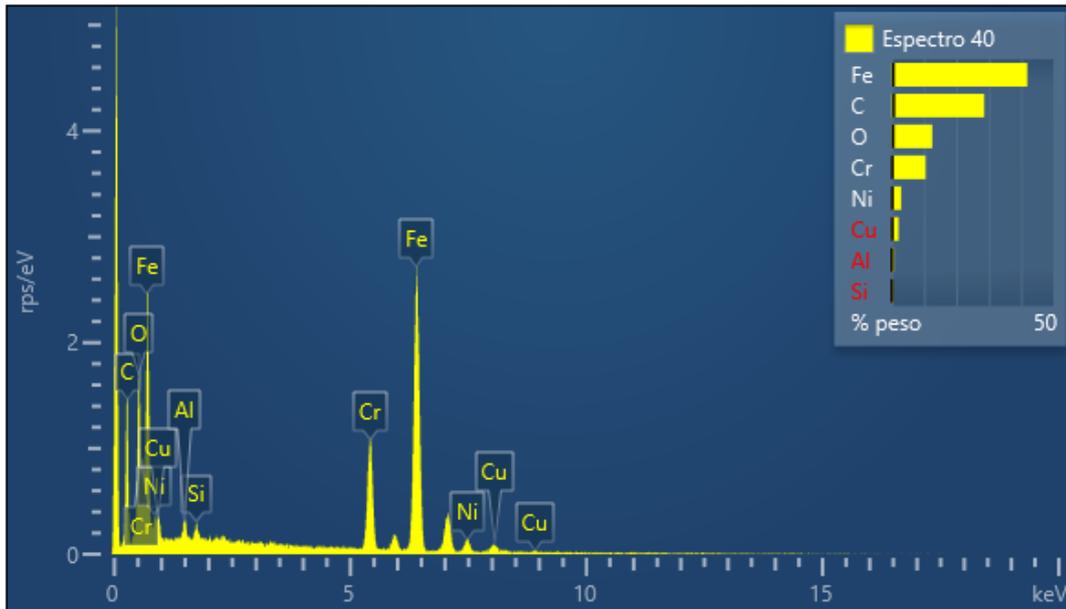


Figura 8.36. Espectro 40 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

En la figura 8.38., se puede observar una zona destacada en la muestra con la aparición de una gran cantidad de carbono en zonas más oscuras como la marcada como espectro 43 en la figura 8.37. El espectro 43 es el correspondiente a la zona más oscura que se muestra en la figura 8.37, e indica una mayor presencia de carbono en esa área específica de la muestra.

La aparición de una gran cantidad de carbono en esta zona puede tener diversas implicaciones. En primer lugar, puede indicar una acumulación de partículas de carbono debido a la fricción y el desgaste entre la muestra y la bola del ensayo. Durante el ensayo, las cargas aplicadas y las interacciones entre las superficies pueden generar fricción y calor, lo que podría conducir a la formación y transferencia de partículas de carbono en esta área. Otra posible explicación podría estar relacionada con la composición y la microestructura del material. Es posible que esta zona específica de la muestra contenga concentraciones más altas de carbono debido a su composición heterogénea o a un tratamiento térmico desigual.

En ambos casos, la aparición de una gran cantidad de carbono en esta área puede influir en las propiedades tribológicas y la capacidad de la muestra para soportar la deformación plástica y el desgaste. El carbono es un elemento importante en la formación de diversos compuestos, como carburos, que pueden afectar la dureza, resistencia y fricción de la superficie.

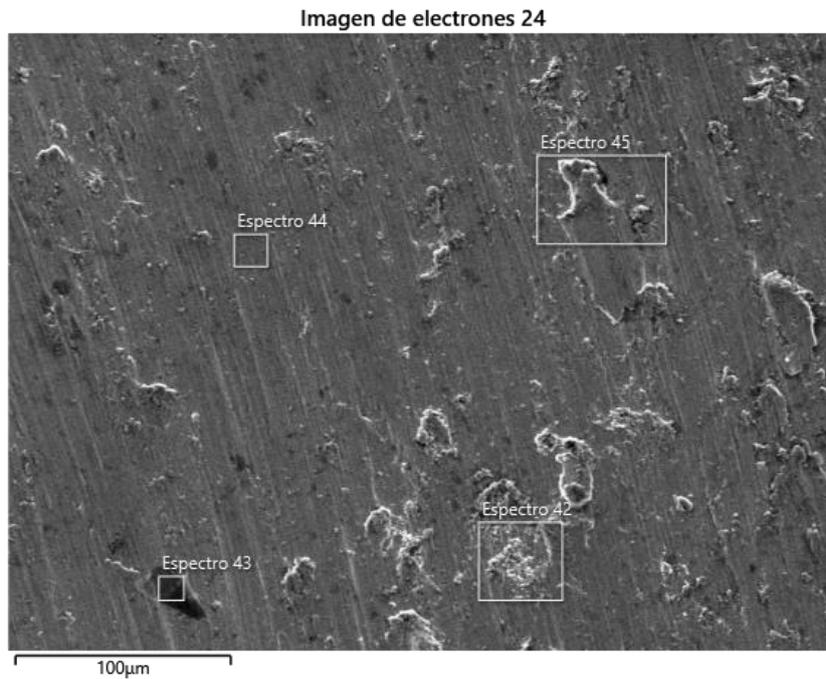


Figura 8.37. Imagen del SEM para el análisis de los espectros de diferentes zonas de la muestra sin TT y a favor de capa (x330). [Imagen de elaboración propia]

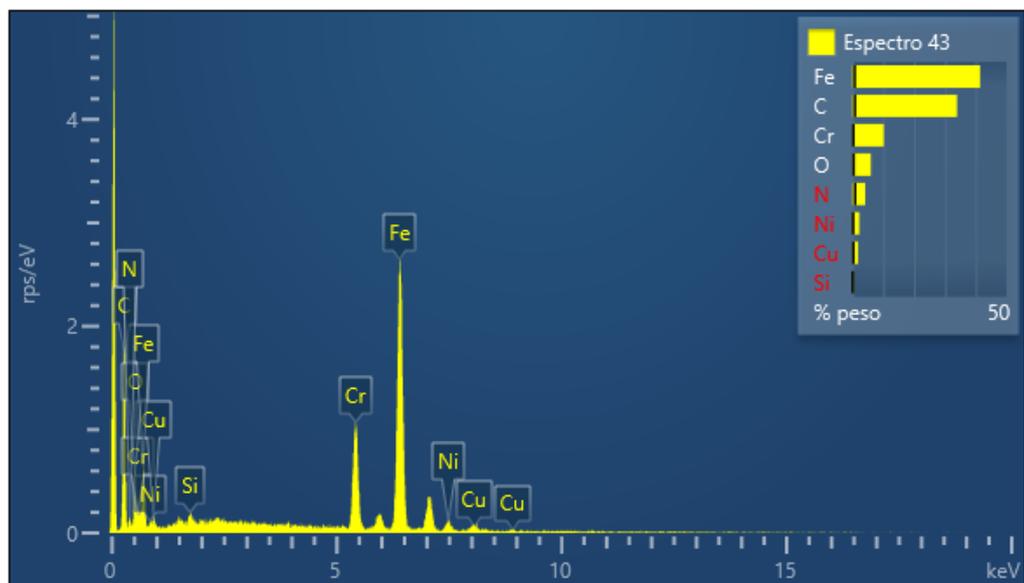


Figura 8.38. Espectro 43 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

En la figura 8.39. se examina detalladamente una región de la superficie que se caracteriza por ser más lisa, homogénea y uniforme. En esta zona se puede ver

una notable ausencia de falta de oxígeno, lo cual indica que hay una escasa o incluso nula presencia de oxidación. Esto contrasta con las áreas circundantes que muestran signos de oxidación y acumulación de partículas.

La falta de oxígeno en esta región más lisa y homogénea puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, la menor rugosidad y la ausencia de asperezas proporcionan menos sitios propicios para la formación de óxido. Además, es posible que la interacción entre la superficie y el ambiente circundante, como la presencia de humedad o contaminantes, sea menor en estas áreas más lisas, lo que limita la oxidación.

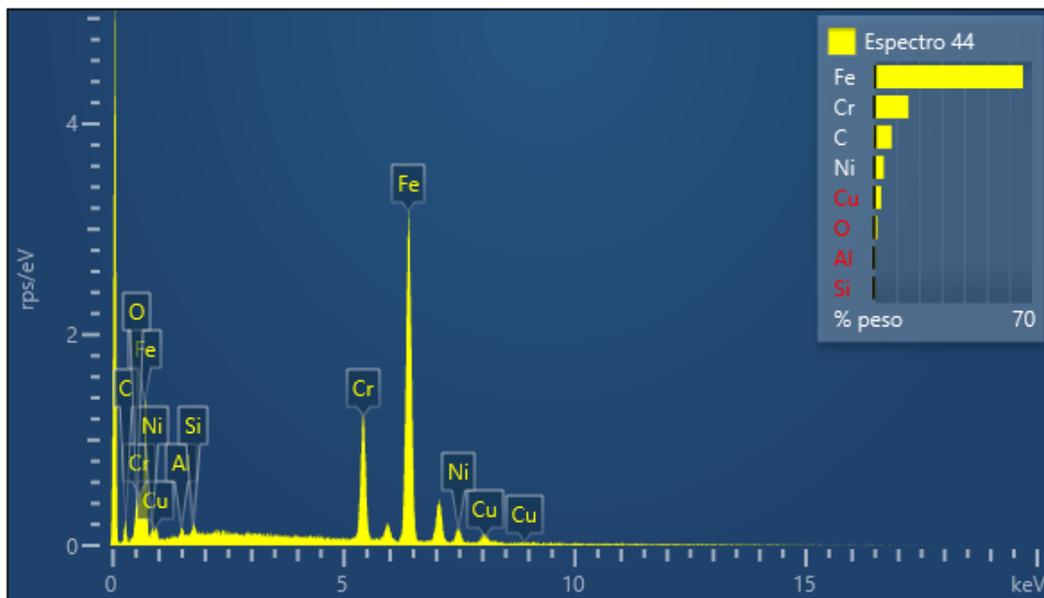


Figura 8.39. Espectro 44 de la composición de la superficie de la muestra sin TT y a favor de capa. [Imagen de elaboración propia]

Por último, en la figura 8.40. se examina la superficie de la muestra con un aumento de x1000, lo que permite visualizar detalles más precisos. En la imagen, se puede observar dos características destacadas: salpicaduras y pequeñas fisuras. Las salpicaduras son pequeños fragmentos de material que se han desprendido de la superficie debido al efecto de cargas cíclicas. Estas salpicaduras pueden formarse como resultado de la deformación plástica y la fractura del material, especialmente en áreas sometidas a altas tensiones o fuerzas de impacto. Las salpicaduras pueden indicar presencia de esfuerzos intensos y la propagación de grietas en la superficie. Además, se pueden apreciar pequeñas fisuras en la imagen. Estas fisuras son microscópicas y están asociadas con la aplicación repetida de fuerzas y tensiones en el material. Las fisuras pueden propagarse a lo largo del tiempo y contribuir al desgaste y la falla

del material. Su presencia puede indicar la presencia de fatiga o debilidad estructural en la muestra.

La presencia de ambas resalta los efectos del desgaste y la carga cíclica en el material. Estos fenómenos pueden tener implicaciones importantes en la durabilidad y el rendimiento del material, especialmente en aplicaciones sometidas a condiciones de trabajo severas.

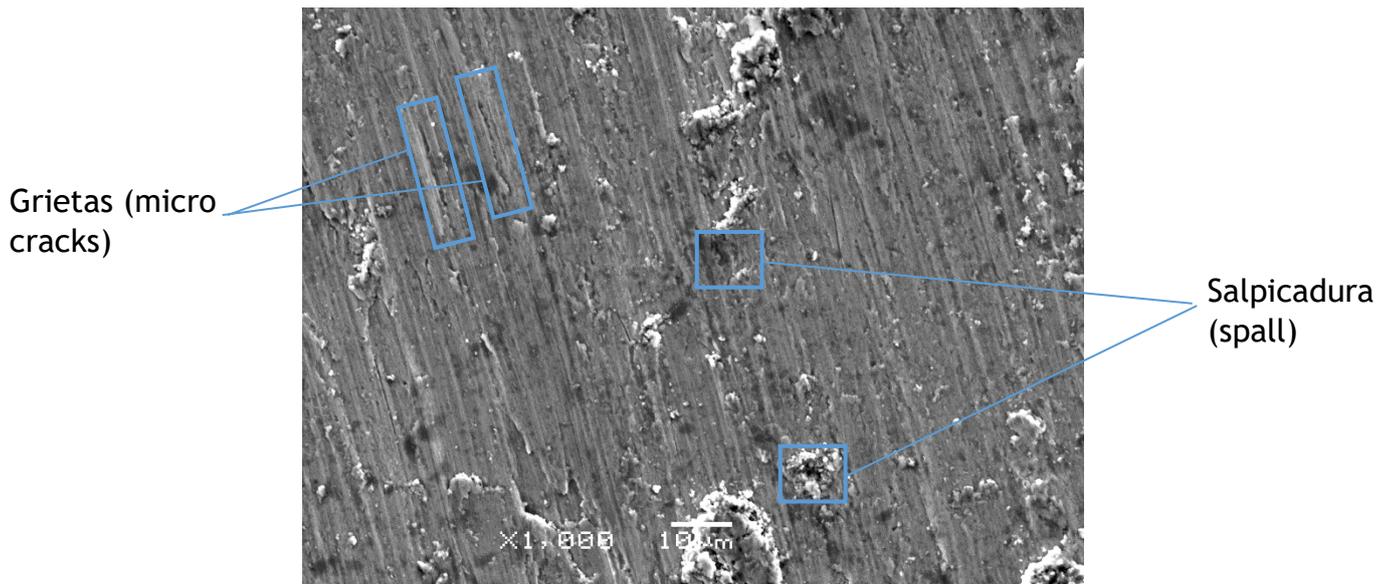


Figura 8.40. Imagen del SEM de la muestra sin TT y a favor de capa (x1000). [Imagen de elaboración propia]

En el caso de las muestras a favor de capa, se observa una diferencia en la aparición de óxido entre las piezas con tratamiento térmico y las sin tratamiento térmico. En particular, en las piezas con tratamiento térmico se puede apreciar una mayor presencia de óxido en comparación con las muestras sin tratamiento térmico. Sin embargo, es importante destacar que esta diferencia no es excesiva, lo que sugiere que el tratamiento térmico no ha tenido un impacto significativo en la formación de óxido en la superficie de las muestras. Esto se puede comprobar en la figura 8.41., donde se muestran los espectros obtenidos en dos áreas diferentes de la muestra, donde podemos ver que no aparece un pico de oxígeno intenso.

En la figura 8.41. (3), se puede apreciar de forma más visual la comparación entre los espectros con tratamiento térmico a favor de capa y sin tratamiento térmico a contra capa, y de nuevo, comprobar la diferencia entre el carbono y el oxígeno, que están más presentes en la muestra tratada térmicamente.

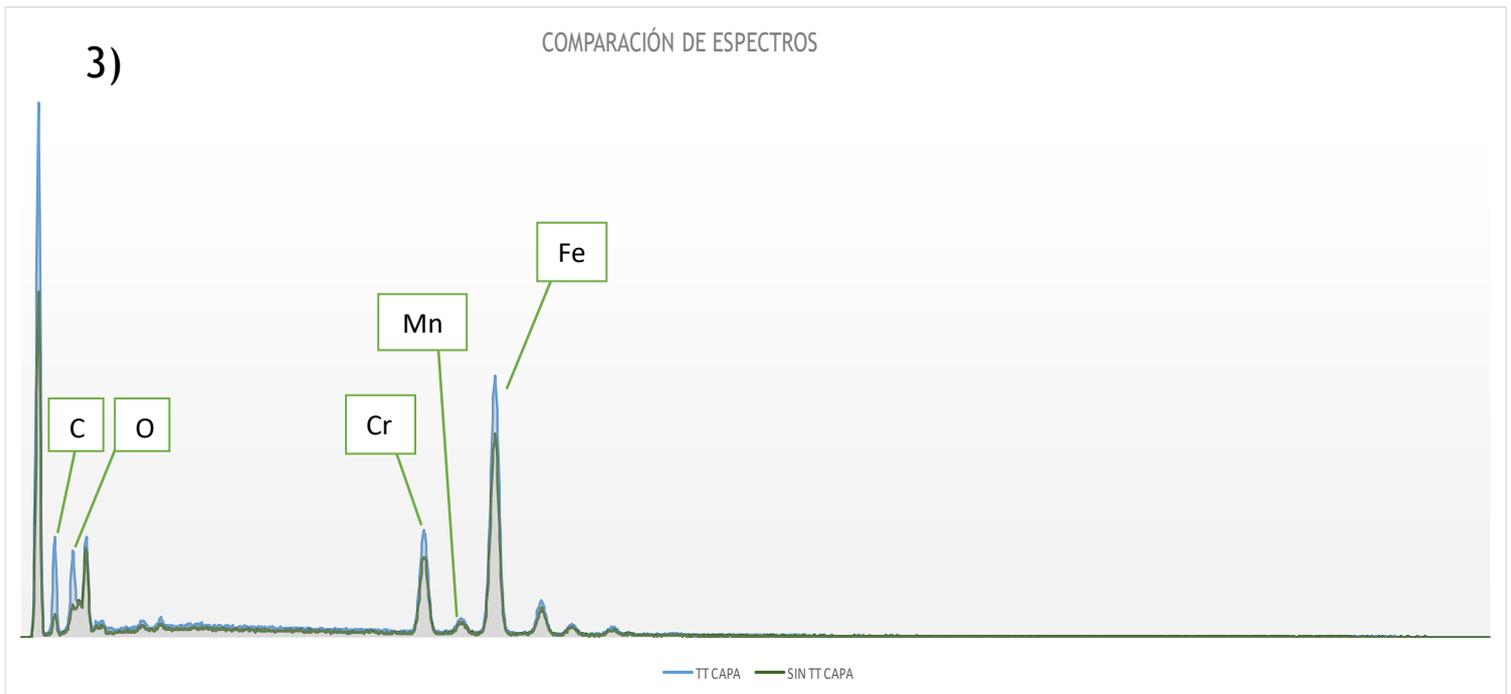
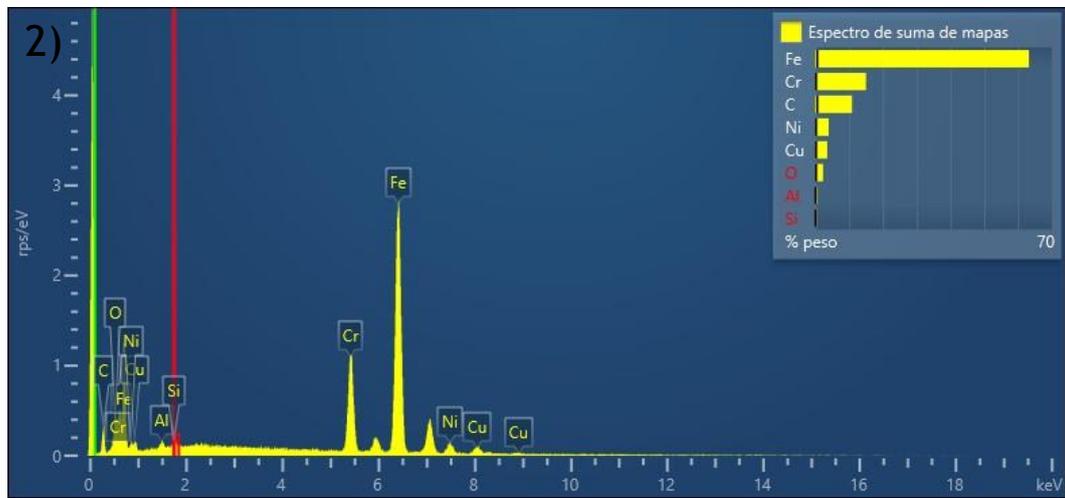
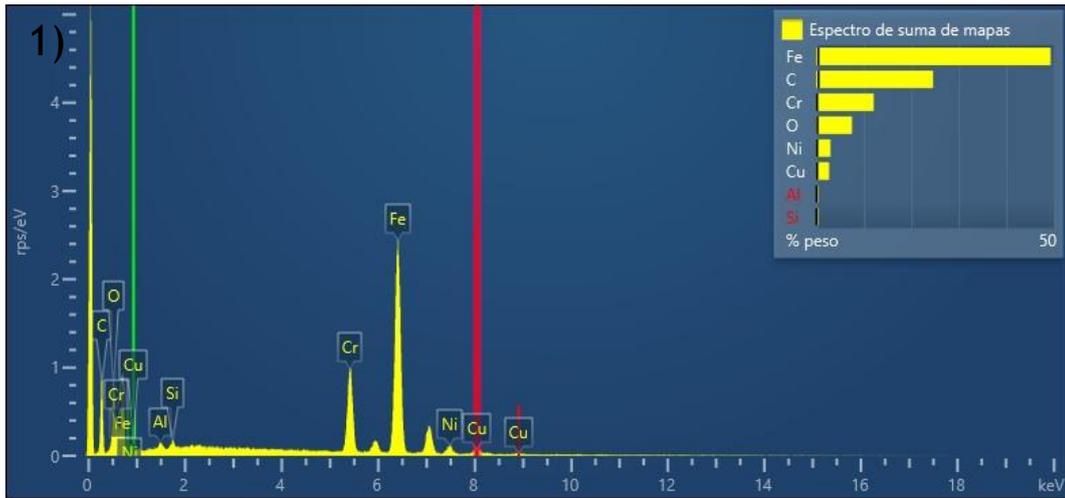


Figura 8.41. Comparación de los espectros generales de la superficie de las huellas (x70). (1) Muestra con TT a favor de capa. (2) Muestra sin TT a favor de capa. (3) Comparación de ambos. [Imagen de elaboración propia]

Por último, en la figura 8.42., se presenta una comparación de la distribución de componentes en la superficie de todas las muestras analizadas previamente. Es importante destacar algunas diferencias notables en cuanto a la distribución de elementos en las diferentes muestras. En la muestra sin tratamiento térmico cortada a contracapa y con tratamiento térmico cortada a favor de capa, se observa que tanto el oxígeno como el carbono están distribuidos especialmente a lo largo de la huella generada por el desgaste. Esto sugiere que la interacción entre el material de la muestra y el ambiente ha favorecido la oxidación y la acumulación de carbono en estas áreas específicas. Por otro lado, en la muestra con tratamiento térmico cortada a contracapa y la muestra sin tratamiento térmico cortada a favor de la capa, se puede apreciar una distribución más homogénea de los componentes en toda la superficie de la muestra. Esto indica que la oxidación y la presencia de carbono se han distribuido de manera más uniforme en estas muestras, en lugar de concentrarse en una zona específica. Estas diferencias en la distribución de componentes pueden tener implicaciones en las propiedades y el desempeño de las muestras. La concentración de oxígeno y carbono en la huella generada por el desgaste puede influir en la resistencia al desgaste y la corrosión localizada en esas áreas. Por otro lado, una distribución más homogénea de estos componentes en toda la superficie puede tener un impacto más uniforme en las propiedades mecánicas y químicas del material.

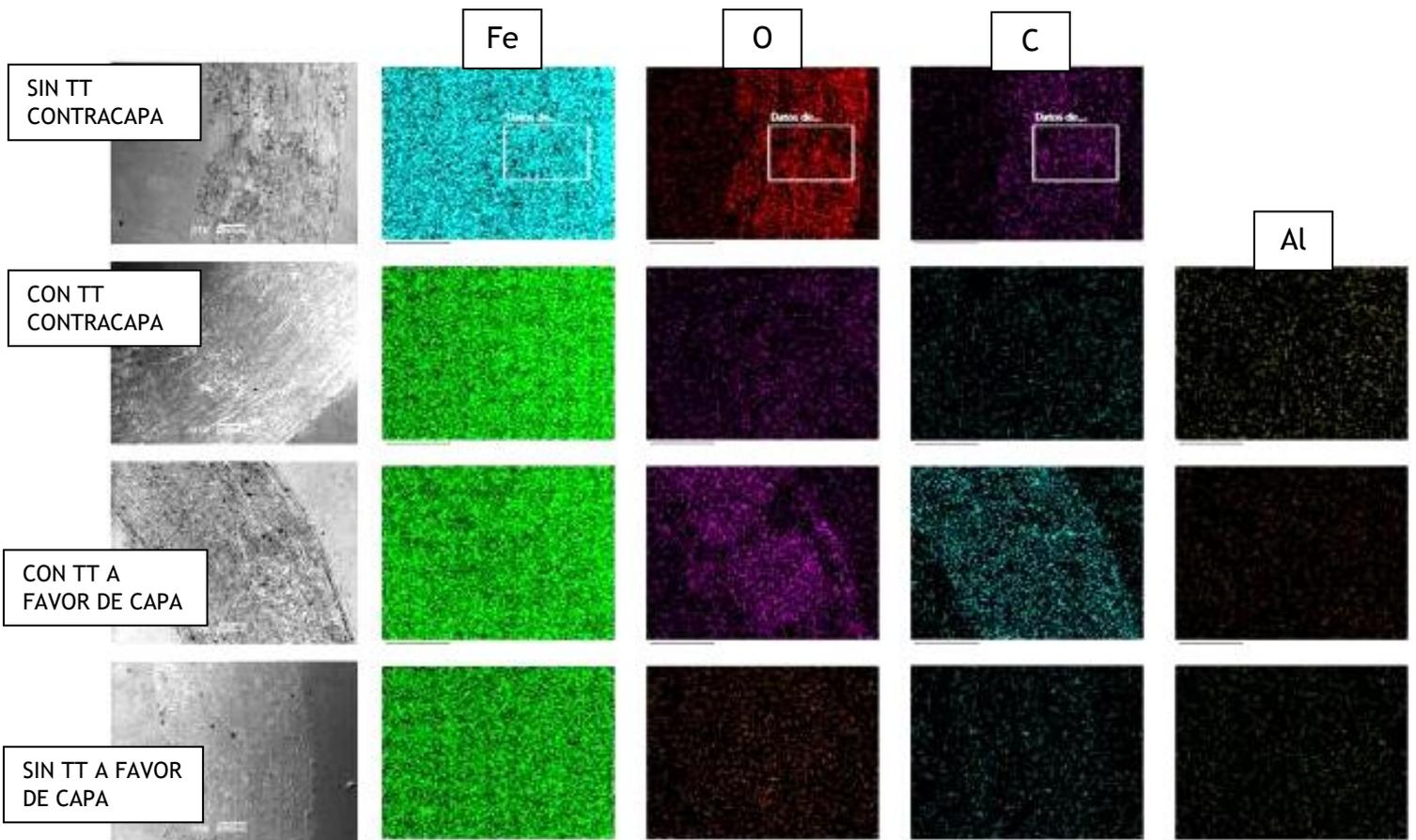


Figura 8.42. Comparación de la distribución de los componentes de todas las muestras analizadas. [Imagen de elaboración propia]

9. CONCLUSIONES.

Para finalizar y a modo de conclusión, hay que recordar que se han estudiado cuatro tipos de piezas: sin tratamiento térmico y cortada a favor de contracapa, con tratamiento térmico y cortada a contracapa, sin tratamiento térmico y cortada a favor de capa, y con tratamiento térmico cortada a favor de capa. Todas ellas de acero inoxidable 17-4PH y fabricadas por SLM.

El objetivo de la aplicación de los tratamientos térmicos era obtener una mejora en las propiedades de las muestras. Por otro lado, también se quería analizar la diferencia entre cortar las piezas a favor de las capas que se van creando en el proceso de fabricación aditiva SLM, o bien perpendicular a la capa.

Los resultados obtenidos han revelado la falta de eficacia de los tratamientos ante los ensayos de desgaste. La mayor diferencia se observó en las piezas

cortadas a contracapa, donde la muestra con tratamiento térmico presentó una mayor resistencia al desgaste por oxidación con respecto a la muestra sin tratamiento térmico, también cortada a contracapa. En el caso de las piezas cortadas a favor de la capa, sólo se vio una pequeña diferencia en la pieza con tratamiento térmico, la cual tenía más cantidad de óxido. Aun así, esta diferencia era mínima, y no se ajustó a las expectativas. Estas piezas cortadas a favor de la capa también presentaron desgaste abrasivo debido a los debris y microfisuras, lo cual afecta al desgaste y pueden llevar a fallas en el material.

En los demás análisis, como la microdureza, macrodureza y pérdida de masa, se observaron pequeñas diferencias, pero no fueron significativas.

Por lo tanto, sería recomendable realizar un estudio de desgaste en piezas de mayor tamaño para evaluar los cambios que ocurren y confirmar si el tamaño reducido de las muestras ha sido el motivo por el que los tratamientos no han sido del todo eficaces.

10. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] «17-4PH_ficha_tecnica_GSS.pdf». Accedido: 29 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.gss-spain.com/wp-content/uploads/2022/05/17-4PH_ficha_tecnica_GSS.pdf
- [2] stadstrand-admin, «17-4 PH - Aceros inoxidable ► suministro ex stock», *gss-spain.com*. <https://www.gss-spain.com/productos/aceros-inoxidables/17-4-ph/> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [3] «71473357Y_Mecánica_junio_16», *Google Docs*. https://docs.google.com/document/u/4/d/1jNcuE-wlSOzFp6vIK8v2l1NmYIZPXldLyp64r17_Tr8/edit?usp=drive_web&oid=107853184408897935749&usp=embed_facebook (accedido 29 de mayo de 2023).
- [4] V. F. Candanedo y A. I. F. Abia, «METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y PRECISIÓN EN TECNOLOGÍA SLM».
- [5] «Estudio de los factores críticos que afectan a la calidad de las piezas fabricadas por SLM», *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/MetalWorking/Articles/138722-Estudio-de-los-factores-criticos-que-afectan-a-la-calidad-de-las-piezas-fabricadas-por-SLM.html> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [6] «www.fabricacionaditiva.online/103.htm». Accedido: 29 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.fabricacionaditiva.online/103.htm>
- [7] HACKERMECANICO, «¿Qué es el desgaste?», 17 de noviembre de 2008. <https://hackermecanico.com/2008/11/17/%c2%bfque-es-el-desgaste/> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [8] J. A. L. Fuentes, «TRABAJO FIN DE GRADO».
- [9] I. Asteco, «Qué es el desgaste por abrasión y cómo combatirlo - Instituto Asteco», 19 de septiembre de 2018. <https://institutoasteco.com/asteco/desgaste-por-abrasion/>, <https://institutoasteco.com/asteco/desgaste-por-abrasion/> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [10] G. Miró, «Buenas prácticas tribológicas para evitar el desgaste de maquinaria». <https://blog.atten2.com/buenas-practicas-tribologicas-para-evitar-el-desgaste-de-maquinaria> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [11] N. L. América, «Explicación del desgaste adhesivo», *Noria Latín América*, 31 de enero de 2022. <https://noria.mx/analisis-de-lubricante-a/explicacion-del-desgaste-adhesivo/> (accedido 29 de mayo de 2023).
- [12] «¿Qué es el desgaste por erosión? Definición | Propiedades materiales», *Material Properties*, 26 de julio de 2021. <https://material-properties.org/es/que-es-el-desgaste-por-erosion-definicion/> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [13] «Desgaste erosivo - EcuRed». https://www.ecured.cu/Desgaste_erosivo (accedido 30 de mayo de 2023).
- [14] N. L. América, «La cavitación explicada e ilustrada», *Noria Latín América*, 21 de diciembre de 2021. <https://noria.mx/control-de-contaminacion-c/la-cavitacion-explicada-e-ilustrada/> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [15] D. H. M. Grajales y A. Sinatora, «EL DESGASTE DE MATERIALES, ENFRENTARLO O DEJARLO DE LADO Y ASUMIR LOS RIESGOS», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 22, Art. n.º 22, oct. 2003, doi: 10.22517/23447214.7427.
- [16] «Cavitación: uno de los fenómenos de desgaste - Instituto Asteco». <https://institutoasteco.com/asteco/cavitacion-uno-de-los-fenomenos-de-desgaste/> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [17] «Definición de corrosión; ¿Que es?, ¿cómo ocurre? y ¿cómo evitarla?» <https://www.nervion.com.mx/conocimientos/corrosion-definicion> (accedido 30 de mayo de 2023).

- [18] HACKERMECANICO, «¿Qué es la tribología?», 14 de septiembre de 2008. <https://hackermecanico.com/2008/09/14/%c2%bfque-es-la-tribologia/> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [19] «1.- Proyecto Manuel Gozalo Rodríguez 200512_FINAL», *Google Docs*. https://docs.google.com/document/u/4/d/1JyqnPYFIFwDciBMAUMw7N9Lo8WTFVoJLax9r4voY/edit?usp=drive_web&oid=107853184408897935749&usp=embed_facebook (accedido 7 de junio de 2023).
- [20] «Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear». <https://www.astm.org/g0133-05r16.html> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [21] «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus». <https://www.astm.org/g0099-17.html> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [22] A. M. Ralls *et al.*, «Tribological, Corrosion, and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Steel», *Metals*, vol. 12, n.º 10, Art. n.º 10, oct. 2022, doi: 10.3390/met12101732.
- [23] S. Giganto, S. Martínez-Pellitero, J. Barreiro, P. Leo, y M. Á. Castro-Sastre, «Impact of the laser scanning strategy on the quality of 17-4PH stainless steel parts manufactured by selective laser melting», *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 20, pp. 2734-2747, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.040.
- [24] P. Ponnusamy, S. H. Masood, S. Palanisamy, R. A. Rahman Rashid, y D. Ruan, «Characterization of 17-4PH alloy processed by selective laser melting», *Mater. Today Proc.*, vol. 4, n.º 8, pp. 8498-8506, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.196.
- [25] A. Dalmau, C. Richard, y A. Igual – Muñoz, «Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: Wear, corrosion and tribocorrosion appraisal», *Tribol. Int.*, vol. 121, pp. 167-179, may 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.01.036.
- [26] S. Kc, P. D. Nezhadfar, C. Phillips, M. S. Kennedy, N. Shamsaei, y R. L. Jackson, «Tribological behavior of 17–4 PH stainless steel fabricated by traditional manufacturing and laser-based additive manufacturing methods», *Wear*, vol. 440-441, p. 203100, dic. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.203100.
- [27] admin, «Tratamiento térmico / Alivio de tensiones», *Cia. General de Aceros S.A.*, 20 de diciembre de 2021. <https://www.cga.com.co/blog/tratamiento-termico-alivio-de-tensiones/> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [28] «Tratamiento de soluciones», *Paulo*. <https://www.paulo.com/es/capabilities/procesa/tratamiento-termico/tratamiento-de-la-solucion/> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [29] «Envejecimiento térmico», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 19 de abril de 2023. Accedido: 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Envejecimiento_t%C3%A9rmico&oldid=150640359
- [30] «Plásticos para aplicaciones con rozamiento, desgaste y cojinetes | Ensinger». <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/seleccion-de-materiales-plasticos/desgaste-por-rozamiento> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [31] Artedínámico, «QUE ES Y COMO FUNCIONA EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO», *Equipos y laboratorio de Colombia*. <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/que-es-y-como-funciona-el-microscopio-electronico-de-barrido> (accedido 12 de junio de 2023).
- [32] «Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/FESEM) - Universidad de Almería». <https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido> (accedido 12 de junio de 2023).
- [33] «¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido?». <https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido> (accedido 12 de junio de 2023).

- [34] Y. Zhang, B. Wang, F. Qiu, H. Yang, y G. Barber, «Superior Wear Resistance of Dual-Phased TiC-TiB₂ Ceramic Nanoparticles Reinforced Carbon Steels», *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.061.