



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCIÓN
TÉRMICA DE ALTA VELOCIDAD Y APORTES DE SOLDADURA PTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JORGE PATRICIO CARRASCO CONTRERAS

**PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO ZÚÑIGA PAEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARCO BÉJAR VEGA
RODRIGO PALMA HILLERNS**

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2010

Agradecimientos

A mi familia y amigos, lo más importante que tengo.

A los profesores de mi comisión y a todos quienes participaron y colaboraron para llevar a cabo este estudio, por confiar en mí, tener paciencia y disposición siempre.

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: JORGE CARRASCO CONTRERAS.
FECHA: 25/10/2010
PROF. GUÍA: Sr. ALEJANDRO ZUÑIGA

“CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA Y APORTES DE SOLDADURA PTA”

La creciente demanda de la industria por disponer de recubrimientos de alta resistencia a la corrosión y abrasión con un menor costo, induce el desarrollo de nuevos compuestos con menor rugosidad superficial y mayor adherencia al sustrato.

El desgaste abrasivo es uno de los grandes problemas que se presentan en piezas que trabajan en contacto con minerales.

Las técnicas de proyección térmica y soldadura PTA, son usadas para formar recubrimientos duros y se basan en conferir al material a depositar (en forma de polvo o varilla), suficiente energía térmica con tal de proyectar material fundido o parcialmente fundido con alta energía cinética formando un recubrimiento compacto.

El estudio que se presenta a continuación tiene su origen en la observación del desgaste prematuro en asientos de válvulas API-9 de bombas GEHO ZPM Duplex presentes en la minería del cobre, las cuales sufren desgaste por abrasión y son reemplazadas cada apróx. 800 [h]. El objetivo del trabajo es producir recubrimientos duros, determinar la influencia de la composición y micro-estructura en el comportamiento en desgaste y micro-dureza y comparar los resultados con el material presente en dicha válvula.

Se fabricaron 4 probetas de acero SAE 1020 de dimensiones 50x50x10 [mm], dos de ellas con recubrimientos metálicos; base níquel (Durmat 59 PTA), base hierro (Durmat 505 PTA), y dos con recubrimientos cerámicos una mezcla níquel y carburo de tungsteno (Durmat 62 PTA), y una con Carburo de tungsteno-Cobalto (Durmat 101 PTA). Se hizo Microscopía Óptica, se sometieron a ensayo de desgaste ASTM-G65 procedimiento A, microscopía electrónica de barrido (SEM) y Micro-dureza.

Los resultados arrojaron que Durmat 101 HVOF pierde un 65 % menos de peso y un 32% menos de espesor frente al material de la válvula. Además este recubrimiento es un 68 % más duro que la válvula, con un valor promedio de 1341,8 HV_{0.3}. Es el único recubrimiento que obtiene mejores resultados que el material de la válvula.

El 59 PTA muestra un crecimiento dendrítico fino en la microscopía, y al agregar carburos de tungsteno la resistencia al desgaste mejora y la dureza aumenta en un 31%. El 505 PTA tiene una micro-estructura muy fina y compacta, con carburos finos ordenados en una matriz de hierro. De los recubrimientos aportados por soldadura de arco transferido, fue el de mejor desempeño.

El recubrimiento metálico base Níquel, Durmat 59 PTA, es el que presenta el comportamiento más deficiente en todas las pruebas y es el único que en el ensayo de desgaste llegó al material base.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Motivación.....	2
1.3	Objetivo general	4
1.4	Objetivos específicos	4
1.5	Alcances.....	4
2	Antecedentes	5
2.1	Desgaste.....	5
2.1.1	Abrasión.....	5
2.1.2	Erosión.....	6
2.1.3	Impacto	6
2.1.4	Corrosión	6
2.1.5	Calor	6
2.2	Recubrimientos duros.....	6
2.2.1	Recubrimientos cerámicos.....	7
2.2.2	Recubrimientos metálicos.....	7
2.3	Soldadura por plasma	7
2.3.1	Soldadura PTA (Plama Transferred Arc)	9
2.4	Proyección térmica de alta velocidad (High Velocity Oxigen Fuel, HVOF)	11
3	Metodología experimental.....	13
3.1	Comportamiento mecánico.....	13
3.1.1	Ensayo de desgaste	13
3.1.2	Micro-dureza.....	14
3.2	Caracterización micro-estructural	15
3.3	Microscopía electrónica de barrido SEM	15
4	Procedimiento experimental.....	17
4.1	Proveedores de tecnologías	17
4.2	Composición del acero de válvula API-9.....	17

4.3	Selección de recubrimientos	18
4.3.1	Polvo base níquel.....	18
4.3.2	Mezcla metálica de polvo base níquel y carburo de tungsteno fundido esférico.....	18
4.3.3	Polvo base hierro (Durmat 505 PTA).....	19
4.3.4	Polvo de carburo de tungsteno-cobalto aglomerado y sinterizado (Durmat 101).....	19
4.4	Fabricación de recubrimientos.....	19
4.5	Probeta desde válvula	19
4.6	Terminación superficial.....	20
4.7	Obtención de muestras mediante electro-erosión.....	20
4.8	Pulido de muestras	22
4.9	Ensayo de micro-dureza	22
4.10	Microscopía Óptica	23
4.11	Ensayo de desgaste	23
4.12	Microscopía electrónica de barrido SEM.....	24
5	Resultados Experimentales.....	26
5.1	Producción de recubrimientos	26
5.2	Microscopía Óptica	28
5.2.1	Durmat 59 PTA.....	28
5.2.2	Durmat 62 PTA.....	29
5.2.3	Durmat 505 PTA.....	31
5.2.4	Durmat 101 HVOF.....	32
5.3	Ensayo de desgaste	34
5.3.1	Probeta válvula	34
5.3.2	Durmat 59 PTA.....	38
5.3.3	Durmat 62 PTA.....	42
5.3.4	Durmat 505 PTA.....	45
5.3.5	Durmat 101	48
5.3.6	Acero SAE 1020.....	51
5.4	Observación de superficies desgastadas.....	55
5.4.1	Probeta Válvula	55
5.4.2	Durmat 59 PTA.....	56

5.4.3	Durmat 62 PTA.....	58
5.4.4	Durmat 505 PTA.....	59
5.4.5	Durmat 101 HVOF	61
5.4.6	Acero SAE 1020	63
5.5	Ensayo de microdureza.....	64
5.5.1	Probeta válvula	64
5.5.2	Durmat 59 PTA.....	64
5.5.3	Durmat 62 PTA.....	66
5.5.4	Durmat 505 PTA.....	67
5.5.5	Durmat 101 HVOF	68
6	Análisis y Discusión de Resultados.....	70
6.1	Microscopía.....	70
6.2	Ensayo de Desgaste.....	71
6.2.1	Comparativa entre Válvula y Durmat 59 PTA	72
6.2.2	Comparativa entre Válvula-62 PTA	73
6.2.3	Comparativa entre Válvula-505 PTA	74
6.2.4	Comparativa entre Válvula-101 HVOF.....	75
6.2.5	Comparativa entre Acero 1020 y Durmat 101 HVOF	76
6.3	Análisis de superficies desgastadas	77
6.4	Ensayo de Micro-dureza.....	79
6.4.1	Comparativa entre Válvula y Durmat 59 PTA	79
6.4.2	Comparativa entre Válvula y Durmat 62 PTA	79
6.4.3	Comparativa entre válvula y Durmat 505 PTA	79
6.4.4	Comparativa entre válvula y Durmat 101 HVOF.....	80
6.4.5	Comparativa entre SAE 1020 y Durmat 101 HVOF	80
7	Conclusiones.....	81
8	Bibliografía.....	82

Índice de Figuras

Figura 1.1. Foto de asientos de válvula API-9.....	3
Figura 1.2. Dimensiones Asiento válvula API-9.....	3
Figura 2.1. Esquema de soldadura por plasma.....	8
Figura 2.2. Foto comparativa entre de soldadura por plasma (izquierda) y soldadura TIG (derecha).....	9
Figura 2.3. Esquema soldadura PTA.....	10
Figura 2.4. Esquema de pistola de dispositivo de aplicación de recubrimiento por HVOF.....	12
Figura 3.1 Maquina de ensayo de desgaste.....	13
Figura 3.2. Durometro Strues Dinamin, indentador Vickers.....	14
Figura 3.3. Microscopio Meiji.....	15
Figura 3.3. Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	16
Figura 4.1. Probeta recubierta con Durmat 59 PTA.....	20
Figura 4.2. Probeta recubierta con Durmat 62 PTA.....	21
Figura 4.3. Probeta recubierta con Durmat 505 PTA.....	21
Figura 4.4. Probeta Durmat 62 PTA cortada por electroerosión.....	21
Figura 4.5. Probeta de válvula API-9.....	22
Figura 4.6. Probeta Durmat 59 PTA cortada por electroerosión.....	22
Figura 4.7. Esquema de dimensiones del equipo para ensayo de desgaste.....	24
Figura 4.8. Montaje de probeta en la cámara del SEM.....	24
Figura 4.9. Acercamiento de montaje de probeta en SEM.....	25
Figura 5.1. Probeta recubierta con Durmat 59 PTA.....	26
Figura 5.2. Probeta recubierta con Durmat 62 PTA.....	26
Figura 5.3. Probeta recubierta con Durmat 505 PTA.....	27

Figura 5.4. Probeta recubierta con Durmat 101 HVOF.....	27
Figura 5.5. Se aprecia el sustrato, interface y Micro-estructura dendrítica del recubrimiento Durmat 59 PTA, izquierda 50x, derecha 100x.....	28
Figura 5.6. Se aprecia el sustrato, interface y Micro-estructura dendrítica del recubrimiento Durmat 59 PTA, 200x.....	28
Figura 5.7. Izquierda, Interface a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.....	29
Figura 5.8. Se aprecia el sustrato, interface y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 62 PTA. Izquierda 50x, derecha recubrimiento 100x.....	29
Figura 5.9. A la izquierda se aprecia la interface y a la derecha el recubrimiento Durmat 62 PTA, 200x.....	30
Figura 5.10. Izquierda, interface a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x	30
Figura 5.11. Se aprecia el sustrato, interface y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 505 PTA. Izquierda 50x, derecha 100x.....	31
Figura 5.12. A la izquierda se aprecia la interface y a la derecha el recubrimiento Durmat 505 PTA, 200x.....	31
Figura 5.13. Izquierda, interface a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.....	32
Figura 5.14. Se aprecia el sustrato, interface y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 101 HVOF. Izquierda 50x, derecha 100x.....	32
Figura 5.15. A la izquierda se aprecia la interface y a la derecha el recubrimiento Durmat 101 HVOF, 200x.....	33
Figura 5.16. Izquierda, interface a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.....	33
Figura 5.17. Secuencia de desgaste de probeta de válvula API-9.....	35
Figura 5.18. Gráfico tiempo v/s peso para probeta válvula.....	36
Figura 5.19. Gráfico tiempo v/s espesor para probeta válvula.....	36
Figura 5.20. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para probeta de válvula.....	37
Figura 5.21. Gráfico de desgaste de probeta de válvula en porcentaje.....	37
Figura 5.22. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 59 PTA.....	39
Figura 5.23. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	40

Figura 5.24. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	40
Figura 5.25. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	41
Figura 5.26. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	41
Figura.5.27 Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 62 PTA.....	43
Figura 5.28. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 62 PTA.....	43
Figura 5.29. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 62 PTA.....	44
Figura 5.30. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 62 PTA.....	44
Figura 5.31. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 62 PTA.....	45
Figura 5.32. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 505 PTA.....	46
Figura 5.33. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 505 PTA.....	46
Figura 5.34. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 505 PTA.....	47
Figura 5.35. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 505 PTA.....	47
Figura 5.36. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 505 PTA.....	48
Figura 5.37. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	49
Figura 5.38. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	49
Figura 5.39. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	50
Figura 5.40. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	50
Figura 5.41. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	51
Figura 5.42. Secuencia de desgaste para probeta de Acero SAE 1020.....	52
Figura 5.43. Gráfico tiempo v/s peso para Acero SAE 1020.....	52
Figura 5.44. Gráfico tiempo v/s espesor para Acero SAE 1020.....	53
Figura 5.45. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para Acero SAE 1020.....	53
Figura 5.46. Gráfico de desgaste para acero SAE 1020.....	54
Figura 5.47. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 100x.....	55
Figura 5.48. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 400x.....	55
Figura 5.49. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 1000x.....	56

Figura 5.50. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 100x.....	56
Figura 5.51. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 400x.....	57
Figura 5.52. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 1000x.....	57
Figura 5.53. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 100x.....	58
Figura 5.54. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 400x.....	58
Figura 5.55. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 1000x.....	59
Figura 5.56. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 100x.....	59
Figura 5.57. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 400x.....	60
Figura 5.58. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 1000x.....	60
Figura 5.59. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 100x.....	61
Figura 5.60. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 400x.....	61
Figura 5.61. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 1000x.....	62
Figura 5.62. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 1000x.....	62
Figura 5.63. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 100x.....	63
Figura 5.64. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 400x.....	63
Figura 5.65. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 1000x.....	64
Figura 5.66. Gráfico de micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 59 PTA.....	65
Figura 5.67. Gráfico de Micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 62 PTA.....	66
Figura 5.68. Gráfico micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 505 PTA.....	67
Figura 5.69. Gráfico de micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 101 HVOF.....	68
Figura 6.1. Izquierda, imagen del recubrimiento Durmat 59 PTA, derecha imagen del recubrimiento Durmat 62 PTA, 200x.....	70
Figura 6.2. Izquierda, imagen del recubrimiento Durmat 505 PTA 200x, derecha imagen del recubrimiento Durmat 101 HVOF, 1000x.....	71

Figura 6.3. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 59 PTA.....	72
Figura 6.4. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 62 PTA.....	73
Figura 6.5. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 505 PTA.....	74
Figura 6.6. Comparación de desgaste entre acero de válvula y Durmat 101 HVOF.....	75
Figura 6.7. Comparación de desgaste entre acero SAE 1020 y Durmat 101 HVOF.....	76
Figura 6.8. Comparación de imágenes del SEM entre Durmat 59 PTA y Durmat 62 PTA.....	77
Figura 6.9. Comparación de imágenes del SEM entre Durmat 505 PTA y Válvula.....	78
Figura 6.10. Imágenes del SEM del Durmat 101 HVOF para los distintos acercamientos, arriba 100x y 400x, abajo dos imágenes 1000x.....	78

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Composición de acero de válvula API-9.....	18
Tabla 4.2. Composición de recubrimiento Durmat 59 PTA.....	18
Tabla 4.3. Composición de recubrimiento Durmat 505 PTA.....	19
Tabla 4.4. Composición de recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	19
Tabla 5.1. Resultados ensayo de desgaste para probeta de válvula.....	34
Tabla 5.2. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 59 PTA.....	38
Tabla 5.3. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 62 PTA.....	42
Tabla 5.4. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 505 PTA.....	45
Tabla 5.5. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	48
Tabla 5.6. Resultados ensayo de desgaste probeta de acero 1020 sin recubrimiento.....	51
Tabla 5.7. Resultados de ensayo de micro-dureza para probeta válvula.....	64
Tabla 5.8. Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	65
Tabla 5.9. Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 59 PTA.....	65
Tabla 5.10. Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 62 PTA.....	66
Tabla 5.11. Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 62 PTA...66	66
Tabla 5.12 Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 505 PTA.....	67
Tabla 5.13 Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 505 PTA...67	67
Tabla 5.14 Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 101 HVOF...68	68
Tabla 5.15 Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 101 HVOF.....	68

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

La eficiencia y confiabilidad son características buscadas incansablemente por la ciencia e ingeniería. Esto conlleva al desarrollo de nuevas tecnologías las cuales ponen al servicio de la industria en general, soluciones que aumentan las prestaciones de los componentes mecánicos involucrados.

En toda operación industrial, un problema de consideración en el mantenimiento de herramientas, equipos y maquinarias, es el de minimizar el desgaste o recuperar las piezas desgastadas, cuyo costo es menor que el reemplazo de las mismas, para lo cual es importante reconocer el problema y la forma de recuperarlas, que por lo general, implica la aplicación de un recubrimiento duro y un maquinado para su acabado. Pero ello no lo es todo, lo primordial es conocer el cómo y con qué material reprocesar la pieza; para esto es necesario saber seleccionar el tipo adecuado de recubrimiento y el proceso de aplicación de éste.

Los recubrimientos duros de piezas de máquinas y equipos sometidos a desgaste son procedimientos que datan de unos 70 años atrás. Con el advenimiento de los procesos de soldadura, se intentó restaurar las superficies desgastadas de las piezas de acero, algunas veces con éxito y otras infructuosamente, situación que obligó a experimentar con metales y aleaciones que producían recubrimientos duros. Las industrias petrolera, minera y de construcción civil fueron los primeros en utilizar estos procesos. El éxito alcanzado motivó una utilización cada vez más creciente en otros campos.

Los revestimientos duros y la soldadura de mantenimiento, prolongan la vida útil de la maquinaria, al obtener altos rendimientos durante más tiempo y reducir el número de fallas. La avanzada tecnología de los recubrimientos, provee a las industrias, uno de los medios más eficaces para combatir el desgaste prematuro, adelantándose a la falla o al momento en que el equipo deja de trabajar en sus condiciones óptimas. De esta manera se optimiza la disponibilidad de la maquinaria, se disminuye costos de mantenimiento y se maximiza la vida útil. Con ello se logra un aumento en la disponibilidad de sistemas críticos y se reduce drásticamente la compra de repuestos.

En este trabajo se estudiarán recubrimientos aplicados por dos tecnologías diferentes; Rociado térmico de alta velocidad y Soldadura Por Arco Transferido.

Los recubrimientos cerámico-metálicos conocidos comúnmente como Cermets, se utilizan ampliamente en aplicaciones en las cuales se requiere buena resistencia al desgaste. Dentro de estos materiales los más utilizados son los carburos de tungsteno (WC-Co), debido a las excelentes propiedades tribológicas que estos materiales exhiben las cuales son atribuidas a su buena adhesión al substrato, buena cohesión, baja porosidad, baja tendencia a formar fases frágiles y alta dureza. Además la tenacidad

otorgada por la matriz que puede ser Co, CoCr o Ni, conforman sistemas que no solamente son duros sino además tenaces, haciéndolos atractivos para numerosas aplicaciones industriales.

Los recubrimientos tipo Cermets son generalmente depositados por técnicas de rociado térmico, ya que estos procesos ofrecen un método efectivo y relativamente económico para proveer buena resistencia al desgaste sin comprometer otros atributos del componente. Uno de los procesos más adecuados para depositar estos materiales, es la proyección térmica de alta velocidad (HVOF por sus siglas en inglés)

Por su parte la soldadura por arco transferido es una evolución de la soldadura TIG, la cual permite depositar compuestos metálicos o mezcla metálico-cerámico de manera mucho más precisa y a menores temperaturas, evitando así variaciones de las propiedades del sustrato. Esta técnica permite una baja disolución por fusión entre el recubrimiento y el sustrato y así no perder a baja profundidad las cualidades del material de aporte.

El trabajo apunta a caracterizar recubrimientos duros tanto metálicos como cerámicos depositados con tecnología de vanguardia como soldadura por arco transferido y proyección térmica de alta velocidad, compararlos con el acero presente actualmente en los asientos de válvulas y concluir cómo se comportan mecánica y estructuralmente.

1.2 Motivación

En el mundo la recuperación de piezas desgastadas por abrasión o corrosión con metalizados y recubrimientos es cada vez más utilizada, estudiando nuevos y mejores materiales, métodos más eficientes de depósito protegiendo el material base y obteniendo superficies con menos rugosidad superficial, mayor adherencia al sustrato y extrema resistencia al desgaste abrasivo.

En la minería del cobre existen bombas de desplazamiento positivo, las cuales mueven pulpa de agua con un 65% de arena, esta pulpa provoca un gran desgaste abrasivo en algunas de las piezas involucradas en el proceso, específicamente el objeto de estudio son los asientos de válvulas API-9 de las bombas GEHO ZPM, los cuales fallan cada aproximadamente 800 [h] por abrasión.



Figura 1.1. Foto de asientos de válvula API-9

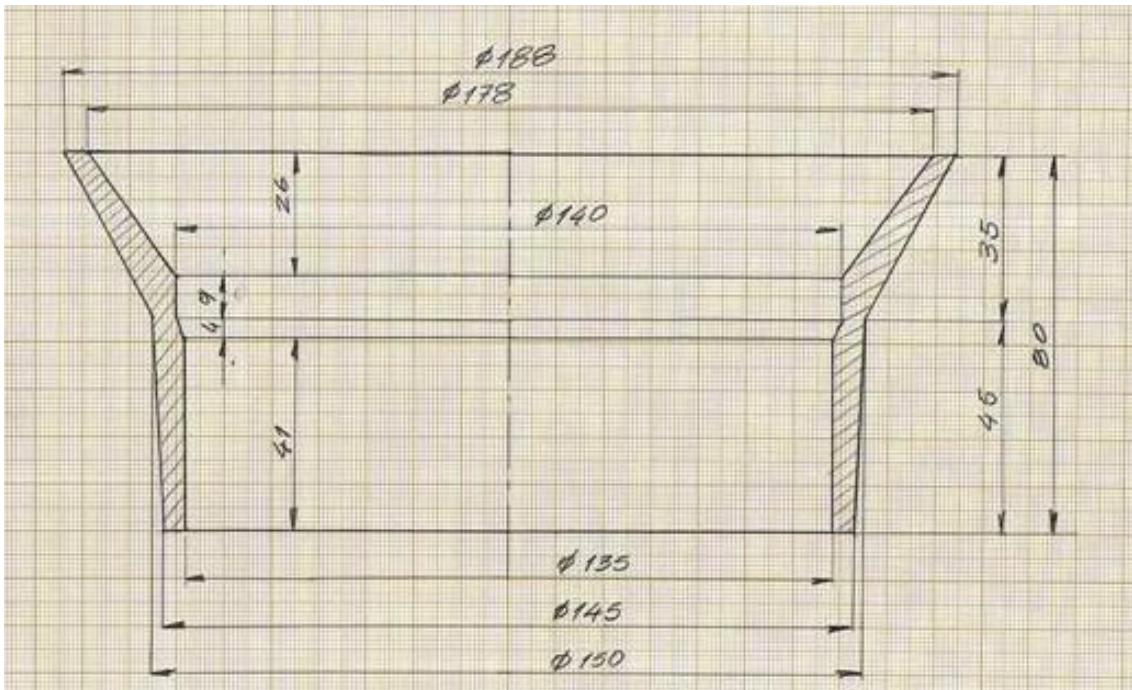


Figura 1.2. Dimensiones Asiento válvula API-9

La principal motivación es buscar alternativas al desgaste abrasivo de estas piezas mecánicas presentes en una de las industrias más importantes del país, como lo es la minería, utilizando tecnología de vanguardia.

1.3 Objetivo general

- Caracterizar el comportamiento de recubrimientos sobre acero obtenidos por proyección térmica de alta velocidad y aportes de soldadura PTA y compararlos con el material del que están compuestos los asientos de válvula API-9.

1.4 Objetivos específicos

- Producir cinco probetas de acero 1020 recubiertas:
 - dos recubrimientos duros cerámicos en base a carburo de tungsteno y
 - dos metálicos en base hierro y níquel.
- Estudiar la micro-estructura de los recubrimientos
- Determinar la influencia de la composición y micro-estructura del recubrimiento sobre micro-dureza y resistencia al desgaste.
- Comparar el desempeño en desgaste y micro-dureza de los recubrimientos con el del material de la válvula API-9 y el acero SAE 1020.

1.5 Alcances

La limitación más importante es el acceso a la tecnología de proyección térmica HVOF, ya que no existe la alternativa en Chile de uso con fines de investigación. Este proceso está disponible en solo cuatro empresas del rubro del metalizado, como un servicio de recubrimiento y recuperación de determinadas piezas con restricciones geométricas y de maquinado posterior.

La fabricación de recubrimientos está condicionada por la disponibilidad comercial de los polvos y electrodos.

Se cuenta con un presupuesto de un millón de pesos para la realización de la investigación.

2 Antecedentes

Se presentan a continuación los antecedentes relativos al objeto de estudio, definición de desgaste, materiales ocupados en revestimientos, tecnologías de aplicación del material de aporte sobre el sustrato.

2.1 Desgaste

El desgaste no viene a ser sino la remoción de partículas de la superficie de una pieza metálica por acción de fuerzas de fricción, combinada algunas veces con fuerzas de impacto y/o corrosión.

Los problemas de desgaste existen en cualquier parte donde exista movimiento, casi todas las industrias encuentran problemas de desgaste. Excesivos desgastes causan grandes pérdidas anualmente debido a:

- Detenciones de producción no planificadas.
- Reemplazos repetitivos de partes costosas.
- Costos elevados por mantenimiento no-planificado.
- Pérdidas de eficiencia de producción.
- Pérdidas de ventas por pobres rendimientos de productos.

Principales factores de Desgaste.-

Entre los principales factores de desgaste podemos considerar a la abrasión, erosión, impacto, corrosión, y calor. Otros factores no menos importantes, pero menos comunes son el rozamiento metal-metal, la cavitación e impacto-fatiga.

2.1.1 Abrasión

Originada por la acción de partículas abrasivas duras que bajo acción de cargas se mueven en la superficie de la pieza, creando surcos o canales por remoción de material más blando. El proceso de remoción se efectúa por uno de los siguientes mecanismos:

- Cortante: ocurre en materiales dúctiles, cuando partículas con bordes agudos actúan formando virutas de metal.
- Desconchado: cuando la superficie es dura y frágil, las partículas duras fracturan y desprenden el material en forma de astillas.

- Labrado: se produce cuando partículas redondeadas actúan sobre superficies dúctiles produciendo deformación plástica y deposición de material en los bordes.

- Erosión: causada por impactos de partículas sólidas a alta velocidad y determinado ángulo de incidencia.

2.1.2 Erosión

Se produce por la acción cortante de partículas suspendidas en un medio fluido con alta energía cinética actuando bajo un determinado ángulo de impacto, cuyo daño al material puede verse acelerado por calor y corrosión.

2.1.3 Impacto

Se traduce en la colisión de partículas sobre la superficie metálica que origina un debilitamiento de sus propiedades mecánicas, por alteración de la estructura cristalina superficial.

2.1.4 Corrosión

Este mecanismo ocurre cuando se produce una reacción química o electroquímica. Podemos considerar dos situaciones diferentes, el ataque químico directo en el cual los electrones abandonan el metal convirtiéndolos en cationes metálicos de un compuesto y la corrosión electroquímica por acción de un electrolito y de otro metal que produzca una acción catódica, convirtiendo a la pieza metálica en parte anódica.

2.1.5 Calor

Este no es un factor que cause un desgaste directo, más bien es un factor coadyuvante de los otros mecanismos, que actúa acelerando la acción de los otros factores antes mencionados.

2.2 Recubrimientos duros

Se entiende por recubrimientos duros aquellas películas delgadas con las que se recubren superficies de muchas piezas de uso técnico, con la finalidad de proporcionarles mayor dureza y mayor resistencia al desgaste. También los recubrimientos pueden aportar otras propiedades de gran importancia para aplicaciones específicas como pueden ser; disminuir el coeficiente de fricción, aumentar la resistencia a la corrosión, introducir propiedades ópticas especiales en la superficie o también producir colores o texturas con fines decorativos.

En nuestros días los recubrimientos más modernos son los llamados recubrimientos de capa fina; capas delgadas de uno o más materiales con espesores pequeños, que van desde algunos nanómetros hasta algunas micras, y de alta calidad tanto en su composición como en su estructura. Su desarrollo y uso fue retardado debido a las tecnologías avanzadas involucradas, tales como; tecnología de alta corriente y

voltaje, tecnología de control de proceso y electrónicas relacionadas, física y química de plasma y tecnología de vacío.

2.2.1 Recubrimientos cerámicos

Los materiales cerámicos son compuestos químicos constituidos por metales y no metales (óxidos, nitruros, carburos, etc.) que incluyen minerales de arcilla, cementos y vidrios. Se trata de materiales/minerales que son aislantes térmicos y que a elevada temperatura y en ambientes agresivos, son más resistentes que los metales y los polímeros. Desde el punto de vista mecánico, son duras y ligeras pero frágiles. Los enlaces interatómicos pueden ser de carácter iónico, o bien de carácter predominantemente iónico con carácter parcial covalente. Las cerámicas se pueden presentar en forma vítrea, mono-cristalina, poli-cristalina o combinaciones de algunas de ellas. Estos materiales tienen dos características importantes, por un lado, su capacidad de resistir al calor y por otro, su resistencia al ataque químico que son debidas sustancialmente a la fortaleza del enlace entre sus átomos que les confiere un alto punto de fusión, dureza y rigidez. El término “cerámica” proviene de la palabra griega “keramikos”, que significa “cosa quemada”, indicando de esta manera que las propiedades deseables de estos materiales generalmente se alcanzan después de un tratamiento térmico a alta temperatura que se denomina cocción.

2.2.2 Recubrimientos metálicos

Se denominan súper-aleaciones a un grupo de materiales de base níquel, hierro y cobalto que son utilizados a temperaturas de 540 °C y superiores. Las súper-aleaciones poseen elevada resistencia a altas temperaturas, resistencia al ataque del medio ambiente (incluyendo nitruración, carbonización, oxidación y sulfuración), excelente resistencia al “Creep”, resistencia a la ruptura por estrés, estabilidad metalúrgica, características de expansión térmica muy útiles y resistencia a la fatiga térmica y a la corrosión. En los últimos diez años se han realizado avances tecnológicos en el desarrollo de modernos motores de turbinas para aviones y dirigibles y componentes de generación de energía coincidiendo con significativos logros de ingeniería en el área de la metalurgia de súper-aleaciones de base níquel.

2.3 Soldadura por plasma

El plasma se considera el cuarto estado de la materia después de la sólida, el líquido y el gaseoso. El plasma consiste en un aglomerado de iones positivos átomos neutros y electrones libres. Y obteniéndose por calentamiento de gases hasta temperaturas extremadamente elevadas. En los cambios de estados de la materia interviene una cierta cantidad de calor (calor latente de la transformación) así, para transformar agua en vapor es necesario aportar calor. De la misma forma. El arco suministra calor al gas para llevarlo al estado de plasma. Posteriormente cuando el plasma vuelve al estado gaseoso devuelve la misma cantidad de calor.

La soldadura por arco plasma es conocida técnicamente como PAW (Plasma Arc Welding), y utiliza los mismos principios que la soldadura TIG, por lo que puede considerarse como un desarrollo de este último proceso. Sin embargo, tanto la densidad energética como las temperaturas son en este proceso mucho más elevadas ya que el estado plasmático se alcanza cuando un gas es calentado a una temperatura suficiente para conseguir su ionización, separando así el elemento en iones y electrones. La mayor ventaja del proceso PAW es que su zona de impacto es dos o tres veces inferior en comparación a la soldadura TIG, por lo que se convierte en una técnica óptima para soldar metal de espesores pequeños.

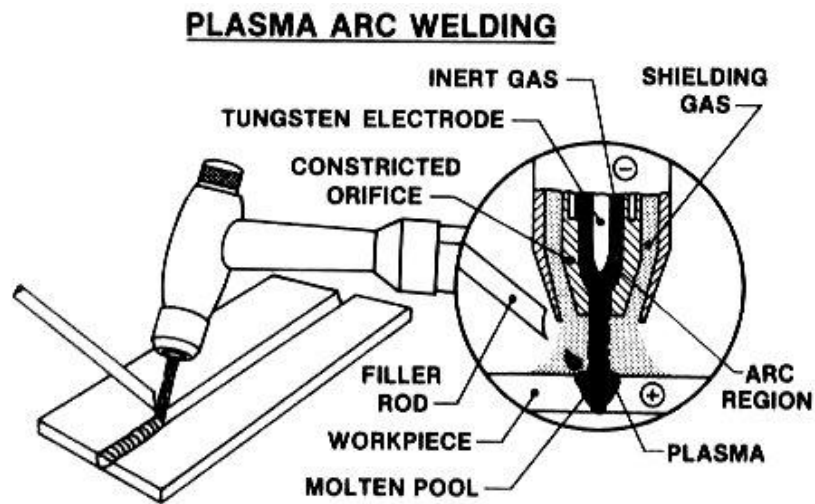


Figura 2.1. Esquema de soldadura por plasma.

En la soldadura por plasma la energía necesaria para conseguir la ionización la proporciona el arco eléctrico que se establece entre un electrodo de tungsteno y el metal base a soldar. Como soporte del arco se emplea un gas, generalmente argón puro o en ciertos casos helio con pequeñas proporciones de hidrógeno, que pasa a estado plasmático a través del orificio de la boquilla que estrangula el arco, dirigiéndose al metal base un chorro concentrado que puede alcanzar los 28.000 °C. El flujo de gas de plasma no suele ser suficiente para proteger de la atmósfera al arco, el baño de fusión y al material expuesto al calentamiento. Por ello a través de la envoltura de la pistola se aporta un segundo gas de protección, que envuelve al conjunto.

La soldadura por plasma – PAW – se presenta en tres modalidades:

1. Soldadura micro-plasma, con corrientes de soldadura desde 0.1 Amp. hasta 20 Amp.
2. Soldadura por fusión “metal to metal”, con corrientes de soldadura desde 20 Amp. hasta 100 Amp.
3. Soldadura Keyhole, por encima de los 100 Amp. en el cual el arco plasma penetra todo el espesor del material a soldar.

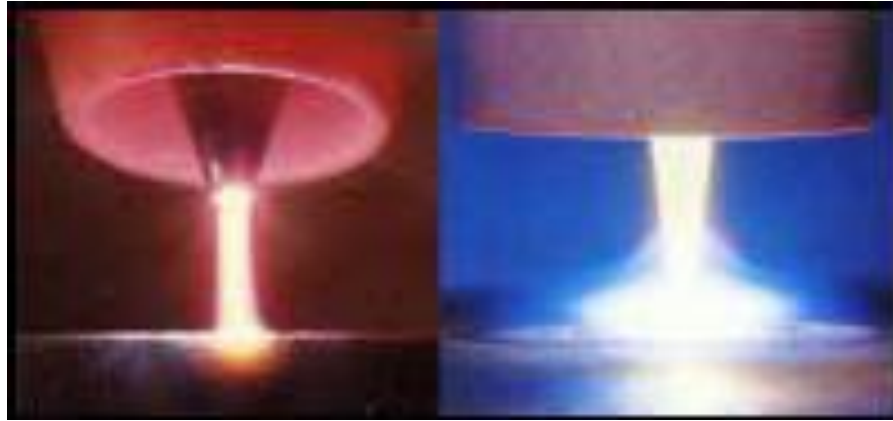


Figura 2.2. Foto comparativa entre de soldadura por plasma (izquierda) y soldadura TIG (derecha)

La principal característica que distingue a los sopletes de arco de plasma de otros sopletes de arco es que, para una corriente y tasa de flujo de gas dados, el voltaje del arco es más alto en el soplete de arco de plasma. El arco se constriñe haciéndolo pasar por un orificio situado en el electrodo. Cuando el gas de plasma atraviesa el arco, se calienta rápidamente hasta una temperatura elevada, se expande y se acelera al pasar por el orificio de constricción hacia la pieza de trabajo.

2.3.1 Soldadura PTA (Plama Transferred Arc)

Los términos “arco transferido” y “arco no transferido” son importantes en el vocabulario de la soldadura por plasma. Un arco transferido fluye del electrodo dentro de la boquilla a la pieza de trabajo, mientras que un arco no transferido ocurre del electrodo a la boquilla independientemente de la pieza de trabajo.

El proceso de soldadura por arco transferido se utiliza como un método de tratamiento superficial en el cual se funde un polvo metálico en un arco de plasma, soldándose sobre la superficie de la pieza trabajada. El depósito así formado es denso y resistente a la corrosión y el desgaste. Además, los recubrimientos se aplican con precisión, sobre una amplia gama de materiales de base, con prácticamente cualquier configuración geométrica.

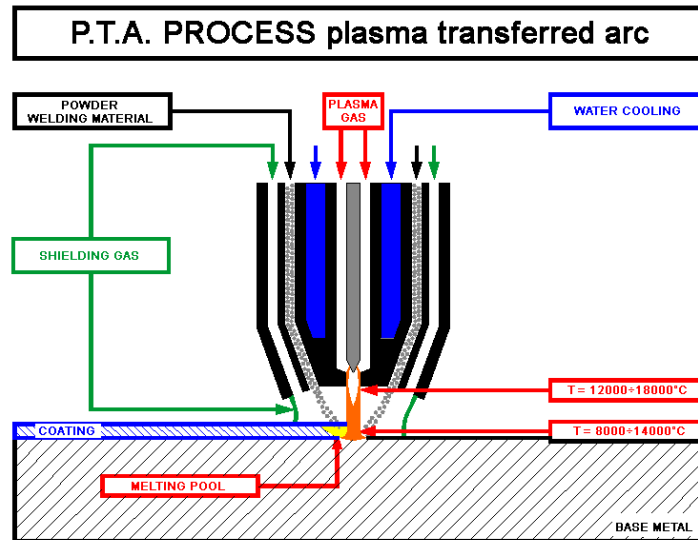


Figura 2.3. Esquema soldadura PTA

La dilución, o sea, el grado de mezcla entre el material de base y el material aportado, puede controlarse con precisión y se lo puede mantener normalmente por debajo del 5%.

El espesor del depósito en apenas una pasada puede controlarse perfectamente entre 0.2mm y 5mm, siendo posible también aplicar múltiples pasadas. El espesor del revestimiento puede controlarse con absoluta precisión y el proceso puede automatizarse fácilmente.

El calor del arco de plasma provoca la fusión del material de revestimiento que es aportado a través de un sistema de alimentación perfectamente controlado, como también la fusión de la superficie de la pieza objeto del revestimiento.

- **MATERIALES DE APORTE**

Algunos de los materiales más frecuentemente aplicados son: aleaciones de cobalto conocidas como "Stellite"; aleaciones de base Cr-Ni-B-Si con diferentes valores de dureza; compuestos con cantidades variables de WC contenido en una matriz Ni-Cr; aceros inoxidables, super-aleaciones, etc.

- **VENTAJAS**

Desde el punto de vista de la homogeneidad del recubrimiento y la adherencia al material base, el proceso es similar al MIG, TIG y arco sumergido, pero tiene las siguientes ventajas:

- **Maquinado:** reduce la dependencia de la habilidad del operario, reduce los índices de rechazo, mayor reproductibilidad.
- **Depósitos de mejor calidad:** debido a que los niveles de dilución son menores y la zona afectada por el calor es menor, lo que significa menor nivel de oxidación. Como también, y en consecuencia de esto, el material depositado se enfría más rápido, la micro-estructura es más refinada lo que resulta en mejores propiedades mecánicas y de resistencia a la abrasión y corrosión.

- **Depósitos más económicos:** la tasa de depósito es más elevada (controlable de algunos gramos por minuto hasta 10 kilos por hora) lo que reduce el tiempo de trabajo. También, al ser más uniforme el depósito requiere menor sobre-material y consecuentemente menos tiempo de maquinado.
- **APLICACIONES**

Algunas de las aplicaciones más comunes de este proceso son; válvulas para motores de combustión interna, tapa de cilindros, ejes de bombas, válvulas de control de fluidos (exclusas, globo, etc), bombas, tornillos de extrusoras, cuchillas de corte, anillos de desgaste, moldes para vidrios, herramientas de agricultura, árbol de levas, matrices, martillos de molinos, diversas partes de máquinas de minería, máquinas de la industria del caucho, chapas de desgaste, rodillos de laminación continua (colada continua), machos de extrusión, anillos de desgaste, sellos mecánicos, manguitos, etc.

2.4 Proyección térmica de alta velocidad (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF)

La proyección térmica HVOF es un procedimiento que consiste en proyectar partículas que son fundidas en un proceso de combustión y posteriormente aceleradas en una tobera convergente-divergente logrando velocidades de los gases superiores a la velocidad del sonido. La alta energía cinética de las partículas en el momento de impacto produce recubrimientos densos y resistentes, mientras que el poco tiempo de residencia de la partícula en la llama (del orden de microsegundos) disminuye la cantidad de óxidos o efectos negativos para la composición química del material a proyectar.

Esta técnica se basa, en la combustión, generalmente propano, propileno, gas natural, hidrógeno o keroseno y un comburente, oxígeno o aire, ambos a elevada presión. Debido a la expansión de los gases hacia el exterior de la cámara de combustión, se genera un haz que se encarga de acelerar las partículas que han sido introducidas.

Las aplicaciones de este proceso son muy variadas, como polvos metálicos o cerámicos que recubren superficies generalmente metálicas, destinados a mejorar su resistencia a la corrosión y la resistencia al desgaste. Así se aplican, a piezas de bombas hidráulicas, camisas, ejes, pistones, válvulas, etc. Sin olvidar aplicaciones destinadas a la recuperación de piezas que han sobrepasado los límites del desgaste admisible.

En cuanto a los materiales usados en recubrimientos para disminuir el desgaste tenemos: Bronces de aluminio, Cupro-Niqueles, Alúmina, Carburos de Cromo, Níquel-Cromo, Carburo de tungsteno, Óxido de Titanio, entre otros.

Los diversos sistemas de HVOF se diferencian en el tipo de alimentación, tipo de inyección y el diseño de la cámara de combustión. El polvo como materia prima generalmente se inyecta en los gases de escape de agua caliente, o en la cámara de combustión, dependiendo del tipo de HVOF y sistema de la boquilla (fig. 2.4). La calefacción y la aceleración de las partículas se lleva a cabo dentro del cañón de la antorcha y la velocidad de la salida y la ampliación de gases puede ser tan alto como 1200 m/s.

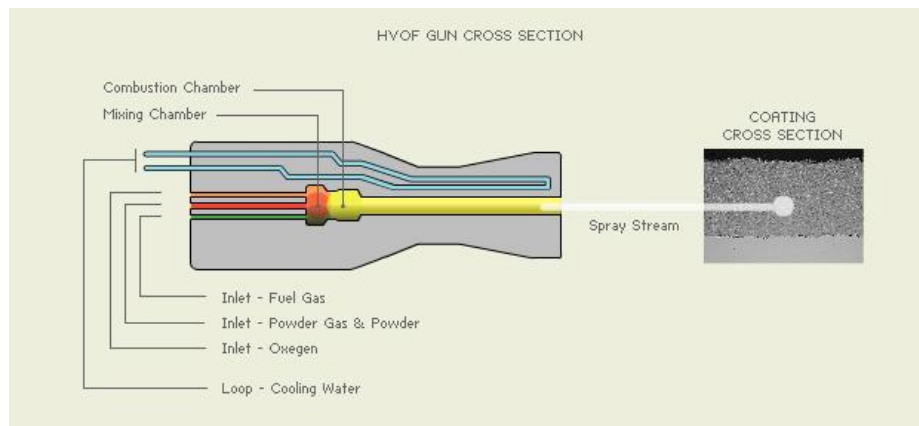


Figura 2.4. Esquema de pistola de dispositivo de aplicación de recubrimiento por HVOF.

Debido a las altas velocidades de partículas y las temperaturas más bien moderadas, estos procesos se utilizan preferentemente para el revestimiento de materiales que tienden a descomponerse a temperaturas más altas, este es el motivo de su principal aplicación, el depósito de metales duros, carburos cementados como WC / Co y Cr₃ C₂ / NiCr, ya que la densidad y la resistencia al desgaste de estos recubrimientos es muy buena.

El principal campo de aplicación de recubrimientos mediante HVOF radica en la mejora de resistencia a la abrasión y el desgaste. Algunos ejemplos de su aplicación son; componentes como las boquillas de chorro de agua de las herramientas de corte, industrias productoras de aluminio, válvulas y bombas en las aplicaciones petroquímicas y sellos mecánicos.

3 Metodología experimental

3.1 Comportamiento mecánico

3.1.1 Ensayo de desgaste

La resistencia al desgaste de las probetas con recubrimientos duros se analizará mediante el ensayo de desgaste abrasivo llamado “Rubber wheel” utilizando un disco con recubrimiento de goma (Clorobutilo) sobre el cual se aplica arena de cuarzo seca de granulometría de 200 [μm], de acuerdo con el procedimiento estándar ASTM-G65 Procedimiento A, este procedimiento es el indicado para recubrimientos duros.

Este ensayo permite efectuar procedimientos para determinar la resistencia de materiales a la abrasión sobre una rueda de goma rotatoria. El equipo a utilizar se puede observar en la figura 3.1.

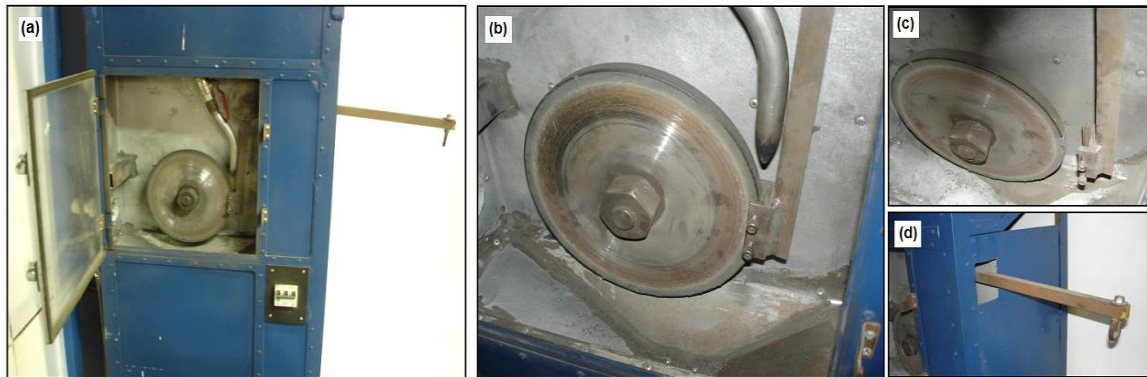


Figura 3.1 Maquina de ensayo de desgaste.

Los parámetros de la norma ASTM-G65 Procedimiento A son los siguientes:

- El caudal de arena de cuarzo debe estar entre 300 y 400 g/min.
- La granulometría de la arena debe ser de 200 μm .
- El disco con recubrimiento de goma debe tener un diámetro inicial de 228,6 mm.
- La rueda posee una velocidad angular de 200 rpm.
- La fuerza aplicada a la probeta debe ser de 130 N.
- La duración del ensayo debe ser de 30 min.

3.1.2 Micro-dureza

Los ensayos de micro-dureza se llevarán a cabo en un Micro-durómetro Strues Dimanin (-1/-2) Identador Vickers, el cual pertenece al Laboratorio de Metalografía del Departamento de Ciencia de los Materiales de la Universidad de Chile. Se aplicará una carga de 300 g durante 10 s.



Figura 3.2. Durometro Strues Dinamin, identador Vickers.

Con el fin de evitar errores en el ensayo de micro-dureza, en forma previa y a temperatura ambiente, las probetas serán pulidas mecánicamente, primero con lijas de metal para trabajo en agua en orden de numeración 80, 100, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500, seguido con un pulido manual con una solución de alúmina de 0,5, hasta dejar la superficie pulida a espejo, con el fin de quitar el óxido existente en la superficie a ensayar. Debido a las posibles desviaciones que se pudieran encontrar en las mediciones, se realizaron 15 mediciones por probeta.

El procedimiento empleado consiste en ubicar la probeta sobre la plataforma y ajustar el lente hasta que la superficie pueda ser observada nítidamente. Posteriormente, se aplica la carga de 300 g. A través del lente se ajusta la distancia cero entre las líneas verticales que miden la longitud de la línea diagonal-horizontal, para luego mover estas líneas a los vértices, ingresando así la longitud de la línea diagonal-horizontal. Se gira 90° el cabezal del lente y se mide con el mismo procedimiento la línea diagonal-vertical. El perfil de micro-dureza se realizará sobre una sección longitudinal de las probetas

cuadradas, donde se puede apreciar el sustrato de acero, la interface de unión y el recubrimiento. Se realizaron las indentaciones a lo largo de esta sección (sobre el recubrimiento). Debido a la alta desviación encontrada de las mediciones, se realizan 15 mediciones por probeta.

3.2 Caracterización micro-estructural

Se utilizará Microscopía Óptica para obtener micrografías de las probetas con tal de estudiar el sustrato la interface y el recubrimiento. La sección expuesta de las probetas en el microscopio serán pulidas mecánicamente, primero con lijas de metal para trabajo en agua en orden de numeración 80, 100, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500, seguido con un pulido manual con una solución de alúmina de 0,5, hasta dejar la superficie pulida a espejo.

Las microscopías se realizarán en un microscopio marca Meiji con acercamientos de 50x, 100x, 200x y 1000x perteneciente al Departamento de Ciencia de los Materiales de la Universidad de Chile.



Figura 3.3. Microscopio Meiji.

3.3 Microscopía electrónica de barrido SEM

Se utilizará el microscopio electrónico de barrido (SEM) dado que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que se trabajan en este estudio, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la

alta resolución ($\sim 100 \text{ \AA}$), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

Las probetas sometidas al ensayo de desgaste se analizarán en el microscopio electrónico de barrido SEM, con el propósito de identificar el mecanismo por el cual se desgastaron.



Figura 3.4. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

4 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental utilizado para la realización de este trabajo de título se dividió en las siguientes secciones que se detallan a continuación:

- Buscar proveedores de tecnologías
- Determinar composición de acero de válvula API-9
- Seleccionar recubrimientos
- Fabricar recubrimientos
- Obtener probeta desde válvula
- Rectificado de probetas
- Obtención de muestras desde probetas mediante electroerosión
- Preparación de equipo para ensayo de desgaste
- Realización de ensayo de desgaste
- Microscopía electrónica de barrido
- Pulido de muestras
- Ensayo de micro-dureza
- Obtención de imágenes mediante Microscopia Óptica

4.1 Proveedores de tecnologías

En Chile la tecnología de soldadura PTA y de HVOF para depositar recubrimientos duros sobre acero no es ampliamente utilizada y existen solo algunas empresas que lo realizan con fines comerciales. Se debió realizar una alianza de cooperación estratégica para poder contar con la maquinaria necesaria y los materiales de aporte.

Industrial Comercial Chile Ltda. provee de las máquinas y Durum Alemania provee los recubrimientos.

4.2 Composición del acero de válvula API-9

La composición del material de la válvula fue obtenida por medio de análisis químico, lo cual se desarrolló en el centro técnico de Indura, CETI, bajo la norma ASTM E572(IT-C-INSPEFRX-01) Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.

Tabla 4.1. Composición de acero de válvula API-9

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	V
Composición %	2,41	0,772	0,704	0,03	0,036	15,08	0,934	0,764	0,205	0,004	0,042

Este material se denomina fundición blanca con alto contenido de cromo.

Las fundiciones blancas aleadas con cromo son productos muy demandados por la industria minera, mineralúrgica, metalúrgica y siderúrgica en virtud de su alta dureza, resistencia a la abrasión y resistencia a la oxidación, que se obtienen a partir de micro-estructuras caracterizadas por un alto contenido de carburos eutécticos junto a otra fase predominantemente martensítica. Estas fundiciones se utilizan mucho en las industrias minera y cementera, en aquellas situaciones en las que el producto debe soportar simultáneamente acciones de desgaste abrasivo e impactos, como en instalaciones trituradoras, instalaciones de clasificación granulométrica o sistemas de bombeo.

4.3 Selección de recubrimientos

Los recubrimientos se seleccionaron previo estudio de los materiales más usados para el aumento de la resistencia a la abrasión y teniendo como antecedente principal la composición de la válvula y con esto tener claro si el material es soldable o tratable térmicamente.

Actualmente en diversos estudios se ha recomendado el uso de materiales cerámicos compuestos de carburo de tungsteno y las super-aleaciones base hierro, níquel y cobalto.

Previo análisis de catálogo facilitado por Durum se eligieron tres recubrimientos metálicos aportados por soldadura PTA y uno cerámico depositado por HVOF.

Los recubrimientos metálicos son:

4.3.1 Polvo base níquel

El nombre comercial de este recubrimiento es Durmat 59 PTA. Este es un recubrimiento aplicado por soldadura PTA.

Tabla 4.2. Composición de recubrimiento Durmat 59 PTA.

	C	Si	Ni	B	Fe
Composición %	0,02	3	balance	3	<2

4.3.2 Mezcla metálica de polvo base níquel y carburo de tungsteno fundido esférico

El nombre comercial de este recubrimiento es Durmat 62 PTA. Es una mezcla de polvos metálicos 40 % Durmat 59 PTA con 60% de Durmat SFTC.

Durmat SFTC es carburo de tungsteno fundido esférico, al mezclarlo con Durmat 59 PTA se busca conseguir mayor dureza sin perder tenacidad.

4.3.3 Polvo base hierro (Durmat 505 PTA)

Tabla 4.3. Composición de recubrimiento Durmat 505 PTA.

	C	Cr	Mo	SC	Fe
Composición %	2,5-2,8	6,0-7,0	1-1,5	10,0-11,0	Balance

Recubrimiento cerámico:

4.3.4 Polvo de carburo de tungsteno-cobalto aglomerado y sinterizado (Durmat 101)

El nombre comercial de este recubrimiento es Durmat 101 HVOF. Este recubrimiento está dentro de la familia de los cerámico-metálicos conocidos comúnmente como Cermets.

Tabla 4.4. Composición de recubrimiento Durmat 101 HVOF.

	Co	WC
Composición %	12	28-Mar

4.4 Fabricación de recubrimientos

Se fabricaron 4 probetas de acero SAE 1020 de 50x50x10 mm para aplicar los recubrimientos anteriormente mencionados. Estos se fabricaron en dependencias de Industrial Comercial Chile Ltda. Los recubrimientos metálicos se aplicaron con Soldadura PTA en una pasada con espesor de aproximadamente 2 mm. Al ser un aporte de soldadura la temperatura de aplicación es la de fusión del material base, que en este caso es aproximadamente 1300 °C.

El recubrimiento cerámico fue depositado por medio de Proyección de alta velocidad (HVOF) con un espesor de 0,6 mm. La temperatura de aplicación es de aproximadamente 100 °C.

4.5 Probeta desde válvula

En dependencias de Impexsa S.A. y por medio de corte por electroerosión se obtuvo una probeta de 43x23x10 mm.



Figura 4.1. Probeta de válvula API-9.

4.6 Terminación superficial

Las probetas se sometieron a un maquinado posterior, tanto a la probeta obtenida de la válvula como a los recubrimientos, con tal de disminuir la rugosidad superficial y facilitar el trabajo futuro. Esto se realizó con piedra de diamante.

4.7 Obtención de muestras mediante electro-erosión.

En dependencias de Impexsa S.A. se procedió a extraer las muestras necesarias desde las probetas para realizar los ensayos propuestos. Se obtuvo una muestra de 10x10x10 mm para llevar a cabo la microscopía y las pruebas de micro-dureza, además de una muestra de 22x50x10 mm para la realización del ensayo de desgaste.



Figura 4.2. Probeta Durmat 59 PTA cortada por electroerosión.



Figura 4.3. Probeta Durmat 62 PTA cortada por electroerosión



Figura 4.4. Probeta Durmat 62 PTA cortada por electroerosión

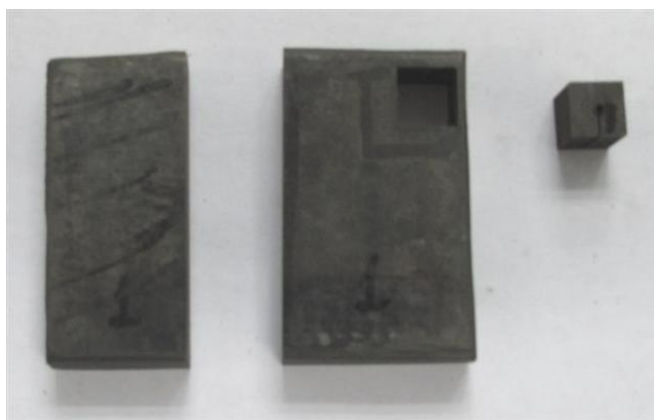


Figura 4.5. Probeta Durmat 101 HVOF cortada por electroerosión

4.8 Pulido de muestras

Las piezas obtenidas desde la probeta para microscopía y micro-dureza fueron pulidas mecánicamente, primero con lijas de metal para trabajo en agua en orden de numeración 80, 100, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500, seguido con un pulido manual con una solución de alúmina de 0,5, hasta dejar la superficie pulida a espejo.



Figura 4.6. Izquierda, máquina de pulido. Derecha, muestras pulidas para microscopía y micro-dureza.

4.9 Ensayo de micro-dureza

Los ensayos de micro-dureza se llevaron a cabo en un Micro-durómetro Strues Dimanin (-1/-2) Indentador Vickers, el cual pertenece al Laboratorio de Metalografía del Departamento de Ciencia de los Materiales de la Universidad de Chile.

El procedimiento empleado fue el siguiente; se ubicó la probeta sobre la plataforma y se ajustó el lente hasta que la superficie pudo ser observada nítidamente. Posteriormente, se aplica la carga de 300g durante 10s para luego liberar la carga. A través del lente se ajustó la distancia cero entre las líneas verticales que miden la longitud de la línea diagonal-horizontal, para luego mover estas líneas a los vértices, ingresando así la longitud de la línea diagonal-horizontal. Se gira 90° el cabezal del lente y se mide con el mismo procedimiento la línea diagonal-vertical

El perfil de micro-dureza se realizó de dos formas, la primera sobre una sección longitudinal de las probetas cuadradas perpendicular a la superficie, donde se puede apreciar el sustrato de acero, la interface de unión y el recubrimiento. Se realizaron las indentaciones a lo ancho de esta sección (desde cerca de la superficie hasta el sustrato), con el objetivo de obtener un perfil de dureza pasando por el recubrimiento la interfase para luego identificar el paso al sustrato.

También se realizó mediciones de forma paralela a la superficie a una distancia media entre esta y el sustrato con tal de buscar un promedio de dureza del recubrimiento.

Debido a la alta desviación encontrada de las mediciones, se realizaron 15 mediciones por probeta.

4.10 Microscopía Óptica

Se obtuvieron imágenes de las probetas por medio de un microscopio marca Meiji con acercamientos de 50x, 100x, 200x y 1000x. Estas imágenes lograron identificar claramente la microestructura del recubrimiento y la interfase de cada probeta.

4.11 Ensayo de desgaste

Se preparó el equipo para realizar el ensayo de desgaste ASTM-G65 tipo A, el cual está diseñado para superficies duras. Se hicieron pruebas para verificar el cumplimiento de los estándares que dicha norma exige.

- Se contó con arena de cuarzo seca de granulometría 200 μm
- El caudal de arena de cuarzo registrado fue de 365 g/min
- El disco con recubrimiento de goma (Clorobutilo) tuvo un diámetro inicial de 223 mm
- La velocidad angular del disco es de 188 RPM
- Fuerza aplicada sobre la probeta 130 N (6,77 kg sobre el brazo)
- Tiempo de ensayo 30 min

La medición experimental de la pérdida de masa y espesor durante el ensayo de desgaste fue realizada cada 5 min, con un total de 6 mediciones por probeta.

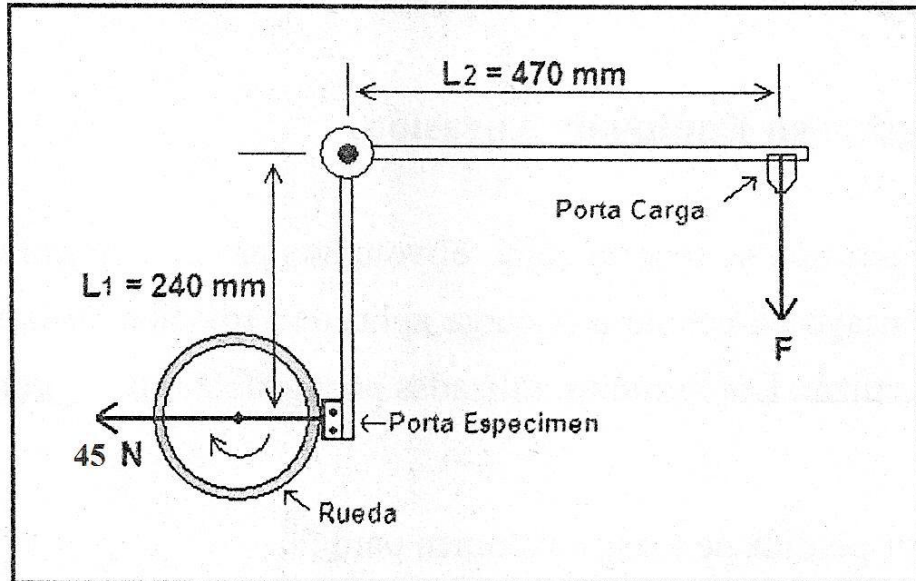


Figura 4.7. Esquema de dimensiones del equipo para ensayo de desgaste.

4.12 Microscopía electrónica de barrido SEM

Se realizó Microscopía electrónica de barrido de la cual se obtuvo imágenes con acercamientos de 100x, 400x y 1000x.



Figura 4.8. Montaje de probeta en la cámara del SEM

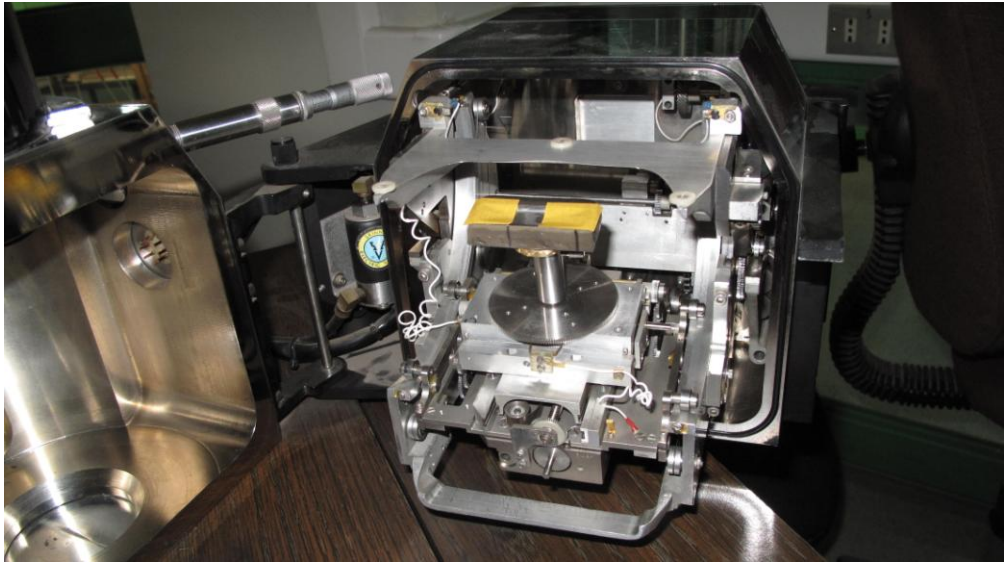


Figura 4.9. Acercamiento de montaje de probeta en SEM

5 Resultados Experimentales

5.1 Producción de recubrimientos

Las imágenes a continuación muestran las probetas con los recubrimientos mencionados y pulidas.

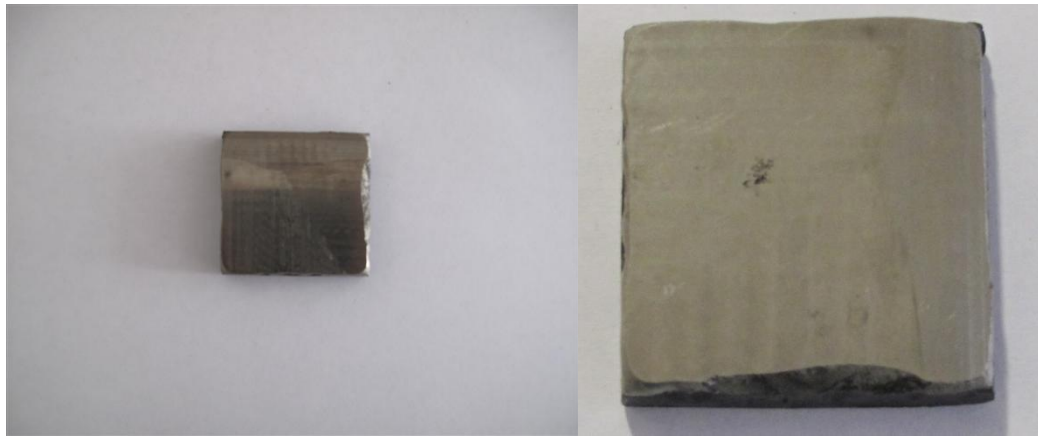


Figura 5.1. Probeta recubierta con Durmat 59 PTA



Figura 5.2. Probeta recubierta con Durmat 62 PTA



Figura 5.3. Probeta recubierta con Durmat 505 PTA

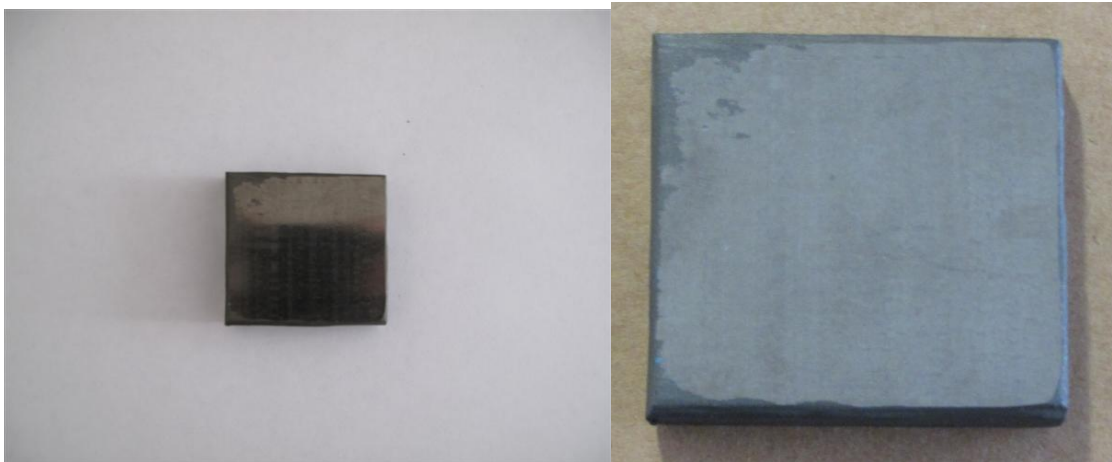


Figura 5.4. Probeta recubierta con Durmat 101 HVOF

5.2 Microscopía Óptica

5.2.1 Durmat 59 PTA

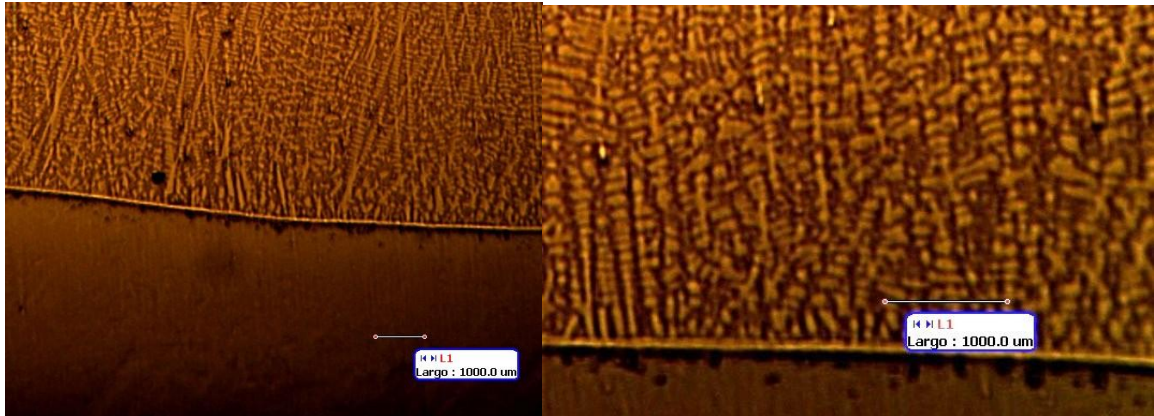


Figura 5.5. Se aprecia el sustrato, interfase y Micro-estructura dendrítica del recubrimiento Durmat 59 PTA, izquierda 50x, derecha 100x.

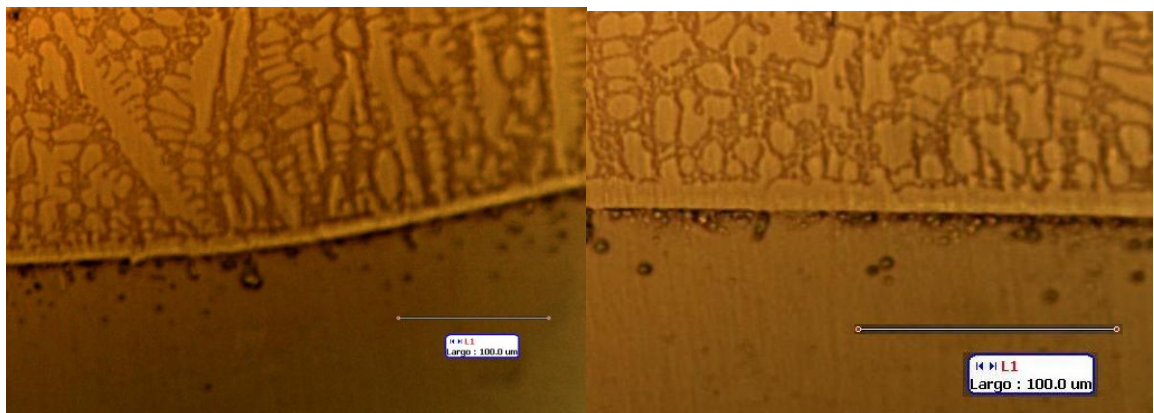


Figura 5.6. Se aprecia el sustrato, interfase y Micro-estructura dendrítica del recubrimiento Durmat 59 PTA, 200x.

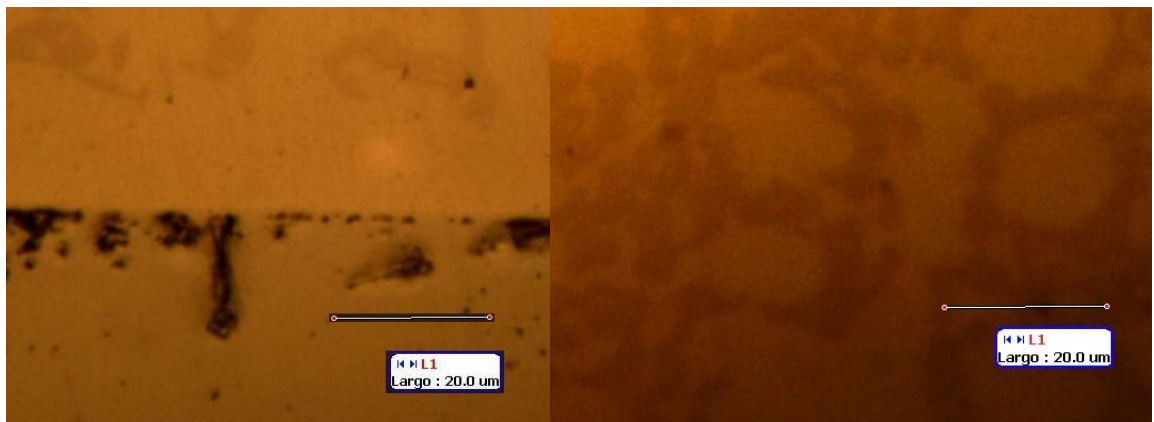


Figura 5.7. Izquierda, Interfase a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.

5.2.2 Durmat 62 PTA

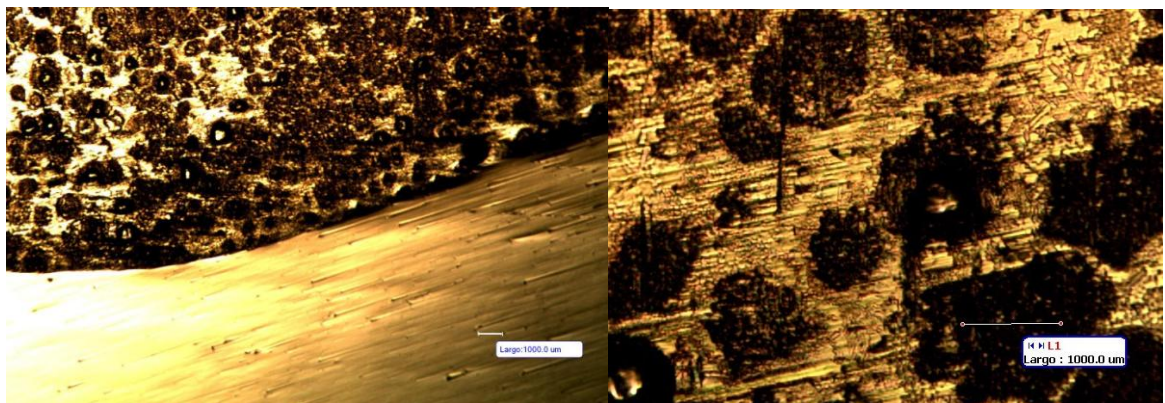


Figura 5.8. Se aprecia el substrato, interfase y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 62 PTA. Izquierda 50x, derecha recubrimiento 100x.

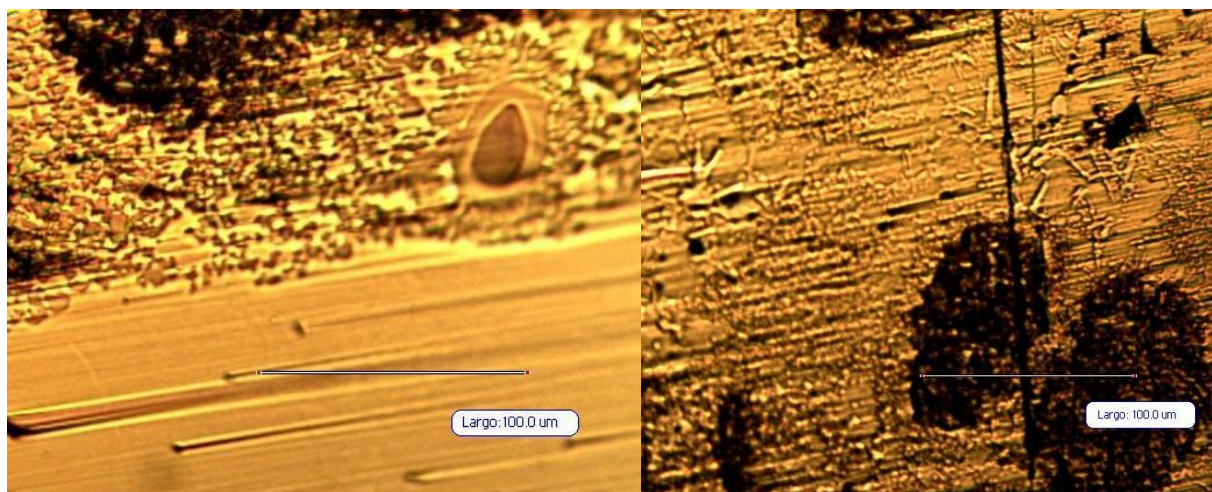


Figura 5.9. A la izquierda se aprecia la interfase y a la derecha el recubrimiento Durmat 62 PTA, 200x.

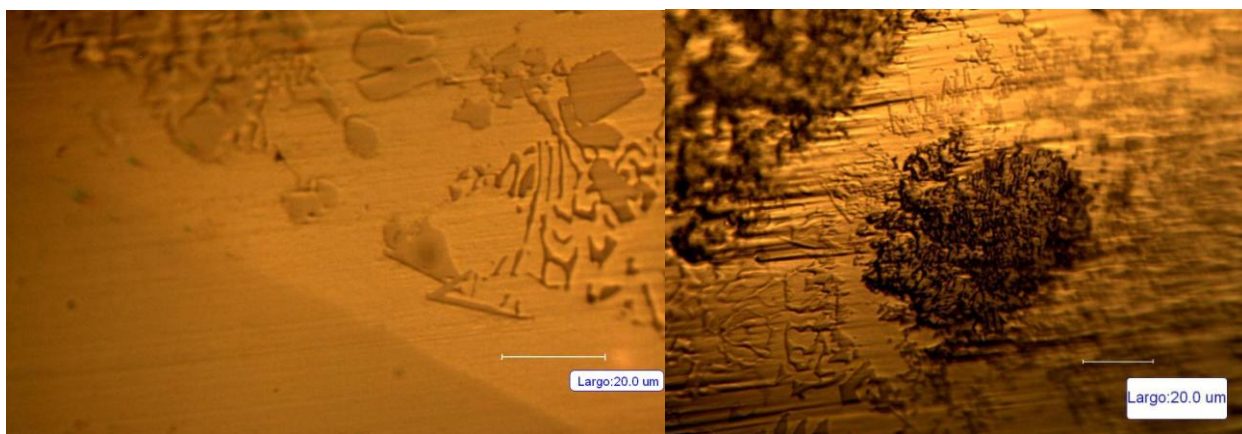


Figura 5.10. Izquierda, interfase a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.

5.2.3 Durmat 505 PTA

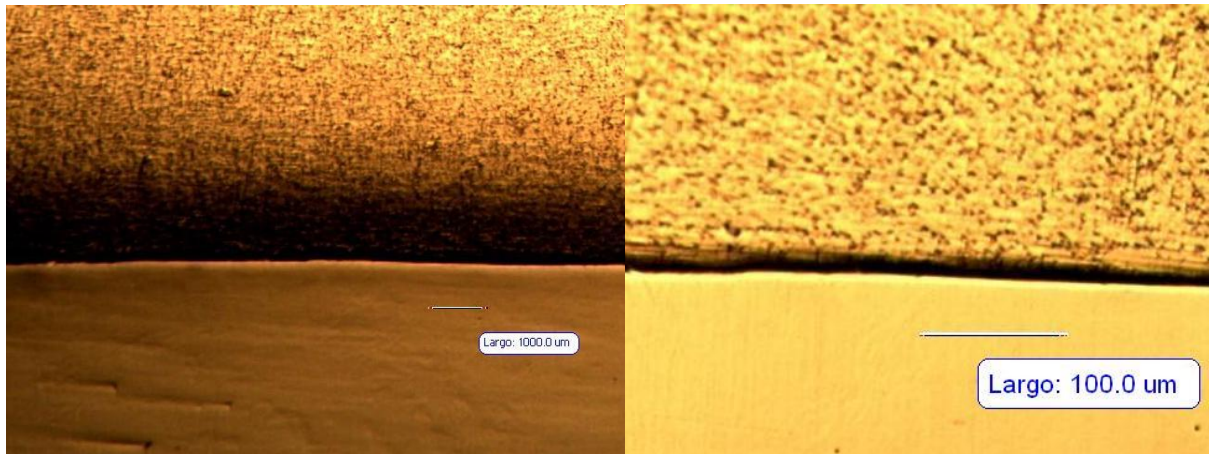


Figura 5.11. Se aprecia el sustrato, interfase y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 505 PTA. Izquierda 50x, derecha 100x.

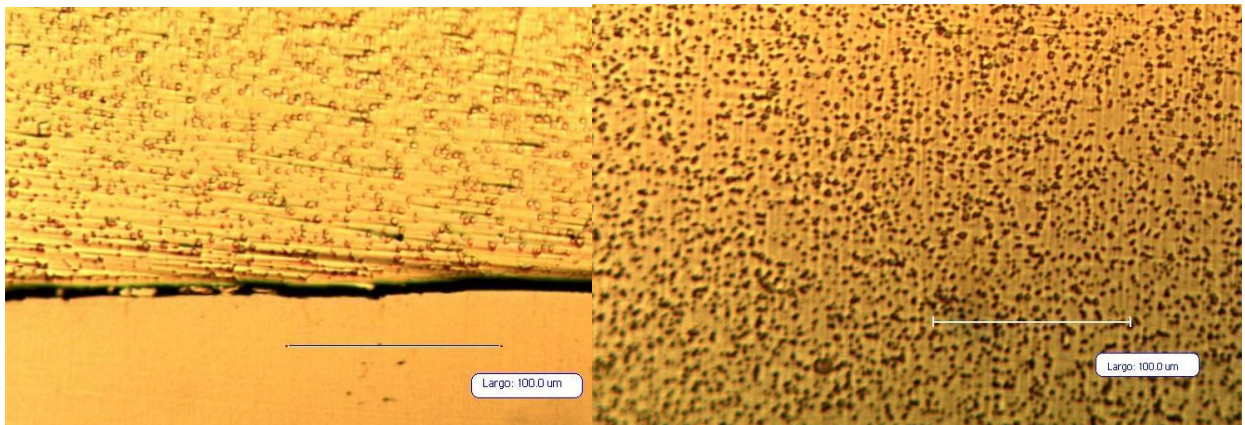


Figura 5.12. A la izquierda se aprecia la interfase y a la derecha el recubrimiento Durmat 505 PTA, 200x.

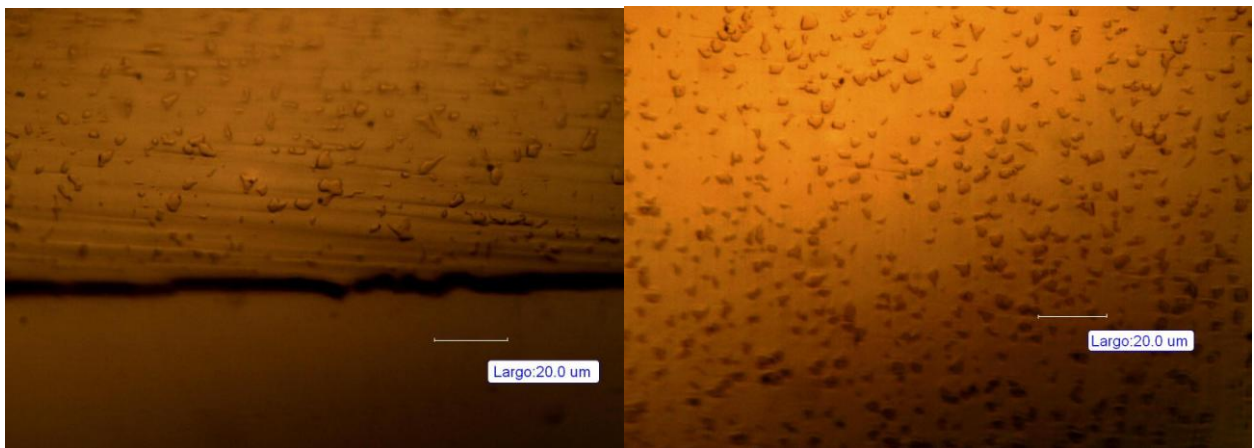


Figura 5.13. Izquierda, interfase a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x.

5.2.4 Durmat 101 HVOF

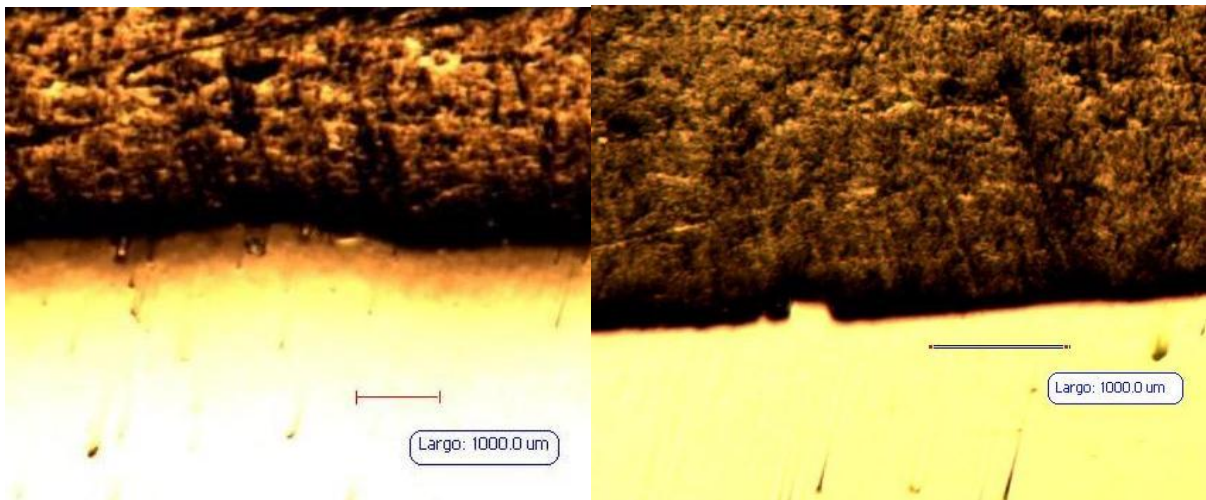


Figura 5.14. Se aprecia el sustrato, interfase y Micro-estructura del recubrimiento Durmat 101 HVOF. Izquierda 50x, derecha 100x.

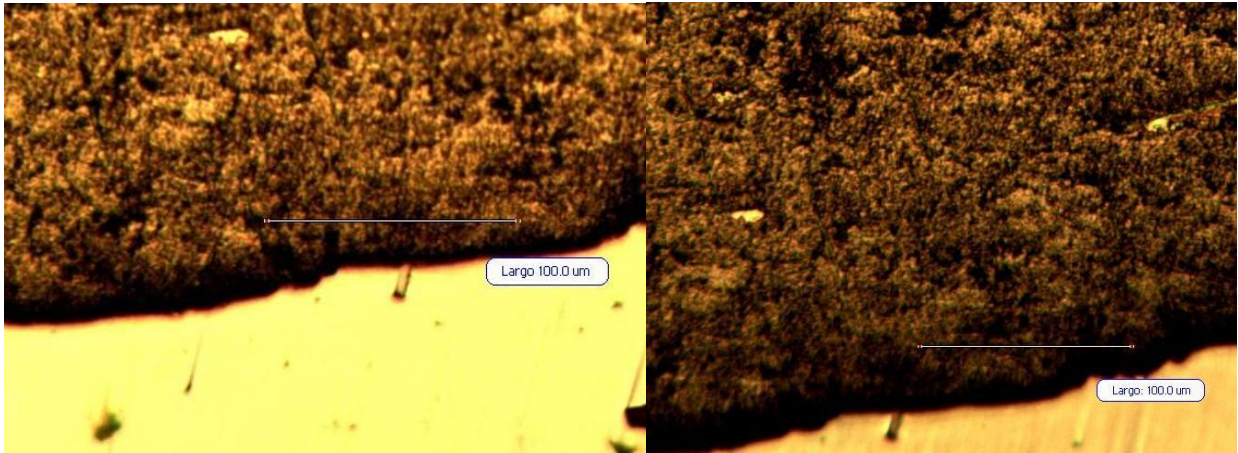


Figura 5.15. A la izquierda se aprecia la interfase y a la derecha el recubrimiento Durmat 101 HVOF, 200x.

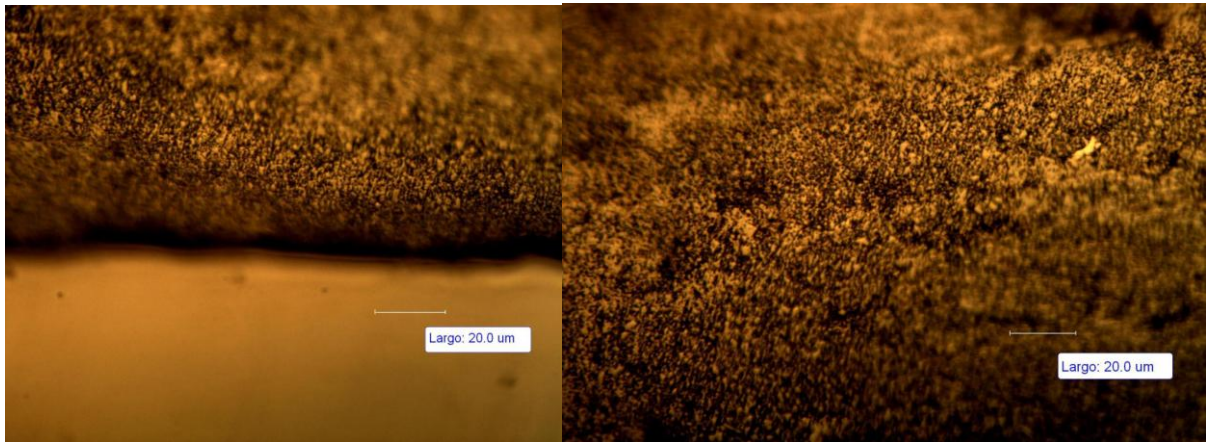


Figura 5.16. Izquierda, interfase a 1000x. Derecha recubrimiento 1000x

5.3 Ensayo de desgaste

Se realizaron ensayos de desgaste según la norma ASTM G65 procedimiento A. Las probetas fueron pesadas y medidas en su espesor (recubrimiento y sustrato) y los resultados se presentan como el peso en gramos y espesor en milímetros y en porcentaje de su peso y de su espesor original cada 5 min de transcurrido el ensayo.

Se los siguientes resultados:

5.3.1 Probeta válvula

Tabla 5.1. Resultados ensayo de desgaste para probeta de válvula.

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	<i>% de peso</i>	<i>% de espesor</i>
0	89,59	10,54	100,0%	100,0%
5	89,54	10,53	99,9%	99,9%
10	89,52	10,53	99,9%	99,9%
15	89,46	10,52	99,9%	99,8%
20	89,42	10,51	99,8%	99,7%
25	89,38	10,48	99,8%	99,4%
30	89,34	10,46	99,7%	99,2%

<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,3%	0,8%

En la figura 5.17 se puede apreciar la secuencia de desgaste de la probeta sometida al ensayo, estas imágenes fueron captadas cada 5 minutos.

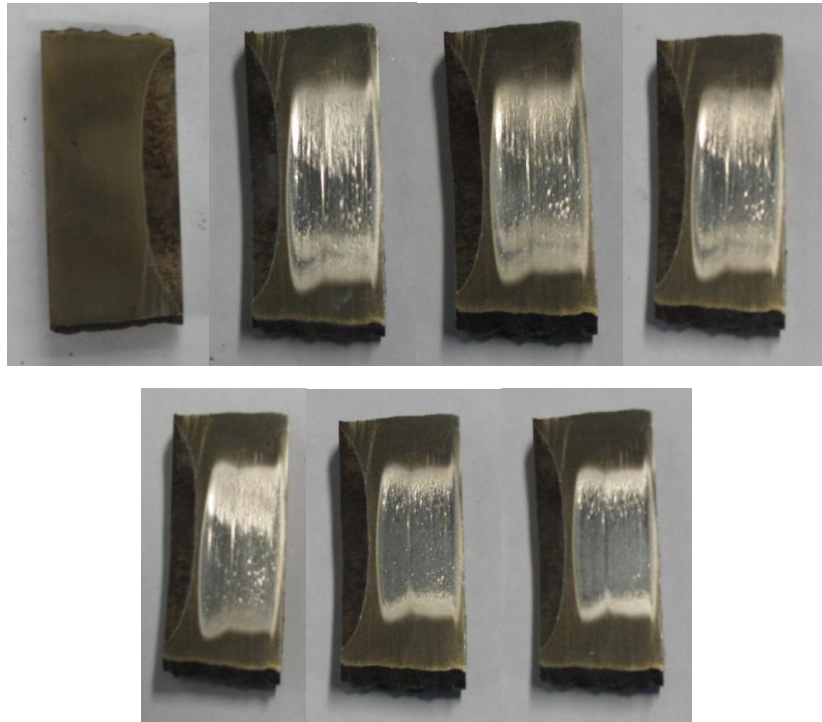


Figura 5.17. Secuencia de desgaste de probeta de válvula API-9

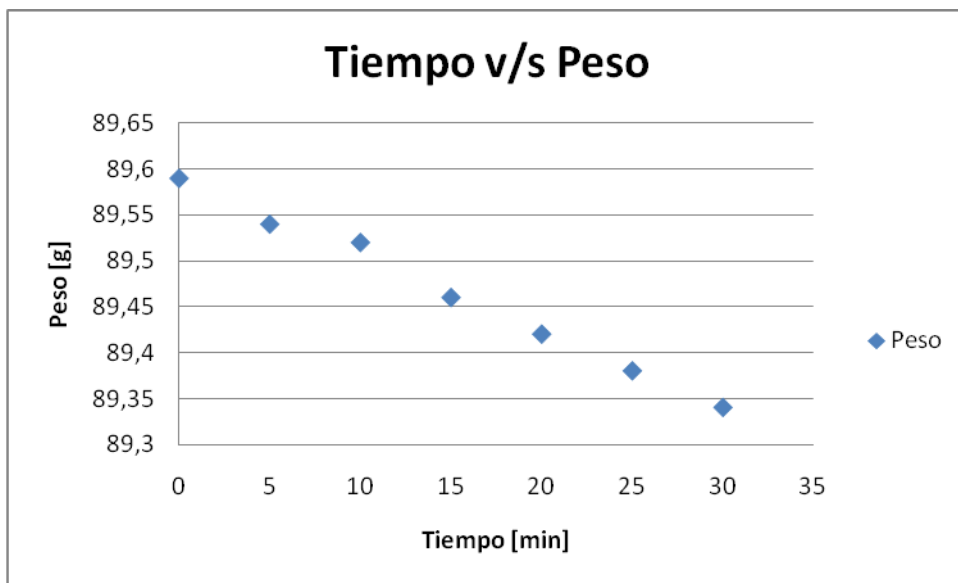


Figura 5.18. Gráfico tiempo v/s peso para probeta válvula.

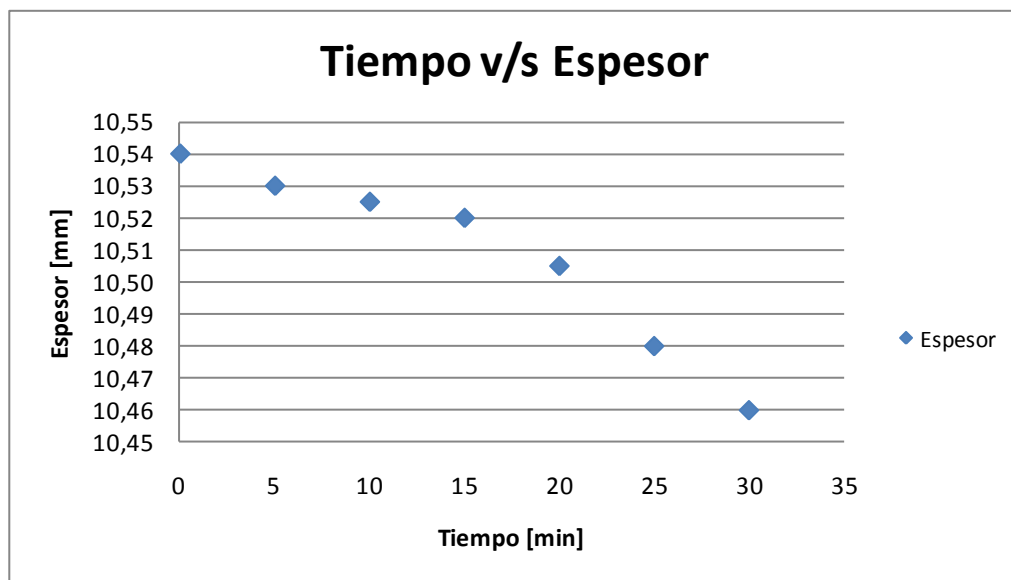


Figura 5.19. Gráfico tiempo v/s espesor para probeta válvula.

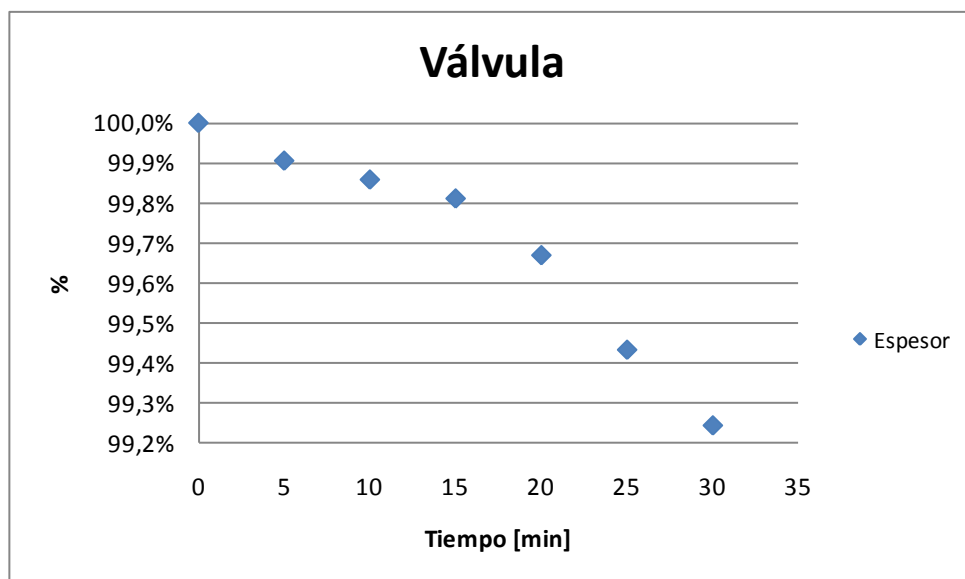


Figura 5.20. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para probeta de válvula

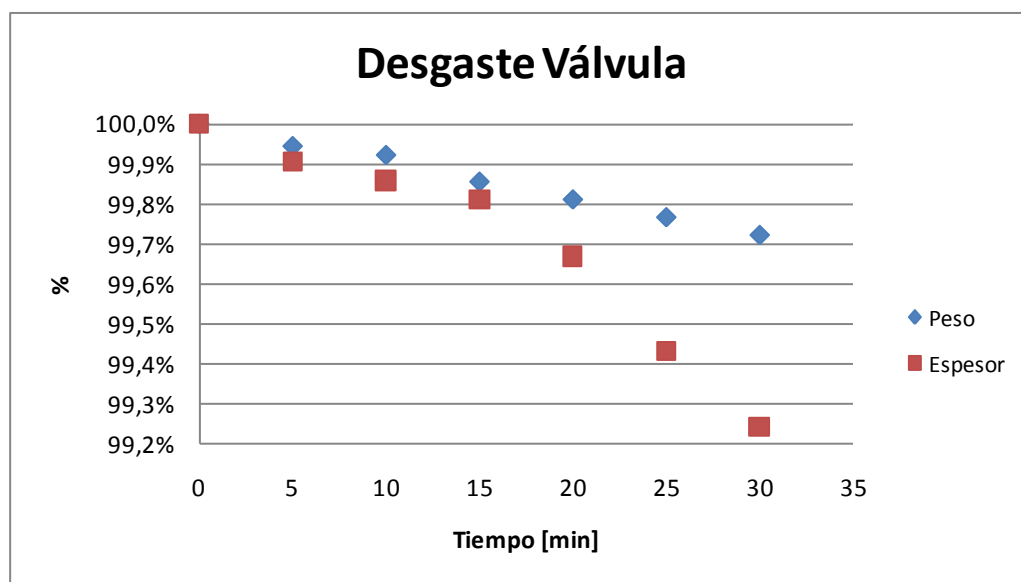


Figura 5.21. Gráfico de desgaste de probeta de válvula en porcentaje.

5.3.2 Durmat 59 PTA

Tabla 5.2. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 59 PTA.

Tiempo [min]	Peso [g]	Espesor [mm]	% de peso	% de espesor
0	102,25	10,52	100,0%	100,0%
5	100,93	10,08	98,7%	95,8%
10	99,78	9,63	97,6%	91,5%
15	98,71	9,51	96,5%	90,4%
20	97,88	9,40	95,7%	89,4%
25	97,21	9,35	95,1%	88,9%
30	96,43	9,21	94,3%	87,5%

Pérdida de peso	Pérdida de Espesor
5,7%	12,5%

En la figura 5.22 se puede apreciar la secuencia de desgaste de la probeta sometida al ensayo, estas imágenes fueron captadas cada 5 minutos.

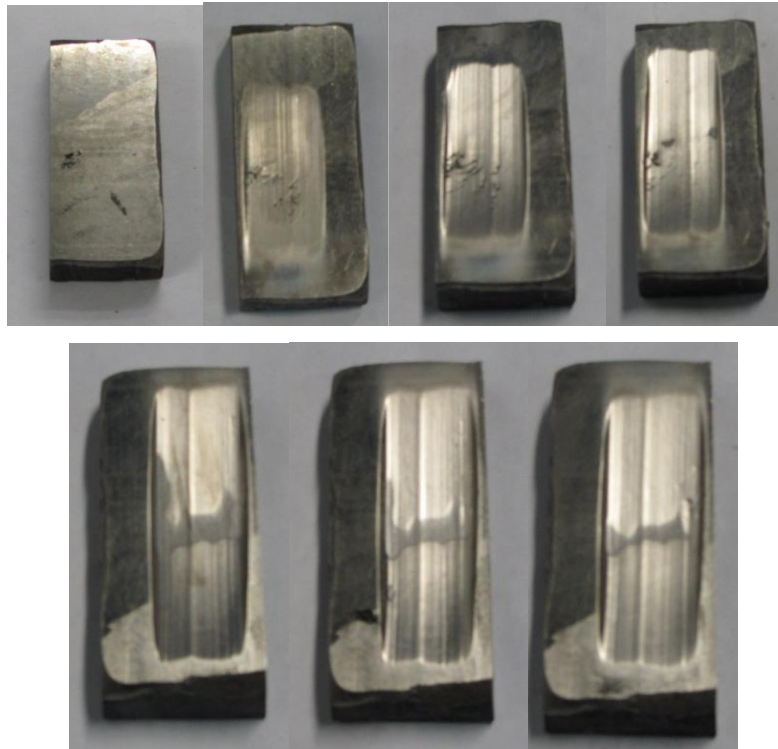


Figura 5.22. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 59 PTA.

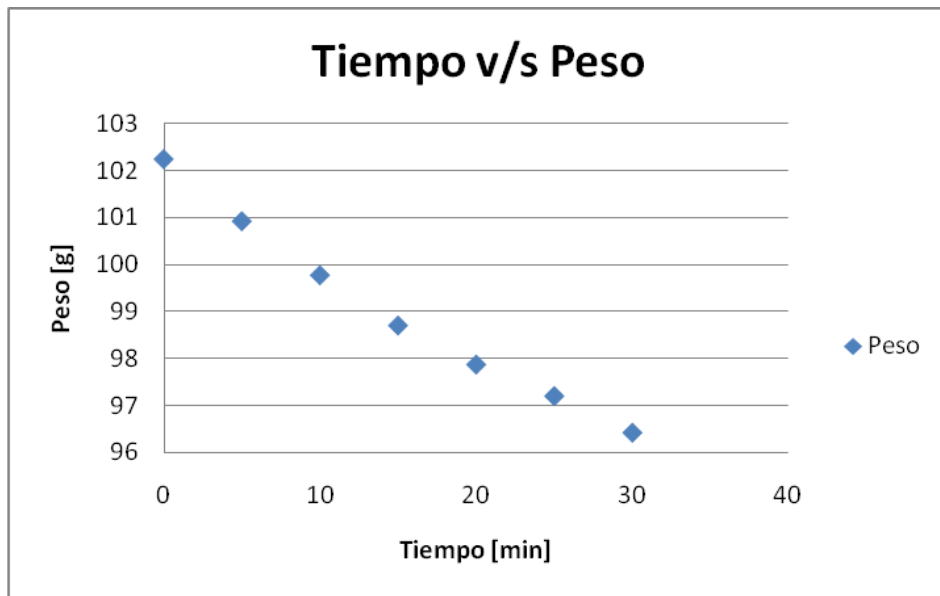


Figura 5.23. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 59 PTA.

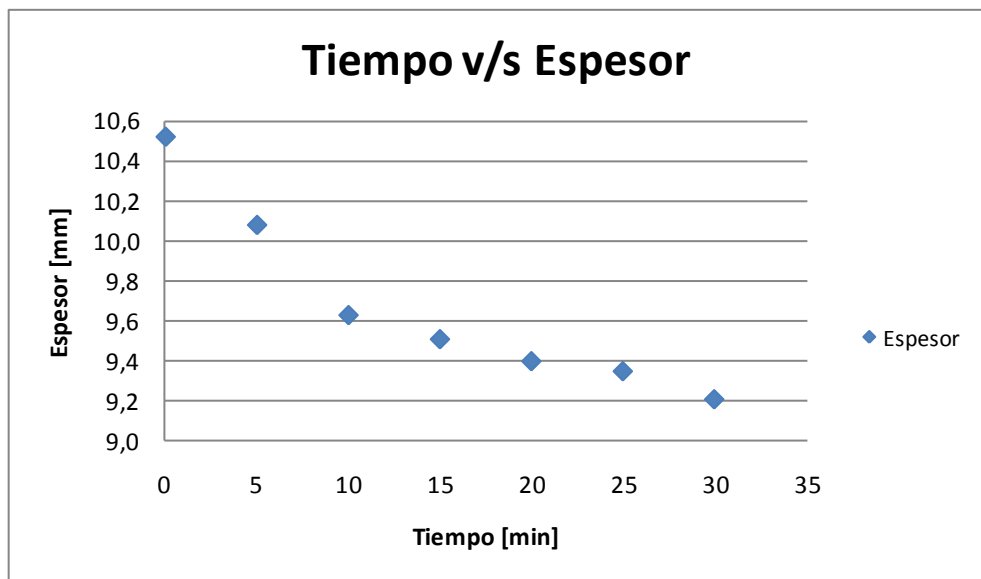


Figura 5.24. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 59 PTA.

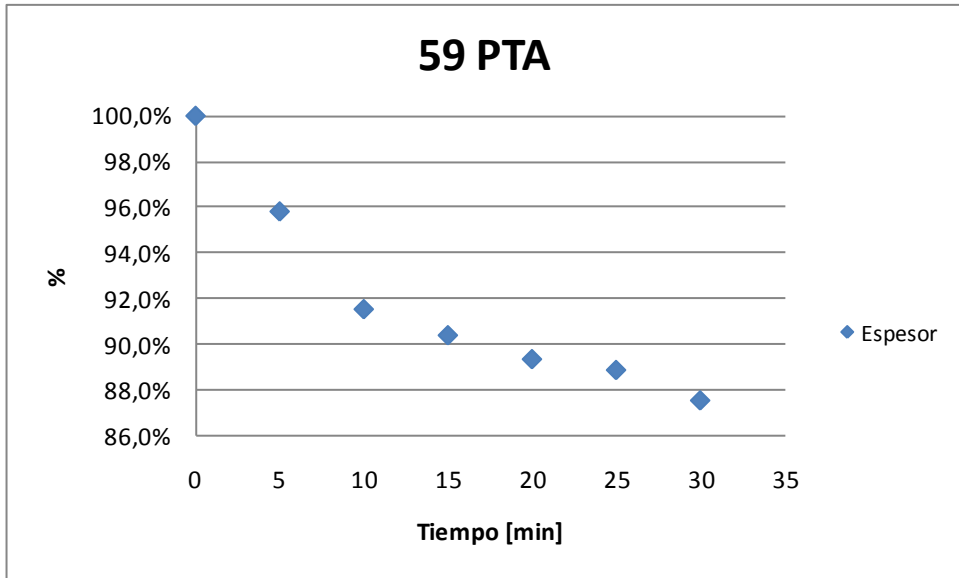


Figura 5.25. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 59 PTA.

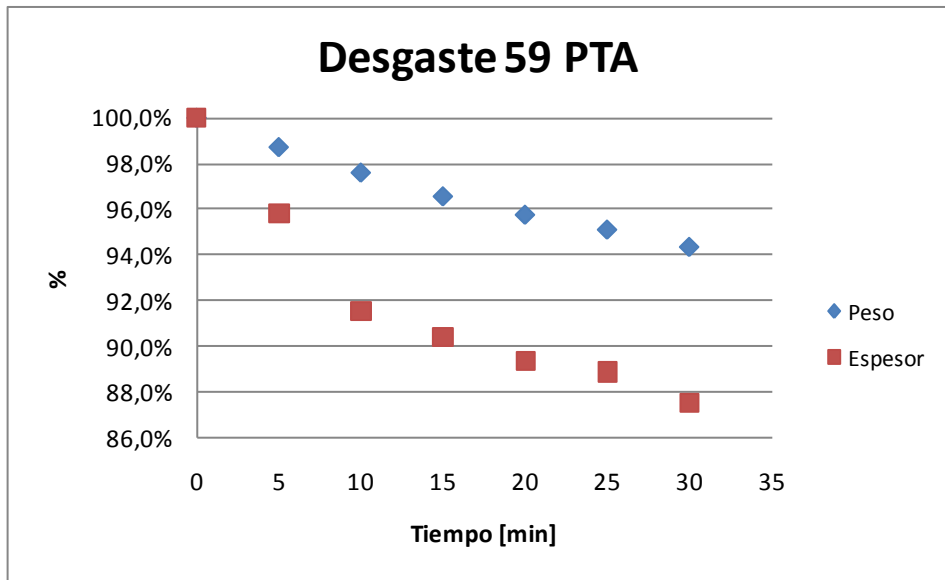


Figura 5.26. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 59 PTA.

5.3.3 Durmat 62 PTA

Tabla 5.3. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 62 PTA.

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	<i>% de peso</i>	<i>% de espesor</i>
0	99,13	10,74	100,0%	100,0%
5	99,01	10,74	99,9%	100,0%
10	98,84	10,73	99,7%	99,9%
15	98,73	10,71	99,6%	99,7%
20	98,62	10,70	99,5%	99,6%
25	98,53	10,68	99,4%	99,4%
30	98,41	10,58	99,3%	98,5%

<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,7%	1,5%

En la figura 5.27 se puede apreciar la secuencia de desgaste de la probeta sometida al ensayo, estas imágenes fueron captadas cada 5 minutos.

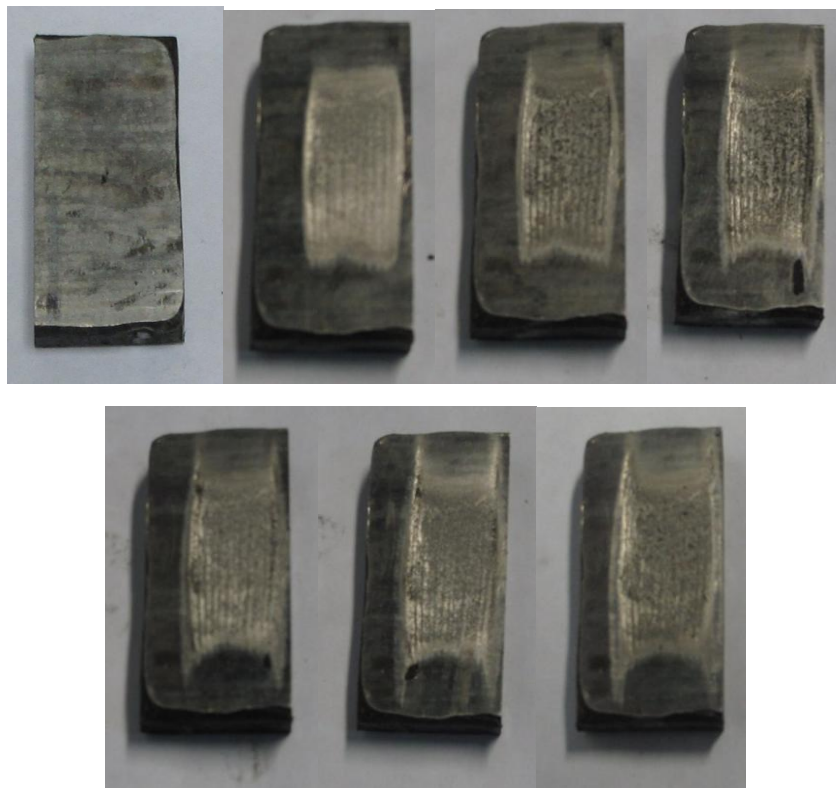


Figura.5.27 Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 62 PTA.

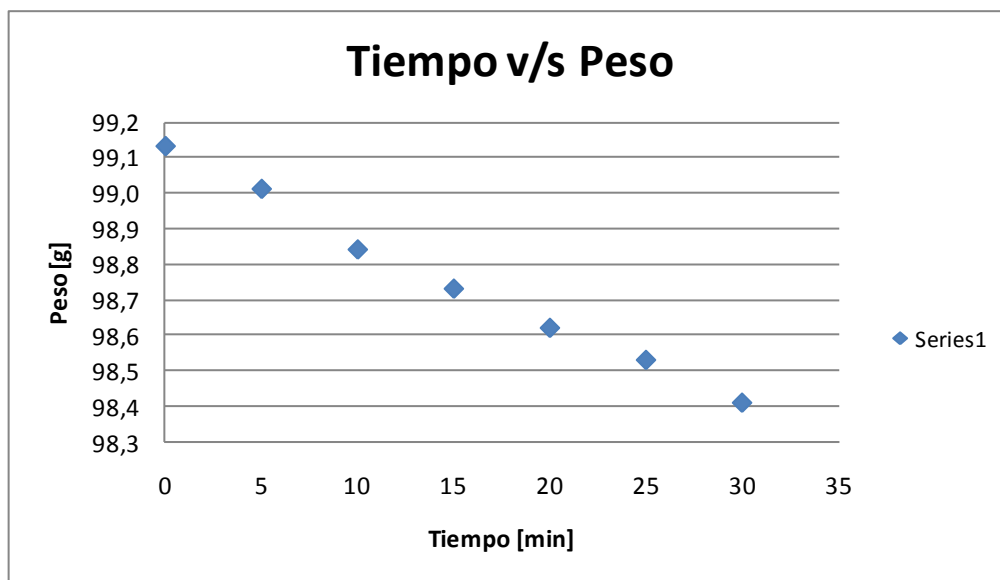


Figura 5.28. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 62 PTA.

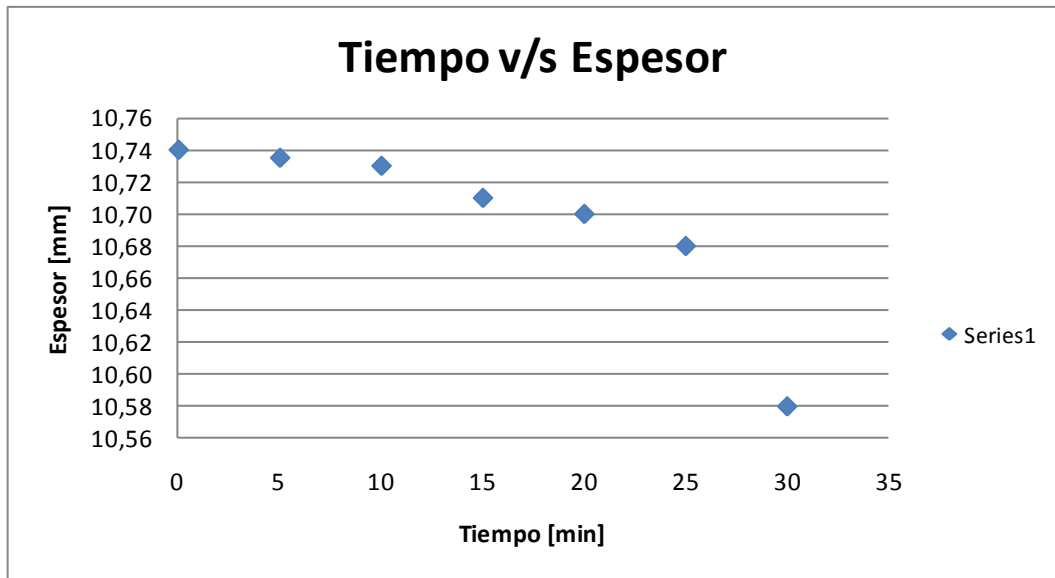


Figura 5.29. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 62 PTA

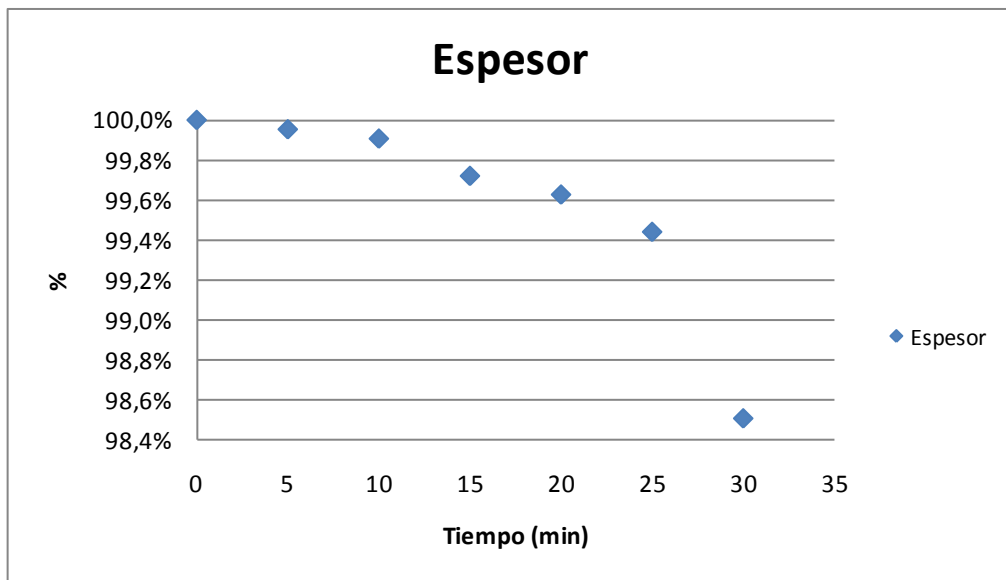


Figura 5.30. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 62 PTA.

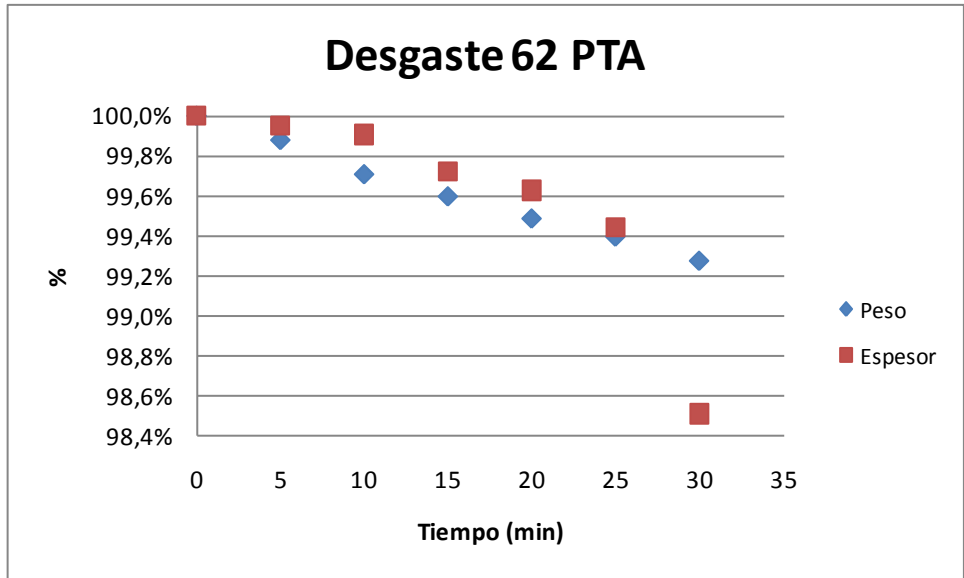


Figura 5.31. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 62 PTA.

5.3.4 Durmat 505 PTA

Tabla 5.4. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 505 PTA.

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	<i>% de peso</i>	<i>% de espesor</i>
0	93,35	11,08	100,0%	100,0%
5	93,34	11,06	100,0%	99,8%
10	93,30	11,05	99,9%	99,7%
15	93,24	11,03	99,9%	99,5%
20	93,21	11,00	99,9%	99,3%
25	93,17	10,59	99,8%	95,6%
30	93,13	10,52	99,8%	94,9%

<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,2%	5,1%

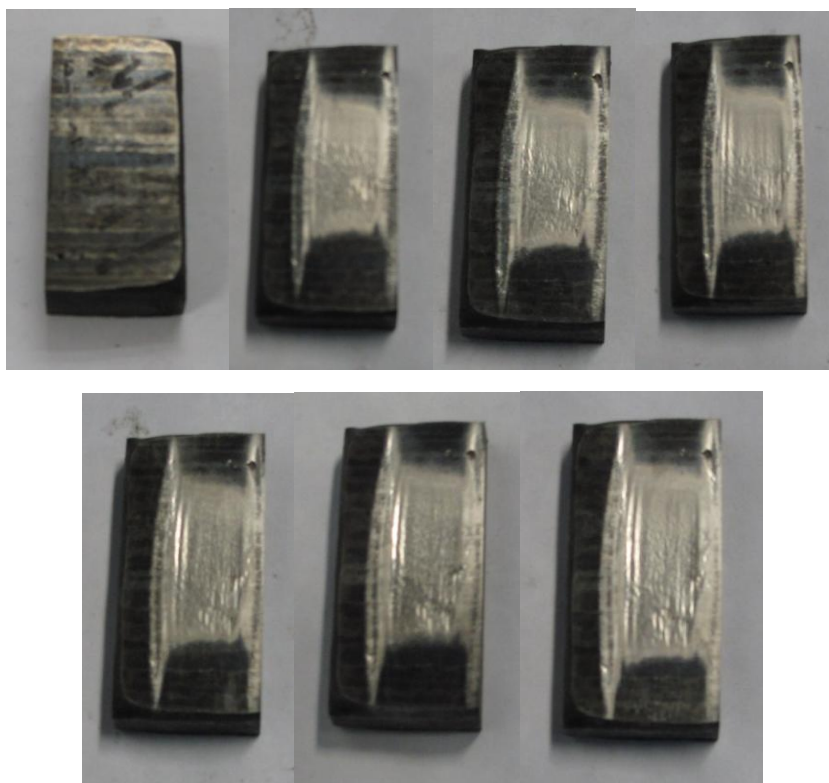


Figura 5.32. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 505 PTA.

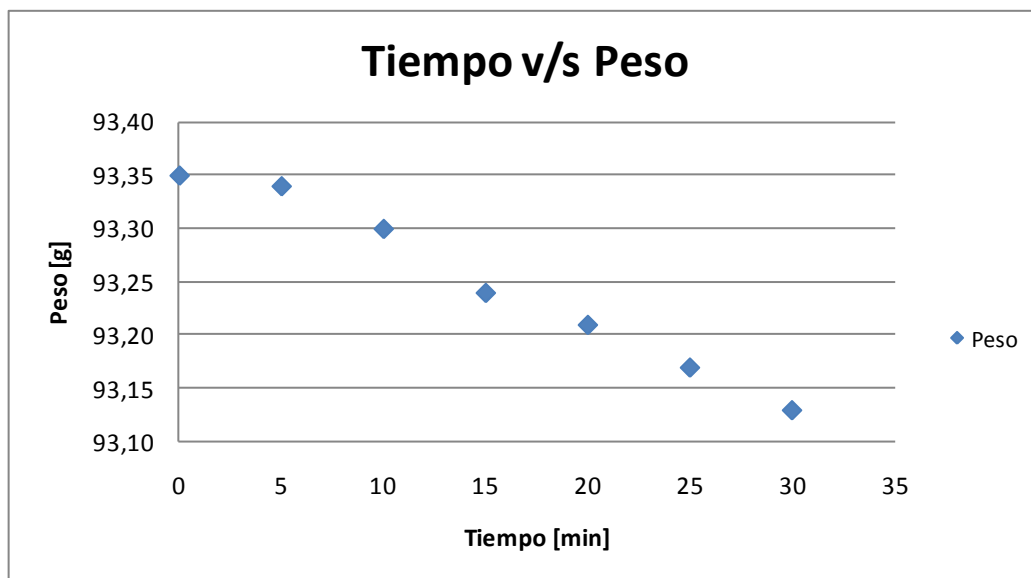


Figura 5.33. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 505 PTA.

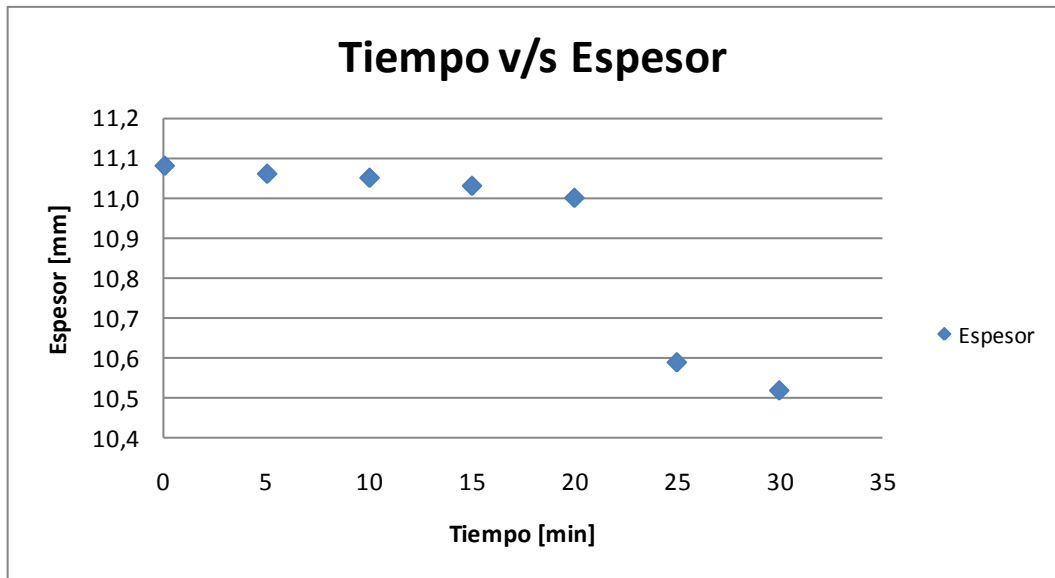


Figura 5.34. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 505 PTA

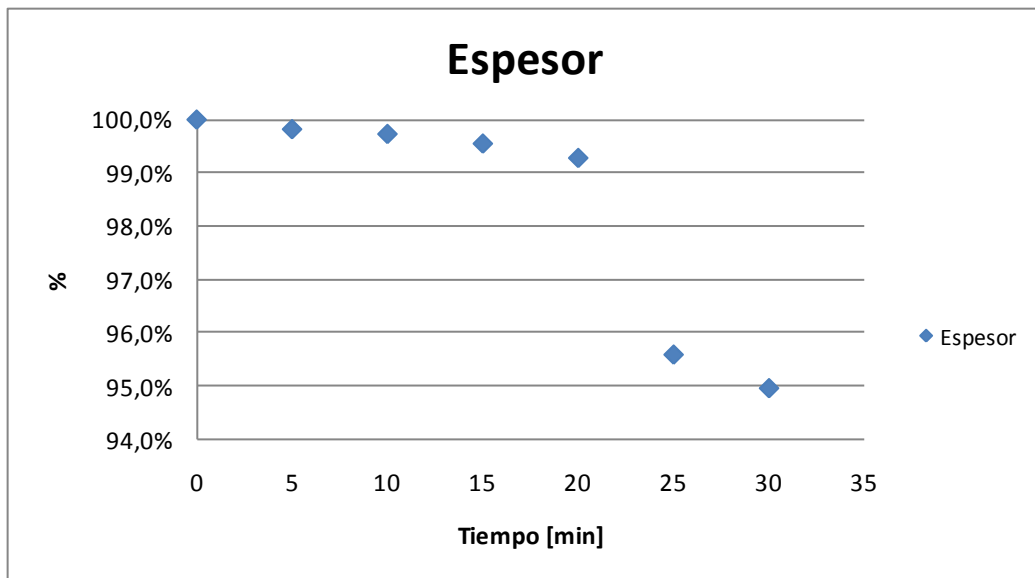


Figura 5.35. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 505 PTA.

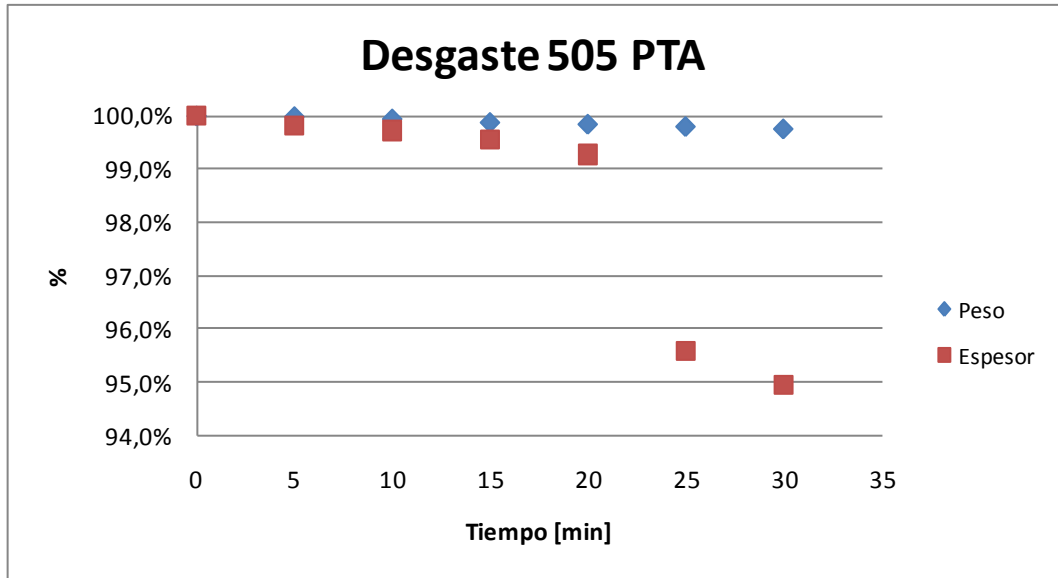


Figura 5.36. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 505 PTA.

5.3.5 Durmat 101

Tabla 5.5. Resultados ensayo de desgaste probeta con recubrimiento Durmat 101 HVOF.

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	<i>% de peso</i>	<i>% de espesor</i>
0	99,46	10,26	100,0%	100,0%
5	99,46	10,26	100,0%	100,0%
10	99,43	10,25	100,0%	99,9%
15	99,42	10,24	100,0%	99,8%
20	99,40	10,23	99,9%	99,7%
25	99,38	10,21	99,9%	99,5%
30	99,37	10,20	99,9%	99,4%

<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,1%	0,6%



Figura 5.37. Secuencia de desgaste de probeta con recubrimiento Durmat 101 HVOF.

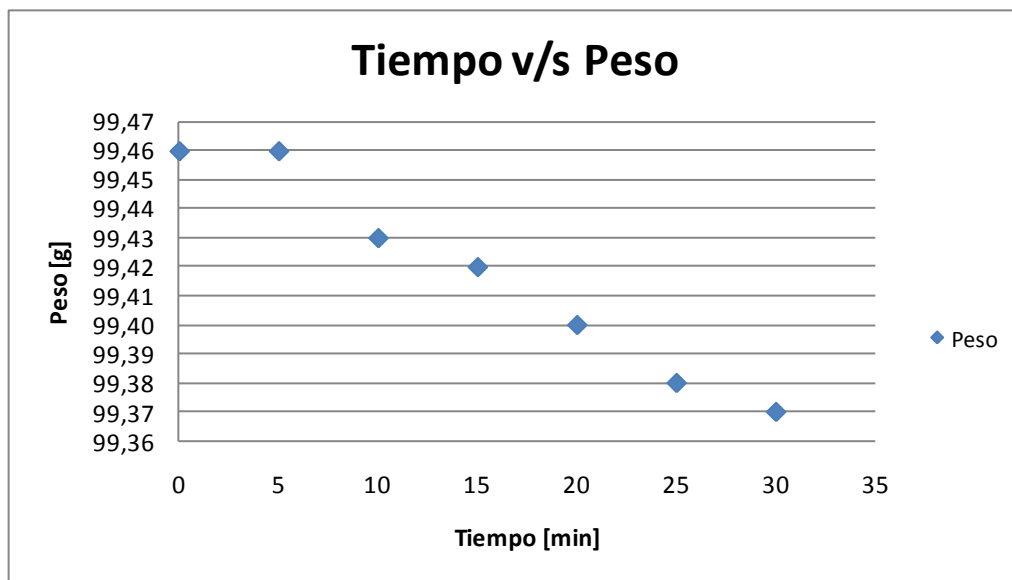


Figura 5.38. Gráfico tiempo v/s peso para recubrimiento Durmat 101 HVOF.

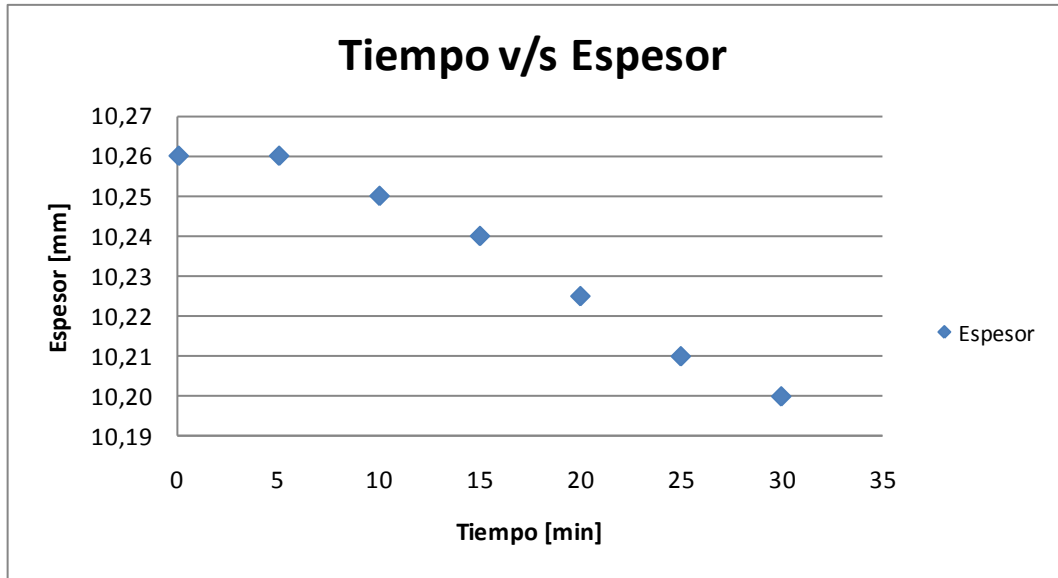


Figura 5.39. Gráfico tiempo v/s espesor para recubrimiento Durmat 101 HVOF.

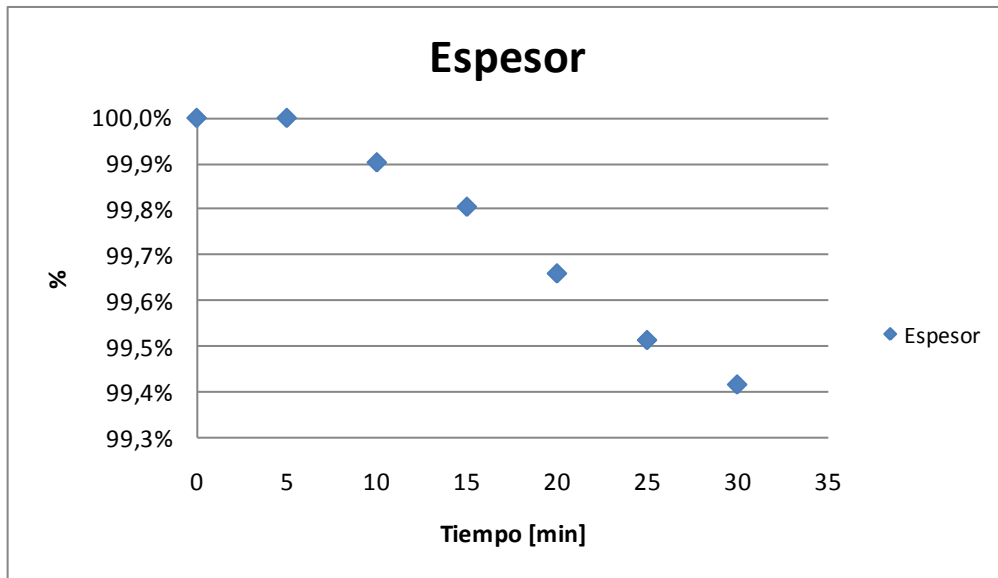


Figura 5.40. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para recubrimiento Durmat 101 HVOF

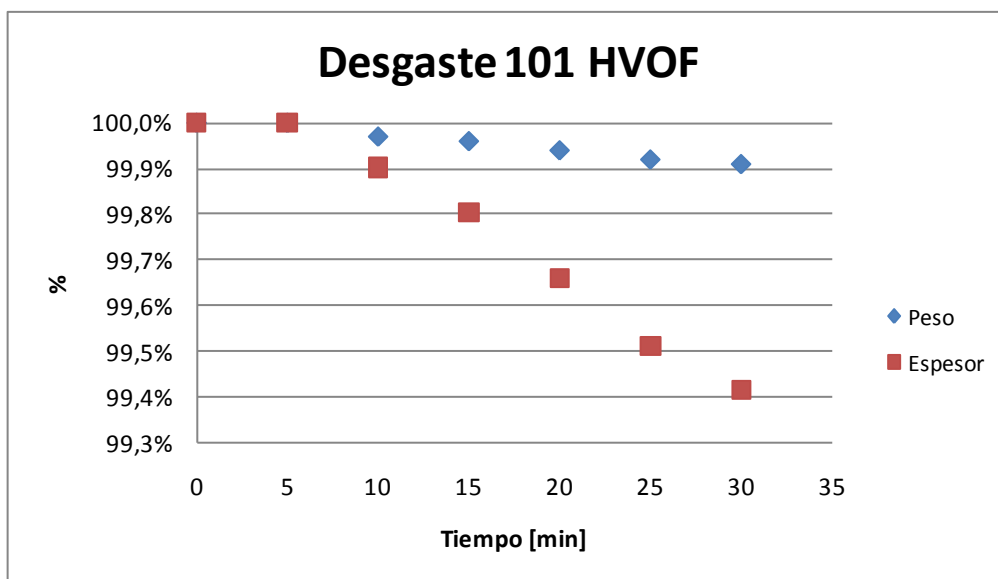


Figura 5.41. Gráfico de desgaste para recubrimiento Durmat 101 HVOF.

5.3.6 Acero SAE 1020

Se realizó el ensayo de desgaste a una probeta de acero SAE 1020 de iguales dimensiones que las probetas con tal de agregar a la discusión los cambios en el comportamiento mecánico que puede generar un recubrimiento duro frente al sustrato.

Tabla 5.6. Resultados ensayo de desgaste probeta de acero 1020 sin recubrimiento.

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Peso [g]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	<i>% de peso</i>	<i>% de espesor</i>
0	89,34	9,80	100,0%	100,0%
5	88,60	8,84	99,2%	90,2%
10	86,47	8,22	96,8%	83,9%
15	84,69	7,99	94,8%	81,5%
20	83,17	7,46	93,1%	76,1%
25	81,73	7,14	91,5%	72,9%
30	80,48	6,90	90,1%	70,4%

<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
9,9%	29,6%

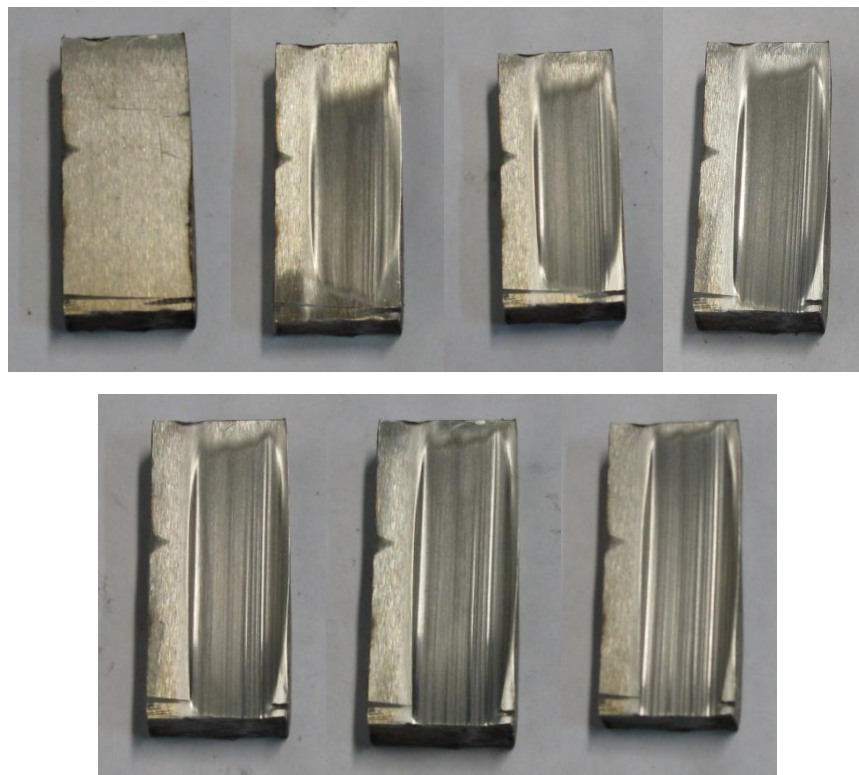


Figura 5.42. Secuencia de desgaste para probeta de Acero SAE 1020.

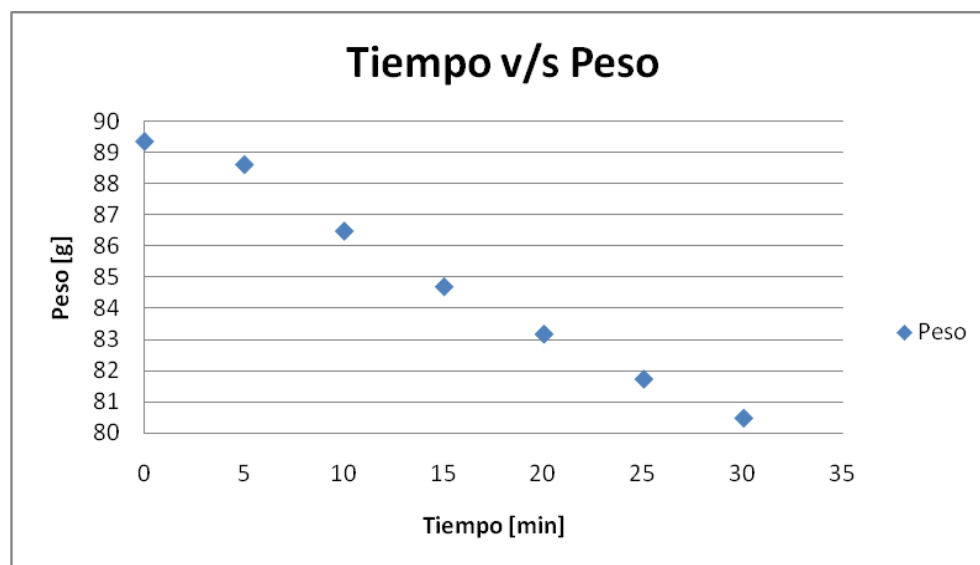


Figura 5.43. Gráfico tiempo v/s peso para Acero SAE 1020.

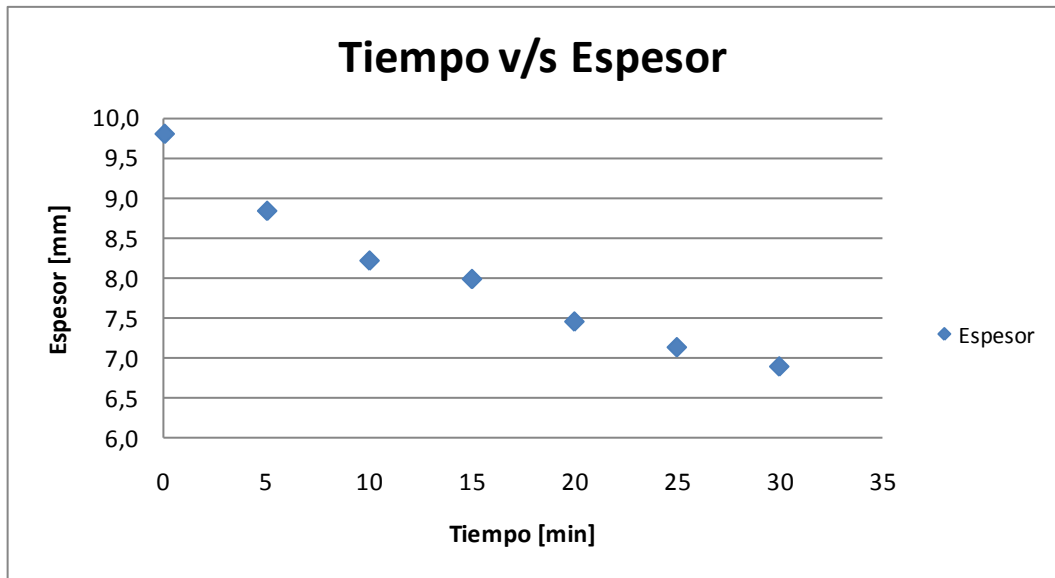


Figura 5.44. Gráfico tiempo v/s espesor para Acero SAE 1020.

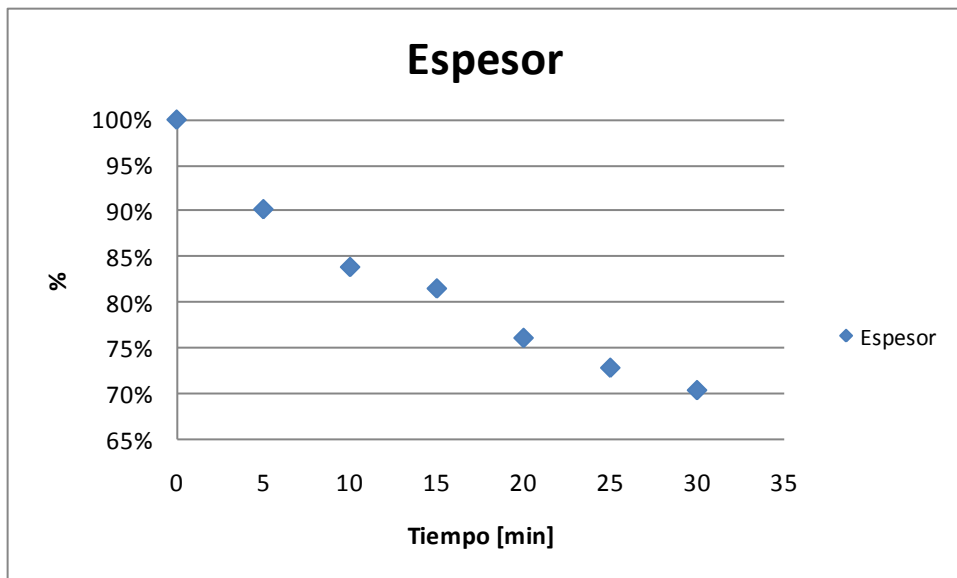


Figura 5.45. Gráfico de pérdida de espesor en porcentaje para Acero SAE 1020.

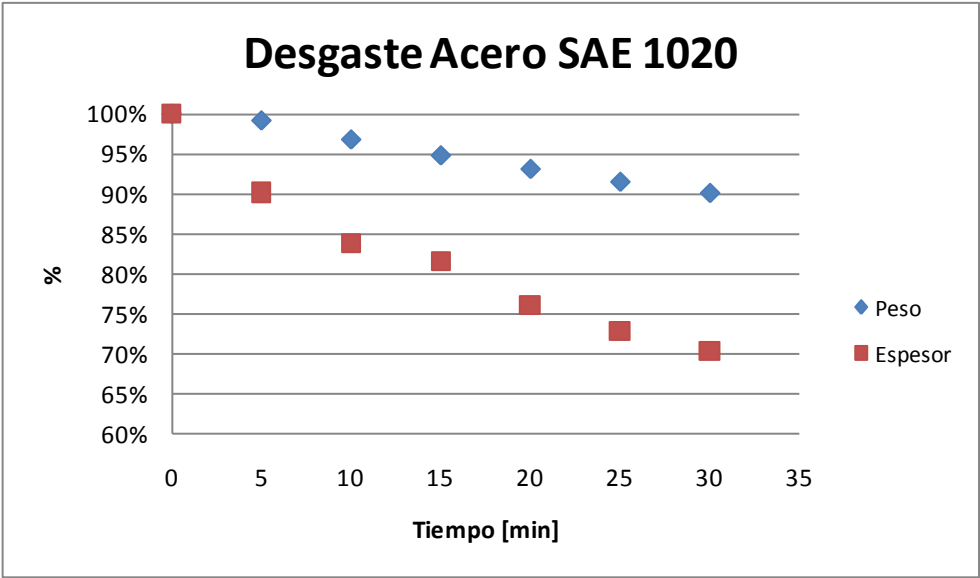


Figura 5.46. Gráfico de desgaste para acero SAE 1020.

5.4 Observación de superficies desgastadas

A continuación se presentan las imágenes obtenidas por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales se realizaron con acercamientos de 100x, 400x y 1000x.

5.4.1 Probeta Válvula

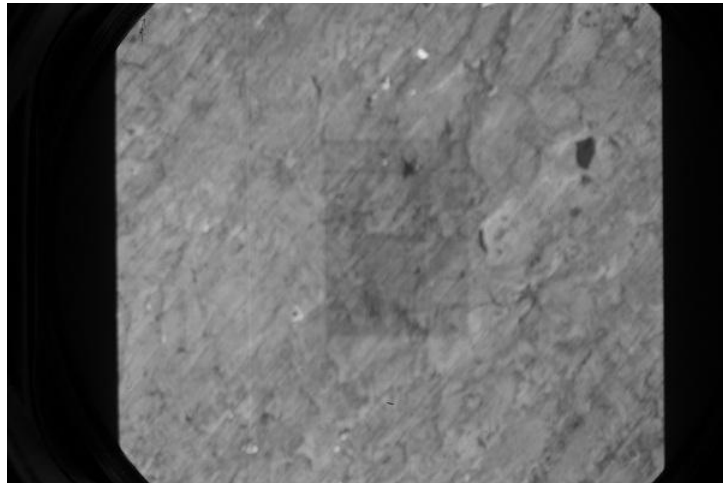


Figura 5.47. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 100x.

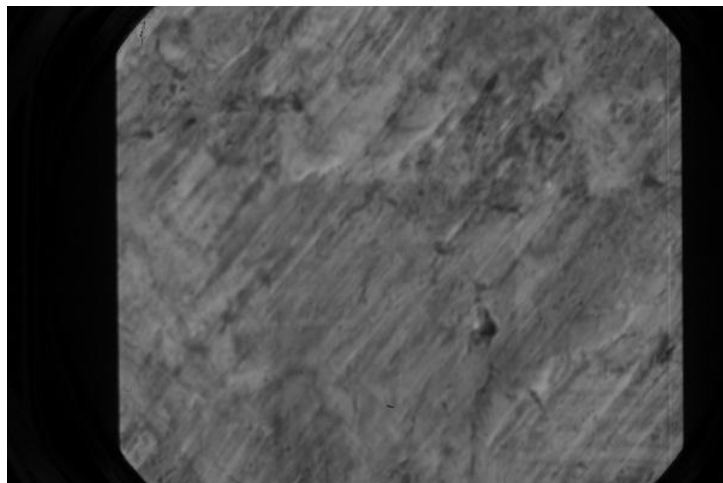


Figura 5.48. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 400x.

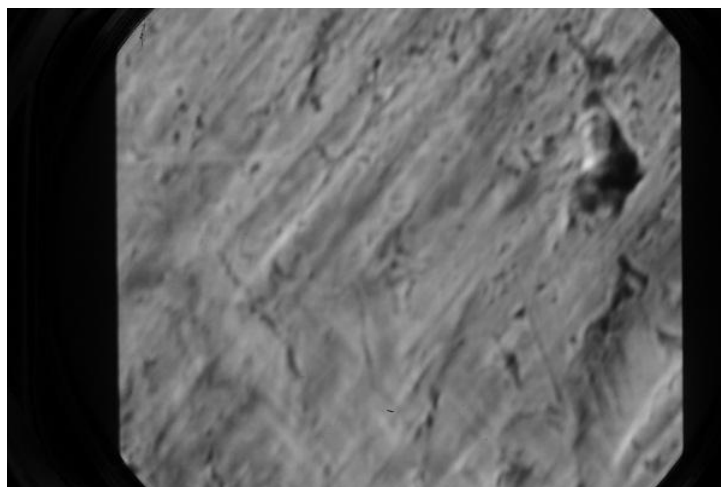


Figura 5.49. Microscopía electrónica de barrido de probeta válvula 1000x.

5.4.2 Durmat 59 PTA

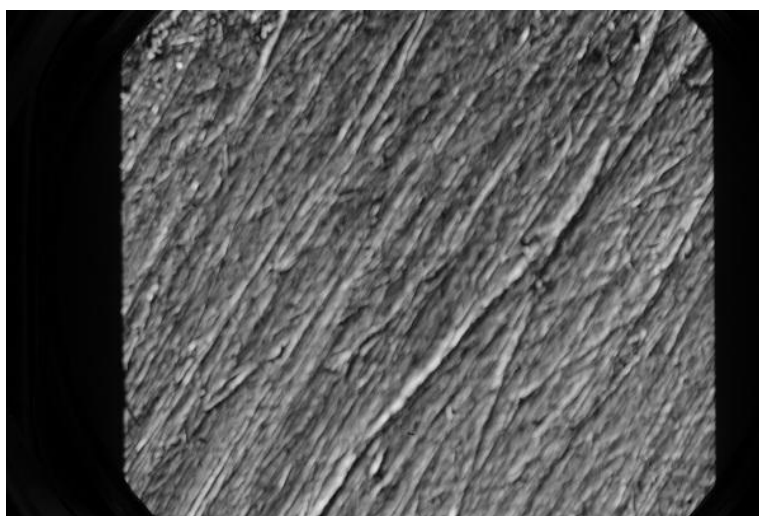


Figura 5.50. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 100x.

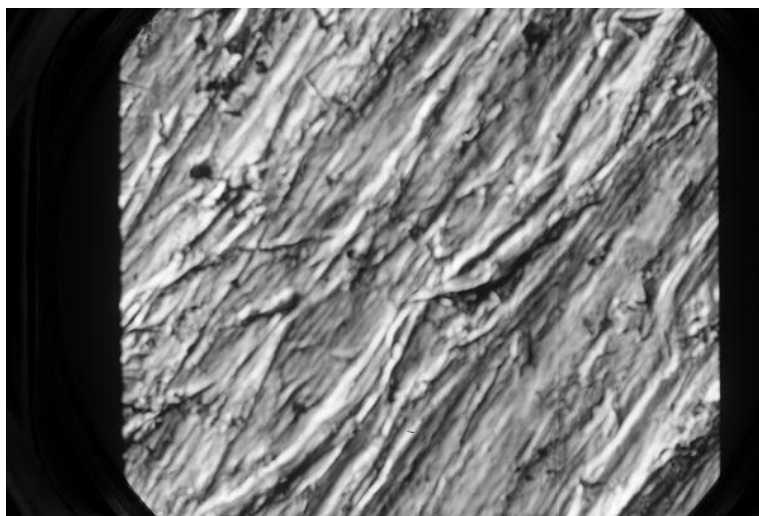


Figura 5.51. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 400x.

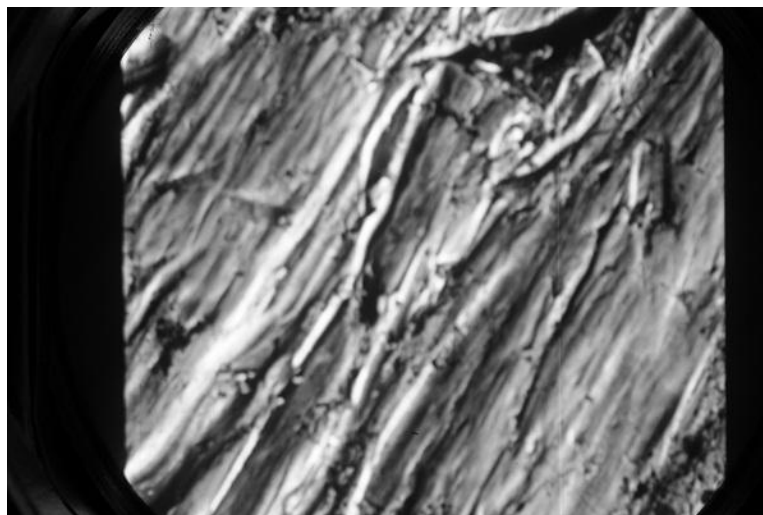


Figura 5.52. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 59 PTA 1000x.

5.4.3 Durmat 62 PTA

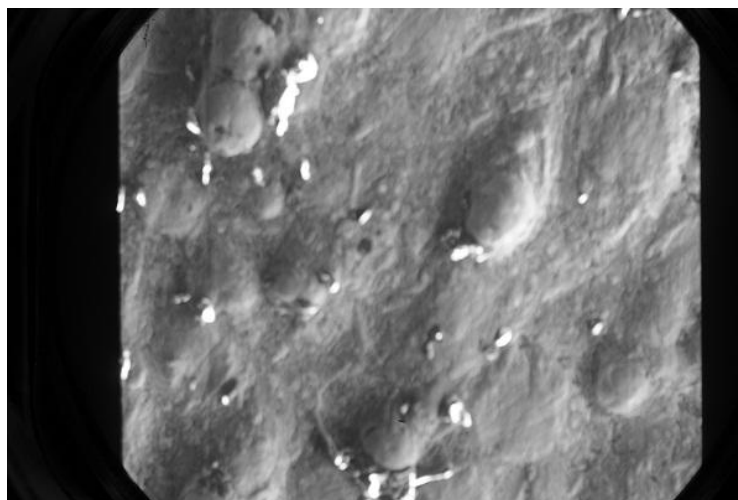


Figura 5.53. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 100x.

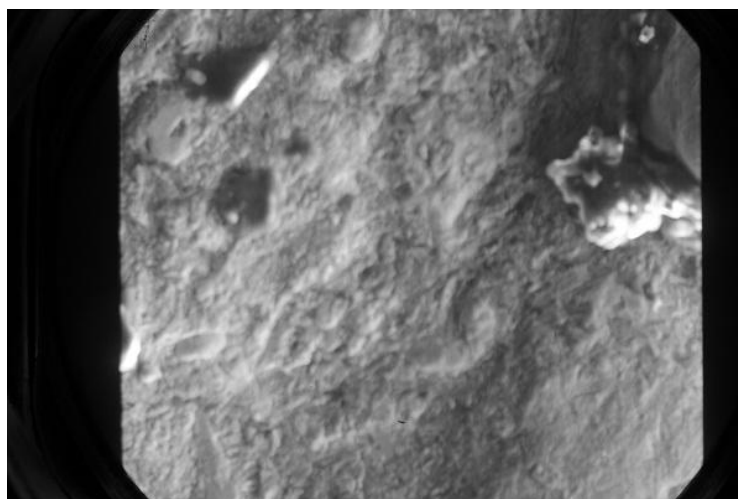


Figura 5.54. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 400x.

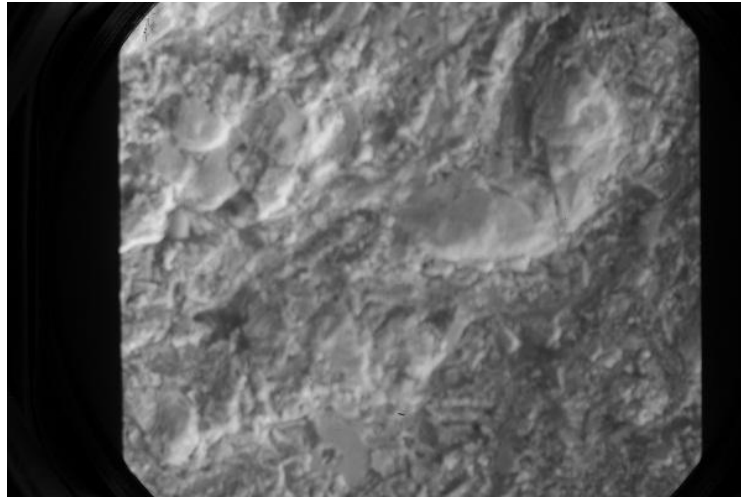


Figura 5.55. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 62 PTA 1000x.

5.4.4 Durmat 505 PTA

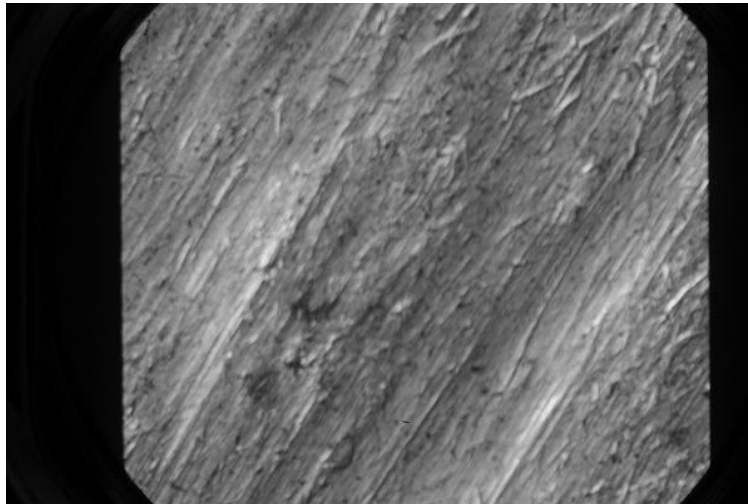


Figura 5.56. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 100x.

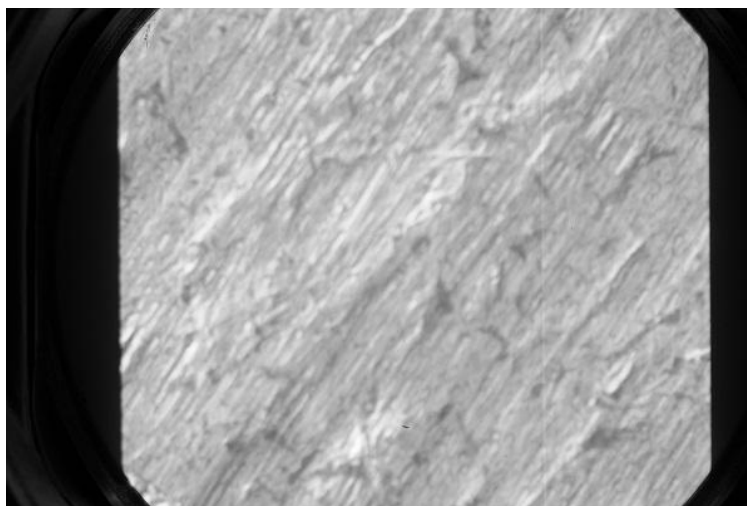


Figura 5.57. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 400x.

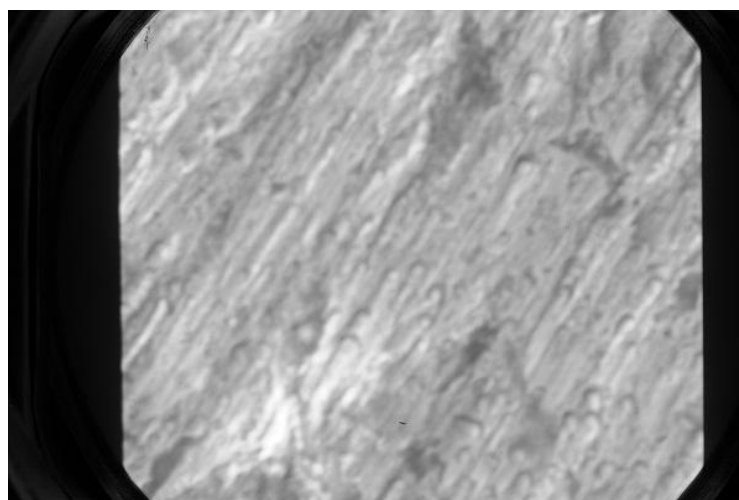


Figura 5.58. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 505 PTA 1000x.

5.4.5 Durmat 101 HVOF

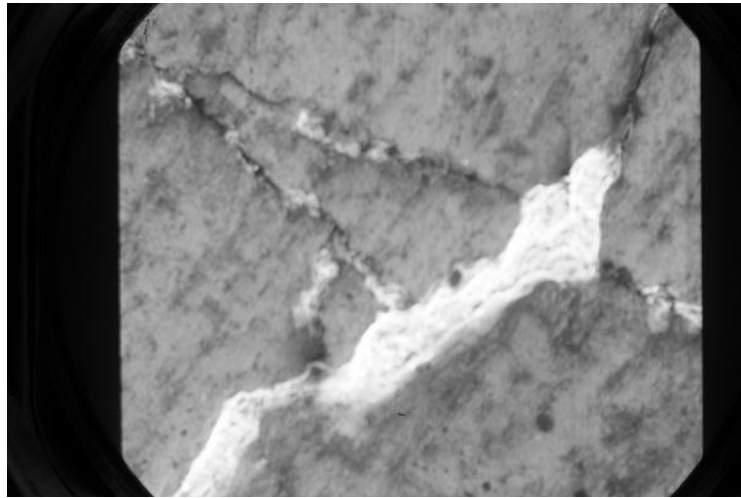


Figura 5.59. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 100x.

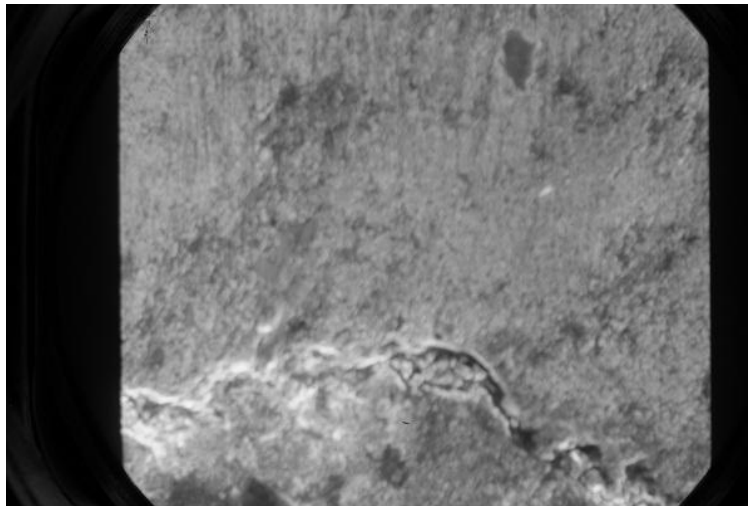


Figura 5.60. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 400x.

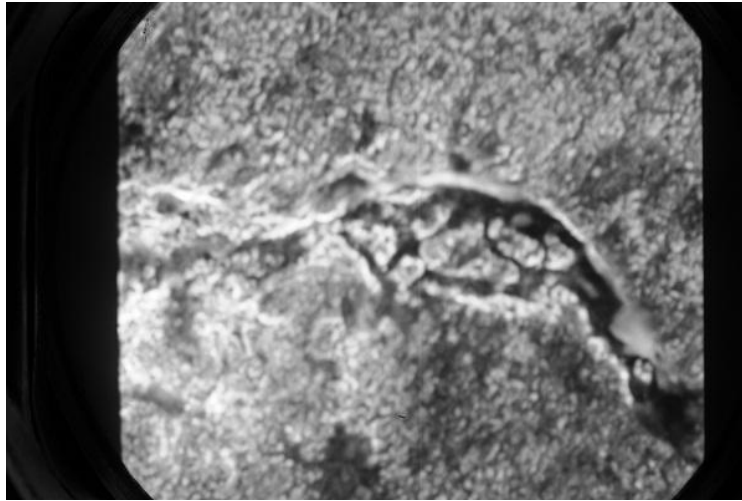


Figura 5.61. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 1000x.

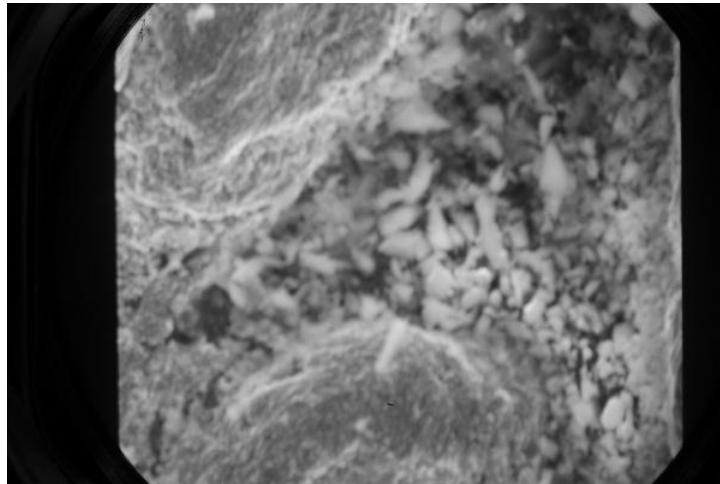


Figura 5.62. Microscopía electrónica de barrido de probeta Durmat 101HVOF 1000x.

5.4.6 Acero SAE 1020

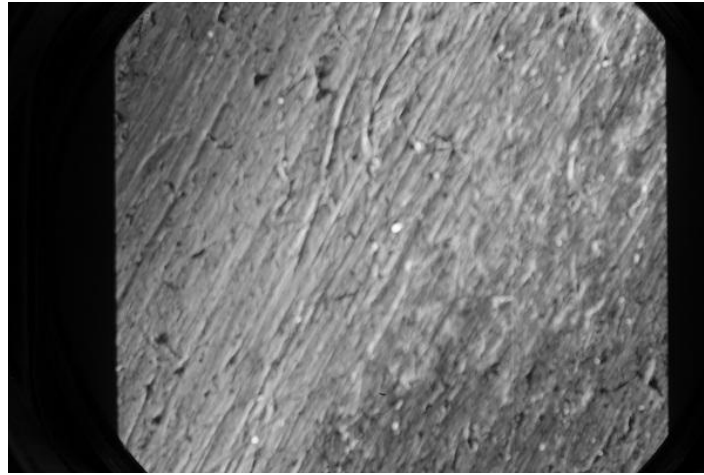


Figura 5.63. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 100x.

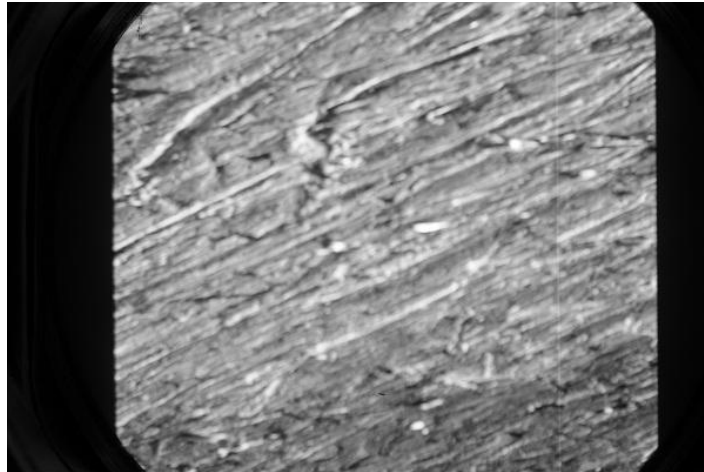


Figura 5.64. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 400x.

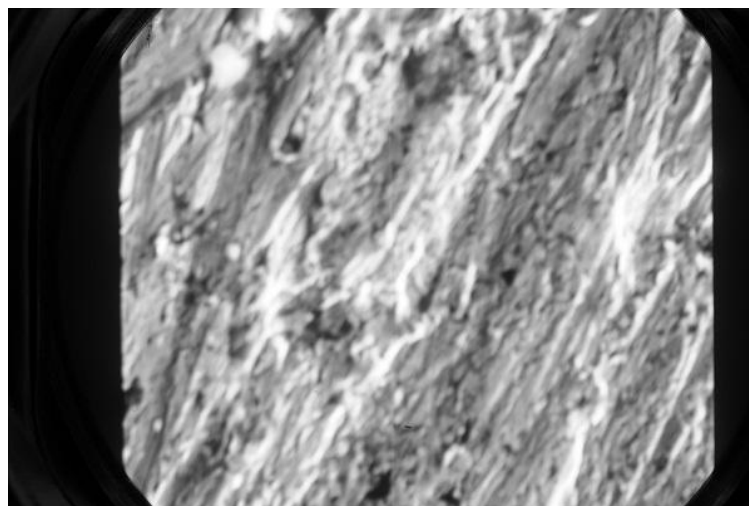


Figura 5.65. Microscopía electrónica de barrido de probeta acero SAE 1020 1000x.

5.5 Ensayo de microdureza

Se realizaron mediciones de micro-dureza, según condiciones mencionadas en el capítulo anterior, a los 4 recubrimientos y al acero proveniente de la válvula. Estas mediciones se hicieron paralelas a la superficie de la muestra a una distancia media del espesor del recubrimiento. Además se presentan mediciones de micro-dureza hechas desde la superficie hasta el sustrato, perpendicular a la superficie de la muestra, con la idea de identificar la transferencia entre el recubrimiento la interface y el sustrato.

El valor promedio de la dureza del Acero SAE 1020 es de 210 HV_{0,3}.

No existe un sistema de conversión estándar entre la escala Vickers y la escala Rockwell solo aproximaciones numéricas en las cuales existe convención.

5.5.1 Probeta válvula

Tabla 5.7. Resultados de ensayo de micro-dureza para probeta válvula.

<i>Medición</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	788	790	795	800	801	798	804	799	796	804	797,5
<i>RC (Aprox)</i>	63	63	64	64	64	64	64	64	64	64	63,8

5.5.2 Durmat 59 PTA

Tabla 5.8. Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 59 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
HV 0,3	326	329	327	324	319	317	325	326	330	329	325,2
RC (Apróx)	33	33	33	33	32	32	33	33	33	33	32,8

Tabla 5.9. Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 59 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV 0,3	330	331	326	322	317	295	267	218	208
Distancia (µm)	100	400	700	1000	1300	1600	1900	2200	2400

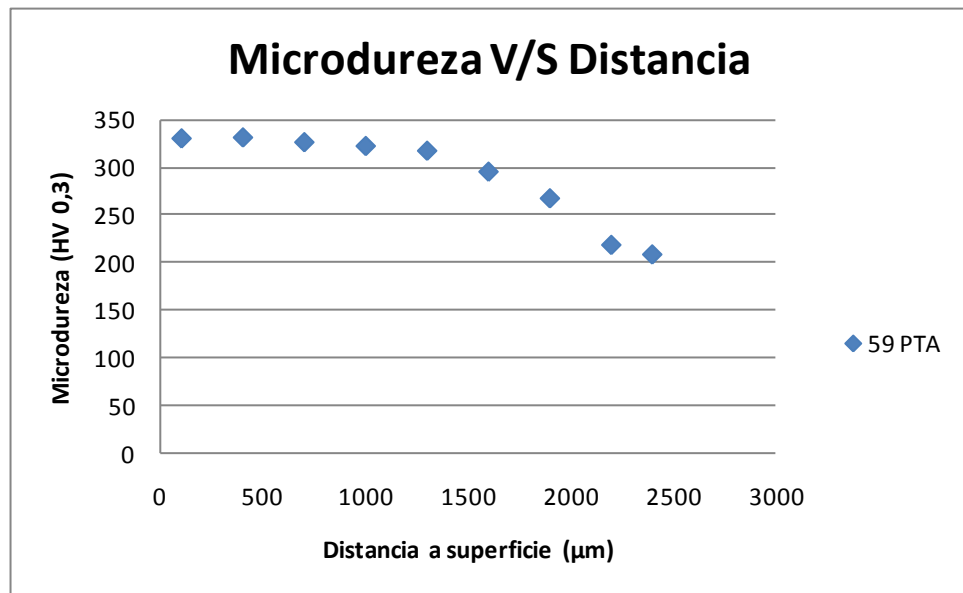


Figura 5.66. Gráfico de micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 59 PTA.

En el gráfico anterior podemos notar que a medida que nos alejamos de la superficie del recubrimiento la dureza baja de manera muy leve partiendo desde los 330 HV_{0,3} a 100 µm de la superficie hasta los 317 HV_{0,3} a 1300 µm, luego de esto podemos notar que entramos en la zona de interfase donde se mezcla, por causa de la temperatura de aplicación de la soldadura, el recubrimiento con el material base, llegando a tener la dureza del acero SAE 1020 a 2400 µm de la superficie. Recordemos que el espesor aproximado del recubrimiento es de 2000 µm.

5.5.3 Durmat 62 PTA

Tabla 5.10. Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 62 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
HV 0,3	467	469	466	466	460	458	458	461	467	460	463,2
RC (Apróx)	47	47	47	47	46	46	46	46	47	46	46,5

Tabla 5.11. Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 62 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV 0,3	468	470	468	465	468	428	368	270	218
Distancia (µm)	100	400	700	1000	1300	1600	1900	2200	2400

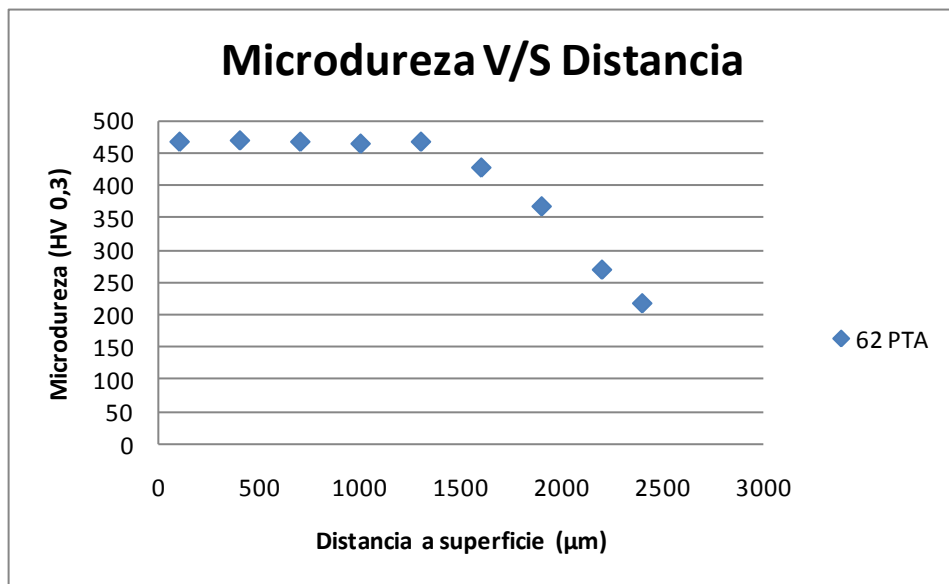


Figura 5.67. Gráfico de Micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 62 PTA.

En la figura 5.67 podemos notar que a medida que nos alejamos de la superficie del recubrimiento la dureza se mantiene prácticamente constante alrededor de los 468 HV_{0,3}, luego de esto podemos notar que desde los 1600 µm la dureza empieza a decaer y entramos en la zona de interfase donde se mezcla, por causa de la temperatura de aplicación de la soldadura, el recubrimiento con el material base, llegando a tener la dureza del acero SAE 1020 a 2400 µm de la superficie. Recordemos que el espesor aproximado del recubrimiento es de 2000 µm.

5.5.4 Durmat 505 PTA

Tabla 5.12 Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 505 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
HV 0,3	713	711	728	760	754	748	728	734	756	750	738,2
RC (Apróx)	61	61	61	63	62	62	61	62	62	62	61,7

Tabla 5.13 Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 505 PTA.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV 0,3	737	735	735	733	726	710	630	418	222
Distancia (μm)	100	400	700	1000	1300	1600	1900	2200	2400

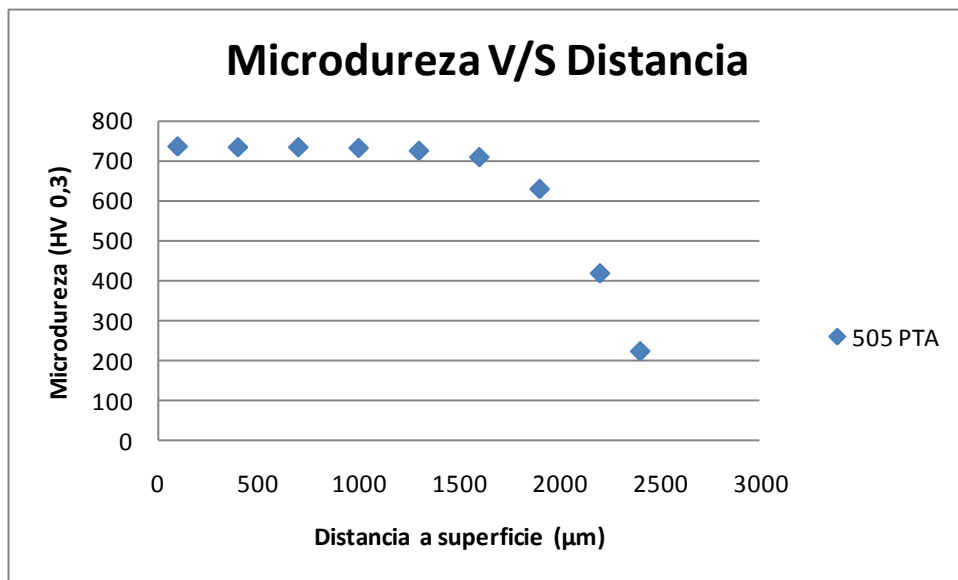


Figura 5.68. Gráfico micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 505 PTA.

En el gráfico anterior se observa que a medida que nos alejamos de la superficie del recubrimiento la dureza se mantiene prácticamente constante alrededor de los 730 HV_{0,3}, luego de esto podemos notar que desde los 1600 μm la dureza empieza a decaer y entramos en la zona de interfase donde se mezcla, por causa de la temperatura de aplicación de la soldadura, el recubrimiento con el material base, llegando a tener la dureza del acero SAE 1020 a 2400 μm de la superficie. Recordemos que el espesor aproximado del recubrimiento es de 2000 μm .

5.5.5 Durmat 101 HVOF

Tabla 5.14 Resultados de ensayo de micro-dureza longitudinal para recubrimiento Durmat 101 HVOF.

<i>Medición</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	1339	1352	1349	1306	1318	1348	1350	1353	1349	1354	1341,8
<i>RC (Aprox)</i>	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73

Tabla 5.15 Resultados de ensayo de micro-dureza perpendicular para recubrimiento Durmat 101 HVOF.

<i>Medición</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>HV 0,3</i>	1330	1335	1336	1332	1343	1110	275	205
<i>Distancia (µm)</i>	100	200	300	400	500	600	700	800

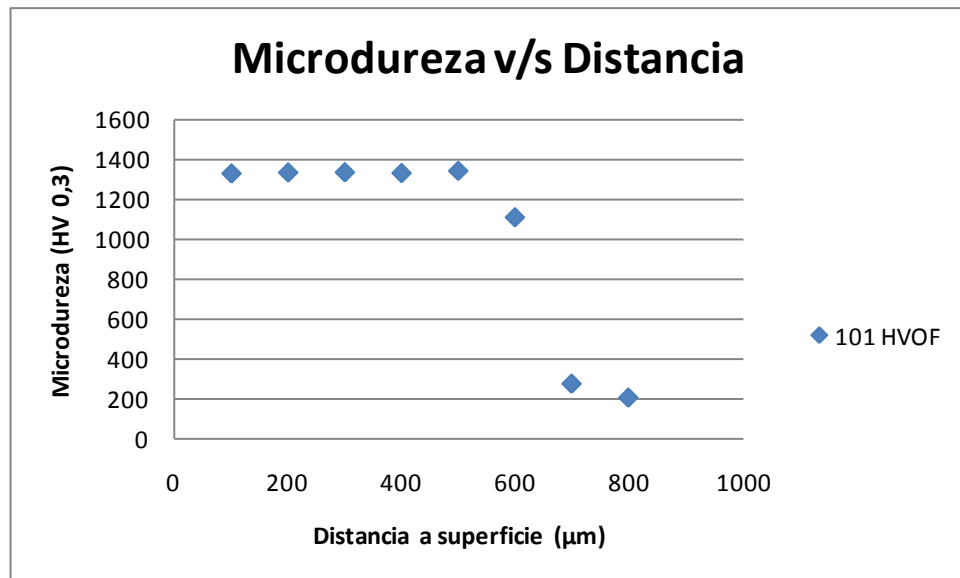


Figura 5.69. Gráfico de micro-dureza versus distancia a la superficie del recubrimiento para Durmat 101 HVOF.

En el gráfico anterior podemos notar que a medida que nos alejamos de la superficie del recubrimiento la dureza se mantiene prácticamente constante alrededor de los 1330 HV_{0,3}, luego de esto podemos notar que desde los 600 µm la dureza decae bruscamente, lo cual nos dice que existe una interfase muy delgada y por ende una mezcla entre el recubrimiento y el material base muy delgada. Esto

se preveía debido a la baja temperatura de aplicación del revestimiento (alrededor de 100 °C). La película teóricamente es de 600 μm lo cual se corrobora con esta medición.

6 Análisis y Discusión de Resultados

6.1 Microscopía

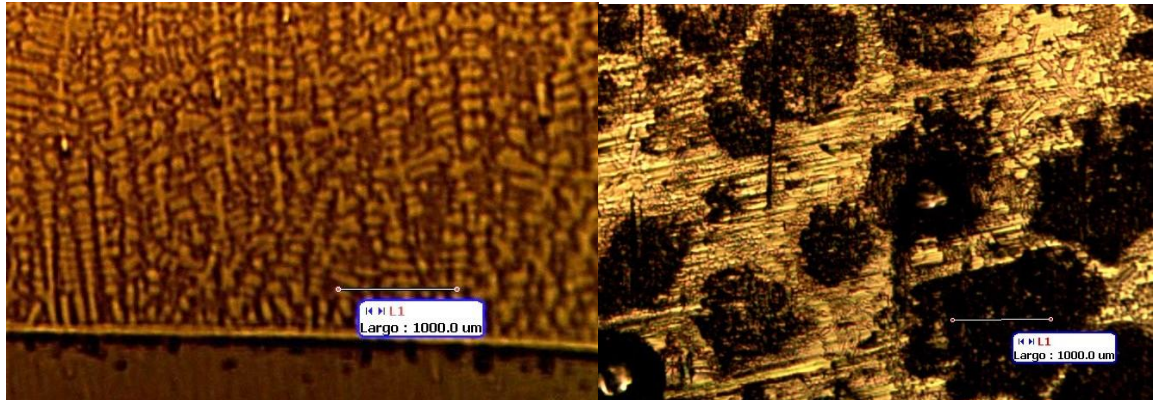


Figura 6.1. Izquierda, imagen del recubrimiento Durmat 59 PTA, derecha imagen del recubrimiento Durmat 62 PTA, 200x.

El Durmat 62 PTA, es una mezcla entre el 59 PTA (polvos base Níquel) y carburos de tungsteno fundidos esféricos. Se puede apreciar un crecimiento dendrítico fino para el 59 PTA y para el 62 PTA los carburos alojados en la matriz de Níquel. Esta matriz se aprecia menos fina dado que debe ocurrir un retraso en el enfriamiento y solidificación por la presencia de los carburos mencionados. Si la dureza estuviese analizada solo sobre la matriz del recubrimiento tendríamos como mejor resultado el 59 PTA, dado la configuración fina, pero con la presencia de los carburos la mayor dureza se consigue en el 62 PTA, este es un 31% más duro que el 59 PTA, lo cual es el objetivo de realizar la mezcla de polvos.

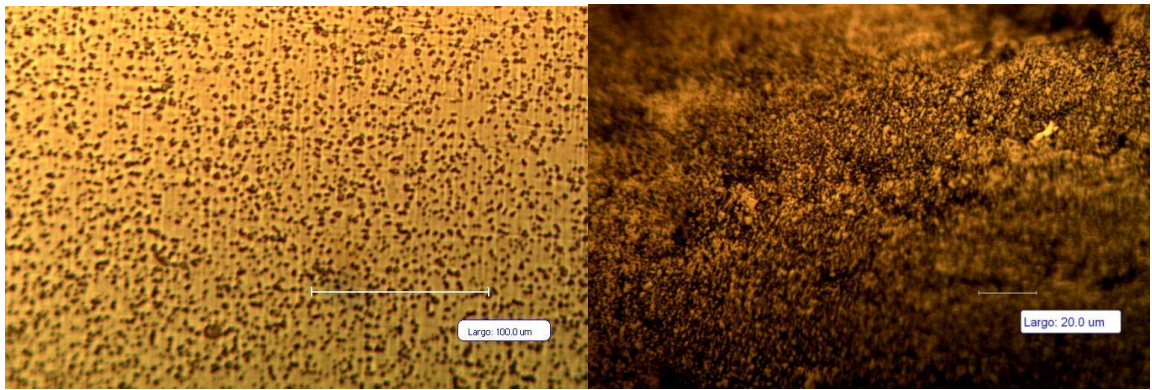


Figura 6.2. Izquierda, imagen del recubrimiento Durmat 505 PTA 200x, derecha imagen del recubrimiento Durmat 101 HVOF, 1000x.

Si comparamos la figura 6.6 izquierda con la figura 6.5, podemos ver una configuración de carburos y matriz mucho más fina y compacta para el recubrimiento 505 PTA. Este recubrimiento tiene mayor dureza que los dos anteriores, es un 109 % más duro que el 59 PTA y un 59 % más duro que el 62 PTA.

En la figura 6.2 derecha no se puede apreciar con exactitud la configuración microscópica del recubrimiento Durmat 101 HVOF, pero se infiere que debiera ser parecida a la del 505 PTA, carburos finos en una matriz de cobalto muy compacta.

6.2 Ensayo de Desgaste

Con la intención de conocer el comportamiento de los recubrimientos y compararlo con el material de la válvula a continuación se comparan resultados. Los gráficos de desgaste se comparan bajo la misma escala con tal de tener mejor noción de los resultados.

6.2.1 Comparativa entre Válvula y Durmat 59 PTA

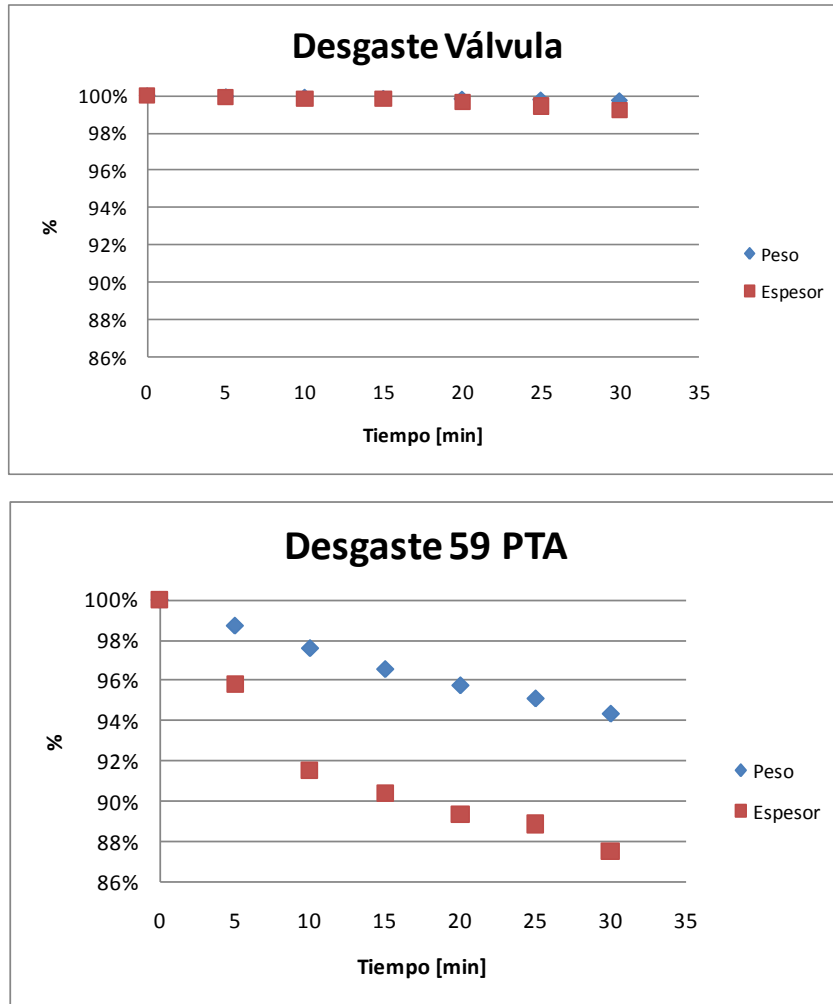


Figura 6.3. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 59 PTA.

Válvula		Durmat 59 PTA	
<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>	<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,3%	0,8%	5,7%	12,5%

Podemos observar que el recubrimiento tiene un comportamiento frente al desgaste muy por debajo del material de la válvula, en total la válvula pierde un 0,279% de su peso frente al 5,69% del recubrimiento, en cuanto al espesor la válvula pierde un 0,759% frente al 12,45% del recubrimiento, más aún a contar de la cuarta medición ya se había llegado al material base, siendo la única probeta en la que ocurrió esto.

6.2.2 Comparativa entre Válvula-62 PTA

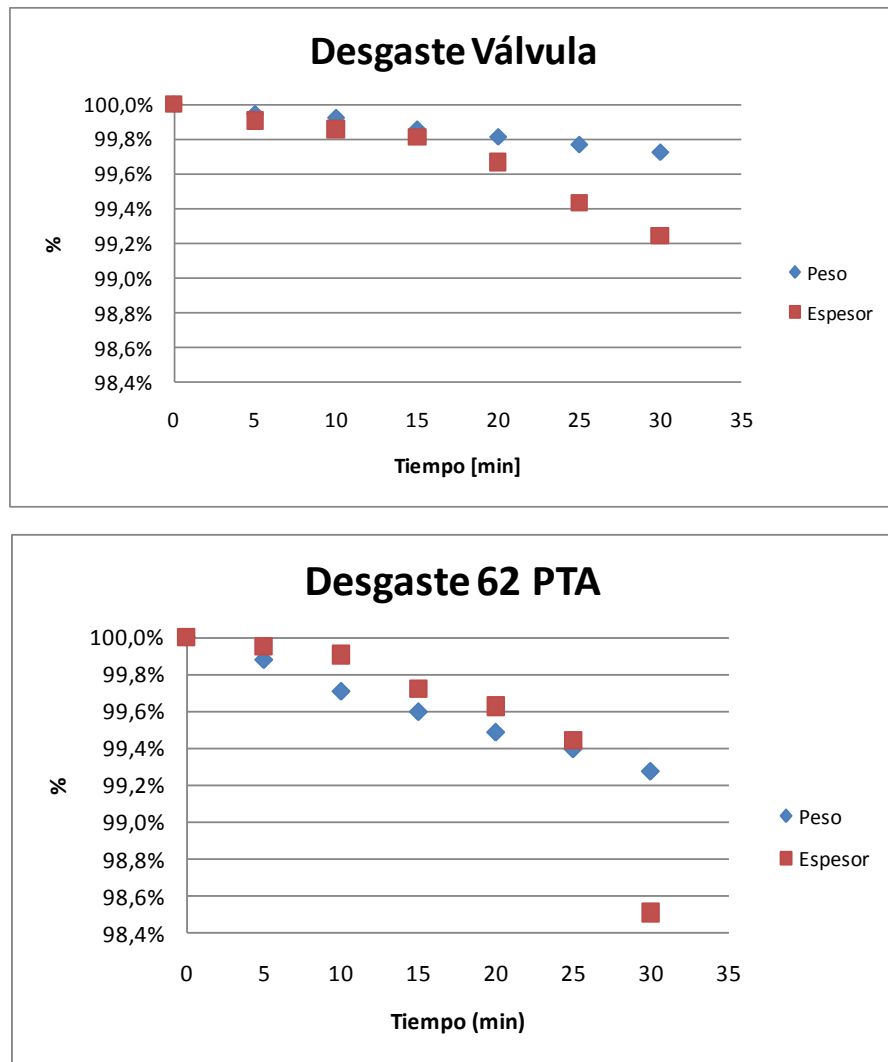


Figura 6.4. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 62 PTA.

Válvula		Durmat 62 PTA	
<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>	<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,3%	0,8%	0,7%	1,5%

Podemos ver que el recubrimiento 62 PTA tiene un mejor comportamiento frente al material de la válvula que el 59 PTA, pierde menos peso y menos espesor pero no presenta mejores resultados que el material de la válvula.

6.2.3 Comparativa entre Válvula-505 PTA

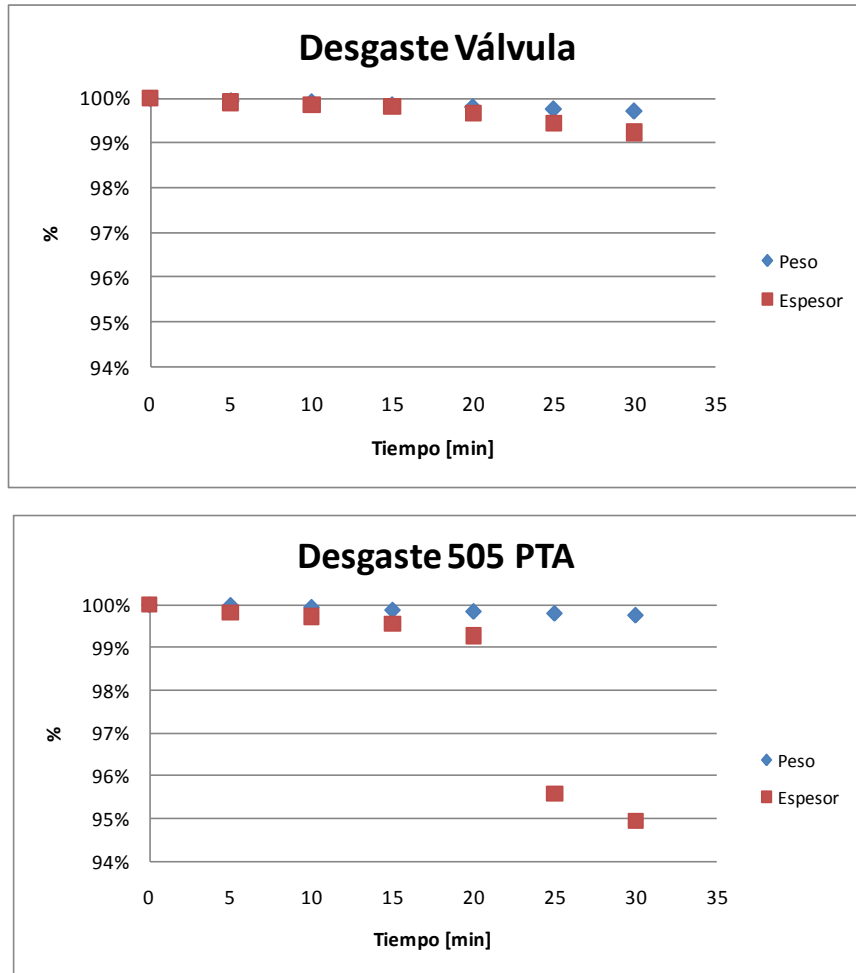


Figura 6.5. Comparación de desgaste entre el material de válvula y Durmat 505 PTA.

Válvula		Durmat 505 PTA	
<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>	<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,3%	0,8%	0,2%	5,1%

Existe un mejor comportamiento por parte de este recubrimiento que los dos anteriores, en el caso de la pérdida de peso podemos observar que el recubrimiento pierde un 0,043% menos que la válvula pero en el caso del espesor el recubrimiento pierde casi 7 veces más que el material de la válvula.

Para el caso del recubrimiento, observamos una fuerte variación a contar de la cuarta medición, al minuto 20, en la pérdida de espesor y no así en el peso lo cual puede reflejar un error de medición.

6.2.4 Comparativa entre Válvula-101 HVOF

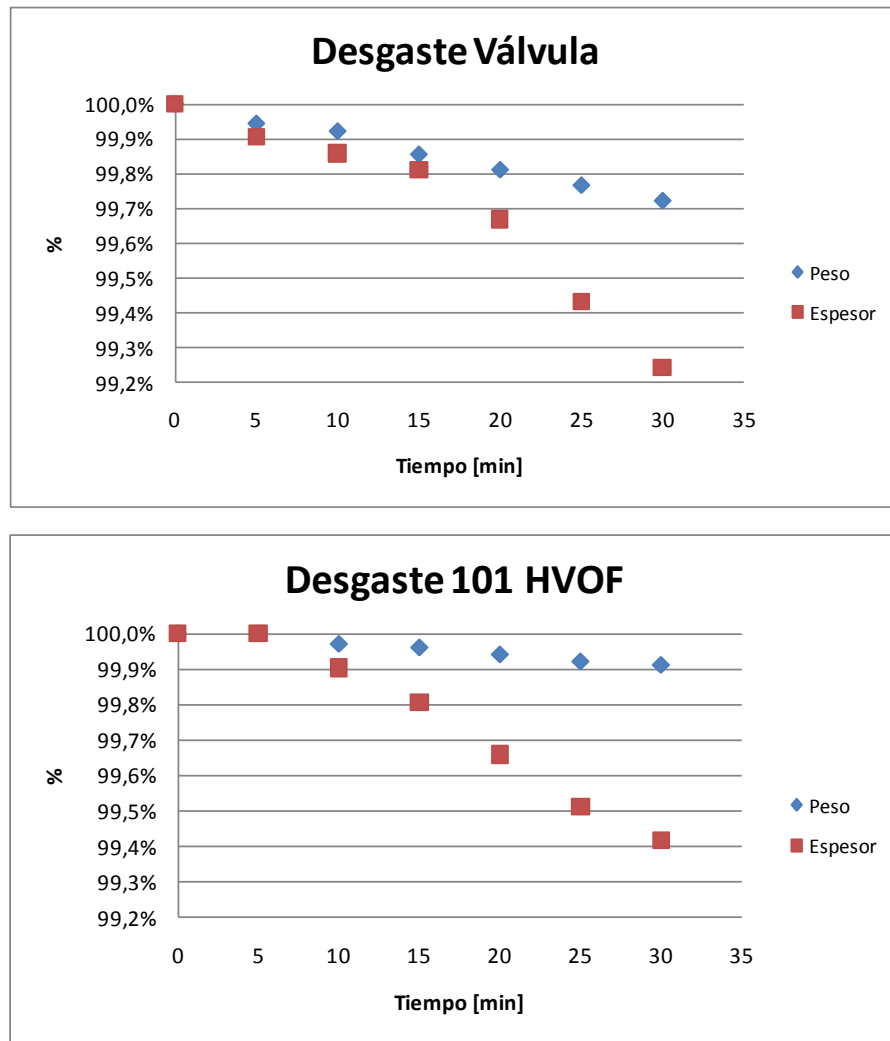


Figura 6.6. Comparación de desgaste entre acero de válvula y Durmat 101 HVOF.

Válvula		Durmat 101 HVOF	
<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>	<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
0,3%	0,8%	0,1%	0,6%

Vemos que el recubrimiento 101 HVOF (Wc-Co) se comporta mejor en la prueba de desgaste abrasivo que el material de la válvula, es el único de los recubrimientos que presenta mejores resultados que la válvula.

6.2.5 Comparativa entre Acero 1020 y Durmat 101 HVOF

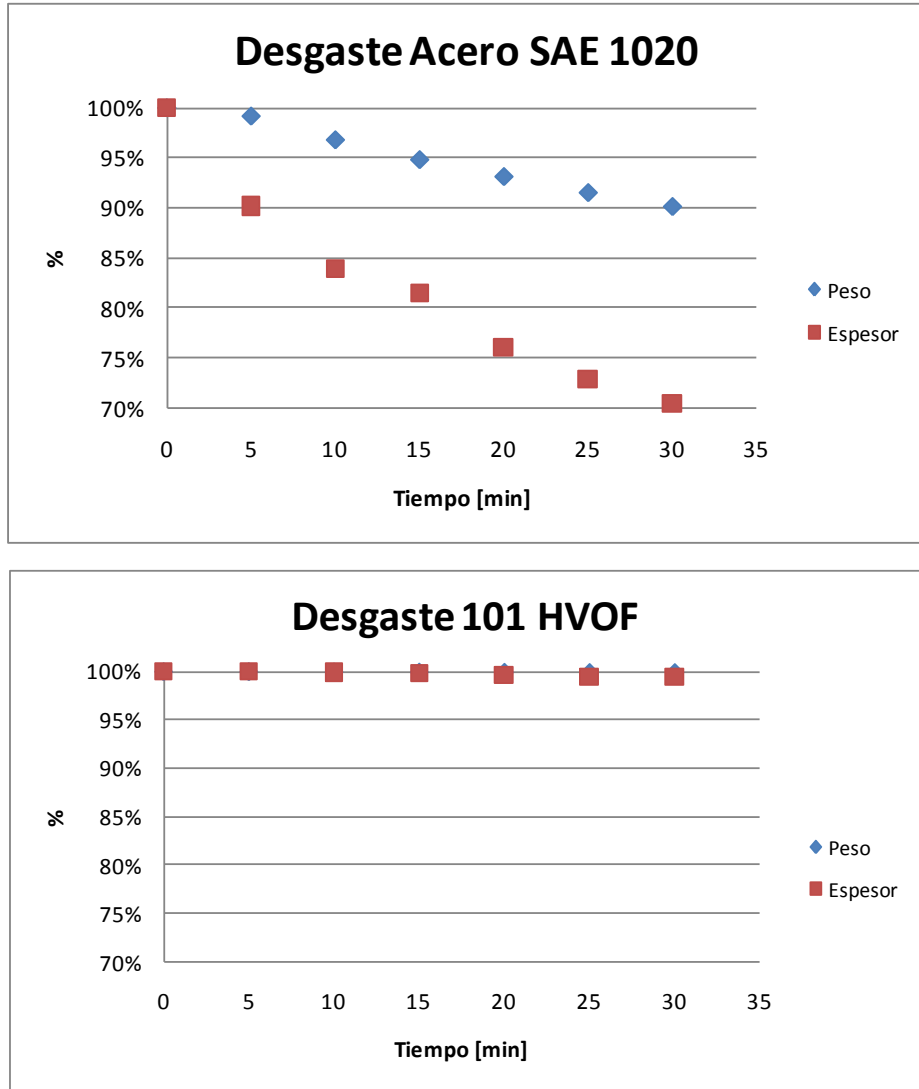


Figura 6.7. Comparación de desgaste entre acero SAE 1020 y Durmat 101 HVOF

Acero SAE 1020		Durmat 101 HVOF	
<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>	<i>Pérdida de peso</i>	<i>Pérdida de Espesor</i>
9,9%	29,6%	0,1%	0,6%

Podemos observar una extrema diferencia teniendo en cuenta que ambas probetas son de igual material acero SAE 1020, con la diferencia de que una de ellas está recubierta con una película de 0,6 [mm] de Carburo de Tungsteno-Cobalto.

6.3 Análisis de superficies desgastadas

Comparamos las imágenes obtenidas por medio del SEM y encontramos patrones similares de desgaste entre el Durmat 59, Durmat 505 y el material de la válvula, los cuales se desgastan por deformación plástica y posterior desprendimiento de material.

Para el Durmat 62 PTA y el 101 HVOF se hace un análisis a continuación:

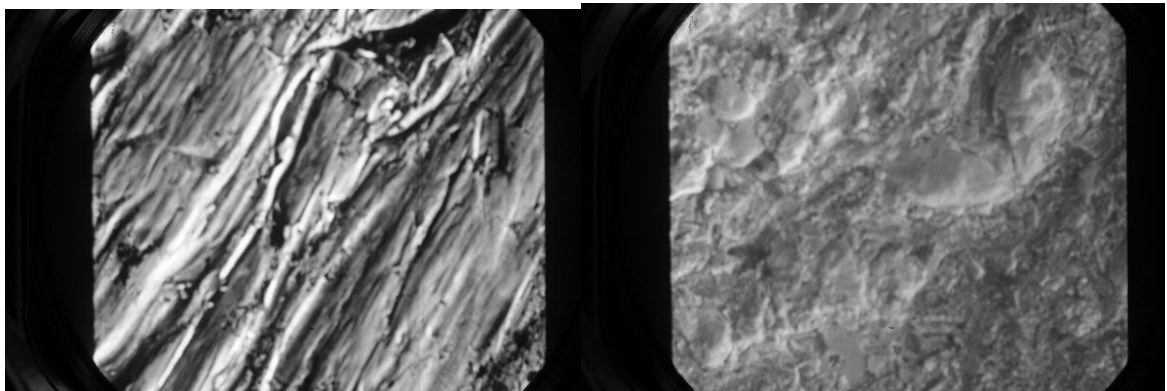


Figura 6.8. Comparación de imágenes del SEM entre Durmat 59 PTA y Durmat 62 PTA.

En la figura 6.8 la imagen de la izquierda corresponde al Durmat 59 PTA el cual es un recubrimiento en base Níquel y el de la derecha, Durmat 62 PTA, es una mezcla de 40% Durmat 59 PTA y un 60% Durmat SFTC (Carburos de tungsteno esféricos). Se puede apreciar una gran diferencia en el desgaste a pesar de que ambos se producen por deformación plástica, el hecho de agregar carburos de tungsteno hace mucho más resistente el recubrimiento.

Los canales o surcos que se pueden apreciar tienen que ver con el sentido del movimiento de las partículas abrasivas durante el ensayo, las cuales se insertan al inicio del contacto y arrastran material deformando plásticamente la superficie.

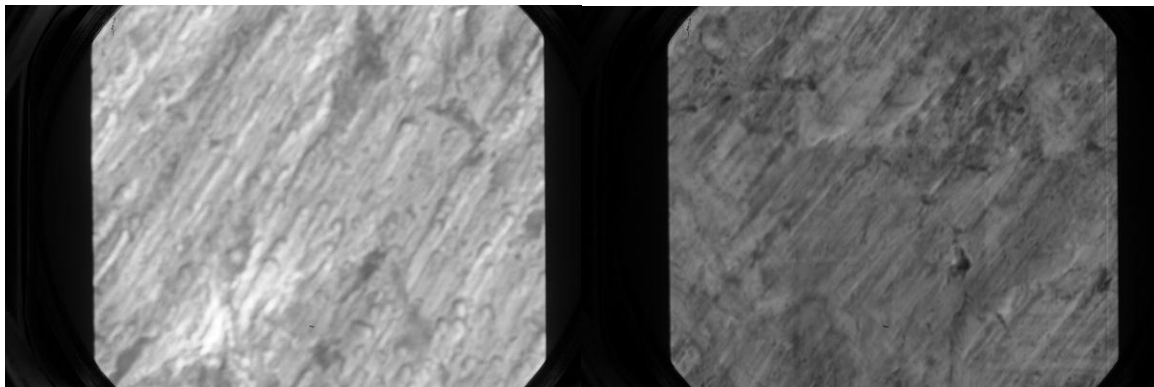


Figura 6.9. Comparación de imágenes del SEM entre Durmat 505 PTA y Válvula.

La comparativa anterior corresponde al recubrimiento en base Hierro Durmat 505 PTA y a la probeta obtenida de la Válvula. Podemos ver que su patrón de desgaste es muy parecido, deformación plástica, pudiendo notar que además de los surcos originados por el roce de las partículas abrasivas se observan incrustaciones las cuales se pueden atribuir a que ciertas partículas se incrustan y luego a medida que aumenta el desgaste se desprenden y forman un nuevo surco desde ese punto.

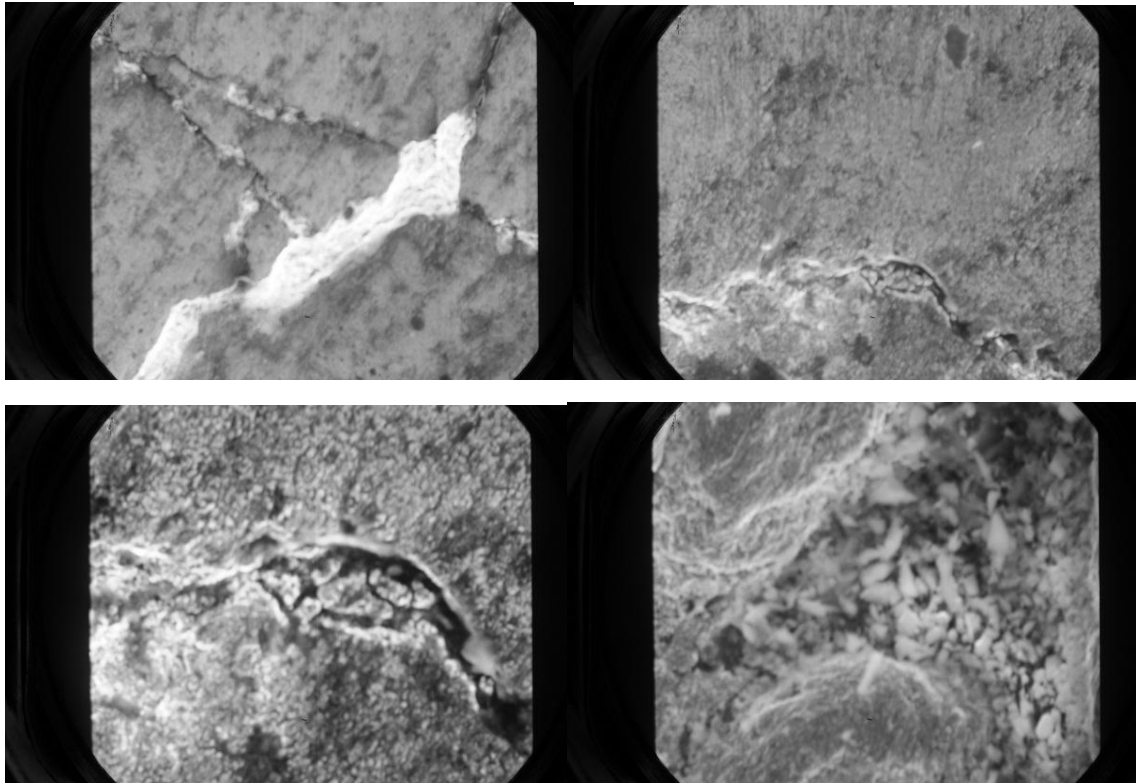


Figura 6.10. Imágenes del SEM del Durmat 101 HVOF para los distintos acercamientos, arriba 100x y 400x, abajo dos imágenes 1000x.

Al observar la figura 6.10 se puede inferir que el desgaste se produce por desprendimiento de partículas de carburo de tungsteno desde la matriz de cobalto, partículas las cuales se introducen en las grietas formadas por micro-fracturas debido a la presión que ejercen las partículas abrasivas sobre la delgada pero extremadamente dura capa de recubrimiento. En imagen superior izquierda se observa una zona más brillante la cual al realizar el acercamiento de 100x a 1000x, imagen inferior izquierda, se aprecia acumulación de partículas en una zona de quiebre.

6.4 Ensayo de Micro-dureza

6.4.1 Comparativa entre Válvula y Durmat 59 PTA

Válvula		Durmat 59 PTA	
Micro-dureza	Promedio	Micro-dureza	Promedio
HV 0,3	797,5	HV 0,3	325,2
RC (Apróx)	63,8	RC (Apróx)	32,8

Identificamos que el valor de la micro-dureza del recubrimiento es prácticamente la mitad del resultado que arroja la medición para la válvula.

6.4.2 Comparativa entre Válvula y Durmat 62 PTA

Válvula		Durmat 62 PTA	
Micro-dureza	Promedio	Micro-dureza	Promedio
HV 0,3	797,5	HV 0,3	463,2
RC (Apróx)	63,8	RC (Apróx)	46,5

Este recubrimiento siendo más duro que el anterior, sigue estando por debajo del resultado de la válvula.

6.4.3 Comparativa entre válvula y Durmat 505 PTA

Válvula		Durmat 505 PTA	
Micro-dureza	Promedio	Micro-dureza	Promedio
HV 0,3	797,5	HV 0,3	738,2
RC (Apróx)	63,8	RC (Apróx)	61,7

Tenemos aquí que el recubrimiento Durmat 505 PTA tiene un resultado muy parecido a la válvula.

6.4.4 Comparativa entre válvula y Durmat 101 HVOF

Válvula

<i>Micro-dureza</i>	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	797,5
<i>RC (Apróx)</i>	63,8

Durmat 101 HVOF

<i>Micro-dureza</i>	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	1341,8
<i>RC (Apróx)</i>	73

Podemos observar que el recubrimiento a base de Carburo de Tungsteno, es un 68 % más duro que el acero de la válvula.

6.4.5 Comparativa entre SAE 1020 y Durmat 101 HVOF

Acero SAE 1020

<i>Micro-dureza</i>	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	210
<i>RC (Apróx)</i>	13

Durmat 101 HVOF

<i>Micro-dureza</i>	<i>Promedio</i>
<i>HV 0,3</i>	1341,8
<i>RC (Apróx)</i>	73

Podemos ver que al recubrir un hacer como el SAE 1020 con una película de Durmat 101 HVOF podemos aumentarla dureza superficial en un 640 %.

7 Conclusiones

Se obtuvieron los 4 recubrimientos y podemos concluir que el de mejor desempeño en las pruebas realizadas es el Durmat 101 HVOF, es el compuesto que presenta la micro-estructura más fina y compacta posee una dureza de 1341 HV_{0,3} lo cual se atribuye al 88% de carburo de tungsteno que contiene.

Al agregar un 60% de carburos de tungsteno a los polvos base níquel su micro-dureza aumentó en un 31% y produjo un aumento en la resistencia al desgaste lo cual queda de manifiesto en las imágenes obtenidas del SEM.

Los compuestos que poseen una micro-estructura más fina y compacta obtuvieron mejor desempeño en desgaste y micro-dureza. Es así como el recubrimiento en base Hierro, Durmat 505 PTA, es que obtiene mejores resultados de los recubrimientos aportados por soldadura.

Durmat 101 HVOF pierde un 64 % menos de peso y un 32 % menos de espesor comparado con el material de la válvula. Además este recubrimiento es un 68 % más duro que la válvula.

El Durmat 505 PTA arroja prácticamente el mismo resultado en dureza que el material de la válvula, 740 HV_{0,3} , pero pierde 5 veces más espesor. Este compuesto es un 59 % más duro que el 62 PTA y un 109 % más duro que el 59 PTA.

El recubrimiento metálico base Níquel Durmat 59 PTA es el de peor comportamiento mecánico en todas las pruebas y es el único que en el ensayo de desgaste llegó al material base.

Las imágenes del SEM confirman los resultados del ensayo de desgaste y de micro-dureza observando que el menos desgastado de los aportes de soldadura es el 505 PTA y que comparando los desgastes con la probeta obtenida de la válvula, todos los recubrimientos se observan con más daño.

Se encontraron alternativas al cambio de piezas mecánicas que fallan por desgaste abrasivo, en este caso particular, los asientos de válvulas API-9, los cuales son cambiados por otros nuevos cada 800 h. Estas piezas podrían repararse usando recubrimientos duros tanto con aportes de soldadura como con proyección térmica, logrando similares o mejores prestaciones en servicio. También queda de manifiesto la alternativa de fabricar piezas en materiales más económicos y recubrir aquellas zonas expuestas a abrasión con materiales capaces de proporcionar alta resistencia al desgaste como el Carburo de Tungsteno.

8 Bibliografía

- [1] Ares, Alicia; Kaufman, Michael y Schvezov, Carlos. (2003). Solidificación direccional de aleaciones dendríticas base Níquel. Jornadas SAM/ CONAMET/ Simposio materia, Santiago, 2 de julio, (paper).
- [2] ASTM Standard G65, 2003, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM International, PA, 2001, DOI: 10.1520/G0065-00E01.
- [3] Caicedo, Holman F.; Valdés, Jairo O. y Coronado, Jhon J. (2005). Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos, *Tecnura*, 17, 16-24.
- [4] Castillo, M.; Villa, G.; Vite, M.; Villegas, P. y Hernández, L. (2003). Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos con aleación Estelita e Inconel 600. *Naturaleza y Desarrollo*, 1(1), 35-40.
- [5] Ferrer C., Amigó V. (2005). *Tecnología de Materiales*, Universidad Politécnica de Valencia: Alfaomega.
- [6] González Hernández, A. G. (2008). Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de los recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Medellín: Disertación para optar al título de Magíster en Ingeniería – Énfasis Materiales, Facultad De Ingeniería, Universidad De Antioquia.
- [7] Gutiérrez, J.; León Sevilla, L.; Mesa Grajales, D. y Toro, A. (2004). Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera. *Scientia Et Technica*, 25, 149-154.
- [8] Ludey M., José y Trujillo S., Gonzáles. (2007). Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores. *Scientia Et Technica*, XII(37), 199-204.
- [9] Manual técnico de la pastilla de freno. Cap. 2, pp 8-11.
- [10] Ortúzar M, R. Desgaste y recuperación. Valparaíso: Curso Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María (inédito).
- [11] Picas, J.A.; Forn, A.; Menargues, S. y Matthäus, G. Recubrimientos multicapa obtenidos por proyección térmica HVOF. Cataluña: Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Politécnica de Cataluña (inédito).

- [12] Rodríguez, María de los A.; Gil, Linda; Pérez, Rafael; Ferrara, Salvador. (2009). Desgaste de recubrimientos WC-Co-Ni-CrBSi tratados térmicamente. *Revista Latinoamericana De Metalurgia y Materiales*, 29(2), 135-150.
- [13] Tong Yul Cho, Jae Hong Yoon, Jae Young Cho, (2009) Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr”, *Surface & Coatings Technology*, 203, 3250-3253.
- [14] Villanueva, J. F. (2005) Avaliação de revestimentos Resistentes A Corrosão e desgaste, aplicados por aspersão térmica ao arco. Florianópolis: Tesis para optar al título de magíster en ingeniería, mención Ingeniería Mecánica, Programa de posgrados en Ingeniería Mecánica, Universidad Federal De Santa Catarina.
- [15] Wang Q.; Chen Z.H. y,Ding Z.X. Performance of abrasive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF. (2009) *Tribology International*, 42 (7), pp. 1046-1051.