



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES EN RECUBRIMIENTOS RESISTENTES AL  
DESGASTE POR ABRASIÓN EN CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**JONATAN EMANUEL MARÍN PÉREZ**

**PROFESOR GUÍA:**

**ALEJANDRO VARGAS USCATEGUI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**RODRIGO PALMA HILLERNS**

**LEONEL NUÑEZ LAZO**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2017**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico  
POR: Jonatan Emanuel Marín Pérez  
FECHA: 16/01/2017  
PROFESOR GUÍA: Alejandro Vargas Uscategui

## **EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES EN RECUBRIMIENTOS RESISTENTES AL DESGASTE POR ABRASIÓN EN CHILE**

Es sabido que Chile es el primer productor de cobre en el mundo, ya sea en el formato de cátodos o concentrado. Los equipos usados en esta industria, tales como, palas retroexcavadoras, cargadores frontales y molinos de cono, están sometidos a un ambiente abrasivo que se traduce en desgaste (pérdida de material), lo que genera grandes costos para las empresas mineras.

El presente trabajo está motivado en conocer la oferta de soluciones disponibles en Chile, para proteger equipos contra el desgaste abrasivo, respondiendo algunas preguntas, tales como ¿Qué materiales se utilizan para recubrir? ¿Qué procesos se usan? Entendiendo la necesidad de proteger los equipos de minería del cobre contra el desgaste generado por los efectos de la abrasión.

El objetivo de la memoria es realizar una evaluación de algunas soluciones tecnológicas en recubrimientos resistentes a la abrasión para aplicaciones de minería en Chile. El trabajo no pretende entregar una solución, sino que hacer una revisión de las tecnologías utilizadas actualmente en el país.

En el mundo, los materiales más utilizados para proteger equipos contra el desgaste abrasivo, son los recubrimientos de carburos de cromo (placas bimetálicas) y los carburos de tungsteno en base níquel. Este último tiene un mejor rendimiento, pero es casi tres veces más costoso que los carburos de cromo. La mayoría de los recubrimientos son aplicados por procesos de soldadura, tales como soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), soldadura por arco de plasma transferido (PTAW, por sus siglas en inglés), entre otros métodos.

La metodología de este trabajo de título se dividió en tres etapas. La primera consistió en el intercambio de información a través de una encuesta online con empresas relacionadas con la oferta de soluciones contra el desgaste. En la segunda etapa, se entrevistó en forma presencial a algunas empresas del rubro y se obtuvieron algunas muestras representativas de la oferta del mercado. En la tercera etapa, las muestras fueron analizadas a nivel de laboratorio (análisis de metalografía, dureza y resistencia al desgaste por abrasión).

De las encuestas se puede determinar que, en Chile, los materiales preferidos para proteger contra el desgaste por abrasión son los aceros austeníticos, fundiciones blancas y las placas bimetálicas. En cuanto a los procesos preferidos, se encuentra la soldadura por electrodo protegido (SMAW) y alambre tubular (FCAW). En las entrevistas, se indica que esta última tiene como ventaja su alta productividad y fácil manejo. Las empresas también indicaron que la decisión de utilizar un material para recubrir se basa en la experiencia del cliente. Del análisis en laboratorio, se observa que el material que presentó mejor comportamiento frente al ensayo de desgaste por abrasión ASTM G65 es la placa bimetálica.

*Para Bárbara...*

## Agradecimientos

Quiero agradecer a las personas que me recibieron muy amablemente y brindaron las muestras para realizar esta memoria.

Agradezco a Bárbara García, mi novia, por estar siempre conmigo, dándome su apoyo ya sea con una palabra de aliento o un abrazo. Ella ha sido un pilar fundamental durante estos años de universidad, quien me ha motivado para seguir adelante y perseguir mis metas...¡Te Amo!

También agradezco a mis profesores de comisión Alejandro Vargas y Rodrigo Palma, quienes siempre estuvieron para dilucidar mis dudas y guiaron este trabajo para que sea un éxito. En especial, quiero agradecer al profesor Patricio Méndez de la Universidad de Alberta (Canadá), quien motivó este estudio y me brindó todo su apoyo durante este proceso.

Agradezco a mi familia y la familia de mi novia, por estar siempre preocupados por mí, dándome palabras de ánimo y apoyándome en lo que necesité.

Por último, a mis amigos Andrés, Diego, Gabriel y Roberto con los cuales pasé momentos que no olvidaré e hicieron que el paso por la universidad haya sido una experiencia increíble.

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes Generales .....	1
1.2	Motivación .....	2
1.3	Objetivo General .....	3
1.4	Objetivos Específicos.....	3
1.5	Alcances .....	3
<b>2</b>	<b>Antecedentes Específicos .....</b>	<b>4</b>
2.1	Desgaste en Industria Minera.....	4
2.2	Desgaste por Abrasión .....	6
2.3	Procesos típicos para fabricar recubrimientos .....	7
2.3.1	Soldadura por plasma transferido (PTAW) .....	7
2.3.2	Soldadura por electrodo protegido (SMAW).....	8
2.3.3	Soldadura por arco sumergido (SAW).....	8
2.3.4	Soldadura por láser (LBW).....	9
2.3.5	Soldadura protegida por gas (GMAW).....	10
2.3.6	Soldadura por alambre tubular (FCAW).....	10
2.4	Materiales típicos de recubrimientos .....	11
2.4.1	Materiales ferrosos.....	13
2.4.1.1	Aceros Perlíticos .....	13
2.4.1.2	Aceros Austeníticos .....	13
2.4.1.3	Aceros Martensíticos .....	14
2.4.1.4	Fundiciones .....	15
2.4.2	Carburos.....	16
2.4.3	Naturaleza de los recubrimientos.....	19
2.5	Fabricantes de recubrimientos duros en Chile .....	20
<b>3</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Procedimiento Experimental .....</b>	<b>23</b>
4.1	Encuesta .....	23
4.2	Ensayo de desgaste .....	23
4.2.1	Preparación de muestras .....	25
4.2.2	Preparación de arena .....	27
4.3	Ensayo de dureza Rockwell C .....	28
4.4	Microscopía óptica.....	28
4.4.1	Corte de muestras.....	28
4.4.2	Pulido de muestras .....	29
<b>5</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>31</b>
5.1	Resultados encuesta .....	31
5.2	Resultados entrevistas.....	35
5.1	Resultados ensayo ASTM G 65.....	39
5.2	Resultados ensayos de dureza Rockwell C.....	41
5.3	Resultados metalografía.....	43
<b>6</b>	<b>Análisis y Discusión .....</b>	<b>47</b>
6.1	Encuestas - Entrevistas .....	47

6.2	Evaluación de muestras obtenidas .....	48
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>50</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>51</b>
	<b>Glosario .....</b>	<b>53</b>
	<b>Anexo A: Encuesta a Proveedores.....</b>	<b>54</b>
	<b>Anexo B: Lista de personas contactadas para participar de este trabajo de título .....</b>	<b>56</b>
	<b>Anexo C: Preparación de muestras para ensayo ASTM G65.....</b>	<b>57</b>
	<b>Anexo D: Corte de muestras para microscopia .....</b>	<b>62</b>
	<b>Anexo E: Resultados ASTM G65 .....</b>	<b>65</b>
	<b>Anexo F: Resultados microscopía.....</b>	<b>79</b>
	<b>E8018 .....</b>	<b>79</b>
	<b>E11018 .....</b>	<b>82</b>
	<b>Weldmang Crom .....</b>	<b>85</b>
	<b>Soltec 65 .....</b>	<b>88</b>
	<b>Overlay 60.....</b>	<b>91</b>
	<b>Postalloy 218 .....</b>	<b>94</b>
	<b>Stoody 100 HC.....</b>	<b>97</b>
	<b>Placa bimetálica 1 .....</b>	<b>100</b>
	<b>Placa bimetálica 2 .....</b>	<b>103</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de algunas ventajas y limitaciones de algunos procesos para producir recubrimientos [15].	11
Tabla 2. Propiedades de algunos carburos.	12
Tabla 3. Durezas típicas de recubrimientos en base ferrosa [18].	15
Tabla 4. Porcentaje de dilución típicos de algunos procesos para producir recubrimientos [18].	20
Tabla 5. Resumen de productos y servicios que ofrecen las empresas proveedoras encuestadas.	31
Tabla 6. Resumen de durezas de los recubrimientos ofrecidos por las empresas encuestadas.	33
Tabla 7. Resumen de duración de recubrimientos ofrecidos por las empresas encuestadas.	34
Tabla 8. Lista de muestras brindadas por las empresas que colaboraron con este trabajo. Se presenta el tipo de recubrimiento, la marca de cada uno y el proceso por el cual fueron elaborados.	35
Tabla 9. Composición química de las muestras obtenidas [23] [24] [25] [26].	36
Tabla 10. Dureza Rockwell C especificada por los fabricantes [23] [24] [25] [26].	36
Tabla 11. Resumen de tipo de aleación de los recubrimientos obtenidos y sus aplicaciones típicas [23] [24] [25] [26].	37
Tabla 12. Resumen de opiniones obtenidas durante entrevistas con empresas participantes.	38
Tabla 13. Resumen de pérdida de masa en el tiempo, según ensayo por norma ASTM G65.	39
Tabla 14. Dureza Rockwell C obtenida en 5 puntos de cada muestra.	41
Tabla 15. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento E8018-C2.	65
Tabla 16. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento E11018-M.	66
Tabla 17. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Weldmang Crom.	68
Tabla 18. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Soltec 65.	69
Tabla 19. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Overlay 60.	71
Tabla 20. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Postalloy 218HD.	72
Tabla 21. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Stooddy 100 HC.	74
Tabla 22. Resultados ensayos ASTM G-65 para la placa bimetálica 1.	75
Tabla 23. Resultados ensayos ASTM G-65 para la placa bimetálica 2.	77

# Índice de ilustraciones

Figura 1. Efecto del desgaste en cono triturador de chancado en arenas bituminosas en Canadá [1]. .....	1
Figura 2. Aplicación de recubrimiento mediante técnica SAW en paredes internas de tuberías [3]. .....	2
Figura 3 Aporte de la Minería al PIB Nacional [7]. .....	4
Figura 4. Evolución del precio nominal promedio del cobre y las toneladas métricas exportadas (TM) en periodo de 2010-2015 [9]. .....	4
Figura 5. Desglose OPEX mina subterránea. [10].....	5
Figura 6. a) Ejemplo de equipos que sufren desgaste en minería por abrasión b) Efecto del desgaste en los dientes de una pala (izquierda: nueva; derecha: desgastada) [11].....	6
Figura 7. Micro-mecanismos del desgaste por abrasión [12]. .....	6
Figura 8. Esquema de soldadura PTAW [2]. .....	8
Figura 9. Esquema de soldadura SMAW [13]. .....	8
Figura 10. Esquema de soldadura por arco sumergido, SAW [2]. .....	9
Figura 11. Esquema de soldadura por laser, LBM [2]. .....	9
Figura 12. Esquema de soldadura GMAW [2]. .....	10
Figura 13. Esquema de soldadura FCAW [14]. .....	10
Figura 14. Microestructura típica de un acero perlítico. Las líneas negras corresponden a la fase perlita y la zona blanca corresponde a austenita [16]. .....	13
Figura 15. Microestructura típica de un acero austenítico tipo Hadfield con zoom de 100X. Las zonas blancas corresponden a la fase austenita [17]. .....	14
Figura 16. Microestructura típica de un acero martensítico. Los granos en forma de aguja corresponden a la martensita, las zonas blancas corresponden a la fase austenita [16].....	14
Figura 17. Pérdida de masa del ensayo ASTM G65, procedimiento A, versus la dureza en escala Rockwell C de distintos recubrimientos en base ferrosa. AM, acero austenítico al manganeso. FB, acero ferrítico-bainítico. MA, acero austenítico-martensítico. MS, acero martensítico. NE, fundición eutéctica. PA, fundición hipoeutéctica. PC, fundición hipereutéctica [18]. .....	15
Figura 18. Pérdida de masa del ensayo ASTM G65, procedimiento A, versus el contenido de Carbono de distintos recubrimientos en base ferrosa. AM, acero austenítico al manganeso. FB, acero ferrítico-bainítico. MA, acero austenítico-martensítico. MS, acero martensítico. NE, fundición eutéctica. PA, fundición hipoeutéctica. PC, fundición hipereutéctica [18].....	16
Figura 19. Diagrama de fase de CCO [20]. .....	17
Figura 20. Estructura típica de recubrimientos de CCO hipoeutécticos [20]. .....	17
Figura 21. Estructura típica de recubrimientos de CCO hipereutécticos [20]. .....	18
Figura 22 Grietas producidas por el alivio de esfuerzos durante el enfriamiento [2]. .....	18



Figura 23. Pérdida de masa de algunos recubrimientos de carburos de Cromo ensayados con distintas arenas según el procedimiento ASTM G65 [21].	19
Figura 24. Microestructura típica de recubrimientos Ni-WC [2].	19
Figura 25. Dilución del material depositado.	20
Figura 26. Ejemplo de productos que ofrece ME ELECMETAL para proteger equipos de minería contra el desgaste. En a) se observa una olla para fundición de cobre (en posición invertida), en b) se observa la base de una pala con placas anti-desgaste y en c) bolas para molienda.	21
Figura 27. Flujograma de trabajo.	22
Figura 28. Esquema del ensayo ASTM G-65 [6].	23
Figura 29. Equipo para realizar ensayo ASTM G-65 disponible en laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. (Fuente: Propia)	24
Figura 30. Cortina de arena constante.	25
Figura 31. Fresa perteneciente al taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.	26
Figura 32. Rectificadora perteneciente al taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.	26
Figura 33. a) Se observa la muestra Weldmang Crom en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.	27
Figura 34. Harnero construido por el estudiante para tamizar la arena.	27
Figura 35. Durómetro Rockwell C presente en el laboratorio de metalografía del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.	28
Figura 36. Muestra Postalloy 218 HD cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.	29
Figura 37. Preparación de muestras para ser encapsuladas en resina.	29
Figura 38. Máquina de pulido de velocidad variable, marca Struers.	30
Figura 39. Microscopio óptico marca OPTIKA, con aumento de 5x, 10x, 20x, 50x y 100x.	30
Figura 40. Resumen de sistemas de materiales ofrecidos por las empresas encuestadas.	32
Figura 41. Dificultad de adquirir materiales contra el desgaste.	32
Figura 42. Principales técnicas para aplicación de recubrimientos.	33
Figura 43. Ejemplo de muestra obtenida gracias a las entrevistas con las empresas que accedieron a colaborar en este trabajo. La muestra corresponde al ejemplar Soltec 65.	35
Figura 44. Marca dejada en recubrimientos luego del ensayo ASTM G65. En a) el recubrimiento 11018-M y en b) la placa bimetálica 1 (el ancho de la huella, en ambas imágenes, es de 12 [mm]).	39
Figura 45. Procedimiento ASTM G65 A de las muestras obtenidas.	40
Figura 46. Gráfico comparativo de pérdida de masa [gr] versus el tiempo.	40
Figura 47. Gráfico de %C vs pérdida de masa.	41

Figura 48. Gráfico de dureza Rockwell C vs pérdida de masa.....	42
Figura 49. Microestructura recubrimiento E8018-C2. Aumento 100X.....	43
Figura 50. Microestructura recubrimiento E11018-M. Aumento 100X.....	43
Figura 51. Microestructura de recubrimiento Soltec 65. Aumento 100X.....	44
Figura 52. Microestructura de recubrimiento Stoody 100 HC. Aumento 100X.....	44
Figura 53. Microestructura de recubrimiento Postalloy 218 HD. Aumento 100X.....	45
Figura 54. Microestructura de recubrimiento Overlay 60. En aumento 50X.....	45
Figura 55. Microestructura de recubrimiento Placa bimetálica 1. En aumento 10X.....	46
Figura 56. Microestructura de recubrimiento Placa bimetálica 2. Aumento 50X.....	46
Figura 57. a) Se observa la muestra Soltec 65 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	57
Figura 58. a) Se observa la muestra Stoody 100 HC en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	57
Figura 59. a) Se observa la muestra E8018-C2 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	58
Figura 60. a) Se observa la muestra E11018-M en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	58
Figura 61. a) Se observa la muestra Postalloy 218 HD en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	59
Figura 62. a) Se observa la muestra Weldmang Crom en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	59
Figura 63. a) Se observa la muestra Overlay 60 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	60
Figura 64. Se observa la muestra placa bimetálica 1 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	60
Figura 65. Se observa la muestra placa bimetálica 2 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.....	61
Figura 66 .Muestra Soltec 65 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	62
Figura 67. Muestra Postalloy 218 HD cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	62
Figura 68. Muestra E11018-M cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio. ...	62
Figura 69. Muestra Weldmang Crom cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	63
Figura 70. Muestra E8018-C2 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio. ....	63
Figura 71. Muestra Overlay 60 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio....	63
Figura 72. Muestra Stoody 100 HC cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	64

Figura 73. Muestra Placa bimetálica 1 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	64
Figura 74. Muestra Placa bimetálica 2 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.....	64
Figura 75. Gráfico de masa vs tiempo para electrodo E8018-C2 durante el ensayo ASTM G 65.	65
Figura 76. a) Muestra del recubrimiento E8018-C2 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.....	66
Figura 77. Gráfico de masa vs tiempo para electrodo E11018-M durante el ensayo ASTM G 65. ....	67
Figura 78. a) Muestra del recubrimiento 11018-M antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.....	67
Figura 79. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Weldmang Crom durante el ensayo ASTM G 65. ....	68
Figura 80. a) Muestra de recubrimiento Weldmang Crom antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	69
Figura 81. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Soltec 65 durante el ensayo ASTM G 65. ....	70
Figura 82. a) Una de las muestras del recubrimiento Soltec 65 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	70
Figura 83. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Overlay 60 durante el ensayo ASTM G 65.....	71
Figura 84. a) Una de las muestras del recubrimiento Overlay 60 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	72
Figura 85. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Postalloy 218HD durante el ensayo ASTM G 65. ....	73
Figura 86. a) Muestra de recubrimiento Postalloy 218HD antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	73
Figura 87. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Stoody 100 HC durante el ensayo ASTM G 65.....	74
Figura 88. a) Muestra de recubrimiento Stoody100 HC antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	75
Figura 89. Gráfico de masa vs tiempo para la placa bimetálica 1 durante el ensayo ASTM G 65. ....	76
Figura 90. a) Muestra de recubrimiento placa bimetálica 1 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	76
Figura 91. Gráfico de masa vs tiempo para la placa bimetálica 2 durante el ensayo ASTM G 65. ....	77
Figura 92. a) Muestra de recubrimiento placa bimetálica 2 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo. ....	78

- Figura 93. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Nital 2%. ..... 79
- Figura 94. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Nital 2%. ..... 80
- Figura 95. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Nital 2%. ... 81
- Figura 96. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Nital 2%. ..... 82
- Figura 97. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Nital 2%. ..... 83
- Figura 98. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Nital 2%. ... 84
- Figura 99. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. ... 85
- Figura 100. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. ... 86
- Figura 101. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. 87
- Figura 102. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. ... 88
- Figura 103. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. ... 89
- Figura 104. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. 90
- Figura 105. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. ... 91
- Figura 106. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. ... 92

Figura 107. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. 93	93
Figura 108. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. .. 94	94
Figura 109. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. .. 95	95
Figura 110. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. 96	96
Figura 111. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoodly 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. .. 97	97
Figura 112. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoodly 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. .. 98	98
Figura 113. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoodly 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. 99	99
Figura 114. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. 100	100
Figura 115. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. 101	101
Figura 116. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. ..... 102	102
Figura 117. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%. 103	103
Figura 118. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%. 104	104
Figura 119. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%. ..... 105	105

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes Generales

Desde el inicio de las civilizaciones humanas se han registrado desarrollos en temas relacionados a fricción, desgaste y lubricación. Estos conceptos son el foco de investigación de la ciencia llamada *Tribología* la cual hace pocas décadas atrás ha tomado una gran importancia debido al crecimiento exponencial de la humanidad. La *fricción* genera disipación de energía debido al contacto entre superficies deslizantes entre sí, y produce el *desgaste* de éstas que es la pérdida de material. Por otro lado, la *lubricación* es un método de control de la fricción para minimizar el desgaste.

Existen distintos tipos de desgaste, como por ejemplo el desgaste por *abrasión*, el cual se refiere a la pérdida de material debido al deslizamiento de partículas duras sobre la superficie de otro material de igual o menor dureza. Este tipo de desgaste se presenta en los conos trituradores de los chancadores de casi cualquier proceso de conminución de minerales, en la Figura 1 se compara un cono triturador nuevo y uno usado luego de un tiempo en servicio [1].

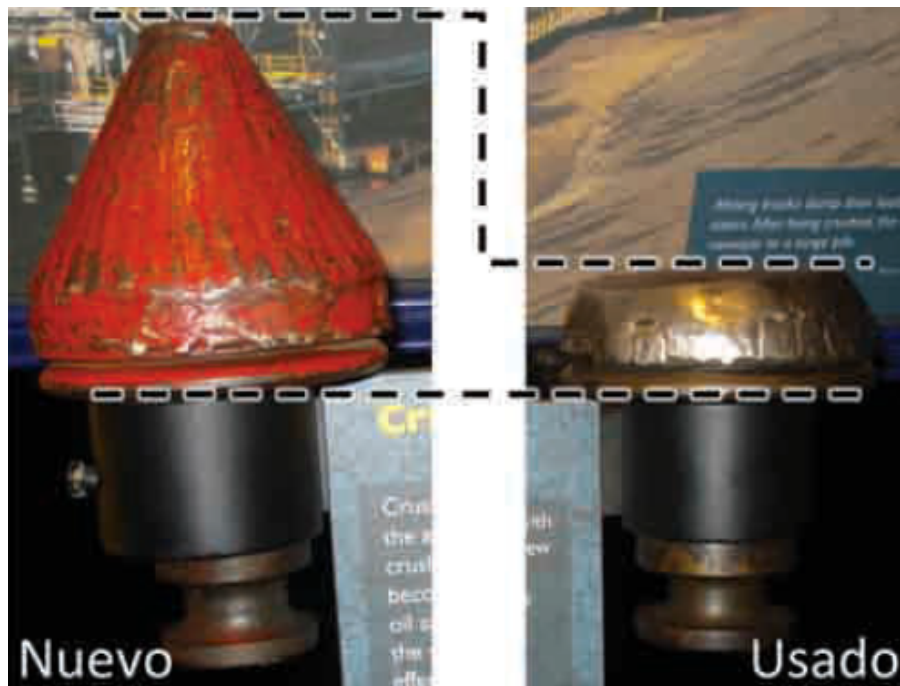


Figura 1. Efecto del desgaste en cono triturador de chancado en arenas bituminosas en Canadá [1].

Hoy en día casi todas las industrias poseen máquinas o equipos donde las partes móviles están sometidas a desgaste lo que genera pérdida de rendimiento, confiabilidad y disponibilidad de equipos, los que conllevan un impacto económico en la estructura de costos de las empresas. A modo de ejemplo para cuantificar la magnitud de los costos relacionados al desgaste, en la industria canadiense se estimó un gasto total de USD\$ 2.5 billones al año [2]. Debido a estos altos costos, es que estos temas se encuentran en constante investigación y desarrollo, pues cualquier mejora en el rendimiento de los materiales puede generar importantes ahorros en los costos.

Actualmente existen variadas tecnologías para suplir esta necesidad y una de las estrategias dominantes es el uso de *recubrimientos duros*, de los cuales la mayoría son depositados por procesos de soldadura, tales como soldadura por arco sumergido (SAW). Ésta técnica tiene como ventaja principal, su alta tasa de deposición, pero solo puede ser aplicada en un taller. En la Figura 2 se observa un ejemplo de aplicación de recubrimiento en las paredes internas de tuberías para proteger contra el desgaste por corrosión. También está la soldadura por electrodo protegido (SMAW) la cual puede ser aplicada en terreno y en todas las posiciones. La soldadura protegida por gas (GMAW), la cual puede ser automatizada logrando alta tasa de deposición o semiautomática para ser aplicada en distintas posiciones. Los materiales más usados para recubrir son los aceros austeníticos, bainíticos, martensíticos, carburos de cromo (CCO) y los carburos de tungsteno (WC). El éxito de estos recubrimientos depende primeramente en reconocer el mecanismo de desgaste para luego seleccionar el tipo de recubrimiento y el proceso para ser aplicado sobre el material base.

En el caso de Chile existe escasa de información en la literatura que permita establecer una base sobre las tecnologías empleadas en la industria minera. Con esto, surge la inquietud de conocer el estado actual del estado tecnológico respecto a recubrimientos duros aplicados en la industria minera chilena, ya sea conocer los tipos de materiales que se usan, los procesos de preferencia por los que son aplicados y las razones por las que se han seleccionados estos materiales y procesos.



Figura 2. Aplicación de recubrimiento mediante técnica SAW en paredes internas de tuberías [3].

## 1.2 Motivación

Es sabido que Chile es el principal productor de cobre en el mundo con una participación promedio de 31,4 % en los últimos 5 años, siendo así, la industria más importante del país, con un

participación promedio en el producto interno bruto (PIB) de 10,8 % en ese mismo periodo [4] Dado el gran tamaño e importancia de esta actividad económica, es que se hace necesario la investigación y desarrollo de procesos y productos utilizados por esta industria con el fin de optimizar la producción y disminuir costos. Por ejemplo, existen distintos equipos y procesos en minería donde los costos asociados a desgaste por abrasión son un tema importante a tratar. En esta industria los procesos como la extracción de mineral, chancado, molienda, transporte de relaves y concentrado generan un alto desgaste de los equipos y máquinas. Además, se suma el hecho que los yacimientos cada vez están más profundos, lo que se asocia a una roca de mayor dureza [5]. Es así como este trabajo está motivado en evaluar algunas de las soluciones tecnológicas en recubrimientos resistentes a la abrasión para aplicaciones en minería en Chile. Lo anterior entendiendo la necesidad de la industria de proteger los equipos contra los efectos del desgaste producido por abrasión durante sus operaciones y así, conferir una mayor vida útil y minimizar los costos de operación y mantenimiento.

### **1.3 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo de título es conocer y evaluar algunas de las tecnologías de recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión disponibles en la actualidad en el mercado chileno para la minería del cobre.

### **1.4 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del presente trabajo de título son:

- Determinar los principales tipos de materiales y procesos por los que se producen recubrimientos resistentes al desgaste para aplicaciones en la minería del cobre.
- Analizar la microestructura y dureza de materiales representativos de la oferta del mercado chileno en recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión para aplicaciones en la minería del cobre.
- Estudiar el comportamiento contra el desgaste de materiales representativos de la oferta del mercado chileno en recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión para aplicaciones en la minería del cobre.

### **1.5 Alcances**

El alcance de esta memoria es la evaluación de recubrimientos duros como solución para enfrentar el desgaste por abrasión en equipos y máquinas de la industria minera del cobre en Chile.

Los tipos de recubrimientos que se estudiaron fueron producidos por métodos de soldadura y los materiales con que se produjeron fueron en matriz ferrosa. La variedad de muestras evaluadas estuvo sujeta a la disposición de los proveedores a colaborar con este trabajo de título.

La evaluación se refiere al análisis metalográfico, medición de dureza Rockwell C y medición de desgaste por abrasión según norma ASTM G65 [6]. En este estudio solo se abordaron los recubrimientos utilizados para proteger equipos contra el desgaste abrasivo.



## 2 Antecedentes Específicos

### 2.1 Desgaste en Industria Minera

Dentro de la actividad Minería, la contribución de la minería del cobre equivale a un 91% del total. Por tal razón, el foco de estudio de esta propuesta se centrará en la minería del cobre. De la Figura 3 se observa que la minería del cobre aporta en 11% al PIB nacional siendo el sector industrial que más aporta.

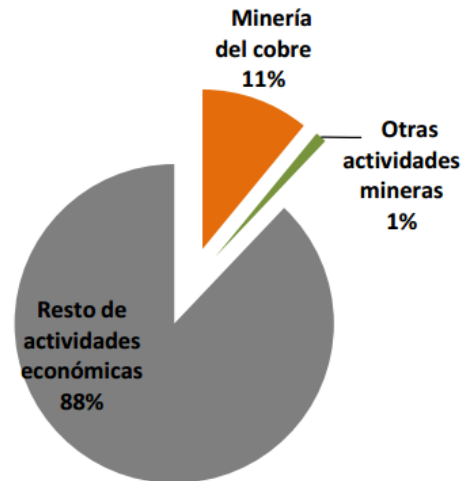


Figura 3 Aporte de la Minería al PIB Nacional [7].

En la Figura 4 se muestra la evolución del precio promedio del cobre y las toneladas métricas exportadas por año. La disminución del precio del cobre afecta directamente a la economía nacional y es por esto que cualquier esfuerzo por disminuir los costos de operación o de capital es de beneficio para el país. Según una conferencia de prensa realizada por el presidente ejecutivo de CODELCO el costo por libra de cobre fue de 236 [c/lb] para el año 2014 [8].

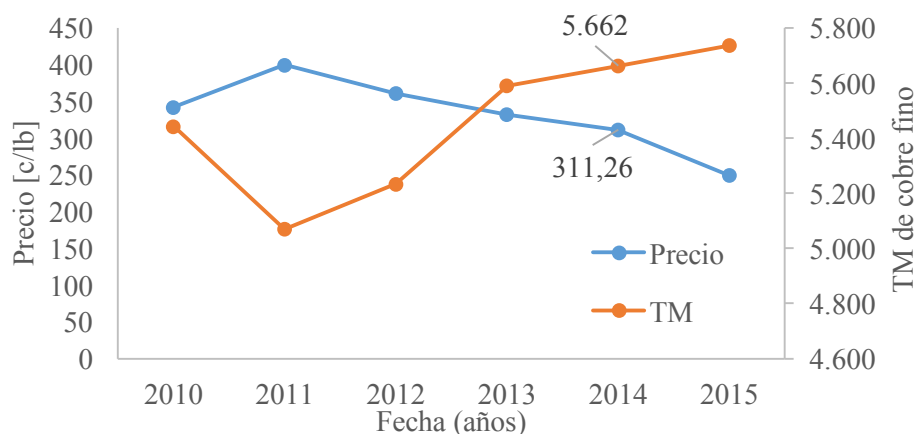


Figura 4. Evolución del precio nominal promedio del cobre y las toneladas métricas exportadas (TM) en periodo de 2010-2015 [9].

Se define como “Insumo Crítico” como aquel cuya situación de abastecimiento podría resultar ser crítica para el proyecto/operación en el mediano y largo plazo. A la criticidad contribuyen principalmente los riesgos de desabastecimiento, como la alta dependencia de las importaciones o un monopolio de los insumos en pocos oferentes, como también la importancia o peso relativo del insumo en la estructura de costos. En la Figura 5 se observa la participación en los costos de operación (OPEX, por sus siglas en inglés) de equipos y servicios relacionados al desgaste de *plancha desgaste, mantención y reparación (M&R) martillo, M&R chancador primario y M&R camión jumbo* en operaciones de mina subterránea los que ascienden a un porcentaje de 12,4% del OPEX total en la estructura de costos de la producción de cobre.

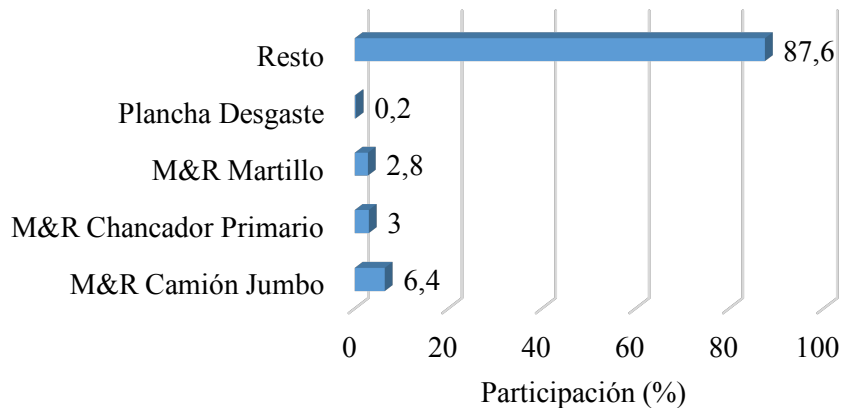


Figura 5. Desglose OPEX mina subterránea. [10]

Se ha identificado que los principales equipos y procesos, que están sometidos a efectos de abrasión y erosión tanto en minería subterráneas como de cielo abierto, son:

- a) En cuanto a los insumos críticos para el OPEX que están sujetos a desgaste se encuentran:
  - Bolas y Barras de Molino.
  - Mantención y reparación (Camiones, Jumbos, Martillos, Chancadora).
  - Servicios de Mantención y Reparación (Chancado y Molienda).
  
- b) En cuanto a los insumos críticos para el CAPEX relacionados con desgaste se encuentran:
  - Pala de cable.
  - Camiones.
  - Molino de Bolas y Barras.
  - Molino SAG.

## 2.2 Desgaste por Abrasión

Por abrasión se entiende como el desgaste producido cuando partículas duras de un material pasan o deslizan sobre la superficie de un objeto sólido con igual o menor dureza, un ejemplo de esto es el que se observa en la Figura 6. Este tipo de desgaste también se observa en los cargadores frontales, palas de cable y cono triturador de los chancadores. Las palas hidráulicas son uno de los equipos que más se ven afectados por este efecto debido al paso de los dientes de éstas sobre la roca para poder remover el material y cargarlo en los camiones mineros.



Figura 6. a) Ejemplo de equipos que sufren desgaste en minería por abrasión b) Efecto del desgaste en los dientes de una pala (izquierda: nueva; derecha: desgastada) [11].

Los micro-mecanismos de abrasión se muestran en la Figura 7. El *corte* es el tipo de desgaste que se utiliza a favor en la industria manufacturera, acá un material duro se mueve sobre un material dúctil generando la deformación plástica de este produciendo el endurecimiento de la zona por trabajo en frío y finalmente el corte del material base. La *fractura* se produce cuando la partícula abrasiva se enfrenta perpendicularmente a la superficie del objeto, además, ambos materiales deben tener durezas similares. La *fatiga* es causada por la deformación repetitiva producida por un material abrasivo que está siendo cargado perpendicularmente sobre un objeto. El *desprendimiento de grano* es generado por el deslizamiento del abrasivo sobre una superficie de similar dureza y donde las uniones intergranulares no son tan fuertes, por lo que el grano sale eyectado.

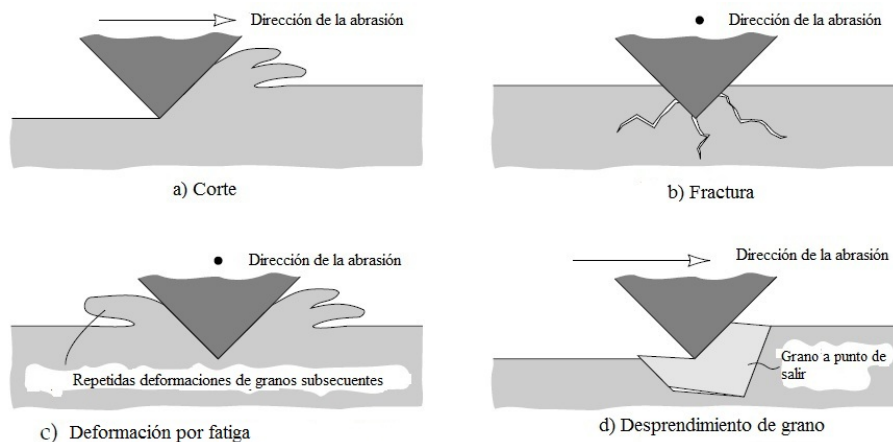


Figura 7. Micro-mecanismos del desgaste por abrasión [12].

Factores que influyen en el desgaste por abrasión:

- Dureza de las partículas.
- Forma.
- Tamaño.
- Aspereza.
- Temperatura.
- Humedad.

El control del desgaste por abrasión se puede realizar aumentando la dureza de la superficie de desgaste en 0,8 veces la dureza de las partículas abrasivas, pero teniendo en cuenta de evitar la fragilidad. Actualmente se utilizan materiales duros o recubrimientos duros de carburos de cromo o carburos de tungsteno en base níquel, los que bordean durezas de 1000-1200 HV. Dado que los carburos son difíciles de maquinarse es que se utilizan métodos por soldadura para ser depositados sobre superficies.

### **2.3 Procesos típicos para fabricar recubrimientos**

Hay diversos métodos para aplicar los recubrimientos duros sobre un material base. Últimamente los estudios se centran en buscar el método que sea más eficiente para depositar estos recubrimientos [12]. La resistencia al desgaste de una superficie también se puede mejorar por tratamientos térmicos o por la adición de elementos aleantes. Para aplicaciones mineras la más usada es la *Superficie Soldada* debido a su alta productividad y efectividad.

A nivel industrial, dentro de las tecnologías que utilizan superficie soldada se destacan las siguientes:

#### **2.3.1 Soldadura por plasma transferido (PTAW)**

Soldadura de arco por transferencia de plasma (Plasma Transfer Arc Welding) utiliza un electrodo de tungsteno donde se alimenta el recubrimiento en forma de polvos los que son fundidos en el arco para luego ser depositados sobre la superficie. En la Figura 8 se presenta un esquema de la soldadura PTAW.

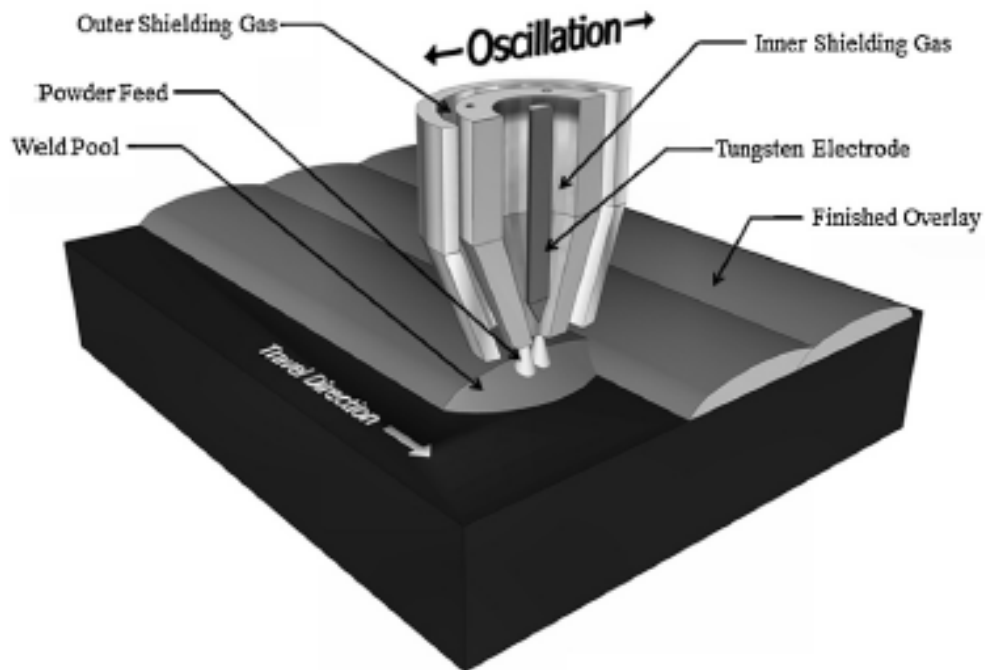


Figura 8. Esquema de soldadura PTAW [2].

### 2.3.2 Soldadura por electrodo protegido (SMAW)

La soldadura de electrodo protegido (Shielded Metal Arc Welding) utiliza una varilla donde en su núcleo se encuentra el electrodo, el cual es también el metal de aporte. En su exterior se encuentra protegido por el fundente, el cual tiene como funciones estabilizar el arco, agregar algunas sustancias al metal de aporte y lo más importante proteger el arco del medioambiente. En la Figura 9 se muestra un esquema de la soldadura SMAW.



Figura 9. Esquema de soldadura SMAW [13].

### 2.3.3 Soldadura por arco sumergido (SAW)

Soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding) es un proceso interesante desde el punto de vista de la productividad debido a que los equipos utilizados son automatizados. La

característica de este tipo de soldadura es que el arco no se observa. En este caso también se utilizan polvos de recubrimientos duros. En la Figura 10 se observa un esquema del proceso SAW para producir recubrimientos.

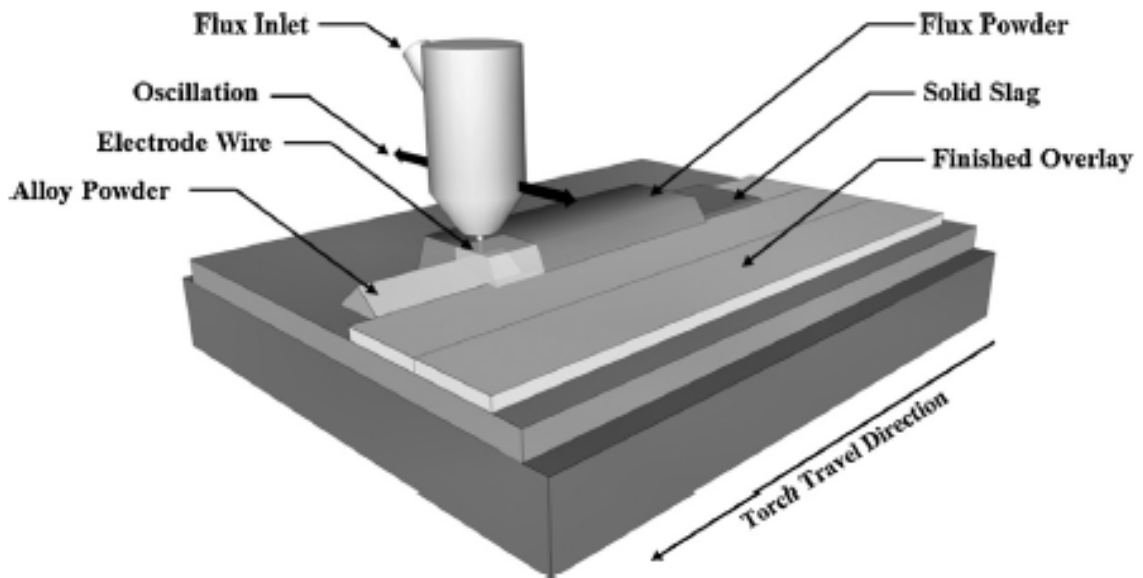


Figura 10. Esquema de soldadura por arco sumergido, SAW [2].

#### 2.3.4 Soldadura por láser (LBW)

Soldadura por láser (Laser Beam Welding) utiliza como fuente de calor generado por el láser. El material para el recubrimiento también se puede aplicar en forma de polvos. En la Figura 11 se presenta un esquema de soldadura por láser.

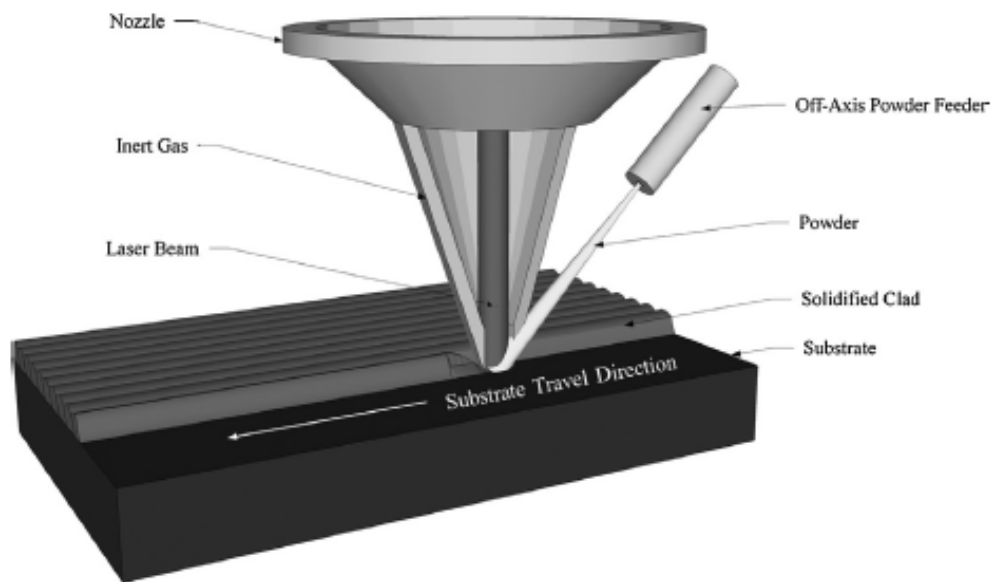


Figura 11. Esquema de soldadura por laser, LBM [2].

### 2.3.5 Soldadura protegida por gas (GMAW)

Este tipo de soldadura (Gas Metal Arc Welding) es muy versátil y ampliamente usada. La ventaja de este tipo es que se puede aplicar en cualquier posición, lo que permite hacer aplicación de recubrimientos en terreno. El material de recubrimiento viene en forma de varilla y en polvos. En la Figura 12 se observa un esquema de la aplicación de recubrimientos por soldadura GMAW.

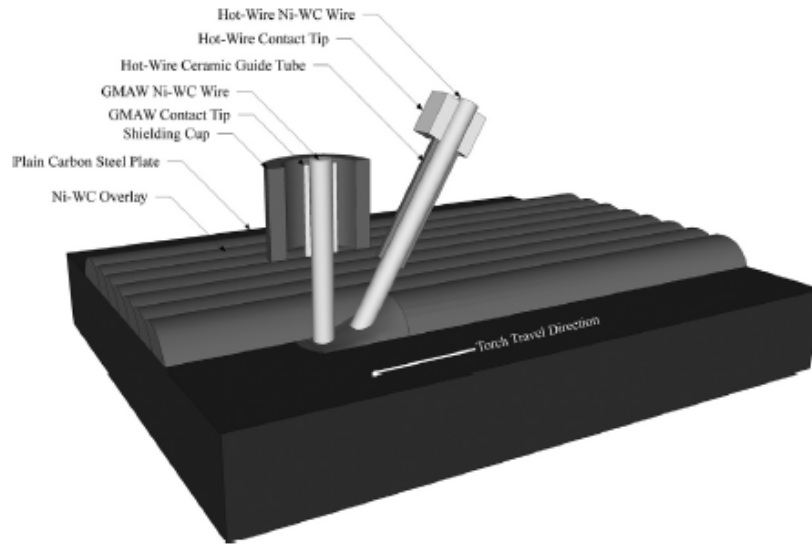


Figura 12. Esquema de soldadura GMAW [2].

### 2.3.6 Soldadura por alambre tubular (FCAW)

La soldadura por alambre tubular (FCAW), tiene como ventaja su alta tasa de deposición, no requiere de eliminar escoria y puede ser aplicada de manera automática o semiautomática. A veces, al electrodo tubular se le adicionan algunos polvos en el material del núcleo. Otras ventajas es que requiere muy bajas habilidades del soldador. Los tipos de materiales que se pueden depositar con esta técnica es muy variada. En la Figura 13 se muestra un esquema de la soldadura por alambre tubular. Se aprecia que hay un gas que protege la soldadura del ambiente, permitiendo obtener baja porosidad del material depositado.

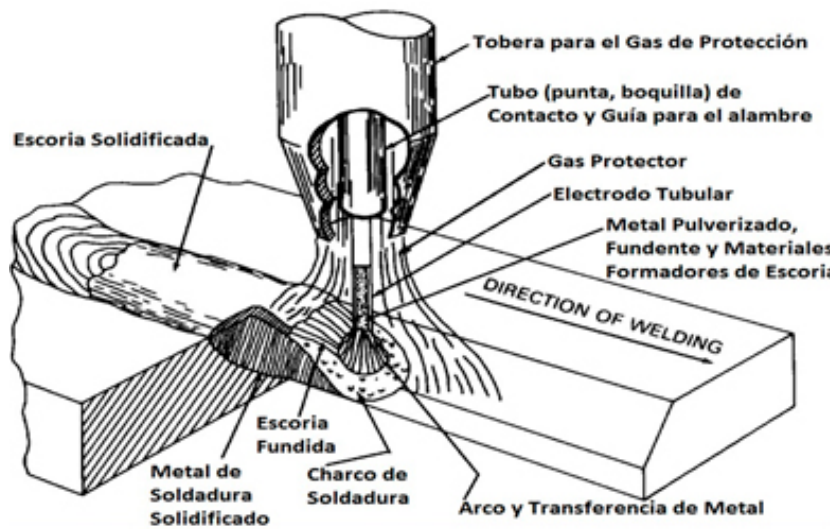


Figura 13. Esquema de soldadura FCAW [14].

En la Tabla 1 se presenta un cuadro resumen con algunas ventajas y limitaciones de los procesos recién mencionados.

Tabla 1. Resumen de algunas ventajas y limitaciones de algunos procesos para producir recubrimientos [15].

Proceso	Ventajas	Limitaciones
SMAW	Disponible para una gran variedad de materiales. Se puede aplicar en todas las posiciones. Bajo costo de equipos. Puede ser aplicado en terreno.	Requiere de buenas habilidades del soldador. Escoria debe ser removida. Si no existe un precalentamiento del material base, se expone a la formación de grietas debido al alto gradiente de temperatura.
Láser	Baja dilución	Equipos de alto costo. Requiere de precaución con el uso del láser.
SAW	Alta tasa de deposición. No hay radiación ultravioleta. Disponible para grandes áreas.	Solo aplicable para superficies grandes. Limitado a superficies planas. Altos gradientes de temperatura. Limitado a aceros de bajo %C
PTAW	No requiere remover escoria. Puede ser aplicada una gran variedad de materiales. Deposito homogéneo.	Solo posición horizontal. Costo de los equipos relativamente alto.
GMAW	Protección por gas. Se puede usar una gran variedad de materiales. Puede ser aplicado en terreno.	Radiación ultravioleta, se requiere de protección. Alta tasa de dilución para modo spray.
FCAW	Bajo costo de los equipos. Bajas habilidades del soldador. Disponible para grandes áreas.	Escoria debe ser removida. Radiación ultravioleta. Solo disponible en taller.

## 2.4 Materiales típicos de recubrimientos

Los recubrimientos resistentes al desgaste consisten en capas aplicadas usualmente sobre un material con la intención de prolongar la protección contra el desgaste. Los espesores típicos van desde 0,1  $\mu\text{m}$  hasta 0,45 m. Las aplicaciones de estos recubrimientos se pueden encontrar en diferentes equipos mineros, por ejemplo, las palas excavadoras, conos de molienda y cargadores frontales. El beneficio de utilizar estos recubrimientos es que se puede mejorar el rendimiento de un material base relativamente barato con la aplicación de una capa de recubrimiento.

Antes de seleccionar el material de recubrimiento se debe tener conocimiento del mecanismo de desgaste que ocurre para dicha aplicación. Para el desgaste contra efectos de abrasión y erosión



se recomienda el uso de *recubrimientos duros* [12], los cuales han demostrado disminuir la tasa de desgaste considerablemente respecto de un material sin recubrimiento.

Hoy en día los sistemas de materiales más usados son los *carburos de cromo* (CCO) y los carburos de tungsteno en aleación base níquel (Ni-WC). El último es el tipo de material más costoso, pero es el que presenta el mejor rendimiento en resistencia al desgaste, en cambio, los recubrimientos basados en CCO son menos costosos, pero presentan un rendimiento 10 veces menor que los Ni-WC. Ambos sistemas son depositados generalmente por procesos de soldadura. En el caso de los CCO los carburos se forman en la solidificación de la capa protectora. En lo Ni-WC los carburos son introducidos dentro de la poza de fusión [2]. En la Tabla 2 se muestran algunas propiedades físicas y de dureza de algunos carburos típicos utilizados en algunos recubrimientos para combatir el desgaste abrasivo.

Tabla 2. Propiedades de algunos carburos.

Carburo	Dureza [HV]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Punto de fusión [°C]
TiC	3000	4900	3100
WC	2200	15700	2870
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1400	6700	1800
Fe <sub>3</sub> C	1020	7500	1252

Los recubrimientos para proteger contra el desgaste por abrasión y erosión se pueden clasificar en cuatro categorías:

- I. *Recubrimiento de superficies*, en el cual se aplica una capa gruesa de material que puede tener una composición completamente distinta al material base. Generalmente se utilizan para proteger contra la corrosión.
- II. *Recubrimientos duros*, donde un material con similar composición al material base se aplica para proteger contra el desgaste por abrasión, erosión e impacto.
- III. *Reconstrucción*, en el cual un material se aplica para restituir una pieza o parte de un equipo con el fin de aumentar su vida útil. Se utilizan generalmente para piezas que están sometidas a desgaste por abrasión e impacto.
- IV. *Relleno*, donde se utiliza un material para rellenar las capas intermedias de un recubrimiento.

Como se menciona en los alcances de este trabajo, solo se estudiarán recubrimientos producidos por soldadura, los que son más conocidos como *hardfacing* o *recubrimientos duros*. La producción de estos recubrimientos consiste en la adición de capas de algún material, el cual luego de solidificar forma una capa protectora del material base.

A continuación, se describen algunos materiales más utilizados como recubrimientos duros en aplicaciones mineras.

### 2.4.1 Materiales ferrosos

Las aleaciones ferrosas constituyen la mayor parte de los materiales usados como recubrimientos duros. Esto se debe principalmente a su bajo costo y moderada resistencia al desgaste, haciéndolos ideales para recubrir piezas de gran tamaño tales como equipos de molienda de minerales o equipos para el movimiento de tierras, por ejemplo, dientes de cargadores frontales en la minería del cobre.

Los tipos de aleaciones ferrosas utilizadas como recubrimientos duros se pueden clasificar como:

- Aceros Perlíticos
- Aceros Austeníticos
- Aceros Martensíticos
- Fundiciones

A continuación, se describen estos tipos de materiales.

#### 2.4.1.1 Aceros Perlíticos

Los aceros perlíticos poseen bajo contenido de Carbono (menor al 0.2% C) y limitada cantidad de elementos aleantes con el fin de asegurar que la microestructura sea perlítica, luego del enfriamiento al ser aplicado el recubrimiento. Estos aceros se utilizan generalmente para restaurar partes de algún equipo que se puedan fabricar de forma repetitiva, como zapatos para palas de rodillos. El proceso preferido para aplicar estos materiales es la soldadura por arco sumergido (SAW). En la Figura 14 se muestra la microestructura típica de un acero perlítico.



Figura 14. Microestructura típica de un acero perlítico. Las líneas negras corresponden a la fase perlita y la zona blanca corresponde a austenita [16].

#### 2.4.1.2 Aceros Austeníticos

Los aceros austeníticos al manganeso tipo Hadfield son los más utilizados como materiales para recubrimientos duros. Estos aceros contienen alrededor de 12-16% Mn y hasta 1% C y pueden retener toda la microestructura de la fase austenita en el enfriamiento como se observa en la Figura 15, generando que este material sea meta-estable. Cuando este material está sometido a la abrasión,

la superficie se deforma plásticamente lo cual induce la transformación de austenita a martensita, lo que produce el endurecimiento de la superficie aumentando la resistencia al desgaste.

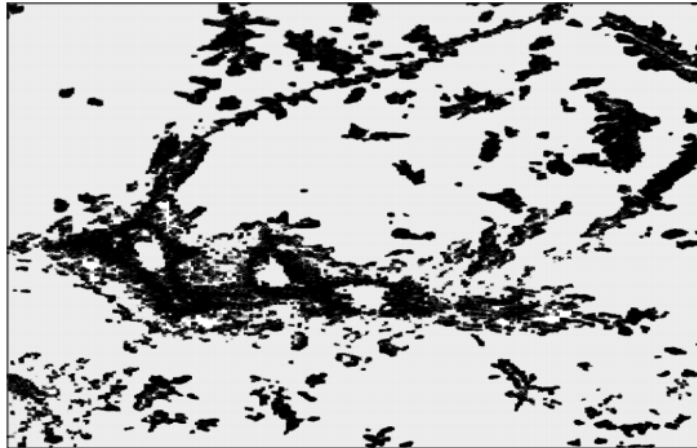


Figura 15. Microestructura típica de un acero austenítico tipo Hadfield con zoom de 100X. Las zonas blancas corresponden a la fase austenita [17].

En la aplicación de estos materiales como recubrimientos se debe tener en cuenta el precalentamiento del material base, con el fin de evitar la fragilización por la precipitación de carburos en los bordes de granos que se produce luego del enfriamiento.

#### 2.4.1.3 Aceros Martensíticos

Los aceros martensíticos están diseñados para formar martensita durante el enfriamiento al aire luego de ser depositados. Estos aceros contienen entre 0,1 y 2%C. Estos recubrimientos tienen menor resistencia al impacto que un acero perlítico o austenítico, pero poseen una alta dureza y resistencia a la abrasión. Para mejorar la tenacidad de estos recubrimientos es recomendable aplicar un proceso de revenido, con el fin de aliviar los esfuerzos térmicos generados en el templeado al aire. En la Figura 16 se presenta la microestructura típica de un acero martensítico.



Figura 16. Microestructura típica de un acero martensítico. Los granos en forma de aguja corresponden a la martensita, las zonas blancas corresponden a la fase austenita [16].

#### 2.4.1.4 Fundiciones

Las fundiciones de hierro generalmente poseen un alto porcentaje de Carbono (mayor al 2%C). Existen numerosas fundiciones las cuales se pueden obtener variando la velocidad de enfriamiento, tratamientos térmicos o añadiendo algunos elementos aleantes. Dentro de todas las variaciones de fundiciones, las más usadas para proteger contra el desgaste abrasivo son las fundiciones blancas. Estas fundiciones contienen 8-35% Cr y 2-5% C, y dependiendo de la cantidad de Cromo y Carbono, éstas se pueden clasificar en hipoeutéctica (2-3% C, 5-29% Cr), eutéctica (3-4% C, 12-29% Cr) e hipereutéctica (4-7% C, 15-36% Cr), siendo este último, el que presenta mejor resistencia al desgaste por abrasión. Esta cualidad se debe a que las fundiciones blancas hipereutéticas poseen una alta cantidad de carburos de cromo, los cuales poseen una dureza entre 1200-1800 HV.

Este tipo de recubrimiento puede ser depositado por las técnicas de GTAW, FCAW, SAW y SMAW, y es uno de los recubrimientos más económicos debido a su alta disponibilidad y fácil aplicación.

En la Tabla 3 se muestran las durezas típicas de los recubrimientos en base ferrosa.

Tabla 3. Durezas típicas de recubrimientos en base ferrosa [18].

Tipo de recubrimiento	Dureza Rockwell C
Acero perlítico	37
Acero austenítico	18 - 24
Acero martensítico	45 - 59
Fundiciones blancas	50 - 63

En la Figura 17 se observa el gráfico de pérdida de masa según el ensayo ASTM G65, versus la dureza en escala Rockwell C de algunos recubrimientos en matriz ferrosa. Se observa que para una misma dureza existen distintos resultados del rendimiento contra el desgaste.

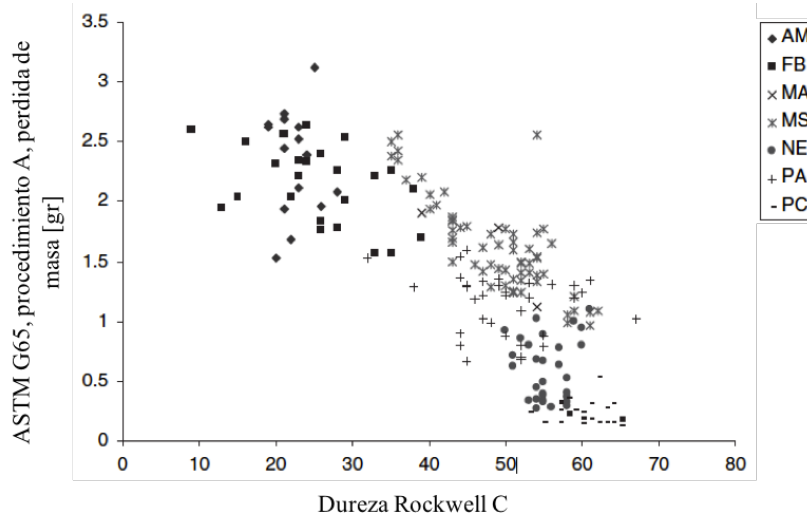


Figura 17. Pérdida de masa del ensayo ASTM G65, procedimiento A, versus la dureza en escala Rockwell C de distintos recubrimientos en base ferrosa. AM, acero austenítico al manganeso. FB, acero ferrítico-bainítico. MA, acero austenítico-martensítico. MS, acero martensítico. NE, fundición eutéctica. PA, fundición hipoeutectica. PC, fundición hipereutectica [18].

En la Figura 18 se presenta el gráfico de pérdida de masa según procedimiento ASTM G65, versus el contenido de carbono (en %) presente en el recubrimiento. En este gráfico es posible observar una tendencia en los datos, es decir, a mayor contenido de carbono menor es la pérdida de masa. La presencia de carbono favorece la formación de carburos duros, es aquí, donde radica esta correlación [19].

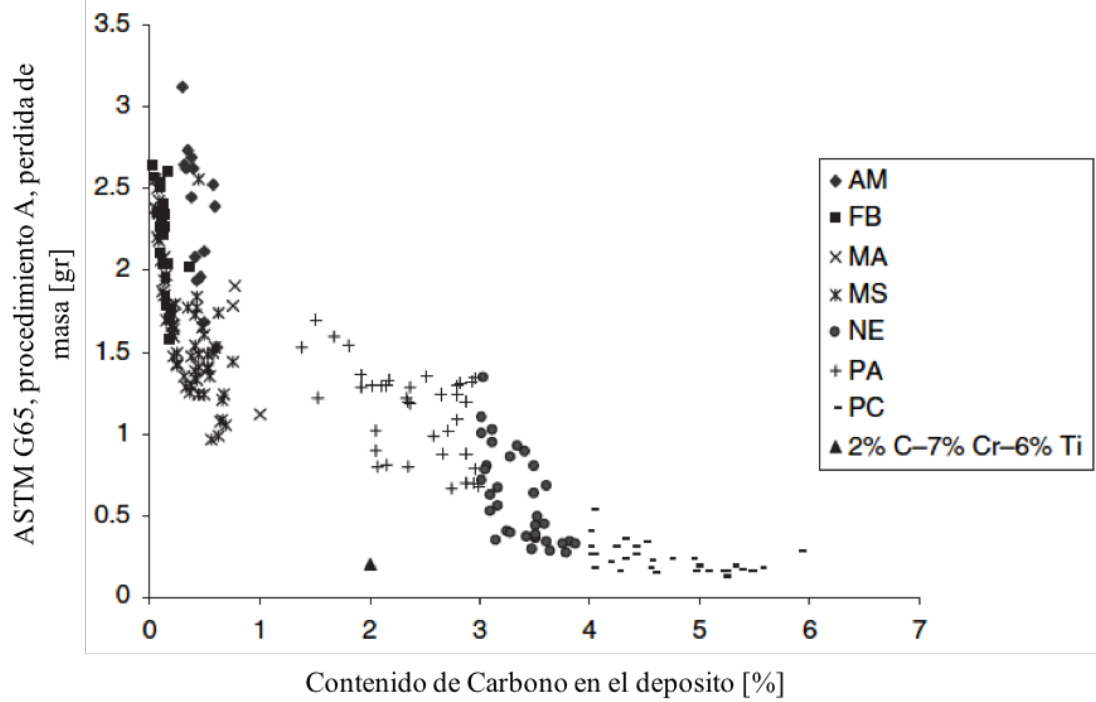


Figura 18. Pérdida de masa del ensayo ASTM G65, procedimiento A, versus el contenido de Carbono de distintos recubrimientos en base ferrosa. AM, acero austenítico al manganeso. FB, acero ferrítico-bainítico. MA, acero austenítico-martensítico. MS, acero martensítico. NE, fundición eutéctica. PA, fundición hipoeutéctica. PC, fundición hipereutéctica [18]

#### 2.4.2 Carburos

Esta categoría está caracterizada por carburos de cromo, tungsteno, titanio o vanadio, los cuales están presentes en un alto porcentaje. Los recubrimientos de carburos de Cromo, más conocidos como placas bimetálicas (o en sus siglas en inglés, como CCO, carbon chromium overlay), son uno de los carburos más comunes y su alta resistencia al desgaste se debe a las elevadas durezas de los carburos, las que alcanzan alrededor de 1800 HV. Estos tipos de carburos se forman al solidificar el metal fundido. La alta resistencia de estos carburos se debe a la formación de un carburo denominados  $M_7C_3$ , que generalmente se encuentra rodeado por una matriz austenítica. La “M” indica la cantidad de distintos carburos que se pueden formar. Si se aumenta la cantidad de cromo y carbono, se puede lograr obtener una mayor resistencia al desgaste.

La formación de estos carburos depende fuertemente de la cantidad de cromo y carbono, las que generalmente se encuentran entre 2-6%C y 8-35%Cr. Según la combinación de estos dos elementos, la formación de carburos puede tener tres microestructuras como se indica en la Figura 19. La microestructura hipoeutéctica que se muestra en la Figura 20 se produce con bajo contenido de carbono (alrededor de 2-3% C), y es más resistente a la corrosión. La microestructura hipereutéctica que se muestra en la Figura 21 generalmente posee alto contenido de carbono y

chromium, which favors the formation of carbides and, consequently, it is possible to obtain a greater resistance to wear.

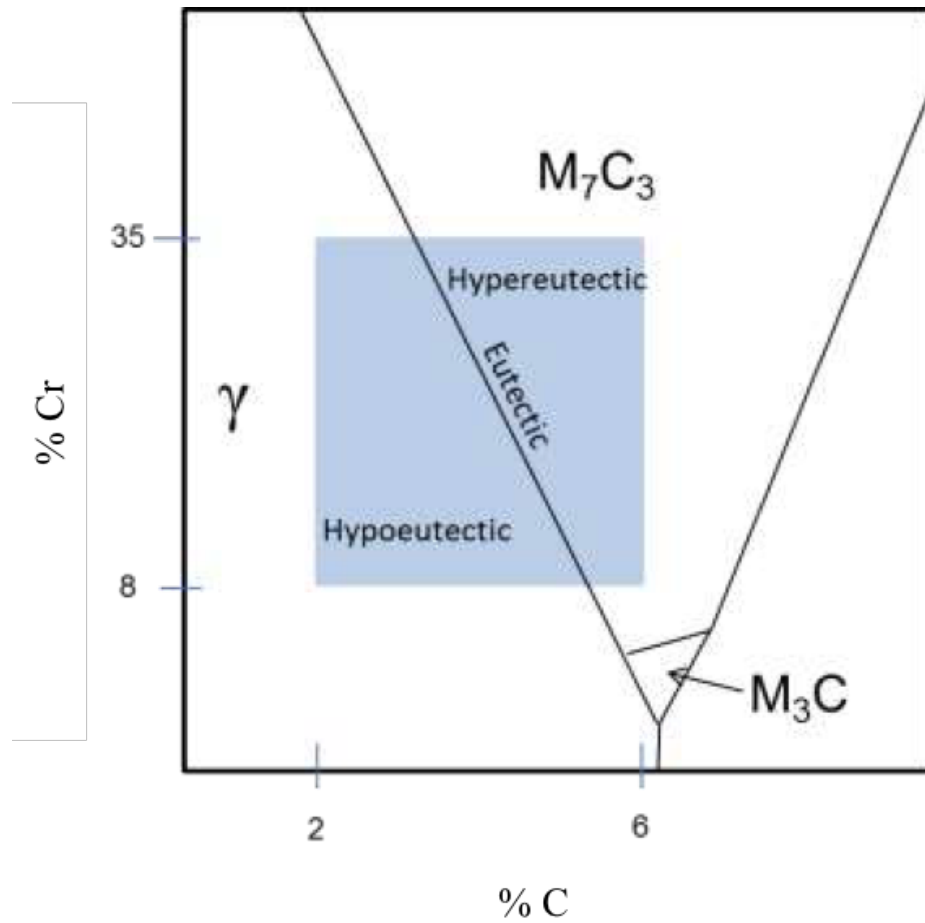


Figure 19. Phase diagram of C-Cr [20].

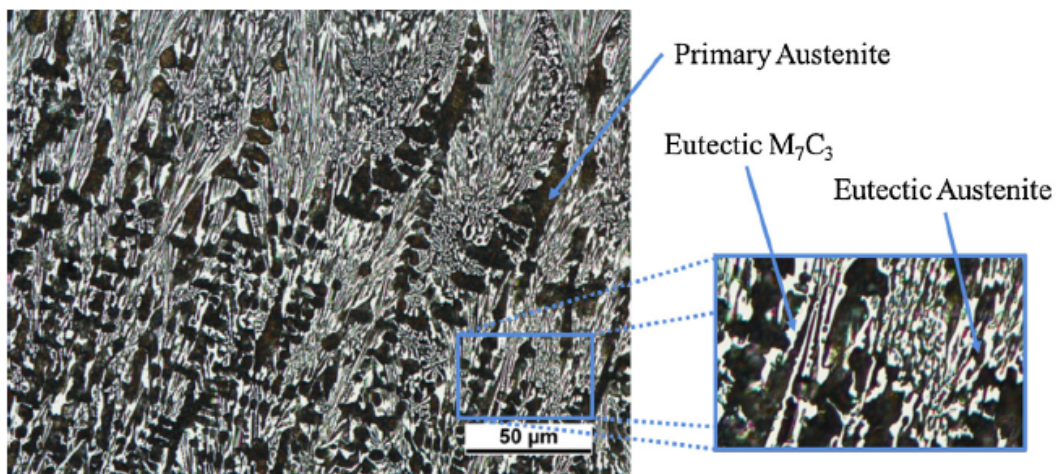


Figure 20. Typical structure of hypoeutectic C-Cr coatings [20].

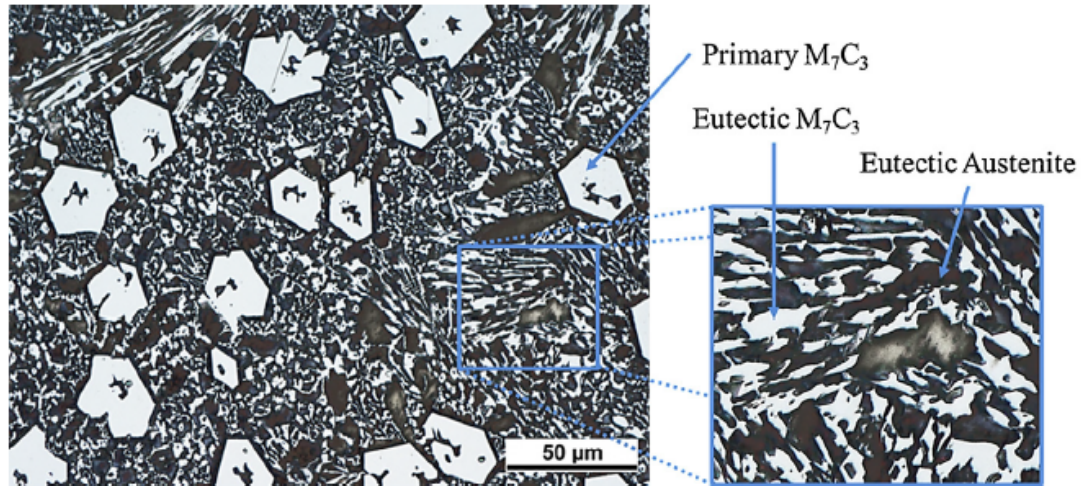


Figura 21. Estructura típica de recubrimientos de CCO hipereutéticos [20].

En la Figura 22 se observa la superficie de un recubrimiento tipo CCO. En esta figura se aprecian ciertas grietas producidas por el relajamiento de esfuerzos térmicos debido al enfriamiento, lo que produce una contracción del material.

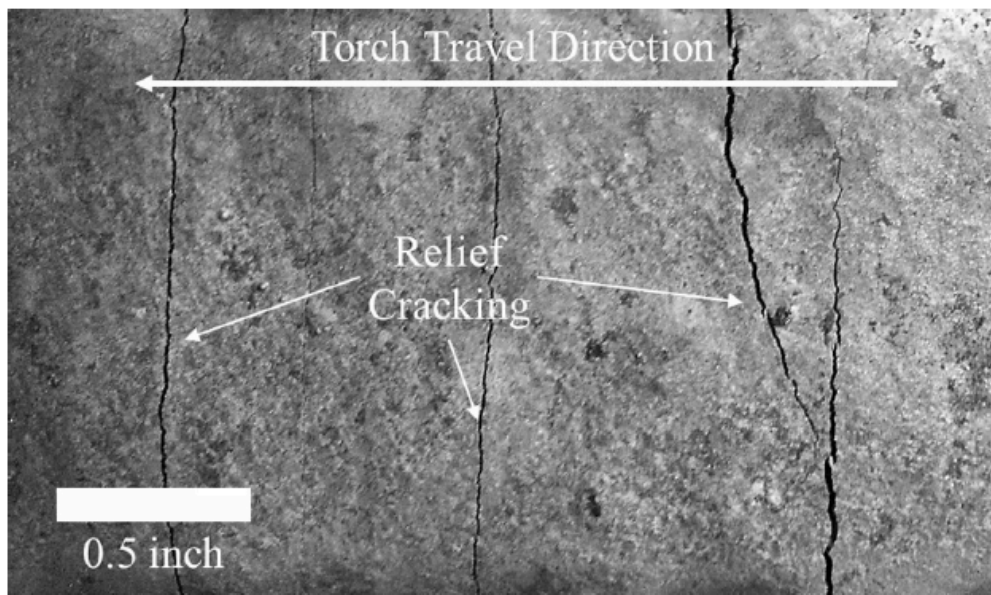


Figura 22 Grietas producidas por el alivio de esfuerzos durante el enfriamiento [2].

En la Figura 23 se presenta el resultado para el ensayo ASTM G65 de carburos de Cromo, los cuales fueron evaluados con distintas arenas. Según el ensayo ASTM G65, la arena que se debe utilizar es de sílice.

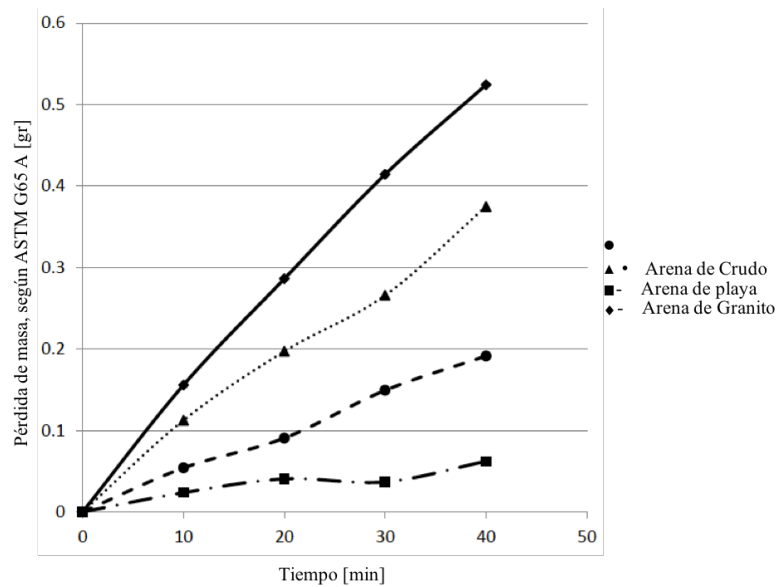


Figura 23. Pérdida de masa de algunos recubrimientos de carburos de Cromo ensayados con distintas arenas según el procedimiento ASTM G65 [21].

También son conocidos los carburos de tungsteno en matriz níquel, Ni-WC, en la Figura 24 se puede observar la microestructura típica de estos recubrimientos. Este tipo de recubrimientos, a diferencia de los CCO, no se forman durante la solidificación del metal, sino que son añadidos en forma de polvos. Los Ni-WC presentan una de las más altas resistencias al desgaste, casi 3 veces más de que los CCO, pero el costo de producción es mucho más elevado. Generalmente se producen por técnicas de PTAW, láser y GMAW.

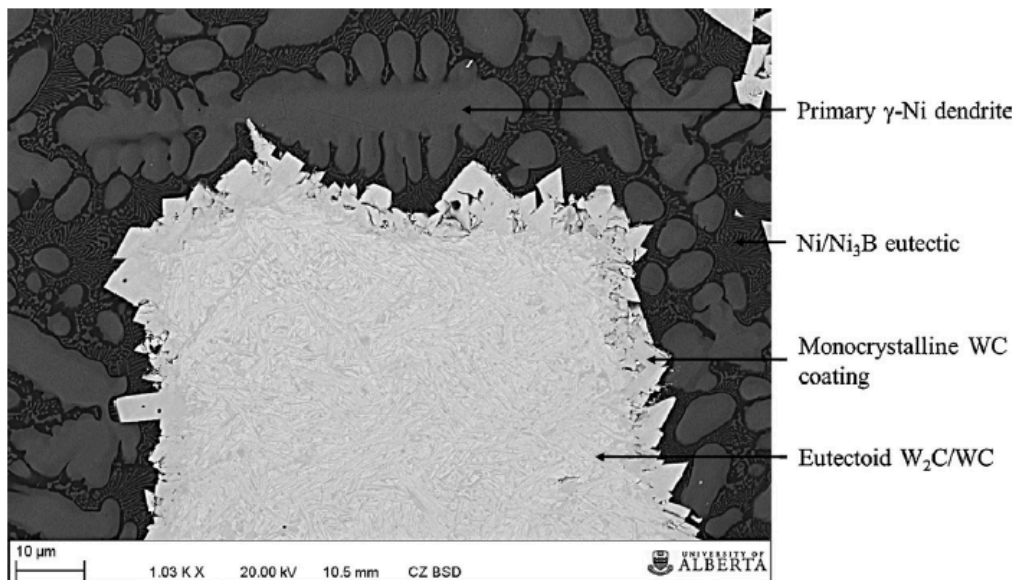


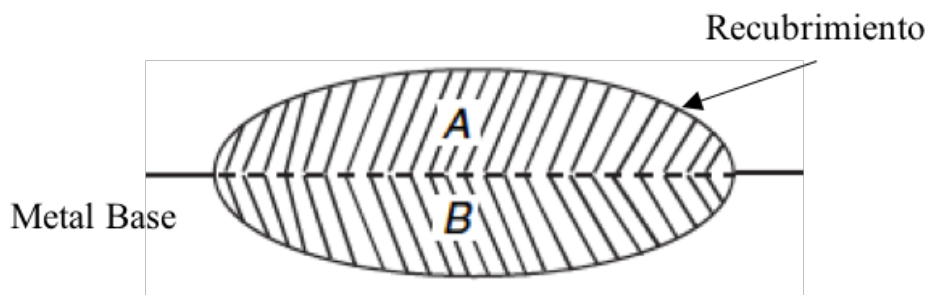
Figura 24. Microestructura típica de recubrimientos Ni-WC [2].

#### 2.4.3 Naturaleza de los recubrimientos

Dado que la mayoría de los procesos para producir recubrimientos duros requieren de la fusión del metal, con el fin de producir la unión entre el metal base y el recubrimiento, es que se define la *dilución* como la zona donde se mezcla el recubrimiento con el metal base. Idealmente, se desea



que el porcentaje de dilución sea el menor posible debido a que se pueden formar fases que resulten frágiles, y con ello, producir la falla del recubrimiento. La cantidad de dilución depende del proceso de soldadura y de los parámetros escogidos para su fabricación. Para determinar el porcentaje de dilución se utiliza el esquema que se presenta en la Figura 25.



$$\text{Porcentaje de dilución} = \frac{A}{A+B} \times 100$$

Figura 25. Dilución del material depositado.

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de dilución típicos de algunos procesos para producir recubrimientos duros.

Tabla 4. Porcentaje de dilución típicos de algunos procesos para producir recubrimientos [18].

Proceso de soldadura	Modo de operación	Dilución [%]
SMAW	Manual	10 - 20
LASER	Automático	1 - 10
SAW	Automático	30 - 60
PTAW	Automático	5 - 15
GMAW	Semiautomático/Automático	10 - 40
FCAW	Semiautomático/Automático	10 - 40

## 2.5 Fabricantes de recubrimientos duros en Chile

Un análisis preliminar del mercado en Chile ha permitido encontrar algunos de los productores y proveedores de recubrimientos duros más grandes en el país. Actualmente en Chile existen proveedores de soluciones al desgaste como Lincoln Electric quien provee de electrodos y alambres para recubrimientos duros. Otro importante proveedor es Indura quien posee una amplia gama de electrodos y alambres para recubrimientos contra la abrasión, la mayoría se caracteriza por poseer carburos de Cromo. También se encuentra Aceros Otero, quien provee de placas bimetálicas (CCO)

y otras soluciones contra el desgaste abrasivo. Estas son algunas de las empresas presentes en el mercado que ofrecen soluciones contra el desgaste abrasivo. En el Anexo B se encuentra una lista con más empresas que ofrecen soluciones para proteger equipos contra el desgaste.

Una de las empresas más importantes a la fecha es ME ELECMETAL, la que cubre alrededor del 80 % del mercado nacional relacionado con elementos al desgaste. Sus principales plantas son la Fundición Talleres y Esco. Según la cuenta anual del año 2015 [22], registró ingresos relacionados a metalurgia de USD\$ 270 millones. Los principales componentes relacionados con metalurgia que ofrecen se pueden observar en la Figura 26.



a)



b)



c)

Figura 26. Ejemplo de productos que ofrece ME ELECMETAL para proteger equipos de minería contra el desgaste. En a) se observa una olla para fundición de cobre (en posición invertida), en b) se observa la base de una pala con placas anti-desgaste y en c) bolas para molienda.

### 3 Metodología

La metodología para el desarrollo de este trabajo se dividió en tres etapas, siguiendo el flujo mostrado en la Figura 27.

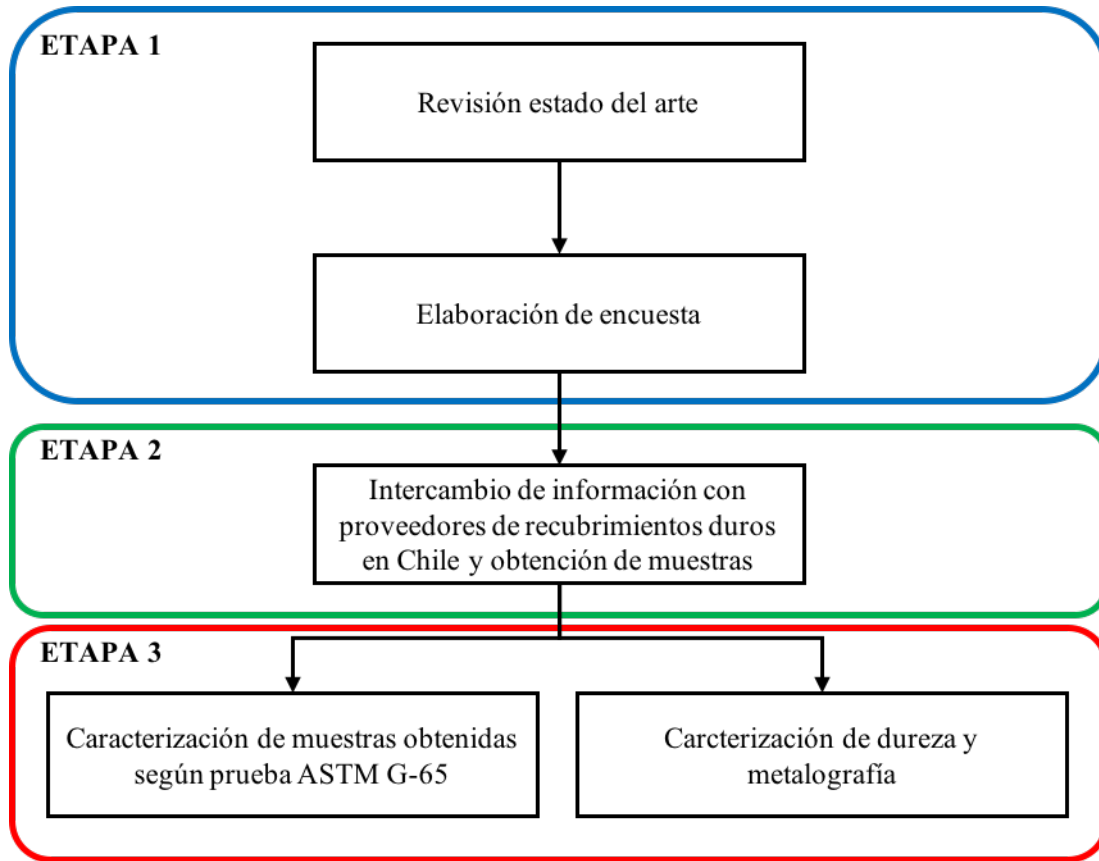


Figura 27. Flujograma de trabajo.

La *Etapa 1* contempló la revisión de estado del arte respecto a recubrimientos duros, los principales materiales utilizados para proteger, los principales procesos y los mecanismos de desgaste por abrasión. Similarmente se hizo una búsqueda de los principales proveedores de soluciones contra el desgaste en Chile para generar los primeros contactos. Con esto, se procedió a la elaboración de una encuesta, para luego, ser aplicada a los participantes que quisieran apoyar este trabajo voluntariamente. La encuesta aplicada a los proveedores de la industria se presenta en el Anexo A.

La *Etapa 2* consistió en aplicar la encuesta vía Internet a los contactos generados en la etapa anterior. El objetivo de la encuesta fue responder a la pregunta sobre cuáles son los procesos y materiales preferidos en Chile para proteger contra el desgaste abrasivo. Además, con la encuesta se generó el primer vínculo con algunos proveedores de soluciones para proteger contra el desgaste abrasivo en la industria, desarrollando así un intercambio de información más distendida con una entrevista presencial entre persona de contacto, estudiante y profesor guía. En este proceso se buscó conseguir muestras representativas del mercado para luego ser analizadas en laboratorio.

La *Etapa 3* del trabajo de título, consideró un análisis técnico de las muestras adquiridas en la etapa anterior. Este análisis consideró la evaluación metalográfica, medición de dureza Rockwell C y evaluación de resistencia al desgaste por abrasión según norma ASTM G65.

## 4 Procedimiento Experimental

### 4.1 Encuesta

Para seleccionar a los proveedores a ser encuestados, se realizó una búsqueda en Internet considerando:

- Si ofrece recubrimientos duros contra desgaste.
- Si ofrece algún servicio relacionado con protección contra el desgaste.
- Si ofrece algún servicio de mantenimiento relacionado con recubrimientos duros.

Con esta información, se contactó vía telefónica o correo electrónico a personas relacionadas con el área de ventas o el área técnica de cada empresa identificada para consultar su disponibilidad para colaborar con el trabajo del estudiante. La lista detallada de empresas contactadas se la lista detallada se encuentra en el Anexo B. Si la respuesta era positiva, entonces se les enviaba la encuesta vía correo electrónico. Esta encuesta se logró realizar gracias a la herramienta Formularios de Google, la cual es de acceso gratuito.

Al final de la encuesta se les consulta si están dispuestos a participar de una entrevista personal junto al estudiante y profesor guía. Este proceso fue de gran importancia puesto que dio lugar a adquirir las muestras para ser analizadas en laboratorio.

Con el fin de proteger la información de las personas encuestadas, en este trabajo no se hace referencia directa a las respuestas de las empresas en forma individual, ni tampoco aquellas que suministraron las muestras para este trabajo de investigación.

### 4.2 Ensayo de desgaste

Para obtener una medida comparativa de la resistencia al desgaste abrasivo se realiza procedimiento ASTM G65 llamado "Rubber Wheel Test". Este procedimiento consiste en someter una muestra contra una rueda con cubierta de caucho (Clorobutilo) la cual gira a una cierta velocidad angular, en el mismo instante se deja caer una cortina de arena de cuarzo como agente abrasivo. En la Figura 28 se muestra un esquema del ensayo de desgaste [6]. Dada la naturaleza de las muestras que se estudian, se realiza el procedimiento A recomendado para materiales con alta resistencia a la abrasión. Este procedimiento consiste en aplicar una fuerza de 130 [N] entre la rueda/muestra, y cumplir con 6.000 revoluciones de la rueda. Este equipo está disponible en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

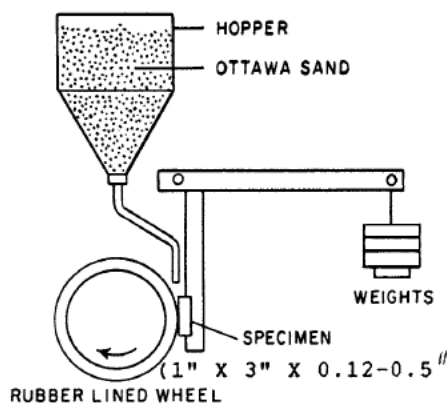


Figura 28. Esquema del ensayo ASTM G-65 [6].

Los parámetros que enuncia el procedimiento ASTM G-65 A son:

- El flujo de arena debe estar entre 300 y 400 [g/min]
- La granulometría debe ser de 200 [ $\mu\text{m}$ ]
- El disco con recubrimiento debe tener un diámetro inicial de 228,6 [mm]
- La rueda debe girar a 200 [RPM]
- La fuerza aplicada debe ser de 130 [N]
- La rueda debe realizar 6.000 revoluciones

El equipo a utilizar se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Equipo para realizar ensayo ASTM G-65 disponible en laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. (Fuente: Propia)

Los parámetros empleados en el equipo fueron:

- Caudal de arena de 360 [gr/min].
- Diámetro inicial del disco de goma de 223 [mm].
- La velocidad angular de 188 [rpm].
- Para cumplir con la carga de 130 [N] se usó una masa de 6.77 [kg].
- El tiempo de ensayo de 32 min para dar cumplimiento con las 6.000 revoluciones que exige el procedimiento A.
- Cortina de arena constante (ver Figura 30)



Figura 30. Cortina de arena constante.

El procedimiento para la aplicación del ensayo se describe a continuación:

1. Limpieza de las muestras por tres minutos en baño ultrasónico.
2. Pesaje de las muestras en una balanza de precisión hasta 0,00001 [gr].
3. Posicionamiento de la muestra en el portamuestras del equipo.
4. Realización de una medición de masa cada 383 segundos por cada muestra; por cada muestra se hicieron un total de cinco mediciones.
5. Antes de cada medición de masa se hace una limpieza de la muestra en baño ultrasónico.

#### 4.2.1 Preparación de muestras

Las muestras obtenidas se proporcionaron con la superficie bruta y sin pulir, por lo que antes de empezar con las pruebas de desgaste se debió realizar un proceso de mecanizado para dejar la superficie lisa y libre de porosidades o irregularidades. Para ello se desbastó la superficie para obtener una superficie plana sin irregularidades, y luego se procedió a rectificar la superficie para eliminar las marcas dejadas por la fresa en el paso anterior. El primer paso se llevó a cabo en una fresadora que se puede observar en la Figura 31, y el segundo paso se llevó a cabo en una rectificadora que se puede observar en la Figura 32. Ambos procedimientos se llevaron a cabo en taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.



Figura 31. Fresa perteneciente al taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.



Figura 32. Rectificadora perteneciente al taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

En la Figura 33 a) se observa la muestra Weldmang Crom en bruto, y en b) se observa la muestra luego de la preparación. En el Anexo C se muestran todas las muestras preparadas para los ensayos ASTM G65, dureza Rockwell C y micrografías.

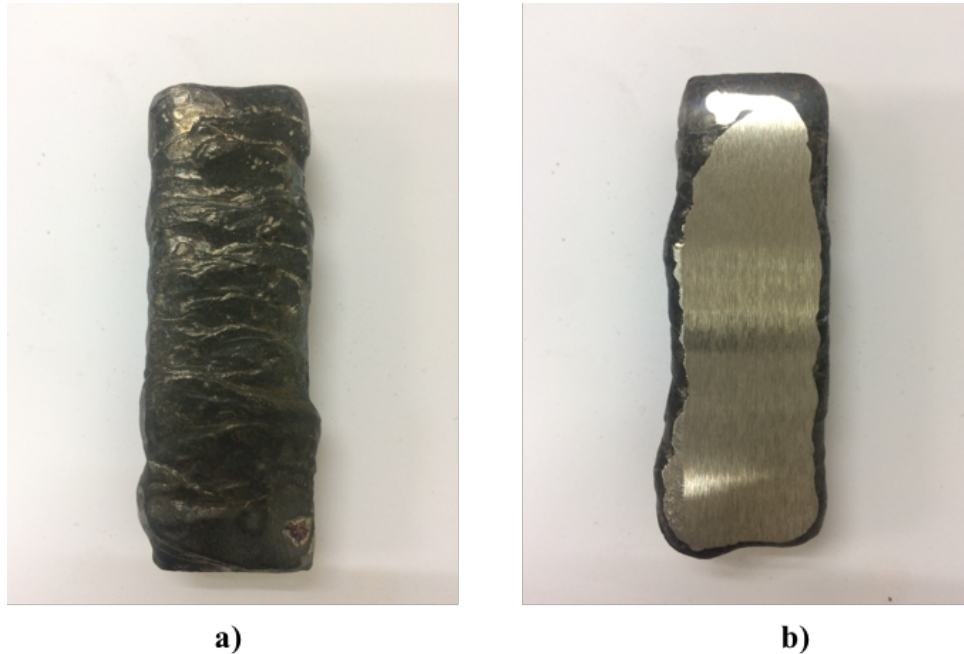


Figura 33. a) Se observa la muestra Weldmang Crom en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.

#### 4.2.2 Preparación de arena

Se empleó arena de cuarzo para la realización de los ensayos y su granulometría se ajustó a los requerimientos de la norma ASTM G65. Para ello, se pasó la arena por un harnero fabricado para tal propósito, y en el que se empleó una malla de acero inoxidable 304 N° 70 GA. Esta malla tiene una apertura del tamiz de 212 [ $\mu\text{m}$ ]. En la Figura 34 se presenta el harnero usado para tamizar la arena.



Figura 34. Harnero construido por el estudiante para tamizar la arena.



### 4.3 Ensayo de dureza Rockwell C

La dureza es una propiedad mecánica que indica la resistencia a la deformación plástica superficial de un material. Existen diversas escalas para medir la dureza, y en este trabajo se utilizó la escala Rockwell C que es la escala más usada para diferenciar los recubrimientos duros. El ensayo de dureza Rockwell C consistió en aplicar una carga de 150 [kg] con un indentador de diamante durante cinco segundos, aproximadamente. Este ensayo se realizó en un durómetro Rockwell de la marca Wilson (ver la Figura 35), perteneciente al Laboratorio de Metalografía del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

Se tomaron cinco mediciones de dureza para cada muestra con el fin de obtener un valor promedio de la dureza global del recubrimiento.

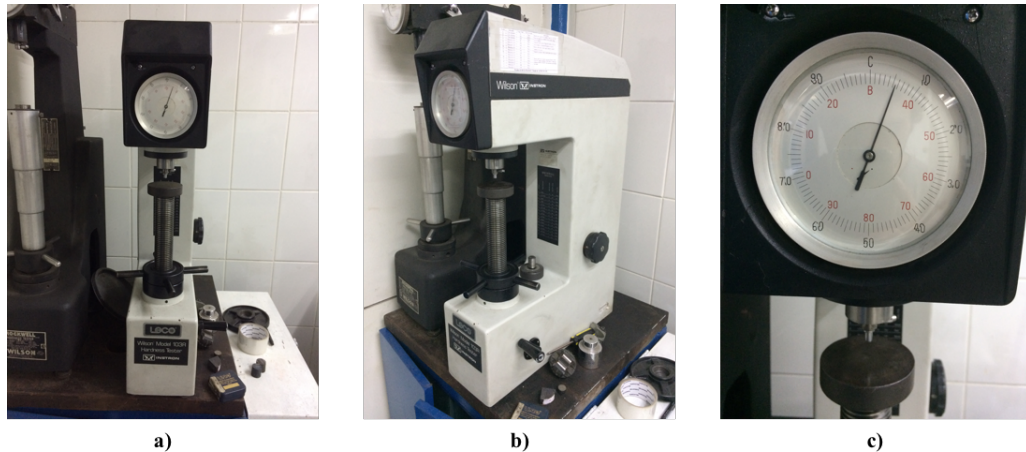


Figura 35. Durómetro Rockwell C presente en el laboratorio de metalografía del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

Se realizaron 5 mediciones por muestra con el objeto de tener un mejor resultado de la dureza global.

### 4.4 Microscopía óptica

Se analiza por microscopía óptica la microestructura de las muestras con el fin de estudiar en corte transversal tres diferentes zonas, i) metal base, ii) interface entre recubrimiento y metal base y iii) la zona cercana a la superficie del recubrimiento. La importancia de este procedimiento radica en observar efectos de dilución del recubrimiento en el material base, como también observar las fases presentes. El microscopio utilizado se encuentra en el Laboratorio del Departamento de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Chile.

#### 4.4.1 Corte de muestras

Para realizar la observación mediante microscopía óptica de los materiales de estudio se extrajo una muestra de dimensiones  $5 \times 10$  [mm<sup>2</sup>] de superficie (la profundidad estuvo ligada al espesor de cada muestra). Este procedimiento se llevó a cabo mediante la técnica de electroerosión dado que es un procedimiento que no afecta la microestructura a observar. En la Figura 36 se muestra como ejemplo el corte de la muestra Postalloy 218 HD. En el Anexo D se muestran los cortes realizados para todas las muestras.

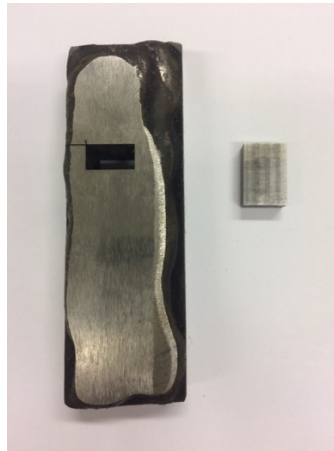


Figura 36. Muestra Postalloy 218 HD cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

#### 4.4.2 Pulido de muestras

Luego de efectuar el corte de las muestras, se procedió con el pulido de estas hasta lograr un acabado especular. En primer lugar, las muestras fueron encapsuladas en una resina para facilitar su manipulación en el pulido. En la Figura 37 se muestra la preparación de las muestras para ser encapsuladas; estas se marcan con números para luego ser identificadas durante la observación en el microscopio.

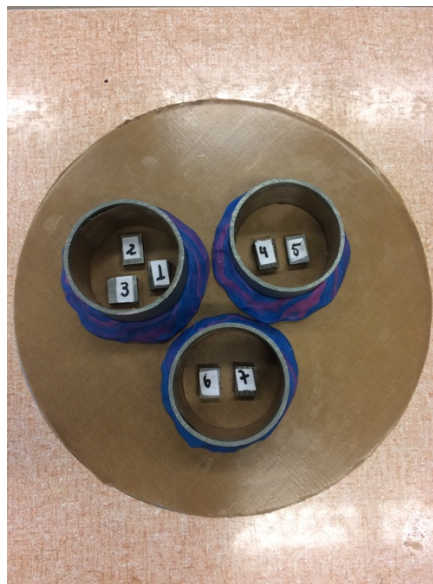


Figura 37. Preparación de muestras para ser encapsuladas en resina.

Una vez encapsuladas las muestras, se procede con el pulido de estas. Para esto se utilizó una máquina de pulido disponible en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Chile, la cual se observa en la Figura 38. Cada cápsula se pasó por una lija de carburo de silicio No. 400 y luego una de No. 600 (norma americana), para finalmente ser pulidas en un paño rotatorio con una solución de alúmina de  $0,04 \mu\text{m}$  hasta dejarlas con un acabado especular.



Figura 38. Máquina de pulido de velocidad variable, marca Struers.

Finalmente se observan las muestras al microscopio óptico perteneciente al Laboratorio de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Chile el cual se presenta en la Figura 39, el cual posee aumentos de 5x, 10x, 20x, 50x y 100x. Para el presente trabajo solo se obtuvieron microscopías con aumentos de 10x, 50x y 100x, en la zona de interface, zona media y zona superior del recubrimiento para observar la evolución de la microestructura. En primera instancia se obtienen imágenes sin ataque químico y luego se atacan las muestras con Vilella al 5% para observar las fases presentes en los recubrimientos.



Figura 39. Microscopio óptico marca OPTIKA, con aumento de 5x, 10x, 20x, 50x y 100x.

## 5 Resultados

### 5.1 Resultados encuesta

En la búsqueda de proveedores de soluciones en recubrimientos duros se logró obtener contacto de veintidós empresas, de las cuales solo nueve estuvieron dispuestas a contestar la encuesta online. A continuación, se presentan los resultados de la encuesta realizada.

En la Tabla 5 se presenta el resumen de los servicios y productos que ofrecen las empresas encuestadas. Para proteger las identidades de las empresas dispuestas a colaborar con este trabajo se etiquetan en orden alfabético.

Tabla 5. Resumen de productos y servicios que ofrecen las empresas proveedoras encuestadas.

Empresa	Consumibles para protección al desgaste	Equipos de soldadura	Materiales Antidesgaste	Servicios de Mantenimiento contra desgaste	Otro
A			X	X	Productos fundidos
B	X	X	X	X	
C				X	Servicio de fabricación, reparación y mantenimiento de Tolvas, Baldes y componentes de desgaste de equipos móviles
D	X				Asesoría técnica y Capacitación en soldaduras especiales; cursos de soldaduras especiales
E	X	X			
F			X		
G			X	X	
H	X	X	X		
I			X	X	Reparación y fabricación de componentes mineros de carguío y movimiento de tierra

En la Figura 40 se presenta el resumen de respuesta a la pregunta qué tipos de materiales ofrecen cada empresa.

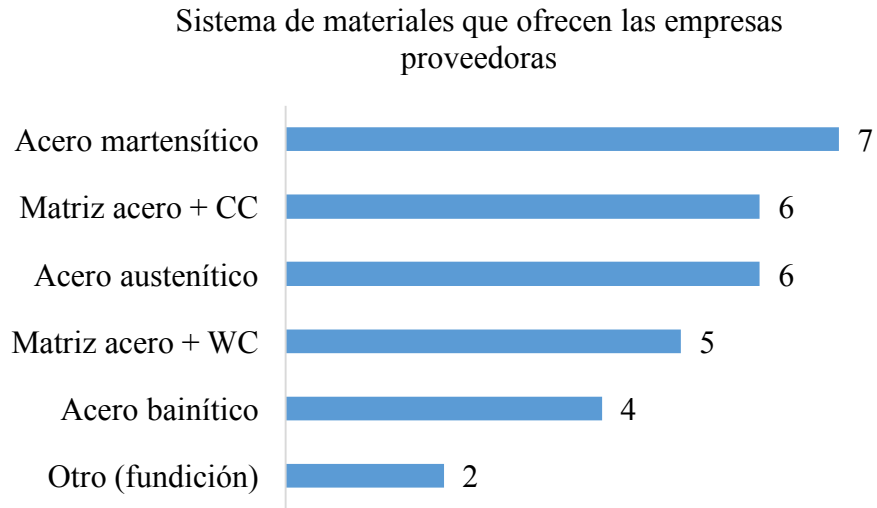


Figura 40. Resumen de sistemas de materiales ofrecidos por las empresas encuestadas.

En la Figura 41 se presenta el gráfico de torta que indica la dificultad de adquirir los materiales antidesgaste. En este gráfico se desprende que el 56% de las empresas encuestadas indica que la dificultad de adquirir estos materiales es baja.

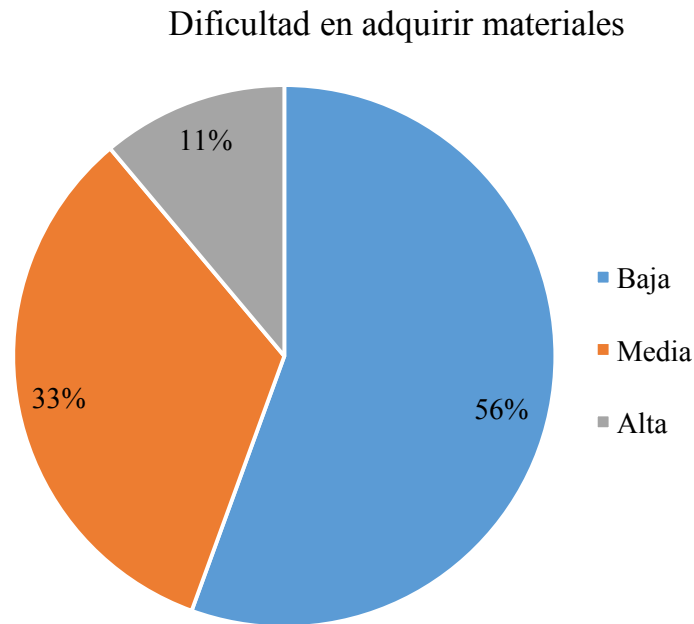


Figura 41. Dificultad de adquirir materiales contra el desgaste.

En la Figura 42 se presenta el resumen de la respuesta a las técnicas usadas por las empresas para aplicar los recubrimientos.

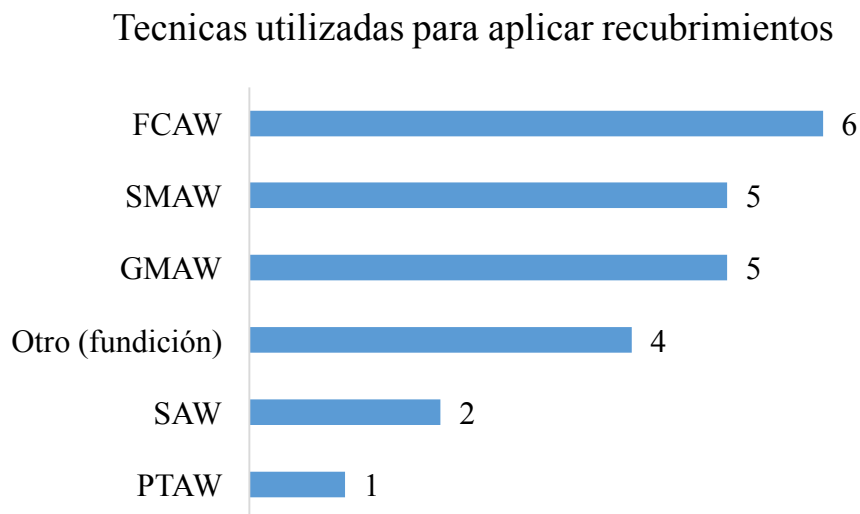


Figura 42 .Principales técnicas para aplicación de recubrimientos.

En la Tabla 6 se presentan las respuestas de la pregunta cuáles son las durezas de los recubrimientos que ofrecen.

Tabla 6. Resumen de durezas de los recubrimientos ofrecidos por las empresas encuestadas.

<b>Empresa</b>	<b>Respuesta</b>
A	15 - 57 Rockwell C
B	60 Rockwell C
C	43 - 51 Rockwell C
D	63 Rockwell
E	28 - 62 Rockwell
F	57 - 60 Rockwell C
G	51 - 63 Rockwell C
H	Martensíticos 43 - 51 Rockwell C Austeníticos 51 - 60 Rockwell C. En el caso de Tungsteno las variaciones de Dureza van entre los 19 - 62 Rockwell C en aplicaciones de soldaduras y en caso de placas de sinterizado hasta 62 Rockwell C aprox.
I	39 - 55 Rockwell C

En la Tabla 7 se presentas los resultados a la pregunta sobre la duración promedio de los recubrimientos ofrecidos por las empresas encuestadas.

Tabla 7. Resumen de duración de recubrimeintos ofrecidos por las empresas encuestadas.

<b>Empresa</b>	<b>Respuesta</b>
A	3-4 meses aproximadamente
B	Depende mucho del material abrasivo, puede ir de un par de meses a un año
C	18.000.000 de toneladas en Baldes y 15.000 horas en tolvas
D	Permiten una larga vida útil
E	Proveedores de consumibles
F	Según condiciones operacionales de los equipos y su tasa de desgaste.
G	-
H	Siempre es Variable, Comparativamente, el Tungsteno es 4-5 veces superior a los Aceros de 470 BHN.
I	garantía de 6 meses en blindaje y 12 meses en estructural

## 5.2 Resultados entrevistas

En la Tabla 8 se muestran las muestras ofrecidas por las empresas que estuvieron dispuestas a colaborar en este trabajo.

Tabla 8. Lista de muestras brindadas por las empresas que colaboraron con este trabajo. Se presenta el tipo de recubrimiento, la marca de cada uno y el proceso por el cual fueron elaborados.

Empresa	Tipo	Cantidad	Proceso
A	E8018-C2	3	SMAW
	E11018-M	3	SMAW
	Soltec 65	3	SMAW
	Stoody 100 HC	3	FCAW
	Placas Bimetálicas 1	3	FCAW
B	Placas Bimetálicas 2	3	FCAW
C	Overlay 60	3	SMAW
	PostAlloy 218 HD	3	SMAW
	Weldmang Crom	3	SMAW

Las muestras obtenidas se encontraban en bruto, como se muestra en la Figura 43. Cada muestra se preparó para ser ensayada según procedimiento ASTM G65, dureza y microscopia, lo cual se presenta en la sección 4.



Figura 43. Ejemplo de muestra obtenida gracias a las entrevistas con las empresas que accedieron a colaborar en este trabajo. La muestra corresponde al ejemplar Soltec 65.



En la Tabla 9 se presenta la composición química de los recubrimientos obtenidos gracias a las entrevistas realizadas con las empresas. Algunos datos fueron entregados por las empresas participantes.

Tabla 9. Composición química de las muestras obtenidas [23] [24] [25] [26].

<b>Recubrimiento</b>	<b>%C</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Mo</b>
Overlay 60	3,4	31	1,7	0,55	0,2	0,5
Weldmang Crom	0,5	0,04	15,5	0,13	0,07	1
8018-C2	0,05	0,02	1,15	0,51	3,73	0,004
11018-M	0,04	0,3	1,54	0,32	1,86	0,4
Soltec 65	3	26 - 32	0,3	1,4		
Stoody 100 HC	4,3	25	1,5	1,5		1
Postalloy 218 HD	3,6 - 4,3	17,4 - 21,3	0,8 - 1,1	0,8 - 1,1		
P. Bimetálica 1	4	32	2,2	0,8		
P. Bimetálica 2	4,5 - 5,5	28 - 32	2	2		

En la Tabla 10 se presentan las durezas especificadas por los fabricantes de los recubrimientos obtenidos.

Tabla 10. Dureza Rockwell C especificada por los fabricantes [23] [24] [25] [26].

<b>Recubrimiento</b>	<b>Dureza Rockwell C</b>
Overlay 60	40 - 61
Weldmang Crom	15 - 52
8018-C2	-
11018-M	-
Soltec 65	50 - 57
Stoody 100 HC	51 - 62
Postalloy 218 HD	63 - 66
P. Bimetálica 1	55
P. Bimetálica 2	58 - 65

De las entrevistas realizadas a las empresas que accedieron a esta instancia, se logró obtener las siguientes muestras que se enlistan en la Tabla 8. Para resguardar la información de cada empresa, éstas se etiquetaron con una letra.

En la Tabla 11 se muestra un resumen con el tipo de aleación y las aplicaciones típicas de los recubrimientos obtenidos.

Tabla 11. Resumen de tipo de aleación de los recubrimientos obtenidos y sus aplicaciones típicas [23] [24] [25] [26].

<b>Recubrimiento</b>	<b>Tipo de aleación</b>	<b>Aplicaciones típicas</b>
Overlay 60	Acero al carbono de baja aleación	Martillos de molino, tornillos transportadores
Weldmang Crom	Acero austenítico al Manganeso	Reparación de piezas fundidas de acero al manganeso, rodillos, chancadores, etc. Especialmente diseñado para reparar defectos de fundición, color similar al material fundido.
8018-C2	Acero de baja aleación	Recipiente de presión para gases licuados
11018-M	Acero de baja aleación	Corazas de molino, palas mecánicas
Soltec 65	Fundición	Baldes de pala, tornillos sin fin, transportadores de clinker, herramientas de agricultura, etc.
Stoody 100 HC	Fundición con carburos en matriz austenítica	Molinos, palas de balde, placas de desgaste, etc.
Postalloy 218 HD	Combinación de 5 tipos de carburos	Equipos para movimiento de tierras, tales como palas y tolvas.
P. Bimetálica 1	Alto porcentaje de carburos de Cromo	Placas antidesgaste para chutes de traspaso
P. Bimetálica 2	Alto porcentaje de carburos de Cromo	Placas antidesgaste para chutes de traspaso

En la Tabla 12 se presenta un resumen con las opiniones vertidas por las empresas durante las entrevistas con el estudiante.

Tabla 12. Resumen de opiniones obtenidas durante entrevistas con empresas participantes.

<b>Empresas</b>	<b>Opiniones</b>
A	Reconoce que el proceso más utilizado para producir recubrimientos es FCAW, debido a su rapidez.
	Muchas veces los clientes optan por el reemplazo de la pieza en vez de ser reparada.
	El proceso minero más problemático en desgaste es el Chancado.
	Los materiales más usados son los carburos de Cromo y aceros austeníticos
B	Los recubrimientos de CCO representan el 90% del mercado, en comparación con los WC.
	El proceso preferido para aplicar recubrimientos es FCAW debido a su rapidez
	Mensualmente, se utilizan alrededor de 40 toneladas de alambre tubular para FCAW
	La decisión para utilizar algún material u otro, por las mineras, se basa en que la tecnología esté aprobada por ellos mismos.
C	Proceso preferido es el FCAW y SMAW
	Las empresas mineras no se arriesgan con materiales nuevos
	El proceso minero crítico en desgaste es el Chancado.

## 5.1 Resultados ensayo ASTM G 65

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos al realizar el ensayo ASTM G65. En la Tabla 13 se presenta el resumen de la pérdida de masa [gr] de las muestras analizadas a diferentes tiempos de ensayo. Este análisis se aplicó a una muestra por cada tipo de recubrimiento.

Tabla 13. Resumen de pérdida de masa en el tiempo, según ensayo por norma ASTM G65.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [g]								
	Pl. bim. 1	Pl. bim. 2	Stoody 100 HC	Postalloy 218 HD	Soltec 65	Overlay 60	Weldmang Crom	E11018	E8018
0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0
383	0,03	0,03	0,05	0,05	0,64	0,46	1,22	2,25	2,35
766	0,06	0,06	0,10	0,1	1,11	0,79	2,2	3,81	4,07
1149	0,09	0,09	0,14	0,14	1,48	1,1	3,28	5,14	5,48
1532	0,12	0,12	0,19	0,18	1,99	1,37	4,09	6,28	6,74
<b>1915</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,24</b>	<b>0,22</b>	<b>2,33</b>	<b>1,68</b>	<b>5,29</b>	<b>7,57</b>	<b>8,37</b>

En la Figura 44 se muestra la diferencia en la marca dejada por el ensayo ASTM G65, para dos recubrimientos, en a) el recubrimiento E11018-M y en b) la placa bimetálica 1. En el Anexo E se muestran todos los resultados del ensayo ASTM G65 para todas las muestras evaluadas en el curso de este trabajo de investigación.

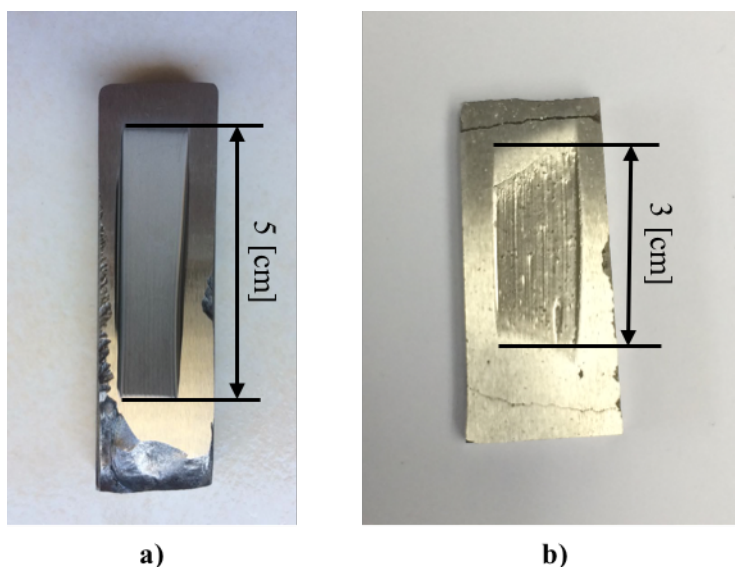


Figura 44. Marca dejada en recubrimientos luego del ensayo ASTM G65. En a) el recubrimiento 11018-M y en b) la placa bimetálica 1 (el ancho de la huella, en ambas imágenes, es de 12 [mm]).

En la Figura 45 se presenta un gráfico resumen de la cantidad total de masa perdida por cada muestra ensayada según el procedimiento ASTM G65 A.

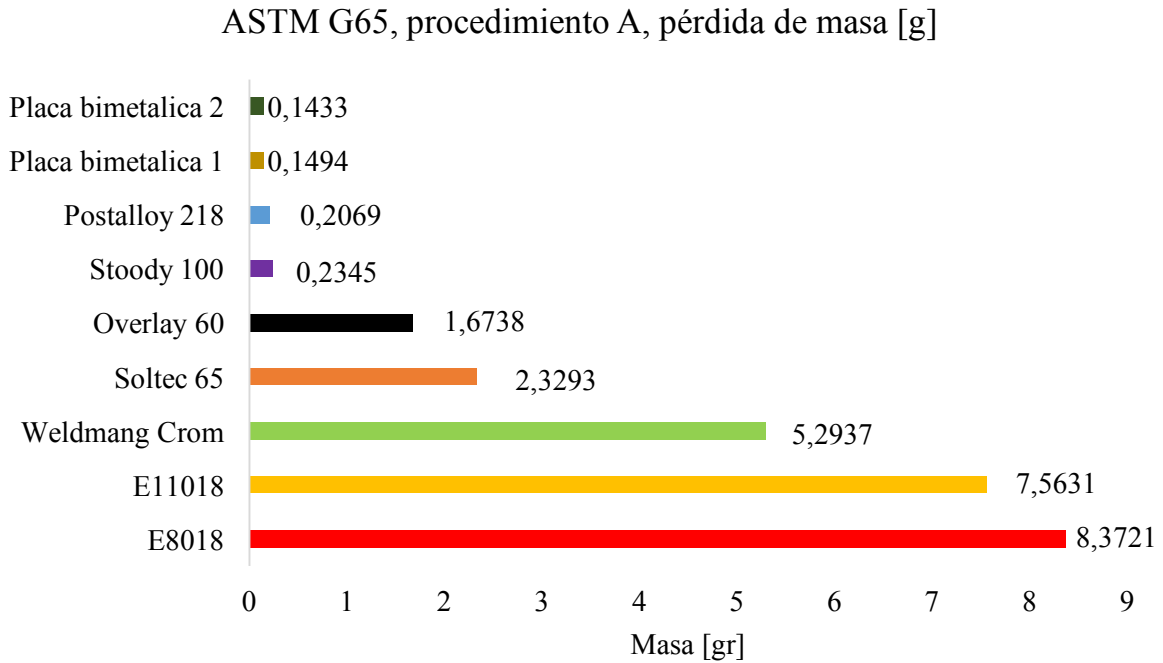


Figura 45. Procedimiento ASTM G65 A de las muestras obtenidas.

Con los resultados de la Tabla 13 se presenta la Figura 46 para comparar la pérdida de masa [gr] durante el tiempo de ensayo de los diferentes tipos de muestras.

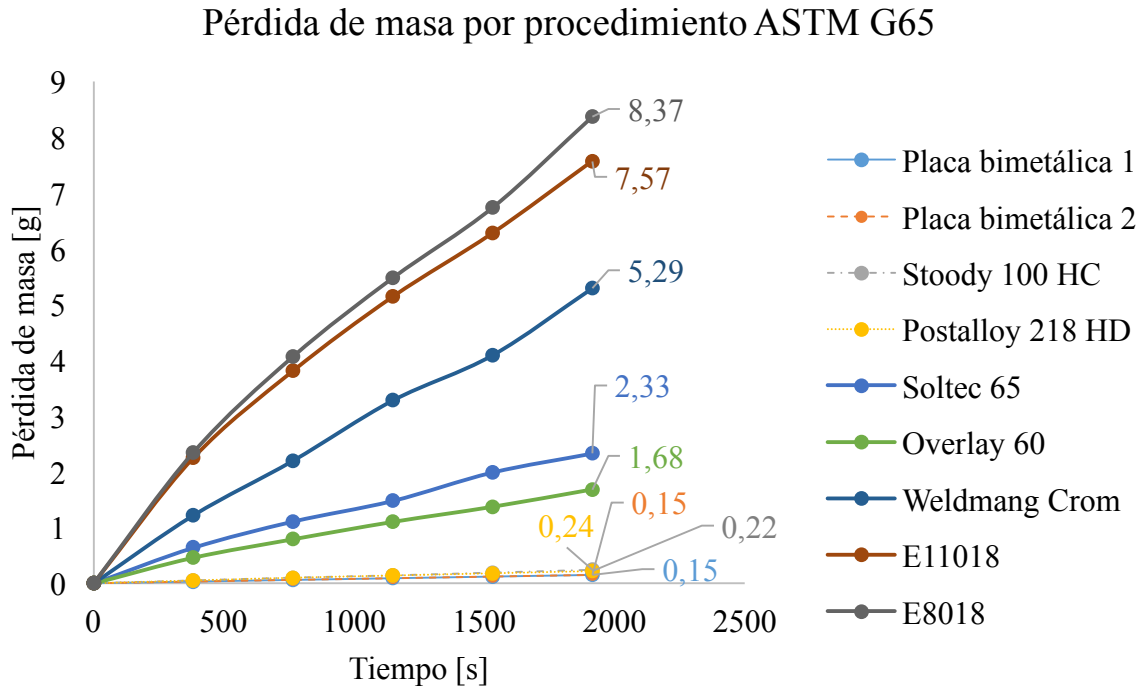


Figura 46. Gráfico comparativo de pérdida de masa [gr] versus el tiempo.

En la Figura 47 se presenta el gráfico de %C versus el total de pérdida de masa de cada muestra sometida al ensayo ASTM G65 A.

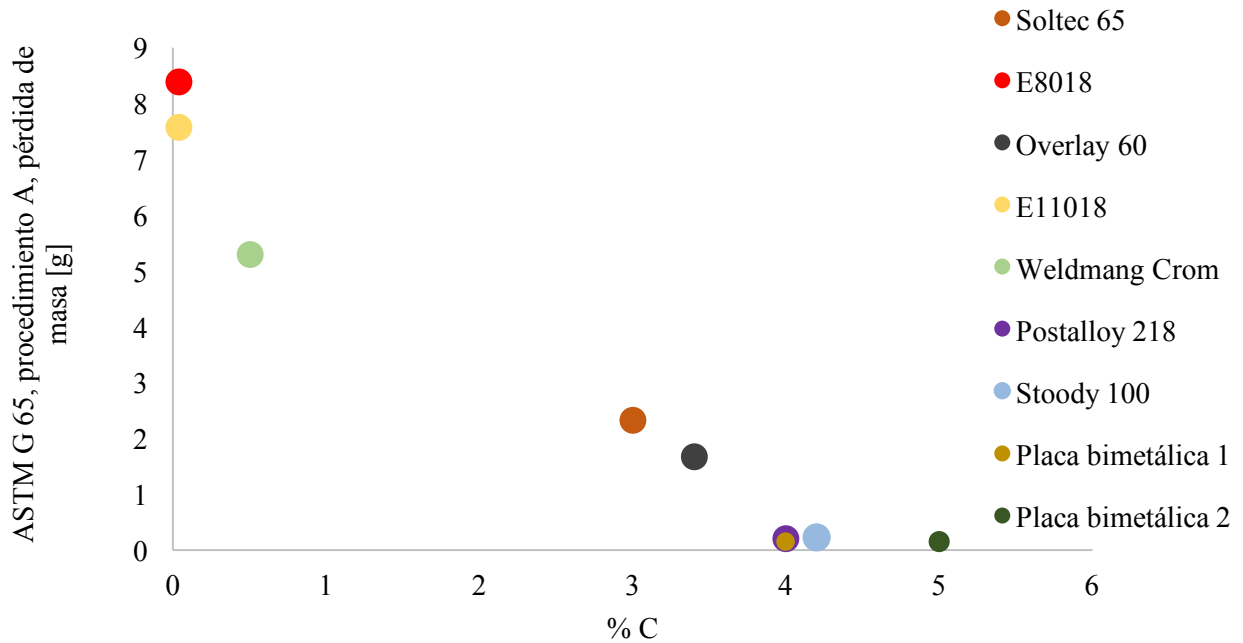


Figura 47. Gráfico de %C vs pérdida de masa.

## 5.2 Resultados ensayos de dureza Rockwell C

En la Tabla 14 se presenta el resumen de las durezas en escala Rockwell obtenidas para cada muestra.

Tabla 14. Dureza Rockwell C obtenida en 5 puntos de cada muestra.

Punto	Soltec 65	Overlay 60	Weldmang Crom	Postalloy 218	Stoodly 100	E8018	E11018	P. Bim. 1	P. Bim. 2
1	50	47	9	55	37	8	19	52	50
2	50	49	10	58	64	10	20	51	50
3	54	49	9	53	59	12	21	51	51
4	51	51	11	60	65	11	19	52	51
5	43	48	10	58	66	12	20	52	52
<b>Promedio</b>	<b>50</b>	<b>49</b>	<b>10</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>11</b>	<b>20</b>	<b>52</b>	<b>51</b>
<b>Desv. Estandar</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

En la Figura 48 se muestra el gráfico de dureza Rockwell C versus la pérdida de masa del procedimiento ASTM G65 A.

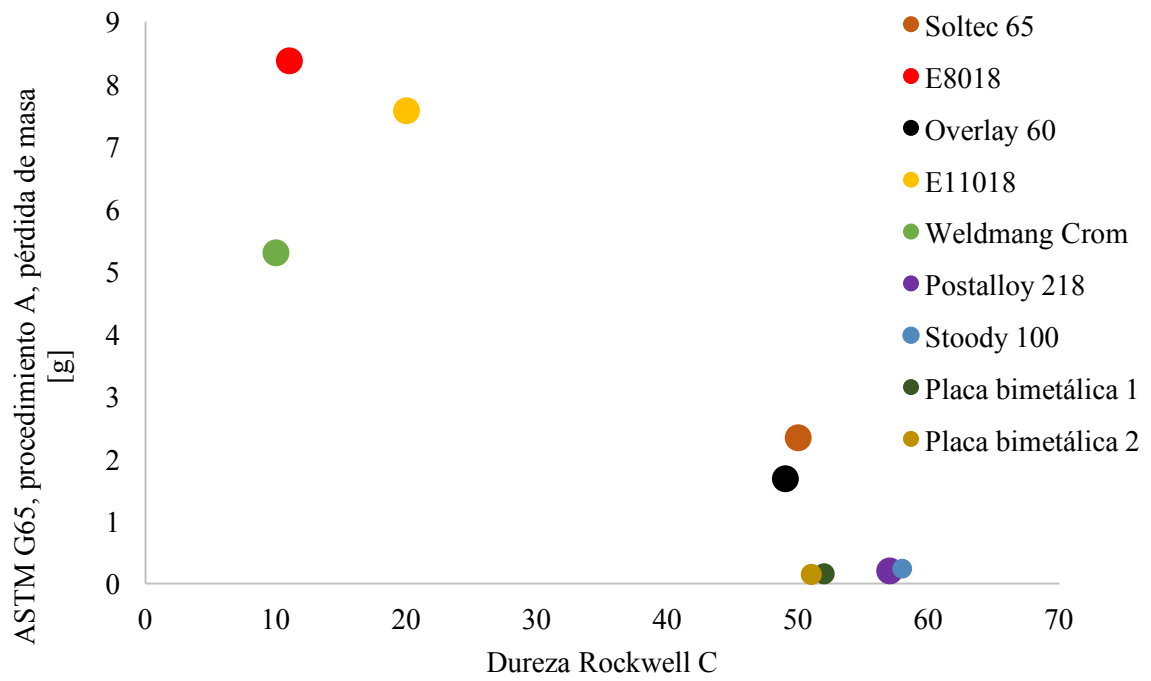


Figura 48. Gráfico de dureza Rockwell C vs pérdida de masa.

### 5.3 Resultados metalografía

A continuación, se presentan algunas imágenes obtenidas en microscopio óptico de las muestras brindadas por las empresas. En el Anexo F se muestran todas micrografías obtenidas de las muestras.

En la Figura 49 se muestra la microestructura del recubrimiento E8018-M. Las zonas claras corresponden a la fase austenita y las zonas oscuras se encuentra la fase perlita.

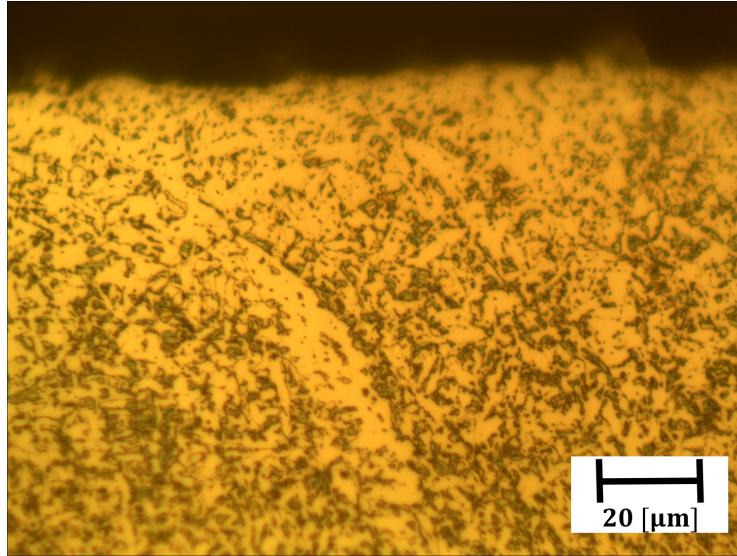


Figura 49. Microestructura recubrimiento E8018-C2. Aumento 100X.

En la Figura 50 se muestra la microestructura del recubrimiento E11018-M. Las zonas claras indican la presencia de la fase austenita y en negro, corresponden a las zonas donde precipita la fase perlita.

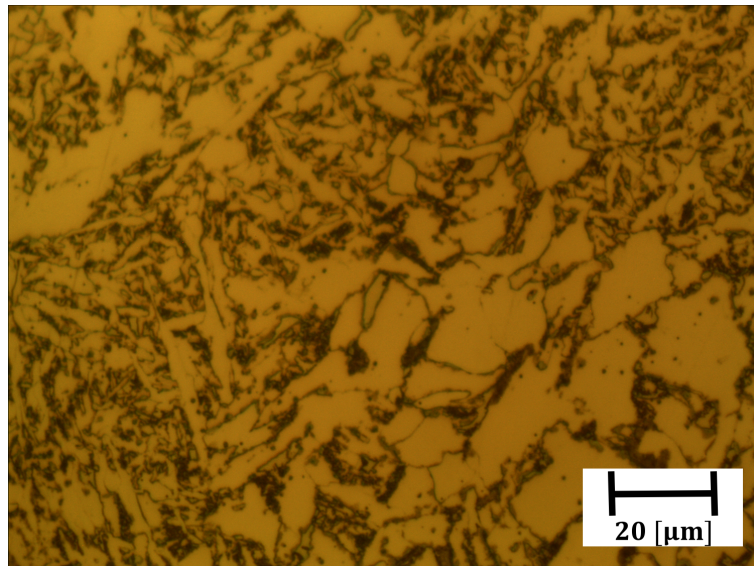


Figura 50. Microestructura recubrimiento E11018-M. Aumento 100X.

En la Figura 51 se observa en las zonas claras la fase austenita, y en los alrededores a estos, se observa la fase perlita.



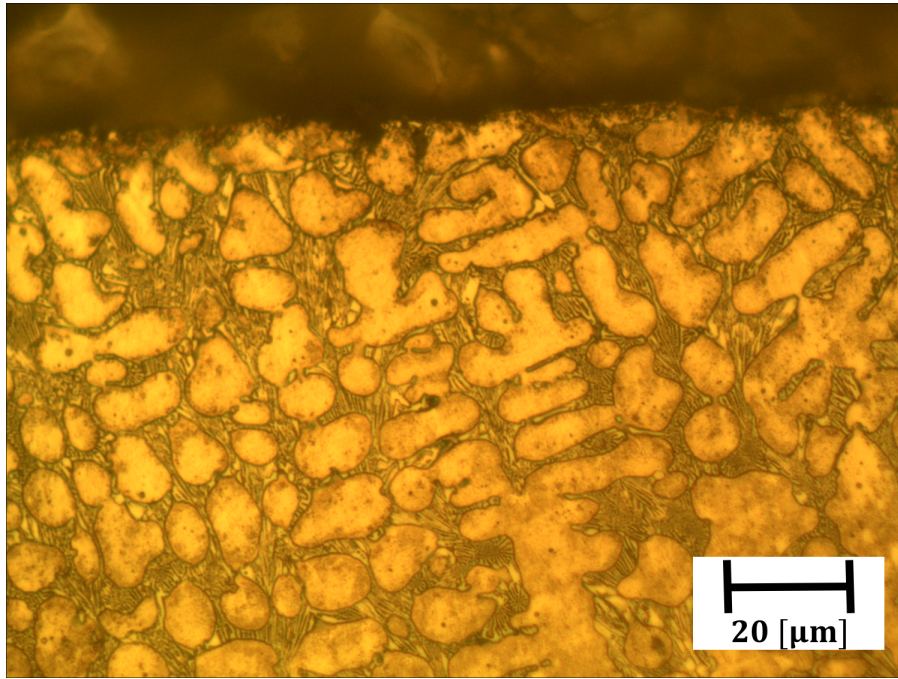


Figura 51. Microestructura de recubrimiento Soltec 65. Aumento 100X.

En la Figura 52 presenta la microestructura del recubrimiento Stody 100 HC. Es posible observar el crecimiento dendrítico de la fase austenita. Entre los espacios interdendríticos es posible observar carburos de cromo y fase perlita en color oscuro.

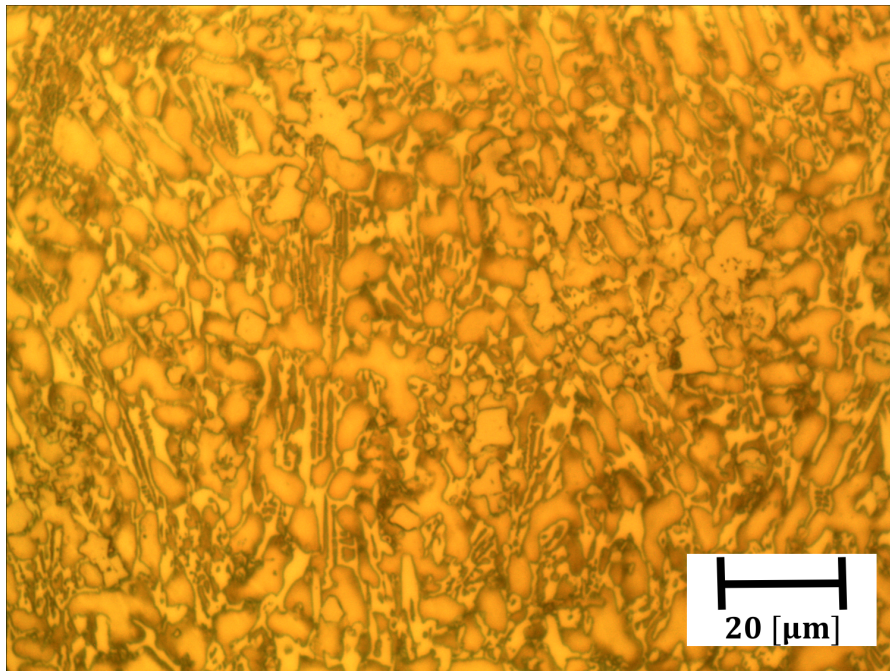


Figura 52. Microestructura de recubrimiento Stody 100 HC. Aumento 100X.

En la Figura 53 se muestra la microestructura del recubrimiento Postalloy 218 HD. Es posible observar la fase austenita de color claro. En color oscuro se observan los carburos precipitados.

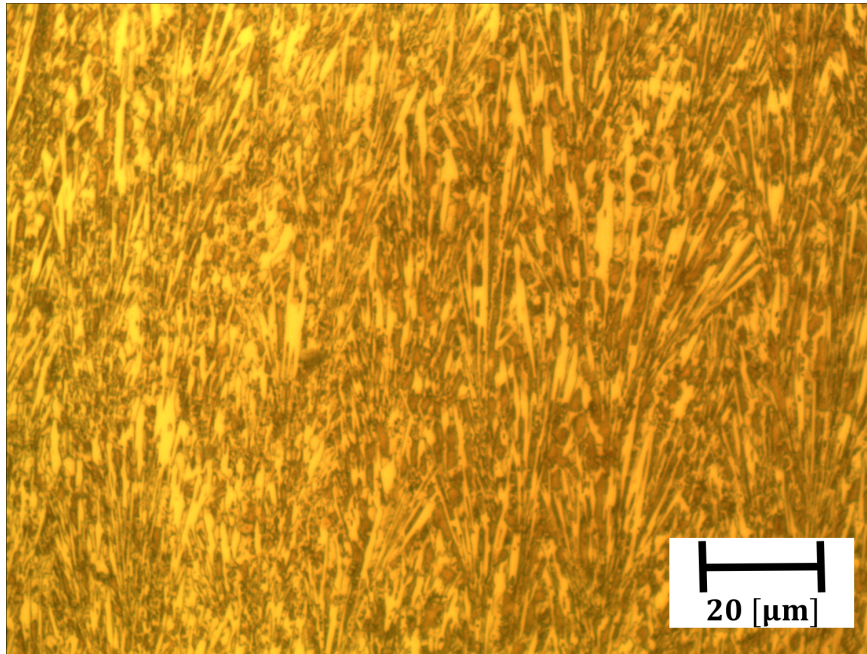


Figura 53. Microestructura de recubrimiento Postalloy 218 HD. Aumento 100X.

En la y Figura 54 se observa la microestructura del recubrimiento Overlay 60, con aumento 50X. Es posible identificar el crecimiento dendrítico de la fase austenita. Entre los espacios interdendríticos se encuentra la fase perlita.

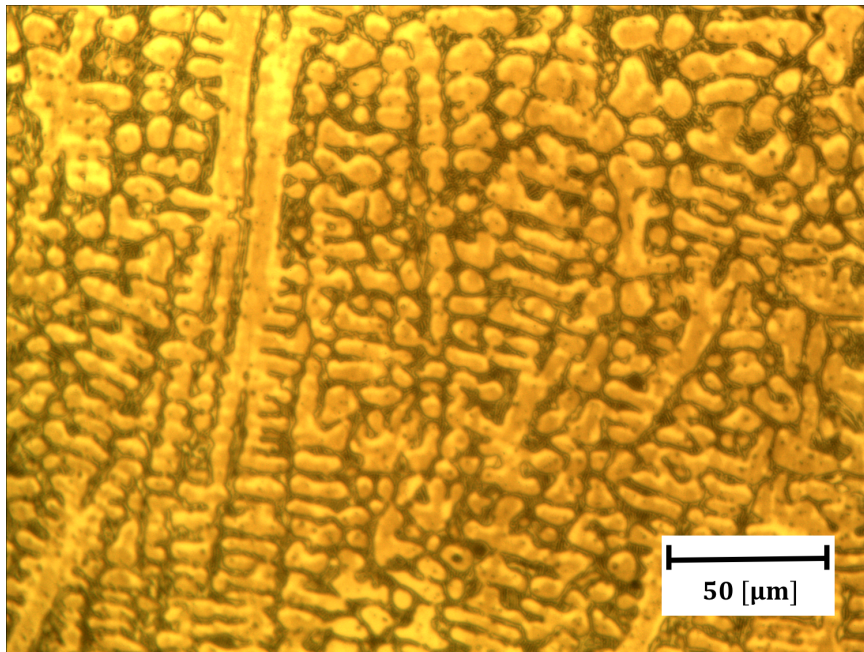


Figura 54. Microestructura de recubrimiento Overlay 60. En aumento 50X

En la Figura 55 se muestra la microestructura del recubrimiento Placa bimetalica 1 (CCO) con aumento 10X. Es posible observar de color claro y de forma hexagonal o hexagonal alargada (tipo bastón), a los carburos  $M_7C_3$ . Estos carburos se encuentran rodeados por la fase austenita, y carburos eutécticos. Esta microestructura es típica de CCO hipereutécticos.

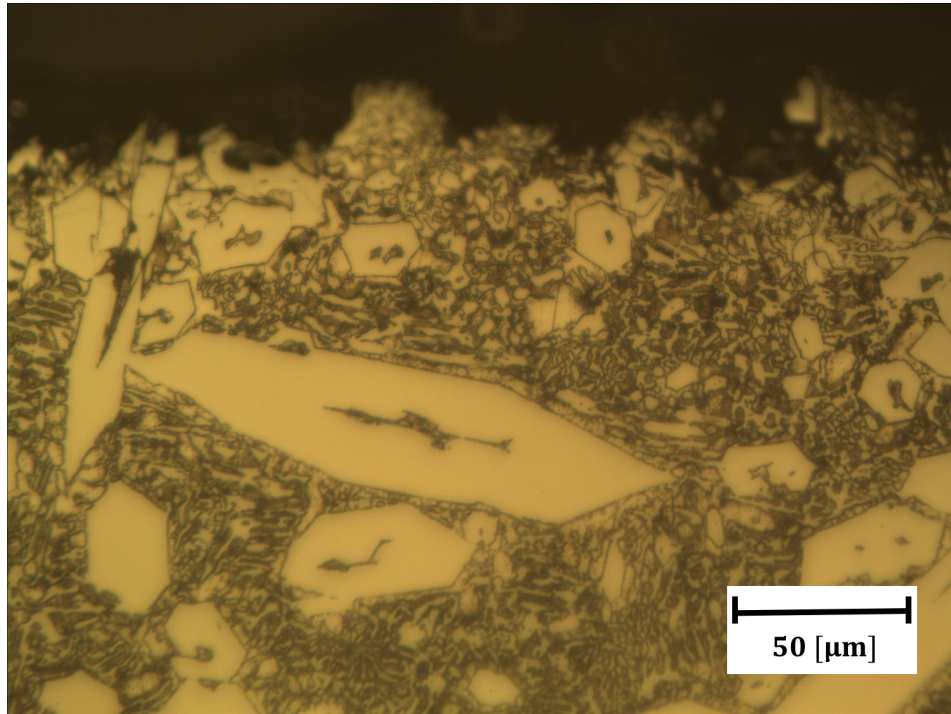


Figura 55. Microestructura de recubrimiento Placa bimetalica 1. En aumento 10X.

En la Figura 56 se muestra la microestructura del recubrimiento Placa bimetalica 2 (CCO). No se observa carburos primarios  $M_7C_3$ , pero si se puede observar la fase austenita en color oscuro y en color claro se observan carburos eutecticos. Esta microestructura es tipica de un CCO hipoeutectico.

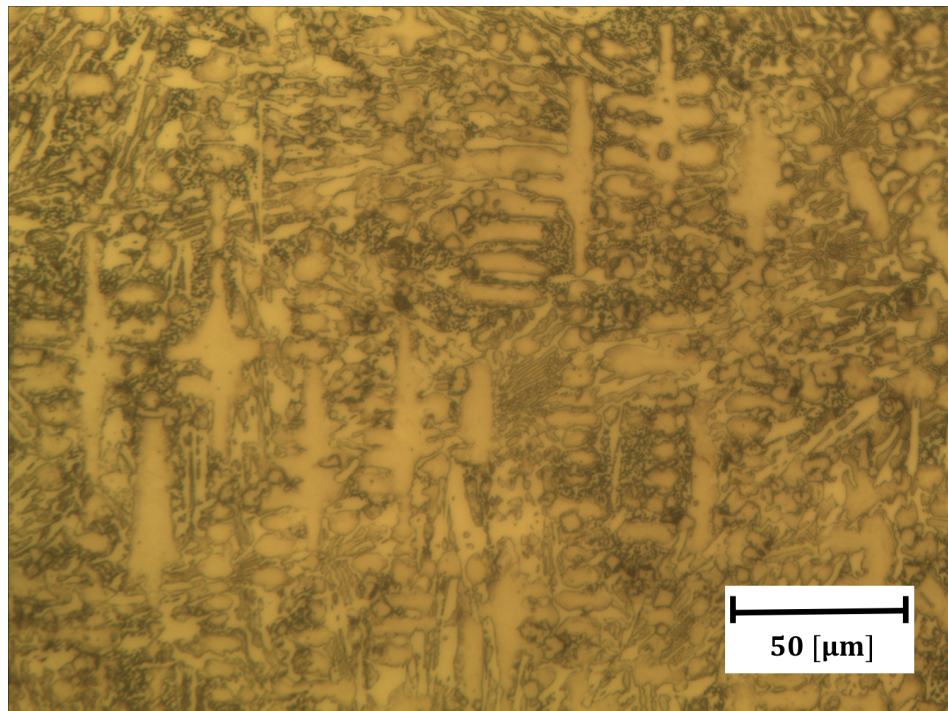


Figura 56. Microestructura de recubrimiento Placa bimetalica 2. Aumento 50X.

## 6 Análisis y Discusión

### 6.1 Encuestas - Entrevistas

De las empresas que participaron de la encuesta online, la mayoría ofrece materiales anti desgaste y servicios de mantención contra el desgaste. En cuanto a los materiales más usados para proteger equipos del desgaste, se encuentran los aceros martensíticos, aceros austeníticos y aceros con carburos de cromo (ver Figura 40), siendo estos últimos, los que tienen un mayor auge en la actualidad según las opiniones de las empresas entrevistadas (ver Tabla 12). El 56% de las empresas señalaron que la dificultad en adquirir los materiales es baja. Y solo un 11% indicó que es alta, lamentablemente la empresa que aseveró esto, no accedió a la entrevista para consultar el por qué es difícil la obtención de estos materiales. En cuanto a los procesos para fabricar recubrimientos para evitar el desgaste por abrasión, se observa de la Figura 42 que FCAW es el preferido, seguida de SMAW y GMAW. Esto coincide con lo expresado por las tres empresas (ver Tabla 12), las que indican que el proceso más usado para fabricar recubrimientos es FCAW, debido a su rapidez en la aplicación lo que genera una alta productividad y que requiere bajas habilidades del soldador. Por otro lado, aseveran que, en la minería del cobre, el proceso preferido para reparar y proteger sus equipos contra el desgaste es SMAW, simplemente por la facilidad de ser aplicado en terreno, a diferencia del FCAW que requiere de un taller. Las durezas reportadas por las empresas, de sus productos ofrecidos para proteger equipos contra el desgaste abrasivo, bordean el rango de 15 a 63 en escala Rockwell C, lo que coincide aproximadamente por lo expuesto en la Tabla 3.

De las opiniones vertidas durante las entrevistas (ver Tabla 12) se desprende que, en cuanto a materiales como los carburos de tungsteno, una empresa señaló, que mientras la tecnología no produzca el ahorro que justifique la inversión de dicho material, es complicado su masificación en el mercado. recubrimientos. Dos de las tres empresas aseguraron que la tecnología como PTAW, es de elevada inversión y con un retorno a largo plazo, lo cual no se justifica para el mercado actual, pues éste no es capaz de pagar por un material de tan elevado costo.

De la Tabla 7 se puede desprender que la duración de los recubrimientos depende de la aplicación en que se usen. Equipos como las palas o conos de chancadores son los que están sometidos a un ambiente mucho más agresivo en términos de desgaste. Por lo que, los recubrimientos dependen del nivel de producción como también de la dureza de la roca.

Lo anterior se puede entender, debido a la baja en el precio del cobre en los últimos 5 años (ver Figura 4), lo cual minimiza las posibilidades de desarrollo y búsqueda de nuevas alternativas para reducir el desgaste. Algunas opiniones de los entrevistados indican que las empresas mineras muchas veces optan por el reemplazo de piezas o componentes, en lugar de la reparación. Además, el ingreso de materiales con mejor resistencia al desgaste, se ven limitados por la experiencia probada en terreno por parte de las empresas mineras, lo cual muy pocas están dispuestas o disponibles para efectuar dichas pruebas en campo. Por lo que las empresas mineras prefieren seguir utilizando tecnología que esté aprobada por ellos antes de experimentar.

De todo esto, surgen algunas dudas como ¿por qué se prefiere el reemplazo de un componente en lugar de repararlo? o ¿por qué no se usan materiales con mejores resistencias al desgaste? Siendo que existen materiales para recubrir o reparar equipos en Chile. Además, se cuenta con empresas dedicadas a la mantención de piezas y equipos mineros que están sometidos a desgaste por abrasión. Las opiniones vertidas por las empresas son desde el punto de vista del proveedor, por lo que, para conocer la respuesta a esta inquietud, es que se deja propuesto como estudio futuro, en el

cual se centre en el punto de vista desde los usuarios de soluciones para proteger equipos contra el desgaste abrasivo (empresas mineras).

## 6.2 Evaluación de muestras obtenidas

De las muestras obtenidas, se puede desprender que hay presencia de aceros austeníticos, fundiciones blancas y carburos como solución contra el desgaste, donde en su mayoría son aceros con altos contenidos de Carbono y Cromo, lo que facilita la formación de carburos de Cromo, los cuales poseen una alta dureza.

De las micrografías realizadas en el laboratorio, se observan que los recubrimientos Stoodly 100 HC, Overlay 60 y Soltec 65 presentan estructuras dendríticas columnares de fase austenita, las que son características de fundiciones blancas hipereutécticas. En la placa bimetálica 1 se observan los carburos primarios  $M_7C_3$  (ver Figura 55), los cuales son los encargados de proveer la dureza y resistencia al desgaste de este tipo de recubrimientos, además, se observa la matriz de austenita eutéctica. Esta microestructura se compara con lo obtenido por Méndez [2], que se muestra en la Figura 21, donde los carburos primarios se presentan en forma de hexágono o bastones en el caso de los CCO hipereutécticos. En cambio, la placa bimetálica 2 presenta estructura de carburos hipoeutécticos, en donde se observa austenita primaria en forma de dendritas y, además, se observan los carburos  $M_7C_3$  eutécticos.

A pesar que en la encuesta online se indicó que el material preferido para proteger contra el desgaste abrasivo son los aceros martensíticos, no se observó en ninguna micrografía la microestructura martensítica.

En cuanto a la dureza de los recubrimientos, de la Tabla 14 se desprende que los recubrimientos Stoodly 100 HC y Postalloy 218 HD presentan las mayores durezas en escala Rockwell C, los que se comparan con las durezas presentadas por las fundiciones blancas, en la Tabla 3. Las placas bimetálicas presentan las segundas durezas más altas. Se observa en la Figura 48 que, para durezas cercanas a 50 Rockwell C, hay distintas resistencias al desgaste de los recubrimientos. Este, fue otro de los importantes resultados que determinó Kotecki [19].

En la Tabla 8 se observa que las placas bimetálicas 1 y 2 presentan la mejor resistencia al desgaste según procedimiento ASTM G65 A. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Duncan [21] para arena de Sílice como se muestra en la Figura 23. La placa bimetálica 2 posee la menor pérdida de masa comparada con la placa bimetálica 1 (ver Figura 45), lo cual se puede deber a que posee un mayor contenido de carbono, el cual fomenta la formación de carburos. A estos tipos de recubrimientos le siguen el Postalloy 218 HD y Stoodly 100 HC, este último, según su composición química, se considera como recubrimiento del tipo fundición blanca. El recubrimiento Postalloy 218 posee una mezcla de carburos los cuales no son especificados por el fabricante (la empresa que dispuso de este recubrimiento, mencionó que tampoco conoce la composición exacta). Los resultados de estos dos recubrimientos son comparables con los mostrados en la Figura 18 para fundiciones hipereutécticas.

En la Figura 44 se muestra la marca dejada por el ensayo ASTM G65 A en dos recubrimientos. En a) se muestra el recubrimiento E11018-M y en b) se muestra la placa bimetálica 1. Se aprecia la diferencia en las marcas debido a la longitud de estas, en las que, con la ayuda de un pie de metro, se midió la longitud de estas. La placa bimetálica tiene 3 [cm] de largo y el E11018-M tiene un largo de 5 [cm].

En la Figura 46 se muestra la evolución de la pérdida de masa [gr], de los recubrimientos evaluados según procedimiento ASTM G65 A. En ella se aprecia que el desgaste sigue un comportamiento lineal para todos los recubrimientos.

En la Figura 47 se muestra la pérdida de material al aplicar el ensayo ASTM G65 A versus el %C presente en cada una. Se observa que a medida que los recubrimientos poseen mayor %C, se pierde menos masa en el ensayo. Este comportamiento fue determinado por Kotecki [19], el cual concluye que el %C es el factor que determina la resistencia al desgaste de un recubrimiento.

Para hacer un estudio más acucioso, se requiere de una mayor participación de empresas otorgando muestras para ser caracterizadas según microestructuras, dureza y desgaste. Esto, con el fin de obtener mayor información y participación de algunos materiales para proteger equipos contra el desgaste abrasivo.

## 7 Conclusiones

De los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede determinar que los materiales usados para recubrir equipos o piezas para protegerlos contra el desgaste por abrasión en la industria minera del cobre en Chile son los aceros austeníticos, martensíticos, fundiciones blancas, placas bimetálicas, siendo estos últimos los que presentan la menor pérdida de masa según procedimiento ASTM G65 A dentro de los recubrimientos estudiados. La placa bimetálica perdió 0,15 [gr] durante el ensayo, comparado con los 8,37 [gr] que perdió el recubrimiento 8018-C2. La dureza observada de los recubrimientos observados está en el rango de 11 a 58 en escala Rockwell C. Se logró obtener micrografías de los recubrimientos obtenidos, los que presentaron microestructuras típicas de carburos de cromo, fundiciones blancas y aceros austeníticos, en cada caso.

De este trabajo, no se pudo emitir un veredicto objetivo del estado tecnológico, en cuanto a soluciones para protección contra el desgaste, en Chile, debido a la baja participación de empresas en este trabajo. En cuanto a las tecnologías para fabricar recubrimientos duros, se infiere que la técnica preferida por el mercado es el SMAW, y FCAW. Este último, se prefiere por la alta tasa de deposición del material, además, de ser una técnica fácil de operar.

Esta realidad difiere mucho de lo que se puede observar en países como Canadá. Donde sistemas de materiales como los WC, que poseen uno de la mejor resistencia contra el desgaste, son los más utilizados. Por otra parte, tecnologías como PTAW, que producen recubrimientos con bajo porcentaje de dilución son la técnica de preferencia. En cambio, en Chile, los procesos preferidos siguen siendo tecnologías tradicionales como SMAW o FCAW. Y en el caso de los materiales, se siguen prefiriendo, aceros austeníticos, martensíticos, fundiciones y placas bimetálicas. Este es un claro indicio que la industria chilena relacionada con recubrimientos duros como solución contra el desgaste, aún tiene un largo camino por desarrollar e investigar nuevas oportunidades de mejoras.

Hoy en Chile, las tecnologías de materiales, como las placas bimetálicas o fundiciones blancas, presentan la mejor solución para proteger contra el desgaste por abrasión. Esta resistencia al desgaste, se debe a la presencia de carburos de Cromo, los cuales confieren una alta dureza a la mezcla con la matriz austenítica. Seguido de estos materiales, le siguen las fundiciones blancas, las cuales también, presentan buena resistencia al desgaste.

Las empresas entrevistadas indicaron que la decisión de escoger un material u otro, se basa en la experiencia previa del cliente, y aunque, se le presente un material de mejores características contra el desgaste, si no lo ha probado en terreno durante un largo tiempo, no se cambiará. Esta aseveración, invita a conocer las opiniones de la contra parte, pues la decisión de escoger un producto para su uso en la minería se debe basar en una decisión técnica-económica, complementada con la experiencia, pero no solo basándose en esta última, lo cual puede conducir a errores e incurrir en gastos innecesarios. Es por esto, que se propone un estudio futuro que explore las opiniones de los usuarios de soluciones para proteger contra el desgaste abrasivo.

Por último, las empresas entrevistadas indican que, en cuanto a los procesos, si la inversión de adquirir una nueva técnica para fabricar recubrimientos, no genera un retorno a corto plazo de la inversión, se opta por otra tecnología de bajo riesgo económico.

Con el presente trabajo se logró hacer una evaluación del estado tecnológico de los recubrimientos resistentes a la abrasión en Chile, donde se encuentran tecnologías para fabricar recubrimientos como FCAW y SMAW, y los materiales presentes son placas bimetálicas (CCO), aceros austeníticos y fundiciones blancas.

## Bibliografía

- [1] MENDEZ, P. 2015. Recubrimientos Duros para Protección al Desgaste y Petróleo y Minería. COPIME LA REVISTA 32: 50-57.
- [2] MENDEZ, P; BARNES, N; BELL, K; BORLE, L; GAJAPATHI, S; GUEST, S; IZADI, H; KAMYABI, A y GOOD, G. 2014. Welding processes for wear resistant overlay. Journal of Manufacturing Processes 16: 4-25.
- [3] RODE WELDING. Weld Overlay. [en línea]  
<https://www.rodewelding.com/weldoverlay.html>. [consulta: 22 Octubre 2016]
- [4] COCHILCO. 2016. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1996 - 2015. Chile.
- [5] MINERÍA CHILENA. 2016. Chancado y molienda: Mayores exigencias por el mineral de baja ley. [en línea] <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/chancado-molienda-mayores-exigencias-mineral-baja-ley/> [consulta: 09 Diciembre 2016]
- [6] ASTM. 2004. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Estados Unidos.
- [7] BANCO CENTRAL DE CHILE. 2015. Cuentas nacionales de Chile.
- [8] CODELCO. 2014. Resultados CODELCO Primer Trimestre 2014. Chile
- [9] COCHILCO. Estadísticas. [en línea]  
[http://www.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo\\_metal=1](http://www.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1) [consulta: 05 Junio 2016]
- [10] COCHILCO. 2014. Identificación de insumos críticos para el desarrollo de la minería en Chile.
- [11] MONSALVE, A. 2004. Diagnóstico y análisis de fallas. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago. Chile.
- [12] STACHOWIAK, G y BATCHELOR, A. 2006. Engineering Tribology. ·3ª ed. Australia. Butterworth Heinemann. 744p.
- [13] CORRAL ESPINOZA. 2014. Sistema de soldeo. [en línea]  
<https://corralesespinoza.wordpress.com/2014/05/29/sistema-de-soldo/> [consulta: 22 Octubre 2016]
- [14] ESAB. Proceso alambre tubular [en línea]  
<http://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-fcaw-alambre-tubular-relleno-de-fundente-definiciones-del-proceso.cfm> [consulta: 10 Diciembre 2016]
- [15] BADISCH, E y ROY, M. 2013. Hardfacing for Wear, Erosion and Abrasion. En: *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. Springer. India.
- [16] CALLISTER, W. 2000. Ciencia e ingeniería de los materiales. 6ª ed. Reverté.
- [17] HIGUIERA, O; MORENO, C y SUAREZ, B. 2010. Evolución microestructural del acero austenítico al manganeso sometido a tratamiento térmico de temple y revenido. Revista Ingenierías Universidad de Medellín 9: 195-206.
- [18] MELLOR, B. 2006. Surface coatings for protection against wear. Woodhead publishing limited. Reino Unido. 415p.



- [19] KOTECKI, D y OGBORN, J. 1995. Abrasion Resistance of Iron-Based Hardfacing Alloys. *Welding Research Supplement*, 74 (8): 269-279.
- [20] BORLE, S; GALL, I y MENDEZ, P. 2015. Primary Chromium Carbide Fraction Control with Variable Polarity SAW. *Welding Journal* 94: 1-7-
- [21] DUNCAN, S. 2016. Evaluation of Rock Particle Media Shape Contribution to Abrasive Wear. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mining Engineering. Edmonton, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, School of Mining and Petroleum Engineering. 135p.
- [22] ME ELECMETAL. 2016. Memoria anual 2014-2015. [en línea] <http://www.me-elecmetal.com/es/memorias.php>. [consulta: 06 Junio 2016].
- [23] INDURA. Fichas técnicas [en línea] <http://www.indura.cl/Web/CL/Menu/2663/Metalmecánica> [consulta: 06 Junio 2016]
- [24] SOLTEC. Soltec 65 [en línea] <http://intranet.soltec.cl/emansys/content/bin/75/ft.soltec65.pdf> [consulta: 10 Diciembre 2016]
- [25] POSTALLOY. Ficha técnica Postalloy 228 HD [en línea] [http://hardfacetechnologies.com/postle\\_hft/pdfs/parts/218HD.pdf](http://hardfacetechnologies.com/postle_hft/pdfs/parts/218HD.pdf) [consulta: 10 Diciembre 2016]
- [26] STOODY. Stoddy 100 HC [en línea] [http://victortechnologies.com/IM\\_Uploads/DocLib\\_7750\\_CRCW008.pdf](http://victortechnologies.com/IM_Uploads/DocLib_7750_CRCW008.pdf) [consulta: 12 Diciembre 2016]

## Glosario

<b>Abrasión</b>	Es un tipo de desgaste que se produce por el paso de partículas duras sobre una superficie.
<b>Desgaste</b>	Falla de la superficie de un material debido al movimiento relativo entre dos superficies, lo que produce deformación plástica o pérdida de material.
<b>Dureza</b>	Propiedad mecánica de los materiales que indica la resistencia de un material a ser deformado plásticamente al aplicar una carga estática.
<b>Fricción</b>	Generación de calor debido al deslizamiento relativo entre dos superficies.
<b>Lubricación</b>	Método utilizado para disminuir el desgaste y fricción.
<b>Recubrimiento duro</b>	Material que se aplica sobre una superficie, generalmente un acero estructural, el cual posee una buena resistencia al desgaste y dureza elevada.
<b>Tribología</b>	Ciencia que estudia la relación entre desgaste, fricción y lubricación.

## Anexo A: Encuesta a Proveedores

La presente encuesta hace parte del trabajo investigativo de Jonatan Marín, estudiante de último año de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile. Esta encuesta busca conocer e identificar las necesidades relacionadas con recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión/erosión en aplicaciones relacionadas a la minería del cobre. Lo anterior también está asociado a la identificación de los principales procesos y materiales que se usan en la industria actual. La información obtenida de esta encuesta será un enorme aporte a su trabajo de título para así optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico.

Se agradece de antemano el tiempo y la disposición en responder esta encuesta.

Atte

Jonatan Marín

Estudiante Ing. Civil Mecánica

Universidad de Chile

mail: [jonatan.marin@ing.uchile.cl](mailto:jonatan.marin@ing.uchile.cl)

Fono: +569 99861136



1 **Nombre Empresa:** \_\_\_\_\_

2 **Nombre contacto:** \_\_\_\_\_

3 **Mail:** \_\_\_\_\_

4 **Número de teléfono/celular:** \_\_\_\_\_

5 **La empresa ofrece:** *Selecciona todos los que correspondan.*

- Consumibles de soldadura para protección antidesgaste
- Equipos de soldadura
- Materiales Antidesgaste (planchas bimetálicas, dientes de palas, entre otros)
- Servicios de mantención contra desgaste abrasivo
- Otro: \_\_\_\_\_

6 **¿Cuáles son los sistemas de materiales que utilizan en aplicaciones antidesgaste?** *Selecciona todos los que correspondan.*

- Matriz de acero + carburos de cromo
- Matriz de acero + carburos de tungsteno

- Aceros Martensíticos
- Aceros Austeníticos
- Aceros Bainíticos
- Otro: \_\_\_\_\_

7 **¿Cuál es la dificultad de adquirir estos materiales?** *Marca solo un óvalo.*

1            2            3

Baja    O            O            O    Alta

8 **Mencione durezas promedio de sus aplicaciones (indicar escala, Rockwell, Brinell o Vickers)**

\_\_\_\_\_

9 **¿Cuáles son las técnicas por las que son aplicados?** *Selecciona todos los que correspondan.*

- Antorcha Oxiacetilénica
- SMAW
- FCAW
- GMAW
- SAW
- PTAW
- Otro: \_\_\_\_\_

10 **¿Cuál es la vida útil de sus productos o servicio de mantención?**

11 **La colaboración entregada en esta encuesta es muy importante para este trabajo, pero una instancia de conversación sería mejor aún. ¿Es posible concretar una reunión para hablar de forma distendida respecto al tema central de esta encuesta?** *Marca solo un óvalo.*

- SI
- NO

Con la tecnología de



## Anexo B: Lista de personas contactadas para participar de este trabajo de título

Ítem	Nombre	Empresa	Descripción	Cargo	Teléfono	E-mail	web
1	Matías Guzmán	Aceros Otero	Principal proveedor de aceros, plásticos de ingeniería y aluminio, en forma de barras y planchas.	Especialista en aplicaciones	56992739039	<a href="mailto:mguzman@acerosotero.cl">mguzman@acerosotero.cl</a>	<a href="http://www.acerosotero.cl">www.acerosotero.cl</a>
2	Jorge Andrade	SODEL CHILE	Proveedor de electrodos, tubos y alambres. Servicio técnico de reparación	Gerente General	56228119602	<a href="mailto:jorge.andrade@sodel.cl">jorge.andrade@sodel.cl</a>	<a href="http://www.sodel.com">www.sodel.com</a>
3	Ernesto Soto			Ingeniero Asesor Técnico	56984483161	<a href="mailto:ernesto.soto@sodel.cl">ernesto.soto@sodel.cl</a>	
4	Esteban Aravena	MINETEC	Proveedor de tolvas y baldes para minería, además presta servicio de mantenimiento.	Product Manager	56950908667	<a href="mailto:earavena@minetec.cl">earavena@minetec.cl</a>	<a href="http://www.minetec-industries.com">www.minetec-industries.com</a>
5	Boris Rakela	Technosteel	Proveedor de herramientas, respuestos y piezas para la perforación de producción y exploración minera	Rotary Sales	56999194076	<a href="mailto:brakela@technosteel.cl">brakela@technosteel.cl</a>	<a href="http://www.technosteel.cl">www.technosteel.cl</a>
6	Max Flores	Austin Ingenieros	Proveedor de tolvas y baldes, además presta servicio de mantenimiento.	Gerente General	56997504372	<a href="mailto:maxf@austinging.cl">maxf@austinging.cl</a>	<a href="http://www.austinging.cl">www.austinging.cl</a>
7	Harry Ward	Sandvik	Proveedor de tolvas y baldes, además presta servicio de mantenimiento.	Product Support Manager	56942635574	<a href="mailto:harry.ward@sandvik.com">harry.ward@sandvik.com</a>	<a href="http://www.sandvik.com">www.sandvik.com</a>
8	Alexis Benavides	Lincoln Electric	Proveedor de equipos de soldadura y consumibles	Director centro tecnológico Soldadura	Sin información	<a href="mailto:alexis_benavides@lincoln-electric.cl">alexis_benavides@lincoln-electric.cl</a>	<a href="http://www.lincolnelectric.com">www.lincolnelectric.com</a>
9	Jorge Toro	ME Elecmetal	Proveedor de baldes, placas antidesgaste, dientes de palas	Ingeniero de Procesos	56722587690	<a href="mailto:jorge.toro@talleres.cl">jorge.toro@talleres.cl</a>	<a href="http://www.me-elecmetal.com">www.me-elecmetal.com</a>
10	Mauricio Ibarra	Indura	Proveedores de equipos y consumibles de soldadura	Gerente de Investigación y desarrollo	5695428976	<a href="mailto:mibarra@indura.net">mibarra@indura.net</a>	<a href="http://www.indura.net">www.indura.net</a>
11	Héctor Fritz			Ingeniero de Desarrollo	56991628191	<a href="mailto:hfritz@indura.net">hfritz@indura.net</a>	<a href="http://www.indura.net">www.indura.net</a>
12	Benjamín Cordero	SSAB	Proveedor de planchas antidesgaste y barras redondas	Ingeniero de Ventas, Special Steels Hardox	56975176160	<a href="mailto:benjamin.cordero@ssab.com">benjamin.cordero@ssab.com</a>	<a href="http://www.ssab.cl">www.ssab.cl</a>
13	Matias Aranda	Ford Steel Chile	Especialista en aceros antiabrasivos (planchas bimetalicas, dientes y mantenimiento)	Sin información	56224811818	<a href="mailto:maranda@fordsteelchile.cl">maranda@fordsteelchile.cl</a>	<a href="http://www.fordsteelchile.cl">www.fordsteelchile.cl</a>
14	Grant Harvey	Hobart	Proveedores de equipos y consumibles de soldadura	Senior Vice President	Sin información	<a href="mailto:dgharvey72@gmail.com">dgharvey72@gmail.com</a>	<a href="http://www.hobart.com.mx">http://www.hobart.com.mx</a>
15	Ravi Menon	Stoody	Proveedores de equipos y consumibles de soldadura	Sin información	Sin información	<a href="mailto:Ravi_Menon@thermadyne.com">Ravi_Menon@thermadyne.com</a>	<a href="http://www.stoodyind.com">http://www.stoodyind.com</a>
16	Claudio Vargas	Welmek	Tratamiento y revestimiento de metales	Director de desarrollo y ventas	56522337006	<a href="mailto:cvargas@welmek.com">cvargas@welmek.com</a>	<a href="http://www.welmek.com">www.welmek.com</a>
17	Victor Sagredo	Kennametal	Empresa dedicada al diseño y venta de productos contra el desgaste	Ingenierías de aplicación	56222641177	<a href="mailto:victor.sagredo@kennametal.com">victor.sagredo@kennametal.com</a>	<a href="http://www.kennametal.com">www.kennametal.com</a>
18	Alejandro Flores	Incometal	Fundición de aceros especiales	Gerente técnico	56994501097	<a href="mailto:aflores@incometal.cl">aflores@incometal.cl</a>	<a href="http://www.incometal.cl">www.incometal.cl</a>
19	Ramon Ojeda	Industrial Comercial Chile	Insumos y equipos de soldadura	Gerente General	Sin información	<a href="mailto:ramonluis.ojeda@comercialchile.cl">ramonluis.ojeda@comercialchile.cl</a>	<a href="http://www.comercialchile.cl">www.comercialchile.cl</a>
20	Cristian Salinas	Magotteaux	Proveedor de soluciones contra para proteger contra el desgaste	Sin información	56228376900	<a href="mailto:cristian.salinas@magotteaux.com">cristian.salinas@magotteaux.com</a>	<a href="http://www.proacer.cl">www.proacer.cl</a>
21	Hector Toro	MolyCop	Principales proveedores de bolas de molinenda	Sin información	56223370400	<a href="mailto:hector.toro@mlycop.cl">hector.toro@mlycop.cl</a>	<a href="http://www.molycop.com">www.molycop.com</a>

## Anexo C: Preparación de muestras para ensayo ASTM G65

De la Figura 57 a la Figura 65 se muestra el antes y el después de la preparación de las muestras para ser ensayadas según el procedimiento ASTM G65.

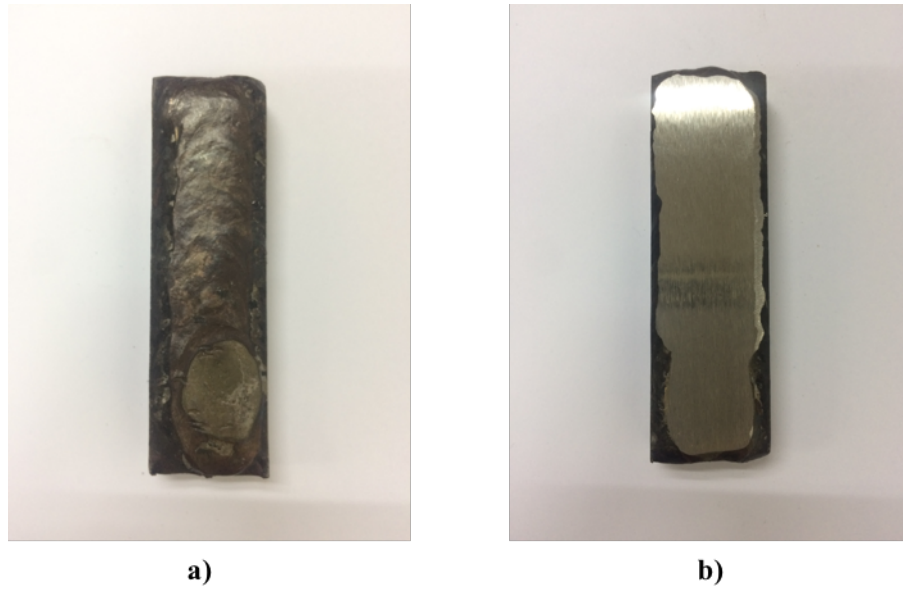


Figura 57. a) Se observa la muestra Soltec 65 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.

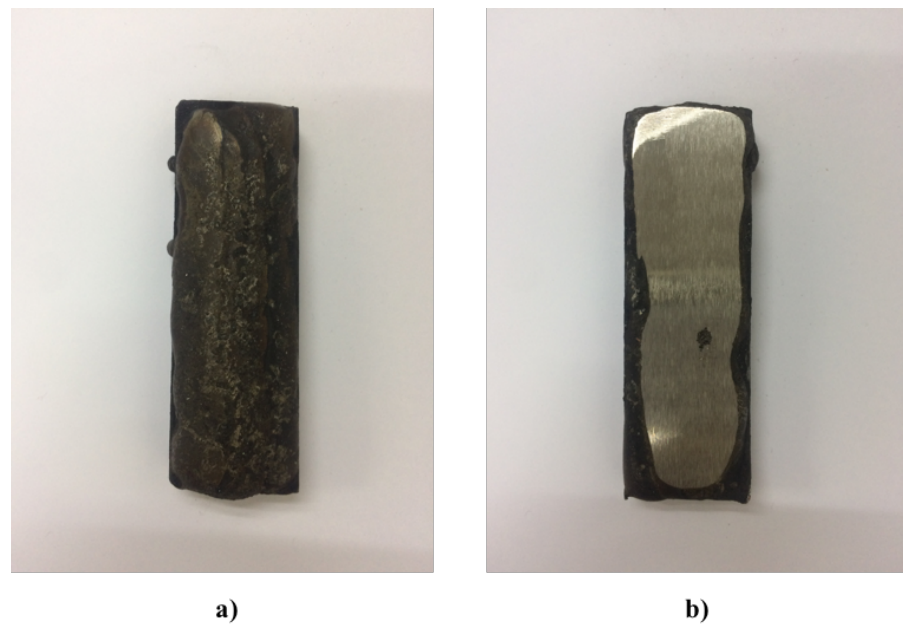
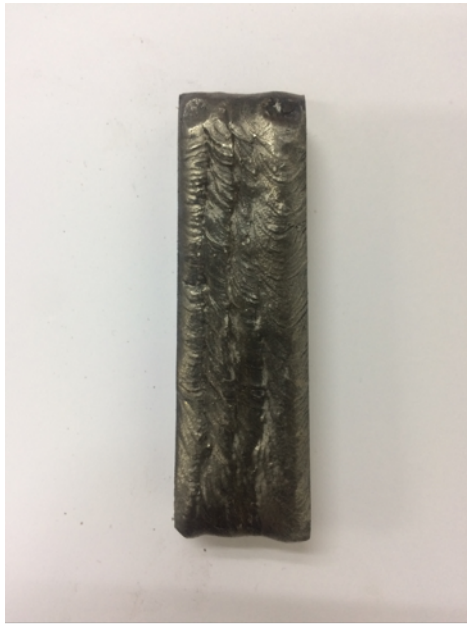
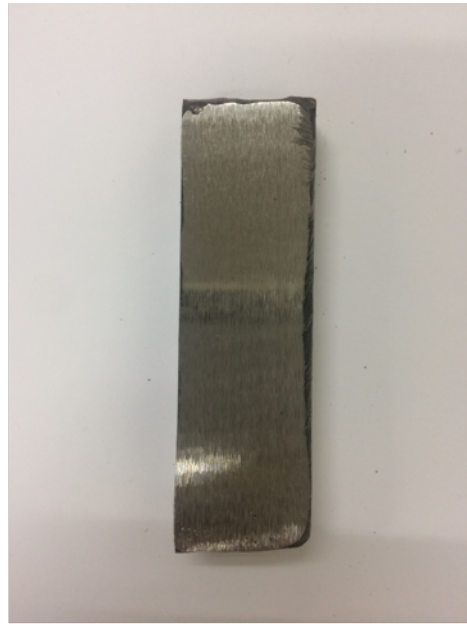


Figura 58. a) Se observa la muestra Stoody 100 HC en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



a)



b)

Figura 59. a) Se observa la muestra E8018-C2 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



a)



b)

Figura 60. a) Se observa la muestra E11018-M en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



**a)**



**b)**

Figura 61. a) Se observa la muestra Postalloy 218 HD en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



**a)**



**b)**

Figura 62. a) Se observa la muestra Weldmang Crom en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.





**a)**



**b)**

Figura 63. a) Se observa la muestra Overlay 60 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



**a)**



**b)**

Figura 64. Se observa la muestra placa bimetálica 1 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.



**a)**



**b)**

Figura 65. Se observa la muestra placa bimetalica 2 en bruto y en b) se presenta la muestra luego de pasar por la fresa y la rectificadora.

#### **Anexo D: Corte de muestras para microscopia**

De la Figura 66 a la Figura 74 se observan las muestras obtenidas mediante la técnica de electroerosión, las que se encapsulan para luego observar al microscopio óptico.

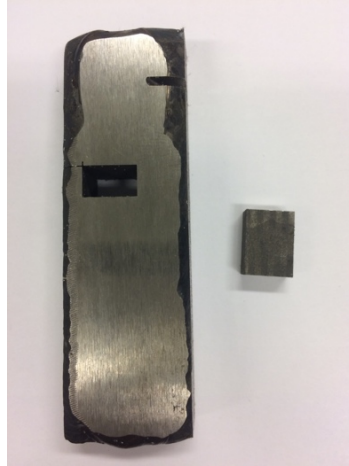


Figura 66 .Muestra Soltec 65 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

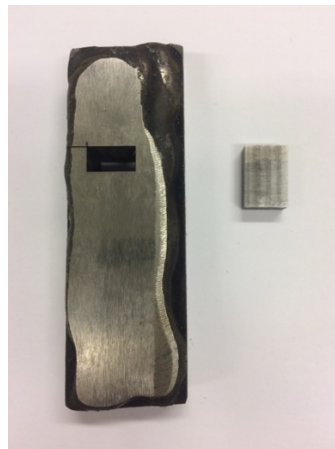


Figura 67. Muestra Postalloy 218 HD cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

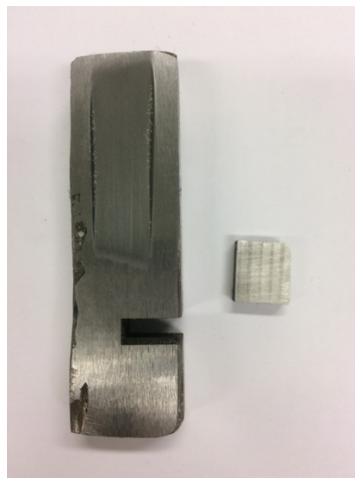


Figura 68. Muestra E11018-M cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

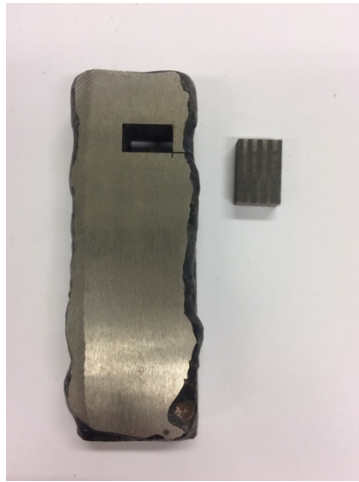


Figura 69. Muestra Weldmang Crom cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

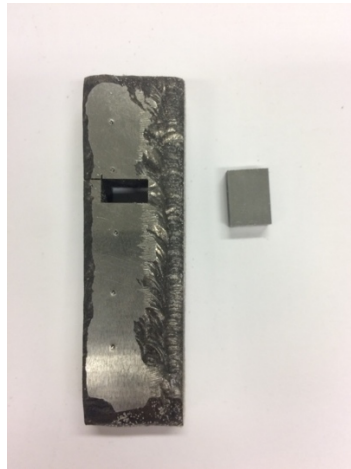


Figura 70. Muestra E8018-C2 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

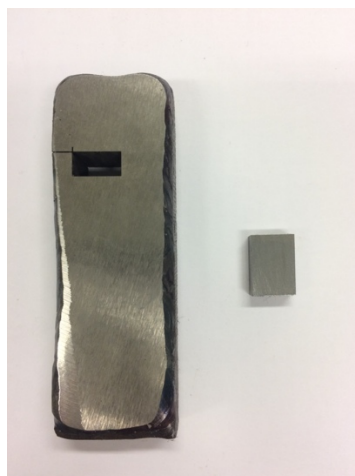


Figura 71. Muestra Overlay 60 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

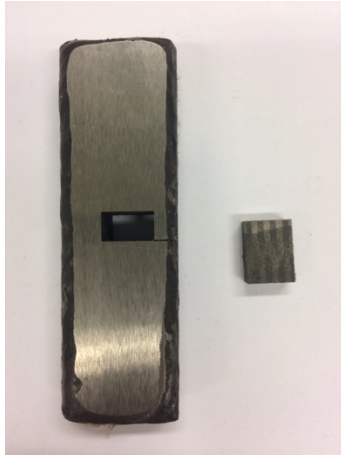


Figura 72. Muestra Stoody 100 HC cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

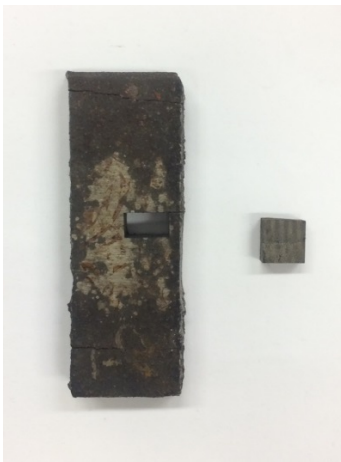


Figura 73. Muestra Placa bimetálica 1 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

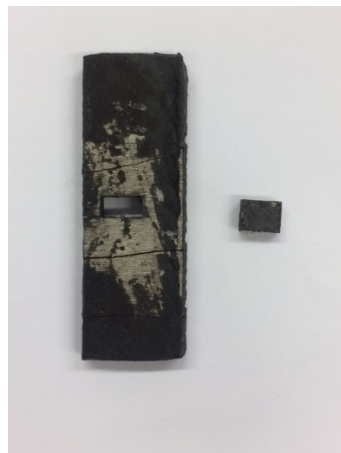


Figura 74. Muestra Placa bimetálica 2 cortada por electroerosión para ser analizado en microscopio.

## Anexo E: Resultados ASTM G65

A continuación, se presentan los resultados del ensayo ASTM G65 aplicados a las muestras obtenidas. El ensayo se realizó sobre una muestra de cada tipo de material obtenido de las empresas que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo de investigación. Para el cálculo de la pérdida en volumen se considera una densidad de  $7.850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ .

### E8018-C2:

En la Tabla 15 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del electrodo E8018, y en la Figura 75 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 15. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento E8018-C2.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	2,35
766	4,07
1149	5,48
1532	6,74
1915	8,37

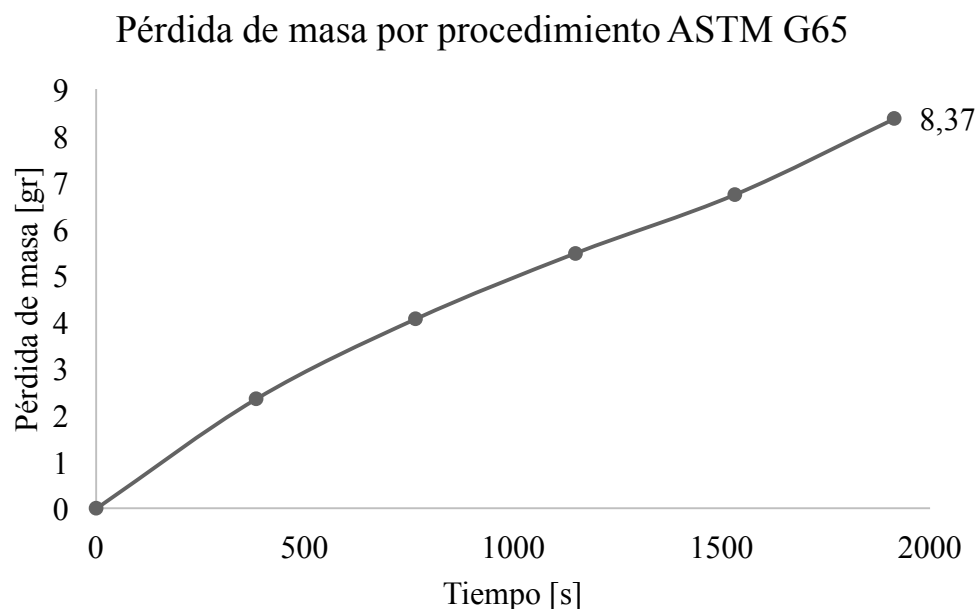


Figura 75. Gráfico de masa vs tiempo para electrodo E8018-C2 durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 76 a) se muestra el ejemplar antes de ser ensayado y en b) la marca resultante de aplicar el ensayo.

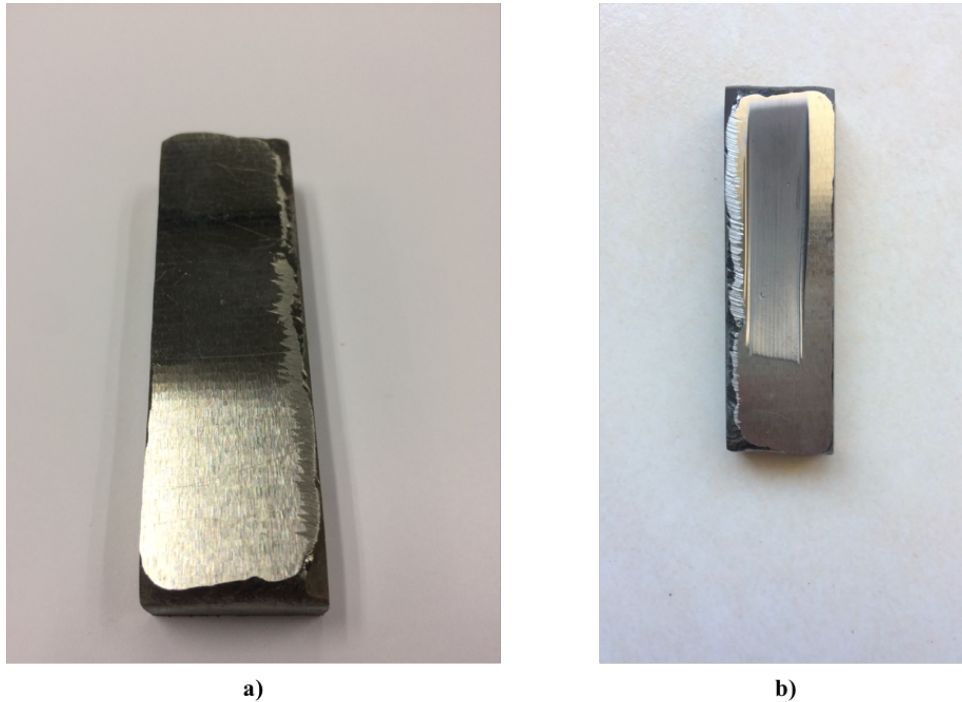


Figura 76. a) Muestra del recubrimiento E8018-C2 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

**E11018-M:**

En la Tabla 16 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del electrodo E11018-M, y en la Figura 77 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 16. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento E11018-M.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	2,25
766	3,81
1149	5,14
1532	6,28
1915	7,57

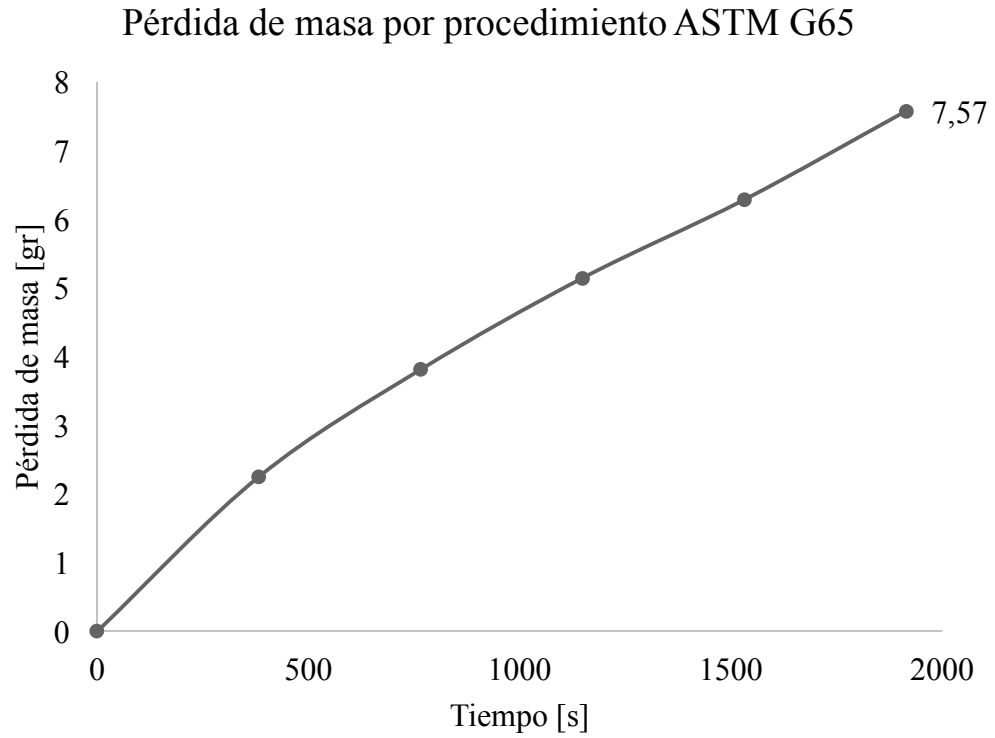


Figura 77. Gráfico de masa vs tiempo para electrodo E11018-M durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 78 a) se observa la muestra antes de ser ensayada, y en b) se observa la marca dejada por procedimiento ASTM G65.

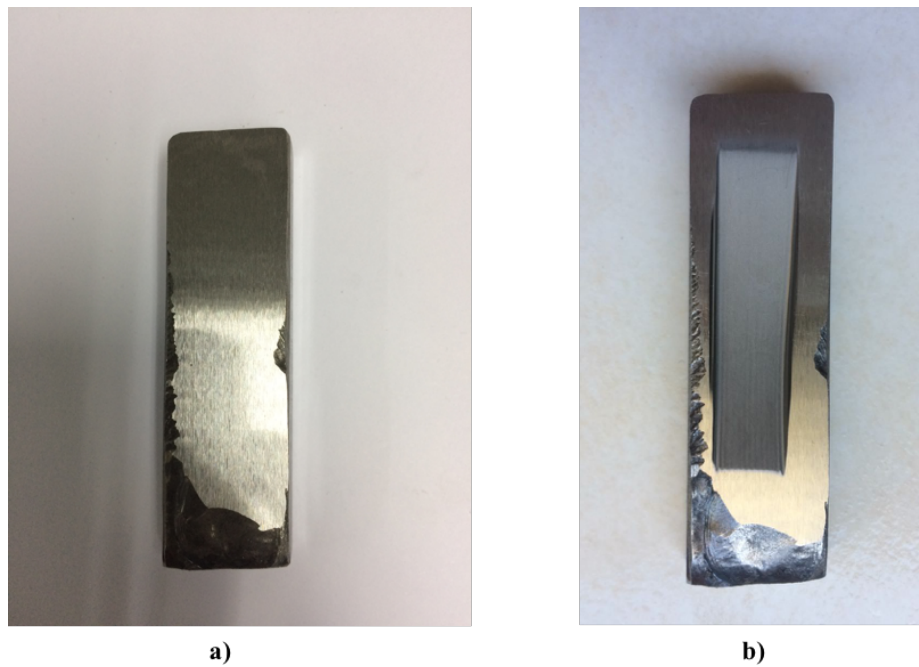


Figura 78. a) Muestra del recubrimiento 11018-M antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.



### Weldamang Crom:

En la Tabla 17 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del recubrimiento Weldmang Crom, y en la Figura 79 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 17. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Weldmang Crom.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	1,22
766	2,21
1149	3,28
1532	4,09
1915	5,29

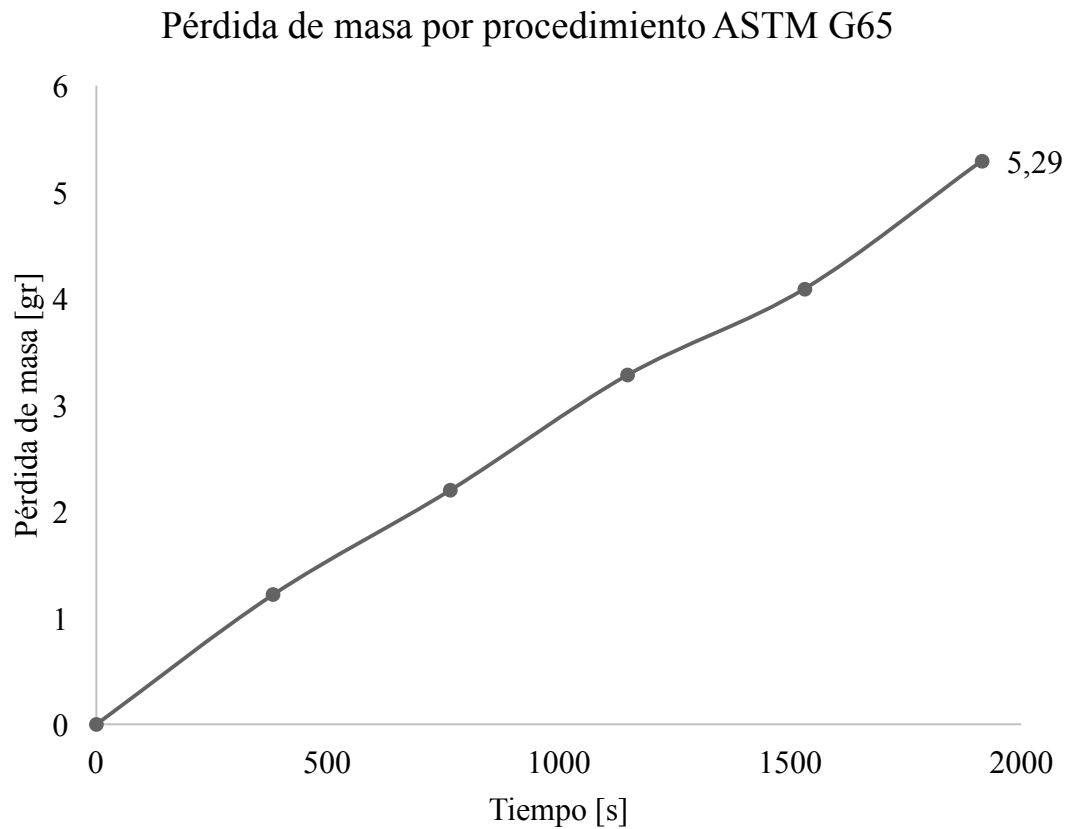


Figura 79. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Weldmang Crom durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 80 a) se observa la muestra antes de ser ensayada y en b) se presenta la marca dejada por el ensayo.

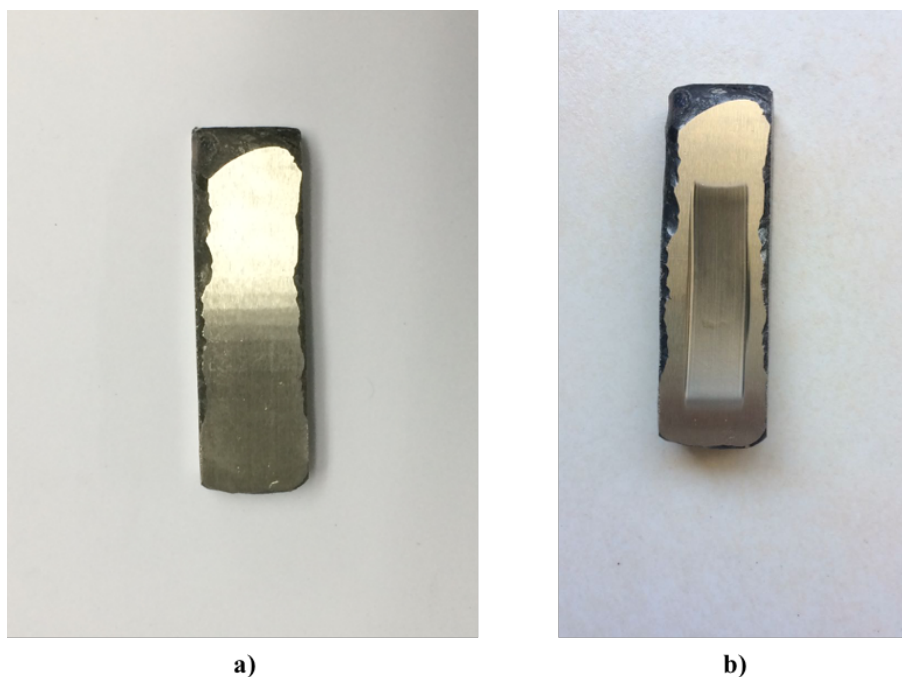


Figura 80. a) Muestra de recubrimiento Weldmang Crom antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

**Soltec 65:**

En la Tabla 18 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del recubrimiento Soltec 65, y en la Figura 81 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 18. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Soltec 65.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	0,64
766	1,11
1149	1,48
1532	1,99
1915	2,33

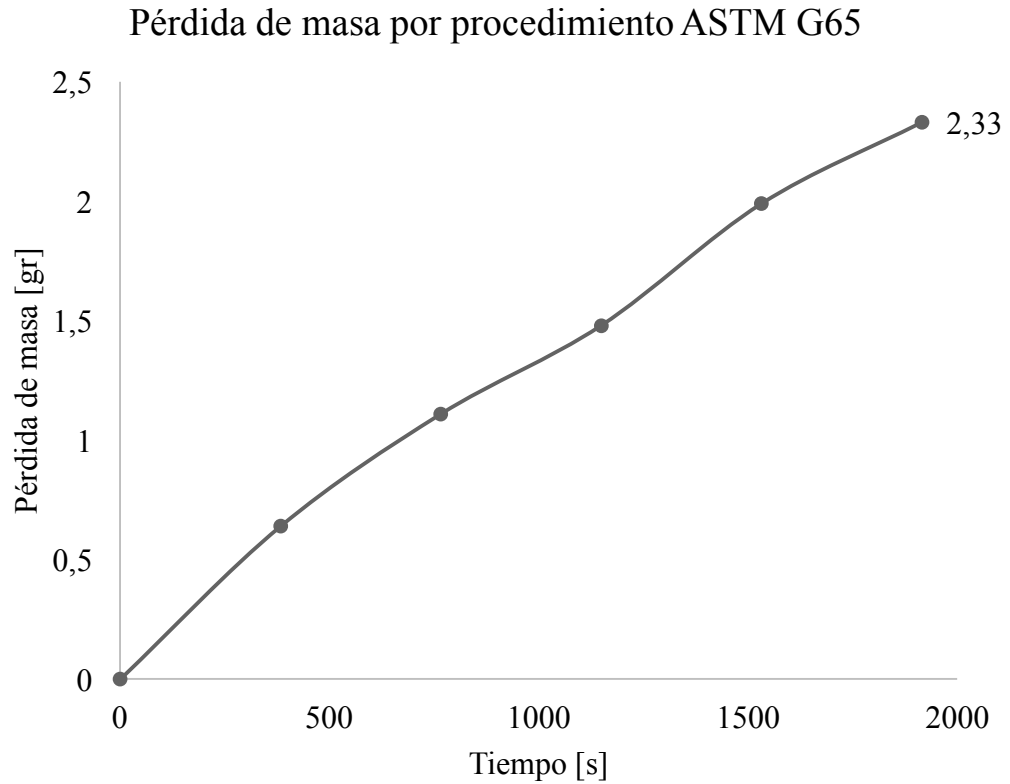


Figura 81. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Soltec 65 durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 82 se presenta el resultado de aplicar el ensayo ASTM G65 sobre el recubrimiento Soltec 65. En a) se muestra uno de los tres ejemplares preparados para el ensayo, y en b) se muestra otra muestra a la cual fue aplicado el ensayo.

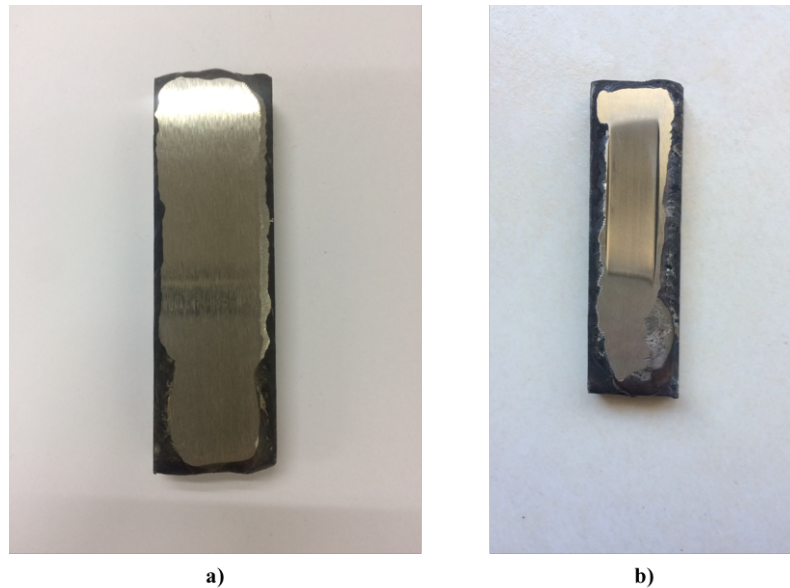


Figura 82. a) Una de las muestras del recubrimiento Soltec 65 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

### Overlay 60:

En la Tabla 19 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del recubrimiento Overlay 60, y en la Figura 83 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 19. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Overlay 60.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	0,46
766	0,79
1149	1,11
1532	1,37
1915	1,68

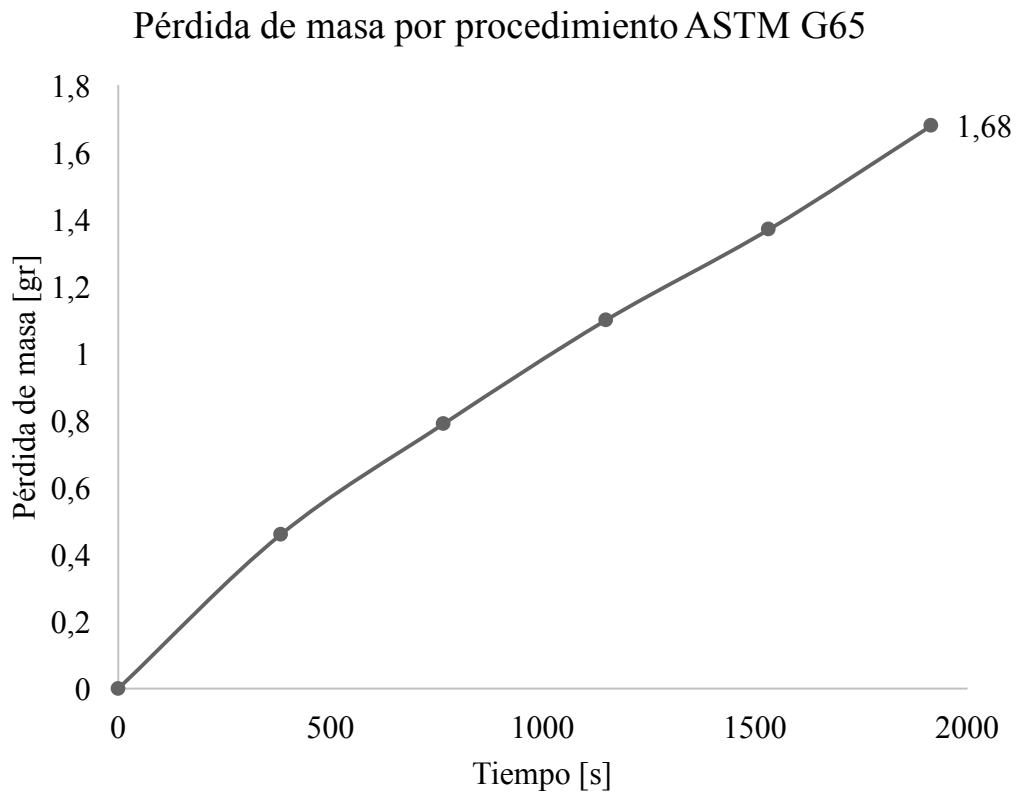


Figura 83. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Overlay 60 durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 84 a) se presenta una muestra antes del ensayo y en b) se muestra la marca dejada en la muestra después de realizar el ensayo.

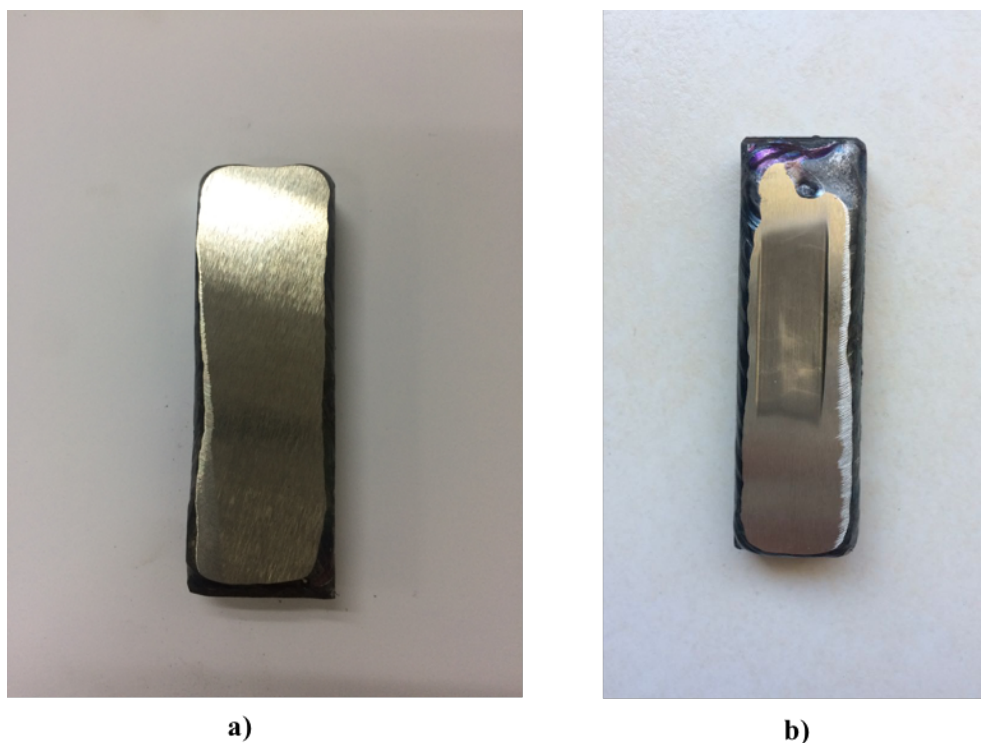


Figura 84. a) Una de las muestras del recubrimiento Overlay 60 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

#### Postalloy 218HD:

En la Tabla 20 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del recubrimiento Postalloy 218HD, y en la Figura 85 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 20. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Postalloy 218HD.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0,00
383	0,05
766	0,11
1149	0,14
1532	0,18
1915	0,22

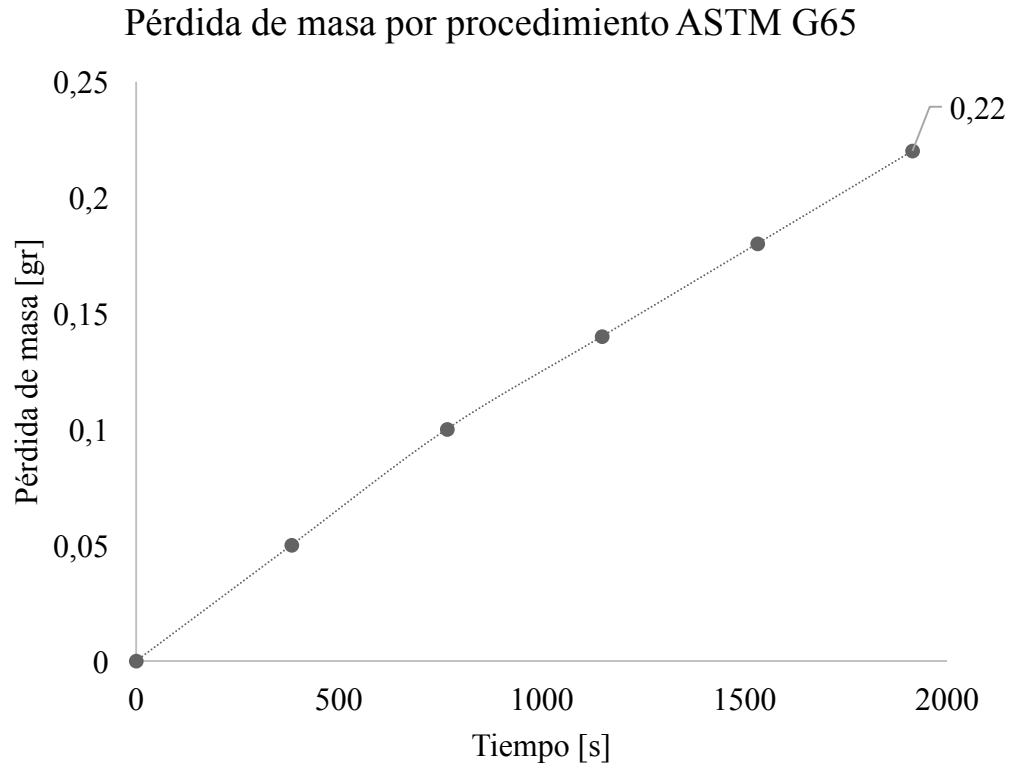


Figura 85. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Postalloy 218HD durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 86 a) se observa la muestra antes de ser ensayada y en b) se presenta la muestra luego del ensayo.

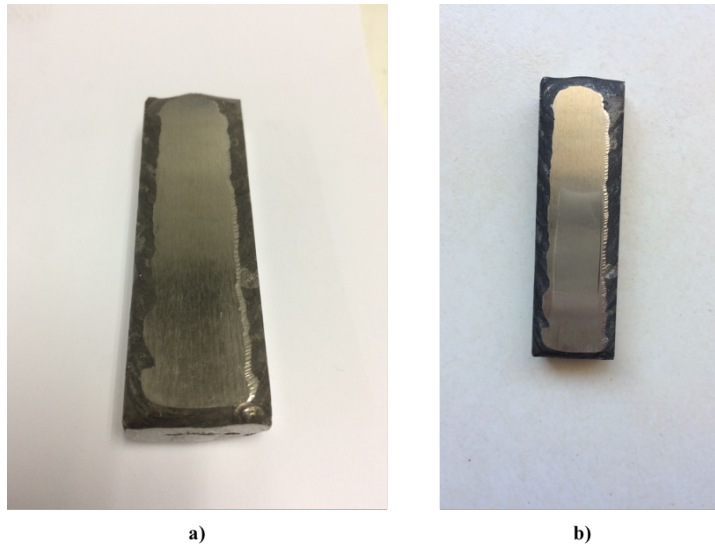


Figura 86. a) Muestra de recubrimiento Postalloy 218HD antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

### Stoody 100 HC:

En la Tabla 20 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste del recubrimiento Stoody 100 HC, y en la Figura 87 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 21. Resultados ensayos ASTM G-65 para recubrimiento Stoody 100 HC.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0
383	0,05
766	0,1
1149	0,14
1532	0,19
1915	0,24

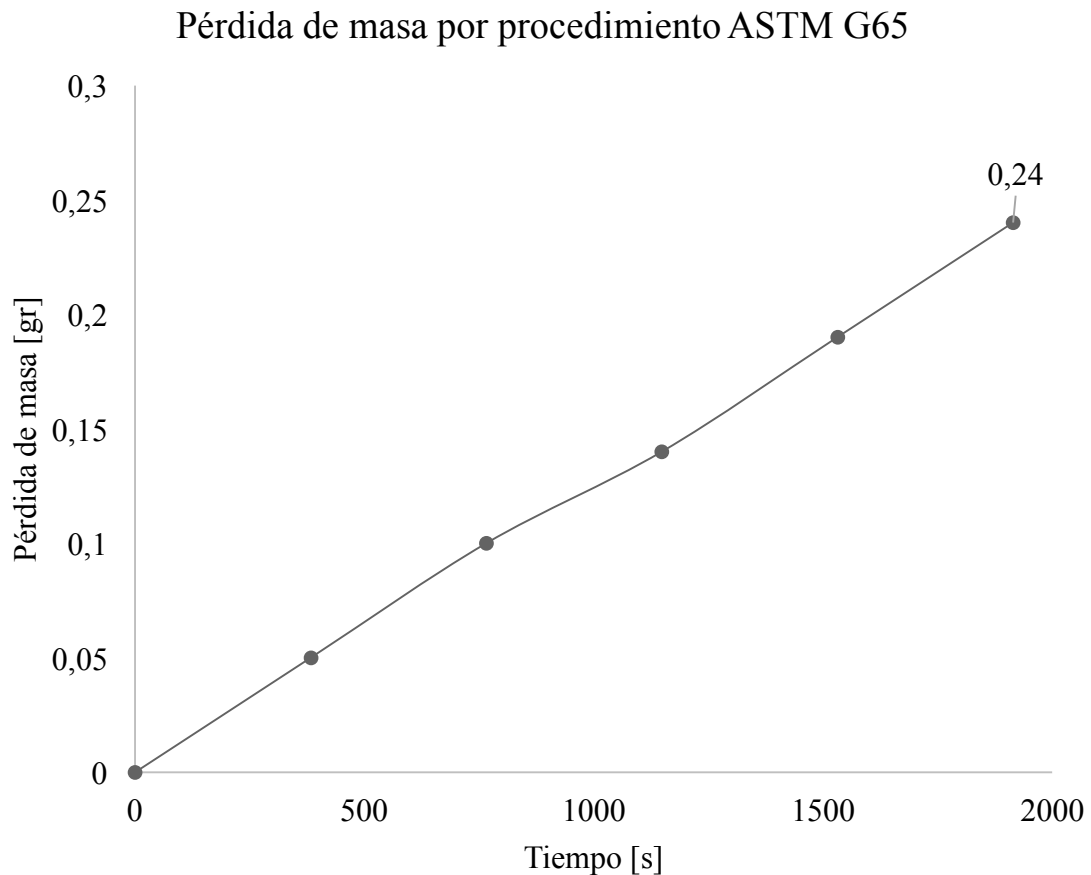


Figura 87. Gráfico de masa vs tiempo para recubrimiento Stoody 100 HC durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 88 a) se observa la muestra antes de ser ensayada y en b) se observa la marca luego de realizar el ensayo.

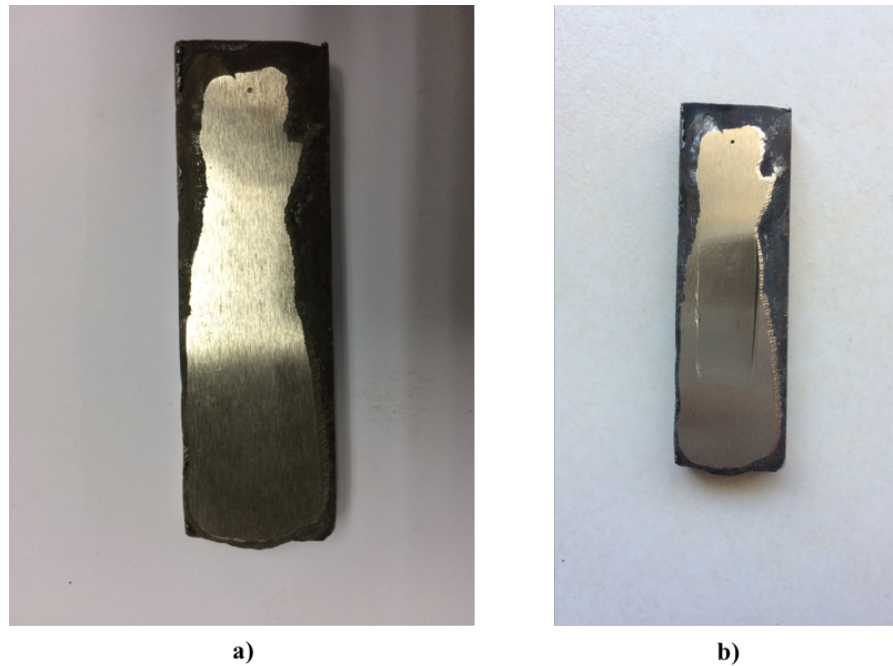


Figura 88. a) Muestra de recubrimiento Stoody100 HC antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

### Placa bimetalica 1:

En la Tabla 21 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste de la placa bimetalica 1, y en la Figura 89 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 22. Resultados ensayos ASTM G-65 para la placa bimetalica 1.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0
383	0,03
766	0,06
1149	0,09
1532	0,12
1915	0,15



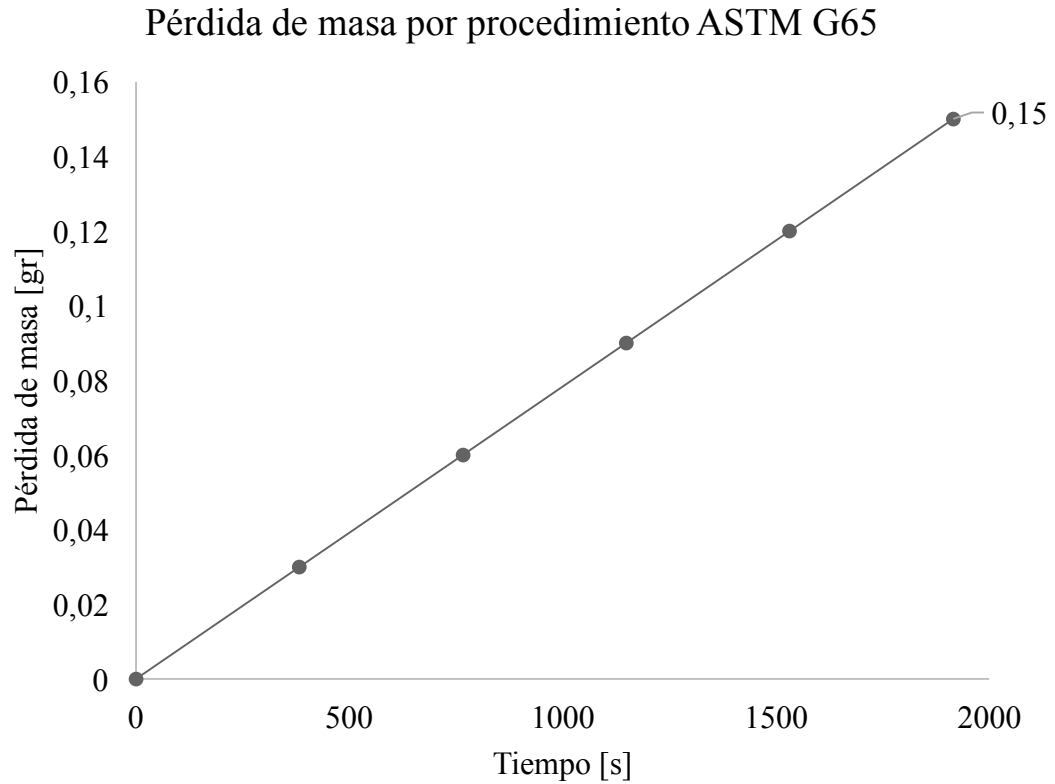


Figura 89. Gráfico de masa vs tiempo para la placa bimetallica 1 durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 90 a) se observa la muestra antes de ser ensayada y en b) se observa la marca luego de realizar el ensayo.

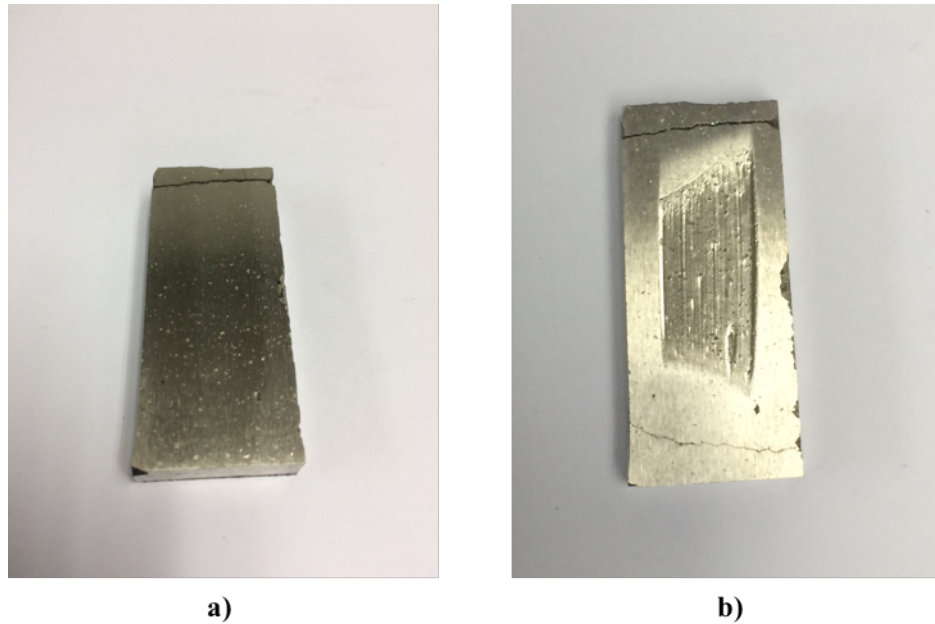


Figura 90. a) Muestra de recubrimiento placa bimetallica 1 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

### Placa bimetálica 2:

En la Tabla 22 se presenta los datos obtenidos para el ensayo de desgaste de la placa bimetálica 2, y en la Figura 91 se muestra el gráfico de pérdida de material versus el tiempo de ensayo, además, se presenta el ajuste de la regresión lineal.

Tabla 23. Resultados ensayos ASTM G-65 para la placa bimetálica 2.

Tiempo [s]	Pérdida de masa [gr]
0	0
383	0,03
766	0,06
1149	0,09
1532	0,12
1915	0,15

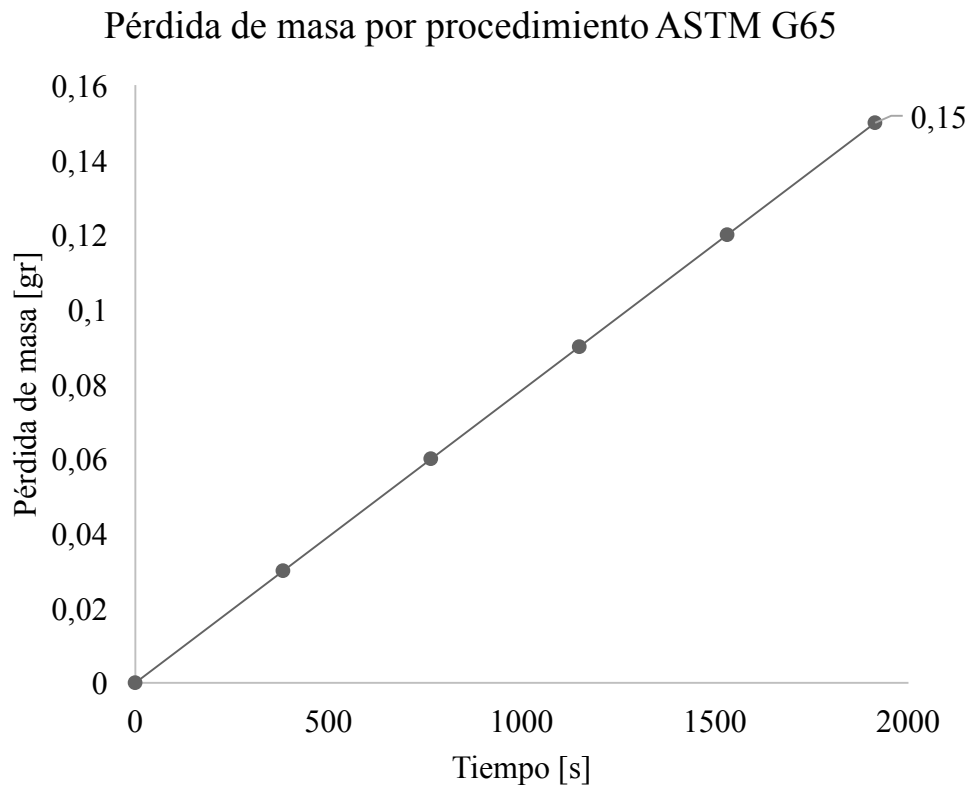


Figura 91. Gráfico de masa vs tiempo para la placa bimetálica 2 durante el ensayo ASTM G 65.

En la Figura 92 a) se observa la muestra antes de ser ensayada y en b) se observa la marca luego de realizar el ensayo.



**a)**



**b)**

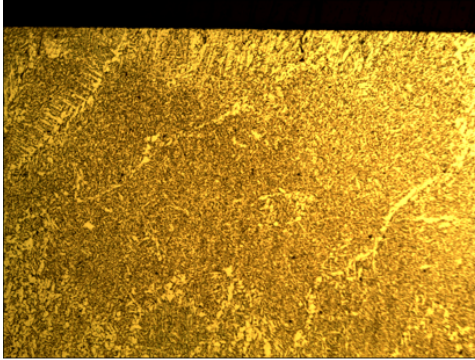
Figura 92. a) Muestra de recubrimiento placa bimetallica 2 antes de ser ensayada y b) la marca resultante del ensayo.

## Anexo F: Resultados microscopía

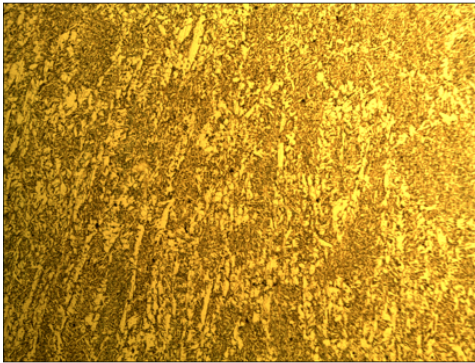
A continuación, se presentan las imágenes obtenidas en microscopio óptico de las muestras obtenidas.

### E8018

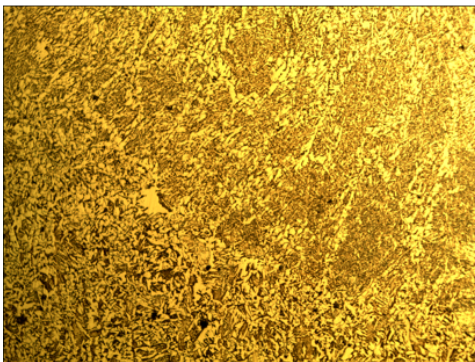
En las Figura 93, Figura 94 y Figura 95 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento E8018-C2, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

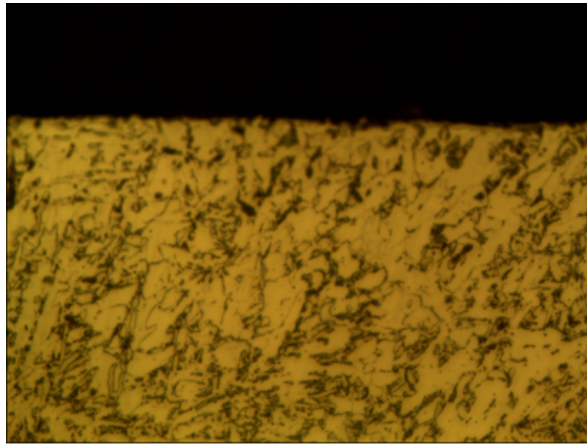


b)

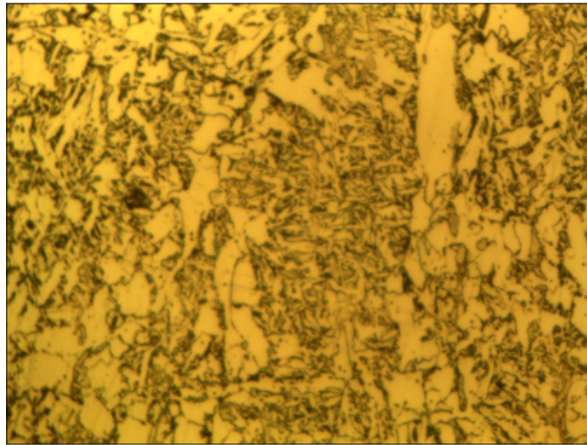


c)

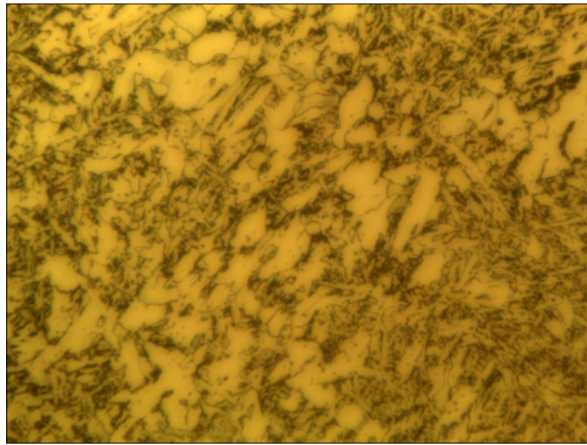
Figura 93. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Nital 2%.



a)

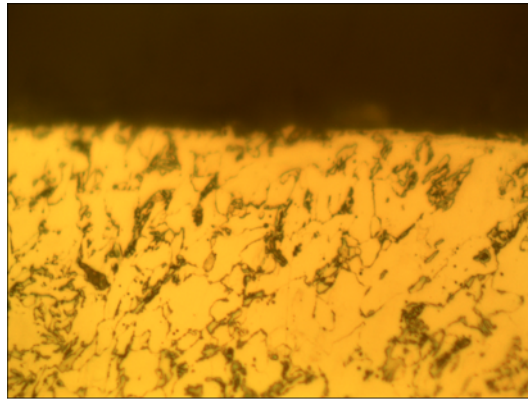


b)

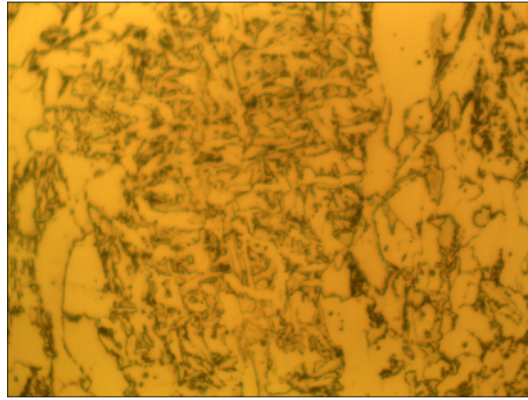


c)

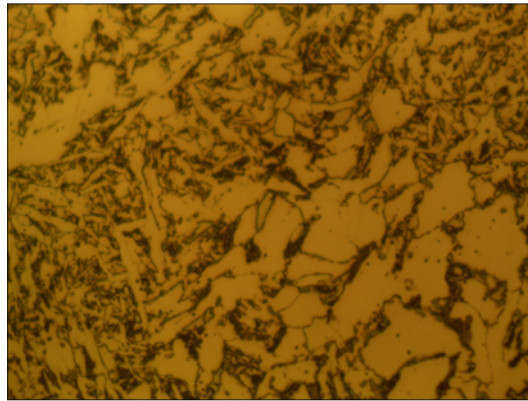
Figura 94. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Nital 2%.



a)



b)

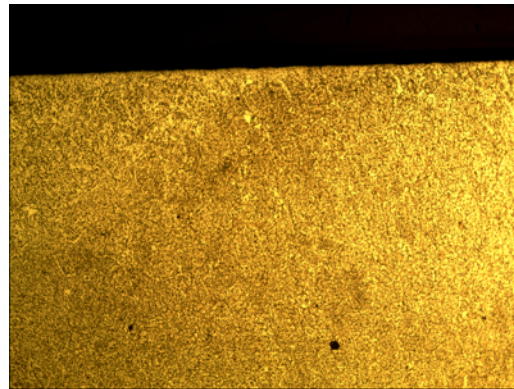


c)

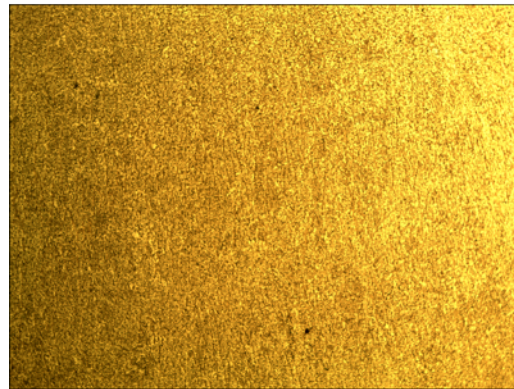
Figura 95. Micrografías tomadas a recubrimiento 8018-C2. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Nital 2%.

### E11018

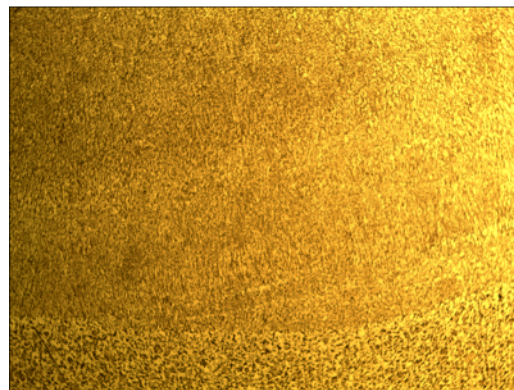
En las Figura 96, Figura 97 y Figura 98 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento E11018-M, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

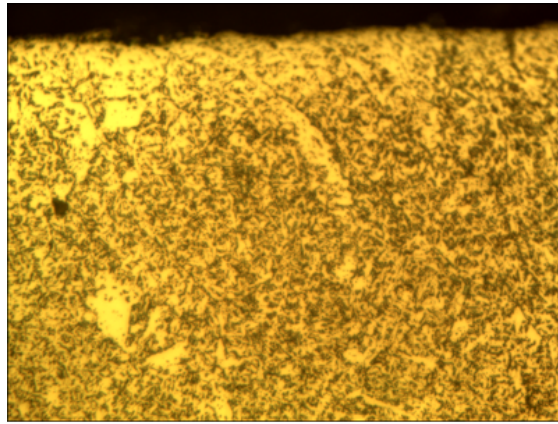


b)

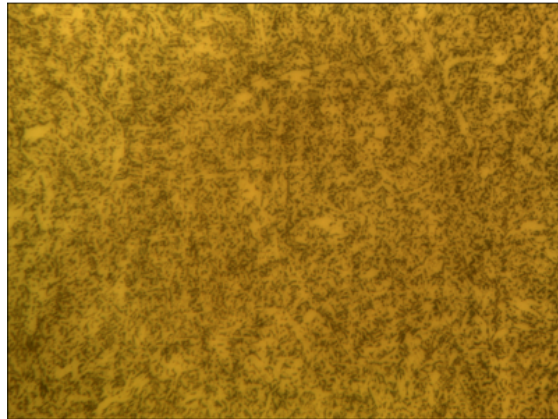


c)

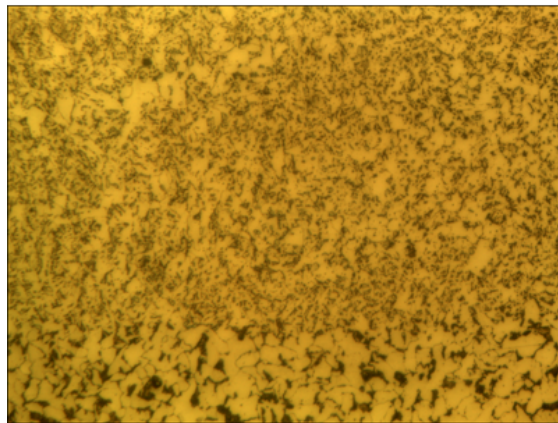
Figura 96. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Nital 2%.



a)



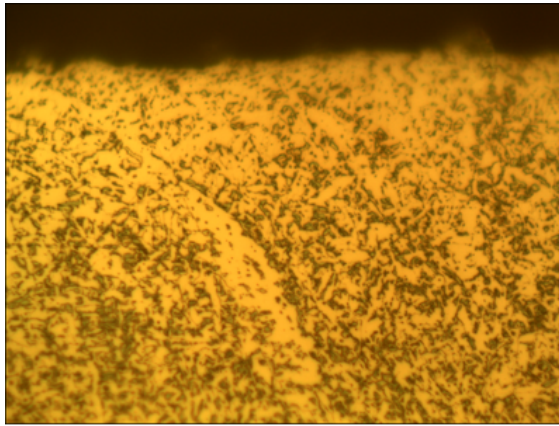
b)



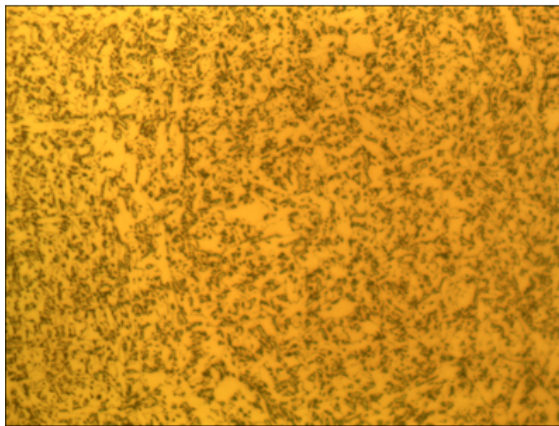
c)

Figura 97. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Nital 2%.

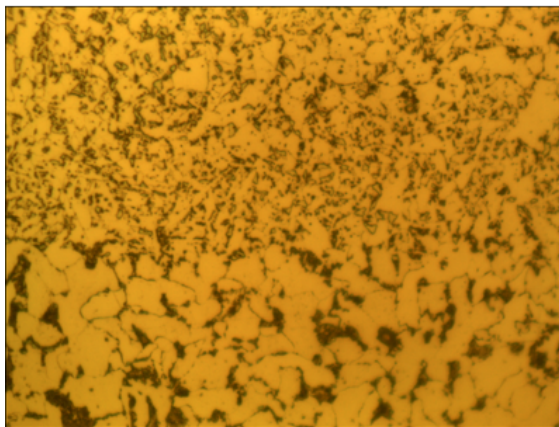




a)



b)

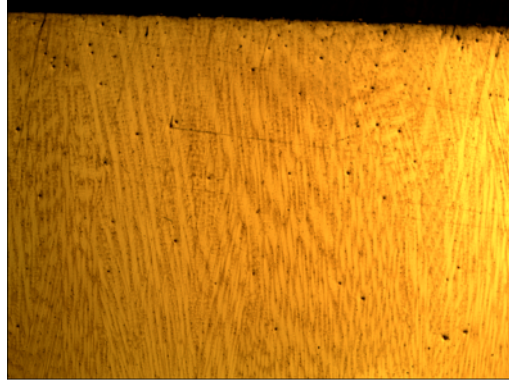


c)

Figura 98. Micrografías tomadas a recubrimiento 11018-M. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Nital 2%.

### Weldmang Crom

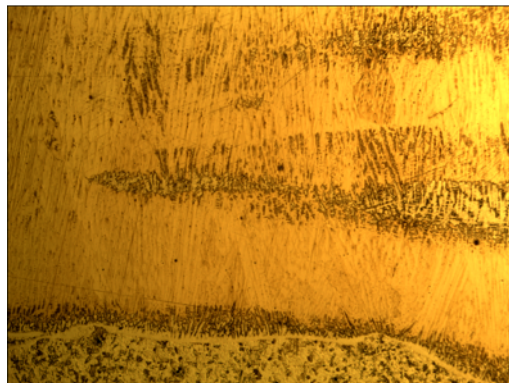
En las Figura 99, Figura 100 y Figura 101 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento Weldmang Crom, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

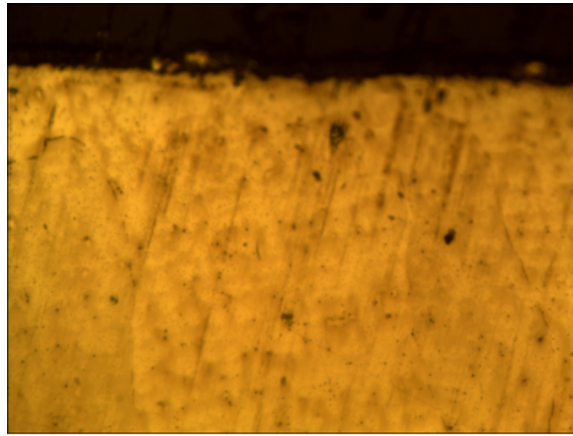


b)

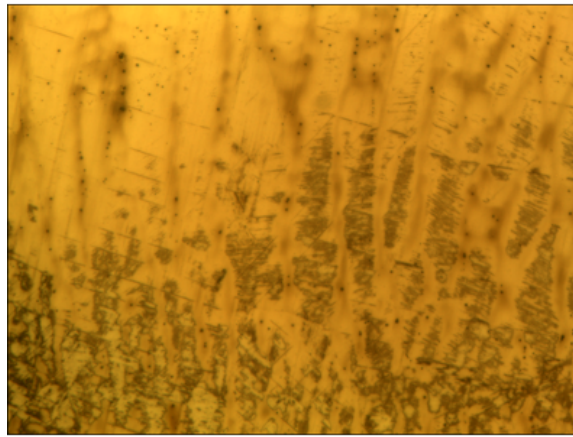


c)

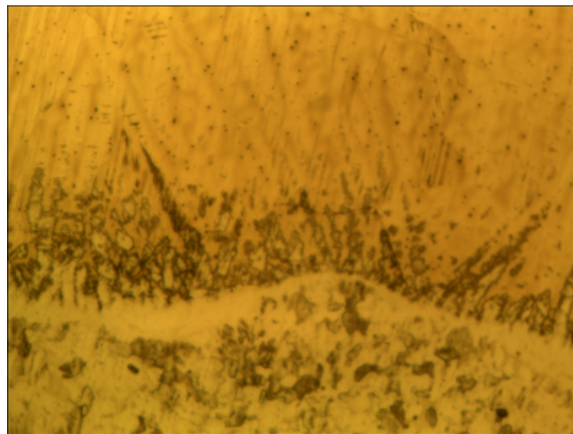
Figura 99. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

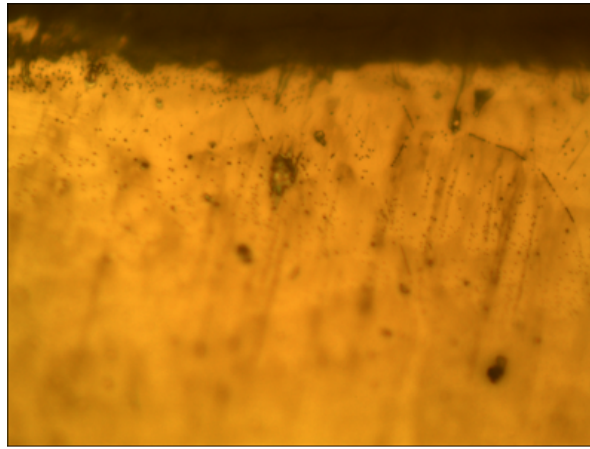


b)

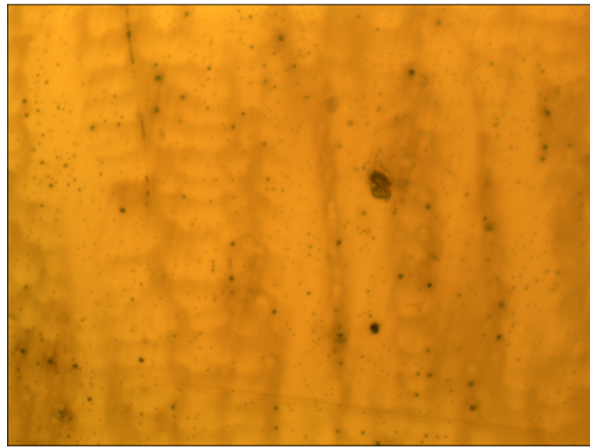


c)

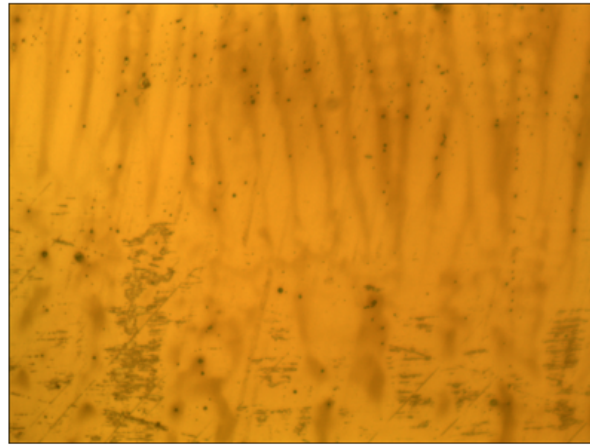
Figura 100. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)

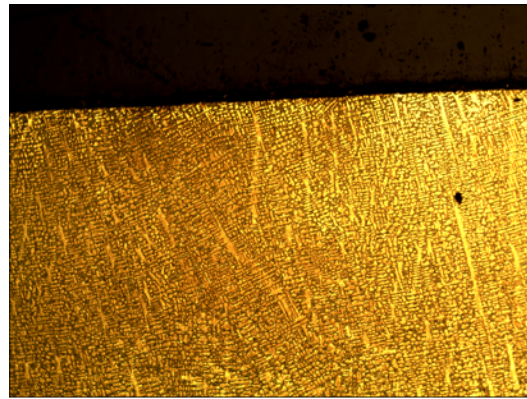


c)

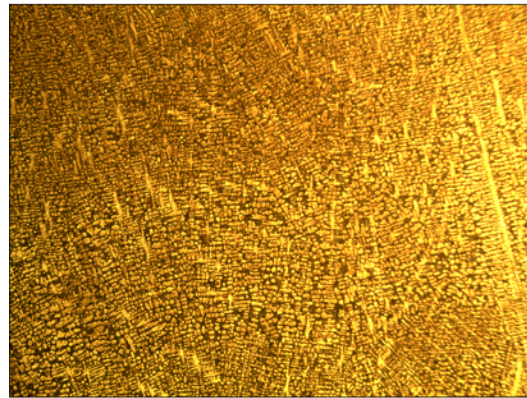
Figura 101. Micrografías tomadas a recubrimiento Weldmang Crom. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

### Soltec 65

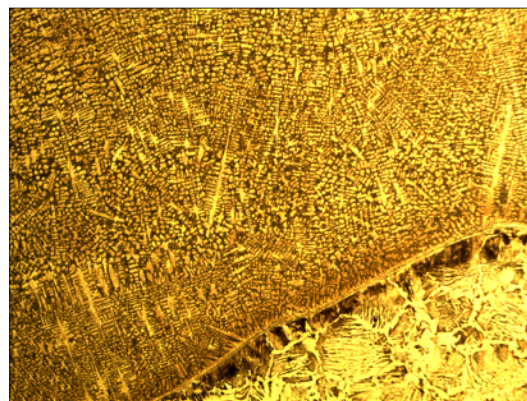
En las Figura 102, Figura 103 y Figura 104 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento Soltec 65, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

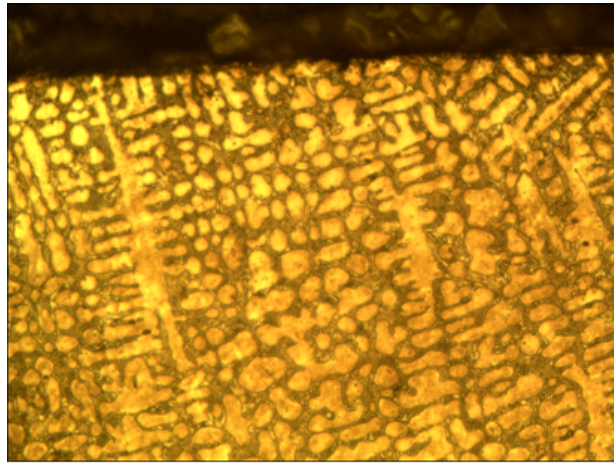


b)

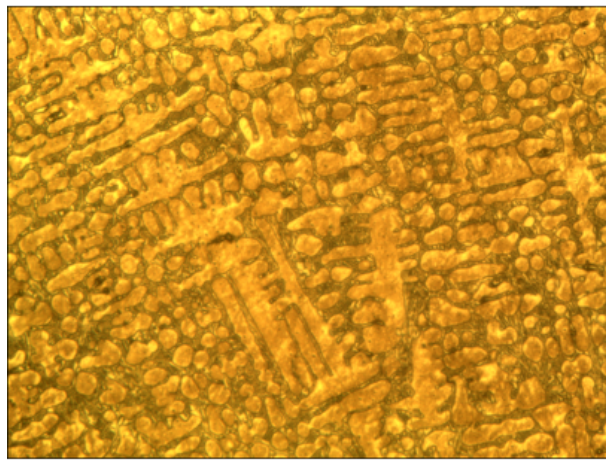


c)

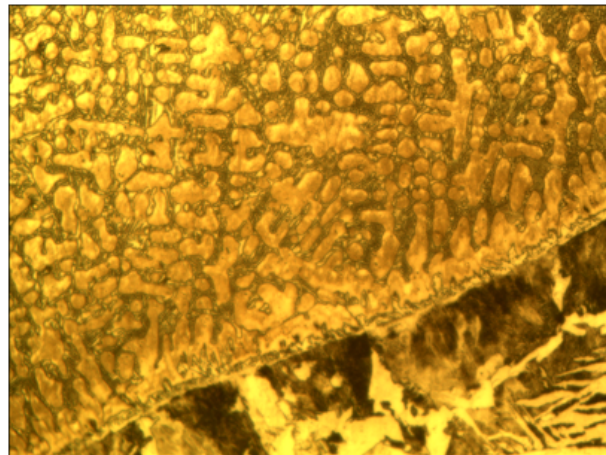
Figura 102. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

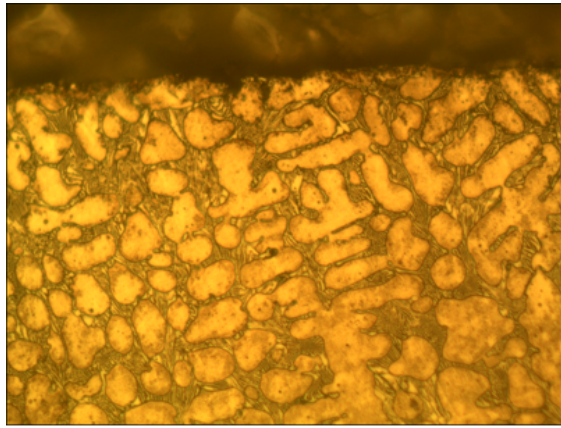


b)

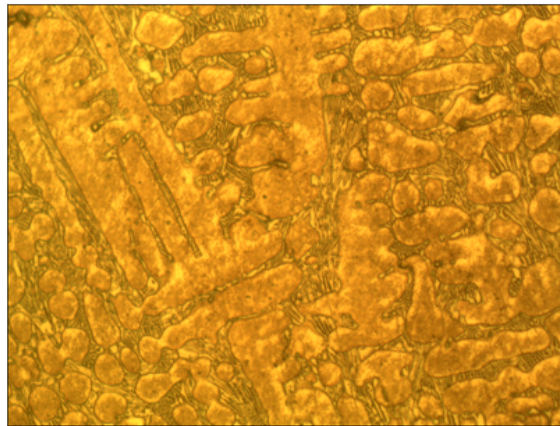


c)

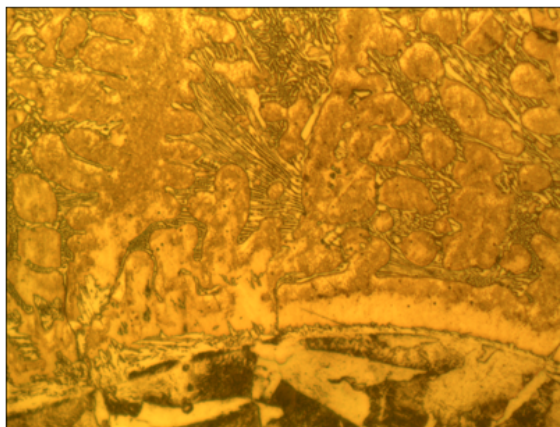
Figura 103. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)

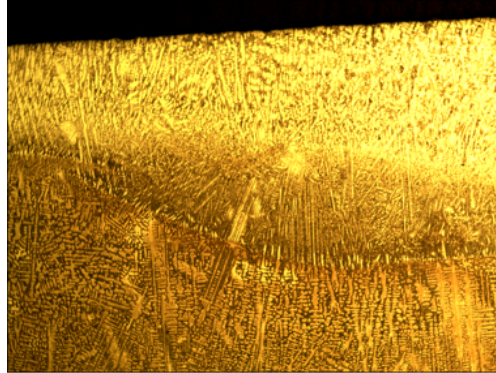


c)

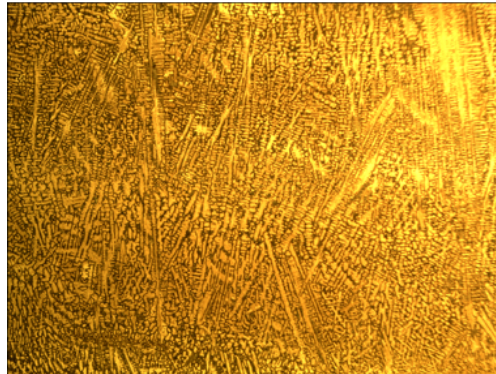
Figura 104. Micrografías tomadas a recubrimiento Soltec 65. a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

### Overlay 60

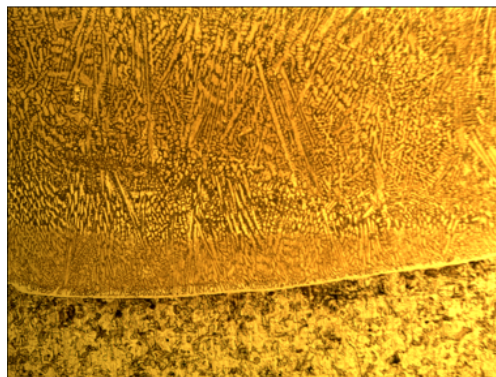
En las Figura 105, Figura 106 y Figura 107 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento Overlay 60, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)



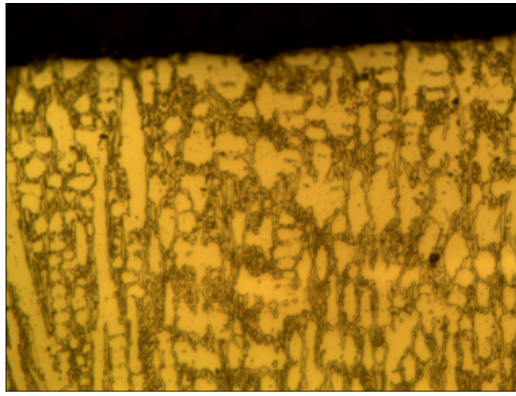
b)



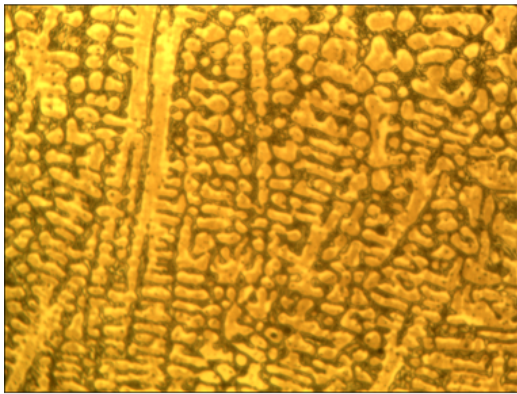
c)

Figura 105. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.

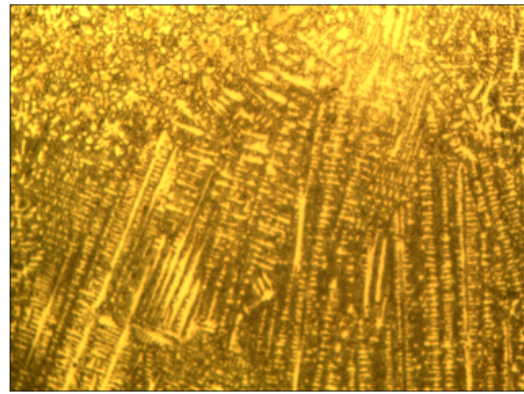




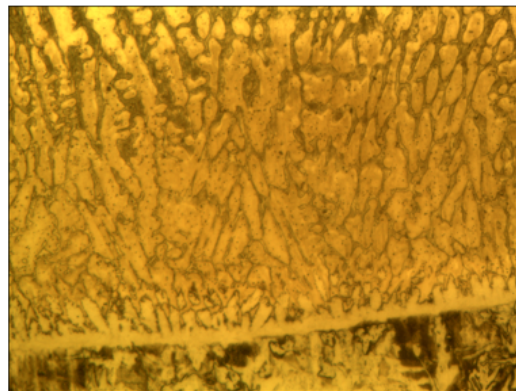
a)



b)

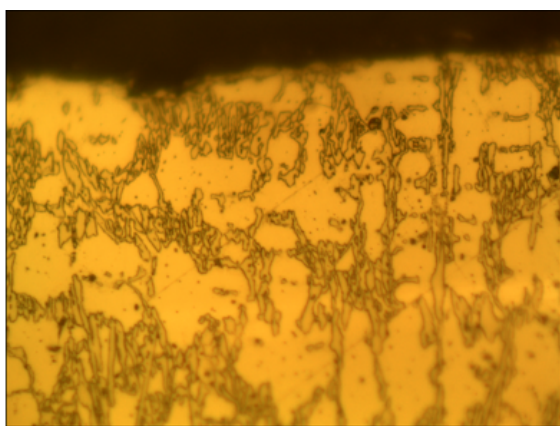


c)

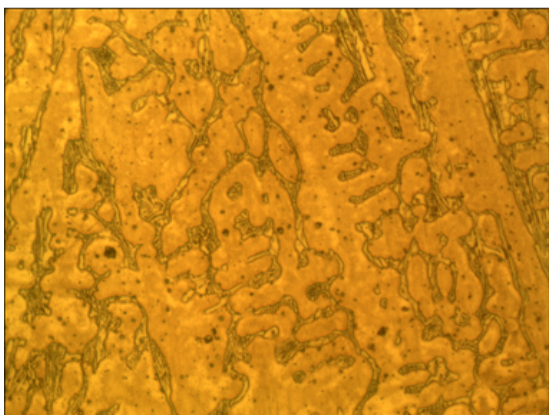


d)

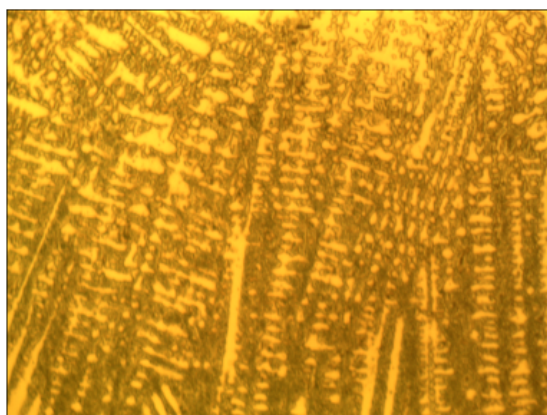
Figura 106. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



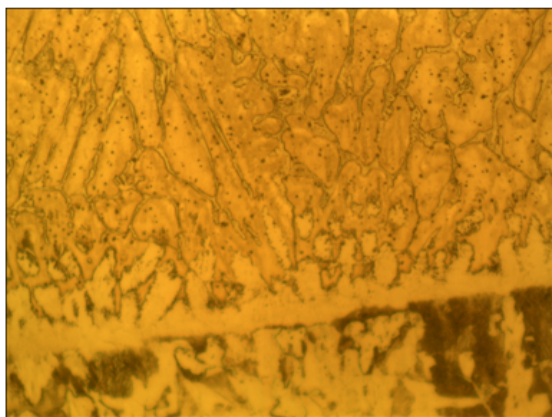
a)



b)



c)

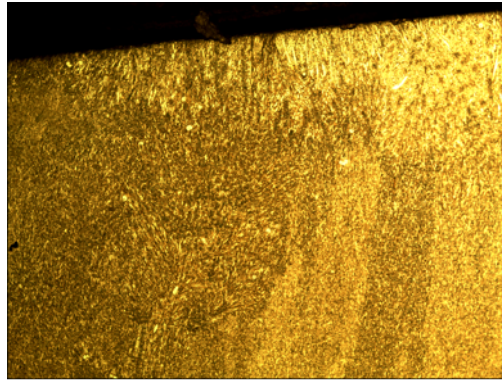


d)

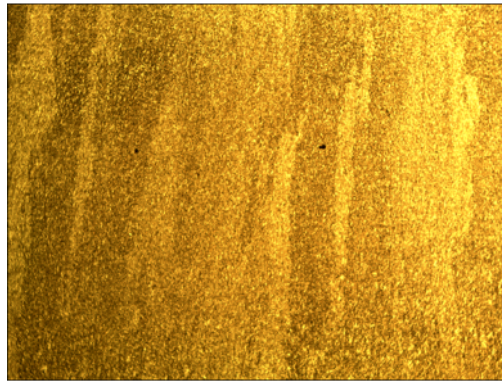
Figura 107. Micrografías tomadas a recubrimiento Overlay 60 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

### Postalloy 218

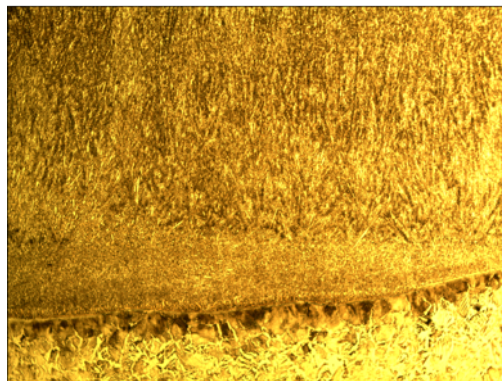
En las Figura 108, Figura 109 y Figura 110 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento Postalloy 218 HD, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

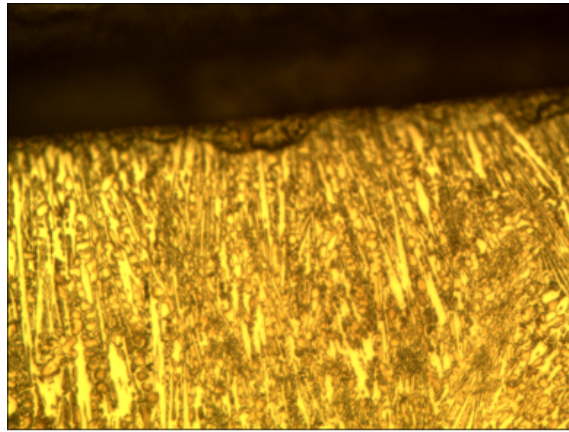


b)

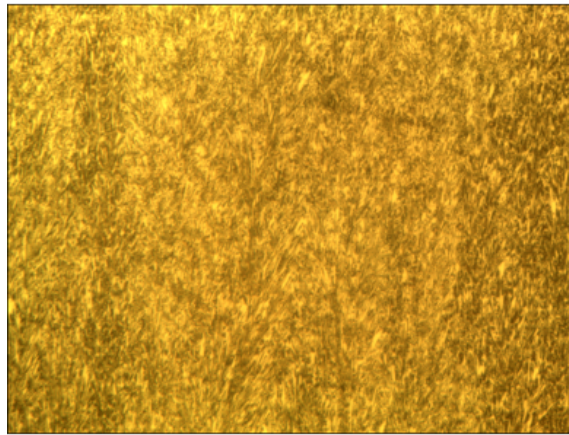


c)

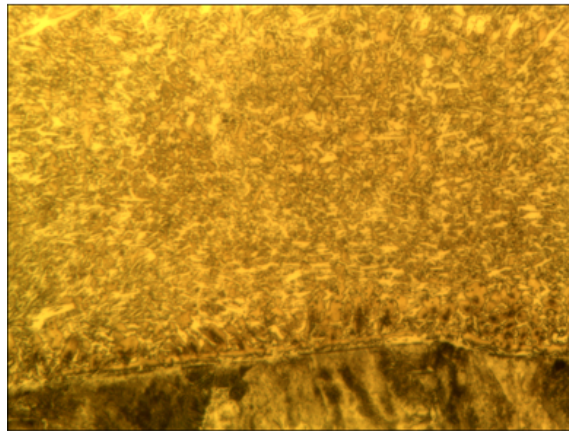
Figura 108. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

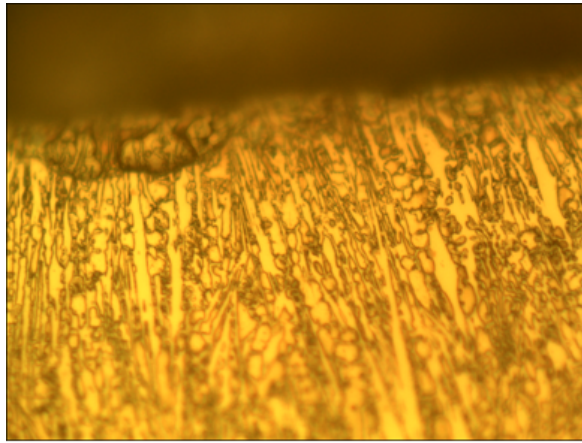


b)

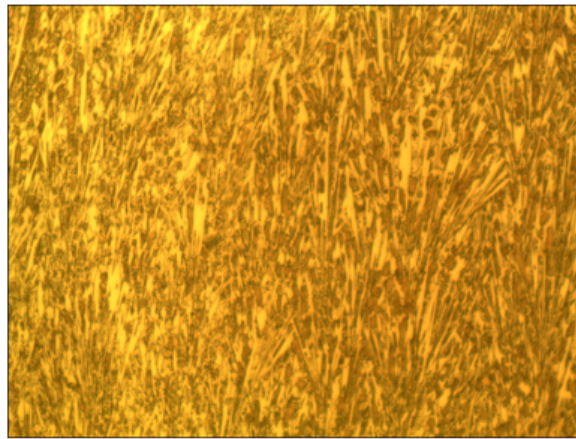


c)

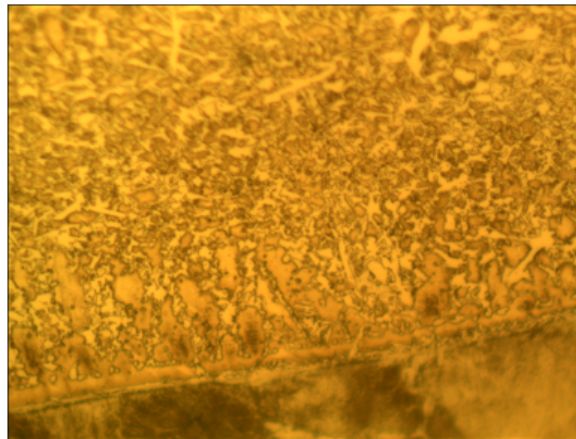
Figura 109. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)

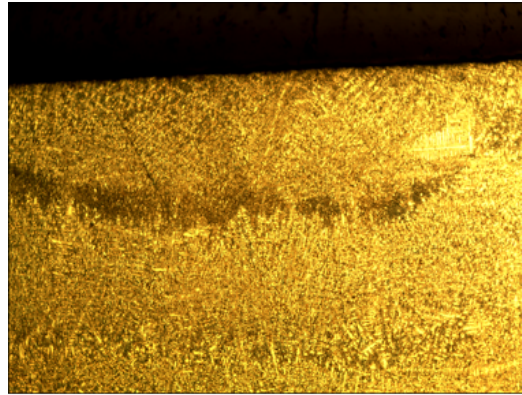


c)

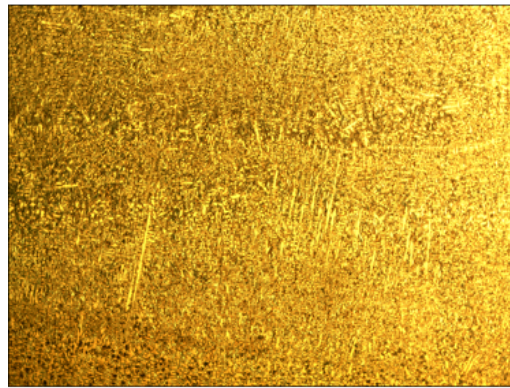
Figura 110. Micrografías tomadas a recubrimiento Postalloy 218 HD a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

### Stoody 100 HC

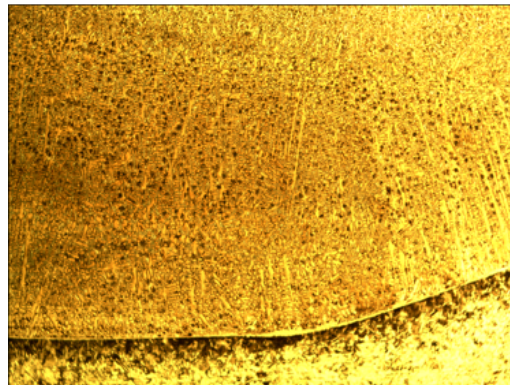
En las Figura 111 Figura 112 y Figura 113 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento Stoody 100 HC, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

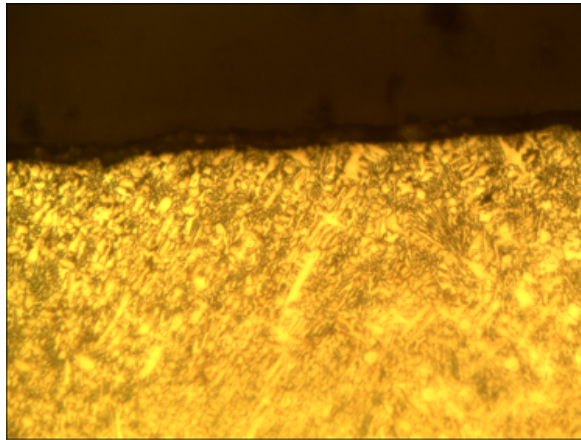


b)

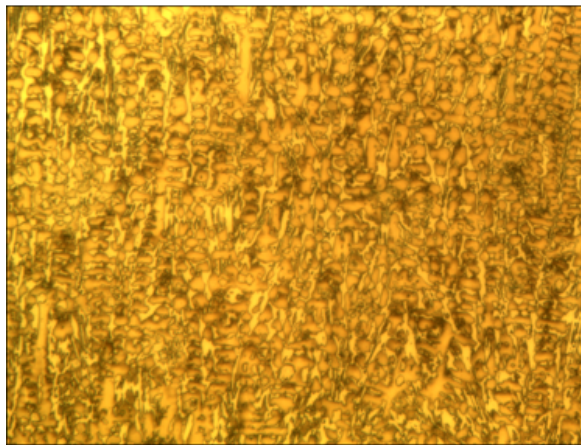


c)

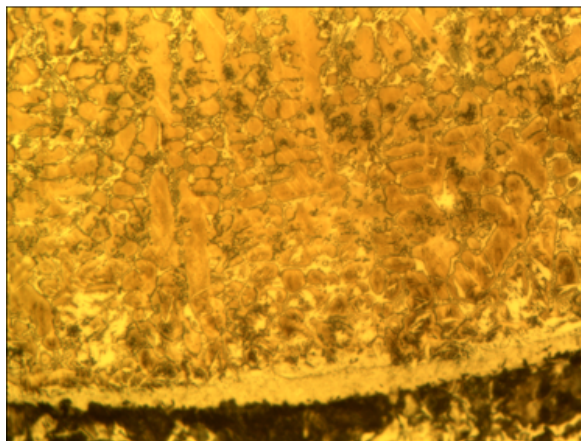
Figura 111. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoody 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

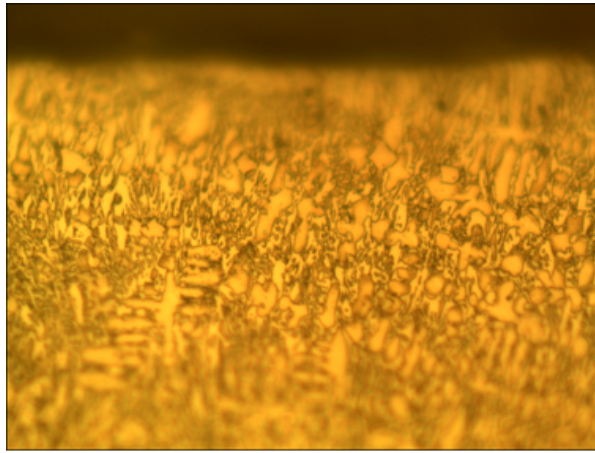


b)

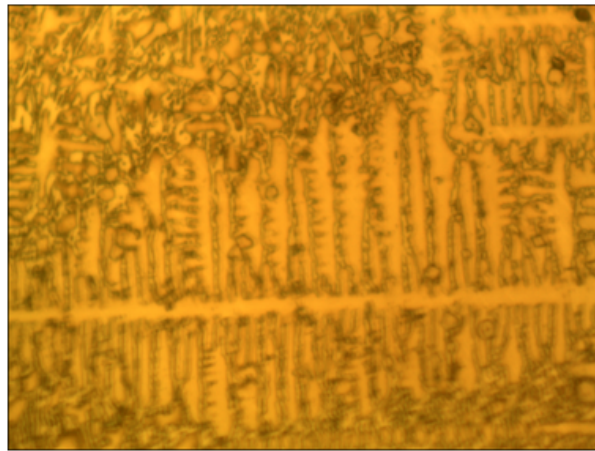


c)

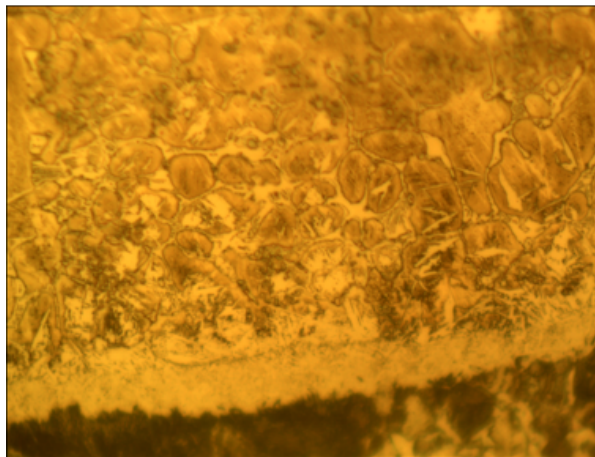
Figura 112. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoody 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)



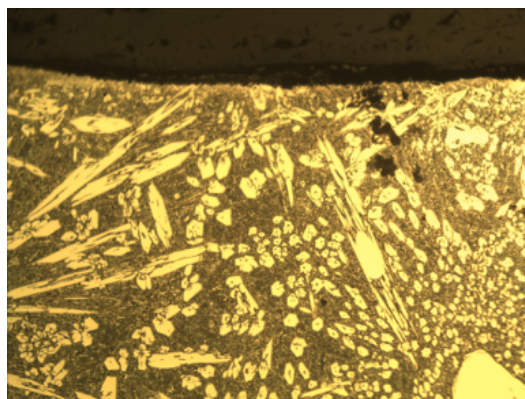
c)

Figura 113. Micrografías tomadas a recubrimiento Stoddy 100 HC a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

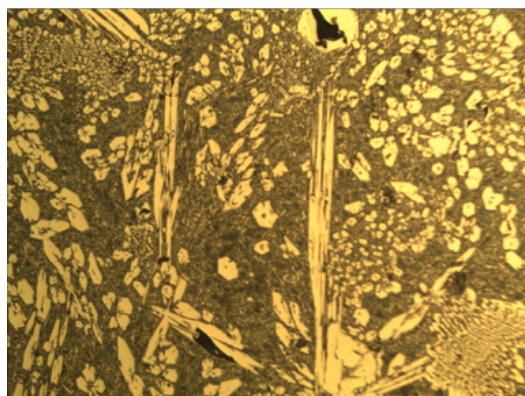


### Placa bimetálica 1

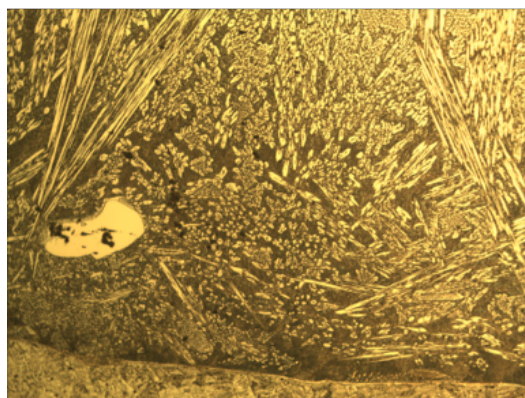
En las Figura 114, Figura 115 y Figura 116 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento placa bimetálica 1, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

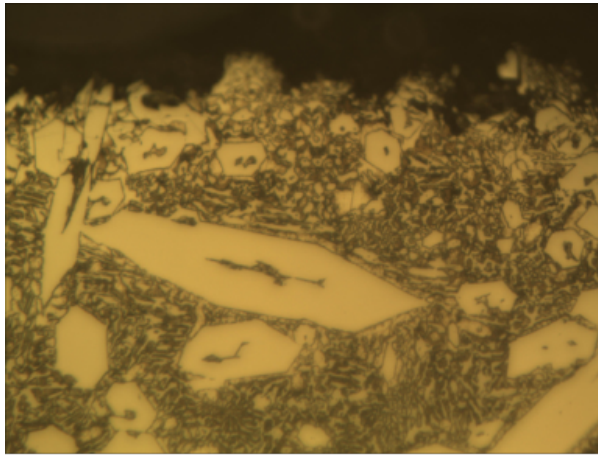


b)

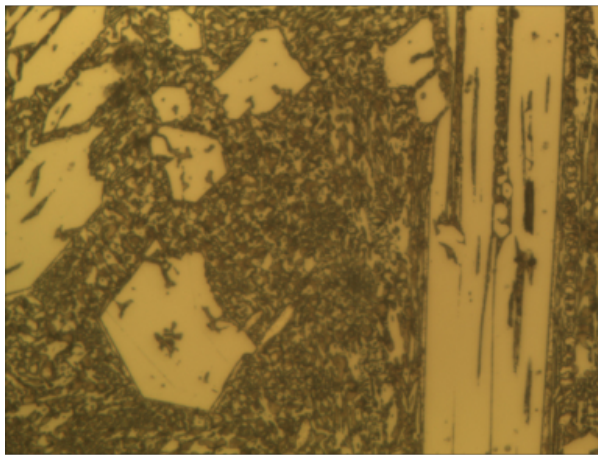


c)

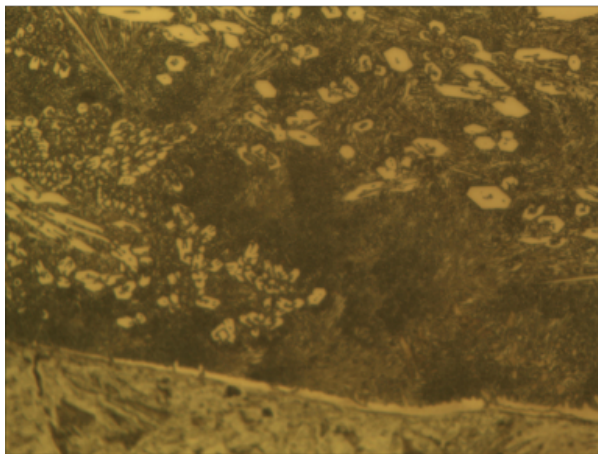
Figura 114. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

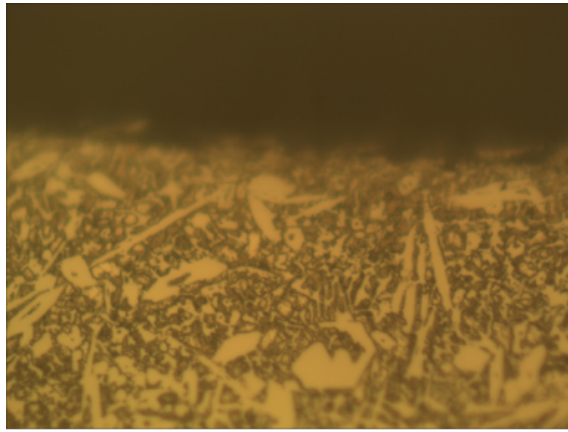


b)

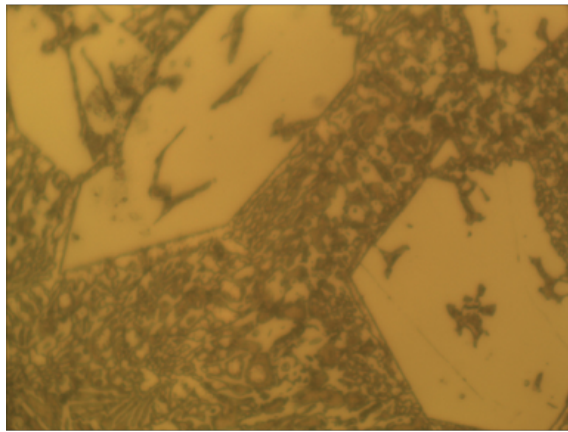


c)

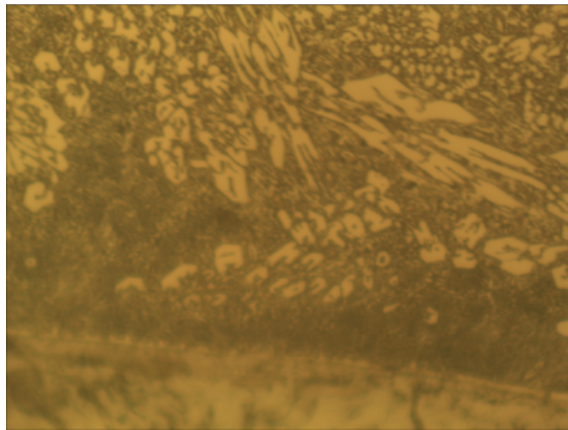
Figura 115. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetallica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)

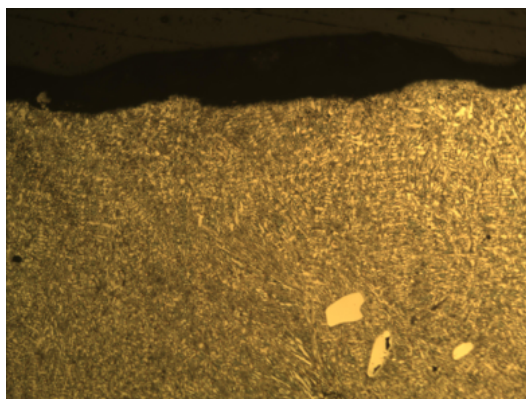


c)

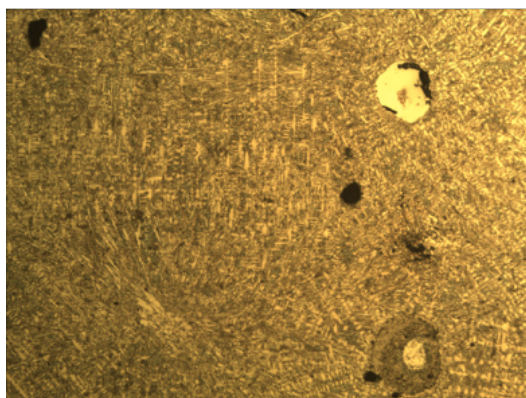
Figura 116. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 1 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.

## Placa bimetálica 2

En las Figura 117, Figura 118 y Figura 119 se presentan las micrografías obtenidas del recubrimiento placa bimetálica 2, con aumentos de 10x, 50x y 100x respectivamente. En cada imagen se presentan vistas de la parte superior, media e interface del recubrimiento.



a)

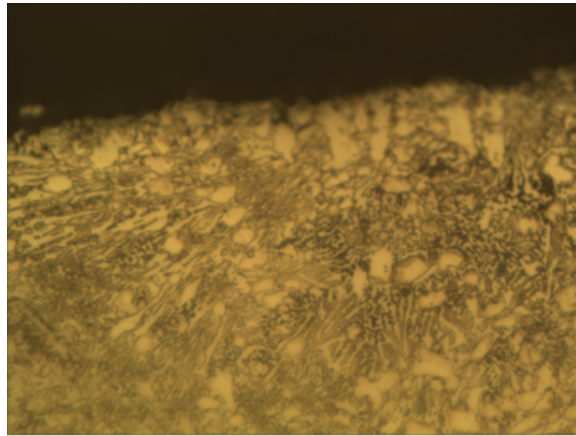


b)

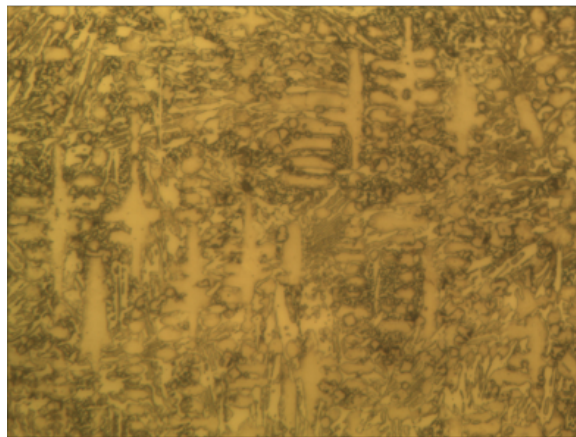


c)

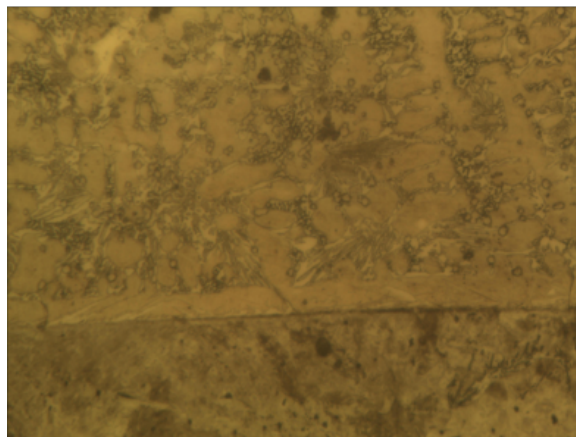
Figura 117. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 10x y atacadas con Vilella 5%.



a)

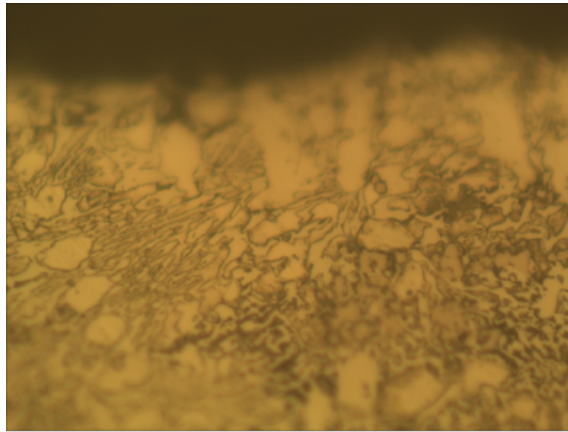


b)

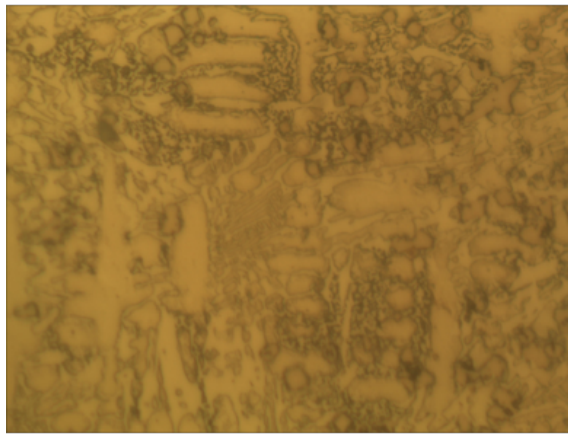


c)

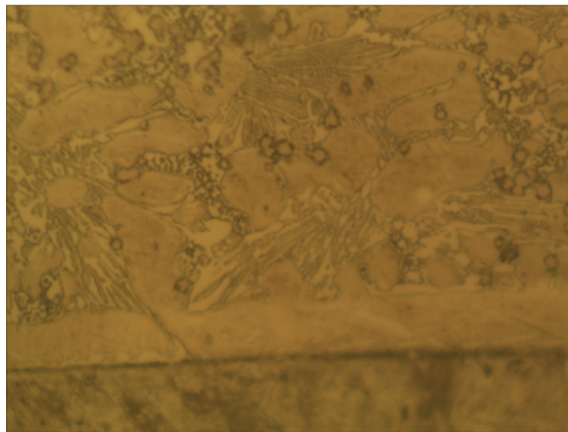
Figura 118. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 50x y atacadas con Vilella 5%.



a)



b)



c)

Figura 119. Micrografías tomadas a recubrimiento placa bimetálica 2 a) se muestra la parte superior del recubrimiento, en b) se muestra la parte media y en c) la parte inferior o zona de interface entre material base y recubrimiento. Imágenes con zoom 100x y atacadas con Vilella 5%.