

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

**RECUBRIMIENTO DE UN SUBSTRATO DE ACERO CON FERRO-ALEACIONES  
MEDIANTE ESD**

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

**RONALD IVÁN AZAAD CALDERÓN**

**SANTIAGO DE CHILE**



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

**RECUBRIMIENTO DE UN SUBSTRATO DE ACERO CON FERRO-ALEACIONES  
MEDIANTE ESD**

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

**RONALD IVÁN AZAAD CALDERÓN**

**PROFESOR GUÍA:**

**MARCO ANTONIO BÉJAR VEGA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**AQUILES HORACIO SEPÚLVEDA OSSES**

**EDUARDO ANTONIO DONOSO CATALÁN**

**SANTIAGO DE CHILE**

**ABRIL 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: RONALD IVÁN AZAAD CALDERON  
PROF. GUÍA: SR. MARCO A. BÉJAR VEGA

## RECUBRIMIENTO DE UN SUBSTRATO DE ACERO CON FERRO-ALEACIONES MEDIANTE ESD

En el presente trabajo de título se estudió la factibilidad de endurecer superficialmente un acero al carbono por deposición de ferro-aleaciones, mediante la utilización de electrodescarga (ESD). El ESD se puede describir como un proceso de microsoldadura de tipo pulsante, en el cual se transfiere material desde un ánodo (electrodo) hacia una pieza de trabajo (substrato) mediante pulsos de corriente de corta duración y alta intensidad.

La deposición se realizó manualmente mediante un dispositivo rotatorio fabricado localmente. Se fabricaron ánodos cilíndricos, de 5 mm de diámetro y de 50 mm de longitud, aproximadamente, empleando las siguientes aleaciones ferrosas: de boro, de molibdeno, de cromo y de titanio. Las distintas ferro-aleaciones se mezclaron con grafito en dos porcentajes: estequiométrico y mayor al estequiométrico. Las ferro-aleaciones y el grafito se molieron hasta un tamaño de polvo de  $53 \mu\text{m}$  aproximadamente; después, se compactaron a una presión de 2070 MPa y se sinterizaron a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las ferro-aleaciones se depositaron sobre un acero SAE 1020, usando un voltaje de 100 V y una atmósfera protectora de argón.

Las capas depositadas se caracterizaron mediante micrografías y macrografías ópticas, microdureza Vickers y difracción de rayos X (DRX). Las macrografías mostraron que las superficies del depósito resultaron rugosas e irregulares, características del proceso ESD. Las micrografías mostraron un espesor de capa irregular cuyo valor promedio, dependiendo de la ferro-aleación, estuvo entre 62 y  $233 \mu\text{m}$ . La microdureza de las capas se midió a temperatura ambiente y luego de un calentamiento a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  en un horno con atmósfera de argón, encontrándose en ambos casos un endurecimiento desde el substrato hasta la superficie de la capa depositada. Los valores obtenidos estuvieron entre 7,5 y 11 veces el valor nominal del substrato (176 HV). Los análisis de DRX, dependiendo de la ferro-aleación aplicada, mostraron entre otros compuestos, en la capa depositada la presencia de Carburo de Hierro ( $\text{Fe}_7\text{C}_3$ ), Boruro de Hierro ( $\text{Fe}_{0,91}\text{B}_{0,09}$ ), Carburo Hierro Cromo ( $\text{Cr}_{1,75}\text{Fe}_{5,25}\text{C}_3$ ), Óxido de Carburo de Titanio ( $\text{TiC}_{0,32}\text{O}_{0,46}$ ) y Carburo de Titanio ( $\text{Ti}_2\text{C}$ ), los cuales se formaron durante la aplicación del proceso ESD.

Se concluyó que es posible endurecer superficialmente el acero SAE 1020 mediante la deposición de ferro-aleaciones por ESD. La dureza de las capas depositadas se mantuvo inclusive al someterlas a una temperatura de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*A mi hija Victoria y mi novia Macarena*

# Agradecimientos

Me gustaría dedicar estas palabras a todas las personas que me han acompañado y apoyado a lo largo de toda la carrera. En especial dedicó este trabajo a mi hija amada, personita por la que me sacrifique con todo mi amor trabajando y estudiando a la vez.

En primer lugar quisiera agradecer a mi Madre por todo lo que me ha dado a lo largo de toda mi vida, con mucha colaboración de mis Abuelos que están en los brazos de Dios y el apoyo incondicional de mis Tías Cecilia y Mónica. También quiero agradecer a mi novia Macarena por su amor y paciencia incondicional, y a su familia la cual me ha aceptado como un miembro más, queriéndome y entregándome mucho amor.

También quiero agradecer a todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, en especial a mi profesor guía el Sr. Marco A. Béjar, el cual fue muy paciente y colaborador a lo largo del trabajo de título. Agradezco lo buena persona que es, no solo conmigo, sino que con todos los alumnos del Departamento. Quiero dar las gracias a los profesores Aquiles Sepúlveda y Eduardo Donoso, por aceptar ser parte de mi comisión y ayudar que el trabajo resultara de la mejor manera. No puedo dejar de reconocer la ayuda entregada por las lindas secretarias del cuarto y quinto piso de la torre central: Maricarmen, Quenita, Soledad y Sra. Raquel.

Una mención especial para todos los profesores del Taller del Departamento, por la ayuda entregada, por el conocimiento que comparten con los alumnos y por todos los buenos momentos que pasamos juntos. Además quisiera reconocer el conocimiento y ayuda entregada por Abraham Herrera, un compañero de trabajo, en el pulido de muestras.

Por último y no menos importante, quiero dar las gracias, al ser más importante en mi vida, DIOS. Gracias a él, cambie mi forma de vivir, ahora me doy cuenta de la maravillosa vida que me dio y trato de disfrutarla al máximo día a día. Gracias Señor, por todo lo que hiciste, por todo lo que haces y por todo lo que harás en mi vida, también te doy las gracias por todas las personas que pusiste en mi camino en este trabajo: mi familia, mi novia, profesores, secretarias, amigos, en fin a todos.

# Índice general

<b>Índice de tablas</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>V</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Deposición por Electrodescarga (ESD) . . . . .	3
2.1.1. Introducción . . . . .	3
2.1.2. Descripción del proceso . . . . .	3
2.1.3. Efecto de la energía de descarga y el tiempo del tratamiento . . . . .	5
2.1.4. Principales aplicaciones . . . . .	6
<b>3. Metodología Experimental</b>	<b>7</b>
3.1. Procedimiento experimental . . . . .	9

3.1.1.	Instalación experimental para deposición por electrodescarga . . . . .	9
3.1.2.	Caracterización del material base . . . . .	18
3.1.3.	Relación Estequiométrica para la Formación de Carburos . . . . .	18
3.1.4.	Caracterización de electrodos . . . . .	20
3.1.5.	Preparación del equipo ESD . . . . .	20
3.1.6.	Procesamiento mediante ESD . . . . .	21
3.1.7.	Caracterización de la capa depositada . . . . .	22
<b>4.</b>	<b>Resultados Experimentales</b>	<b>24</b>
4.1.	Resultados Experimentales Generales . . . . .	24
4.2.	Caracterización del Material Base . . . . .	25
4.3.	Procesamiento mediante ESD . . . . .	26
4.3.1.	Puesta a punto del circuito de descarga y pruebas preliminares . . . . .	26
4.3.2.	Caracterización de superficie y espesor de capa . . . . .	27
4.3.3.	Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito mayor al este- quiométrico sin gas protector . . . . .	35
4.3.4.	Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito mayor al este- quiométrico con gas protector . . . . .	40
4.3.5.	Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito estequiométrico con gas protector . . . . .	46
4.3.6.	Probetas sometidas a una temperatura de 600 [°C] en horno con atmósfera de Argón . . . . .	52
<b>5.</b>	<b>Discusión</b>	<b>57</b>
5.1.	Caracterización de superficie y espesor de capa . . . . .	57

5.2. Resultados preliminares . . . . .	59
5.3. Microdureza y Difracción de rayos X . . . . .	59
5.3.1. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-B . . . . .	59
5.3.2. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Mo . . . . .	60
5.3.3. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Cr . . . . .	61
5.3.4. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Ti . . . . .	62
5.4. Probetas sometidas a una temperatura de 600 [°C] en horno con atmósfera de Argón	63
<b>6. Conclusiones</b>	<b>64</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>
<b>A. Información PIMASA</b>	<b>67</b>
<b>B. Planos de Fabricación</b>	<b>72</b>
<b>C. Memoria de Cálculo</b>	<b>75</b>
C.1. Cálculo y puesta a punto de prensa hidráulica . . . . .	75
<b>D. Diagramas de Fases</b>	<b>79</b>
<b>E. Difracción de Rayos X</b>	<b>83</b>

# Índice de tablas

3.1. Información de las ferroaleaciones entregadas por el fabricante. . . . .	12
3.2. Continuación: Información de las ferroaleaciones entregadas por el fabricante. . . .	12
3.3. Granulometría de las ferroaleaciones obtenidas del proceso de pulverización. . . .	14
3.4. Carburos y temperaturas de formación. . . . .	18
3.5. Masas molares de B, Mo, Cr, Ti y C. . . . .	18
3.6. Electrodos con contenido estequiométrico de grafito. . . . .	20
3.7. Electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico. . . . .	20
4.1. Promedio y desviación estándar de microdureza de Acero 1020. . . . .	25
4.2. Durezas obtenidas en la puesta a punto del sistema. . . . .	26

# Índice de figuras

2.1. Ejemplo de capa depositada por ESD, deposito de acero inoxidable sobre bronce al aluminio. Para A 60[V] y B 80[V] [1]. . . . .	5
2.2. Depósito de $Cr_3C_2$ en zonas del rotor de la turbina y de WC en los álabes. . . . .	6
2.3. Reparación de un componente de aluminio. . . . .	6
3.1. Diagrama de flujo de las etapas del trabajo de título. . . . .	8
3.2. Esquema simplificado del circuito RC. . . . .	9
3.3. Circuito de descarga utilizado. . . . .	9
3.4. Dispositivo de deposición rotatoria de material. . . . .	10
3.5. Porta electrodo de Cobre. . . . .	11
3.6. Carbón eléctrico. . . . .	11
3.7. Chancador de mandíbula. . . . .	13
3.8. Pulverizador Labtechnics. . . . .	13
3.9. Torno mecánico utilizado en la mezcla de polvos metalúrgicos. . . . .	14
3.10. Prensa hidraulica Buehler. . . . .	15
3.11. Elementos utilizados en el compactación de los polvos metalúrgicos. . . . .	16
3.12. Horno eléctrico utilizado en la sinterización. . . . .	17
3.13. Muestras post-sinterizado. . . . .	17

3.14. Esquema identador Vickers. . . . .	23
4.1. Micrografías de las probetas para la cuesta a punto: (a) Capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C con 120 [V]. (b) Capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C con 100 [V]. (c) Capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C con 80 [V]. (d) Capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C con 100 [V]. . . . .	27
4.2. Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	28
4.3. Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	28
4.4. Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento. . . . .	29
4.5. Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	30
4.6. Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	30
4.7. Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento. . . . .	31
4.8. Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	32
4.9. Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	32
4.10. Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento. . . . .	33

4.11. Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	34
4.12. Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s]. . . . .	34
4.13. Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, en dependencia del tiempo de tratamiento. . . . .	35
4.14. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	36
4.15. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	36
4.16. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	37
4.17. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	37
4.18. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	38
4.19. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	38
4.20. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	39
4.21. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, con voltaje de 100 [V]. . . . .	39
4.22. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	41
4.23. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	41

4.24. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	42
4.25. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	43
4.26. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	44
4.27. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	44
4.28. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	45
4.29. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	46
4.30. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	47
4.31. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	48
4.32. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	49
4.33. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	49
4.34. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	50
4.35. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	50
4.36. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	51
4.37. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V]. . . . .	52

4.38. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	53
4.39. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	53
4.40. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	54
4.41. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	54
4.42. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	55
4.43. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	55
4.44. Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-24,46wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	56
4.45. Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-24,46wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C. . . . .	56
C.1. Esquema de carga en prensa hidráulica de compresión. . . . .	76
C.2. Esquema de carga en matriz de compactación. . . . .	76
D.1. Diagrama de fases B-C. . . . .	79
D.2. Diagrama de fases Mo-C. . . . .	80
D.3. Diagrama de fases Cr-C. . . . .	81
D.4. Diagrama de fases Ti-C. . . . .	82
E.1. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C. . . . .	84
E.2. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C. . . . .	85
E.3. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C. . . . .	86

E.4. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C. . . . .	87
E.5. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt %C. . . . .	88
E.6. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C. . . . .	89
E.7. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt %C. . . . .	90
E.8. Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C. . . . .	91

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes Generales

La constante búsqueda de nuevos procesos para mejorar las propiedades de los materiales, ha sido tema principal para los investigadores en los últimos años. Así es como, las propiedades superficiales han captado el interés de muchos científicos, principalmente por los beneficios en aplicaciones como: endurecimiento de álabes de turbinas, reparación de superficies dañadas, aumento de la resistencia a la corrosión, etc. Dentro de los procesos y/o tratamientos para mejorar las propiedades superficiales, destaca la deposición de material.

Para la deposición de material existen muchos procesos, muchos de ellos utilizados industrialmente: soldadura, rociado térmico y electrodeposición, entre otros. La soldadura y el rociado térmico se aplican para recubrir metales con materiales cerámicos, como el carburo de cromo. La electrodeposición se usa para depósitos duros de cromo, pero, a pesar de ser un proceso relativamente económico, su utilización se está empezando a restringir debido a los problemas de contaminación asociados [1].

Otro método para recubrir materiales es la deposición por electrodescarga (ESD), el cual consiste en pulsos de microsoldadura, en los cual se transfiere material desde un ánodo (electrodo) hacia una pieza de trabajo (substrato) mediante pulsos de corriente de corta duración y alta intensidad. Este proceso térmico es relativamente barato y ha sido utilizado durante décadas para recubrir localmente superficies de substratos metálicos con el material del electrodo. Este proceso produce recubrimientos muy unidos al substrato, debido al enlace metalúrgico obtenido, por lo que es muy utilizado para reparar superficies o aumentar localmente la dureza superficial. Su aplicación es muy amplia; por ejemplo los álabes de las turbinas de gas y vapor, se recubren y reparan me-

dante ESD. Muchos componentes utilizados en las industrias nucleares son recubiertos mediante este proceso [3].

En un estudio realizado el año 2008 en la Universidad de Chile, se depositó titanio sobre un sustrato de cobre mediante ESD. Los valores de dureza obtenidos en la capa de titanio depositada por ESD estuvieron entre 1100 [HV] y 1300 [HV].

## **1.2. Motivación**

El uso de la deposición por electrodescarga en reparaciones de superficie o aumento de dureza local en superficies de forma compleja, ha llevado a que este proceso se utilice en forma manual o robotizada. En la actualidad, el proceso se aplica manualmente a través de una pistola con un porta electrodo rotatorio. Ahora bien, en el presente trabajo se busca construir un dispositivo manual rotatorio de electrodescarga, que permita realizar estudios o ensayos en condiciones similares a las utilizadas a nivel industrial.

El acero SAE 1020 tiene propiedades mecánicas muy bajas, dadas principalmente por su composición química. Dado lo anterior, en el presente trabajo de título, se busca mejorar la dureza superficial de este acero, para entregarle la posibilidad de mayores aplicaciones a nivel industrial.

## **1.3. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo de título es recubrir un sustrato de acero con ferro-aleaciones, mediante ESD con electrodo rotatorio.

### **1.3.1. Objetivos Específicos**

- Construir un dispositivo de deposición por electrodescarga manual, que permita la utilización del proceso ESD sobre superficies con geometrías complejas.
- Fabricar electrodos de ferroaleaciones de Cr, Mo, Ti y B, adicionando grafito para fomentar, durante la aplicación de ESD, la formación de compuestos metálicos duros en la capa depositada.
- Determinar la influencia del porcentaje de grafito sobre la capa formada.
- Caracterizar la capa depositada, en función de su: superficie, espesor, microdureza y compuestos metálicos.

## Capítulo 2

### Antecedentes

#### 2.1. Deposición por Electrodescarga (ESD)

##### 2.1.1. Introducción

En la deposición por electrodescarga de un material, una gran intensidad corriente es conducida a través de un electrodo oscilante y/o rotatorio y un sustrato por un periodo de tiempo muy pequeño. Cuando el electrodo se aleja de la superficie, se forma un arco eléctrico, que causa la fusión de la superficie del electrodo por un corto lapso de tiempo. De esta forma se logra el recubrimiento superficial del sustrato, formado ya sea solo por el material aportado por el electrodo o por una aleación del material del electrodo y la superficie del sustrato [2].

##### 2.1.2. Descripción del proceso

El proceso de deposición por electrodescarga puede ser considerado como una "microsoldadura", sin embargo, en este tipo de soldadura el electrodo siempre ejerce una cierta presión sobre el sustrato, muy por el contrario con la típica soldadura al arco. Para asegurar la unión entre el electrodo y el sustrato, se debe mantener un movimiento constante. Este movimiento se puede conseguir, a través de la vibración del electrodo en distintos ejes: longitudinal, axial y/o rotacional.

En la actualidad, la transferencia de material durante la deposición por electrodescarga no está completamente clara y en torno a este tema se han desarrollado un sin número de teorías. La primera de las teorías propone que durante el pulso eléctrico, una parte del electrodo se separa y se adhiere al sustrato. El material puede ser transferido en un estado sólido, líquido o gaseoso [2].

Una segunda teoría, postula que existe una combinación entre transferencia globular y pulveri-

zación (spray). Por último una tercera teoría muestra que la formación de una gota por un periodo de tiempo largo, la cual excede la duración del pulso eléctrico [2].

En el proceso ESD el material se deposita gracias a una rápida descarga de energía eléctrica: una gran intensidad de corriente es conducida en un corto periodo de tiempo, a través del electrodo en movimiento sobre la superficie de trabajo, es decir, el sustrato. Cuando el electrodo se aleja de la superficie, se produce el arco eléctrico, que funde la superficie del electrodo por un pequeño lapso de tiempo. La frecuencia de oscilación mecánica varía entre 50 y 100 [Hz] [2].

La intensidad del pulso eléctrico puede alcanzar los 500 [A] [2]. Este pulso eléctrico tiene la energía suficiente para fundir parte del electrodo y de la pieza de trabajo. La duración del pulso es muy pequeña, cerca de los 80 [ $\mu$ s], el aporte de calor es bajo y las deformaciones son casi imperceptibles. La rápida tasa de enfriamiento del depósito favorece la formación de una microestructura final, la cual mejora la resistencia al desgaste.

A continuación se muestran las fases en las que se puede dividir el proceso de deposición por electrodescarga:

1. El electrodo toca el sustrato, en este momento comienza la descarga de energía . El sustrato y una parte del electrodo alcanzan una gran temperatura localmente.
2. El electrodo se retira, con un movimiento rápido y antes que descargue toda la energía, el arco se enciende, por la separación entre el sustrato y el electrodo. El arco depende directamente del material del electrodo.
3. En el sustrato se libera una cantidad suficiente de energía para que el electrodo se funda.
4. Se forma una pequeña gota. Esta se mueve a hacia del sustrato adhiriéndose en él.

En la Figura 2.1 se muestra a modo de ejemplo, una capa de material depositada por ESD para dos voltajes distintos. El material del sustrato es bronce al aluminio y el material del electrodo es acero inoxidable.

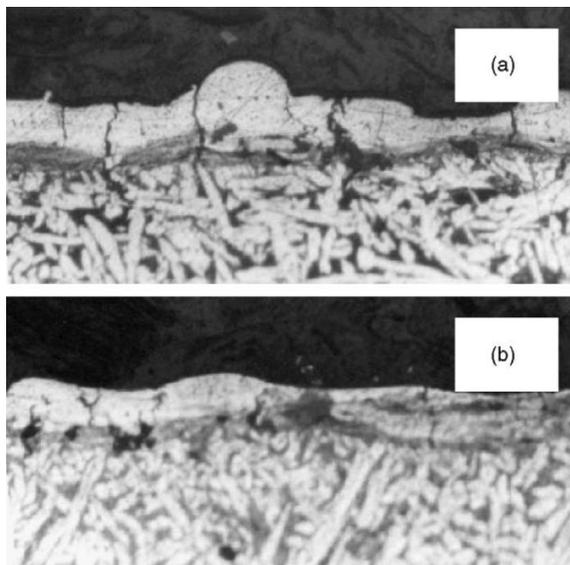


Figura 2.1: Ejemplo de capa depositada por ESD, deposito de acero inoxidable sobre bronce al aluminio. Para A 60[V] y B 80[V] [1].

### 2.1.3. Efecto de la energía de descarga y el tiempo del tratamiento

La energía disponible para la descarga en cada ciclo es:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_g^2 \quad (2.1)$$

Donde  $C$  corresponde a la capacidad del condensador y  $V_g^2$  corresponde al voltaje de ruptura en el medio.

La forma en que esta energía se distribuye depende de la longitud de la separación interelectrodo, la duración de la descarga y las propiedades físicas de los electrodos. Al aumentar la energía de descarga por unidad de área, aumenta el grosor de la capa depositada hasta alcanzar un valor máximo. Al alcanzar un nivel de energía crítica se produce evaporación del material de manera que se genera una sobrepresión que eyecta el material transferido. La calidad de la capa depende en gran medida del tiempo de tratamiento. Para tiempos prolongados de tratamiento, aparecen grietas y poros que hacen disminuir el espesor de la capa depositada debido a la fatiga térmica que la afecta. Por esto, existe un tiempo óptimo de tratamiento en el cual se alcanza la máxima transferencia. El tiempo crítico para el cual se obtiene la máxima transferencia, en general, tiende a disminuir al aumentar la energía de descarga [4].

## 2.1.4. Principales aplicaciones

### Mejora de las propiedades superficiales

Una de las principales aplicaciones del proceso ESD, es la mejora de las propiedades superficiales de los materiales, como por ejemplo; aumento de la dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión. En la Figura 2.2 se muestra el rotor de una turbina a gas y los álabes de la misma. En la actualidad algunas zonas del rotor se recubren con depósitos de carburos de cromo ( $Cr_3C_2$ ) y los álabes con depósitos de carburos de tungsteno (WC).



Figura 2.2: Depósito de  $Cr_3C_2$  en zonas del rotor de la turbina y de WC en los álabes.

Este tipo de depósito para mejorar las propiedades superficiales también se aplican a componentes de la industria automotriz, componentes de equipos nucleares, equipamiento militar (cañones de tanques), etc.

### Reparación y mantenimiento de componentes

Otra aplicación interesante del proceso, es la reparación y mantenimiento de superficies. En este caso se utiliza el material del electrodo como relleno de las zonas dañadas, pudiéndose lograr una muy buena terminación superficial. Con este método se pueden reparar, pequeñas socavaciones, grietas y cualquier daño menor generado en la superficie de los materiales. En la Figura 2.3 se muestra una pieza de aluminio y el proceso de reparación del daño superficial.



Figura 2.3: Reparación de un componente de aluminio.

## Capítulo 3

# Metodología Experimental

La metodología experimental de este trabajo de título se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.1. A continuación se resumirán las etapas de la metodología presentada:

- Obtención de los polvos metalúrgicos: Se realizó una molienda en seco de las ferroaleaciones (FeB, FeMo, FeCr, FeTi) y grafito, para obtener una granulometría aproximada de 53 [ $\mu\text{m}$ ], para lo cual se utilizó el pulverizador Labtechnics Modelo 100301, que se encuentra en el laboratorio de Preparación Mecánica del departamento de Ingeniería Civil en Minas de la Universidad de Chile.
- Mezcla de polvos metalúrgicos: Se procedió a mezclar los polvos de las ferroaleaciones y grafito, con la finalidad de homogenizar los polvos para la fabricación de los electrodos. Para ello se utilizaron los tornos mecánicos ubicados en el Taller Mecánico del departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile.
- Compactación y sinterización de los electrodos: Luego de la mezcla de polvos, estos se compactaron a una presión de 2070 [MPa] y se sinterizaron a unos 900 [ $^{\circ}\text{C}$ ] aproximadamente.
- Retiro de camisa de electrodo: Posterior a la sinterización de los electrodos, se procedió al retiro de la camisa utilizada para la compactación de los polvos.
- Caracterización del substrato: Antes de comenzar con el procesamiento mediante ESD, se caracterizó la dureza del substrato, para poder comparar la dureza inicial con la dureza final obtenida. El material del substrato es un acero SAE 1020, el cual presentó una dureza promedio de 176 [HV].
- Fabricación del dispositivo rotatorio: Se fabricó un dispositivo que permite la deposición de material en forma rotatoria, con el objetivo de mejorar la deposición de material y la

terminación superficial.

- Preparación del equipo ESD: Antes del inicio de las pruebas se conectó el dispositivo rotatorio con el circuito de descarga y posteriormente realizaron las pruebas para la puesta a punto del equipo.
- Procesamiento mediante ESD: Se realizaron las pruebas depositando los diferentes tipos de electrodos, variando entre otros factores el contenido de Carbono de los electrodos, el tiempo de tratamiento y la atmósfera protectora del proceso.
- Caracterización de la capa depositada: Se caracterizaron las capas depositadas, en función de: la terminación superficial, espesor, microdureza y compuestos metálicos.

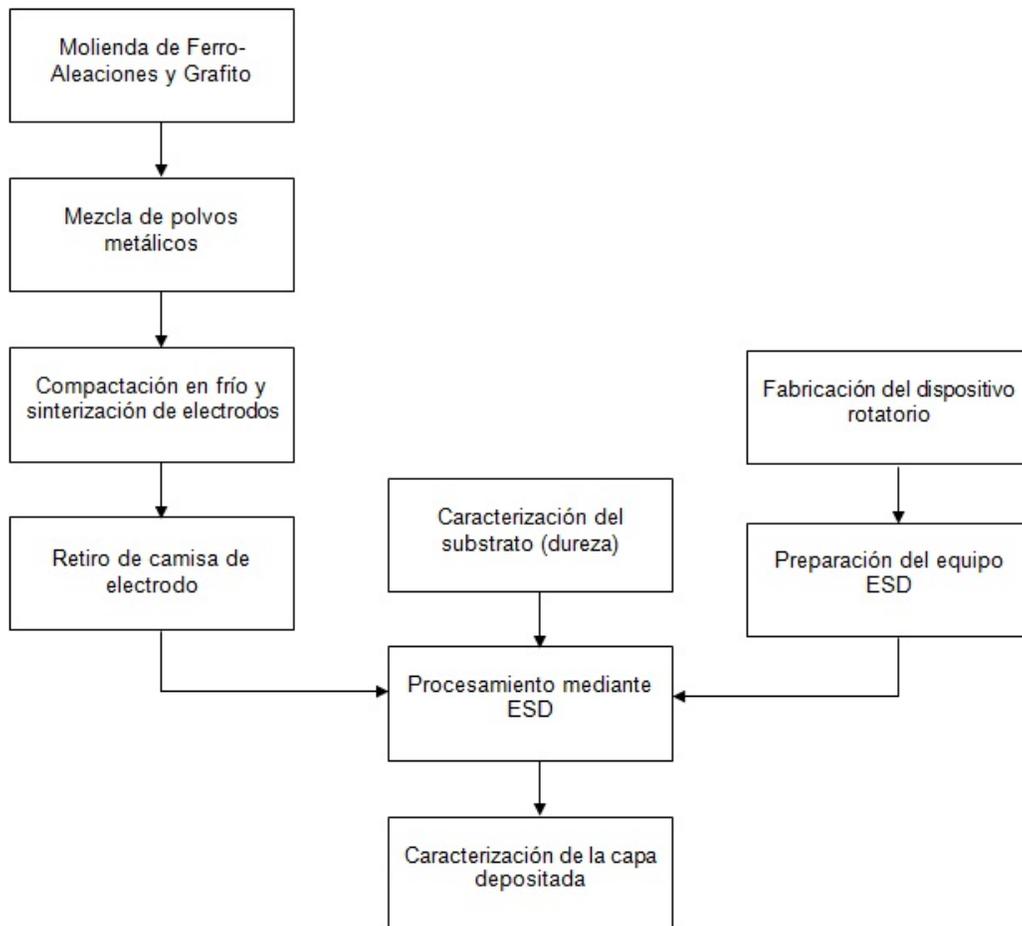


Figura 3.1: Diagrama de flujo de las etapas del trabajo de título.

### 3.1. Procedimiento experimental

#### 3.1.1. Instalación experimental para deposición por electrodescarga

Un esquema general simplificado de una instalación de deposición por electrodescarga se muestra en la Figura 3.2, el cual consiste en un circuito de corriente continua conectado al electrodo y un dispositivo electromecánico que le otorga el movimiento al material base y hace vibrar el electrodo contra el sustrato.

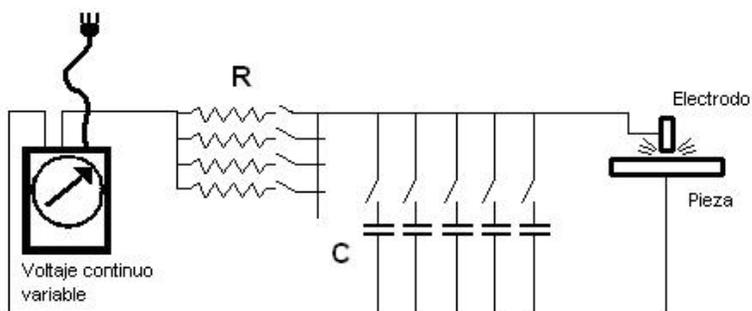


Figura 3.2: Esquema simplificado del circuito RC.

#### Circuito de descarga

En la Figura 3.3 se observa el circuito RC de descarga utilizado en este trabajo. Entre los factores más importantes que gobiernan la tasa de transferencia entre el electrodo y el sustrato, están los parámetros eléctricos del circuito tales como; la capacidad del condensador, la resistencia del circuito y el voltaje de la fuente.

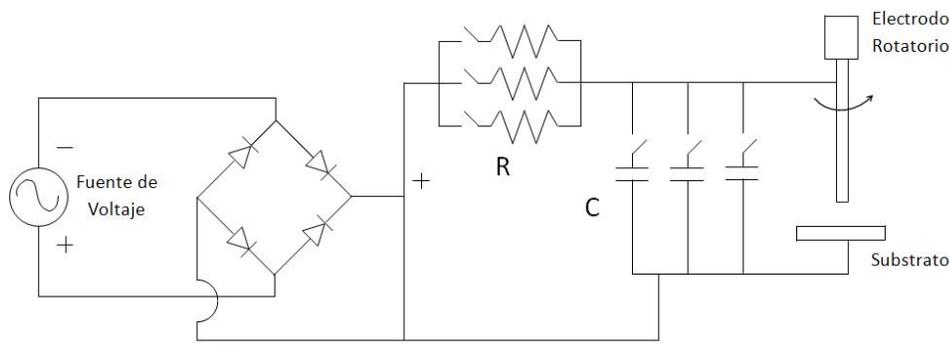


Figura 3.3: Circuito de descarga utilizado.

La fuente de poder es un transformador de salida variable, el cual se alimenta con un voltaje

alterno de 220 [V] efectivos y una frecuencia de 50 [Hz] [4].

La corriente se rectifica pasando a través de un puente rectificador de onda completa y posteriormente a través de un condensador de filtro [4].

La resistencia (R) del diagrama se utiliza para regular la constante de tiempo que controla la carga del condensador y/o para limitar la corriente de cortocircuito [4].

Los electrodos representan el material de aporte (ferroaleaciones + grafito) y la pieza representa el sustrato (Acero SAE 1020).

### Mecanismo de movimiento del electrodo

El movimiento del electrodo para la presente instalación experimental, es de tipo rotatorio. Para poder lograr el movimiento rotacional del electrodo, se fabricó un dispositivo, que otorga dicho movimiento al electrodo y permite una aplicación manual del proceso.

En la Figura 3.4 se muestra el dispositivo fabricado para la deposición rotatoria. Para otorgar el movimiento rotatorio, se utilizó un eje flexible de taladro el cual permite libertad de aplicación del proceso.

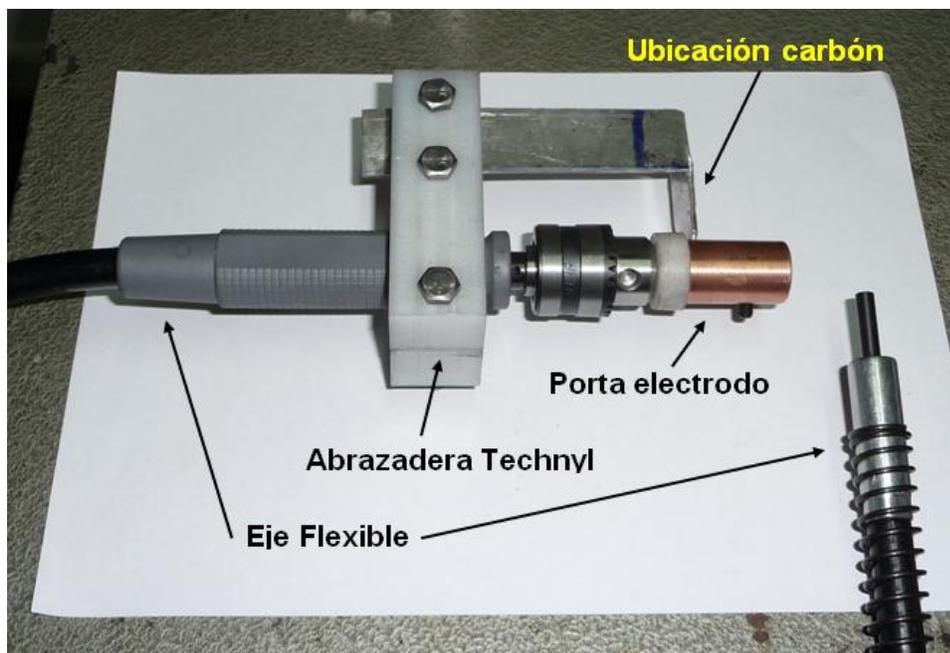


Figura 3.4: Dispositivo de deposición rotatoria de material.

En el mandril del eje flexible se monta el porta electrodo. Con el fin de optimizar la transmisión

de energía eléctrica proveniente del circuito de descarga, el porta electrodo se fabricó de Cobre, metal conocido por su excelente conductividad eléctrica.

En la Figura 3.5 se aprecia en detalle el porta electrodo y sus componentes; camisa de technyl y perno prisionero. La camisa de technyl se utilizó para aislar eléctricamente el mango del eje flexible y el perno prisionero para sujetar el electrodo. En el anexo B se muestra el plano de fabricación del porta electrodo y la camisa de technyl.

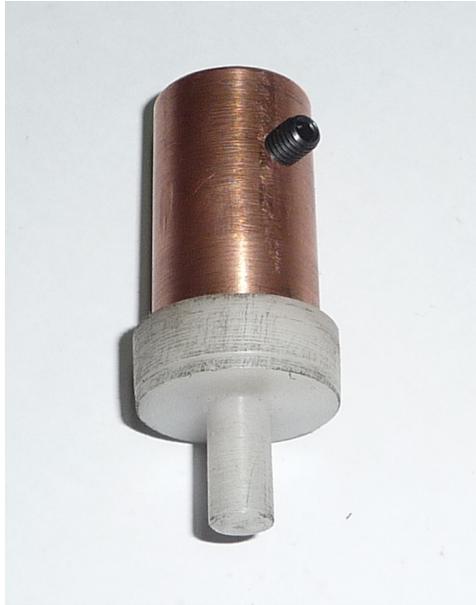


Figura 3.5: Porta electrodo de Cobre.

La conexión eléctrica entre el circuito de descarga y el dispositivo rotatorio, se realizó a través de un carbón eléctrico con resorte. En la Figura 3.4 se muestra la ubicación que debiera tener el carbón eléctrico, éste se montó en el dispositivo rotatorio, al momento de realizar las pruebas preliminares de puesta a punto del sistema. La Figura 3.6 muestra el carbón eléctrico utilizado.

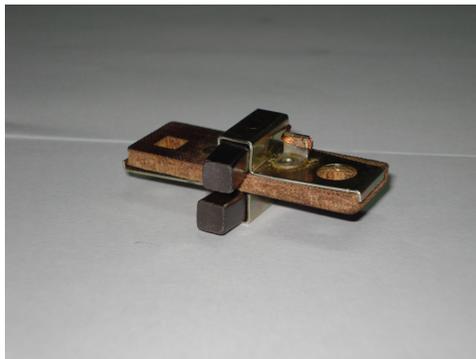


Figura 3.6: Carbón eléctrico.

## Aplicación de gas protector

Se determinó que la mejor manera de proporcionar el gas protector (Argón), es manipular la manguera de forma manual, apuntando el chorro de Argón directamente hacia la zona de contacto entre el electrodo y el sustrato. De esta manera se evita que haya pérdidas excesivas del gas. Se utilizó Argón extra puro proporcionado por el Empresa Indura.

En esta sección se detallan los materiales, equipos y procesos utilizados en la fabricación de los electrodos.

## Materiales

**Ferroaleaciones:** Las ferroaleaciones de Boro, Molibdeno, Cromo y Titanio utilizadas, fueron proporcionadas por Provedora Industrial Minera Andina S.A. (PIMASA-Chile). Las características técnicas (ver detalle en Anexo A) entregadas por el fabricante se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Información de las ferroaleaciones entregadas por el fabricante.

Ferroaleación	Granulometría [mm]	Contenido de X [%p] (Fe-X)
Ferro-Cromo	10-50	67,06
Ferro-Titanio	5-50	70,11
Ferro-Molibdeno	10-50	68,95
Ferro-Boro	10-50	15,37

Tabla 3.2: Continuación: Información de las ferroaleaciones entregadas por el fabricante.

Ferroaleación	Contenido de Carbono [%p]	Morfología
Ferro-Cromo	8,23	Rocas de forma irregular
Ferro-Titanio	0,10	Rocas de forma irregular
Ferro-Molibdeno	0,04	Rocas de forma irregular
Ferro-Boro	1,60	Partículas de forma irregular

**Grafito:** El polvo de grafito utilizado fue proporcionado por Minera Tracmin Limitada. La granulometría del polvo de Grafito es de 0,05-0,08 [mm] aproximadamente.

## Molienda

Para la reducción de tamaño de las rocas de forma irregular, se utilizó el chancador de mandíbulas TM Engineering Ltd., ubicado en el Laboratorio de Preparación Mecánica del Departamento de Ingeniería Civil en Minas de la Universidad de Chile. En la Figura 3.7 se muestra el chancador de mandíbula utilizado.



Figura 3.7: Chancador de mandíbula.

La pulverización de las ferroaleaciones se realizó con el pulverizador Labtechnics Modelo 100301, ubicado en el Laboratorio de Preparación Mecánica del Departamento de Ingeniería Civil en Minas de la Universidad de Chile. En la Figura 3.8 se aprecia el pulverizador utilizado en el proceso de molienda.



Figura 3.8: Pulverizador Labtechnics.

En la Tabla 3.3 se muestra la granulometría obtenida del proceso de pulverización.

Tabla 3.3: Granulometría de las ferroaleaciones obtenidas del proceso de pulverización.

Ferroaleación	Granulometría [mm]
Ferro-Cromo	0,03-0,05
Ferro-Titanio	0,05-0,08
Ferro-Molibdeno	0,03-0,05
Ferro-Boro	0,03-0,05

### Mezcla de polvos

La mezcla de los polvos de ferroaleaciones y grafito, se realizó mediante la mezcla mecánica de los materiales en un recipiente rotatorio. A través de este proceso se homogenizó la mezcla de ferroaleaciones y grafito, las cuales presentan distintas densidades, tamaños y formas. La mezcla de los polvos metalúrgicos, se realizaron en los tornos mecánicos disponibles en el Taller del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile. La velocidad de rotación de mezcla fue 100 [rpm]. El tiempo de mezcla fue de 120 [min]. En la Figura 3.9 se muestra el torno mecánico dispuesto para la mezcla del material. La inclinación del recipiente con respecto del eje de rotación fue 45° aproximadamente.



Figura 3.9: Torno mecánico utilizado en la mezcla de polvos metalúrgicos.

### Compactación en frío

La compactación en frío se realizó en la prensa hidráulica Buehler de 5 [ton] con bomba de 60 [MPa]. La compactación fue a alta presión para disminuir la porosidad en verde del compacto. La Figura 3.10 muestra la prensa hidráulica utilizada en el proceso de compactación.



Figura 3.10: Prensa hidraulica Buehler.

Para realizar la compactación se diseñaron y fabricaron los elementos necesarios para llevar a cabo ésta. Los elementos fabricados fueron: matriz, tapón de matriz, punzón y camisa de electrodo (ver detalle de los planos de fabricación en el Anexo B). Los elementos construidos para la compactación se muestran en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Elementos utilizados en el compactación de los polvos metalúrgicos.

La compactación se inicia introduciendo la camisa del electrodo dentro de la matriz, al igual que el tapón de la matriz en la parte inferior. Luego se introducen los polvos metalúrgicos dentro de la camisa del electrodo, y se realiza una pre-compactación con el punzón, logrando que el volumen inicial de los polvos disminuya. Posteriormente se agrega más polvo metalúrgico, para llenar el espacio generado en la pre-compactación. Finalmente, se aplica una presión de 2070,5 [MPa] aproximadamente en la prensa hidráulica, que corresponde a una presión de 100 [bar] en el reloj de la prensa. (Ver cálculo en el Anexo C). Cabe destacar que la compactación se realizó sin líquidos lubricantes.

### Sinterización

La sinterización se llevo a cabo en el horno eléctrico del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile. La temperatura de sinterizado fue 900°C aproximadamente, con un tiempo de residencia del compacto de una hora. Se espera que la sinterización logre la difusión de partículas, para lograr un enlace permanente a nivel atómico. El horno utilizado en la sinterización, se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12: Horno eléctrico utilizado en la sinterización.

En la Figura 3.13 se muestran las camisas de los electrodos, recién extraídas del proceso de sinterización.



Figura 3.13: Muestras post-sinterizado.

### **Retiro de camisa de electrodo**

Luego de la sinterización de los polvos metalúrgicos, se procedió con el retiro de la camisa de electrodo que sirve de contenedor de los polvos en la compactación.

El retiro de la camisa se realiza en dos pasos: primero se adelgaza la pared de la camisa en los tornos mecánicos, pertenecientes al Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, hasta dejar un espesor de pared de 1 [mm] aproximadamente. Posteriormente, la delgada capa restante, se retira utilizando un dremel, que es una herramienta de corte circular para pequeños espesores y de fácil maniobrabilidad.

### 3.1.2. Caracterización del material base

Se realizaron pruebas de microdureza al material base, para determinar la dureza base con que se trabajará y determinar si existe un aumento de la microdureza posterior al tratamiento.

### 3.1.3. Relación Estequiométrica para la Formación de Carburos

A priori, los compuestos metálicos que pueden aumentar de gran manera la dureza superficial de las capas depositadas son los carburos, es por esto que a continuación se muestra la relación estequiométrica para las cuatro ferroaleaciones, que permite idealmente la formación de carburos en la capa depositada. Para determinar que carburos se formarán y a que temperaturas, se utilizó los diagramas de fase B-C, Mo-C, Cr-C y Ti-C, los cuales se muestran en el Anexo D. En la tabla 3.4, se muestran los distintos carburos que se forman, tomando como supuesto inicial la temperatura más baja de formación posible.

Tabla 3.4: Carburos y temperaturas de formación.

Carburo	Temperatura [°C]
Carburo de Boro ( $B_4C$ )	1000
Carburo de Molibdeno ( $MoC$ )	500
Carburo de Cromo ( $Cr_3C_2$ )	1200
Carburo de Titanio ( $TiC$ )	500

En la tabla 3.5, se presentan las masas molares de los elementos B, Mo, Cr, Ti y C.

Tabla 3.5: Masas molares de B, Mo, Cr, Ti y C.

Elemento	Masa molar [g/mol]
Boro (B)	10,81
Molibdeno (Mo)	95,94
Cromo (Cr)	51,99
Titanio (Ti)	47,90
Carbono (C)	12,01

#### Carburo de Boro

Carburo de Cromo  $B_4C$ , es un sólido cristalino negro con una dureza aproximada de 2900 [HB]. Para determinar la cantidad de carbono, que se debe tener para la formación de  $B_4C$ , en relación a la cantidad de boro, se tiene lo siguiente:

$$B_4C = 4 \cdot B + C = 4 \cdot 10,81 + 12,01 = 43,24g + 12,01g \quad (3.1)$$

La cantidad de boro es aproximadamente 3,6 veces la cantidad de carbono.

### **Carburo de Molibdeno**

Carburo de Cromo  $MoC$ , es un sólido cristalino gris con una dureza aproximada de 1500 [HB]. Para determinar la cantidad de carbono, que se debe tener para la formación de  $MoC$ , en relación a la cantidad de molibdeno, se tiene lo siguiente:

$$MoC = Mo + C = 95,94g + 12,01g \quad (3.2)$$

La cantidad de molibdeno es aproximadamente 8 veces la cantidad de carbono.

### **Carburo de Cromo**

Carburo de Cromo  $Cr_3C_2$ , es un sólido cristalino gris con una dureza aproximada de 1200 [HB]. Para determinar la cantidad de carbono, que se debe tener para la formación de  $Cr_3C_2$ , en relación a la cantidad de cromo, se tiene lo siguiente:

$$Cr_3C_2 = 3 \cdot Cr + 2 \cdot C = 3 \cdot 51,99 + 2 \cdot 12,01 = 155,97g + 24,02g \quad (3.3)$$

La cantidad de cromo es aproximadamente 6,5 veces la cantidad de carbono.

### **Carburo de Titanio**

Carburo de Cromo  $TiC$ , es un sólido cristalino negro con una dureza aproximada de 2400 [HB]. Para determinar la cantidad de carbono, que se debe tener para la formación de  $TiC$ , en relación a la cantidad de titanio, se tiene lo siguiente:

$$TiC = Ti + C = 47,90g + 12,01g \quad (3.4)$$

La cantidad de titanio es aproximadamente 3,9 veces la cantidad de carbono.

### 3.1.4. Caracterización de electrodos

En la Tablas 3.6 y 3.7 se muestra la caracterización de los electrodos utilizados, en relación a la cantidad de grafito.

Tabla 3.6: Electrodos con contenido estequiométrico de grafito.

Electrodo	Contenido de X [g] (Fe-X)	Contenido de C [g]
Fe-B-4,10wt %C	12,26	3,40
Fe-Mo-7,92wt %C	56,46	7,05
Fe-Cr-10,09wt %C	54,11	8,32
Fe-Ti-15,18wt %C	57,31	14,69

Tabla 3.7: Electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico.

Electrodo	Contenido de X [g] (Fe-X)	Contenido de C [g]
Fe-B-24,95wt %C	12,26	26,40
Fe-Mo-24,97wt %C	56,46	27,27
Fe-Cr-26,15wt %C	54,11	26,25
Fe-Ti-23,46wt %C	57,31	25,18

### 3.1.5. Preparación del equipo ESD

Para el procesamiento mediante ESD se construyeron 2 tipos de electrodos para cada una de las ferroaleaciones: uno con un contenido de grafito estequiométrico y otro con un contenido de grafito mayor al estequiométrico. Se considera un contenido de grafito estequiométrico, como el contenido ideal de grafito que fomenta la formación de carburos y compuestos metálicos.

En el proceso de preparación del equipo se conectó el dispositivo rotatorio al circuito de descarga y se preparó el tanque de argón. También realizaron pruebas para la puesta a punto del equipo, donde se depositaron los cuatro tipos de electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico sin y con gas protector tres voltajes distintos: 80, 100 y 120 [V], obteniendo así un número de 12 probetas. De estas pruebas preliminares con variación de voltaje, se escogió un voltaje de 100 [V] para realizar las pruebas posteriores, ya que este voltaje presentó los mejores resultados de adherencia de la capa depositada. La adherencia solo se inspeccionó visualmente.

### 3.1.6. Procesamiento mediante ESD

Para estudiar la forma de la capa depositada y el espesor de la misma, se realizaron pruebas con los electrodos con un contenido de grafito mayor al estequiométrico. Los electrodos se depositaron sobre una superficie cuadrada de  $1 \text{ [cm}^2\text{]}$ , donde se realizaron 3 probetas por electrodo. Para la primera probeta se tuvo un tiempo de tratamiento de 180 [s], para la segunda un tiempo 270 [s] y para la tercera un tiempo de 360 [s].

Luego para estudiar la microdureza y los compuestos formados en la capa depositada, se realizaron pruebas con los 2 tipos de electrodos, es decir, con los de contenido de grafito estequiométrico y con los de contenido de grafito mayor al estequiométrico. Durante la realización de estas pruebas se trató de mantener constante en 10 [mm/mín], la velocidad de avance del electrodo. Los electrodos se depositaron sobre una superficie  $0,5 \text{ [cm}^2\text{]}$  durante 3 minutos aproximadamente.

Por último, las capas fabricadas por los electrodos con contenido mayor al estequiométrico y atmósfera de argón, se introdujeron dentro de un horno con atmósfera protectora de argón, durante una hora y a una temperatura de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , con el objetivo de medir la microdureza en la capa, luego del tratamiento térmico en el horno.

Los parámetros constantes para todas las experiencias mencionadas anteriormente son: la capacidad de los condensadores correspondiente a  $200 \text{ [}\mu\text{F]}$ , el valor de la resistencia  $14,3 \text{ [}\Omega\text{]}$  y el voltaje de la fuente  $100 \text{ [V]}$ .

#### Medición de variables

Un multímetro digital permitirá conocer tanto el voltaje de salida del transformador como el valor de la resistencia. La capacidad de los condensadores se obtendrá gracias a la capacidad nominal de placa. La velocidad de avance del electrodo se obtendrá dividiendo la longitud de las probetas con el tiempo necesario para que el electrodo avance completamente sobre ésta, el cual se medirá con un cronómetro.

#### Variación del voltaje de la fuente

Se aplicaron procesos de ESD a probetas variando el voltaje de la fuente. Cabe mencionar que el voltaje de la fuente no corresponde necesariamente al voltaje de ruptura del medio, sin embargo está estrechamente relacionado. Con estos valores de voltaje se comprobó que el tratamiento es efectivo y se logró un depósito eficiente de los electrodos.

Los valores de voltaje nominal utilizados son los siguientes:

- 80 [V]
- 100 [V]
- 120 [V]

### **Variación del porcentaje de Carbono en la aleaciones metalúrgicas**

Se construyeron en total 8 electrodos, 2 por cada ferroaleación. De estos dos electrodos uno se fabricó con un contenido de grafito estequiométrico, es decir, el contenido de grafito ideal para la formación de carburos y el otro con un contenido mayor al estequiométrico de grafito, con la finalidad de estudiar la influencia del grafito sobre la formación de compuestos metálicos y la dureza de la capa depositada.

#### **3.1.7. Caracterización de la capa depositada**

Para el estudio y análisis de los resultados se realizaron macrografías a la superficie, perfiles de microdureza, micrografías a sección transversal de la capa y caracterización química sobre la superficie de la probeta.

#### **Caracterización de superficie y espesor de capa**

Para caracterizar la superficie de la capa se tomaron macrografías con aumento de 20X sobre la superficie. Para caracterizar el espesor, se realizaron probetas micrográficas longitudinales de la capa, donde se estimó el espesor promedio de la capa y la variación de espesor con el tiempo de tratamiento.

#### **Microdureza**

Para medir microdureza se utilizó un microdurómetro marca Struers Duramin, cuyo identador mide dureza Vickers. El microdurómetro se encuentra en el Laboratorio del departamento de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Chile. Se utilizó una carga de 1,961 [N] (200 [g] aproximadamente) durante 15 segundos. En la Figura 3.14 se muestra un esquema del identador utilizado. La dureza Vickers se determina de la siguiente manera:

$$HV = \frac{1854,4 \cdot P}{d^2} \quad (3.5)$$

Donde

- HV: Microdureza Vickers
- P: Carga aplicada [g]
- d: Promedio de las diagonales [ $\mu m$ ]

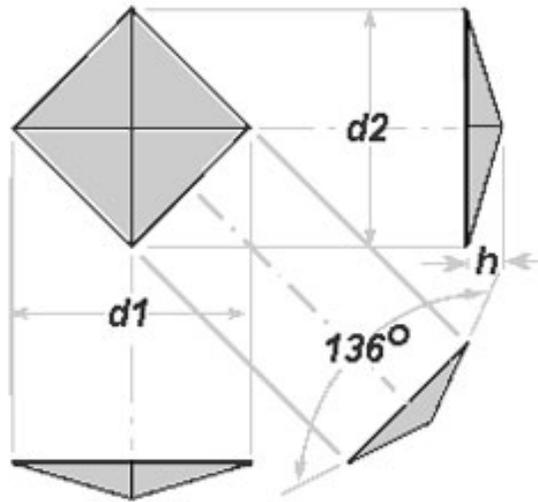


Figura 3.14: Esquema indentador Vickers.

### Caracterización Microestructural

Se utilizó microscopía óptica para obtener micrografías de las superficies de las probetas obtenidas mediante ESD.

### Difracción de Rayos X

Para estudiar la composición superficial en base a las fases presentes y posible presencia de carburos, se utilizó el equipo de Difracción de Rayos X, ubicado en el laboratorio de Cristalografía del departamento de Física de la Universidad de Chile.

El análisis de difracción de rayos X fue del tipo incidente rasante, con una variación del ángulo  $2\Theta$  desde  $0,5^\circ$  a  $2,5^\circ$ .

## Capítulo 4

# Resultados Experimentales

### 4.1. Resultados Experimentales Generales

El objetivo principal de este Trabajo de Título fue recubrir un sustrato de acero con ferroaleaciones, mediante deposición por electrodescargas con electrodo de movimiento rotatorio, donde si bien las capas depositadas no lograron un espesor uniforme, si se obtuvieron distintos compuestos metálicos que aumentaron la dureza superficial del sustrato. Según lo obtenido de la difracción de rayos X sobre la superficie de las capas depositadas, se encontraron: Carburo de Hierro ( $Fe_7C_3$ ), Boruro de Hierro ( $Fe_{0,91}B_{0,09}$ ), Carburo Hierro Cromo ( $Cr_{1,75}Fe_{5,25}C_3$ ), Óxido de Carburo de Titanio ( $TiC_{0,32}O_{0,46}$ ) y Carburo de Titanio ( $Ti_2C$ ), entre otros compuestos metálicos.

Durante la puesta a punto del equipo ESD, se trataron probetas con los electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico para 3 voltajes distintos, obteniendo así 12 probetas. Los resultados de microdureza se muestran en la Tabla 4.2. De estos ensayos se determinó visualmente que el voltaje que presentó la mejor adherencia de las capas al sustrato fue 100 [V] y por lo tanto el voltaje para la fabricación de las siguientes probetas se fijó en 100 [V].

Para las capas producidas por las cuatro ferroaleaciones, se obtuvieron superficies irregulares y rugosas. En cuanto al estudio de espesores de capa; para el electrodo fabricado por Fe-B se obtuvieron espesores de capa de 81, 120 y 131 [ $\mu m$ ], el electrodo fabricado por Fe-Mo obtuvo espesores de capa de 62, 110 y 115 [ $\mu m$ ], el electrodo de Fe-Cr obtuvo espesores de capa de 143, 201 y 236 [ $\mu m$ ] y por último el electrodo de Fe-Ti obtuvo espesores de capa de 44, 79 y 88 [ $\mu m$ ]. Los 3 espesores de capa mencionados anteriormente, se obtuvieron con tiempos de tratamiento de 180, 270 y 360 [s] respectivamente.

Para las pruebas de microdureza, se utilizaron probetas con una superficie de 0,5 [ $cm^2$ ]. Las

primeras 8 probetas se trataron con los electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico. Cuatro probetas se procesaron en ausencia del gas protector y las cuatro probetas restantes en presencia del gas protector, para estudiar la variación de la dureza con la aplicación del gas protector. Para el electrodo fabricado con la ferroaleación de Fe-B, se obtuvieron valores de dureza entre 1361-2031 [HV], para el electrodo de Fe-Mo, se lograron valores de durezas entre 1050-1908 [HV], para el electrodo de Fe-Cr, se lograron valores de dureza entre 772-1736 [HV] y para el electrodo de Fe-Ti, se lograron valores de dureza entre 622-1317 [HV].

Posteriormente se fabricaron cuatro probetas, utilizando electrodos con contenido de grafito estequiométrico ideal y con un voltaje de 100 [V]. Estas nuevas probetas se fabricaron inmediatamente en presencia de gas protector, ya que los mejores resultados que se obtuvieron, en las primeras probetas fabricadas, en cuanto a homogeneidad y adherencia de la capa, se lograron con presencia del gas protector. Para el electrodo fabricado de Fe-B, se obtuvieron valores de dureza entre 1070-1470 [HV], para el electrodo de Fe-Mo, se lograron valores de dureza entre 1780-2013 [HV], para el electrodo de Fe-Cr, se lograron valores de dureza entre 901-1578 [HV] y para el electrodo de Fe-Ti, se lograron valores entre 576-688 [HV].

Las probetas fabricadas con los electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico y atmósfera de argón, sometidas a una temperatura de 600 °C, mantuvieron los valores de microdureza encontrados luego de la aplicación del proceso ESD a una temperatura ambiente.

Como se observa en todas las probetas fabricadas, se logró un efectivo depósito del electrodo sobre el sustrato (Acero SAE 1020) y aumento de la dureza superficial por sobre el valor de referencia del sustrato (176 [HV]).

## 4.2. Caracterización del Material Base

Previo a la realización de las pruebas mediante ESD, se midió microdureza del sustrato, el cual corresponde a un acero SAE 1020. En la tabla 4.1 se muestra la microdureza promedio y la desviación estándar. El ensayo se realizó con una carga de 200 g.

Tabla 4.1: Promedio y desviación estándar de microdureza de Acero 1020.

	<b>Acero SAE 1020</b>
Nº de datos	12
Promedio [HV]	176
Desviación Est. [HV]	3,6

### 4.3. Procesamiento mediante ESD

#### 4.3.1. Puesta a punto del circuito de descarga y pruebas preliminares

Se logró conectar y montar de manera satisfactoria el banco de pruebas para aplicar el proceso ESD, a las probetas de acero SAE 1020.

Las pruebas iniciales para la puesta a punto, se realizaron utilizando los electrodos con un porcentaje de grafito mayor al estequiométrico. En la Tabla 4.2 se muestran resultados obtenidos. Estos resultados, aunque preliminares, sirven para estudiar la influencia que tiene el voltaje sobre la dureza de la capa depositada. Se realizaron aproximadamente unas 8 mediciones por probeta y el promedio de éstas se muestra en la Tabla 4.2. Las pruebas se realizaron sin gas protector.

Tabla 4.2: Durezas obtenidas en la puesta a punto del sistema.

Electrodo	Dureza a 80 V [HV]	Dureza a 100 V [HV]	Dureza a 120 V [HV]
Fe-B-24,95wt %C	1379,4	1492,0	1682,7
Fe-Mo-24,97wt %C	1566,9	1945,4	1790,7
Fe-Cr-26,15wt %C	1537,6	1688,7	1801,8
Fe-Ti-23,46wt %C	808,2	839,9	910,3

Las indentaciones sobre las capas depositadas, se realizaron en forma aleatoria a lo largo del espesor de la capa, es decir, las indentaciones no mantienen la misma distancia respecto de la interfase capa-substrato. En la Figura 4.1 se muestran algunas indentaciones realizadas. Las capas depositadas sobre estas probetas preliminares, no presentaron un grosor uniforme, por lo que las marcas se realizaron sobre secciones con un grosor suficiente para medir microdureza. Algunas indentaciones de microdureza provocaron grietas en la capa depositada, lo que demuestra cierta fragilidad de la misma.

La adherencia de la capa al substrato en estas probetas de prueba no fue la óptima, ya que una vez aplicado el proceso una cantidad de material muy pequeño se desprendía de la capa depositada.

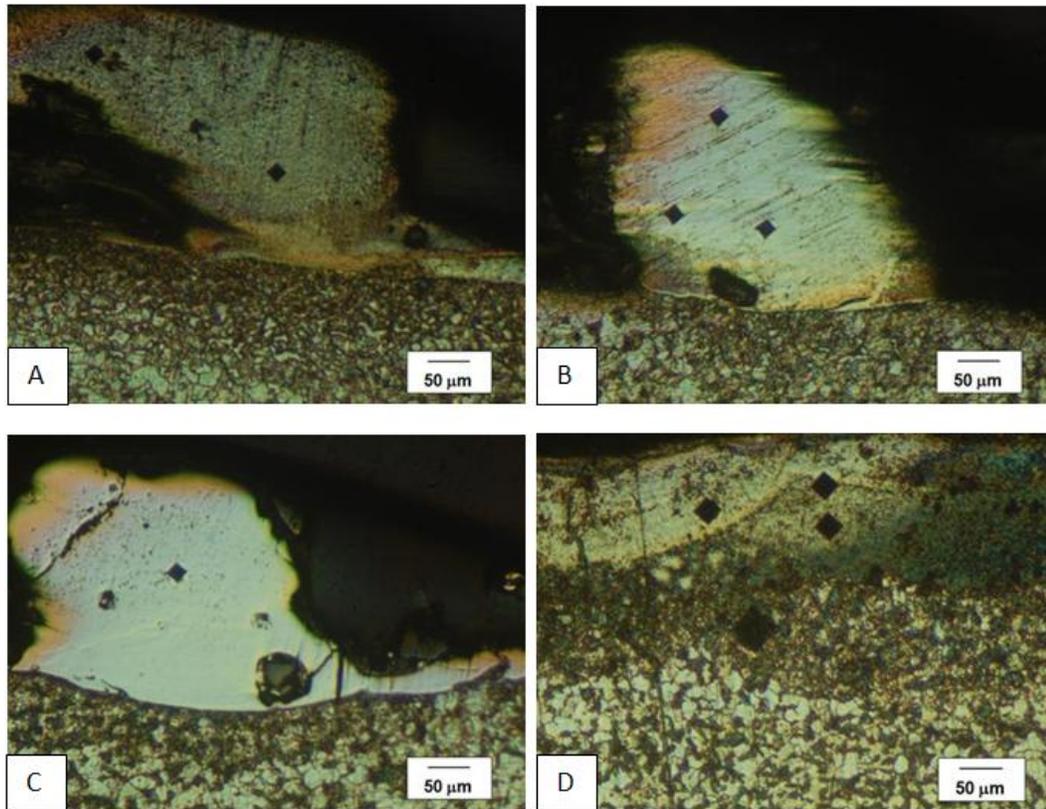


Figura 4.1: Micrografías de las probetas para la cuesta a punto: (a) Capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C con 120 [V]. (b) Capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C con 100 [V]. (c) Capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C con 80 [V]. (d) Capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C con 100 [V].

### 4.3.2. Caracterización de superficie y espesor de capa

A continuación se muestran las macrografías de las superficies tratadas por los electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico, con variación del tiempo de tratamiento y las micrografías longitudinales de las capas depositadas. Con los resultados antes mencionados se estudió la forma de las capas depositadas y la influencia del tiempo de tratamiento en el espesor de las mismas.

#### Electrodo de Ferro-Boro

En la Figura 4.2 se muestran macrografías de las superficies tratadas con el electrodo Fe-B-24,95wt%C, la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 180 [s] y la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 360 [s].

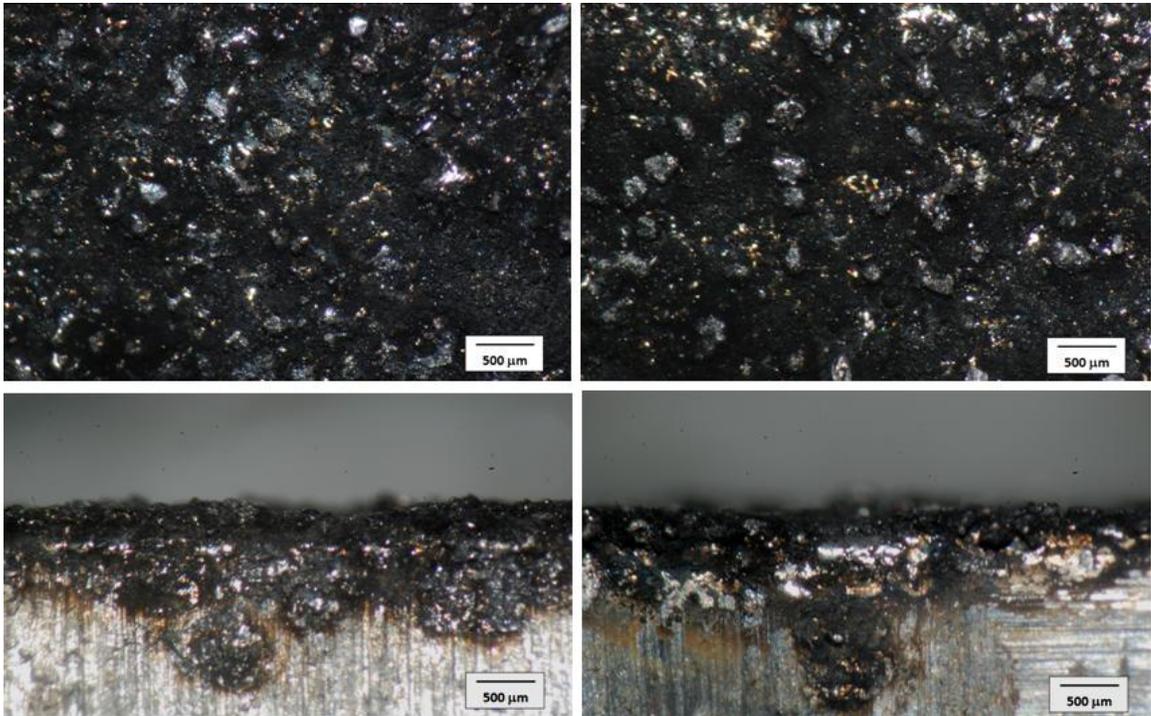


Figura 4.2: Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s].

La Figura 4.3 muestra los perfiles longitudinales de las capas depositadas por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, para los tiempos de tratamiento de 180 y 360 [s]. En las micrografías se muestran el promedio aproximado de los espesores de las capas. Además en el gráfico de la Figura 4.4 se muestra la evolución del espesor en función del tiempo, de acuerdo a las tres probetas tratadas.

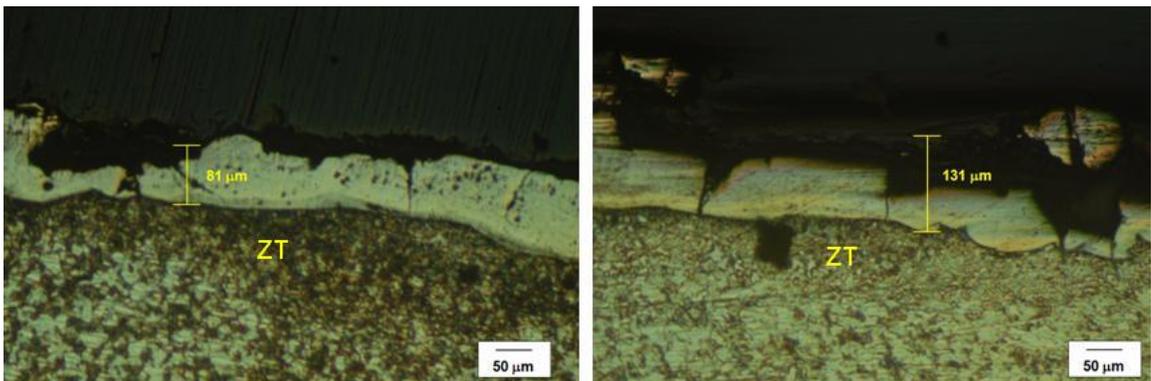


Figura 4.3: Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s].

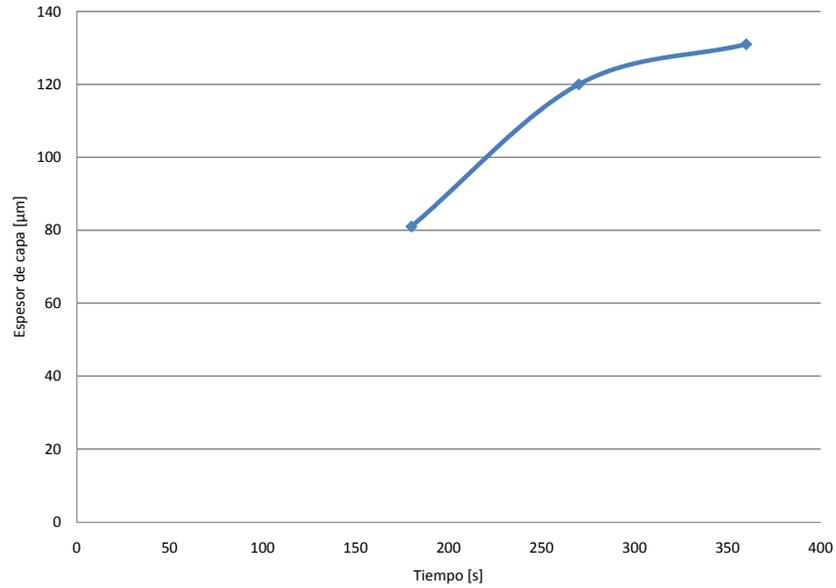


Figura 4.4: Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento.

### Electrodo de Ferro-Molibdeno

En la Figura 4.5 se muestran macrografías de las superficies tratadas con el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 180 [s] y la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 360 [s].

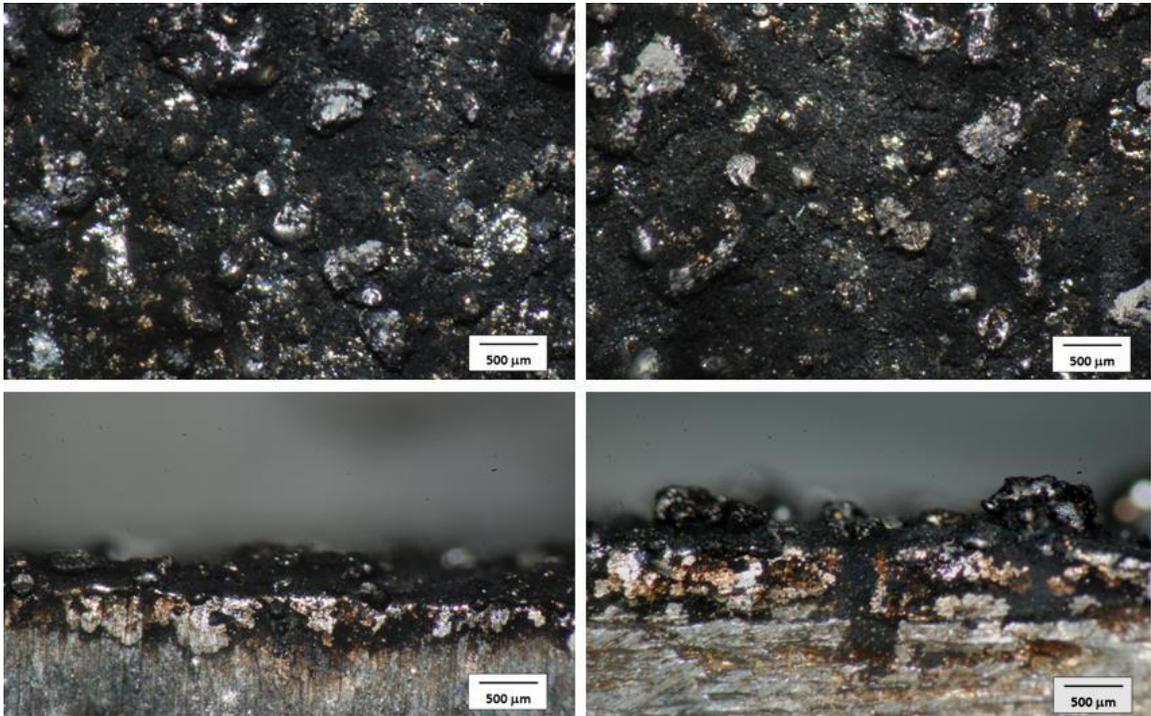


Figura 4.5: Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s].

La Figura 4.6 muestra los perfiles longitudinales de las capas depositadas por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, para los tiempos de tratamiento de 180 y 360 [s]. En las micrografías se muestran el promedio aproximado de los espesores de las capas. Además en el gráfico de la Figura 4.7 se muestra la evolución del espesor en función del tiempo, de acuerdo a las tres probetas tratadas.

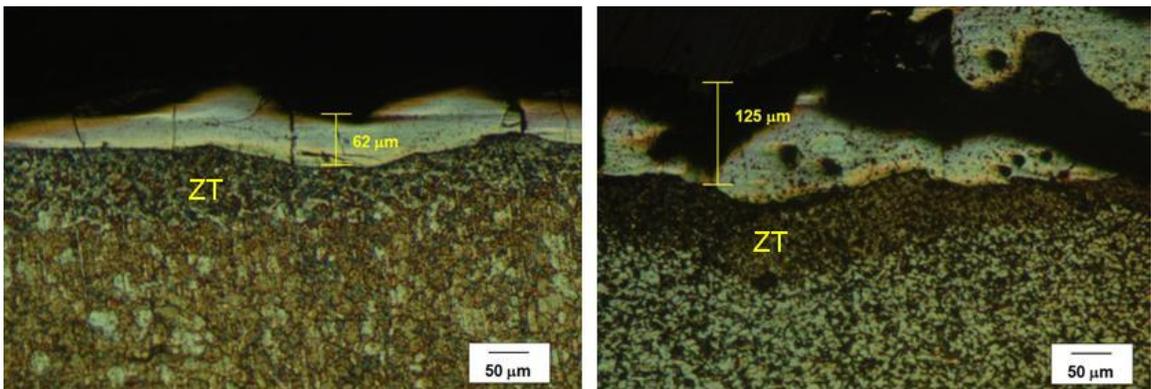


Figura 4.6: Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s].

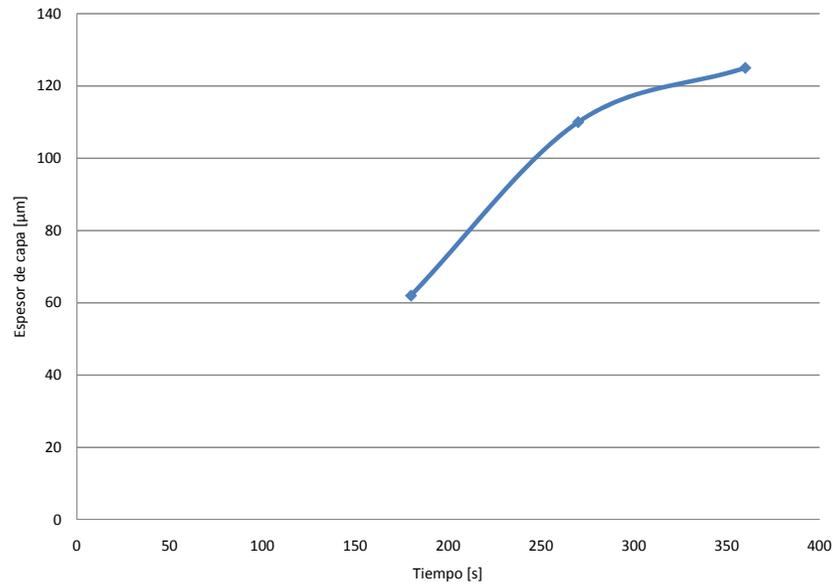


Figura 4.7: Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento.

### Electrodo de Ferro-Cromo

En la Figura 4.8 se muestran macrografías de las superficies tratadas con el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 180 [s] y la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 360 [s].

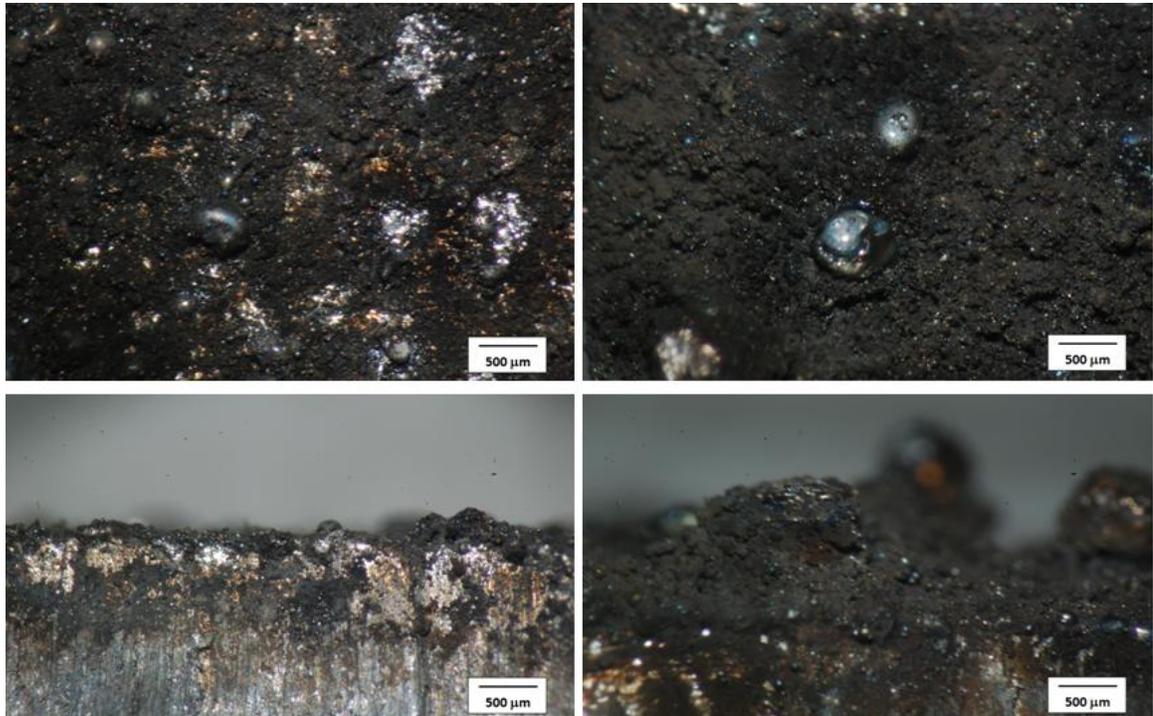


Figura 4.8: Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s].

La Figura 4.9 muestra los perfiles longitudinales de las capas depositadas por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, para los tiempos de tratamiento de 180 y 360 [s]. En las micrografías se muestran el promedio aproximado de los espesores de las capas. Además en el gráfico de la Figura 4.10 se muestra la evolución del espesor en función del tiempo, de acuerdo a las tres probetas tratadas.

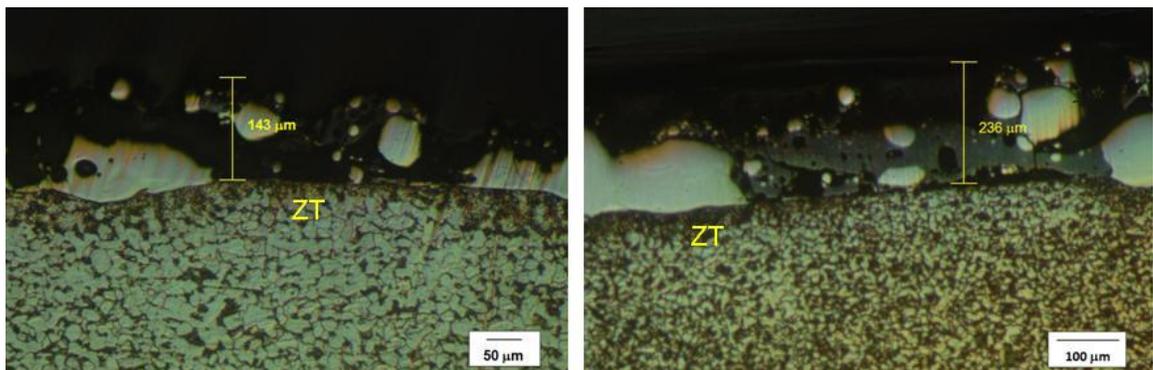


Figura 4.9: Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s].

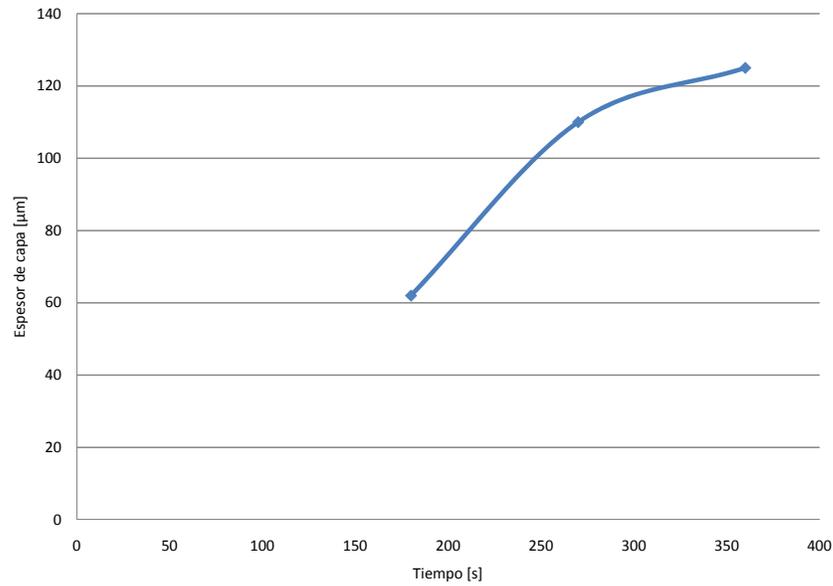


Figura 4.10: Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento.

### Electrodo de Ferro-Titanio

En la Figura 4.8 se muestran macrografías de las superficies tratadas con el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C, la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 180 [s] y la macrografía de la izquierda corresponde a la probeta tratada durante 360 [s].

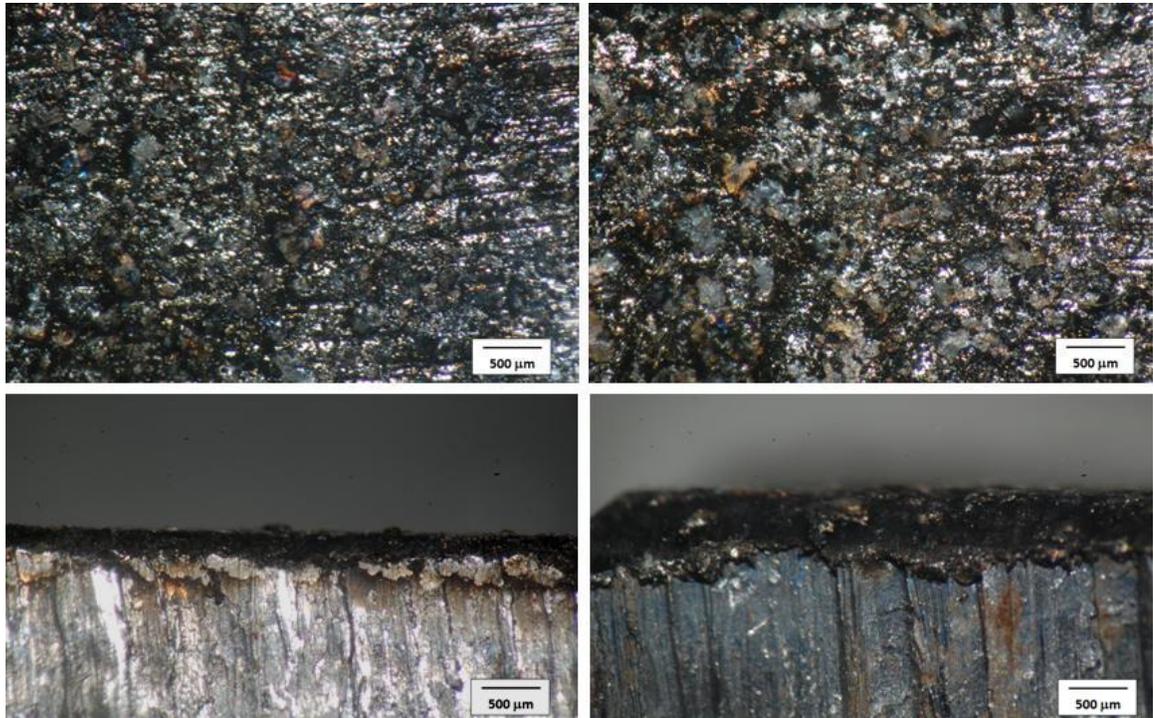


Figura 4.11: Macrografía a la superficie y espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C: a la izquierda superior e inferior se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha superior e inferior la probeta tratada durante 360 [s].

La Figura 4.12 muestra los perfiles longitudinales de las capas depositadas por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C, para los tiempos de tratamiento de 180 y 360 [s]. En las micrografías se muestran el promedio aproximado de los espesores de las capas. Además en el gráfico de la Figura 4.13 se muestra la evolución del espesor en función del tiempo, de acuerdo a las tres probetas tratadas.

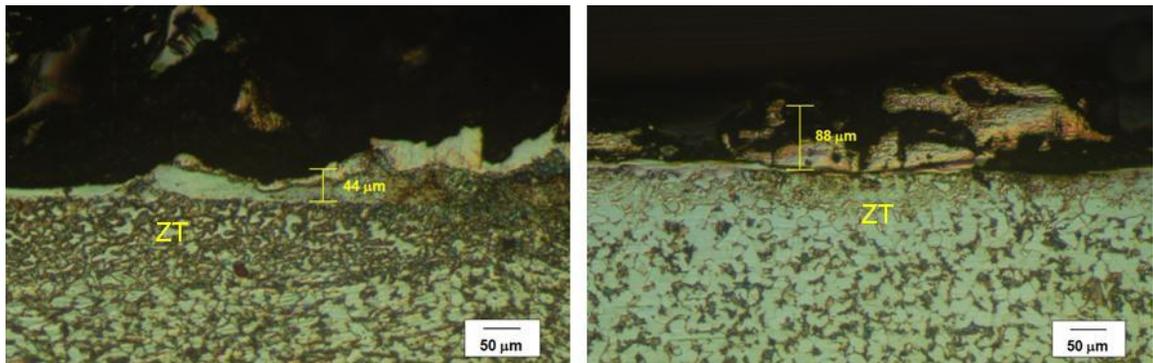


Figura 4.12: Micrografía longitudinal de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C: a la izquierda se muestra la probeta tratada durante 180 [s] y a la derecha la probeta tratada durante 360 [s].

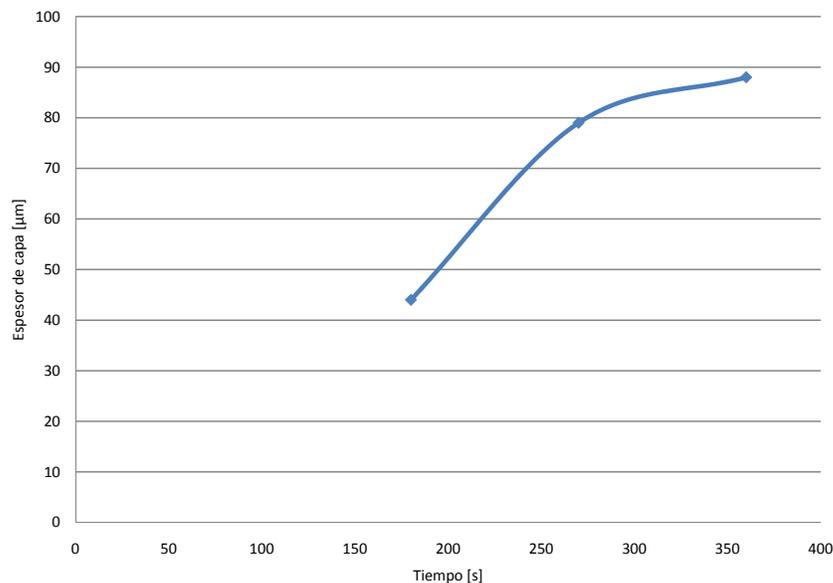


Figura 4.13: Variación del espesor de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C, en dependencia del tiempo de tratamiento.

### 4.3.3. Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito mayor al estequiométrico sin gas protector

De los tres voltajes aplicados en forma preliminar, los mejores resultados en cuanto a; adherencia de la capa al sustrato e integridad de las indentaciones de microdureza, se obtuvieron con un voltaje de 100 [V]. Dado lo anterior se seleccionó dicho voltaje para fabricar depósitos que permitan realizar un perfil de microdureza, con la finalidad de estudiar la influencia del espesor de la capa sobre la microdureza de la misma.

#### Electrodo de Ferro-Boro

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-B-24,95wt%C. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 indentaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1658 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1361 [HV].

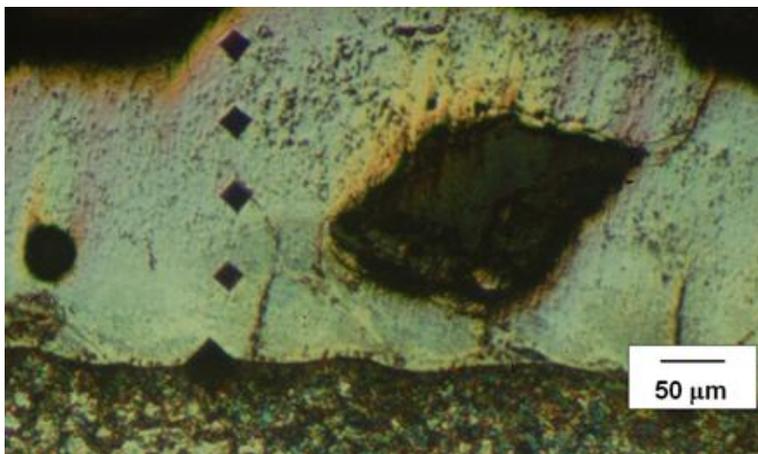


Figura 4.14: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, con voltaje de 100 [V].

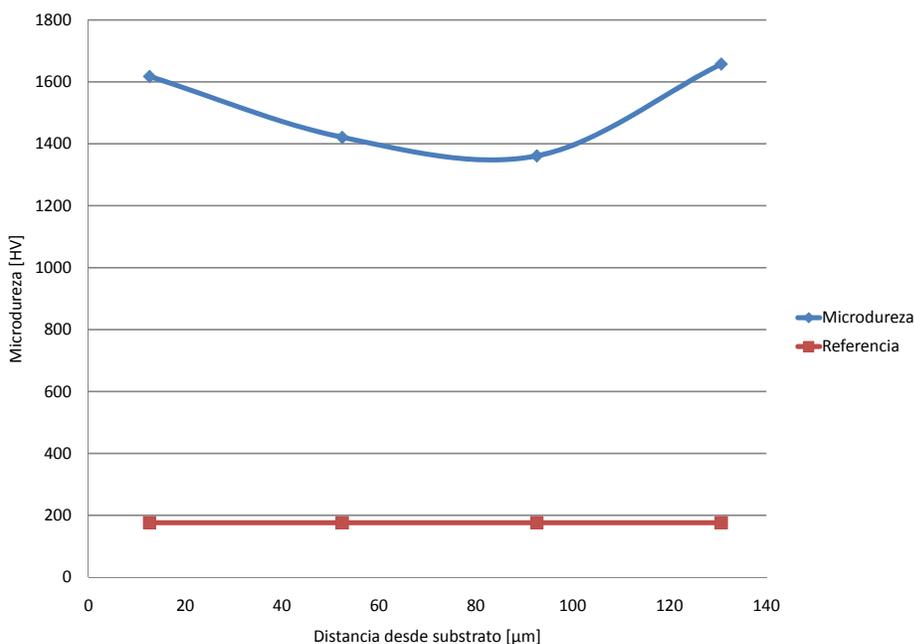


Figura 4.15: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, con voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Molibdeno

Las Figuras 4.16 y 4.17 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 indentaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1576 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1050 [HV].

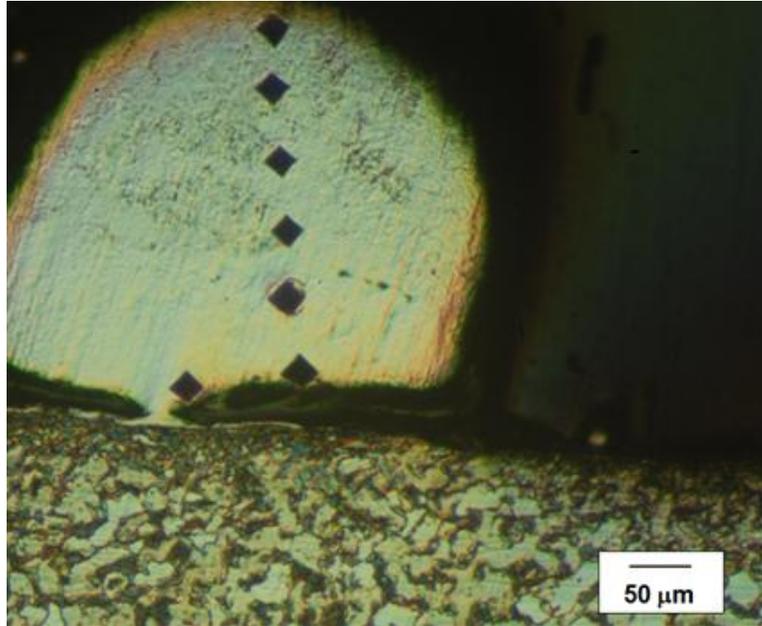


Figura 4.16: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, con voltaje de 100 [V].

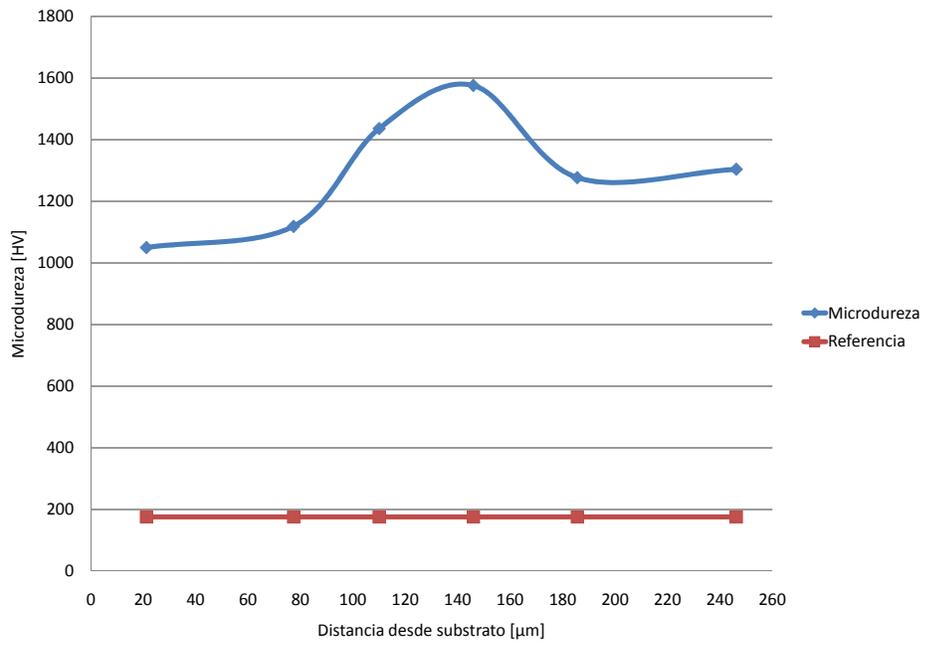


Figura 4.17: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, con voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Cromo

Las Figuras 4.18 y 4.19 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 indentaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1486 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 772 [HV].

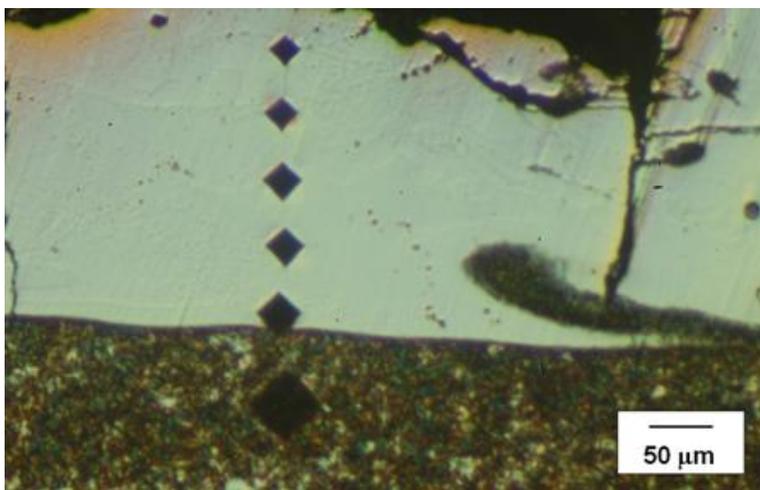


Figura 4.18: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, con voltaje de 100 [V].

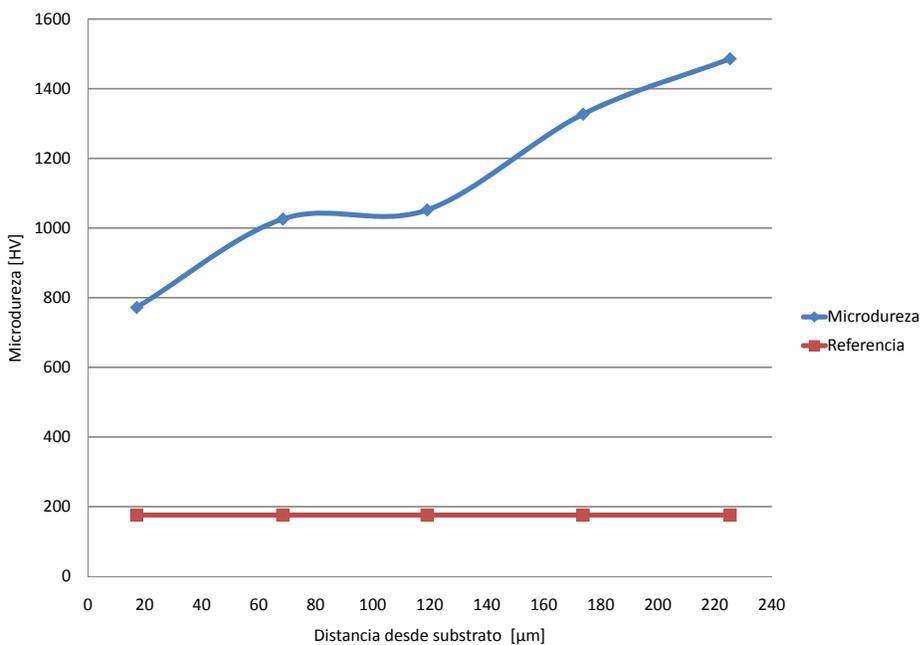


Figura 4.19: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, con voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Titanio

Las Figuras 4.20 y 4.21 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 indentaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 826 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 597 [HV].

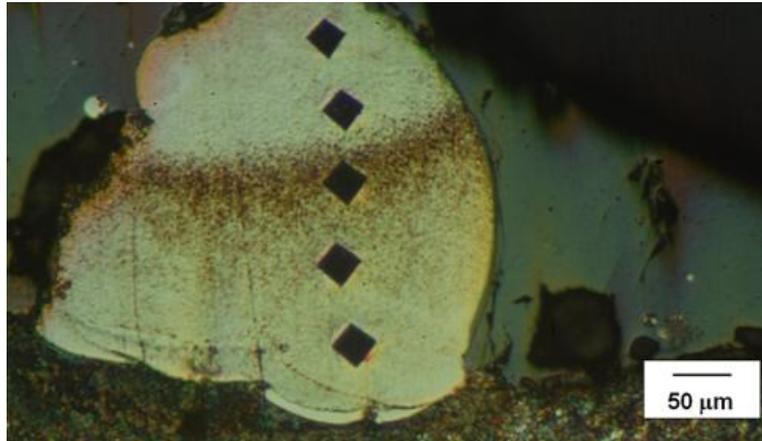


Figura 4.20: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C, con voltaje de 100 [V].

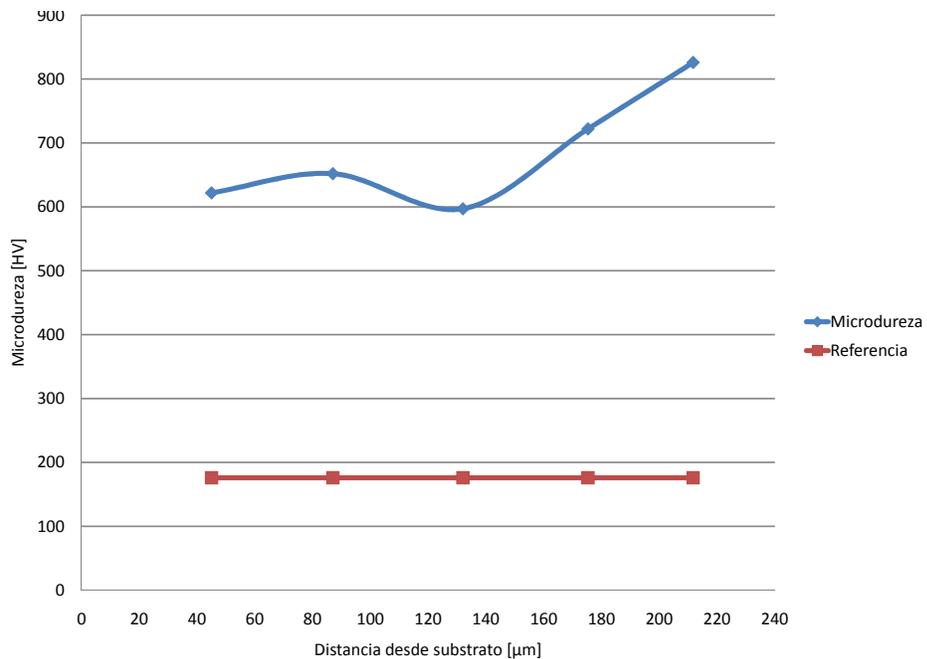


Figura 4.21: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%C, con voltaje de 100 [V].

Al igual que en las probetas fabricadas en la puesta a punto del circuito de descarga, las capas

formadas por los distintos electrodos no tienen un grosor uniforme y en la mayoría de los casos el grosor de una sección típica no permitió más de dos indentaciones, por lo tanto las indentaciones se realizaron en secciones con un grosor suficiente para poder realizar 4 o 5 marcas.

En las nuevas capas obtenidas no se mejoró la adherencia de la capa al sustrato, obtenida en las probetas preliminares.

#### **4.3.4. Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito mayor al estequiométrico con gas protector**

Para evitar que la capa depositada se contamine con impurezas exteriores, se utilizó el gas protector para el procesamiento de nuevas probetas. En el procesamiento se mantuvieron los mismos electrodos y el mismo voltaje, que las probetas anteriores. Además se espera que con el uso del gas protector, la adherencia de la capa depositada mejore.

La microdureza medida sobre estas probetas, se realizó con una carga de 980,7 [mN] (100 [g]) durante 15 segundos. Se cambió la carga en estas probetas, para poder aprovechar el grosor de las capas formadas.

Por último para caracterizar completamente las capas depositadas, se llevaron al Departamento de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile, para realizarles un análisis de difracción de rayos X. Los difractogramas obtenidos se observan en el Anexo E.

#### **Electrodo de Ferro-Boro**

Las Figuras 4.22 y 4.23 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-B-24,95wt% C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 indentaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 2031 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1530 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.1), se halló la presencia de Boruro de Hierro ( $Fe_{0,91}B_{0,09}$ ), Fe puro, Grafito C.

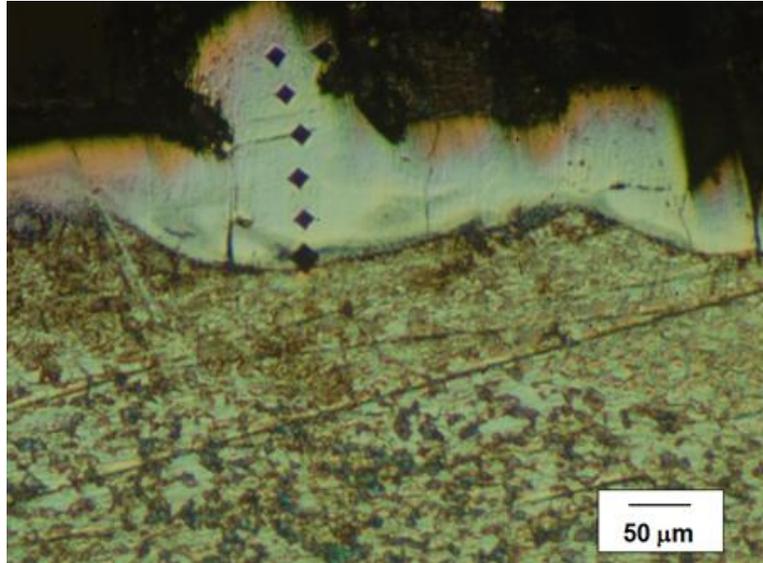


Figura 4.22: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

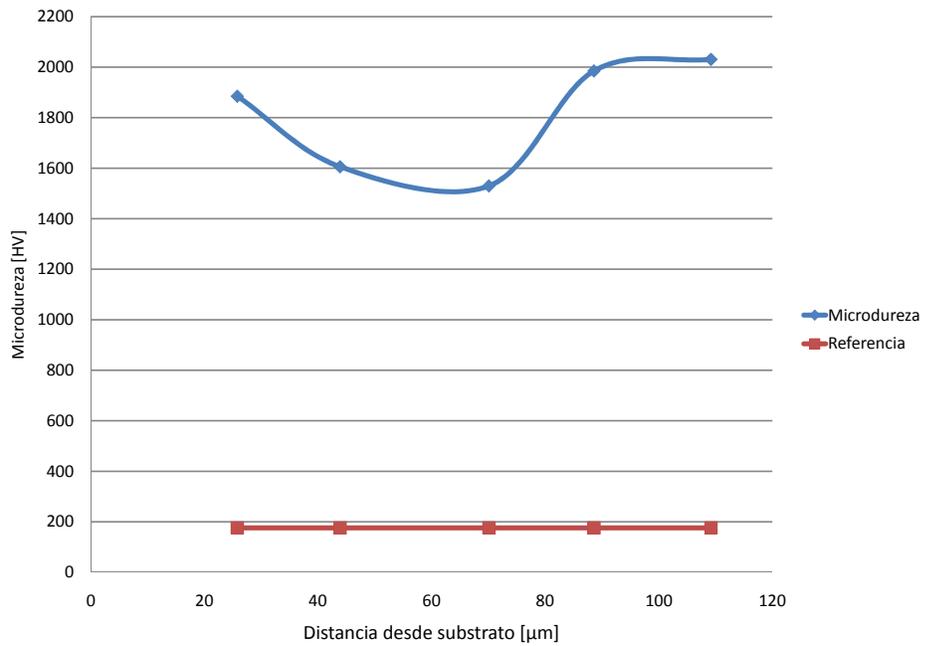


Figura 4.23: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Molibdeno

Las Figuras 4.24 y 4.25 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1908 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1521 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.2), se halló la presencia de Hierro-Molibdeno ( $Mo_{0,038}Fe_{0,962}$ ), Fe puro, Grafito C y Hierro-Carbono ( $CFe_{15,1}$ ).

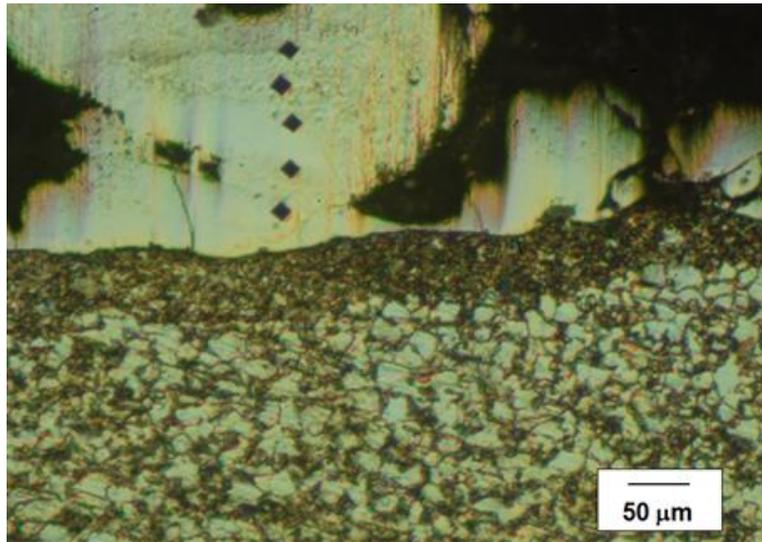


Figura 4.24: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

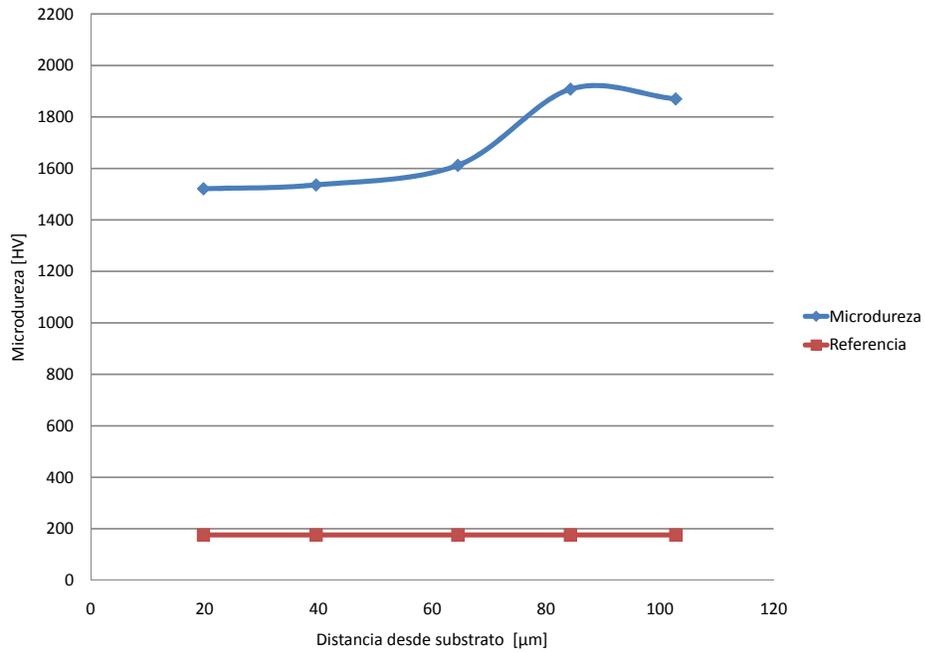


Figura 4.25: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Cromo

Las Figuras 4.26 y 4.27 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1442 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 906 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.3), se halló la presencia de Carburo de Hierro-Cromo ( $Cr_{1,75}Fe_{5,25}C_3$ ) y Carburo de Hierro ( $Fe_7C_3$ ).

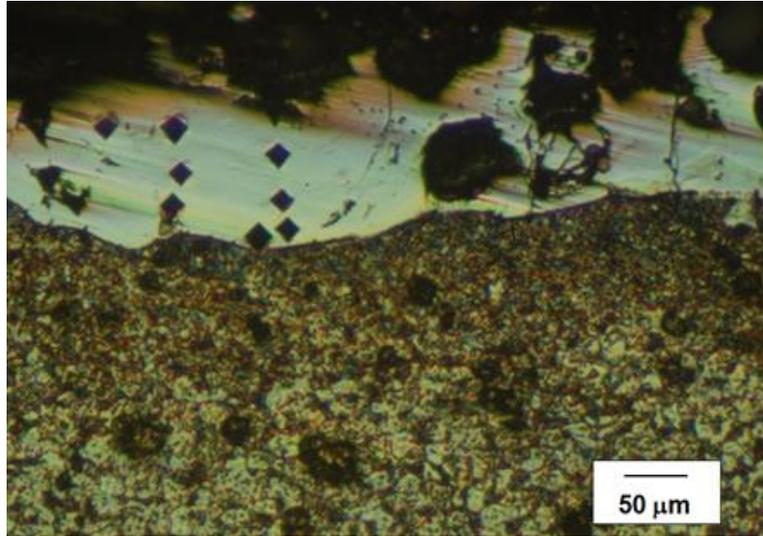


Figura 4.26: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

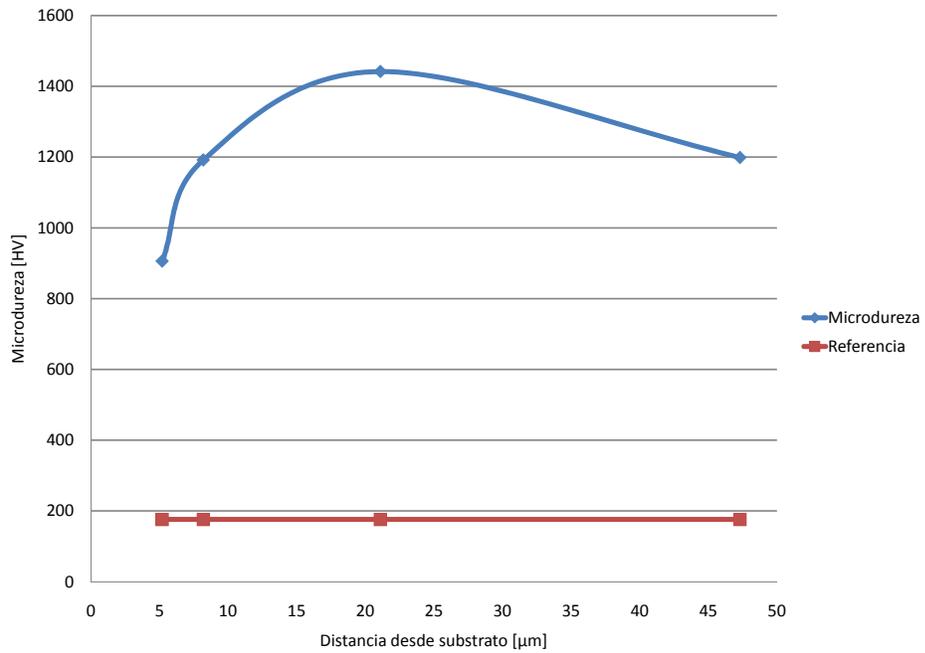


Figura 4.27: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Titanio

Las Figuras 4.28 y 4.29 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1317 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 722 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.4), se halló la presencia de Hierro-Titanio ( $Ti_{0,023}Fe_{0,977}$ ), Fe puro, Óxido de Carburo de Titanio ( $TiC_{0,32}O_{0,46}$ ) y Carburo de Titanio ( $Ti_2C$ ).

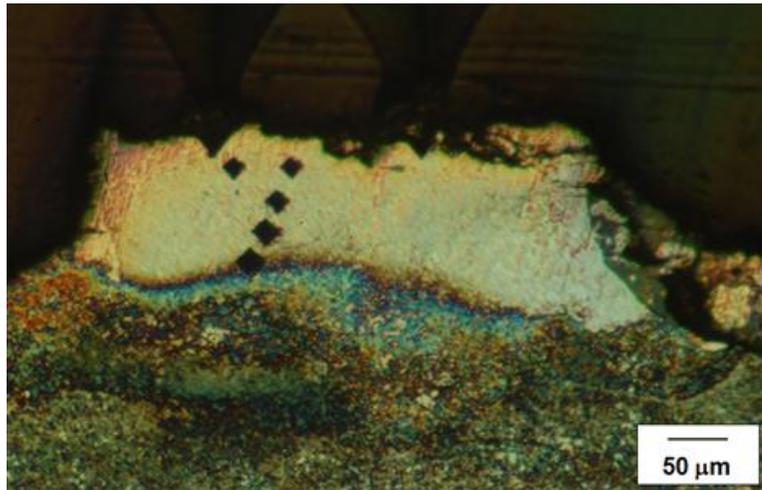


Figura 4.28: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

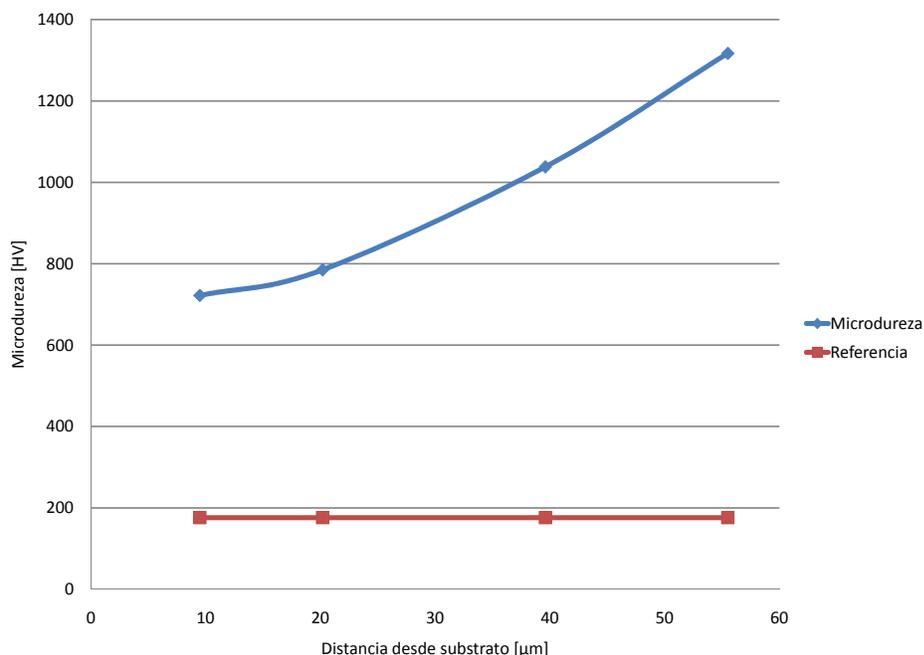


Figura 4.29: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt%*C*, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

La adherencia y uniformidad de la capa formada en presencia del gas protector, mejoró con respecto a las probetas procesadas sin el gas protector.

#### 4.3.5. Probetas tratadas con electrodos con porcentaje de grafito estequiométrico con gas protector

Se fabricaron cuatro probetas utilizando los electrodos con contenido de grafito estequiométrico ideal (ver Tabla 3.6). Se utilizó inmediatamente el gas protector sobre estas probetas, dado los buenos resultados obtenidos sobre las probetas anteriores, en cuanto a uniformidad y adherencia de la capa.

La microdureza medida sobre estas probetas, se realizó con una carga de 980,7 [mN] (100 [g]) durante 15 segundos. Se cambió la carga en estas probetas, para poder aprovechar el grosor de las capas formadas.

Por último para caracterizar completamente las capas depositadas, se llevaron al Departamento de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile, para realizarles un análisis de difracción de rayos X. Los difractogramas obtenidos se observan en el Anexo E.

### Electrodo de Ferro-Boro

Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-B-4,10wt%C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1540 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 878 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.5), se halló la presencia de Carburo de Hierro  $Fe_7C_3$  y Fe puro.

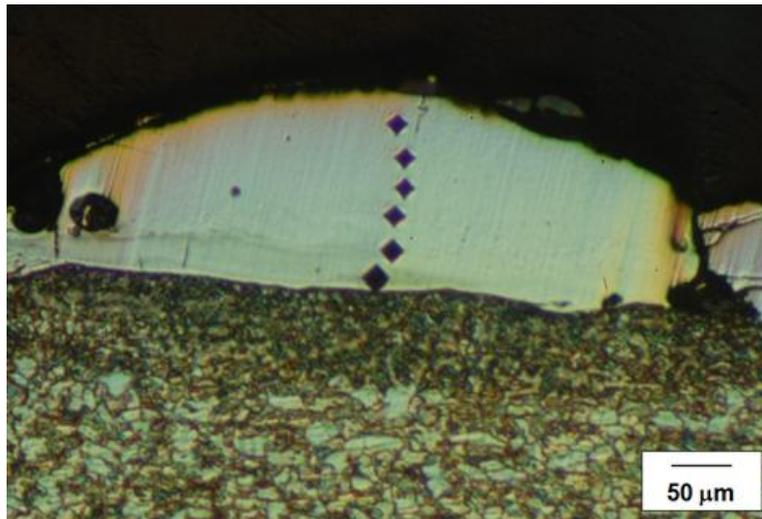


Figura 4.30: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

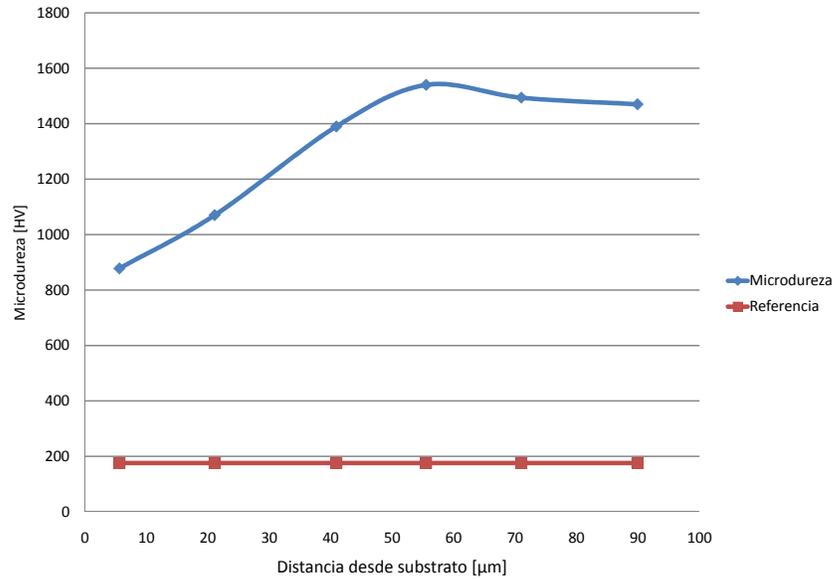


Figura 4.31: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Molibdeno

Las Figuras 4.32 y 4.33 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 2013 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1780 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.6), se halló la presencia de Hierro-Molibdeno ( $Mo_{0,038}Fe_{0,962}$ ), Fe puro, Hierro-Carbono ( $CFe_{15,1}$ ) y distintas fases de Carburo de Hierro ( $Fe_3C$ ,  $Fe_5C_2$  y  $Fe_7C_3$ ).

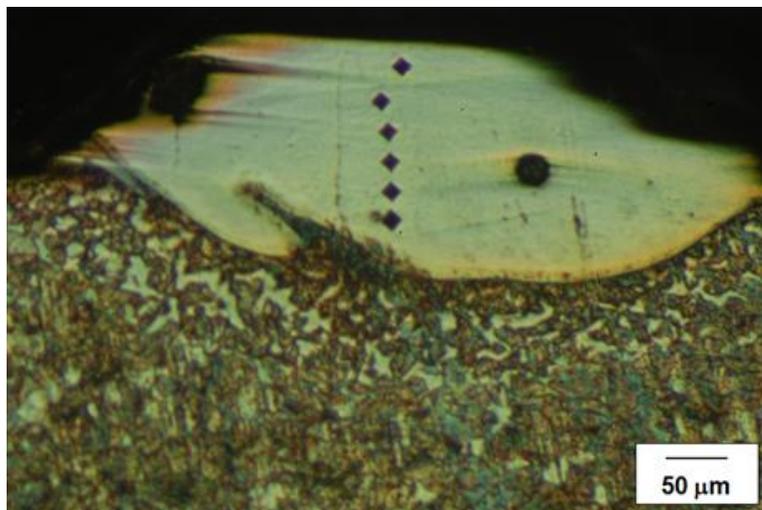


Figura 4.32: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

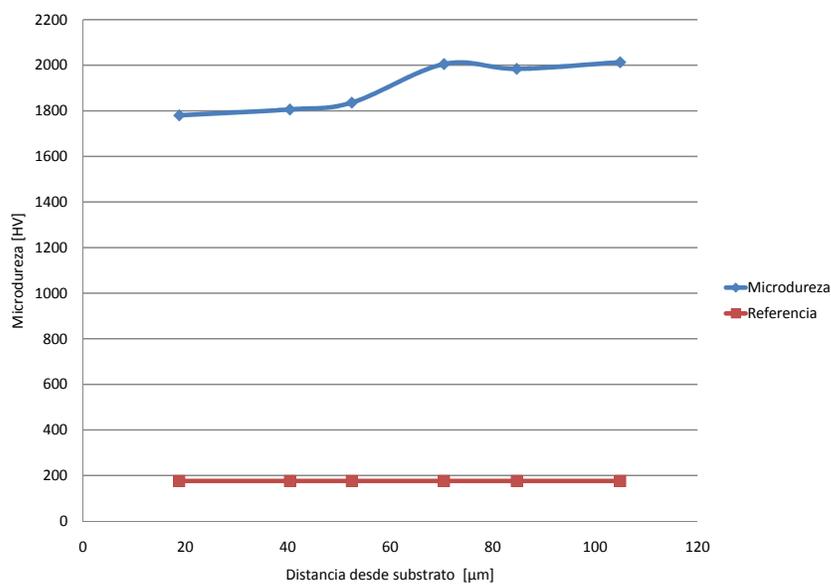


Figura 4.33: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Cromo

Las Figuras 4.34 y 4.35 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1578 [HV], mientras que

la menor dureza promedio fue de 901 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.7), se halló la presencia de Hierro-Cromo ( $Cr_{0,08}Fe_{0,92}$ ) y Fe puro.

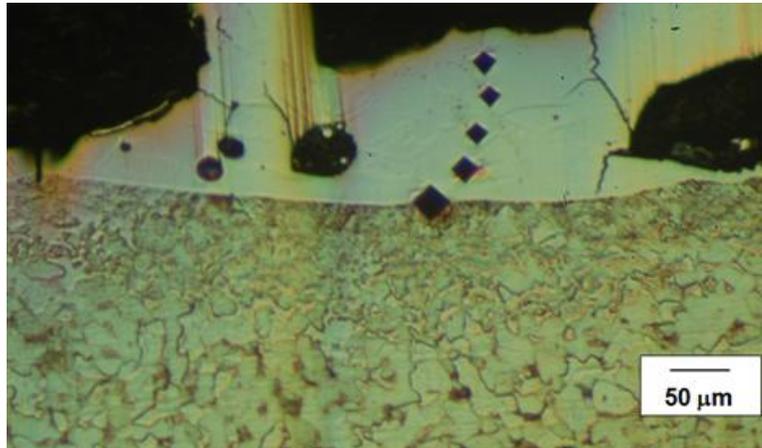


Figura 4.34: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

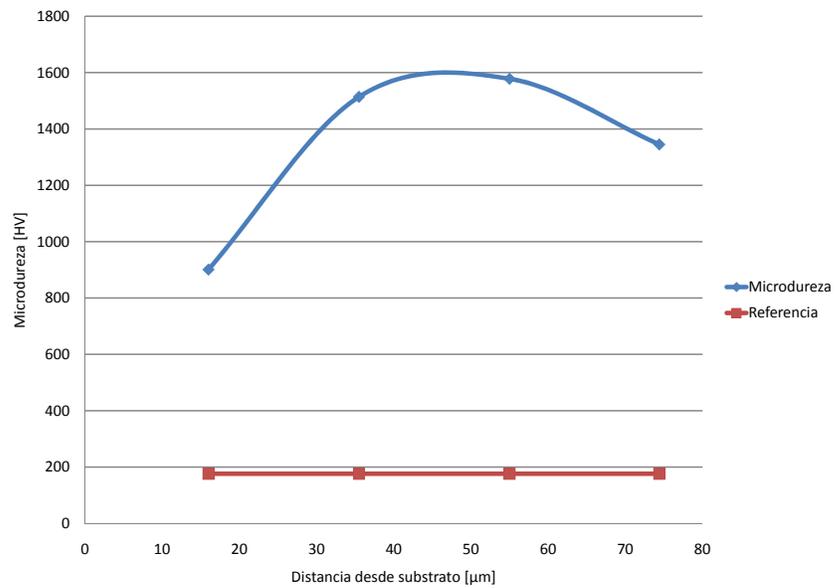


Figura 4.35: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

### Electrodo de Ferro-Titanio

Las Figuras 4.36 y 4.37 muestran los resultados obtenidos para el electrodo Fe-Ti-15,18wt%C en presencia del gas protector. El perfil de microdureza es el resultado de un promedio de 3 identificaciones aproximadamente. La mayor dureza promedio encontrada fue de 688 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 576 [HV].

Mediante la difracción de rayos X (ver sección E.8), se halló la presencia de Hierro-Titanio ( $Ti_{0,025}Fe_{0,975}$ ), Fe puro y Óxido de Hierro-Titanio ( $Fe_3Ti_3O_{10}$ ).

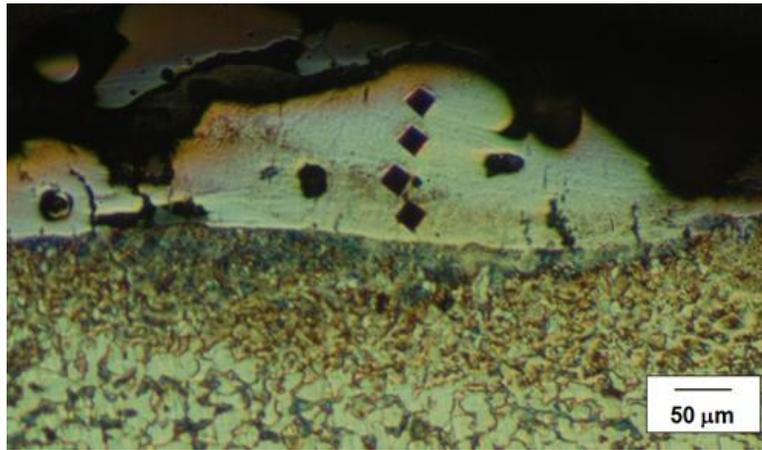


Figura 4.36: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt%C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

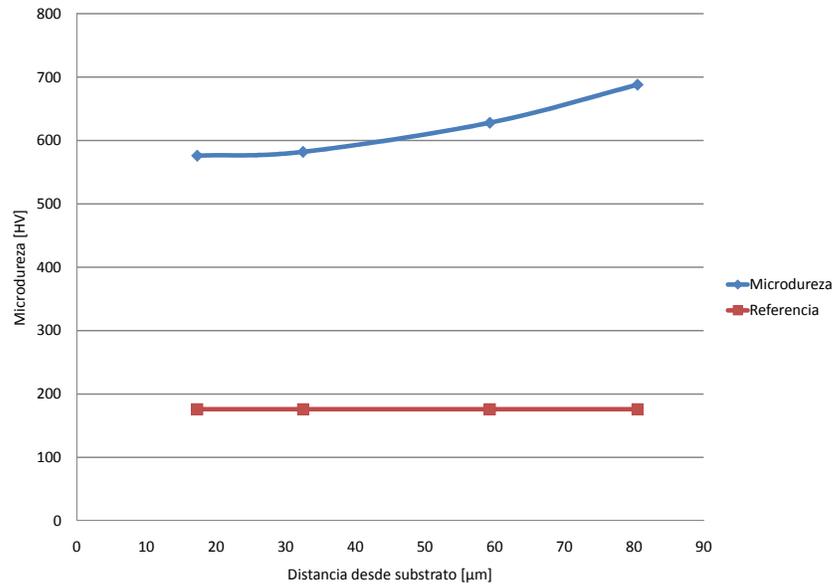


Figura 4.37: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C, con atmósfera de Argón y voltaje de 100 [V].

#### 4.3.6. Probetas sometidas a una temperatura de 600 [°C] en horno con atmósfera de Argón

A continuación se muestran los perfiles de microdureza obtenidos, en las probetas fabricadas con los electrodos con contenido de grafito mayor al estequiométrico, luego de mantener las probetas durante una hora, a una temperatura de 600 [°C] y con atmósfera protectora de argón.

##### Capa formada por Ferro-Boro

En las Figuras 4.38 y 4.39 muestran los resultados obtenidos para la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt %C. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1948 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1538 [HV].

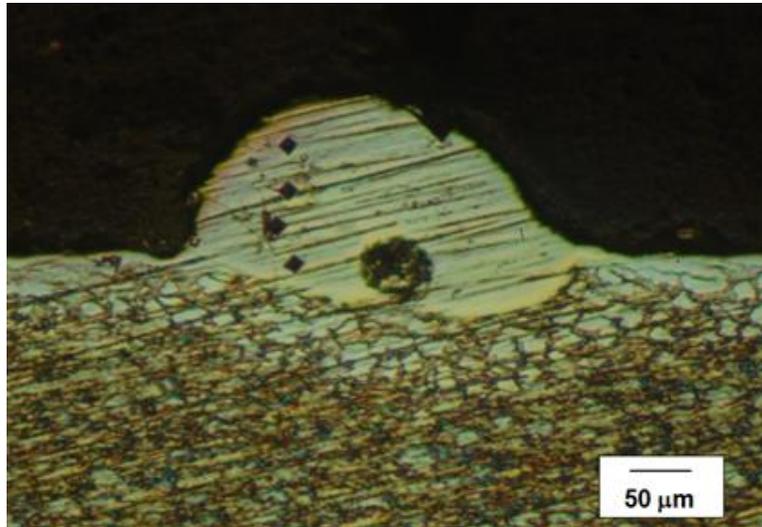


Figura 4.38: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

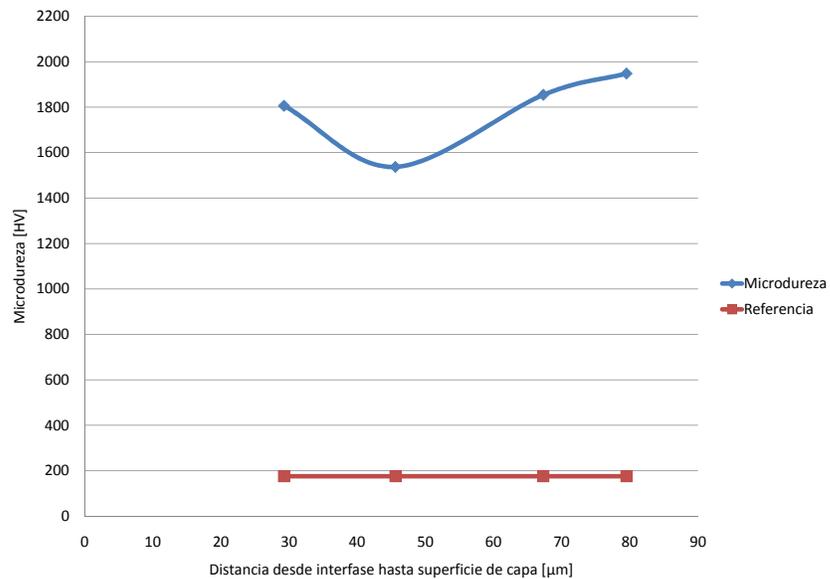


Figura 4.39: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

### Capa formada por Ferro-Molibdeno

En las Figuras 4.40 y 4.41 muestran los resultados obtenidos para la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C. La mayor dureza promedio encontrada fue de 2002 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 1597 [HV].

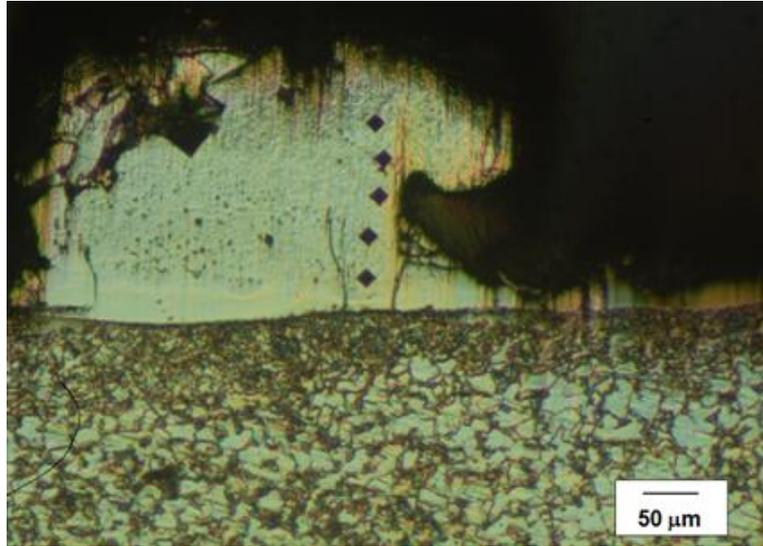


Figura 4.40: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

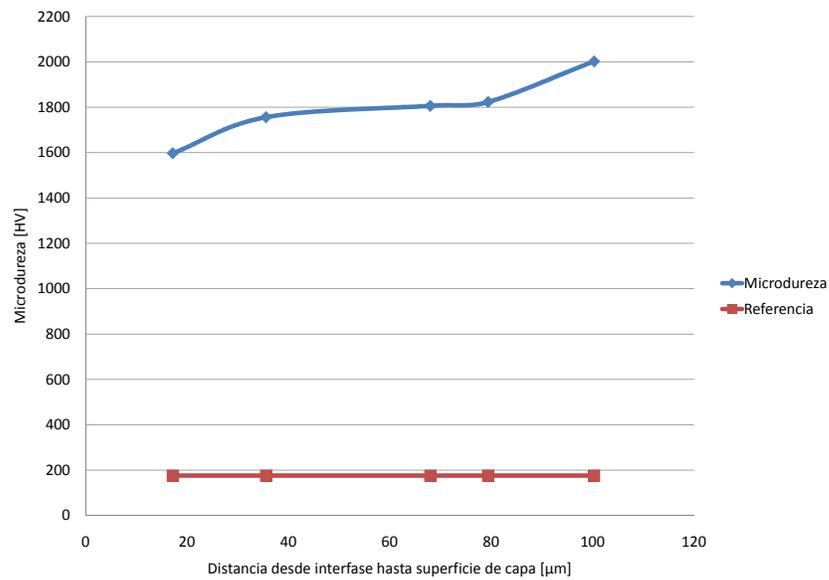


Figura 4.41: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

### Capa formada por Ferro-Cromo

En las Figuras 4.42 y 4.43 muestran los resultados obtenidos para la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1499 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 912 [HV].

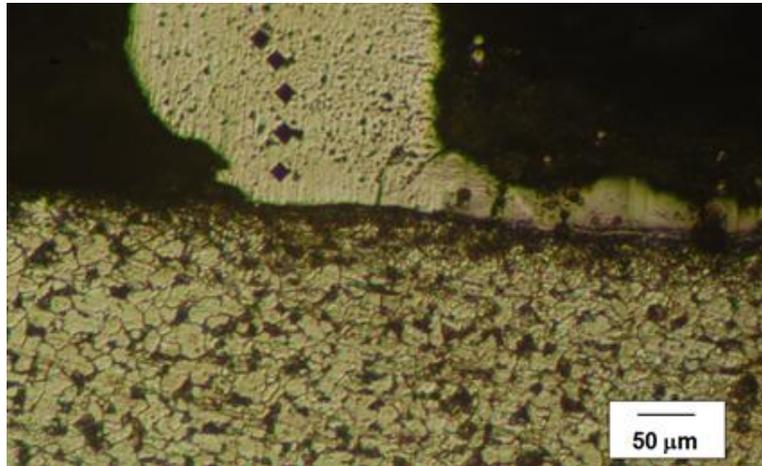


Figura 4.42: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

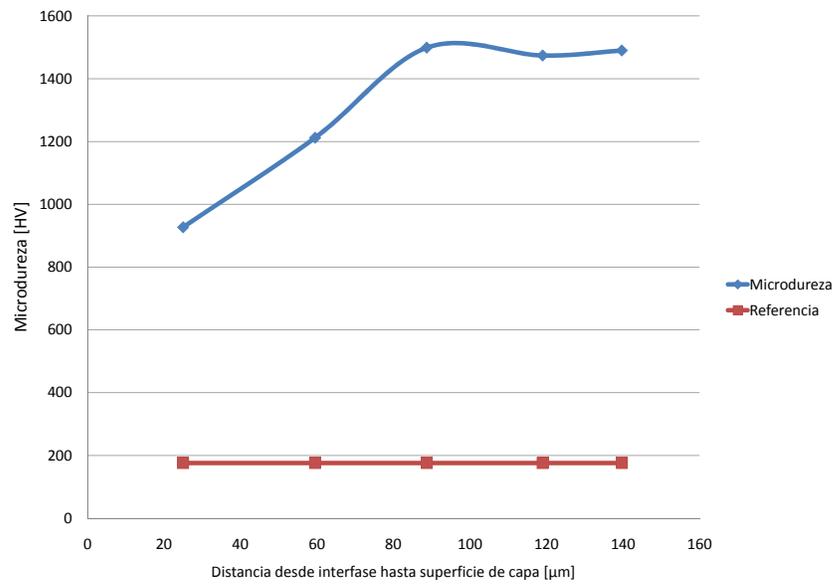


Figura 4.43: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

### Capa formada por Ferro-Titanio

En las Figuras 4.44 y 4.45 muestran los resultados obtenidos para la capa formada por el electrodo Fe-Ti-24,46wt%C. La mayor dureza promedio encontrada fue de 1436 [HV], mientras que la menor dureza promedio fue de 706 [HV].

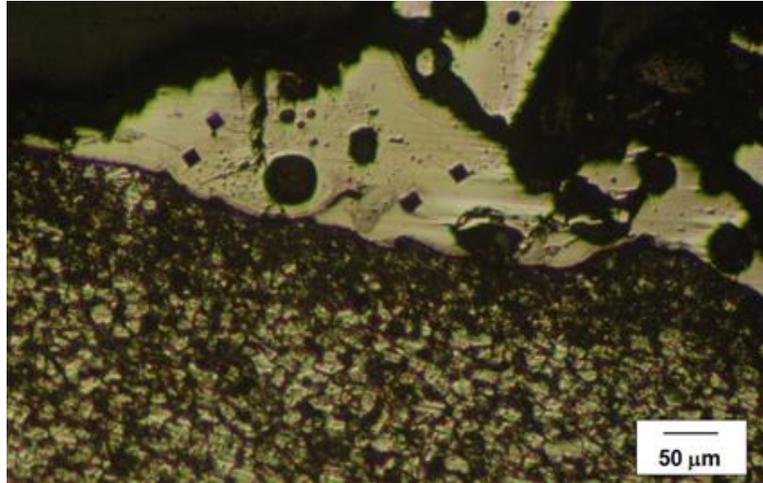


Figura 4.44: Micrografía de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-24,46wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

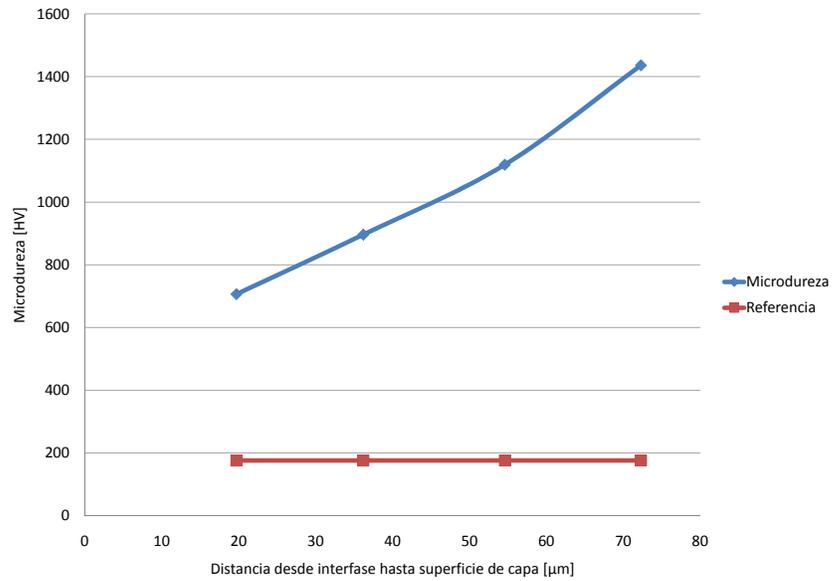


Figura 4.45: Perfil de microdureza de la capa formada por el electrodo Fe-Ti-24,46wt%C, luego de estar sometida a una temperatura de 600 °C.

## Capítulo 5

### Discusión

#### 5.1. Caracterización de superficie y espesor de capa

En las pruebas realizadas en ausencia de la atmósfera protectora, se observó una superficie irregular en la capa depositada y una adherencia no óptima para el proceso ESD. Posteriormente al incluir el gas protector al proceso ESD, la adherencia mejoró considerablemente, obteniendo recubrimientos bien adheridos al sustrato, que es una de las características principales del proceso [2]. Esta mejora en la adherencia se explica por la presencia de la atmósfera protectora, la cual evitó la contaminación de la capa depositada.

Se observa en las Figuras 4.2 y 4.5, correspondientes a las capas formadas por los electrodos Fe-B-24,95wt %C y Fe-Mo-24,97wt %C, una superficie rugosa e irregular, debida al mecanismo de transferencia globular de masa durante el proceso ESD desde el electrodo al sustrato. Esta es una característica del proceso ESD. Se forma una gota de líquido en la punta del electrodo, la cual se mueve por el canal de descarga de plasma hacia la superficie del sustrato generando a una apariencia de rocío ("splash").

La superficie formada al usar el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C (ver Figura 4.8) resultó ser más irregular y menos rugosa que las antes mencionadas (ver Figuras 4.2 y 4.5). Se aprecian las gotas de líquido provenientes del electrodo, depositadas en forma aislada, y una cantidad de material de color negro, que aparentemente se trataría de grafito, sobre la superficie. Lo anterior indica que el proceso de deposición del electrodo, no se desarrolló de la manera óptima, probablemente por la cantidad de grafito adicionada al electrodo, considerando que la ferroaleación Fe-Cr contenía un porcentaje de grafito mayor al resto de las ferroaleaciones.

Con el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C (ver Figura 4.11) se obtuvo una superficie más homogénea

y menos rugosa, respecto de las otras 3 superficies. También se observaron las gotas de líquido provenientes del electrodo, las cuales se encuentran menos distanciadas entre si y de menor tamaño, lo que se refleja en una capa más continua pero de menor espesor en comparación con los resultados de las demás ferroaleaciones.

En las micrografías longitudinales del espesor, de todas las probetas realizadas, se identificaron 3 zonas continuas: la capa depositada, la zona de transición y el sustrato (ver Figuras 4.3, 4.6, 4.9 y 4.6). La zona de transición continua muestra la buena unión metalúrgica lograda entre el recubrimiento y el sustrato. Esta zona puede ser considerada como la zona térmicamente afectada, ya que se observa un cambio en la microestructura del sustrato. Sin embargo, el espesor de las capas depositadas no fue uniforme, más bien se mantuvo irregular a lo largo de todas las probetas fabricadas. A través del espesor de la capa depositada se detectaron algunas burbujas y, al momento de realizar algunas indentaciones durante el ensayo de microdureza, se produjeron algunas microgrietas. Las burbujas pueden ser de oxígeno o de argón, las cuales quedaron en la capa durante el proceso de deposición. Las microgrietas producidas durante el ensayo de microdureza, se deben a la fragilidad de la capa depositada, lo cual se asocia, a su vez, a la rápida tasa de enfriamiento característica del proceso ESD [2].

En cuanto a la variación del espesor de capa versus el tiempo de tratamiento, se obtuvo para la capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C un espesor de capa de 81, 120 y 131 [ $\mu\text{m}$ ], para tiempos de tratamiento de 180, 270 y 360 [s], respectivamente. La Figura 4.4 muestra una pendiente ascendente entre los 180 y 270 [s] y una pendiente con una tendencia horizontal, entre los 270 y 360 [s]. La pendiente del último tramo, indica que el que el espesor de capa máximo a depositar es ligeramente mayor a 131 [ $\mu\text{m}$ ], con un tiempo de tratamiento cercano a los 360 [s].

Para el electrodo Fe-Mo-24,97wt%C se obtuvo espesores de capa de 62, 110 y 115 [ $\mu\text{m}$ ], para los tiempos de tratamiento mencionados anteriormente. La Figura 4.7 muestra un comportamiento similar al de la Figura 4.4, lo que indica que el espesor de capa máximo a depositar es superior a 115 [ $\mu\text{m}$ ] con un tiempo de tratamiento cercano a los 360 [s]. Para los electrodos Fe-B-24,95wt%C y Fe-Mo-24,97wt%C se observa una similitud en cuanto a la forma de la superficie y tamaño de espesor de capa depositada.

La capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C mostró espesores de capa de 143, 201 y 236 [ $\mu\text{m}$ ], para los tiempos de tratamiento mencionados anteriormente. La Figura 4.10 muestra una pendiente netamente ascendente entre los 180 y 360 [s]. Lo anterior indica que el espesor de capa máximo a depositar es superior a 236 [ $\mu\text{m}$ ], con un tiempo de tratamiento mayor a 360 [s]. La diferencia con las demás ferroaleaciones en el espesor de capa obtenido, se explica por el exceso de grafito encontrado durante la inspección visual realizada sobre la superficie.

Los espesores de capa obtenidos por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C son: 44, 79 y 88 [ $\mu\text{m}$ ], para los tiempos 180, 270 y 360 [s], respectivamente. El comportamiento del espesor versus el tiempo de tratamiento de la capa formada por Fe-Ti-23,46wt %C, ver Figura 4.13, es similar al de las capas formadas por Fe-B-24,95wt %C y Fe-Mo-24,97wt %C, ver Figuras 4.4 y 4.7, respectivamente.

## 5.2. Resultados preliminares

Al observar las mediciones de dureza obtenidas en los ensayos preliminares, se aprecia una clara tendencia de aumento de dureza al aumentar el voltaje del circuito de descarga. Este comportamiento se observó para todas las ferroaleaciones, salvo para Fe-Mo. De todas maneras, estos resultados son preliminares y sirvieron principalmente para la puesta a punto del proceso ESD.

## 5.3. Microdureza y Difracción de rayos X

### 5.3.1. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-B

El electrodo Fe-B-24,95wt %C depositado con un voltaje de 100 [V], sin gas protector, logró un rango de durezas entre 1361 y 1658 [HV]. Después de aplicar el electrodo con las mismas condiciones del circuito de descarga, pero con una atmósfera protectora, se obtuvo durezas entre 1530 y 2031 [HV]. Los valores de dureza encontrados son muy superiores al valor de dureza de referencia, 176 [HV]; esto es, aproximadamente 11,5 veces la dureza de referencia en el caso de la mayor dureza encontrada.

En ambas probetas, el máximo valor de microdureza se encontró en la superficie de la capa depositada. Luego, existe un decrecimiento gradual de la microdureza aproximadamente hasta el centro de la capa y luego un crecimiento de la misma, hasta llegar al sustrato (ver Figuras 4.15 y 4.23).

La difracción de rayos X realizada sobre la probeta fabricada en presencia del gas protector (ver Figura E.1), indicó la presencia de Boruro de Hierro ( $Fe_{0,91}B_{0,09}$ ), compuesto responsable de las altas durezas encontradas en la capa [6].

Al aplicar el electrodo Fe-B-4,10wt %C con atmósfera protectora, el cual presenta un contenido de grafito estequiométrico, se obtuvo valores de dureza entre 878 y 1540 [HV], donde el máximo valor de dureza es 8,5 veces el de la referencia.

El valor de dureza máximo se encuentra aproximadamente en la superficie de la capa; a partir de este punto la dureza comienza a decrecer hasta llegar a la interfase capa-sustrato (ver Figura 4.31).

Las durezas encontradas son menores a las obtenidas al aplicar el electrodo Fe-B-24,95wt %C. La disminución en los valores de dureza se debe al menor porcentaje de grafito presente en el electrodo Fe-B-4,10wt %C que en el Fe-B-24,95wt %C.

La difracción de rayos x de la capa formada (ver Figura E.5), mostró la presencia de Carburo de Hierro ( $Fe_7C_3$ ), compuesto responsable de los valores de dureza encontrados.

### 5.3.2. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Mo

El electrodo Fe-Mo-24,97wt %C depositado con un voltaje de 100 [V], sin gas protector, logró un rango de durezas entre 1050 y 1576 [HV]. Posteriormente, al aplicar el electrodo con las mismas condiciones del circuito de descarga, pero en presencia de gas protector, se obtuvo durezas entre 1521 y 1908 [HV]. Los valores de dureza encontrados son muy superiores al valor de dureza de referencia 176 [HV]; aproximadamente, 10 veces la dureza de referencia en el caso de la mayor dureza encontrada.

En la probeta fabricada en ausencia de gas protector, la dureza mayor se encontró aproximadamente en el centro de la capa depositada, mientras que en la probeta tratada con atmósfera protectora, la dureza mayor se logró cerca de la superficie de la capa depositada. El perfil de la primera probeta tiende a ser decreciente desde la superficie de la capa hasta la interfase capa-substrato, observándose un peak de dureza en el sector medio antes mencionado (ver Figura 4.17). El perfil de dureza de la segunda probeta, es decreciente desde la superficie de la capa hasta la interfase capa-substrato (ver Figura 4.25).

La difracción de rayos X realizada sobre la probeta fabricada en presencia del gas protector (ver Figura E.2), mostró la presencia de Hierro-Molibdeno ( $Mo_{0,038}Fe_{0,962}$ ), Hierro-Carbono ( $CFe_{15,1}$ ) y Grafito C. Las durezas encontradas se atribuyen a los compuestos antes mencionados.

Al procesar el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C con atmósfera protectora, el cual presenta un contenido de grafito estequiométrico, se obtuvo valores de dureza entre 1780 y 2013 [HV], donde el máximo valor de dureza es 11,4 veces el de referencia. El perfil de dureza de la capa es decreciente desde la superficie de la misma hasta el substrato (ver Figura 4.33). Las durezas encontradas en la probeta, son similares a las obtenidas con el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C, en presencia de gas protector.

La difracción de rayos x de la capa formada por Fe-Mo-7,92wt %C (ver Figura E.6), mostró la presencia de Hierro-Molibdeno y Hierro-Carbono al igual que en la capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C. Además de estos elementos, se encontraron distintas fases del Carburo de

Hierro ( $Fe_3C$ ,  $Fe_5C_2$ ,  $Fe_7C_3$ ).

Cabe destacar que las durezas encontradas en las capas depositadas por ambos electrodos son similares, al igual que los compuestos encontrados en los difractogramas para ambas capas. Esto indica que el menor porcentaje de grafito en el electrodo Fe-Mo-7,92wt %C no afectó la dureza.

### 5.3.3. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Cr

El electrodo Fe-Cr-26,15wt %C depositado con un voltaje de 100 [V], sin gas protector, logró un rango de durezas entre 772 y 1486 [HV]. En seguida, al depositar el electrodo con las mismas condiciones del circuito de descarga, pero con una atmósfera protectora, se obtuvo durezas entre 906 y 1442 [HV]. Los valores de dureza encontrados son muy superiores al valor de dureza de referencia 176 [HV]; aproximadamente, 8,4 veces la dureza de referencia, en el caso de la mayor dureza encontrada.

La capa depositada en ausencia de gas protector, presenta un perfil de dureza con un comportamiento decreciente desde la superficie de la capa hasta la interfase capa-substrato (ver Figura 4.19). La capa formada en presencia de la atmósfera protectora, presenta un perfil de microdureza creciente desde la superficie hasta el centro de de la capa y luego decreciente desde el centro hasta el substrato (ver Figura 4.27).

La difracción de rayos X realizada sobre la probeta fabricada en presencia del gas protector (ver Figura E.3), indicó la presencia de Carburo de Hierro Cromo ( $Cr_{1,75}Fe_{5,25}C_3$ ), Carburo de Cromo ( $Cr_7C_3$ ) y Carburo de Hierro ( $Fe_7C_3$ ). Los compuestos metálicos antes mencionados compuestos, son los responsables de las microdurezas encontradas [8][9].

Al aplicar el electrodo Fe-Cr-10,09wt %C con atmósfera protectora, el cual presenta un contenido de grafito estequiométrico, se obtuvieron valores de dureza entre 901 y 1578 [HV], donde el máximo valor de dureza es 8,9 veces el de referencia.

La curva del perfil de dureza encontrada, es similar en forma a la encontrada en la capa depositada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt %C con atmósfera protectora (ver Figura 4.35).

La difracción de rayos x de la capa formada (ver Figura E.7), mostró la presencia de Hierro-Cromo ( $Cr_{0,08}Fe_{0,92}$ ), compuesto metálico de la dureza obtenida en la capa depositada [8][9].

Cabe destacar que las durezas encontradas en las capas depositadas por ambos electrodos son similares, al igual que los compuestos encontrados en los difractogramas para ambas capas. Esto indica que el menor porcentaje de grafito en el electrodo Fe-Cr-10,09wt %C, no afectó la dureza.

### 5.3.4. Electrodo formado por la ferroaleación Fe-Ti

El electrodo Fe-Ti-23,46wt %C depositado con un voltaje de 100 [V], sin gas protector, logró un rango de durezas entre 622 y 826 [HV]. Después, con el mismo electrodo y las mismas condiciones del circuito de descarga, pero ahora con una atmósfera protectora, se obtuvo durezas entre 722 y 1317 [HV]. Los valores de dureza encontrados son muy superiores al valor de dureza de referencia 176 [HV]; aproximadamente, 7,5 veces la dureza de referencia en el caso de la mayor dureza encontrada.

En ambas probetas se encontró un perfil de dureza decreciente desde la superficie de la capa, es decir, los valores de dureza disminuyen paulatinamente desde la superficie de la capa hasta la interfase capa-substrato (ver Figuras 4.21 y 4.29).

La difracción de rayos X realizada sobre la probeta fabricada en presencia del gas protector (ver Figura E.4), mostró la presencia de Hierro-Titanio ( $Ti_{0,023}Fe_{0,977}$ ), Óxido de Carburo de Titanio ( $TiC_{0,32}O_{0,46}$ ) y Carburo de Titanio ( $Ti_2C$ ), compuestos responsables de la dureza encontrada en la capa [10].

Al aplicar el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C con atmósfera protectora, el cual presenta un contenido de grafito estequiométrico, se obtuvo valores de dureza entre 576 y 688 [HV], donde el máximo valor de dureza es 3,9 veces el de referencia.

El valor de dureza máximo se encuentra aproximadamente en la superficie de la capa; a partir de este punto, la dureza comienza a decrecer hasta llegar a la interfase capa-substrato (ver Figura 4.37). Las durezas encontradas son menores a las obtenidas al aplicar el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, la disminución en los valores de dureza, se debe al menor porcentaje de grafito presente en el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C en comparación de Fe-Ti-23,46wt %C.

La difracción de rayos x de la capa formada (ver Figura E.8), mostró la presencia de Hierro-Titanio ( $Ti_{0,0025}Fe_{0,975}$ ) y Óxido de Hierro-Titanio ( $Fe_3Ti_3O_{10}$ ). Los compuestos encontrados en el difractograma, guardan relación con los valores de dureza encontrados. Al comparar el resultado con el difractograma del electrodo Fe-Ti-23,46wt %C, destaca la ausencia de Carburos metálicos de base Titanio en la capa. El menor contenido de grafito en el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C, influyó en la no formación dichos Carburos y ,por ende, no se lograron las grandes durezas obtenidas con el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C.

#### **5.4. Probetas sometidas a una temperatura de 600 [°C] en horno con atmósfera de Argón**

Las durezas obtenidas luego de someter las probetas fabricadas con los electrodos: Fe-B-24,95wt %C, Fe-Mo-24,97wt %C, Fe-Cr-26,15wt %C y Fe-Ti-24,46wt %C con atmósfera de argón, a una temperatura de 600 C, fueron similares a las logradas una vez aplicado el proceso ESD a temperatura ambiente. Esta similitud entre los valores de dureza encontrados, confirma que la dureza de la capa depositada, se debe principalmente a los compuestos formados durante la aplicación del proceso, ya que si hubiese disminuido luego del tratamiento en el horno, la dureza inicial de la capa se debería a la tasa de enfriamiento rápido del proceso y no a los compuestos formados. Con lo anterior, se asegura que las capas mencionadas, son aptas para trabajos en frío y para trabajos en caliente hasta 600 [°C].

## Capítulo 6

### Conclusiones

Se logró construir un dispositivo de ESD manual. El dispositivo mostrado en la Figura 3.4 y el circuito de descarga correspondiente, permitieron aplicar el proceso ESD de la manera planificada en el comienzo de este trabajo.

Se logró depositar satisfactoriamente capas de compuestos metálicos mediante ESD, a partir de electrodos formados por ferroaleaciones y grafito.

La fabricación de los electrodos se realizó utilizando polvos de cuatro ferroaleaciones: Fe-B, Fe-Mo, Fe-Cr y Fe-Ti. Se construyeron dos electrodos por cada ferroaleación, uno con un contenido de grafito estequiométrico y otro con un contenido mayor de grafito. Estos electrodos permitieron estudiar la influencia del grafito sobre la formación de compuestos metálicos sobre la capa depositada y por ende la microdureza de la misma.

Las capas depositadas fueron completamente caracterizadas en cuanto a forma de la superficie, espesor, microdureza y contenido de compuestos metálicos.

Se concluye que es posible endurecer superficialmente el acero SAE 1020 mediante la deposición de ferro-aleaciones por ESD. La formación de los distintos carburos y compuestos metálicos se produjo por la adición de grafito en la fabricación de los electrodos. La microdureza de las capas se mantuvo inclusive al someter las capas depositadas a una temperatura de 600 °C en un horno con atmosfera de argón.

## Bibliografía

- [1] M.A. Béjar, W. Schnake, W. Saavedra, J.P. Vildósola, Surface hardening of metallic alloys by electrospark deposition followed by plasma nitriding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, p. 210-213, 2006.
- [2] A. Lesnjak, J. Tusek, Processes and properties of deposits in electrospark deposition, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 7, p. 391-396, 2002.
- [3] R. N. Johnson, Electrospark deposition: Principals and Applications, *Proceedings of 45<sup>th</sup> Annual SVC Technical Conf.*, Lake Buena Vista, Florida, Abril 13-18, 2002.
- [4] C. P. Llanos, Tratamiento superficial de Cu mediante titanización por ESD y procesamiento mediante plasma-electrolisis, memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [5] J. P. Stevens, Tratamiento de una capa electrolítica de Cromo mediante electrodescargas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2004.
- [6] Mehmet Eroglu, Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness, *Surface & Coatings Technology* 203, Vol. 203, p. 2229-2235, 2009.
- [7] A. Amirsadeghi, M. Heydarzadeh Sohi, Comparison of the influence of molybdenum and chromium TIG surface alloying on the micro estructura, hardness and wear resistance of ADI, *Journal of Materials Processing Technology* 20I, p. 673-677, 2008.
- [8] Chia-Ming Chang, Chi-Ming Lin, Chih-Chun Hsieh, Jie-Hao Chen, Weite Wu, Microstructural characteristics of Fe-40 wt%Cr-xC hardfacing alloys with [1.0-4.0 wt%] carbon content, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 487, p. 83-89, 2009.
- [9] J. Cuevas, W. Barona, H. Sanchez, I. Castro, Reforzamiento de la aleación de Aluminio 6061 con Carburos dobles de Fe-Cr obtenidos por aleación mecánica, *Scientia et Technica* Año XIII, p. 119-123, 2007.

- [10] K. Korkmaz, H.I. Bakan, Process and properties of  $TiC_{0,7}N_{0,3}$ -based cermet coating deposition on steel by electrospark deposition technique, *Kovove Mater* 48, Vol. 36, p. 153-158, 2010.

## **Anexo A**

# **Información PIMASA**

# ANÁLISIS

## **FERRO TITANIO**

Descripción: FERRO TITANIO

Análisis:	TI	69.85	%
	Si	0.05	%
	C	0.10	%
	P	0.01	%
	S	0.005	%
	AL	0.81	%
	MN	0.07	%

Size 10 – 50 (90% min.)

P – 3496

PROVEEDORA INDUSTRIAL  
MINERA ANDINA S.A.  
Calle Nueva 1725  
Huechuraba  
Santiago, Chile  
Fono: (56-2) 499 10 00  
Fax : (56-2) 499 10 10  
[info@pimasa.com](mailto:info@pimasa.com)  
[www.pimasa.com](http://www.pimasa.com)

# ANÁLISIS

## FERROBORO

<b>Descripción</b>	<b>Ferroboro</b>
<b>Boro</b>	<b>15.37%</b>
<b>Aluminio</b>	<b>0.23%</b>
<b>Silicio</b>	<b>2.03%</b>
<b>Carbono</b>	<b>1.60%</b>
<b>Molibdeno</b>	<b>0.013%</b>
<b>Cromo</b>	<b>0.048%</b>
<b>Fósforo</b>	<b>0.031%</b>
<b>Cobalto</b>	<b>0.010%</b>
<b>Vanadio</b>	<b>0.089%</b>
<b>Níquel</b>	<b>0.048%</b>
<b>Manganeso</b>	<b>0.44%</b>
<b>Azufre</b>	<b>0.009%</b>
<b>Cobre</b>	<b>0.108%</b>
<b>Titanio</b>	<b>0.074%</b>

PROVEEDORA INDUSTRIAL  
MINERA ANDINA S.A.  
Calle Nueva 1725  
Huechuraba  
Santiago, Chile  
Fono: (56-2) 499 10 00  
Fax : (56-2) 499 10 10  
[info@pimasa.com](mailto:info@pimasa.com)  
[www.pimasa.com](http://www.pimasa.com)

# ANALISIS QUÍMICO

## FERROMOLIBDENO

Descripción: FERROMOLIBDENO

Análisis:	Mo	68.95	%
	C	0.04	%
	Cu	0.34	%
	P	0.027	%
	S	0.03	%
	Si	0.86	%

Size            10 – 50 mm

---

Firma Autorizada

# ANÁLISIS

## FERRO CROMO ALTO CARBONO

Descripción: FERRO CROMO ALTO CARBONO

Análisis:	Cr	67.0670	%
	Si	0.9670	%
	C	8.2330	%
	P	0.0310	%
	S	0.0300	%

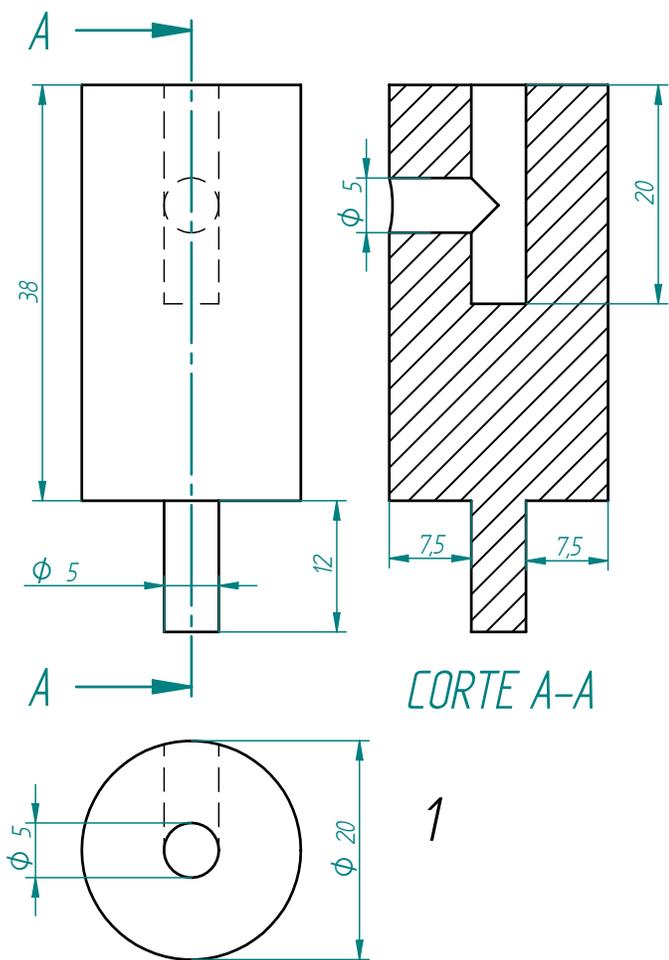
Size 10 - 50 mm

P- 4196

PROVEEDORA INDUSTRIAL  
MINERA ANDINA S.A.  
Calle Nueva 1725  
Huechuraba  
Santiago, Chile  
Fono: (56-2) 499 10 00  
Fax : (56-2) 499 10 10  
[info@pimasa.com](mailto:info@pimasa.com)  
[www.pimasa.com](http://www.pimasa.com)

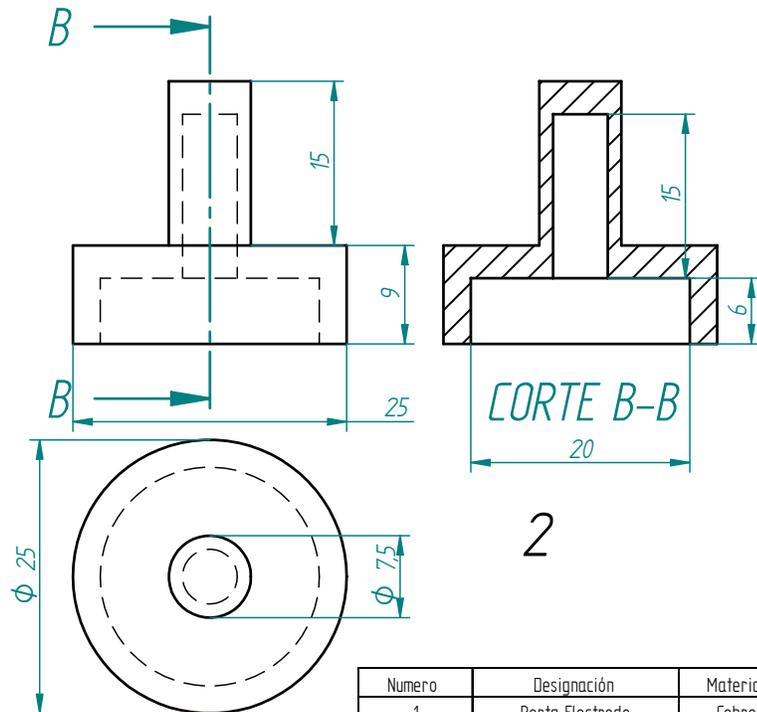
## **Anexo B**

### **Planos de Fabricación**



CORTE A-A

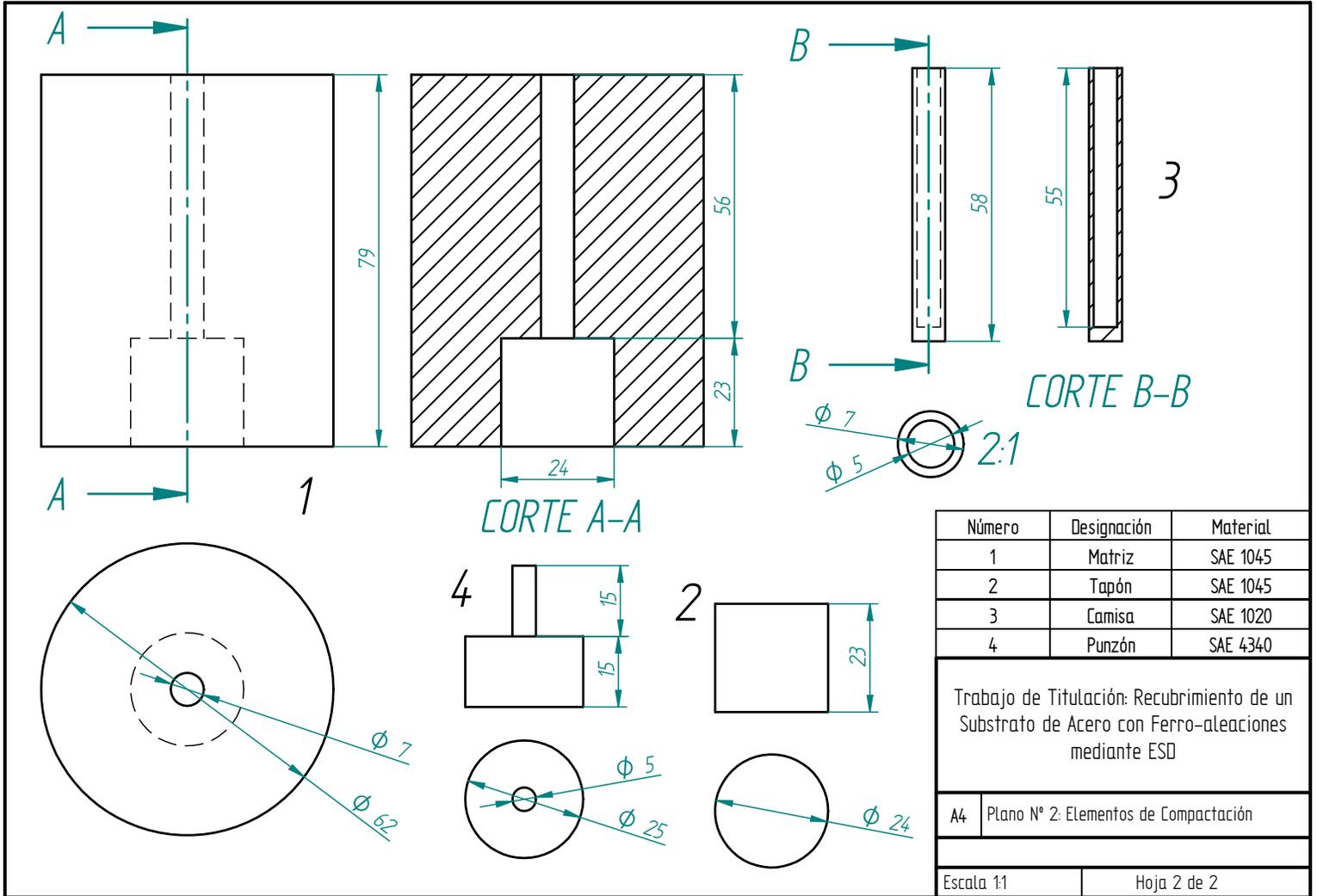
1



CORTE B-B

2

Numero	Designación	Material
1	Porta Electrodo	Cobre
2	Camisa porta electrodo	Technyl
Trabajo de Titulación: Recubrimiento de un Substrato de Acero con Ferro-aleaciones mediante ESD		
A4	Plano N° 1: Elementos del Dispositivo Rotatorio	
Escala 2:1		Hoja 1 de 2



Número	Designación	Material
1	Matriz	SAE 1045
2	Tapón	SAE 1045
3	Camisa	SAE 1020
4	Punzón	SAE 4340

Trabajo de Titulación: Recubrimiento de un Substrato de Acero con Ferro-aleaciones mediante ESD

A4 Plano N° 2: Elementos de Compactación

Escala 1:1 Hoja 2 de 2

## **Anexo C**

# **Memoria de Cálculo**

### **C.1. Cálculo y puesta a punto de prensa hidráulica**

La prensa hidráulica utilizada para efectuar la compresión de la mezcla de polvos tiene una capacidad máxima de levante de 5 toneladas. El manómetro integrado a la prensa mide la presión en la cámara o botella de aceite, la cual tiene una capacidad máxima de medición de 600 bar. El diámetro exterior de la cámara de aceite es de 76,7 [mm] con un espesor de pared de 2 [mm]. A partir de esto, el diámetro del pistón empujado por la columna de aceite, como se observa en la Figura C.1, es de  $D_r = 72,7$  [mm].

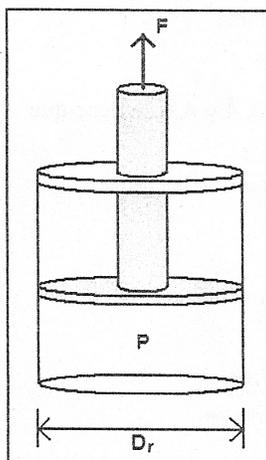


Figura C.1: Esquema de carga en prensa hidráulica de compresión.

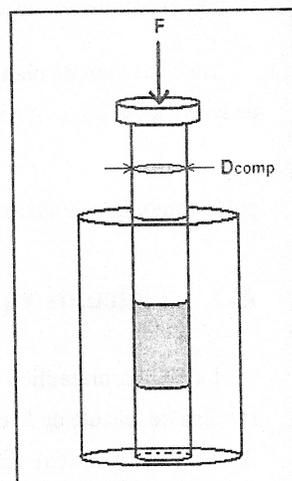


Figura C.2: Esquema de carga en matriz de compactación.

En base a lo anterior, el siguiente cálculo permite obtener el valor aproximado real de presión sobre el compacto de polvos. La presión en la cámara de aceite se considera constante, por lo que la fuerza aplicada por el pistón de compresión  $F$  es igual a

$$F = P_{prensa} \cdot A_{pistn} \quad (C.1)$$

donde  $P_{prensa}$  es la presión de aceite en la cámara y  $A_{pistn}$  es el área del pistón de carga tal que

$$A_{pistn} = \frac{\pi D_r^2}{4} = \frac{\pi(7,27)^2}{4} = 41,51 \text{ cm}^2 \quad (C.2)$$

Las dimensiones de  $F$  y  $A_{pistn}$  para éste cálculo son [kgf] y [ $\text{cm}^2$ ] respectivamente. Mientras que la dimensión de  $P_{prensa}$  depende del valor entregado por el manómetro de la prensa hidráulica, [bar], [psi] o [ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ].

Producto de la acción y reacción luego del contacto entre el pistón de carga y el punzón de compactación, la fuerza aplicada sobre el punzón es igual a  $F$  de la ecuación C.1, que para el caso del punzón de compactación es igual a

$$F = P_{compactacin} \cdot A_{punzn} \quad (C.3)$$

donde  $P_{compactacin}$  es la presión de compactación y  $A_{punzn}$  es el área transversal del punzón de

compactación tal que

$$A_{punzn} = \frac{\pi D_{comp}^2}{4} \quad (C.4)$$

donde  $D_{comp}$  es el diámetro de la sección transversal del punzón como se observa en la Figura C.2, el cual es de 0,5 [cm]. Las dimensiones de  $F$  y  $A_{punzn}$  para éste cálculo son [kgf] y [cm<sup>2</sup>] respectivamente. Por lo cual, el valor del  $A_{punzn}$  es

$$A_{punzn} = \frac{\pi D_{comp}^2}{4} = \frac{\pi(0,5)^2}{4} = 0,2cm^2 \quad (C.5)$$

Entonces, por efecto de acción y reacción, de las ecuaciones C.1 y C.3 se tiene que

$$F = P_{prensa} \cdot A_{pistn} = P_{compactacin} \cdot A_{punzn} \Rightarrow P_{compactacin} = P_{prensa} \frac{A_{pistn}}{A_{punzn}} \quad (C.6)$$

donde para éste caso, la razón  $A_{pistn}/A_{punzn} = 41,51/0,2 = 207,5$ . Es decir, la ecuación C.6 queda

$$P_{compactacin} = 207,5 \cdot P_{prensa} \quad (C.7)$$

Por último, se realizó la compactación a una presión de manómetro de 100 [bar] aproximadamente, por lo que la presión de compactación fue de

$$P_{compactacin} = 20750[bar] = 2070,5[MPa] \quad (C.8)$$

## Anexo D

### Diagramas de Fases

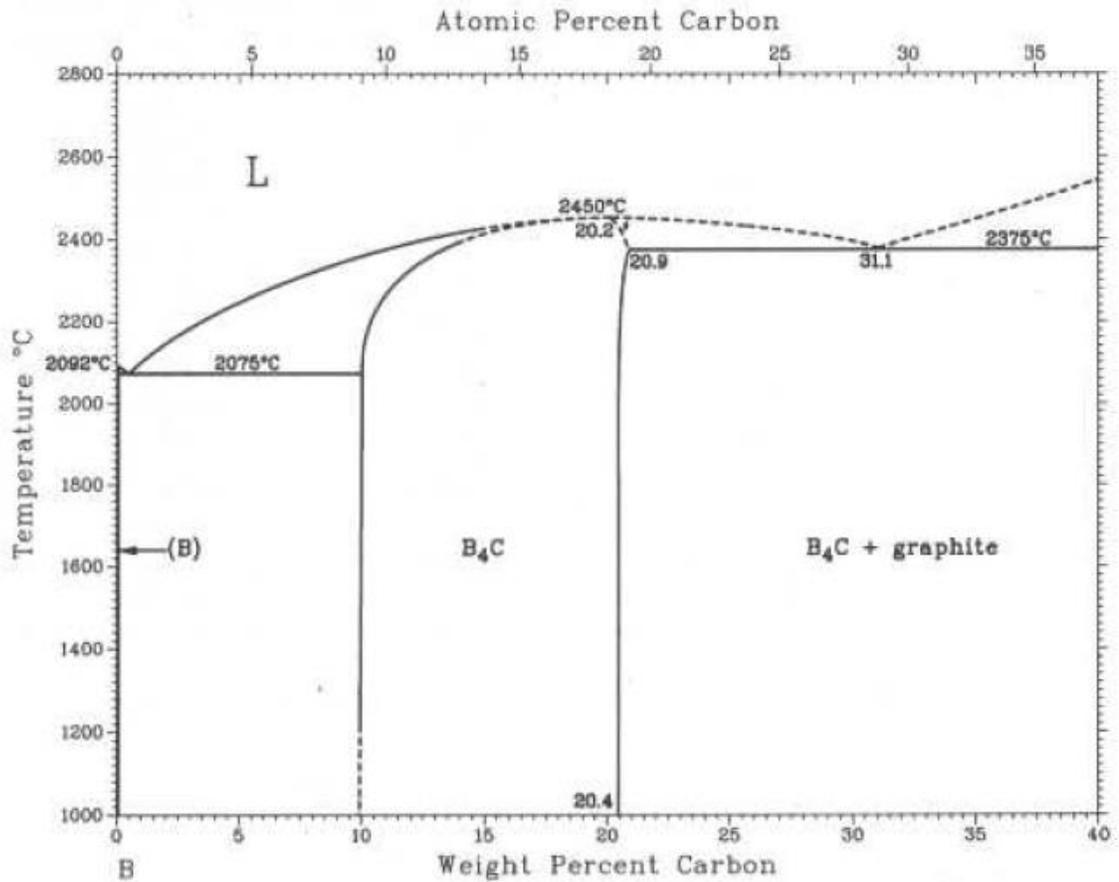


Figura D.1: Diagrama de fases B-C.

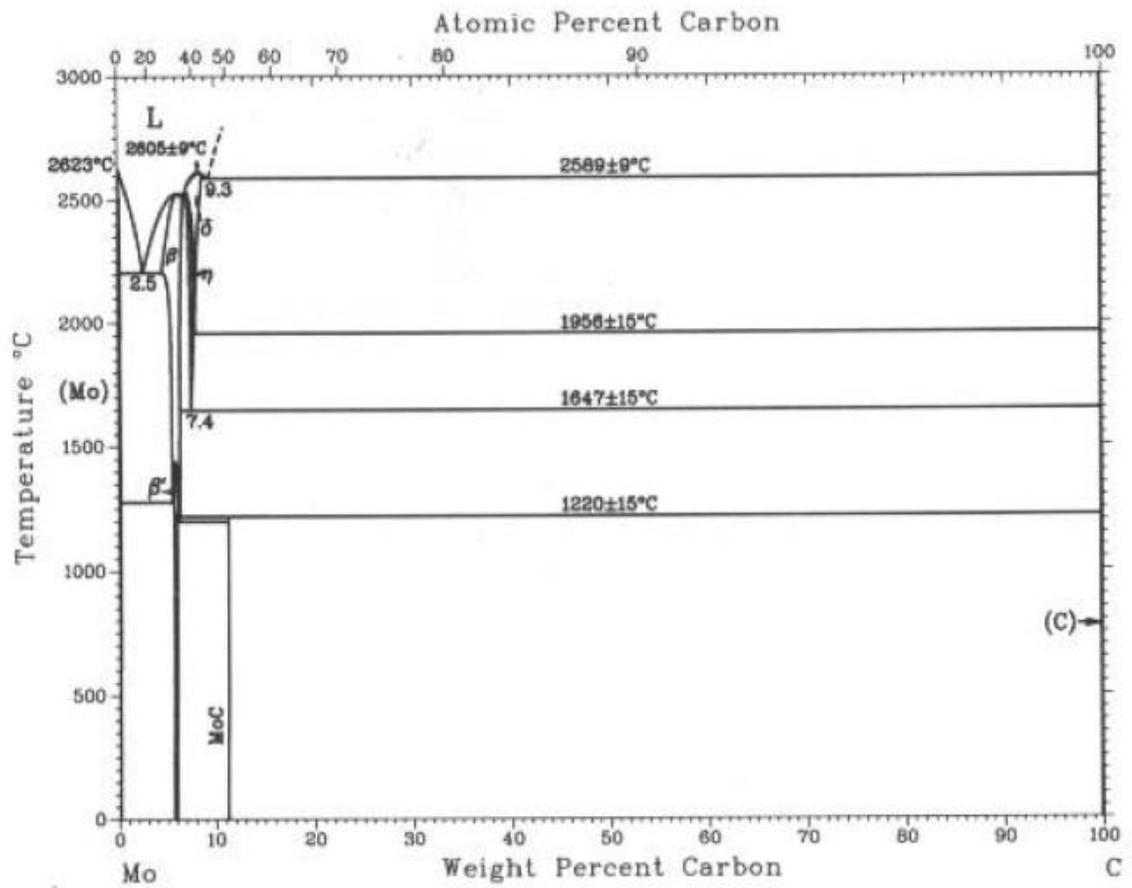


Figura D.2: Diagrama de fases Mo-C.

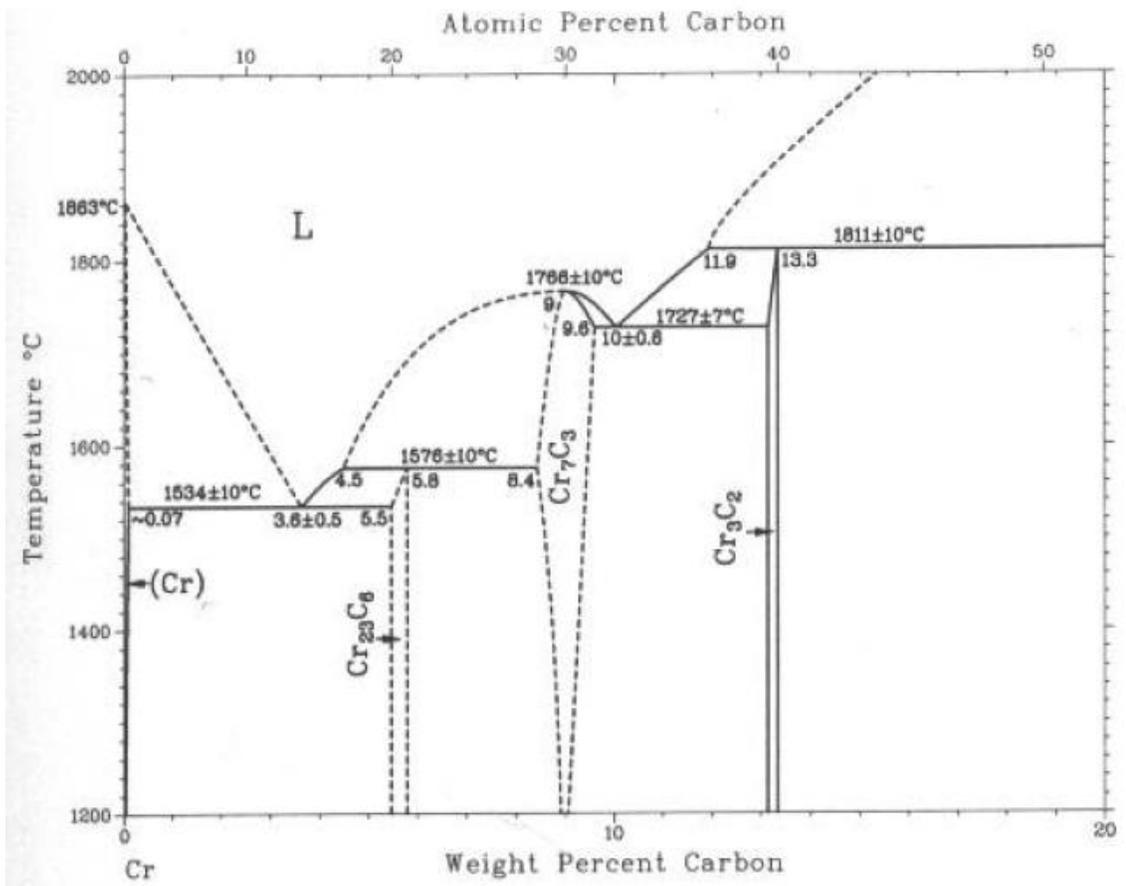


Figura D.3: Diagrama de fases Cr-C.

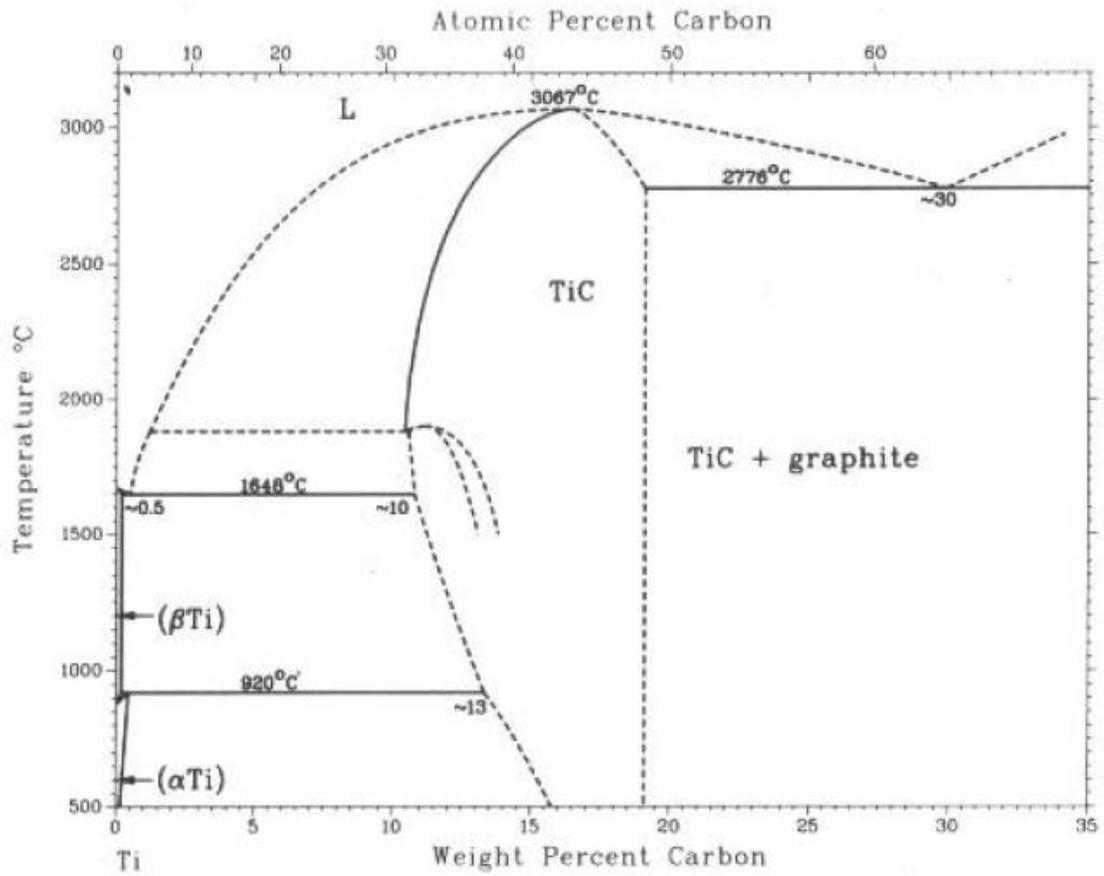


Figura D.4: Diagrama de fases Ti-C.

## **Anexo E**

# **Difracción de Rayos X**

**Capa formada por Fe-B-24,95wt%C**

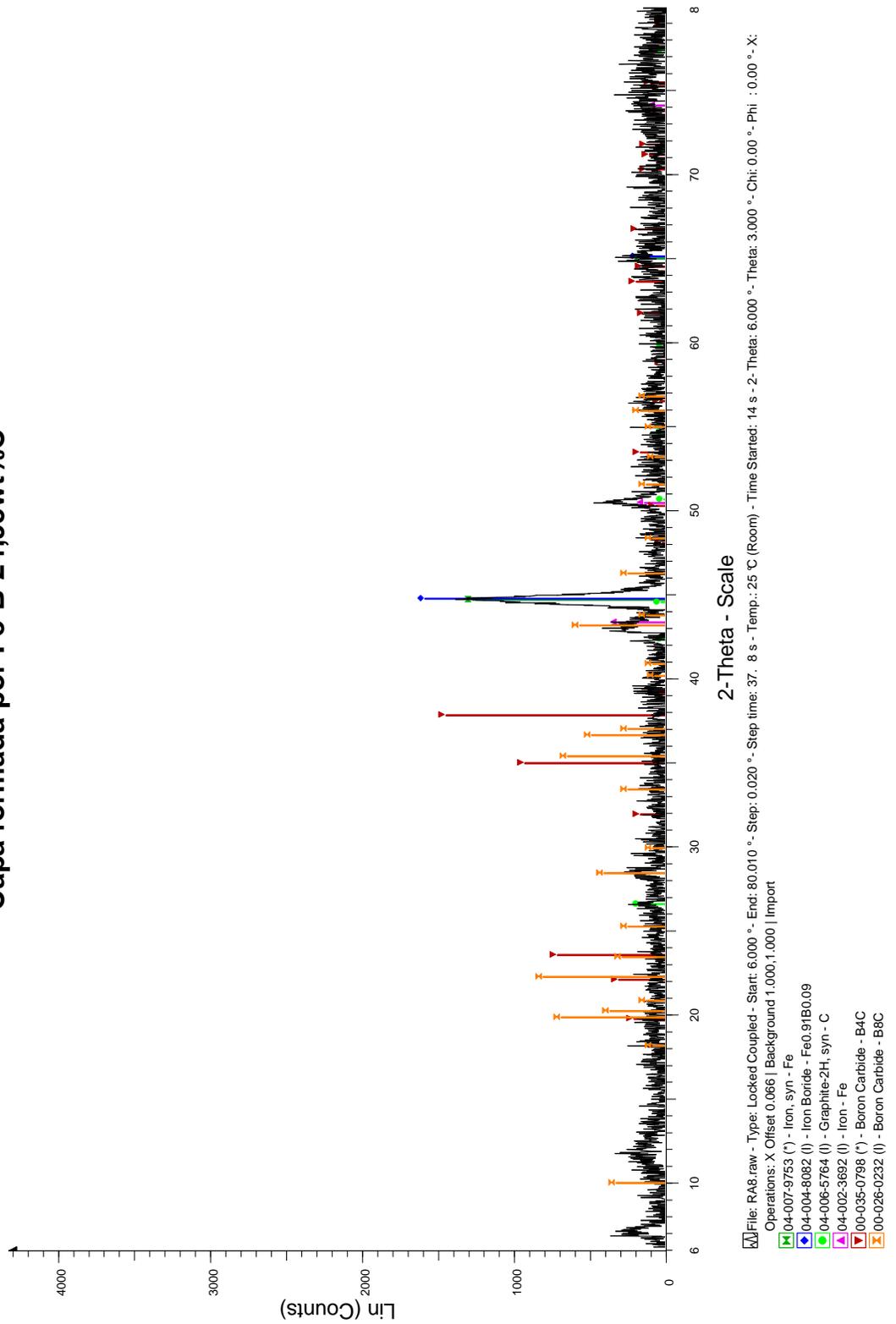


Figura E.1: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-B-24,95wt%C.

Capa formada por Fe-Mo-24,97wt%C

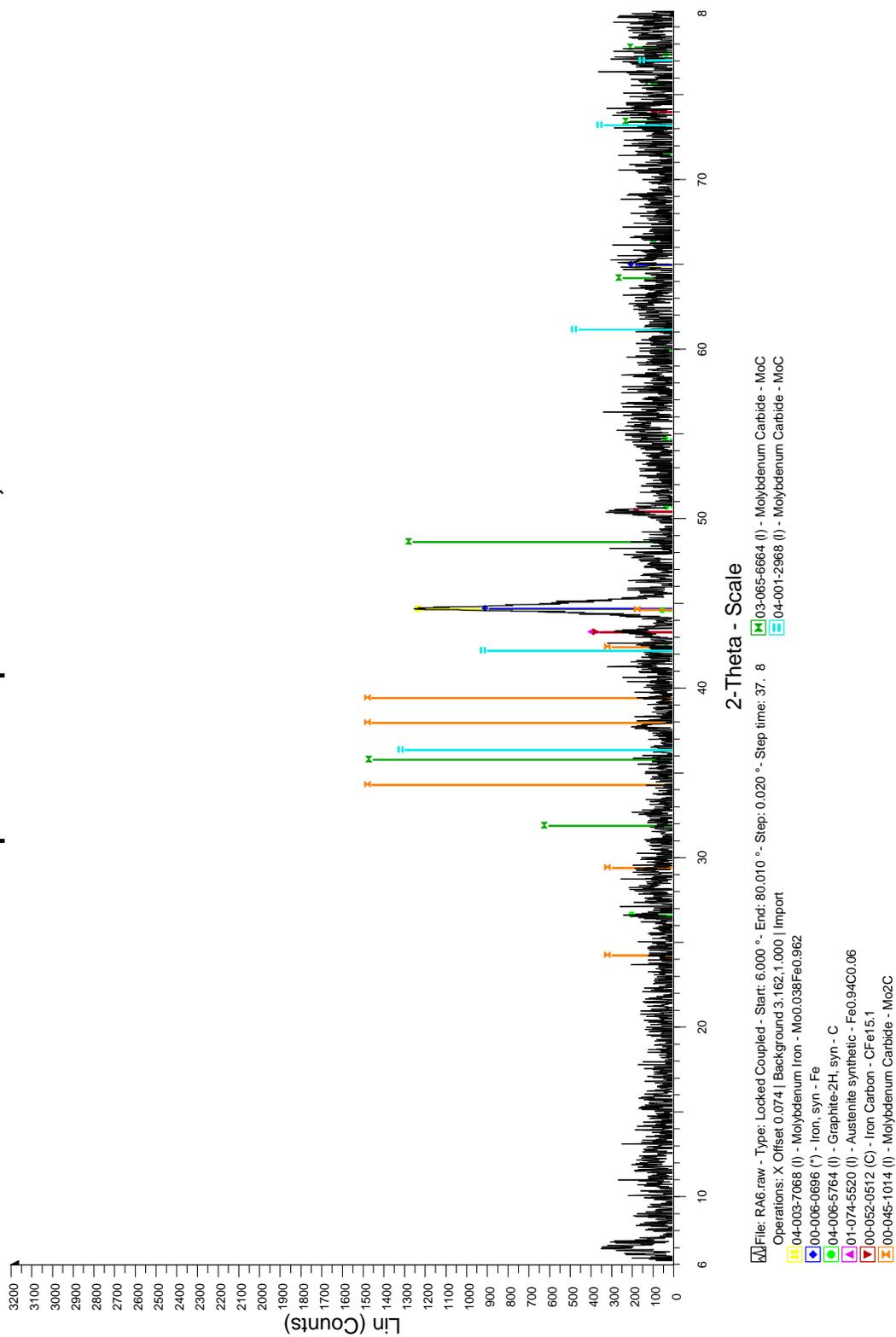


Figura E.2: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Mo-24,97wt %C.

**Capa formada por Fe-Cr-26,15wt%C**

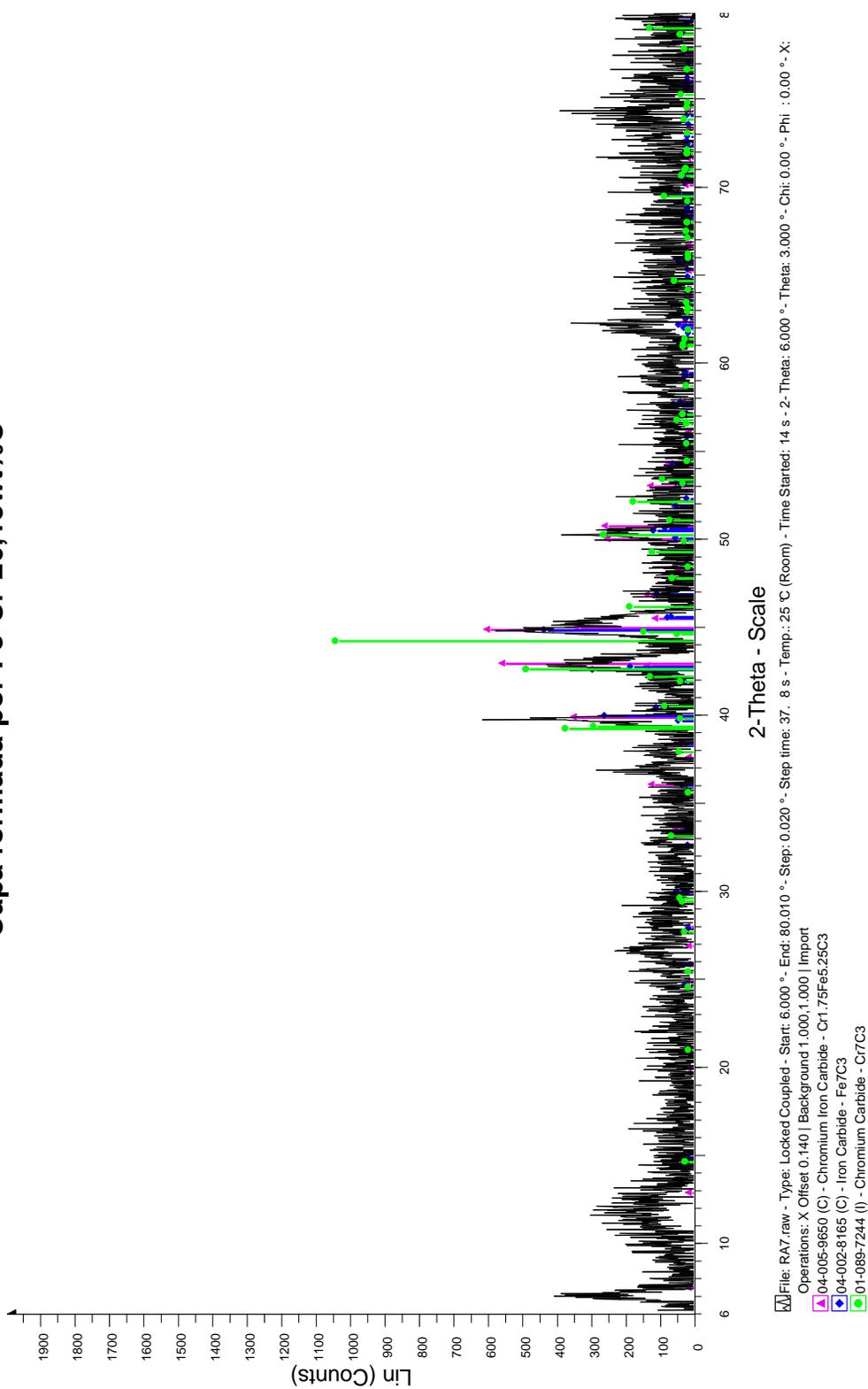


Figura E.3: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Cr-26,15wt%C.

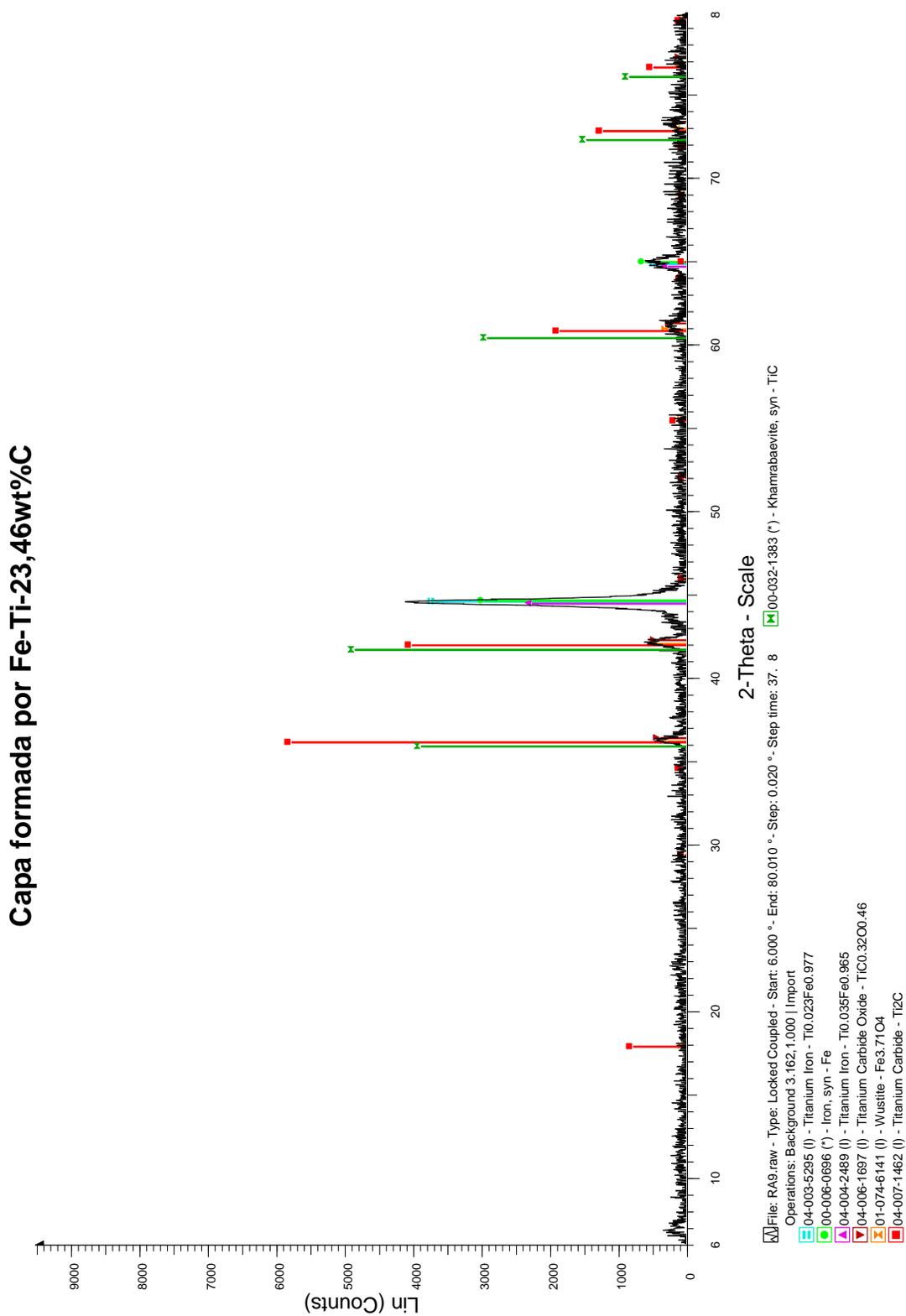


Figura E.4: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Ti-23,46wt %C.

Capa formada por Fe-B-4,10wt%C

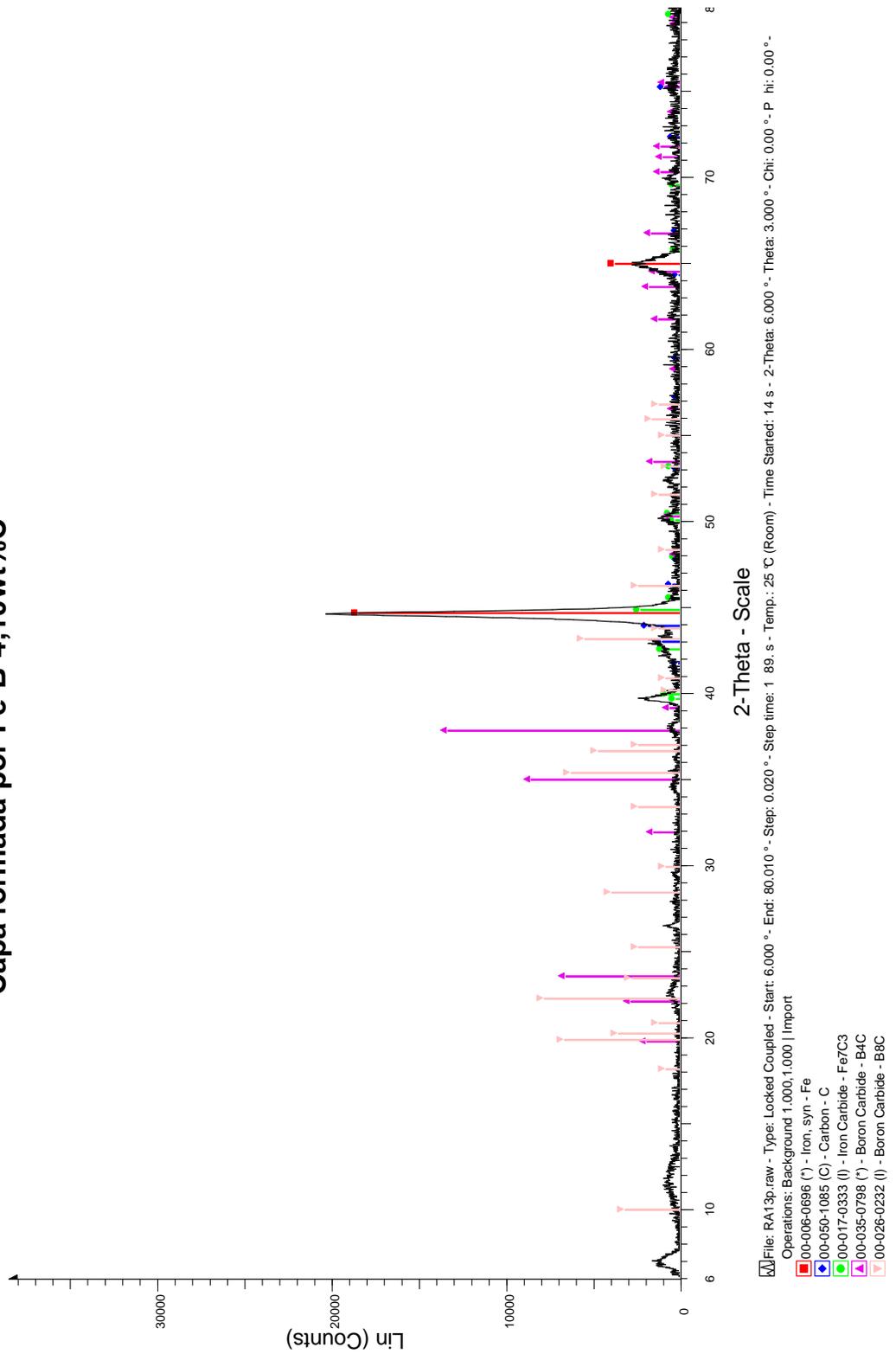


Figura E.5: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-B-4,10wt %C.

Capa formada por Fe-Mo-7,92wt%C

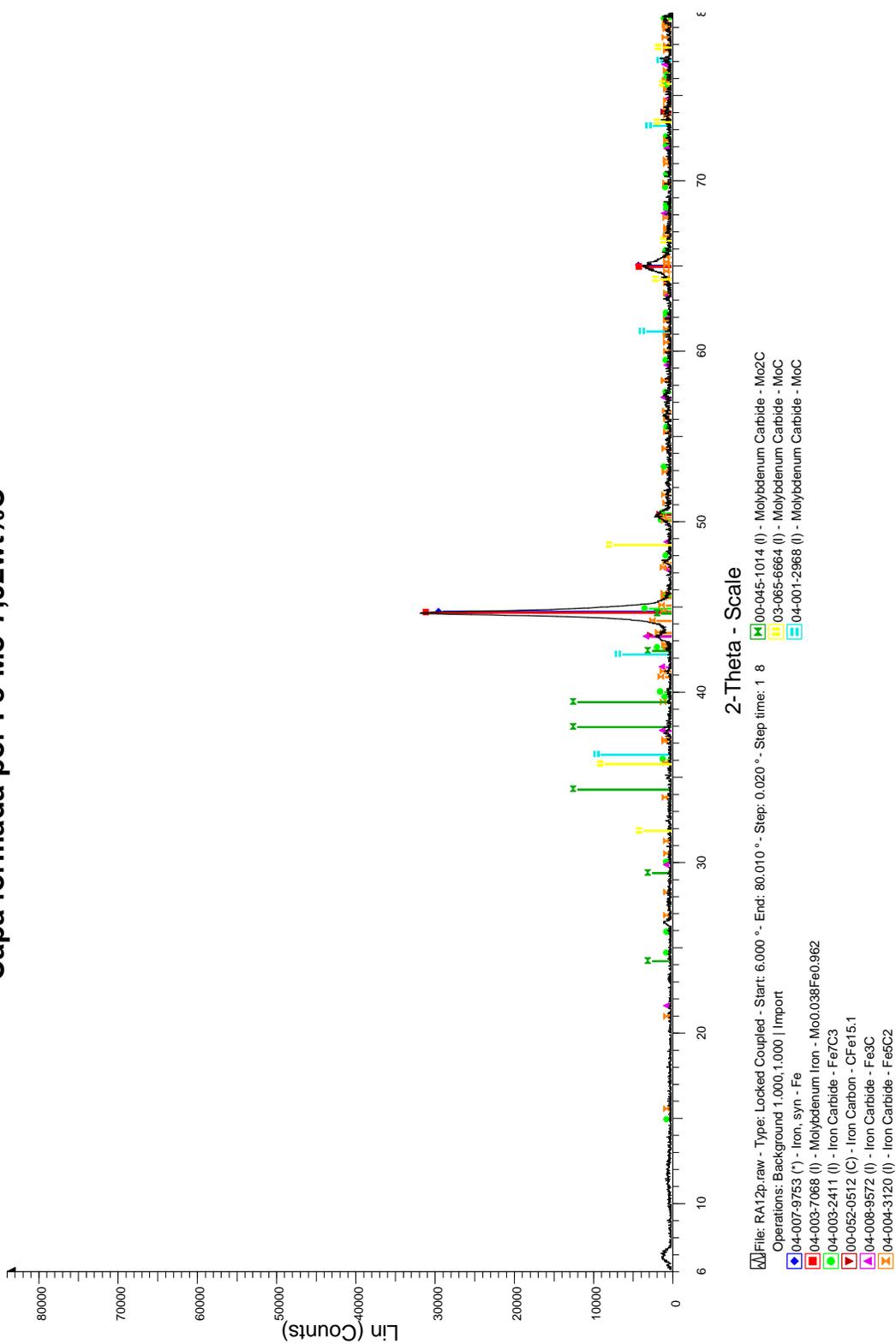


Figura E.6: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Mo-7,92wt%C.

### Capa formada por Fe-Cr-10,09wt%C

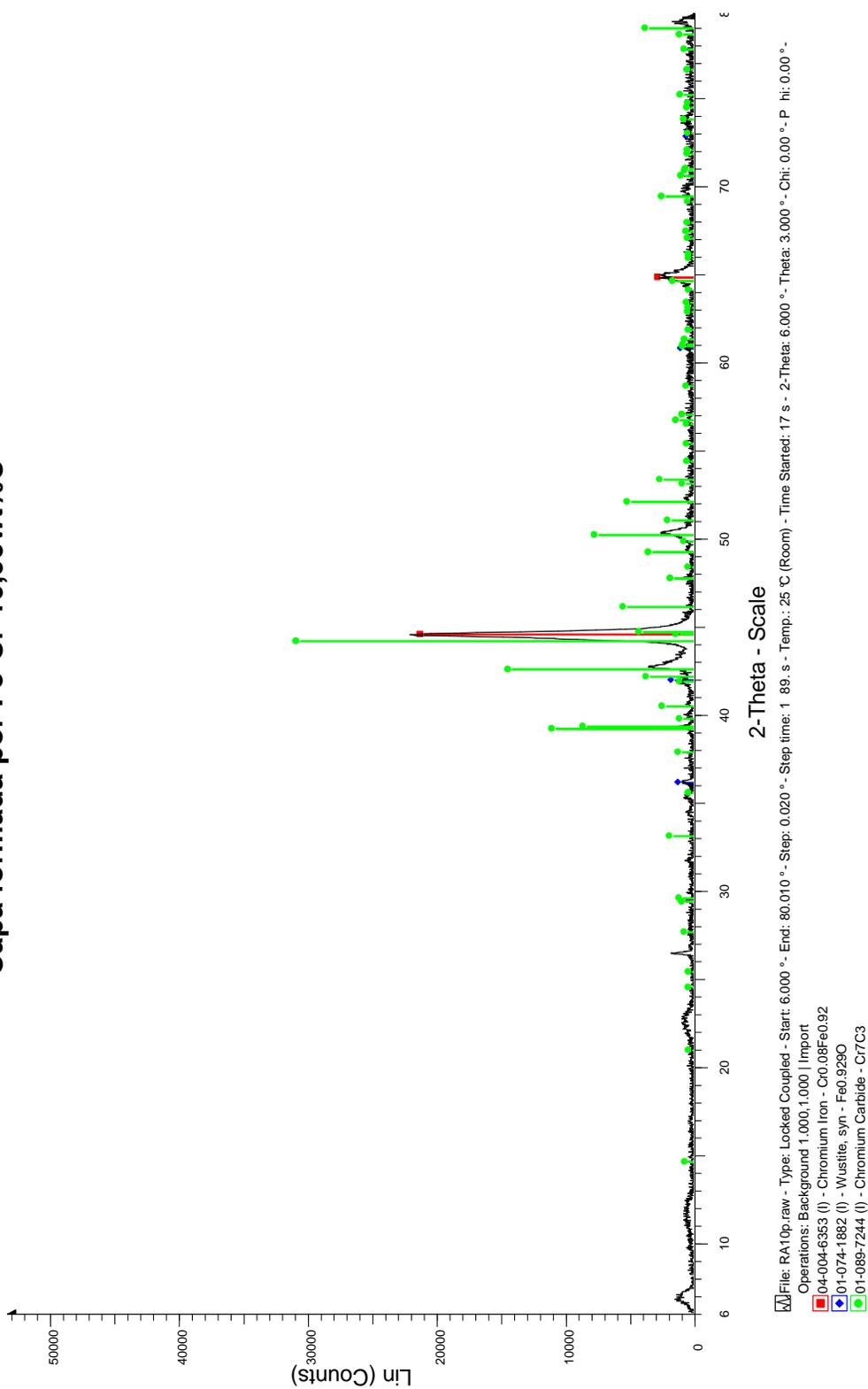


Figura E.7: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Cr-10,09wt%C.

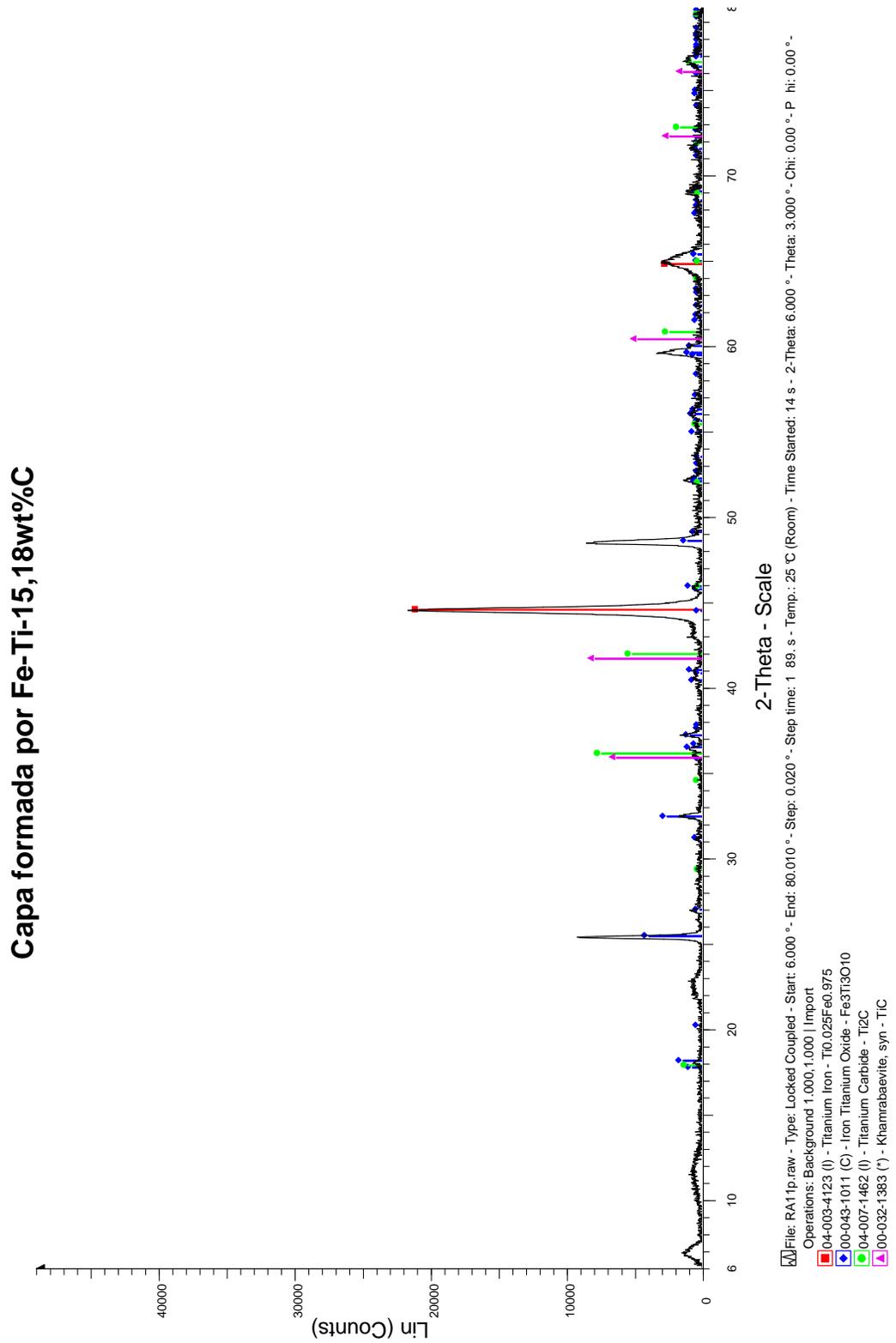


Figura E.8: Difracción de rayos X de capa formada por el electrodo Fe-Ti-15,18wt %C.