



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE ZINC SOBRE ACERO A-36, AL VARIAR LA CALIDAD SUPERFICIAL Y SER TRATADO TÉRMICAMENTE

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

AGILA DÍAZ BRYAN ALEXIS  
[bryan.agila@epn.edu.ec](mailto:bryan.agila@epn.edu.ec)

CHÁVEZ GARZÓN JOEL RICARDO  
[joel.chavez@epn.edu.ec](mailto:joel.chavez@epn.edu.ec)

DIRECTOR: ING. DIAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME M.Sc.  
[carlos.diaz@epn.edu.ec](mailto:carlos.diaz@epn.edu.ec)

QUITO, abril de 2021

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **BRYAN ALEXIS AGILA DÍAZ** y **JOEL RICARDO CHÁVEZ GARZÓN**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

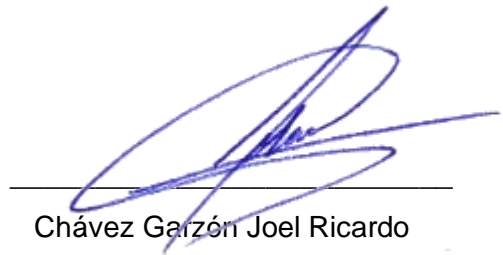
Nosotros, **Agila Díaz Bryan Alexis**, y **Chávez Garzón Joel Ricardo**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

Agila Díaz Bryan Alexis



---

Chávez Garzón Joel Ricardo

## DEDICATORIA

Dedicado a todas aquellas personas que han significado un apoyo para mí y me brindan su cariño y respaldo incondicional para seguir adelante en todo lo que me proponga a pesar de cualquier adversidad que pueda presentarse.

A mis padres por el cuidado y constancia que me han dado todos estos años, sin olvidar los preciados valores que me han inculcado, permitiéndome llegar hasta aquí, todo ha sido gracias a ustedes. A mi hermana y mi sobrino, que, a pesar de no mantener una relación cercana, hemos vivido juntos pocas, pero magníficas experiencias que lograron marcar tanto mi vida como mi carácter, siempre los querré, les deseo que cumplan cada una de sus metas y sueños.

A mi pareja, por darme esa seguridad y aliento que tanto necesitaba para no darme por vencido, aun en las situaciones más difíciles, quiero darle las gracias, por tanto. A cada uno de mis amigos de la infancia y los que se han ido sumando con el pasar de los años, a todos ellos que se mantiene hasta la actualidad, quiero que sepan que son personas maravillosas y quedaré siempre agradecido porque sin esperar nada a cambio, me brindaron de su conocimiento y su alegría.

*Chávez Garzón Joel Ricardo*

## AGRADECIMIENTO

Culminando con esta etapa importante de mi vida, quiero agradecer a cada una de las personas que se mantuvieron conmigo durante este viaje, ya que con su aporte permitieron cultivar este sueño, hasta convertirlo en realidad. Este apartado quiero dedicarlo a cada uno de mis maestros de primaria y secundaria, a todos ellos que con su perseverancia y enseñanzas lograron despertar e inculcar en mi esa necesidad de mantenerme educado de forma continua y alentaron esas ganas de superarme cada día más. De igual forma a todos esos profesionales que me brindaron su tiempo y conocimiento durante todas esas horas de clase durante la carrera universitaria, preparándonos tanto a mi como a mis compañeros de la mejor forma para la vida laboral, a mi tutor de tesis MSc. Ingeniero Carlos Diaz por su dirección y acertados consejos junto con las correcciones necesarias para el desarrollo del presente trabajo.

Mi gratitud a mi compañero de tesis Bryan Agila, los lazos de amistad y compañerismo formados durante la vida universitaria serán el reflejo de este y futuros trabajos futuros.

Muchas gracias.

*Chávez Garzón Joel Ricardo*

## DEDICATORIA

Dedico con todo el cariño este trabajo a toda mi familia y amigos de manera especial a mis abuelos Luis, José, Carmen y Anita, a mis papás Luz y Miguel, a mis hermanos Eddy, Freddy, Leonardo y Andrés, a mi hermana no de sangre pero si de vida, Mishell, gracias a todos, su ejemplo de vida, apoyo y enseñanzas me permiten ahora conseguir esta meta tan anhelada.

*Agila Díaz Bryan Alexis*

## AGRADECIMIENTO

Un gracias inmenso a mis abuelos Luis, José, Carmen y Anita, su ejemplo de amor, y valentía por como enfrentaron y enfrentan la vida me llena de motivación en cada desafío. A mi madre Luz, la mujer más maravillosa de mi vida, gracias por la paciencia, por tu ejemplo y por velar por mí en cada día. A mi padre Miguel, el hombre más soñador, gracias por llenarme de valor para aventurarme a aprender siempre nuevas cosas, por inculcarme que no existe límite para lo que deseamos. A mis hermanos Eddy, Freddy, Leonardo, Andrés y a toda la familia Agila Díaz, infinitas gracias por ser un apoyo incondicional.

A las mujeres más influyentes en mi vida Mishell, Allison y Marilyn, recuerden que admiro todo lo que son y lo que proyectan siempre, gracias por su amistad y por ser inspiración en mi vida. A todos los amigos de “Los Prrro”, por hacer que la etapa de la universidad sea más llevaderas, gracias inmensas a los amigos del HCCH, y a todos los amigos con los cuales hasta ahora puedo charlar de la vida.

Un agradecimiento especial a Don René y a la Ing. Proaño por la ardua labor que dedican al crecimiento profesional. Gracias a mi director el Ing. Carlos Díaz por brindarnos con paciencia el soporte necesario para finalizar esta investigación.

A mi amigo de tesis, Joel Chávez, hermano querido, gracias por la paciencia, por tu esfuerzo y por trabajar conjuntamente para lograr terminar este estudio.

Finalmente, gracias a mi alma mater, y a todos sus docentes y personal administrativo que contribuyeron para formarme profesionalmente.

*Agila Díaz Bryan Alexis*

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	2
DECLARACIÓN .....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
DEDICATORIA .....	6
AGRADECIMIENTO .....	7
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
INTRODUCCIÓN.....	17
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Acero estructural .....</b>	<b>19</b>
1.1.1 Concepto.....	19
1.1.2 Acero estructural A-36.....	20
<b>1.2 Fundamentos del proceso de mecanizado.....</b>	<b>22</b>
1.2.1 Principales procesos de mecanizado.....	22
<b>1.3 Sistemas de protección en metales .....</b>	<b>24</b>
1.3.1 Protección anódica .....	24
1.3.2 Protección catódica .....	24
<b>1.4 Galvanizado.....</b>	<b>26</b>
1.4.1 Tipos de galvanizado .....	26
1.4.2 Proceso de galvanizado en caliente.....	27
1.4.3 Morfología del recubrimiento galvánico en caliente .....	29
1.4.4 Influencia de la temperatura y tiempo de inmersión en el baño de galvanizado .....	38
1.4.5 Ventajas del galvanizado.....	39
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>41</b>
<b>2.1 Mecanizado y obtención de probetas (Fase 1) .....</b>	<b>41</b>
2.1.1 Determinación del número de probetas.....	42
2.1.2 Obtención de material base.....	43
2.1.3 Dimensionamiento de probetas en placas .....	43
2.1.4 Mecanizado de placas.....	46



2.1.5	Obtención de probetas.....	50
2.1.6	Galvanizado de probetas.....	51
<b>2.2</b>	<b>Elaboración de ensayos (Fase 2).....</b>	<b>51</b>
2.2.1	Equipos empleados.....	53
2.2.2	Ensayo de tracción.....	55
2.2.3	Análisis de composición química.....	56
2.2.4	Ensayo de metalografía.....	58
2.2.5	Ensayo de micro dureza – recubrimiento de zinc.....	60
2.2.6	Ensayo de rugosidad.....	62
2.2.7	Ensayo de desgaste.....	63
2.2.8	Ensayo de corrosión mediante cámara de niebla salina.....	64
2.2.9	Ensayo de adherencia pull-off.....	67
2.2.10	Ensayo de adherencia por temperatura.....	69
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1</b>	<b>Resultados de los ensayos.....</b>	<b>71</b>
3.1.1	Resultados del ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A-36.....	71
3.1.2	Resultados del ensayo de composición química del sustrato del acero ASTM A-36.....	72
3.1.3	Resultados del ensayo metalográfico: Medición de espesores y reconocimiento de fases del recubrimiento galvanizado.....	73
3.1.4	Resultados del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-dureza.....	84
3.1.5	Resultados del ensayo de rugosidad.....	96
3.1.6	Resultados del ensayo de desgaste.....	97
3.1.7	Resultados del ensayo de corrosión.....	99
3.1.8	Resultados del ensayo de adherencia pull-off.....	114
3.1.9	Resultados del ensayo de adherencia en caliente.....	116
3.1.10	Resumen de resultados de los lotes de estudio ensayados.....	126
<b>3.2</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>128</b>
3.2.1	Análisis de los resultados del ensayo de tracción.....	128
3.2.2	Análisis de los resultados del ensayo de composición química.....	128
3.2.3	Análisis de los parámetros del proceso de galvanizado.....	129
3.2.4	Análisis de los resultados del ensayo de micro–dureza y metalografía.....	129
3.2.5	Análisis de los resultados del ensayo de rugosidad.....	131
3.2.6	Análisis de los resultados del ensayo de desgaste.....	132
3.2.7	Análisis de los resultados del ensayo de corrosión.....	133
3.2.8	Análisis de los resultados del ensayo de adherencia pull-off.....	135

3.2.9	Análisis de los resultados del ensayo de adherencia por temperatura ..	136
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>139</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>141</b>
	Referencias Bibliográficas .....	143
	ANEXOS.....	147
	<b>ANEXO I. IPAC CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL</b> .....	<b>147</b>
	<b>ANEXO II. CONTROL DEL GALVANIZADO-GALVANORTE</b> .....	<b>148</b>
	<b>ANEXO III. CODIFICACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS</b> .....	<b>149</b>
	<b>ANEXO IV. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN</b> .....	<b>150</b>
	<b>ANEXO V. COMPOSICIÓN QUÍMICA</b> .....	<b>154</b>
	<b>ANEXO VI. MEDIDAS Y DETERMINACIÓN DE FASES DEL ESPESOR DE GALVANIZADO</b> .....	<b>157</b>
	<b>ANEXO VII. VALORES DE PESO DEL LAS PROBETAS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE DESGASTE</b> .....	<b>169</b>
	<b>ANEXO VIII. CÁLCULO VELOCIDAD DE CORROSIÓN</b> .....	<b>170</b>
	<b>ANEXO IX. ENSAYO DE PULL OFF</b> .....	<b>172</b>
	<b>ANEXO X. ESPESOR DE GALVANIZADO DESPUÉS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN</b> .....	<b>180</b>
	<b>ANEXO XI. RESULTADO DEL ENSAYO DE RUGOSIDAD</b> .....	<b>184</b>
	<b>ANEXO XII. RESULTADOS DE ENSAYO DE ADHERENCIA POR TEMPERATURA</b> .....	<b>186</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química del acero estructural .....	20
Tabla 1.2. Composición química para placas de acero A-36, ancho > 380 mm .....	20
Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero estructural A36 .....	21
Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero estructural A-36 .....	21
Tabla 1.5. Estructura de las fases Zn-Fe .....	30
Tabla 1.6. Fases de la microestructura del recubrimiento galvánico .....	31
Tabla 1.7. Influencia del silicio en la estructura del recubrimiento galvánico .....	32
Tabla 1.8. Recubrimiento galvánico respecto al contenido de silicio y fósforo .....	35
Tabla 1.9. Transformación de fases Zn-Al .....	36
Tabla 1.10. Fases desarrolladas en la interfaz recubrimiento-acero de acuerdo con % de Al .....	37
Tabla 2.1. Número de probetas según el ensayo .....	42
Tabla 2.2. Equipos empleados para la realización de la investigación presente .....	53
Tabla 3.1. Especificaciones de propiedades mecánicas del material base según Norma NTE INEN 2215:2012 .....	71
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base realizado en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones .....	71
Tabla 3.3. Especificaciones de composición química del material base según norma NTE INEN 2215:2012 .....	72
Tabla 3.4. Resultados del ensayo de composición química material base realizado en el laboratorio de fundición de la EPN .....	73
Tabla 3.5. Metalografías probetas fresadas aumento 500x .....	74
Tabla 3.6. Metalografías probetas rectificadas aumento 500x .....	79
Tabla 3.7. Requerimiento mínimo para el recubrimiento galvánico del acero estructural ASTM A-36 .....	84
Tabla 3.8. Resumen espesor de recubrimiento galvánico de las probetas .....	84
Tabla 3.9. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM1 .....	85
Tabla 3.10. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM2 .....	86
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM3 .....	87
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM4 .....	88
Tabla 3.13. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM5 .....	89
Tabla 3.14. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM1 .....	90
Tabla 3.15. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM2 .....	91
Tabla 3.16. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM3 .....	92
Tabla 3.17. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM4 .....	93
Tabla 3.18. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM5 .....	94
Tabla 3.19. Parámetros de mecanizado en probetas fresadas y rectificadas .....	97
Tabla 3.20. Promedio medidas de probetas antes del ensayo de desgaste .....	97
Tabla 3.21. Resultados de los pesos obtenidos para las probetas del ensayo de corrosión .....	99
Tabla 3.22. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC1 .....	100
Tabla 3.23. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC2 .....	101
Tabla 3.24. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC3 .....	102
Tabla 3.25. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC4 .....	103
Tabla 3.26. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC5 .....	104
Tabla 3.27. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC1 .....	105

Tabla 3.28. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC2 .....	106
Tabla 3.29. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC3 .....	107
Tabla 3.30. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC4 .....	108
Tabla 3.31. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC5 .....	109
Tabla 3.32. Pérdida de material por corrosión para probetas fresadas .....	110
Tabla 3.33. Pérdida de material por corrosión para probetas rectificadas .....	110
Tabla 3.34. Comparación de espesores probetas fresadas .....	112
Tabla 3.35. Comparación de espesores probetas rectificadas .....	112
Tabla 3.36. Velocidad de corrosión para probetas fresadas .....	113
Tabla 3.37. Velocidad de corrosión para probetas rectificadas .....	113
Tabla 3.38. Resultados del ensayo de Pull-Off empleando el medidor automático de adherencia en el lote de probetas fresadas .....	114
Tabla 3.39. Resultados del ensayo de Pull-Off empleando el medidor automático de adherencia en el lote de probetas rectificadas .....	115
Tabla 3.40. Resultados de las probetas fresadas antes del ensayo de adherencia en caliente .....	116
Tabla 3.41. Resultados de las probetas rectificadas antes del ensayo de adherencia en caliente .....	116
Tabla 3.42. Resultados de las probetas fresadas después del ensayo a 200 °C. ....	116
Tabla 3.43. Resultados de las probetas rectificadas después del ensayo a 200 °C. ...	117
Tabla 3.44. Resultados de las probetas fresadas y rectificadas después del ensayo a 300 °C. ....	117
Tabla 3.45. Resultados de las probetas fresadas y rectificadas después del ensayo a 400 °C. ....	117
Tabla 3.46. Resultados de micro-durezas para las probetas FT1 y RT1 a 200° C .....	118
Tabla 3.47. Resultados de micro-durezas para las probetas FT2 y RT2 a 300° C .....	119
Tabla 3.48. Resultados de micro-durezas para las probetas FT3 y RT3 a 300° C .....	120
Tabla 3.49. Resultados de micro-durezas para las probetas FT4 y RT4 a 400° C .....	121
Tabla 3.50. Resultados de micro-durezas para las probetas FT5 y RT5 a 400° C .....	122
Tabla 3.51. Espesores del recubrimiento galvánico bajo distintos valores de temperatura .....	123
Tabla 3.52. Espesores de las fases del galvanizado bajo distintos valores de temperatura .....	123
Tabla 3.53. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados al lote de probetas fresadas y rectificadas .....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de fresado en discordancia (izquierda) y en concordancia (derecha).....	23
Figura 1.2. Proceso de rectificado .....	24
Figura 1.3. Serie de potenciales electroquímicos de los metales .....	25
Figura 1.4. Protección catódica del zinc sobre el acero .....	26
Figura 1.5. Proceso de galvanizado GALVANORTE CIA. Ltda. ....	29
Figura 1.6. Diagrama de fases temperatura - % Zn .....	30
Figura 1.7. Microestructura del recubrimiento para tiempo de baño de 3 minutos.....	31
Figura 1.8. Diagrama de fases Zn-Al .....	36
Figura 1.9. Diagrama ternario de fases Fe-Al-Zn .....	37
Figura 1.10. Efectos de la temperatura sobre el espesor de recubrimiento de galvanizado en aceros con distinto porcentaje de silicio.....	39
Figura 2.1. Diagrama de procesos para la obtención de probetas .....	41
Figura 2.2. Material base acero A-36.....	43
Figura 2.3. Distribución de las probetas en las placas mecanizadas. ....	44
Figura 2.4. Distribución probetas para caracterización de material .....	45
Figura 2.5. Dimensiones de probetas para el ensayo de tracción .....	45
Figura 2.6. Corte de placas de material base .....	45
Figura 2.7. Especificación de cuchillas para el mecanizado .....	46
Figura 2.8. Montaje de cuchillas en la herramienta de fresado.....	46
Figura 2.9. Montaje de placas en la fresadora .....	47
Figura 2.10. Fresado de placas y muestra final.....	48
Figura 2.11. Mesa magnética y disco abrasivo .....	48
Figura 2.12. Graduación y avance por dial y volantes .....	49
Figura 2.13. Proceso de desbaste para rectificación de las placas .....	49
Figura 2.14. Muestra final de rectificado .....	50
Figura 2.15. Corte de probetas por chorro de agua .....	50
Figura 2.16. Probetas galvanizadas.....	51
Figura 2.17. Diagrama de flujo para elaboración de ensayos.....	52
Figura 2.18. Ensayo de tracción .....	55
Figura 2.19. Espectrómetro de chispa del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional .....	58
Figura 2.20. Preparación de probetas para micrografía.....	59
Figura 2.21. Limpieza de probetas para posicionar en el molde de duralón .....	59
Figura 2.22. Colocación y secado de resina en moldes de duralón .....	60
Figura 2.23. a) Equipo para micro-indentación, b) Micro-indentaciones realizadas sobre el recubrimiento de zinc .....	62
Figura 2.24. Preparación de probetas para el ensayo de rugosidad .....	62
Figura 2.25. Disposición de probetas para el ensayo de desgaste .....	64
Figura 2.26. Soporte de acrílico colocado dentro de la cámara de corrosión.....	65
Figura 2.27. a) Cámara de niebla salina para ensayo de corrosión y b) Muestra expuesta a la cámara de niebla salina después de siete días .....	67
Figura 2.28. Tipos de fractura que se presentan en el recubrimiento de las muestras galvanizadas.....	68
Figura 2.29. Codificación de los tipos de fracturas presentes en los metales con recubrimiento galvánico .....	68
Figura 2.30. Disposición de probetas para el ensayo de adherencia por temperatura	70
Figura 3.1. Curva esfuerzo deformación para la probeta M20.050.01.....	72

Figura 3.2. Resultado de los valores de dureza promedio para probetas fresadas en base a la estructura de la fase zeta. ....	95
Figura 3.3. Resultado de los valores de dureza promedio para probetas rectificadas en base a la estructura de la fase zeta .....	95
Figura 3.4. Resultados del ensayo de rugosidad de probetas fresadas .....	96
Figura 3.5. Resultados del ensayo de rugosidad de probetas rectificadas .....	96
Figura 3.6. Valores de desgaste promedio en las probetas de fresado y rectificado ...	98
Figura 3.7. Pérdida de material en función del tiempo para el proceso de fresado ...	111
Figura 3.8. Pérdida de material en función del tiempo para el proceso de rectificado	111
Figura 3.9. Velocidad de corrosión promedio VS Tiempo para las probetas de fresado .....	113
Figura 3.10. Velocidad de corrosión promedio VS Tiempo para las probetas de rectificado .....	114
Figura 3.11. Rugosidad VS Adherencia de ambos procesos de mecanizado.....	115
Figura 3.12. Dureza VS Adherencia de ambos procesos de mecanizado .....	115
Figura 3.13. Caracterización del recubrimiento de zinc luego de un proceso de corrosión .....	135

## RESUMEN

En la presente investigación se caracterizó el recubrimiento de zinc sobre acero A-36, al variar su calidad superficial y ser sometido a cambios de temperatura. Inicialmente se empleó un proceso de fresado y rectificado para la obtención de las muestras, mismas que fueron galvanizadas en caliente. En base a la metodología planteada, las probetas fueron analizadas bajo distintos ensayos, tales como: metalografía, micro-dureza, composición química, rugosidad, desgaste, adherencia por temperatura, corrosión por niebla salina y pull-off. En primera instancia mediante los resultados obtenidos se determinó que las probetas con superficie rectificadas conservaron una vida útil prolongada, mayor resistencia a la corrosión y menor pérdida por desgaste, en comparación con las probetas fresadas, debido al grado de rugosidad que originó cada uno de estos procesos. Todo esto de la mano con el porcentaje de silicio del material base, el tiempo de inmersión en el baño de zinc y las estructuras formadas en la fase zeta ( $\zeta$ ), las cuales, en función de su forma, tamaño y distribución, generan una mayor rugosidad en la superficie de las muestras de estudio y de igual manera determinará la dureza del recubrimiento. Por otro lado, las muestras con superficie fresada presentan una mejora frente a las probetas rectificadas relacionadas a los parámetros de adherencia por desprendimiento y temperatura, identificando una mejora de las propiedades de dureza, rugosidad superficial y resistencia a la corrosión, generadas por la formación una capa protectora entre la interfaz sustrato – recubrimiento producto de la difusión del zinc, al someter las muestras a una temperatura de 300 °C y 400 °C.

**Palabras clave:** procesos de mecanizado, composición química, fase zeta, rugosidad superficial, temperatura, espesor de galvanizado, adherencia del recubrimiento.

## ABSTRACT

This investigation characterized the zinc coating on A-36 steel, modifying its surface quality and generating temperature changes. Initially, milling and grinding processes were used to obtain test specimens, which were hot dip galvanized. Using the methodology, the specimens were subjected to different tests, such as: metallography, micro-hardness, chemical composition, roughness, wear, temperature adherence, salt spray corrosion and pull-off. In the first instance the results showed that the specimens with grinding surface conserved a long useful life, greater resistance to corrosion and less detachment of the coating due to wear, compared to the milled specimens, based on the degree of roughness that each one of these processes originated. All this added the percentage of silicon in the substrate, the immersion time of the zinc bath and the structures formed in the zeta phase ( $\zeta$ ), which depending on their shape, size and distribution, provide greater roughness on the surface of the test specimens in the same way will determine the hardness of the coating. On the other hand, test specimens with milled surface show an improvement compared to the grinded specimens related to the parameters of adhesion by detachment and temperature, improvement properties of hardness, surface roughness and corrosion resistance, due to formation of a protective layer between the substrate-coating interface caused by the diffusion of zinc, when these are heat treated with a temperature of 300 °C and 400 °C.

**Keywords:** machining processes, chemical composition, zeta phase, surface roughness, temperature, galvanized thickness, coating adhesion.



# **“CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE ZINC SOBRE ACERO A-36, AL VARIAR LA CALIDAD SUPERFICIAL Y SER TRATADO TÉRMICAMENTE”**

## **INTRODUCCIÓN**

El acero representa uno de los materiales más empleados en la industria, principalmente en construcciones, moldeo de perfiles o láminas, componentes automotrices, objetos de uso cotidiano como electrodomésticos, etc. Sin embargo, una de las principales limitantes que atañen a este material es que tiende con el tiempo a deteriorarse ya sea por problemas durante su manufactura, defectos o discontinuidades agregadas, factores ambientales como la temperatura y humedad del aire, entre otros. Así mismo, todo material, especialmente los metales ferrosos aleados buscan retornar a su estado inicial de baja energía, debido a las reacciones químicas que los metales generan al contacto con agentes oxidantes, estos pueden ser inducidos o propios del medio. Esta situación provocó que varias constructoras o fabricantes de acero desarrollen o empleen recubrimientos para la protección y duración del material; actualmente existen distintos métodos de recubrimiento que dependen de la aplicación de elementos protectores. Uno de los métodos más empleados y económicos contra el deterioro corresponde al proceso de galvanizado, el cual implica cubrir un metal con otro con el fin de servir de barrera para el sustrato y dotarlo de un acabado más resistente; no obstante, la problemática se origina en que la adherencia y duración del recubrimiento galvánico en el acero puede ser perjudicada por el acabado superficial del mismo. Los estudios e investigaciones realizadas durante los últimos años referentes a este fenómeno son de difícil acceso o limitados, por lo cual surge la motivación de investigar la incidencia que tiene el tratar térmicamente el acero recubierto con modificación superficial, así como el comportamiento en cuanto a sus propiedades mecánicas de adherencia, desgaste y dureza entre el sustrato y la capa de galvanizado. El estudio de la influencia que tienen los procesos de mecanizado en el deterioro del recubrimiento galvánico en el acero estructural A-36 proporcionará información valiosa que será de aporte a la industria y empresas dedicadas a la elaboración de estructuras metálicas o de elementos que requieran de una gran resistencia mecánica, con la finalidad de procurar un correcto acabado superficial que contribuya a la adherencia de la capa de galvanizado y por consecuencia a la reducción de la tasa de corrosión, además de brindar información general acerca de los cambios microestructurales suscitados.

## **OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar el recubrimiento de zinc sobre acero A-36, al variar la calidad superficial y ser tratado térmicamente.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos de la investigación tienen que reunir las siguientes características:

- Obtener probetas de acero estructural A-36.
- Determinar la influencia de la temperatura sobre la interfaz que se produce en la capa de galvanizado y el material base.
- Determinar la influencia del proceso de mecanizado sobre la interfaz que se produce en la capa de galvanizado y el material base.
- Obtención de los parámetros y herramientas para el acabado superficial de las probetas.
- Evaluar los resultados obtenidos.

# 1 MARCO TEÓRICO

## 1.1 Acero estructural

### 1.1.1 Concepto

Llamamos acero estructural a la combinación de dos elementos principales, hierro y carbono junto con algunos otros elementos tales como el fósforo, oxígeno, azufre y silicio; estos son los que proporcionarán sus grandes propiedades, mientras que la cantidad de carbono presente deberá ser inferior al 2% en concentración y no menor a 0,03%.

Referente a sus propiedades se remarca su alta resistencia a la tensión y compresión, ductilidad, soldabilidad, moderada resistencia a la corrosión a condiciones normales; por el contrario, en altas temperatura estas propiedades pueden verse gravemente afectadas.

#### 1.1.1.1 Clasificación del acero estructural

##### **Perfiles estructurales**

Representan elementos de acero laminado y se caracterizan por tener una sección transversal de ángulo o canal o en su defecto en forma de T, H e I.

##### **Planchas**

Representa hojas planas de acero laminado en caliente y por lo general manejan espesores entre 5,8 mm y 4,5 mm.

##### **Barras**

Representan elementos de acero laminado en la que su sección transversal podría abarcar todos los tamaños de formas hexagonales, circulares o cuadradas.

### 1.1.1.2 Tipos de acero estructural

Para el caso de tubos se emplean los modelos ASTM A500, A501 y A53. Estos se pueden encontrar en forma geométrica redonda, rectangular y cuadrada. Estos tipos de acero presentan gran resistencia a la fluencia y resistencia a la tracción con valores entre 250 – 300 MPa, y 350 – 400 MPa respectivamente.

Para perfiles y planchas se emplean los modelos como ASTM A572, A529, A588 y A36. El espesor comercial en el caso de planchas es de 25 – 100 mm con una resistencia a la fluencia menor a 345 MPa. Para el caso de perfiles se encuentran disponibles en el mercado en todos los tamaños. Su resistencia a la fluencia es menor a 485 MPa.

### 1.1.2 Acero estructural A-36

Es considerado el acero estructural más empleado a nivel industrial, y tiene un contenido de carbono de hasta 0.29%. Este tipo de acero por lo general se lo lamina en caliente. En la Tabla 1.1 y 1.2, se detalla la composición química del acero A-36 y en la Tabla 1.3 y 1.4 se presenta las propiedades mecánicas y físicas del material, respectivamente.

### Composición química

Tabla 1.1. Composición química del acero estructural

Composición Química (% , ≤) Para Formas					
Acero	C	Si	P	S	Cu
ASTM A36	0,26	0,4	0,04	0,05	0,2

(Fuente: Material Mundial. (2018). *Acero ASTM A36, Acero A36 Propiedades, Ficha Técnica, Dureza, Densidad Estructural*. Recuperado de <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>)

Tabla 1.2. Composición química para placas de acero A-36, ancho > 380 mm

Composición Química (% , ≤) Para placas > 380 mm							
Acero	C	Si	Mn	P	S	Cu	Espesor [mm]
ASTM A36	0,25	0,4	N/A	0,03	0,03	0,2	≤ 20
	0,25	0,4	0,8 - 1,2	0,03	0,03	0,2	20 < e ≤ 40
	0,26	0,15 - 0,4	0,8 - 1,3	0,03	0,03	0,2	40 < e ≤ 65
	0,27	0,15 - 0,4	0,85 - 1,2	0,03	0,03	0,2	65 < e ≤ 100
	0,29	0,15 - 0,5	0,85 - 1,2	0,03	0,03	0,2	> 100

(Fuente: Material Mundial. (2018). *Acero ASTM A36, Acero A36 Propiedades, Ficha Técnica, Dureza, Densidad Estructural*. Recuperado de <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>)

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero estructural A36

Propiedades Mecánicas		
Dureza Brinell	[HB]	119 - 162
Límite de Fluencia	[MPa]	>250
Resistencia a la Tracción	[MPa]	400 - 550
Porcentaje de Elongación en 50 mm	[%]	>23
Esfuerzo de Fluencia en Espesor de 200	[mm]	>250

(Fuente: Material Mundial. (2018). *Acero ASTM A36, Acero A36 Propiedades, Ficha Técnica, Dureza, Densidad Estructural*. Recuperado de <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>)

Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero estructural A-36

Propiedades Físicas		
Módulo de Corte	[GPa]	79,3
Módulo de Elasticidad	[GPa]	200
Relación de Poisson	-	0,26
Densidad	[g/cm <sup>3</sup> ]	7,85

(Fuente: Material Mundial. (2018). *Acero ASTM A36, Acero A36 Propiedades, Ficha Técnica, Dureza, Densidad Estructural*. Recuperado de <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>)

## Aplicaciones en la industria

Existen una amplia gama de aplicaciones para el acero estructural A-36 específicamente para la construcción, modelado de planchas y perfiles. Se lo emplea en las instalaciones de edificios e industrias, cables de puentes, refuerzo de concreto, varillas. En el caso de los techos y pisos se elaboran mallas electrosoldadas y láminas plegadas.

Diferentes Usos:

- Largueros tipo Joist
- Montantes y diagonales de armaduras
- Anclajes de barras redondas lisas
- Placas de conexión
- Contravientos de cubiertas (Material Mundial, Web, 2018)

## **1.2 Fundamentos del proceso de mecanizado**

El mecanizado se define como un proceso de fabricación mecánica de piezas que se realiza mediante un procedimiento de conformado y que puede ser de tres tipos:

- Formado con desprendimiento de material (por arranque de viruta).
- Formado por deformación plástica de la pieza.
- Formado añadiendo material nuevo.

Para la fabricación de piezas, el mecanizado es uno de los procesos más utilizados, permite fabricar piezas con dimensiones, geometría y acabados superficiales en función de la necesidad de aplicación. El mecanizado se emplea para la fabricación de piezas metálicas, polímeros, materiales compuestos, etc.

Esta revisión se centrará en el conformado por arranque de viruta con los procesos empleados en el proyecto.

### **1.2.1 Principales procesos de mecanizado**

Los procesos de mecanizado se desarrollan a través del uso de máquinas herramientas, utilizadas para conformar la pieza en bruto. Los elementos principales en estas máquinas son los útiles de cortes y los elementos de sujeción de la pieza al equipo de conformado.

Entre las distintas etapas que se dan en un proceso de mecanizado de una pieza, se distinguen el desbaste y el acabado. El desbaste está destinado a eliminar grandes cantidades de material de la pieza, generalmente sin ajustar mucho la precisión del corte y es parte de la primera etapa del mecanizado. Por otro lado, el acabado se realiza en las últimas pasadas de la herramienta, con mayor precisión, con el fin de conseguir un elemento con dimensiones, tolerancias y acabado superficial de la calidad requerida. (Ingemecanica, 2018)

#### **Fresado**

Se ejecuta mediante una máquina herramienta llamada fresadora. En este caso, el material se corta con una herramienta rotativa, denominada fresa, su forma es circular y está provista en su perímetro exterior de varios filos de corte.

En el fresado, la extracción de material se realiza mediante la combinación del movimiento de giro de la herramienta de corte y el desplazamiento, ya sea de la pieza a mecanizar, o de la propia herramienta. Figura 1.1.

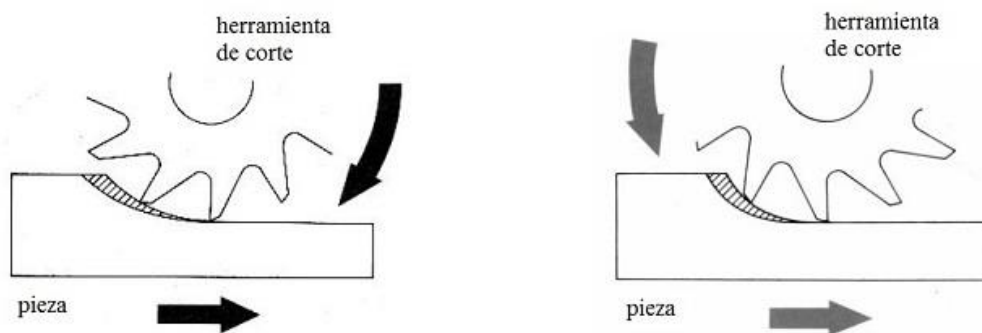


Figura 1.1. Esquema de fresado en discordancia (izquierda) y en concordancia (derecha)  
(Fuente: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>)

La velocidad de corte a la que gira la herramienta depende del tipo de material de la pieza de trabajo. En general, los materiales más blandos se cortan a velocidades de torneado más altas y los materiales duros se cortan regularmente a un ritmo más lento.

Las fresadoras ofrecen una inmensa versatilidad, ya que cuentan con un movimiento adicional más que el torno, por lo que pueden ejecutar distintos mecanizados, aunque su coste y productividad se verá condicionado por el tipo de trabajo, el tamaño de la pieza y la serie a producir. (Ingemecanica, 2018)

## Rectificado

Se realiza en una máquina rectificadora, mediante un proceso de abrasión, el equipo retira material de una pieza con el fin de modelarla empleando herramientas llamadas muelas. El rectificado se utiliza para el acabado de piezas, en la etapa final de su producción, después del torneado o fresado, para contribuir con el acabado superficial del producto y su tolerancia dimensional. El rectificado es una operación de mecanizado que se realiza sobre piezas que exigen medidas y tolerancias precisas, ya sean geométricas, dimensionales o de acabado superficial, Figura 1.2.

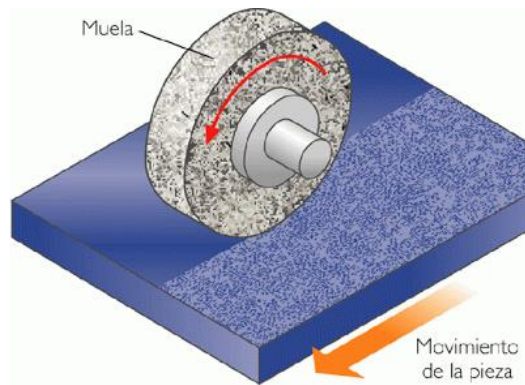


Figura 1.2. Proceso de rectificado

(Fuente: <https://www.mecanizadossinc.com/rectificado-proceso-comun-mecanizado-piezas-abrasion/l>)

### 1.3 Sistemas de protección en metales

La corrosión es un fenómeno que produce el deterioro de los materiales mediante reacciones químicas y electroquímicas con el entorno, esto se debe a que los materiales metálicos son obtenidos del procesamiento de minerales, induciéndolos a un estado de mayor energía, dichos materiales con el tiempo intentan regresar a su estado natural, lo que origina este proceso de corrosión. (Salazar, 2015)

Actualmente en base a investigaciones y el desarrollo de la tecnología se ha incorporado métodos para el control de este fenómeno. Los métodos principales son la protección anódica y catódica.

#### 1.3.1 Protección anódica

Es un método que se basa en recubrir un metal con una fina capa de óxido para que no se corra. Por ejemplo, existen materiales como el aluminio que pueden generar de manera espontánea esta capa de óxido al entrar con contacto con el aire, asegurando resistencia a la corrosión. Es un proceso costoso y difícil de mantener y su uso no es frecuente.

#### 1.3.2 Protección catódica

La protección catódica consiste en reducir o eliminar la corrosión de un metal, haciendo que la superficie de este funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrolito. Para conseguir esto se debe hacer que el potencial eléctrico del metal a proteger se vuelva más electronegativo mediante la aplicación de una corriente directa o la unión de un material de sacrificio (comúnmente magnesio, aluminio o zinc). (García, 2015). La protección catódica por material de sacrificio inhibe en gran medida la corrosión galvánica.



## Corrosión Galvánica

También denominada corrosión electroquímica, se produce cuando dos materiales metálicos que poseen diferente valor de electronegatividad están en contacto dentro de un electrolito, de manera que el metal menos electronegativo (ánodo) se oxidará, presentando un progresivo deterioro de la superficie metálica, y el más electronegativo (cátodo) se reducirá. Este proceso de oxidación y reducción se genera por el flujo de corriente del ánodo hacia el cátodo polarizándolos de manera positiva y negativa, respectivamente. Este tipo de reacción es un caso particular de un sistema químico denominado par galvánico. (Incoperfil, 2006). Cuánto más alto y positivo sea el valor de electronegatividad más noble es el metal, es decir tiene resistencia a la corrosión. Estos valores se encuentran tabulados en la serie galvánica, Figura 1.3, la cual es una herramienta útil para la selección de un material en una aplicación específica. (Construmática, 2021)

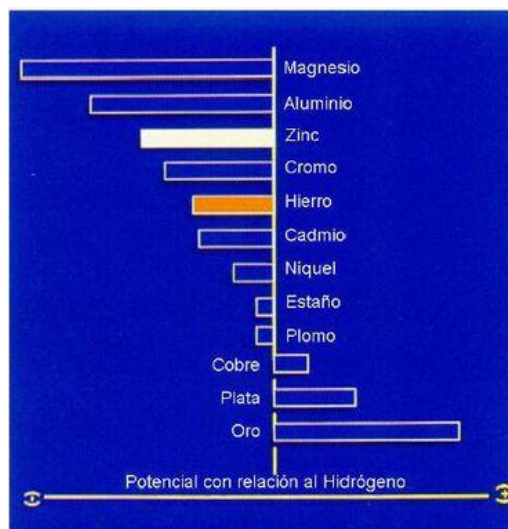


Figura 1.3. Serie de potenciales electroquímicos de los metales  
(Fuente: [https://www.construmatica.com/construpedia/El\\_Zinc\\_como\\_Metal\\_Protector](https://www.construmatica.com/construpedia/El_Zinc_como_Metal_Protector))

Los recubrimientos de zinc ejercen una activa protección catódica en las piezas y elementos metálicos de modo que asegura que mientras exista una capa protectora de zinc sobre la superficie el material base permanecerá inalterado. Estos revestimientos generan una protección tipo barrera debido a que la humedad y el anhídrido carbónico del aire genera sobre la superficie del zinc una capa de pasivación protectora soluble, compacta y adherente provocando que la velocidad de corrosión del zinc sea inferior de 10 a 30 veces por debajo de la del acero, Figura 1.4.

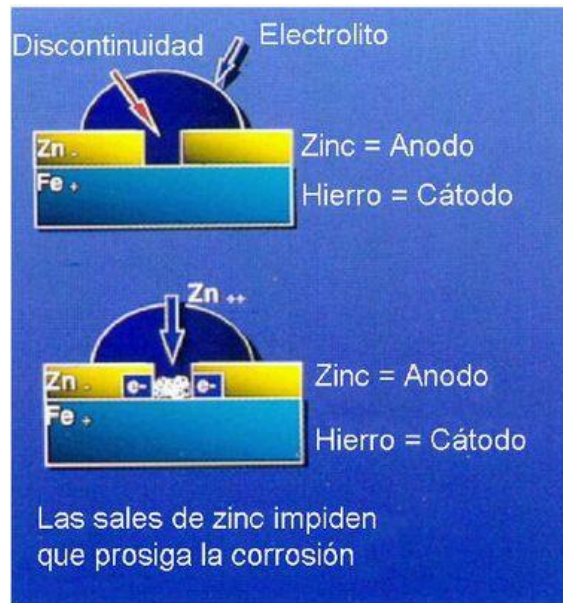


Figura 1.4. Protección catódica del zinc sobre el acero  
(Fuente: [https://www.construmatica.com/construpedia/El\\_Zinc\\_como\\_Metal\\_Protector](https://www.construmatica.com/construpedia/El_Zinc_como_Metal_Protector))

## 1.4 Galvanizado

El zinc constituye uno de los elementos menos predominantes alrededor del mundo, sin embargo, posee muchas ventajas al momento de emplearlo, entre las principales es que posee bajo punto de fusión, características anódicas respecto a otros metales como el hierro y tienden a corroerse antes que este último.

El zinc junto con sus aleaciones posee características destacables en cuanto a resistencia a la corrosión atmosférica, dependiendo de las condiciones del medio ambiente e influencia del oxígeno atmosférico. Este elemento tiende a formar un recubrimiento, esta capa sirve como protección reduciendo la velocidad de corrosión alrededor de la superficie a proteger. Durante los últimos años se han desarrollado una variedad de procesos de galvanizado con la finalidad de retrasar el fenómeno de la corrosión; todos estos métodos se basan en añadir elementos aleantes para la formación de una barrera entre el metal y los elementos que pueden ser agresivos en el medio de trabajo, en este caso la deposición de un material de mayor carga sobre uno de menor carga.

### 1.4.1 Tipos de galvanizado

Existen a nivel industrial varios métodos para generar una capa de recubrimiento en aceros, entre los principales tenemos:

### **Galvanizado por laminación**

Corresponde a un tipo de galvanización en el que se sumergen láminas de metal en zinc fundido dentro de crisoles, con la finalidad de prolongar el tiempo de vida útil del material y reducir la exigencia de mantenimiento.

### **Zincado electrolítico**

Como su nombre lo indica constituye un proceso de depósito de zinc por medio de electrólisis, proceso de separación de elementos de un compuesto con la ayuda de la electricidad. El proceso debe ser alcalino y sin rastro de cianuro. Si el método cumple estos requerimientos la resistencia a la corrosión y la uniformidad de los espesores se conserva. Tal es el caso del zincado ácido.

### **Galvanización en frío**

Proceso que consiste en aplicar un recubrimiento de zinc a aceros empleando herramientas como brochas o pistolas. Para que el recubrimiento sea efectivo como en el galvanizado en caliente, se requiere que la capa protectora posea como mínimo 92% de zinc y conduzca la electricidad.

### **Galvanización en caliente**

Método de recubrimiento de elementos de acero, sumergiéndolos en un crisol con zinc fundido en su interior a aproximadamente 450 grados centígrados. Este método abarca el consumo de zinc a nivel global de aproximadamente 50%; por lo que se le considera uno de los mejores métodos de protección contra la corrosión de los aceros, esto se debe a que la unión del acero con el zinc fundido genera una reacción química metalúrgica. El contenido de zinc es mucho mayor conforme se acercan a la superficie del material base.

#### **1.4.2 Proceso de galvanizado en caliente**

La información acerca del método da galvanizado presentada es recuperada de la página oficial de la empresa GALVANORTE CIA Ltda.

## **Desengrase**

En este procedimiento se sumerge el elemento que se desea galvanizar en una solución alcalina o ácida, con el fin de retirar residuos del material base que se pudieron adherir de procesos de mecanizado.

## **Enjuague**

Durante esta etapa las piezas o elementos son limpiados con agua con la finalidad de no añadir sustancias desengrasantes en procesos posteriores.

## **Decapado**

El procedimiento de decapado se emplea para eliminar el óxido o cualquier impureza que se pueda situar en la superficie de los elementos, aplicando una solución ácida; garantizando una limpieza química de la superficie del sustrato.

## **Enjuague**

Durante esta etapa las piezas o elementos son limpiados con agua con la finalidad de impedir que se añada ácido o hierro durante la etapa de fluxado.

## **Fluxado**

En este punto del proceso de galvanizo se añade una solución de sales a los elementos de acero con la finalidad de beneficiar a la adherencia del zinc y el hierro, además de prevenir la rápida oxidación de la superficie del material antes de ser galvanizada.

## **Secado**

Las piezas de acero serán calentadas a una temperatura aproximada de 40 hasta 80 grados Celsius para retirar la humedad de su superficie.

## **Baño de zinc**

Etapa del proceso en la que los elementos serán bañados por zinc fundido a 99.9% de pureza, el tiempo del baño será el adecuado para lograr la aleación zinc-hierro a una temperatura aproximada de 450 °C.

## Enfriamiento

Como su nombre lo indica, las piezas son sumergidas en agua a condiciones atmosféricas para facilitar la verificación del galvanizado.

## Inspección

Se realiza un control de calidad a los resultantes del proceso, haciendo hincapié en los parámetros de apariencia, espesor y adherencia del zinc y el sustrato, con ayuda de herramientas, equipos, normas nacionales e internacionales. En la Figura 1.3. se observa el procedimiento.

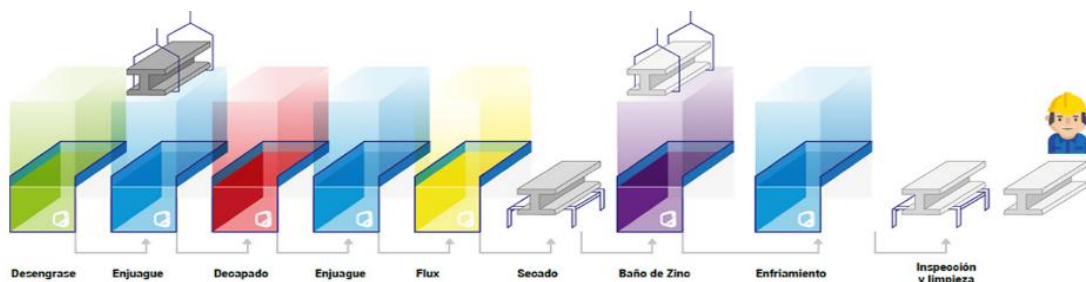


Figura 1.5. Proceso de galvanizado GALVANORTE CIA. Ltda.  
(Fuente: <https://www.galvanorte.ec/index.php/9-uncategorised>)

### 1.4.3 Morfología del recubrimiento galvánico en caliente

#### Composición química de los recubrimientos

Durante los baños de galvanizado que se le proporciona al material base, suelen añadirse elementos de manera intencional o por el contrario se revelan como impurezas agregadas del material; en algunos, añadidas durante la etapa de fabricación.

Estos elementos añadidos en el baño pueden llegar a influir de manera significativa en el desarrollo de la capa de zinc y hasta su morfología; entre algunos de ellos podemos mencionar, níquel, cobre, aluminio, estaño y plomo.

Para los procesos de galvanizado en caliente, se puede visualizar la formación de las fases que toman lugar debido a que se emplea zinc puro con bajo contenido de aleantes por medio del diagrama Zn-Fe de la Figura 1.4 junto con la Tabla 1.5, que representa las características de estas.

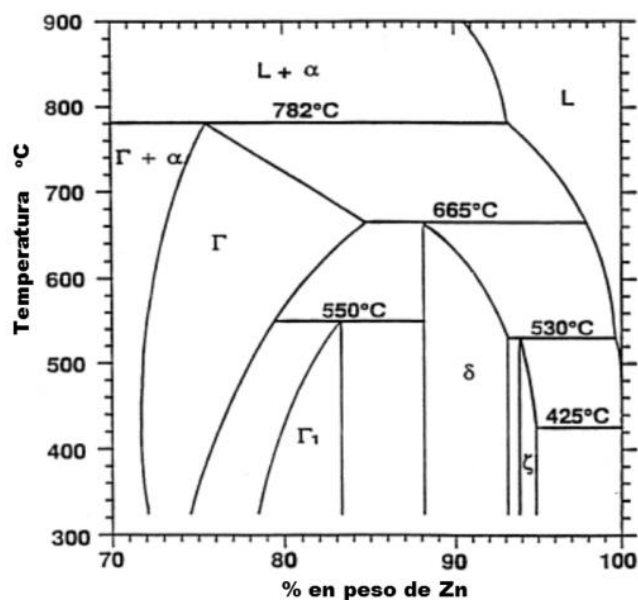


Figura 1.6. Diagrama de fases temperatura - % Zn  
 (Fuente: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>)

Tabla 1.5. Estructura de las fases Zn-Fe

Fases	Fórmula	Estructura
$\alpha$ Fe	Fe (Zn)	BCC
$\Gamma$	Fe 3 Zn 10	BCC
$\Gamma_1$	Fe 5 Zn 21	FCC
$\delta$	Fe Zn 10	Hexagonal
$\zeta$	Fe Zn 13	Monocíclica
$\eta$ Zn	Zn (Fe)	HCP

(Fuente: Rico Y., Carrasquero E., 2017, *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: Una revisión*. Recuperado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>).

### 1.4.3.1 Fases en la microestructura del recubrimiento

Normalmente el número de fases que toman lugar en la microestructura del recubrimiento galvánico son cuatro y se encuentra muy bien definidas de acuerdo con los parámetros y elementos presentes durante el baño del zinc. Tal y como se muestra en la Figura 1.5 y Tabla 1.6.

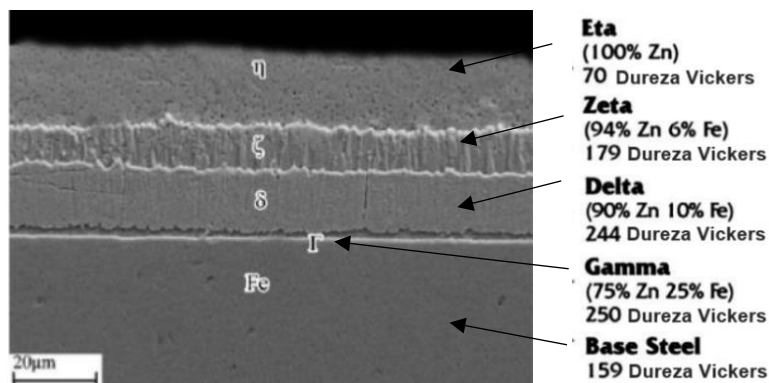


Figura 1.7. Microestructura del recubrimiento para tiempo de baño de 3 minutos  
(Fuente: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>)

Tabla 1.6. Fases de la microestructura del recubrimiento galvanizado

Fases	Características
$\Gamma$ (Gamma)	Se puede visualizar con tiempos prolongados durante el baño de zinc, el porcentaje de hierro dentro de esta fase es de 21 – 28 %, además de poseer una estructura cristalina cúbica con una dureza representativa de 250 Vickers.
$\delta$ (Delta)	Son consideradas capas intermedias que toman lugar siempre y cuando la concentración de aluminio en el baño no sea elevada, los compuestos formados en estas fases poseen propiedades frágiles por lo que contribuyen a la formación de grietas en caso de deformación con grandes espesores de recubrimiento. La fase delta muestra una estructura cristalina tipo hexagonal, mientras que la fase zeta consta de una monoclinica <sup>1</sup> ; los valores de dureza que se registran para estas fases son de 244 y 179 Vickers, respectivamente.
$\zeta$ (Zeta)	
$\eta$ (Eta)	Esta fase se verá reducida cuando el material luego del proceso de galvanizado es sometido a un proceso térmico posterior. A la vez que esta fase se ve reducida se observa un crecimiento de la fase zeta, esta sección del recubrimiento muestra una estructura cristalina tipo hexagonal que mantiene una buena flexibilidad con valores de dureza de 70 Vickers.

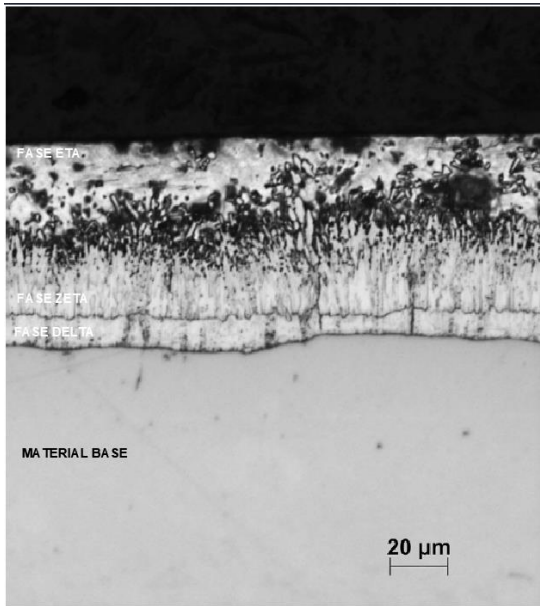
(Fuente: Rico Y., Carrasquero E., 2017, *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: Una revisión*. Recuperado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>).

<sup>1</sup> Monoclinica: Es uno de los siete sistemas cristalinos que tiene tres ejes desiguales, dos de estos están en un plano vertical, que se cortan en un ángulo oblicuo. El tercer eje es perpendicular al plano de los otros dos.

## Influencia del silicio en el galvanizado

En la Tabla 1.7 se detalla la influencia del silicio en el recubrimiento galvánico.

Tabla 1.7. Influencia del silicio en la estructura del recubrimiento galvánico

<p>Bajo contenido de silicio (&lt;0,035% Si)</p>	<p>La capa superficial del sustrato de hierro puro alfa (Fe-<math>\alpha</math>) presenta alta reactividad con el zinc fundido, generando la formación de una fase delta (<math>\delta</math>) la cual a su vez desacelera con rapidez la reacción de la difusión entre el sustrato y el recubrimiento. La fase delta (<math>\delta</math>) de la aleación mantiene cristales hexagonales columnares compactos.</p> <p>En el baño de galvanizado, la superficie de la muestra se calienta lo suficiente generando una capa delgada de fase delta (<math>\delta</math>), junto con una capa primaria denominada zeta (<math>\zeta</math>) que posee cristales monoclinicos. El borde superficial del recubrimiento se encuentra cubierto por una capa de zinc puro que penetra en los cristales integrados de la fase zeta (<math>\zeta</math>).</p> <p>En la fase zeta (<math>\zeta</math>) la difusión del hierro origina que se cree una etapa secundaria de esta misma fase, que se encuentra separada por un límite definido de la capa primaria, mientras que el espesor de la fase delta (<math>\delta</math>) no sufre un cambio perceptible en este proceso.</p> <p>Independientemente del tiempo de inmersión en el baño de zinc no se registran cambios considerables en el espesor de galvanizado. En este tipo de acero el revestimiento tiene buena resistencia mecánica y sus valores superan ligeramente los valores prescritos en norma ISO 1461.</p>	 <p>FASE ZETA FASE ZETA FASE DELTA MATERIAL BASE 20 μm</p>
--	---	--



**Efecto Sandelin (0,035% al 0,12% Si)**

El silicio influye de manera fundamental en la reacción del hierro con el zinc, provocando un impacto desfavorable sobre las características del recubrimiento.

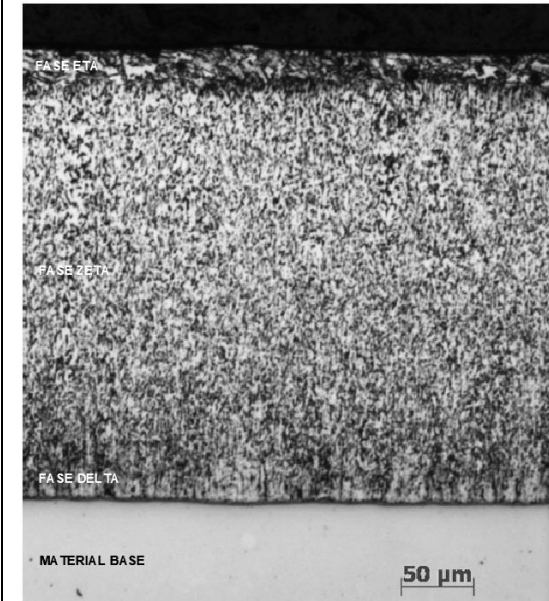
Los revestimientos que presentan estos tipos de acero son gruesos y quebradizos, consiste principalmente en materia blanda solidificada, propensos a sufrir daños mecánicos ya que en ellos predomina una capa de fase de aleación zeta ( $\zeta$ ), que consta de cristales monoclinicos dispuestos aleatoriamente dispersos en zinc puro.

La presencia de silicio en el acero puede producir una reducida adhesión con el recubrimiento causada por porosidades de contracción consecuencia de la difusión intensiva de hierro del sustrato.

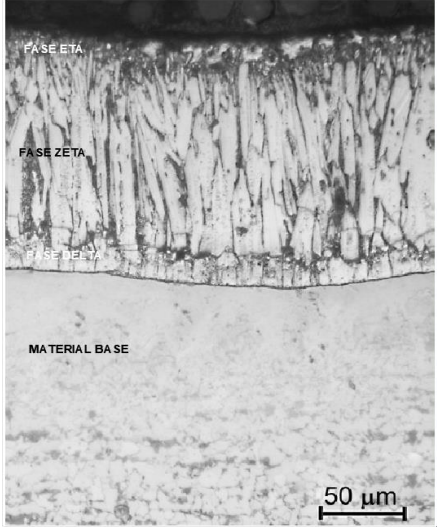
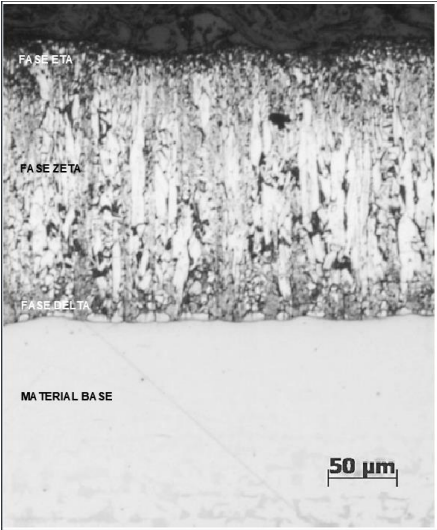
Visualmente el recubrimiento en este tipo de acero se presenta de color gris oscuro y con reactividad elevada de la interfase hierro-zinc.

A diferencia del caso anterior no existe una capa que divida la fase delta ( $\delta$ ) generada del material base.

La temperatura de fusión tiene influencia en el espesor del revestimiento, cuando la temperatura decrece el pico Sandelin desaparece, debido a la reducida efusión<sup>2</sup> de hidrógeno.



<sup>2</sup> Efusión: Proceso que ocurre cuando un gas que está bajo presión escapa hacia el exterior por medio de una abertura.

<p><b>Efecto Sebisty (0,12% al 0,28% Si)</b></p>	<p>El revestimiento en los aceros con este contenido de silicio puede tener un espesor y estructura aceptable si se logra mantener este porcentaje en el rango Sebisty. El recubrimiento para este tipo de acero es más quebradizo y grueso que los aceros de bajo contenido de silicio, sin embargo, su resistencia mecánica es aceptable y antes de la aplicación de revestimientos orgánicos se pueden pulir con éxito.</p> <p>En este rango la velocidad de galvanizado se ve reducida al aumentar la temperatura de fusión. En la fase delta (<math>\delta</math>) aparece un espacio que impide el transporte de material entre el sustrato y el zinc, esto se atribuye a que la posdifusión del hidrógeno en el sustrato no puede compensar la efusión de este mismo hidrógeno presente en el recubrimiento debido al silicio.</p>	
<p><b>Alto contenido de silicio (&gt;0,28% Si)</b></p>	<p>No se puede recomendar aceros con alto contenido de silicio por encima del 0,28% para galvanizar en caliente, porque son extremadamente gruesos y frágiles, tienen una resistencia mecánica muy baja e incluso si se someten a un barrido muy cuidadoso ya que se deslaminan fácilmente.</p> <p>A mayor cantidad de silicio se observa una reducción del del hidrógeno dentro del material. Es decir, la estructura del revestimiento de zinc ya no se ve influenciada por este proceso.</p>	

Fuente: (Kuklik & Kudlacek, 2016)

De lo anterior y con base a estudios se ha llegado a establecer que la composición química del acero recomendada es:

- Silicio < 0.030 %
- Fósforo < 0.50%
- Carbono < 0.30%

De acuerdo con (Tenas S.A, 2000), la Tabla 1.8 proporciona información de las características del recubrimiento galvánico en base al porcentaje de silicio y fósforo en el acero.

Tabla 1.8. Recubrimiento galvánico respecto al contenido de silicio y fósforo

Clase de Acero	Contenido de Silicio y Fósforo (%)	Características del Recubrimiento Galvánico
1	Si < 0,28	Recubrimiento grueso, color gris oscuro. Reactividad elevada de la interfase hierro-zinc
2	0,13 < Si < 0,28	Recubrimiento medio, color mate o plateado. Reacción de la interfase normal
3	0,03 < Si < 0,13	Recubrimiento grueso, color gris oscuro. Reactividad elevada de la interfase hierro-zinc
4	Si < 0,03 Si + 2,5P < 0,09	Recubrimiento normal, color plateado brillante. Reacción de la interfase normal. <b>COMPOSICIÓN IDEAL PARA GALVANIZAR</b>

(Fuente: Galvanizados TENAS S.A, 2000, *Influencia del Silicio y del Fósforo*, Barcelona. Recuperado de: <http://www.galvanizadostenas.com/5900.html> ).

### Influencia del aluminio en el recubrimiento

Es importante mencionar que estudios acerca de la adición de elementos como el níquel en el baño del zinc mejora la resistencia a la corrosión del material y recubrimiento debido a que impide el desarrollo de hidrógeno durante este proceso. De igual manera se ha comprobado mejoras con la adición de tierras raras al proceso de galvanizado brindando mayor homogeneidad a la microestructura y resistencia en la corrosión.

Investigaciones centradas en el estudio del desarrollo de la microestructura con baños de zinc proporcionado por el sector industrial en los que se encuentra que la formación de la fase  $\Gamma$ , es lenta mientras que en la fase  $\zeta$  se posicionan dos tipos de morfologías para tiempos de baño reducidos, concluyendo en un espesor de recubrimiento grueso lo que genera reducción en su ductilidad.

Sin embargo, el elemento más importante durante el proceso de galvanizado es el aluminio, debido a que se encarga de evitar la formación de las capas o fases Zn–Fe puesto a que la fragilidad de estas perjudica al recubrimiento y sus propiedades.

De igual manera se puede apreciar el diagrama de fases Zn–Al en la Figura 1.6 junto con la Tabla 1.9 donde se visualizan las transiciones que experimentan entre ellas dependiendo de la temperatura a las que son sometidas.

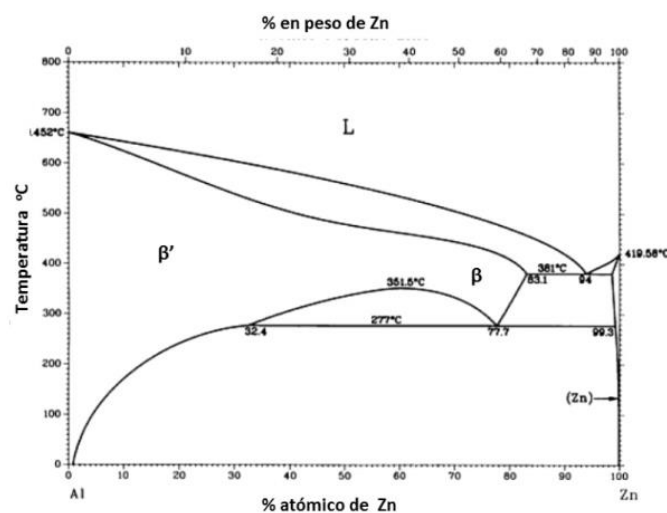


Figura 1.8. Diagrama de fases Zn-Al  
(Fuente: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5055/505554802004/html/index.html>)

Tabla 1.9. Transformación de fases Zn-Al

Transformación de Fase	Composición en % de Peso Zn	Temperatura (°C)	Tipo de Transformación
$L \leftrightarrow \beta + \eta$	95	381	Eutéctico Eutectoide
$\beta \leftrightarrow \beta' + \eta$	77,7	277	Monotectoide
$(Al) \leftrightarrow \beta' + \beta$	61,3	351,5	Crítica
$L \leftrightarrow (Al)$	0	660,4	Congruente
$L + \eta$	100	419,5	Congruente

(Fuente: Rico Y., Carrasquero E., 2017, *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: Una revisión*. Recuperado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>).

Cuando se tiene una concentración de Zn-5%Al, el tipo de transformación microestructural que destaca, corresponde a una aleación eutéctica, mientras que en condiciones de equilibrio se visualizará una fase eutéctica laminar completa de  $\beta + \eta$ ; sin embargo, uno de los factores que se ve involucrado al momento de determinar la fase o transición microestructural del recubrimiento y el material base es la velocidad de enfriamiento, una vez que el baño de zinc ha sido aplicado, en esta se resalta la importancia de la disolución del hierro en el recubrimiento, formando compuestos Al-Zn-Fe. De manera que en la Tabla 1.10 se recauda información de las posibles microestructuras que se pueden suscitar entre la interfase recubrimiento – acero con una temperatura de baño de zinc estándar de 450°C.

Tabla 1.10. Fases desarrolladas en la interfaz recubrimiento-acero de acuerdo con % de Al

Temperatura °C	% en peso Al	Fase
450	< 0,10	Fase $\zeta$ en equilibrio con el líquido
	0,10 - 0,14	Fase $\delta$ en equilibrio con el líquido
	> 0,14	Compuesto $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ ( $\eta$ ) en equilibrio con el líquido

(Fuente: Rico Y., Carrasquero E., 2017, *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: Una revisión*. Recuperado de: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>).

De forma global las diferentes fases dependiendo al porcentaje en peso de Fe-Al-Zn se puede apreciar en el Diagrama de Fase Ternario que se observa en Figura 1.7.

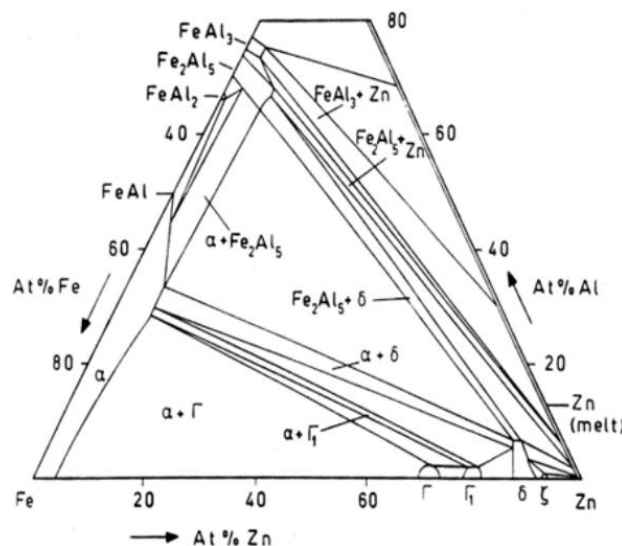


Figura 1.9. Diagrama ternario de fases Fe-Al-Zn  
(Fuente: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5055/505554802004/html/index.html>)

#### **1.4.4 Influencia de la temperatura y tiempo de inmersión en el baño de galvanizado**

Para aceros de bajo contenido de silicio el espesor de recubrimiento de zinc se encuentra debajo de los 120  $\mu\text{m}$  de acuerdo con la ley de tiempo parabólico, excepto cuando el galvanizado ocurre a 500 °C donde el crecimiento del recubrimiento es estrictamente lineal generando alrededor de tres veces el espesor que se obtendría con una temperatura de baño normal. El espesor de galvanizado es menor a 100  $\mu\text{m}$ , cuando se tiene una temperatura de galvanización hasta 460°C. Referente al tiempo de inmersión corto (1 minuto) los recubrimientos siempre están por debajo de los 80  $\mu\text{m}$  independiente de la temperatura.

Para aceros dentro del rango Sandelin los valores de espesor de recubrimiento más grandes se presentan con un rango de temperatura de 450 hasta 470° C. El rango de velocidad de crecimiento es de 45  $\mu\text{m}/\text{min}$  a 460° C. Esto no se evidencia para una temperatura de 435° C ni 500° C, ya que se produce un crecimiento de capa lineal en dichos valores, esto se atribuye a que no hay limitaciones que perturben la reacción hierro-zinc. A 550° C se registran recubrimientos con un espesor de 40  $\mu\text{m}$  que se desarrollan en el acero reactivo independientemente del tiempo de inmersión.

Para el rango Sebisty se aprecian espesores de recubrimiento gruesos a temperaturas de baño de 435 a 445° C. El espesor de recubrimiento disminuye al aumentar la temperatura de fusión. Se presenta un crecimiento lineal de recubrimiento de galvanizado a 500° C. Con un valor de 550° C la velocidad de crecimiento disminuye y el espesor promedio es de 70  $\mu\text{m}$  muestras que la tasa de crecimiento más alta se registra a los 460° C con un valor de velocidad de crecimiento de 40  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

Para aceros con alto contenido de silicio los efectos son similares al caso Sandelin, sin embargo, existen diferencias significativas en el desarrollo de la estructura. Esta información se obtuvo de la investigación realizada por (MaaB, 2011). En la Figura 1.8 se visualiza la influencia del porcentaje de silicio del sustrato y la temperatura del baño de galvanizado sobre el espesor del recubrimiento de zinc.

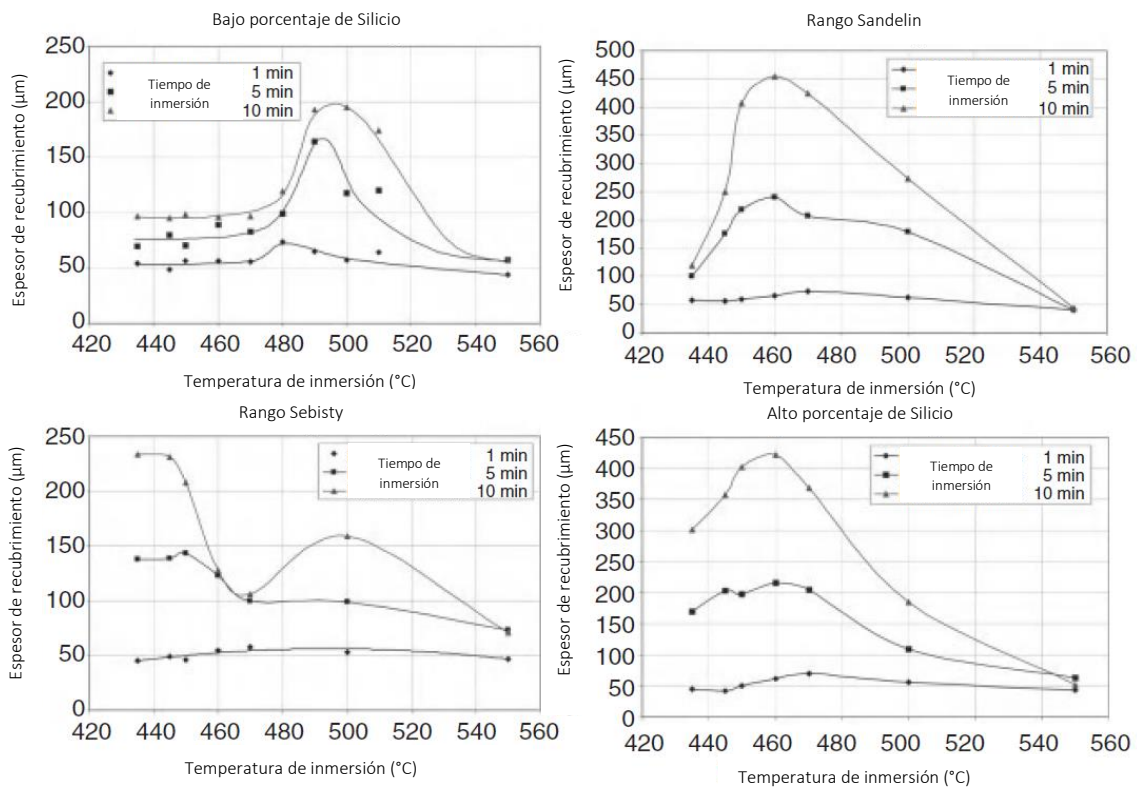


Figura 1.10. Efectos de la temperatura sobre el espesor de recubrimiento de galvanizado en aceros con distinto porcentaje de silicio (a-d) Espesor de recubrimiento en función del tiempo de inmersión a: aceros con bajo contenido de silicio, b: aceros en rango Sandelin, c: aceros en rango Sebisty, d: aceros con alto porcentaje de silicio.

Fuente: (MaaB, 2011)

### 1.4.5 Ventajas del galvanizado

- El costo del mantenimiento es ínfimo o en algunos casos nulo, debido a que garantizan sus propiedades.
- El proceso para la aplicación del recubrimiento galvánico es prácticamente rápido por lo que pueden ser usadas inmediatamente en el medio de trabajo.
- El recubrimiento de zinc posee gran resistencia a golpes y abrasión; de igual manera tapona las discontinuidades o rasguños del material.
- El recubrimiento galvánico posee muy buena compatibilidad con el hormigón, aluminio y acero inoxidable, ya sean por motivos estéticos o incrementar su durabilidad.
- El recubrimiento galvánico de 80 micras de espesor posee enorme durabilidad, se ha demostrado que dependiendo al medio de trabajo; ya sea rural, urbano, industrial o marino, su tiempo de vida se estima entre 10 a 40 años.

- La capa protectora de zinc puede aplicarse a una amplia gama de elementos metálicos, desde tuercas, pernos y tornillos hasta estructuras metálicas.
- Todos los elementos galvanizados pueden ser soldados sin ningún impedimento por medio de los mismos procesos de soldadura comunes para el acero, en otras palabras, no requiere de ningún proceso de soldadura especial.
- Los procesos de galvanizado se encuentran totalmente estandarizados y regulados por normas como ASMT A 123, ASTM B6, NTE INEN ISO 1461, entre otras, por lo cual es sumamente confiable y seguro.



## 2 METODOLOGÍA

El tipo de investigación empleada para el desarrollo del presente proyecto de titulación abarca el método experimental, puesto a que se caracteriza la interfaz entre el acero A-36 y el recubrimiento galvánico al someter al material base a dos procesos de mecanizado, fresado y rectificado, de forma adicional se realizó un ensayo de adherencia por temperatura, que permitió observar la influencia de la temperatura en la interfaz del recubrimiento galvánico.

### 2.1 Mecanizado y obtención de probetas (Fase 1)

En la Figura 2.1 se resumen las actividades realizadas durante la primera fase de la metodología para la obtención de las probetas que se emplearon en el desarrollo del presente proyecto de titulación.

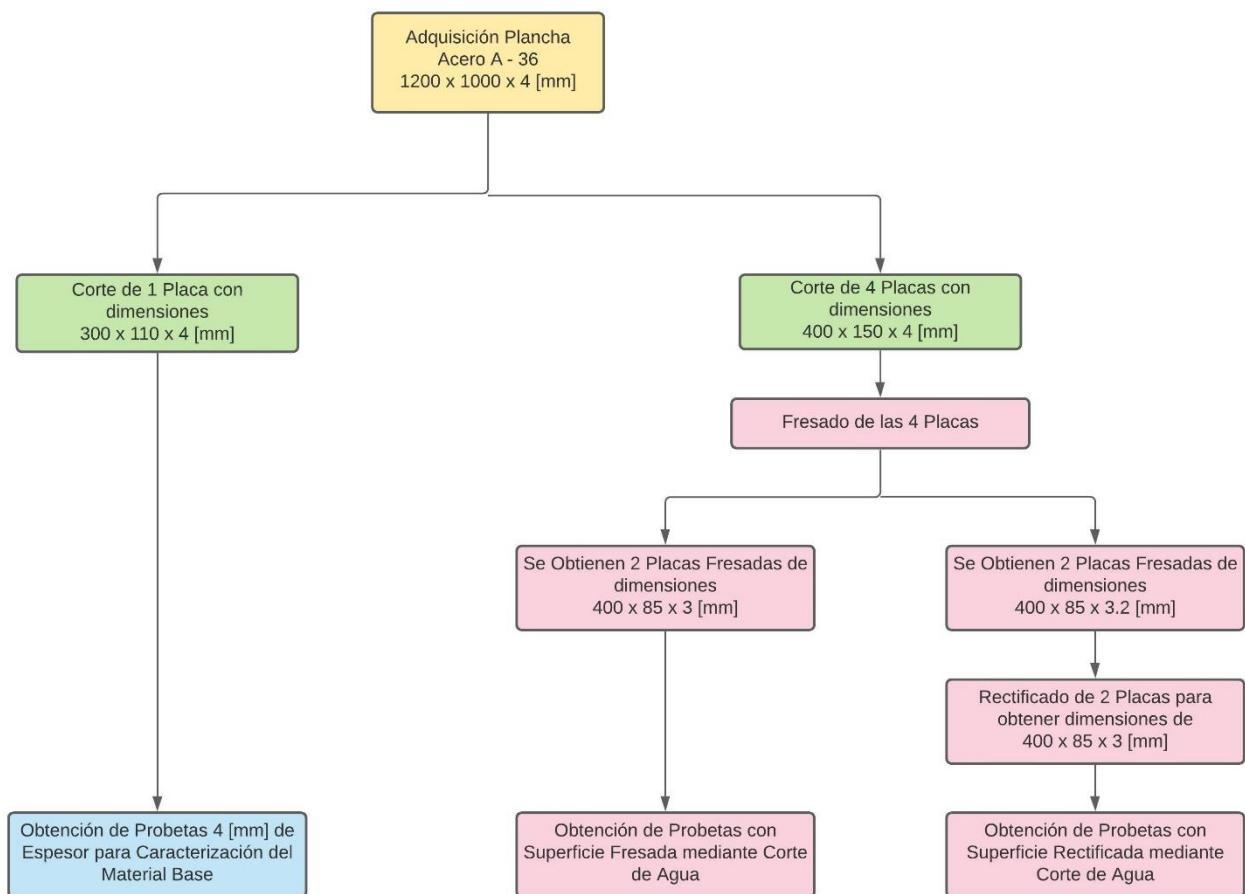


Figura 2.1. Diagrama de procesos para la obtención de probetas  
(Fuente: Propia)

### 2.1.1 Determinación del número de probetas

En la primera etapa se estipula el número de probetas dependiendo a los ensayos que se realizaron, es importante recalcar que se ensayaron tanto probetas con y sin recubrimiento galvánico de zinc, estas últimas con la finalidad de proporcionar información referente a las propiedades mecánicas y composición química del material base sin mecanizar. En la Tabla 2.1 se detalla el número de probetas estimadas para cada ensayo.

Tabla 2.1. Número de probetas según el ensayo

Ensayo	Dimensión [mm]	N° Probetas (Con Recubrimiento)	N° Probetas (Sin Recubrimiento)
Ensayo de Tracción	Según la Norma ASTM E 8	-	3
Composición Química	20x20	-	1
Metalografía		10	1
Ensayo de Micro dureza		10	-
Ensayo de Rugosidad		10	-
Ensayo de Desgaste		10	-
Ensayo de Corrosión con Niebla Salina		8	-
Ensayo de Adherencia Pull – Off	50x50	10	-
Adherencia por Temperatura	30x30	48	5
<b>TOTAL</b>			

(Fuente: Propia)

### 2.1.2 Obtención de material base

Una vez establecido el número de probetas requeridas para cada ensayo, se procedió con la adquisición del material base. Las dimensiones del material base se estimaron aproximadamente en 1000 x 1000 x 4 milímetros de espesor, el valor fue tentativo basándose en el área útil, determinada por el número de probetas a realizar y las dimensiones comerciales que manejan las empresas a nivel nacional que distribuyen el material. Para esta etapa se seleccionó a la empresa IPAC S.A.

En el ANEXO I se detalla la ficha técnica de los productos de acero al carbono laminados de la empresa IPAC S.A, donde constan las propiedades mecánicas y su composición química. Mediante una cotización proporcionada por la empresa, el material base empleado se describe como acero A-36 sin galvanizar con dimensiones de 1000 x 1200 x 4 milímetros de espesor, Figura 2.2.



Figura 2.2. Material base acero A-36  
(Fuente: Propia)

### 2.1.3 Dimensionamiento de probetas en placas

Durante esta etapa se planteó las dimensiones con las que contaron las placas de trabajo que se obtuvieron del material base, de manera que se logrará mecanizar sin inconvenientes con los equipos disponibles en el “Laboratorio de Máquinas y Herramientas” de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Se realizó la distribución de las probetas en estas placas de tal forma que se redujeran el número de procesos.

Para el caso del equipo de fresado el ancho de desbaste de la herramienta es de 85 milímetros, mientras que su recorrido, aproximadamente 400 milímetros, se realizó de tal manera que no se genere demasiada vibración en la placa. Establecidos estos

valores se concluyó que el área de las placas fuera de 400 x 150 x 4 milímetros de espesor, debido a que se requiere un área libre para la sujeción del material de trabajo a la mesa del equipo mediante bridas.

Para el equipo de amolado por disco se empleó las mismas dimensiones de las placas del equipo de fresado puesto que no generaron inconvenientes con el avance y desplazamiento de la mesa junto con el disco de trabajo.

Se empleó cuatro placas en las cuales se distribuyeron todas las probetas a las que se aplicó RECUBRIMIENTO GALVÁNICO DE ZINC como se presenta en la Figura 2.3.

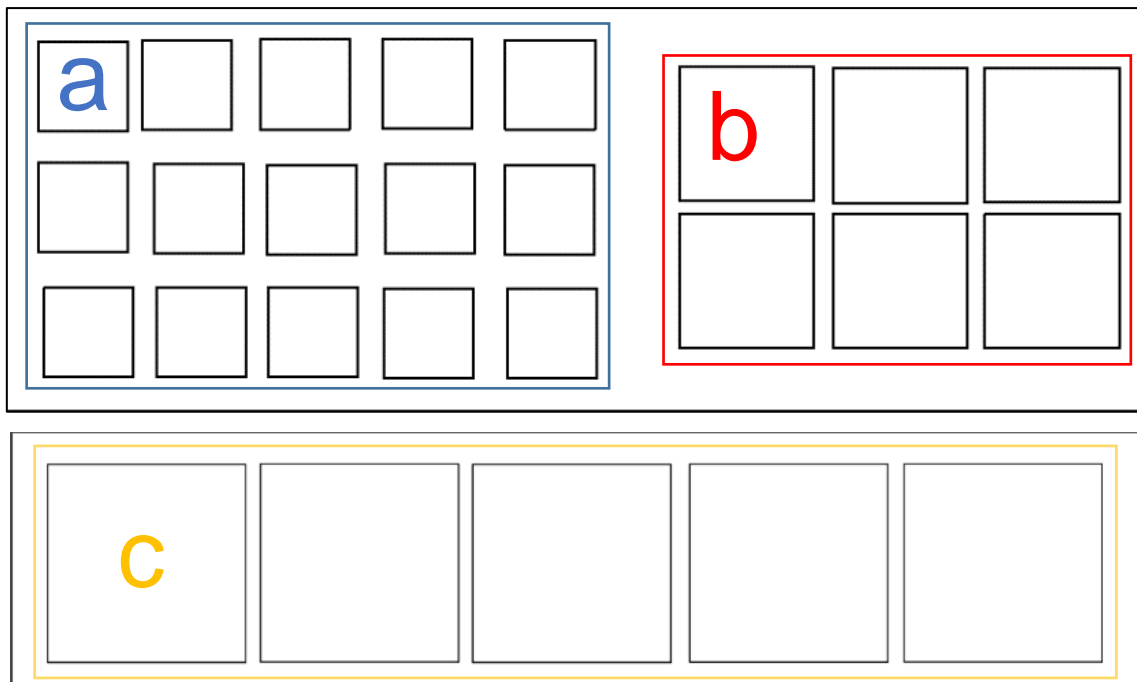


Figura 2.3. Distribución de las probetas en las placas mecanizadas.

a) Muestras empleadas para realizar el ensayo de composición química, metalografía, microdureza, rugosidad, desgaste, corrosión de niebla salina. b) Muestras empleadas para el ensayo de adherencia por temperatura y, c) Muestras empleadas para el ensayo de adherencia con pull off.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.4 se muestra la disposición de las probetas sobre la plancha metálica a mecanizar, al igual que las probetas para el ensayo de caracterización. En la Figura 2.5 se detallan las dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción.

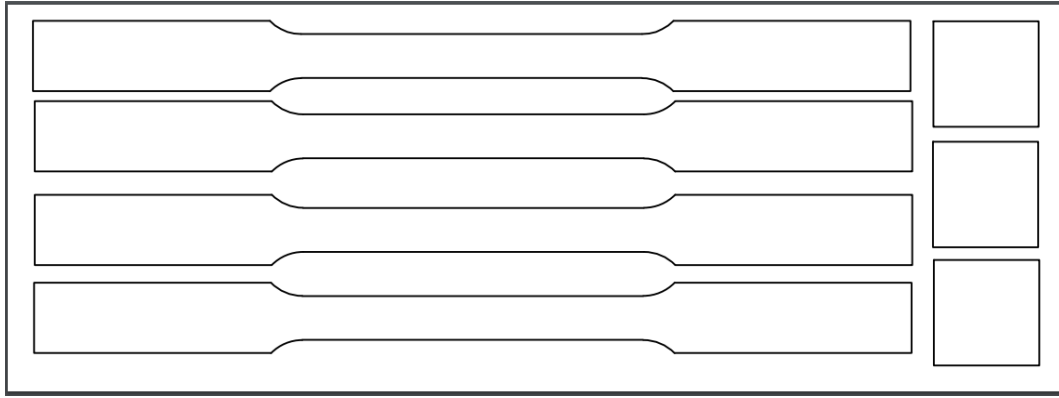


Figura 2.4. Distribución probetas para caracterización de material  
 Las probetas alargadas se emplean para el ensayo de tracción, y las probetas pequeñas para caracterizar la composición química del material base.  
 (Fuente: Propia)

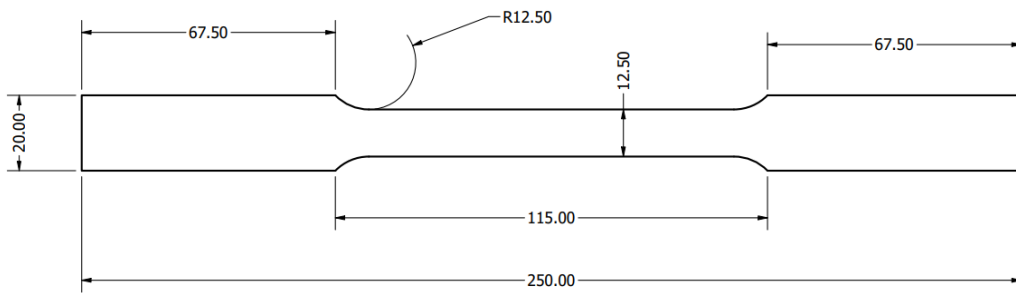


Figura 2.5. Dimensiones de probetas para el ensayo de tracción  
 (Fuente: ASTM E 8)

El corte de las placas de trabajo del material suministrado por IPAC S.A se realizó en el “Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla” mediante una sierra eléctrica de disco con las dimensiones establecidas como se observa la Figura 2.6.



Figura 2.6. Corte de placas de material base  
 (Fuente: Propia)

## 2.1.4 Mecanizado de placas

Durante esta etapa se realizó el mecanizado de las placas para la obtención de las probetas necesarias en los ensayos del “Laboratorio de Máquinas y Herramientas” empleando la fresadora y la rectificadora de disco.

Para el maquinado de la superficie de las placas se estipuló que el desbastado sea de 0,5 milímetros por cada lado, brindando una velocidad de avance de mesa y revoluciones del equipo considerables, con la finalidad de generar una superficie áspera que beneficie a la adherencia del recubrimiento galvánico generando puntos de anclaje en toda la superficie del material.

### Fresado

Para el desbastado en la fresadora se adquirió cuatro cuchillas de corte especificadas como CUCHILLAS DE WIDIA A-16, distribuidas por la empresa ‘Castillo Hermanos S.A.’ (Figura 2.7) que fueron adaptadas en el portaherramientas del equipo (Figura 2.8).

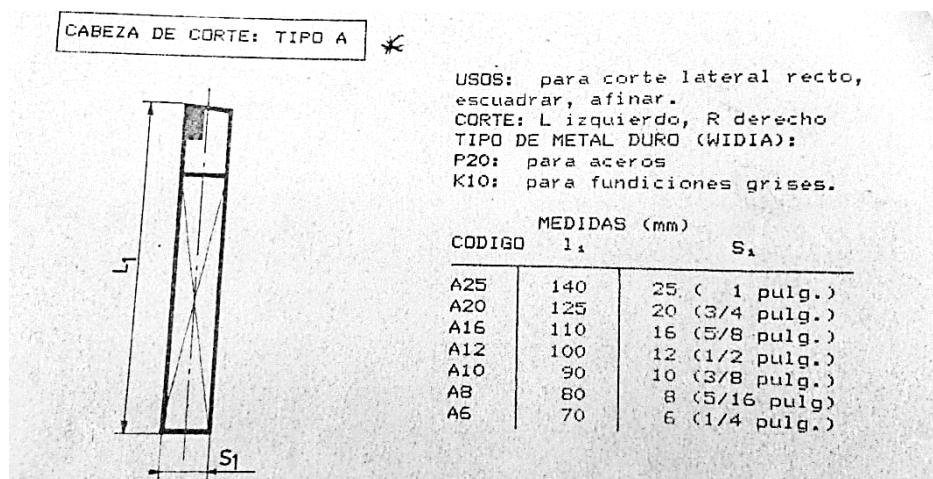


Figura 2.7. Especificación de cuchillas para el mecanizado  
(Fuente: Castillo Hermanos S. A.)



Figura 2.8. Montaje de cuchillas en la herramienta de fresado  
(Fuente: Propia)

En el equipo se desmontó la entenalla de la mesa de trabajo y se colocaron las placas a mecanizar, empleando bridas de tornillo con el fin de reducir las vibraciones de las mismas debido al corte que se llevó a cabo, tal como se observa en la Figura 2.9.

Una vez fijada, se intercambió la herramienta del cabezal del equipo por una herramienta tipo punta, la cual permitió centrar la placa en base a la posición del cabezal asegurando que las cuchillas recorran toda la placa por el centro de manera simétrica, se usó una velocidad de 35 rpm en la fresadora para el alineamiento y rayado de la línea central.

Con el cabezal de la herramienta de corte centrada se alineó las cuchillas del portaherramientas respecto a la superficie de la placa, esto se lo llevó a cabo para que toda la herramienta trabaje en conjunto y evite que los filos de las cuchillas se vean afectados de manera inmediata.



Figura 2.9. Montaje de placas en la fresadora  
(Fuente: Propia)

Para los parámetros del mecanizado en la fresadora se tomó de referencia la investigación realizada por (Chacón, Díaz, & Andueza, 2018) donde se configuraron los parámetros del mecanizado en la fresadora para mejorar la rugosidad superficial del material; los autores señalan que la mayor rugosidad superficial se obtiene con un avance de mesa de 90 mm/min sin uso de refrigerante y 280 rpm para la velocidad del equipo, además de establecer una profundidad de corte entre los valores de 1 a 2 milímetros. Para el fresado realizado en el presente estudio se usó los mismos parámetros a excepción de la velocidad del equipo con un valor de 250 rpm. El proceso de mecanizado descrito para este equipo se realizó para dos placas de 400 x 150 x 4 milímetros de espesor. El acabado final de este proceso se visualiza en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Fresado de placas y muestra final  
(Fuente: Propia)

### Rectificado de disco

Debido a las características técnicas y de funcionamiento del equipo de rectificado por disco, no es posible desprender un espesor considerable de las placas, para lo cual se realizó una etapa de mecanizado previo en el equipo de fresado siguiendo el procedimiento descrito con anterioridad.

El espesor de la placa fue reducido en un milímetro en total de manera que la etapa de desbastado en fresadora fue establecida en 4 décimas por cada lado, de manera que las placas pasarán al equipo de rectificado con un espesor de 3,2 milímetros. El equipo de rectificado cuenta con una mesa que genera un campo magnético que permitió la fijación completa de las placas para que el disco abrasivo recorra su superficie, Figura 2.11.



Figura 2.11. Mesa magnética y disco abrasivo  
(Fuente: Propia)

El funcionamiento de la rectificadora es manual y cuenta con un dial graduado en centésimas que permite controlar la profundidad de desbaste del disco abrasivo, con giro de 3500 rpm, y dos volantes que controlan el desplazamiento axial del disco y transversal de la mesa. El avance transversal de la mesa se estableció en base al ancho del área mecanizada y el disco abrasivo, el volante que controla este desplazamiento



se encuentra graduado en décimas, una vuelta completa representa 10 milímetros de ancho. El ancho a mecanizar de la placa fue de 85 milímetros, Figura 2.12.

Es recomendable que la configuración del avance transversal de la mesa sea de media vuelta del volante por cada vaivén del disco a lo largo de la placa, por lo que fueron necesarias aproximadamente 17 medias vueltas para cubrir el ancho total de la placa.



Figura 2.12. Graduación y avance por dial y volantes  
(Fuente: Propia)

El avance longitudinal del disco fue de 80 mm/s, generando cierta rugosidad superficial en la placa. Respecto a la profundidad de corte, el dial se configuró en 10 centésimas por cada lado, obteniendo una sección final con 3 milímetros de espesor. En la Figura 2.13 y 2.14 se visualiza el desbaste realizado para la obtención de las placas con superficie rectificada y el acabado superficial resultante, respectivamente.

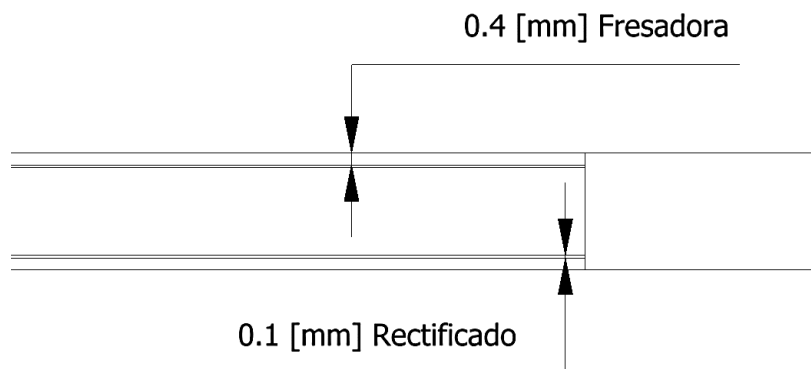


Figura 2.13. Proceso de desbaste para rectificación de las placas  
(Fuente: Propia)

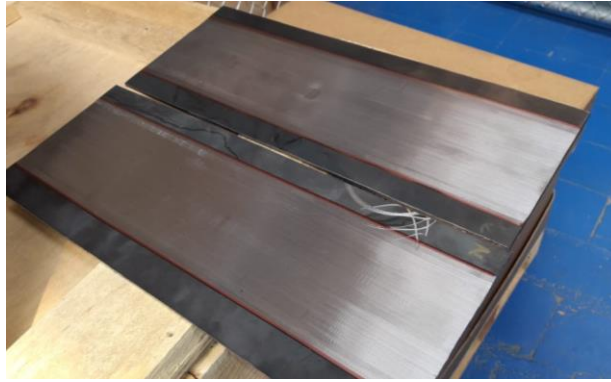


Figura 2.14. Muestra final de rectificado  
(Fuente: Propia)

### 2.1.5 Obtención de probetas

Una vez mecanizadas las placas de acero se procede a cortar las probetas previamente dimensionadas mediante chorro de agua. La empresa encargada de la actividad fue SAPTEC, esta compañía se encarga del corte de materiales mediante chorro de agua o láser empleado equipo CNC. El motivo por el cual se seleccionó el corte por chorro de agua sobre los distintos métodos existentes es para evitar transformaciones de fase y daños por corrosión en los bordes de las probetas. La forma y dimensiones de las probetas que se obtuvieron de las placas mecanizadas se pueden apreciar en la Figura 2.15.



Figura 2.15. Corte de probetas por chorro de agua  
(Fuente: Propia)

### 2.1.6 Galvanizado de probetas

Se aplicó a la superficie de las muestras un proceso de galvanizado en caliente como método de protección, realizado por la empresa GALVANORTE CIA. Ltda. Para agilizar este proceso y prevenir la fundición del material base debido al espesor de las probetas, se unieron todas las muestras por medio de un alambre de acero. El plan y control de calidad del proceso brindado por la empresa se detallan en el ANEXO II.

Debido a que se requiere una superficie de contacto uniforme en las probetas para los ensayos a realizar, se eliminaron las rebabas sobrantes por exceso de zinc en cada cara, procurando no extraer la capa superficial de ellas, Figura 2.13.



Figura 2.16. Probetas galvanizadas  
(Fuente: Propia)

## 2.2 Elaboración de ensayos (Fase 2)

Durante esta fase se realiza los ensayos para caracterización de material base y recubrimiento de zinc de las probetas obtenidas. En el ANEXO III se puede observar a detalle la codificación empleada para las muestras en cada uno de los ensayos realizados, en la Figura 2.17 se detalla el procedimiento empleado para la elaboración de los ensayos.

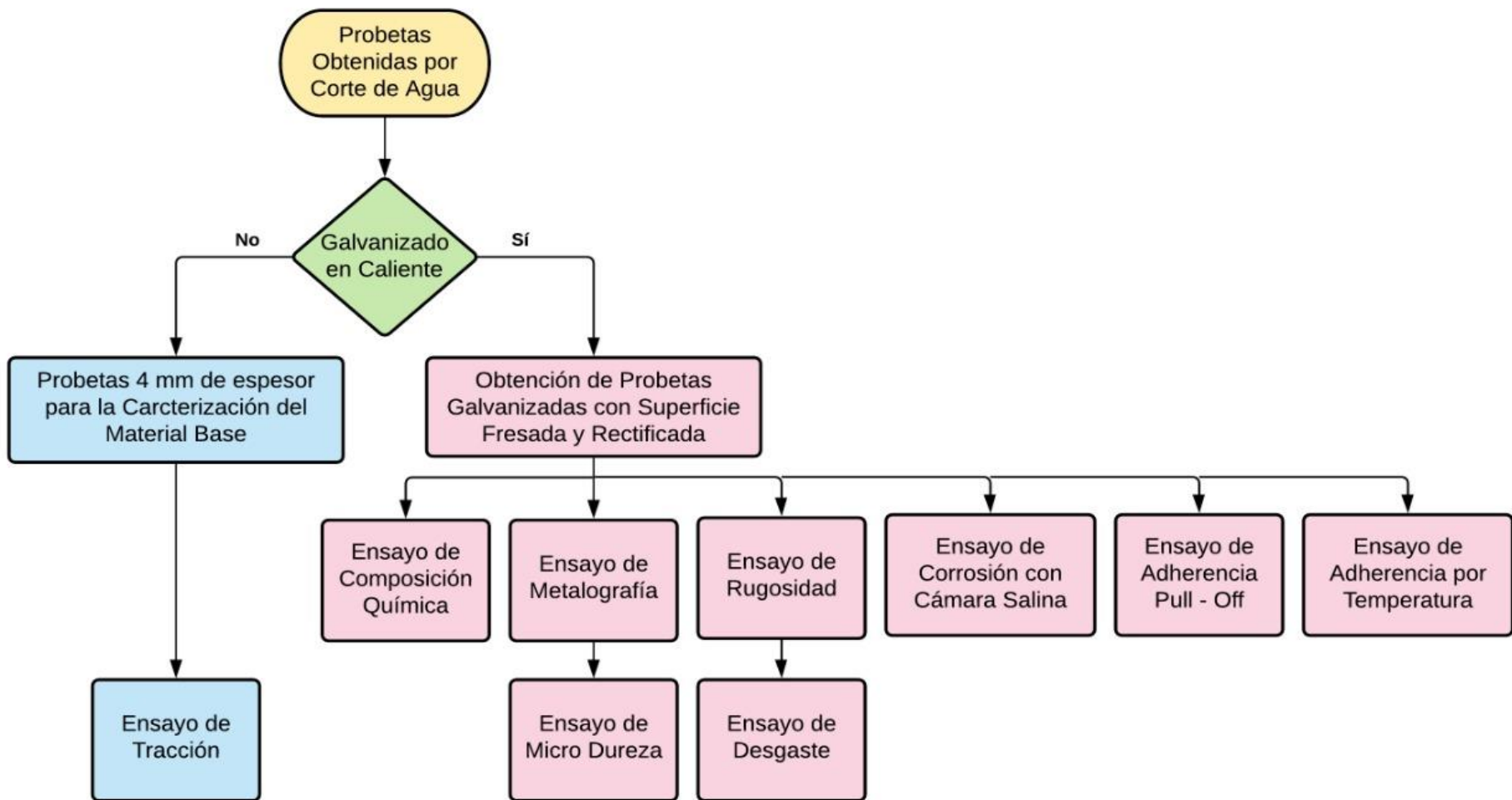











Figura 2.17. Diagrama de flujo para elaboración de ensayos  
(Fuente: Propia)

## 2.2.1 Equipos empleados

Tabla 2.2. Equipos empleados para la realización de la investigación presente

Ensayo	Equipo	Especificaciones	
		Código	EM/01 - 00
Tracción		<b>Certificado:</b>	LM- LF -2018 - 1961
		<b>Calibración:</b>	LAB - METRO
Metalografía		<b>Marca:</b>	MEIJI
		<b>Modelo:</b>	IM7200
Metalografía y Adherencia		<b>Serie:</b>	1808
		<b>Marca:</b>	FORCIMAT
Metalografía y Adherencia	Máquina Neumática de Desbaste Fino y Pulido	<b>Modelo:</b>	FORCIPOL 2V
		<b>Serie:</b>	N20161076

Composición Química		<b>Marca:</b>	BRUKER
		<b>Modelo:</b>	Q2s
	Espectrómetro de Chispa	<b>Art. - No.:</b>	Q103384
Micro - Dureza		<b>Marca:</b>	METKON
		<b>Modelo:</b>	DUROLINE M
	Durómetro de Microindentador Vickers	<b>Serie:</b>	KAMEKAM
Termogravimetría		<b>Marca:</b>	MUFLA 2
		<b>Certificado:</b>	EPN-UIO-MEI-041-17
	Horno Eléctrico Mufla	<b>Calibración:</b>	TEGMETRO S. A.
Corrosión		<b>Marca:</b>	N/A
		<b>Modelo:</b>	N/A
	Cámara de Niebla Salina	<b>Serie:</b>	N/A

<b>Adherencia</b>		<b>Marca:</b>	ELCOMETER
		<b>Modelo:</b>	510
	Pull - Off	<b>Software:</b>	ElcoMaster
<b>Rugosidad</b>		<b>Marca:</b>	MITUTOYO
		<b>Modelo:</b>	SJ -210
	Rugosímetro	<b>Palpador:</b>	Diamante, radio 2 $\mu\text{m}$ . Ángulo de punta: 60°

(Fuente: Propia)

## Caracterización del material base

### 2.2.2 Ensayo de tracción

Este tipo de ensayo es simple, económico y normalizado. En esta prueba se somete al material a una fuerza de tracción, es decir, se le aplica una fuerza o varias fuerzas externas que van a tratar de estirar el material. Con el estiramiento, al aplicar una mayor fuerza sobre el material se llega al punto de rotura, donde se fractura, Figura 2.18.

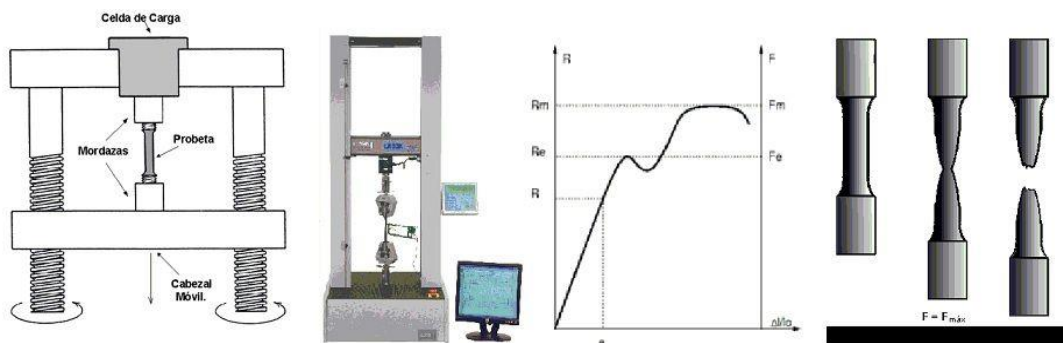


Figura 2.18. Ensayo de tracción

(Fuente: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>)

Este ensayo se realizó para evaluar las propiedades mecánicas del acero y su comportamiento en sus diferentes zonas, hasta alcanzar la falla trazando las curvas Esfuerzo – Deformación.

### **Procedimiento del ensayo de tracción**

El ensayo se realizó en el “Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones” de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional mediante el procedimiento descrito a continuación.

- Se verificó la calidad superficial y acabados de las cuatro probetas de tracción dimensionadas mediante la norma ASTM E 8.
- Se procedió a marcar en las probetas los puntos para la medición de la elongación generada, aproximadamente 50 milímetros.
- Se preparó la máquina universal de ensayos colocando las mordazas correspondientes para probetas planas en el cabezal superior e inferior. Se configuró la velocidad de carga de 3 mm/min para el ensayo.
- Se verificó que el equipo este en su estado inicial (Posición ‘Return’) y se colocó la probeta en las mordazas; se encendió la carga suministrada por el equipo y se inició el ensayo.
- Se observó la fluencia del material y encuellamiento que tomó lugar entre las marcas previamente fijadas dentro de la probeta; debido a las condiciones del equipo se documentó mediante video las lecturas de deformación y carga suministrados por la máquina para elaborar las curvas características de Esfuerzo – Deformación.
- Generada la fractura de la muestra se procedió a tomar la medida de la longitud final entre las marcas fijadas en la probeta y comparar los resultados con la norma. Este procedimiento es repetido para cada una de las probetas.

### **2.2.3 Análisis de composición química**

Es necesario conocer la composición química de un metal para identificar su capacidad para resistir la corrosión, así como sus características mecánicas y el comportamiento que puede desarrollar en diferentes medios, combinado con tratamientos térmicos. (SCI, 2020)



## **Espectrometría por chispa**

El equipo de espectrometría se encarga de generar una descarga eléctrica entre la punta de un electrodo y la superficie de estudio de la probeta que se encuentran envueltas en una atmósfera de argón. Esta descarga genera desprendimiento de material superficial del sustrato e induciendo a que los átomos o iones generen energía radiante. El equipo de espectrometría consta de tubos fotomultiplicadores cuya función implica transformar dicha energía radiante en señales eléctricas y representarlas como un valor cuantificable, de modo a que las señales estándar internas del material pasan a convertirse en fracciones de masa.

## **Procedimiento del análisis de composición química**

- Se preparó la superficie de la probeta basándose en la norma ASTM E 1251 y las recomendaciones del fabricante del equipo, asegurando que la superficie se encuentre libre de porosidad u óxidos que pueden afectar en la quemadura generada por la descarga eléctrica del arco.
- Se encendió el espectrómetro y se dio apertura a la válvula de argón con una presión recomendada por el fabricante de 3 bares, Figura 2.19.
- Mediante el software del equipo se realizó un proceso de purga de aproximadamente 40 minutos de duración.
- Se realizó una calibración del equipo mediante una base de aluminio con la muestra R – 10.
- Visualizando la señal de aprobación del software del proceso de purga el equipo está listo para ser usado.
- Se cubrió y selló la probeta seleccionada dentro de la abertura del espectrómetro.
- Se activa el equipo de manera que la marca generada por el arco sea adecuada, la marca de ser profunda en su centro y rodeada por un anillo de tonalidad oscura.
- El resultado del análisis corresponde al promedio realizado de tres mediciones, tomando en cuenta el diámetro de abertura del equipo que para este caso es de 12 milímetros.



Figura 2.19. Espectrómetro de chispa del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional  
(Fuente: Propia)

## **Caracterización del recubrimiento de zinc**

### **2.2.4 Ensayo de metalografía**

La metalografía es el método que analiza de forma microscópica las características estructurales de un metal o una aleación, buscando inclusiones, micro rechupes, microestructuras, tratamientos térmicos que se hayan realizado, entre otros, con el fin de determinar si el material mantiene los requisitos para el que ha sido elaborado; también podemos encontrar la presencia de material forjado, laminado y fundido. Se puede conocer la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de irregularidades y segregaciones.

La herramienta más utilizada por el metalurgista es el microscopio, tanto desde el punto de vista técnico como científico. Mediante este ensayo es posible determinar la distribución, tamaño de grano y forma de varias fases e inclusiones que tienen gran incidencia sobre las propiedades mecánicas del elemento. La microestructura proporcionará información relacionada sobre el tratamiento térmico y procesos de mecanizado a los que fue sometido el metal. (FECA, 2011)

Las probetas empleadas para el ensayo de metalografía son diez con dimensiones 2 x 2 centímetros (5 probetas con superficie rectificada y 5 probetas fresadas).

### **Procedimiento del ensayo de metalografía**

Se prepararon la superficie de las probetas galvanizadas para los ensayos de metalografía y micro-dureza, probetas de 2 x 2 centímetros.

Se empleó el equipo de pulido para eliminar ciertas rebabas residuales en la superficie debido al baño de galvanizado previo, esto se realizó puesto a que es necesaria una superficie plana para asentamiento y análisis de las probetas, Figura 2.20.



Figura 2.20. Preparación de probetas para micrografía  
(Fuente: Propia)

Luego del proceso de pulido, la superficie de las muestras fue limpiadas con alcohol etílico al 99,8% de concentración y posicionadas dentro de piezas de tubo de duralón como se muestra en la Figura 2.21.



Figura 2.21. Limpieza de probetas para posicionar en el molde de duralón  
(Fuente: Propia)

Una vez listos los moldes de las muestras se rellenaron con una mezcla de resina poliéster, dejándolos de secar por un lapso de 10 minutos. Transcurrido el lapso estipulado, se retiró el duralón obteniendo finalmente las muestras tal y como se observa en la Figura 2.22.



Figura 2.22. Colocación y secado de resina en moldes de duralón  
(Fuente: Propia)

Una vez preparadas las muestras con su respectiva matriz de resina se procedió a desbastar las probetas en el equipo de disco marca BUEHLER con una lija abrasiva de 100 g/pulg<sup>2</sup>.

Terminado el proceso de desbastado se colocaron las probetas en el equipo de pulido de marca FORCIMAT de manera que se pueda obtener una superficie clara, plana y definida entre el recubrimiento y el material base de las probetas.

En última instancia se visualizó mediante el microscopio de marca OLYMPUS las muestras obtenidas; identificando y caracterizando la microestructura de la interfaz material – recubrimiento.

### 2.2.5 Ensayo de micro dureza – recubrimiento de zinc

Nos referimos a la dureza como la resistencia de los materiales a ser penetrados por otros de mayor dureza, es decir, lo que se define como dureza de cohesión o estática. La dureza se mide empleando una unidad absoluta, las escalas más utilizadas son: Vickers y Knoop; la diferencia entre cada una es el tipo de penetrador usado. El ensayo consiste en forzar la superficie de un elemento mediante un indentador de tamaño reducido con cargas bajas. La marca establecida en la superficie es medida mediante un microscopio óptico y se la transforma en un valor de dureza, para este ensayo es importante la preparación superficial previa de las muestras para garantizar la precisión en la medición.

#### Micro-dureza Vickers

Se utilizó un indentador Vickers en la superficie de la muestra con un valor fijo de precarga y tiempo de penetración. Una vez transcurrido el tiempo, se retira la carga y se toma la medida de las diagonales generadas por el indentador con la ayuda de un

microscopio óptico. Con los valores de las diagonales (d) y el valor de la fuerza cargada (P) es posible obtener el número de dureza Vickers, mediante la siguiente expresión:

$$H = 1854.4 * \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 1. Dureza Vickers

Se usó diez probetas para el ensayo de micro-dureza, las mismas que fueron sometidas a metalografía y constan de dimensiones 2 x 2 centímetros (5 probetas con superficie rectificada y 5 con superficie fresada). La norma a la que se rige el ensayo corresponde a la ASTM E 384.

### **Procedimiento para el ensayo de micro dureza**

- Se colocará cada muestra sobre el equipo de laboratorio el cual corresponde a un durómetro Micro – Vickers Metkon, se enciende el sistema de iluminación y su respectiva fuente, Figura 2.23.
- Se selecciona el respectivo indentador y se procede a colocar el microscopio sobre la muestra que será ensayada, de manera que pueda ser visualizada.
- Se asegura que, en el área seleccionada para la toma de medida, el indentador guarde una distancia equivalente a 2,5 veces la longitud de la diagonal de la indentación entre dos mediciones.
- Se ajustó los parámetros del ensayo en el apartado *Display* del equipo, los cuales se detallan como fuerza y tiempo de permanencia de 100 gf y 10 segundos respectivamente.
- Se procuró que la mitad de una de las diagonales sea menor al 5% de la mitad del largo de la otra, de lo contrario la medida será considerada inconsistente
- Mediante el botón de *Ejecución* se dio inicio al ensayo, haciendo uso del Software Kamekam se midió las dos diagonales de la indentación y se promedió estas dos medias.
- El procedimiento se lleva a cabo cinco veces de manera que con estos valores se realice un promedio para conseguir la magnitud de la dureza del recubrimiento de zinc.

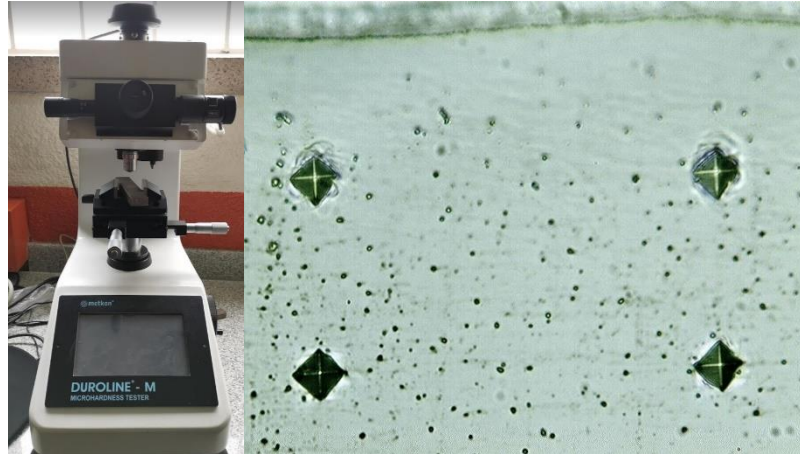


Figura 2.23. a) Equipo para micro-indentación, b) Micro-indentaciones realizadas sobre el recubrimiento de zinc  
(Fuente: Propia)

### 2.2.6 Ensayo de rugosidad

Para esta prueba, se emplea un dispositivo portátil para medir la rugosidad de la superficie, denominado rugosímetro que funciona dibujando un palpador en toda la superficie de la muestra a una velocidad constante. El instrumento registra las distancias hacia arriba y abajo del palpador de rugosidad a medida que atraviesa la superficie. El parámetro  $R_t$  se mide en base a la norma ISO 428710 y hace referencia a la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más bajo en cualquier longitud de evaluación de 12,7 milímetros. Se realizan cinco trazos y se promedia los valores de  $R_t$  para obtener la media de los picos más grandes. (Neurtek, 2019).

Para el ensayo de rugosidad se evaluó el acabado superficial de diez probetas (5 probetas rectificadas y 5 fresadas) cuyas dimensiones son de 2 x 2 centímetros tal como se visualiza en la Figura 2.24.

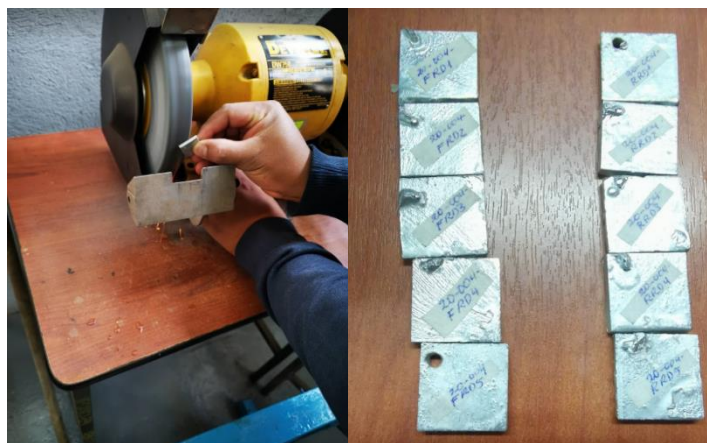


Figura 2.24. Preparación de probetas para el ensayo de rugosidad  
(Fuente: Propia)

## **Procedimiento para el ensayo de rugosidad**

- Se preparó la superficie de todas las muestras limpiándolas con alcohol al 99,8% en concentración.
- Debido a que se necesita una superficie plana para la colocación del equipo de medición en las muestras se pulió cada una de las esquinas de las probetas, estos lugares no se deberán tomar como referencia para la mediación del rugosímetro.
- Una vez preparadas las superficies de todas las muestras a ensayar, se instaló el palpador en el rugosímetro y se colocó la lámina de corcho para nivelar cada probeta. La norma empleada para el ensayo de rugosidad corresponde a la ISO 4288.

### **2.2.7 Ensayo de desgaste**

Este ensayo se basa en la norma ASTM G 65 “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus”. Se ensayaron diez probetas (5 probetas con superficie fresada y 5 rectificada), las dimensiones de las probetas son de 2 x 2 centímetros.

Debido a que la finalidad de la norma es el ensayo de materiales en bruto, se realizó una tropicalización de la misma, puesto a que el objetivo de la presente investigación se centra en la caracterización de los efectos en el recubrimiento galvánico de las probetas, de manera que se adecuó el equipo neumático para desbaste fino y pulido de marca FORCIMAT con el que cuenta el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla.

En el equipo se configuraron ciertos parámetros para simular las condiciones del ensayo de acuerdo con la norma. En el disco de pulido se posicionó una lija 250 para el desgaste de las muestras, la velocidad del cabezal del equipo como la de la pista se modificó en 150 rpm, mientras que la presión ejercida hacia las probetas se estipuló en 30 Newtons.

### **Procedimiento para el ensayo de desgaste**

- La preparación de las probetas se realizó de la misma manera que se describe en el apartado de ‘Ensayo de Metalografía’, de manera que se puedan posicionar en el cabezal del equipo cada una de las matrices de resina que contiene a las muestras.

- Para el ensayo se tomó la medida en peso de cada muestra antes de formar las matrices de resina y otra medida al estar posicionadas dentro de las mismas.
- El número de probetas que se ensayaron simultáneamente en el equipo fueron cinco, Figura 2.25. Se configuró la velocidad del equipo de desbaste y pulido junto con la carga suministrada a las muestras.
- El tiempo estimado de ensayo para las probetas dentro del equipo fue de 5 segundos, este parámetro se obtuvo mediante la experimentación de material base residual galvanizado, debido a que las muestras una vez que completaban el periodo de 5 segundos de ensayo, el desgaste llegaba a ser visible hasta el material base.
- Una vez terminado el ensayo se retiraron las muestras del equipo y se limpió la superficie expuesta con alcohol etílico de 99,8% en concentración de manera que se eliminó cualquier residuo.
- Se tomó la medida final del peso de las muestras.



Figura 2.25. Disposición de probetas para el ensayo de desgaste  
(Fuente: Propia)

### 2.2.8 Ensayo de corrosión mediante cámara de niebla salina

Se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM B 117. El propósito de esta prueba es replicar la resistencia de ciertos materiales frente a la corrosión existente en el sector industrial en las instancias del laboratorio. Durante muchos años, los investigadores han utilizado las pruebas de niebla salina para evaluar nuevos recubrimientos de metal y recubrimientos de pintura, desarrollando varios tratamientos químicos y prepintados para aceros recubiertos, contribuyendo así al desarrollo de nuevos productos.



Para que la prueba de corrosión por niebla salina sea útil, el requisito principal es que los resultados estén relacionados con el comportamiento o el rendimiento en las condiciones de uso. (Galvinfo, 2017)

### **Parámetros del ensayo**

Se ensayó 10 probetas, las dimensiones fueron de 2 x 2 centímetros y 4 milímetros de espesor (5 probetas con superficie fresada y 5 rectificadas).

Debido a la forma y dimensiones de las probetas a ensayar dentro de la cámara de corrosión salina se diseñó y elaboró un soporte a base de material acrílico, el mismo que cumplió con los requerimientos de exposición para el contacto con el agente aspersor según las normas ASTM B 117 y ASTM G 85-11, este soporte se detalla en la Figura 2.26.



Figura 2.26. Soporte de acrílico colocado dentro de la cámara de corrosión  
(Fuente: Propia)

La colocación de las probetas en el soporte aseguró que el rociado de la mezcla de cloruro de sodio tenga contacto con las caras de las muestras de forma directa y procurando una separación entre cada una de ellas.

De igual forma se consideraron los parámetros ambientales en el medio donde se llevó a cabo el ensayo; uno de ellos es la temperatura puesto que puede afectar la velocidad en el agrietamiento por corrosión en las muestras.

El rango de temperatura que se manejó durante el ensayo fue de  $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  mediante dos focos de 75 Watt, estos se encontraban encendidos durante 9 horas diarias. El registro de temperatura se realizó mediante cuatro termómetros de alcohol situados dentro de la cámara.

## **Distribución de solución salina**

La forma de aplicación del cloruro de sodio en las muestras es mediante rociado, este método posee una gran ventaja debido a que puede obtener gran cantidad de oxígeno y esto favorece al proceso de corrosión puesto a que las grietas toman lugar en menor tiempo.

Es importante recalcar que se deberá comprobar el nivel de pH que posee la solución salina empleada debido a que la velocidad de corrosión en las muestras, específicamente para aceros de bajo contenido de carbono, para un pH mayor a 8,5 el material base se ve afectado gravemente por el producto corrosivo en caso de cavidades o picaduras localizadas en la superficie. En el caso de pH menores el material no se verá modificado significativamente (Veloz, Esparza, Reyes, & Uruchurtu, 2012)

Dicho esto, el tiempo de rociado del equipo fue de 5 minutos por cada hora de funcionamiento. Durante este tiempo el aspersor roció 200 mililitros de la solución salina. Mediante tiras para cuantificar el pH se estima que el valor del pH de la solución salina fue de 6, referencia al relleno del reservorio de la solución salina, el cual se realizó cada 3 días.

## **Procedimiento del ensayo de corrosión**

Configurados todos los parámetros mencionados tales como la temperatura de la cámara, posicionamiento de las probetas y concentración de la solución; se inició con el ensayo como se detalla a continuación:

- Se colocaron las probetas en la cámara de niebla durante una semana.
- Se procedió a realizar la medición de peso de cada una de las muestras.
- Se empleó agua destilada para el lavado de cada probeta.
- Se elaboró macrografías de cada una de las muestras.
- Se regresó las probetas a la cámara de niebla.

Se estableció 30 días para el ensayo de forma que se pueda analizar la evolución del proceso de corrosión en el material. De esta forma se evita la acumulación de residuos o agentes que puedan llegar a afectar los resultados del ensayo. Durante el análisis de las muestras se realizó una limpieza de la cámara de niebla y el reservorio de la solución una vez a la semana, Figura 2.27.

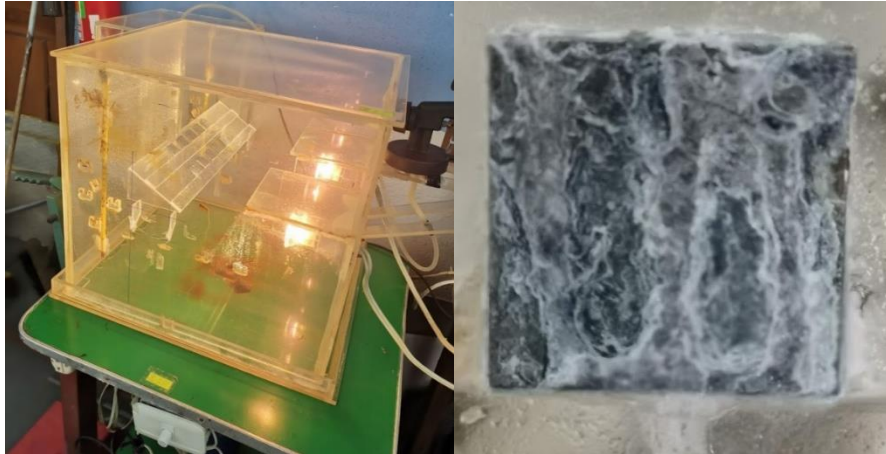


Figura 2.27. a) Cámara de niebla salina para ensayo de corrosión y b) Muestra expuesta a la cámara de niebla salina después de siete días  
(Fuente: Propia)

### 2.2.9 Ensayo de adherencia pull-off

La adherencia es el comportamiento de una partícula a mantenerse unida a una superficie. En la industria el ensayo de adherencia es necesario para asegurar que la pintura o el recubrimiento se adhiera adecuadamente al material base sobre el que se aplica, este ensayo refleja la fuerza de unión entre las diferentes capas del recubrimiento con el sustrato, permite detectar posibles defectos del revestimiento, sirve como control de calidad y establece si es necesario eliminar un sistema de revestimiento existente antes de aplicar pintura nueva. La adhesión del revestimiento a la superficie depende en gran medida de la calidad de su material base.

#### Indicadores de fractura en el ensayo pull-off

Una vez realizado los ensayos es importante conocer los tipos de fractura que se pueden generar en el recubrimiento de las muestras.

Como se visualiza en la Figura 2.28 se reconocen distintos tipos de fractura y falla; cuando se produce una separación del adherente entre el recubrimiento de la muestra y la muñeca se habla de una falla del adhesivo. Cuando se produce una fractura en las caras del recubrimiento de la muestra se habla de una fractura cohesiva y, por último, cuando se produce la anomalía entre las capas del recubrimiento y el adherente se habla de una fractura adhesiva.

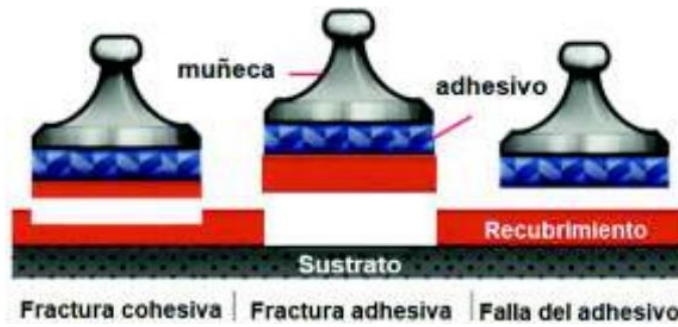


Figura 2.28. Tipos de fractura que se presentan en el recubrimiento de las muestras galvanizadas  
Fuente: (Defelsko, s.f.)

Una vez especificadas las fallas y fracturas que pueden presentarse durante el ensayo se procede a codificarlas para simplificar su representación en el reporte tal y como se muestra en la Figura 2.29.

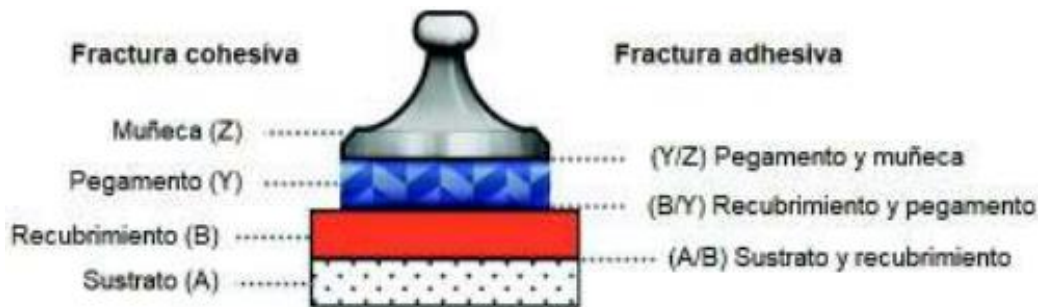


Figura 2.29. Codificación de los tipos de fracturas presentes en los metales con recubrimiento galvanizado  
Fuente: (Defelsko, s.f.)

Cada tipo de anomalía debe ser descrita como un porcentaje, ya sea que se presenta únicamente como falla o una combinación de ambas fracturas.

### Procedimiento ensayo pull-off

El procedimiento que se empleó para llevar a cabo el ensayo se describe en las normas ASTM D 4541 e ISO 4624, con la finalidad de conocer la tensión requerida para desprender el recubrimiento del material base en dirección perpendicular.

- Se preparó la superficie de la probeta y las muñecas raspando ligeramente con una lija 100, de manera que se generen puntos de anclaje que beneficien la aplicación del adherente y se reduzca la posibilidad de fallo.
- Se limpió la superficie de contacto de la probeta y la muñeca con desengrasante (thinner) con la finalidad de eliminar impurezas.
- Se colocó el adherente entre las superficies de contacto, procurando formar una película continua. Las características del mismo se detallan en el ANEXO IX.

- Se unió las probetas y las muñecas ejerciendo levemente presión de contacto. Se deberá remover el exceso de adherente colocado ya que pueden generar burbujas que afecten su resultado.
- Se calentó el conjunto durante 90 minutos a una temperatura de 150 °C, posteriormente se los dejó enfriar dentro del horno durante 48 horas. Algunas variaciones leves se llevaron a cabo en el proceso de preparación de muestras y dados de arranque de acuerdo con la norma estipulada y las recomendaciones del fabricante del adhesivo, con la finalidad de obtener los valores más altos de resistencia a la carga suministrada, esto se detalla en el ANEXO IX.
- Se colocó el conjunto bajo el equipo automático Elcometer de acople, configurando el sistema con un diámetro de muñeca y una velocidad de arranque de 10 milímetros y 0.8 MPa/s, respectivamente.
- Se realizó el ensayo y se tomó el valor de esfuerzo de rotura en MPa.
- De manera visual se identificó el tipo de fractura generada.
- Se realizó una macrografía de la zona de fractura tanto en la probeta como en el dado empleado.
- Se repitió el procedimiento para cada probeta fresada y rectificada con el fin de generar 20 valores de resistencia a la adhesión para cada lote, calculando el valor promedio.

### **2.2.10 Ensayo de adherencia por temperatura**

Este ensayo se realizó bajo la norma INEN NT-950:2013, el objetivo de este ensayo es caracterizar y determinar el grado de adherencia del recubrimiento galvánico sobre el material base. Se utilizó el apartado 4.3 de la norma, denominado “Método por enfriamiento brusco”, para la realización del estudio. Con la finalidad de analizar la afección que produce la temperatura en el recubrimiento galvánico se realizó una tropicalización de la norma, agregando dos medidas de temperatura para el ensayo de 300 y 400 °C.

Para este ensayo el número de probetas empleadas son diez con dimensiones de 3 x 3 centímetros y 4 milímetros de espesor (5 probetas con superficie rectificada y 5 fresadas). Utilizando los hornos eléctricos que se encuentran en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla se llevó a cabo el procedimiento descrito a continuación.

## Procedimiento del ensayo de adherencia por temperatura

- Se preparó la superficie de las muestras limpiándolas con alcohol etílico de 99,8% en concentración.
- Se realizó una toma de medida correspondiente al peso de cada una de las muestras antes de ingresarlas en el horno eléctrico.
- Se posicionó a las muestras en dos soportes metálicos para evitar el contacto directo con las paredes del horno eléctrico, Figura 2.30.
- Mediante el panel de control se configuró la velocidad de calentamiento a razón de 10 °C/min hasta alcanzar la temperatura deseada de 200 °C.
- Se mantuvo a todas las muestras en el interior del horno durante 60 minutos con la primera temperatura de permanencia de 200 °C.
- Se repitió el procedimiento para cuatro probetas, dos de cada proceso de mecanizado, con una temperatura de 300 °C durante 6 horas.
- Se calentó a cuatro probetas adicionales, dos de cada proceso de mecanizado, a una temperatura de 400 °C durante 6 horas.
- Todas las muestras al salir del horno fueron sometidas inmediatamente a un enfriamiento brusco en agua.
- Posterior al enfriamiento, todas las muestras fueron preparadas en resina para una caracterización metalográfica y de micro-dureza.



Figura 2.30. Disposición de probetas para el ensayo de adherencia por temperatura  
(Fuente: Propia)

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados de los ensayos

##### 3.1.1 Resultados del ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A-36

Una vez realizado el ensayo de tracción de las muestras y comparados estos valores con los descritos en la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R), se determina que cumple para un acero ASTM A36, Tabla 3.1. En la Tabla 3.2 se visualizan los resultados obtenidos del ensayo y mediante el software Matlab se muestra el diagrama Esfuerzo – Deformación de una probeta ensayada M20.050.01, Figura 3.1.

Tabla 3.1. Especificaciones de propiedades mecánicas del material base según Norma NTE INEN 2215:2012

Propiedad Mecánica	Valor
Esfuerzo de Fluencia (Sy)	≥ 250 MPa
Resistencia a la Tracción (St)	400-550 MPa
Porcentaje de Elongación en 50 mm (ε)	>21%

(Fuente: INEN, 2012)

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base realizado en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones

Probeta	Ancho Promedio (3 Medidas)		Carga Máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Porcentaje elongación en 50 [mm]
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
-	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	-
M20.050.01	12.80	3.96	4645	20661	59.1	408.3	50.3
M20.050.02	12.85	3.97	4639	20636	58.7	405.2	46.8
M20.050.03	12.85	3.93	4583	20388	58.6	404.4	47.7
M20.050.04	12.72	3.83	4587	20403	60.7	419.5	45.8

(Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones, EPN)

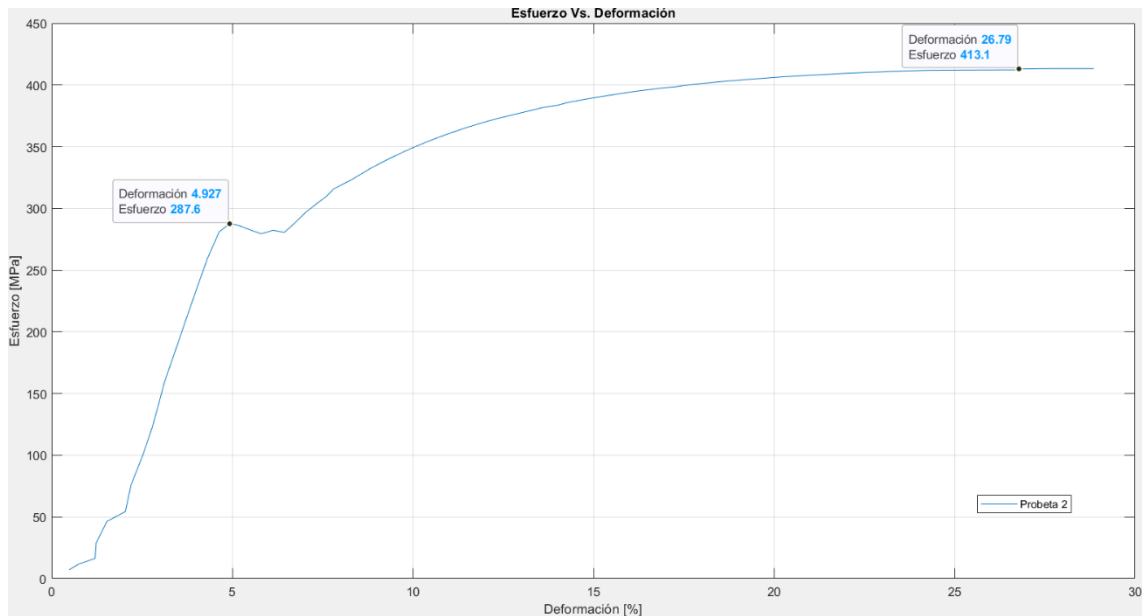


Figura 3.1. Curva esfuerzo deformación para la probeta M20.050.01  
(Fuente: Propia)

En el ANEXO IV se puede visualizar las curvas Esfuerzo-Deformación para el resto de las probetas ensayadas mediante la máquina universal de ensayos.

### 3.1.2 Resultados del ensayo de composición química del sustrato del acero ASTM A-36

De igual manera para el caso del límite permisible de los elementos presentes en la composición química del material base de estudio, se toma como referencia lo estipulado en la norma NTE INEN 2215:2020 (1-R). Referencia Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Especificaciones de composición química del material base según norma NTE INEN 2215:2012

Elementos Composición Química	Porcentaje [%]
Carbono (C)	<0.26
Manganeso (Mn)	/
Azufre (S)	<0.05
Fósforo (P)	<0.04
Silicio (Si)	≤0.4

(Fuente: INEN, 2012)



En la Tabla 3.4 se pueden observar los valores de los elementos que componen el material base, en el ANEXO V se puede visualizar el informe detallado del ensayo realizado el equipo de espectrometría por chispa.

Tabla 3.4. Resultados del ensayo de composición química material base realizado en el laboratorio de fundición de la EPN

<b>Elementos Composición Química</b>	<b>Porcentaje [%]</b>
Carbono (C)	0.116
Manganeso (Mn)	0.405
Fósforo (P)	0.018
Cromo	0.017
Níquel (N)	0.015
Aluminio (Al)	0.035
Hierro (Fe)	99.38
Silicio (Si)	<0.0050
Azufre (S)	<0.0030
Total	99.99

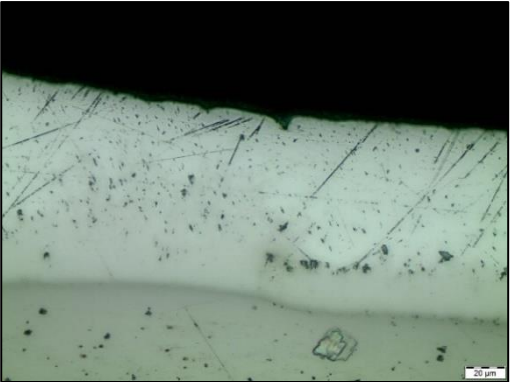
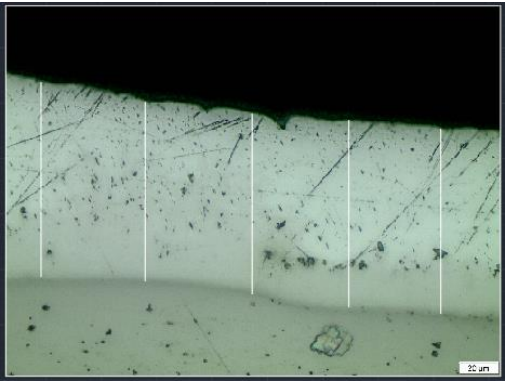
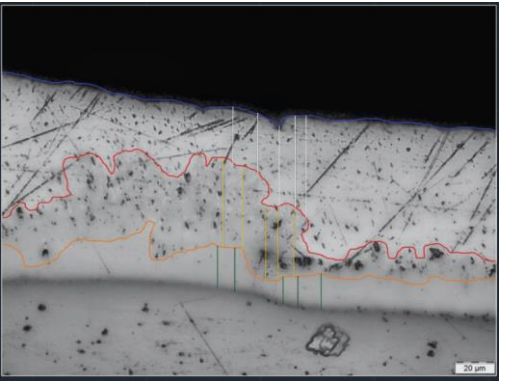
(Fuente: Laboratorio de Fundición, EPN)

### **3.1.3 Resultados del ensayo metalográfico: Medición de espesores y reconocimiento de fases del recubrimiento galvanizado**

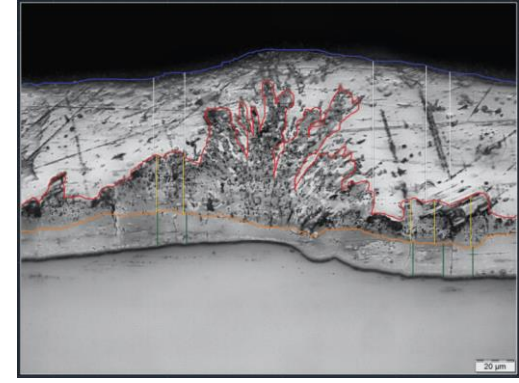
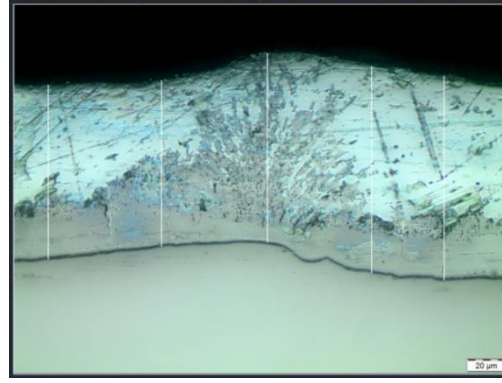
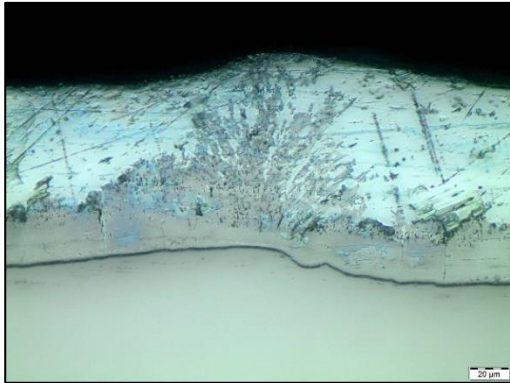
En esta sección se presentan las metalografías obtenidas en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla mediante el uso del microscopio invertido OLYMPUS GX 41. Se empleó un aumento de 500x para la visualización de las muestras. De las metalográficas obtenidas y empleado el Software AutoCAD se tomaron cinco medidas de espesor de galvanizado y espesor de fases para cada lado de las muestras; este procedimiento junto con los valores obtenidos es expuestos en el ANEXO VI.

En la Tabla 3.5 y Tabla 3.6, se presenta brevemente los resultados de las metalografías, espesor de galvanizado y fases presentes en el recubrimiento. La Tabla 3.7 muestra el valor de espesor mínimo que deben poseer las muestras de placas de acero estructural según la norma ASTM A 123.

Tabla 3.5. Metalografías probetas fresadas aumento 500x

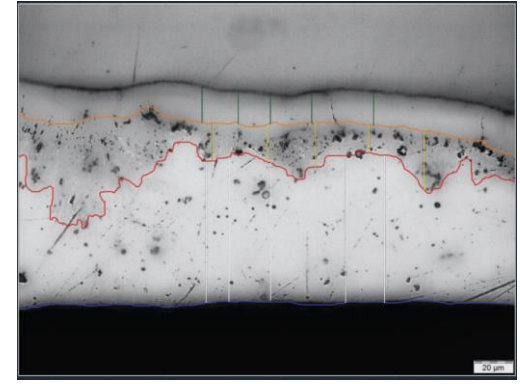
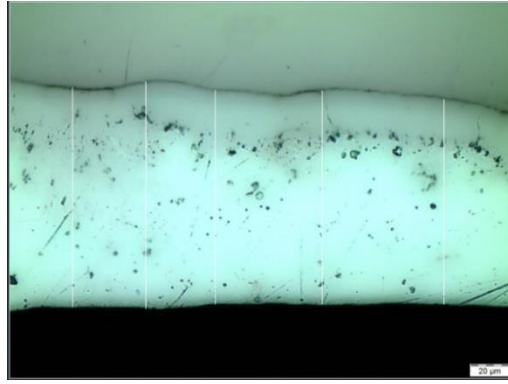
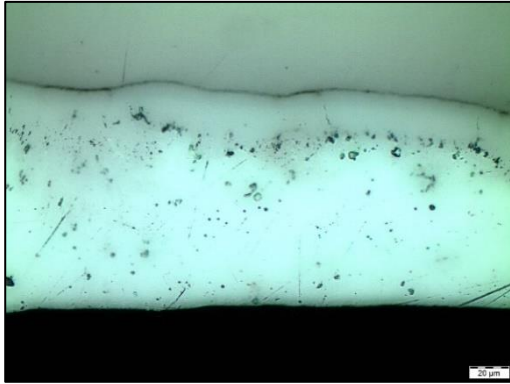
Muestra	Metalografía	Espesor de galvanizado	Fases del recubrimiento
20-004-FM1			
<p>En el recubrimiento de zinc se visualizan ciertas marcas que abarcan la mayor zona del espesor del galvanizado. El valor promedio del espesor de recubrimiento obtenido es de 77,47 <math>\mu\text{m}</math>. Se puede evidenciar la presencia de tres fases, una con coloración gris clara y la otras dos restantes con tonalidad opacas. La primera presenta la mayor cantidad de rayones y consta de un valor promedio de espesor de 38,15 <math>\mu\text{m}</math>, mientras que la fase intermedia se desarrolla de manera irregular y se encuentra llena de un conjunto de aparentes inclusiones o porosidades con un valor de espesor promedio de 13,85 <math>\mu\text{m}</math>. La fase más cercana al material base se observa más consolidada, con un aspecto columnar y libre de marcas, todas estas características proporcionan indicios de una diferencia de durezas entre las tres secciones del recubrimiento, el espesor promedio que posee esta fase es de 23,40 <math>\mu\text{m}</math>.</p>			

20-004-FM2



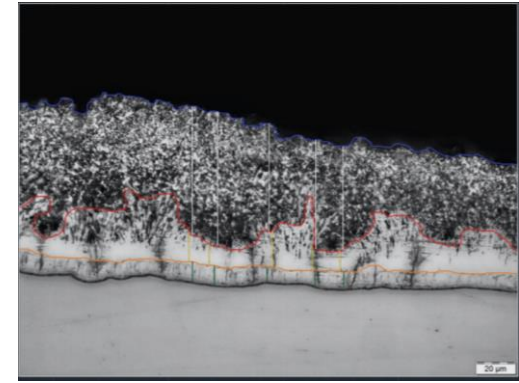
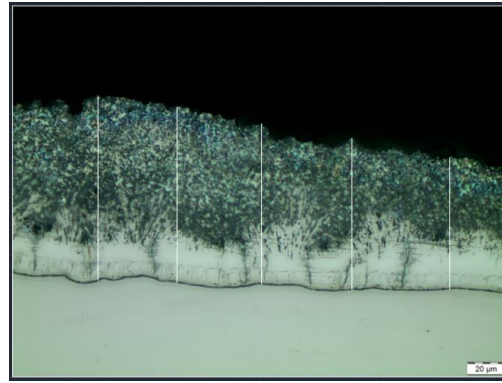
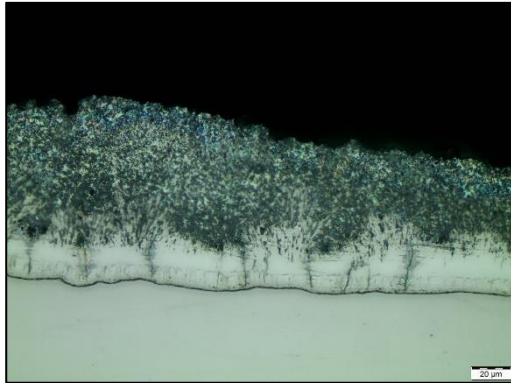
Se puede visualizar la formación de tres fases dentro del recubrimiento de zinc, dos secciones oscuras y una clara. La fase más cercana al material base se presenta con un aspecto libre de marcas e inclusiones con una estructura columnar, esta sección mantiene un valor de espesor promedio de 19,09  $\mu\text{m}$ ; la fase intermedia se muestra con un desarrollo irregular en forma de ramificaciones que se extienden hasta el borde superior del recubrimiento y posee un valor de espesor promedio de 11,93  $\mu\text{m}$ . La última fase con tonalidad más clara se observa extensa y prominente dentro del galvanizado, con un valor de espesor promedio de 78,24  $\mu\text{m}$ , una vez más son visibles marcas de rayones dentro de esta sección; el valor promedio del espesor total del recubrimiento obtenido es de 107,01  $\mu\text{m}$ .

20-004-FM3



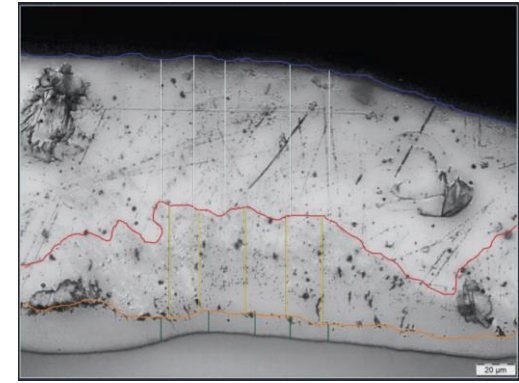
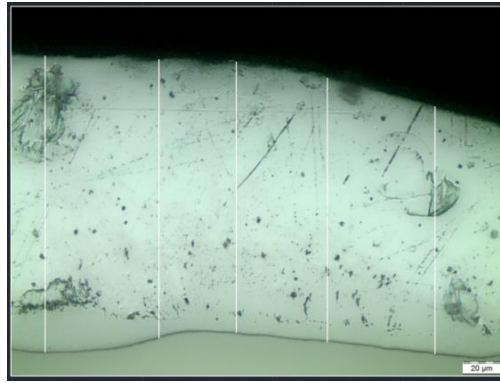
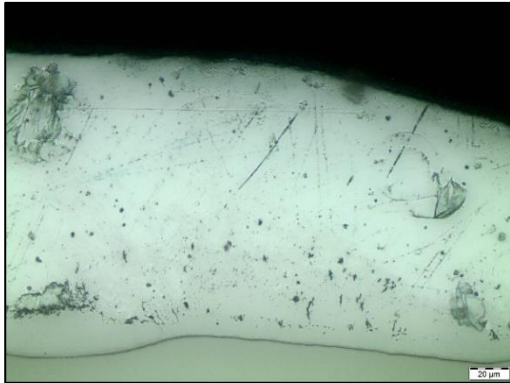
En el recubrimiento de zinc se observan ciertos puntos negros y algunas marcas levemente visibles dentro del borde exterior de la muestra. Dentro del espesor se logran distinguir tres fases, la fase más clara se observa en mayor proporción dentro de la capa de galvanizado con un valor promedio de 75,62  $\mu\text{m}$ . Como en casos anteriores la fase más oscura cercana al sustrato presenta un aspecto de formación columnar y consolidada, libre de marcas, con un valor de espesor de 17,38  $\mu\text{m}$ . La sección intermedia con tonalidad opaca mantiene un espesor promedio de 21,97  $\mu\text{m}$ , esta fase se desarrolla en forma de ramificaciones a manera de picos cortos, se aprecian dentro de esta sección marcas e inclusiones. El valor promedio del espesor del recubrimiento para esta muestra es de 112,78  $\mu\text{m}$ .

20-004-FM4



Se observa que el recubrimiento de zinc presenta tres fases delimitadas con una tonalidad distintiva, para el caso de la fase más oscura, cercana al bode exterior se aprecia un aspecto tipo granular, por lo que se puede presentar indicios de una diferencia de dureza entre las secciones de la capa de galvanizado, el valor promedio de espesor de esta fase es de 61,02 µm. La fase intermedia se muestra con un tono claro para esta muestra, se mantiene irregular con formación de picos que se levantan hacia el borde exterior del galvanizado, no se evidencia presencia de marcas ni puntos negros en esta sección y cuenta con un espesor promedio de 14,07 µm, la fase más cercana al material base se aprecia con un aspecto columnar con un valor de espesor promedio de 10,16 µm, el valor promedio del espesor total del recubrimiento para esta muestra es de 94,01 µm.


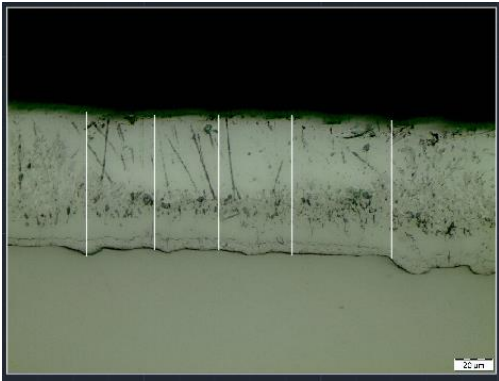
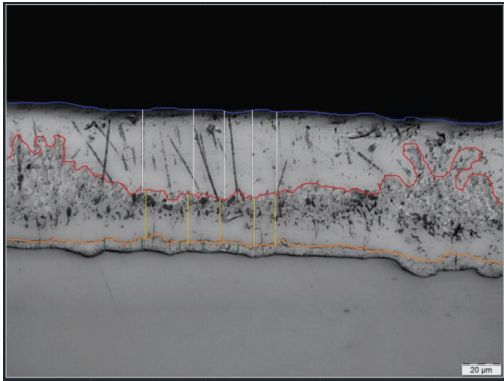
20-004-FM5



Se observa en el recubrimiento de zinc varias manchas, al igual que un conjunto de rayones que toman lugar en la sección superior del recubrimiento, se distinguen la formación de tres fases en el galvanizado, una fase inferior junto al material base con un aspecto columnar definido que posee un valor de espesor promedio de  $11,23 \mu\text{m}$ ; una fase intermedia que no se logra apreciar de forma clara, sin embargo, se distinguen estructuras en forma de pequeños picos que están direccionados hacia el borde del galvanizado, acompañadas de una concentración de puntos negros, el espesor promedio de esta sección es de  $54,71 \mu\text{m}$ . Finalmente la fase superior presenta una extensión mayor a la de las anteriores fases con un valor de espesor promedio de  $78,39 \mu\text{m}$ , en esta área se observa un predominio de rayones. El valor promedio del espesor del recubrimiento para esta muestra es de  $143,67 \mu\text{m}$ .

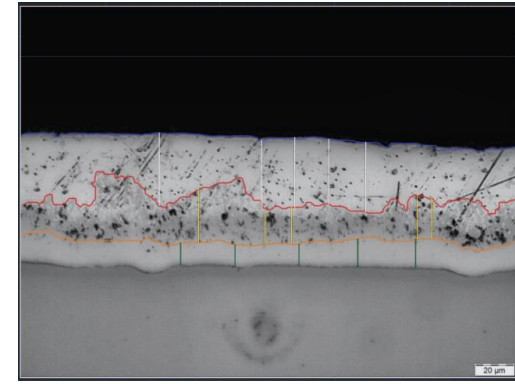
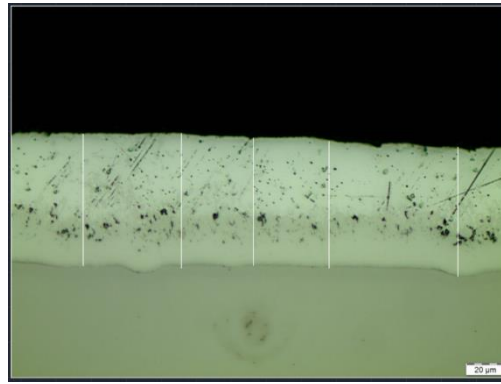
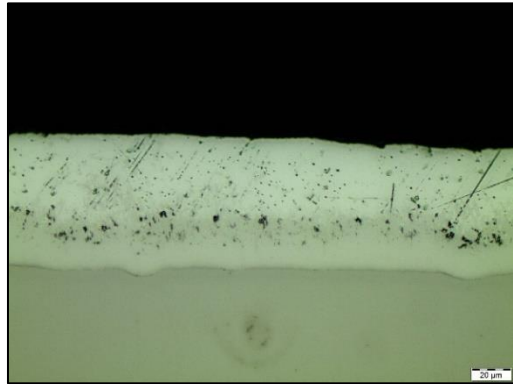
(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Metalografías probetas rectificadas aumento 500x

Muestra	Metalografía	Espesor de galvanizado	Fases del recubrimiento
20-004-RM1			
<p>Se distingue dentro del recubrimiento de zinc una vez más la presencia de marcas y puntos negros a lo largo del espesor de la capa de galvanizado que cuenta con un espesor promedio de 93,53 µm. Se pueden visualizar tres fases definidas, en la sección con tonalidad más clara cercana al borde exterior se evidencia un conjunto de rayones que abarcan la totalidad de la fase, esta sección cuenta con un espesor promedio de 64,62 µm. La fase intermedia se presenta mucho más gruesa con dos áreas completamente marcadas, una irregular con ramificaciones prolongadas que presenta la mayor acumulación de puntos negros del recubrimiento y otra libre de marcas con un aspecto de estructura columnar como base, el valor de espesor promedio de esta sección es de 10,61</p>			

µm. La última fase cercana al material base se evidencia reducida, sin embargo, se aprecia una vez más una estructura consolidada sin presencia de marcas, el espesor promedio de esta sección es de 17,44 µm.

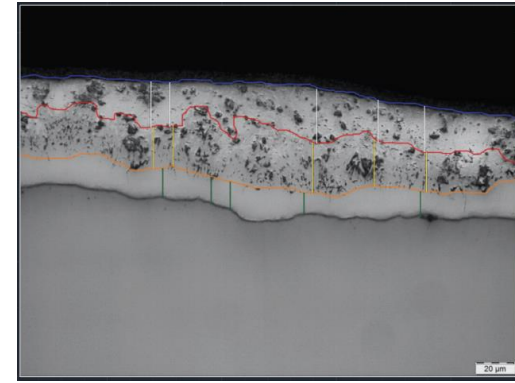
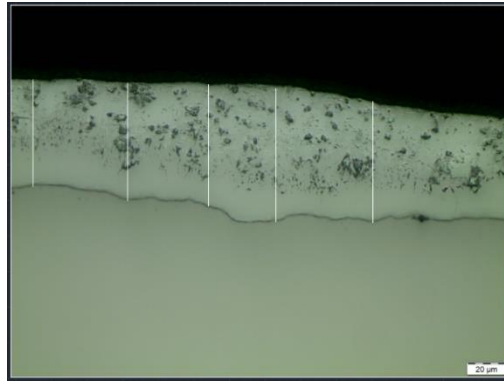
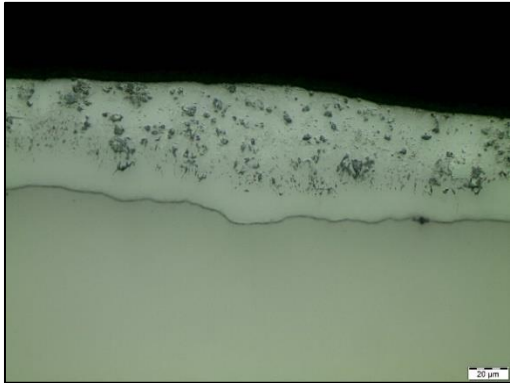
20-004-RM2



En el recubrimiento de zinc se visualiza a una vez más ciertas marcas y puntos negros, de igual manera el número de fases que se evidencian en la capa de galvanizado son tres; el valor de espesor promedio de recubrimiento en la muestra es de 69,14 µm. La fase cercana al borde exterior del recubrimiento presenta una tonalidad clara donde se evidencia la mayor cantidad de rayones y ciertas zonas donde se localizan depósitos de puntos negros, el valor promedio de espesor de esta sección es de 37,57 µm. La fase intermedia se presenta con una tonalidad más oscura, se aprecia un desarrollo irregular extendido hacia el borde exterior del galvanizado donde es evidente mayor concentración de puntos negros y cuenta con un espesor promedio de 17,62 µm. Finalmente, la fase cercana al sustrato se aprecia con un aspecto fuertemente consolidado, con una frontera de sección más definida y sin presencia de marcas ni puntos negros, esta fase cuenta con un valor de espesor promedio de 15,05 µm.

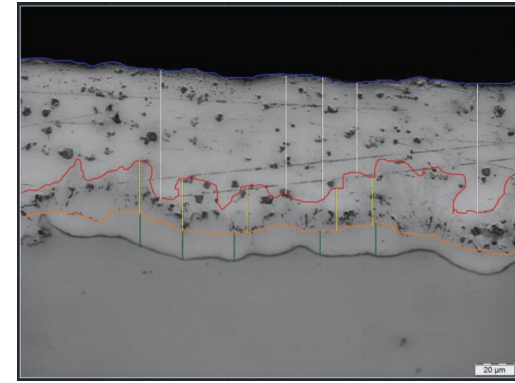
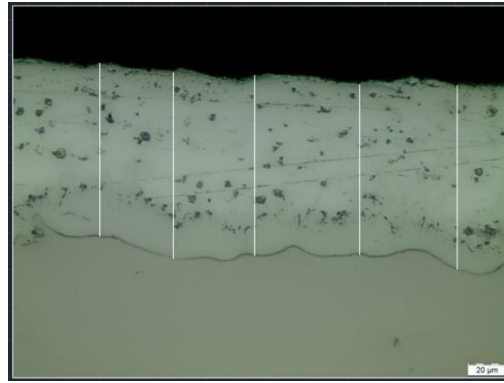
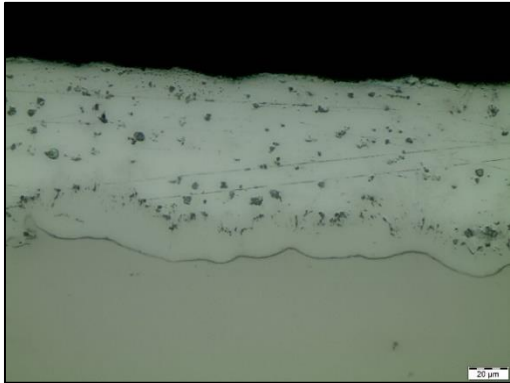


20-004-RM3



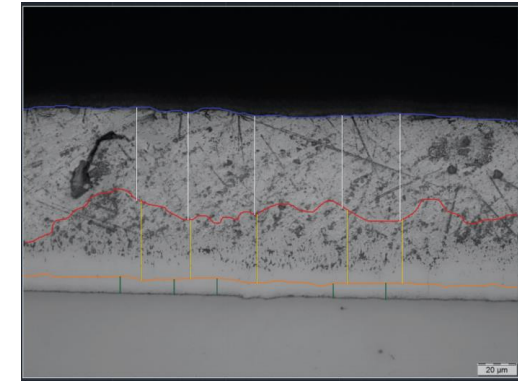
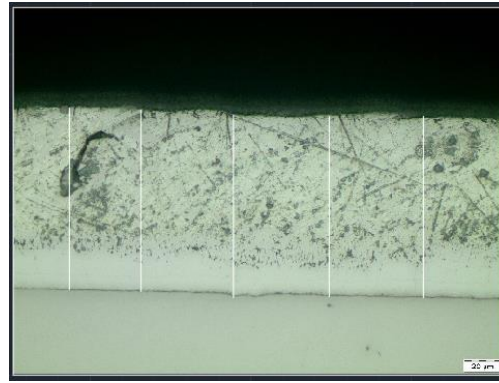
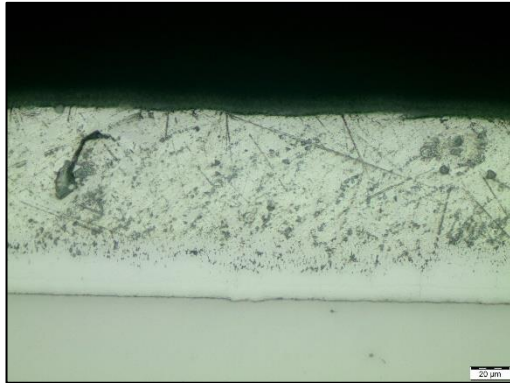
En el recubrimiento de zinc se puede apreciar únicamente puntos negros a manera de depósitos que presentan mayor tamaño que los visualizados en anteriores muestras, el valor de espesor promedio que mantiene la capa de galvanizado es de 76,03  $\mu\text{m}$ ; de igual manera el número de fases que se distinguen en el recubrimiento son tres que no presentan a simple vista una tonalidad distintiva entre ellas, sin embargo, es posible diferenciarlas debido a la distribución y características que posee cada sección. La fase cercana al borde se presenta reducida, con una acumulación de puntos negros separadas; el valor de espesor promedio de esta zona es de 36,96  $\mu\text{m}$ . En la fase intermedia se puede evidenciar de igual manera una acumulación de estos puntos negros, pero más unidos a diferencia de la sección anterior; de ideal forma se observa un desarrollo irregular que se extiende hacia el borde del galvanizado, el valor de espesor promedio de la fase es de 16,34  $\mu\text{m}$ . La fase cercana al sustrato se muestra como una sección más consolidada, con aspecto columnar y libre de marcas, el valor de espesor promedio de la sección es de 19,18  $\mu\text{m}$ .

20-004-RM4



Para el recubrimiento formado en la muestra se aprecia la presencia de puntos negros a manera de depósitos junto con marcas de rayado localizados en el borde exterior de la capa de galvanizado, el valor del espesor promedio obtenido para la muestra es de 94,01  $\mu\text{m}$ . En la fase cercana a la superficie del recubrimiento se visualiza la acumulación de puntos negros, sin embargo, se encuentran separados entre ellos, además se aprecian marcas de rayado definidas que atraviesan el largo de esta sección; el valor de espesor promedio de esta zona es de 61,75  $\mu\text{m}$ . Referente a la fase intermedia del galvanizado se observan puntos negros más unidos entre ellos, dentro de la zona que marca el cambio de fase suscitado respecto a la anterior, además es evidente un desarrollo irregular a manera de ramificaciones en ciertas áreas a lo largo de la fase; el valor de espesor promedio es de 25,43  $\mu\text{m}$ . La fase cercana al material base presenta su aspecto columnar característico y libre de marcas, el espesor promedio de esta sección es de 15,45  $\mu\text{m}$ .

20-004-RMS



Para el recubrimiento de zinc formado se puede evidenciar la presencia de marcas de rayado que abarcan mayor área de la capa de galvanizado junto con una especie de manchas a manera de depósitos, el valor de espesor promedio obtenido en la muestra es de 96,91  $\mu\text{m}$ . Se aprecia la formación de tres fases dentro del galvanizado, la fase cercana a la superficie externa ocupa la mayor zona del espesor del recubrimiento, dentro de esta sección se localizan marcas de rayado y puntos negros; el valor de espesor promedio de esta zona es de 50,90  $\mu\text{m}$ . La fase intermedia se muestra reducida y delgada donde se genera el mayor depósito de puntos negros, estos proporcionan información de cómo se desarrolla esta zona en relación al resto de fases, el valor de espesor promedio obtenido es de 36,29  $\mu\text{m}$ . La fase cercana al sustrato se muestra fuertemente delimitada con aspecto columnar y consolidado sin presencia de marcas, el valor de espesor promedio obtenido para esta zona es de 8,35  $\mu\text{m}$ .

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.7 se especifica el valor mínimo de espesor de galvanizado según la norma ASTM A 123 para placas de acero estructural A-36 en función de su espesor. Y en la Tabla 3.8 se presenta el resumen de los valores de espesor de galvanizado máximo y mínimo obtenidos en las probetas fresadas y rectificadas.

Tabla 3.7. Requerimiento mínimo para el recubrimiento galvánico del acero estructural ASTM A-36

Categoría	Espesor de Material Base [mm]	Espesor de Recubrimiento [ $\mu\text{m}$ ]	Grado de Recubrimiento	Cantidad de Recubrimiento [ $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ ]
Placas Acero Estructural	$1,6 < e < 3,2$	65	65	460

(Fuente: ASTM A-123 Internacional, 2015)

Tabla 3.8. Resumen espesor de recubrimiento galvánico de las probetas

Espesor de Recubrimiento [ $\mu\text{m}$ ]		
Probeta	Valor Mínimo	Valor Máximo
Superficie Fresada	77,47	143,67
Superficie Rectificada	69,14	96,91

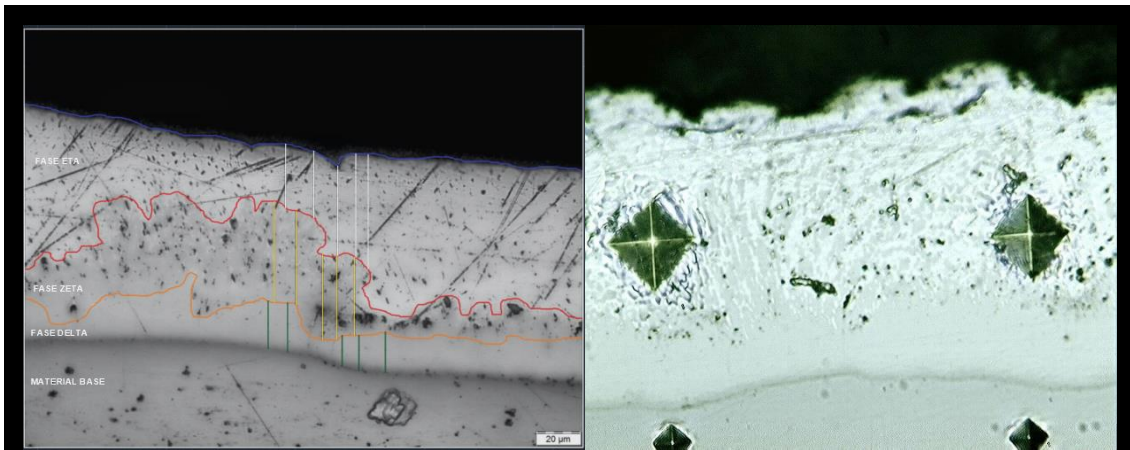
(Fuente: Propia)

### 3.1.4 Resultados del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-dureza

A continuación, se detallan los valores de dureza y tamaño de las marcas pertenecientes a las diagonales del indentador, obtenidos por medio del ensayo de micro – dureza. Mediante la norma ASTM E 384 se realiza un análisis en función de la diferencia en porcentaje entre las diagonales del indentador; el apartado 8.10.3 de la norma señala que la mitad de la longitud de una de las diagonales del indentador no puede variar en 5% de la mitad de la longitud restante, de esta manera se visualizan en color rojo los valores que no cumplen con este apartado para la Tabla 3.9 hasta la Tabla 3.18.

Los resultados obtenidos para las probetas FM2, RM1 y RM4 no cumplen con los parámetros normalizados respecto a la medida del indentador, de manera que estos valores quedan descartados.

Tabla 3.9. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM1

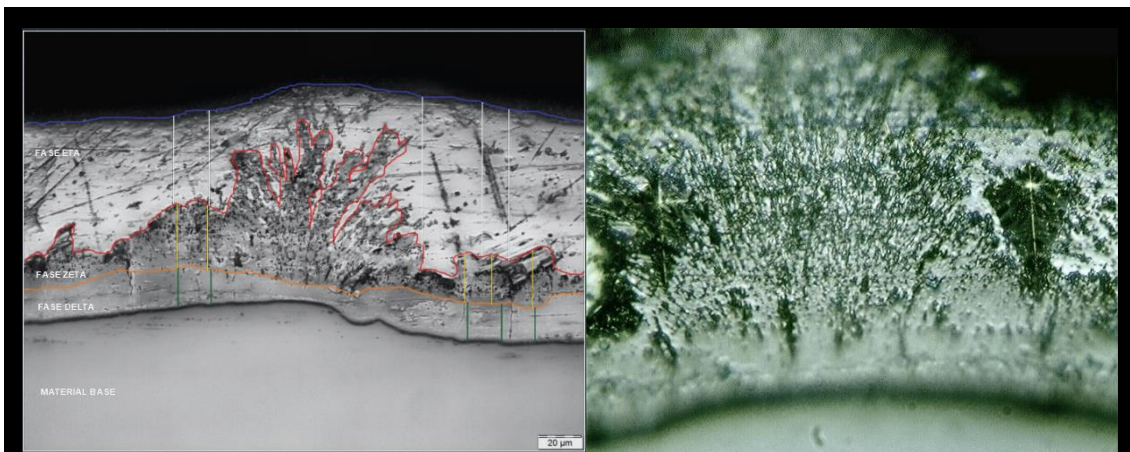


Probeta FM1	D <sub>1</sub> [µm]	D <sub>2</sub> [µm]	Promedio [µm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	78,49	30,31	24,83	79,48	78,49
2	56,6	33,83	23,4	33,65	56,6
3	23,37	26,38	23,37	5,71	66,64
4	24,56	22,71	23,64	4,07	82,96
5	35,04	25,43	30,24	18,90	50,7
6	26,95	26,65	26,8	0,56	64,53
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					73,75
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					13,03

En la metalografía se aprecia el desarrollo de las fases delta ( $\delta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ) en el recubrimiento galvánico. Las marcas de indentación cumplen con el parámetro de la norma referente al porcentaje de aceptación para las diagonales del indentador, sin embargo, los valores de dureza registrados corroboran que las marcas que cumplen con la norma ASTM E 384, se encuentran localizadas dentro la fase eta ( $\eta$ ) y presenta un valor mínimo de 64,53 hasta un valor máximo de 82,96 en dureza Vickers. En la fase zeta ( $\zeta$ ) se puede visualizar una formación de cristales que se muestran inmersos dentro de la capa de zinc.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM2

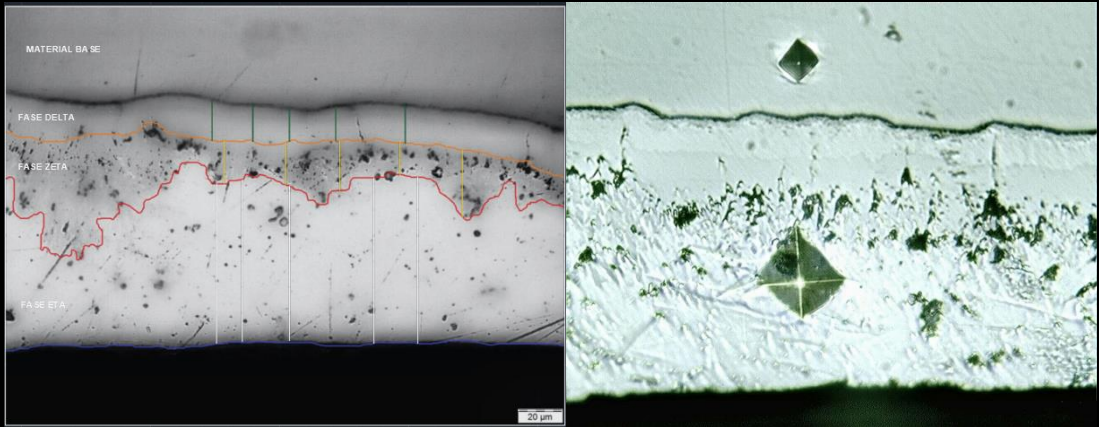


Probeta FM2	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	36,94	21,94	29,44	34,18	53,47
2	33,27	16,72	25	49,49	74,16
3	26,59	18,88	22,73	20,42	89,69
4	37,42	16,05	26,74	66,57	64,83

Se visualiza el desarrollo de una fase delta ( $\delta$ ) en la base del recubrimiento y una fase zeta ( $\zeta$ ) con crecimiento ramificado en forma de pequeñas agujas en uno de los lados de la muestra; de igual manera se observa una capa de zinc externa que corresponde a la fase eta ( $\eta$ ). Las marcas de indentación realizadas en el ensayo abarcan todas las fases presentes en el recubrimiento galvánico, generando el efecto de la deformación de la medida, de manera que ninguna de las tomas de datos realizadas se aprueba basado en la norma ASTM E 384 debido a la diferencia de dureza entre ellas.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM3

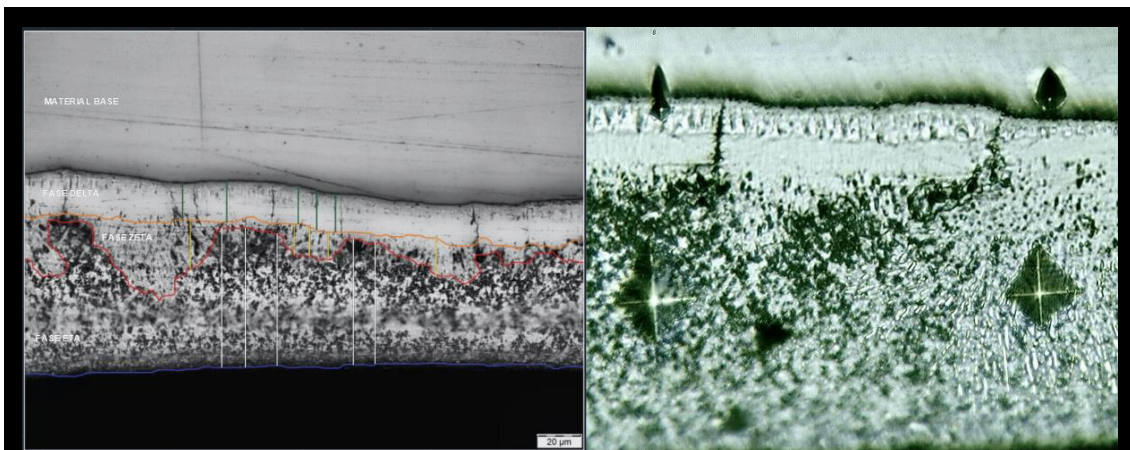


Probeta FM3	D <sub>1</sub> [µm]	D <sub>2</sub> [µm]	Promedio [µm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	31,23	18,52	24,88	34,31	74,9
2	31,33	18,4	24,87	35,14	74,95
3	31,35	25,2	28,28	12,20	57,96
4	25,42	24,22	24,82	2,48	75,22
5	26,71	26,16	26,44	1,05	66,32
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					70,77
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					6,29

Se aprecian tres fases en el recubrimiento galvánico correspondientes a la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) a diferencia de lo que ocurre en casos anteriores; el desarrollo de las diferentes fases se visualiza de manera más consolidada, uniforme y clara. Referente a la medida de dureza, se registra que la fase eta ( $\eta$ ) presenta un valor mínimo de 66,32 hasta un valor máximo de 75,22 en dureza Vickers. Nuevamente se visualiza en la fase zeta ( $\zeta$ ) una formación de cristales inmersos dentro de la capa de zinc.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM4



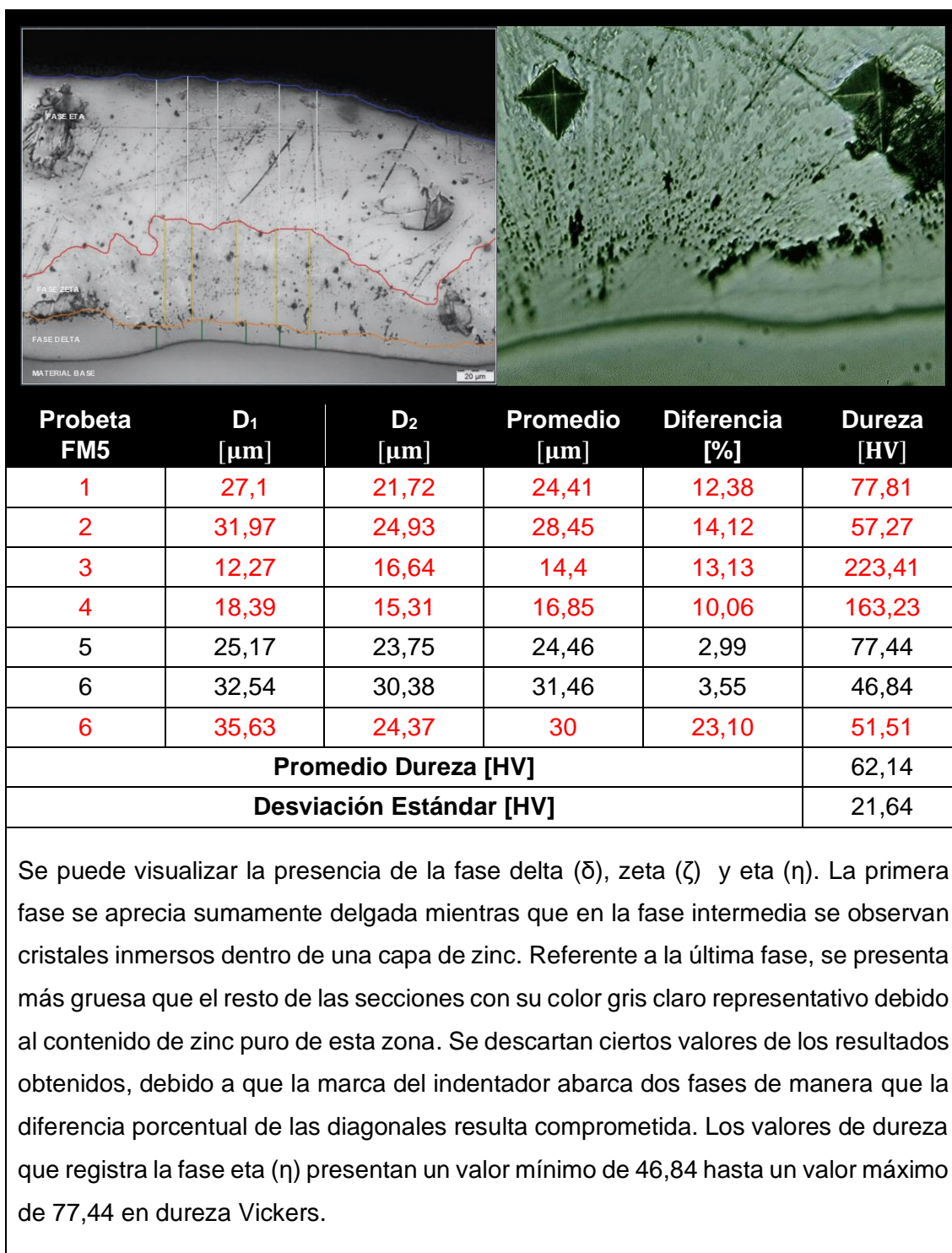
Probeta FM4	D <sub>1</sub> [µm]	D <sub>2</sub> [µm]	Promedio [µm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	24,91	23,29	24,1	3,48	79,8
2	30,43	24,6	27,52	11,85	61,2
3	22,94	22,58	22,76	0,80	89,49
4	33,59	27,18	30,385	11,79	50,2
5	33,03	27,21	30,12	10,69	51,1
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					84,65
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					6,81

De manera análoga al resto de muestras, se identifica la formación de la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ). Se puede apreciar que la primera fase presenta una tonalidad oscura que se diferencia de las probetas anteriores, mientras que la segunda se desarrolla con irregularidad, en forma de cristales delgados y poco definidos; la última fase se aprecia gruesa y más estable, sirviendo como base para un temprano crecimiento de la sección intermedia del recubrimiento. Se registra un valor mínimo de 79,80 hasta un valor máximo de 89,49 en dureza Vickers para la fase eta ( $\eta$ ).

(Fuente: Propia)

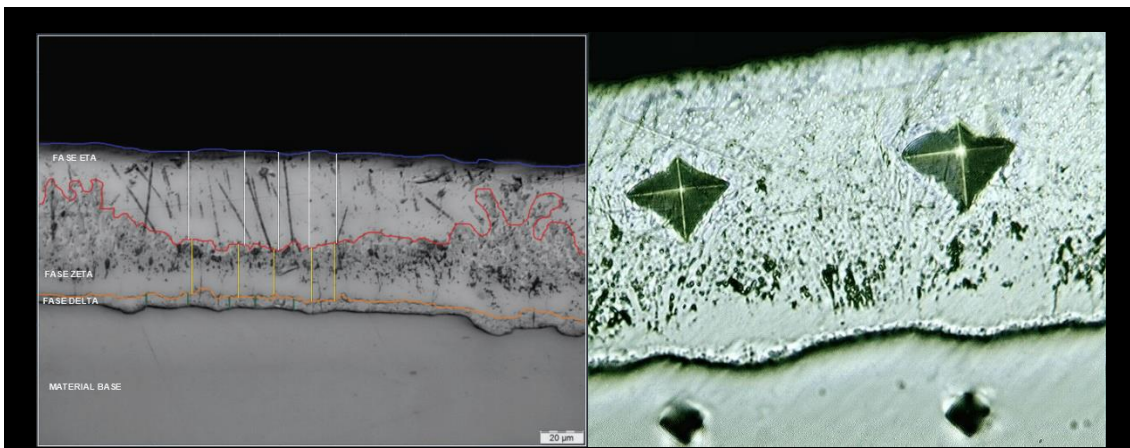


Tabla 3.13. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta FM5



(Fuente: Propia)

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM1

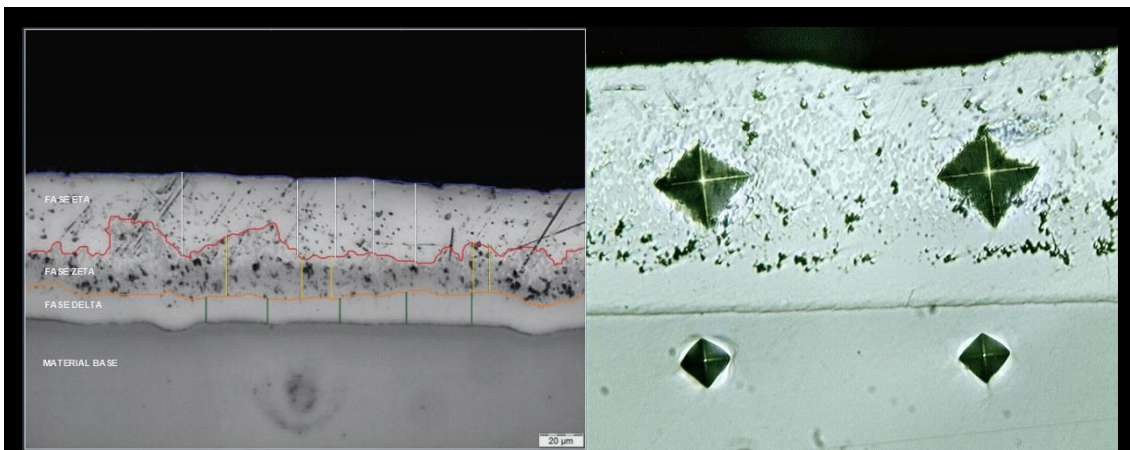


Probeta RM1	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	32,23	26,9	29,57	9,91	53,02
2	33,45	26,74	30,1	12,55	51,17
3	25,87	30,82	28,34	8,03	57,71
4	26,82	33,93	30,38	10,48	50,23
5	31,18	24,4	27,79	13,89	60,01
6	26,38	30,99	28,68	7,44	56,34

Se aprecia la formación de tres fases, fase delta ( $\delta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ), las dos primeras muestran características de dureza más elevadas que la última debido a la estructura y disposición que presenta, por lo cual los valores de las diagonales del indentador no logran definirse correctamente y son descartadas por incumplimiento de la norma ASTM E 384, sin embargo, se puede destacar que las medidas de dureza obtenidas en el indentador son cercanas al valor representativo de la fase eta ( $\eta$ ), 70 en dureza Vickers. En la fase zeta ( $\zeta$ ) se aprecia la formación de cristales inmersos en una capa de zinc.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM2

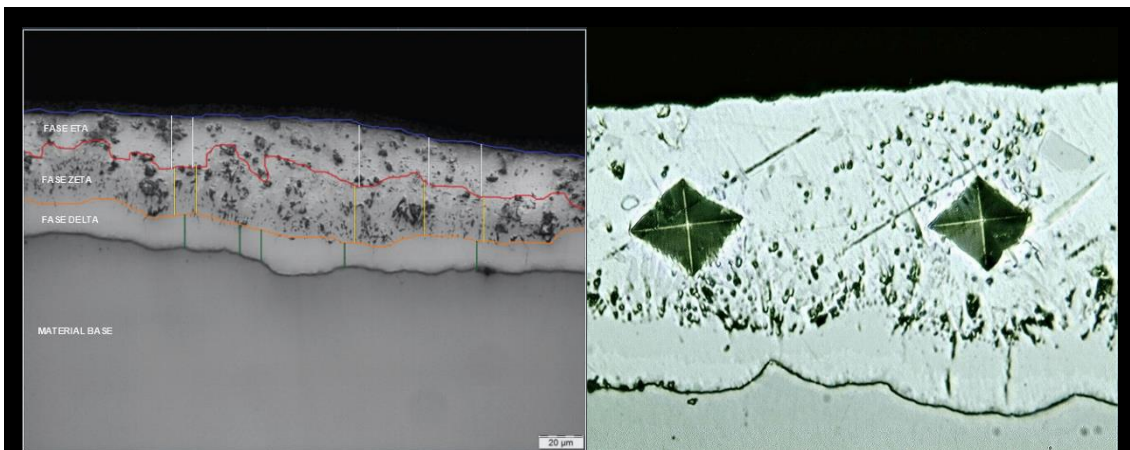


Probeta RM2	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	32,41	23,78	28,1	18,15	58,7
2	29,69	22,7	26,19	15,40	67,56
3	28,82	30,19	29,5	2,27	53,25
4	25,97	28,22	27,09	3,99	63,14
5	32,54	24,29	28,42	16,98	57,4
6	27,08	27,73	27,4	1,17	61,72
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					59,37
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					5,35

En la metalografía se aprecia el desarrollo de tres fases. Se identifica la presencia de una fase eta ( $\eta$ ) mediante los valores de dureza que califican con la norma ASTM E384. Los valores de las diagonales que no cumplen con la norma, confirman la existencia de dos fases más duras en el recubrimiento, fase delta ( $\delta$ ) y fase zeta ( $\zeta$ ). Se observa la formación de nucleaciones en la fase eta ( $\eta$ ). Esta sección presenta un valor mínimo de 53,25 hasta un valor máximo de 63,14 en dureza Vickers. En la fase zeta ( $\zeta$ ) se aprecia la formación de cristales inmersos en una capa de zinc.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM3

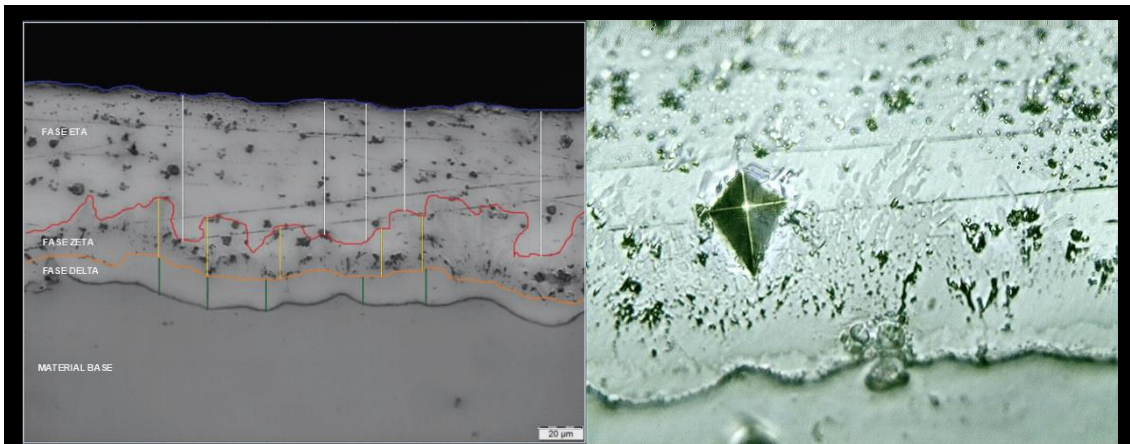


Probeta RM3	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	35,54	26,42	30,98	17,26	48,29
2	30,66	22,61	26,63	17,80	65,34
3	28,34	32,85	30,6	6,86	49,52
4	28,14	30,53	29,34	3,91	53,86
5	23,57	28,6	26,08	8,79	68,14
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					53,86
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					NA

Se reconoce en la metalografía la fase delta ( $\delta$ ), fase zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ). Esta última se identifica con el único valor que califica respecto a la diferencia de las diagonales en base a la norma ASTM E 384, con una magnitud representativa de 53,86 en dureza Vickers, dentro de la misma se puede apreciar una vez más la formación de núcleos atribuidos a depósitos de zinc durante el proceso de galvanizado. La diferencia de tamaño de las diagonales en el resto de medidas de dureza registradas da hincapié a la presencia de una zona con mayor dureza, fase delta ( $\delta$ ) y zeta ( $\zeta$ ), en esta última no se visualiza la formación de ninguna estructura cristalina o límites de fase definidos y presenta una tonalidad clara similar a la capa eta ( $\eta$ ).

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM4

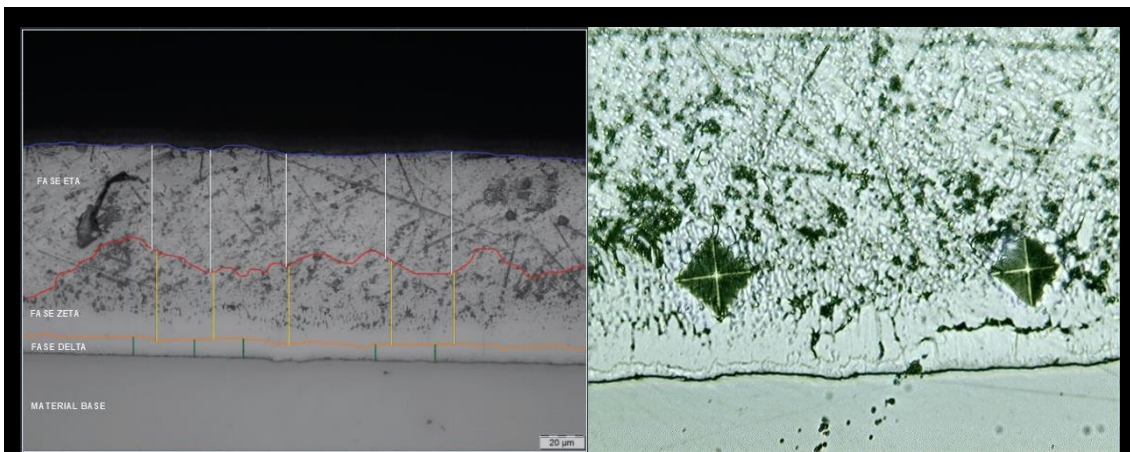


Probeta RM4	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	29,8	24,96	27,38	9,70	61,83
2	29,11	23,99	26,55	10,67	65,74
3	34,12	24,27	29,19	20,29	54,34
4	31,88	24,1	27,99	16,14	59,17
5	27,99	24,8	26,4	6,43	66,52
6	31,2	23,58	27,39	16,16	61,79

Se aprecia la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) en la metalografía. El desarrollo de las fases se mantiene irregular en ciertas zonas. Se puede observar que los datos descartados por la inconsistencia en la medida de las diagonales se deben a que la fase zeta ( $\zeta$ ) desarrolla ramificaciones gruesas en forma de puntas irregulares direccionadas al borde exterior del recubrimiento.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de micro-dureza probeta RM5



Probeta RM5	D <sub>1</sub> [μm]	D <sub>2</sub> [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	24,66	24,23	24,45	0,89	77,57
2	21,02	20,42	20,72	1,47	107,98
3	28,51	24,29	26,4	8,69	66,51
4	27,4	23,85	25,62	7,44	70,59
5	22,29	23,76	23,02	3,09	87,44
6	27,39	24,48	25,93	5,94	68,92
<b>Promedio Dureza [HV]</b>					90,99
<b>Desviación Estándar [HV]</b>					15,51

Una vez más se observa la formación de la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ). Se aprecia la formación de nucleaciones concentradas en la fase eta ( $\eta$ ) en uno de los lados de la metalografía. La dureza de esta fase presenta un valor mínimo de 77,57 hasta un valor máximo de 107,98 en dureza Vickers. En la fase zeta ( $\zeta$ ) se evidencia la formación de cristales delgados, de manera similar al caso anterior, estos se encuentran direccionados al borde superior del recubrimiento.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.2 y Figura 3.3, se visualizan los valores de dureza en base a la estructura que presentó la fase zeta en cada una de las muestras. La desviación estándar es de 11,44 HV y 15,98 HV, respectivamente.

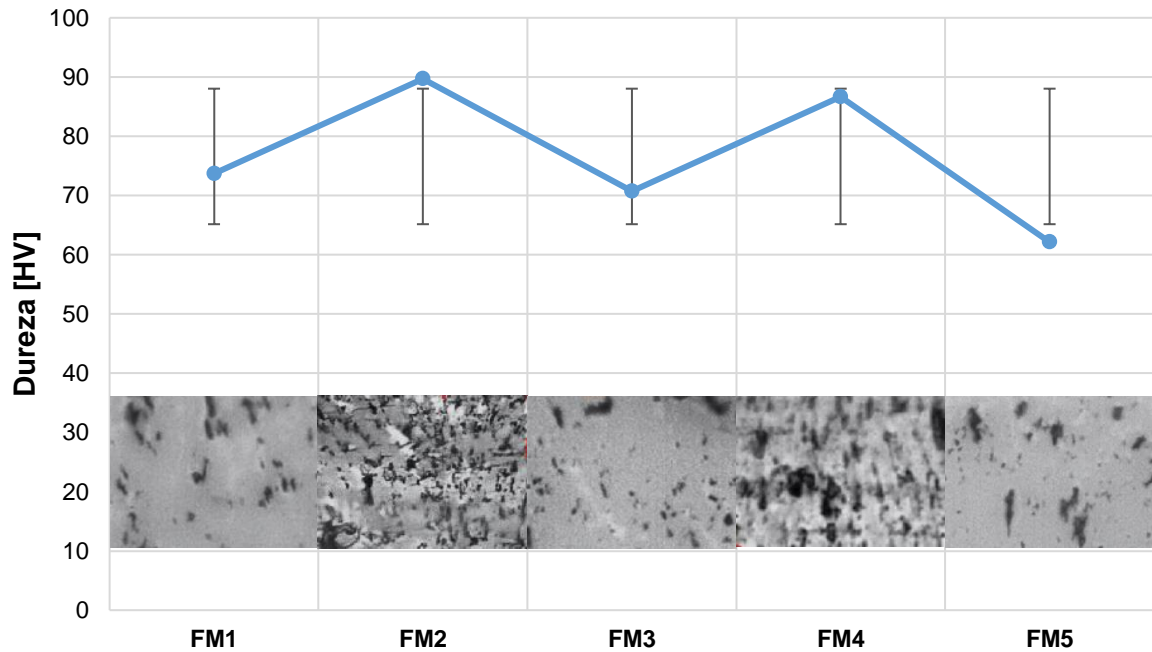


Figura 3.2. Resultado de los valores de dureza promedio para probetas fresadas en base a la estructura de la fase zeta.  
Fuente: (Propia)

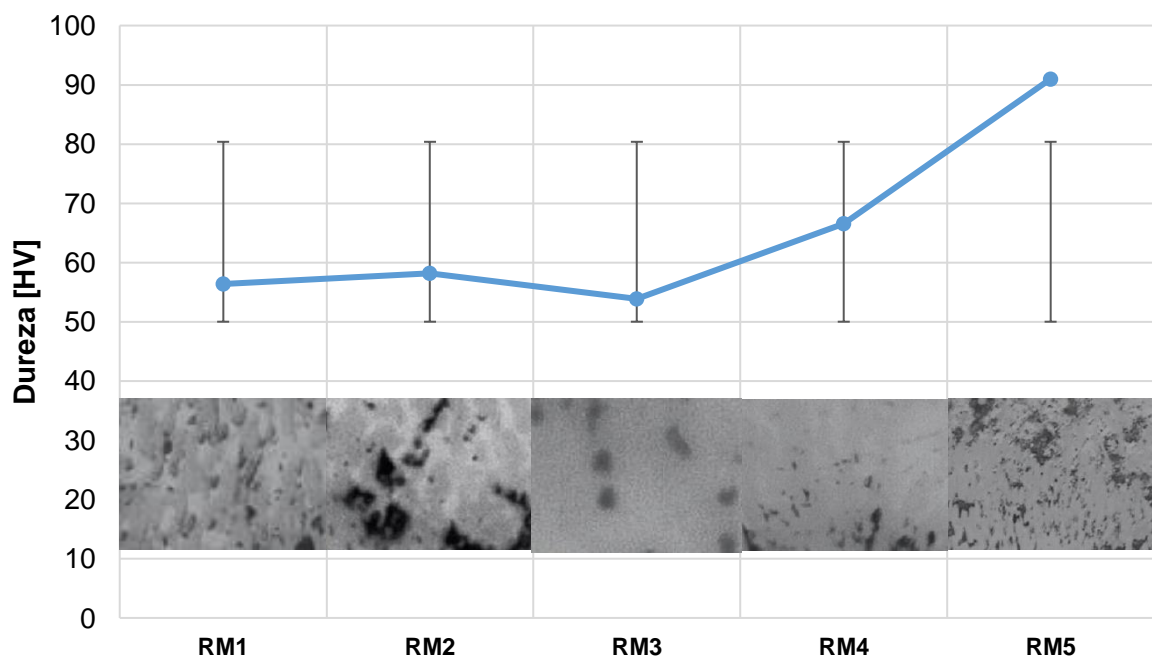


Figura 3.3. Resultado de los valores de dureza promedio para probetas rectificadas en base a la estructura de la fase zeta  
Fuente: (Propia)

### 3.1.5 Resultados del ensayo de rugosidad

En el ANEXO XI se visualiza a detalle los resultados obtenidos de la medición de rugosidad para las probetas con superficie fresada y rectificada. En la Figura 3.4 y Figura 3.5, se observan los valores de espesor de rugosidad promedio calculadas para cada una de las muestras.

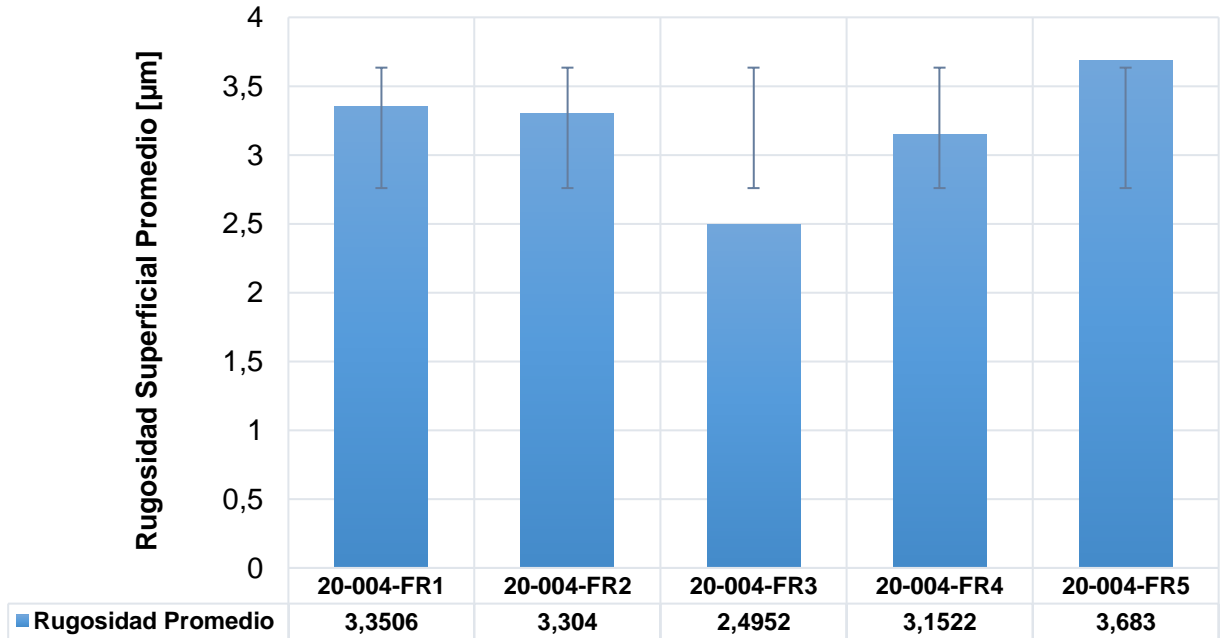


Figura 3.4. Resultados del ensayo de rugosidad de probetas fresadas  
Fuente: (Propia)

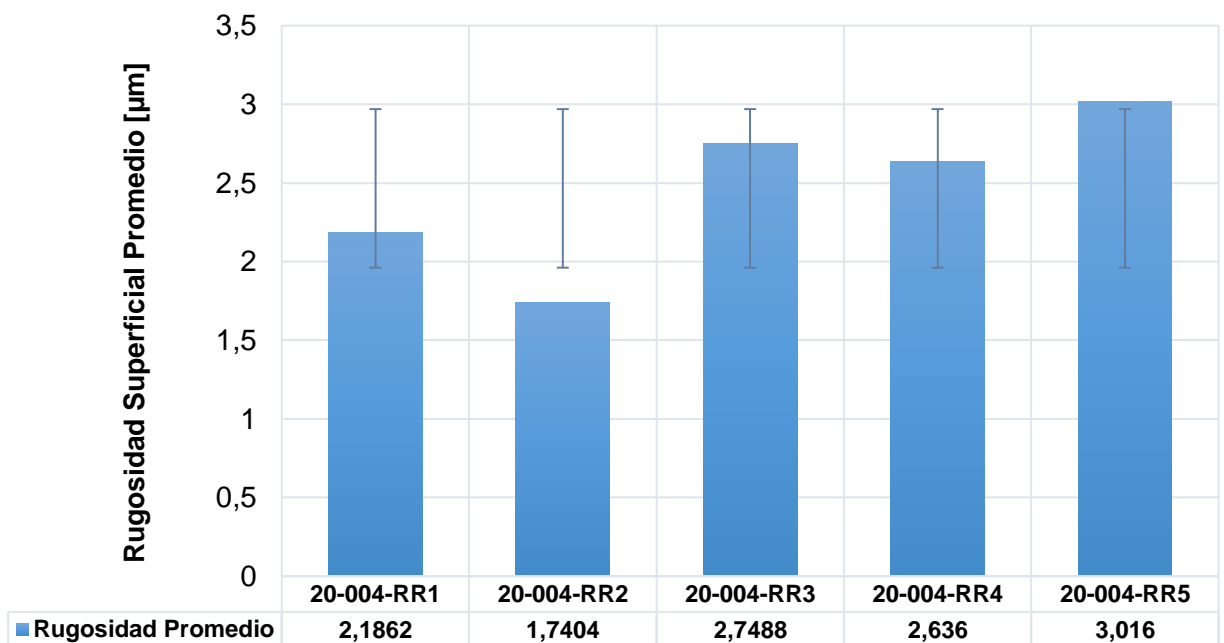


Figura 3.5. Resultados del ensayo de rugosidad de probetas rectificadas  
Fuente: (Propia)



En la Tabla 3.19 se resumen los principales parámetros de mecanizado empleados en los equipos para las probetas ensayadas.

Tabla 3.19. Parámetros de mecanizado en probetas fresadas y rectificadas

Proceso de mecanizado	Velocidad del Equipo [rpm]	Profundidad de Corte	Velocidad de Avance
Fresado	250	0,5 [mm]	1,5 [mm/s]
Rectificado	3500	0,01 [mm]	88,88 [mm/s]

(Fuente: Propia)

### 3.1.6 Resultados del ensayo de desgaste

En este apartado se visualizan los resultados obtenidos para el ensayo de desgaste, el cual es realizado por medio de la diferencia de pesos, en el ANEXO VII se muestra a detalle la medición registrada del peso de las probetas y los valores de las mismas luego de ser colocadas en la matriz de resina antes y después del ensayo.

Empleando la norma ASTM G 65 se realizó el ensayo de desgaste abrasivo tal y como se describe en el apartado 2.2.2 del presente estudio, los valores promedio para las medidas obtenidas dentro del ensayo se presentan desde la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Promedio medidas de probetas antes del ensayo de desgaste

Probetas	Peso promedio sin resina antes del ensayo [g]	Peso promedio con resina antes del ensayo [g]	Peso promedio con resina después del ensayo [g]
20-004-FRD1	10,97	26,14	25,95
20-004-FRD2	10,41	24,25	24,08
20-004-FRD3	10,44	22,71	22,55
20-004-FRD4	10,36	24,67	24,55
20-004-FRD5	10,58	25,39	25,26
20-004-RRD1	10,3	24,96	24,84
20-004-RRD2	10,14	21,04	20,91
20-004-RRD3	10,14	19,03	18,88
20-004-RRD4	10,22	22,57	22,45
20-004-RRD5	9,54	21,35	21,2

(Fuente: Propia)

De igual forma empleado los datos promedio de la Tabla 3.20 se calcula la diferencia conjunta con los valores de las muestras con resina antes y después del ensayo para obtener el valor teórico de pérdida promedio del recubrimiento en peso de las probetas luego del ensayo. Los resultados de este cálculo para las muestras con superficie fresada y rectificada se presentan en la Figura 3.6. La desviación estándar para el lote de muestras fresadas y rectificadas es de 0,03 y 0,016 gramos, respectivamente.

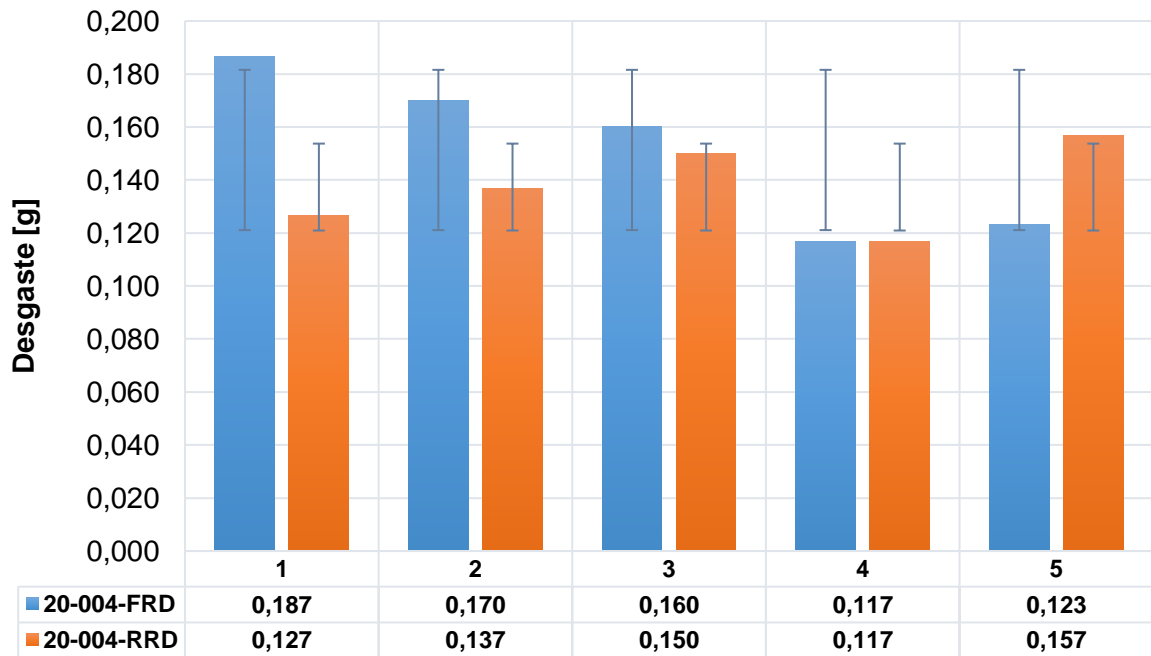


Figura 3.6. Valores de desgaste promedio en las probetas de fresado y rectificado  
Fuente: (Propia)

### 3.1.7 Resultados del ensayo de corrosión









En el presente apartado se visualizan los resultados de las probetas sometidas al ensayo de corrosión mediante la cámara salina, la Tabla 3.21 muestra los valores correspondientes al peso de cada una de las probetas para una determinada semana de exposición y de igual forma en la Tabla 3.22 hasta la Tabla 3.31 se presenta una breve descripción de lo observado en las macrografías tomadas de las muestras luego de ser sometidas a una limpieza y lavado.

Tabla 3.21. Resultados de los pesos obtenidos para las probetas del ensayo de corrosión

<b>Pesos de las Probetas [g]</b>					
<b>Probeta</b>	<b>Antes del Ensayo</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>
20-004-FC1	11,431	11,416	11,406	11,386	11,333
20-004-FC2	10,612	10,606	10,586	10,566	10,533
20-004-FC3	10,455	10,440	10,426	10,406	10,360
20-004-FC4	10,753	10,756	10,726	10,700	10,656
20-004-FC5	10,884	10,856	10,836	10,803	10,766
20-004-RC1	9,954	9,956	9,936	9,920	9,873
20-004-RC2	10,390	10,366	10,366	10,360	10,313
20-004-RC3	10,097	10,116	10,096	10,076	10,036
20-004-RC4	9,941	9,956	9,930	9,920	9,863
20-004-RC5	10,041	10,046	10,036	10,016	9,986


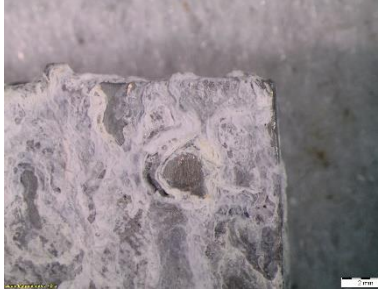






(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC1

20-004-FC1			
Semana	Macrografía 4x	Macrografía 8x	Observación
1			En las macrografías se observa la acumulación de una especie de partículas blancas que generan una cobertura alrededor de la muestra. En las zonas libres de estas partículas se aprecian mínimos desprendimientos del recubrimiento galvánico.
2			La cobertura de estas partículas empieza a generar una tonalidad amarillenta. Se visualizan más espacios libres y se aprecian nuevamente mínimos daños en el recubrimiento galvánico.
3			Se observa mayor área rodeada del color amarillento que se generó en la superficie de la probeta, de igual forma se aprecia una menor concentración de partículas blanquecinas. En las esquinas se observa deterioro del recubrimiento galvánico.
4			Se aprecia que la zona amarillenta incrementa con el pasar del tiempo, la acumulación de partículas blanquecinas es menor que en la primera semana y los daños en el recubrimiento son mínimos a simple vista.




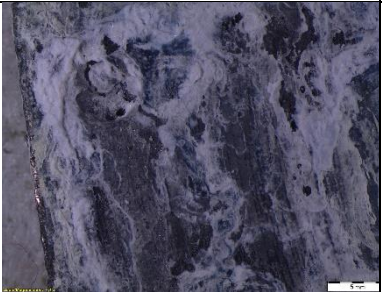




(Fuente: Propia)

Tabla 3.23. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC2

20-004-FC2			
Semana	Macrografía 4x	Macrografía 8x	Observación
1			Se visualiza acumulación de partículas blancas en la superficie de la probeta, las zonas libres de cobertura son muy reducidas, y se aprecian mínimas pérdidas del recubrimiento.
2			En la acumulación de la capa blanquecina comienza a visualizarse tonos amarillentos. De manera visual se aprecia que la distribución de las zonas amarillentas es menor que en las evidenciadas en la probeta FC1.
3			Se observa que la acumulación de las partículas blanquecinas se mantiene presente sobre la superficie de la probeta, se aprecia que las zonas amarillentas se extienden en las muestras, se observa desprendimiento de galvanizado en las zonas libres de solución.
4			El tono amarillento producido en la superficie de la muestra luce con una tonalidad más oscura y se evidencia desprendimiento de material en las esquinas de la probeta. La acumulación de la capa blanquecina se mantuvo constante en las mismas zonas.




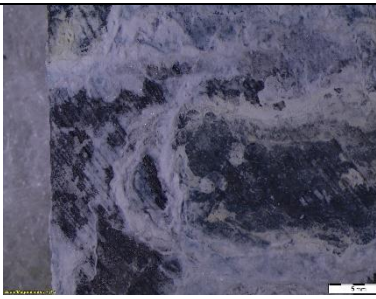




(Fuente: Propia)

Tabla 3.24. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC3

<b>20-004-FC3</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			Se aprecia una acumulación de partículas blanquecinas como en los casos anteriores. Además, se puede observar ciertas irregularidades en la superficie de la probeta que puede generarse debido al acabado superficial y el proceso de galvanizado al que fue sometida la muestra.
2			Se visualiza una acumulación de la capa blanquecina cerca de los bordes de la probeta, dentro de esta capa se aprecia la aparición de pequeños puntos a manera de picaduras.
3			Se observa que el tono amarillento que toma lugar en la superficie de la muestra genera una forma de elipse dentro de la zona de la capa blanquecina. Existen zonas libres en los bordes de la probeta donde se registra un mínimo desprendimiento de material.
4			Se observa una vez más la incidencia de la capa blanquecina en la superficie de la probeta, en las zonas libres de estas partículas se logra apreciar desprendimiento del recubrimiento galvánico. Las secciones con tono amarillento se tornan más oscuras.




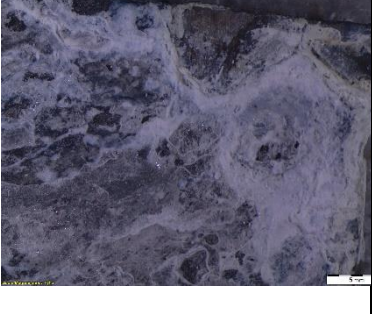

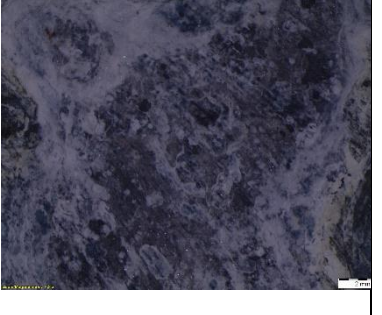

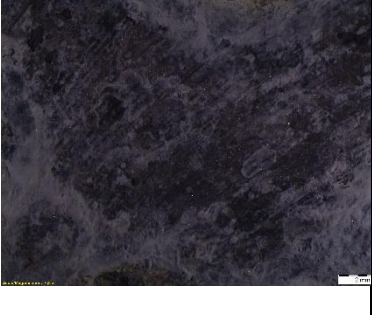
(Fuente: Propia)

Tabla 3.25. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC4

20-004-FC4			
Semana	Macrografía 4x	Macrografía 8x	Observación
1			Se puede apreciar acumulación de partículas blanquecinas que recaen en el centro de la probeta, el borde superior e inferior de la muestra se observan libres de formaciones, sin embargo, debido a un depósito irregular del recubrimiento cercano a la zona superior de la probeta se puede visualizar un punto sin incidencia de esta capa blanquecina.
2			Se observa una acumulación de capa blanquecina con espacios libres en la zona central de la probeta, en estos espacios se aprecia mínimos daños del recubrimiento galvánico.
3			El tono amarillento generado en la superficie se aprecia en la periferia y zona central de la probeta. La acumulación de la capa blanquecina visualizada, llena y cubre el resto de la probeta.
4			Se observa que el tono amarillento recae en el centro de la probeta y en el costado izquierdo de la macrografía. Se visualiza desprendimiento de recubrimiento galvánico en los bordes de la muestra.

(Fuente: Propia)



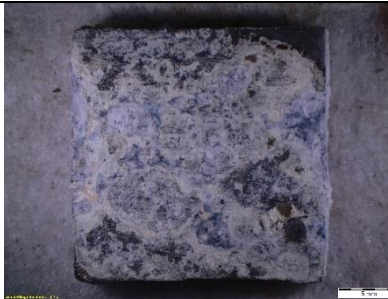
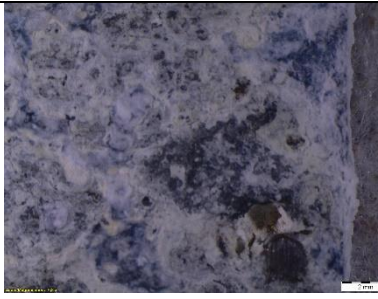




Tabla 3.26. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-FC5

20-004-FC5			
Semana	Macrografía 4x	Macrografía 8x	Observación
1			Se puede observar la presencia de partículas blancas que cubre la mayor área de la superficie de la probeta, excepto por una pequeña área en forma triangular.
2			Los bordes de la probeta presentan mínimo tono amarillento. Es evidente la acumulación de la capa blanca en la cara de la probeta y ciertos espacios libres en los cuales se observan una mínima pérdida de recubrimiento.
3			La zona central de la probeta presenta una reducción de la capa blanca a diferencia de la periferia de la muestra. Se evidencia la formación de la capa amarillenta característica de esta semana.
4			Se observa un aumento de la zona amarillenta en la periferia de la capa blanca dentro de la sección central de la muestra. El desgaste del recubrimiento se aprecia de manera mínima en los espacios libres.

(Fuente: Propia)




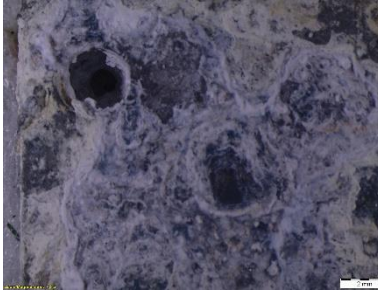
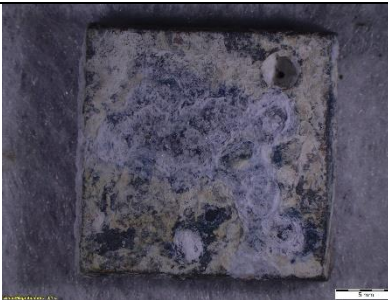





Tabla 3.27. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC1

<b>20-004-RC1</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			Se aprecia la acumulación de partículas blancas en el centro de la probeta. En las zonas libres de la superficie se observa mínimo desprendimiento de recubrimiento galvánico.
1			Se distingue un tono amarillento que se origina desde las zonas que presentan acumulaciones de capa blanca. Las zonas libres de la superficie de la muestra una vez más se observan con un mínimo desprendimiento de recubrimiento galvánico.
3			Se puede apreciar que la zona amarillenta se extiende cubriendo mayor área en la superficie de la probeta y se observa una reducción de la capa blanca.
4			Se observa que la zona amarillenta se extiende y llega a cubrir más de la mitad de la superficie de la muestra. En las zonas libres de la probeta se distingue desprendimiento del recubrimiento galvánico.



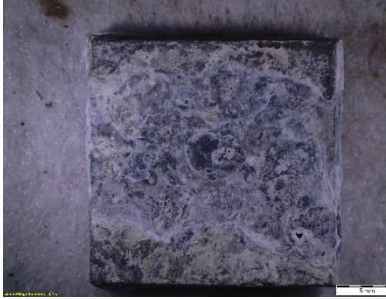
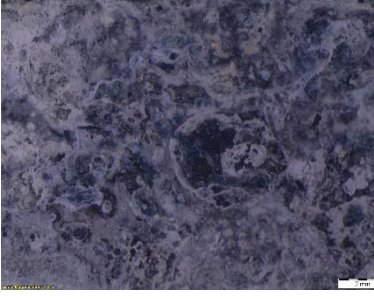
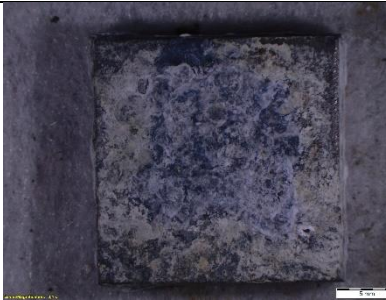
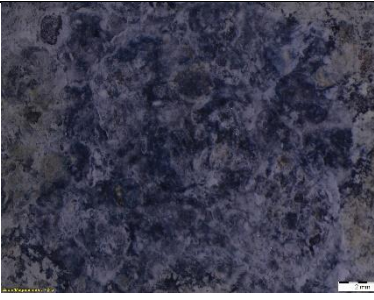

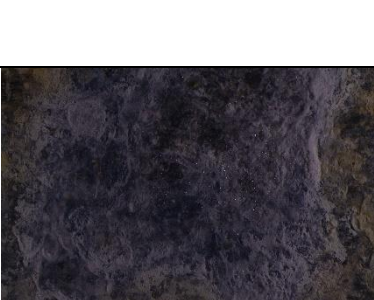
(Fuente: Propia)

Tabla 3.28. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC2

<b>20-004-RC2</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			Se observan que las esquinas y ciertas zonas en la parte central de la superficie se muestran libres de partículas, mientras que el resto de la probeta se ve cubierta por completo con la capa blanca característica.
2			Se aprecia de forma visual pérdida de recubrimiento en los espacios libres de partículas blanquecinas sobre la superficie de la probeta y se observa de igual manera que el tono amarillento se hace presente en la parte exterior que rodea a la muestra.
3			Se evidencia que la capa blanquecina formada toma incidencia en la mayor parte de la superficie de la muestra, el tono amarillento empieza a formarse en los bordes y se dirige hacia el centro de la probeta.
4			Se observa que el color amarillento toma lugar desde los bordes y va avanzando hacia el centro de la muestra, rodeando la capa blanquecina que se aprecia reducida.






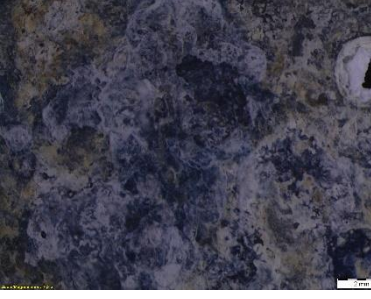


(Fuente: Propia)

Tabla 3.29. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC3

<b>20-004-RC3</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			Se logra visualizar la acumulación de partículas blancas que cubren la mayor parte de la superficie de la probeta. En los pequeños espacios libres no se aprecia desprendimiento de recubrimiento galvánico.
2			En el borde superior e inferior se visualiza el crecimiento de la zona amarillenta. Se aprecia que la capa blanca se extiende a lo largo de la superficie y se acumula en la parte central de la probeta.
3			Se observa que la zona con color amarillento toma mayor extensión desde los bordes hasta la periferia de la superficie y en el centro de la muestra se conserva en mayor proporción de la capa blanca. Se visualizan mínimos espacios libres de cualquier componente externo e interno.
4			Se aprecia que el tono amarillento tiene un color más opaco, y su extensión incrementa sobre la superficie de la probeta. Se identifica que la capa blanca se mantiene en el centro de la probeta.



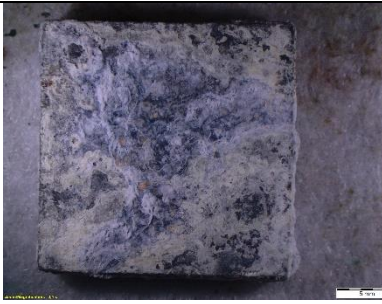
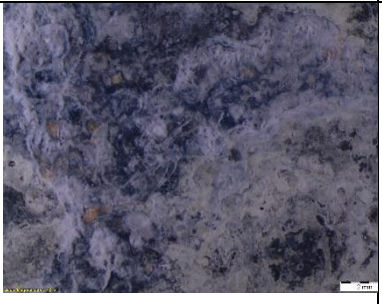




(Fuente: Propia)

Tabla 3.30. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC4

<b>20-004-RC4</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			La probeta se ve cubierta en mayor cantidad de una capa blanquecina, a excepción del borde derecho de la macrografía donde se observan zonas libres de esta capa. El agujero libre pertenece a la muestra.
2			Se observa un tono amarillento que se extiende desde los bordes de la probeta hacia el centro de la misma. Los pequeños espacios libres no presentan a simple vista pérdida de recubrimiento galvánico.
3			Se visualiza que la tonalidad amarillenta se torna más oscura que se extiende y adhiere en gran medida a la superficie del recubrimiento. El borde izquierdo de la macrografía no presenta pérdida de recubrimiento galvánico visible.
4			Se evidencia una reducción de la capa blanquecina sobre la superficie de la muestra, el tono amarillento se extiende abarcando una mayor proporción.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.31. Macrografías ensayo de corrosión probeta 20-004-RC5

<b>20-004-RC5</b>			
<b>Semana</b>	<b>Macrografía 4x</b>	<b>Macrografía 8x</b>	<b>Observación</b>
1			La superficie de la probeta se observa cubierta de partículas blancuecinas que se adhieren al recubrimiento galvánico.
2			Se observa un tono amarillento que se origina desde los bordes hacia el centro de la muestra. De manera adicional se aprecian pequeños puntos de color café rojizo en el centro de la probeta.
3			Se observa que la zona amarillenta se torna más oscura desde los bordes de la muestra. Se visualiza un mínimo desprendimiento de galvanizado en las zonas libres de la capa blancuecina.
4			Se observa la periferia de la superficie de la probeta cubierta por una tonalidad amarillenta, su adherencia y extensión es fuerte sobre el recubrimiento. Se visualizan en las zonas de los bordes desprendimientos mínimos de recubrimiento.

(Fuente: Propia)

## Pérdida de Material

En base a la Tabla 3.21, se presentan los valores de pérdida de material promedio y desviación estándar para cada semana, estos dos últimos parámetros se calculan para verificar que no exista dispersión de los datos y así generar una correcta interpretación de los mismos. Para el cálculo se considera el valor absoluto de cada medición, los resultados se muestran en la Tabla 3.32 y Tabla 3.33.

Para las probetas con superficie fresadas y rectificadas los valores de desviación estándar obtenidos oscilan entre 0,006 y 0,011 gramos respecto al promedio, esto indica un comportamiento homogéneo durante el ensayo.

Tabla 3.32. Pérdida de material por corrosión para probetas fresadas

<b>Pérdida de Material [g]</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>
20-004-FC1	0,015	0,010	0,020	0,053
20-004-FC2	0,005	0,020	0,020	0,033
20-004-FC3	0,016	0,013	0,020	0,047
20-004-FC4	-0,033	0,030	0,027	0,043
20-004-FC5	0,028	0,020	0,033	0,037
<b>Promedio</b>	0,019	0,019	0,024	0,043
<b>Desviación Estándar</b>	0,011	0,008	0,006	0,008

(Fuente: Propia)

Tabla 3.33. Pérdida de material por corrosión para probetas rectificadas

<b>Pérdida de Material [g]</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>
20-004-RC1	-0,002	0,020	0,017	0,047
20-004-RC2	0,024	0,000	0,007	0,047
20-004-RC3	0,019	0,02	0,02	0,040
20-004-RC4	0,015	0,027	0,01	0,057
20-004-RC5	-0,015	0,01	0,02	0,030
<b>Promedio</b>	0,015	0,015	0,015	0,044
<b>Desviación Estándar</b>	0,008	0,011	0,006	0,010

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.7 se observa la pérdida de material en función del tiempo para el proceso de fresado.

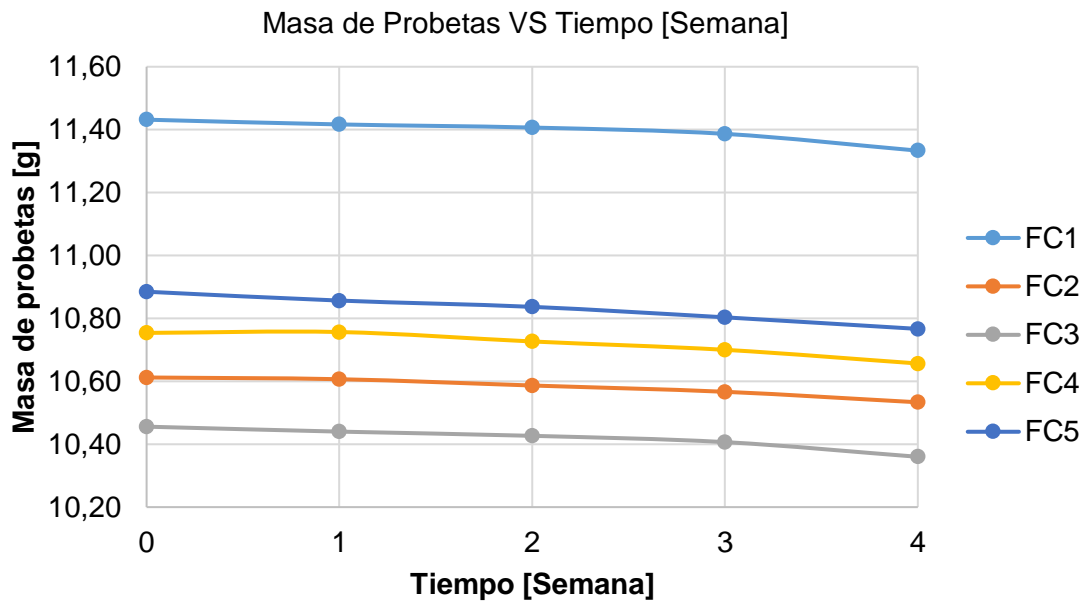


Figura 3.7. Pérdida de material en función del tiempo para el proceso de fresado  
Fuente: (Propia)

En la Figura 3.8 se observa la pérdida de material en función del tiempo para el proceso de rectificado.

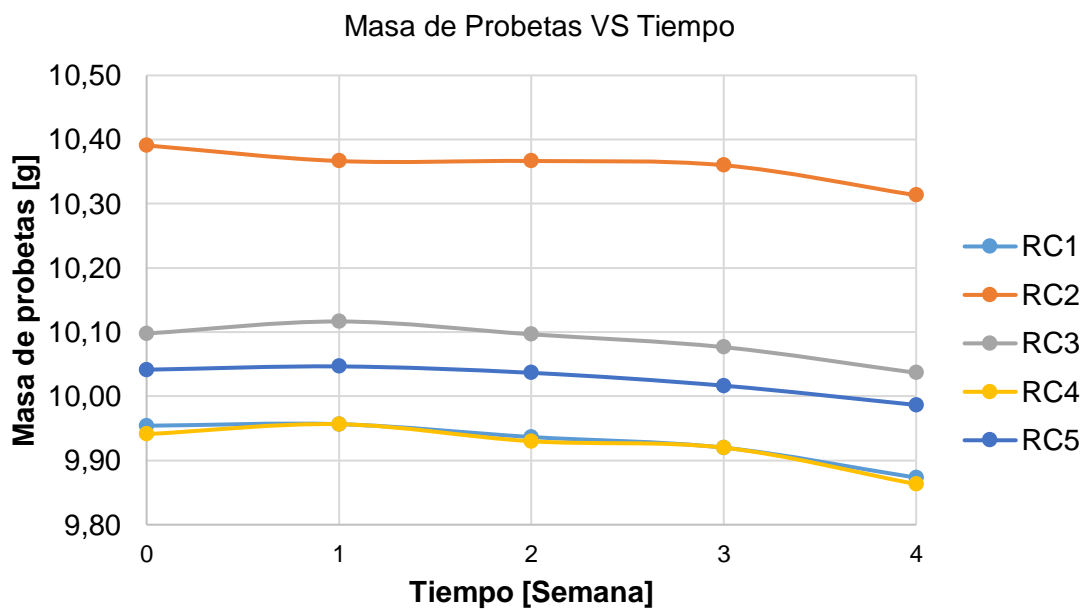


Figura 3.8. Pérdida de material en función del tiempo para el proceso de rectificado  
Fuente: (Propia)

En el ANEXO X se visualiza las metalografías y valores de espesor de recubrimiento correspondientes a las muestras luego de ser ensayadas en el cámara de corrosión de niebla salina, de igual forma se procede a medir el espesor de recubrimiento remanente mediante el software AutoCAD para cada una de las muestras. Los resultados son comparados con los espesores iniciales de la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

En la Tabla 3.34 y Tabla 3.35 se presenta la comparación de valores de espesores antes y después del proceso de corrosión.

Tabla 3.34. Comparación de espesores probetas fresadas

		20-004-FC1	20-004-FC2	20-004-FC3	20-004-FC4	20-004-FC5
<b>Espesor Promedio Antes del Ensayo</b>	$\mu\text{m}$	77,47	107,01	112,78	84,70	143,67
<b>Espesor Promedio Después del Ensayo</b>	$\mu\text{m}$	119,16	26,46	21,82	29,06	35,77
<b>Diferencia de Espesor</b>	$\mu\text{m}$	-41,69	80,55	90,96	55,64	107,90
<b>Porcentaje de Pérdida</b>	%	-	75,27	80,66	65,69	75,10

(Fuente: Propia)

Tabla 3.35. Comparación de espesores probetas rectificadas

		20-004-RC1	20-004-RC2	20-004-RC3	20-004-RC4	20-004-RC5
<b>Espesor Promedio Antes del Ensayo</b>	$\mu\text{m}$	93,53	69,14	76,03	94,01	96,91
<b>Espesor Promedio Después del Ensayo</b>	$\mu\text{m}$	27,78	22,95	119,27	17,44	48,26
<b>Diferencia de Espesor</b>	$\mu\text{m}$	65,75	46,19	-43,24	76,57	48,65
<b>Porcentaje de Pérdida</b>	%	70,29	66,81	-	81,45	50,20

(Fuente: Propia)

### Velocidad de Corrosión

En la Tabla 3.36 y 3.37 se expresan los resultados de velocidad de corrosión obtenidos para cada semana. En el ANEXO VIII se detalla el ejemplo de cálculo para estos valores.



Tabla 3.36. Velocidad de corrosión para probetas fresadas

<b>Velocidad de corrosión [mm/año]</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Semanas</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>20-004-FC1</b>	2,847	1,898	3,796	10,058
<b>20-004-FC2</b>	0,949	3,796	3,796	6,263
<b>20-004-FC3</b>	3,037	2,467	3,796	8,920
<b>20-004-FC4</b>	-6,263	5,693	5,124	8,161
<b>20-004-FC5</b>	5,314	3,796	6,263	7,022

(Fuente: Propia)

Tabla 3.37. Velocidad de corrosión para probetas rectificadas

<b>Velocidad de corrosión [mm/año]</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Semanas</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>20-004-RC1</b>	-0,380	3,796	3,226	8,920
<b>20-004-RC2</b>	4,555	0,000	1,328	8,920
<b>20-004-RC3</b>	3,606	3,796	3,796	7,591
<b>20-004-RC4</b>	2,847	5,124	1,898	10,818
<b>20-004-RC5</b>	-2,847	1,898	3,796	5,693

(Fuente: Propia)

En las Figuras 3.9 y 3.10 se puede visualizar la velocidad de corrosión promedio de los lotes de estudio para cada semana.

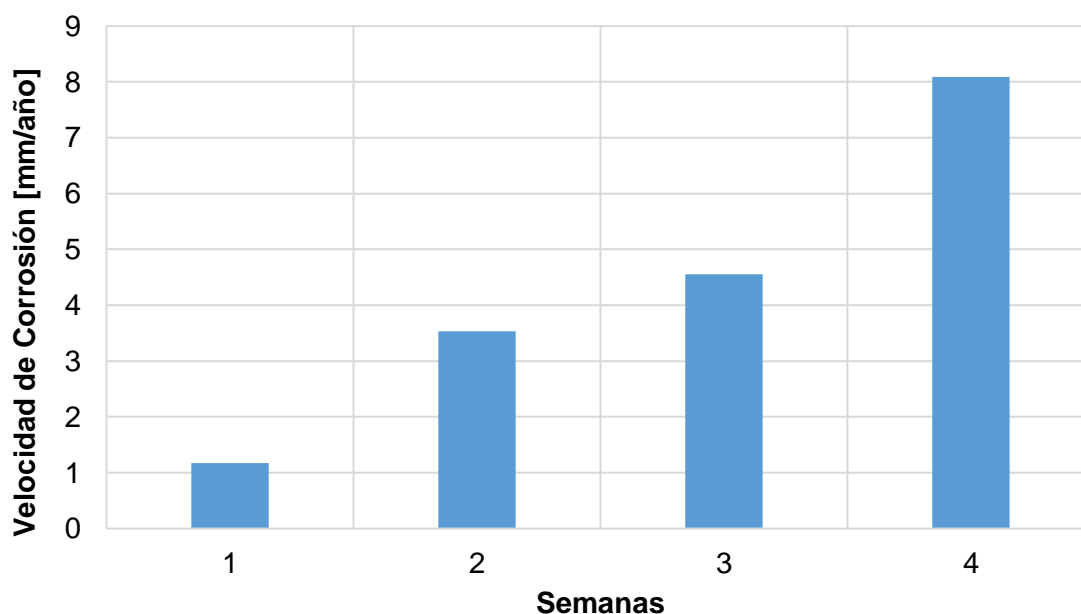


Figura 3.9. Velocidad de corrosión promedio VS Tiempo para las probetas de fresado  
Fuente: (Propia)

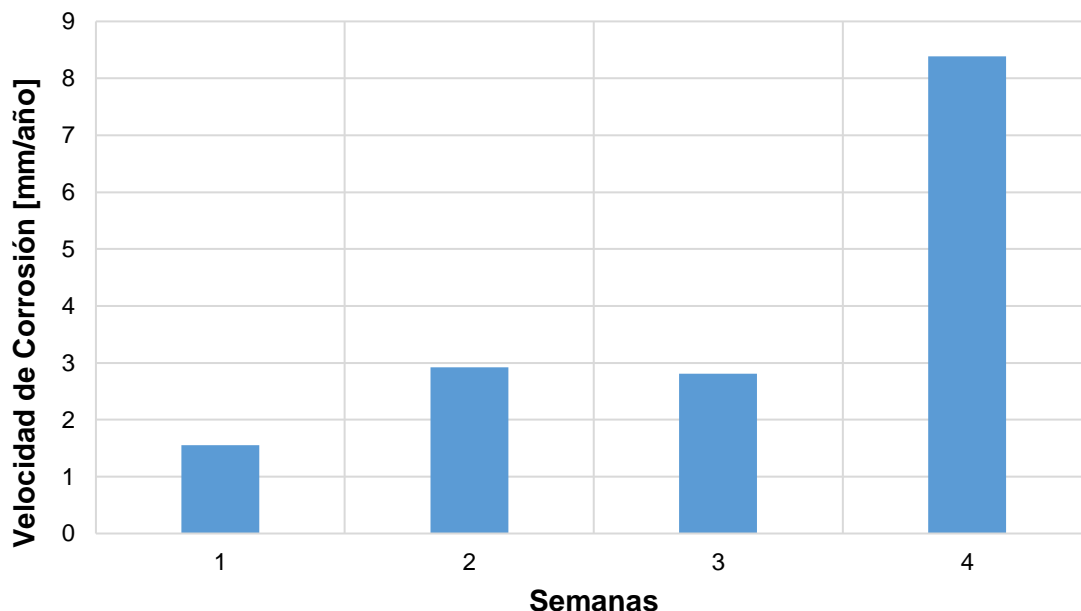


Figura 3.10. Velocidad de corrosión promedio VS Tiempo para las probetas de rectificado  
Fuente: (Propia)

### 3.1.8 Resultados del ensayo de adherencia pull-off

El ensayo de pull-off utilizando el medidor automático de adherencia por arranque, permite obtener el valor de esfuerzo, carga de fractura (considerando el área de estudio de 10 milímetros de diámetro del dado de arranque) y el tipo de fractura presentada. Los resultados se encuentran tabulados en las Tablas 3.38 y 3.39. De igual forma del equipo se obtienen las gráficas de la carga aplicada versus el tiempo de desprendimiento de las probetas ensayadas junto con las macrografías del dado y la probeta empleadas, todo esto se detalla en el ANEXO IX.

Tabla 3.38. Resultados del ensayo de Pull-Off empleando el medidor automático de adherencia en el lote de probetas fresadas

Probeta	Esfuerzo Fractura [MPa]	Carga Fractura [N]	Tipo de fractura	Tiempo hasta la fractura [s]
20-004-FA1	>16,57	>1301,41	100% B/Y	>21,75
20-004-FA2	>13,33	>1046,94	100% B/Y	>17,64
20-004-FA3	>13,04	>1024,16	100% B/Y	>17,30
20-004-FA4	>13,19	>1035,94	100% B/Y	>17,35
<b>Promedio</b>	>14,03	>1102,11	100% B/Y	>18,51
<b>Desv. Estand.</b>	1,69	133,19	NA	2,17

(Fuente: Propia)

Tabla 3.39. Resultados del ensayo de Pull-Off empleando el medidor automático de adherencia en el lote de probetas rectificadas

Probeta	Esfuerzo Fractura [MPa]	Carga Fractura [N]	Tipo de fractura	Tiempo hasta la fractura [s]
20-004-RA1	>11,73	>921,27	100% B/Y	>15,75
20-004-RA2	>13,28	>1043,01	100% B/Y	>17,80
20-004-RA3	>12,02	>944,05	100% B/Y	>15,95
20-004-RA4	>14,85	>1166,32	100% B/Y	>19,70
<b>Promedio</b>	>12,97	>1018,66	100% B/Y	>17,30
<b>Desv. Estand.</b>	1,42	111,73	NA	1,85

(Fuente: Propia)

En las Figuras 3.11 y 3.12 se visualiza la relación entre el parámetro de adherencia con los de dureza y rugosidad para cada lote de probetas mecanizadas.

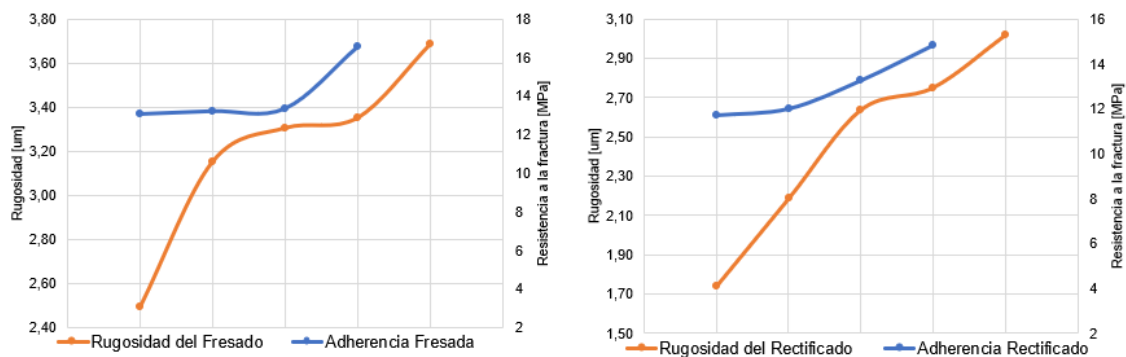


Figura 3.11. Rugosidad VS Adherencia de ambos procesos de mecanizado  
Fuente: (Propia)

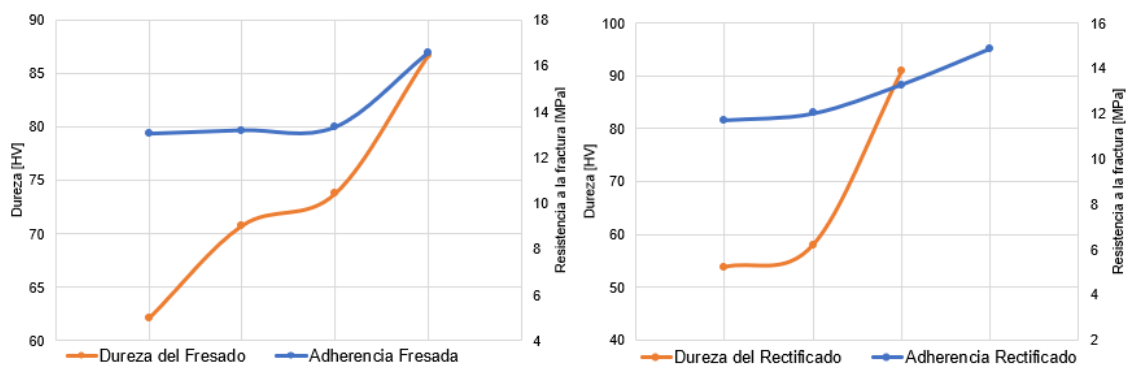


Figura 3.12. Dureza VS Adherencia de ambos procesos de mecanizado  
Fuente: (Propia)

### 3.1.9 Resultados del ensayo de adherencia en caliente

Resultados de las medidas en peso tomadas de las muestras antes de ser ingresadas en el horno eléctrico. Tabla 3.40 y Tabla 3.41.

Tabla 3.40. Resultados de las probetas fresadas antes del ensayo de adherencia en caliente

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-FT1	24,81	24,84	24,83	24,83
20-004-FT2	24,62	24,63	24,62	24,62
20-004-FT3	25,25	25,26	25,26	25,26
20-004-FT4	24,62	24,63	24,62	24,62
20-004-FT5	24,47	24,48	24,49	24,48
<b>Desviación Estándar</b>				0,31

(Fuente: Propia)

Tabla 3.41. Resultados de las probetas rectificadas antes del ensayo de adherencia en caliente

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-RT1	24,18	24,20	24,18	24,19
20-004-RT2	23,67	23,68	23,67	23,67
20-004-RT3	22,87	22,88	22,87	22,87
20-004-RT4	23,24	23,25	23,24	23,24
20-004-RT5	23,29	23,30	23,30	23,30
<b>Desviación Estándar</b>				0,49

(Fuente: Propia)

Los resultados de la Tabla 3.42 y 3.43 reflejan las medidas en peso tomadas de las muestras después de ser ingresadas en el horno eléctrico a una temperatura de 200 °C durante 60 minutos, para probetas fresadas y rectificadas, respectivamente.

Tabla 3.42. Resultados de las probetas fresadas después del ensayo a 200 °C.

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-FT1	24,81	24,82	24,81	24,81
20-004-FT2	24,62	24,62	24,63	24,62
20-004-FT3	25,26	25,25	25,24	25,25
20-004-FT4	24,63	24,63	24,62	24,62
20-004-FT5	24,46	24,44	24,47	24,46
<b>Desviación Estándar</b>				0,30

(Fuente: Propia)

Tabla 3.43. Resultados de las probetas rectificadas después del ensayo a 200 °C.

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-RT1	24,17	24,18	24,18	24,18
20-004-RT2	23,67	23,68	23,66	23,67
20-004-RT3	22,87	22,88	22,87	22,87
20-004-RT4	23,22	23,22	23,21	23,22
20-004-RT5	23,3	23,29	23,31	23,30
<b>Desviación Estándar</b>				0,49

(Fuente: Propia)

Los resultados de la Tabla 3.44 y 3.45 reflejan las medidas en peso tomadas de las muestras después de ser ingresadas en el horno eléctrico a una temperatura de 300 °C y 400 °C durante 6 horas, respectivamente.

Tabla 3.44. Resultados de las probetas fresadas y rectificadas después del ensayo a 300 °C.

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-FT2	24,64	24,63	24,64	24,64
20-004-FT3	25,28	25,28	25,27	25,28
20-004-RT2	23,7	23,71	23,7	23,70
20-004-RT3	22,88	22,87	22,86	22,87
<b>Desviación Estándar</b>				1,06

(Fuente: Propia)

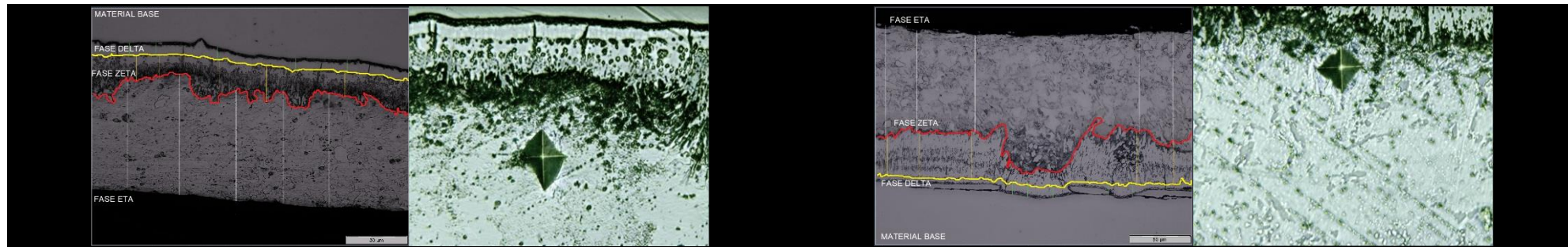
Tabla 3.45. Resultados de las probetas fresadas y rectificadas después del ensayo a 400 °C.

<b>Probeta</b>	<b>Medición 1</b> [g]	<b>Medición 2</b> [g]	<b>Medición 3</b> [g]	<b>Promedio</b> [g]
20-004-FT4	24,7	24,69	24,71	24,70
20-004-FT5	25,52	25,51	25,52	25,52
20-004-RT4	23,38	23,38	23,38	23,38
20-004-RT5	23,31	23,30	23,31	23,31
<b>Desviación Estándar</b>				1,07

(Fuente: Propia)

Para la Tabla 3.46 hasta la Tabla 3.50 se visualizan en color rojo los valores que no cumplen con el apartado 8.10.3 de la norma ASTM E 384 que señala que la mitad de la longitud de una de las diagonales del indentador no puede variar en 5% de la mitad de la longitud restante, por ende, estos valores son descartados y no se consideran en el cálculo del promedio.

Tabla 3.46. Resultados de micro-durezas para las probetas FT1 y RT1 a 200° C



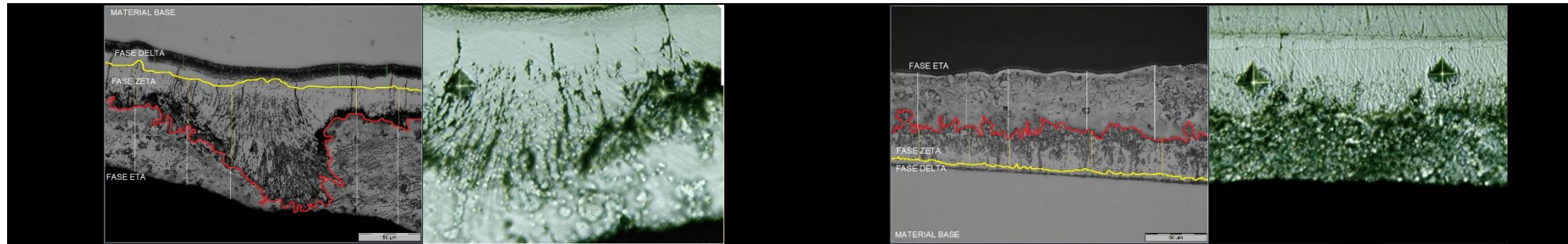
Se visualiza la presencia de tres fases, las cuales fueron caracterizadas con anterioridad, se observa el predominio de la fase eta ( $\eta$ ) en el espesor del recubrimiento y una limitación marcada entre cada interfase. A pesar de que los datos registrados de dureza no califican debido a la condición de las diagonales mediante la norma ASTM E 384, es evidente que el valor promedio obtenido corresponde a la dureza representativa de la fase eta ( $\eta$ ). Se aprecia cerca de la interfaz sustrato-recubrimiento la formación de una capa oscura delgada .

Se observa el predominio de la fase eta ( $\eta$ ) sobre el resto de las capas en el recubrimiento galvanico; en el caso de la fase zeta ( $\zeta$ ) se puede visualizar que la forma y disposición de los cristales es delgada y aleatoria con dirección hacia el borde exterior, para la fase delta ( $\delta$ ) se aprecia de forma visual una constante en su espesor. El valor promedio de dureza obtenido para la muestra es característico de la fase eta ( $\eta$ ). Una vez más se logra apreciar cerca de la interfaz sustrato-recubrimiento la formación de la capa oscura, para este caso se aprecia con un espesor reducido.

Temperatura [200 °C]	Medición de probeta FT1						Medición de probeta RT1					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
D1	21,94	24,32	26,68	24,7	24,56	23,97	24,21	30,98	23,99	24,32	23,73	24,67
D2	26,94	29,91	33,7	30,61	30,6	31,08	25,64	33,57	25,02	27,54	27,3	25,4
Promedio	24,44	27,12	30,19	27,66	27,58	27,53	24,93	32,28	24,51	25,93	25,52	25,04
Diferencia	9,28	9,34	10,42	9,65	9,87	11,44	2,79	3,86	2,06	5,85	6,54	1,44
Dureza	77,6	63,03	50,84	60,6	60,93	61,17	74,61	44,49	77,17	68,93	71,19	73,94
Promedio de Dureza [HV]	62,36						67,55					
Desviación Estándar [HV]	NA						15,44					

(Fuente: Propia)

Tabla 3.47. Resultados de micro-durezas para las probetas FT2 y RT2 a 300° C



Se visualiza la conservación de las tres fases dentro del recubrimiento, para el valor de temperatura empleado se observa un crecimiento de la fase zeta ( $\zeta$ ) que atraviesa el largo del espesor y se proyecta en el borde exterior del galvanizado; la capa oscura que se aprecia cercana al material base se evidencia con un espesor más extenso que en el caso anterior, rodeando las inmediaciones de la fase delta ( $\delta$ ). Los valores de dureza registrados son característicos de la fase delta ( $\delta$ ) y fase zeta ( $\zeta$ ), 179 HV y 244 HV, respectivamente.

Se observa una delimitación marcada para cada interfase dentro del recubrimiento, el desarrollo de la fase zeta ( $\zeta$ ) es evidente comparándola con el caso anterior a una temperatura de 200 °C, los cristales presentan una forma consolidada y de manera gradual tienden a proyectarse hacia el exterior del galvanizado; para el caso de la fase eta ( $\eta$ ) se visualizan pequeñas formaciones circulares dispersas por toda la capa. La formación de la capa oscura cercana al material base, se observa con un espesor más uniforme. Los valores de dureza registrados son característicos de la fase zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ).

Temperature [300 °C]	Medición de probeta FT2						Medición de probeta RT2					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
D1	9,97	11,27	13,88	16,85	14,23	14,35	18,87	24,91	22,93	19	14,71	15,07
D2	9,97	11,75	14,23	17,81	14,71	15,78	22,65	27,65	26,33	19,81	14,97	16,38
Promedio	9,97	11,51	14,06	17,33	14,47	15,07	20,76	26,28	24,63	19,41	14,84	15,73
Diferencia	0,00	2,04	1,23	2,70	1,63	4,53	8,34	4,95	6,46	2,04	0,87	4,00
Dureza	466,26	350,04	234,62	154,35	221,31	204,24	107,52	67,11	76,41	123,12	210,59	187,55
Promedio de Dureza [HV]	271,80						147,09					
Desviación Estándar [HV]	115,09						64,91					

(Fuente: Propia)

Tabla 3.48. Resultados de micro-durezas para las probetas FT3 y RT3 a 300° C



Se visualiza una vez más el desarrollo de las tres fases características del recubrimiento, plenamente delimitadas. En referencia a la fase delta ( $\delta$ ) se observa nuevamente la capa oscura cercana al sustrato, se aprecia un crecimiento en el espesor de la misma. La apariencia de la fase zeta ( $\zeta$ ) se aprecia en dos tonalidades, la tonalidad clara presenta una estructura consolidada mientras que la oscura envuelve a los cristales que se proyectan hacia el borde exterior del galvanizado. Los valores de dureza obtenidos son característicos de esta última y de la fase delta ( $\delta$ ).

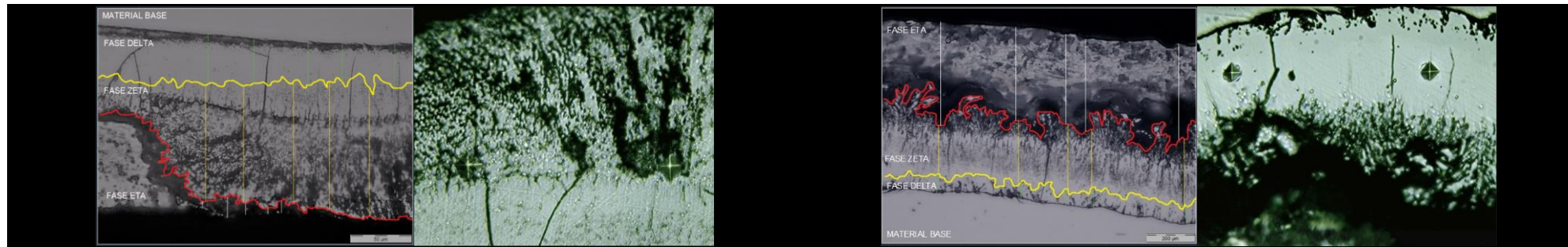
Se observan tres fases dentro del recubrimiento, se aprecia tanto para la fase delta ( $\delta$ ) y zeta ( $\zeta$ ) una estructura consolidada con cristales cortos en el borde de esta última fase. En referencia a la fase eta ( $\eta$ ) se visualiza la formación de inclusiones en ciertas zonas de la capa, similares a los cristales característicos de la fase zeta ( $\zeta$ ). La capa oscura cercana al sustrato no presenta un crecimiento considerable con el aumento de la temperatura, tal y como en casos anteriores para este lote de estudio. Los valores de dureza obtenidos son característicos de la fase eta ( $\eta$ ).

Temperatura [200 °C]	Medición de probeta FT3						Medición de probeta RT3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
D1	15,32	18,64	15,18	26,1	15,79	10,44	32,5	18,98	27,51	18,74	21,83	25,62
D2	16,01	20,4	15,47	29,21	16,26	10,44	34,52	21,47	29,78	20,16	23,72	26,21
Promedio	15,67	19,52	15,33	27,66	16,03	10,44	33,51	20,23	28,65	19,45	22,78	25,92
Diferencia	2,15	4,31	0,94	5,32	1,45	0,00	2,93	5,80	3,81	3,52	3,98	1,13
Dureza	188,86	121,03	197,29	60,6	180,53	425,34	41,28	113,36	56,48	122,50	89,35	69,03
Promedio de Dureza [HV]	222,61						75,73					
Desviación Estándar [HV]	170,22						31,52					

(Fuente: Propia)



Tabla 3.49. Resultados de micro-durezas para las probetas FT4 y RT4 a 400° C



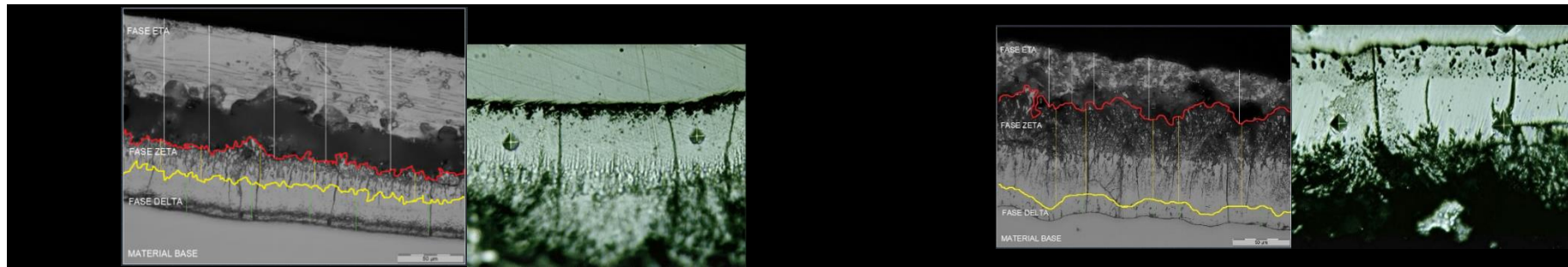
Se visualiza el desarrollo de las tres fases características del recubrimiento, se observa un cambio de tonalidad en la fase eta ( $\eta$ ) y una reducción en el espesor de la capa delta ( $\delta$ ). Se aprecia un crecimiento en la fase zeta ( $\zeta$ ) con una sección en la base más consolidada, mientras que la segunda con tonalidad más oscura y cercana al borde exterior, abarca un conjunto de cristales delgados a manera de ramificaciones. Se evidencia de manera visual una reducción en el espesor de la capa oscura cercana al sustrato. Los valores de dureza obtenidos son representativos de la fase delta ( $\delta$ ).

Se aprecia un desarrollo de la fase zeta ( $\zeta$ ), donde la forma de los cristales se visualiza más alargados a manera de agujas; la fase eta ( $\eta$ ) muestra una tonalidad oscura y se observan ciertas inclusiones cercanas al borde exterior del recubrimiento. En referencia a la fase delta ( $\delta$ ) se percibe una reducción en el espesor de la capa y la zona oscura cerca a las inmediaciones del sustrato se muestra más delgada, casi imperceptible. Los valores de dureza obtenidos en la muestra son representativos de esta última fase.

Temperatura [400 °C]	Medición de probeta FT4						Medición de probeta RT4					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
D1	15,78	13,18	20,54	9,13	11,28	10,79	10,91	11,15	11,53	10,21	10,33	10,91
D2	17,32	16,37	20,87	11,15	12,47	11,86	11,3	11,87	11,62	10,68	10,67	11,41
Promedio	16,55	14,78	20,71	10,14	11,88	11,33	11,11	11,51	11,58	10,45	10,50	11,16
Diferencia	4,45	9,74	0,79	9,06	4,77	4,51	1,73	3,03	0,39	2,20	1,59	2,19
Dureza	169,25	212,29	108,09	450,7	328,91	361,18	375,96	349,97	346,02	425,03	420,11	371,98
Promedio de Dureza [HV]	241,86						381,51					
Desviación Estándar [HV]	122,45						33,94					

(Fuente: Propia)

Tabla 3.50. Resultados de micro-durezas para las probetas FT5 y RT5 a 400° C



Se visualiza, para el caso de la fase delta ( $\delta$ ), una reducción en el espesor de la capa y la consolidación de una tonalidad oscura cercana al sustrato, en el caso de la fase zeta ( $\zeta$ ) se observan dos zonas, el área clara presenta una disposición más consolidada y la zona oscura abarca los cristales de tamaño grueso representativos de la capa; se visualiza la predominancia de la fase eta ( $\eta$ ) en el espesor del galvanizado. Los valores de dureza obtenidos son representativos de la fase delta ( $\delta$ ) y las orillas de la interfase con el material base

Se visualiza que el espesor de la fase delta ( $\delta$ ) se mantiene constante y presenta su aspecto de estructura consolidada característica, la zona oscura cercana al sustrato se muestra ampliamente reducida. La fase zeta ( $\zeta$ ) se observa alargada y abarca la mayor mayor parte del espesor del galvanizado; una vez más se presentan dos zonas con tonalidades distintas, una clara y otra oscura, dentro del área clara se visualizan fisuras que atraviesan el espesor de la capa, mientras que el área oscura aloja los cristales delgados en forja de aguja característicos. Los valores de dureza obtenidos son representativos de la fase delta ( $\delta$ ) y la interfaz con el material base.

Temperatura [400 °C]	Medición de probeta FT5						Medición de probeta RT5					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
D1	16,26	9,76	10,72	10,01	9,41	9,61	12,11	12,01	10,59	9,98	13,18	14,14
D2	16,87	10,56	11,03	10,92	10,44	11,03	12,22	12,93	10,91	10,56	14,13	16,97
Promedio	16,57	10,16	10,88	10,47	9,93	10,32	12,17	12,47	10,75	10,27	13,66	15,56
Diferencia	1,81	3,79	1,41	4,17	4,93	6,44	0,45	3,56	1,47	2,75	3,36	8,34
Dureza	168,85	449,24	392,11	423,34	470,66	435,06	313,40	298,13	401,09	439,61	248,64	191,62
Promedio de Dureza [HV]	380,84						340,17					
Desviación Estándar [HV]	122,08						78,20					

(Fuente: Propia)

En las Tablas 3.51 y 3.52 muestran el resumen de las mediciones de los espesores y fases presentes en el galvanizado para los lotes de estudio, los cuales fueron sometidos a distintas temperaturas. Las micrografías y la totalidad de los datos obtenidos se presentan en el ANEXO XII.

Tabla 3.51. Espesores del recubrimiento galvánico bajo distintos valores de temperatura

<b>Valores del espesor de Galvanizado</b>						
<b>Temperatura [°C]</b>	200		300		400	
<b>Probetas</b>	<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>	<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>	<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>
<b>Valor máximo [µm]</b>	124,97	132,65	116,96	88,40	147,24	177,69
<b>Valor mínimo [µm]</b>	120,51	126,50	95,56	85,22	138,95	141,82

(Fuente: Propia)

Tabla 3.52. Espesores de las fases del galvanizado bajo distintos valores de temperatura

<b>Valores del espesor de las fases del galvanizado</b>							
<b>Temperatura [°C]</b>		200		300		400	
<b>Probetas</b>		<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>	<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>	<b>Fresado</b>	<b>Rectificado</b>
<b>Fase Eta</b>	<b>Valor máximo [µm]</b>	99,12	92,55	58,24	52,13	76,30	98,94
	<b>Valor mínimo [µm]</b>	89,47	78,99	50,42	57,39	12,38	49,42
<b>Fase Zeta</b>	<b>Valor máximo [µm]</b>	30,04	43,51	28,41	39,50	130,68	76,68
	<b>Valor mínimo [µm]</b>	18,10	31,76	20,17	27,43	51,60	20,73
<b>Fase Delta</b>	<b>Valor máximo [µm]</b>	10,47	10,58	20,04	10,72	10,47	18,69
	<b>Valor mínimo [µm]</b>	9,34	9,65	19,47	5,85	7,45	16,06

(Fuente: Propia)

Se calculó la diferencia porcentual para los valores de dureza entre los datos de las muestras sin proceso térmico (Tablas 3.9 hasta la 3.18), con las muestras sometidas a diferentes temperaturas del presente estudio (Tablas 3.44 hasta la 3.48). Referente a los datos de espesor de galvanizado se empleó para los lotes sin proceso térmico el ANEXO VI, y para las muestras sometidas a diferentes temperaturas el ANEXO XII.

### **Comparación de dureza y el espesor de las muestras entre las probetas sin proceso térmico con las sometidas a 200 °C**

Comparando los datos antes mencionados, se evidencia que los valores de dureza obtenidos en ambos lotes de mecanizado, corresponden al valor característico de la fase eta ( $\eta$ ) del recubrimiento, en concordancia con la investigación de (Rico & Carrasquero, 2017).

Para el caso del lote con superficie fresada la diferencia porcentual promedio encontrada fue de 15,44% mientras que la diferencia para el lote de probetas rectificadas no pudo ser calculada puesto a que los valores de dureza de la muestra RM1, sin proceso térmico, fueron descartados; por otro lado, la muestra RT1 registró un valor de dureza promedio de 67,55 HV.

Comparando el espesor del recubrimiento galvánico de ambos lotes, se obtuvo una diferencia porcentual de 65,21% entre la muestra FM1 y FT1, para el caso de las fases presentes la diferencia porcentual promedio para la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) corresponde a 58,96%, 41,18% y 57,05%, respectivamente. Entre la probeta RM1 y RT1 la diferencia porcentual fue de 28,17%; mientras que la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) del recubrimiento corresponde a 24,35%, 71,86% y 42,78%, respectivamente.

### **Comparación de dureza y el espesor de las muestras entre las probetas sin proceso térmico con las sometidas a 300 °C**

Para este caso las durezas son comparados con la referencia encontrada en la investigación de (Yraima & Carrasquero, 2017) donde se especifica una dureza representativa de 244 HV y 179 HV para la fase delta ( $\delta$ ) y zeta ( $\zeta$ ), respectivamente. En el lote con superficie fresada se halla que el valor de dureza de la muestra FT2 se tomó del área perteneciente a la capa delta ( $\delta$ ) con 271,80 HV; de manera que la diferencia porcentual promedio encontrada es de 10,22%. Por otro lado, en la muestra FT3 se aprecia un valor representativo de la capa zeta ( $\zeta$ ) de 222,61 HV, generando una diferencia porcentual promedio con el valor de referencia de 19,60%.

Respecto al lote con superficie rectificada se observa que el valor de dureza obtenida en la muestra RT2 corresponde a la zona de la capa zeta ( $\zeta$ ) con 147,09 HV; obteniendo una diferencia porcentual promedio con la probeta RM2 de 17,83%. En cuanto a la probeta RT3 los valores de dureza obtenidos pertenecen a la zona de la capa eta ( $\eta$ ) y fueron comparados con el valor promedio registrado para la muestra RM3, sin proceso

térmico, debido a que se encuentran dentro del mismo rango de medida; la diferencia porcentual promedio generada entre estas muestras es considerable, reflejando un 28,87%.

Para el espesor de galvanizado en las probetas del lote con superficie fresada FT2 y FT3, se encontró una diferencia porcentual del 8,50% y 15,27% comparando con los valores iniciales de las muestras. Los espesores para la fase eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) de la probeta FT2 presentaron una diferencia porcentual de 25,56%, 58% y 1,90%. En el caso de la probeta FT3 se obtuvo 33,33%, 8,19% y 13,27%, respectivamente.

Para las probetas rectificadas RT2 y RT3 el espesor del galvanizado generó una diferencia del 18,87% y 23,04%, respectivamente. Las fases eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) manifestaron una diferencia del 27,93%, 55,24% y 61,13% para la primera muestra y 35,59%, 40,43% y 44,11% para el caso de la última probeta.

### **Comparación de dureza y el espesor de las muestras entre las probetas sin proceso térmico con las sometidas a 400 °C**

Respecto a las muestras sometidas a una temperatura de 400 °C los valores fueron obtenidos de las indentaciones realizadas en la capa delta ( $\delta$ ), generando una medida de 241,86 HV en la probeta FT4; de manera que la diferencia porcentual promedio encontrada es de 36,04%. Por otro lado, en la muestra FT5 se obtuvo una magnitud representativa de la misma capa con 380,84 HV, con una diferencia porcentual promedio de 35,93%. Para el caso del lote con superficie rectificada se observa que el valor de dureza obtenido en la muestra RT4 corresponde a la zona de la capa delta ( $\delta$ ) con 381,51 HV, proporcionando una diferencia porcentual promedio de 36,04%. De igual forma en la probeta RT5 los valores registrados pertenecen a la zona de la capa delta ( $\delta$ ) con un valor de 240,17 HV, la diferencia porcentual calculada es de 1,58%. Todos los datos de dureza obtenidos para ambos lotes fueron comparados con los valores de referencia señalados en el estudio de (Yraima & Carrasquero, 2017) para el cálculo de la diferencia porcentual, esto debido a que los resultados de dureza previos al ensayo de temperatura son característicos de otra fase presente en el recubrimiento.

En las muestras del lote con superficie fresada la diferencia porcentual promedio registrada del espesor del recubrimiento total para las muestras FT4 y FT5 son de 42,47% y 3,29%, respectivamente. Por otro lado, la diferencia porcentual encontrada para los datos obtenidos en los diferentes espesores para las fases eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) en la primera probeta es de 84,5%, 86,11% y 71,98%; de igual forma en la

última muestra los valores de diferencia porcentual obtenidos son de 0,84%, 66,34% y 57,56%, respectivamente.

El lote de muestras con superficie rectificadas, muestra RT4 y RT5, en cuanto a la diferencia porcentual del espesor total del recubrimiento se establece en 47,09% y 31,68%, respectivamente. De manera análoga se calcula la diferencia porcentual promedio del espesor de cada capa del galvanizado, obteniendo lo que respecta a la capa eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y delta ( $\delta$ ) para la primera muestra los valores de 37,59%, 18,48% y 17,34%, respectivamente; en el caso de la última muestra estas diferencias son 2,91%, 52,67% y 48%.

### **3.1.10 Resumen de resultados de los lotes de estudio ensayados**

Finalmente, en la Tabla 3.53 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada ensayo. En ella se evalúa colocando un punto en la probeta que manifiesta un mejor resultado en comparación a su recíproco del lote contrario. Cabe mencionar que los parámetros calificados en cada ensayo se encuentran codificados con tonalidades características; tonalidad verde para los parámetros esperados y deseados para las muestras; tonalidad amarilla para aquellos parámetros que dependen de factores secundarios para su correcto desarrollo y finalmente la tonalidad roja para aquellos indicativos indeseables en el recubrimiento de un elemento mecánico. Por otro lado, las casillas marcadas con la abreviación NC (No califica) se les otorga a aquellas muestras cuyos valores fueron descartados por inconsistencia durante el ensayo o de por sí, no fueron ensayados.

De esa forma se evidencia que las probetas fresadas presentaron mayor dureza en el recubrimiento, el espesor total y de las fases de galvanizado y la resistencia a la adherencia por medio del ensayo de pull-off en comparación del lote de muestras rectificadas. En el parámetro de adherencia por temperatura se colocó la puntuación en las probetas que presentaron mejoría en el valor de dureza, espesor de recubrimiento y tuvieron menor pérdida de masa del galvanizado a los diferentes rangos de temperatura ensayados, esta selección se realizó para cada muestra de los lotes y de esta manera se le otorgó un punto. Para el ensayo de corrosión y desgaste las probetas rectificadas tuvieron mejor rendimiento, generando menos pérdida de material en ambas experimentaciones, debido a su acabado superficial y la disposición que el recubrimiento generaba sobre las probetas.

Tabla 3.53. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados al lote de probetas fresadas y rectificadas

Codificación	Material	Plancha de acero estructural A -36											
	Contenido de silicio	Bajo contenido de silicio < 0,0050%											
	Ensayo de tracción	Cumple con los requerimientos (NORMA ASTM E 8)											
	Ensayo de composición química	Cumple con los requerimientos (NORMA NTE INEN 2215:2020)											
	Acabado superficial	Probetas con superficie fresada					Total (/5)	Probetas con superficie rectificada					Total (/5)
	Numeración de probeta	F1	F2	F3	F4	F5		R1	R2	R3	R4	R5	
20-004-M	Dureza del recubrimiento	1	NC	1	1	0	3	NC	1	0	NC	1	2
	Espesor de fase delta	1	1	0	0	1	3	0	0	1	1	0	2
	Espesor de fase eta	0	1	1	0	1	3	1	0	0	1	0	2
20-004-A	Adherencia Pull - off	1	1	1	0	NC	3	0	0	0	1	NC	1
20-004-T	Adherencia por temperatura	0	1	1	0	1	3	1	0	0	1	0	2
20-004-M	Espesor de recubrimiento	0	1	1	0	1	3	1	0	0	1	0	2
	Espesor de fase zeta	1	0	1	0	1	3	0	1	0	1	0	2
20-004-RD	Rugosidad superficial	1	1	0	1	1	4	0	0	1	0	0	1
	Desgaste	1	1	1	1	0	4	0	0	0	1	0	1
20-004-C	Corrosión (Pérdida de espesor de recubrimiento)	0	1	1	0	1	3	1	0	0	1	0	2
	Corrosión (Pérdida de peso de recubrimiento)	1	1	1	1	1	5	0	0	0	0	0	0
	Corrosión (Velocidad de Corrosión)	1	0	1	0	1	3	0	1	0	1	0	2

Fuente: (Propia)

## **3.2 Discusión**

### **3.2.1 Análisis de los resultados del ensayo de tracción**

Empleando lo estipulado en la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R) se comparan los requerimientos del acero con los resultados del ensayo de tracción descritos en la Tabla 3.2. Se puede evidenciar mediante las curvas de Esfuerzo-Deformación, Figura 3.1 y el ANEXO IV, los valores de esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación que presentaron las probetas ensayadas cumplen con los requerimientos mínimos de 250 MPa, 400 a 550 MPa y 21%, establecidos por la norma.

### **3.2.2 Análisis de los resultados del ensayo de composición química**

Los valores referenciados en la norma NTE INEN 2215:2012 se emplean para comparar los resultados del ensayo descrito en la Tabla 3.4.

Respecto a los valores permisibles estipulados por la norma en la Tabla 3.3, relacionados a los elementos químicos como el carbono, azufre, silicio y fósforo; se comprueba que el acero empleado es un material con bajo contenido de silicio y cumple con la composición química para un acero ASTM A36 ya que los datos se encuentran bajo el valor de referencia.

Empleando la Tabla 1.7 se observa que en los aceros con bajo contenido de silicio la fase zeta ( $\zeta$ ) no se desarrolla considerablemente durante el tiempo de inmersión del galvanizado y su crecimiento se desacelera pronto, sin embargo, los recubrimientos presentan la formación definida de la fase delta ( $\delta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ). El material empleado en el estudio presenta este comportamiento, por lo que se lo clasifica dentro de la categoría de acero de bajo contenido de silicio, por lo cual no se presenta el fenómeno Sandelin dentro de la estructura del recubrimiento.

La correcta composición química de las muestras analizadas en este estudio, muestran un óptimo galvanizado en caliente que se caracteriza por mantener un color plateado brillante, el estudio realizado por (Tenas S.A, 2000) permite confirmar este hecho.



### **3.2.3 Análisis de los parámetros del proceso de galvanizado**

Los parámetros empleados por la empresa GALVANORTE CIA. LTDA fueron una temperatura de baño y tiempo de inmersión de 450 °C y 2 minutos respectivamente, la composición química del baño de galvanizado corresponde a 99,99% de zinc puro y el otro 0,01% restante en aleaciones utilizadas para mejorar el baño.

Empleando el diagrama de la investigación de (MaaB, 2011) en la Figura 1.8, se localizan los valores obtenidos en la Tabla 3.8 de espesor de recubrimiento, donde se ratifica que estos valores se encuentran en el rango de 60 a 75  $\mu\text{m}$  para los parámetros del proceso señalado, independiente del acabado superficial al que hayan sido sometidas las muestras. De igual forma al comparar estas magnitudes con los valores de requerimiento mínimo para placas expresados por la norma ASTM A 123 mostrados en la Tabla 3.7 se confirma que el espesor de recubrimiento de galvanizado de las muestras analizadas cumple el requerimiento mínimo estipulado por la norma, con un valor de 65 [ $\mu\text{m}$ ] para placas de acero estructural. Se registra altos valores de recubrimiento en la probeta FM3 y FM5 para fresado y la probeta RM4 y RM5 para rectificado.

### **3.2.4 Análisis de los resultados del ensayo de micro-dureza y metalografía**

Mediante los valores obtenidos de micro-dureza debido a las marcas del indentador, se puede constatar que los resultados fueron tomados dentro de la fase eta ( $\eta$ ), debido a que esta se visualiza en mayor proporción dentro de los recubrimientos y se encuentra en un rango de 38,15 a 78,39  $\mu\text{m}$  para las muestras fresadas y de 36,96 a 61,75  $\mu\text{m}$  para las rectificadas según los resultados visualizados en la Tabla 3.11 y Tabla 3.12.

De la Tabla 1.6 se observa que los valores de dureza Vickers promedio para las fases del recubrimiento galvánico se encuentra entre 60 a 85 Vickers que comparado con el estudio realizado por (Chukhin, Andrianov, & Spitsov, 2018) (70 HV) se determina que se encuentra dentro del rango para la fase eta ( $\eta$ ). Mediante estos parámetros se da constancia de la existencia de esta fase en las muestras analizadas ya que los resultados obtenidos mediante el ensayo tienen un promedio de.

Referente a la fase delta ( $\delta$ ) y zeta ( $\zeta$ ) que usualmente toman lugar en los recubrimientos galvánicos a una temperatura de inmersión baja (445°C hasta 480°C), no se lograron obtener valores de dureza Vickers durante el ensayo que caractericen claramente a estas fases, sin embargo, teniendo en cuenta lo señalado en la investigación de (Kuklik

& Kudlacek, 2016), donde mencionan que durante el baño de galvanizado, el zinc se difunde de manera parcial sobre la superficie del sustrato, dando lugar a una solución primaria de hierro alfa ( $\alpha$ ) sobre la capa superficial. Sobre esta solución y con el calentamiento suficiente de la superficie, las fases de aleación delta ( $\delta$ ) y zeta ( $\zeta$ ) comienzan inmediatamente a crecer y su grosor dentro del recubrimiento galvánico estará ligado al tiempo de inmersión del baño. Teniendo en cuenta que las muestras analizadas en el presente estudio corresponden a un acero con bajo contenido de silicio y fueron sometidas a un tiempo de inmersión corto durante el proceso de galvanizado, se corrobora la presencia de la capa zeta ( $\zeta$ ) en forma de capa delgada, estrechamente unida a la fase delta ( $\delta$ ), tal como se observa dentro de las Tablas 3.9 hasta la 3.18.

La razón por la cual varias de las medidas registradas por el indentador no cumplen con lo establecido en la norma ASTM E 384 se debe a que las marcas realizadas abarcan las fases presentes en el recubrimiento, este mismo resultado se vio evidenciado en la investigación realizada por (Chico, 2018). De las tres fases mencionadas la primera tiene la característica de ser dura, por lo que el indentador penetra menos, y las otras dos fases son más suaves permitiendo que el indentador penetre más, de esa forma las esquinas opuestas de la marca se mostrarán en diferentes planos, lo que provoca una diferencia pronunciada entre sus diagonales.

Tal como se especifica en el ANEXO VII, se identifica la fase delta ( $\delta$ ), zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ) en los recubrimientos galvánicos y comparando los resultados obtenidos de dureza Vickers se logra evidenciar que el valor máximo en las probetas fresadas fue de 86,65 HV y en las rectificadas de 90,99 HV, con una diferencia porcentual del 4,77%. En el caso del valor de dureza mínima en las probetas fresadas se obtuvo 62,14 HV y en las rectificadas 53,86 HV, con una diferencia porcentual del 13,32%.

La diferencia porcentual para ambos procesos de mecanizado es mínima, por lo cual, al profundizar en la estructura del recubrimiento galvánico de cada una de las muestras, se encuentra una relación descendente entre el valor de dureza de la fase eta ( $\eta$ ) en relación a las formaciones presentes en la fase zeta ( $\zeta$ ).

En este sentido, comparando los resultados con los de la investigación de (Chico, 2018), estos valores se ordenan en función del más alto al más bajo de la siguiente manera: Formaciones de cristales delgadas similares a agujas registrarán los valores de dureza más altos, si estos cristales poseen espesores más gruesos el valor de dureza del recubrimiento disminuirá. Además, si la fase zeta ( $\zeta$ ) presenta una combinación de cristales inmersos en una capa de zinc se obtendrán valores más pequeños de dureza.

En el caso de contemplar únicamente aleación de zinc, fase eta ( $\eta$ ), se obtendrán los valores de dureza más bajos en las muestras, Figuras 3.2 y 3.3.

De esta manera se determina en base a las características estructurales de los recubrimientos y diferencia porcentual calculada, que los valores de dureza para las muestras con superficie fresada y rectificada se mantienen dentro del mismo rango, ya que en base a lo mencionado en los estudios realizados por (Caicedo, Valdés, & Coronado, 2005) y (Chico, 2018), se contrasta que la dureza del recubrimiento en las muestras del presente estudio no depende del proceso de mecanizado ejecutado en el material base, más bien se ve afectado por la formación, tamaño y arreglo de los cristales individuales en cada una de las fases junto con los parámetros en el proceso de aplicación de la capa de galvanizado en el sustrato.

### **3.2.5 Análisis de los resultados del ensayo de rugosidad**

Mediante la Figura 3.4 y la Figura 3.5, se observa que el valor máximo y mínimo de rugosidad promedio, para el caso de las probetas fresadas corresponde a 3,38  $\mu\text{m}$  y 2,49  $\mu\text{m}$ , respectivamente, mientras que para las probetas rectificadas se tiene un valor de 3,02  $\mu\text{m}$  y 1,74  $\mu\text{m}$ . En el ANEXO XI se visualiza el valor de rugosidad producido por operaciones comunes de mecanizado obtenido de (ASM Handbook Committee, 1995); los valores que se resaltan dentro de las marcas rojas corresponden a los rangos de rugosidad promedio obtenidos, y encajan dentro del valor esperado para cada proceso. Se visualiza que los rangos de rugosidad para las muestras con superficie fresada se encuentran dentro de los valores en aplicaciones frecuentes y para el caso de las muestras con superficie rectificada, se encuentran dentro de la categoría de aplicaciones menos frecuentes, bordeando el área de aplicaciones frecuentes.

Según la investigación realizada por (Seré, Culcasi, Elsner, & Di Sarli, 1997) y (Galvanizing Handbook, 2019) la rugosidad del sustrato se puede ver afectada por las herramientas de corte empleadas en los diferentes procesos de mecanizado y se consolidarán en un parámetro que influya significativamente en las características de los recubrimientos de manera que si aumenta su rugosidad, el tamaño de grano de zinc se verá disminuido y se desarrollará con una textura basal<sup>3</sup> definida, además de incrementar el espesor del recubrimiento galvánico, este último se contrasta con los valores reflejados en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6 del presente estudio donde es evidente

---

<sup>3</sup> Que cuenta con una textura separada y definida.

que las probetas fresadas tienen un mayor espesor de galvanizado respecto a las probetas rectificadas. Dicho esto de los resultados obtenidos se verifica que los valores de rugosidad promedio son mayores para las probetas con superficie fresada que las de superficie rectificada.

Además, se confirma que el acabado superficial empleado en el presente estudio influyó en el proceso de degradación de las muestras, siendo más perjudicial para las probetas que presentan mayor rugosidad puesto a que el depósito de partículas y contaminantes llegan a comprometer el material base y favorecer la pérdida del recubrimiento a diferencia de las probetas con acabado liso y con rangos de valores de rugosidad relativamente bajos, como es el caso de las muestras con superficie rectificada, esto se contrasta con el trabajo realizado por (Chico, 2018) y (Pardo, 2006) donde se presentan resultados similares.

### **3.2.6 Análisis de los resultados del ensayo de desgaste**

De los resultados visualizados en la Figura 3.6, se obtiene una pérdida de recubrimiento predominante para el lote de muestras con superficie fresada, específicamente para la probeta FRD1 con 0,187 gramos y una pérdida mínima para la probeta FRD4 con 0,117 gramos.

Para el caso de las muestras con superficie rectificada se registra una pérdida de recubrimiento máxima en la probeta RRD5 con 0,157 gramos de desgaste y una pérdida mínima para la muestra RRD4 de 0,117 gramos, este último coincide con el valor mínimo de pérdida obtenido para las muestras fresadas.

De la investigación realizada por (Gómez, 2005) se señala que el desgaste de los recubrimientos se debe a varios factores como son la estructura del material, acabado y condiciones superficiales brindado a las muestras, además del estudio de (Gonzalez, Vargas, & Esperanza, 2007) se observa que la muestra que presentó mayor valor de desgaste también mantiene la mayor cantidad de rugosidad superficial con magnitudes de 0,0075 gramos y 8,31  $\mu\text{m}$ , respectivamente. De esta forma contrastando los resultados obtenidos de rugosidad y desgaste para el lote de probetas con superficie fresada del presente estudio, se corrobora que las muestras que presentan una mayor rugosidad están relacionadas con las probetas que presentan mayor desgaste por abrasión.

### **3.2.7 Análisis de los resultados del ensayo de corrosión**

Los datos de pérdida de espesor, material y velocidad de corrosión obtenidos se contrastan con las macrografías presentes en las Tablas 3.22 hasta la 3.31, donde luego del lavado de las probetas las acumulaciones de solución salina se desprenden del material eliminando parte del recubrimiento, además, se visualiza la formación de una capa blanquecina debido al óxido de zinc, misma que se encuentra rodeada de una capa secundaria de color amarillenta y anaranjada, atribuida a la interacción del cloro y el oxígeno con el hierro y carbono del sustrato. Debido a que el ensayo de corrosión con cámara de niebla salina simula condiciones extremas para las muestras es evidente una reducción y agrietamiento del recubrimiento galvánico. Los resultados obtenidos son comparados con el estudio realizado por (Navarrete & Salgado, 2007), donde se esclarece y justifica cada una de estas formaciones suscitadas durante el proceso de corrosión.

Referente a la pérdida de espesor de recubrimiento, la máxima diferencia registrada para las probetas con superficie fresada y rectificada es de 107,90  $\mu\text{m}$  y 76,57  $\mu\text{m}$ , respectivamente; generando una diferencia porcentual considerable entre estas magnitudes de 29,04%, por otro lado, la diferencia mínima calculada para las muestras con superficie fresadas fue de 55,64  $\mu\text{m}$  y para probetas rectificadas de 46,19  $\mu\text{m}$ , proporcionando una diferencia porcentual de 16,98%, Tablas 3.34 y 3.35.

En el ANEXO X se detallan los resultados de pérdida de material en el recubrimiento, obtenido por diferencia de pesos para ambos lotes, se registra el máximo valor para probetas fresadas en 0,118 gramos mientras que en probetas rectificadas, se obtiene 0,081 gramos; lo que se traduce a una diferencia porcentual de 31,36%, por otro lado el valor mínimo para las muestras fresadas y rectificadas es de 0,079 y 0,055 gramos, respectivamente; la diferencia porcentual calculada para este caso es de 30,38%.

Lo que concierne a la velocidad de corrosión obtenida, se registra que para la cuarta semana de ensayo el mayor valor registrado para las muestras con superficie fresada es de 10,058 milímetros por año, mientras que en el caso de las muestras con superficie rectificada se observó, para esta misma semana, una velocidad de 10,818 milímetros por año, Tablas 3.36 y 3.37.

Los resultados en cuanto al porcentaje de pérdida de espesor y material del recubrimiento para ambos procesos de mecanizado es significativo y se atribuye, a que las mediciones de espesor, posteriores al ensayo, fueron realizadas en las zonas que

se presentan más afectadas, además, para las muestras sometidas a un proceso de fresado se observa una mayor pérdida de recubrimiento, esto se contrasta con la investigación de (Chico, 2018), donde se señala que una probeta con mayor rugosidad superficial generarán más espacios que favorezcan la acumulación de partículas corrosivas. Respecto a la velocidad de corrosión se evidencia que las probetas rectificadas tienen valores menores que las fresadas, durante las tres primeras semanas, estos resultados se deben al acabado superficial del lote, el cual actúa a manera de barrera y mantiene una superficie menos rugosa, lo que impide que la solución salina y partículas externas afecten la degradación del recubrimiento. Los datos obtenidos se apoyan con la investigación de (Negrón, 2018) e (Hidalgo & Ramos, 2015) donde en los primeros 20 días se observa una velocidad de corrosión constante, en el lapso del día 25 al día 42 la velocidad incrementa y luego decae nuevamente hasta consolidarse en una velocidad de corrosión constante, asemejando un aspecto en forma de campana. Un comportamiento similar se visualiza con las muestras del presente estudio durante los 30 días de ensayo, donde empleando los resultados de pérdida de masa del galvanizado, se definen las curvas de velocidad de corrosión promedio, observando un tramo de tendencia ascendente progresivo para ambos lotes, Figuras 3.9 y 3.10. Además, valores encontrados para las probetas FC1 y RC3, referentes al espesor de galvanizado, Tablas 3.34 y 3.35, la velocidad de corrosión y las macrografías presentes en el ANEXO X, evidencian un incremento en los valores del espesor del recubrimiento luego del ensayo de corrosión, de acuerdo a la investigación de (Navarrete & Salgado, 2007) este fenómeno ocurre cuando la solución salina y partículas corrosivas ingresan y se acumulan en la interfaz sustrato – recubrimiento, debido a defectos o falta de adherencia de la capa de galvanizado, estos agentes al mantener contacto con el sustrato reaccionan generando un desarrollo de óxidos de hierro, zinc y sales corrosivas, dando lugar a la formación de empollamientos que tienden a incrementar, provocando con el tiempo, la falla interna del recubrimiento y el deterioro directo del material base; se registró un comportamiento similar para las probetas anteriormente mencionadas.

De la investigación realizada por (Jiménez, Gil, & Larez, 2006) donde se relaciona las zonas oscuras visibles en las micrografías ópticas que se presentan dentro de la capa eta ( $\eta$ ) con productos de corrosión, se contrasta esta información identificando esta zona en las metalografías obtenidas en el presente estudio como se muestra en la Figura 3.13, esta zona indica una acumulación preferencial de agentes contaminantes debido a la disposición y dirección del rociado y las probetas dentro de la cámara de corrosión,

generando un deterioro leve del recubrimiento de las muestras ya que aún es posible distinguir de forma clara el espesor remanente del galvanizado que envuelve al sustrato.

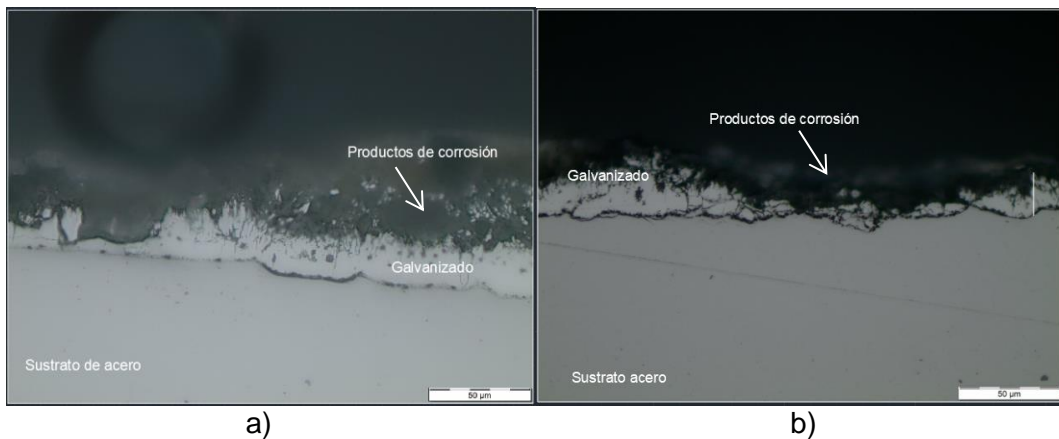


Figura 3.13. Caracterización del recubrimiento de zinc luego de un proceso de corrosión  
a: Probeta fresada, b: Probeta rectificada  
Fuente: (Propia)

Finalmente, en base a la norma ISO 9227:2015 se recomienda que las pruebas de niebla salina sean empleadas sólo como control de calidad para análisis de discontinuidades, poros y daño en la pintura o en ciertos recubrimientos metálicos, mas no como un indicador de la resistencia del recubrimiento a la corrosión durante un periodo de tiempo establecido.

### 3.2.8 Análisis de los resultados del ensayo de adherencia pull-off

Mediante los resultados obtenidos en las Tablas 3.38 y 3.39 se verificó que no se presentó desprendimiento del recubrimiento galvánico para ningún lote analizado, la clase de falla suscitada en cada una de las muestras fue de naturaleza tipo adhesivo, el pegamento suministrado por la empresa MASTERBOND se deprendió del recubrimiento en su totalidad dentro del área de análisis de diez milímetros de diámetro para el dado de arranque utilizado.

El desprendimiento de la capa de galvanizado se generará únicamente al sobrepasar los valores de carga y resistencia de fractura obtenidos; esto se compara con la investigación realizada por (Chico, 2018), donde mediante el ensayo de adherencia con equipo automático Elcometer, empleando muestras con un recubrimiento galvánico promedio de 100 µm de espesor y dados de arranque de 10 milímetros de diámetro se generó desprendimiento entre la interfaz sustrato-recubrimiento, sobrepasando valores de carga y esfuerzo de fractura mayores a 2000 Newtons y 25 MPa, respectivamente, sin embargo, estos valores referenciales tienden a incrementar o reducirse en base a la

disposición y relación que guarden las diferentes fases dentro del recubrimiento, orientación cristalográfica, cuidado de los parámetros en el proceso de galvanizado ejecutado, al igual que el espesor del recubrimiento (Rico & Carrasquero, 2017).

Se determina en base al espesor de los recubrimientos galvánicos de ambos lotes, que en las muestras no se presentó descascaramiento a diferencia de lo que ocurre en elementos con espesores mayores a 300  $\mu\text{m}$  de galvanizado, tal y como lo señala (Galvanizing Handbook, 2019).

Comparando los valores de resistencia de fractura obtenidos, se verifica que el lote de muestras con superficie fresada presenta un valor máximo de 16,57 MPa y mínimo de 13,04 MPa. Para el caso de las muestras rectificadas el valor máximo fue de 14,85 MPa y un mínimo de 11,73 MPa. La diferencia porcentual calculada es de 10,40% y 10,04%, respectivamente.

En base a esto se determina que las muestras con superficie fresada presentan un leve incremento en adherencia del recubrimiento respecto a las muestras rectificadas; además esta diferencia se ve reflejada con los resultados obtenidos para los ensayos de dureza y rugosidad. La disposición y forma cristalográfica presente en la fase zeta ( $\zeta$ ) de ambos lotes, determina la dureza del recubrimiento; en el caso de las probetas fresadas los cristales en esta capa mantienen una disposición alargada a manera de agujas, por lo cual los esfuerzos axiales suministrados en el ensayo deberán ser más elevados para poder separar o desprender dicha fase del recubrimiento. Para el parámetro de rugosidad se puede evaluar las características del comportamiento del agente adhesivo empleado para el ensayo frente a las rugosidades de ambos lotes, donde el mejor perfil de anclaje se registra con los mayores valores de rugosidad superficial, esto se visualiza en las Figuras 3.11 y 3.12.

### **3.2.9 Análisis de los resultados del ensayo de adherencia por temperatura**

En base al apartado 3.1.9 para muestras sometidas a 200 °C, se verifica que los datos de dureza para ambos lotes de mecanizado están acorde al rango de medida de la capa eta ( $\eta$ ). El espesor total de recubrimiento para las probetas fresadas aumentó a diferencia de las probetas rectificadas, debido a la difusión del zinc dentro de las interfases del recubrimiento ocasionado por el proceso térmico. En el caso del espesor de la capa delta ( $\delta$ ) no se produjo un incremento influenciado por el aumento de temperatura en ambos lotes de estudio, mientras que para la fase zeta ( $\zeta$ ), las probetas



rectificadas registraron un crecimiento en su espesor a diferencia de las fresadas, debido a que en la interfaz eta y zeta se producen vacancias generadas por el proceso térmico, que contribuye a la rápida difusión del zinc en esta fase, un fenómeno similar se origina en la investigación realizada por (Chung, Esfahan, Wang, Cook, & Durandet, 2019). En base a las fotografías del ANEXO XII se deduce que no se presentó un cambio ni desprendimiento superficial del recubrimiento de las probetas sometidas a esta temperatura.

En las muestras sometidas a 300 °C se aprecia claramente las fases presentes en el galvanizado. Los datos de dureza para las probetas FT2 y FT3 coinciden con los valores característicos de la fase delta ( $\delta$ ). Para las muestras rectificadas, la probeta RT2 obtuvo la dureza representativa de la capa zeta ( $\zeta$ ), mientras que la probeta RT3 registró un incremento porcentual del 40,61% en la dureza de la fase eta ( $\eta$ ), de la investigación realizada por (Barbato, Ponce, Jara, Cuevas, & Egaña, 2008) se concluye que este incremento se genera debido a la progresiva disminución del tamaño de grano del recubrimiento con el aumento de temperatura, lo que produce una mayor homogeneidad y compactibilidad de los granos de las fases. Para este lote se tiene una predominancia en el espesor de la fase zeta ( $\zeta$ ) y eta ( $\eta$ ) con respecto a las muestras de superficie fresada. Con el aumento de la temperatura las vacancias incrementan en las interfases del galvanizado, lo que origina que la difusión del zinc en contacto con el hierro genere la formación de una capa intermetálica entre el material base y el recubrimiento; estas formaciones proporcionarán una mayor resistencia a agentes corrosivos debido a que actúan a manera de capa protectora de respaldo en situaciones donde la cubierta externa de los recubrimientos llegue a desprenderse, para este estudio se encontraron que dichas formaciones se evidencian en mayor medida para los recubrimientos del lote con superficie fresada, esto se contrasta con el estudio realizado por (Chung, Esfahan, Wang, Cook, & Durandet, 2019). El proceso térmico aplicado no afectó la vida útil del galvanizado, tal como se corrobora en las fotografías del anexo previo.

Según el estudio realizado por (Szatkowska & Jędrzejczyk, 2021) se menciona que al aplicar un tratamiento térmico en recubrimientos de zinc se ven modificadas ciertas propiedades como la dureza del recubrimiento y la resistencia a la abrasión. A temperaturas mayores a 400 °C los valores de micro-dureza en la capa subsuperficial del recubrimiento pueden llegar a incrementarse hasta 2,5 veces el valor referencial y en cuanto a la resistencia a la abrasión a una temperatura de 270 °C hasta 430 °C este parámetro llega a elevarse, lo que se reflejará en la reducción de la pérdida de peso durante la fricción. Esto se compara con los valores de dureza obtenidos para las muestras con superficie fresada sometidas a 400 °C del presente estudio donde se

observa un incremento porcentual que varía desde 58% hasta 72% para la capa delta ( $\delta$ ). Referente a las formaciones en la interfaz sustrato – recubrimiento, para este lote la capa se mantiene constante pese al aumento de temperatura a diferencia de las muestras con superficie rectificada, donde resulta casi imperceptible.

Empleando los resultados obtenidos del peso de las muestras en las Tablas 3.40 hasta la 3.45, se visualiza que la diferencia porcentual obtenida para las muestras de ambos lotes sometidas a 200 °C presenta una leve variación en cuanto a pérdida de masa comparándola con las muestras no tratadas, con una magnitud máxima de 0,08% y mínima de 0,04%. Para el caso de las muestras sometidas a 300 °C y 400 °C se registra un aparente aumento de masa que varía entre 0,079% y 4,25%; este último valor toma lugar en las muestras con superficie fresada; este fenómeno se genera debido al proceso de corrosión que toma lugar mediante la interacción de los parámetros de la rugosidad superficial y la temperatura de ensayo dentro del horno eléctrico puesto a que al generarse más espacios en la superficie del recubrimiento junto con la interacción del oxígeno con el zinc, promueven la formación de capas de óxido de zinc sobre el recubrimiento galvánico traduciéndose así en un incremento de la masa total de la probeta y magnificándose este proceso en los lotes con superficie fresada; esto se contrasta con la información proporcionada por (Lenntech, 2021), donde se menciona que la temperatura, pH y contenido de oxígeno son factores que incrementan el proceso de corrosión en los metales.

De manera adicional en base a la investigación de (Martínez, y otros, 2018) en donde se detalla el estudio del comportamiento de recubrimiento Co – B se estipula que, con la aplicación de temperatura en el recubrimiento, este tiende a incrementar su masa debido a las reacciones del oxígeno con la aleación. Dentro del parámetro de 0 – 200 °C se percibe una reducción en la masa y de 250 °C en adelante el incremento de masa mantiene una tendencia creciente, tal y como sucede en el presente estudio en donde a temperaturas cercanas a los 200 °C se percibe una reducción en la masa y el mayor valor registrado se establece a 300 °C y 400°C.

## 4 CONCLUSIONES

Se logró obtener los parámetros y herramientas que definieron el acabado superficial de las muestras fresadas y rectificadas, para determinar su influencia sobre las propiedades del recubrimiento galvánico.

El contenido de silicio del material base es un factor determinante para la formación de las fases del recubrimiento galvánico ya que este porcentaje junto con el tiempo de permanencia de baño, proporcionan las características adecuadas para el desarrollo de las estructuras del hierro – zinc, difusión del oxígeno y efusión del hidrógeno, además de condicionar el espesor de recubrimiento para una correcta correlación y desarrollo entre las fases.

La formación, tamaño y disposición de las estructuras que tomen lugar en la fase zeta ( $\zeta$ ) del recubrimiento junto con el acabado superficial de las muestras, influyen directamente en el valor de rugosidad registrado, de manera que, si este parámetro es mayor, se visualizará un incremento en el espesor del recubrimiento galvánico.

El espesor de recubrimiento galvánico debe ser seleccionado en función de la aplicación requerida y cumplir con las especificaciones mínimas de la norma ASTM A 123, puesto que altos valores de recubrimiento llegan a comprometer el nivel de adherencia con el sustrato.

El proceso de mecanizado de las muestras influye tanto en el porcentaje de rugosidad de la superficie como en el grado de corrosión generado, ya que una rugosidad elevada producirá la acumulación de agentes corrosivos y partículas externas dentro del recubrimiento, proporcionando una degradación significativa y comprometiendo de manera temprana el material base.

Los valores de dureza de las muestras analizadas no dependen del proceso de mecanizado superficial, dependen de la disposición y tamaño de los cristales de la fase zeta ( $\zeta$ ).

Los elementos sometidos a un proceso de fresado antes del galvanizado serán propensos a generar una fase zeta ( $\zeta$ ) en el recubrimiento en forma de cristales alargados equiaxiales similares a agujas; mismos que al interactuar con las mediaciones

de la fase eta ( $\eta$ ) contribuirán a la rugosidad superficial del galvanizado y de igual manera, esta distribución, favorecerá a la propiedad de dureza del recubrimiento.

Las probetas sometidas a tratamiento térmico de 200 °C no presentan ninguna variación en el aspecto físico ni microestructural del zinc. Tanto los valores de dureza como espesor del galvanizado y sus fases fueron similares antes y después del tratamiento térmico.

La aplicación del proceso térmico a 300 °C, en probetas con superficie fresada genera un incremento en el espesor de la fase zeta ( $\zeta$ ) del recubrimiento galvánico.

La aplicación de un rango de temperatura controlado en el recubrimiento galvánico entre 270 °C y 430 °C, presenta beneficios a las propiedades mecánicas, dependiendo al tipo de aplicación al que destine el elemento mecánico, puesto que en este rango de temperatura se genera una interfaz entre el material base y el galvanizado, producto de la difusión del zinc en el recubrimiento, esto produce una mejora relacionada a la resistencia a la corrosión de materiales, se logra obtener un incremento de dureza y resistencia a la abrasión considerable de las muestras prolongando su vida útil.

## 5 RECOMENDACIONES

Es importante conocer la composición química y propiedades del material base antes de realizar el proceso de galvanizado. Ya que, en base a los parámetros de baño establecidos, se podrá garantizar una correcta formación y desarrollo de las fases del recubrimiento.

Se recomienda realizar el dimensionamiento de las probetas a ensayar en función de la capacidad operativa que tenga la empresa proveedora del servicio de galvanizado, debido a que en muestras delgadas y pequeñas su cuidado y manipulación es complejo, de esta manera se puede evitar la formación de rebabas en zonas de interés, salvo que el procedimiento del ensayo demande determinadas dimensiones para la muestra de estudio mediante la especificación de alguna norma.

Para los resultados obtenidos de las metalografías se recomienda aplicar una edición fotográfica a las imágenes, que facilite la visualización e identificación de las fases presentes en el galvanizado.

Para el ensayo de rugosidad es recomendable contar con una superficie plana en una de las caras que sirva de apoyo para la muestra, con el fin de no afectar la precisión del equipo MITUTOYO.

Para el ensayo de corrosión por niebla salina es recomendable, revisar mínimo dos veces por semana el estado de la pistola presurizada, encargada de rociar la solución salina, verificando que no se encuentre obstruida por la sal presente en la solución. De igual manera es necesario controlar el nivel de flujo de la solución salina por medio de su atomizador, y se debe verificar que la bomba electrosumergible del depósito se encuentre siempre con solución salina.

Para el ensayo de pull-off se recomienda emplear un adhesivo con propiedades cohesivas y resistencia a la tracción como es el caso del EP15 ND-2 de la empresa Master Bond, debido a que el galvanizado es un recubrimiento extremadamente resistente y los pegamentos epóxicos comunes no brindan resultados que aporten valor a la investigación. De igual manera es importante proporcionar un correcto perfil de anclaje entre la superficie de la probeta y la del dado empleado en el ensayo, utilizando una lija, con el fin de beneficiar las propiedades del pegamento y garantizar una correcta

adherencia la cual deberá estar apoyada por una presión de contacto sobre el conjunto mencionado.

Para realizar el procedimiento del ensayo de adherencia por temperatura a 300 °C y 400 °C se recomienda utilizar soportes de materiales refractarios al momento de colocar las probetas en el horno eléctrico presente en el laboratorio, debido a que el uso recurrente de materiales metálicos puede provocar inconvenientes, afectando los resultados de la investigación, debido a su tendencia de oxidación.

Se recomienda realizar más de una toma de datos para el ensayo de pull-off, con la finalidad de contrastar que los resultados obtenidos sean consistentes entre ellos. Ya que el nivel de adherencia del recubrimiento al sustrato varía en función de los parámetros del galvanizado y específicamente en la uniformidad que presente la capa de zinc.

Para la sujeción del dado a la placa galvanizada en el ensayo de pull-off se recomienda que la presión de contacto no sea excesiva y resulte uniforme sobre la superficie del dado, para ello es útil la cinta masking.

Para la obtención de las metalografías, debido a que el análisis se encuentra en los bordes de la probeta, se recomienda realizar el ataque químico empleando un hisopo. El tiempo de ataque no debe ser mayor a cinco segundos, de lo contrario puede llegar a perjudicar la interpretación e identificación de las fases.

## Referencias Bibliográficas

- ANDI. (2014). Guía de prácticas de galvanizado por inmersión en caliente . *Instituto de desarrollo urbano* , 16-21.
- ASM Handbook Committee, N. (1995). *ASM Handbook Machining*. ASM.
- Barbato, S., Ponce, J., Jara, M., Cuevas, J., & Egaña, R. (Marzo de 2008). *Scielo*. Obtenido de Scielo Web: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-97072008000100022](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-97072008000100022)
- Bello, C., & Bersani, O. (2009). Tratamientos térmicos del acero. En C. Bello, & O. Bersani, *Tratamientos térmicos del acero* (págs. 2-18). Chile: Universidad de Chile, Facultad de arquitectura y urbanismo.
- Caicedo, H., Valdés, J., & Coronado, J. (2005). Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos. *Tecnura*, 16-24.
- Chacón, R., Díaz, M., & Andueza, L. (31 de Enero de 2018). *Ciencia Ingenieria Universidad de los Andes*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5075/507557606005/html/index.html>
- Chico, J. (2018). *Caracterización del grado de adherencia y difusión de la capa de aleación Hierro-Zinc para perfiles galvanizados de acero estructural de bajo contenido de carbono*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Chukhin, V., Andrianov, A., & Spitsov, D. (2018). *The mechanism and identification of corrosion of steel pipes*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering.
- Chung, P., Esfahan, M., Wang, J., Cook, P., & Durandet, Y. (15 de Noviembre de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897219308965>
- Construmática, W. (29 de Abril de 2021). *Construmática, Web*. Obtenido de [https://www.construmatica.com/construpedia/El\\_Zinc\\_como\\_Metal\\_Protector](https://www.construmatica.com/construpedia/El_Zinc_como_Metal_Protector)
- Encyclopedia Britannica, Inc. (2012). *Efectos de los procesos térmicos*. Obtenido de britannica : <https://www.britannica.com/technology/steel/Effects-of-heat-treating>
- ESSAY, UK. (Noviembre de 2018). *Design of steel structures: History and features*. Obtenido de ukessays: <https://www.ukessays.com/essays/construction/design-of-steel-structures-construction-essay.php?vref=1>
- FECA, W. (Noviembre de 2011). *Feandalucia*. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8732.pdf>
- Ferrosplanes. (Marzo de 2018). *Proceso de galvanizado ¿Qué es y qué ventajas tiene?* Obtenido de ferrosplanes: <https://ferrosplanes.com/proceso-galvanizado-ventajas/>
- FORNIS. (2012). *Zincado electrolítico*. Obtenido de fornis: <https://www.fornis.com.ar/Utilidades.asp?idseccion=3>

- Galvanizing Handbook, W. (Junio de 2019). *Nordic Galvanizing*. Obtenido de [http://nordicgalvanizers.com/wp-content/uploads/2020/01/NG\\_GalvanizingHandbook\\_digitalversion.pdf](http://nordicgalvanizers.com/wp-content/uploads/2020/01/NG_GalvanizingHandbook_digitalversion.pdf)
- GALVANORTE, Ecuador. (2010). *Galvanizado en caliente*. Obtenido de galvanorte.ec: <https://www.galvanorte.ec/index.php/9-uncategorised>
- Galvinfo, W. (7 de Junio de 2017). *GalvInfoNote*. Obtenido de [https://latiza.zinc.org/wp-content/uploads/sites/10/2017/02/GalvInfoNote3\\_4.pdf](https://latiza.zinc.org/wp-content/uploads/sites/10/2017/02/GalvInfoNote3_4.pdf)
- García, R. (2015). *Ingeniero Marino*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com/corrosion-y-proteccion-catodica/>
- GERDAU CORSA. (2017). *Elección del tipo de acero para estructuras*. Obtenido de GERDAU CORSA: <https://www.gerdau.com>
- Godínez, R., & Pérez, J. (2010). *El acero estructural en la ingeniería mecánica*. México: Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad azcapotzalco.
- Gómez, M. (2005). Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros. En G. Maryory. Carcelona: Universitat de Barcelona.
- Gómez, T., Águeda, E., García, J., & J, N. (Mayo de 2011). *Galvanizado básico para electromecánica*. Obtenido de Books Google: [https://books.google.es/books?id=\\_ESsEd-4OYUC&pg=PA89&dq=El+galvanizado++es&hl=es&sa=X&ei=t9mvT5iiB8Oq0QXc4oCW CQ&sqi=2&ved=0CEYQ6AEwAQ#v=onepage&q=El%20galvanizado%20%20es&f=false](https://books.google.es/books?id=_ESsEd-4OYUC&pg=PA89&dq=El+galvanizado++es&hl=es&sa=X&ei=t9mvT5iiB8Oq0QXc4oCW CQ&sqi=2&ved=0CEYQ6AEwAQ#v=onepage&q=El%20galvanizado%20%20es&f=false)
- Gonzalez, A., Vargas, F., & Esperanza, M. (2007). Influencia de la rugosidad en la micrudureza y en la resistencia al desgaste de recubrimientos aplicados mediante proyección térmica. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 163 - 167.
- Hidalgo, G., & Ramos, L. (2015). *Estudio y caracterización de la corrosión en probetas de aluminio serie 6005 pre esforzadas en un medio salino*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Incoperfil, W. (2006). *Galvanizado: Reacción con otros metales/materiales*. Valencia: BVQI.
- Ingemeconica, W. (2018). *Ingemeconica Fundamentos de los procesos de mecanizado*. Obtenido de <https://ingemeconica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>
- Jiménez, L., Gil, L., & Larez, M. (Julio de 2006). *SciELO*. Obtenido de [http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212006000300002&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212006000300002&script=sci_arttext&tlng=en)
- Kuklik, V., & Kudlacek, J. (2016). En *Hot - Dip Galvanizing of steel structures* (págs. 36-37). Elsevier.
- Lenntech. (2021). *Corrosión en calderas*. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/proceso/caldera/corrosion.htm#:~:text=Generamente%2C%20las%20temperaturas%20m%C3%A1s%20altas,fuertemente%20los%20rangos%20de%20corrosi%C3%B3n>.
- MaaB, P. (2011). *Handbook of hot dip-galvanization*. WILEY-VCH.



- Martínez, A., Méndez, A., Arciga, E., Flores, J., Pérez, J., Meas, Y., & Trejo, G. (2018). Effect of heat treatment on the hardness and wear resistance of electrodeposited Co-B alloy coatings. *Elsevier*, 5.
- Material Mundial, Web. (2018). *Acero ASTM A36: Acero A36 propiedades, ficha técnica, dureza, densidad estructural*. Obtenido de Material Mundial: <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>
- Navarrete, E., & Salgado, O. (2007). *Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>
- Negrón, J. (2018). "Evaluación de la influencia de los ambientes marinos en las propiedades mecánicas de los aceros de construcción ASTM A615 y aluminio al 99% de pureza". Arequipa, Perú.
- Neurtek, W. (2019). Obtenido de <https://www.neurtek.com/es/academia/pinturas-y-recubrimientos/perfil-de-superficie-y-rugosidad-comparacion-de-metodos-de-medicion>
- Neurtek, W. (2019). *Neurtek*. Obtenido de <https://www.neurtek.com/es/pintura-recubrimientos/medidor-adherencia-pintura>
- Pardo, D. (2006). *Propiedades superficiales y evaluación de adherencia mecánica-química de lamados metal-polímero*. Universidad Austral de Chile.
- Rico, Y., & Carrasquero, E. (2017). *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente*. Obtenido de scielo senescyt: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>
- Rodriguez, G., & Salinas, P. (2017). *Estudio de la agresividad corrosiva en medio salino de planchas galvanizadas en caliente sometidas a esfuerzos de tensión*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Salazar, J. (30 de Abril de 2015). *Scielo, Web*. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- SCI, W. (2020). *SCI Control & Inspection*. Obtenido de <https://scisa.es/analisis-quimico/>
- Seré, P., Culcasi, J., Elsner, C., & Di Sarli, A. (1997). *Factores que afectan a la estructura del recubrimiento de zinc obtenidos por inmersión*. Madrid: Revista de Metalurgia CSIC.
- Szatkowska, E., & Jędrzejczyk, D. (31 de Enero de 2021). *The Impact of Heat Treatment on the Behavior of a Hot-Dip Zinc Coating Applied to Steel During Dry Friction*. Obtenido de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/348934351\\_The\\_Impact\\_of\\_Heat\\_Treatment\\_on\\_the\\_Behavior\\_of\\_a\\_Hot-Dip\\_Zinc\\_Coating\\_Applied\\_to\\_Steel\\_During\\_Dry\\_Friction](https://www.researchgate.net/publication/348934351_The_Impact_of_Heat_Treatment_on_the_Behavior_of_a_Hot-Dip_Zinc_Coating_Applied_to_Steel_During_Dry_Friction)
- Tenas S.A, W. (2000). *Galvanizados TENAS S.A*. Obtenido de <http://www.galvanizadostenas.com/5900.html>

Veloz, M., Esparza, E., Reyes, V., & Uruchurtu, J. (Junio de 2012). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6098/>

Yraima, R., & Carrasquero, E. (16 de Mayo de 2017). *Ingenius*. Obtenido de Scielo: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/ing/n18/1390-650X-ing-18-00030.pdf>