



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

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

CHICO CHAMORRO JUAN JOSÉ
juan.chico@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Marzo 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **JUAN JOSÉ CHICO CHAMORRO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

DIRECTOR

DECLARACIÓN

Yo, **Juan José Chico Chamorro**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis 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.

Juan José Chico Chamorro

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Generalidades.....	3
1.1.1. Zinc (Zn).....	3
1.1.2. Corrosión del acero	3
1.1.3. Protección frente a la corrosión	4
1.1.4. Protección anticorrosiva del acero usando zinc	4
1.2. Proceso de galvanizado por inmersión en caliente.....	5
1.2.1. Galvanizado discontinuo por lotes	5
1.2.2. Pretratamiento químico en el galvanizado discontinuo (método seco).....	6
1.2.3. Formación del recubrimiento de aleación Fe-Zn a bajas temperaturas	7
1.2.4. Factores que influyen en el espesor de la capa de galvanizado	9
1.3. Normas de certificación de procesos de galvanizado	15
1.3.1. Norma ASTM A123: Especificación estándar para recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero.....	15
1.3.2. Norma ASTM A153: Especificación estándar para recubrimientos de zinc (por inmersión en caliente) en herrajes de hierro y acero	16
1.3.3. Norma NTE INEN 672: Recubrimientos de zinc por inmersión en caliente sobre elementos de sujeción. Requisitos generales.....	16
1.3.4. Norma NTE INEN 950: Recubrimientos metálicos. Determinación de la adherencia. Métodos de ensayo.....	16
1.3.5. Norma NTE INEN 2483: Recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos	16

1.4.	Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36.....	17
1.4.1.	Ensayo de tracción	17
1.4.2.	Diagrama esfuerzo-deformación.....	17
1.5.	Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36	18
1.5.1.	Ensayo de dureza.....	18
1.5.2.	Ensayo de dureza Rockwell.....	18
1.5.3.	Relación entre dureza y resistencia a la tracción	19
1.6.	Análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36	19
1.6.1.	Análisis de composición química mediante un espectrómetro de chispa	19
1.7.	Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado.....	20
1.7.1.	Metalografía.....	20
1.7.2.	Difusión atómica y sus mecanismos de difusión	21
1.7.3.	Procesamiento digital de imágenes	21
1.8.	Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado	22
1.8.1.	Método de decapado	22
1.9.	Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación.....	23
1.9.1.	Ensayo de micro-indentación.....	23
1.9.2.	Ensayo de dureza Vickers por micro-indentación	23
1.10.	Ensayo de <i>Pull-Off</i> para medición de la adhesividad mecánica	23
1.10.1.	Adhesividad mecánica	23
1.10.2.	Ensayo de <i>Pull-Off</i>	24
1.11.	Medición del perfil de superficie.....	25
1.11.1.	Rugosidad superficial.....	25
2.	METODOLOGÍA	26
2.1.	Obtención de la muestra	26
2.2.	Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36.....	27
2.2.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de tracción.....	27
2.2.2.	Procedimiento del ensayo de tracción	28
2.3.	Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36	29
2.3.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de dureza	29
2.3.2.	Procedimiento del ensayo de dureza	29
2.4.	Análisis de composición química del sustrato de acero A36.....	30
2.4.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el análisis de composición química..	30
2.4.2.	Procedimiento del análisis de composición química	31
2.5.	Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado.....	31

2.5.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el análisis metalográfico	31
2.5.2.	Procedimiento del análisis metalográfico	33
2.6.	Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado	34
2.6.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para la evaluación del espesor del recubrimiento por el método de decapado.....	34
2.6.2.	Procedimiento del método de decapado para evaluación del espesor del recubrimiento por el método de decapado.....	35
2.7.	Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación.....	35
2.7.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación	35
2.7.2.	Procedimiento del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación.....	36
2.8.	Ensayo de <i>Pull-Off</i> para medición de la adhesividad mecánica.....	37
2.8.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de <i>Pull-Off</i> para medición de la adhesividad mecánica	37
2.8.2.	Inspección visual y naturaleza de la fractura en el ensayo de <i>Pull-Off</i>	41
2.8.3.	Procedimiento del ensayo de <i>Pull-Off</i> para medición de la adhesividad mecánica	42
2.9.	Medición del perfil de superficie	43
2.9.1.	Equipo para la medición del perfil de superficie	43
2.9.2.	Procedimiento de la medición del perfil de superficie.....	44
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1.	Resultados	45
3.1.1.	Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36	45
3.1.2.	Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36.....	46
3.1.3.	Análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36.....	47
3.1.4.	Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado	47
3.1.5.	Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado	53
3.1.6.	Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación	54
3.1.7.	Ensayo de <i>Pull-Off</i> para medición de la adhesividad mecánica	56
3.1.8.	Medición del perfil de superficie.....	60
3.2.	Discusión	61
3.2.1.	Análisis de resultados del ensayo de tracción del acero ASTM A36	61

3.2.2. Análisis de resultados de la caracterización de la composición química del sustrato de acero ASTM A36	61
3.2.3. Determinación de los parámetros de galvanizado en función del contenido de silicio en el sustrato de acero	62
3.2.4. Análisis de resultados de las metalografías del perfil de acero galvanizado	62
3.2.5. Análisis de resultados del espesor mínimo de recubrimiento para el perfil estructural del acero y de los espesores de las fases de recubrimiento.....	65
3.2.6. Análisis de resultados del peso por unidad de área del recubrimiento para el perfil estructural de acero.....	68
3.2.7. Análisis de resultados del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación y de dureza del acero ASTM A36	69
3.2.8. Análisis de resultados del ensayo de <i>Pull-Off</i> del recubrimiento de zinc mediante el dispositivo de acople para la máquina universal de ensayos.....	71
3.2.9. Análisis de resultados de la rugosidad del recubrimiento de zinc.....	72
3.2.10. Análisis de las gráficas de relación de los diferentes parámetros de los recubrimientos de zinc estudiados.....	74
3.2.11. Análisis de las metalografías del desprendimiento del recubrimiento de zinc causado por el ensayo de <i>Pull-Off</i>	77
3.2.12. Resumen de las propiedades químicas, mecánicas y características de la capa de aleación hierro-zinc para diferentes perfiles galvanizados	78
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
4.1. Conclusiones.....	80
4.2. Recomendaciones	82
Referencias Bibliográficas	84
Anexos	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Potenciales eléctricos de metales en una solución acuosa con cloruro de sodio a 20°C.	4
Figura 1.2. Proceso esquemático de galvanizado por inmersión en caliente por lotes.	5
Figura 1.3. Micrografía de un recubrimiento producido por galvanizado por inmersión en caliente.	7
Figura 1.4. Aceros calmados galvanizados, a una temperatura de 450-465°C.	8
Figura 1.5. Resistencia a la corrosión de acero galvanizado en caliente en diferentes atmósferas.	9
Figura 1.6. Espesor del recubrimiento en función del contenido de silicio (inmersión de 10 min).	10
Figura 1.7. Estructuras cristalinas en aceros al carbono con tiempos de galvanizados mayores a 5 minutos (existe una transición entre las estructuras individuales existentes).	11
Figura 1.8. Espesor del recubrimiento en función de la temperatura de inmersión (1, 5 y 10 minutos) para aceros con diferentes contenidos de silicio.	13
Figura 1.9. Dependencia del espesor del recubrimiento con el tiempo de inmersión.	14
Figura 1.10. Micrografías de acero galvanizado en el rango <i>Sebisty</i>	15
Figura 1.11. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de un acero estructural.	18
Figura 1.12. Mecanismos de difusión.	21
Figura 1.13. Ensamble para el ensayo de <i>Pull-Off</i> de sustratos rígidos, usando una sola muñeca.	24
Figura 1.14. Medición de la rugosidad de la superficie.	25
Figura 2.1. Muestreo (artículos de especímenes simples) de los perfiles galvanizados.	27
Figura 2.2. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción.	27
Figura 2.3. Dimensiones de las probetas para el análisis de composición química.	30
Figura 2.4. Dimensiones de la probeta para la evaluación del espesor por el método de decapado.	35
Figura 2.5. Dimensiones de las probetas para el ensayo de <i>Pull-Off</i>	37
Figura 2.6. Dispositivo de unión probeta-muñeca.	39
Figura 2.7. Dispositivo de <i>Pull-Off</i> para la máquina universal de ensayos.	40
Figura 2.8. Muñeca para el medidor automático de adherencia por arranque.	41
Figura 2.9. Tipos de fracturas producidas en el ensayo de <i>Pull-Off</i>	41
Figura 2.10. Descripción de los tipos de fractura producidos en el ensayo de <i>Pull-Off</i>	42
Figura 3.1. Diagrama esfuerzo-deformación del sustrato de acero ASTM A36.	46

Figura 3.2. Comparación del espesor de los recubrimientos (empresa A y B).	66
Figura 3.3. Comparación del espesor de la fase <i>delta</i> de los recubrimientos (empresa A y B).....	67
Figura 3.4. Comparación del espesor de la fase <i>zeta</i> de los recubrimientos (empresa A y B).....	67
Figura 3.5. Comparación del espesor de la fase <i>eta</i> de los recubrimientos (empresa A y B).....	67
Figura 3.6. Comparación del peso por unidad de área del recubrimiento (empresa A y B).	69
Figura 3.7. Comparación de dureza por micro-indentación de los recubrimientos (empresa A y B).....	70
Figura 3.8. Comparación de la adherencia de los recubrimientos (dispositivo de <i>Pull-Off</i>).	71
Figura 3.9. Comparación de rugosidad de los recubrimientos (empresa A y B).	73
Figura 3.10. Relación entre la rugosidad y el espesor de los recubrimientos (empresa A y B).....	75
Figura 3.11. Relación entre el esfuerzo de desprendimiento del recubrimiento (dispositivo de <i>Pull-Off</i>), dureza y estructura metalográfica (empresa A y B).....	76
Figura 3.12. Rugosidad vs. Carga de fractura (dispositivo de <i>Pull-Off</i>).	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características del zinc.	3
Tabla 1.2. Composición general de las capas en el sistema de recubrimiento de un acero.	8
Tabla 1.3. Escalas para el ensayo de dureza Rockwell.	19
Tabla 1.4. Escala Vickers para el ensayo de dureza por micro-indentación.....	23
Tabla 2.1. Tratamientos superficiales y variaciones del proceso de galvanizado.	26
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.	28
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.....	29
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del espectrómetro de chispa.	31
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de las probetas para el análisis metalográfico.....	32
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.....	32
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la máquina neumática de desbaste fino y pulido.	33
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.....	33
Tabla 2.9. Configuración de la máquina neumática para los procesos de desbaste y pulido.....	34
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del durómetro micro-Vickers.	36
Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de las muñecas.....	38
Tabla 2.12. Especificaciones técnicas del adhesivo.....	38
Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del horno eléctrico o mufla.	39
Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del medidor automático de adherencia por arranque.	40
Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del medidor digital de perfil de superficie.	44
Tabla 3.1. Requisitos mecánicos del acero de grado ASTM A36.....	45
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36.....	45
Tabla 3.3. Requisitos del ensayo de dureza del acero de grado ASTM A36.	46
Tabla 3.4. Resultados del ensayo de dureza del sustrato de acero de grado ASTM A36.....	46
Tabla 3.5. Requisitos de composición química acero ASTM A36.....	47
Tabla 3.6. Resultados del análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36.	47
Tabla 3.7. Resultados del análisis metalográfico del sustrato de acero ASTM A36.	48
Tabla 3.8. Resultados del análisis metalográfico de las diferentes capas de aleación hierro-zinc.....	48

Tabla 3.9. Requisito del espesor mínimo de recubrimiento para el perfil estructural de acero.	51
Tabla 3.10. Resultados de la medición de espesores de la probeta A0-M1.	51
Tabla 3.11. Resultados de la medición de espesores de la probeta A1-M1.	51
Tabla 3.12. Resultados de la medición de espesores de la probeta A2-M1.	51
Tabla 3.13. Resultados de la medición de espesores de la probeta A3-M1.	52
Tabla 3.14. Resultados de la medición de espesores de la probeta A4-M1.	52
Tabla 3.15. Resultados de la medición de espesores de la probeta B0-M1.	52
Tabla 3.16. Resultados de la medición de espesores de la probeta B1-M1.	52
Tabla 3.17. Resultados de la medición de espesores de la probeta B2-M1.	52
Tabla 3.18. Resultados de la medición de espesores de la probeta B3-M1.	53
Tabla 3.19. Requisito de peso por unidad de área mínima de galvanizado para el perfil estructural.	53
Tabla 3.20. Resultados de la evaluación del espesor del recubrimiento de zinc por decapado.	53
Tabla 3.21. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A0-M1).....	54
Tabla 3.22. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A1-M1).....	54
Tabla 3.23. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A2-M1).....	55
Tabla 3.24. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A3-M1).....	55
Tabla 3.25. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A4-M1).....	55
Tabla 3.26. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B1-M1).....	55
Tabla 3.27. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B2-M1).....	56
Tabla 3.28. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B3-M1).....	56
Tabla 3.29. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote A0.....	56
Tabla 3.30. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote A1.....	57
Tabla 3.31. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote A2.....	57
Tabla 3.32. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote A3.....	57
Tabla 3.33. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote A4.....	57

Tabla 3.34. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote B0.....	58
Tabla 3.35. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote B1.....	58
Tabla 3.36. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote B2.....	58
Tabla 3.37. Resultados del ensayo de Pull-Off del lote B3.....	58
Tabla 3.38. Resultados del ensayo de Pull-Off con el medidor automático de adherencia.	59
Tabla 3.39. Análisis metalográfico del desprendimiento de la capa protectora de zinc.	59
Tabla 3.40. Resultados de la medición del perfil de superficie.	61
Tabla 3.41. Resumen de la evaluación del sustrato y de los recubrimientos estudiados..	79

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Características de las fases presentes en aceros de acuerdo a su contenido de silicio.....	88
ANEXO II. Códigos de identificación de las probetas obtenidas para los ensayos de adhesión y difusión	89
ANEXO III. Código fuente del procesamiento digital realizado a las micrografías obtenidas	90
ANEXO IV. Código fuente del procesamiento digital realizado a las macrografías obtenidas en el ensayo de <i>Pull-Off</i> para determinar el porcentaje de desprendimiento del recubrimiento	91
ANEXO V. Formato para el reporte del ensayo de <i>Pull-Off</i>	93
ANEXO VI. Obtención de probetas y ejecución de los ensayos.....	94
ANEXO VII. Informe técnico del ensayo de tracción	96
ANEXO VIII. Informe técnico del análisis de composición química	99
ANEXO IX. Medición del espesor de las fases y de la capa de aleación hierro-zinc para cada tipo de muestra	101
ANEXO X. Ensayo de dureza de la capa de recubrimiento de zinc mediante micro-indentación	106
ANEXO XI. Informe técnico del ensayo de <i>Pull-Off</i>	108
ANEXO XII. Obtención de los porcentajes de desprendimiento de las probetas sometidas al ensayo de <i>Pull-Off</i>	110
ANEXO XIII. Gráficas esfuerzo de fractura en función del tiempo.....	113

RESUMEN

En el presente estudio se caracterizó el grado de adherencia y difusión de la capa de aleación Fe-Zn obtenida por dos procesos de galvanizado por inmersión en caliente, uno industrializado en la empresa A y otro desarrollado artesanalmente por la empresa B, los cuales además se diferencian por los tiempos de inmersión y enfriamiento empleados. Este recubrimiento se aplicó a perfiles de acero estructural de bajo contenido de carbono (ASTM A36) de denominación AL 65x6 mm y de 400 mm de largo, sometidos a los siguientes pretratamientos superficiales mecánicos: sin pretratamiento, pulido, lijado, esmerilado y reducción del tiempo de fluxado. Más adelante, se implementó la metodología necesaria para medir la adhesión del recubrimiento a través de un ensayo de *Pull-Off* y además se realizaron análisis mecánicos, metalográficos y de composición química, en base a los cuales se valoró la calidad del galvanizado y se determinó que la empresa A entrega productos que cumplen los criterios de aceptación de la norma ASTM A123, mientras que la empresa B presenta problemas en alcanzar el espesor mínimo solicitado. Adicionalmente, se determinó cómo el contenido de silicio del acero, los tiempos de inmersión, tiempos de enfriamiento, los pretratamientos superficiales, las estructuras cristalinas desarrolladas en la fase *zeta* (ζ) y el fenómeno de difusión del hierro sobre el zinc influyen sobre las propiedades finales del recubrimiento. Concluyendo que, los parámetros de galvanizado deben ser elegidos en base a información técnica, para garantizar un adecuado desempeño y durabilidad, al menor costo posible.

Palabras clave: aleación Fe-Zn, galvanizado por inmersión en caliente, grado de adherencia, grado de difusión, protección anticorrosiva, recubrimiento de zinc.

ABSTRACT

This study presents the characterization of the adhesion and diffusion grade of the Fe-Zn alloy coating obtained by two processes of hot-dip galvanizing, an industrialized process in the A company and an artisan process developed by the B company, which work with different immersion and cooling times. This coating was applied on structural steel shapes with a low carbon content (ASTM A36), 65x6 mm denomination and a length of 400 mm, and those were pre-treated mechanically in their surfaces with the next processes: without pre-treatment, polished, sanding, grinding and reduction of flux time. Next, it was implemented a methodology to measure the coating adhesion through a Pull-Off test, and then mechanical, metallographic and chemical composition analysis were done to evaluate the galvanizing quality. As results, the products of A company satisfy the acceptance criteria of ASTM A123 standard, while the galvanized of B company present problems getting the minimum coating thickness. In addition, it was determined how silicon content in the steel, immersion times, cooling times, surface pre-treatments, crystalline structures content in the *zeta* phase (ζ) and diffusion of the iron over the zinc, influence in the final properties of the coating. In conclusion, the hot- dip galvanizing parameters should be chosen based on technically information to guarantee an adequate performance and durability, with the lowest cost.

Keywords: adhesion grade, anti-corrosive protection, diffusion grade, Fe-Zn alloy, hot-dip galvanizing, zinc coating.

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

INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos en ambientes húmedos sufren un proceso de corrosión irreversible, por lo que requieren una adecuada protección superficial mediante diferentes métodos, entre los cuales se destacan los recubrimientos metálicos; sin embargo, a pesar de ser útiles como protección, no se le ha dado la suficiente importancia a la relación existente entre el espesor de la capa de aleación hierro-zinc depositada sobre los sustratos de acero de bajo contenido de carbono mediante un proceso de galvanizado por inmersión en caliente, con la calidad superficial obtenida antes de la aplicación de este recubrimiento. Es así que se puede determinar la influencia de este comportamiento en el grado de adhesión y difusión del sistema.

Por otra parte, las normas a través de las cuales la industria nacional certifica habitualmente sus procesos de galvanizado por inmersión en caliente, no permiten aportar información respecto al grado de adhesión del recubrimiento de zinc depositado sobre el sustrato, por lo cual se establecerá una metodología concreta que permita proporcionar una medición objetiva de este fenómeno. Es importante mencionar que para estos ensayos se especificará una apropiada caracterización de variables en base a información y parámetros de estándares análogos, para evitar desviaciones en la medición y para lograr consistencia en caso de que se requieran replicar los ensayos antes mencionados (Fletcher & Barnes, s.f.).

Finalmente, se logrará promover la calidad del servicio de galvanizado por inmersión en caliente ofrecido en el país. Además se brindará soporte a ciertos procesos como el *sweep blasting*¹, en donde la preparación superficial requiere la exposición a esfuerzos mecánicos elevados para generar una adecuada adhesión de las pinturas protectoras y para evitar delaminaciones, con el fin de obtener sistemas dúplex² confiables; también incluyen otros

¹ Limpieza y creación de rugosidad en superficies previo a la aplicación de recubrimientos, mediante un proceso abrasivo (Maaß, 2011).

² Combinación de un recubrimiento metálico y una o más capas de pintura (Van Eijnsbergen, 2012).

procesos como el *hydro blasting*³. Adicionalmente, con el presente estudio los productos galvanizados beneficiarán diferentes campos de aplicación, como por ejemplo la construcción, la creación de piezas de maquinaria agrícola, ganadera y de carga, líneas de tubería, sistemas de irrigación, equipos de la industria alimenticia, entre otros, ya que gracias a la adhesividad se garantizará que la barrera metálica hierro-zinc sea resistente a la abrasión y a la erosión (Maaß, 2011). Así también, la caracterización de esta unión garantizará una vida útil amplia de los elementos anteriormente descritos.

Objetivo general

Caracterizar el grado de adherencia y difusión de la capa de aleación hierro-zinc para perfiles galvanizados de acero estructural de bajo contenido de carbono.

Objetivos específicos

- Valorar el espesor de la capa de aleación hierro-zinc con su grado de adherencia y difusión con el propósito de verificar la calidad de galvanizado de los perfiles estudiados.
- Analizar la respuesta del recubrimiento de galvanizado sobre el sustrato mediante ensayos mecánicos para identificar los componentes que definen el desempeño y durabilidad del sistema.
- Explicar la difusión y adhesión en función de la calidad superficial del sustrato metálico a fin de sugerir posibles mejoras en el proceso de galvanizado.

Alcance

El presente proyecto busca realizar ensayos de *Pull-Off* y además analizar el grado de difusión de perfiles de acero de bajo contenido de carbono con diferentes acabados superficiales y posteriormente galvanizados por un proceso de inmersión en caliente, mediante la selección de lotes provenientes de diferentes empresas, con la finalidad de encontrar la relación entre el espesor de la capa de aleación hierro-zinc con su grado de adherencia y difusión. Además, con el análisis de sus propiedades mecánicas y químicas se pretende encontrar los factores que determinan el desempeño y durabilidad del sistema, junto a las posibles mejoras a realizarse en los procesos de galvanizado empleados.

³ Limpieza de la superficie mediante un proceso de remoción usando un chorro de agua a una presión elevada (Maaß, 2011).

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades

En los siguientes apartados se detallan los conocimientos que ayudan a entender los aspectos relacionados con el proceso de galvanizado por inmersión en caliente de aceros estructurales de bajo contenido de carbono y los efectos producidos por la presencia de silicio en estos sustratos metálicos.

1.1.1. Zinc (Zn)

Es un metal obtenido a partir de la esfalerita, posee bajo punto de fusión, es sencillo de conformar sobre los 100°C, pero frágil a bajas temperaturas. Es un material anisotrópico, duro y resistente. Posee buenas características aleantes y es empleado en acabados superficiales, donde provee alta eficiencia y protección durable contra la corrosión (Kuklik & Kudlacek, 2016). Más propiedades de este material se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características del zinc.

Características del zinc		
Símbolo químico	Zn	
Mineral	Esfalerita	
Número atómico	30	
Peso atómico	65,37	
Grupo característico	Metal de transición	
Valencia	2	
Color	Plateado blanco-azulado, lustroso	
Estructura cristalina	Hexagonal (empaquetamiento estrecho)	
Densidad	7140	Kg.m ⁻³
Temperatura de fusión	419,5	°C
Coeficiente de expansión térmica	29x10 ⁻⁶	K ⁻¹
Resistencia a la tracción	120	MPa
Ductilidad	60	%
Dureza	72	Brinell (HB)

(Fuente: Kuklik & Kudlacek, 2016)

1.1.2. Corrosión del acero

Es un proceso indeseado y espontáneo, causado por las acciones químicas o físico-químicas del ambiente. Además, transforma irreversiblemente los metales hasta que vuelvan a su estado mineral y los destruye gradualmente mediante dos tipos de reacciones:

- Una **reacción electroquímica**, ya sea producida entre dos metales con una conexión eléctricamente conductiva y/o creando una pila galvánica, en la cual el metal de menor potencial eléctrico desempeña el papel de ánodo y se oxida, mientras que el otro en un estado de inmunidad hace de cátodo y se reduce. Los potenciales eléctricos de algunos metales se indican en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Potenciales eléctricos de metales en una solución acuosa con cloruro de sodio a 20°C.
(Fuente: Kuklik & Kudlacek, 2016)

- El otro tipo de reacción es de naturaleza **química** producida entre el metal y el ambiente o por la disolución de su estructura en metales líquidos (Kuklik & Kudlacek, 2016).

1.1.3. Protección frente a la corrosión

La protección contra la corrosión incluye dos métodos: (1) los procedimientos activos, en los que se manipulan los procesos de corrosión, ingeniería, selección de materiales, diseño y manufactura; y (2) los procedimientos pasivos, los cuales aíslan a los metales del agente corrosivo mediante capas protectoras, mismas que pueden ser recubrimientos de tipo orgánico, metálico, no metálico o pintura, siendo los más destacados los recubrimientos metálicos (Maaß, 2011).

1.1.4. Protección anticorrosiva del acero usando zinc

El zinc crea una protección catódica, ya que al adquirir el papel de ánodo de sacrificio, le confiere inmunidad al hierro. Además, al ser depositado sobre el metal crea una barrera de alta resistencia y adherencia llamada pátina⁴ que desacelera el proceso corrosivo. Por este motivo, se han desarrollado diversas tecnologías con el fin de promover la calidad del recubrimiento de zinc, entre ellas galvanoplastia, rociado térmico, galvanizado por inmersión en caliente, *sherardizado*⁵ y chapado metálico (Kuklik & Kudlacek, 2016).

⁴ Recubrimiento protector producto de la corrosión, que en su gran mayoría consiste de carbonato de zinc y es generado por el dióxido de carbono atmosférico (Kuklik & Kudlacek, 2016).

⁵ Recubrimiento aplicado al hierro por calentamiento de polvo de zinc (Gonzales J. , 1989)

1.2. Proceso de galvanizado por inmersión en caliente

Es un método de protección contra la corrosión para sustratos de acero, que al ser sumergidos en zinc fundido permiten la creación de un recubrimiento aleado, en donde intervienen procesos de difusión, reacciones metalúrgicas y transformaciones termodinámicas (Kuklik & Kudlacek, 2016). Su principal ventaja frente a otros recubrimientos radica en que no presenta formación de óxido gracias a la pátina producida y a la lenta corrosión; pues si se garantiza una adecuada adhesión, el recubrimiento de zinc solo corroerá parcialmente a su capa más externa.

Las superficies galvanizadas no muestran apariencia ni composición homogéneas, pues las reacciones no ocurren al mismo tiempo, se originan en zonas localizadas y tienen el aspecto de manchas debido a las diferencias estructurales, a la humedad y a la presencia de ciertas partículas extrañas (Van Eijnsbergen, 2012).

Este método de protección posee dos tipos de procesos, uno discontinuo por lotes, donde los elementos son tratados individualmente y otro continuo para elementos en forma de placas o bandas conformadas en frío (Maaß, 2011).

1.2.1. Galvanizado discontinuo por lotes

Los sustratos pueden galvanizarse mediante un método seco o un método húmedo, sin presentar diferencia en su resistencia a la corrosión (Van Eijnsbergen, 2012). El método seco, representado esquemáticamente en la Figura 1.2, es el más comercial y de mayor productividad debido a su alto grado de mecanización, por lo que será detallado en los siguientes apartados (Kuklik & Kudlacek, 2016).

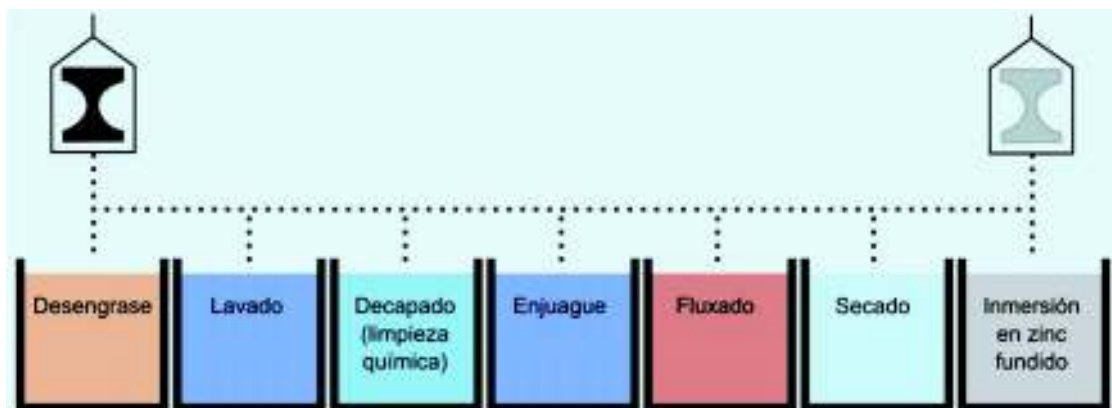


Figura 1.2. Proceso esquemático de galvanizado por inmersión en caliente por lotes.
(Fuente: Instituto de Metales No Ferrosos-ICZ, s.f.)

1.2.2. Pretratamiento químico en el galvanizado discontinuo (método seco)

El proceso de galvanizado es exitoso si la superficie del sustrato se encuentra limpia, sin contaminantes y correctamente activada, por lo cual es necesario realizar un pretratamiento químico previo a su inmersión en zinc fundido. Sus etapas se pueden visualizar en la Figura 1.2 y se detallan en base a lo referido por Kuklik & Kudlacek (2016):

- **Desengrase**, remueve la grasa de la superficie del sustrato para garantizar una adecuada inmersión en la fase de decapado. Para ello se pueden emplear dos tipos de agentes: (1) los alcalinos, como el hidróxido de sodio o el fosfato de potasio disueltos en agua y mantenidos a temperaturas sobre los 50°C; y (2) los ácidos, como el ácido fosfórico que es de menor eficiencia y que debe mantenerse a temperatura ambiente en una mezcla con ácido nítrico, sulfúrico o clorhídrico para precipitar y sedimentar la grasa en el fondo del tanque. El tiempo adecuado de desengrase corresponde de unos 15 a 20 minutos.
- **Lavado**, este proceso se realiza para evitar el deterioro de la tina de decapado.
- **Decapado**, emplea ácidos inorgánicos. Frecuentemente, se usa ácido clorhídrico en concentración mayor al 14% y con una temperatura mayor a 50°C. Su eficiencia se eleva al agregar cloruro ferroso, asegurando la disolución de las incrustaciones superficiales, pero con el transcurso del tiempo el contenido de hierro incrementa y el ácido clorhídrico libre decrece, por lo que se añaden inhibidores que además reducen la saturación de hidrógeno en el acero. Su tiempo de exposición es de 5 a 20 minutos.
- **Enjuague**, se realiza posterior a cada operación de decapado para prevenir la transferencia de cloruro ferroso al flux o al baño de zinc, ya que puede generar un efecto negativo al incrementar el nivel de escoria. Dura de 40 a 60 segundos.
- **Flux**, proceso realizado aproximadamente durante 3 minutos en una solución acuosa de cloruro de zinc y cloruro de amonio en una relación 3:2 y aproximadamente con 400 g/l de sal, que se mantiene a menos de 50°C. Esta solución al secarse crea un film protector que previene la oxidación. Cuando el sustrato entra en el zinc fundido, el cloruro de hidrógeno, obtenido del cloruro de amonio, disuelve los óxidos de zinc y aluminio, lo cual mejora el contacto entre el zinc fundido y la superficie del acero. Por otra parte, el cloruro de zinc reduce la tensión superficial del zinc puro, activa la superficie e inicia la reacción metalúrgica hierro-zinc.
- **Secado**, mediante ventilación y calor, previene las salpicaduras de zinc durante la inmersión. La cámara soporta condiciones extremas de corrosión, pues se manejan temperaturas y niveles de contaminación altos. El tiempo varía alrededor de 20 minutos.

1.2.3. Formación del recubrimiento de aleación Fe-Zn a bajas temperaturas

Este recubrimiento se crea por la difusión entre átomos de hierro y zinc, la cual a su vez produce enlaces intermetálicos y promueve la formación de diferentes fases, aproximadamente entre 435-620°C. Este proceso produce menor contaminación y menor demanda energética a bajas temperaturas, como por ejemplo a los 490°C, en donde el recubrimiento se adhiere firmemente al hierro y se forman cada una de las fases observadas en la Figura 1.3 y que son: la fase *gamma* (γ) que es muy difícil de observar, la fase *delta* (δ) que posee un gran espesor, la fase *zeta* (ζ) en la cual los cristales se disuelven y flotan permanentemente; y la fase *eta* (η) que es completamente zinc fundido.

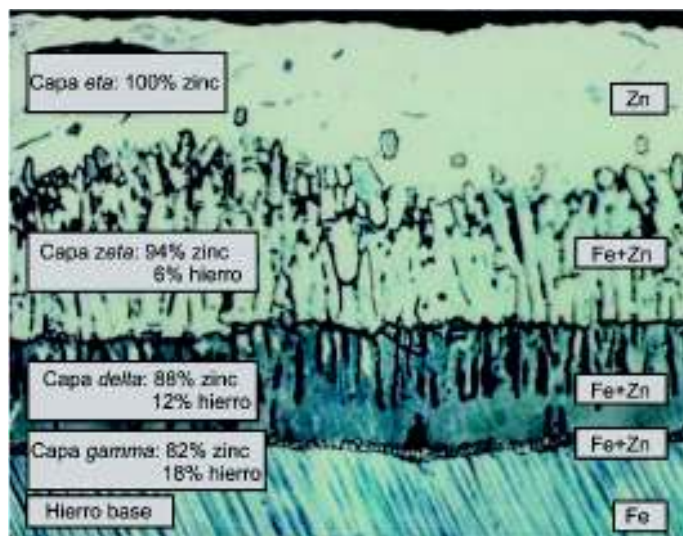


Figura 1.3. Micrografía de un recubrimiento producido por galvanizado por inmersión en caliente. (Fuente: Flórez & Ruiz, s.f.)

Entre 440-460°C la estructura de las fases hierro-zinc (Figura 1.3) depende fuertemente de los diferentes parámetros de galvanizado. Entre 490-530°C no se genera la fase *delta*, mientras que sobre los 530°C solamente la fase *delta* es estable y compacta. Además, el incremento de silicio vuelve frágil al recubrimiento (Maaß, 2011). Las características de las fases de la capa de aleación hierro-zinc son:

- **Fase zeta (ζ)**, durante el tiempo de inmersión se forman dos fases continuas, la δ y la ζ . La fase ζ en aceros calmados⁶ es delgada e inconsistente, su espesor crece linealmente con el tiempo y entre sus cristales existen vacantes que reducen su adhesión al sustrato (Kuklik & Kudlacek, 2016). En estado líquido forma un canal natural

⁶ Aceros que no poseen formación de burbujas durante su solidificación gracias a la acción desoxidante del aluminio y del silicio en la colada (Falk, Gockel, Lernet, & Schlossorsch, 1986).

para que el zinc llegue hasta la interfase de las capas ζ y δ , donde adquiere el hierro necesario para que se desarrolle (Van Eijnsbergen, 2012).

- **Fase *delta* (δ)**, se forma con la fase ζ . En aceros calmados es delgada e inconsistente, pues no se desarrolla totalmente durante la inmersión en zinc (Kuklik & Kudlacek, 2016). Enfriamientos lentos minimizan su agrietamiento y fragilización gracias a que esta fase se presenta completa, mientras que en enfriamientos rápidos su crecimiento es limitado (Van Eijnsbergen, 2012).
- **Fase *gamma* (γ)**, una vez creadas las fases ζ y δ , y si la ferrita está lo suficientemente saturada con el zinc, al remover el elemento de la tina y con un enfriamiento lento, se segrega la fase γ , cuya formación continua hasta los 200°C, presentando elevada adhesión al sustrato (Kuklik & Kudlacek, 2016).
- **Fase *eta* (η)**, es zinc puro y completa la creación del recubrimiento (Maaß, 2011).

En la Tabla 1.2 se muestra la composición total de la capa de recubrimiento de la aleación hierro-zinc, así como sus características individuales, mientras que la Figura 1.4 indica el crecimiento de estas capas durante y después del galvanizado.

Tabla 1.2. Composición general de las capas en el sistema de recubrimiento de un acero.

Tipo de capa	Composición total de la capa			
	<i>Eta</i> (η)	Aleación <i>zeta</i> (ζ)	Aleación <i>delta</i> (δ)	Aleación <i>gamma</i> (γ)
Composición estequiométrica	Zn	Zn ₁₃ Fe	Zn ₇ Fe	Zn ₂₁ Fe ₅
Porcentaje de hierro [%]	-	5.8-6.2	7-12	21-28
Estructura cristalina	Hexagonal	Monoclínica	Hexagonal	Cúbica
Espesor del recubrimiento [μ m]	8-12	10-25	30-40	0,1-0,2
Flexibilidad	Buena	Pobre	Pobre	Pobre
Dureza y resistencia a la abrasión	Alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

(Fuente: van Eijnsbergen, 2012)

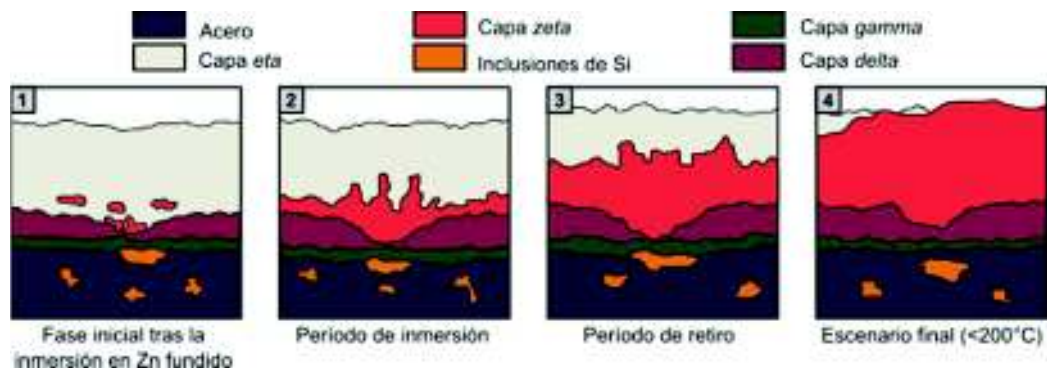


Figura 1.4. Aceros calmados galvanizados, a una temperatura de 450-465°C.
(Fuente: Kuklik & Kudlacek, 2016)

1.2.4. Factores que influyen en el espesor de la capa de galvanizado

El espesor de la capa protectora de zinc depende de ciertos factores que influyen en las reacciones metalúrgicas, los cuales a su vez afectan la resistencia a la corrosión del acero galvanizado. Es así que en la Figura 1.5 se puede apreciar cómo la vida útil del recubrimiento de zinc es directamente proporcional a su espesor, para cada una de las condiciones atmosféricas propuestas. Entre los factores que afectan el espesor se encuentran:

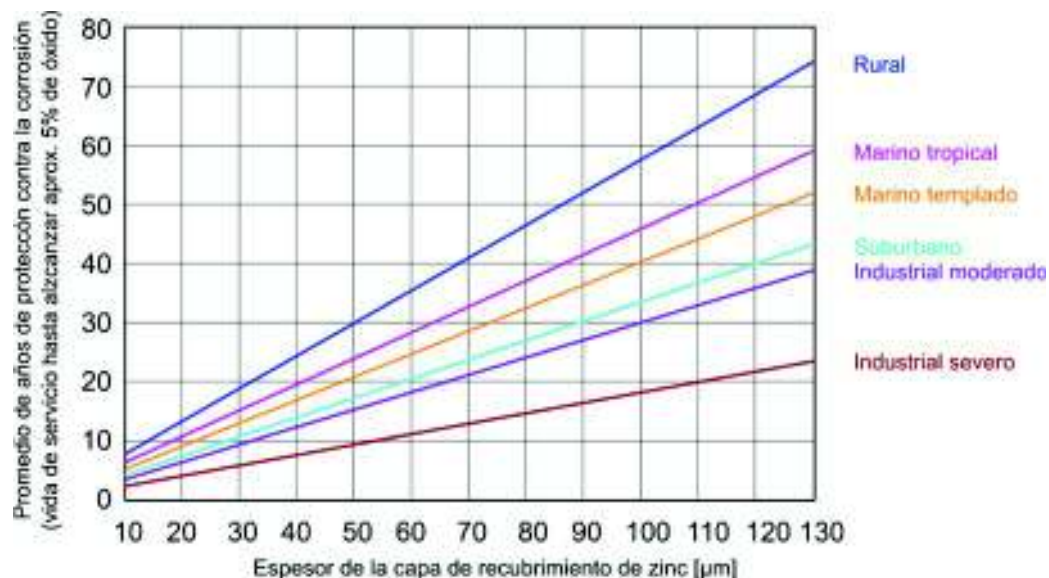


Figura 1.5. Resistencia a la corrosión de acero galvanizado en caliente en diferentes atmósferas. (Fuente: GYMSA, s.f.)

- **Influencia del silicio (Si)**, presenta un impacto desfavorable en las características del recubrimiento, a pesar que es útil desoxidando al acero (Kuklik & Kudlacek, 2016). Además, Maaß (2011) referencia que entre 440-460°C el silicio afecta sobre la difusión del hidrógeno y por consiguiente sobre las características del recubrimiento, así:
 - **Bajo contenido de silicio (<0,035%Si)**, en aceros no calmados la fase δ se forma rápidamente gracias a la alta reactividad entre la superficie libre de gases del hierro puro alfa ($Fe-\alpha$) y el zinc, lo cual hace que la interfase entre el recubrimiento y el sustrato se agriete y que la tasa de galvanización disminuya debido a la interrupción en el transporte de masa. Por otra parte, en aceros calmados no se encuentra la superficie de hierro alfa, pero se produce una relación similar debido al aumento de la efusión⁷ del hidrógeno causada gracias a la presencia de aluminio.

⁷ Proceso de escape de un gas que se encuentra bajo presión (Atkins, 2006).

- **Rango Sandelin (0,035-0,12%Si)**, no se forma la fase δ por ausencia de Fe- α . Se pierde hidrógeno posterior a la inmersión en zinc, se genera una rápida remoción de las fases de aleación en la zona de reacción acero-recubrimiento y se pierde la estructura desarrollada. El espesor del recubrimiento crece abruptamente con un comportamiento lineal (efecto *Sandelin*) y se ve fuertemente influenciado por la temperatura, la cual en rangos bajos hace decrecer la efusión de hidrógeno, retrasando la remoción de partículas y formando capas de aleación más densas.
- **Rango Sebisty (0,12-0,28%Si)**, la formación de capas depende de la temperatura, misma que con un incremento hace que la tasa de galvanizado se reduzca (efecto *Sebisty*). Sobre los 450°C la fase δ y una rotura aparecen en el límite de fase, impidiendo el transporte de materia entre el acero y el zinc. Esto se produce porque la post-difusión de hidrógeno desde el acero no puede ser compensada por la efusión del hidrógeno superficial, gracias a lo cual se forma una capa temporal periférica empobrecida de hidrógeno altamente reactiva y una capa δ compacta.
- **Alto contenido de silicio (>0,28%Si)**, el espesor del recubrimiento crece con el aumento de temperatura y la efusión de hidrógeno decrece fuertemente en la superficie del acero sin afectar en la estructura de la capa de zinc.

En base a ello, en la Figura 1.6 se representa el espesor del recubrimiento en función del contenido de silicio (para temperaturas comprendidas entre 440-460°C), en donde se puede apreciar además del efecto *Sebisty* y del pico producido en el rango *Sandelin*, que a bajos contenidos de silicio, el espesor del recubrimiento es independiente de la temperatura y que en altos contenidos se obtienen espesores relativamente grandes.

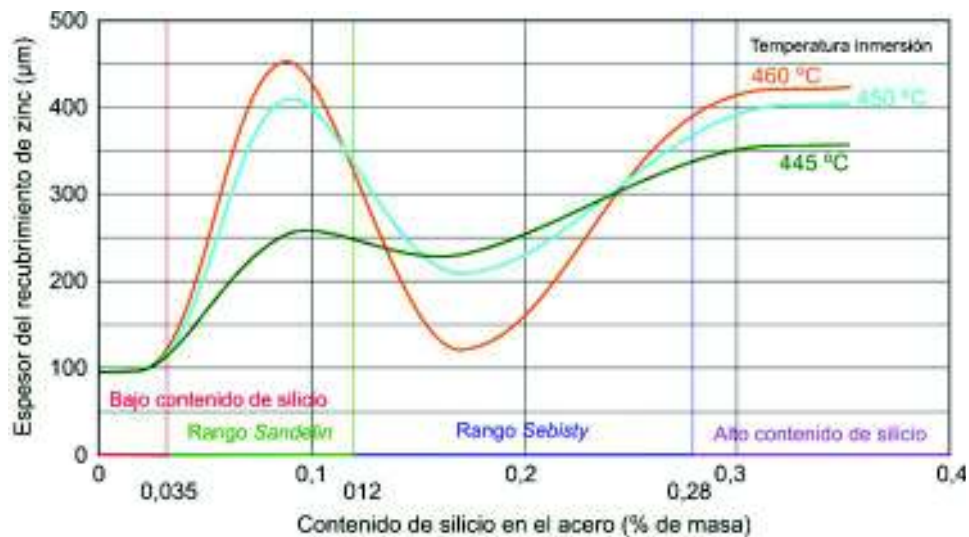


Figura 1.6. Espesor del recubrimiento en función del contenido de silicio (inmersión de 10 min).
(Fuente: Maaß, 2011)

Por otra parte, las diferentes combinaciones que se pueden generar entre la temperatura del baño de zinc y el contenido de silicio del acero entregarán como resultados diferentes tipos de estructuras, lo cual se puede observar detalladamente en la Figura 1.7. Además, en el ANEXO I se pueden apreciar las fases desarrolladas en los aceros con diferentes contenidos de silicio, sus respectivas características y una imagen microscópica de las mismas.

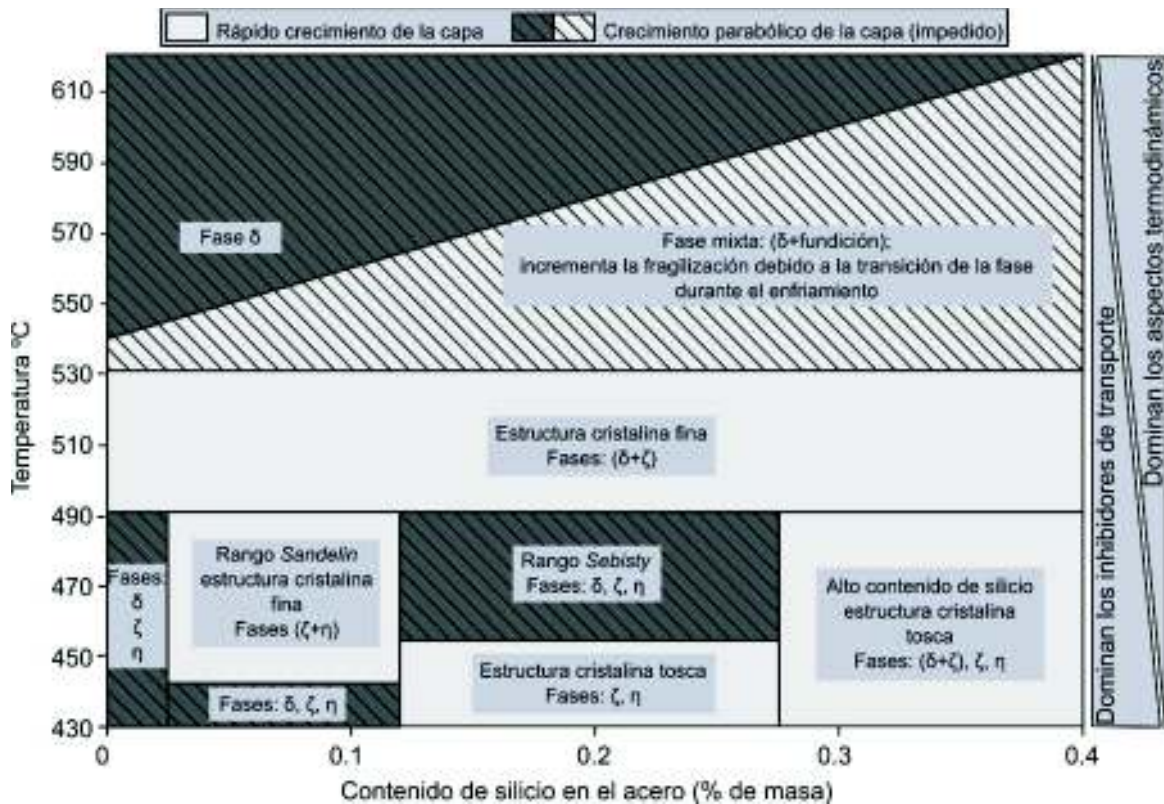


Figura 1.7. Estructuras cristalinas en aceros al carbono con tiempos de galvanizados mayores a 5 minutos (existe una transición entre las estructuras individuales existentes).
(Fuente: Maaß, 2011)

Continuando con los factores que afectan el espesor del recubrimiento, se encuentran los referidos por Kuklik & Kudlacek (2016):

- **El hidrógeno y sus efectos perjudiciales**, se producen por la reacción entre el hierro y cloruro de hidrógeno durante el decapado, donde el hidrógeno pasa al área de menor presión parcial y penetra el acero, formando una solución intersticial. Allí el hidrógeno mantiene su forma atómica, pero al culminar el decapado puede escapar o formar moléculas en zonas con defectos estructurales, produciendo así burbujas, fragilización o corrosión.

- **Componentes químicos del acero**, son elementos de aleación que pueden modificar o influenciar sobre las propiedades del recubrimiento. Entre ellos se encuentran:
 - **Fósforo (P)**, produce un efecto similar al silicio en concentraciones superiores al 0,03%. Para prevenir este efecto, se debe cumplir que $Si+2,5 P < 0,09$.
 - **Azufre (S)**, mejora la maquinabilidad del acero, pero lo disuelve excesivamente en el zinc fundido. Más del 0,15% de contenido puede producir cambios geométricos.
 - **Manganeso (Mn)**, en concentraciones sobre el 1,25% generan una disposición más compacta de los cristales de la fase ζ . En aceros calmados, el recubrimiento presenta mayor consistencia y mejores propiedades mecánicas.
 - **Carbono (C)**, contenidos bajos no generan gran impacto, pero contenidos elevados aceleran la tasa de reacción hierro-zinc, producen espesores de recubrimiento gruesos y al precipitarse en los bordes de grano contribuyen a la corrosión por hidrógeno.
 - **Aluminio (Al)**, agente desoxidante para aceros calmados, de elevada afinidad con el nitrógeno. El aluminio saturado en el acero puede permanecer aleado al hierro o libre. Si se encuentra libre actúa en ciertas reacciones y da lugar a una fase Fe-Al inconsistente, delgada, densa y no uniforme, que previene la difusión del hierro.
- **Elementos de adición en las tinas de zinc**, juntos no deben exceder el 1,5% de concentración y son los siguientes:
 - **Aluminio (Al)**, del 0,003-0,005% reduce la oxidación de la superficie del sustrato, pero en contenidos mayores forman una capa gruesa de óxido en la superficie de zinc, que no se disuelve con el flux y provoca defectos.
 - **Estaño (Sn)**, en concentraciones mayores al 1% forman lentejuelas de zinc con fines decorativos. En aceros calmados reduce el espesor del recubrimiento.
 - **Níquel (Ni)**, suprime el efecto del rango *Sandelin*. Contenidos de 0,055% otorgan al acero una conducta efervescente⁸, con características mecánicas buenas y con un espesor del recubrimiento adecuado. No influye en aceros con $Si > 0,12\%$.
 - **Plomo (Pb)**, reduce la tensión superficial y la viscosidad del zinc durante su remoción del baño, pero es dañino para la salud.
 - **Bismuto (Bi)**, es una alternativa del plomo. También es tóxico, por lo que se emplea en contenidos menores al 0,1%.
- **Otros factores**, los cuales se detallan a continuación:
 - **Espesor de la sección del sustrato**, el espesor de los recubrimientos es menor con secciones delgadas de sustratos (se controlan espesores mínimos).

⁸ Conducta que presentan los aceros no calmados, ya que liberan grandes cantidades de gas.

- **Procesamiento mecánico sobre el sustrato**, ciertos procesos incrementan el espesor del recubrimiento debido al aumento de la superficie de contacto entre el sustrato y el zinc, alterando así la estructura de la capa protectora.
- **Procesamiento térmico del sustrato**, tratamientos térmicos a temperaturas que no llegan al punto de recristalización conseguirán una recuperación del recubrimiento y un refinado del grano, lo cual genera revestimientos uniformes y sin anomalías.
- **Limpieza superficial del sustrato**, sustancias extrañas en la superficie facilitan la formación de cristales en la fase ζ .
- **Temperatura del baño de zinc**, el espesor de los recubrimientos de aceros se relaciona con la temperatura del baño de zinc para cada rango de contenido de silicio, tal como se observa en la Figura 1.8. Además, resulta importante resaltar que en tiempos cortos de inmersión no existen diferencias considerables en el espesor del recubrimiento, para los diferentes tipos de aceros.

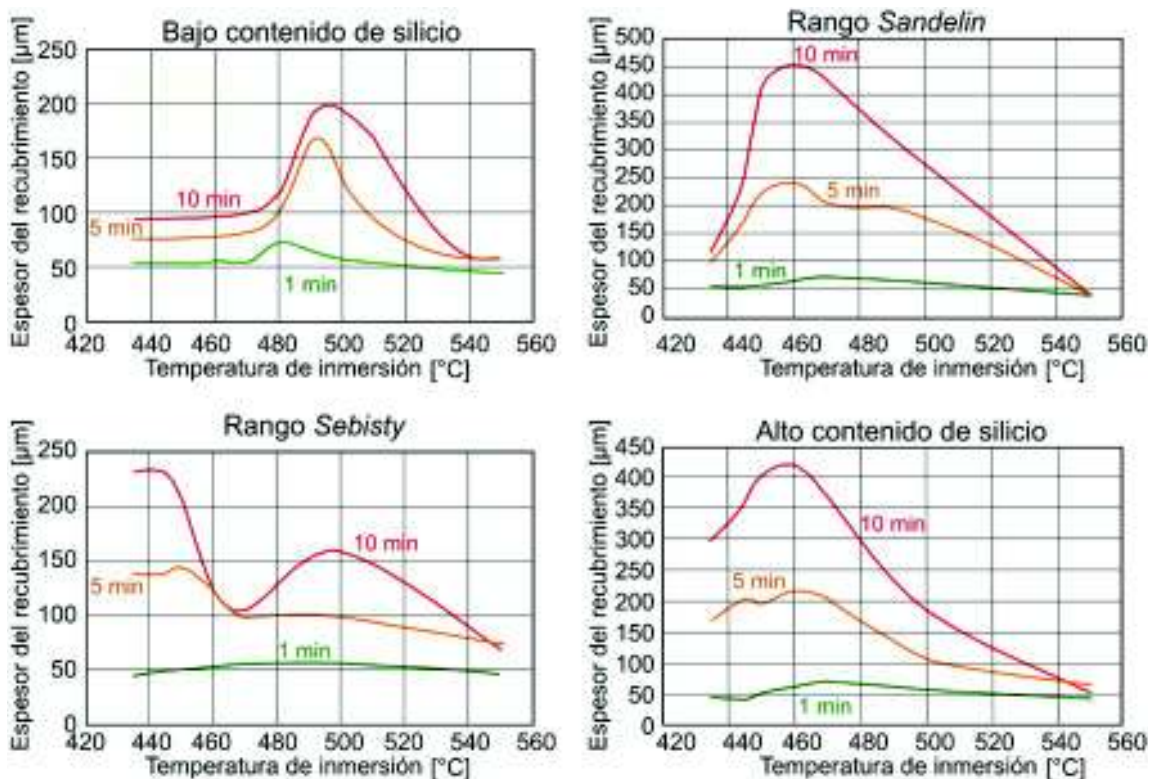


Figura 1.8. Espesor del recubrimiento en función de la temperatura de inmersión (1, 5 y 10 minutos) para aceros con diferentes contenidos de silicio.

(Fuente: Maaß, 2011)

- **Tiempo de inmersión**, generalmente de 2 a 8 minutos y depende de la masa del objeto (Van Eijnsbergen, 2012). En la Figura 1.9 se observa este comportamiento.

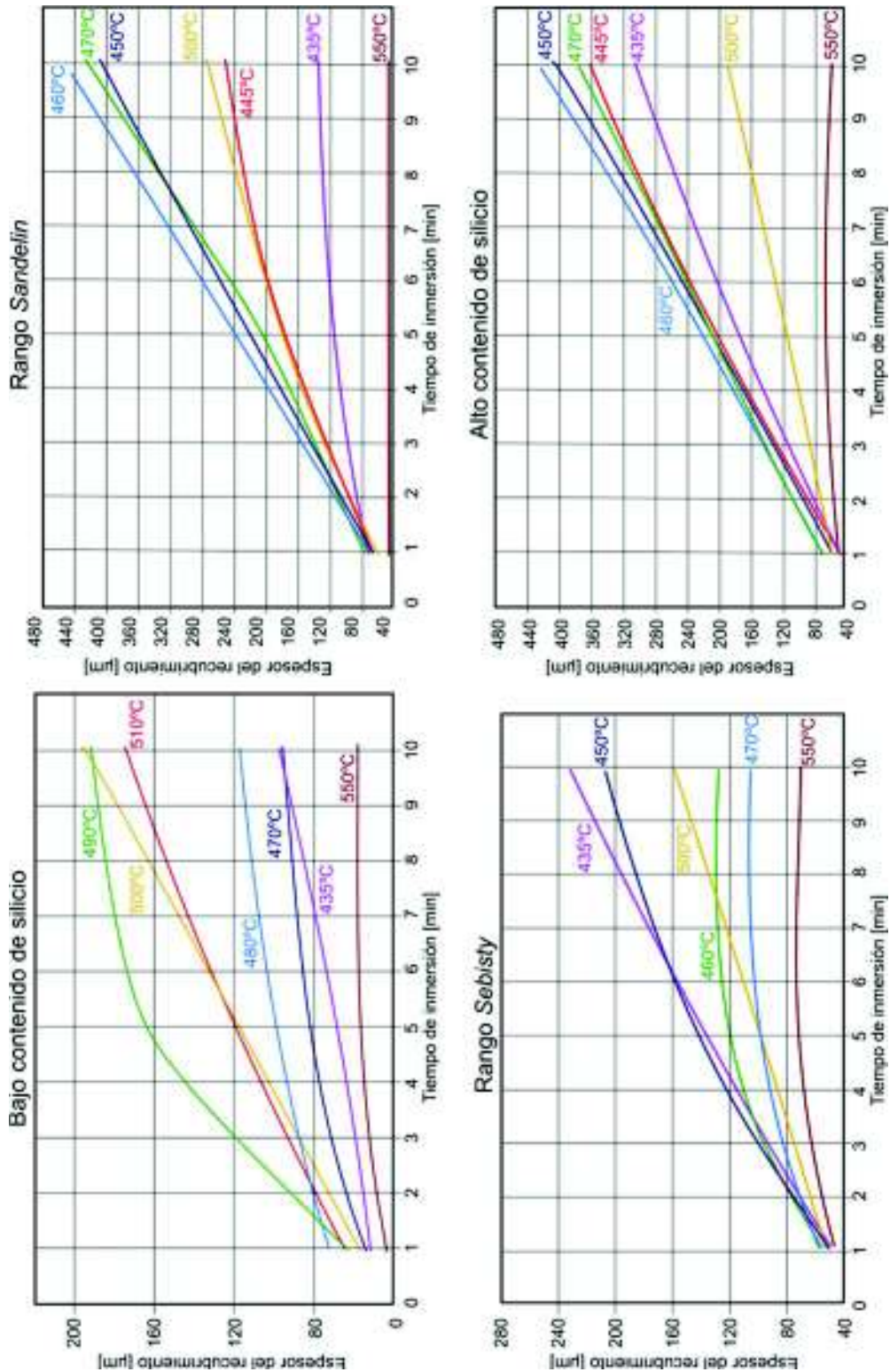


Figura 1.9. Dependencia del espesor del recubrimiento con el tiempo de inmersión.
(Fuente: Maaß, 2011)

Tomando en cuenta los dos últimos factores mencionados, en la Figura 1.10 se observan micrografías de acero galvanizado con 0,21% de silicio, donde el espesor del recubrimiento incrementa con el aumento de temperatura y con el tiempo de inmersión.

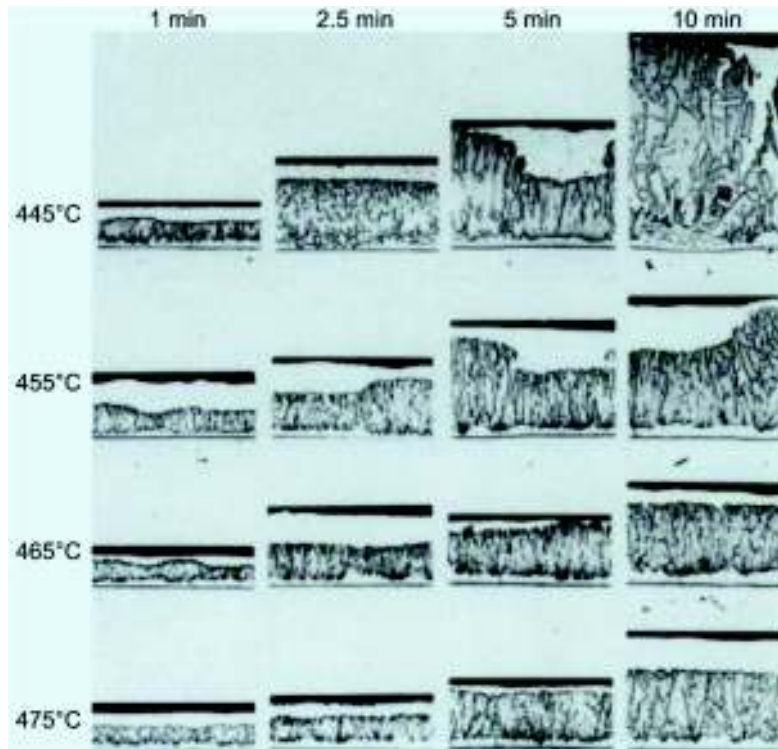


Figura 1.10. Micrografías de acero galvanizado en el rango *Sebisty*.
(Fuente: van Eijnsbergen, 2012)

- **Condiciones de enfriamiento**, la difusión hierro-zinc continúa después del proceso de galvanizado, debajo de los 200°C. Aceros de gran espesor y dentro del rango *Sebisty*, consumen todo el zinc del recubrimiento formando una aleación hierro-zinc durante el enfriamiento, la cual posee un aspecto mate opaco (Kuklik & Kudlacek, 2016).

1.3. Normas de certificación de procesos de galvanizado

A través de los estándares descritos a continuación, la industria ecuatoriana certifica los diferentes procesos de galvanizado por inmersión en caliente.

1.3.1. Norma ASTM A123: Especificación estándar para recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero

Este estándar abarca los requerimientos para recubrimientos de zinc de productos de hierro y acero rolado, perfiles forjados, fundiciones, láminas, barras y tiras obtenidas por un proceso de galvanizado por inmersión en caliente. También cubre productos terminados, no terminados y elementos que han sido galvanizados antes de formar parte de piezas fabricadas demasiado grandes como para ser centrifugadas.

Además, se garantiza la calidad del recubrimiento mediante la inspección visual, medición del espesor del recubrimiento, medición del peso antes y después del galvanizado, medición de la adhesión y medición de la fragilidad. También incluye otras generalidades.

1.3.2. Norma ASTM A153: Especificación estándar para recubrimientos de zinc (por inmersión en caliente) en herrajes de hierro y acero

Este estándar cubre los recubrimientos de zinc, aplicados a herrajes de hierro y acero por un proceso de inmersión en caliente. Estos herrajes son centrifugados o manipulados con el fin de remover el exceso de metal del baño.

Posteriormente, mediante inspección visual se garantiza el acabado y apariencia del recubrimiento y se asegura el cumplimiento de los siguientes parámetros estandarizados: masa, espesor, fragilidad y apariencia del recubrimiento. También se especifican otras particularidades sobre este proceso.

1.3.3. Norma NTE INEN 672: Recubrimientos de zinc por inmersión en caliente sobre elementos de sujeción. Requisitos generales

Aplicable a recubrimientos de zinc producidos por inmersión en caliente para herrajes de acero y hierro centrifugados o manipulados de tal forma que se remueva el exceso de metal obtenido en el proceso. No incluye productos como: alambre, clavos, tubo, perfiles o láminas sin procesar. Se basa en las normas ISO 1459, ISO 1461 y ASTM 153.

1.3.4. Norma NTE INEN 950: Recubrimientos metálicos. Determinación de la adherencia. Métodos de ensayo

Norma aplicada a todo tipo de recubrimiento obtenido por alguno de los siguientes métodos: inmersión en caliente, electrolítico, metalizado, mecánico, entre otros. Los métodos de adherencia empleados incluyen: limado, bruñido manual, enfriamiento brusco, bruñido manual para metales preciosos, doblado, cinta adhesiva, soldadura blanda, cortadura, martillado y rayado.

1.3.5. Norma NTE INEN 2483: Recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos

Este estándar se encuentra desarrollado totalmente en base a la Norma ASTM A123.

1.4. Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36

1.4.1. Ensayo de tracción

Mediante el ensayo de tracción se obtiene la resistencia mecánica y la ductilidad del acero estructural a través de una carga de tensión aplicada sobre una pequeña muestra, con la finalidad de caracterizar mecánicamente a este sustrato metálico y a la vez describir su comportamiento. Para este fin, basándose en el procedimiento establecido en la norma ASTM E8, se coloca la muestra entre las mordazas de una máquina universal de ensayos, misma que gracias a un sistema de control automático debe tabular y graficar los resultados obtenidos al aplicar la carga de tracción. Esta carga es aplicada con una velocidad lenta y el ensayo culmina al producirse la fractura de la probeta (Gere & Goodno, 2009).

1.4.2. Diagrama esfuerzo-deformación

Beer (2007) señala que el acero estructural es un material dúctil⁹, por lo que al someterse a un ensayo de tracción se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación que presenta el comportamiento observado en la Figura 1.11 y que además está detallado a continuación:

- **OA**, la carga aplicada presenta un comportamiento lineal respecto a la deformación y su pendiente es conocida como módulo de elasticidad.
- **AB**, la pendiente empieza a disminuir hasta alcanzar el punto B, a partir de donde la curva se vuelve horizontal.
- **BC**, la probeta presenta un comportamiento plástico, alcanza el punto de fluencia y se alarga considerablemente sin un aumento notable de la tensión (Gere & Goodno, 2009).
- **CD**, el acero empieza a endurecerse a causa de la deformación generada por una carga grande (Gere & Goodno, 2009). En el punto D, se alcanza el valor máximo de tensión, correspondiente a la resistencia última a la tracción.
- **DE**, la elongación de la probeta se genera con cargas menores hasta alcanzar la falla, la cual ocurre al llegar al valor de carga correspondiente a la resistencia a la fractura. Aquí se provoca una estricción, ya que su sección transversal se reduce.
- **CE'**, curva obtenida al considerar el área real de la sección transversal de la probeta ensayada, mientras que en CDE se considera su área inicial (Gere & Goodno, 2009).

⁹ Material que tiene capacidad de soportar un gran grado de deformación hasta que se produce su fractura (Callister, 2007).

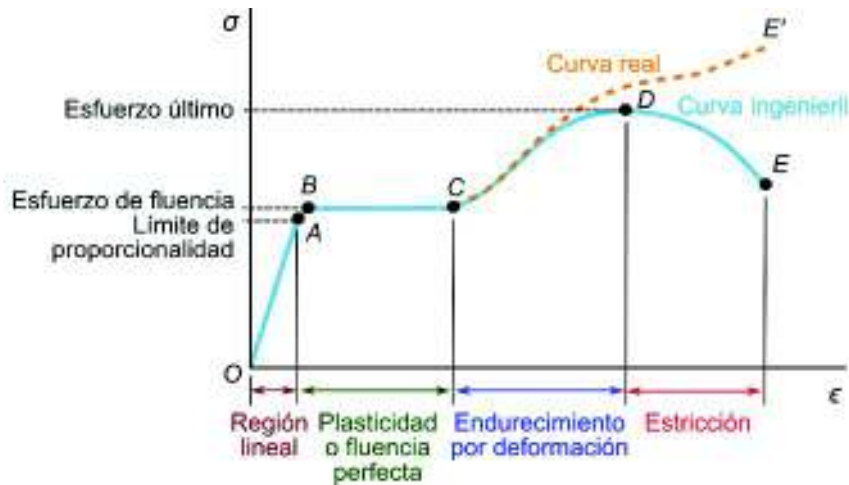


Figura 1.11. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria de un acero estructural.
(Fuente: Gere & Goodno, 2009)

Adicionalmente, para medir la ductilidad del material se lo hace mediante su porcentaje de alargamiento o elongación (ϵ), mismo que es calculado con la Ecuación 1.1 a partir de la longitud final (L_f) y la longitud inicial (L_o) de la probeta ensayada.

$$\epsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\%$$

Ecuación 1.1. Porcentaje de elongación.

1.5. Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36

1.5.1. Ensayo de dureza

Este ensayo se efectúa con la finalidad de medir la resistencia a la indentación (penetración) del sustrato metálico de acero estructural de bajo contenido de carbono. Esto, se lo realiza asignando un número de dureza a la profundidad de una huella que resulta de rayar la superficie del material ensayado con un penetrador obtenido a partir de un material más duro, mediante una carga y velocidad controlada. Hay que tener en cuenta que las durezas son medidas relativas y solamente se deben comparar los resultados de ensayos realizados mediante la misma técnica (Callister, 2007).

1.5.2. Ensayo de dureza Rockwell

Es un método sencillo de realizar y no requiere conocimientos especiales, por lo que se ha convertido en una de las técnicas más empleadas para medir la dureza y se la ejecuta en base a la norma ASTM E18. Se determina a partir de la diferencia de profundidad de

penetración que se obtiene al aplicar en primer lugar, una carga pequeña y posteriormente una carga mayor. Las escalas, penetradores y cargas empleadas más comúnmente se detallan en la Tabla 1.3 (Callister, 2007).

Tabla 1.3. Escalas para el ensayo de dureza Rockwell.

Símbolo	Penetrador	Carga menor [Kgf]	Carga mayor [Kgf]	Característica
HRA	Diamante	10	60	Cono con ángulo de 120°
HRB	Esfera de acero	10	100	Diámetro de 1/16 pulg
HRC	Diamante	10	150	Cono con ángulo de 120°

(Fuente: Callister, 2007)

1.5.3. Relación entre dureza y resistencia a la tracción

Existe una relación proporcional para cada tipo de material entre el número de dureza en escala Brinell (HB) y la resistencia a la tracción (St) en MPa, por lo que se puede afirmar que la resistencia de un metal a la deformación plástica puede ser definida tanto por su resistencia a la tracción como por su dureza (Callister, 2007). Esta relación matemática, para aceros con menos del 0,8% de carbono, se encuentra expresada en la Ecuación 1.2

$$S = 3,45 \times H$$

Ecuación 1.2. Relación entre dureza y resistencia a la tracción para aceros.

Adicionalmente, como se puede observar resulta necesario relacionar las durezas Rockwell (HRA, HRB o HRC) con las durezas Brinell (HB), por lo cual se emplean las tablas respectivas de conversión de dureza de metales contenidas en la norma ASTM E140.

1.6. Análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36

1.6.1. Análisis de composición química mediante un espectrómetro de chispa

Este procedimiento permite determinar la composición química del perfil estructural de acero (sustrato metálico). Para ello, se vaporiza una muestra del material y se analizan las chispas formadas en un espectrómetro de emisión. Durante este proceso los átomos e iones desprendidos son excitados, por lo que emiten una luz que es conducida hasta un conjunto de sistemas ópticos que mediante un detector electrónico fotosensible miden la luz y la convierten en cargas eléctricas (Servicio Científico-técnicos de la UPC, s.f.).

1.7. Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado

El análisis microscópico de las secciones transversales de las muestras de los perfiles galvanizados, requiere la obtención de probetas metalográficas preparadas en base a la norma ASTM B487. De esta forma, se puede medir el espesor del recubrimiento y de sus fases, así como también las fotomicrografías del fenómeno de difusión de la capa de aleación hierro-zinc depositada sobre el sustrato metálico.

1.7.1. Metalografía

Estudia microscópicamente las características estructurales, tamaño de grano, forma, distribución de fases, propiedades mecánicas, tratamientos mecánicos y térmicos de un metal o una aleación mediante la ayuda de un microscopio metalúrgico (Avner, 1988). Para ello se preparan adecuada y cuidadosamente las muestras mediante las siguientes etapas:

- **Extracción de la muestra**, consiste en seleccionar apropiadamente un ejemplar representativo (Laboratorio de Metalografía, 2010), sencillo de manipular y que tiene que permanecer frío durante su extracción.
- **Montaje**, usado para que las muestras pequeñas o de forma incómoda sean sencillas de manipular durante las operaciones de pulido. Se realizan con resinas de plásticos sintéticos resistentes al ataque químico de los reactivos usados (Avner, 1988).
- **Desbaste grueso o burdo**, remueve todas las rebabas y rayones que se producen al momento de cortar la muestra.
- **Desbaste fino**, elimina la zona deformada en los procesos anteriores mediante el empleo secuencial de lijas cada vez más finas.
- **Pulido grueso**, se desbasta levemente en una rueda giratoria húmeda cubierta de un paño especial y bajo la acción de abrasivos suspendidos en agua.
- **Pulido fino**, similar al proceso anterior, pero con partículas abrasivas más finas que eliminan las deformaciones pequeñas de la superficie de la muestra.
- **Ataque químico**, hace visible cada característica estructural que se desea estudiar, gracias a la acción química de un reactivo en la superficie pulida. Su aplicación es por inmersión o mediante un algodón empapado (Laboratorio de Metalografía, 2010).

Las operaciones de desbaste y pulido se realizan con enfriamiento de la muestra, a través de movimientos lineales repetitivos perpendiculares a los rayones, con la finalidad que dicha muestra alcance una superficie plana y libre de imperfecciones (Avner, 1988).

1.7.2. Difusión atómica y sus mecanismos de difusión

La difusión es un mecanismo en donde los átomos se desplazan a través de la materia (Smith, 2006), con la finalidad de otorgar estabilidad termodinámica y de crear homogeneidad en la composición del material. Este fenómeno es producto de la diferencia de concentración de la materia, su impureza y la imperfección de sus arreglos atómicos (Askeland, Fullay, & Wright, 2011). Por otra parte, se conoce que a temperaturas por debajo del punto de fusión del zinc, en la superficie del acero, se pueden difundir los átomos de zinc, lo cual permite generar la unión química con el hierro y promover la alta resistencia a la corrosión del recubrimiento (Kuklik & Kudlacek, 2016). En una red cristalina se pueden presentar los mecanismos ilustrados en la Figura 1.12 y descritos a continuación:

- **Difusión por vacantes o mecanismos sustitucionales**, los átomos se desplazan a través de sus redes cristalinas hacia vacantes o cualquier otro tipo de defecto presente en el material. Este fenómeno se genera gracias a la energía de activación producida por las vibraciones térmicas de los átomos, las cuales elevarán el grado de difusión del metal debido a un incremento de temperatura, mientras que la diferencia de tamaño entre átomos y su energía de enlace definirán la velocidad de difusión.
- **Difusión intersticial**, se genera cuando los átomos de la red cristalina se mueven a una posición intersticial vecina y desocupada, sin desplazar a ningún otro átomo, ya que el tamaño de átomos que se difunden es más pequeño respecto a los de la matriz.

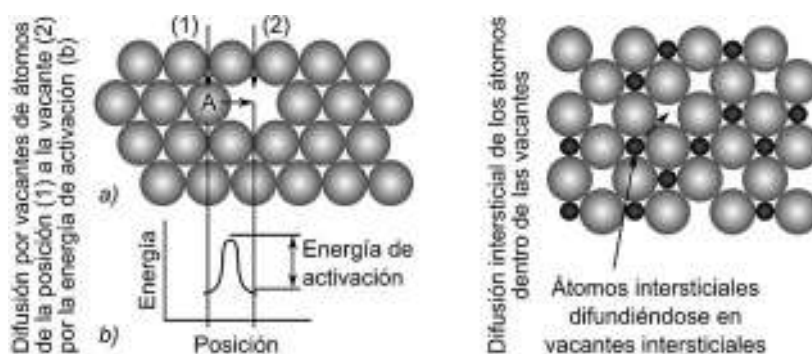


Figura 1.12. Mecanismos de difusión.
(Fuente: Smith, 2006)

1.7.3. Procesamiento digital de imágenes

Una imagen es una función bidimensional $f(x,y)$ conformada por un número finito de elementos que se denominan píxeles, gracias a los cuales puede ser procesada y manipulada digitalmente en una computadora (Gonzales & Woods, s.f.). Para el presente

estudio, en primer lugar las imágenes se adquieren digitalmente a través de un microscopio metalográfico, para posteriormente llevarlas a un preprocesamiento, en donde a través de diversas técnicas se mejora la apariencia visual de la imagen, realizando un ajuste en base a los requerimientos y apreciación del usuario (Departamento de Electrónica y Automática, 2017). Entre las técnicas del preprocesamiento se encuentra el mejoramiento del contraste, eliminación de ruido, restauración, entre otras (Serna & Román, 2009).

1.7.4. Software libre *Python*

Es un lenguaje de programación empleado en el desarrollo de software, sencillo de usar, poderoso y que brinda dinamismo para trabajar con rapidez en la mayoría de plataformas. Al mismo tiempo, pone a disposición una gran biblioteca de libre distribución que resulta útil en el desarrollo de programas en diversas áreas de aplicación, entre ellas la del procesamiento digital de imágenes (Van Rossum, 2009). Para esto, se requiere un compilador (intérprete de lenguaje) que ejecute un código de fuente (Llulluna, 2014) desarrollado en base a los paquetes o librerías *NumPy*, *OpenCV*, *PIL* y *Matplotlib*, mismos que permiten leer, manipular, realizar operaciones de reajuste y escribir las imágenes en varios formatos (Solem, 2012), garantizando así que se observe adecuadamente el fenómeno de difusión requerido en este estudio.

1.8. Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado

1.8.1. Método de decapado

Se trata de un ensayo destructivo basado en la norma ASTM A90 para determinar el peso (masa) por unidad de área del recubrimiento de zinc aplicado sobre el sustrato de acero ASTM A36. Para ello, se realiza el decapado de un espécimen removido de un artículo de prueba, mediante el uso de un compuesto químico, con la finalidad de remover el recubrimiento de zinc del sustrato metálico y así obtener el peso inicial del espécimen (W_1) y el peso del espécimen decapado (W_2), en gramos. Posteriormente, a través de la Ecuación 1.3 y conociendo el área de recubrimiento original del espécimen (A) en mm^2 , se puede obtener el peso del recubrimiento (C) en g/m^2 (ASTM International, 2013).

$$C = \left[\frac{(W_1 - W_2)}{A} \right] \times 10^6$$

Ecuación 1.3. Peso (masa) del recubrimiento por unidad de área.

1.9. Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

1.9.1. Ensayo de micro-indentación

Es un ensayo basado en la norma ASTM E384, en el cual se mide la dureza de un determinado material mediante micro-indentación, ya sea a través de la escala Knoop o de la escala Vickers. Esta técnica consiste en forzar sobre la superficie de la muestra un indentador muy pequeño con cargas relativamente bajas en comparación a las empleadas en los ensayos de dureza tradicionales, tal como es el caso de la escala Brinell o de la Rockwell. Posteriormente, se mide la marca resultante a través de un microscopio óptico y se la convierte en un número de dureza. Para este fin, se requiere una adecuada preparación superficial de la muestra mediante operaciones de desbaste y pulido, con lo cual se garantiza precisión en la medición de dureza (Callister, 2007).

1.9.2. Ensayo de dureza Vickers por micro-indentación

En este caso se emplea un indentador Vickers bajo la acción de una fuerza y un tiempo previamente establecidos (ver Tabla 1.4). Entonces, se remueve la carga y se miden las diagonales de la indentación realizada en μm , con la ayuda de un microscopio óptico. Finalmente, se extrae la media (d) de las dos diagonales medidas y con el valor de fuerza aplicada (P) se calcula el número de dureza Vickers a través de la Ecuación 1.4

$$H = 1854,4 \times \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 1.4. Dureza Vickers.

Tabla 1.4. Escala Vickers para el ensayo de dureza por micro-indentación.

Símbolo	Penetrador	Fuerza [gf]	Tiempo [s]	Geometría
HV	Diamante	1-1000	10-15	Piramidal de base cuadrada y ángulo entre caras de 120°

(Fuente: CSUN, 2008)

1.10. Ensayo de *Pull-Off* para medición de la adhesividad mecánica

1.10.1. Adhesividad mecánica

Es importante realizar ensayos de adhesión mecánica a cualquier recubrimiento aplicado a un sustrato metálico, ya que una mala adhesividad del sistema se traduce directamente

en un mal desempeño de su capa protectora. Por lo tanto, valores bajos de adhesión son indicadores de fallas prematuras del recubrimiento (Fletcher & Barnes, s.f.). Para ello, se utilizan las normas ASTM D4541 e ISO 4624, ya que describen los diferentes equipos y el método empleado para determinar la adhesividad mecánica mediante el ensayo de *Pull-Off*, mismo que a diferencia de otros procedimientos como los especificados en las normas ASTM A123 o NTE INEN 950, entregan como resultado valores cuantificables de adhesión.

1.10.2. Ensayo de *Pull-Off*

Para realizar la medición de la adhesividad mecánica de una capa protectora, a través del ensayo de *Pull-Off* se emplea el mecanismo representado en la Figura 1.13, el cual se encuentra compuesto por una muñeca unida a la superficie del recubrimiento mediante el uso de un adhesivo curado con propiedades cohesivas mayores a las del recubrimiento. Entonces, este conjunto se ensambla en una máquina de ensayos y con una tensión controlada se mide el esfuerzo mínimo requerido para romper la interface recubrimiento-sustrato (ISO, 2016). Al mismo tiempo, en este dispositivo se produce una auto-alineación, de tal forma que la probeta se encuentre sometida a tracción pura durante la medición. Finalmente, se identifica, se califica y se reporta la naturaleza de la fractura en función del porcentaje de fallas adhesivas y cohesivas obtenidas (ASTM International, 2009).



Figura 1.13. Ensamble para el ensayo de *Pull-Off* de sustratos rígidos, usando una sola muñeca.
(Fuente: ISO, 2016)

En caso de querer repetir el ensayo y para obtener consistencia en los resultados se deben definir ciertos parámetros, como: tipo y condiciones de uso del adhesivo, preparación superficial del recubrimiento y de la muñeca, diseño de la muñeca, temperatura a la cual se realiza el ensayo, tipo de equipo empleado, entre otros (Fletcher & Barnes, s.f.).

1.11. Medición del perfil de superficie

1.11.1. Rugosidad superficial

La rugosidad, según Kalpakjian & Schmid (2002) se define como la medida de las desviaciones cercanas e irregulares de una superficie plana expresada en función de los siguientes factores:

- Altura y ancho de las desviaciones.
- Y la distancia a lo largo de la cual se mide la rugosidad superficial.

Es entonces que, para obtener la medición de la rugosidad de la superficie de un determinado material es necesario emplear instrumentos denominados como rugosímetros superficiales. Estos equipos expresan una rugosidad máxima (R_{max}), definida como la distancia entre el pico más alto y el valle más bajo del perfil de superficie a lo largo de la longitud de la muestra, entre los cuales además existe una distancia de separación (R_t) (Elcometer, 2016). Estos parámetros pueden apreciarse gráficamente en la Figura 1.14 y las unidades empleadas para expresar la rugosidad superficial en el presente estudio son los micrómetros (μm).

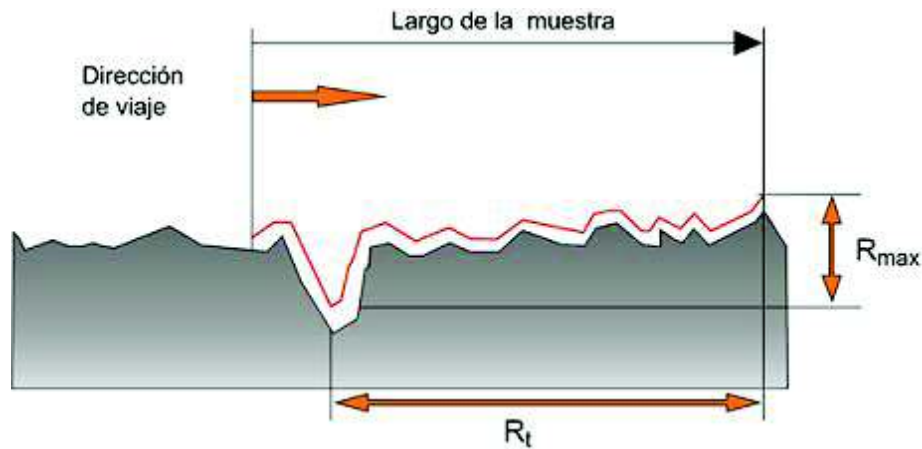


Figura 1.14. Medición de la rugosidad de la superficie.
(Fuente: Elcometer, 2018)

Finalmente se puede añadir que, a través de esta forma de expresión de la rugosidad superficial también se puede indicar la cantidad de material que se debe retirar para obtener una superficie completamente lisa (Kalpakjian & Schmid, 2002).

2. METODOLOGÍA

2.1. Obtención de la muestra

Para realizar los respectivos análisis se toman como base perfiles estructurales de acero de bajo contenido de carbono (ASTM A36) de 6 m de largo y denominación AL 65 x 6 mm, los cuales una vez cortados en secciones de 400 mm se someten a diferentes acabados superficiales, previo al proceso de galvanizado por inmersión en caliente.

Una vez realizados estos tratamientos superficiales, los lotes se separan por grupos, tal que cada uno de ellos sea galvanizado por una empresa diferente. Las empresas involucradas se denominan en este documento como empresa A y empresa B, teniendo en cuenta que cada una de ellas ejecuta el galvanizado por inmersión en caliente de forma diferente, por lo que en la Tabla 2.1 se resumen los acabados superficiales propuestos para cada sección y las diferencias en los procesos de las 2 empresas involucradas.

Tabla 2.1. Tratamientos superficiales y variaciones del proceso de galvanizado.

Empresa	Tratamiento superficial mecánico	Temperatura del baño de zinc	Tipo de enfriamiento (tiempo)
A	No	435°C ¹⁰	Al ambiente
A	Pulido	435°C ¹⁰	Al ambiente
A	Lijado	435°C ¹⁰	Al ambiente
A	Esmerilado	435°C ¹⁰	Al ambiente
A	(reducción tiempo de fluxado)	435°C ¹⁰	Al ambiente
B	No	450°C	En agua (10 s)
B	Pulido	450°C	En agua (10 s)
B	Lijado	450°C	En agua (10 s)
B	Esmerilado	450°C	En agua (10 s)

(Fuente: Propia)

Gracias a que la norma ASTM A123 cubre las exigencias del galvanizado por inmersión en caliente de productos de acero laminados y además detalla la metodología empleada para determinar el tipo y tamaño de muestra para cada caso, se procede a identificar el muestreo requerido. Por consiguiente, se consideran las secciones obtenidas como artículos de especímenes simples, ya que cada elemento posee individualmente un área de galvanizado menor a 100 000 mm².

¹⁰ La temperatura del baño de zinc empleada por parte de la empresa A es desconocida, por lo cual se toma como referencia la temperatura de 435°C, que es el valor mínimo correspondiente a la temperatura a partir de la cual se puede obtener la formación del recubrimiento de aleación Fe-Zn.

Una representación esquemática del proceso de muestreo en base a la norma mencionada se puede apreciar en la Figura 2.1.

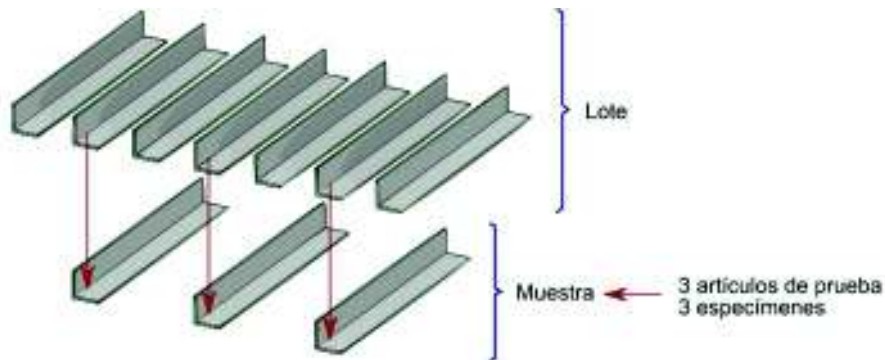


Figura 2.1. Muestreo (artículos de especímenes simples) de los perfiles galvanizados.
(Fuente: ASTM International, 2015)

Adicionalmente, como cada lote se encuentra compuesto por 1 solo elemento (con un tratamiento superficial diferente y con cierta variación en el proceso de galvanizado), la norma señala que la superficie total de cada unidad de producto se considera como un solo espécimen, a partir del cual se extraen las respectivas probetas que se emplean en la ejecución de cada uno de los ensayos elegidos para caracterizar las diferentes secciones de perfil galvanizadas. Estas probetas con el fin de que se reconozcan fácilmente se las codifica en base a la tabla adjunta en el ANEXO II.

2.2. Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36

2.2.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de tracción

- **Probetas para el ensayo de tracción**, son obtenidas a partir del perfil de acero estructural ASTM A36 mediante un proceso de maquinado. Sus dimensiones se encuentran especificadas en la norma ASTM E8 y pueden observarse en la Figura 2.2.

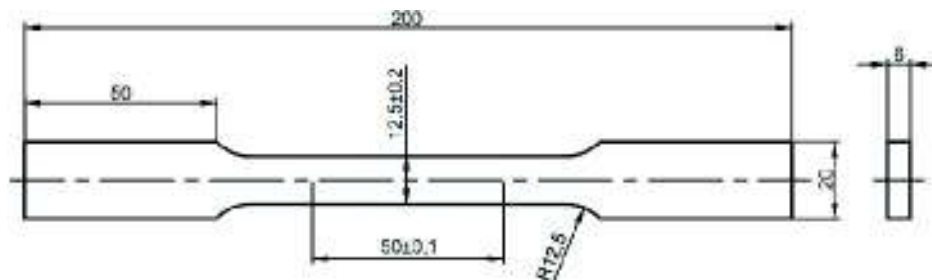


Figura 2.2. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción.
(Fuente: ASTM International, ASTM E8, 2016)

- **Máquina universal de ensayos**, equipo disponible en el Laboratorio de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, cuyas características se encuentran descritas en la Tabla 2.2.
- **Otros equipos**, incluye un calibrador pie de rey (apreciación de 0,01 mm) y un marcador de distancias.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Tinius Olsen	
Modelo	Súper L	
Capacidad de carga	3000 KN	
Aplicación de carga	Sistema hidráulico	
Display	Digital	
Dimensiones	Ancho: 915 mm	
	Profundidad: 788 mm	
	Altura: 1016 mm	
Almacenamiento de datos	Software NAVIGATOR	

(Fuente: propia)

2.2.2. Procedimiento del ensayo de tracción

- Asegurarse que las probetas tengan un acabado superficial adecuado sin rebabas, protuberancias o cualquier otro tipo de concentrador de esfuerzos.
- Con el marcador de distancias colocar dos puntos de referencia, mismos que deben encontrarse a una longitud de 50 mm (ver Figura 2.2).
- Colocar las mordazas en la máquina universal de ensayos.
- Seleccionar la plantilla correspondiente a la probeta empleada.
- Configurar en la máquina universal de ensayos una velocidad de carga de 10 mm/min.
- Asegurar la probeta a las mordazas y ubicar la máquina universal en su posición inicial.
- Encerar los datos del equipo.
- Iniciar el ensayo.
- Recolectar los datos obtenidos en el software del equipo.
- Desmontar la probeta y medir con el calibrador la elongación producida en la probeta (entre los puntos de referencia marcados).
- Calcular el porcentaje de elongación empleando la Ecuación 1.1 y tabular el resto de información obtenida.

2.3. Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36

2.3.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de dureza

- **Probetas para el ensayo de dureza**, se utiliza una de las probetas empleadas en el análisis metalográfico (ver la Tabla 2.5 detallada más adelante). Para realizar este ensayo se requiere que previamente ya se encuentre realizado el respectivo análisis metalográfico.
- **Durómetro Rockwell**, el equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus características se encuentran descritas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	HARDROCKER	
Modelo	150-A	
Carga mínima	0 Kgf	
Capacidad de carga	60 Kgf	
	100 Kgf	
	150 Kgf	
Sistema de aplicación de carga	Hidráulico	
Lectura	Analógica	
Indentador empleado	Punta de acero (1/16 pulg)	

(Fuente: propia)

- **Patrones de calibración**, se emplean el patrón Qualitest 66,27 \pm 1,0 HRB.

2.3.2. Procedimiento del ensayo de dureza

- Asegurarse que la probeta a ensayar posea dos superficies completamente planas, paralelas y que en cada una de ellas se encuentre descubierto el material estudiado.
- Garantizar que las superficies de la probeta se encuentran libres de cualquier impureza.
- Seleccionar en el durómetro la escala a emplear (para este caso es Rockwell B), girando la perilla lateral derecha hasta la posición respectiva.
- Colocar el indentador correspondiente a la escala elegida en base a la Tabla 1.3.
- Calibrar el durómetro con ayuda de los patrones de calibración.
- Colocar la probeta sobre el soporte del durómetro.

- Llevar la punta del indentador a la superficie de la probeta, girando la perilla horizontal (en forma de cruz) en sentido horario.
- Encerar el durómetro.
- Hacer que la aguja grande gire 3 veces en el indicador o que la perrilla pequeña pase de la marca negra hasta la marca roja mediante el accionamiento de la perilla horizontal (en forma de cruz).
- Cargar la muestra mediante el accionamiento de la manilla lateral inferior derecha y esperar que la aguja grande del indicador alcance estabilidad, esto ocurrirá aproximadamente en 20 segundos.
- Descargar la máquina, regresando lentamente la manilla lateral inferior derecha.
- Leer y recolectar el valor mostrado en la respectiva escala del indicador.
- Repetir el procedimiento de tal forma que se obtengan 5 medidas consistentes sobre la misma probeta, procurando que la distancia entre cada medición sea mayor a 3 veces el diámetro de indentación.
- Obtener el valor final de dureza, promediando las medidas previamente recolectadas.

2.4. Análisis de composición química del sustrato de acero A36

2.4.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el análisis de composición química

- **Probetas para el análisis de composición química**, se obtienen mediante corte manual con arco de sierra y enfriamiento por agua. Además, una de sus superficies debe ser desbastada. Las dimensiones se detallan en la Figura 2.3.

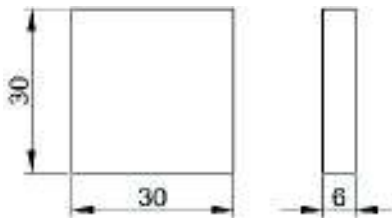


Figura 2.3. Dimensiones de las probetas para el análisis de composición química.
(Fuente: Propia)

- **Espectrómetro de chispa**, el equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional y sus características se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del espectrómetro de chispa.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	BRUKER	
Modelo	Q2 ION	
Voltaje	100/240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Potencia	200 W (50 W en modo espera)	
Cámara de chispeo	Argón de calidad 4,8 con un consumo de 2,5 l/min	
Dimensiones	Ancho: 440 mm	
	Profundidad: 530 mm	
	Alto: 390 mm	

(Fuente: BRUKER, s.f.)

2.4.2. Procedimiento del análisis de composición química

- Colocar la muestra sobre la cámara de chispeo y accionar el botón de inicio del proceso.
- Esperar 30 segundos para obtener la composición elemental del metal analizado.
- Repetir el procedimiento 3 veces para cada muestra y promediar estas mediciones para obtener el resultado final (BRUKER, s.f.).

2.5. Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado

2.5.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el análisis metalográfico

Los equipos empleados en este ensayo están disponibles en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, mismos que junto a los dispositivos y herramientas se encuentran descritos a continuación:

- **Probetas para el análisis metalográfico**, se adquieren a partir de los especímenes descritos en la Sección 2.1 mediante un proceso de corte con ayuda de un disco de corte y enfriamiento con agua. Posteriormente, se diluye resina poliéster con estireno monómero en una solución del 10% v/v¹¹, luego se le añade octoato de cobalto al 12% p/p¹², el cual cumple la función de iniciador del proceso de curado de la resina, en una concentración volumétrica del 0,5% y finalmente se le agrega el catalizador peróxido de metil-etil cetona (MEKP) al 1,5% del volumen de la resina diluida. Inmediatamente, se ubica la muestra dentro del molde de montaje, asegurándose que la probeta se

¹¹ Volumen de soluto (cm³) por cada 100 unidades de volumen de la solución (cm³).

¹² Número de gramos de soluto por cada 100 gramos de solución.

encuentre adecuadamente alineada y entonces se vierte la resina preparada. Esperar un tiempo aproximado de 2 horas para que la resina se seque completamente y entonces desmontar cuidadosamente las probetas. Las especificaciones y dimensiones de estas se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de las probetas para el análisis metalográfico.

Descripción	Especificación	Imagen
Materiales	Resina poliéster insaturada Estireno monómero Octoato de cobalto al 12% p/p Peróxido de metil-etil cetona (MEKP)	
	Probeta de acero galvanizado	
Dimensiones del perfil galvanizado	Ancho: 12 mm	
	Largo: 30 mm	
	Espesor: 6 mm	
Dimensiones de la probeta	Diámetro: 37 mm	
	Altura: 15 mm	

(Fuente: propia)

- **Máquina desbastadora de disco**, empleado en los procesos de desbaste grueso o burdo. Las especificaciones técnicas del equipo se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-0M-84	
Fabricante	Metallurgical Apparatus	
Voltaje	220 V	
Amperaje	6,2 A	
Potencia del motor	1 hp	
Número del abrasivo	100 granos/pulg ²	
Dimensiones	Ancho: 670 mm	
	Profundidad: 960 mm	
	Altura: 710 mm	

(Fuente: propia)

- **Máquina neumática de desbaste fino y pulido**, realiza las operaciones de desbaste fino, pulido grueso y pulido fino, reemplazando los procesos manuales y menos eficientes antiguamente empleados. La Tabla 2.7 presenta sus especificaciones.

Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la máquina neumática de desbaste fino y pulido.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	FORCIMAT	
Modelo	FORCIPOL 2V	
Año	2016	
Serie	N20161076	
Voltaje	230 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Potencia del motor	0,75 hp	
Capacidad de probetas	6	
Dimensiones	Ancho: 695 mm	
	Profundidad: 685 mm	
	Altura: 655 mm	

(Fuente: InColor, s.f.)

- **Microscopio metalográfico**, permite obtener las fotomicrografías requeridas. El equipo se encuentra detallado en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Año	2016	
Serie	4D41167	
Voltaje	100-120 / 230-240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Potencia del motor	85 VA - 40 W	
Dimensiones	Ancho: 236 mm	
	Profundidad: 624 mm	
	Altura: 407 mm	

(Fuente: Olympus, s.f.)

- **Otros elementos**, se requieren una secadora de cabello, algodón, pinzas, alcohol etílico de 99,8° de pureza (anhidro), nital al 2%, lubricante de diamante en base de agua y suspensión de diamante de 6 y 1 micras.

2.5.2. Procedimiento del análisis metalográfico

- Realizar el desbaste grueso de la probeta en la máquina de disco descrita en la Tabla 2.6. Para ello, asentar la muestra uniformemente hasta que esta adquiriera un solo plano (Laboratorio de Metalografía, 2010).

- Ejecutar las siguientes etapas: desbaste fino, pulido grueso y pulido fino en la máquina neumática (ver Tabla 2.7), con la configuración de la Tabla 2.9. Al finalizar cada ciclo, se lavan las superficies de las probetas con alcohol e inmediatamente se las seca.

Tabla 2.9. Configuración de la máquina neumática para los procesos de desbaste y pulido.

Configuración	Desbaste fino	Pulido grueso	Pulido fino
Tiempo de cada ciclo	2 min	2 min	2 min
Velocidad de giro del cabezal	125 rpm	125 rpm	125 rpm
Velocidad de giro del plato	200 rpm	160 rpm	160 rpm
Fuerza aplicada	10 N	10 N	10 N
Tipo de plato	Lija: 240 granos/pulg Lija: 600 granos/pulg Lija: 1500 granos/pulg	Paño de 3 micras	Paño de 1 micra
Tipo de lubricante	Agua	Suspensión de diamante (3 μ m)	Suspensión de diamante (1 μ m)

(Fuente: propia)

- Realizar el ataque químico a las probetas previamente obtenidas, mediante el método de inmersión en nital al 2%, durante un tiempo de 40 segundos.
- En base a la norma ASTM B487 y con ayuda del software *Stream Essentials*, realizar 5 mediciones consistentes del espesor de cada fase del recubrimiento y del espesor total, con una magnificación de 100x y calcular el promedio de las mediciones tomadas.
- Obtener fotomicrografías con magnificaciones de 100x, 500x y 1000x.
- Procesar las fotomicrografías en el software libre *Python* (ver el ANEXO III) con la finalidad de obtener una mejor visualización del fenómeno de difusión estudiado.

2.6. Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado

2.6.1. Equipos, dispositivos y herramientas para la evaluación del espesor del recubrimiento por el método de decapado

- **Probetas para la evaluación del espesor del recubrimiento por el método de decapado**, se obtienen mediante corte, con ayuda de un disco de corte y enfriamiento por agua a partir de los especímenes detallados en la Sección 2.1. Las dimensiones se ilustran en la Figura 2.4 y cumplen con la norma ASTM A90, la cual requiere un área mínima de la superficie recubierta de zinc de al menos 2000 mm².

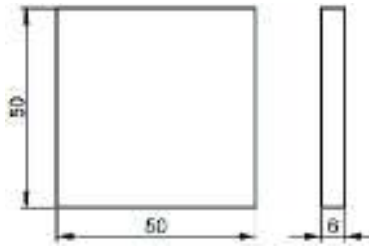


Figura 2.4. Dimensiones de la probeta para la evaluación del espesor por el método de decapado.
(Fuente: Propia)

- **Otros elementos**, una balanza digital (apreciación de 0,01 g), ácido clorhídrico en una mezcla con agua en relación 1:1 a temperatura ambiente, alcohol etílico de 99,8° de pureza (anhidro), un recipiente de vidrio y una secadora.

2.6.2. Procedimiento del método de decapado para evaluación del espesor del recubrimiento por el método de decapado

- Lavar los especímenes con un solvente, luego enjuagarlos con alcohol industrial y secarlos completamente.
- Determinar el peso (masa) inicial del espécimen y tomar las dimensiones de las probetas con la finalidad de calcular el área de recubrimiento que se va a decapar.
- Realizar la inmersión de la probeta en la mezcla de ácido clorhídrico y agua, hasta que cese la reacción producida y deje de existir la presencia de burbujas.
- En seguida de realizado el decapado lavar los especímenes con abundante agua.
- Colocar alcohol industrial sobre las superficies de las probetas y secarlas.
- Determinar el peso (masa) del espécimen nuevamente.
- Calcular el peso (masa) del recubrimiento por unidad de área.


2.7. Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

2.7.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

- **Probetas para el ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación**, se emplean las probetas utilizadas en el análisis metalográfico (ver la Tabla 2.5). Este ensayo se realiza una vez obtenidas las metalografías respectivas.

- **Durómetro micro-Vickers**, el equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus características se encuentran descritas en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del durómetro micro-Vickers.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Metkon	
Modelo	DUROLINE M	
Carga para los ensayos	10 gf, 25gf, 50, gf, 100 gf, 200 gf, 300 gf, 500 gf, 1000 gf	
Tiempo de carga	5-99 s (carga y descarga automática)	
Magnificación del microscopio	Para mediciones: 400x	
	Para observación: 100x	
Escala de medición de dureza	HV (Vickers)	
	HK (Knoop)	
Software	Kamekam	
Dimensiones	Ancho: 190 mm	
	Profundidad: 430 mm	
	Altura: 520 mm	

(Fuente: Metkon, 2013)

2.7.2. Procedimiento del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

- Asegurarse que la probeta a ensayar posea dos superficies completamente planas, paralelas y que en cada una de ellas se encuentre descubierto el material estudiado.
- Ubicar la probeta sobre el soporte de la máquina y encender el sistema de iluminación y la fuente de la máquina.
- Seleccionar el indentador correspondiente.
- Enfocar el microscopio, para que la superficie en donde se requiere efectuar la medición pueda ser observada.
- Seleccionar el área en donde se realizará la medición de la dureza y ubicar el indentador en la posición correspondiente, tal que la distancia entre dos mediciones sea 2,5 veces la longitud de la diagonal de la indentación (ASTM International, 2017).
- Ajustar la intensidad de la luz y las aperturas del microscopio para obtener una resolución y contraste óptimo.
- Previo a la ejecución del ensayo, configurar en el *display* del equipo los parámetros seleccionados, los cuales corresponden a una fuerza de 100 gf y a un tiempo de permanencia de carga de 10 s (Cervantes, et al., 2013).

- Activar el botón de ejecución del ensayo en el *display* del equipo.
- Con ayuda del software *Kamekam* medir las dos diagonales de la indentación y promediar estas dos medidas. Para ello, es importante comprobar que la mitad de una diagonal sea menor al 5% de la mitad del largo de la otra diagonal, para que la medida sea considerada como consistente. Además, ninguna de las 4 esquinas de la indentación obtenida puede encontrarse desenfocada (ASTM International, 2017).
- Repetir el procedimiento hasta obtener 5 mediciones y promediar estos valores para conseguir el número de dureza para cada recubrimiento de zinc estudiado.

2.8. Ensayo de *Pull-Off* para medición de la adhesividad mecánica

2.8.1. Equipos, dispositivos y herramientas para el ensayo de *Pull-Off* para medición de la adhesividad mecánica

A continuación, se describe cada uno de los equipos, dispositivos y herramientas empleados para ejecutar el ensayo de *Pull-Off*, así como sus especificaciones técnicas y consideraciones necesarias para alcanzar consistencia en los resultados:

- **Probetas para el ensayo de *Pull-Off***, a partir de los especímenes previamente descritos, se cortan secciones cuadradas totalmente planas y libres de distorsión con las dimensiones representadas en la Figura 2.5. Es indispensable mantener las muestras frías durante su extracción (ISO, 2016).

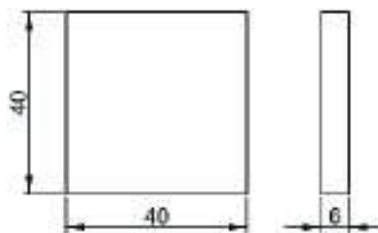


Figura 2.5. Dimensiones de las probetas para el ensayo de *Pull-Off*.
(Fuente: Propia)

- **Máquina universal de ensayos**, mismo equipo empleado en el ensayo de tracción (descrito en la Sección 2.2). Sus características pueden observarse en la Tabla 2.2.
- **Muñecas de ensayo**, se obtienen mediante un proceso de mecanizado por arranque de viruta a partir de pernos de acero al carbono hexagonales, de tal forma que a partir de su cabeza se pueda obtener una superficie cilíndrica, rígida y plana de 20 mm de

diámetro. Por otra parte, el espesor de la cabeza de la muñeca es de 5 mm, obtenida mediante un proceso de refrentado sobre la cabeza de este perno, con lo cual la longitud total de cada muñeca es 105 mm. Por otra parte, gracias a que las muñecas son obtenidas a partir de pernos normalizados se puede garantizar que las caras sean maquinadas perpendicularmente a su eje y que no se deformen durante el ensayo, ya que al ser pernos con tratamientos térmicos de templado y revenido presentarán mayor resistencia a la tracción. La Tabla 2.11 resume las especificaciones antes descritas.

Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de las muñecas.

Descripción	Especificación	Imagen
Material	Acero al carbono	
Clase	8.8 (Perno métrico)	
Tipo	DIN-931 (DIN-24014)	
Diámetro	M14	
Tratamiento térmico	Templado y revenido	
Dimensiones	Diámetro cabeza: 20 mm	
	Espesor cabeza: 5 mm	
	Largo total: 105 mm	

(Fuente: propia)

- **Adhesivo**, es un adhesivo epóxico de un solo componente que requiere ser curado a través de calor para producir enlaces rígidos, contracciones mínimas dimensionales y alta resistencia a la tensión. Además, presenta buena adhesión con una gran variedad de sustratos (Master Bond Inc., s.f.). El procedimiento para su uso, tiempo de curado y otras especificaciones se expresan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Especificaciones técnicas del adhesivo.

Descripción	Especificación	Imagen
Modelo	EP15 ND-2	
Marca	Master Bond	
Resistencia	Tracción: 12000 psi = 82,74 MPa	
Preparación de la superficie	Limpiar, desengrasar (con acetona, xileno o tolueno) y secar las superficies. Lijar ligeramente la superficie (crear una superficie rugosa)	
Curado	A 150-170°C durante 60-90 minutos	
Aplicación y curado	Aplicar una capa delgada y uniforme con una espátula. Mantener una presión adecuada durante el curado, tal que se mantenga un contacto íntimo entre las superficies adheridas. Remover con una espátula el exceso de adhesivo y limpiar con acetona.	

(Fuente: Master Bond Inc., s.f.)

- **Dispositivo de unión probeta-muñeca**, permite ejercer una presión adecuada entre la superficie de la muñeca y de la probeta, con la finalidad de que estas presenten un mejor contacto con el adhesivo durante el tiempo de curado y además que se garantice un alineamiento apropiado del conjunto. Este dispositivo está fabricado con un perfil de acero estructural AL 50x6 mm, una plancha de acero inoxidable de 3 mm de espesor, una pletina de acero de 1x1/4 de pulg, pernos M8, M5, y tuercas tipo mariposa M8. Este dispositivo y su aplicación se los puede apreciar en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Dispositivo de unión probeta-muñeca.
(Fuente: Propia)

- **Horno eléctrico o mufla**, el equipo se encuentra disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional y sus características se detallan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del horno eléctrico o mufla.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	LINFBERG	
Modelo	51828	
Año	1981	
Voltaje	220/240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Potencia Máxima	5600 W	
Dimensiones	Alto: 725 mm	
	Ancho: 630 mm	
	Profundidad: 700 mm	
Temperatura máxima	1000°C	
Aislante	Fibra de cerámica	

(Fuente: propia)

- **Dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal de ensayos**, creado a partir de pernos calidad 8.8, planchas (10 y 20 mm de espesor) y ejes (1,5 pulg de diámetro) de acero A36 mediante varios procesos de corte y mecanizado por arranque de viruta. Posee un sistema de auto alineación y su ensamble puede observarse en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal de ensayos.
(Fuente: Propia)

- **Medidor automático de adherencia por arranque**, equipo disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional con las características detalladas en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del medidor automático de adherencia por arranque.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Elcometer	
Modelo	510	
Precisión	0,01 MPa	
Velocidades de arranque	0,1-1,4 MPa/s	
Aplicación de carga	Bomba hidráulica	
Software para recolectar datos	ElcoMaster	
Diámetro de las muñecas (rango de mediciones)	10 mm (8-100 MPa)	
	14,2 mm (4-50 MPa)	
	20 mm (2-25 MPa)	
Dimensiones	Alto: 66 mm	
	Ancho: 100 mm	
	Profundidad: 260 mm	

(Fuente: Elcometer, 2016)

- **Muñecas para el medidor automático de adherencia por arranque**, estos elementos son de acero inoxidable, con un diámetro de 10 mm debido a que es la dimensión en la que el equipo permite trabajar en un rango más amplio de valores de adherencia mecánica. Este elemento puede ser observado en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Muñeca para el medidor automático de adherencia por arranque.
(Fuente: Propia)

2.8.2. Inspección visual y naturaleza de la fractura en el ensayo de *Pull-Off*

Una vez realizado el ensayo, las superficies de fractura deben ser examinadas, para lo cual es necesario identificar el tipo o los tipos de fallas. Estas fracturas se ilustran en la Figura 2.9 y se las describe a continuación, según lo especificado por DeFelsko (s.f.):

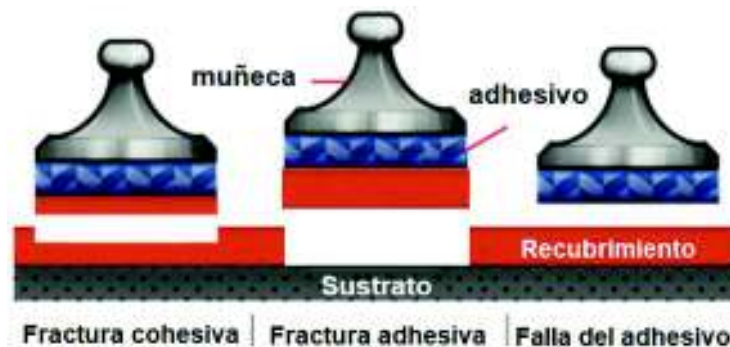


Figura 2.9. Tipos de fracturas producidas en el ensayo de *Pull-Off*.
(Fuente: DeFelsko, s.f.)

- **Fractura cohesiva**, ocurre dentro de los límites de la capa del recubrimiento.
- **Fractura adhesiva**, se produce en la interface de las capas del recubrimiento y la pega.
- **Falla del adhesivo**, separación del pegamento entre el recubrimiento y la muñeca.

Posterior a ello, se asigna con un nombre a cada tipo de fractura encontrada para facilitar su identificación en el reporte. Las fracturas cohesivas se etiquetan mediante una letra mayúscula correspondiente a la capa en la que ocurrió la falla y las fracturas adhesivas se las representa con dos letras correspondientes a las superficies involucradas y separadas por un signo *slash* (/). En este estudio se presentan los casos ilustrados en la Figura 2.10.

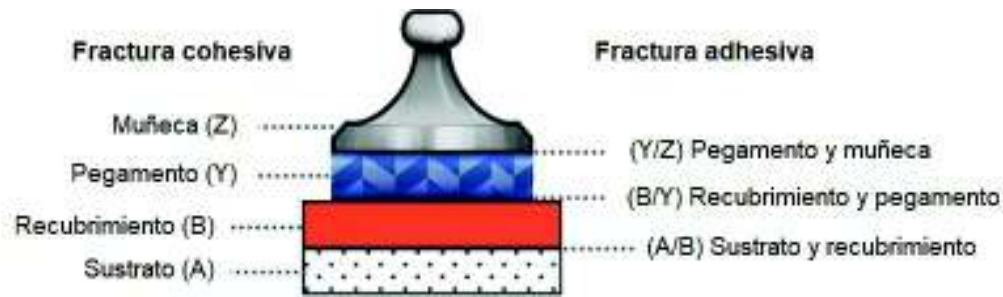


Figura 2.10. Descripción de los tipos de fractura producidos en el ensayo de *Pull-Off*.
(Fuente: DeFelsko, s.f.)

Finalmente, se expresa cada tipo de falla como un porcentaje, ya sea que se presente solo un tipo de fractura o como una combinación de fallas cohesivas y adhesivas (ISO, 2016).

2.8.3. Procedimiento del ensayo de *Pull-Off* para medición de la adhesividad mecánica

El procedimiento para realizar el ensayo de *Pull-Off* se basa en las normas ASTM D4541 e ISO 4624, mismas que específicamente evalúan sistemas de recubrimientos simples y multicapas de pinturas, barnices y productos a fines, pero que para este caso permiten obtener la medida de la tensión mínima necesaria para desprender o romper el recubrimiento de zinc en dirección perpendicular al sustrato (ISO, 2016). Para ello se emplea el dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal siguiendo los siguientes pasos:

- Raspar ligeramente la superficie de acero de la muñeca con papel de lija, para crear una mayor área de contacto y reducir el riesgo de falla del pegamento (Fletcher & Barnes, s.f.). Repetir este procedimiento para la superficie de la probeta, teniendo cuidado de no remover una considerable capa de recubrimiento.
- Limpiar las superficies de la probeta y de la muñeca sobre las cuales se va a colocar el pegamento con la ayuda de un desengrasante, con el propósito de que la superficie de la muestra quede libre de suciedad, grasa, aceite, pintura, óxido y otros contaminantes.
- Precalentar las muñecas y las probetas durante 30 minutos a 150°C.
- Aplicar el pegamento sobre las superficies de interés, de acuerdo a las indicaciones proporcionadas por el proveedor (ver Tabla 2.12). Es importante que el adhesivo produzca una película continua a lo largo de las superficies.
- Pegar la superficie de la probeta con la de la muñeca en el dispositivo de unión ilustrado en la Figura 2.6, asegurando una adecuada alineación y aplicando una pequeña presión de contacto entre sus superficies. Inmediatamente remover los excesos de

adhesivo, evitando cualquier tipo de movimiento del conjunto, pues esto puede crear burbujas que durante el ensayo forman discontinuidades en la tensión aplicada.

- Colocar el conjunto en el interior del horno a una temperatura de 150°C durante un tiempo de 90 minutos.
- Una vez curado el adhesivo, extraer los elementos del horno y dejarlos enfriar por un tiempo estimado de 1 hora.
- Ensamblar la unión previamente preparada en el acople del conjunto probeta-muñeca, montarlo sobre la máquina universal de ensayos y configurar la máquina universal de ensayos, aplicando el esfuerzo de tensión con una tasa de incremento uniforme que no supere 1 MPa/s (1 MN/m²s).
- Ejecutar el ensayo y una vez desprendido el recubrimiento anotar el esfuerzo de rotura *sigma* (σ), expresado en MPa.
- Mediante inspección visual establecer la naturaleza de la fractura y expresar cada una de estas áreas a manera de porcentaje, seguido del tipo de falla, tal como se describe en la Figura 2.10. Las áreas de falla se calculan a través de una macrografía procesada en *Python*, mediante las líneas de programación adjuntas en el ANEXO IV y que son realizadas en base al trabajo de titulación de Granja & Poveda (2017).
- Repetir los pasos anteriores, de tal forma que se obtengan 5 medidas de resistencia a la adhesión para cada una de las muestras analizadas.
- Calcular la media de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que este valor debe ser expresado en MPa.
- Finalmente, llenar el reporte del ensayo con la información solicitada en el ANEXO V, mismo que es realizado en base a norma ISO 4624 y que además permite obtener resultados consistentes en el caso de que se requiera reproducir el ensayo realizado.

Por otra parte, para realizar el ensayo de *Pull-Off* empelando el medidor automático de adherencia por arranque Elcometer, se debe seguir el procedimiento antes descrito, con la diferencia de que en este equipo se debe configurar previamente el uso de la muñeca de 10 mm de diámetro junto con una velocidad de arranque de 0,8 MPa/s.

2.9. Medición del perfil de superficie

2.9.1. Equipo para la medición del perfil de superficie

El equipo empleado para realizar la medición de la rugosidad superficial, junto a sus especificaciones técnicas se encuentra descrito a continuación:

- **Probetas para la medición del perfil de superficie**, se emplean probetas con las mismas dimensiones que las usadas en el ensayo de *Pull-Off* y que a la vez se encuentran descritas en la Figura 2.5.
- **Medidor digital de perfil de superficie**, equipo disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional con las características detalladas en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del medidor digital de perfil de superficie.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Elcometer	
Modelo	224	
Precisión	± 5%	
Resolución	1 μm	
Rango de medición	0-500 μm	
Nivel de lecturas	50 lecturas/min	
Tipo de punta de la sonda	Carburo de tungsteno con un ángulo de 60° y un radio de 50 μm	
Tipo de superficies	Superficies planas y convexas	
Dimensiones	Alto: 141 mm	
	Ancho: 73 mm	
	Profundidad: 37 mm	

(Fuente: Elcometer, 2015)

2.9.2. Procedimiento de la medición del perfil de superficie

De acuerdo a la guía de usuario entregada por el proveedor del equipo se deben seguir los siguientes pasos:

- Colocar la sonda de medición sobre la superficie a partir de la cual se desea obtener la rugosidad, sosteniéndola firmemente por el mango y asegurándose de que esta se encuentre perpendicular a la superficie.
- Levantar la punta de la sonda y volverla a colocarla sobre la superficie, para obtener una nueva medida.
- Repetir el procedimiento 5 veces sobre un área de 150 mm².
- Promediar las lecturas para obtener el perfil de superficie de pico a valle del área previamente seleccionada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos mencionados en los apartados anteriores y en base a los cuales se caracteriza mecánica y químicamente el sustrato metálico y los revestimientos de zinc. Además, en el ANEXO VI se observan los perfiles sometidos a sus respectivos pretratamientos superficiales, así como el resultado de cada proceso de galvanizado por inmersión en caliente empleado.

3.1. Resultados

3.1.1. Ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36

El sustrato metálico empleado en este estudio es un perfil de acero laminado en caliente de grado ASTM A36. Por lo tanto, este material debe cumplir con los requisitos mecánicos especificados en la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R) y que a su vez se encuentran resumidos en la Tabla 3.1. Entonces, en base a estas propiedades mecánicas se comparan y validan los resultados conseguidos a través del ensayo de tracción realizado.

Tabla 3.1. Requisitos mecánicos del acero de grado ASTM A36.

Propiedad mecánica	Valor
Esfuerzo de fluencia (S_y)	≥ 250 MPa
Resistencia a la tracción (S_t)	400-550 MPa
Porcentaje de elongación en 50 mm (ϵ)	$> 21\%$

(Fuente: INEN, 2012)

Por otra parte, los resultados obtenidos se los puede apreciar en el informe técnico entregado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones adjunto en el ANEXO VII y a la vez resumido en la Tabla 3.2. Adicionalmente, se grafica mediante el software *AutoCAD* el diagrama esfuerzo-deformación del sustrato de acero estudiado en base a la tabla de valores obtenida a través del sistema de control automático de la máquina universal de ensayos empleada. Este diagrama se lo puede apreciar en la Figura 3.1.

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del sustrato de acero ASTM A36.

Propiedad mecánica	Valor
Esfuerzo de fluencia (S_y)	370,9 MPa
Resistencia a la tracción (S_t)	483,5 MPa
Porcentaje de elongación en 50 mm (ϵ)	36,4 %

(Fuente: Propia)

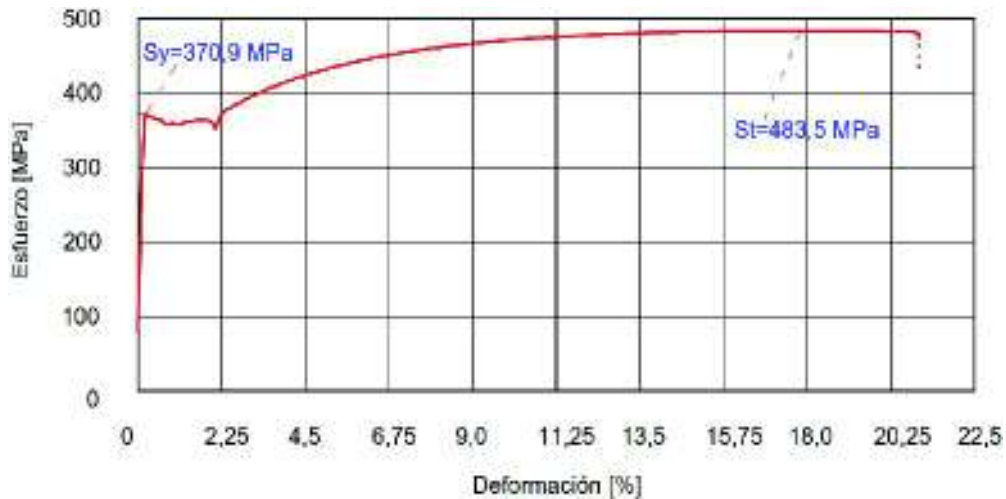


Figura 3.1. Diagrama esfuerzo-deformación del sustrato de acero ASTM A36.
(Fuente: Propia)

3.1.2. Ensayo de dureza del sustrato de acero ASTM A36

El valor de dureza de referencia para el sustrato metálico ensayado, en escala Brinell (HB), se lo calcula empleando la Ecuación 1.2 y tomando la resistencia a la tracción (St) de la Tabla 3.1. Posteriormente, requiere ser transformada a escala Rockwell B (HRB), para que de esta forma pueda ser comparado con la dureza medida. Cabe señalar que el valor de resistencia a la tracción se encuentra especificado en un rango, lo cual implica que el valor de dureza también se lo exprese de esta forma, tal como se lo observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Requisitos del ensayo de dureza del acero de grado ASTM A36.

Dureza	Valor (HRB)
Mínima	65
Máxima	83

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.4 se presentan las 7 mediciones de dureza tomadas durante el ensayo y el promedio obtenido se lo realiza a partir de 5 valores, para lo cual se descartan las medidas con el valor más bajo y el más alto, que son las medidas 1 y 4, respectivamente.

Tabla 3.4. Resultados del ensayo de dureza del sustrato de acero de grado ASTM A36.

Número de medición (HRB)							Promedio (HRB)
1	2	3	4	5	6	7	
77	79	79	80	80	79	80	79,40

(Fuente: Propia)

3.1.3. Análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36

El sustrato metálico previamente descrito, en cuanto a los límites máximos de composición química también debe cumplir con los requerimientos de la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R). Estos límites mencionados se encuentran resumidos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Requisitos de composición química acero ASTM A36.

Elementos de la composición química	Porcentaje [%]
Carbono (C)	<0,26
Manganeso (Mn)	/
Azufre (S)	<0,05
Fósforo (P)	<0,04
Silicio (Si)	≤0,40

(Fuente: INEN, 2012)

Los resultados obtenidos se aprecian en el informe técnico adjunto en el ANEXO VIII y que ha sido desarrollado por parte del Departamento de Materiales del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Su composición química se resume en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados del análisis de la composición química del sustrato de acero ASTM A36.

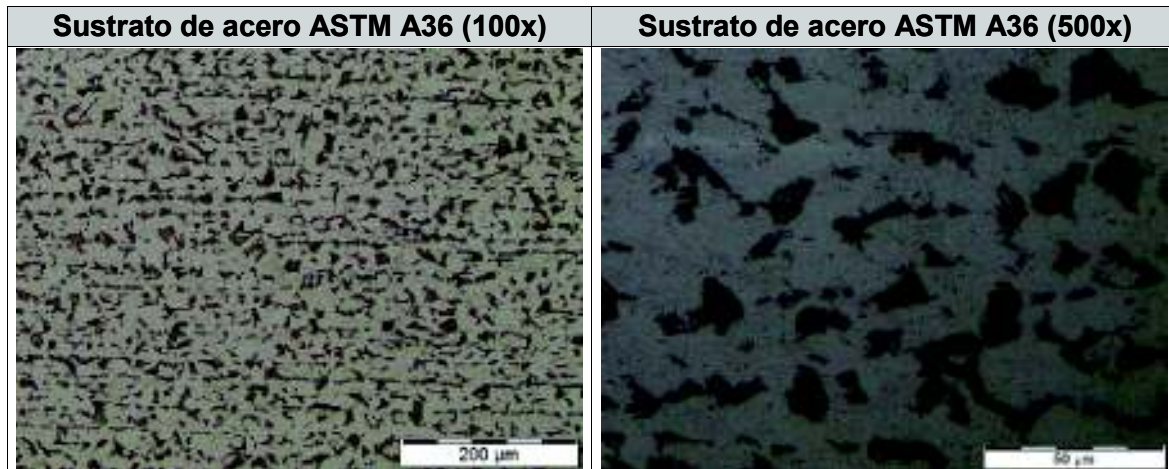
Elementos de la composición química	Porcentaje [%]
Carbono (C)	0,094
Manganeso (Mn)	0,624
Azufre (S)	0,012
Fósforo (P)	0,017
Silicio (Si)	0,172

(Fuente: Propia)

3.1.4. Análisis metalográfico del perfil de acero galvanizado

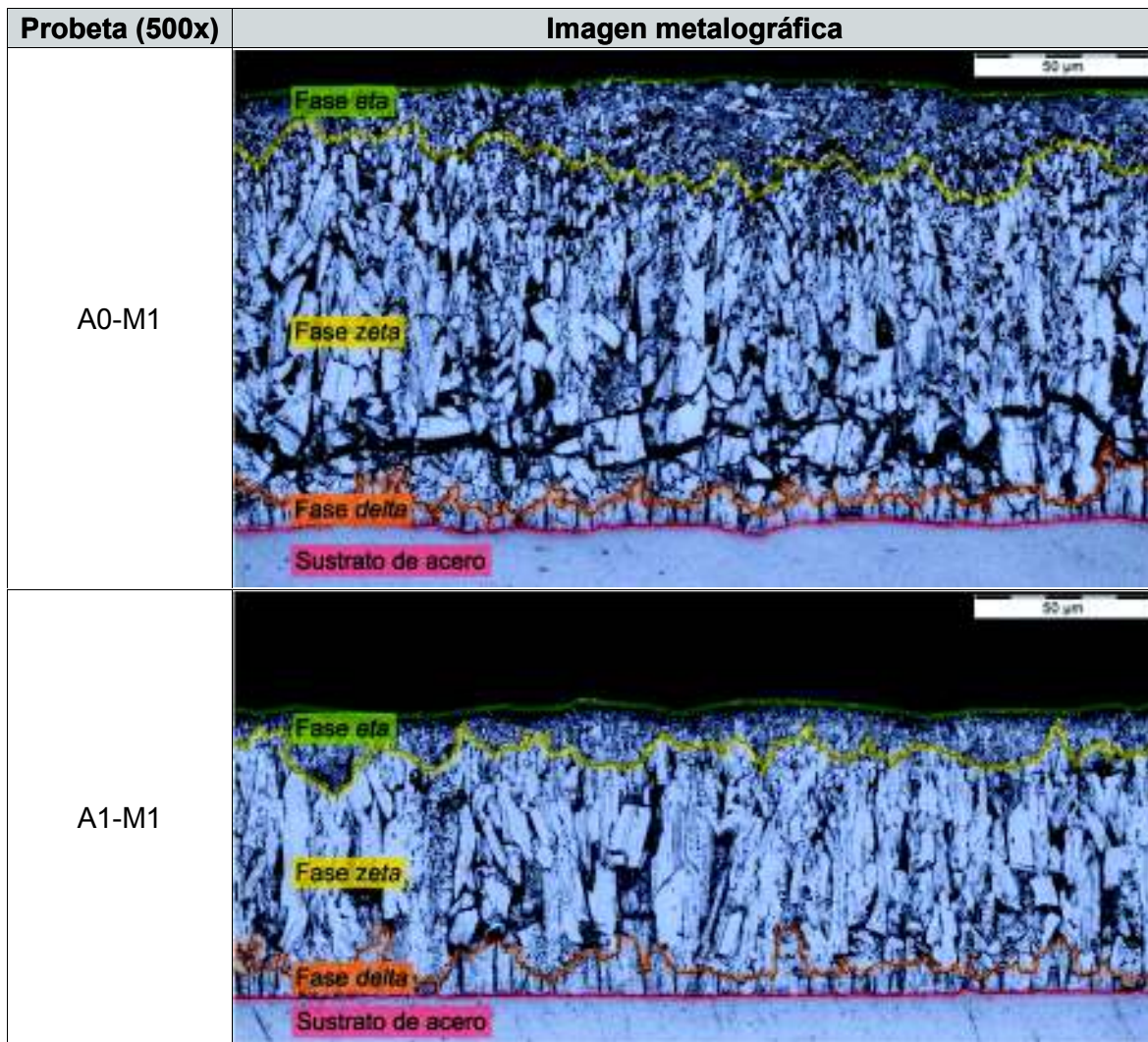
En primer lugar se adquieren las metalografías de la sección transversal del sustrato metálico (acero ASTM A36), mismas que pueden ser observadas con una magnificación de 100x y 500x en la Tabla 3.7. Por otra parte, las micrografías correspondientes a las diferentes muestras de cada capa de aleación hierro-zinc con una magnificación de 500x se procesan mediante filtros en el software libre *Python*, a través de las líneas de programación descritas en el ANEXO III. Estas imágenes se muestran en la Tabla 3.8, en donde se encuentra identificada cada fase presente estudiada.

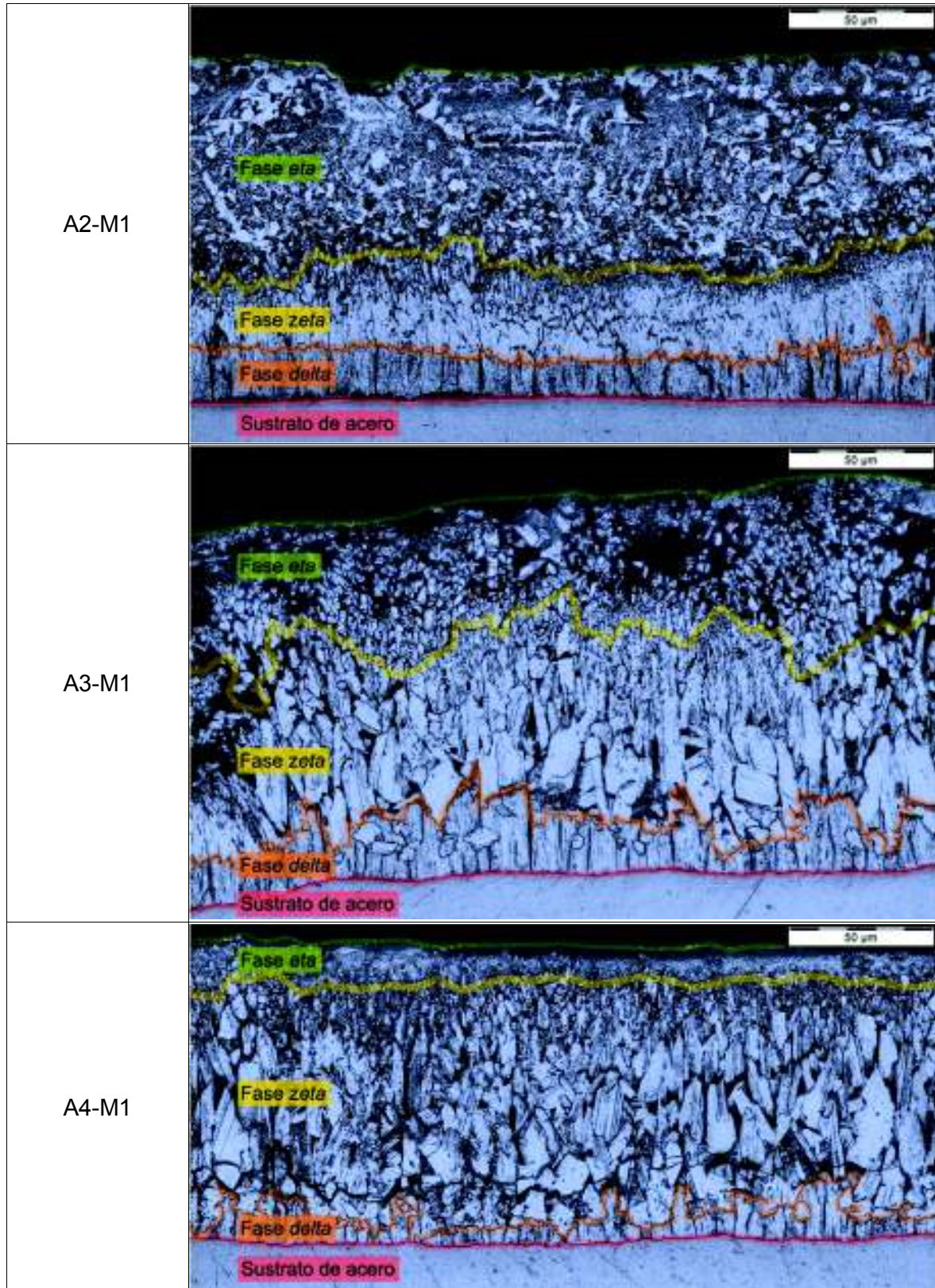
Tabla 3.7. Resultados del análisis metalográfico del sustrato de acero ASTM A36.

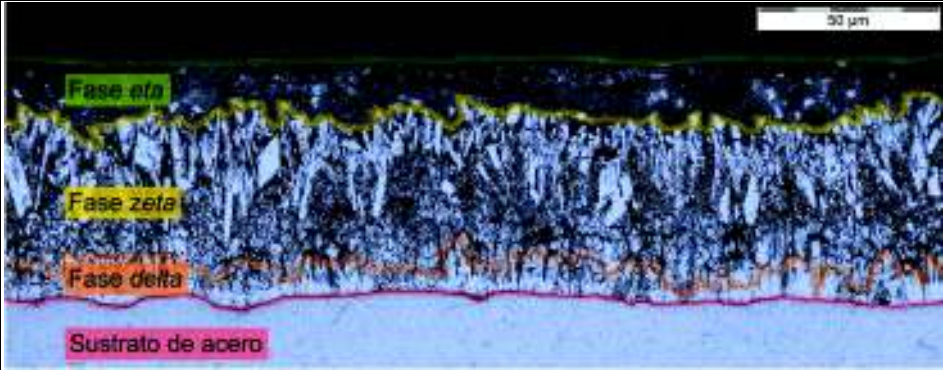
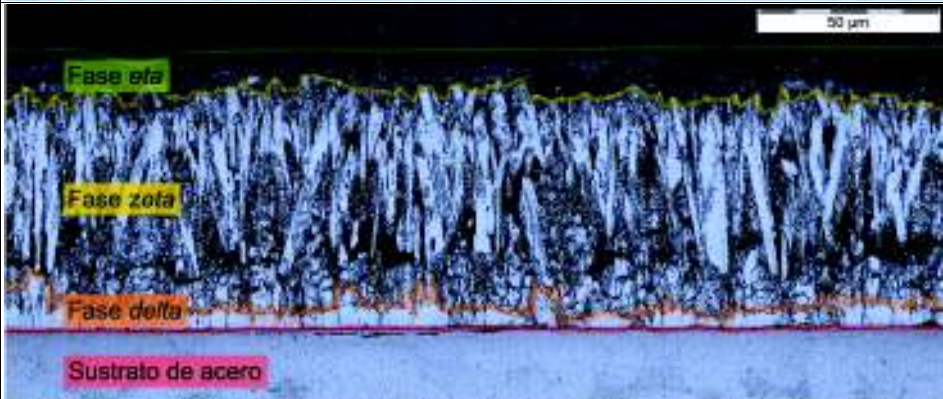
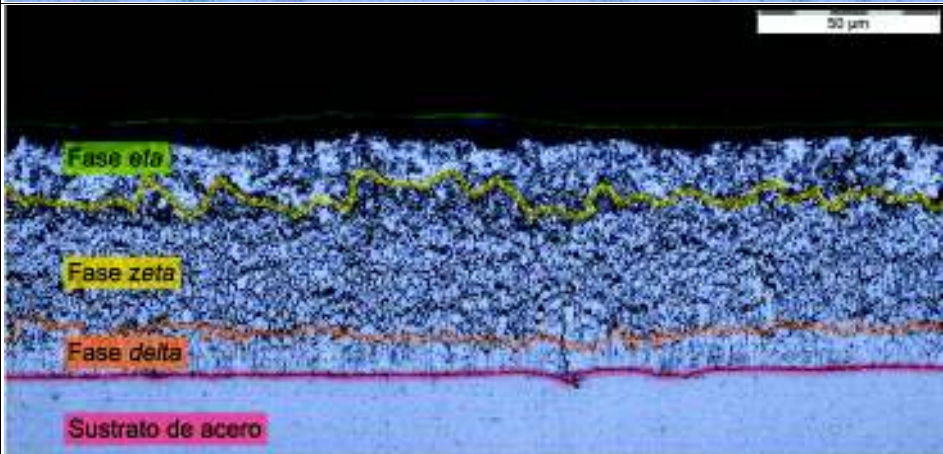
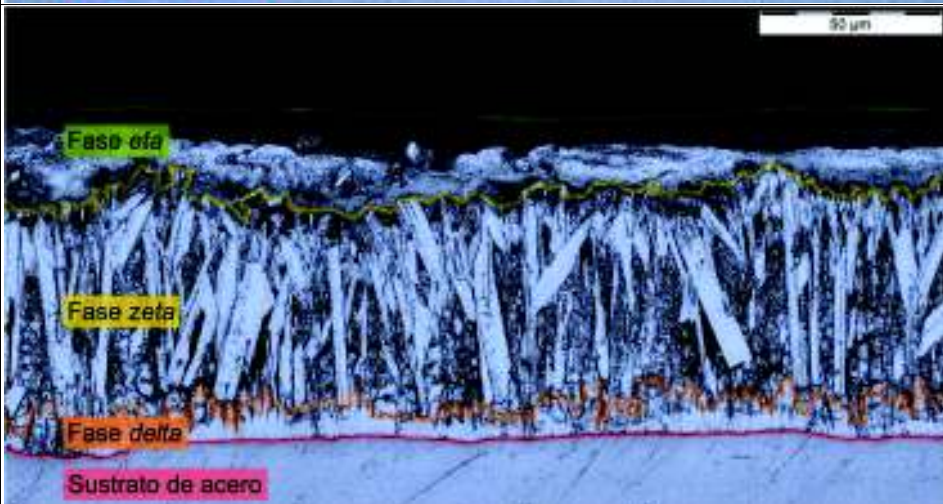


(Fuente: Propia)

Tabla 3.8. Resultados del análisis metalográfico de las diferentes capas de aleación hierro-zinc.





B0-M1	
B1-M1	
B2-M1	
B3-M1	

(Fuente: Propia)

Adicionalmente, se muestran los resultados de las medidas del espesor de cada fase presente en los diferentes tipos de recubrimientos, así como el de las dimensiones totales de cada capa de aleación. Como referencia, es importante conocer los requerimientos que establece la norma ASTM A123 para el grado de espesor de galvanizado mínimo solicitado. Esta especificación se la encuentra delineada en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Requisito del espesor mínimo de recubrimiento para el perfil estructural de acero.

Categoría de material	Espesor acero	Grado de recubrimiento	Espesor mínimo
Perfiles estructurales	≥4.8 a <6.4 [mm]	75	75 [μm]

(Fuente: ASTM International, 2015)

Como resultado, las respectivas dimensiones para cada tipo de muestra se pueden observar desde la Tabla 3.10 hasta Tabla 3.18, mientras que en el ANEXO IX se aprecian las imágenes que detallan las mediciones realizadas.

Tabla 3.10. Resultados de la medición de espesores de la probeta A0-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	131,20	132,50	131,20	128,64	124,81	129,67
Fase <i>delta</i>	8,32	7,68	8,96	8,34	7,68	8,20
Fase <i>zeta</i>	86,40	88,97	83,85	83,20	89,60	86,40
Fase <i>eta</i>	42,24	44,80	40,98	39,68	40,96	41,73

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados de la medición de espesores de la probeta A1-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	78,72	78,72	79,36	79,36	78,08	78,85
Fase <i>delta</i>	18,56	19,20	16,64	21,13	16,64	18,43
Fase <i>zeta</i>	48,00	42,24	40,96	45,44	44,16	44,16
Fase <i>eta</i>	19,21	17,28	16,64	19,20	20,48	18,56

(Fuente: Propia)

Tabla 3.12. Resultados de la medición de espesores de la probeta A2-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	133,76	124,80	127,36	122,24	122,88	126,21
Fase <i>delta</i>	18,56	14,72	18,57	26,24	19,20	19,46
Fase <i>zeta</i>	40,96	60,16	59,52	64,00	70,40	59,01
Fase <i>eta</i>	56,96	39,04	45,44	36,48	33,92	42,37

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Resultados de la medición de espesores de la probeta A3-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	101,77	122,24	109,45	107,52	103,75	108,95
Fase <i>delta</i>	14,72	14,08	14,72	16,00	14,08	14,72
Fase <i>zeta</i>	66,61	61,49	69,76	69,12	68,59	67,11
Fase <i>eta</i>	28,80	23,68	26,88	26,91	26,24	26,50

(Fuente: Propia)

Tabla 3.14. Resultados de la medición de espesores de la probeta A4-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	97,92	99,2	103,68	102,41	101,13	100,87
Fase <i>delta</i>	8,32	7,68	8,96	8,32	7,68	8,19
Fase <i>zeta</i>	70,41	66,56	64,01	70,41	69,12	68,10
Fase <i>eta</i>	32,65	23,05	30,73	23,04	30,08	27,91

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Resultados de la medición de espesores de la probeta B0-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	58,88	57,61	60,16	57,60	58,89	58,63
Fase <i>delta</i>	5,12	3,84	4,48	4,48	4,53	4,49
Fase <i>zeta</i>	40,33	39,04	43,52	42,24	42,24	41,47
Fase <i>eta</i>	16,00	16,64	16,64	16,64	16,00	16,38

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Resultados de la medición de espesores de la probeta B1-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	78,09	76,81	73,61	76,80	73,60	75,78
Fase <i>delta</i>	3,84	4,48	5,12	4,48	3,84	4,35
Fase <i>zeta</i>	46,72	44,16	48,64	49,28	48,02	47,36
Fase <i>eta</i>	20,48	16,00	16,00	16,64	14,72	16,77

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Resultados de la medición de espesores de la probeta B2-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	61,45	64,65	65,92	64,00	64,00	64,00
Fase <i>delta</i>	14,08	10,88	12,16	12,80	11,52	12,29
Fase <i>zeta</i>	28,83	27,52	28,16	24,32	28,17	27,40
Fase <i>eta</i>	18,57	18,56	19,84	21,76	21,12	19,97

(Fuente: Propia)

Tabla 3.18. Resultados de la medición de espesores de la probeta B3-M1.

Medición [μm]	1	2	3	4	5	Promedio
Recubrimiento	96,65	89,61	87,04	84,49	92,16	89,99
Fase <i>delta</i>	5,12	6,40	6,40	6,40	6,40	6,14
Fase <i>zeta</i>	59,96	61,44	58,88	62,08	56,96	59,86
Fase <i>eta</i>	22,40	20,49	23,04	23,76	19,84	21,91

(Fuente: Propia)

3.1.5. Evaluación del espesor del recubrimiento de zinc mediante el método de decapado

Tal como en el caso del espesor del galvanizado, la norma ASTM A123 también detalla el grado mínimo de recubrimiento de zinc expresado en unidad de peso por unidad de área superficial. Este criterio de aceptación para el respectivo espesor del sustrato de acero estructural analizado se lo presenta en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Requisito de peso por unidad de área mínima de galvanizado para el perfil estructural.

Categoría de material	Espesor del acero [mm]	Grado del recubrimiento	Espesor mínimo [g/m ²]
Perfiles estructurales	≥4.8 a <6.4	75	530

(Fuente: ASTM International, 2015)

Como resultado del ensayo de decapado realizado a cada una de las muestras analizadas y mediante los cálculos correspondientes se obtiene el valor del peso por unidad de área superficial expresado en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Resultados de la evaluación del espesor del recubrimiento de zinc por decapado.

Probetas	W ₁ [g]	W ₂ [g]	Base [mm]	Altura [mm]	A [mm ²]	C [g/m ²]
A0-D/1	111,57	107,91	49,88	50,69	5056,83	723,77
A1-D/1	109,30	106,44	49,83	49,62	4945,13	578,35
A2-D/1	103,81	100,83	48,75	48,33	4712,18	632,40
A3-D/1	106,90	103,84	49,54	49,28	4882,66	626,71
A4-D/1	109,14	105,68	49,4	49,91	4931,11	701,67
B0-D/1	104,49	102,46	49,15	48,88	4804,90	422,49
B1-D/1	107,86	104,83	50,05	49,41	4945,94	612,62
B2-D/1	104,79	102,72	48,73	48,37	4714,14	439,10
B3-D/1	107,63	104,49	49,38	49,24	4862,94	645,70

(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

La dureza del recubrimiento obtenido a través de micro-indentación revela los resultados expuestos desde la Tabla 3.21 hasta la Tabla 3.28. Adicionalmente, las micro-indentaciones realizadas sobre cada probeta, pueden ser evidenciadas en el ANEXO X. Es importante mencionar que para la probeta B0-M1 no se presenta ningún resultado, debido a que el micro-indentador es muy grande respecto al espesor del recubrimiento de la muestra, por lo que el valor de dureza no representa adecuadamente a la capa de aleación hierro-zinc.

Además, en las tablas anteriormente mencionadas, para obtener el promedio de dureza del recubrimiento mediante micro-indentación no se consideran las mediciones expresadas en color rojo, ya que estas no cumplen con la condición de que la mitad de la dimensión de la una diagonal sea menor al 5% de la mitad del largo de la otra diagonal (ASTM International, 2017). El valor para determinar el cumplimiento de esta condición se encuentra descrito en dichas tablas como “diferencia”.

Tabla 3.21. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A0-M1).

Medición de la probeta A0-M1	D ₁ [µm]	D ₂ [µm]	Promedio [µm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	34,62	36,37	35,50	2,41	147,15
2	38,35	34,62	36,49	5,39	139,29
3	37,03	35,16	36,10	2,66	142,27
4	36,04	35,07	35,56	1,38	146,66
5	37,14	36,15	36,65	1,37	138,03
Promedio dureza [HV]					143,53

(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A1-M1).

Medición de la probeta A1-M1	D ₁ [µm]	D ₂ [µm]	Promedio [µm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	40,78	33,74	37,26	10,43	133,57
2	35,71	38,90	37,31	4,10	133,20
3	39,24	34,84	37,04	6,31	135,16
4	36,81	38,24	37,53	1,87	131,64
5	40,33	34,62	37,48	8,25	132,03
Promedio dureza [HV]					132,42

(Fuente: Propia)

Tabla 3.23. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A2-M1).

Medición de la probeta A2-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	40,11	37,69	38,90	3,21	122,51
2	37,92	40,00	38,96	2,60	122,15
3	40,11	38,02	39,07	2,75	121,47
4	40,35	35,85	38,10	6,28	127,72
5	38,13	37,71	37,92	0,56	128,92
Promedio dureza [HV]					123,76

(Fuente: Propia)

Tabla 3.24. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A3-M1).

Medición de la probeta A3-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	31,43	33,08	32,26	2,49	178,22
2	31,98	31,88	31,93	0,16	181,85
3	32,09	32,76	32,43	1,02	176,37
4	31,21	32,53	31,87	2,03	182,55
5	31,54	32,75	32,15	1,85	179,43
Promedio dureza [HV]					179,68

(Fuente: Propia)

Tabla 3.25. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta A4-M1).

Medición de la probeta A4-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	38,24	36,15	37,20	2,89	133,98
2	38,61	36,27	37,44	3,23	132,27
3	36,93	37,25	37,09	0,43	134,76
4	38,46	36,26	37,36	3,03	132,81
5	38,35	36,38	37,37	2,71	132,80
Promedio dureza [HV]					133,32

(Fuente: Propia)

Tabla 3.26. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B1-M1).

Medición de la probeta B1-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	38,02	37,37	37,70	0,87	130,46
2	37,59	38,14	37,87	0,72	129,33
3	39,01	38,02	38,52	1,30	124,96
4	39,34	36,93	38,14	3,26	127,50
5	39,01	37,80	38,41	1,60	125,68
Promedio dureza [HV]					127,59

(Fuente: Propia)

Tabla 3.27. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B2-M1).

Medición de la probeta B2-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	41,00	51,88	46,44	10,49	85,96
2	42,97	52,64	47,81	9,19	81,11
3	42,00	53,85	47,93	11,00	80,71
4	43,52	49,89	46,71	6,38	84,99
5	41,45	51,91	46,68	10,08	85,07

(Fuente: Propia)

Tabla 3.28. Resultado del ensayo de dureza del galvanizado por micro-indentación (probeta B3-M1).

Medición de la probeta B3-M1	D ₁ [μm]	D ₂ [μm]	Promedio [μm]	Diferencia [%]	Dureza [HV]
1	39,01	39,35	39,18	0,43	120,77
2	37,58	41,10	39,34	4,28	119,79
3	36,59	40,77	38,68	5,13	123,91
4	37,58	40,22	38,90	3,28	122,51
5	36,37	42,09	39,23	6,79	120,46
Promedio dureza [HV]					121,49

(Fuente: Propia)

3.1.7. Ensayo de *Pull-Off* para medición de la adhesividad mecánica

El ensayo de adhesividad mecánica realizado con el dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal de ensayos presenta los resultados descritos en el informe técnico entregado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones adjunto en el ANEXO XI y a la vez tabulados desde la Tabla 3.29 hasta la Tabla 3.37, en donde se muestra la carga, el esfuerzo aplicado en la superficie de la muñeca (correspondiente a un área de 314,16 mm²) y el tipo de fractura obtenido. Además, los valores de carga de las probetas con falla adhesiva y que no poseen un 100% de pegamento sobre su superficie son descartados, no se consideran para los respectivos cálculos y son expresados con letras de color rojo.

Tabla 3.29. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote A0.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
A0-P1	2120	6,75	100% B/Y
A0-P2	1919	6,11	100% B/Y
A0-P3	1987	6,32	100% B/Y
A0-P4	1851	5,89	7,06% A/B
A0-P5	2350	7,48	9,40% A/B
Promedio	2045,40	6,51	8,23% A/B

(Fuente: Propia)

Tabla 3.30. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote A1.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
A1-P1	3260	10,38	71,95% A/B
A1-P2	1934	6,16	36,62% A/B
A1-P3	2710	8,63	86,34% A/B
A1-P4	1673	5,33	50,59% A/B
A1-P5	3000	9,55	43,75% A/B
Promedio	2515,40	8,01	57,85% A/B

(Fuente: Propia)

Tabla 3.31. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote A2.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
A2-P1	1168	3,72	6,24% A/B
A2-P2	2100	6,68	/
A2-P3	2180	6,94	/
A2-P4	1264	4,02	100% B/Y
A2-P5	Falla durante la sujeción		
Promedio	1216,00	3,87	6,24% A/B

(Fuente: Propia)

Tabla 3.32. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote A3.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
A3-P1	3170	10,09	10,71% A/B
A3-P2	1110	3,53	100% B/Y
A3-P3	1910	6,08	/
A3-P4	3160	10,06	19,56% A/B
A3-P5	1722	5,48	100% B/Y
Promedio	2290,50	7,29	15,14% A/B

(Fuente: Propia)

Tabla 3.33. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote A4.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
A4-P1	2650	8,44	100% B/Y
A4-P2	1782	5,67	100% B/Y
A4-P3	1591	5,06	100% B/Y
A4-P4	2280	7,26	100% B/Y
A4-P5	1698	5,40	100% B/Y
Promedio	>2000,20	>6,37	100% B/Y

(Fuente: Propia)

Tabla 3.34. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote B0.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
B0-P1	1800	5,73	100% B/Y
B0-P2	1168	3,72	100% B/Y
B0-P3	2140	6,81	100% B/Y
B0-P4	2690	8,56	100% B/Y
B0-P5	967	3,08	/
Promedio	>1949,50	>6,21	100% B/Y

(Fuente: Propia)

Tabla 3.35. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote B1.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
B1-P1	1124	3,58	/
B1-P2	2040	6,49	100% B/Y
B1-P3	2290	7,29	100% B/Y
B1-P4	416	1,32	100% B/Y
B1-P5	1355	4,31	100% B/Y
Promedio	>1525,25	>4,86	100% B/Y

(Fuente: Propia)

Tabla 3.36. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote B2.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
B2-P1	Falla durante la sujeción		
B2-P2	2060	6,56	100% B/Y
B2-P3	845	2,69	100% B/Y
B2-P4	1928	6,14	100% B/Y
B2-P5	892	2,84	/
Promedio	>1611,00	>5,13	100% B/Y

(Fuente: Propia)

Tabla 3.37. Resultados del ensayo de *Pull-Off* del lote B3.

Probeta	Carga de fractura [N]	Esfuerzo de fractura [MPa]	Tipo de fractura
B3-P1	1488	4,74	/
B3-P2	2960	9,42	/
B3-P3	2300	7,32	100% B/Y
B3-P4	2490	7,93	100% B/Y
B3-P5	1882	5,99	100% B/Y
Promedio	>2224,00	>7,05	100% B/Y

(Fuente: Propia)

Por otra parte, el ensayo de *Pull-Off* mediante el medidor automático de adherencia por arranque, permite obtener el tipo y valor de esfuerzo de fractura, que además se lo expresa a manera de carga (considerando un área superficial de 78,54 mm²). Estos resultados se encuentran tabulados en la Tabla 3.38. Adicionalmente, este equipo permite apreciar la gráfica de la carga aplicada versus tiempo de desprendimiento de las probetas ensayadas, la misma que puede ser observada en el ANEXO XIII.

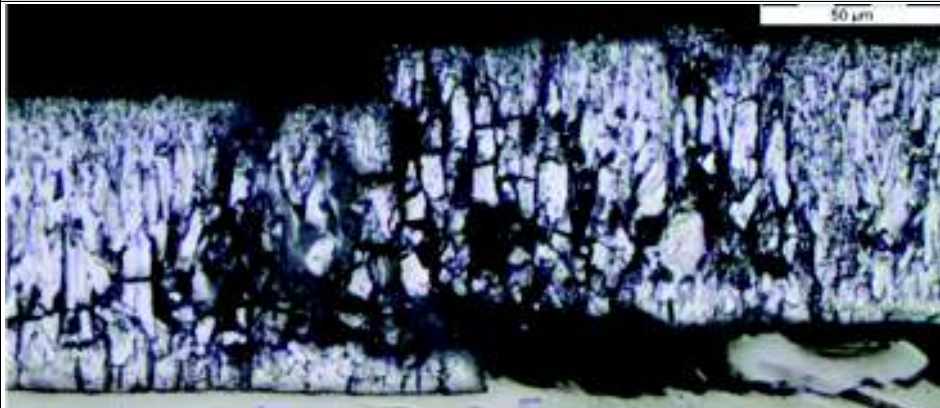
Tabla 3.38. Resultados del ensayo de *Pull-Off* con el medidor automático de adherencia.

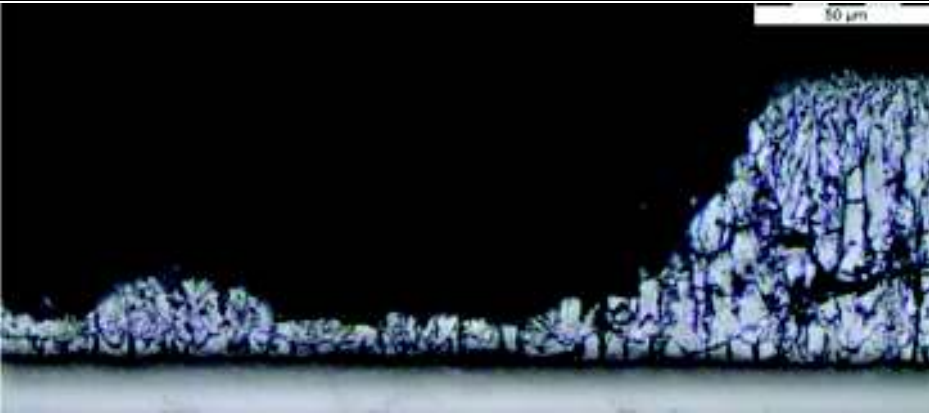

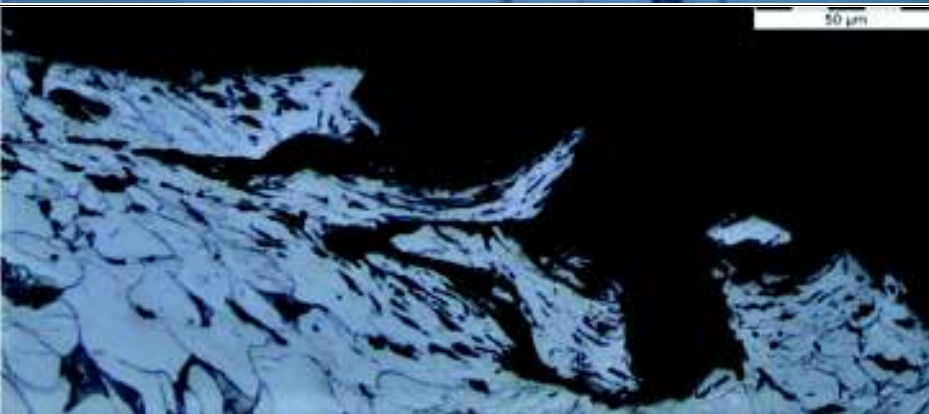
Probeta	Esfuerzo de fractura [MPa]	Carga de fractura [N]	Tipo de fractura	Tiempo hasta la fractura [s]
A0-P0	>32,06	>2517,99	100% B/Y	41,10
A1-P0	25,66	2015,34	91,73% A/B	33,01
A2-P0	>31,12	>2444,16	100% B/Y	39,79
A3-P0	23,90	1877,11	30,67% A/B	30,85
A4-P0	>30,08	>2362,48	100% B/Y	38,54
B0-P0	>18,49	>1452,20	100% B/Y	24,05
B1-P0	25,62	2012,19	23,40% A/B	34,00
B2-P0	>23,70	>1861,40	100% B/Y	30,55
B3-P0	>17,61	>1383,09	100% B/Y	23,00

(Fuente: Propia)

Adicionalmente, con la finalidad de observar el tipo de desprendimiento producido entre el recubrimiento de zinc y el sustrato de acero de las probetas con pretratamiento superficial de pulido y además galvanizadas en las dos empresas involucradas, se analizan las micrografías realizadas a la sección transversal de las probetas A1-P3 y B1-P0, tal como se puede observar en la Tabla 3.40.

Tabla 3.39. Análisis metalográfico del desprendimiento de la capa protectora de zinc.

Probeta (500x)	Imagen metalográfica
A1-P3	

<p>A1-P3</p>	
<p>B1-P0</p>	
<p>B1-P0</p>	

(Fuente: Propia)

Finalmente, las imágenes procesadas en el software libre *Python* se pueden apreciar en el ANEXO XII. En estas imágenes, se evalúan los porcentajes del área de desprendimiento de cada recubrimiento arrancado al momento de ejecutar el ensayo de *Pull-Off* con ayuda de los dos tipos de dispositivos previamente descritos en la Sección 2.8.1.

3.1.8. Medición del perfil de superficie

Las medidas de rugosidad de los lotes de acero estructural galvanizados con diferentes pretratamientos de acabado superficial se encuentran resumidas en la Tabla 3.40.

Tabla 3.40. Resultados de la medición del perfil de superficie.

Probeta	Mediciones de rugosidad superficial [μm]					Promedio
	1	2	3	4	5	
A0-P0	49	46	64	55	60	54,80
A1-P0	187	206	207	206	179	197,00
A2-P0	86	72	78	87	78	80,20
A3-P0	56	71	60	61	59	61,40
A4-P0	64	60	45	57	59	57,00
B0-P0	64	64	65	67	75	67,00
B1-P0	53	40	57	44	50	48,00
B2-P0	66	43	54	65	49	55,40
B3-P0	99	116	95	111	101	104,40

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1. Análisis de resultados del ensayo de tracción del acero ASTM A36

Al comparar la Tabla 3.2 con la Tabla 3.1, se puede encontrar que el esfuerzo de fluencia (S_y) de 370,9 MPa supera el límite inferior solicitado, además la resistencia a la tracción (S_t) con un valor de 483,5 MPa se halla dentro del rango permisible y el porcentaje de elongación en 50 mm (ϵ) correspondiente al 36,4% es mayor al valor mínimo requerido. Por lo tanto, se afirma que el comportamiento mecánico del sustrato de acero de bajo contenido de carbono cumple con los requisitos especificados en la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R).

3.2.2. Análisis de resultados de la caracterización de la composición química del sustrato de acero ASTM A36

Se puede observar, al comparar la Tabla 3.6 con la Tabla 3.5, que el carbono, el azufre, el fósforo y el silicio se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles establecidos en la norma NTE INEN 2215:2012 (1-R), por lo cual se asegura que el comportamiento del acero de bajo contenido de carbono cumple con sus respectivos requerimientos químicos.

Por otra parte, al comparar el porcentaje en peso del fósforo, azufre, manganeso, carbono y aluminio en el acero, con el de las concentraciones referenciadas por Kuklik & Kudlacek (2016), se puede asegurar que ninguno de estos componentes aleantes modifica o influencia sobre las propiedades del recubrimiento. Así también, el contenido de silicio

correspondiente a 0,172% en peso ubica a este elemento dentro del rango *Sebisty*, que abarca aceros con contenido de silicio entre 0,12 y 0,28% (Maaß, 2011). Adicionalmente, este acero resulta adecuado para realizar el proceso de galvanizado por inmersión en caliente, ya que es recomendable un contenido de silicio menor al 0,035% o entre 0,15 y 0,22%; por otra parte, si no se cumple esta condición, el acero es considerado como reactivo y producirá revestimientos demasiado gruesos (American Galvanizers Association, 2016), lo cual es indeseable debido a que se genera descamación y separación del recubrimiento de la superficie del sustrato, como resultado de los elevados esfuerzos producidos en la interfase hierro-zinc (Sang Chareon Hot Dip Galvanize Company Limited, 2008).

3.2.3. Determinación de los parámetros de galvanizado en función del contenido de silicio en el sustrato de acero

A continuación, se analizan los perfiles galvanizados testigo, mismos que no poseen pretratamiento superficial y corresponden a los lotes A0 y B0, en base a las gráficas características pertenecientes al rango *Sebisty* y a través de las cuales se deducen los principales parámetros empleados en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente de cada una de las empresas, así:

- Para la **empresa A**, en la gráfica de espesor del recubrimiento en función del contenido de silicio para un tiempo de inmersión de 10 minutos (ver Figura 1.6), al espesor de 129,67 μm (ver Tabla 3.10) le corresponde una temperatura de inmersión de 460°C. Además, en la gráfica de espesor del recubrimiento en función de la temperatura de inmersión (ver Figura 1.8), se aprecia que se obtienen los mismos resultados para tiempos de inmersión de 10 y 5 minutos, siendo el de 5 minutos el más adecuado.
- Para la **empresa B**, se tiene como dato que el proceso de galvanizado se realiza a una temperatura de inmersión de 450°C, valor que junto al espesor del recubrimiento de 58,63 μm (ver Tabla 3.15) proyectan en la gráfica de espesor del recubrimiento en función del tiempo de inmersión (ver Figura 1.9), un tiempo de 1 minuto y 20 segundos.

3.2.4. Análisis de resultados de las metalografías del perfil de acero galvanizado

Al analizar las metalografías de la Tabla 3.7 se puede apreciar la microestructura del sustrato de acero ASTM A36, misma que se encuentra compuesta por una zona clara

correspondiente a una fase ferrítica y por ciertas zonas de color café oscuro propias de una estructura cristalina perlítica, las cuales se encuentran presentes en cantidades menores y con cierta distribución longitudinal, ya que el perfil es obtenido por un proceso de laminado en caliente. Así también, esta microestructura cristalina y el bajo contenido de carbono definen a este elemento como un acero hipoeutectoide.

Por otra parte, las metalografías de los recubrimientos de zinc de la Tabla 3.8 permiten apreciar las siguientes características:

- **Probeta A0-M1**, el sustrato posee una superficie irregular, a partir de la cual se desarrolla una fase *delta* de espesor variable. Posteriormente, la fase *zeta* posee cristales grandes y distribuidos a manera de columnas, que a medida que se extienden hacia el extremo superior se vuelven más finos y pequeños. Estos cristales se difunden a través de la fase *eta* y provocan que la interfase entre la capa *eta* y *zeta* no se encuentre claramente definida. Adicionalmente, la fase *zeta* posee espacios intercristalinos vacíos y una pronunciada grieta horizontal.
- **Probeta A1-M1**, la superficie del sustrato es perfectamente horizontal con pequeñas crestas a lo largo de la misma. Posee una fase *delta* irregular, seguida de una fase *zeta* conformada por cristales alargados y de gran tamaño con una disposición a manera de columnas, entre los cuales existen grietas. Finalmente, la fase *eta* posee una difusión de la fase *zeta* dentro de esta.
- **Probeta A2-M1**, posee cierta irregularidad en la superficie del acero, sobre la cual se desarrolla una capa *delta* gruesa y de espesor uniforme. A continuación, se tiene una fase *zeta* compuesta en su parte inferior por una aleación; mientras que, en su extremo superior, en la frontera con la fase *eta*, presenta la formación de cristales muy pequeños difundidos a lo largo de la capa *eta*, misma que es de gran espesor y presenta una superficie externa irregular.
- **Probeta A3-M1**, la superficie del sustrato es deforme. Le sigue una fase *delta* irregular, dentro de la cual se encuentran incrustaciones de cristales provenientes de la fase *zeta*. Más adelante, la zona inferior de la fase *zeta* posee cristales desarrollados y con una distribución vertical, mientras que en el extremo superior sus cristales van disminuyendo en tamaño y se van difundiendo a lo largo de la fase *eta*, la cual no presenta una superficie uniforme.
- **Probeta A4-M1**, posee las mismas características que la probeta A0-M1 y no presenta ninguna diferencia notable.

- **Probeta B0-M1**, la superficie del sustrato es irregular. A partir de esta, se encuentra una fase *delta* delgada y de espesor variable, seguida de una fase *zeta* que en su parte inferior es una aleación en su mayoría, mientras que en la parte superior se encuentra formada por cristales delgados y pequeños con una orientación vertical. Además, la fase *eta* se encuentra bien definida.
- **Probeta B1-M1**, el sustrato presenta una superficie plana, pero con pequeñas crestas a lo largo de la misma. Su fase *delta* es de espesor irregular y le sigue una fase *zeta* que en su parte inferior es una aleación, mientras que en su parte superior posee cristales bastante delgados y alargados a manera de agujas, distribuidos de forma vertical, entre los cuales se encuentran ciertos espacios intercristalinos vacíos. Finalmente, se tiene la fase *eta*.
- **Probeta B2-M1**, presenta cierta irregularidad en la superficie del acero, sobre la cual se desarrolla una fase *delta* un tanto uniforme en cuanto a su espesor y que además posee una grieta vertical. La interfase entre la capa *delta* y *zeta* no se encuentra claramente delimitada, ya que la fase *zeta* se compone por una aleación, seguida de una fase *eta* que puede ser fácilmente diferenciada.
- **Probeta B3-M1**, la superficie del acero no es uniforme y le sigue una fase *delta* de espesor variable y con fronteras bien definidas. La fase *zeta* posee cristales desarrollados, de gran tamaño y con distribución vertical, entre los cuales se encuentran ciertos espacios con grietas o espacios ocupados por otros cristales muy pequeños. Adicionalmente, la fase *eta* está conformada por zinc puro.

En base a las características descritas se tiene que, tanto las capas protectoras de la empresa A, como las de la empresa B se encuentran compuestas por las fases *delta* (δ), *zeta* (ζ) y *eta* (η), lo cual de acuerdo a Maaß (2011) es producto de combinar una temperatura de inmersión que va alrededor de 450°C y un contenido de silicio que se encuentre dentro del rango *Sebisty* (ver Figura 1.7). A más de eso, en estos recubrimientos se encuentra ausente la fase *gamma* (γ), ya que tiempos de inmersión pequeños, como los usados en estos procesos, no permiten que se realice la incubación de esta capa y solamente se observa una línea entre el acero y la fase *delta* (Rico, 2012). Adicionalmente, respecto a los cristales encontrados en la fase *zeta*, los granos pequeños y menos desarrollados se denominan equiaxiales, mientras que los cristales alargados con una estructura a manera de columnas, se denominan granos columnares (Cervantes, y otros, 2013), por lo que es común encontrar una frontera tenue dentada entre la fase *zeta* y la fase *delta* (Valdés, 2010).

Por otro lado, en el ANEXO VI los lotes A0, A2, A3 y A4, presentan revestimientos de aspecto poco brillante, combinados con zonas opacas, mientras que el lote A1 presenta en su mayoría un aspecto gris mate. Este fenómeno se produce en los perfiles galvanizados por la empresa A, ya que el factor común entre estos lotes es la difusión de cristales individuales de la fase *zeta* a través de la fase *eta*. Es así que, mientras mayores sean los tiempos de inmersión en este proceso, los tiempos de enfriamientos aumentarán y darán como resultado una reacción metalúrgica entre el zinc y el hierro (American Galvanizers Association, 2016) en la cual el hierro que se ha tomado a partir de la fase *delta* se difunde hasta la superficie del recubrimiento, dándole al recubrimiento un aspecto mate (Valdés, 2010). Además, la grieta horizontal presente a lo largo de la capa *zeta* es resultado de temperaturas de inmersión mayores a los 450°C (Maaß, 2011).

En contraparte, las estructuras del recubrimiento de la empresa B poseen una fase *zeta* con cristales extendidos a lo largo de la superficie del acero y una fase *delta* esporádica y de espesor limitado, tal como lo predice Maaß (2011) en la tabla adjunta en el ANEXO I. Este comportamiento es resultado de una elevada velocidad de enfriamiento que provee una estructura cristalina más fina y una capa de zinc puro sobre las superficies intermetálicas (American Galvanizers Association, 2016). Así también la elevada velocidad de enfriamiento es causante de la aparición de la grieta en el lote B2 (Van Eijnsbergen, 2012), misma que se origina en la capa más frágil, correspondiente a la fase *delta* (Valdés, 2010). Finalmente, cabe señalar que las microgrietas presentes a lo largo de la capa protectora, pueden acelerar el proceso de corrosión (Valdés, 2010).

3.2.5. Análisis de resultados del espesor mínimo de recubrimiento para el perfil estructural del acero y de los espesores de las fases de recubrimiento

Una vez analizado el espesor del recubrimiento promedio de cada tipo de lote, se concluye que los perfiles estructurales galvanizados por la empresa A superan con un gran margen a los valores mínimos de aceptación establecidos en la norma ASTM A123 (ver Tabla 3.9), mientras que los espesores de los perfiles galvanizados en la empresa B son considerablemente menores en relación a los de la empresa A. Posteriormente, se determina que las muestras pertenecientes a los lotes B1 y B3 (pretratamiento superficial de pulido y de esmerilado, respectivamente) cumplen estrechamente con los criterios de aceptación mencionados, mientras que los lotes B0 y B2 (sin pretratamiento superficial y con pretratamiento de lijado, respectivamente) presentan valores pobres de espesor de la

capa de aleación hierro-zinc. Esto se puede observar más detalladamente en la Figura 3.2. Además, al comparar los productos de ambas empresas se tiene que los espesores obtenidos a través del proceso de galvanizado de la empresa A, para cada pretratamiento superficial, son más gruesos y son el resultado de emplear un mayor tiempo de inmersión en el baño de zinc, cumpliendo así el comportamiento descrito en la Figura 1.8.

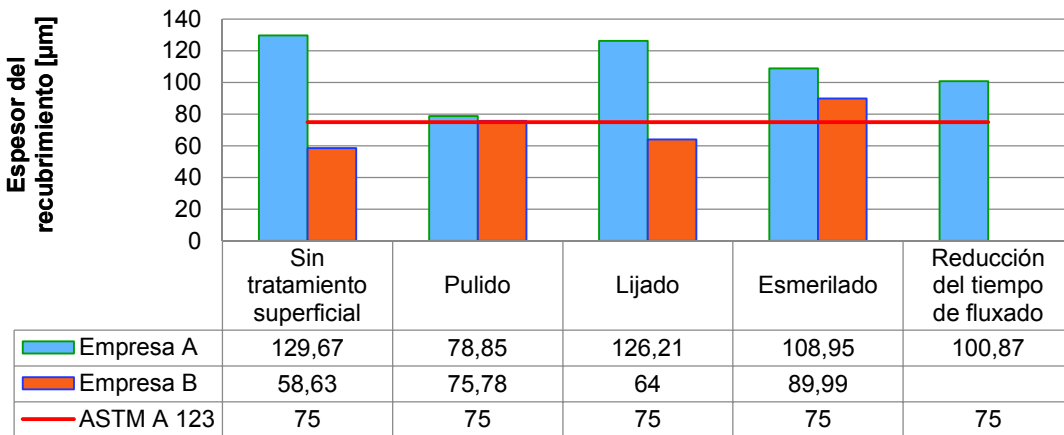


Figura 3.2. Comparación del espesor de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

Posteriormente, se analizan los espesores de las diferentes fases de aleación hierro-zinc empleando la Figura 3.3, la Figura 3.4 y la Figura 3.5, mismas que se comparan con el estudio desarrollado por Parvini & Rafiezadeh (2009), en el cual se presentan los espesores de las diferentes capas de aleación obtenidas sobre un acero de bajo carbono (0,085%) y con un contenido de silicio del 0,003% (perteneciente al grupo de aceros de bajo contenido de silicio) a través de un proceso de galvanizado por inmersión en caliente ejecutado con un tiempo de inmersión de 5 minutos. A pesar de las diferencias existentes con el sustrato de acero ASTM A36 utilizado en el presente estudio, esta información se emplea como referencia, ya que su microestructura contiene características similares a las observadas en la Tabla 3.8 y además permite apreciar las variaciones producidas en el espesor de las fases de aleación para cada tipo de pretratamiento superficial utilizado.

Es así que, en primera instancia la Figura 3.3 muestra que en todos los lotes, las fases *delta* de la capas de galvanizado correspondientes a la empresa A poseen mayor espesor que las obtenidas en la empresa B, lo cual es producto de las elevadas velocidades de enfriamiento usadas por parte de la empresa B que hacen que la fase *delta* se desarrolle limitadamente (American Galvanizers Association, 2016). Además, los espesores delgados de la fase *delta* poseen una incidencia mínima sobre el espesor total del recubrimiento.

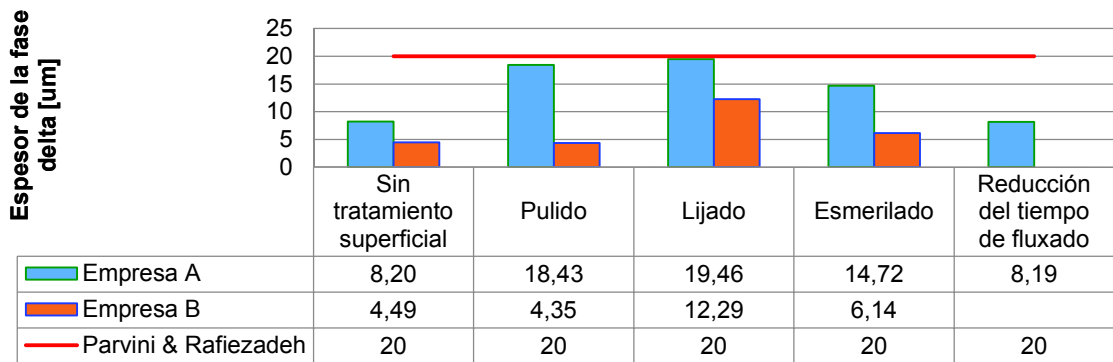


Figura 3.3. Comparación del espesor de la fase *delta* de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

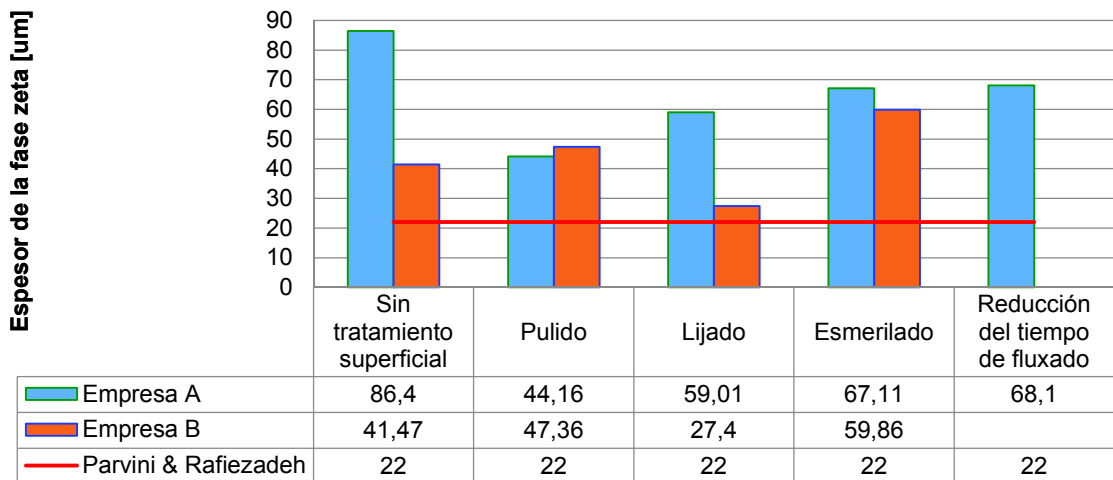


Figura 3.4. Comparación del espesor de la fase *zeta* de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

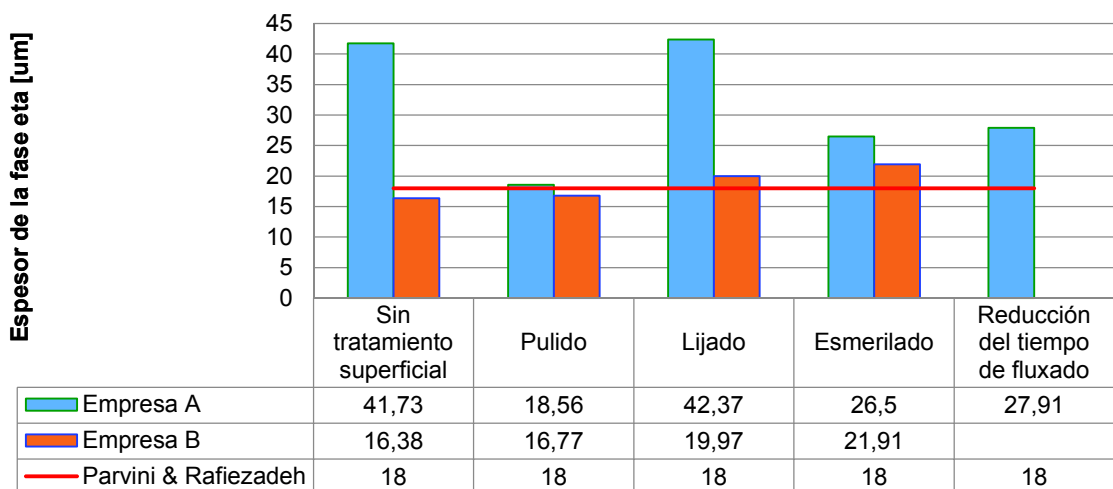


Figura 3.5. Comparación del espesor de la fase *eta* de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

Por otro lado, en la Figura 3.4 y Figura 3.5, al comparar los procesos de galvanizado empleados en las empresas A y B se puede apreciar que en el pretratamiento superficial de pulido tanto la fase *zeta* como la *eta* poseen valores similares; ocurriendo el mismo fenómeno para el pretratamiento superficial de esmerilado. En contraparte, en los perfiles sin pretratamiento superficial y con pretratamiento superficial de lijado tanto la fase *eta* como la *zeta* presentan mayores espesores en la empresa A que en la empresa B. Es así que se determina que las capas decisivas en brindar el espesor total al recubrimiento son la fase *zeta* y posteriormente la fase *eta*, para lo cual se señala que el crecimiento de la fase *zeta* se encuentra favorecido por la difusión de sus cristales a través de la fase *eta* (Rico, 2012), mientras que el crecimiento de la capa *eta* depende de la velocidad de extracción y la temperatura del zinc líquido (Valdés, 2010). También, los espesores de las capas *delta*, *zeta* y *eta*, para cada tipo de pretratamiento superficial realizado, son menores para los productos obtenidos en la empresa B que para los producidos por la empresa A, esto debido al incremento en la velocidad de enfriamiento aplicada en la empresa B.

Además, se tiene que en la Figura 3.3 los lotes con pretratamiento superficial de pulido y lijado, galvanizados en la empresa A, poseen una fase *delta* de espesor cercano al de referencia, mientras que en el resto de lotes se tienen valores inferiores. En la Figura 3.4 el perfil con pretratamiento de lijado, galvanizado por la empresa B, posee un espesor de la fase *zeta* similar al de referencia mientras que para los otros lotes, tanto para la empresa A como para la B, el espesor de esta capa es mayor. Y por último, en la Figura 3.5 la capa *eta* correspondiente a los lotes galvanizados por la empresa B, poseen espesores cercanos al valor de referencia, mientras que para la empresa A las medidas son mucho mayores, a excepción del perfil con pretratamiento superficial de pulido al que le corresponde un espesor de la capa *eta* cercana a la de referencia. Finalmente, en los dos tipos de procesos de galvanizado estudiados el pretratamiento superficial de pulido y el de esmerilado, brindan los resultados más uniformes, parejos y que cumplen con la norma ASTM A123.

3.2.6. Análisis de resultados del peso por unidad de área del recubrimiento para el perfil estructural de acero

La norma ASTM A123 define el grado del espesor de recubrimiento en base a la dimensión de su espesor o al valor de su peso por unidad de área, lo cual confirma el comportamiento similar y consistente entre estos dos parámetros que a su vez se expresan en la Figura 3.2 y en la Figura 3.6, respectivamente. Es por eso que trabajar con cualquiera de ellos a lo largo de este estudio no resulta ser un inconveniente.

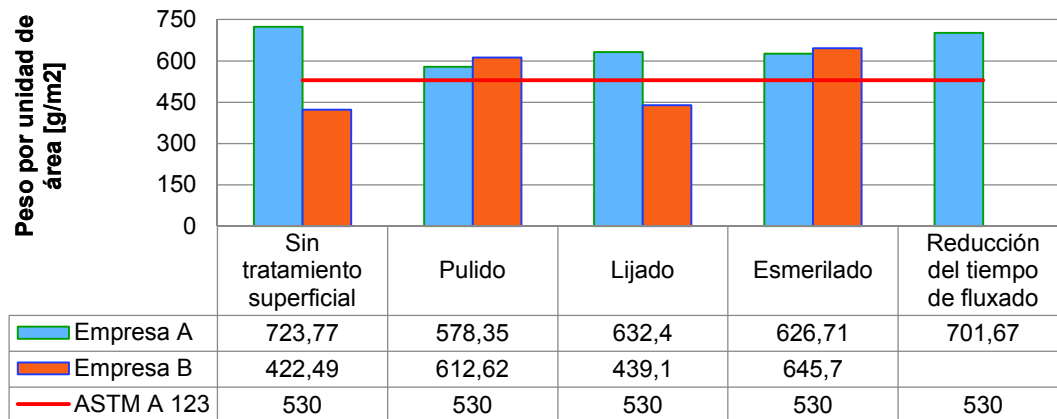


Figura 3.6. Comparación del peso por unidad de área del recubrimiento (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

3.2.7. Análisis de resultados del ensayo de dureza del recubrimiento de zinc mediante micro-indentación y de dureza del acero ASTM A36

Para este ensayo, la dureza se obtiene a través de micro-indentación, en la cual se efectúa la marca del indentador en la zona central del recubrimiento. Es así que, en espesores espesos la marca se ubica en la fase *zeta* debido a que es la capa más gruesa, mientras que en recubrimientos delgados la marca puede llegar a abarcar las fases *zeta*, *eta* y *delta* (ver ANEXO X). Además, los valores de dureza de la Figura 3.7 se consideran como consistentes, ya que al compararlos en el trabajo de Valdés (2010) con el valor de dureza de 112 [HV] de la capa *zeta* y además al encontrarse entre el valor mínimo de 70 [HV] de la capa *eta* y el máximo de 285 [HV] correspondiente a la *delta*, se reconoce que los valores de dureza representan adecuadamente al recubrimiento y a sus tres fases en conjunto.

Adicionalmente, al analizar los resultados de la Tabla 3.27 del ensayo de dureza de la probeta B2 (pretratamiento superficial de lijado), se sostiene que sus medidas no cumplen con la condición que establece la norma ASTM E384 de que la mitad de la dimensión de la una diagonal sea menor al 5% de la mitad del largo de la otra diagonal. La razón para ello, es que la marca del indentador abarca las tres fases de aleación, tal como se mencionó en el anterior párrafo, por lo que en la zona perteneciente a la capa *zeta* y *eta*, que son las fases de mayor espesor y las más suaves, el indentador penetrará más, mientras que en la zona perteneciente a la fase *delta*, que es la más delgada y la más dura a la vez, el indentador penetrará menos y entonces las esquinas opuestas de la marca aparecerán en diferentes planos, generando así la diferencia tan pronunciada entre estas diagonales. Por ello, resulta complicado obtener la dureza de los recubrimientos que son muy delgados.

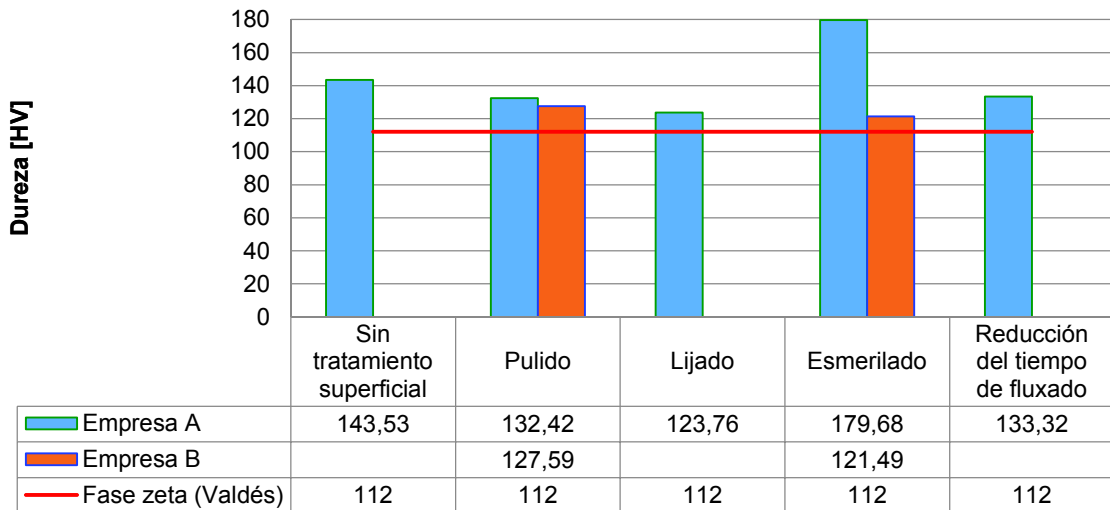


Figura 3.7. Comparación de dureza por micro-indentación de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

Una vez validados los resultados, se identifica que la dureza del recubrimiento del perfil con pretratamiento superficial de pulido producido por la empresa A es ligeramente mayor que el producido por la empresa B, mientras que el recubrimiento del perfil con pretratamiento superficial de esmerilado producido en la empresa A es mucho mayor que el producido en la empresa B. Así también, a nivel general se observa que las durezas de los recubrimientos superan la dureza de la fase *zeta* tomada como de referencia. En el caso del perfil con pretratamiento superficial de esmerilado de la empresa A, la dureza (perteneciente a la capa *zeta*) es la mayor que presentan al comparar todas las muestras. Así también, al analizar individualmente las diferentes fases de aleación mencionadas en el trabajo de Valdés (2010), se tiene que la dureza de la capa *delta* es mayor en una proporción del 154% respecto a la de la fase *zeta*, lo cual implica que este fenómeno se replique en los recubrimientos de los lotes estudiados. Así pues, la fase *delta* presentará la mayor dureza de todas las fases presentes en el sistema sustrato-recubrimiento.

Por otra parte, se tiene que las propiedades del recubrimiento van a estar determinadas fundamentalmente por el tamaño y arreglo de los cristales individuales. Estos cristales, pueden crecer a partir de los ya existentes y serán cristales grandes pero en pequeñas cantidades, o también pueden crearse nuevos cristales a partir de la formación de núcleos y tendrán depósitos de granos más finos pero en mayor cantidad. Los depósitos finos son más tersos, brillantes, duros y resistentes, pero menos dúctiles a comparación de los gruesos. Por ello, se señala que el tamaño de las partículas y su naturaleza determinan la resistencia y dureza del recubrimiento (Valdés, 2010).

3.2.8. Análisis de resultados del ensayo de *Pull-Off* del recubrimiento de zinc mediante el dispositivo de acople para la máquina universal de ensayos

Al observar la Tabla 3.38 y al compararla con las cargas de desprendimiento del recubrimiento tabuladas desde la Tabla 3.29 hasta la Tabla 3.37 se puede evidenciar que los valores del medidor automático de adherencia por arranque se encuentran dentro del rango de valores alcanzados a través del dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal de ensayos y a través de los cuales se calcula también el promedio del esfuerzo de fractura de cada uno de los lotes ensayados. Entonces, los valores obtenidos en el medidor automático de adherencia por arranque, permiten validar los resultados alcanzados con el dispositivo de *Pull-Off* para la máquina universal. Por otro lado, el valor referencial de adhesión es el de un recubrimiento análogo, correspondiente a un sistema dúplex aplicado sobre una placa de acero de 4 mm de espesor rociada con zinc fundido y poliéster. El recubrimiento de zinc posee un espesor de 100 μm y el ensayo de adhesión realizado con una muñeca de 20 mm de diámetro presenta un esfuerzo de alrededor 3 MPa, para el cual el conjunto del sistema dúplex se desprendió del sustrato (Handa & Takazawa, 1998).

Es así que, en la Figura 3.8 los lotes A0, A1, A2 y A3 presentan valores correspondientes al esfuerzo necesario para desprender la capa protectora, mientras que los valores de los lotes A4, B0, B1, B2 y B3 vienen expresados a manera de rangos y representan el esfuerzo requerido para producir la falla adhesiva entre la superficie del pegamento y del recubrimiento. Esto implica que el desprendimiento de la capa de galvanizado para los lotes A4, B0, B1, B2 y B3 se producirá una vez excedidos los esfuerzos señalados.

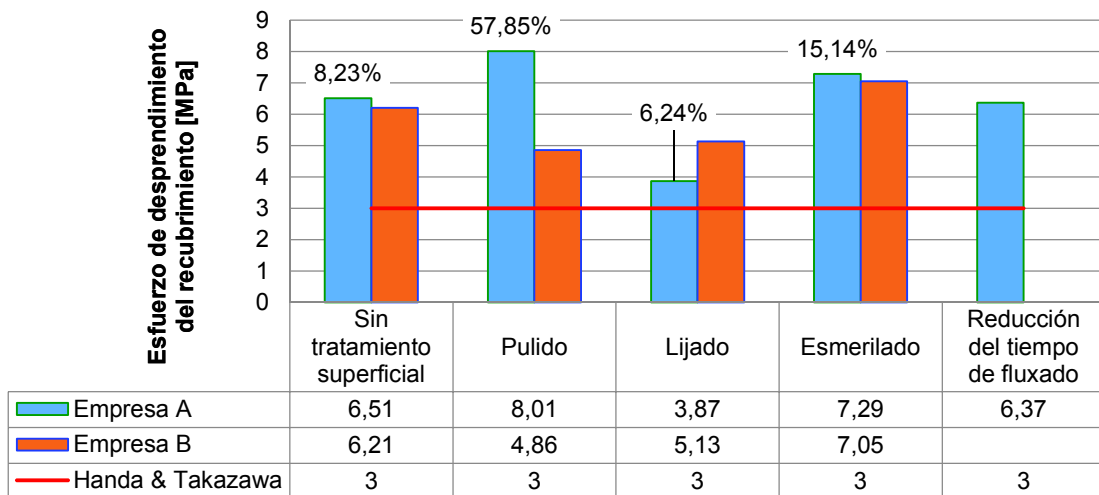


Figura 3.8. Comparación de la adherencia de los recubrimientos (dispositivo de *Pull-Off*).
(Fuente: Propia)

Entonces, al analizar la Figura 3.8 se tiene que, para los perfiles sin pretratamiento superficial y con pretratamiento superficial de esmerilado el valor de adhesión de los lotes producidos en la empresa A son muy similares a los valores mínimos de adhesión presentados por los lotes producidos en la empresa B. El perfil con pretratamiento superficial de pulido perteneciente a la empresa A presenta un valor más elevado de adherencia que el valor mínimo de adherencia del perfil obtenido en la empresa B. Mientras que el perfil con pretratamiento superficial de lijado de la empresa A necesariamente implica un valor menor de adhesión que el perfil de la empresa B. Adicionalmente, se puede apreciar que el esfuerzo requerido para producir el desprendimiento del recubrimiento adquiere un mayor valor a medida que los porcentajes de desprendimiento (ubicados sobre las barras de la Figura 3.8) aumentan.

Finalmente, se tiene que en relación al valor de referencia empleado, la adhesión de todos los lotes galvanizados es superior y estos a su vez no presentan un comportamiento que brinde la posibilidad de descamarse durante su manipulación, tal como sucede con los recubrimientos excesivamente gruesos ($>300 \mu\text{m}$) que son más frágiles y tienden a descamarse durante su manipulación (Nordic Galvanizers, 2017). Este fenómeno ocurre como consecuencia del alto estrés generado por los revestimientos espesos, en la interfase entre el acero y la capa de aleación hierro-zinc y que se lo corrige disminuyendo el tiempo de inmersión y aplicando enfriamientos rápidos (American Galvanizers Association, 2016).

3.2.9. Análisis de resultados de la rugosidad del recubrimiento de zinc

En la Figura 3.9 se aprecia que los valores de rugosidad de los diferentes lotes van desde 48 hasta $104,4 \mu\text{m}$, a excepción del lote A1 que presenta un valor de $197 \mu\text{m}$. Para este caso, se tiene que ese valor de rugosidad tan grande es causado por el alto grado de difusión de los cristales provenientes de la fase *zeta* sobre la capa *eta* y que llegan hasta la superficie externa del recubrimiento, confiriéndole así una superficie de aspecto gris mate, tal como se puede observar en el ANEXO VI. Así también, al analizar los acabados superficiales de los otros perfiles galvanizados se aprecia que los lotes pertenecientes a la empresa B son de aspecto brillante, mientras que los perfiles procesados en la empresa A poseen una combinación de un color claro con ramificaciones opacas. Este comportamiento se justifica a través del trabajo de Gill & Langill (2005) en el cual se menciona que un recubrimiento en donde la fase *eta* es consumida completamente por la capa *zeta* y que es expuesta a la superficie, presenta un perfil de superficie de elevada rugosidad, mientras que si la fase *eta* se encuentra intacta se presentará una superficie

lisa. Por lo tanto, se puede llegar a demostrar que con un tiempo grande de inmersión en el baño de zinc combinado con una velocidad de enfriamiento lenta, la empresa A puede producir galvanizados con una fase *eta* consumida parcial o incluso completamente, mientras que si se tiene un tiempo de inmersión pequeño junto a una velocidad de enfriamiento rápida se garantiza una fase *zeta* de zinc puro y lisa a la vez.

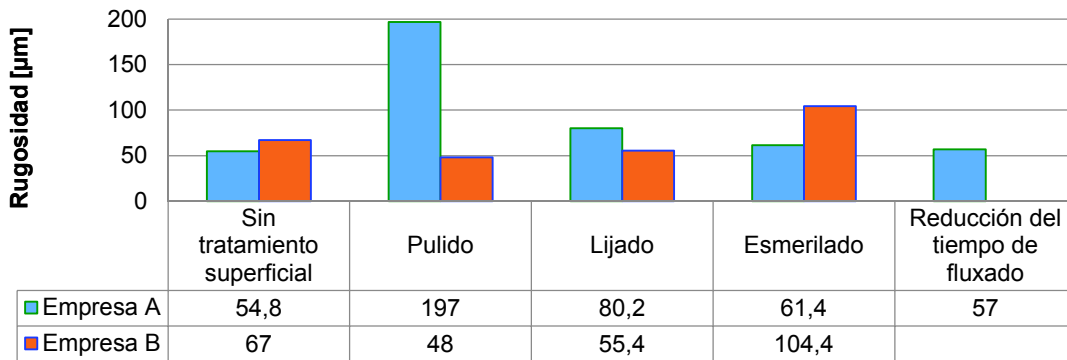


Figura 3.9. Comparación de rugosidad de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

Adicionalmente, en la Figura 3.9 se tiene que la muestra galvanizada sin pretratamiento superficial posee la diferencia más baja de rugosidad al comparar los procesos empleados entre la empresa A y la empresa B; además estos perfiles galvanizados poseen un valor semejante de rugosidad superficial que el elemento sometido a una reducción en el tiempo de fluxado en la empresa A. Así también, para los lotes con pretratamiento superficial de pulido, lijado y esmerilado el proceso aplicado en la empresa A le otorga al recubrimiento valores de rugosidad que van disminuyendo en el mismo orden que los pretratamientos previamente descritos, mientras que se produce una relación ascendente de rugosidad en el proceso empleado en la empresa B. También, se tiene que una superficie rugosa o áspera implica la presencia de valles, poros y capilaridades, los cuales a su vez incrementan la ligadura o amarre mecánico con adhesivos u otras partículas, además que si estas capilaridades son abiertas, cualquier sustancia podría fluir a través de las mismas; mientras que si la superficie es lisa, se presentan inconvenientes al momento de generar una buena unión de la superficie con un adhesivo o en acumular sustancias (Pardo, 2006). Por lo tanto, en base a ello se deduce que los recubrimientos con valores de rugosidad elevados presentarán mayor posibilidad de que se incrusten partículas contaminantes o que se acumulen sustancias corrosivas sobre la superficie de la capa de recubrimiento, lo cual naturalmente inducirá a que se genere el proceso corrosivo, mientras que las superficies lisas o con valores bajos de rugosidad impedirán este comportamiento.

3.2.10. Análisis de las gráficas de relación de los diferentes parámetros de los recubrimientos de zinc estudiados

Una vez analizados individualmente los resultados, se comparan los diferentes parámetros estudiados de dos en dos, tal que al llevarlos a una gráfica se pueda deducir el comportamiento de cada tipo de recubrimiento y con ello se establezcan las relaciones existentes entre las diferentes propiedades y características de las capas de aleación hierro-zinc, así también como sus principales diferencias.

Es entonces que, en primer lugar, en la Figura 3.10 se presenta la relación correspondiente entre la rugosidad y el espesor de los recubrimientos para los cuales se presentan los siguientes análisis:

- En los lotes galvanizados por la **empresa A**, las rugosidades más bajas y de similar valor se presentan en las muestras A0 y A4 (microestructuralmente similares), seguidos por recubrimientos con una rugosidad creciente en el siguiente orden: perfiles con pretratamiento de esmerilado, lijado y pulido, en los cuales se puede apreciar que la rugosidad está dada en función de la difusión de los cristales provenientes de la fase *zeta* sobre la fase *eta*. Adicional a ello, como se conoce que el comportamiento de la rugosidad se encuentra en función de las microestructuras cristalinas desarrolladas en las capas de aleación hierro-zinc, se tiene que estas microestructuras a su vez se encuentran afectadas por el tipo de enfriamiento empleado, por lo que este factor va a ser decisivo en determinar el tipo de rugosidad obtenida (ASTM International, 2013).
- En contraste, para la **empresa B** los lotes galvanizados poseen espesores más pequeños de recubrimiento en relación a los obtenidos en la empresa A, además de que la rugosidad de estos perfiles galvanizados aumenta respetándose el tipo de pretratamiento superficial aplicado al sustrato de acero, es decir que la rugosidad aumenta en el siguiente orden: perfil pulido, lijado, sin pretratamiento superficial y esmerilado, tomando en cuenta que el perfil sin pretratamiento superficial posee una superficie burda, tal como se lo puede apreciar en la descripción de las metalografías de la Tabla 3.8 y en el ANEXO VI. Por lo tanto se afirma que los recubrimientos que poseen su fase *eta* compuesta por zinc puro, cumplen con el comportamiento que establece que en la mayor parte de aceros, el incremento de rugosidad superficial del sustrato genera un aumento en el espesor del recubrimiento (Nordic Galvanizers, 2017). Lo cual, a su vez va acompañado de un aumento en la rugosidad superficial de la capa protectora.

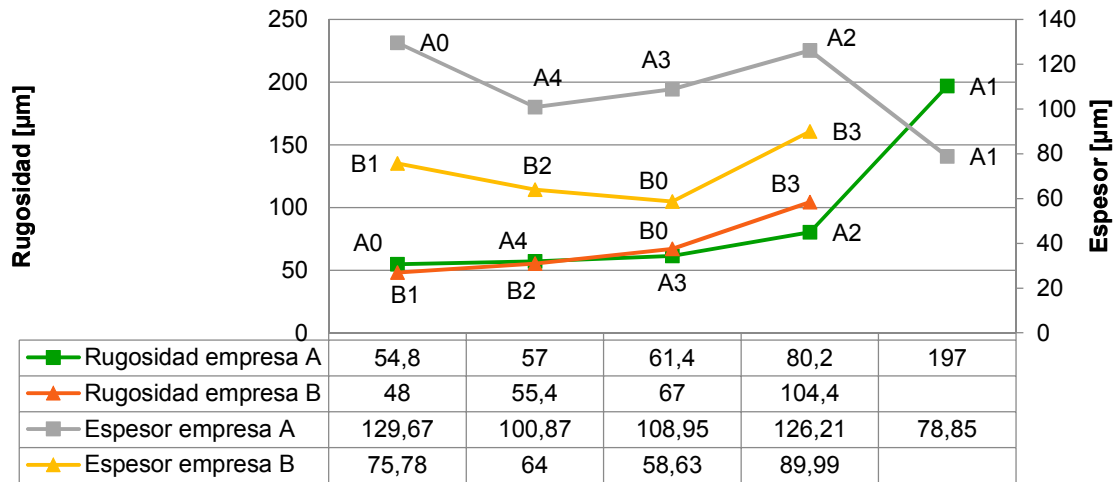


Figura 3.10. Relación entre la rugosidad y el espesor de los recubrimientos (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

En segundo lugar, en la Figura 3.11 se observa cómo la dureza, que a su vez depende del tipo de estructura cristalográfica de sus fases, se relaciona con la carga de fractura necesaria para producir el arranque de esta capa protectora. Es por ello que al analizar los recubrimientos en los que se logra obtener un desprendimiento en el ensayo de *Pull-Off*, el valor más bajo de adhesión viene dado por la muestra A2, que en su fase *zeta* es una aleación, posteriormente en orden creciente del valor de adhesión, le siguen: muestra A0 con una fase *zeta* gruesa que contiene varios cristales finos junto a la presencia de una grieta pronunciada, luego el lote A3 con una fase *zeta* más delgada y con cristales semejantes al del caso anterior y finalmente el lote A1 que presenta una capa *zeta* delgada con cristales un poco más alargados que los casos anteriores y además con grietas. Adicionalmente, ya que solo se conoce el valor mínimo necesario para desprender el recubrimiento de los lotes obtenidos a través de la empresa B, se espera que al igual que en el anterior caso, la adhesión del sistema se encuentre en función del tipo de estructura cristalográfica de la capa *zeta*, del tamaño y forma de los cristales y de la presencia de grietas. Mientras tanto en lo concerniente a dureza, se tiene que los granos finos equiaxiales poseen los valores más grandes de dureza, mientras que si estos granos son más grandes, su dureza disminuirá. Posteriormente, los cristales alargados a manera de aguja y de espesor delgado poseen menor valor de dureza que los del caso anterior y además si estos cristales con forma de aguja poseen espesores más gruesos, la dureza del recubrimiento disminuirá aún más. Finalmente, una fase *zeta* compuesta por la combinación de cristales y una aleación adquirirán valores más pequeños de dureza que si se tienen solamente cristales, mientras que, si se trata completamente de una aleación los valores de dureza serán los más bajos que se puedan encontrar.

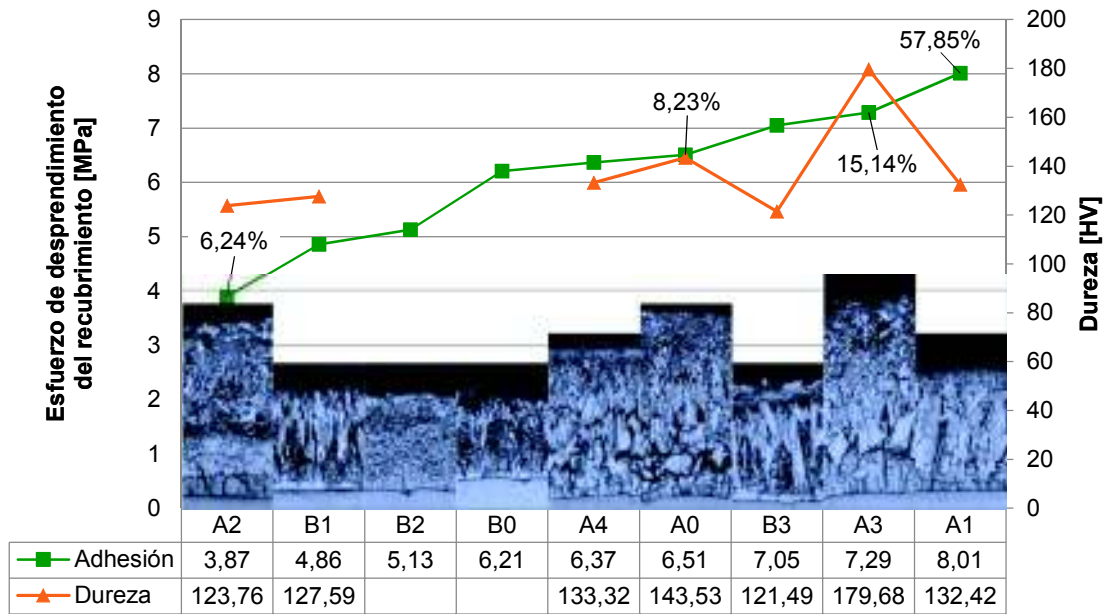


Figura 3.11. Relación entre el esfuerzo de desprendimiento del recubrimiento (dispositivo de *Pull-Off*), dureza y estructura metalográfica (empresa A y B).
(Fuente: Propia)

Por lo tanto, las propiedades de adhesión también vienen determinadas por el tamaño y arreglo de los cristales individuales, en donde los cristales grandes en su estructura resultan ser muy frágiles frente a las cargas de tracción aplicadas (Valdés, 2010). En contraparte, los cristales equiaxiales pequeños requieren esfuerzos elevados para lograr desprender la capa de recubrimiento, mientras que en el caso de los granos alargados en forma de aguja, se requerirá un esfuerzo mayor a los requeridos en caso anterior y si los cristales en forma de aguja son aún más delgados el esfuerzo necesario para desprender el recubrimiento será aún mayor, esto a casusa de que el esfuerzo aplicado actúa a lo largo del eje axial de estos cristales, haciendo así que el recubrimiento resista muy bien al desprendimiento. Finalmente, se tiene que la ductilidad de los recubrimientos y a la vez su grado de adhesión dependen del tamaño de grano, orientación cristalográfica, vacantes presentes, temperatura de inmersión y tiempo de enfriamiento en el baño de zinc, espesor del recubrimiento y distribución de las fases que constituyen la microestructura del recubrimiento (Rico & Carrasquero, 2017).

Como último punto, en la Figura 3.12 se presenta la gráfica del esfuerzo necesario para desprender el recubrimiento en función de la rugosidad, en donde se puede apreciar que los puntos que representan las muestras galvanizadas en la empresa B presentan un comportamiento lineal entre la rugosidad y el valor mínimo de adhesión que soporta el recubrimiento, esto como consecuencia de que en el ensayo de *Pull-Off* realizado, las fallas

producidas son de tipo adhesivas, entre la superficie de la capa protectora y el pegamento. Con ello se puede apreciar el comportamiento que posee el adhesivo MasterBond EP15 ND-2 frente a las diferentes rugosidades, lo cual refleja que las a mayor valor de rugosidad superficial, el perfil de anclaje que se brinda al pegamento será superior y por lo tanto tendrá mayor probabilidad de desprender cohesivamente el recubrimiento.

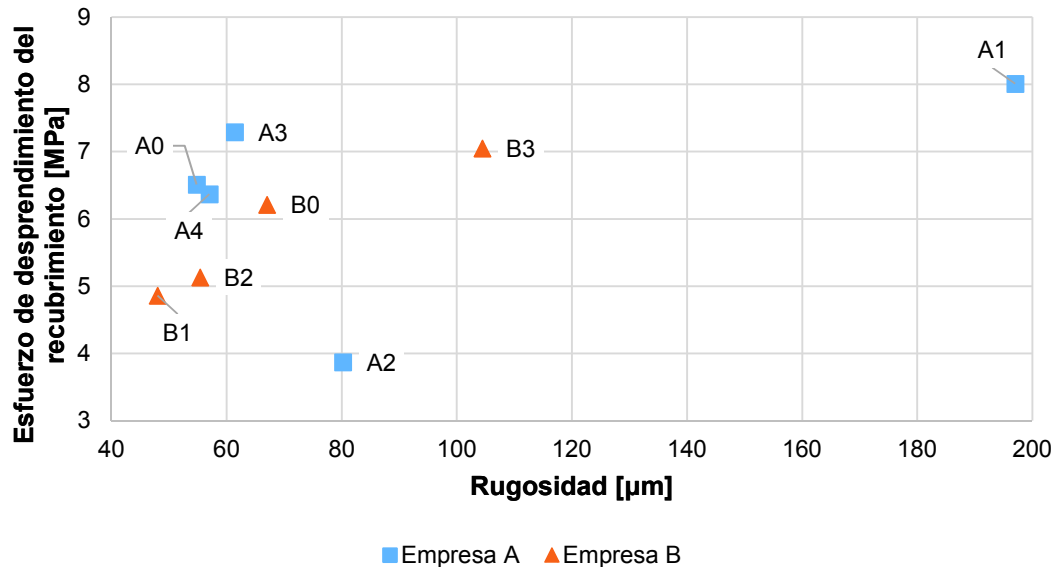


Figura 3.12. Rugosidad vs. Carga de fractura (dispositivo de *Pull-Off*).
(Fuente: Propia)

3.2.11. Análisis de las metalografías del desprendimiento del recubrimiento de zinc causado por el ensayo de *Pull-Off*

Mediante este análisis, se observa el tipo de desprendimiento que se produce al realizar el ensayo de *Pull-Off* sobre el recubrimiento de dos perfiles con el mismo pretratamiento mecánico, el uno galvanizado en la empresa A y el otro galvanizado en la empresa B. Para ello, en base a la Tabla 3.39 se tiene que la probeta correspondiente al lote A1 posee un desprendimiento a lo largo de la parte inferior de la fase *zeta*, lugar por donde existen grietas; además, la fractura va recorriendo a lo largo de los espacios intercristalinos pertenecientes a la fase *zeta*, por lo cual se deduce que esta capa es menos resistente que la unión que posee la fase *delta* con el sustrato metálico. En contraste, los cristales de la fase *zeta* alargados en forma de aguja y de espesor delgado tienen una mayor resistencia a la tracción, de modo que la adhesión de estos cristales supera en gran medida el valor de adhesión entre la fase *delta* y el sustrato metálico; entonces, el desprendimiento se genera en el acero, que resulta de la fluencia y posterior desgarre del material.

A causa de este comportamiento, se analizan los dos posibles tipos de desprendimiento que se pueden presentar, los cuales como se describe en el párrafo anterior, pueden ser de carácter cohesivo en el que se produce una ruptura del recubrimiento; o también puede resultar en un fallo del sustrato metálico en el que este se rompe antes que la interfase sustrato-recubrimiento. Al mismo tiempo, es importante mencionar que en el diseño de una unión sustrato-recubrimiento no se busca bajo ningún concepto que se produzca la falla en el sustrato metálico y en cuyo caso se considera sobredimensionada la zona de unión, pues la calidad adhesiva del recubrimiento será superior a la mecánicamente necesaria (Pardo, 2006). Este concepto es aplicado para evaluar uniones entre un metal y un polímero, pero para el presente estudio permite evaluar el sistema de aleación hierro-zinc obtenido por un proceso de galvanizado por inmersión en caliente. Por consiguiente, en base a esta información se tiene que, si la superficie metálica queda desnuda debido al desprendimiento del recubrimiento y si además esta área es muy grande, la durabilidad y la resistencia a la corrosión del sistema pueden verse afectadas. Mientras que, si la falla ocurre cohesivamente en el recubrimiento, aún existirá una pequeña capa de aleación hierro-zinc que en cierta forma protegerá contra la corrosión al acero, de mejor forma que si el sustrato se encuentra totalmente descubierto. Así también, en el desprendimiento de carácter cohesivo del recubrimiento, el arranque se produce a lo largo de la fase *zeta*, en el cual queda adherido al sistema un remanente de esta capa y por debajo de esta una fase *delta* intacta, lo cual resulta beneficioso ya que como se estudió en capítulos anteriores, esta fase posee un elevado valor de dureza y además tendrá la capacidad de seguir brindando protección contra la corrosión al sustrato metálico.

3.2.12. Resumen de las propiedades químicas, mecánicas y características de la capa de aleación hierro-zinc para diferentes perfiles galvanizados

En la Tabla 3.41 se califican si los recubrimientos de los perfiles galvanizados así como el del sustrato metálico cumplen o no cumplen con los criterios de aceptación de sus respectivas normas. Así también se evalúan los recubrimientos en base a los análisis de las características estudiadas a lo largo del presente estudio. Finalmente, una vez realizado el respectivo análisis en base a la Tabla 3.41, se tiene que el mejor recubrimiento pertenece al perfil de acero estructural con un pretratamiento mecánico de esmerilado, realizado por parte de la empresa A, el cual posee el tercer espesor más grueso de todos los lotes, posee una fase *delta*, *zeta* y *eta* con una dimensión adecuada, es el recubrimiento que posee la mayor dureza, presenta el segundo valor más elevado de adhesividad con un tipo de falla cohesiva en la capa protectora y además posee una superficie suficientemente lisa.

Tabla 3.41. Resumen de la evaluación del sustrato y de los recubrimientos estudiados.

Parámetro	Criterio	Pretratamiento aplicado	Comportamiento de la empresa A			Comportamiento de la empresa B		
			Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo
Químico y mecánico	NTE INEN 2215	Acero ASTM A36	Sí cumple					
Grado del espesor del recubrimiento	ASTM A123	Sin pretratamiento	Sí cumple			No cumple		
		Pulido	Sí cumple			Sí cumple		
		Lijado	Sí cumple			No cumple		
		Esmerilado	Sí cumple			Sí cumple		
		Reducción t. fluxado	Sí cumple					
Espesor de la fase delta	Se prefieren valores cercanos al de referencia	Sin pretratamiento			X			X
		Pulido	X					X
		Lijado	X				X	
		Esmerilado		X				X
		Reducción t. fluxado			X			
Espesor de la fase zeta	Se prefieren espesores gruesos	Sin pretratamiento	X				X	
		Pulido		X			X	
		Lijado		X			X	
		Esmerilado		X		X		
		Reducción t. fluxado		X				
Espesor de la fase eta	Se prefieren valores superiores al de referencia	Sin pretratamiento	X					X
		Pulido		X				X
		Lijado	X				X	
		Esmerilado		X			X	
		Reducción t. fluxado		X				
Dureza	Se prefieren durezas superiores al de referencia	Sin pretratamiento		X			X	
		Pulido		X			X	
		Lijado		X			X	
		Esmerilado	X				X	
		Reducción t. fluxado		X				
Adhesividad	Se prefieren fallas cohesivas del recubrimiento	Sin pretratamiento	X					X
		Pulido	X					X
		Lijado		X			X	
		Esmerilado	X					X
		Reducción t. fluxado	X					
Rugosidad	Se prefieren superficies lisas	Sin pretratamiento		X			X	
		Pulido			X		X	
		Lijado		X			X	
		Esmerilado		X				X
		Reducción t. fluxado		X				

(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El contenido de silicio que poseen los aceros, es un factor muy importante al momento de realizar el proceso de galvanizado, ya que de este depende el espesor de recubrimiento que se vaya a obtener, así como el de sus propiedades.

Los perfiles estructurales de bajo contenido de carbono, sometidos a un tratamiento superficial mecánico de pulido al momento de ser galvanizados obtendrán el mismo espesor de la capa protectora y un valor de dureza similar, tanto para un tiempo de inmersión de 1 minuto 20 segundos, como para uno de 5 minutos. La diferencia radica en el grado de adhesión ocasionado por sus diferentes estructuras cristalinas y además en el nivel de rugosidad presente.

Un recubrimiento obtenido a través de un proceso de galvanizado por inmersión en caliente debe poseer una elevada vida útil (resistencia a la corrosión), tiene que resistir a la abrasión, debe soportar post tratamientos superficiales tales como *sweep blasting* o *hydro blasting*, no puede permitir la acumulación de partículas o sustancias corrosivas en su superficie y tampoco debe desprenderse del sustrato metálico. Por lo tanto en base a estas características, se concluye que el recubrimiento que mejor se ajusta a este requerimiento es el perfil con pretratamiento de esmerilado, galvanizado a 460°C, con un tiempo de inmersión en el zinc fundido de 5 minutos y con una velocidad de enfriamiento moderada.

Obtener espesores excesivamente gruesos no resulta ser tan conveniente, ya que en ocasiones esto significa sacrificar el nivel de adhesión que presenta el recubrimiento con el sustrato metálico. Por esta razón, de acuerdo a la aplicación, se debe seleccionar adecuadamente el espesor de la capa protectora, tal que se tenga una buena adhesión sin tener que sacrificar el tiempo de protección contra la corrosión o su normal desempeño. También es importante tener en cuenta que se cumplan las respectivas normas y además que los costos de producción de las capas protectoras sean bajos.

Tener espesores gruesos de recubrimiento implica tener una fase *zeta* bastante desarrollada. Si a esto se le combinan tiempos de inmersión elevados con tiempos de enfriamientos largos, se tiene que la fase *eta* se irá consumiendo parcialmente, debido a la difusión que producen los cristales de la fase *zeta* sobre el zinc puro de la fase *eta*. Además, esto se traduce directamente en un incremento del valor de rugosidad del recubrimiento.

En general, los cristales de la fase *zeta* son los decisivos en dar las características adhesivas y de dureza al recubrimiento, considerando además que la fase *zeta* es la que ocupa generalmente un mayor espacio en cuanto a la dimensión del espesor total del recubrimiento. Es así, que las propiedades de la capa protectora de aleación hierro-zinc varían en función de sus estructuras cristalinas de la siguiente forma:

- Si la estructura de la fase *zeta* posee cristales en forma de granos pequeños, el recubrimiento presentará una mayor dureza, la cual oscila entre valores de 132 a 180 [HV]; mientras que los cristales con forma de agujas alargadas adquieren durezas que van desde 121 a 128 [HV]. Estos cristales en forma de agujas mientras presenten espesores más delgados, obtendrán mayores valores de dureza.
- Cuando un recubrimiento de aleación de zinc se somete a cargas de tracción perpendiculares a la superficie, lo suficientemente grandes como para desprenderlo, el arranque se producirá de acuerdo al tipo de estructura cristalina que posee la capa de galvanizado, ya que si la fase *zeta* es una aleación, posee granos alargados de gran tamaño, tiene cristales en forma de agujas gruesas o presenta grietas, el desprendimiento ocurrirá entre los espacios intercristalinos; mientras que si la estructura posee granos pequeños o cristales en forma de agujas delgadas, el desprendimiento se producirá en el sustrato de acero, muy cerca de su superficie.

Extrapolando la información anteriormente mencionada, también se puede concluir que tiempos de inmersión pequeños, así como tiempos de enfriamientos rápidos terminan creando recubrimientos con mayor grado de adherencia al sustrato metálico y además con menor dureza.

Los aspectos brillantes de los perfiles galvanizados reflejan valores bajos de rugosidad y una capa de zinc puro, mientras que los perfiles de colores opacos o incluso con colores gris mate manifiestan valores de rugosidad elevados y la presencia de cristales provenientes de la fase *zeta* en la superficie de la capa protectora.

El espesor de la fase *eta* es un factor importante, pues espesores gruesos de esta capa confieren una mayor resistencia frente a la corrosión al sustrato metálico. Además si el perfil galvanizado se somete a un proceso de *sweep blasting*, por ejemplo, se desea que esta capa no sea removida, por lo cual esta fase debe presentar un espesor mayor que el espesor máximo de remoción de material, que en este caso es de 10 μm . Así también, es importante el espesor de la fase *delta*, ya que al ser la capa que mayor dureza presenta,

en caso de que se desprenda el recubrimiento a causa de una falla cohesiva de capa de aleación hierro-zinc, el material que queda adherido al sustrato aún brindará resistencia a la corrosión gracias al remanente de zinc adherido.

La rugosidad del recubrimiento producido es un factor decisivo al momento de ejecutar el ensayo de *Pull-Off*. Por ello la superficie del recubrimiento debe poseer un apropiado perfil de anclaje para que la película de pegamento se adhiera adecuadamente y pueda producir el arranque al momento de ejecutar el ensayo. Adicionalmente, se tiene que los perfiles que poseen difusión de la fase *zeta* hasta la superficie externa se adhieren mejor al pegamento utilizado.

4.2. Recomendaciones

Es necesario elegir adecuadamente los parámetros (tiempos de inmersión y enfriamiento) de galvanizado en función de los resultados que se desean obtener, ya que una apropiada elección permitirá cumplir con los estándares de calidad requeridos y además permitirá reducir costos en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente empleado.

Se recomienda que se eliminen los procesos artesanales y empíricos para realizar el galvanizado por inmersión en caliente, lo cual puede ser reemplazado por el uso de información técnica, manuales o incluso la información presentada en este estudio, dado que define de una forma más adecuada los parámetros decisivos del galvanizado.

Espesores gruesos alargan la vida útil del recubrimiento, pero en contraparte implica mayor fragilidad de la misma, ya que poseen la posibilidad de descascararse y de no soportar cargas; por lo que resulta necesario conocer el desempeño requerido en procesos como *sweep blasting*, el *hydro blasting* (proceso que actualmente reemplaza al *sand blasting*) o en los procesos posteriores como transporte, almacenamiento, ensamble e incluso a lo largo de su vida útil por los que atravesarán los perfiles galvanizados una vez salidos de la empresa, con la finalidad de definir las características requeridas en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente.

Se recomienda emplear aceros con bajo contenido de silicio (>0,035%) o que a su vez se encuentren dentro del rango *Sebisty* (entre 0,15 y 0,22%), ya que pueden ofrecer espesores del recubrimiento adecuados, combinados con buenas propiedades mecánicas, garantizando así que estos no se desprendan fácilmente y que resistan a la abrasión.

Al realizar un pretratamiento superficial mecánico sobre el sustrato metálico, hay que tener en cuenta si el método empleado implica un aumento de rugosidad de la superficie o no, pues los perfiles ya vienen con una determinada rugosidad propia del proceso de laminado en caliente y al momento de pulirlos, por ejemplo, se puede disminuir el valor de rugosidad original, lo cual no resulta conveniente.

No se deben sobredimensionar la adhesión de los recubrimientos de zinc, ya que en caso que se produzca su desprendimiento no es deseable que la falla se genere en el sustrato metálico, pues esto puede disminuir la resistencia a la corrosión y al desgaste del conjunto, por lo tanto se requiere que la falla ocurra a través del mismo recubrimiento.

Para realizar el ensayo de *Pull-Off* en perfiles estructurales galvanizados hay que emplear un adhesivo adecuado, tal como el MasterBond EP15 ND-2, que combina propiedades cohesivas con una adecuada resistencia a la tracción. Dado que la diferencia con otros pegamentos epóxicos o cianocrilatos radica en que solo presentan una de estas dos propiedades y no ambas.

Se recomienda en el ensayo de *Pull-Off* aplicar una velocidad de carga constante durante el ensayo, ya que es un factor decisivo para obtener consistencia en los resultados. Además, para garantizar que los ensayos puedan ser replicados se deben definir adecuadamente los siguientes parámetros: condiciones de uso del adhesivo, preparación superficial del recubrimiento y de la muñeca, y diseño de la muñeca y del equipo empleado.

Referencias Bibliográficas

- American Galvanizers Association. (2016). *Inspección de Productos de Productos de Acero Galvanizado en Caliente*. AGA, Inc.
- Askeland, D., Fullay, P., & Wright, W. (2011). *The science and engineering of materials*. Canadá: Nelson Education.
- ASTM International. (2009). *ASTM D4541-09e1 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. Recuperado de <https://doi.org/10.1520/D4541-09E01>.
- ASTM International. (2012). *ASTM E140-12be1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. Recuperado de: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E140-12be1>.
- ASTM International. (2013). *ASTM A90/A90M-13 Standard Test Method for Weight [Mass] of Coating on Iron and Steel Articles with Zinc or Zinc-Alloy Coatings*. Recuperado de: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A90A90M-13>.
- ASTM International. (2013). *ASTM B487-85(2013) Standard Test Method for Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of Cross Section*. Recuperado de: [http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?B487-85\(2013\)](http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?B487-85(2013)).
- ASTM International. (2015). *ASTM 123/A123M-15 Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products*. Recuperado de: https://doi.org/10.1520/A0123_A0123M-15. Retrieved from https://doi.org/10.1520/A0123_A0123M-15
- ASTM International. (2016). *ASTM A153/A153M-16a Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware*. Recuperado de: https://doi.org/10.1520/A0153_A0153M-16A.
- ASTM International. (2016). *ASTM E8/E8M-16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Recuperado de: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E8E8M-16a>.
- ASTM International. (2017). *ASTM E18-17e1 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Recuperado de: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E18-17e1>.
- ASTM International. (2017). *ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. Recuperado de: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E384-17>.
- Atkins, P. (2006). *Principios de química: los caminos del descubrimiento*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Avner, S. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill.

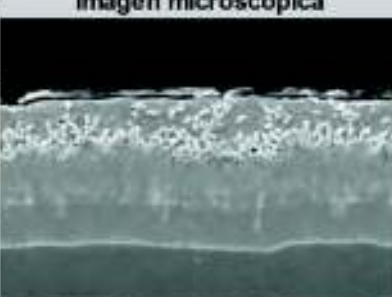
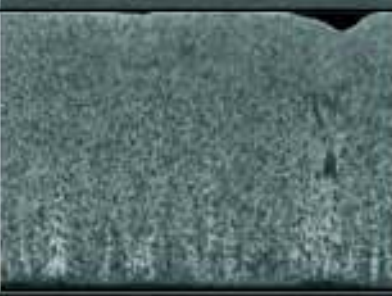
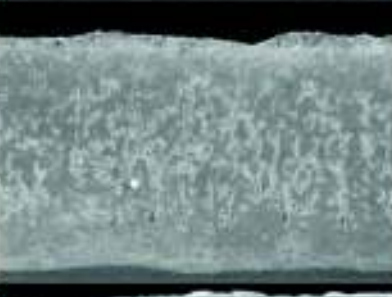
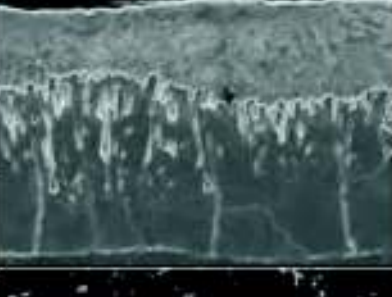
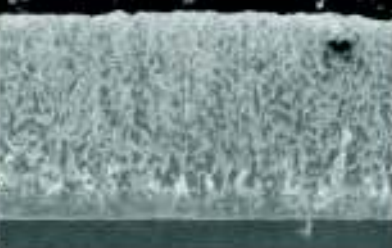
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2007). *Mecánica de Materiales*. Mc Graw Hill.
- BRUKER. (s.f.). *Q2 ION-Analizador de metales Ultra-compacto*. Recuperado de: <https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion/overview.html>.
- California State University Northridge. (2008). *Microindentation Hardness Testing*. Recuperado de: http://www.csun.edu/~bavarian/Courses/MSE%20528/microindentation_hardness_testing.pdf.
- Callister, W. (2007). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté.
- Cervantes, J., Barba, A., Hernández, M., Salas, J., Espinoza, J., Dénova, C., . . . Valdez, R. (2013). *Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono*. Revista Metalúrgica. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia>.
- Cervantes, J., Barba, A., Hernández, M., Salas, J., Espinoza, J., Dénova, C., . . . Valdez, R. (2013). *Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono*. México D.F.: Revista Metalúrgica.
- DeFelsko. (s.f.). *Visual Analysis and Recording of Test Results*. Recuperado de: <http://www.defelsko.com/adhesion-tester/fractures.htm>.
- Departamento de Electrónica y Automática. (2017). *Capítulo 1: Procesamiento Digital de Imágenes*. San Juan: Universidad Nacional de San Juan: Recuperado de: <http://dea.unsj.edu.ar/imagenes/recursos/Capitulo1.pdf>.
- Elcometer. (2015). *Elcometer 224 - Medidor digital de perfil de superficie*. Recuperado de: www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Datasheets/Spanish/224.pdf.
- Elcometer. (2016). *Elcometer 510 - Medidor automático de adherencia*. Recuperado de: <http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Datasheets/Spanish/510.pdf>.
- Elcometer. (2016). *Elcometer 7062 - Preparación superficial-Rugosidad*. Recuperado de: www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Datasheets/English/7062.pdf.
- Falk, D., Gockel, H., Lernet, F., & Schlossorsch, B. (1986). *Metalotecnica fundamental*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Fletcher, J., & Barnes, D. (s.f.). *Pull-off adhesion testing of coatings – Improve your technique*. ElCometer. Recuperado de: http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Pull-Off_Adhesion_Testing_of_Coatings_Improve_Your_Technique.pdf.
- Flórez, M., & Ruiz, J. (s.f.). *Recubrimientos y Tratamientos Superficiales: La Galvanización en Caliente*. Retrieved from Asociación para la Promoción Técnica del Acero: http://www.apta.com.es/pdf/galva_caliente.pdf
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de materiales*. México, D.F.: Cengage Learning.
- Gill, M., & Langill, T. (2005). *The Slip Resistance of Galvanized Surfaces*. American Galvanizers Association.

- Gonzales, J. (1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Madrid: Centro Superior de Investigaciones Científicas, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas .
- Gonzales, R., & Woods, R. (s.f.). *Digital image processing*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- Granja, M., & Poveda, R. (2017). *Caracterización de los Parámetros de Combustión del Equipo TVCC instalado en el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- GYMSA. (s.f.). *Galvanizado Propiedades*. Recuperado de: <http://www.gymsa.cl/galvaproiedades.html>.
- Handa, T., & Takazawa, H. (1998). *Duplex Protection System of Powder Coating and Metal Sprayng on Steel Articles*. Houston: NACE International.
- InColor. (s.f.). *FORCIPOL 2V*. Recuperado de: <http://www.incolorec.com.ec/sitio/productos/50>.
- INEN. (2009). *NTE INEN 2483 Recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero*. Recuperado de <https://archive.org/details/ec.nte.2483.2009>.
- INEN. (2012). *NTE INEN 2215:2012-1R Perfiles de acero laminados en caliente. Requisitos*. Recuperado de: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte1/2215-1R.pdf>.
- INEN. (2013). *NTE INEN 950:2013 Recubrimientos metálicos. Determinación de la adherencia. Métodos de ensayo*. Recuperado de: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/950-1.pdf>.
- INEN. (2016). *NTE INEN 672 Recubrimientos de zinc por inmersión en caliente sobre elementos de sujeción*. Recuperado de: http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/01/nte_inen_672.pdf.
- Instituto de Metales no Ferrosos-ICZ. (s.f.). *Guía para la Galvanización por Inmersión en Caliente*. Recuperado de: <http://www.arquitecturaenacero.org/sites/default/files/adjuntos/guia-de-galvanizacal.pdf>.
- ISO. (2016). *ISO 4624:2016 (en) Paints and varnishes - Pull-off test for adhesion*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4624:ed-3:v1:en>.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México: Pearson Educación.
- Kuklik, V., & Kudlacek, J. (2016). *Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures*. New York: Elsevier.
- Laboratorio de Metalografía. (2010). *Laboratorio de Ciencia de Materiales I: Folleto Guía de Prácticas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Llulluna, F. (2014). *Procesamiento de Imágenes Mediante Software Libre Python Para el Análisis Metalográfico en Aceros de Bajo Contenido de Carbono*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Maaß, P. (2011). Handbook of hot-dip galvanization. John Wiley & Sons.
- Master Bond Inc. (s.f.). *EP15 Technical Data Sheet*. New Jersey.
- Metkon. (2013). *Hardness Testing-Durolite-M/L V/V*. Recuperado de: http://www.metkon.com/en/category_hardness-testing_40.html.
- Nordic Galvanizers. (2017). *Steels suitable for galvanizing*.
- Olympus. (s.f.). *Industrial Microscopes*. Recuperado de: <https://www.olympus-ims.com/en/microscope/gx41/>.
- Pardo, D. (2006). *Propiedades Superficiales y Evaluación De Adherencia Mecánica-Química de Laminados Metal-Polímero*. Universidad Austral de Chile.
- Parvini, N., & Rafiezadeh, E. (2009). *Effect of Aluminium on Microstructure and Thickness of Galvanized Layers on Low Carbon Silicon-Free Steel*. Irán: International Journal of ISSI.
- Rico, Y. (2012). *Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente sobre aceros*. Barquismeto: Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre".
- Rico, Y., & Carrasquero, E. (2017). *Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: una revisión*. INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología.
- Sang Chareon Hot Dip Galvanize Company Limited. (2008). *Hot Dip Galvanized Coating Procedure*.
- Serna, N., & Román, U. (2009). *Técnicas de Segmentación en Procesamiento Digital de Imágenes*. San Marcos: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de: http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/risi/2009_n2/v6n2/a02v6n2.pdf.
- Servicio Científico-técnicos de la UPC. (s.f.). *Espectrómetro para análisis de metales*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <http://www.upc.edu/sct/es/equip/509/espectrometro-analisis-metales.html>.
- Smith, W. C. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Madrid: McGraw-Hill.
- Solem, J. (2012). *Programming Computer Vision with Python*. Creative Commons.
- SPECTRO. (2005). *SPECTROMAXx*. Recuperado de: http://www.upc.edu/sct/es/documents_equipment/d_127_id-509.pdf.
- Valdés, C. (2010). *Galvanizado por difusión sobre aleaciones de cobre y caracterización de los revestimientos obtenidos*. Universidad Autónoma de México.
- Van Eijnsbergen, J. (2012). Duplex systems: hot-dip galvanizing plus painting. Newnes.
- Van Rossum, G. (2009). *El tutorial de Python*. Recuperado de: <http://docs.python.org.ar/tutorial/pdfs/TutorialPython2.pdf>.

Anexos

ANEXO I. Características de las fases presentes en aceros de acuerdo a su contenido de silicio

Contenido de Si	Fases formadas	Características de las fases	Imagen microscópica
Bajo contenido de silicio	Fase δ	Densa y separada del acero por una grieta	
	Fase ζ	Cristales visibles flotan en el exterior de la fase η	
	Fase η	Cinc puro	
	Fase γ	Directamente en el acero y no es visible (se forma tras largos tiempos de galvanizado)	
Rango Sandelin temperaturas entre 430-440°C	Fase ζ	Pequeños cristales de escoria incrustados en la fase η	
	Fase η	Cinc solidificado	
	Fase δ	Fuertemente desarrollada	
Rango Sebisty temperaturas bajo 450 °C		Completamente una aleación	
	Fase δ	Formada esporádicamente	
	Fase ζ	Cristales largos extendidos verticalmente en la superficie del acero	
Rango Sebisty temperaturas entre 450-480°C	Fase δ	Gruesa y compacta	
	Fase ζ	Cristales densamente compactos	
	Fase η	Fase pronunciada	
Alto contenido de silicio	Fase ζ	Cristales grandes y afilados	
	Fase δ	Sus cristales existen cerca del sustrato, estructura suelta y se encuentra mezclada con la fase ζ	

ANEXO II. Códigos de identificación de las probetas obtenidas para los ensayos de adhesión y difusión

Empresa		Tratamiento superficial o variación del proceso			Tipo de ensayo		Número de probeta
Nombre	Código	Nombre	Código		Nombre	Código	
Empresa A	A	Sin tratamiento superficial	0	Separar a través de un guión (-)	Tracción	T	Se denomina con el número respectivo de probeta
		Pulido	1		Composición Química	Q	
		Lijado	2		Metalográfico	M	
Empresa B	B	Esmerilado	3		Decapado	D/	
		Reducción del tiempo de fluxado	4		Dureza	D	
					Pull-Off	P	

ANEXO III. Código fuente del procesamiento digital realizado a las micrografías obtenidas

```
#Se importan las librerías
from PIL import Image, ImageFilter, ImageOps
import cv2
import numpy as np
##Se aplica un filtro "Menos Laplaciano" (enfoco mediante una
convolución kernel)
#Se define el tamaño de la matriz kernel: 3x3
tamaño = (3,3)
#Se escriben los coeficientes del filtro
coeficientes = [0, -1, 0, -1, 5, -1, 0, -1, 0]
#Se ingresa el factor de escalado para el filtro kernel
factor = 0.95
#Se crea la iteración la edición automática de todas las imágenes
for i in [0, 1]:
    if i == 0:
        m = 'A'
    else:
        m = 'B'
    for j in range(0, 5):
        #Se abre la imagen en escala de grises
        img = cv2.imread('C:/Users/Usuario/Desktop/Filtro/' + m + repr(j)
+ '-M1_500X.jpg', 0)
        #Se crea objeto CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram
Equalization)
        clahe = cv2.createCLAHE(clipLimit=2.0, tileGridSize=(8,8))
        cl1 = clahe.apply(img)
        #Se guarda la imagen resultante hasta este punto
        cv2.imwrite('C:/Users/Usuario/Desktop/Filtro/Clahe/' + m +
repr(j) + '-M1_500X_clahe.jpg', cl1)
        #Se abre la imagen deseada
        imagen_original =
Image.open('C:/Users/Usuario/Desktop/Filtro/Clahe/' + m + repr(j) + '-
M1_500X_clahe.jpg')
        #Se procesa la imagen y se le aplica el filtro respectivo para
mejorar el enfoque
        imagen_01 = imagen_original.filter(ImageFilter.Kernel(tamaño,
coeficientes, factor))
        imagen_procesada = imagen_01.filter(ImageFilter.Kernel(tamaño,
coeficientes, factor))
        #Se colorea la imagen con un tono celeste y negro
        coloriza = ImageOps.colorize(imagen_procesada, (0, 0, 0), (175,
200, 250))
        #Se graba el resultado final
        coloriza.save('C:/Users/Usuario/Desktop/Filtro/' + m + repr(j) +
'-M1_500X_edit.jpg')
```

ANEXO IV. Código fuente del procesamiento digital realizado a las macrografías obtenidas en el ensayo de *Pull-Off* para determinar el porcentaje de desprendimiento del recubrimiento

```
#Se importan las librerías
import numpy as np
import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
#Datos a modificar para obtener los resultados deseados:
Radio_min = 320 #RADIO MINIMO DE LA CIRCUNFERENCIA A DETECTAR
Radio_max = 380 #RADIO MAXIMO DE LA CIRCUNFERENCIA A DETECTAR
Nombre_Imagen = 'A3-P4' #CODIFICACION DE LA PROBETA ANALIZADA
#Se importa la imagen de la probeta respectiva
img0 = cv2.imread('C:/Users/Usuario/Desktop/PRUEBA
AREAS/'+Nombre_Imagen+'.png', cv2.IMREAD_COLOR)
#Se escala el tamaño de la imagen, tal que tenga un ancho de 1000 pixeles
ancho = 1000
r = ancho/img0.shape[1]
img = cv2.resize(img0, None, fx=r, fy=r, interpolation=cv2.INTER_AREA)
#Se transforma la imagen a monocromática
img2gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
img_blur = cv2.medianBlur(img2gray, 15)
#Se emplea el método de Hough para detectar la marca circular en la
probeta
Radius_delta = 10
circles = cv2.HoughCircles(img2gray, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1, ancho/1,
param1 = 50, param2 = 30, minRadius = Radio_min, maxRadius = Radio_max)
circles = np.uint16(np.around(circles))
#Se aplica una máscara para eliminar los pixeles externos a la
circunferencia detectada
mask_circle = cv2.inRange(img2gray, 0, 0)
for i in circles [0,:]:
    cv2.circle(mask_circle, (i[0], i[1]), i[2] - Radius_delta, (255, 255,
255), -1)
#Se aplica la máscara a la imagen original (se obtiene solo la
información deseada)
img_circle0 = cv2.bitwise_and(img, img, mask=mask_circle)
#Se recorta la imagen
y0 = i[0] - (i[2] - Radius_delta)
x0 = i[1] - (i[2] - Radius_delta)
y1 = i[0] + (i[2] - Radius_delta)
x1 = i[1] + (i[2] - Radius_delta)
img_circle = img_circle0[x0:x1, y0:y1]
#SE REALIZA EL ANALISIS EN BASE A COLORES
#Se establecen límites para reconocer la zona de desprendimiento (sección
amarilla)
lower_1 = np.array([28,1,150])
upper_1 = np.array([32,255,250])
#Se convierte la imagen a modelo HSV (tonalidad, saturación brillo)
res2HSV = cv2.cvtColor(img_circle, cv2.COLOR_BGR2HSV)
res2HSVz1 = cv2.cvtColor(img_circle, cv2.COLOR_BGR2HSV)
#Se crean máscaras en el intervalo anterior para detectar la zona de
desprendimiento
(h, w) = res2HSV.shape[:2]
medio = np.uint16(np.around(w/2))
z9 = cv2.inRange(res2HSV, lower_1, upper_1)
cv2.rectangle(res2HSVz1, (medio,0), (w, h), (0, 0, 0), -1)
```

```

#Se aplican filtros para eliminar pixeles innecesarios
kernel = np.ones((3,3),np.uint16)
transformacion = cv2.morphologyEx(z9, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
z10 = cv2.morphologyEx(transformacion, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)
#Se transforman y aplican las máscaras en formato RGB
res2RGB = cv2.cvtColor(img_circle, cv2.COLOR_BGR2RGB)
z1 = cv2.bitwise_and(res2RGB, res2RGB, mask=z10)
#Se cuentan el número de pixeles que conforman el área desprendida
pxl_zonalc = cv2.countNonZero(z10)-174 #Corresponde al número de pixeles
de la regla de referencia del microscopio
pxl_circle = cv2.countNonZero(mask_circle)
#Se obtiene el porcentaje de desprendimiento
p_dsp = ("{0:.2f}".format(pxl_zonalc*100/pxl_circle))
#SE MUESTRAN LOS RESULTADOS OBTENIDOS
fig0 = cv2.imread('C:/Users/Usuario/Desktop/PRUEBA
AREAS/'+Nombre_Imagen+'.jpg', cv2.IMREAD_COLOR)
fig = plt.figure(0)
fig.canvas.set_window_title('Porcentaje de desprendimiento en el ensayo
de Pull-Off de la probeta '+Nombre_Imagen)
plt.subplot(1,3,1)
plt.imshow(fig0, cmap = plt.cm.gray)
plt.axis('off')
plt.title('Probeta: '+Nombre_Imagen)
plt.subplot(1,3,2)
plt.imshow(z10, cmap = plt.cm.gray)
plt.axis('off')
plt.title('Imagen Procesada')
plt.subplot(1,3,3)
plt.imshow(res2RGB, cmap = plt.cm.gray)
plt.axis('off')
plt.title(p_dsp+'% desprendido')
plt.show()

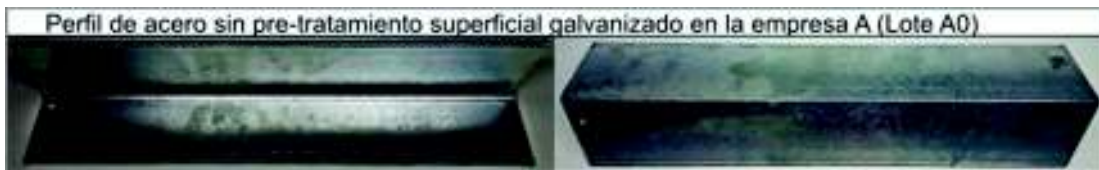
```

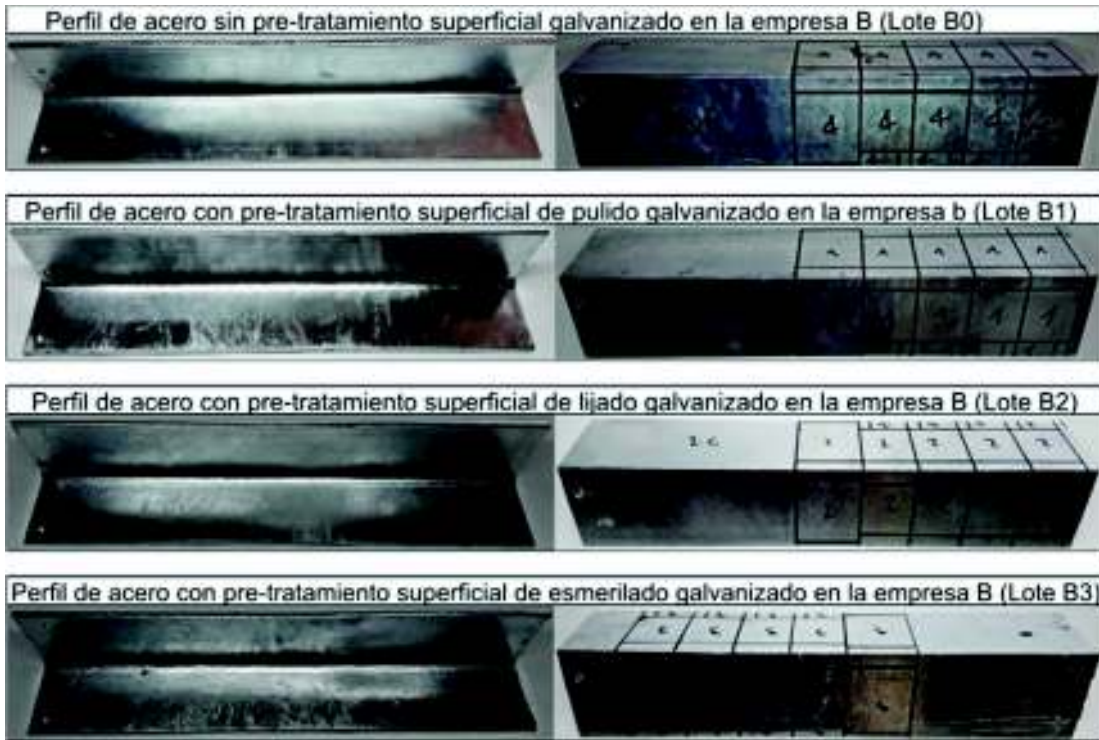
Fuente: Granja & Poveda, 2017

ANEXO V. Formato para el reporte del ensayo de *Pull-Off*

REPORTE DEL ENSAYO DE PULL-OFF			
Referencia de la metodología empleada:			
Información general		Identificación de la probeta	
Lugar:	Código de identificación:		
Fecha:	Dimensiones	Ancho:	
Responsables:		Largo:	
		Espesor:	
Identificación del sustrato			
Material:	Referencia o especificación que		
Tipo de sustrato:	proporcione información del sustrato:		
Denominación:	Observaciones:		
Identificación y aplicación del recubrimiento			
Material:	Secado del recubrimiento	Tiempo:	
Espesor del recubrimiento [µm]		Temperatura:	
Método de medición del recubrimiento:	Observaciones:		
Preparación superficial del sustrato:			
Aplicación del recubrimiento:			
Recubrimiento aplicado por:			
Acerca de las muñecas			
Dimensiones	Diámetro de la cabeza:		Material:
	Espesor de la cabeza:		Observaciones:
	Longitud total de la muñeca:		
Identificación y aplicación del adhesivo			
Tipo de adhesivo:		Tiempo de curado:	
Marca del adhesivo:		Temperatura de curado:	
Resistencia a la tracción:		Observaciones:	
Preparación superficial del recubrimiento:			
Acerca del dispositivo de corte			
Tipo:			
Acerca del ensayo			
Máquina empleada para la realización del ensayo:		Observaciones:	
Resultados obtenidos			
Esfuerzo de la fractura		Tipo de fractura	Observaciones
Medición 1	[MPa]	Medición 1	
Medición 2	[MPa]	Medición 2	
Medición 3	[MPa]	Medición 3	
Medición 4	[MPa]	Medición 4	
Medición 5	[MPa]	Medición 5	
Análisis estadístico de los resultados obtenidos			
Media	[MPa]		

ANEXO VI. Obtención de probetas y ejecución de los ensayos





ANEXO VII. Informe técnico del ensayo de tracción



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – NOV.17.12.0

Quito, 14 de noviembre de 2017

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Carlos Díaz

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de acero pertenecientes al Sr. Juan José Chico Chamorro para el proyecto de titulación "CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE ADHERENCIA Y DIFUSIÓN DE LA CAPA DE ALEACIÓN Fe-Zn PARA PERFILES GALVANIZADOS DE ACERO ESTRUCTURAL DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas de acero para ensayo de tracción.

2. **ENSAYO DE TRACCIÓN**

En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizado a las probetas de acero.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción realizado a las muestras de material base.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	N	lbf	MPa	ksi	MPa	ksi	
T-1	12,63	5,74	35.052	7.880	370,9	53,8	483,5	70,1	36,4
T-2	12,61	5,7	35.119	7.895	374,4	54,3	488,6	70,9	*

* La probeta T-2 no se puede determinar la elongación debido a que falla fuera de las marcas establecidas.



Página 1 de 3

En el anexo se presenta la curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T-1.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES, S.A.



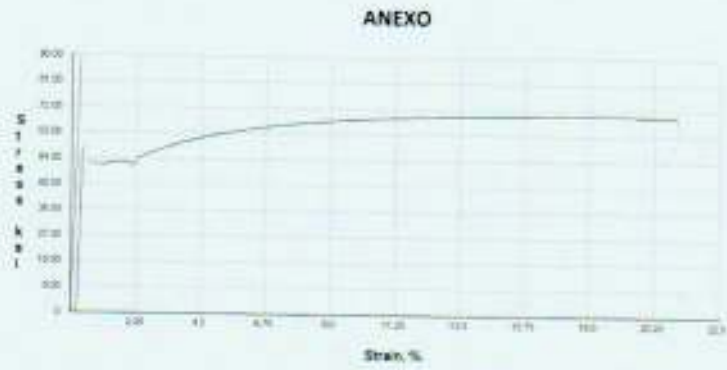


Figura 1. Curva de esfuerzo vs. deformación de la probeta T-1



ANEXO VIII. Informe técnico del análisis de composición química



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Msc. Carlos Wime Díaz Campoverde

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 09 de noviembre del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en probeta de acero, solicitado por el Ing. Carlos Wime Díaz Msc.

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de placa suelta.

Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar la respectiva composición química en la muestra.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta
Probeta de acero	P1: M 1





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 DEPARTAMENTO DE MATERIALES
 LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

Elemento	Muestra
	P1
Elemento	Valor [%]
Carbono [C]	0.094
Silicio [Si]	0.172
Manganeso [Mn]	0.624
Fosforo [P]	0.017
Azufre [S]	0.012
Cromo [Cr]	0.09
Molibdeno [Mo]	0.0063
Níquel [Ni]	0.151
Cobre [Cu]	0.207
Aluminio [Al]	0.0034
Cobalto [Co]	0.0094
Niobio [Nb]	<0.005
Titanio [Ti]	<0.002
Vanadio [V]	<0.003
Wolframio [W]	<0.02
Boro [B]	0.0013
Estaño [Sn]	0.01
Hierro [Fe]	98.6
Magnesio [Mg]	0

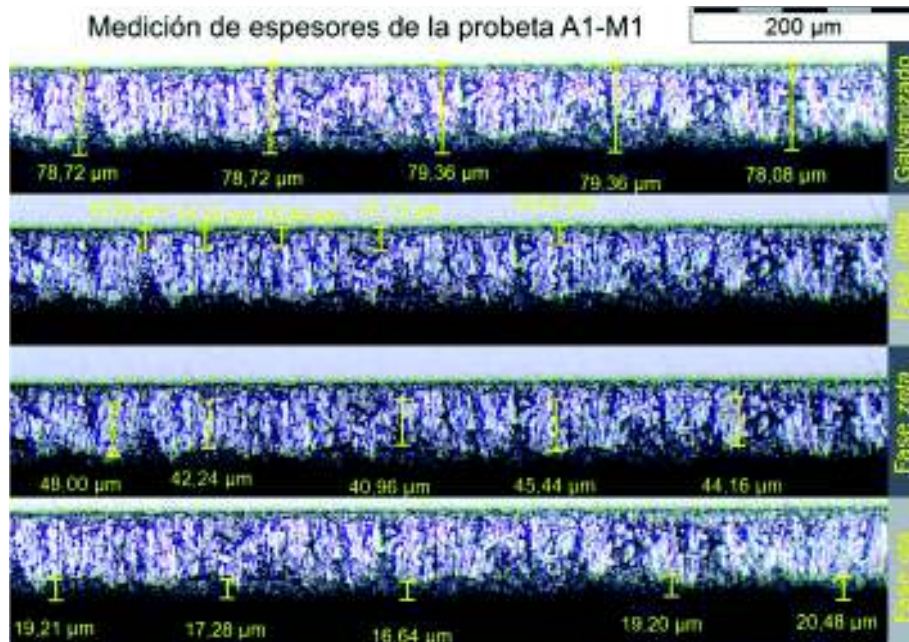
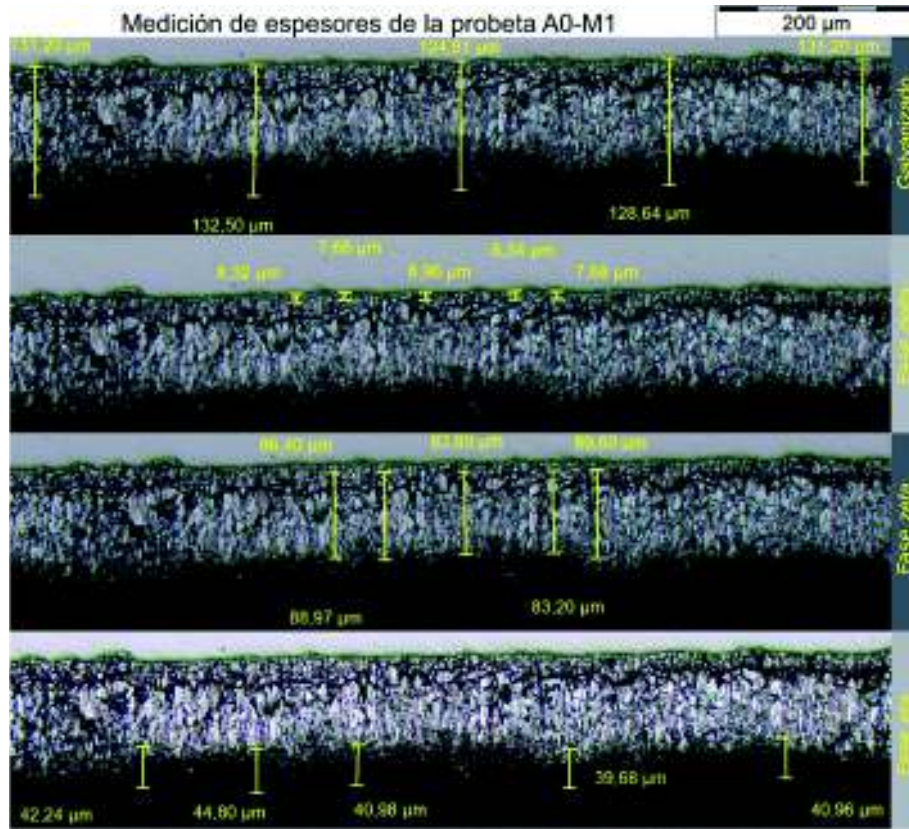
Ing. Luis Gustavo Huilca

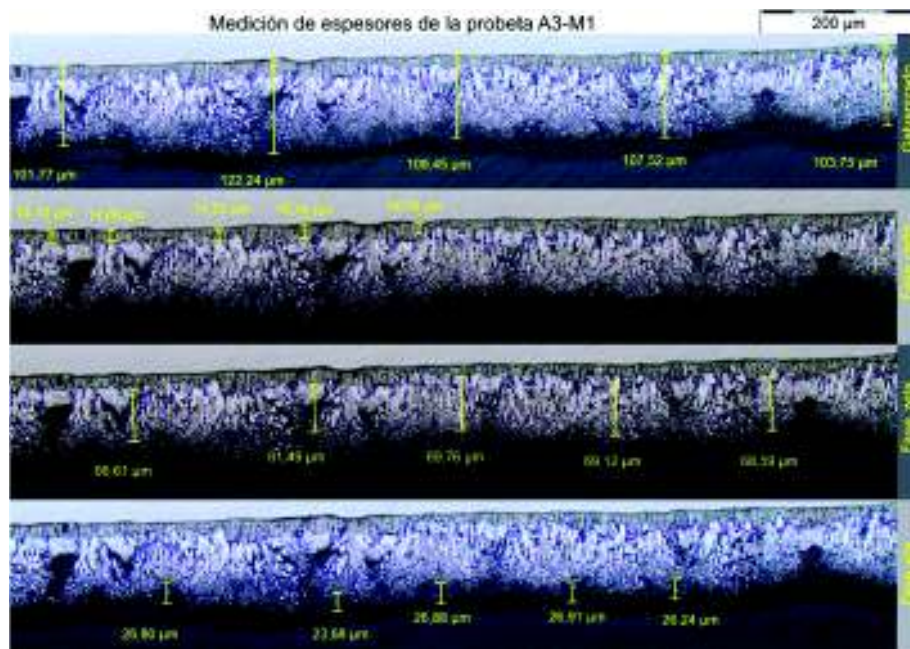
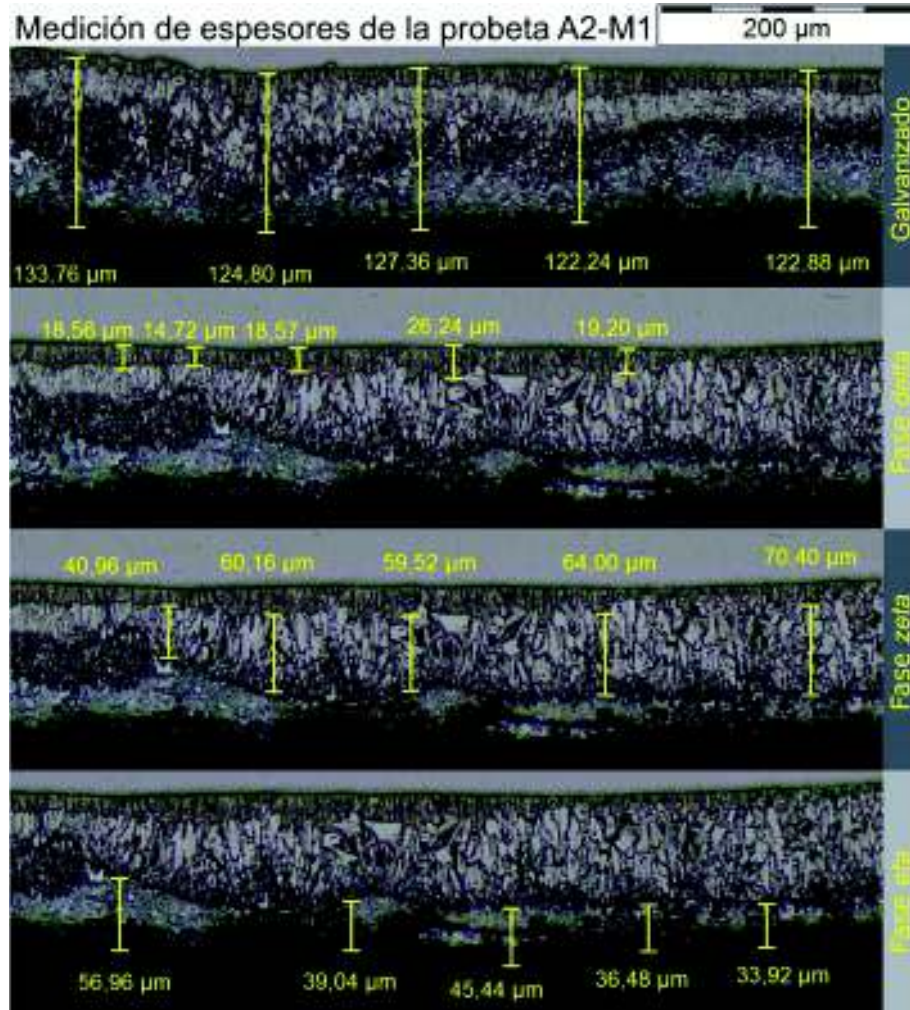
Técnico Responsable

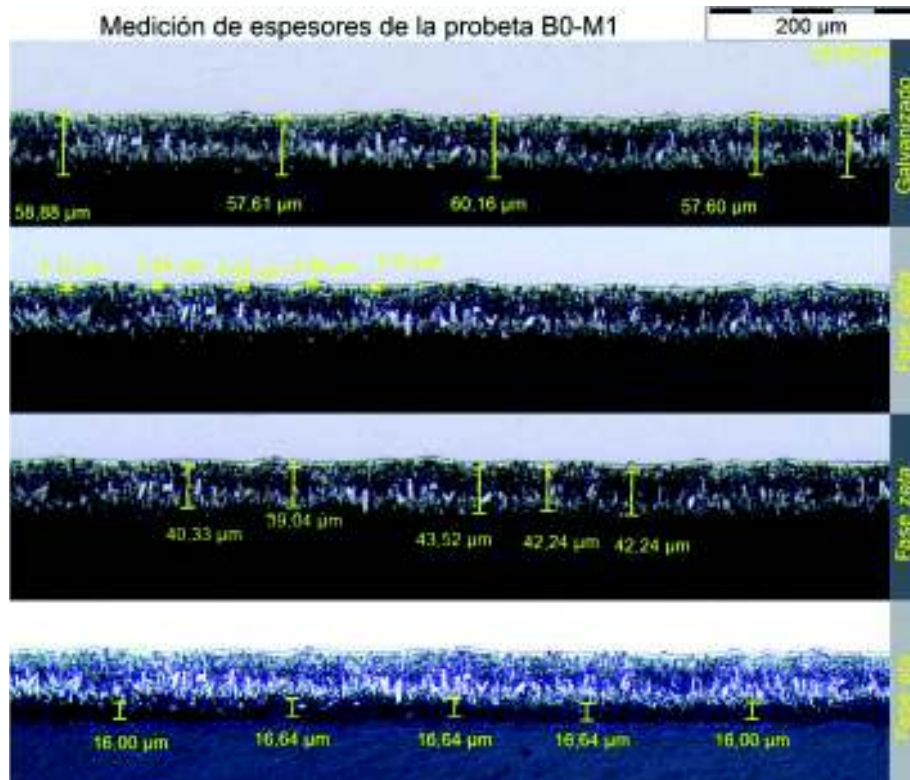
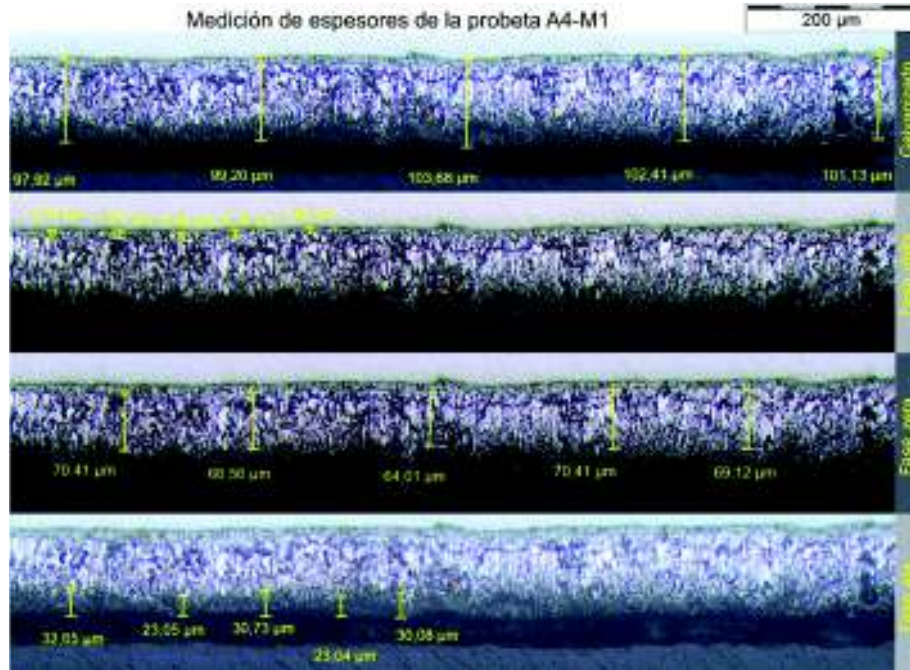
Ing. Oscar Sotomayor

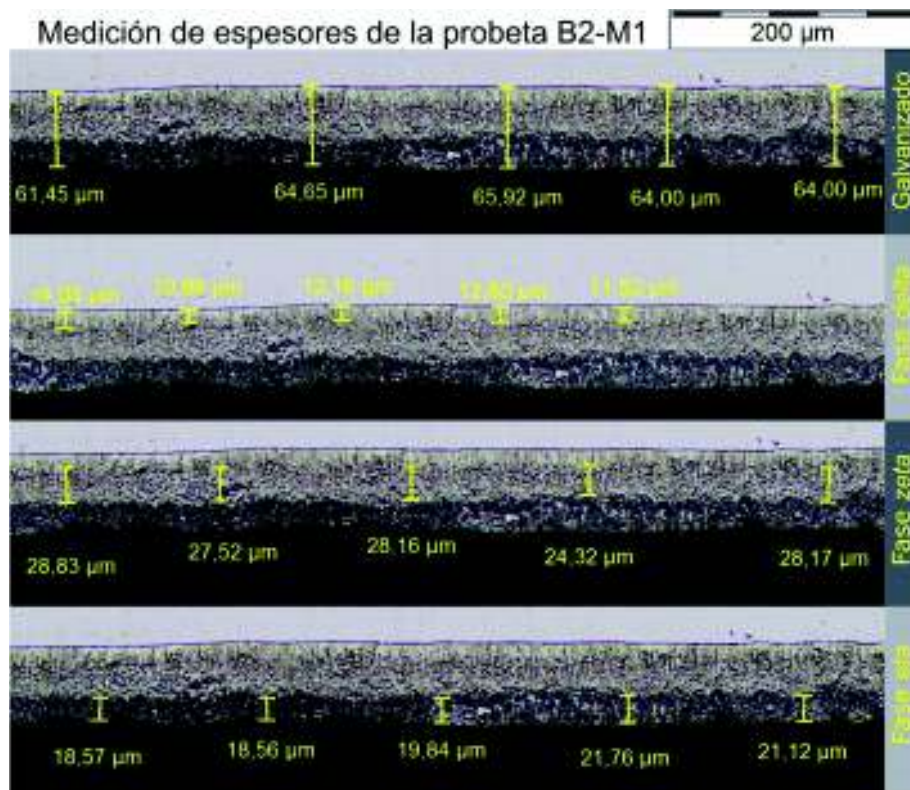
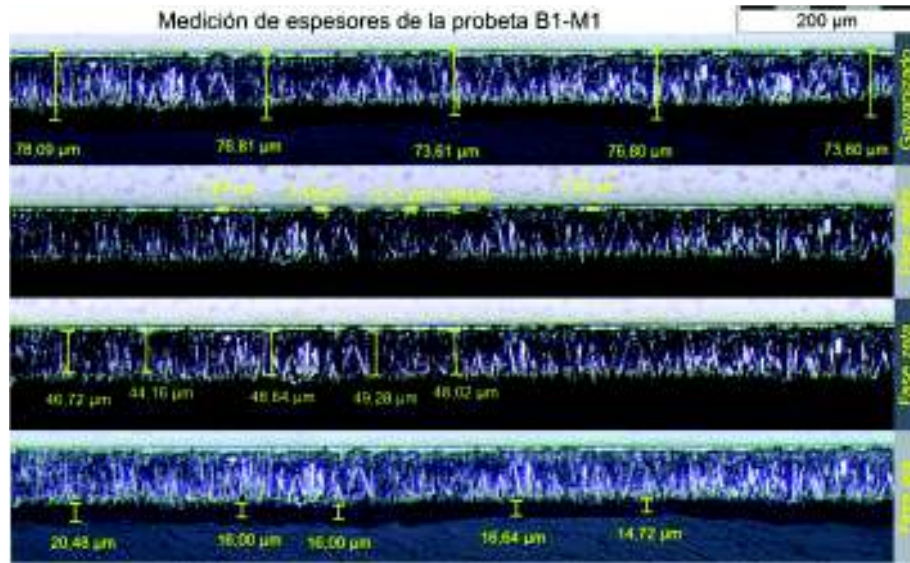
Jefe del Laboratorio de Fundición.

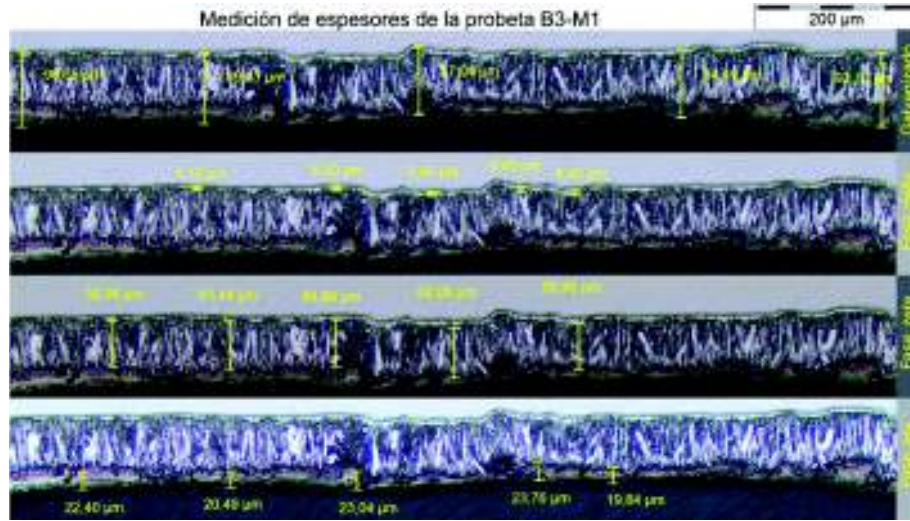
ANEXO IX. Medición del espesor de las fases y de la capa de aleación hierro-zinc para cada tipo de muestra











ANEXO X. Ensayo de dureza de la capa de recubrimiento de zinc mediante micro-indentación

Ensayo de micro-indentación de la probeta A0-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta A1-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta A2-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta A3-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta A4-M1 (400x)



*No existe registro del ensayo de micro-indentación de la probeta B0-M1

Ensayo de micro-indentación de la probeta B1-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta B2-M1 (400x)



Ensayo de micro-indentación de la probeta B3-M1 (400x)



ANEXO XI. Informe técnico del ensayo de *Pull-Off*



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – ENE.18.09.0

Quito, 10 de enero de 2018.

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Carlos Wime Díaz Campoverde

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en perfiles galvanizados de acero pertenecientes al Sr. JUAN JOSE CHICO CHAMORRO para el proyecto de titulación "CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE ADHERENCIA Y DIFUSIÓN DE LA CAPA DE ALEACIÓN Fe-Zn PARA PERFILES GALVANIZADOS DE ACERO ESTRUCTURAL DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRA:** Cuarenta y cinco (45) muestras de perfiles galvanizados de acero para ensayo de carga.

2. ENSAYO DE CARGA

En la tabla 1 se presenta los resultados del ensayo de carga realizado.

Tabla 1. Resultados del ensayo de carga.

Id.	Carga máxima registrado	
	lbf	N
A0-P1	477	2.120
A0-P2	431	1.919
A0-P3	447	1.987
A0-P4	416	1.851
A0-P5	528	2.350
A1-P1	733	3.260
A1-P2	435	1.934
A1-P3	609	2.710
A1-P4	376	1.673
A1-P5	674	3.000



LAEV-EPN



Página 1 de 2

Continuación Tabla 1.		
A2-P1	263	1.168
A2-P2	472	2.100
A2-P3	490	2.180
A2-P4	284	1.264
A3-P1	713	3.170
A3-P2	250	1.110
A3-P3	429	1.910
A3-P4	710	3.160
A3-P5	387	1.722
A4-P1	596	2.650
A4-P2	401	1.782
A4-P3	358	1.591
A4-P4	513	2.280
A5-P5	382	1.698
B0-P1	405	1.800
B0-P2	263	1.168
B0-P3	481	2.140
B0-P4	605	2.690
B0-P5	217	967
B1-P1	253	1.124
B1-P2	459	2.040
B1-P3	515	2.290
B1-P4	94	416
B1-P5	305	1.355
B2-P2	463	2.060
B2-P3	190	845
B2-P4	433	1.928
B2-P5	201	892
B3-P1	335	1.488
B3-P2	665	2.960
B3-P3	517	2.300
B3-P4	560	2.490
B3-P5	423	1.882

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. María Gracia, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ANEXO XII. Obtención de los porcentajes de desprendimiento de las probetas sometidas al ensayo de *Pull-Off*

Porcentaje de desprendimiento de la probeta A0-P4



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A0-P5



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P1



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P2



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P3



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P4



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P5



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A2-P1



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A3-P1



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A3-P4



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A1-P0



Porcentaje de desprendimiento de la probeta A3-P0

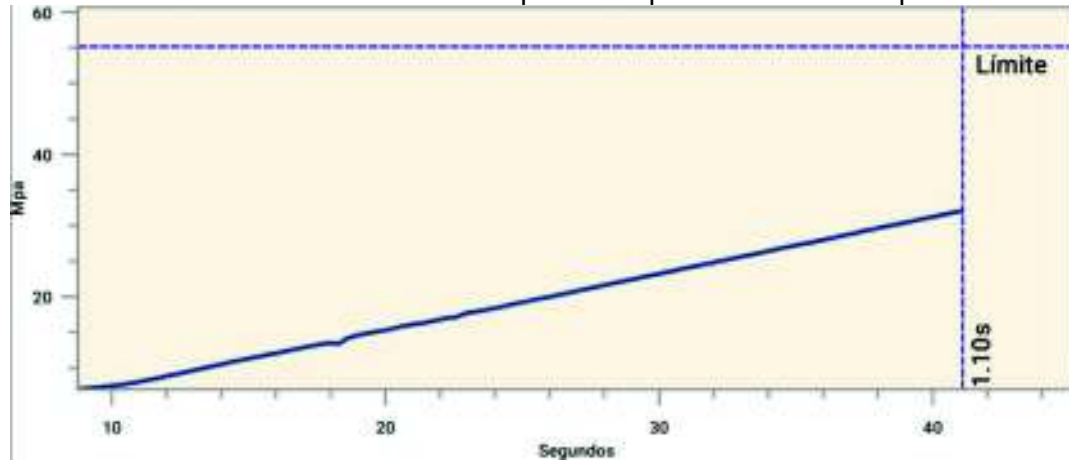


Porcentaje de desprendimiento de la probeta B1-P0

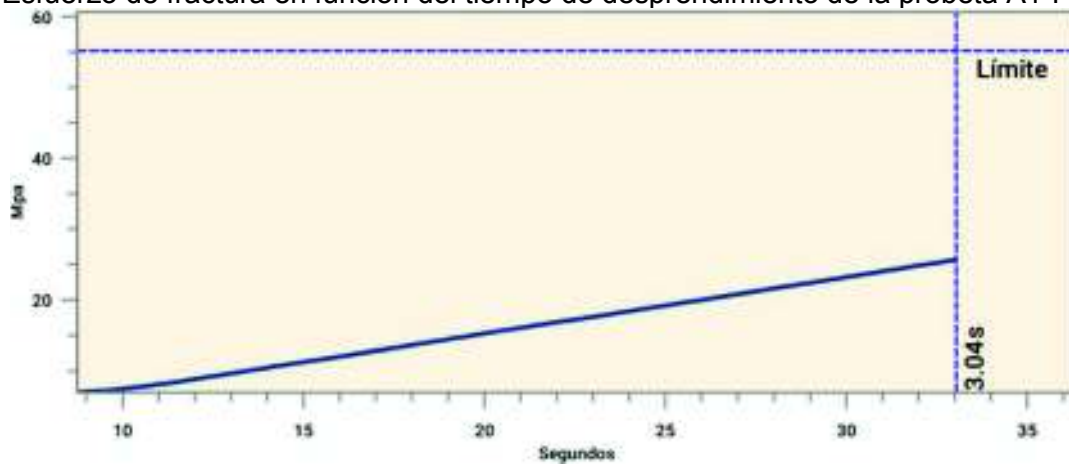


ANEXO XIII. Gráficas esfuerzo de fractura en función del tiempo

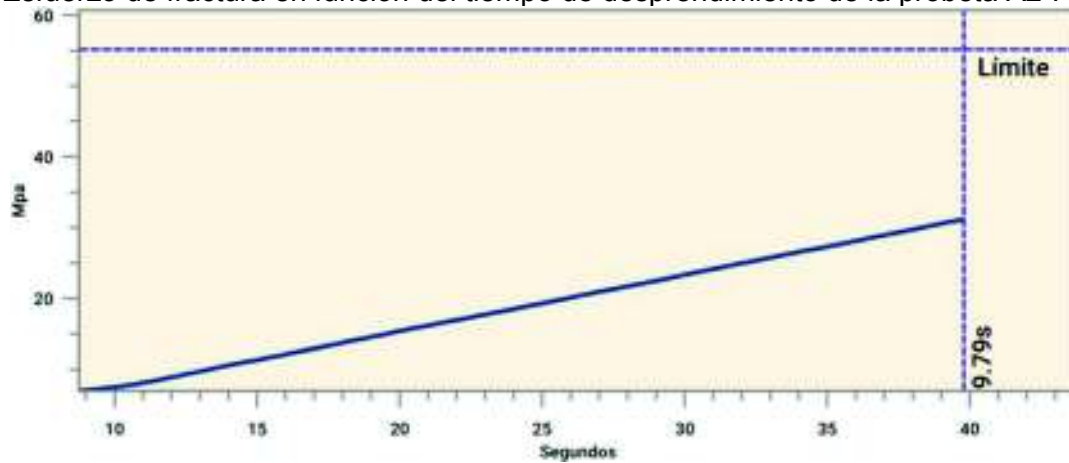
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta A0-P0



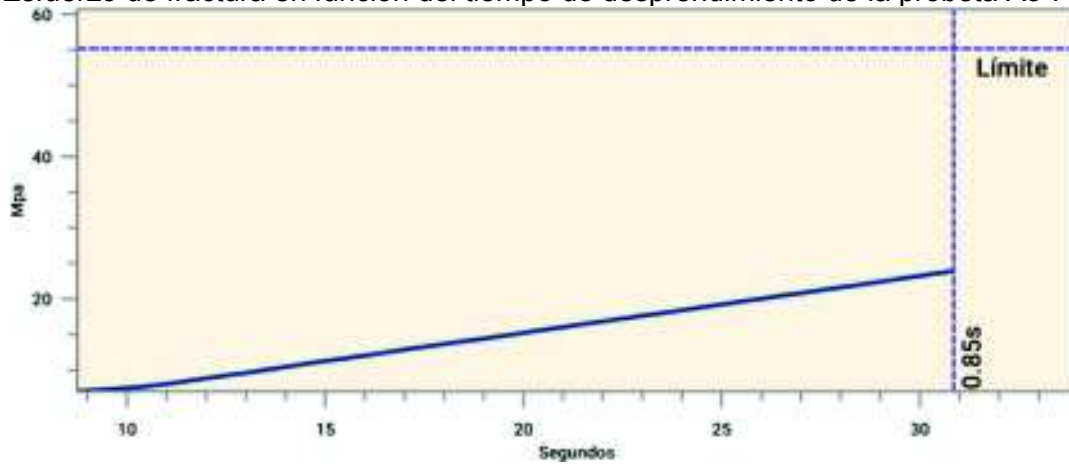
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta A1-P0



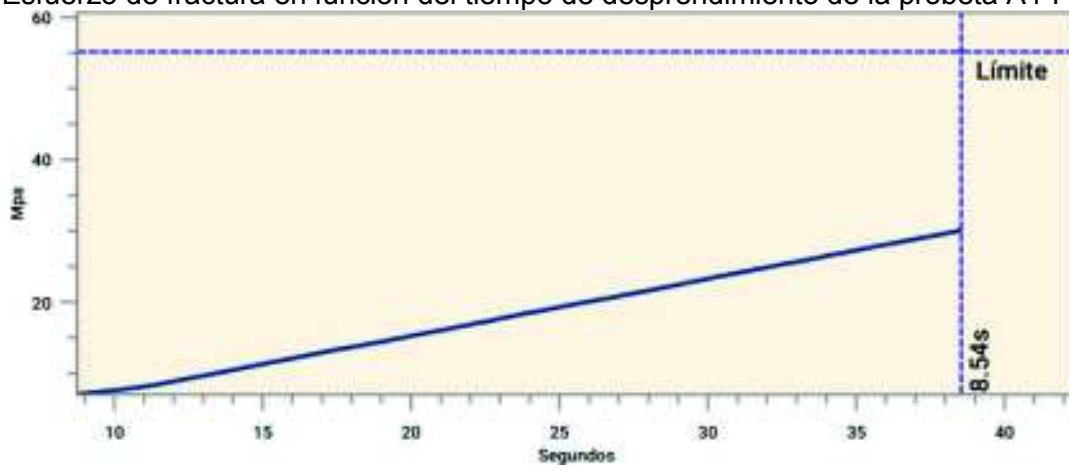
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta A2-P0



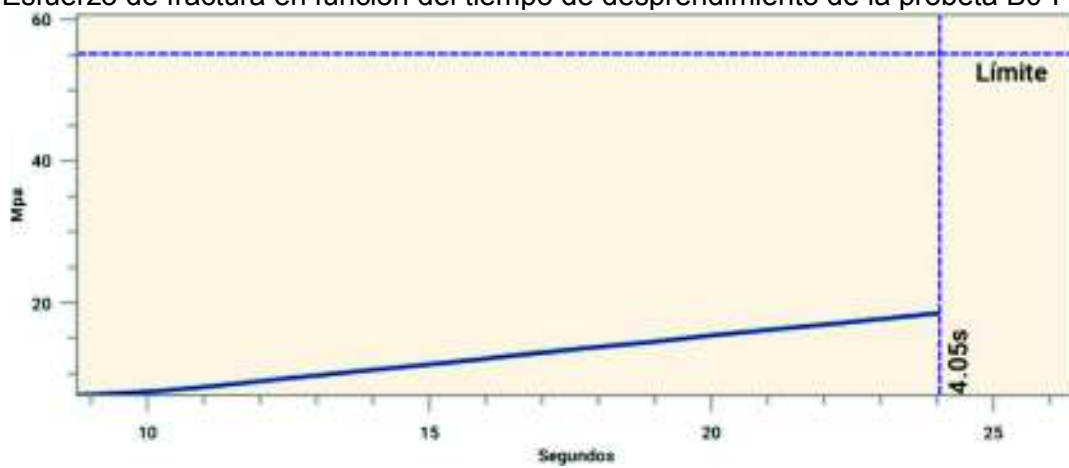
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta A3-P0



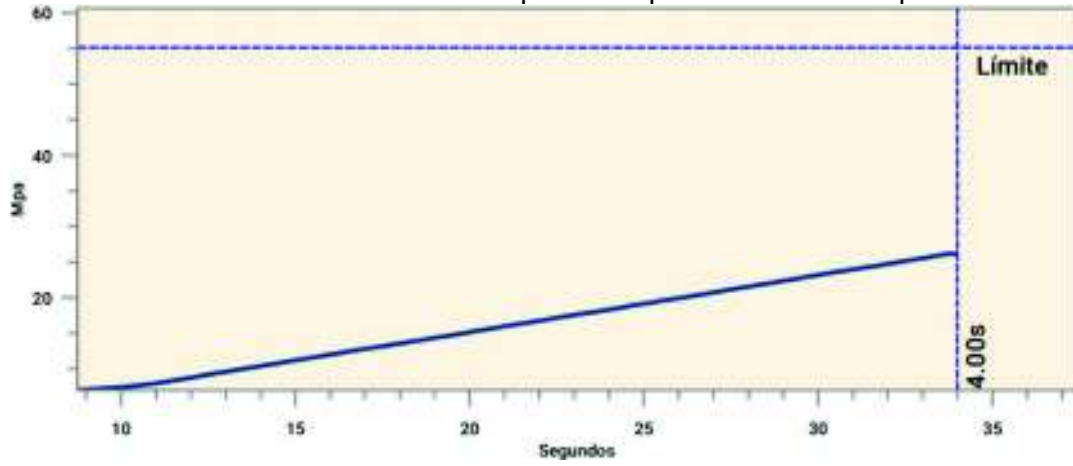
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta A4-P0



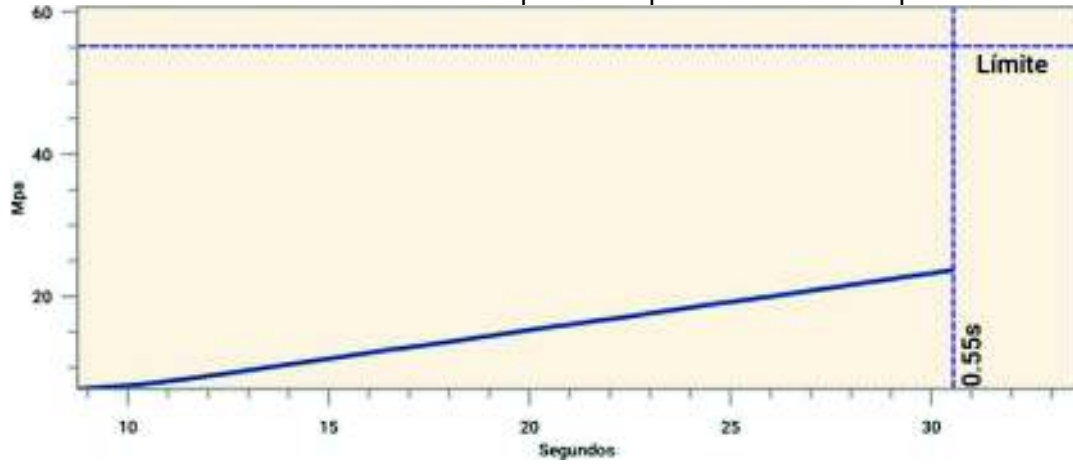
Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta B0-P0



Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta B1-P0



Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta B2-P0



Esfuerzo de fractura en función del tiempo de desprendimiento de la probeta B3-P0

