



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Química

“Determinación y análisis de variables críticas en el proceso de galvanizado de la tubería de acero a escala de laboratorio para su posterior optimización en planta”

Trabajo de titulación previo a
la obtención del Título de
Ingeniero Químico.

AUTORES:

Felipe Leonardo Acero Mainato
C.I.:010713681-4
e-mail: felipe.acero655@gmail.com
Karla Margoth Romoleroux Urgilez
C.I.:010538981-1
e-mail: kromoleroux92@gmail.com

DIRECTORA:

Ing. María Eulalia Vanegas Peña. PhD
C.I.:010316811-8

Cuenca-Ecuador
21 de octubre del 2020



RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar las variables críticas para controlar de manera efectiva la preparación de la superficie de la tubería de acero en la empresa TUGALT S.A. y proponer una composición química que permita la reducción de espesor de capa. Para ello se realizó una evaluación actual de la planta obteniendo información sobre sus parámetros, evaluados mediante cartas de control en un periodo de siete semanas.

El trabajo se realizó a escala de laboratorio con probetas de acero (especificación JIS G3132 SPTH 1) para manipular las variables en cada etapa del proceso (desengrasado, decapado, fluxado y galvanizado o zincado): pH, concentración de las soluciones empleadas en los baños, temperatura, tiempos de inmersión y el rango de trabajo óptimo para obtener una tubería de mayor calidad.

Para la etapa de zincado se trabajó a una temperatura de $450 \pm 1^\circ\text{C}$ por un tiempo de inmersión de las probetas de 2,4,6 minutos, manteniendo la composición de zinc en 98.5% P/P constante, variando la composición de aluminio, bismuto, estaño y níquel en el rango de 0-1.5 % en peso del sistema "Zn-Al-Bi-Sn-Ni", que fue dosificado por diseño experimental, para favorecer el escurrido y reducir el espesor de la probeta, disminuir la ingesta de zinc y evitar grumos.

Los recubrimientos obtenidos se examinaron a través de: mediciones de espesor de capa, análisis metalográfico utilizando microscopio invertido, prueba de corrosión en la cámara de niebla salina y adherencia de método cruzado; determinando que el experimento 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min) cumple con las especificaciones establecidas, proporciona un mejor acabado (formación de cristales) que hace que el producto sea visualmente aceptado, con un espesor de capa de $79,233\mu\text{m}$ y formación de las cuatro capas definidas (alfa, beta, gama y delta) que influyen en la corrosión y un acabado perfectamente liso.

PALABRAS CLAVES: Aleación Zn-Ni-Al-Bi-Sn. Galvanizado. Espesor de capa, Análisis metalográfico. Cámara de niebla salina.



ABSTRACT

The objective of this work is to determine the critical variable to effectively control the preparation of the surface of the steel pipeline in the company TUGALT S.A. and propose a chemical composition that allows optimization in the zinc bath process (zinc plating process). For this, a current evaluation of the plant was carried out, obtaining information on its parameters, evaluated by means of control letters over a period of seven weeks.

The work was carried out on a laboratory scale with steel cylinder samples (JIS G3132 SPTH 1 specification) to manipulate the variables at each stage of the process (degreased, pickling, fluxing, and zinc plated): pH, concentration of the solutions used in the baths, temperature, immersion times and the optional working range to obtain a higher quality pipeline.

For the zinc plated stage, work was carried out at a temperature of $450\pm 1^{\circ}\text{C}$ for an immersion time of the steel cylinder samples of 2, 4, 6 minutes, keeping the zinc composition at 98,5% W/W constant, varying the aluminum, bismuth, tin and nickel composition in the range of 0-1,5% by weight of the "Zn-Al-Bi-Sn-Ni" system, which was dosed by experimental design, to favor drainage and reduce the thickness of the steel cylinder samples, decrease zinc intake and avoid lumps.

The coatings obtained were examined by means of: layer thickness measurements, metallographic analysis using an inverted microscope, salt spray chamber corrosion test and cross-method adherence; determining that experiment 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2minutes) meets the established specifications, provides a better finish (crystal formation) that makes the product visually accepted, with a layer thickness of $79,233\ \mu\text{m}$ and formation of the four defined layers (alpha, beta, gamma and delta) that influence corrosion and a perfectly smooth finish.

KEY WORDS: Zn- Ni-Al-Bi-Sn alloy. Zinc plating. Layer thickness. Metallographic analysis. Salt spray chamber.



Tabla de contenido

CAPITULO I	18
1. Generalidades.....	18
1.1 Introducción	18
1.2 Historia y descripción del estado actual de la empresa	18
1.3 Estado actual de la empresa TUGALT S.A. en relación a la producción de piezas galvanizadas	20
1.3.1 Preparación de la superficie o acondicionamiento.....	20
1.3.2 Galvanizado de la pieza	23
1.4 Planteamiento del problema.....	24
1.5 Justificación	25
1.6 Objetivos.....	25
Objetivos Generales	25
Objetivos Específicos	25
CAPITULO II	26
2. Marco teórico	26
2.1 Acero	26
2.1.1 Corrosión del acero.....	26
2.2 Propiedades del Zn	27
2.3 Técnicas de galvanizado.....	30
2.4 Galvanizado en discontinuo por inmersión en caliente.....	32
2.5 Etapas del proceso de galvanizado en caliente.....	33
2.5.1 Preparación de la Superficie	33
2.5.2 Zincado	41
2.6 Composición química de los baños de zincado.....	43
2.7 Propiedades del galvanizado	47
2.8 Inspección de la pieza.....	47
2.8.1 Apariencia y condiciones de acabado superficial	48
2.9 Herramientas estadísticas.....	50



Universidad de Cuenca

2.9.1	Histograma.....	51
2.9.2	Gráficos de control	51
2.9.3	Capacidad de un proceso	53
2.10	Diseño de experimentos.....	58
2.10.1	Diseño factorial	58
2.10.2	Software estadístico Minitab	59
2.11	Optimización	59
Capítulo III	.....	60
3.	Metodología	60
3.1	Proceso experimental	60
3.1.1	Diseño de cartas de control.....	60
3.1.2	Sistema de estudio “proceso de galvanizado” a escala de laboratorio ...	61
3.1.3	Optimización del baño de zincado.....	65
3.2	Resultados y Análisis	72
3.2.1	Resultados de las cartas de control de todas las etapas del proceso.....	72
3.2.2	Resultados de cada etapa del proceso a escala de laboratorio.....	102
3.3	Análisis de costos	120
3.4	Conclusiones	123
3.5	Recomendaciones	124
Bibliografía	.....	126
Apéndice A	.....	132
Métodos de cuantificación	.....	132
Apéndice B	.....	135
Datos obtenidos de las etapas de galvanizado a nivel de planta	135	
Desengrasado.....	135	
Decapado.....	136	
Fluxado	137	
Zincado	139	
Apéndice C	.....	142

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Espesor de capa medidos durante 7 semanas en producto de planta	142
Apéndice D	143
Datos obtenidos a escala de laboratorio de cada una de las etapas de galvanizado	143
Desengrasado (antes de la inmersión de las probetas en la solución)	143
Desengrasado (después de la inmersión de las probetas en la solución).....	143
Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 1%P/P H ₃ PO ₄ (antes de la inmersión de las probetas en la solución)	144
Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 1%P/P H ₃ PO ₄ (después de la inmersión de las probetas en la solución)	144
Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 5%P/P H ₃ PO ₄ (antes de la inmersión de las probetas en la solución)	145
Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 5%P/P H ₃ PO ₄ (después de la inmersión de las probetas en la solución)	146
Valores medidos de cloruro de amonio-zinc en función de la temperatura y la concentración total	146
Relación espesor de capa, temperatura y concentración en la etapa de fluxado	147
Espesor de capa de cada uno los experimentos con las diferentes combinaciones en la etapa de zincado.....	148



Lista de tablas

Tabla 1.1 Características de los productos de TUGALT S.A.....	19
Tabla 1.2 Composición química de las bobinas de acero que generalmente son utilizadas para el galvanizado de tubos.	20
Tabla 2.1 Cambios en áreas anódicas y catódicas	26
Tabla 2.2 Características generales del zinc.....	28
Tabla 2.3 Influencia del contenido de fósforo y silicio en el recubrimiento.....	29
Tabla 2.4 Diferentes técnicas de galvanizado de piezas.....	30
Tabla 2.5 Explicación química de la protección del Zinc	33
Tabla 2.6 Características de tipos de desengrasado.....	34
Tabla 2.7 Cuadro comparativo de agentes decapantes	35
Tabla 2.8 Sales de Flux comúnmente usadas.....	40
Tabla 2.9 Parámetros que se controla en el fluxado	41
Tabla 2.10 Composición y características de las capas de zinc formadas durante la etapa de galvanizado	42
Tabla 2.11 Composición química de baño de zinc en % peso	43
Tabla 2.12 Composición Química de baño de zinc en % peso.....	44
Tabla 2.13 Características de los metales, cambios que producen en el baño de zinc y su posterior revestimiento en los tubos de acero.....	44
Tabla 2.14 Grados de espesor de recubrimientos promedio mínimo por categoría de material para elementos individuales y elementos armados.....	48
Tabla 2.15 Grado de espesor del recubrimiento	48
Tabla 2.16 Tipos de apariencia y características de acabado superficial	49
Tabla 2.17 Valores de Cp y su interpretación.....	54
Tabla 2.18 Interpretaciones de C_{pk}	54
Tabla 2.19 Categorías de los estados de un proceso y su interpretación.....	57
Tabla 3.1 Dosificaciones de los baños desengrasado, decapado, fluxado y temperatura.....	62
Tabla 3.2 Resultados de revestimientos mediante la combinación de los metales.....	66
Tabla 3.3 Rango de dosificación de los metales	68
Tabla 3.4. Dosificaciones de metales en %P/P	68
Tabla 3.5 Dosificaciones de metales en gramos	69
Tabla 3.6 Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión	72
Tabla 3.7 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de pH.....	74
Tabla 3.8 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de pH	74
Tabla 3.9 Límites de especificación y control de parámetros correspondientes al desengrasado.	78
Tabla 3.10 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de desengrasado.....	78
Tabla 3.11 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de decapado analizados en las tinas 1 y 2.	83



Tabla 3.12 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de decapado analizados en las tinas 1 y2.	83
Tabla 3.13 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de Temperatura.....	85
Tabla 3.14 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de Temperatura.....	85
Tabla 3.15 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de cloruro de amonio	91
Tabla 3.16 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de cloruro de amonio.....	92
Tabla 3.17 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de fluxado.....	93
Tabla 3.18 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de fluxado.....	93
Tabla 3.19 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de la °T secado	95
Tabla 3.20 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de especificación de la °T secado	95
Tabla 3.21 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de zincado.....	99
Tabla 3.22 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de la etapa de zincado	99
Tabla 3.23 Promedio del espesor de capa de los distintos espesores de tubos comprendidos entre un diámetro de 1,8-3mm.	100
Tabla 3.24 Promedio del espesor de capa de los distintos espesores de tubos comprendidos entre un diámetro de 3,2-5mm	100
Tabla 3.25 Datos correspondientes al decapado empleando dos tipos de concentración de H ₃ PO ₄	104
Tabla 3.26 Rango de tiempo a emplear conforme el nivel de concentración del baño de decapado	107
Tabla 3.27 Mediciones de °Be obtenidos cuando se varía la sal de flux	108
Tabla 3.28 Valores obtenidos de micraje del tubo galvanizado al variar la concentración de sal de flux y su temperatura.....	110
Tabla 3.29 Parámetros para la limpieza superficial de los tubos.....	112
Tabla 3.30 Ensayos de adherencia, espesor de capa, brillo y floreado.....	112
Tabla 3.31 Características visuales de los recubrimientos (acabado, adherencia)....	114
Tabla 3.32 Masa inicial (g) de las probetas antes de su ingreso en la cámara salina	115
Tabla 3.33 Masa final (g) de las probetas después de la cámara salina	116
Tabla 3.34 Características y valores obtenidos al variar el tiempo de inmersión en el experimento 1	117
Tabla 3.35 Costo de implementación del proyecto evaluado en 5 años.....	121
Tabla 3.36 Datos adicionales para la evaluación de costos de implementación.....	121
Tabla 3.37 Costo en planta en el periodo de 5 años	122



Índice de figuras

<i>Figura 1.1: Recepción de tubería procedente del área de formado</i>	21
<i>Figura 1.2: Inmersión de tubos en el baño de desengrasado</i>	21
<i>Figura 1.3: Decapado de tubos de acero</i>	22
<i>Figura 1.4: Aspecto visual de tubos de acero después del decapado</i>	22
<i>Figura 1.5: Fluxado de tubos de acero</i>	22
<i>Figura 1.6: Zona de precalentamiento de tubos</i>	23
<i>Figura 1.7: Zona de soplado y enfriamiento de tubos</i>	23
<i>Figura 1.8: Zona de almacenamiento</i>	23
<i>Figura 1.9: Diagrama de flujo del galvanizado de acero</i>	24
<i>Figura 2.1: Consumo global de zinc refinado</i>	28
<i>Figura 2.2: Efecto del silicio sobre el recubrimiento de acero</i>	29
<i>Figura 2.3: Micrografía de sección transversal de diversas técnicas de revestimiento</i>	32
<i>Figura 2.4: Capas de óxido de hierro presentes en el acero</i>	35
<i>Figura 2.5: Mecanismo de ataque del agente decapante sobre las capas de óxido</i>	36
<i>Figura 2.6: Relación entre el tiempo de decapado y la concentración del baño a 20°C</i>	38
<i>Figura 2.7: Curva de Kleingarn</i>	39
<i>Figura 2.8: Micrografía del revestimiento de galvanizado por inmersión en caliente</i>	41
<i>Figura 2.9: Cinética de crecimiento de recubrimientos obtenidos en el baño Zn-AlNiBiSn para el acero 0.02Si (a) y para el acero 0.05Si (b)</i>	46
<i>Figura 2.10: Cinética de crecimiento de los recubrimientos obtenidos en el baño de Zn-Al-Ni-Pb en: a) acero con bajo contenido de silicio-0.02 y b) acero Sandelín-0.05Si</i>	47
<i>Figura 2.11: Categorías de los estados de un proceso en función de los índices de inestabilidad S_t y de la capacidad real C_{pk}</i>	56
<i>Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso general a escala de laboratorio</i>	61
<i>Figura 3.2: Dimensiones de cubas utilizadas para los baños de desengrasado, decapado y fluxado</i>	63
<i>Figura 3.3: Codificación de muestras a) Desengrasado, b) Decapado</i>	64
<i>Figura 3.4: Contorno de revestimiento variando Metal B-Metal C, constante Metal A-Metal D</i>	66
<i>Figura 3.5: Contorno del revestimiento variando Metal A-Metal C, constante Metal B-Metal D</i>	67
<i>Figura 3.6 Contorno del revestimiento variando Metal A-Metal B, constante Metal C-Metal D</i>	67
<i>Figura 3.7: Gráfico de probabilidad de los distintos parámetros del desengrasado</i>	73
<i>Figura 3.8: Transformación de Johnson para el pH</i>	74
<i>Figura 3.9: Reporte de análisis de capacidad del pH</i>	75
<i>Figura 3.10: Reporte de análisis de capacidad de la concentración H_3PO_4</i>	76
<i>Figura 3.11: Reporte de análisis de capacidad de la concentración de hierro disuelto</i>	77
<i>Figura 3.12: Diagrama de probabilidad de datos correspondientes a las dos tinas de decapado</i>	79
<i>Figura 3.13: Capacidad del proceso del %P/P HCl de la tina 1</i>	79
<i>Figura 3.14: Capacidad del proceso de Fe (g/L) en la tina 1</i>	80



<i>Figura 3.15: Capacidad de proceso de %P/P HCl en la tina 2</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3.16: Capacidad del proceso de Fe(g/L) en la tina 2</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.17: Diagrama de probabilidad de datos correspondientes al Fluxado</i>	<i>84</i>
<i>Figura 3.18: Transformación de Johnson para la temperatura en el fluxado</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.19: Reporte del proceso de capacidad de la temperatura en el fluxado</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.20: Reporte de la capacidad del proceso del pH correspondiente al fluxado</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.21: Reporte de capacidad del proceso para la concentración de hierro disuelto en el fluxado</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.22: Reporte de capacidad del proceso para °Be en el fluxado</i>	<i>89</i>
<i>Figura 3.23: Reporte de capacidad del proceso para cloruro de zinc (g/L) en el fluxado</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.24: Transformación de Johnson para el cloruro de amonio</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.25: Reporte de capacidad para el cloruro de amonio en el fluxado</i>	<i>92</i>
<i>Figura 3.26: Diagnóstico de probabilidad de los parámetros de la etapa de zincado</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.27: Transformación de Johnson para la Temperatura de Secado</i>	<i>95</i>
<i>Figura 3.28: Reporte de la capacidad del proceso de la temperatura de secado</i>	<i>96</i>
<i>Figura 3.29: Reporte de la capacidad del proceso en relación a la temperatura del proceso (baño de zinc)</i>	<i>97</i>
<i>Figura 3.30: Reporte de la capacidad del proceso relacionado a la temperatura del dross</i>	<i>98</i>
<i>Figura 3.31: Medición de la capa de revestimiento de los tubos galvanizados en planta (espesor ≤ 3mm) durante siete semanas vs espesor óptimo</i>	<i>101</i>
<i>Figura 3.32: Medición de la capa de revestimiento de los tubos galvanizados en planta (espesor > 3mm) durante siete semanas</i>	<i>101</i>
<i>Figura 3.33: Peso eliminado en cada uno de los experimentos de la etapa de desengrasado</i>	<i>102</i>
<i>Figura 3.34: Concentración de g/ L Hierro de cada experimento en la etapa de desengrasado</i>	<i>103</i>
<i>Figura 3.35: Interacción entre el peso eliminado, tiempo y concentración empleados en cada experimento, empleando un baño al 1% de H₃PO₄ por 10 min anterior a la etapa de decapado</i>	<i>105</i>
<i>Figura 3.36: Interacción entre el hierro disuelto, tiempo y concentración empleados en cada experimento, con un baño al 1% de H₃PO₄ por 10 min anterior a la etapa de decapado</i>	<i>105</i>
<i>Figura 3.37: Interacción entre el peso eliminado, tiempo y concentración empleados en cada experimento, empleando un baño al 5% de H₃PO₄ por 10 min anterior a la etapa de decapado</i>	<i>106</i>
<i>Figura 3.38: Interacción entre el hierro disuelto, tiempo y concentración empleados en cada experimento, con un baño al 5% de H₃PO₄ por 10 min anterior a la etapa de decapado</i>	<i>106</i>
<i>Figura 3.39: Regresión lineal entre °Be y sal de flux (%P/P)</i>	<i>108</i>
<i>Figura 3.40: Comportamiento de cloruro de zinc vs temperatura y concentración total de sal de flux</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.41: Comportamiento de cloruro de amonio vs temperatura y concentración total de sal de flux</i>	<i>109</i>



<i>Figura 3.42: Diagrama de contorno del micraje del tubo galvanizado vs la concentración de sal de flux y su temperatura.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 3.43: Tipos de floreado de zinc sobre la superficie de acero</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.44: Masa perdida (g) de los distintos experimentos colocados en cámara salina</i>	<i>117</i>
<i>Figura 3.45: Micrografía de revestimiento del experimento 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.46: Micrografía de revestimiento del experimento 2 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.47: Micrografía de revestimiento del experimento 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min) empleando un tiempo de inmersión de 1 min.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.48: Micrografía de revestimiento de probeta en planta</i>	<i>119</i>



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Felipe Leonardo Acero Mainato en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación " Determinación y análisis de variables críticas en el proceso de galvanizado de la tubería de acero a escala de laboratorio para su posterior optimización en planta", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre de 2020


LEONARDO

Felipe Leonardo Acero Mainato

C.I: 010713681-4



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Karla Margoth Romoleroux Urgilez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación y análisis de variables críticas en el proceso de galvanizado de la tubería de acero a escala de laboratorio para su posterior optimización en planta", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre del 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Karla Margoth Romoleroux Urgilez

C.I: 010538981-1



Universidad de Cuenca

Cláusula de Propiedad Intelectual

Felipe Leonardo Acero Mainato autor/a del trabajo de titulación "Determinación y análisis de variables críticas en el proceso de galvanizado de la tubería de acero a escala de laboratorio para su posterior optimización en planta", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de octubre de 2020

LEONARDO S

Felipe Leonardo Acero Mainato

C.I: 010713681-4



Universidad de Cuenca

Cláusula de Propiedad Intelectual

Karla Margoth Romoleroux Urgilez, autor/a del trabajo de titulación "Determinación y análisis de variables críticas en el proceso de galvanizado de la tubería de acero a escala de laboratorio para su posterior optimización en planta" certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de octubre del 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Karla Margoth Romoleroux Urgilez

C.I: 010538981-1



Universidad de Cuenca

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de manera incondicional a la empresa TUGALT S.A. en particular al Ing. Juan Vanegas Gerente de Manufactura por permitirnos el uso de las instalaciones, al igual que a todo el personal del área de producción por brindarnos su ayuda a lo largo de la elaboración de la tesis.

Por otra parte, agradecemos a nuestra directora de tesis Ing. María Eulalia Vanegas Peña, por habernos colaborado de manera intelectual y ayudarnos a resolver nuestras dudas que se presentaron durante la tesis.

A la Facultad de Ciencias Químicas, por su formación académica a lo largo de toda la carrera, y a su alma mater por los conocimientos brindados.

Para finalizar, agradecemos especialmente a nuestros familiares, por el apoyo incondicional y total hacia cada uno de nosotros, de manera emocional y económica.

FELIPE Y KARLA



DEDICATORIA

Dedico este logro a mi madre Rosa Acero, por todo el esfuerzo que ha hecho a lo largo de su vida por sacar a toda la familia adelante cumpliendo el rol de madre y padre a la vez; en especial por apoyarme a culminar mis estudios esforzándose día a día con su constancia en el trabajo, dejándome una herencia invaluable como es el estudio y sus valores inculcados, como es el respeto y responsabilidad; por su amor, cariño y esfuerzo que me permitieron transformar en la persona que soy hoy por hoy.

A mis herman@s: Segundo, Olger, Mariana, Gladys, Edwin y Mercy por su apoyo durante este trayecto; por ser un ejemplo viviente de perseverancia y constancia en la vida cotidiana para sacar a sus familias adelante; que me supieron transmitir y educar de manera correcta. A pesar de las circunstancias mi admiración como personas y como padres/madres; a pesar de las indiferencias que pudiéramos tener siempre han estado ahí en todo momento dándome esas palabras de sabiduría.

A mis sobrin@s que de alguna manera son el pilar fundamental de la persona que soy; por su amor incondicional y respeto que tienen a mi persona; gracias por ser aquellas personas que hacen que mi vida sea más amena.

A Karla por su compromiso y dedicación con el proyecto permitiendo de esta manera cumplir con los objetivos planeados durante este periodo; por ser una amiga y compañera incondicional en todo momento.

FELIPE ACERO



Universidad de Cuenca

DEDICATORIA

La finalización de esta etapa estudiantil de mi vida, está dedicada a toda mi familia, por haberme animado en cada momento, por darme un consejo cada vez que desistía de culminar mis estudios, por no dejarme sola.

Este logro en especial es por mi madre Blanca Urgilez, quien desde el primer momento se convirtió en mi amiga, confidente, y apoyo incondicional; por mis hijas Emily y Luciana, por quienes llegue hasta el final y para poder demostrarles que nada es imposible, si ellas se lo proponen.

A mi compañero de tesis Felipe, por su paciencia, ánimo, esfuerzo y apoyo, que fueron cualidades claves para poder culminar exitosamente este proyecto.

KARLA ROMOLEROUX



CAPITULO I

1. Generalidades

1.1 Introducción

La empresa TUGALT S.A, perteneciente al Grupo Industrial Graiman está ubicada en el parque industrial (entre Machángara y Panamericana Norte Km 4) de la ciudad de Cuenca. La empresa se dedica a la manufactura metal-mecánico, en específico a la elaboración de tubería de acero y productos galvanizados, ofreciendo al mercado las siguientes líneas: Maxitubo (tubería mecánica, galvanizada, conducción de cables, conducción de fluidos, estructural), Maxiperfil (perfilería), Maxitecho (Aluzinc, pre pintado, curvo, mini-onda, liso), Steel Frame (sistema estructural liviano), Maxilosa (placa colaborante), Maxizinc (galvanizado corrugada pato rojo, galvanizado lisa pato rojo, pregalvanizado corrugada, pregalvanizado lisa). (TUGALT S.A, 2019)

La empresa ha venido enfrentándose a varios problemas a lo largo de su vida productiva y en específico en el área de galvanizado de tubería de acero, se puede mencionar las pérdidas de tiempo por proceso y reproceso, baños que son desechados sin ningún tipo de control antes de su agotamiento, espesores de tubos altos y acabados, que involucran mano de obra para retirar el exceso de zinc; estos problemas pueden deberse a la falta de un estricto control de parámetros críticos en las etapas o por no disponer de una metodología destinada a corregir errores. (TUGALT S.A, 2019)

Por tal motivo los objetivos del presente trabajo están orientados a) Determinar los parámetros críticos que permitan la optimización del galvanizado del acero, mediante la utilización de herramientas de cartas de control, software estadístico (Minitab), b) A escala de laboratorio, determinar una formulación adecuada en la etapa de zincado para la reducción del espesor de capa y mejora del aspecto visual, añadiendo metales como Aluminio, Bismuto, Níquel y Estaño, cumpliendo con las normas INEN al momento de evaluar su calidad.

1.2 Historia y descripción del estado actual de la empresa

TUGALT S.A. fue constituida en 1963 de la mano del señor Alfredo Peña Calderón, fue la primera empresa dedicada a la fabricación de tubería, perfilera y techos en el país, con la visión de ser líderes en la producción de acero. En la actualidad la empresa posee unas de las mejores máquinas para los procesos de transformación de chapa metálica en productos como: tubería, perfiles y techos. Tiene sus centros de distribución a nivel nacional tanto en Guayaquil (Hidrosa), en Quito (Centro Sur y Norte) y en Cuenca



Universidad de Cuenca

(Centro Totoracocha). Los productos que fabrica TUGALT S.A. se elabora con acero que cumple con las normas ASTM, SAE y JIS. A continuación, se detalla algunas de las características de sus productos (ver tabla 1.1).

Tabla 1.1 Características de los productos de TUGALT S.A.

Líneas	Producto	Materia Prima	Norma de fabricación	Inspecciones	Espesor (mm)	Tipos
MAXITUBO	Tubería para mueble	Acero laminado en frío $f_y=2100\text{Kg/cm}^2$	NTE INEN 2415	Tolerancia dimensional +/- 0.5%	0.75, 0.9, 1.1	Tubo redondo, cuadrado y rectangular
	Tubería conducción	Acero galvanizado bajo norma ASTM A 653	NTE INEN 3016	Tolerancia dimensional +/- 0.13mm	1.05, 1.2	EMT conducción de cables
	Tubería para uso estructural	Acero al carbono laminado en caliente límite de fluencia $f_y=205\text{Mpa}$	NTE INEN 2415; NTE INEN 2483 (2009)	Tolerancia dimensional +/- 0.5%	1.2, 1.5, 1.8, 2.2,25, 2.3, 2.5, 3, 3.2,3.6 5	Tubo redondo, cuadrado y rectangular
	Tubería galvanizada para conducción de fluidos	Acero al carbono laminado en caliente bajo norma JIS G3132	NTE INEN 2415; NTE INEN 2470; NTE INEN 2483 (2009)	Recubrimiento de zinc 500g/m^2	1.8, 2.2,25, 2.3, 2.5, 3, 3.2,3.6 5	Tubo redondo, cuadrado y rectangular Tubo redondo ISO II: serie liviana, serie liviana galvanizada ASTM A53
	Tubería estructural	Acero al carbono laminado en caliente $f_y=255\text{MPa}$	NTE INEN 2415; NTE INEN 2483 (2009)	Recubrimiento de zinc 120g/m^2	1.6, 2	Tubo redondo, cuadrado
MAXIPERFIL	Perfiles	Acero al carbono laminado en CALIENTE $f_y=205\text{MPa}$	NTE INEN 1623	Tolerancia dimensional +/- 0.5%	1.8, 2, 3	C, G, L
MAXITECHO	Aluzinc trapezoidal	Acero estructural recubierto por una capa de aleación: aluminio (55%) y zinc (45%)	NTE INEN 2221	Ancho útil 0.5%, altura 1.5mm, longitud +30/0mm	0.25, 0.3, 0.35, 0.4	Trapezoidal verde, terracota, rojo claro, blanco, curvo
MAXILOSA	Placa colaborante	Acero galvanizado (ASTM A653 SS37)	NTE INEN 2397	Ancho útil +/- 0.5%, longitud +20/0mm	0.65, 0.75	Largo (m): 3, 3.6, 4, 4.5, 5, 6, 10
MAXIZINC	Planchas de zinc	JIS G3141	NTE INEN 2221	Recubrimiento de zinc 120g/m^2	0.2 mm	Pregalvanizado corrugado y liso

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



STEEL FRAME	Sistema estructural liviano (perfiles pregalvanizado)	ASTM A653 SS37	NTE INEN 2526	Recubrimiento de zinc 275 g/m ²	0.93, 1.28, 1.64 mm	Crucero G y perforado, capa C
-------------	---	----------------	---------------	--	---------------------	-------------------------------

Fuente: TUGALT S.A., Comercialización, “Catálogo de productos”.

1.3 Estado actual de la empresa TUGALT S.A. en relación a la producción de piezas galvanizadas

Para el galvanizado de las piezas (tubería) se utiliza bobinas de acero de diferente composición química como se presenta en la tabla 1.2, la composición química de hierro es mayor a 98%P/P.

Tabla 1.2 Composición química de las bobinas de acero que generalmente son utilizadas para el galvanizado de tubos.

Tamaño (mm)	Composición Química %					
	C	Si	Mn	P	S	Si+P
1,43X1000	0,05	0,02	0,32	0,012	0,001	0,032
	0,06	0	0,3	0,004	0,004	0,004
1,72X1220	0,05	0,01	0,22	0,016	0,006	0,026
	0,05	0,02	0,22	0,021	0,007	0,041
1,91X1220	0,05	0,02	0,22	0,021	0,007	0,041
	0,05	0,01	0,22	0,016	0,006	0,026
	0,04	0,01	0,21	0,019	0,006	0,029
2,5X1030	0,11	0,009	0,496	0,015	0,0079	0,024
2,81X1195	0,11	0,009	0,488	0,018	0,0081	0,027
3,6X1060	0,11	0,009	0,488	0,018	0,0081	0,027

Fuente: TUGALT S.A, Departamento de control de calidad “Especificaciones del proveedor”

El proceso de galvanizado implica las siguientes etapas:

1.3.1 Preparación de la superficie o acondicionamiento

Etapa necesaria para la limpieza del área superficial de la pieza y activarla al momento de su inmersión en el baño de zinc, se prepara mediante tratamientos químicos. En la figura 1.1 se aprecia la tubería previa al tratamiento químico procedente del área de formado.



Universidad de Cuenca



Figura 1.1: Recepción de tubería procedente del área de formado

Fuente: Autores.

Desengrasado

Los tubos son sumergidos en una solución de ácido fosfórico (H_3PO_4), como se visualiza en la figura 1.2. Las características de la etapa son: concentración del baño 2% P/P en H_3PO_4 , pH entre 2-3 y tiempo de permanencia 5-10 minutos.



Figura 1.2: Inmersión de tubos en el baño de desengrasado

Fuente: Autores.

Decapado

Se inicia la etapa de decapado con un enjuague en agua, los tubos son sumergidos en un baño de ácido clorhídrico (HCl) como se muestra en la figura 1.3, cuya concentración oscila entre 8-18 %P/P, el tiempo de inmersión (10-30min) depende inversamente de la concentración, es así que a mayor concentración del ácido menor será su tiempo de permanencia en el mismo.

Para el baño se emplea inhibidores que impide que el ácido ataque al acero y elimine correctamente el óxido, y antivapores que delimitan las emisiones de vapores a la atmósfera de trabajo. En la figura 1.4 se observa el aspecto visual aceptable al sumergir



Universidad de Cuenca

los tubos en un baño de decapado, después de esta etapa se realiza un enjuague con agua y se procede a la siguiente etapa.



Figura 1.3: Decapado de tubos de acero



Figura 1.4: Aspecto visual de tubos de acero después del decapado

Fuente: Autores.

Fluxado

Compuesto por una disolución de Cloruro de zinc ($ZnCl_2$) y Cloruro de amonio (NH_4Cl) denominada sal doble de flux (figura 1.5), con una concentración de 660-710g/L. Los parámetros de operación del baño comprenden: temperatura entre 25-40°C, pH entre 4-5 y tiempo de inmersión de 1-2min.



Figura 1.5: Fluxado de tubos de acero

Fuente: Autores.

Secado: En la figura 1.6 se observa la cámara de secado, los tubos ingresan continuamente a una temperatura de 100-118°C con la finalidad de disminuir la humedad en la pieza, lo cual evitará salpicaduras al momento de su inmersión en el baño de zinc.

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Figura 1.6: Zona de precalentamiento de tubos

Fuente: Autores.

1.3.2 Galvanizado de la pieza

Después del acondicionamiento los tubos se colocan sobre un tornillo sin fin para su ingreso al baño de zinc, la temperatura de trabajo está entre los 440°C y 450°C por un tiempo de 2-3min. Se extraen los tubos para su posterior soplado con vapor de agua para eliminar grumos o partes sobrecargadas de zinc como se observa en la figura 1.7 y se enfrían a temperatura ambiente (en la figura 1.8 se visualiza la zona de almacenamiento).



Figura 1.7: Zona de soplado y enfriamiento de tubos



Figura 1.8: Zona de almacenamiento

Fuente: Autores.

El zinc utilizado por TUGALT S.A. tiene una concentración mayor a 99,995 %P/P con pequeñas trazas de metales (Aluminio, Plomo, Hierro, Cobre, Estaño, Cadmio). En la figura 1.9 se detalla el proceso del galvanizado de acero mediante un diagrama de flujo.

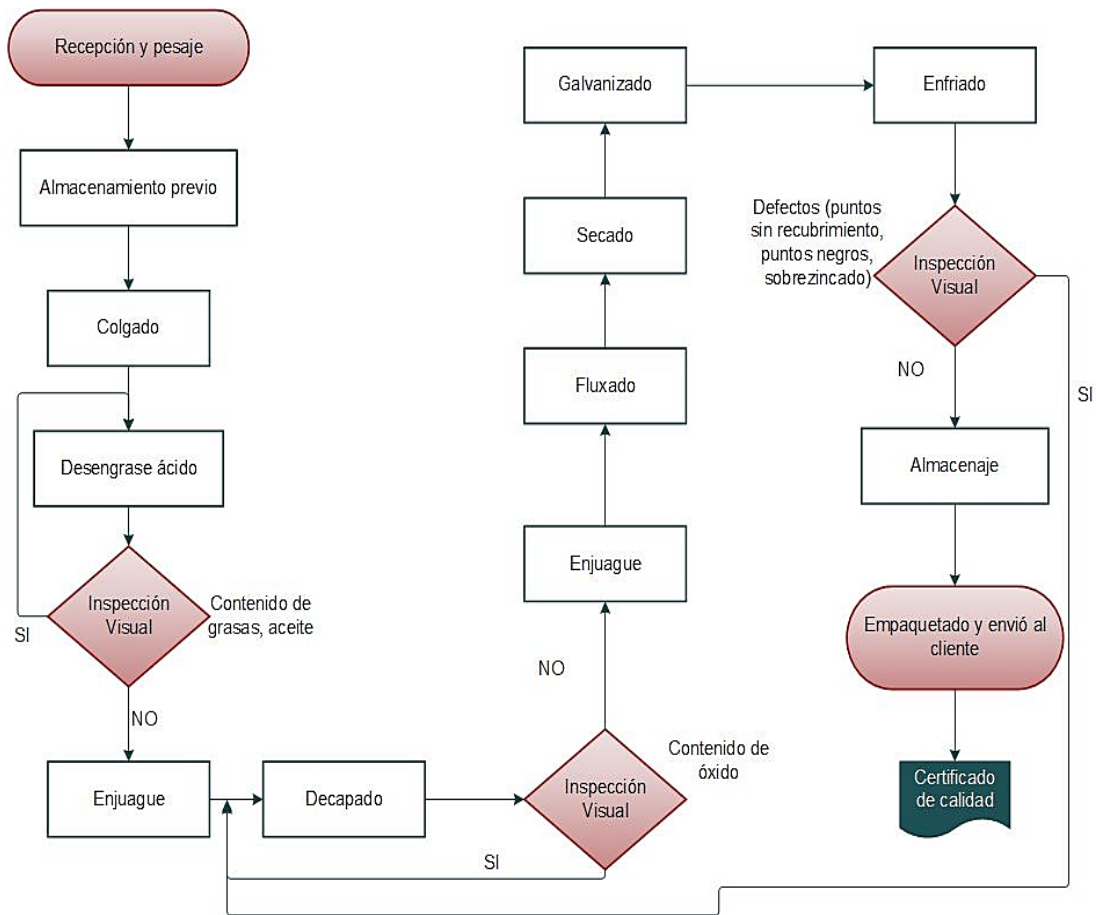


Figura 1.9: Diagrama de flujo del galvanizado de acero

Fuente: Autores.

1.4 Planteamiento del problema

En la empresa TUGALT S.A en el área de galvanizado de tubos de acero, al momento de la inmersión de la pieza en el baño de zinc se produce algunos defectos (exceso de recubrimiento, quemado de la tubería, partes sin galvanizar, inadecuado floreado de la pieza, puntos negros) generando de esta manera un consumo masivo de zinc que se ve asociado al tiempo de inmersión y en gran parte a la composición química del zinc en lingotes. En otras áreas como el desengrasado, decapado y fluxado los operadores no cuentan con un proceso estandarizado al momento de evaluar cada baño, es así que a valores correspondientes de: pH, tiempo, temperatura y concentración no registran valores por día o semana, los mismos que son críticos al momento de evaluar la eficiencia de cada uno y permitan determinar las condiciones óptimas; lo que conllevaría una disminución en tiempo de procesado, recursos, y predecir un reproceso (volver a galvanizar la pieza zincada).



1.5 Justificación

En la norma NTE INEN 2483 (2009) especifica que la tubería de acero galvanizado debe contar con un grado de recubrimiento dependiendo del rango de espesor y categoría de material, mientras que el acabado debe ser uniforme y moderadamente liso. En los últimos meses la empresa TUGALT S.A, visualiza imperfecciones en la tubería galvanizada, siendo más notorio en tubería de diámetro menores a 2 pulgadas cuyo espesor son menores a 3mm; se observa secciones sin galvanizar y exceso de zinc, lo cual hace que no cumpla con la especificación de la norma y no pueda ser comercializado.

De esto surge la necesidad de evaluar el proceso de galvanizado iniciando desde el tratamiento químico (desengrasado, decapado, fluxado) hasta el baño de zinc que permitirá determinar parámetros críticos en cada etapa para una optimización de los recursos en el proceso.

1.6 Objetivos

Objetivos Generales

- Determinar los parámetros críticos que permitan la optimización del galvanizado del acero.
- Determinar una formulación adecuada en los baños de zinc con Al, Bi, Ni, Sn en la etapa de galvanizado con la probabilidad de la reducción del espesor de capa y mejora de la apariencia de la pieza.

Objetivos Específicos

- Describir de forma general la secuencia de operaciones del proceso de galvanizado de acero por inmersión en caliente en la empresa TUGALT S.A.
- Establecer variables críticas en cada etapa del proceso que permita un control óptimo de las mismas.
- Seleccionar los porcentajes adecuados de metales para la optimización del proceso, mediante un diseño experimental y comprobar mediante normativas vigentes los resultados obtenidos.
- Analizar los costos para la implementación a escala industrial.



CAPITULO II

2. Marco teórico

2.1 Acero

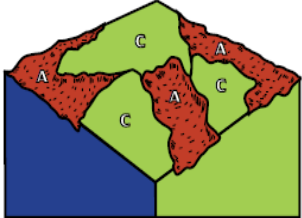
Al acero se lo puede definir como una aleación de hierro (98%P/P) y carbono(0,05-2%P/P), con mínimas cantidades de manganeso (Mn), silicio (Si) y azufre (S). El 80% de los materiales metálicos producidos corresponden al acero, por su combinación de resistencia, sencillez de fabricación y un gran rango de propiedades con bajo costo. La composición química del acero es determinante en las características del recubrimiento, los elementos silicio, fósforo y carbono son fundamentales para obtener adecuados revestimientos. (Maldonado Flores, 1996)

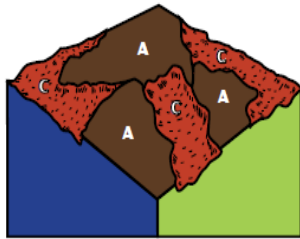
2.1.1 Corrosión del acero

La corrosión del acero es uno de los problemas más graves porque se encuentra expuesto a ambientes externos e internos que deterioran el material. Los factores más importantes que influyen en la corrosión son: composición-estructura del acero, impurezas (SO_2), estrés interno irregular (fuerza, exposición a un ambiente no uniforme), temperatura, humedad, pH del medio de exposición.

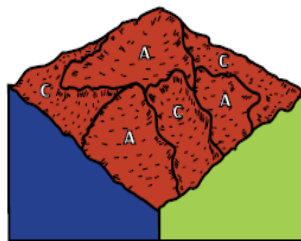
En la tabla 2.1 se indican las etapas de corrosión del acero al encontrarse expuesto al factor más destacado que es la humedad; la misma que se compara con una celda de concentración que consta de un ánodo y cátodo del mismo metal o aleación y una vía de corriente de retorno, la fuerza electromotora surge de la diferencia en concentración de las soluciones en contacto con el metal.

Tabla 2.1 Cambios en áreas anódicas y catódicas

Etapas de la Corrosión	Descripción
	Encajamiento de ánodos (A) y cátodos (C), conectados eléctricamente por el acero adyacente.



La humedad ejerce una trayectoria eléctrica entre ánodos y cátodos de la pieza. Debido a diferencias en el potencial, la corriente eléctrica comienza a fluir a medida que se consumen las áreas anódicas. Los iones de hierro producidos en el ánodo se combinan con el ambiente para formar el óxido de hierro.



Con el tiempo, las áreas antes no corroídas son atacadas y esto provoca una corrosión de superficie uniforme, dando un color marrón/rojizo.

Fuente: (American Galvanizers Association, 2015)

Al sustituir el ánodo o el cátodo por un metal (menos noble) diferente modifica la dirección de la corriente, el galvanizado en caliente explota esta propiedad al sacrificar el zinc (ánodo) para proteger al acero subyacente (cátodo). (American Galvanizers Association, 2015)

Los costos por corrosión se estiman en un 3% PIB de los países (Estados Unidos), es de ahí la utilización de técnicas adecuadas de protección que genera un ahorro del 25%. La protección del acero por aleaciones, métodos electroquímicos y recubrimientos protectores acrecenta el tiempo de vida útil y minimiza costos por mantenimiento. Entre los recubrimientos protectores el más eficiente en economía y aumento de vida útil es el zinc como elemento de sacrificio.

2.2 Propiedades del Zn

Metal de color gris, conductor de calor y electricidad, es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, en la tabla 2.2 se describen algunas características del metal. El zinc y sus aleaciones tienen una excelente resistencia a la corrosión, por su facilidad para formar una capa protectora (óxido de zinc y varias sales básicas), dependiendo de la naturaleza del medio. Su ventaja se basa en su bajo punto de fusión y en el hecho de que el zinc es anódico respecto al acero, es decir, cuando se pone en conexión con el hierro o acero en presencia de un electrolito, el zinc se corroe. (Coiras Mancera, 2006)

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Universidad de Cuenca

Tabla 2.2 Características generales del zinc

Característica	Parámetro
Símbolo	Zn
Número atómico	30
Peso atómico	65,37
Densidad	7192 kg/m ³
Tensión Superficial	760 mN/m
Punto de fusión	420°C
Punto de ebullición	907°C

Fuente: (Noriega del Olmo, 2016)

Los usos más comunes del zinc lo constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales, como se observa en la figura 2.1 el 60 % del zinc es destinado para protección del acero y el hierro denominado galvanizado. (International Zinc Association, 2015)

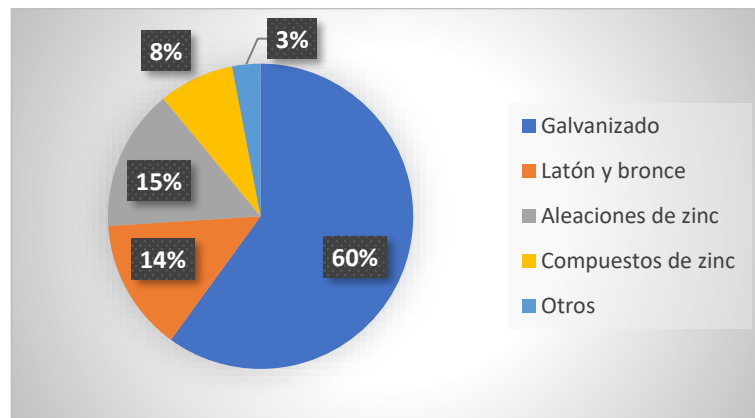


Figura 2.1: Consumo global de zinc refinado

Fuente: (International Zinc Association, 2015)

Cuando el acero posee silicio entre 0,03% y 0,15% y por encima de 0,25% en peso, se produce un crecimiento acelerado de las capas de revestimiento conocido como efecto Sandelin; como se observa en la figura 2.2 para valores mayores a 0,25% la reacción se vuelve inestable y el acero tiende a rechazar el revestimiento, mientras que para valores de silicio de 0,15-0,25% en peso, el revestimiento es adecuado por su bajo consumo de zinc y adecuada formación de capas. (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth

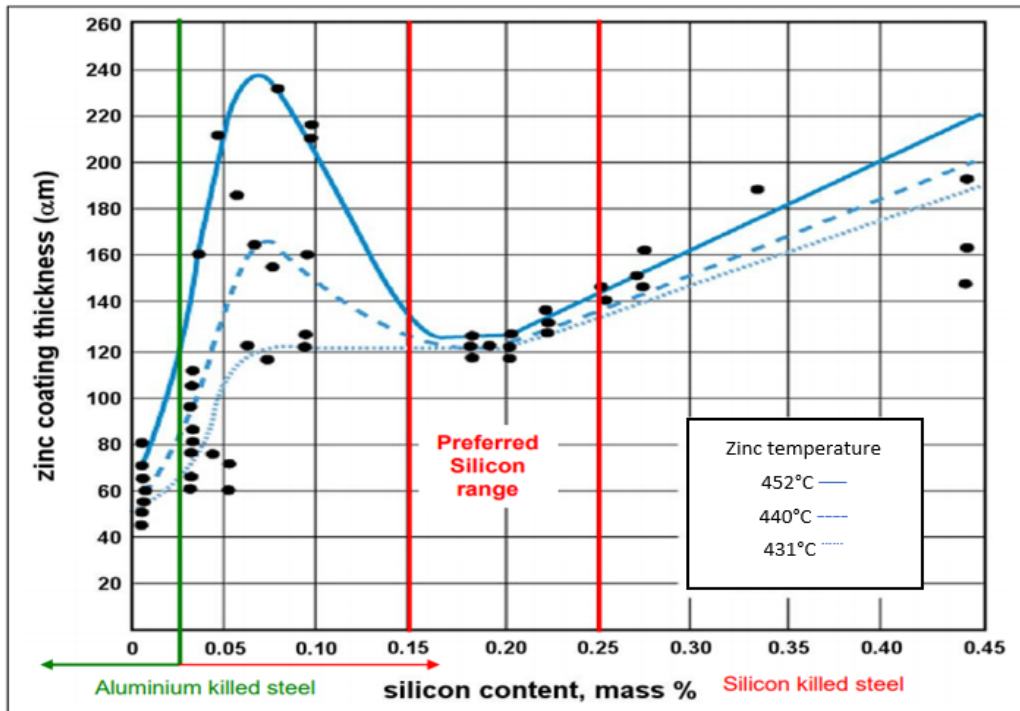


Figura 2.2: Efecto del silicio sobre el recubrimiento de acero

Fuente: (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

En la tabla 2.3 se indica la influencia que tiene el silicio y el fósforo en recubrimientos, en determinados porcentajes de peso en el acero.

Tabla 2.3 Influencia del contenido de fósforo y silicio en el recubrimiento

Clase de acero	Silicio + fósforo (%)	Características del recubrimiento y reactividad entre el hierro y el zinc
1	$Si + P < 0,03$	Reactividad normal: recubrimiento plateado, brillante y de espesor normal.
2	$0,03 < Si + P < 0,13$	Dominio Sandelin: elevada reactividad, recubrimiento grueso y gris.

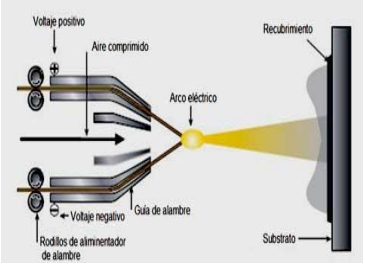

3	$0,13 < Si + P < 0,28$	Dominio	Sebisty: Reactividad normal, recubrimiento medio y color plateado.
4	$Si + P > 0,28$	Elevada	reactividad, recubrimiento grueso y gris.




Fuente: (Noriega del Olmo, 2016)

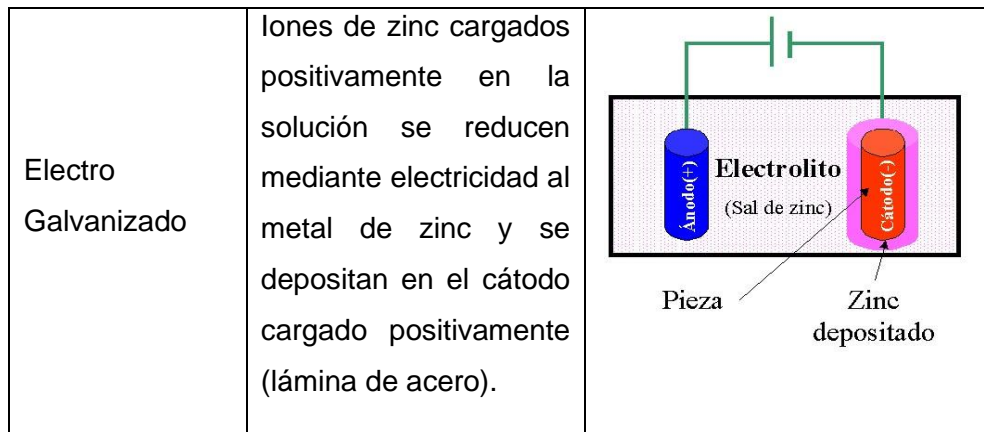
2.3 Técnicas de galvanizado

Se han desarrollado técnicas que permiten la adherencia al metal dependiendo de la pieza y el uso, estas técnicas se describen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Diferentes técnicas de galvanizado de piezas

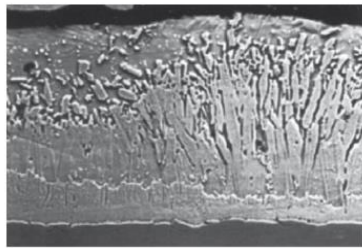
Técnica	Características	Sistema
Metalización con zinc o zincado por protección	Zinc en alambre o en polvo, alimenta a una pistola atomizadora la cual se proyecta sobre las superficies previamente preparadas por granallado.	
Galvanización en discontinuo por inmersión en caliente	Inmersión de las piezas en un baño de zinc fundido: tornillería, tubos en plantas automáticas y artículos diversos	
	Inmersión de bobinas de acero laminadas y alambres, sumergidos	

<p>Galvanización en continuo por inmersión en caliente</p>	<p>en un baño de zinc fundido de manera continua, previamente con limpieza superficial.</p>	
<p>Depósitos metálicos a partir de polvo de zinc</p>	<p>Tratamiento de piezas pequeñas con polvo de zinc en tambores giratorios a temperaturas inferiores a la de fusión del zinc, obteniendo aleaciones de zinc-hierro o depósitos zinc</p>	
<p>Pinturas con polvo de zinc</p>	<p>Aplicación con cepillo o spray de polvo de zinc mezclado con adhesivos orgánicos o inorgánicos; el acero debe limpiarse mediante arenado a casi metal blanco, limpieza a chorro comercial o metal blanco. Las pinturas contienen de 92 a 95% de zinc metálico en película seca.</p>	

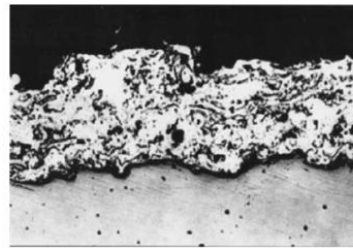


Fuente: (Coiras Mancera, 2006)

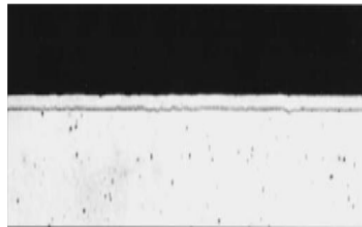
En la figura 2.3 se observa la micrografía de la capa de revestimiento empleando las distintas técnicas de galvanizado mediante zinc.



Galvanización en caliente



Metalizado por proyección



Electrogalvanizado



Pintura enriquecida en zinc

Figura 2.3: Micrografía de sección transversal de diversas técnicas de revestimiento

Fuente: (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

2.4 Galvanizado en discontinuo por inmersión en caliente

Obtención de una capa de recubrimiento sobre el tubo de acero por inmersión en un baño de zinc a temperatura de 440-460°C, los recubrimientos de este tipo cubren la totalidad de las superficies de las piezas, incluidas los interiores de los cuerpos huecos, y quedan adheridos a la superficie del acero a través de una serie de capas de



aleaciones zinc-hierro, que proporcionan gran dureza y excelente resistencia a la abrasión, en la tabla 2.5 se indican las reacciones químicas que tiene lugar.

Tabla 2.5 Explicación química de la protección del Zinc

Fase	Reacción	Característica
Oxidación	$2\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{ZnO}$	Óxido de Zinc es inestable y la protección al metal no es permanente.
Hidratación	$2\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Zn}(\text{OH})_2$	Zinc entra en contacto con la humedad, generando hidróxidos.
Carbonatación	$5\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Forma una capa final con estructura compacta de carbonato de zinc, que reducirá la velocidad de corrosión del material.

Fuente: (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

2.5 Etapas del proceso de galvanizado en caliente

El proceso está formado por tres etapas generales: preparación de la superficie, zincado e inspección de la pieza, las cuales en conjunto permitirán obtener una pieza de mejor calidad a nivel estructural y superficial.

2.5.1 Preparación de la Superficie

De acuerdo a la preparación de la superficie de la pieza dependerá la adherencia del metal, cualquier falla o deficiencia en la preparación de la superficie será notable cuando se retire el acero del zinc fundido, ya que las áreas no limpias permanecerán sin revestir; consta de tres pasos: desengrasado, decapado y fluxado.



Desengrasado

Se basa en la eliminación de grasas, aceites, residuos de soldadura, polvo, sales, tierra y hongos de la superficie metálica que puedan interferir en la interacción directa del recubrimiento y la superficie, estas son saponificadas, emulsionadas y dispersadas. La efectividad del baño dependerá de la concentración del H_3PO_4 (1-5%P/P), suciedad del material, temperatura. (Noriega del Olmo, 2016) ; (Hernández Betancur, 2018)

Se pueden emplear dos tipos de desengrasado, en la tabla 2.6 se especifica los parámetros de cada tipo de desengrase y sus ventajas al momento de su uso.

Tabla 2.6 Características de tipos de desengrasado

Características	Desengrase Alcalino (NaOH)	Desengrase Ácido (H₃PO₄)
Proceso posterior	Enjuague útil	Enjuague inútil
Materia prima	Productos químicos baratos	Productos químicos caros
Eficiencia	70%	90%
Tiempo de inmersión	10-20 min	5-15 min
Temperatura	40-60°C	18-30°C
Duración	8-12 meses	≥ 5 años
Costo/tonelada	Mayor	Menor
pH	12-13	2-3
Concentración	15-18 %P/P	1-5 %P/P

Fuente: (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

Un desengrasante ácido a base de H_3PO_4 limita al hierro por precipitación lo que es favorable al momento de su vida útil (superior a los 5 años de utilización). (Sabadell, 2018)

Decapado

Tiene como objetivo eliminar los óxidos metálicos y cascarilla de fabricación mediante la aplicación de ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H_2SO_4). En la tabla 2.7 se especifica las diferencias al aplicar estos dos ácidos a nivel de planta

Tabla 2.7 Cuadro comparativo de agentes decapantes

Parámetros	HCl	H ₂ SO ₄
Tiempo de operación	8-20 minutos	25-50 minutos
Temperatura	Ambiente	60-70°C
Concentración	Inicial: 190g/L (16-17%P/P) Final: 60g/L (6-5%P/P)	Inicial: 90-120g/L (9-12%P/P) Final: 10g/L (1%P/P)
Hierro	Inicial: 20g/L Final:150g/L	Inicial: 0g/L Final:80-120g/L
Proceso de contaminación	Mínimamente nocivo a la salud y al ambiente	Altamente nocivo

Fuente: (Delgado Enriquez & Bravo Palacios, 2016)

La superficie del acero contiene principalmente óxidos de hierro, esta formación en diferentes capas se da por el laminado del acero (figura 2.4); debido a las siguientes capas y el contenido de óxidos se dará un ataque notable tanto del ácido como de la corrosión:

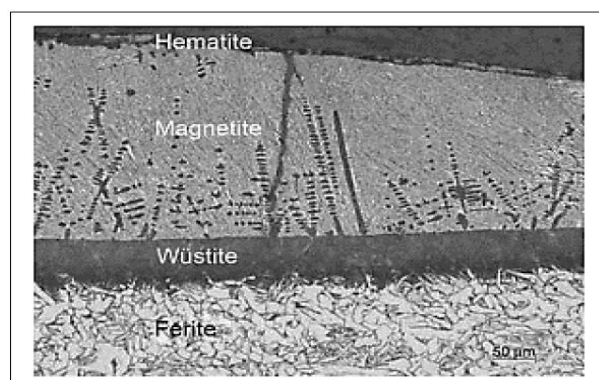


Figura 2.4: Capas de óxido de hierro presentes en el acero

Fuente: (Sabadell, 2018)

- Hematita (capa externa): Capa delgada que contiene óxido férrico (Fe₂O₃).
- Magnetita (Intermedia): Capa gruesa de óxido ferroso-férrico (Fe₃O₄).



Universidad de Cuenca

- Wüstita (Interna): Capa compacta (FeO), adyacente al metal base.
- Ferrita (metal base): Capa compacta de hierro.

En la figura 2.5 se presenta el mecanismo de reacción que se da durante el decapado utilizando ácido clorhídrico, y a continuación se describen las reacciones.

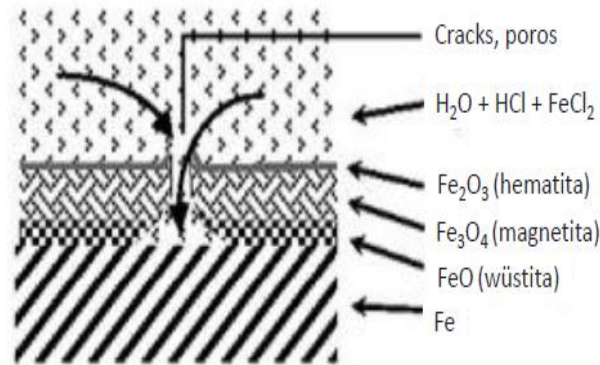
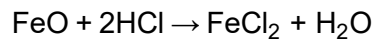


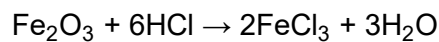
Figura 2.5: Mecanismo de ataque del agente decapante sobre las capas de óxido

Fuente: (Sabadell, 2018)

1. Se disuelve el óxido (wüstita):



2. El ácido ataca a la hematita y magnetita lo cual produce cloruro férrico (FeCl₃)



Las capas wüstita y magnetita son las responsables de la formación de óxido que provoca la corrosión del acero. Por lo cual es necesario la eliminación de estas mediante el decapado, estas capas en el caso de la wüstita tienen una solubilidad en ácido muy buena mientras que en la magnetita es difícil. (Sabadell, 2018)

3. El metal base se disuelve

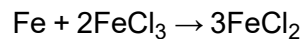


Esta reacción es mucho más lenta, aumenta el consumo de ácido y “pica” el acero, por ello se usa inhibidores.

4. El metal base se disuelve también por reacción con el cloruro férrico



Universidad de Cuenca



Esta reacción no puede inhibirse y es la razón por la que la solución de decapado apenas contiene cloruro férrico.

Desarrolladas ya las reacciones que tienen acabo en el decapado es necesario que se inhiba la reacción 3 debido a que esta ataca el metal y en consecuencia produce un desgaste innecesario del ácido, es por esa razón que se han desarrollados aditivos que permitan inhibir esta reacción y también no permitan la perdida al ambiente por evaporación entre los cuales tenemos:

- **Inhibidores:** Inhibe el ataque al metal base, disminuye el tiempo de inmersión de la pieza (la velocidad de remoción de óxido es mayor), el porcentaje de residuos en la siguiente etapa es menor.
- **Agentes Antivapores:** Disminuyen los vapores emitidos por el reactivo ácido hacia el ambiente de trabajo lo cual evita la pérdida por evaporación. (Fonseca Vega & Guamán Campoverde, 2011)

Los parámetros que se controlan en un baño de decapado con ácido clorhídrico son:

- Tiempo de inmersión
- Concentración del baño %P/P HCl
- Contenido de Fe (g/L)

Un baño de decapado inicia con una concentración de 14-16%P/P, conforme se trata la pieza el baño pierde su efectividad, es así que se necesita adicionar ácido al 34%P/P que se estima que se realice cuando la concentración de hierro sea de 100g/L y 8-10% P/P de HCl. La eficiencia disminuye por pérdidas producidas por evaporación, arrastre de las piezas y por el aumento de concentración de hierro. En la figura 2.6 se indica el tiempo de inmersión de la pieza, correlacionado con la concentración del baño (%P/P ó g/L) y la concentración de Fe(g/L) (Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas, 2013)

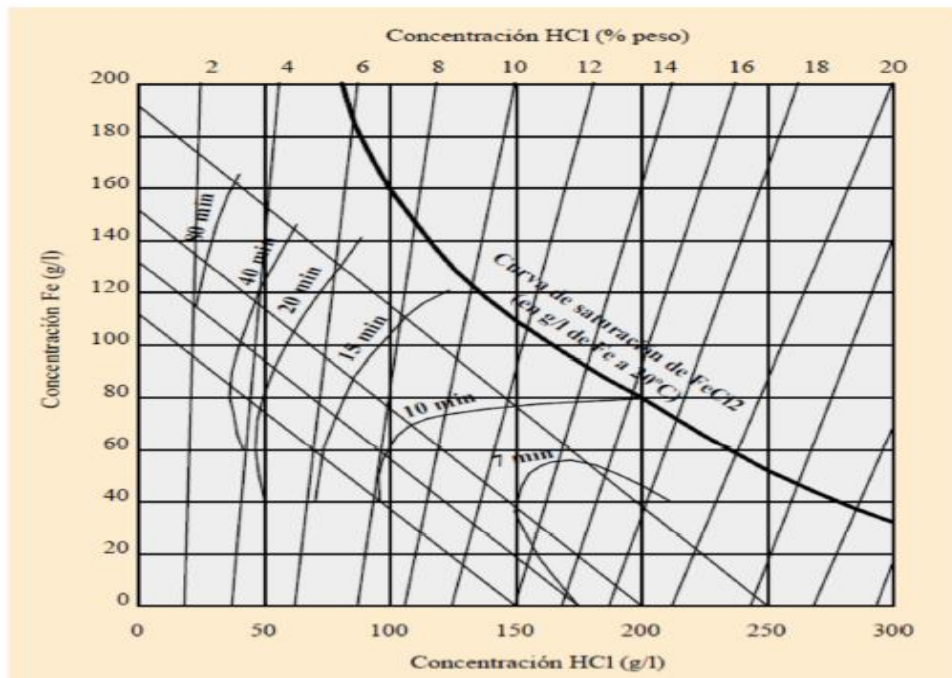


Figura 2.6: Relación entre el tiempo de decapado y la concentración del baño a 20°C

Fuente: (Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas, 2013)

Se ha desarrollado varios métodos que permiten la reducción de consumo y máximo aprovechamiento del HCl, produciendo de esta manera menos desechos.

Kleingarn en el año 1988 publicó un artículo donde se menciona la adición de agua o ácido al baño, en el que se debe eliminar ácido parcialmente gastado para dejar espacio para el ácido o el agua añadidos y un control óptimo de decapado para reducir la concentración de hierro mediante adiciones de ácido nuevo. (Campano, 2012); (C.T. Philipp, 2007)

Este método se le conoce como la curva de Kleingarn, el cual indica que exceder la solubilidad máxima provoca la precipitación de cristales ferrosos y detiene la reacción de decapado. Para realizar una correcta interpretación de la figura 2.7 se requiere de un análisis periódico de Hierro y HCl. Cuando el ácido es totalmente nuevo (A), conforme avance el proceso de decapado de tubos, la concentración de ácido decae y la concentración de hierro aumenta (B), en este punto se empieza enriquecer aproximándose a la curva óptima de decapado (línea azul). El literal C marca el inicio de un baño enriquecido conforme continua con el decapado decaerá (D) y se realiza otra recarga aproximándose a la curva de óptima de decapado (E), el literal (F) marca el fin de la efectividad del baño con respecto a recargas de HCl a partir de este punto se procede al cambio total.

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth

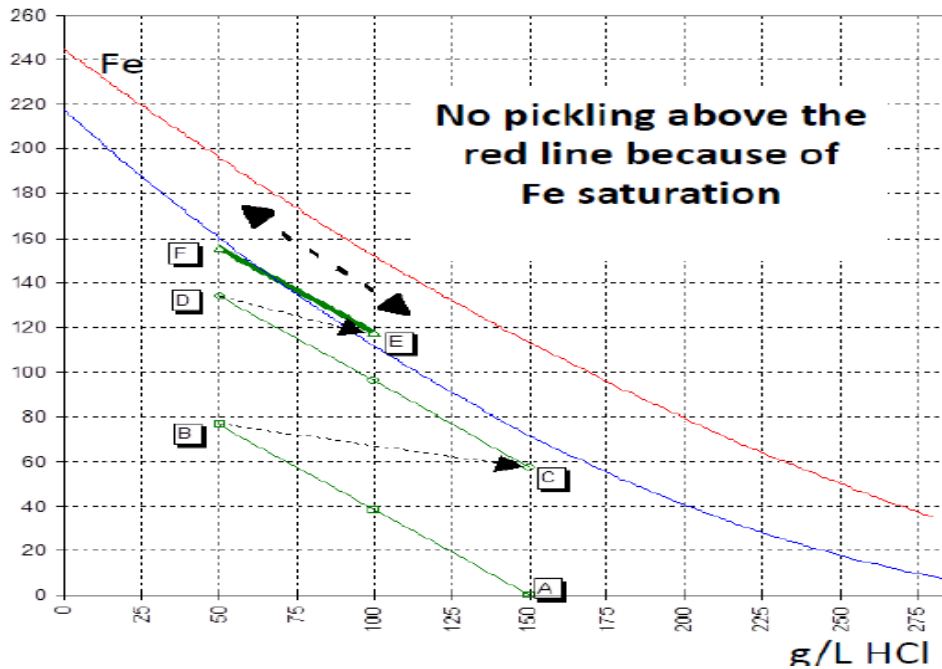


Figura 2.7: Curva de Kleingarn

Fuente: (Campano, 2012)

Para la cantidad de ácido a enriquecer en el baño de decapado se utiliza la ecuación (1) y para predecir la disminución de hierro en el baño se emplea la ecuación (2):

$$Y = \frac{(a \cdot b) - (a_1 \cdot b_1)}{(c - a_1)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Y= Cantidad de ácido a adicionar, litros

a= Concentración óptima del ácido deseada, %P/P

b= Volumen de la tina requerido al finalizar el enriquecimiento, litros

c= Concentración del ácido a dosificar, %P/P

a₁=Concentración actual de la tina, %P/P

b₁= Volumen de la tina actual, litros

$$Z = \frac{(d_1 \cdot d) - (e \cdot Y)}{b} \quad \text{Ecuación 2}$$

d=(b-Y) = Volumen de ácido que permanecerá en la tina luego de retirar el volumen a regenerar, litros



d_1 = Concentración de hierro actual antes de ser regenerado, g/L

e = Concentración de Hierro en el ácido a dosificar = 0g/L

Z = Concentración de hierro en el baño posterior a ser regenerado, g/L (Campano, 2012)

Fluxado

Favorece la reacción metalúrgica entre el zinc fundido y la pieza de acero, elimina los rastros de óxidos produciendo una efectiva limpieza; dando como resultado la formación de una capa fina de cristales cloruro de zinc-amonio, asegurando un recubrimiento uniforme de zinc. Generalmente la composición de la sal es cloruro de zinc ($ZnCl_2$) y cloruro de amonio (NH_4Cl), en una concentración total de 400-600g/L. (Coiras Mancera, 2006)

Cuando el contenido de $ZnCl_2$ es elevado produce un secado lento generando salpicaduras al momento de la inmersión de la pieza, mientras que a bajo contenido provoca reoxidación de la superficie de acero después de la aplicación del fundente, aumentando el contenido de escoria (Dross) al final del proceso. Si la concentración de NH_4Cl es alta emitirá humos excesivos y si es baja provoca defectos como puntos negros en la superficie galvanizada. En la tabla 2.8 se detalla los distintos tipos de sales existentes en el mercado que son aptos para la etapa de fluxado, de acuerdo a su aplicación industrial.

Tabla 2.8 Sales de Flux comúnmente usadas

Nombre	Formula	Composición %P/P		Usos
		$ZnCl_2$	NH_4Cl	
Cloruro de zinc anhidro	$ZnCl_2$	98	-	Industria Textil
Sal Simple	$ZnCl_2 \cdot NH_4Cl$	72	28	Láminas
Sal Doble	$ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl$	56	44	General
Sal Triple	$ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$	46	54	General

Fuente: (S.A.LIPMES, 2007)

La temperatura de trabajo de las diferentes sales de flux dependerá si el proceso consta o no de una zona de secado; entre un rango de 30-40°C se deberá trabajar con una temperatura de secado a 100°C; si no se dispone de secado la temperatura de trabajo deberá ser mayor a 40°C. El objetivo es evitar que la pieza ingrese con el mayor porcentaje de humedad en el baño de zinc, se impide salpicaduras que resultan en Acero Mainato Felipe Leonardo



Universidad de Cuenca

desperdicios. Para un mayor control se consideran los parámetros de funcionamiento descritos en la tabla 2.9. (Tozin, 2017)

Tabla 2.9 Parámetros que se controla en el fluxado

Parámetro	Mínimo	Máximo
Temperatura (°C)	20	75
pH	3.5	5
Tiempo (min)	1	3
°Be	20	30

Fuente: (Coiras Mancera, 2006); (Fonseca Vega & Guamán Campoverde, 2011)

2.5.2 Zincado

Luego de que la pieza este limpia de oxidantes y haya sido activada su superficie de contacto se procede a su secado (100°C), se sumerge en el zinc fundido cuya temperatura oscila entre 440-460°C por un tiempo que depende del tamaño y geometría de la pieza. El proceso mecánico de galvanizado es sencillo, sin embargo, a nivel metalúrgico se forman 4 capas complejas que tienen lugar en la interface del acero galvanizado y el zinc fundido, en la figura 2.8 se presenta estas capas con su respectiva distribución y en la tabla 2.10 su composición y características. (Pokorny, Kolisco, Balik, & Novak, 2016)

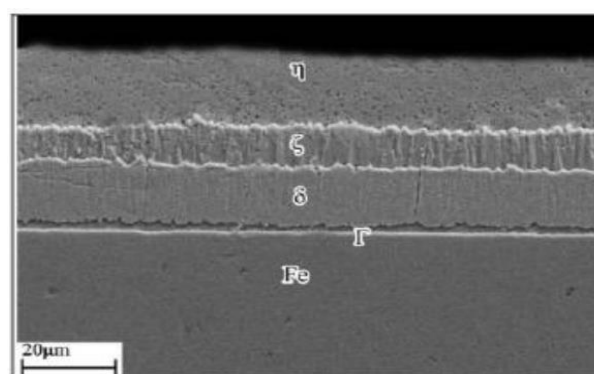


Figura 2.8: Micrografía del revestimiento de galvanizado por inmersión en caliente

Fuente: (Rico Oviedo, 2012)

La compleja estructura de capas que lo compone es muy variable en la composición química, física y propiedades mecánicas; las capas identificadas son: Gamma(γ), Delta (δ), Zeta (ζ) y capa exterior denominada Eta(η).

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Tabla 2.10 Composición y características de las capas de zinc formadas durante la etapa de galvanizado

Nombre	Fórmula	%Zn	Características
Gamma	Fe_3Zn_{10}	73-80	Es una fina capa adyacente al acero, para su formación requiere un tiempo largo de inmersión. Espesor de recubrimiento 0,1-0,2 μ m
Delta	$FeZn_7$	89-93	Es delgada e inconsistente (30-40 μ m), no se desarrolla totalmente durante la inmersión en zinc.
Zeta	$FeZn_{13}$	93.7-94.3	Es delgada e inconsistente (10-25 μ m); su espesor crece linealmente con el tiempo y entre sus cristales existen vacíos que reducen su adhesión al sustrato.
Eta	Zn	100	Es zinc puro (8-12 μ m), posterior al galvanizado mediante tratamiento térmico la capa eta desaparece permitiendo el crecimiento de la capa zeta.

Fuente: (Chico Chamarro, 2018)

La formación de capas durante el zincado depende de varios factores del proceso que ocasionan cambios en la estructura, apariencia y propiedades del recubrimiento. El entendimiento de estos factores en el proceso de galvanizado, y de la naturaleza física y química del recubrimiento formado es importante para lograr desarrollar las características deseadas. Los factores claves que influyen en la formación de estas complejas estructuras durante el recubrimiento son: composición química del baño y del acero, temperatura del baño, tiempo de inmersión y velocidad de enfriamiento. (Rico Oviedo, 2012)



Dross

Aleación Zn-Fe (96%Zn-4%Fe P/P) en forma de cristales se debe por el arrastre de sales de hierro de etapas anteriores (decapado, fluxado), que son depositados al fondo de la cuba de zincado. La cantidad de dross es afectada por ciertos factores: temperatura del flux, tiempo de contacto flux-acero, actividad cloruro de amonio-zinc, temperatura del zinc, tiempo de inmersión, rugosidad de la superficie del acero. (American Galvanizers Association, 2015)

Para evitar la formación excesiva de dross en el baño de zincado, es necesario considerar el tiempo de inmersión en la sal de flux, tiempo de secado, mantener la concentración de la sal de flux, controlar las temperaturas de la etapa de zincado.

2.6 Composición química de los baños de zincado

El volumen de trabajo de zincado debe contener un valor promedio no menor del 98,5 % P/P de zinc en peso (INEN 2483, 2009), mientras que la Norma Internacional (ISO 1461:2009, 2010) establece que el baño de galvanizado contenga zinc fundido y otros elementos aleantes o impurezas que no exceda el 1,5% en peso, estas impurezas en algunas circunstancias son adicionadas intencionalmente con el objetivo de influir en la morfología y la cinética de crecimiento de la capa de zinc. (Rico O. & Carrasquero, 2017)

Las tablas 2.11 y 2.12 indican porcentaje en peso de la composición del baño de zinc, los cuales fueron objetos de estudios de algunos autores obteniendo resultados en la reducción de la capa de revestimiento y su morfología.

Tabla 2.11 Composición química de baño de zinc en % peso

Aleación	Ni (%)	Bi (%)	Sn (%)	Pb (%)	Zn (%)
Zn-Ni-Bi-Sn	0.16	0.71	2.95	-	96.18
Zn-Ni-Pb-Sn	0.16	-	2.88	0.72	96.24
Zn-Ni-Pb-Bi-Sn	0.16	0.41	3.49	0.43	95.51

Fuente: (Radu & Vlad, 2011)



Tabla 2.12 Composición Química de baño de zinc en % peso

Metal	%
Bismuto	0.06-0.10
Níquel	0.003-0.05
Estaño	0.3-0.5
Aluminio	0.01-0.14

Fuente: (De Lima, Guessser, & Masiero, 2007)

Kania & Liberski, 2012; manifiestan que la adición de Aluminio, Estaño, Níquel y Bismuto introducidos conjuntamente en un baño de zinc es una de las posibles composiciones químicas de dicho baño. Esta formulación permite combinar beneficios, tales como; reducción de las pérdidas de zinc como resultado de la oxidación de la superficie del baño, la formación reducida de capas demasiadas gruesas y el nivel insuficiente de fluidez. Los beneficios de la adición de cada uno de estos elementos en los revestimientos son descritos en la tabla 2.13.

Tabla 2.13 Características de los metales, cambios que producen en el baño de zinc y su posterior revestimiento en los tubos de acero.

Elemento	Información general	Características que le confieren al baño de zinc
Aluminio	<p>Símbolo: Al</p> <p>Número atómico: 13</p> <p>Peso atómico: 26.981</p> <p>Punto de fusión: 660°C</p> <p>Punto de ebullición: 2519°C</p> <p>Densidad: 2698,4Kg/m³</p> <p>Metal ferromagnético, blando, de baja resistencia mecánica, maleable, alta resistencia a la corrosión, gran conductividad eléctrica y térmica, puede formar aleaciones con otros</p>	<p>El Aluminio es adicionado en 0,01 %P/P proporcionando un aspecto brillante al acero galvanizado, este fenómeno se debe a la fuerte tendencia del aluminio y el oxígeno para combinarse y formar Al₂O₃. La adición de Aluminio desde 0 a 0,028% P/P en el sistema Fe-Zn-Ti-Al disminuye el espesor tanto para las capas frágiles, así como para el recubrimiento total. (Roa Saavedra,</p>



	elementos para aumentar su resistencia.	2004); (Rico O. & Carrasquero, 2017)
Bismuto	Símbolo: Bi Número atómico: 83 Peso atómico: 208.980 Punto de fusión: 271.3°C Punto de ebullición:1560°C Densidad: 9780Kg/m ³	La adición de 0,1% en peso de Bi tiene un rendimiento equivalente a agregar 1% en peso en Pb, proporcionando una aleación muy estable y se repone proporcionalmente a la cantidad de zinc agregado al baño. En concentraciones comprendidas entre 0,1 y 0,5% tiene una baja tensión superficial, mejora la fluidez del baño de zinc, proporciona piezas galvanizadas sin exceso de este, reducción en la generación de dross y consumo de zinc. (Tozin, 2017); (GAGNÉ, 2018)
Níquel	Símbolo: Ni Número atómico: 28 Peso atómico: 58.71 Punto de fusión: 1453°C Punto de ebullición: 2730°C Densidad: 8900Kg/m ³	La adición de Níquel en el baño de galvanizado permite limitar la reactividad del acero, el rango óptimo debería estar entre 0,04-0,06 % en peso, mantener un límite inferior del contenido de níquel permite limitar el impacto del silicio sobre el crecimiento de la capa de revestimiento en el acero Sandelin, mientras que a un límite superior evita la formación excesiva de zinc duro. (Kania & Liberski, 2014)
	Símbolo: Sn Número atómico: 50 Peso atómico: 118.19	El propósito de la adición de estaño al baño es obtener cristales de zinc más grandes y aumentar el brillo, los



Estaño	Punto de fusión: 231.9°C Punto de ebullición: 2270°C Densidad: 7300Kg/m3 Es dúctil a temperaturas normales y se mezcla fácilmente con otros metales para formar aleaciones (LENNTECH, 2018)	cristales de la capa zeta (ζ) son más grandes de lo habitual, lo cual hace que esta capa sea menos gruesa y compacta; sin embargo, el estaño no afecta la formación de la fase delta(δ). (De Lima, Guessser, & Masiero, 2007)
---------------	--	--

Los autores reportan su estudio en base en el sistema Zn-(0,0076 %P/P Al- 0,045 %P/P Ni-0,073 %P/P Bi-0,68 %P/P Sn) en el cual variaron la temperatura (440-460°C y el tipo de acero empleado (diferente contenido de silicio), obteniendo resultados de revestimiento expresados en la figura 2.9; mientras que en la figura 2.10 en el año 2014 emplearon el sistema Zn-(0,0089 %P/P Al-0,063 %P/P Ni-0,54 %P/P Pb). (Kania & Liberski,2012,2014)

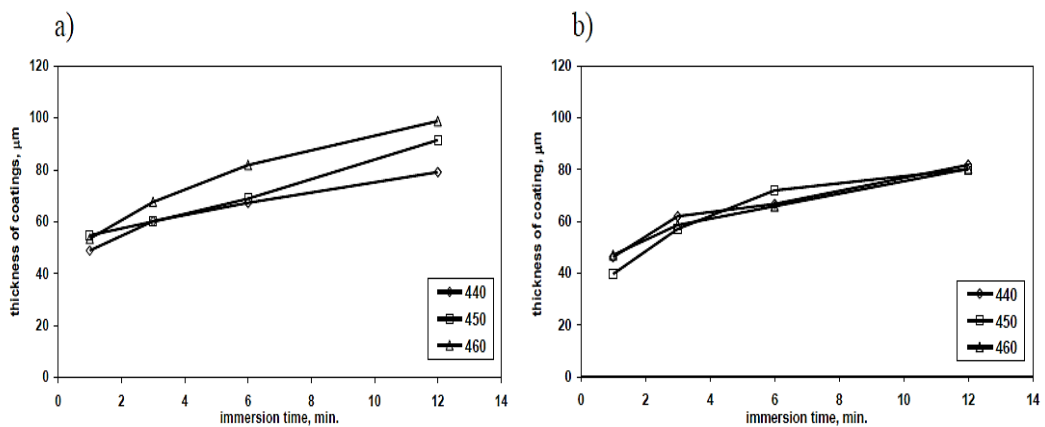


Figura 2.9: Cinética de crecimiento de recubrimientos obtenidos en el baño Zn-AlNiBiSn para el acero 0.02Si (a) y para el acero 0.05Si (b)

Fuente: (Kania & Liberski, 2012)

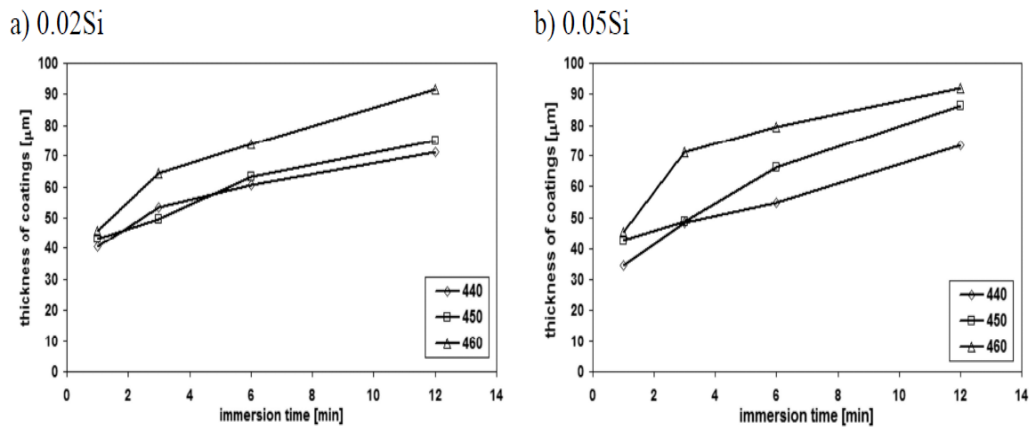


Figura 2.10: Cinética de crecimiento de los recubrimientos obtenidos en el baño de Zn-Al-Ni-Pb en: a) acero con bajo contenido de silicio-0.02 y b) acero Sandelín-0.05Si

Fuente: (Kania & Liberski, 2014)

2.7 Propiedades del galvanizado

- **Resistencia a la abrasión:** Se desarrolla capas resistentes que están fuertemente unidas protegiendo a la pieza contra el daño por la manipulación hostil durante el transporte y la instalación.
- **Dureza:** Las capas gama, delta y zeta son más duras hasta 240Hv (dureza de Vickers) mientras que el acero desnudo 160Hv, la capa eta es blanda y dúctil.
- **Protección Uniforme:** Durante la reacción metalúrgica entre el acero y el zinc el revestimiento crece perpendicularmente a todas las superficies, es por eso que es tan espeso en la esquinas y bordes.
- **Longevidad:** Su tiempo de vida es por décadas, siendo así su tasa de corrosión de 1/30 del acero desnudo en ambientes similares.

2.8 Inspección de la pieza

De acuerdo con la Norma (ISO 1461:2009, 2010) en relación al aspecto de la pieza como un criterio de aceptación las superficies significativas de todas las piezas sometidas a galvanizado por inmersión en caliente, examinadas con visión normal o corregida desde una distancia mínima de 1 metro, no deberían presentar nódulos, ampollas (prominencias sin metal sólido en su interior), rugosidades y puntos punzantes (que puedan causar lesiones), así como de zonas no recubiertas.

De acuerdo a la norma ecuatoriana NTE INEN 2483 (2009) especifica espesores de recubrimientos en base a la categoría y espesor del material que se esté galvanizando



las cuales se ilustran en las tablas 2.14 y 2.15; mientras que el acabado debe ser continuo, moderadamente liso y uniforme, tanto en espesor como en peso, tamaño y forma.

Tabla 2.14 Grados de espesor de recubrimientos promedio mínimo por categoría de material para elementos individuales y elementos armados

Categoría del material	Todas las muestras controladas				
	Margen de espesor del acero (mm)				
	< 1,6	≥ 1,6 < 3,2	≥ 3,2 < 4,8	≥ 4,8 < 6,4	≥ 6,4
Perfiles y placas estructurales	45	65	75	85	100
Flejes (tiras) y barras	45	65	75	85	100
Cañería y tubería	45	45	75	75	75
Alambre	35	50	60	65	80

Fuente: (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NTE INEN 2483, 2009)

Tabla 2.15 Grado de espesor del recubrimiento

Grado de recubrimiento	µm	g/m ²
35	35	245
45	45	320
50	50	355
55	55	390
60	60	425
65	65	460
75	75	530
80	80	564
85	85	600
100	100	705

Fuente: (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NTE INEN 2483, 2009)

2.8.1 Apariencia y condiciones de acabado superficial

Terminado el proceso de galvanizado se procede con el enfriamiento de la pieza, en algunas ocasiones se utiliza agua a ebullición o enfriamiento a temperatura ambiente; posterior a esto la pieza posee un aspecto brillante muy característico que desaparece conforme transcurre el tiempo, los defectos comunes que se presentan se detallan en la tabla 2.16. (ANDI-FEDIMENTAL, 2014)



Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth

Tabla 2.16 Tipos de apariencia y características de acabado superficial

Defectos	Descripción
<p data-bbox="300 405 663 439">Recubrimiento gris oscuro</p> 	<p data-bbox="703 371 1327 757">Se desarrolla en zonas localizadas, en algunas ocasiones se expande. Se lleva a cabo en aceros con contenidos altos de silicio, fósforo y carbono, el cual se vuelve más reactivo al contacto con el zinc, este efecto se disminuye normalizando la calidad del acero. Otros factores también se deben al enfriamiento lento después de la galvanización.</p>
<p data-bbox="300 952 660 985">Manchas o líneas de óxido</p> 	<p data-bbox="703 918 1327 1153">Se produce cuando la pieza no se extrae a velocidad constante del horno de galvanización, el cual depende de la forma y del drenaje de la pieza, este defecto no compromete la vida útil del revestimiento.</p>
<p data-bbox="300 1503 660 1536">Exceso de zinc acumulado</p> 	<p data-bbox="703 1469 1327 1906">Se produce una descamación del revestimiento de $\geq 300\mu\text{m}$, a causa de altas tensiones provocadas en la interfaz del acero produciendo una separación del revestimiento. Este efecto se debe a demasiado tiempo de permanencia en el baño de zinc, superficie del material demasiado rugosa por un decapado excesivo y por la temperatura del baño de zinc demasiado alta, el producto es rechazado y regalvanizado.</p>



<p>Grumos en la superficie de la pieza</p> 	<p>Depósitos de diversas formas sobre la superficie del material galvanizado producido por sedimentos contaminantes presentes en el baño.</p>
<p>Aspereza general</p> 	<p>Formación irregular de capas de zinc y hierro, debido a la composición química del acero, por exceso de extracción, inmersión por tiempo prolongado y alta temperatura del zinc fundido</p>

Fuente: (ANDI-FEDIMENTAL, 2014); (Fonseca Vega & Guamán Campoverde, 2011)

2.9 Herramientas estadísticas

Para poder analizar las variables que influyen de manera crítica en el proceso de galvanizado que normalmente se presentan como valores numéricos con fluctuación aleatoria se emplean herramientas estadísticas.

Son técnicas que ayudan a resolver problemas de un proceso mediante la observación, evaluación y comparación de las características con otro proceso tipo estándar. La característica de un producto está determinada por la calidad (propiedades físicas, químicas, mecánicas, estéticas, durabilidad, funcionamiento, etc.); que en conjunto determinan el aspecto y comportamiento del mismo. (ARANGO MAZARIEGOS, 2004)

1. Hoja de recolección de datos
2. Histograma
3. Diagrama de Pareto
4. Diagrama de causa efecto
5. Diagrama de dispersión
6. Estratificación
7. Gráficos de control

2.9.1 Histograma

Representación gráfica de la distribución de un conjunto de datos o de un variable, donde los datos se clasifican por su magnitud en cierto número de clases. Permite visualizar la tendencia central, la dispersión y la forma de la distribución.

2.9.2 Gráficos de control

Permiten evaluar si un proceso está o no en un estado de control estadístico dentro de los límites, determinan el rango de variabilidad estadística aceptable para la variable que se esté monitoreando. (Pierdant Rodríguez & Rodríguez Franco, 2009)

Cartas de control por variables: Se emplean en el caso que se efectúan mediciones en determinada escala, estas cartas pueden explicar los datos del proceso en términos tanto de su dispersión como de su localización, por lo que siempre se analizan en pares, tales como las cartas: \bar{x} -R (media y rango), x-MR (valor individual y rango móvil), \tilde{x} -R (mediana y rango), \bar{x} -s (media y desviación estándar).

Cartas de control por atributos: Se emplean cuando se requiere un registro de observaciones sobre una característica, como el número de artículos defectuosos en una muestra (gráfico de control de porcentaje **p**, gráfico de número de unidades defectuosas **np**, gráfico de la evolución de los defectos presentes en muestras de tamaño constante **c**, gráfico de los defectos por unidad presentes en muestras tomadas a intervalos fijos de tiempo **u**). (Navadi, 2006)

Carta de control x-MR

Es un diagrama para variables de tipo continuo. Pero en lugar de aplicarse a procesos masivos se emplea a procesos lentos, en los cuales para obtener una medición o una muestra de la producción se requieren periodos relativamente largos.

I. Carta de control individual

Límite superior de control	$(UCL) = \bar{x} + 3 \sigma_{\bar{x}}$	Ecuación 3
----------------------------	--	------------



Universidad de Cuenca

Límite central $(\bar{x})=\bar{x}$ Ecuación 4

Límite inferior de control $(LCL)=\bar{x} - 3 \sigma_{\bar{x}}$ Ecuación 5

Donde:

\bar{x} : la media de los datos

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\bar{R}}{1,128}$$

II. Carta de rangos móviles

Muestra los valores de rangos móviles de orden 2 con el fin de detectar cambios en la dispersión del proceso y se calcula de la siguiente manera:

Límite superior de control $(UCL)=3,2686*\bar{R}$ Ecuación 6

Límite central $(\bar{x})=R$ Ecuación 7

Límite inferior de control $(LCL)=0$ Ecuación 8

Carta de control \bar{x} -R

- I. La carta \bar{x} analiza la variación entre medias de los subgrupos, detectando cambios significativos en la media del proceso, cuando ocurre cambios la curva se desplaza enviando señales fuera de control. Cuenta con una línea central y con límites superior e inferior de control, se dice que el proceso está bajo control cuando las medias están dentro de los límites, y cuando las medias estén fuera se trata de un proceso sin control. (Pierdant Rodríguez & Rodríguez Franco, 2009)

Las fórmulas para calcular los límites superiores e inferiores son los siguientes:

Límite superior de control $(UCL)=\bar{x} + A_2R$ Ecuación 9

Límite central $(\bar{x})=\bar{x}$ Ecuación 10

Límite inferior de control $(LCL)=\bar{x} - A_2R$ Ecuación 11

Donde:

\bar{x} : medias de las muestras

A_2 : factor que se calcula en relación al tamaño de la muestra n

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



R= rango promedio

- II. La carta R analiza la variación entre los rangos de los subgrupos, permitiendo detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso, presenta límite central y límites superior e inferior de control; se dice que el proceso está bajo control con respecto a su variabilidad cuando no hay subgrupos fuera de los límites de control caso contrario se estimará que el proceso está fuera de control en relación con su variabilidad. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013).

Las fórmulas que se utilizan para calcular los límites son los siguientes:

$$\text{Límite superior de control (UCL)} = D_3 R \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\text{Límite central (R)} = R \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Límite inferior de control (LCL)} = D_4 R \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

R= Rango promedio de las muestras

D_3, D_4 = Factor para el cálculo del límite de control que está en relación al tamaño de la muestra n.

2.9.3 Capacidad de un proceso

Es el grado de amplitud que tiene un proceso para cumplir con las especificaciones técnicas deseadas con respecto al valor nominal para una determinada característica. Si la capacidad de un proceso es alta se determina que el proceso es capaz y se mantendrá estable a lo largo del tiempo concluyendo que el proceso está bajo control, caso contrario el proceso no será adecuado para el trabajo y requiere modificaciones. (Besterfield & H, 2009)

Índice de capacidad potencial del proceso (C_p)

Es el cociente entre el ancho de especificaciones y la amplitud de la variación natural del proceso, es un índice a corto plazo con respecto a su alcance temporal y el proceso está centrado en los límites de especificación. Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Universidad de Cuenca

σ : Desviación estándar del proceso a corto plazo

USL: Límite de especificación superior

LSL: Límite de especificación inferior

Para que un proceso sea considerado capaz debe cumplir con los valores indicados en la tabla 2.17 y su interpretación con respecto a valores una vez aplicando la ecuación 15.

Tabla 2.17 Valores de C_p y su interpretación

Valor de C_p	Categoría del proceso	Decisión (proceso está centrado)
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Calidad 6σ .
$C_p > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < C_p < 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Requiere de un análisis y de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria.
$C_p < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias.

Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)

Índice de capacidad real (C_{pk})

El proceso no está centrado en los límites de especificación, pero está contenidos en ellos. Es así que se da las siguientes interpretaciones (tabla 2.18):

Tabla 2.18 Interpretaciones de C_{pk}

Valor de C_{pk}	Interpretación
$C_{pk} \approx C_p$	El proceso está muy cercano al punto medio de especificaciones.



$C_{pk} \ll C_p$	La media del proceso está alejada del centro de las especificaciones indicando la capacidad real del proceso y se debe corregir descentralización.
$C_{pk} > 1.25$	El proceso es capaz
$C_{pk} < 1$	El proceso no cumple por lo menos con una de las especificaciones

Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)

Índice P_p

Indicador del desempeño potencial del proceso, que se calcula en forma similar al índice C_p , pero usando la desviación estándar de largo plazo.

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_L} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

σ_L : Desviación estándar del proceso a largo plazo

USL: Límite de especificación superior

LSL: Límite de especificación inferior

Índice P_{pk}

Indicador del desempeño real del proceso, que se calcula en forma similar al índice C_{pk} por lo que se da las mismas interpretaciones (tabla 2.18) al analizar el histograma, pero usando la desviación estándar de largo plazo.

Índice de inestabilidad, S_t

Proporciona una magnitud de qué tan inestable es el proceso, cuyos valores se detectan en la gráfica de control cuando están fuera de ella, su fórmula es la siguiente:

$$S_t = \frac{\text{Número de puntos especiales}}{\text{Número total de puntos}} * 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:



Universidad de Cuenca

Número total de puntos: Cantidad de puntos que se graficaron en la carta de control en un determinado periodo.

Número de puntos especiales: Cantidad de puntos fuera del gráfico de control durante ese mismo periodo.

Estado de un proceso

Consiste en analizar al proceso, su estabilidad y capacidad a través del tiempo, es así que un proceso será capaz cuando cumple con especificaciones de tal forma que el nivel de inconformidades es bajo para garantizar que no habrá esfuerzos inmediatos para tratar de mejorar su capacidad. La estabilidad de un proceso se define como la variación del mismo a través del tiempo; si es estable (control estadístico) es predecible en el futuro inmediato. En función de su capacidad y estabilidad se definen 4 categorías que se indican en la figura 2.11 y la tabla 2.19 que analiza su interpretación. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)

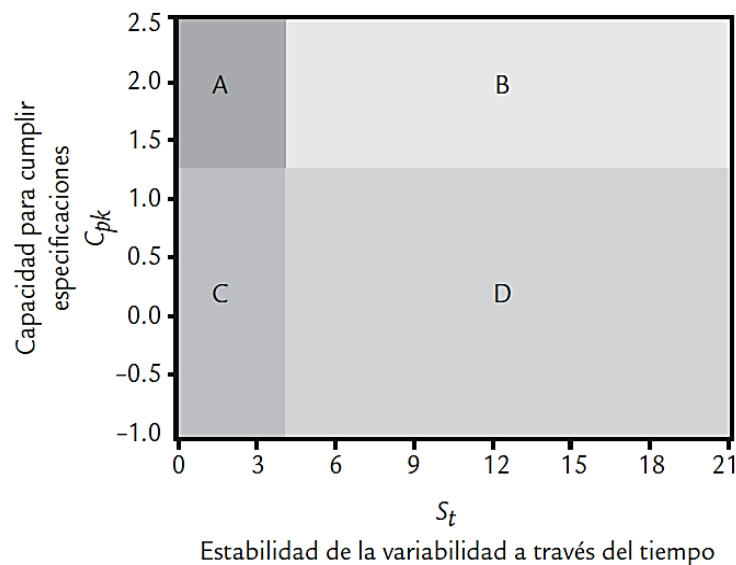


Figura 2.11: Categorías de los estados de un proceso en función de los índices de inestabilidad S_t y de la capacidad real C_{pk}

Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)



Tabla 2.19 Categorías de los estados de un proceso y su interpretación

		¿El proceso es estable? Herramientas: Cartas de control e índice de inestabilidad	
		SÍ	NO
¿El proceso es capaz? Herramientas: Estudios de capacidad e índices C_p y C_{pk}	SÍ	A (estable y capaz)	B (capaz pero inestable)
	NO	C (estable pero incapaz)	D (inestable e incapaz)

Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)

Proceso Tipo A (capaz y estable)

Proceso que cumple con las especificaciones y es predecible en el futuro inmediato. Realizar actividades enfocadas a mantener ese estado de proceso y explorar alternativas para mejorar su productividad y operatividad.

Proceso Tipo B (capaz pero inestable)

Funciona en presencia de causas especiales de variación, pero estas son tales que el proceso es capaz de cumplir con especificaciones. Para mejorar este proceso se sugiere la identificación y eliminación de las causas de la inestabilidad, se aplica las mismas actividades sugeridas para el proceso tipo D.

Proceso Tipo C (estable pero incapaz)

Proceso catalogado como estable, pero con baja capacidad de cumplir especificaciones. Para mejorar este proceso se debe contar con la siguiente estrategia:

1. Revisar y mejorar la aplicación de las cartas de control.
2. Investigar las causas de la baja capacidad mediante un proyecto de mejora.
3. Volver a evaluar el estado del proceso.

Proceso Tipo D (inestable e incapaz)

No cumple con especificaciones, las causas especiales de variación aparecen con frecuencia, produce mala calidad y su desempeño es difícil de pronosticar. Para mejorar este proceso se recomienda:

1. Orientar esfuerzos de mejora, detectar y eliminar causas de inestabilidad.
2. Mejorar la aplicación y el uso de las cartas de control.



Universidad de Cuenca

3. Con la ayuda de datos históricos localizar el patrón de inestabilidad.
4. Hacer una lista de las variables de entrada o situaciones que pueden causar ese tipo de patrón.
5. Confirmar cuál de ellas realmente genere esos cambios en el proceso.

2.10 Diseño de experimentos

Consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcione evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas sobre determinada situación. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008)

2.10.1 Diseño factorial

Sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas; es así, que en ocasiones un diseño factorial permite determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor. La manera en que se estudia la influencia que tiene cada factor sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos.

Los factores pueden ser:

- **Cualitativos:** Sus niveles toman valores discretos o de tipo nominal (máquinas, lotes, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.).
- **Cuantitativos:** Sus niveles toman valores dentro de cierto intervalo (humedad, velocidad, presión, tiempo, etc.). (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013)

Arreglo factorial

Conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse al considerar todas las posibilidades de combinación de los niveles de los factores.

Diseño factorial general

Considere f factores A, B, C, ..., K con niveles a, b, c, ..., k, respectivamente, donde la letra K denota al f -ésimo o último factor del conjunto a estudiar. Por ejemplo, consideremos 3 factores cada uno con 3 niveles, el diseño factorial será 3^3 lo cual da un total de 27 efectos. Casi cualquier software estadístico incluye procedimientos para realizar el análisis de un diseño factorial, tal es el caso de Minitab.



Universidad de Cuenca

2.10.2 Software estadístico Minitab

Software diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, ofrece al usuario herramientas precisas y de fácil manejo, enfocada al análisis de datos, mejora de productos y servicios para implementar proyectos de control de calidad.

La secuencia para obtener un diseño factorial general es: Stat → DOE → Factorial → Create Factorial Design y por último se elige la opción General Full Factorial Design.

2.11 Optimización

Técnica que busca la mejor solución de un problema extrayendo información sobre el punto óptimo a partir de un modelo ajustado, es así que en ciertos problemas se requiere que minimiza los costes o maximice los beneficios.

Metodología de la superficie de respuesta: Estrategia experimental y de modelación que permite encontrar condiciones de operación óptima de un proceso.

Optimización individual: Combinación de los factores de control donde se predice el mejor valor posible de una respuesta dentro de la región experimental. (Lozano & Guillermo, 2009)



Capítulo III

3. Metodología

3.1 Proceso experimental

3.1.1 Diseño de cartas de control

Recopilación de información del proceso de galvanizado de tubos de acero en la empresa TUGALT S.A. de diferentes diámetros que se tratan en la empresa y la composición química que se detalla en la tabla 1.2; considerando los diferentes parámetros físico-químicos: pH, concentración %P/P de los baños, concentración de hierro, temperatura, grados Baumé, etc. basados en *American Galvanizers Association* el cual establece parámetros óptimos de funcionamiento y de esta manera definir rangos. Conociendo estos rangos se procederá a realizar cartas de control con un análisis de siete semanas (26/08/2019-04/10/2019) para cada parámetro.

- a. Grado de acidez o alcalinidad: Potenciómetro
- b. Métodos volumétricos: Titulación ácido-base, titulación redox (permanganometría- cuantificación de hierro)
- c. Argentometría
- d. Aerómetro: Grados Baumé
- e. Termómetro digital: Temperatura (°C)
- f. Determinación de cloruro de amonio y cloruro de zinc (g/L)

Para la realización de lo cuantificación de los parámetros se aplican los métodos del apéndice A.

Consideraciones al realizar las cartas de control:

Para la elaboración de las cartas de control se tomó en cuenta las siguientes condiciones:

- I. Analizar si los valores obtenidos son normales o anormales mediante una prueba de normalidad, cuyo valor debe ser $p \geq 0,05$ para considerar una muestra de datos normal.
- II. Cuando $p < 0,05$ concluye que los datos no provienen de una población normal, encontrar una distribución anormal que modele de forma apropiada los datos. Una alternativa es hacer uso de transformaciones (transformación Johnson) que permitan llevar los datos a una distribución normal.



III. De acuerdo al resultado de p se procede a emplear los diferentes gráficos que se acoplen al tipo de datos, y de ser necesario se aplicará la transformación de la muestra; se graficará mediante distribución normal utilizando el análisis Sixpack que permite analizar varias herramientas: cartas de control, gráficos de dispersión, histograma de capacidad, gráfico de probabilidad.

3.1.2 Sistema de estudio “proceso de galvanizado” a escala de laboratorio

Una vez determinados los parámetros físico-químicos de los baños se procederá a emplear un sistema a escala de laboratorio que permitirá evaluar cada baño obteniendo un óptimo que minimizará el consumo de insumos y tiempo empleado. Para un manejo adecuado de las etapas del galvanizado a escala de laboratorio se empleará el siguiente diagrama de flujo descrito en la figura 3.1.

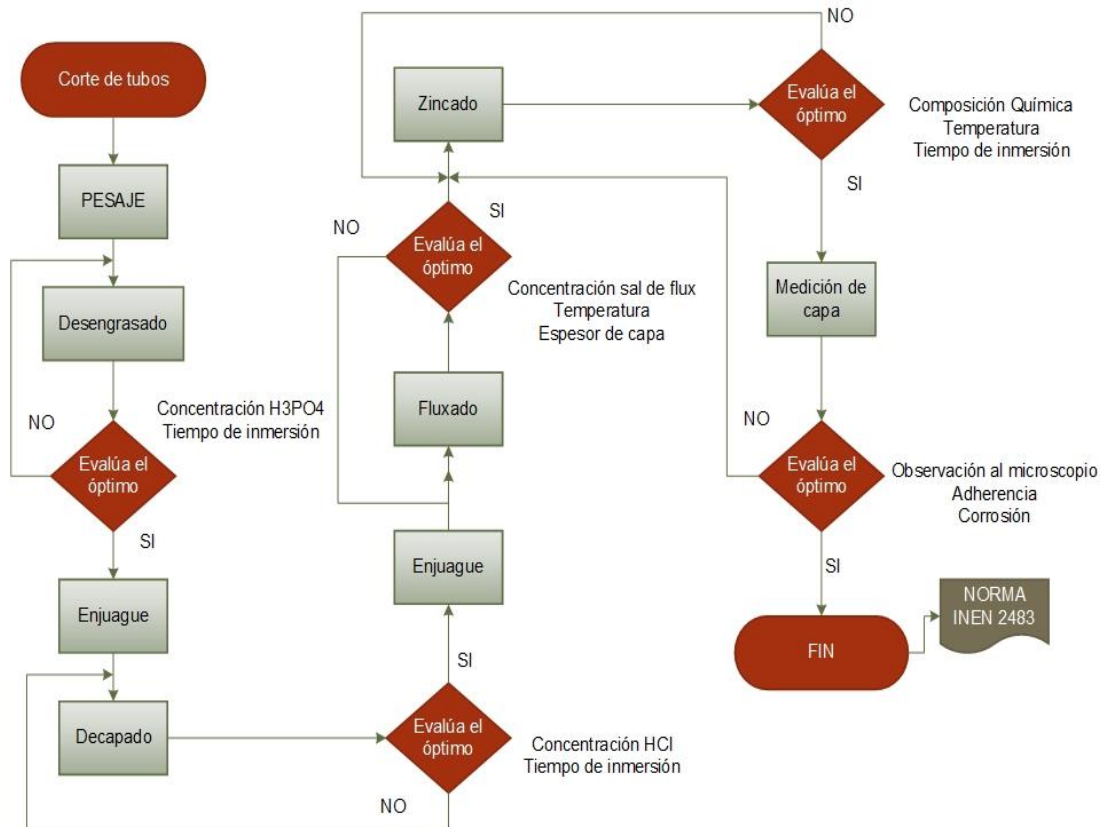


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso general a escala de laboratorio

Fuente: Autores.

- Los números de experimentos necesarios en cada etapa, son evaluados por el software Minitab 17, permitiéndonos introducir las variables a analizar como son: concentración, tiempo y temperatura, en la tabla 3.1 se indican estas variables y su respectiva respuesta a cada etapa



Tabla 3.1 Dosificaciones de los baños desengrasado, decapado, fluxado y temperatura

Etapa – Variables-Número de experimentos	Visualización de los experimentos a realizarse																																																																																																																																				
<p>-Desengrasado</p> <p>-Variables:</p> <p>Tiempo: 5,10,15 min</p> <p>Concentración: 1,3,5 %P/P</p> <p>-N° de experimentos: 9</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C1</th> <th>C2</th> <th>C3</th> <th>C4</th> <th>C5</th> <th>C6</th> </tr> <tr> <th>StdOrder</th> <th>RunOrder</th> <th>PtType</th> <th>Blocks</th> <th>Concentración</th> <th>Tiempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>10</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>15</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>10</td></tr> <tr><td>6</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>15</td></tr> <tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>8</td><td>8</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>10</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>15</td></tr> </tbody> </table>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Concentración	Tiempo	1	1	1	1	1	5	2	2	1	1	1	10	3	3	1	1	1	15	4	4	1	1	3	5	5	5	1	1	3	10	6	6	1	1	3	15	7	7	1	1	5	5	8	8	1	1	5	10	9	9	1	1	5	15																																																																		
C1	C2	C3	C4	C5	C6																																																																																																																																
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Concentración	Tiempo																																																																																																																																
1	1	1	1	1	5																																																																																																																																
2	2	1	1	1	10																																																																																																																																
3	3	1	1	1	15																																																																																																																																
4	4	1	1	3	5																																																																																																																																
5	5	1	1	3	10																																																																																																																																
6	6	1	1	3	15																																																																																																																																
7	7	1	1	5	5																																																																																																																																
8	8	1	1	5	10																																																																																																																																
9	9	1	1	5	15																																																																																																																																
<p>-Decapado</p> <p>-Variables:</p> <p>Tiempo: 8,12,16,20min</p> <p>Concentración:</p> <p>8,10,12,14,16%P/P</p> <p>- N° de experimentos: 20</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C1</th> <th>C2</th> <th>C3</th> <th>C4</th> <th>C5</th> <th>C6</th> </tr> <tr> <th>StdOrder</th> <th>RunOrder</th> <th>PtType</th> <th>Blocks</th> <th>Concentración</th> <th>Tiempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td><td>8</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td><td>12</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td><td>16</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td><td>20</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>10</td><td>8</td></tr> <tr><td>6</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>10</td><td>12</td></tr> <tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>1</td><td>10</td><td>16</td></tr> <tr><td>8</td><td>8</td><td>1</td><td>1</td><td>10</td><td>20</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>12</td><td>8</td></tr> <tr><td>10</td><td>10</td><td>1</td><td>1</td><td>12</td><td>12</td></tr> <tr><td>11</td><td>11</td><td>1</td><td>1</td><td>12</td><td>16</td></tr> <tr><td>12</td><td>12</td><td>1</td><td>1</td><td>12</td><td>20</td></tr> <tr><td>13</td><td>13</td><td>1</td><td>1</td><td>14</td><td>8</td></tr> <tr><td>14</td><td>14</td><td>1</td><td>1</td><td>14</td><td>12</td></tr> <tr><td>15</td><td>15</td><td>1</td><td>1</td><td>14</td><td>16</td></tr> <tr><td>16</td><td>16</td><td>1</td><td>1</td><td>14</td><td>20</td></tr> <tr><td>17</td><td>17</td><td>1</td><td>1</td><td>16</td><td>8</td></tr> <tr><td>18</td><td>18</td><td>1</td><td>1</td><td>16</td><td>12</td></tr> <tr><td>19</td><td>19</td><td>1</td><td>1</td><td>16</td><td>16</td></tr> <tr><td>20</td><td>20</td><td>1</td><td>1</td><td>16</td><td>20</td></tr> </tbody> </table>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Concentración	Tiempo	1	1	1	1	8	8	2	2	1	1	8	12	3	3	1	1	8	16	4	4	1	1	8	20	5	5	1	1	10	8	6	6	1	1	10	12	7	7	1	1	10	16	8	8	1	1	10	20	9	9	1	1	12	8	10	10	1	1	12	12	11	11	1	1	12	16	12	12	1	1	12	20	13	13	1	1	14	8	14	14	1	1	14	12	15	15	1	1	14	16	16	16	1	1	14	20	17	17	1	1	16	8	18	18	1	1	16	12	19	19	1	1	16	16	20	20	1	1	16	20
C1	C2	C3	C4	C5	C6																																																																																																																																
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Concentración	Tiempo																																																																																																																																
1	1	1	1	8	8																																																																																																																																
2	2	1	1	8	12																																																																																																																																
3	3	1	1	8	16																																																																																																																																
4	4	1	1	8	20																																																																																																																																
5	5	1	1	10	8																																																																																																																																
6	6	1	1	10	12																																																																																																																																
7	7	1	1	10	16																																																																																																																																
8	8	1	1	10	20																																																																																																																																
9	9	1	1	12	8																																																																																																																																
10	10	1	1	12	12																																																																																																																																
11	11	1	1	12	16																																																																																																																																
12	12	1	1	12	20																																																																																																																																
13	13	1	1	14	8																																																																																																																																
14	14	1	1	14	12																																																																																																																																
15	15	1	1	14	16																																																																																																																																
16	16	1	1	14	20																																																																																																																																
17	17	1	1	16	8																																																																																																																																
18	18	1	1	16	12																																																																																																																																
19	19	1	1	16	16																																																																																																																																
20	20	1	1	16	20																																																																																																																																
<p>-Fluxado</p> <p>-Variables:</p> <p>Tiempo: 1min</p> <p>Concentración:</p> <p>410,510,610,710,810 g/L</p> <p>Temperatura: 30, 50,70 °C</p> <p>-N° de experimentos: 15</p>																																																																																																																																					

C1	C2	C3	C4	C5	C6
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Concentración	Temperatura
2	2	1	1	410	50
3	3	1	1	410	70
4	4	1	1	510	30
5	5	1	1	510	50
6	6	1	1	510	70
7	7	1	1	610	30
8	8	1	1	610	50
9	9	1	1	610	70
10	10	1	1	710	30
11	11	1	1	710	50
12	12	1	1	710	70
13	13	1	1	810	30
14	14	1	1	810	50
15	15	1	1	810	70

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Metal A	Metal B	Tiempo	Metal C	Metal D	Temperatura
1	1	1	1	0,25	0,050	2	0,07	0,025	450
2	2	1	1	0,25	0,050	4	0,07	0,025	450
3	3	1	1	0,25	0,050	6	0,07	0,025	450
4	4	1	1	0,25	0,054	2	0,07	0,025	450
5	5	1	1	0,25	0,054	4	0,07	0,025	450
6	6	1	1	0,25	0,054	6	0,07	0,025	450
7	7	1	1	0,35	0,050	2	0,07	0,025	450
8	8	1	1	0,35	0,050	4	0,07	0,025	450
9	9	1	1	0,35	0,050	6	0,07	0,025	450
10	10	1	1	0,35	0,054	2	0,07	0,025	450
11	11	1	1	0,35	0,054	4	0,07	0,025	450
12	12	1	1	0,35	0,054	6	0,07	0,025	450

-Zincado
 -Variables
 Tiempo: 2, 4, 6 min
 Temperatura: 450°C
 Concentración:
 Metal A: 0,25-0,35% P/P
 Metal B: 0,05-0,054% P/P
 Metal C: 0,07 %P/P
 Metal D: 0,025 %P/P
 -N° de experimentos: 12

Fuente: Autores.

- Para la preparación de los baños a escala de laboratorio se utilizaron cubas de acero, cuyas dimensiones se ilustran en la figura 3.2.

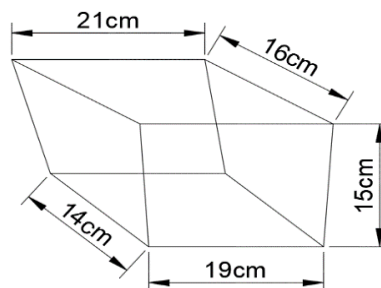


Figura 3.2: Dimensiones de cubas utilizadas para los baños de desengrasado, decapado y fluxado

Fuente: Autores.



Desengrasado y Decapado

- Para la dosificación del baño de desengrasado, se inició a partir de una solución madre al 22% P/P, para llegar a una concentración menor se empleó la ecuación 18:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad \text{Ecuación 18}$$

La obtención de una solución al 5%P/P con un volumen de 1Litro se realizó de la siguiente manera (ecuación 19):

$$V_1 = \frac{5\%P/P * 1L}{22\%P/P} = 0.2272L \quad \text{Ecuación 19}$$

Para las soluciones de decapado se empleó la ecuación 18, partiendo de una solución madre de 34%P/P de ácido clorhídrico.

- El número de experimentos que son necesarios para considerar valida la experimentación se los obtuvo mediante Minitab 17 expresados en la tabla 3.1.
- En cada baño se ingresó cinco tubos de acero de especificación JIS G3132 SPTH 1 (tamaño 2,5 X 1030 mm) con una longitud de 6cm, espesor 2,5mm, diámetro 1" y se codificaron de la siguiente manera (ver figura 3.3).
- En el caso del desengrasado (a) se colocó el orden del experimento, concentración y tiempo (ejemplo: EXPERIMENTO 9,5,15; orden 9, concentración 5%P/P, tiempo de 15 minutos); y en el caso del decapado (b) se colocó las siglas DC, orden de experimento, concentración y tiempo (ejemplo: DC-EXPERIMENTO 20,16,20; orden 20, 16%P/P y tiempo de 20minutos).

a)



b)



Figura 3.3: Codificación de muestras a) Desengrasado, b) Decapado

Fuente: Autores.



- Se procedió al pesaje de cada uno de los tubos antes y después de su ingreso en las distintas soluciones, con el objetivo de evaluar la eficiencia del baño para eliminar impurezas mediante la diferencia de pesos.
- Al finalizar en cada experimento se determinó mediante titulación el contenido de hierro.
- Una vez obtenido los datos de diferencia de peso y contenido de Fe en g/L se procedió a registrar en el software MINITAB 17 para obtener las gráficas correspondientes determinando el óptimo en cada baño.

Fluxado

Se inicia con la preparación de muestras en blanco añadiendo sales de flux en un rango de 160-860g/L para determinar parámetros como: Grados °Be, concentración de Cloruro de zinc, Cloruro de amonio y pH, con el objetivo de determinar el comportamiento de la sal en este rango.

- Según referencia bibliográfica de acuerdo a (Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas, 2013) establece la dosificación de 400g/L de sal de flux; y de acuerdo a parámetros reales utilizados por la empresa esta alrededor de 660-710g/L. Se considera que para obtener un revestimiento adecuado se trabaja en el rango de 410-810g/L.
- Para el número de experimentos a realizar se ingresa como parámetros tiempo (1min), temperatura (30, 50 y 70 °C) y concentraciones de sal de flux (410, 510, 610, 710 y 810 g/L) en el software Minitab 17 (tabla 3.1).
- Se ingresará en cada una de las concentraciones dos tubos y posterior en un baño de zinc por un 1 minuto. Para verificar la eficacia del baño de fluxado, se someterá a cada experimento a la medición de revestimiento (espesor de capa).

3.1.3 Optimización del baño de zincado

De acuerdo a los autores De Lima, Guesser & Masiero (2007), se obtuvieron diferentes valores de recubrimiento mediante la combinación de Al-Sn-Ni-Bi expresados en la tabla 3.2 (por motivos de confidencialidad se manejará la formulación en base a metal A,B,C y D); lo que nos permite evaluar el rango de utilización de las concentraciones de los metales a través de la metodología de la superficie de respuesta, con la ayuda del Software Minitab 17 mediante gráficos y la posible combinación de los mismos para un recubrimiento entre 40-60 μm (figura. 3.4, 3.5, 3.6).



Tabla 3.2 Resultados de revestimientos mediante la combinación de los metales

	% P/P				Revestimiento (µm)
	Metal A	Metal B	Metal C	Metal D	
Zinc puro	0	0	0	0	113
Zinc + 1%Pb	0	0	0	0	109
1	0	0,06	0	0,05	96
2	0	0,06	0	0,003	128
3	0	0,1	0	0,05	99
4	0	0,1	0	0,003	94
5	0,3	0,1	0	0,003	97
6	0,3	0,1	0	0,05	95
7	0,3	0,06	0	0,003	94
8	0,5	0,1	0	0,003	92
9	0,5	0,1	0	0,05	88
10	0,5	0,06	0	0,003	89
11	0,5	0,1	0,01	0,003	93
12	0,5	0,1	0,01	0,05	88
13	0,5	0,06	0,01	0,003	97
14	0,5	0,1	0,14	0,003	79
15	0,5	0,1	0,14	0,05	70
16	0,5	0,06	0,14	0,003	78

Fuente: De Lima, Guesser & Masiero (2007)

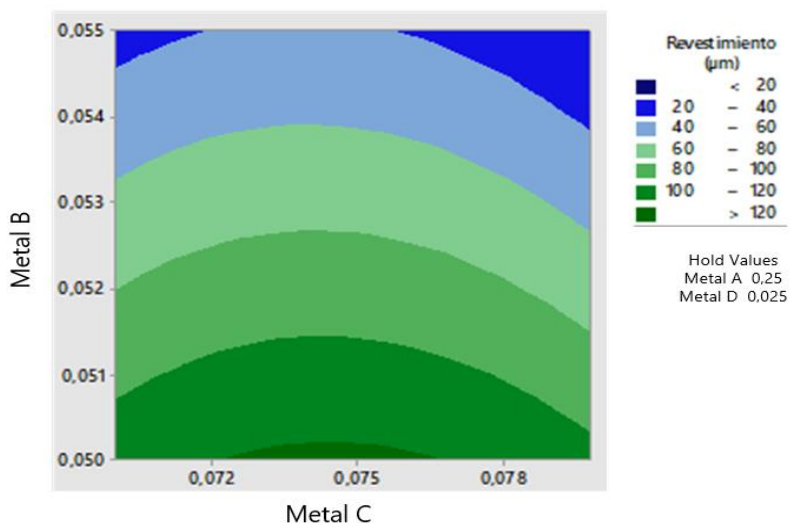


Figura 3.4: Contorno de revestimiento variando Metal B-Metal C, constante Metal A-Metal D

Fuente: Autores.



Universidad de Cuenca

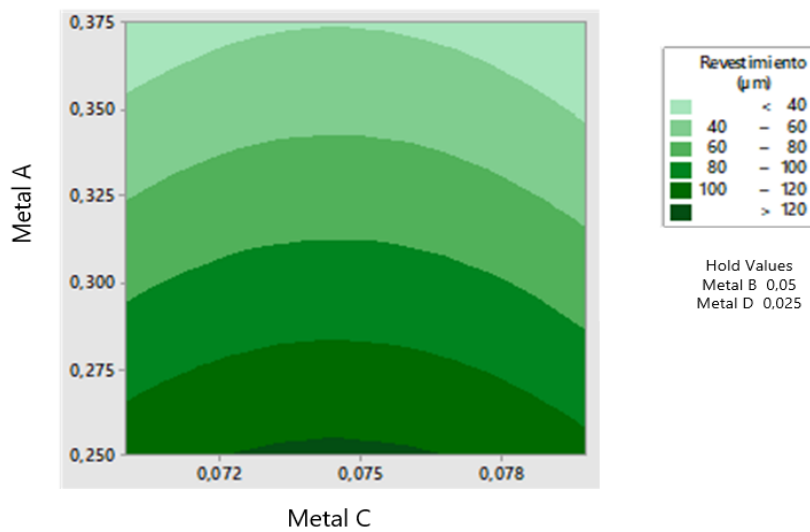


Figura 3.5: Contorno del revestimiento variando Metal A-Metal C, constante Metal B-Metal D

Fuente: Autores.

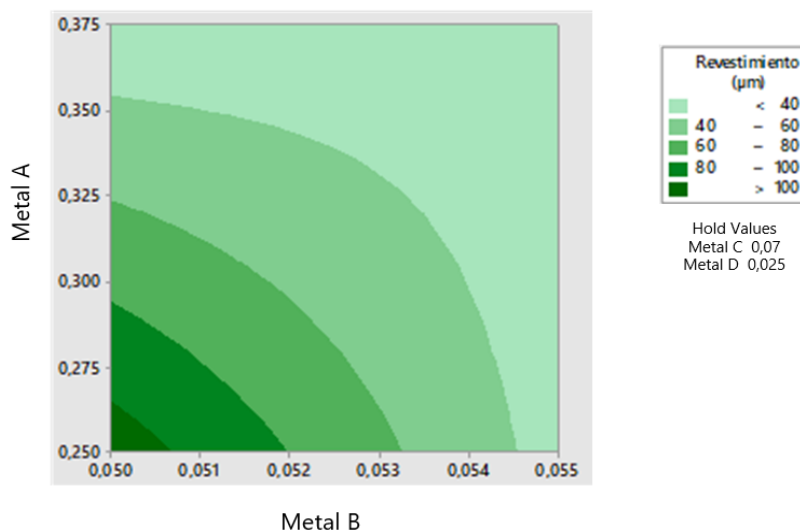


Figura 3.6 Contorno del revestimiento variando Metal A-Metal B, constante Metal C-Metal D

Fuente: Autores.

Se realizará la medición del espesor de la capa de zinc de los tubos mediante medición magnética que evaluará el rango de espesores, determinando exceso o déficit de zinc en los tubos. Para su optimización se llevará a cabo variaciones en la composición química del baño de zinc con otros metales (A-B-C-D) a escala de laboratorio; la dosificación de los metales se efectuará de acuerdo a la tabla 3.3, trabajando a temperatura de 450°C por un tiempo de inmersión de 2,4,6 minutos para la cual se mantendrá la composición de zinc constante 98.5% en peso. Como se observa en la



figura 3.6 el rango de revestimiento no supera las 100 μm manteniendo constante Metal D y Metal C, debido a esto se toma como caso de estudio la composición indicada.

Tabla 3.3 Rango de dosificación de los metales

Metal	%P/P
A	0,25-0,35
B	0,05-0,054
C	0,07
D	0,025

Fuente: Autores.

Para obtener las cantidades de metales a dosificar en el baño se efectuará un diseño experimental en función de las variables antes mencionadas, con la ayuda del software Minitab 17, en la tabla 3.1 se observa el número de experimentos a realizar, tomando en consideración el rango de dosificación expresados en la tabla 3.3 que fueron previamente analizados a partir de las figuras 3.4, 3.5, 3.6. Los metales utilizados en la experimentación tuvieron las siguientes propiedades:

- Metal A: Granular (diámetro de partícula 0,425-2mm), pureza $\geq 99.5\%$.
- Metal B: Granular, pureza $\geq 99.99\%$.
- Metal C: En polvo esférico (diámetro de partícula $\leq 30\mu\text{m}$), pureza 99%.
- Metal D: En polvo (diámetro de partícula $< 50\mu\text{m}$), pureza 99,7%.

En este ensayo se trabajó con 6 probetas de acero de especificación JIS G3132 SPTH 1 con una longitud de 6cm, espesor 2.5mm, diámetro 1" para cada experimento; en las tablas 3.4 y 3.5 se detalla las dosificaciones de los metales en %P/P y gramos respectivamente, con 9 kilogramos de zinc netos.

Tabla 3.4. Dosificaciones de metales en %P/P

N° experimentos	Tiempo (min)	%P/P			
		A	B	C	D
1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)	2	0,25	0,05	0,07	0,025
2 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)	4	0,25	0,05	0,07	0,025



3 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-6min)	6	0,25	0,05	0,07	0,025
4 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-2min)	2	0,25	0,054	0,07	0,025
5 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-4min)	4	0,25	0,054	0,07	0,025
6 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-6min)	6	0,25	0,054	0,07	0,025
7 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)	2	0,35	0,05	0,07	0,025
8 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)	4	0,35	0,05	0,07	0,025
9 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-6min)	6	0,35	0,05	0,07	0,025
10 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-2min)	2	0,35	0,054	0,07	0,025
11 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-4min)	4	0,35	0,054	0,07	0,025
12 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-6min)	6	0,35	0,054	0,07	0,025

Fuente: Autores.

Tabla 3.5 Dosificaciones de metales en gramos

N° experimentos	Tiempo (min)	Gramos			
		A	B	C	D
1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)	2	22,556	4,502	6,304	2,25
2 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)	4	22,556	4,502	6,304	2,25



3 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-6min)	6	22,556	4,502	6,304	2,25
4 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-2min)	2	22,556	4,862	6,304	2,25
5 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-4min)	4	22,556	4,862	6,304	2,25
6 (0,25A/0,054B/0,07C/0,025D-6min)	6	22,556	4,862	6,304	2,25
7 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)	2	31,61	4,502	6,304	2,25
8 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)	4	31,61	4,502	6,304	2,25
9 (0,35A/0,05B/0,07C/0,025D-6min)	6	31,61	4,502	6,304	2,25
10 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-2min)	2	31,61	4,862	6,304	2,25
11 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-4min)	4	31,61	4,862	6,304	2,25
12 (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-6min)	6	31,61	4,862	6,304	2,25

Fuente: Autores.

Para validar los resultados de recubrimiento se basó en la norma NTE INEN 2483 (2009), con la utilización de Elcometer 456 (equipo de espesor que utiliza medición magnética de acuerdo a la norma ISO 2178:2016) y evaluar la calidad de las capas formadas en el tubo zincado se aplicará un análisis metalográfico, ensayo de adherencia y corrosión.

Análisis metalográfico: Para observar y medir las cuatro fases que conforma la capa de revestimiento durante la etapa de galvanizado se empleará un microscopio metalográfico invertido modelo GX51 que cuenta con un sistema de análisis de captura



Universidad de Cuenca

y análisis de imágenes. Su cámara digital Olympus DP73 es una cámara que permite realizar capturas de imágenes en todas las técnicas de microscopía incluyendo fluorescencia. Además, su software Stream Essentials permite modular aplicaciones microscópicas en ciencia de materiales y análisis de tamaño de grano (método planimétrico). Para el análisis microscopio en el caso de secciones transversales de las muestras de las tuberías galvanizadas, requieren ser preparadas en base a la norma ASTM B487.

Floreado: Son cristales brillantes que se forman en la superficie de la lámina galvanizada en continuo, esta característica se realizará de manera visual con las siguientes condiciones: a) se tratara de un floreado mínimo cuando el tamaño de grano sea visible y menos distintivo aproximadamente 1 mm, b) floreado regular en el que presenta un tamaño 15-25mm observándose caras múltiples, c) sin floreado cuando el tamaño de grano no es visible a simple vista.

Corrosión: Consiste en la utilización de cámara salina en la cual se introducirán probetas de acero galvanizado, con la finalidad de evaluar la vida útil de la pieza, las condiciones serán establecidas por la norma ASTM B-117 (Presión 10psi, $T=35\pm 2^{\circ}\text{C}$, Tiempo=96horas, concentración=5%P/P, NaCl-95%P/P H_2O).

Adherencia: El ensayo es el de método cruzado el cual clasifica el material de acuerdo al grado de desprendimiento, se detalla en la tabla 3.6; en general no debe ser posible desprender partes del recubrimiento, y tan solo debe ser posible remover pequeñas partículas en la superficie de este. (ASTM D3359-9, 2010)



Tabla 3.6 Clasificación de los resultados de la prueba de adhesión

Classification	% of Area Removed	Surface of Cross-cut Area From Which Flaking has Occured for 6 Parrallel Cuts & Adhesion range by %
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

Fuente: (ASTM D3359-9, 2010)

3.2 Resultados y Análisis

3.2.1 Resultados de las cartas de control de todas las etapas del proceso

I. Etapa de desengrasado

En el anexo B se registra los valores de los diferentes parámetros de desengrasado que fueron analizados en un periodo de tiempo de siete semanas de manera diaria; cada uno de estos valores se emplearon para la elaboración de la carta de control individual



y de otras herramientas estadísticas, que permiten analizar el estado de esta etapa dentro del proceso general.

Mediante el software Minitab 17, se describe en la figura 3.7 el valor de normalidad de cada uno de los parámetros de desengrasado mediante el valor de probabilidad ($p \geq 0,05$).

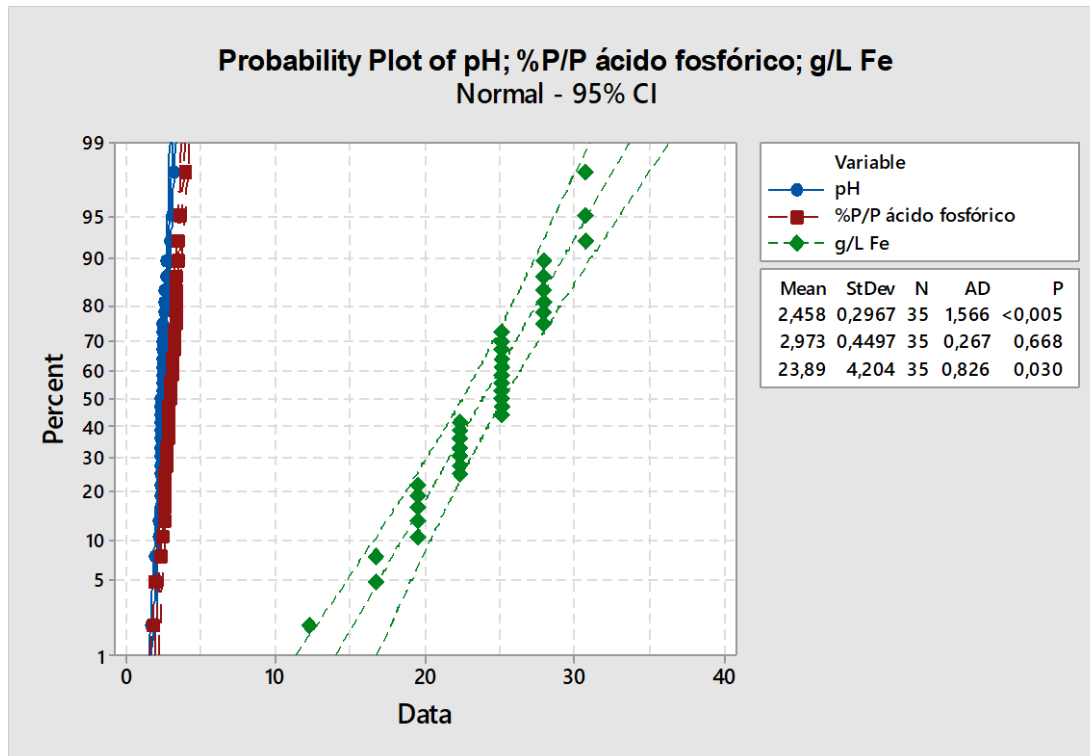


Figura 3.7: Gráfico de probabilidad de los distintos parámetros del desengrasado

Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados de p , uno de los parámetros (pH) del desengrasado no cumple con la misma, por lo que se debe aplicar la transformación de los datos. Minitab 17 determina de manera automática la transformación adecuada (mayor valor de p) para la muestra de datos empleada, en este caso en la figura 3.8 se aplica la Transformación de Johnson, con un valor final de probabilidad $p=0,808$ apta para graficar mediante distribución normal (Apéndice A: etapa de desengrasado-columna transformación pH).

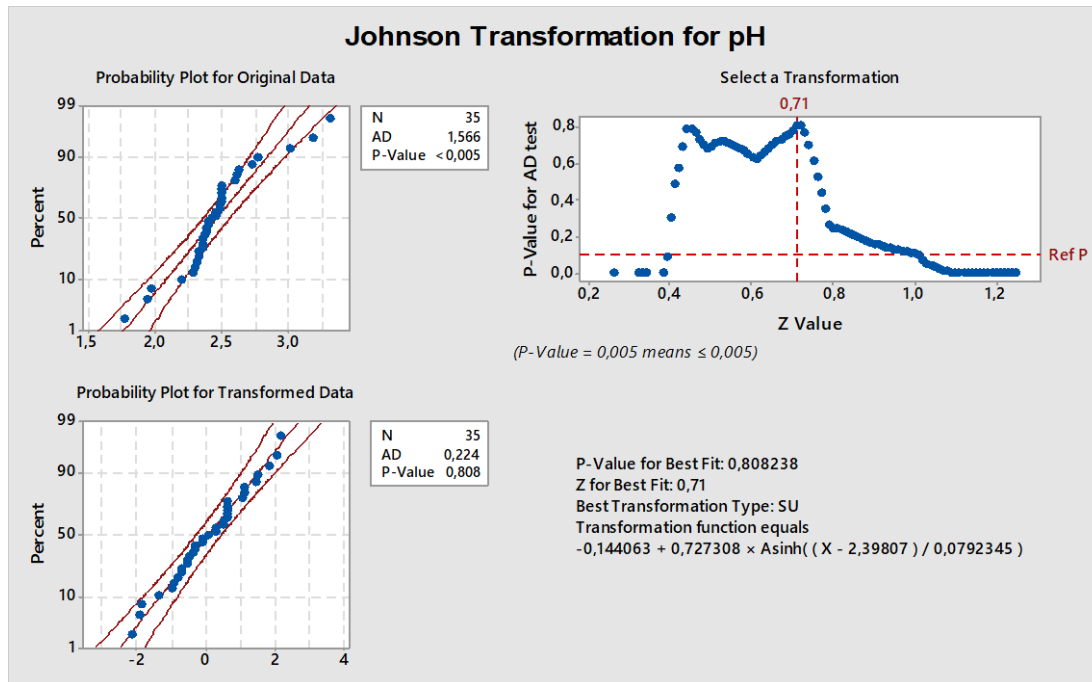


Figura 3.8: Transformación de Johnson para el pH

Para elaborar las cartas de control individual correspondientes al pH (35 datos) se transforman los límites de especificación y control a datos entendibles para el programa mediante la utilización de la ecuación de Johnson que se visualizan en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de pH

Límites de control	Johnson	Normal
UCL	2,426	3,753
\bar{x}	0,079	2,422
LCL	-2,267	1,666

Fuente: Autores.

Tabla 3.8 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de pH

Límites de especificación	Johnson	Normal
USL	1,837	3
Target	0,634	2.5
LSL	-1,829	2

Fuente: Autores

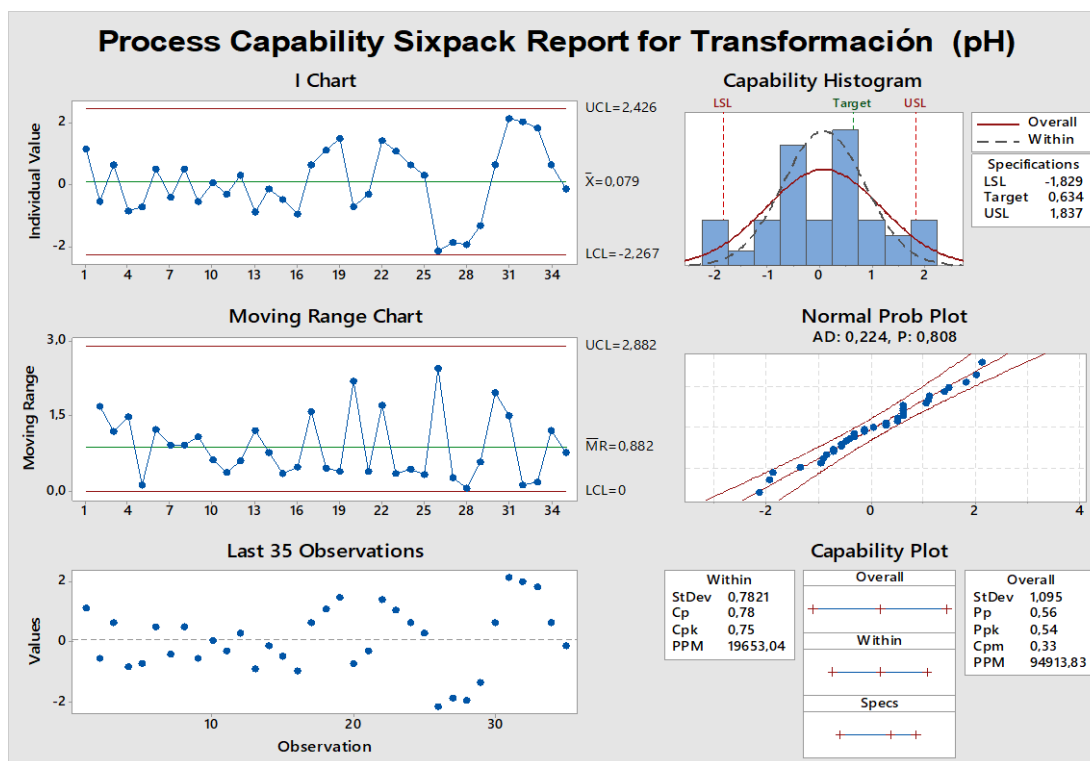


Figura 3.9: Reporte de análisis de capacidad del pH

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de desengrasado con respecto al parámetro de pH

En la figura 3.9 se observa los resultados obtenidos por el software Minitab 17 en el que se reportan gráficas de control, histograma e índices de capacidad. En las gráficas de control se considera que el proceso es estable (ningún punto fuera de los límites de control), con un comportamiento normal.

La capacidad del proceso $C_p = 0,78$ ($1 \leq C_p \leq 1,33$) indica que el proceso es parcialmente adecuado y un índice de capacidad $C_{pk} = 0,75$ (datos fuera del objetivo, se encuentran descentrados con mucha variabilidad), reflejando 19653,04 partes defectuosas por millón (PPM) en la muestra y 94913,83 PPM en el proceso, no cumple por lo menos con una de las especificaciones (límite de especificación superior). De acuerdo a $C_{pk} = 0,75$ y $S_t = 0$ (figura 2.12) el proceso es tipo C estable pero incapaz.

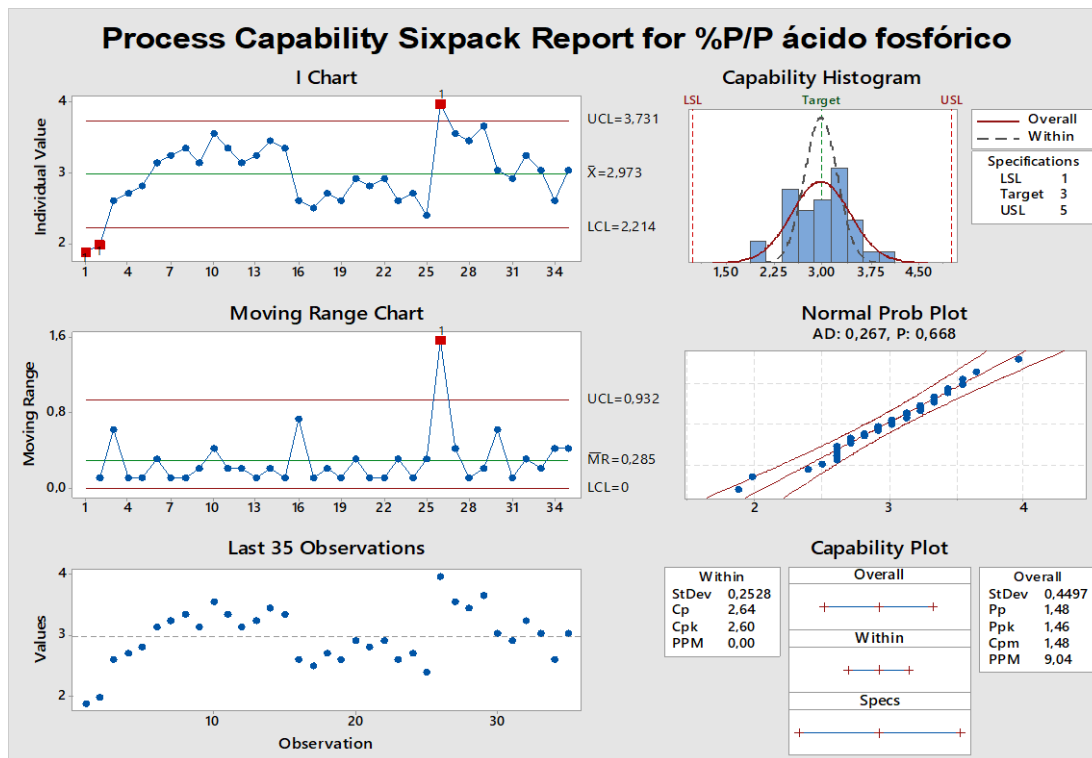


Figura 3.10: Reporte de análisis de capacidad de la concentración H_3PO_4

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de desengrasado con respecto al parámetro de concentración % P/P H_3PO_4

De acuerdo a la figura 3.10 la concentración de %P/P H_3PO_4 , en la gráfica de control individual se observa 2 puntos por debajo del límite de control inferior (1 y 2) a causa de la limpieza de la tina que contiene la solución ácida y un punto por encima del límite de control superior (26) por adición de ácido. No se eliminan estos puntos porque se desea saber la situación actual de etapa.

De acuerdo al histograma la distribución de datos de la muestra es centrada, con una desviación de 0,2528, con PPM en la muestra de 0.

El $C_p = 2,64$ ($C_p > 2$) el proceso es calidad 6 sigma, índice de capacidad real $C_{pk} = 2,60$ ($C_{pk} > 1,25$) el proceso es capaz. En relación a $C_{pk} = 2,60$ y $S_i = 8,57$ es B (inestable pero capaz).

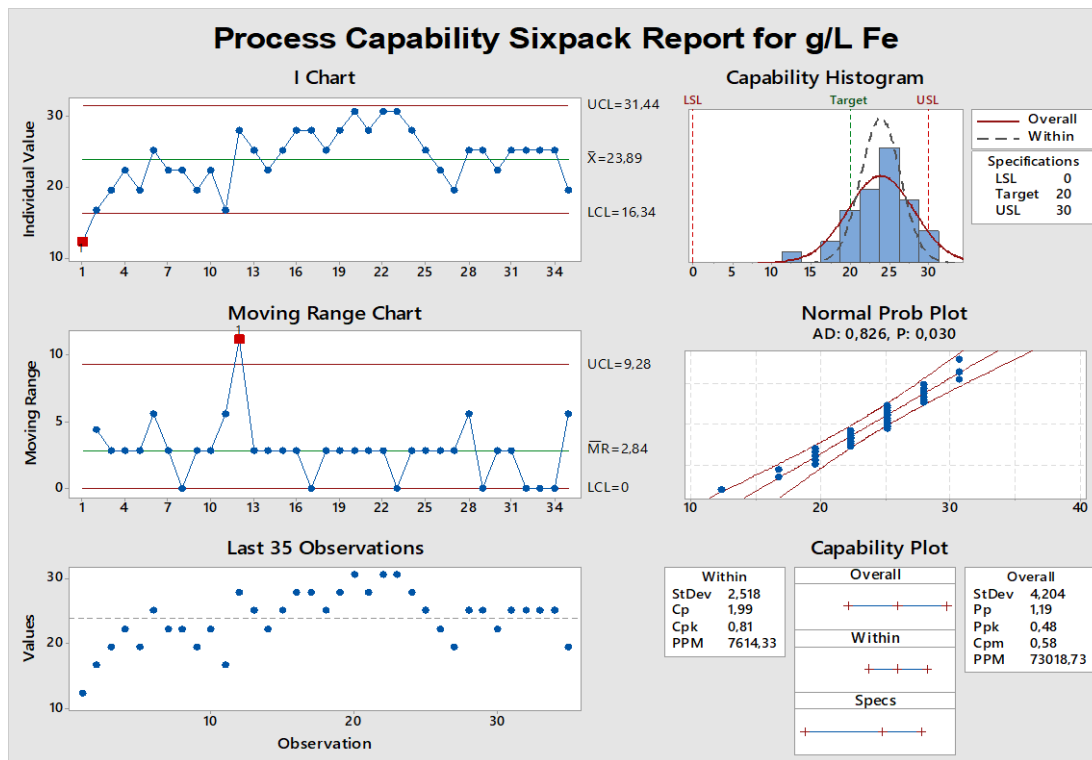


Figura 3.11: Reporte de análisis de capacidad de la concentración de hierro disuelto.

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de desengrasado con respecto al parámetro de concentración (g/L) Fe

En la figura 3.11 el valor de $p=0,030$ es considerado como distribución anormal, pero al aplicar la transformación sugerida por el Software Minitab 17, es el valor más cercano a $p \geq 0,05$, por lo que se inicia con la construcción de los diferentes gráficos para su análisis, con valores de C_p y C_{pk} cercanos a lo real.

El punto 1 se encuentra por debajo del límite inferior de control individual por la limpieza de la tina (se elimina la cantidad de hierro), se observan 2 puntos cercanos al límite inferior (2 y 11) y 3 puntos cercanos al límite superior (20, 22 y 23) debido al estado de la materia prima tratada (óxido de hierro).

La distribución de los datos de la muestra en el histograma es descentralizada por encima del objetivo con mucha variabilidad, con una desviación de 2,518 y 7614,33 PPM. El índice de capacidad $C_p=1,99$ ($C_p > 1,33$) refleja que el proceso es adecuado y $C_{pk}=0,81$ ($C_{pk} < 1$) el proceso no cumple con el límite de especificación inferior y la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones. Con un índice de inestabilidad $S_t=2,85$ y $C_{pk}=0,81$ el proceso es de tipo C (estable pero incapaz).

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Análisis de resultado de la etapa de desengrasado

De acuerdo a los resultados expresados en las tablas 3.9 y 3.10, la medición de los parámetros: pH es un proceso tipo C (estable pero incapaz), %P/P de H₃PO₄ es B (inestable pero capaz) y g/L Fe es C (estable pero incapaz).

Tabla 3.9 Límites de especificación y control de parámetros correspondientes al desengrasado.

Parámetros	Límites de control			Límites de especificación			Puntos fuera de control	Número de datos
	UCL	\bar{x}	LCL	USL	TARGET	LSL		
pH	3,753	2,422	1,666	3	2,5	2	0	35
Fe (g/L)	31,44	23,89	16,34	30	20	0	3	35
H ₃ PO ₄ (%P/P)	3,731	2,973	2,214	5	3	1	1	35

Fuente: Autores

Tabla 3.10 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de desengrasado

Parámetros	C _p	C _{pk}	S _t	S _{t dev}	Tipo de proceso
pH	0,78	0,75	0	0,7821	C
H ₃ PO ₄ (%P/P)	2,64	2,60	8,57	0,252	B
Fe (g/L)	1,99	0,81	2,857	2,518	C

Fuente: Autores

II. Etapa de decapado

En la etapa de decapado se registran los valores indicados en el anexo B los cuales corresponden a dos tinas, se evalúa si estos datos son normales mediante un diagrama de probabilidad que se visualiza en la figura 3.12.

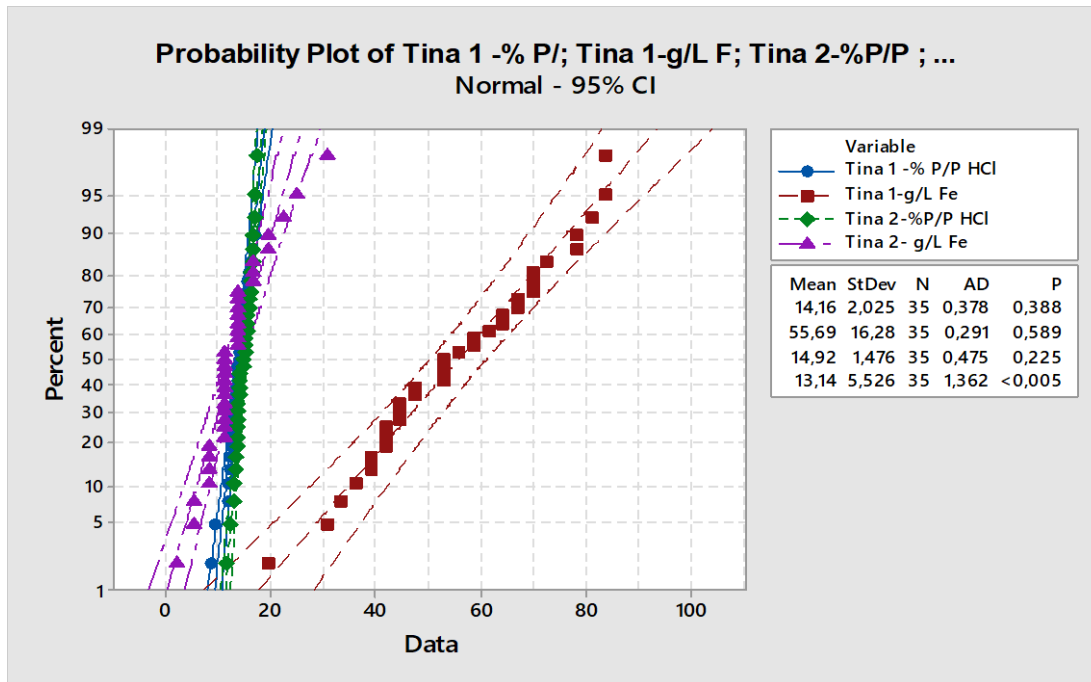


Figura 3.12: Diagrama de probabilidad de datos correspondientes a las dos tinas de decapado

Fuente: Autores.

Tina 1

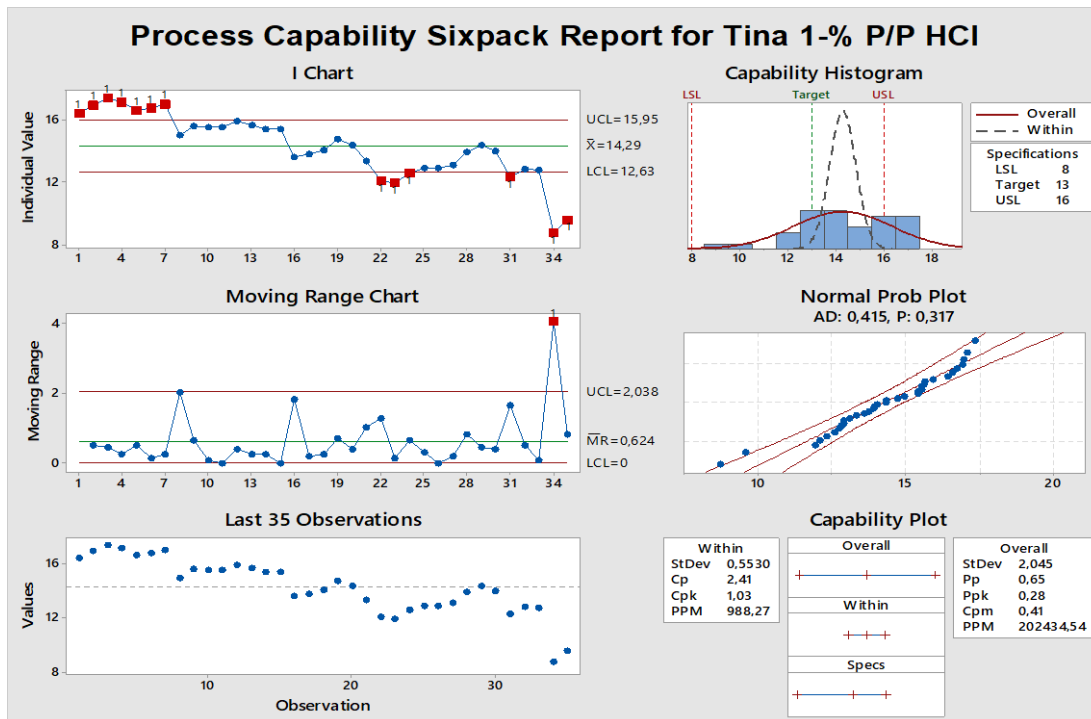


Figura 3.13: Capacidad del proceso del %P/P HCl de la tina 1

Fuente: Autores.



Análisis de la etapa de decapado de la tina 1 con respecto a la concentración %P/P HCl

En la figura 3.13 la concentración %P/P de HCl, en la carta de control individual se observan 7 puntos fuera del límite de control superior (puntos del 1 al 7) y 6 puntos por debajo del límite de control inferior (puntos 22,23,24,31,34 y 35), cabe mencionar que esto ocurre por la adición de ácido y su posterior consumo (comportamiento esperable).

La distribución de los datos de la muestra en el histograma es descentralizada por encima del objetivo con poca variabilidad, con una desviación de 0,5530 y 988,27 PPM.

La capacidad del proceso es $C_p=2,41$ ($C_p>2$) y $C_{pk}=1,03$, se debe corregir descentralización; con índice de inestabilidad $St=37,14$, el proceso es tipo D (inestable e incapaz), se espera este comportamiento por el consumo y recarga del reactivo, esto se puede prevenir adicionando ácido antes de que el valor de concentración descienda cerca del límite inferior de control y en el caso del límite superior se debe preparar el baño de acuerdo a formulación.

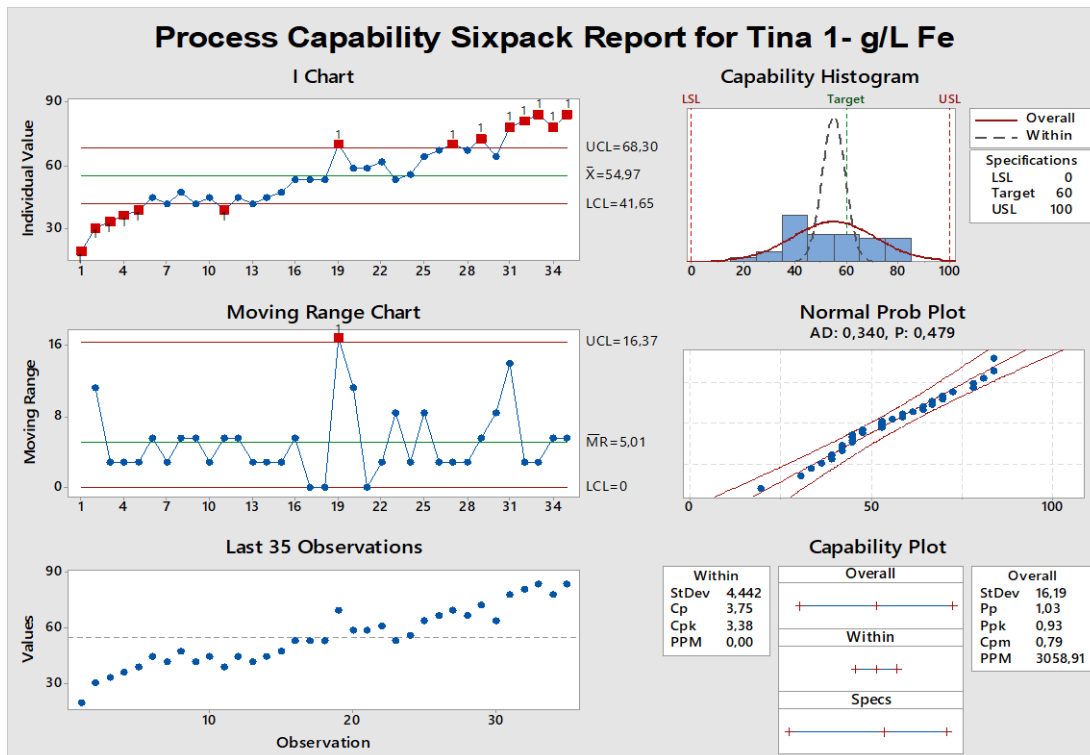


Figura 3.14: Capacidad del proceso de Fe (g/L) en la tina 1

Fuente: Autores.



Análisis de la etapa de decapado de la tina 1 con respecto a la concentración g/L Fe

En la figura 3.14 en la carta de control individual se identifican puntos fuera de los límites de control tanto superior como inferior, además de puntos cercanos, indicativo de que el proceso se encuentra fuera de control. Los datos tienen una tendencia ascendente debido a que se acumula el óxido de hierro en el baño.

La distribución de los datos de la muestra en el histograma es descentralizada con poca variabilidad y una desviación de 4,442 con 0 PPM. Con un $C_p = 3,75$ ($C_p > 2$), se puede definir como un proceso capaz; el $C_{pk} = 3,38$ ($C_{pk} > C_p$), por debajo del límite objetivo, con un $S_t = 40$; el proceso es tipo B (inestable pero capaz).

Tina 2

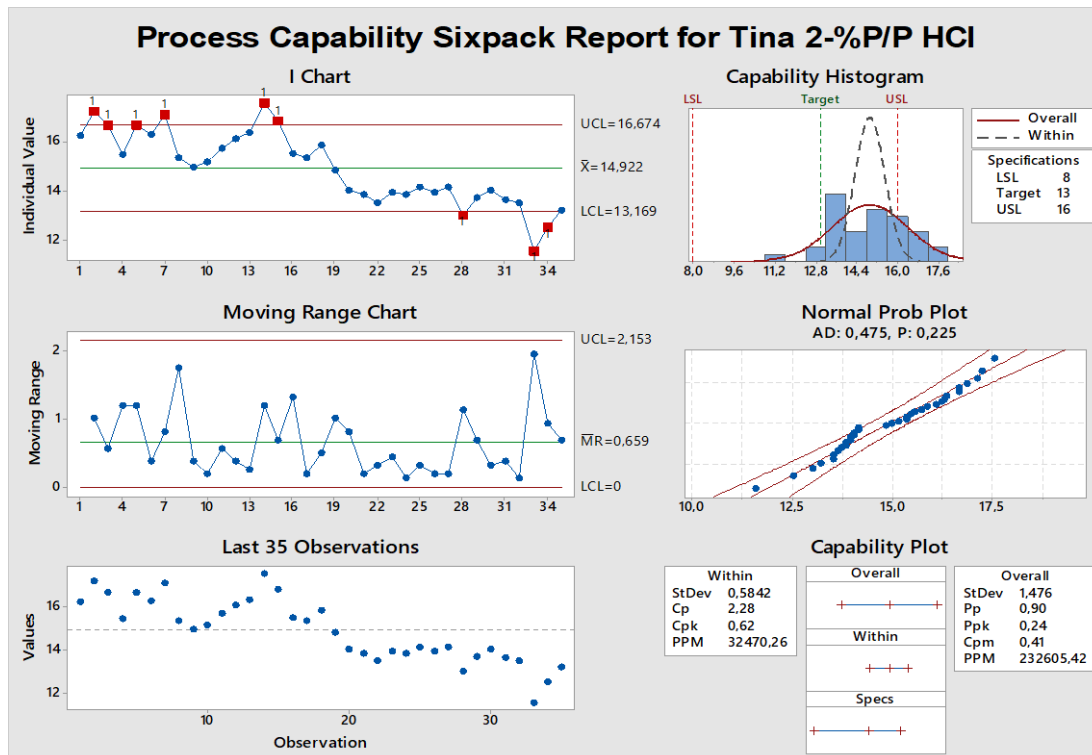


Figura 3.15: Capacidad de proceso de %P/P HCI en la tina 2

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de decapado de la tina 2 con respecto a la concentración %P/P HCI.

En la carta de control individual (figura 3.15), se observa 9 puntos fuera de los límites de control, 6 puntos por encima (puntos 2,3,5,7,14 y 15) y 3 puntos por debajo (puntos

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



28, 33 y 34); esta tendencia se debe a la manipulación de la concentración de la sustancia, el tiempo de inmersión (mayor tiempo de inmersión el material se deteriora y decae la concentración del baño) y el arrastre de sustancias (grasas, lodos) de la etapa anterior por parte de la materia prima.

En el histograma se define que la distribución de los datos se encuentra descentralizada con mucha variabilidad por encima de la función objetivo, con una desviación de 0,5842 de la muestra y 32470 PPM.

C_p con valor de 2,28 ($C_p > 2$) el proceso es adecuado, y un $C_{pk} = 0,62$ ($C_{pk} < 1$) no cumple con el límite de especificación inferior; con índice de inestabilidad $S_t = 25,71$ y el $C_{pk} = 0,62$ el proceso es considerado de tipo D (inestable e incapaz).

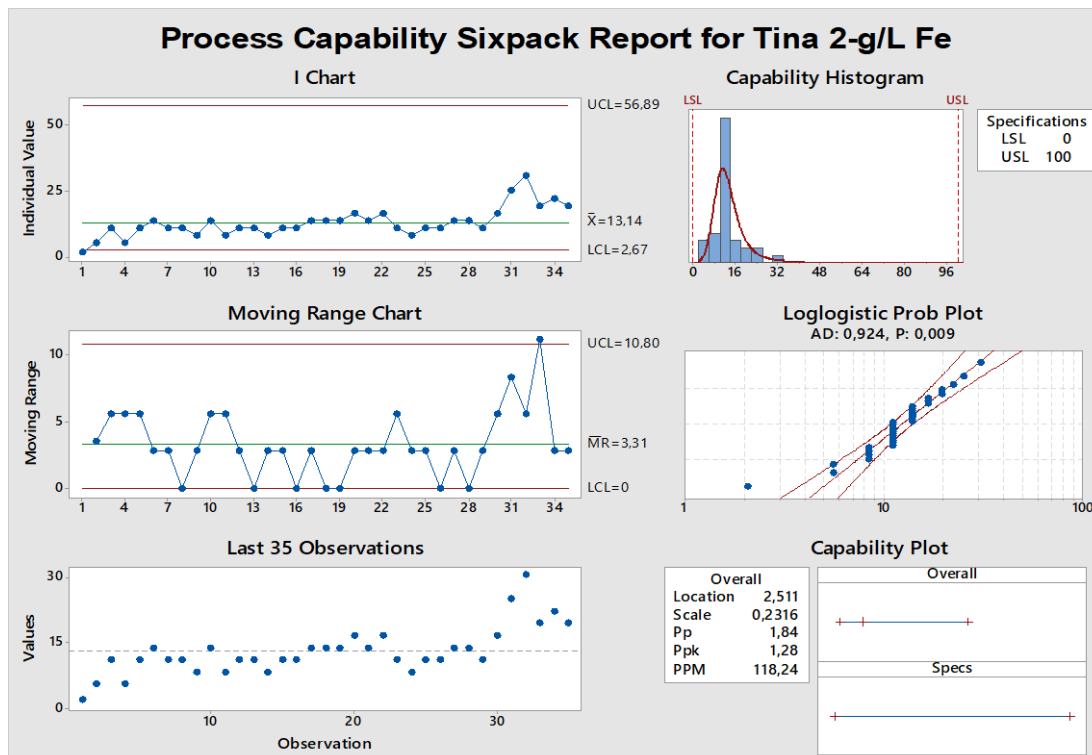


Figura 3.16: Capacidad del proceso de Fe(g/L) en la tina 2

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de decapado de la tina 2 con respecto a la concentración g/L Fe.

La cantidad de g/L de Fe presente en la tina 2 (figura 3.12) indica una distribución de datos anormales en donde $p \leq 0,05$, indicativo de que se debe realizar una transformación



de los datos. En la figura 3.16 se observa los gráficos realizados con la transformación Loglogistic ofrecida por Minitab 17 ($p=0,009$).

La carta de control individual determina que todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control. En el histograma la distribución de la muestra se encuentra dentro de los límites de especificación, presenta poca variabilidad. Con $P_p=1,84$ y $P_{pk}=1,28$, proceso adecuado a largo plazo y capaz (proceso de tipo A).

Análisis del proceso de decapado en las tinas 1y 2.

De acuerdo a los resultados expresados en las tablas 3.11 y 3.12, la medición de los parámetros: %P/P HCl (tina 1) es un proceso tipo D (inestable e incapaz), g/L Fe (tina1) proceso tipo B (inestable pero capaz), %P/P HCl (tina2) proceso tipo D (inestable e incapaz), g/L Fe (tina 2) proceso tipo A (estable y capaz).

Tabla 3.11 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de decapado analizados en las tinas 1 y 2.

	Parámetros	Límites de control			Límites de especificación			Puntos fuera de control	Número de mediciones
		UCL	\bar{x}	LCL	USL	TARGET	LSL		
Tina 1	%P/P HCl	15,95	14,29	12,63	16	13	8	13	35
	g/L Fe	72,95	55,69	38,43	100	60	0	14	35
Tina 2	%P/P HCl	16,674	14,922	13,169	16	13	8	9	35
	g/L Fe	56,89	13,14	2,67	100	60	0	0	35

Fuente: Autores.

Tabla 3.12 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de decapado analizados en las tinas 1 y2.

	Parámetros	C_p	C_{pk}	S_t	$S_t \text{ dev}$	Tipo de proceso
Tina 1	%P/P HCl	2,41	1,03	37,14	0,553	D
	g/L Fe	3,75	3,38	40	4,442	B
Tina 2	%P/P HCl	2,28	0,62	25,71	0,5842	D
	g/L Fe	1,84	1,28	0	-	A

Fuente: Autores.



III. Etapa de Fluxado

En la etapa de fluxado se registran los valores indicados en el apéndice B, se evalúa si estos datos son normales mediante un diagrama de probabilidad que se visualiza en la figura 3.17.

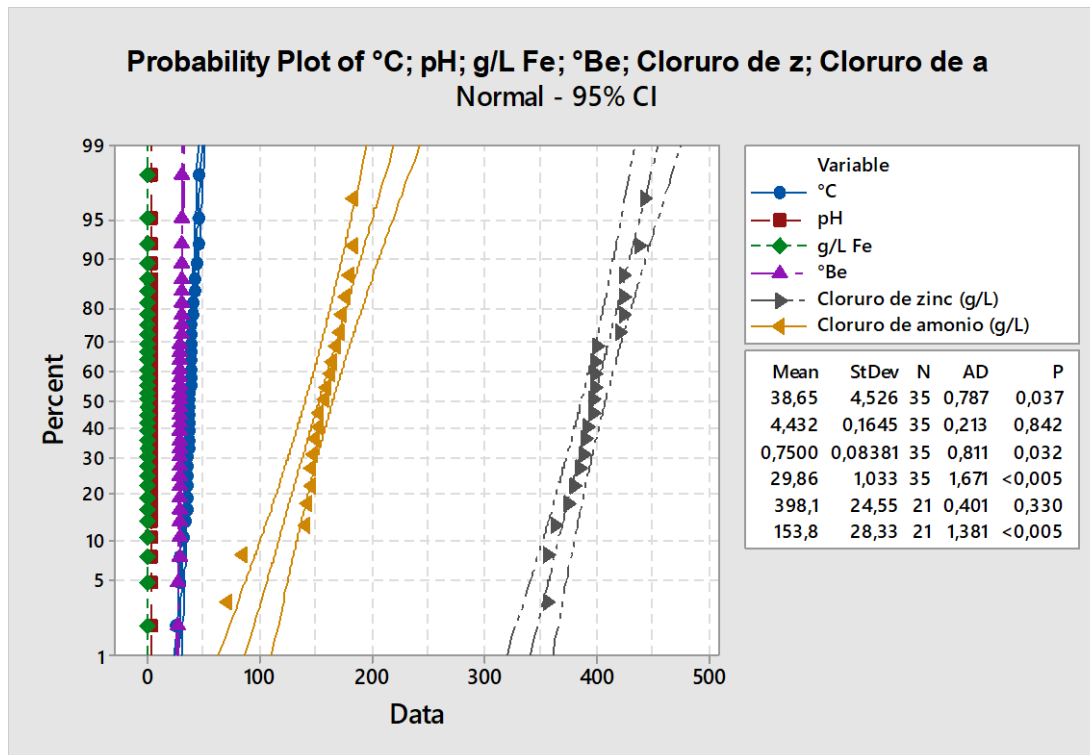


Figura 3.17: Diagrama de probabilidad de datos correspondientes al Fluxado

Fuente: Autores.

De acuerdo al análisis de probabilidad indicado en la figura 3.17 los parámetros como temperatura, contenido de hierro, grados Baumé y cloruro de amonio (g/L) presentan un valor de $p < 0,05$ indicativo que los datos tienen distribución anormal.

Temperatura °C:

Se realiza la transformación de datos mediante la transformada de Johnson (figura 3.18) lo cual permitirá realizar un análisis apropiado de la capacidad normal.

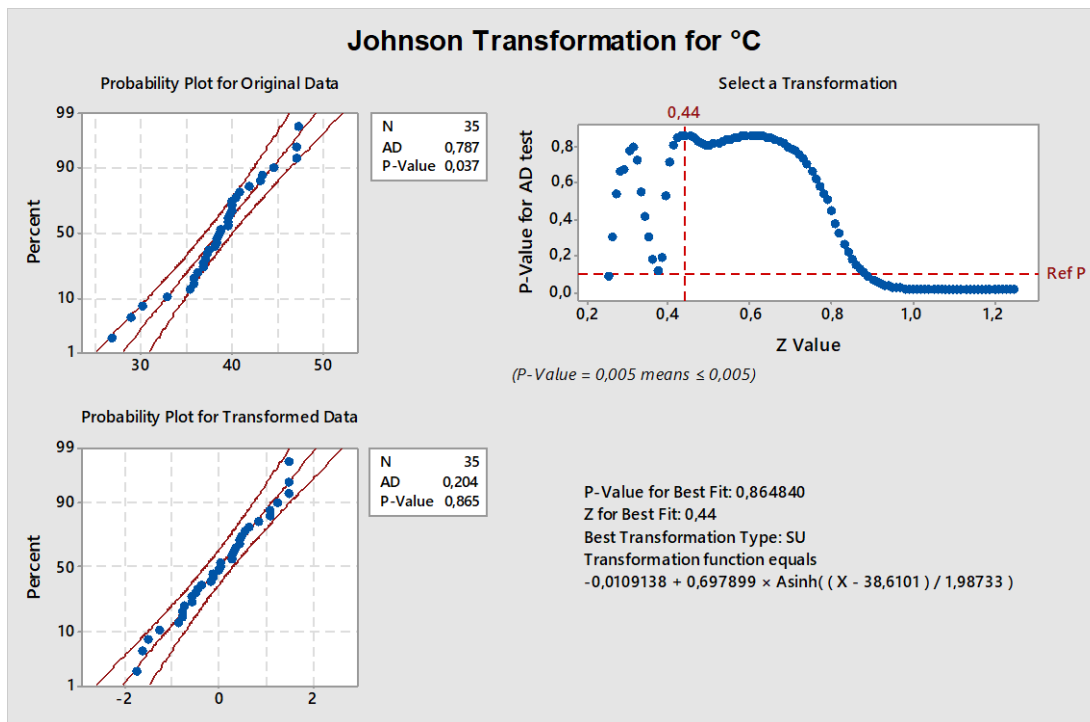


Figura 3.18: Transformación de Johnson para la temperatura en el fluxado

Fuente: Autores.

En las tablas 3.13 y 3.14 se transforman los datos entendibles para el programa Minitab 17.

Tabla 3.13 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de Temperatura

Límites de control	Johnson	Normal
UCL	2,651	83,64
\bar{x}	0,016	38,686
LCL	-2,618	-3,014

Fuente: Autores.

Tabla 3.14 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de Temperatura

Límites de especificación	Johnson	Normal
USL	2,399	70
Target	0,444	40
LSL	-2,399	20

Fuente: Autores.

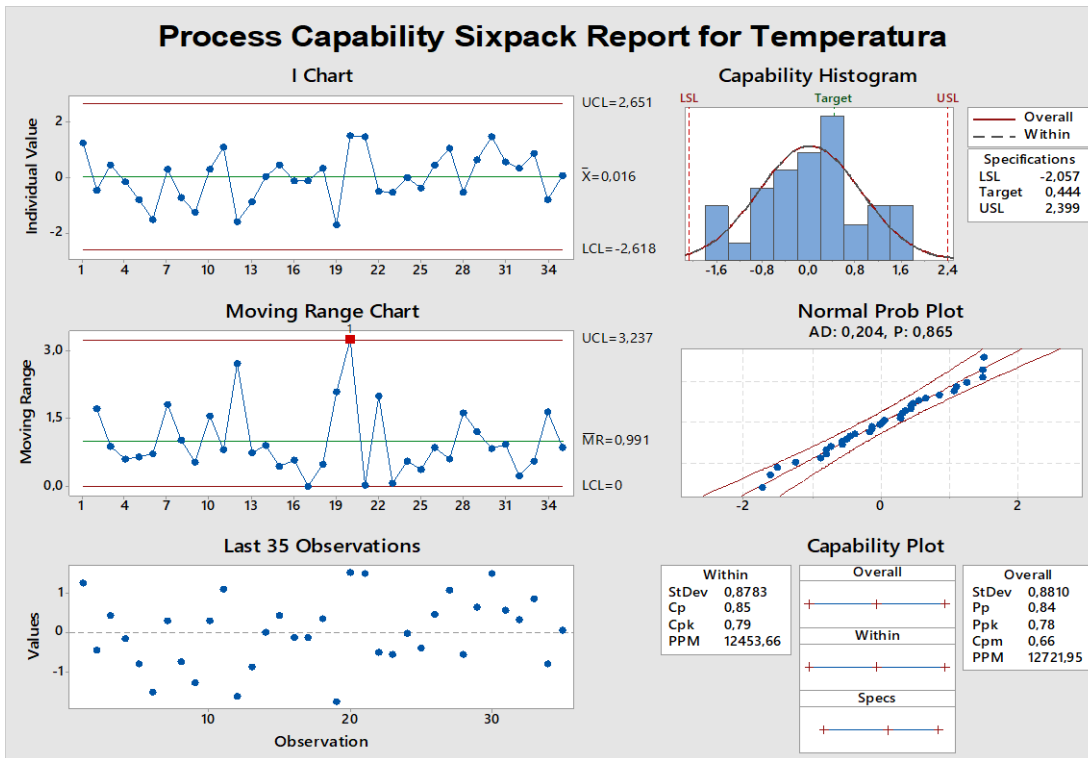


Figura 3.19: Reporte del proceso de capacidad de la temperatura en el fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto a la temperatura (°C).

El parámetro se encuentra bajo control (figura 3.19), con datos dentro de los límites y fluctúan o varían de manera normal (carta de control individual). En el histograma se define que la distribución se encuentra descentralizada con mucha variabilidad por debajo de la función objetivo, con una desviación de 0,878 de la muestra y 12453,66 PPM.

$C_p=0,85$ indica que no es adecuado para el trabajo, se requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria, con respecto a la capacidad real ($C_{pk}=0,79$) es menor a 1 lo que indica que los datos no se encuentran en el objetivo; con un $S_t=0$ es un proceso de tipo C (estable pero incapaz).



pH:

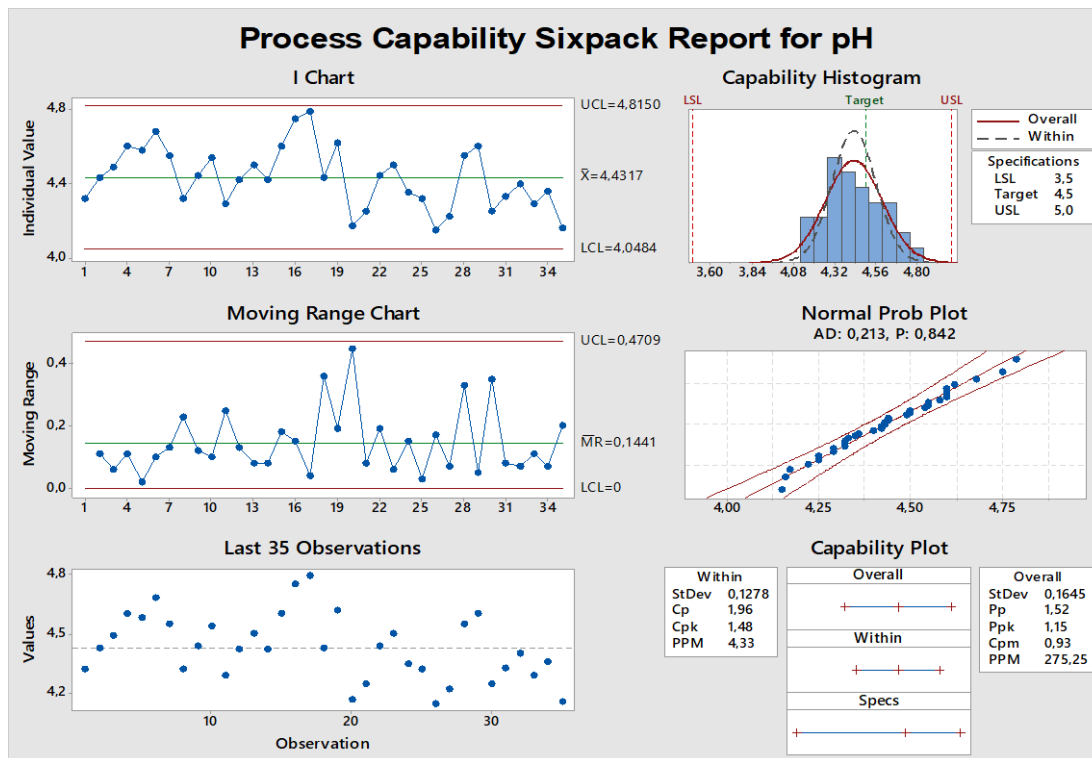


Figura 3.20: Reporte de la capacidad del proceso del pH correspondiente al fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto al pH.

Como se observa en la figura 3.20 el parámetro se encuentra bajo control en la carta de control individual, con dos puntos cerca del límite superior (punto 16 y 17) y con tendencia normal, su principal causa es el decaimiento de la concentración en la tina.

La tendencia de los datos en el histograma es descentralizada con poca variabilidad por debajo de la función objetivo, con una desviación de 0,127 y menor probabilidad de producir defectos (4,33 PPM).

C_p con valor de 1,96 ($C_p > 1,33$) el proceso es adecuado, y un $C_{pk}=1,48$ ($C_{pk} > 1,25$) el proceso es capaz; con índice de inestabilidad $S_i=0$ y el $C_{pk}=1,48$ el proceso es considerado de tipo A (estable y capaz).



g/L Fe:

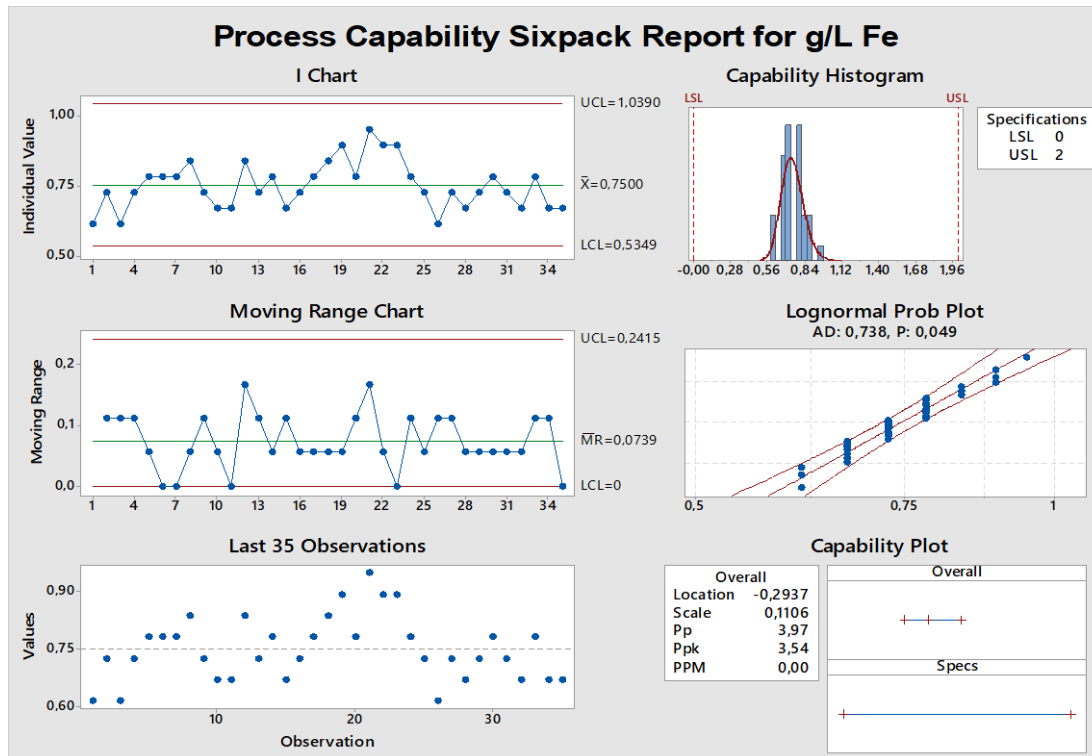


Figura 3.21: Reporte de capacidad del proceso para la concentración de hierro disuelto en el fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto g/L Fe.

Los datos con respecto al contenido de hierro (figura 3.17) indica una distribución de datos anormales en donde $p \leq 0,05$, indicativo de que se debe realizar una transformación de los datos. En la figura 3.21 se observa los gráficos realizados con la transformación Lognormal ofrecida por Minitab 17 ($p=0,049$). Parámetro bajo control con respecto a la carta de control individual.

En el histograma la distribución de los datos se encuentra dentro de los límites de especificación con poca variabilidad, con 0 PPM.

$P_p=3,97$ y $P_{pk}=3,54$ cumple con las especificaciones a largo plazo cumpliendo calidad Seis Sigma.



°Be:

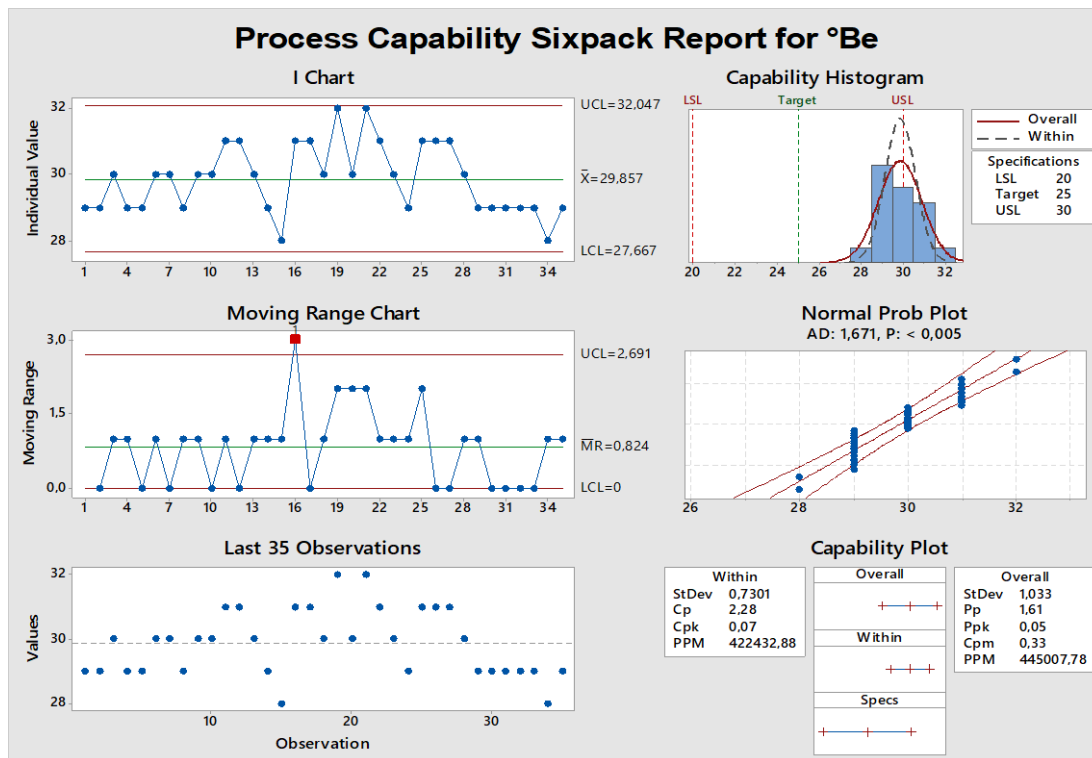


Figura 3.22: Reporte de capacidad del proceso para °Be en el fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto °Be

Los datos correspondientes a °Be (figura 3.17) no son normales ($p \leq 0,005$) y tampoco se ajusta a ninguna de las gráficas anormales (loglogistic, logistic, gamma, parameter gamma, exponential, lognormal), debido a que se necesita evaluar la capacidad de los datos se realiza como si se tratara de datos normales.

Parámetro bajo control en la carta individual (figura 3.22), presenta un comportamiento errático con la presencia de 2 datos cerca de los límites superior (19,21) y dos inferiores (15,34) indicando una disminución o aumento de sal en el baño. En el histograma los datos se encuentran descentralizados con poca variabilidad y sobre el límite de especificación superior; con una desviación de 0,7301 y 422432,88 PPM.

$C_p = 2,28$ ($C_p > 2$) tiene calidad 6 sigma, pero su capacidad real del proceso ($C_{pk} = 0,07$) es baja ($C_{pk} < 1$),. Se debe realizar una nueva dosificación de la sal estableciendo como objetivo el límite central (25°Be), debido a que en planta toman como función objetivo el



límite superior. Con un índice de inestabilidad $S_i=0$ y $C_{pk}=0,07$ es un proceso tipo C (estable pero incapaz).

Cloruro de zinc (g/L):

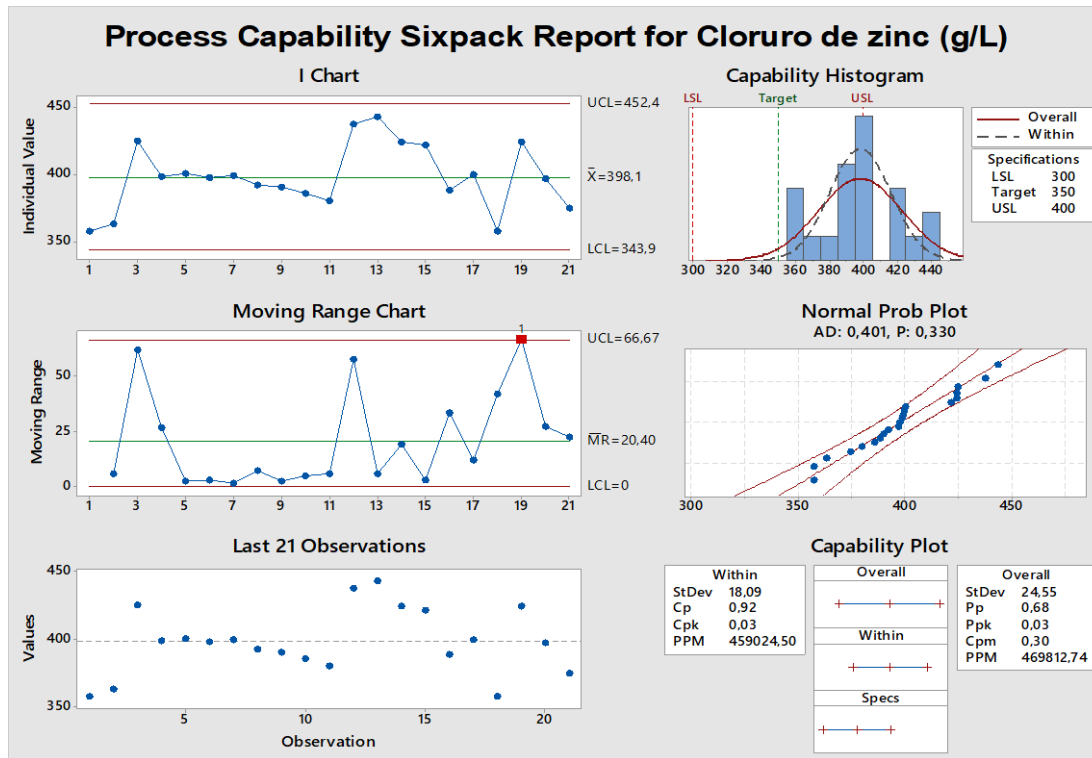


Figura 3.23: Reporte de capacidad del proceso para cloruro de zinc (g/L) en el fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto a la concentración de Cloruro de zinc (g/L).

Se encuentra bajo control la carta de control individual (figura 3.23), con la presencia de un patrón descendente (datos 4-11), la causa se debe a que decae la concentración de sal; en el dato 12 los operadores realizan una recarga de sal para que se mantenga dentro de los límites de control. En el histograma los datos se encuentran descentralizados con mucha variabilidad, por encima de la función objetivo, con una desviación de 18,09 y 459024,5 PPM.

$C_p=0,92$ y $C_{pk}=0,03$ el parámetro no es adecuado para el trabajo y se requiere modificaciones serias, es así que su media es el límite superior de especificación. Con un $S_i=0$ y $C_{pk}= 0,03$ el proceso es tipo C (estable pero incapaz).



Cloruro de amonio (g/L):

Como se observa en la figura 3.24 los datos son transformados de anormales a normales mediante la transformación de Johnson, en las tablas 3.15 y 3.16 se presentan los límites de especificación y control transformados a datos entendibles que sirven para la construcción de las cartas e histograma de la figura 3.25.

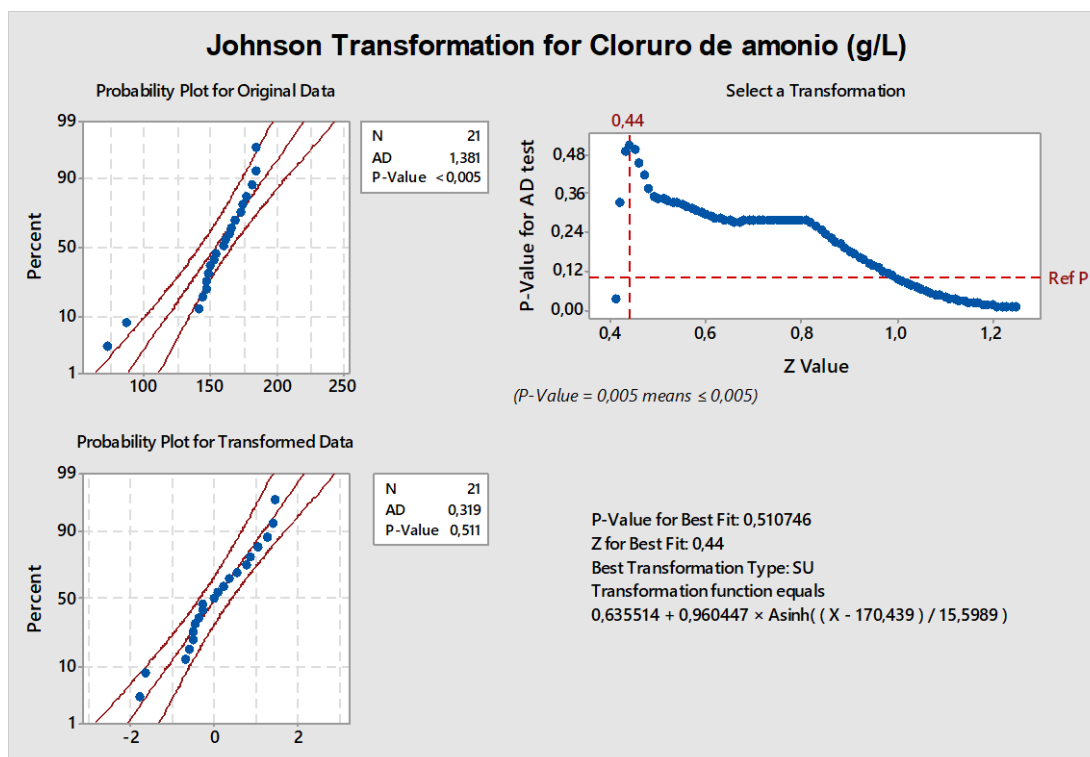


Figura 3.24: Transformación de Johnson para el cloruro de amonio

Fuente: Autores.

Tabla 3.15 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de cloruro de amonio

Límites de control	Johnson	Normal
UCL	2,469	221,9
\bar{x}	0,022	159,78
LCL	- 2,424	-17,82

Fuente: Autores



Tabla 3.16 Transformación de datos: Johnson-Normal de los límites de especificación de cloruro de amonio

Límites de especificación	Johnson	Normal
USL	1,976	200
Target	-0,406	150
LSL	-1,489	100

Fuente: Autores

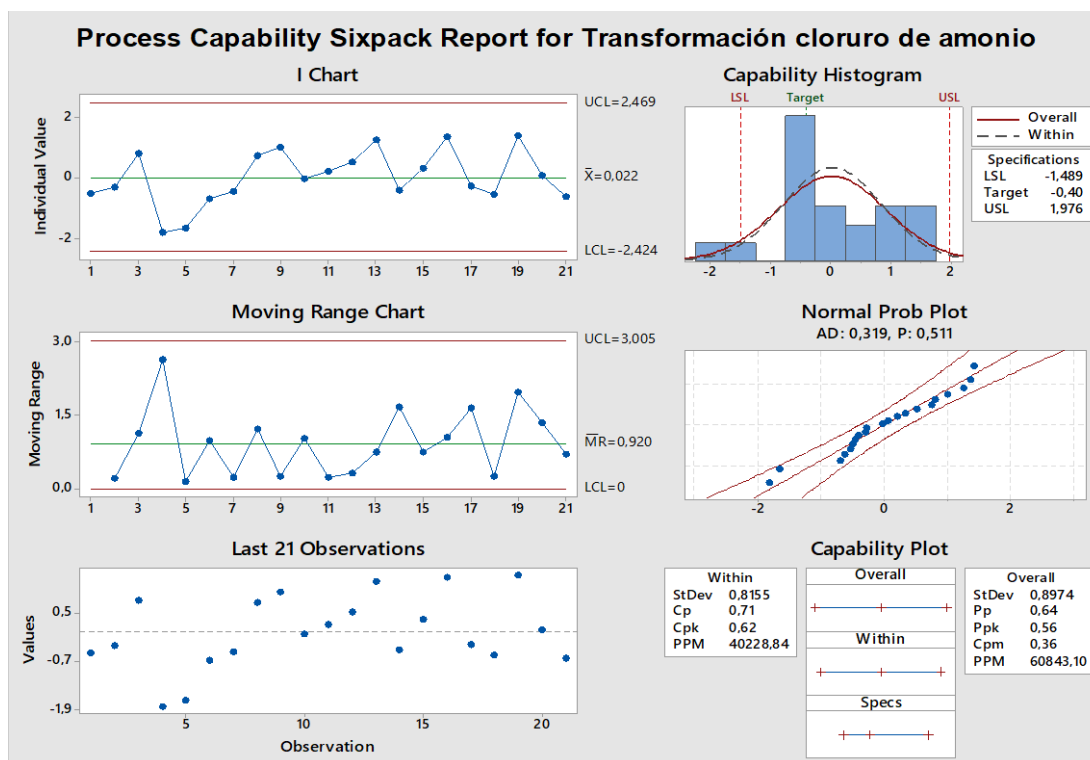


Figura 3.25: Reporte de capacidad para el cloruro de amonio en el fluxado

Fuente: Autores.

Análisis de la etapa de fluxado con respecto a la concentración de Cloruro de amonio (g/L).

En la carta de control individual (figura 3.25) está bajo control con un comportamiento normal dentro de los límites de control. En el histograma la distribución de los datos se encuentra descentralizados con mucha variabilidad por encima de la función objetivo, con una desviación de 0,8155 y 40228,84 PPM.



$C_p=0,71$ ($C_p < 1$) y $C_{pk}=0,62$ ($C_{pk} < 1,25$) no es adecuado para el trabajo, requiere modificaciones para llegar a una calidad satisfactoria, con $St=0$ y $C_{pk}=0,62$ es un proceso de tipo C (estable pero incapaz).

Análisis del proceso en la etapa de fluxado.

De acuerdo a los resultados expresados en las tablas 3.17 y 3.18, la medición de los parámetros: Temperatura ($^{\circ}C$) es un proceso tipo C (estable pero incapaz), pH proceso tipo A (estable y capaz), g/L Fe proceso tipo A (estable y capaz), $^{\circ}Be$ proceso tipo C (estable pero incapaz), Cloruro de zinc (g/L) proceso tipo C (estable pero incapaz), cloruro de amonio (g/L) proceso tipo C (estable pero incapaz). Se considera que se deberían aplicar análisis y modificaciones en la etapa para alcanzar la función objetivo y minimizar la desviación

Tabla 3.17 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de fluxado

Parámetros	Límites de control			Límites de especificación		
	UCL	\bar{x}	LCL	USL	TARGET	LSL
Temperatura ($^{\circ}C$)	83,64	38,686	-3,014	70	40	20
pH	4,815	4,431	4,048	5	4,5	3,5
g/L Fe	1,039	0,75	0,535	2	1	0
$^{\circ}Be$	32,047	29,857	27,667	30	25	20
Cloruro de zinc (g/L)	452,4	398,1	343,9	400	350	300
Cloruro de amonio (g/L)	221,9	159,78	-17,82	200	150	100

Fuente: Autores.

Tabla 3.18 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de fluxado

Parámetros	C_p	C_{pk}	St	St dev	Tipo de proceso
Temperatura ($^{\circ}C$)	0,85	0,79	0	0,878	C
Ph	1,96	1,48	0	0,127	A
g/L Fe	3,97	3,54	0	-	A
$^{\circ}Be$	2,28	0,07	0	0,730	C
Cloruro de zinc (g/L)	0,92	0,03	0	18,09	C
Cloruro de amonio (g/L)	0,71	0,62	0	0,8155	C

Fuente: Autores.



IV. Etapa de Zincado

En la etapa de zincado se registran los valores indicados en el Anexo B correspondientes al secado, dross y al proceso (temperatura del baño de zinc), se evalúa los datos si presentan o no una distribución normal mediante un diagrama de probabilidad que se visualiza en la figura 3.26.

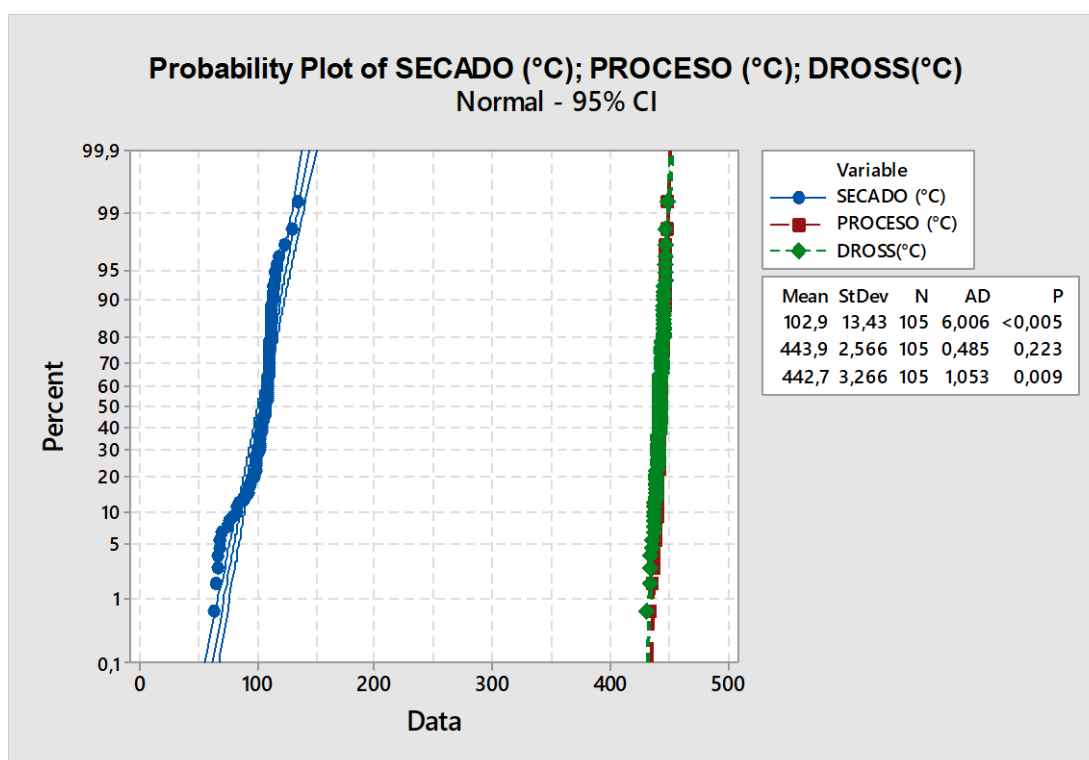


Figura 3.26: Diagnóstico de probabilidad de los parámetros de la etapa de zincado

Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados de probabilidad presentados en la figura 3.26, los datos evaluados para la temperatura de secado no presentan distribución normal ($p \leq 0,05$), por lo que se debe aplicar la transformación adecuada para su posterior análisis de capacidad y estabilidad.

Temperatura de secado:

Como se observa en la figura 3.27 los datos son transformados de anormales a normales mediante la transformada de Johnson, en las tablas 3.19 y 3.20 se presentan los límites de especificación y control transformados a datos entendibles que sirven de medidas para la figura 3.28.

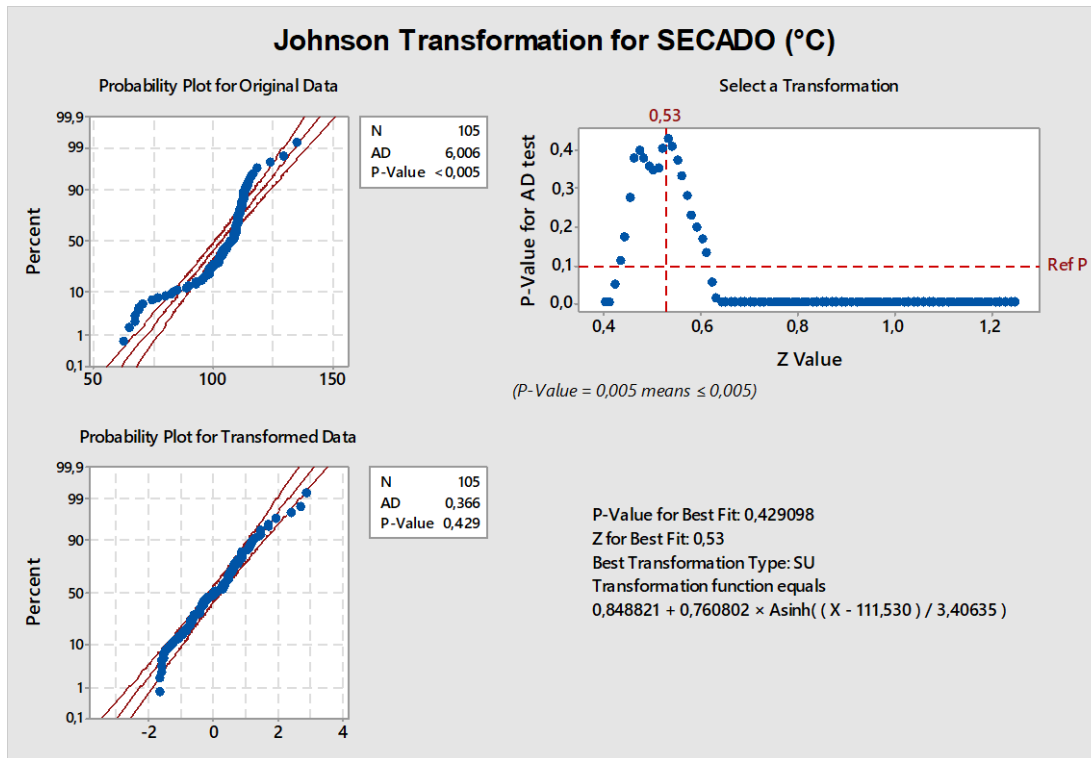


Figura 3.27: Transformación de Johnson para la Temperatura de Secado

Fuente: Autores.

Tabla 3.19 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de control de la °T secado

Límites de control	Johnson	Normal
UCL	0,935	111,916
\bar{x}	0,026	107,084
LCL	- 0,882	95,136

Fuente: Autores.

Tabla 3.20 Transformación de datos: Johnson-normal de los límites de especificación de la °T secado

Límites de especificación	Johnson	Normal
USL	-0,622	100
Target	-1,086	90
LSL	-1,373	80

Fuente: Autores.

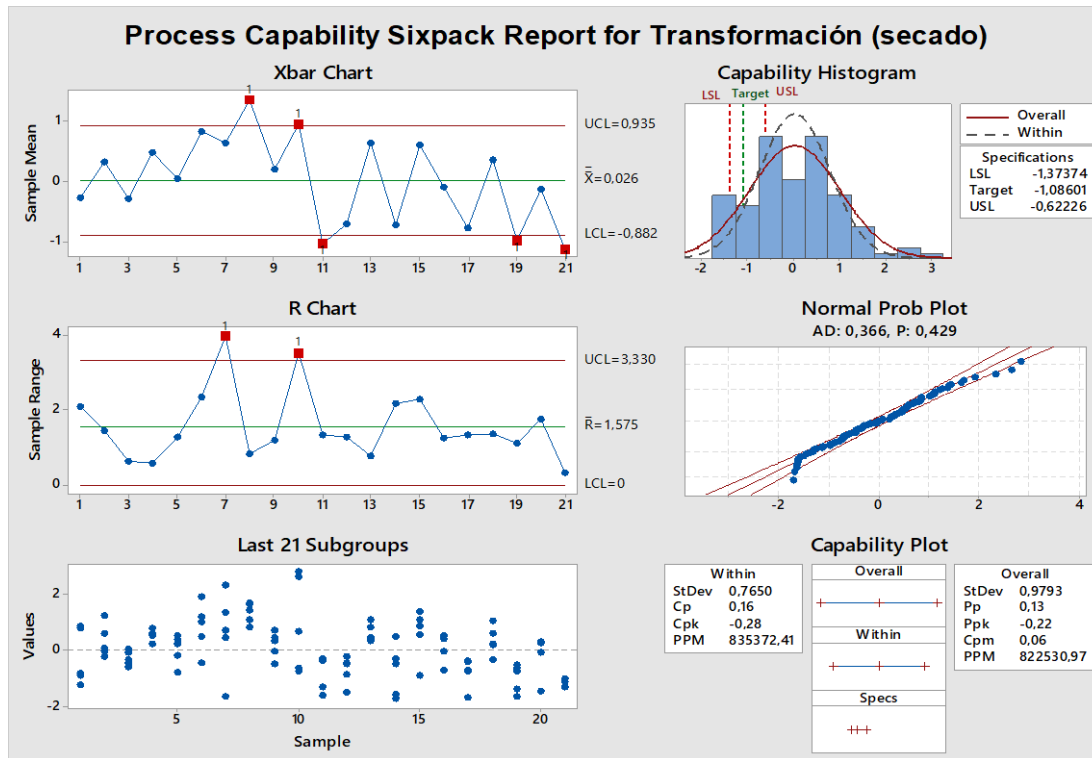


Figura 3.28: Reporte de la capacidad del proceso de la temperatura de secado

Fuente: Autores.

Análisis del proceso en la etapa de zincado con respecto a la temperatura de secado (°C)

En la figura 3.28 con respecto a la carta individual es un parámetro fuera de control, existen puntos que salen de los límites (8,10,19,21) debido a que los operadores no esperan que se establezca el equipo. En el histograma la distribución de los datos es descentralizada por encima de la función objetivo, con una desviación de 0,765 y 835372,41 PPM.

Su $C_p=0,16$ ($C_p<1$) y $C_{pk}=-0,28$ ($C_{pk}<1,25$) indican que no son adecuados para el trabajo y que no cumplen con los límites de especificaciones, encontrándose en el histograma la distribución por encima del límite superior. Con un $S_i=23,80$ y $C_{pk}=-0,28$ es un proceso de tipo D (inestable e incapaz).



Temperatura del proceso (baño de zinc °C):

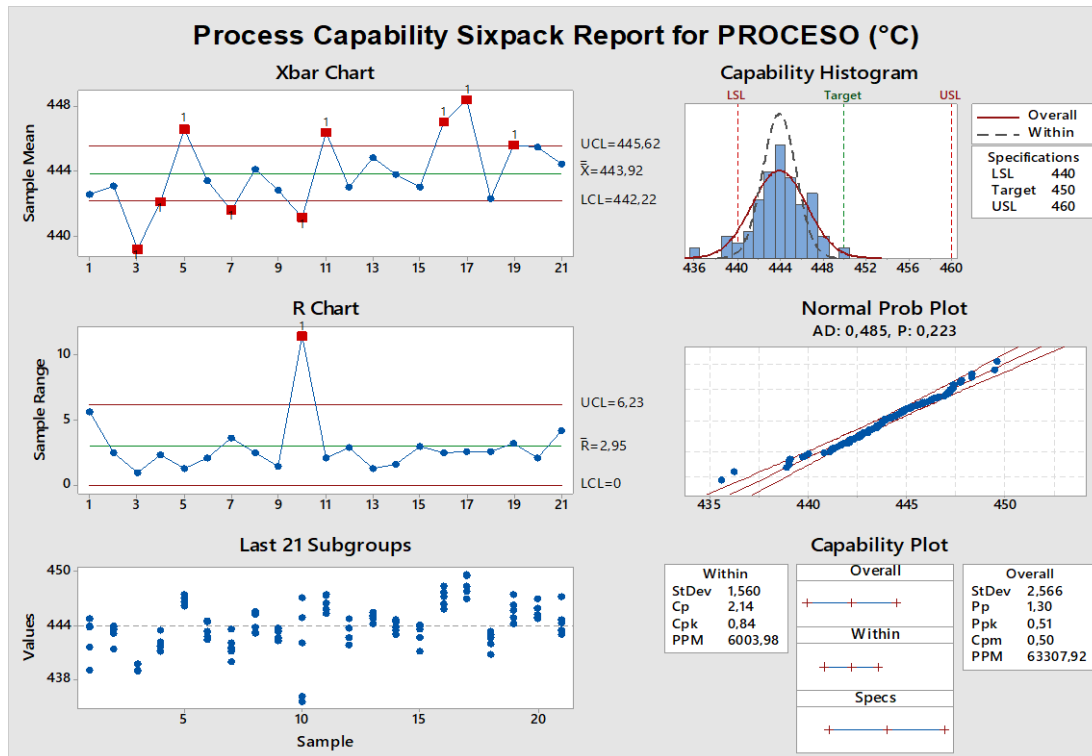


Figura 3.29: Reporte de la capacidad del proceso en relación a la temperatura del proceso (baño de zinc)

Fuente: Autores.

Análisis del proceso en la etapa de zincado con respecto a la temperatura del proceso (baño de zinc °C).

Existen 9 puntos fuera de los límites de la carta individual siendo un proceso fuera de control (figura 3.29) debido a que los operadores no permiten que se establezca el horno, por el tiempo de procesamiento a ser empleado durante la jornada. La distribución de los datos en el histograma se encuentra descentralizada con poca variabilidad por debajo de la función objetivo, con una desviación de 1,56 y 6003,98 PPM.

$C_p=2,14$ ($C_p \geq 2$) es de calidad 6 sigma, pero su $C_{pk}=0,84$ ($C_{pk} < 1$) indica que no cumple con el límite de especificación superior. Con un $St=45,85$ y $C_{pk}=0,84$ es un proceso tipo D (inestable e incapaz).



Temperatura del dross (°C):

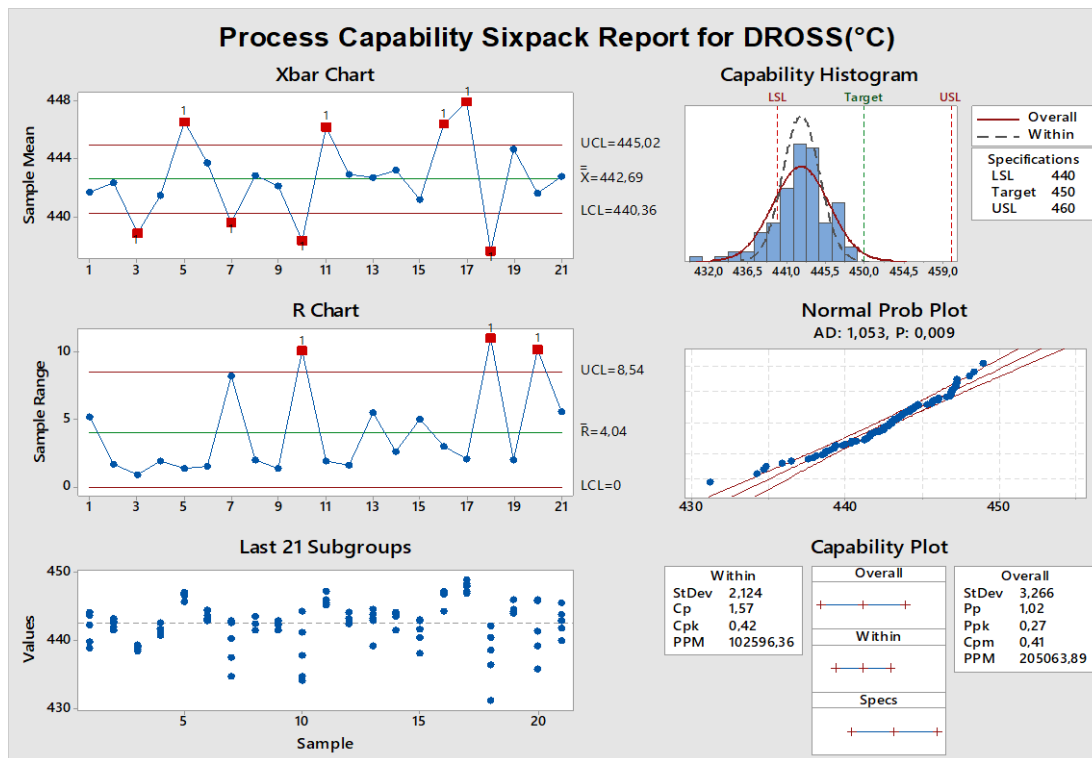


Figura 3.30: Reporte de la capacidad del proceso relacionado a la temperatura del dross

Fuente: Autores.

Análisis del proceso en la etapa de zincado con respecto a la temperatura del dross (°C).

Es un parámetro fuera de control (8 puntos) con respecto a la carta de control individual (figura 3.30). Los datos en el histograma son descentralizados con poca variabilidad por debajo de la función objetivo.

$C_p=1,57$ ($C_p>1,33$) es adecuado para el trabajo, pero su $C_{pk}=0,42$ ($C_{pk}<1$) indica que no cumple con el límite de especificación superior. Con un índice de inestabilidad de $S_i=38,09$ y $C_{pk}=0,42$ el proceso es tipo D (inestable e incapaz)

Análisis del proceso en la etapa de zincado.

De acuerdo a los resultados expresados en las tablas 3.21 y 3.22, la medición de los parámetros: secado (°C), baño de zinc (°C) y dross (°C) son procesos tipos D (inestable e incapaz). Se considera que se deberían aplicar análisis y modificaciones en la etapa para alcanzar la función objetivo y minimizar la desviación.

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Tabla 3.21 Límites de especificación y control para los distintos parámetros de la etapa de zincado

Parámetros	Límites de control			Límites de especificación			Puntos fuera de control	Número de datos
	UCL	\bar{x}	LCL	USL	TARGET	LSL		
Secado (°C)	111,916	107,084	95,136	100	90	80	5	21
Baño de zinc (°C)	445,62	443,92	442,92	460	450	440	9	21
Dross (°C)	445,02	442,69	440,36	460	450	440	8	21

Fuente: Autores.

Tabla 3.22 Índices de capacidad, inestabilidad, desviación estándar, tipo de proceso correspondientes a parámetros de la etapa de zincado

Parámetros	C_p	C_{pk}	S_t	St dev	Tipo de proceso
Secado (°C)	0,16	-0,28	23,80	0,765	D
Baño de zinc (°C)	2,14	0,84	42,85	1,56	D
Dross (°C)	1,57	0,42	38,09	2,124	D

Fuente: Autores.

V. Medición de la capa de revestimiento

Durante siete semanas se realizó la medición de la capa de revestimiento de los diferentes tubos galvanizados que se procesan en planta (Apéndice C) en las tablas 3.23 y 3.24 se detalla un promedio del espesor de capa. En la figura 3.31 se indican los resultados para tubos con espesores de acero menores o iguales a 3mm, correlacionando con la Norma INEN NTE 2483 (2009) en la que se especifica que el revestimiento para este espesor debe ser de 45 μm . Al igual que en la figura 3.32 se controla el mismo parámetro, pero para tubos con espesor de acero superior a 3mm, en los que el espesor adecuado es de 75 μm .



Tabla 3.23 Promedio del espesor de capa de los distintos espesores de tubos comprendidos entre un diámetro de 1,8-3mm.

Diámetro del tubo	Espesor del tubo	Espesor de capa(μm)	Desviación estándar (S)	Espesor óptimo (μm)
50,8mm	1,8 mm	73,992	10,152	45
1/2 pulg	2 mm	111,793	20,137	45
73 mm	2 mm	64,660	8,493	45
101,6 mm	2 mm	55,638	5,691	45
63,5 mm	2 mm	71,560	10,778	45
38,1 mm	2 mm	74,650	11,107	45
3/4 pulg	2,3 mm	74,392	17,072	45
1 pulg	2,5 mm	93,035	18,305	45
1/2 pulg	2,65 mm	144,880	18,251	45
1 1/2 pulg	2,65 mm	87,324	17,213	45
2 pulg	2,65 mm	95,940	3,301	45
101,6 mm	3 mm	61,334	5,992	45

Fuente: Autores

Tabla 3.24 Promedio del espesor de capa de los distintos espesores de tubos comprendidos entre un diámetro de 3,2-5mm

Diámetro del tubo	Espesor del tubo	Espesor de capa (μm)	Desviación estándar (S)	Espesor óptimo (μm)
1 pulg	3,2 mm	62,0436	16,401	75
2 1/2 pulg	3,2 mm	58,908	7,983	75
2 pulg	3,6 mm	82,644	3,447	75
2 1/2 pulg	5 mm	70,502	12,086	75
3 pulg	5 mm	69,797	3,550	75
4 pulg	5 mm	66,215	11,713	75

Fuente: Autores.

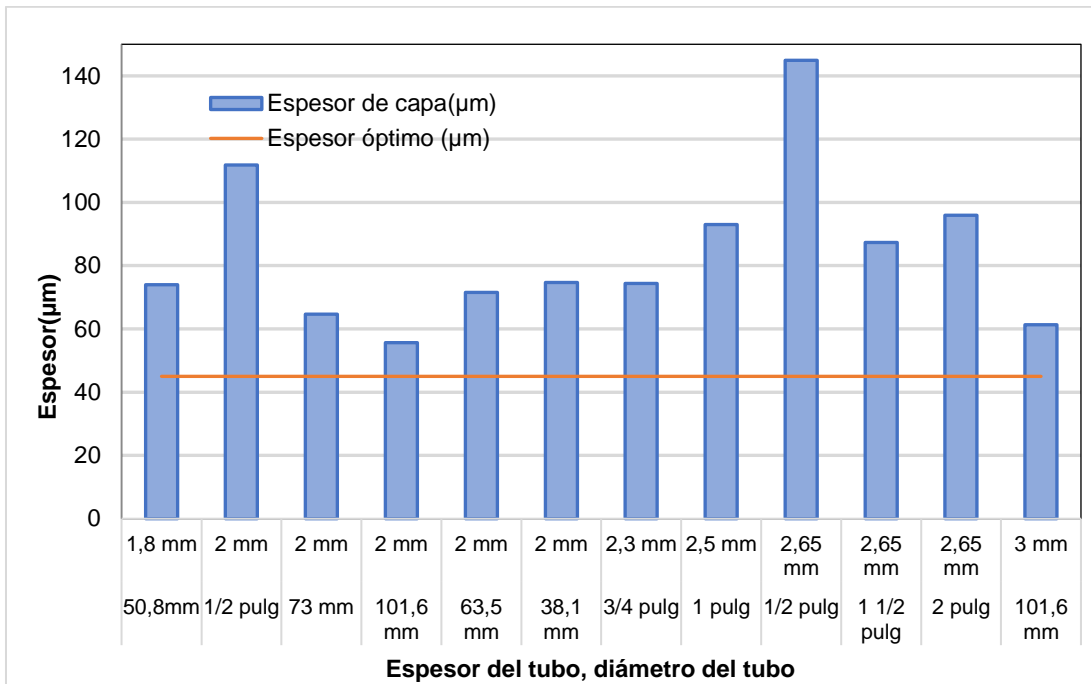


Figura 3.31: Medición de la capa de revestimiento de los tubos galvanizados en planta (espesor ≤ 3mm) durante siete semanas vs espesor óptimo

Fuente: Autores.

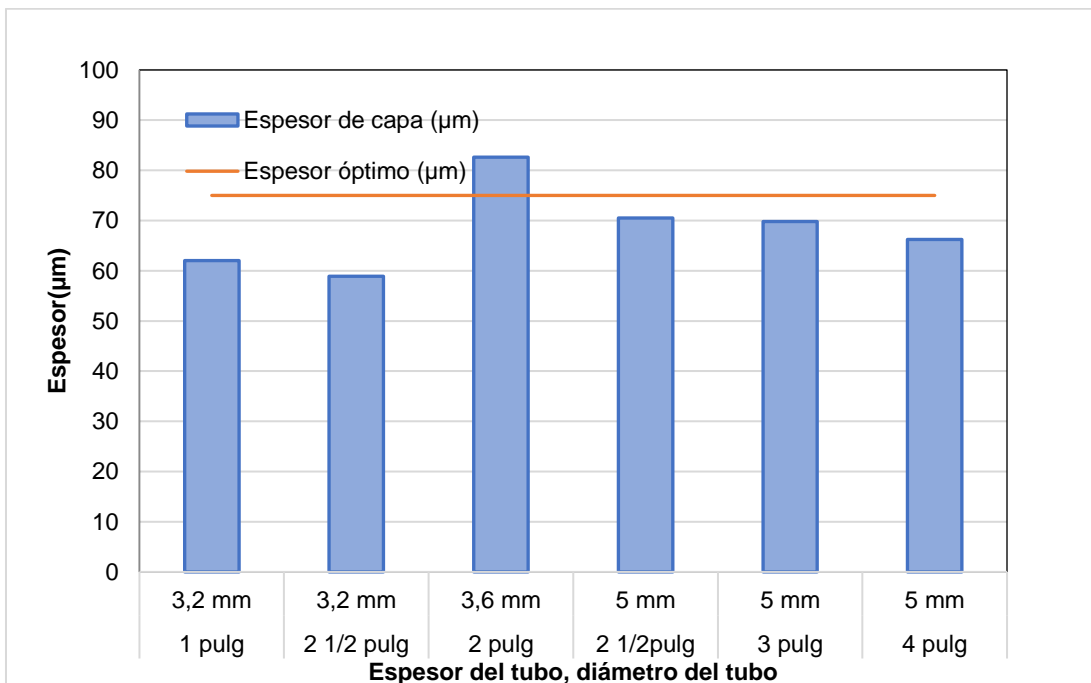


Figura 3.32: Medición de la capa de revestimiento de los tubos galvanizados en planta (espesor > 3mm) durante siete semanas

Fuente: Autores.



Análisis de los resultados de la medición de la capa de revestimiento

- Tubos galvanizados con espesor menor a 3mm: Como se observa en la figura 3.31, mayor contenido de zinc presentan en su capa de revestimiento son los tubos de 1/2pulg, en comparación con los demás diámetros que también sobrepasan el óptimo de revestimiento.
- Tubos galvanizados con espesor mayor a 3mm: En la figura 3.32, los productos galvanizados presentan un déficit en su capa de revestimiento, a excepción de 2pulg y 3,6mm de espesor.

3.2.2 Resultados de cada etapa del proceso a escala de laboratorio

I. Desengrasado

Para la etapa de desengrasado se llevaron a cabo 9 experimentos (apéndice D), en cada uno de ellos se introdujo 5 tubos, con lo cual se consideró un promedio de peso eliminado indicado en la figura 3.33; y la concentración de hierro (g/L) se cuantificó al final de cada experimento (ver figura 3.34).

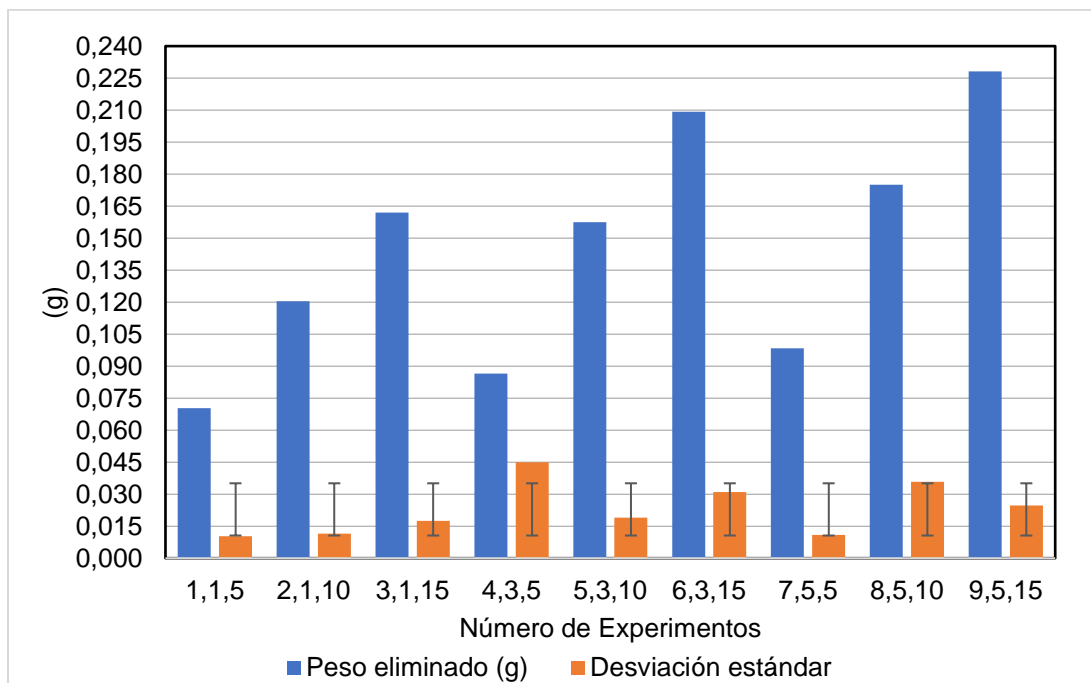


Figura 3.33: Peso eliminado en cada uno de los experimentos de la etapa de desengrasado

Fuente: Autores.

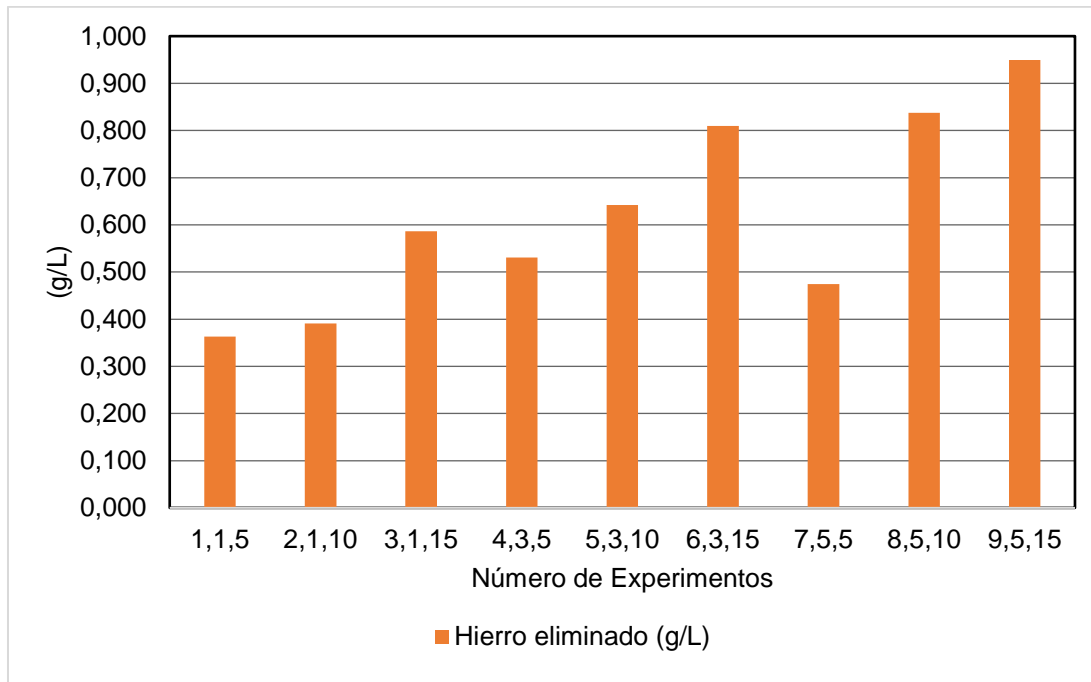


Figura 3.34: Concentración de g/ L Hierro de cada experimento en la etapa de desengrasado

Fuente: Autores.

- **Análisis en relación al peso eliminado y tiempo empleado:** En cada uno de los experimentos realizados, el experimento (9,5,15) de acuerdo a la figura 3.33 con un valor de 0,2282g es el que mayor eliminación de peso presenta con un tiempo de 15 minutos y 5%P/P H_3PO_4 , este intervalo se descarta por el tiempo ya que no es no apto para ser aplicado en planta, por lo que se analiza los tres experimentos con un tiempo de inmersión de 10 minutos. Los experimentos analizados son: (2,1,10), (5,3,10), (8,5,10); entre los cuales el mayor peso eliminado lo presenta el experimento (8,5,10) con 0,1751g a una concentración de 5%P/P H_3PO_4 y un tiempo de inmersión de 10min .
- **Análisis en relación al contenido de hierro disuelto:** Se analizó en el baño (figura 3.34) el contenido de hierro disuelto al elimina mayor óxido (mayor concentración de hierro) en el tubo ofreciendo a la etapa de decapado una mayor vida útil, los baños de un tiempo de 15 minutos se descartan por ser amplio para ser aplicado en planta y los baños de 5 minutos su eliminación de hierro es baja, razones por las cuales se opta por los baños de 10 minutos; con mayor contenido de hierro (0,81g/L) es el experimento 8,5,10 con una concentración al 5% P/P y un tiempo de inmserión de 10min.



II. Decapado

En la tabla 3.25 se registró el peso promedio eliminado por cada experimento equivalente al peso perdido de cinco tubos ingresados en cada baño (apéndice D), y la respectiva cuantificación del contenido de hierro (g/L). Para cada experimento se empleó como etapa anterior un desengrasado con concentración 1% y 5% P/P H_3PO_4 con un tiempo de 10 minutos.

Tabla 3.25 Datos correspondientes al decapado empleando dos tipos de concentración de H_3PO_4

Experimento	Datos de decapado al emplear un desengrase al 5% P/P-10min			Datos de decapado al emplear un desengrase al 1% P/P-10min		
	Promedio de peso eliminado (g)	Desviación estándar	Hierro Disuelto (g/L)	Promedio de peso eliminado (g)	Desviación estándar	Hierro Disuelto (g/L)
1,8,8	0,398	0,010	1,117	0,337	0,046	1,005
2,10,8	0,433	0,026	1,061	0,340	0,065	1,061
3,12,8	0,444	0,027	1,340	0,447	0,084	1,285
4,14,8	0,453	0,020	1,285	0,456	0,094	1,285
5,16,8	0,460	0,016	1,592	0,523	0,068	1,676
6,8,12	0,436	0,015	1,173	0,399	0,048	1,229
7,10,12	0,468	0,023	1,229	0,503	0,078	1,229
8,12,12	0,468	0,048	1,312	0,481	0,079	1,452
9,14,12	0,454	0,026	1,424	0,516	0,103	1,731
10,16,12	0,497	0,044	1,564	0,605	0,057	1,955
11,8,16	0,433	0,008	1,229	0,368	0,055	1,117
12,10,16	0,469	0,036	1,296	0,684	0,101	2,066
13,12,16	0,507	0,070	1,396	0,639	0,108	2,513
14,14,16	0,479	0,022	1,536	0,741	0,080	2,513
15,16,16	0,501	0,030	1,480	0,653	0,094	2,346
16,8,20	0,449	0,029	1,312	0,609	0,095	1,843
17,10,20	0,466	0,009	1,368	0,675	0,081	2,122
18,12,20	0,487	0,035	1,312	0,682	0,102	1,899
19,14,20	0,479	0,037	1,452	0,693	0,105	2,122
20,16,20	0,480	0,024	1,676	0,772	0,243	2,402

Fuente: Autores.

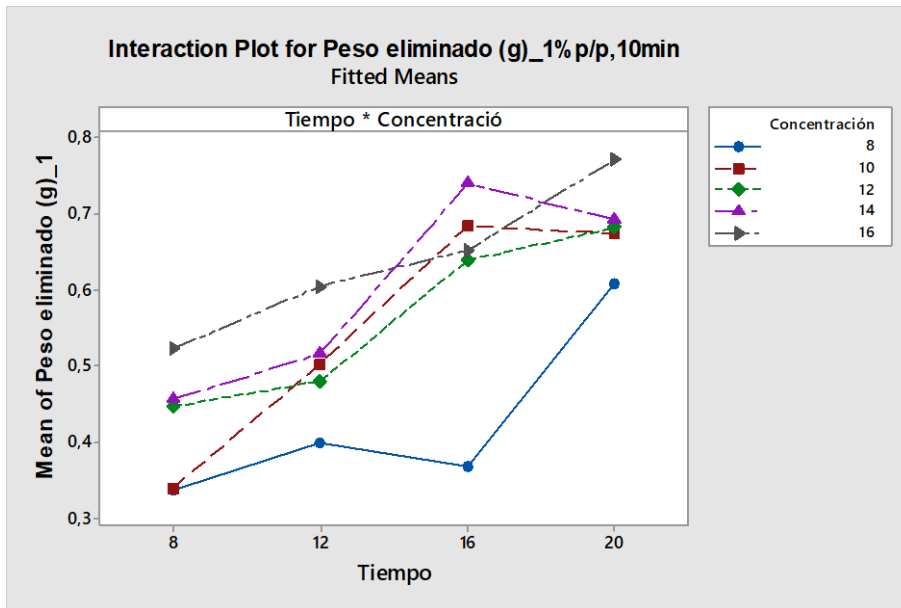


Figura 3.35: Interacción entre el peso eliminado, tiempo y concentración empleados en cada experimento, empleando un baño al 1% de H_3PO_4 por 10 min anterior a la etapa de decapado

Fuente: Autores.

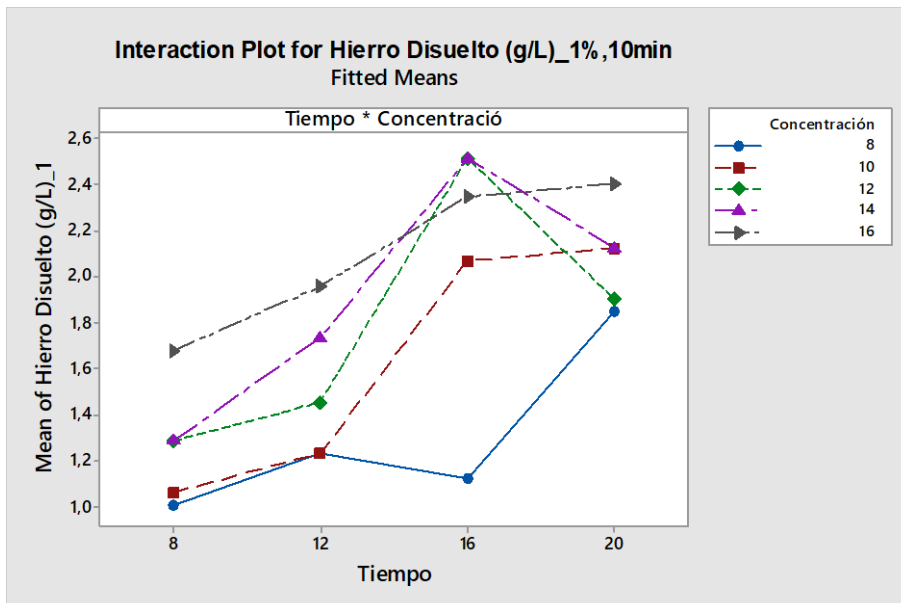


Figura 3.36: Interacción entre el hierro disuelto, tiempo y concentración empleados en cada experimento, con un baño al 1% de H_3PO_4 por 10 min anterior a la etapa de decapado

Fuente: Autores.

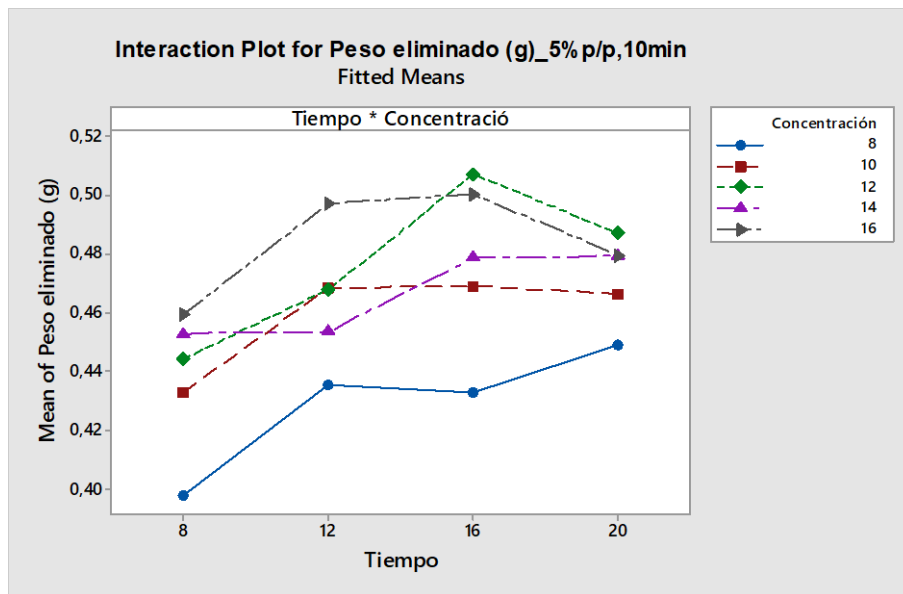


Figura 3.37: Interacción entre el peso eliminado, tiempo y concentración empleados en cada experimento, empleando un baño al 5% de H_3PO_4 por 10 min anterior a la etapa de decapado

Fuente: Autores.

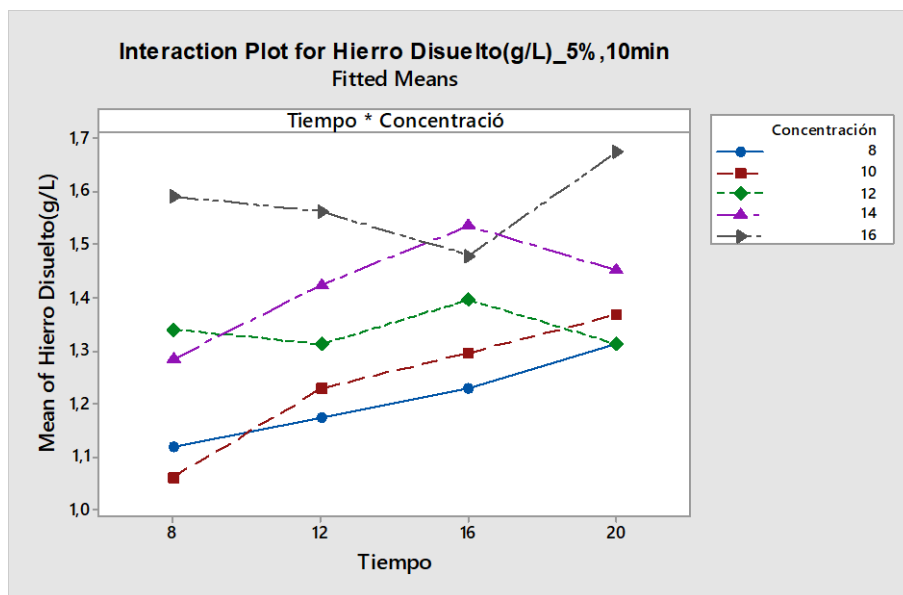


Figura 3.38: Interacción entre el hierro disuelto, tiempo y concentración empleados en cada experimento, con un baño al 5% de H_3PO_4 por 10 min anterior a la etapa de decapado

Fuente: Autores.

Análisis de resultados de la etapa de decapado

- **Análisis en relación al peso eliminado y su correlación con la eficiencia de la etapa de desengrasado :** El peso eliminado ilustrado en las figuras 3.35 y



3.37 se relaciona en función al cambio de concentración de la etapa de desengrasado; es así que se observa que al aplicar un desengrase al 1% por 10 minutos la eficiencia del baño de decapado con relación al peso eliminado es 0,3-0,8g, en comparación con el de 5% por 10 minutos que es de 0,4-0,5g. En esta etapa se ve reflejada por la efectividad a nivel de costos ya que se puede mantener la eficiencia del baño de decapado, con la variación de la concentración del baño de desengrasado. Para obtener la misma eficiencia con respecto a la limpieza y tiempo requerido se debe utilizar la tabla 3.26:

Tabla 3.26 Rango de tiempo a emplear conforme el nivel de concentración del baño de decapado

Concentración (%P/P HCl)	Tiempo mínimo (min)	Tiempo máximo (min)
8	20	>20
10	12	16
12	12	16
14	12	16
16	8	12

Fuente: Autores.

- **Análisis con respecto a la concentración de hierro disuelto:** La interacción que tiene el tiempo y la concentración sobre el hierro disuelto es tal que a mayor concentración mayor eliminación de hierro, estos valores se observan en la figura 3.38 (no se analiza la figura 3.36 porque tiene el mismo patrón que la figura 3.38). Respecto a la concentración de 16%P/P a 8 minutos tiene un máximo de eliminación, pero conforme pasa el tiempo este se ve reducido porque el hierro disuelto se transforma en cloruro férrico y cloruro ferroso, llegando a disminuir el contenido de hierro al cabo de 16 minutos los cuales no se pueden cuantificar en los ensayos, pasado este tiempo vuelve a incrementar, debido a que intervienen: $FeCl_3$ y HCl que atacan al material base. Caso similar lo presenta 12 y 14 %P/P con un mayor intervalo de tiempo para que se produzca el desgaste de la pieza; al igual que al 8 y 10% P/P el aumento de tiempo es mayor.



III. Fluxado

En la tabla 3.27 se encuentran los valores correspondientes a grados °Be cuando se varía la concentración de sal de flux y se representa en la figura 3.39 con su respectiva regresión y su correlación.

Tabla 3.27 Mediciones de °Be obtenidos cuando se varía la sal de flux

Sal de flux (g/L)	%P/P	°Be
160	13,79	11
210	17,36	13
260	20,63	16
310	23,66	18
360	26,47	20
410	29,08	21
460	31,51	23
510	33,77	25
560	35,90	25
610	37,89	27
660	39,76	28
710	41,52	29
760	43,18	30
810	44,75	31
860	46,24	32

Fuente: Autores.

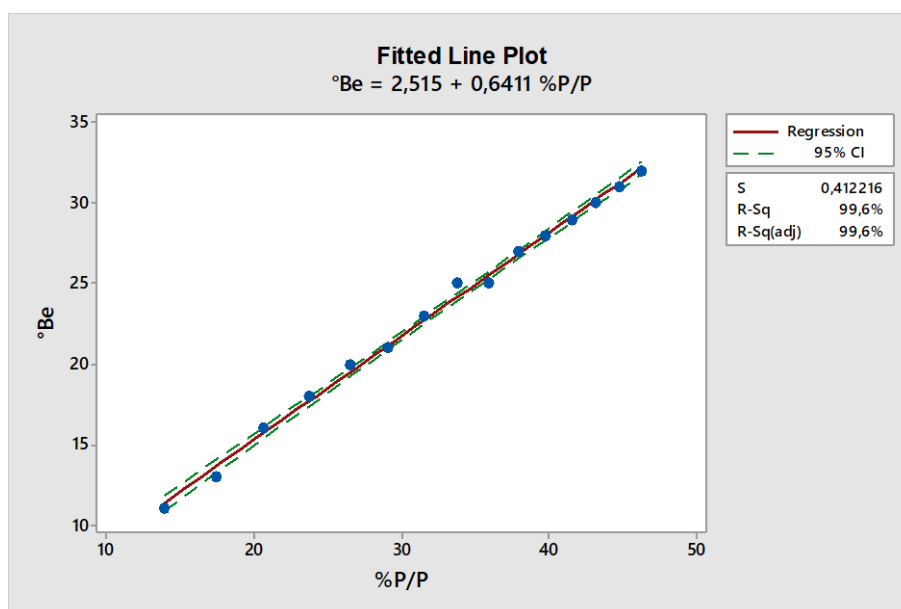


Figura 3.39: Regresión lineal entre °Be y sal de flux (%P/P)

Fuente: Autores.



Universidad de Cuenca

Para determinar el comportamiento de los componentes de la sal de flux (cloruro de amonio y cloruro de zinc) se realizaron mediciones, variando la temperatura y la concentración de sal (Apéndice D).

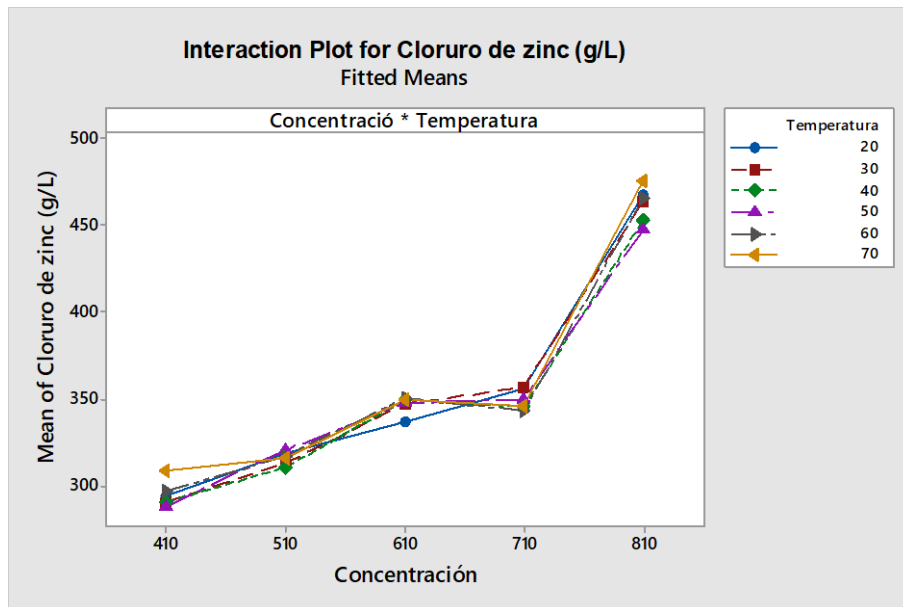


Figura 3.40: Comportamiento de cloruro de zinc vs temperatura y concentración total de sal de flux

Fuente: Autores.

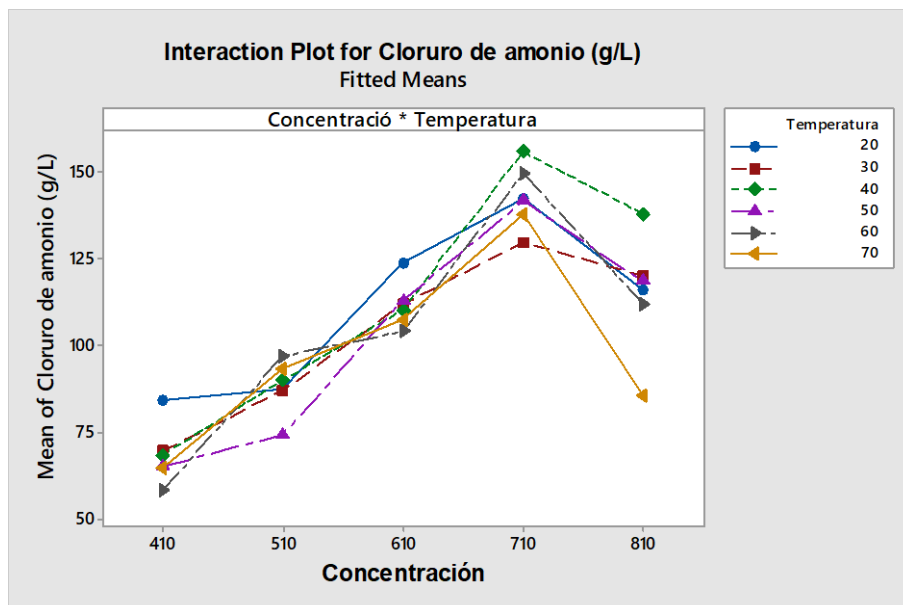


Figura 3.41: Comportamiento de cloruro de amonio vs temperatura y concentración total de sal de flux

Fuente: Autores.



Determinado el comportamiento de las sales de flux se trabajará con rangos específicos para la posterior inmersión de la pieza en el baño de zinc, y determinar cómo influye en la capa de revestimiento (micraje) cuyos valores se representa en la tabla 3.28. Para obtener el valor del micraje indicado en la tabla 3.28 se realizaron 10 mediciones expresados en el apéndice D.

Tabla 3.28 Valores obtenidos de micraje del tubo galvanizado al variar la concentración de sal de flux y su temperatura

Concentración (g/L)	Temperatura (°C)	Espesor de capa (µm)	Desviación estándar (S)
410	30	109,5	6,638
410	50	113,05	19,599
410	70	83,063	11,539
510	30	123,501	27,627
510	50	97,292	7,052
510	70	89,426	4,589
610	30	88,873	6,681
610	50	99,116	8,464
610	70	105,504	7,131
710	30	91,714	5,249
710	50	94,417	6,867
710	70	99,944	8,481
810	30	108,47	4,019
810	50	96,569	7,730
810	70	103,473	8,176

Fuente: Autores.

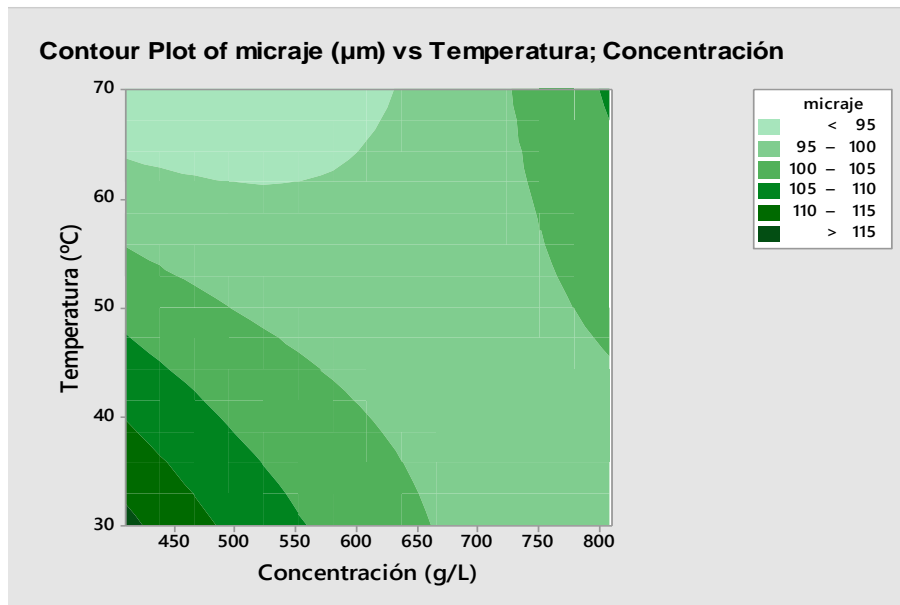


Figura 3.42: Diagrama de contorno del micraje del tubo galvanizado vs la concentración de sal de flux y su temperatura

Fuente: Autores.

Análisis de resultados de la etapa de fluxado

- **Comportamiento de la sal de flux vs °Be:** Como se observa en la figura 3.39 la concentración de sal es directamente proporcional a los °Be indicativo de correlación de $R^2=99.6\%$ como aceptación.
- **Comportamiento del cloruro de amonio y zinc vs temperatura y concentración total de sal:** El comportamiento del cloruro de zinc (300-350g/L) es estable en el rango de 410-710g/L de sal total como se observa en la figura 3.40, a partir de 710g/L existe un aumento considerable de este compuesto; mientras que para el cloruro de amonio (50-150 g/L) no existe estabilidad en un rango de 410-710g/L de concentración total de sal (figura 3.41).
- **Comportamiento de la sal total y temperatura vs el espesor de capa:** Dada la figura 3.42 se ilustra contornos que demuestran en que rangos se debería trabajar para obtener un descenso en el espesor de capa relacionando la concentración y la temperatura con la que se debería trabajar la sal de flux. Para un micraje menor a $95\mu\text{m}$, el rango de concentración es 410-650 g/L a una temperatura de 60-70°C siendo el más cercano al micraje óptimo de 45-75 μm .



IV. Zincado

Previa a la etapa de zincado de los tubos se realizó la limpieza superficial aplicando las condiciones indicadas en la tabla 3.29.

Tabla 3.29 Parámetros para la limpieza superficial de los tubos

Etapa	Condiciones
Desengrasado	Concentración=5%P/P H_3PO_4 ; pH=0,88; tiempo de inmersión=10min.
Decapado	Concentración=16%P/P HCl; tiempo de inmersión=12min.
Fluxado	Concentración=510g/L sal de flux; pH=3,55; tiempo de inmersión=1min; temperatura=65°C

Fuente: Autores.

Se introdujo al baño de zinc 6 probetas para cada experimento, se realizó la medición de espesor de capa dos veces en cada tubo, obteniendo 12 mediciones en cada experimento (Apéndice E).

En relación a la fluidez del baño en cada experimento, no presento mayores inconvenientes en el escurrido. Como características adicionales para verificar la calidad de la probeta se realizaron los ensayos de adherencia, revestimiento (cuantitativa) y de manera cualitativa brillo, apariencia de la superficie y floreado expresado en la tabla 3.30.

Tabla 3.30 Ensayos de adherencia, espesor de capa, brillo y floreado

Número de experimento	Espesor		Adherencia	Brillo	Floreado	Superficie
	Promedio (μm)	Desviación estándar (S)				
1	79,233	7,780	5B	SI	SI	LISO
2	85,608	7,137	5B	SI	SI	LISO
3	99,891	7,099	4B	SI	NO	BAJA RUGOSIDAD



Universidad de Cuenca

4	80,407	8,353	4B	SI	NO	BAJA RUGOSIDAD
5	93,333	5,110	5B	SI	NO	BAJA RUGOSIDAD
6	98,058	5,324	4B	SI	NO	LISO
7	85,508	4,588	3B	SI	NO	BAJA RUGOSIDAD
8	98,434	6,418	0B	SI	NO	BAJA RUGOSIDAD
9	142,817	5,580	1B	SI	NO	ALTA RUGOSIDAD
10	121,850	7,728	0B	NO	NO	LISO
11	154,242	7,906	5B	NO	NO	LISO
12	198,058	6,899	0B	NO	NO	LISO
Zinc puro-2min	93,042	8,452	5B	NO	NO	LISO
Zinc puro-4min	108,017	9,277	5B	NO	NO	LISO
Zinc puro-6min	158,750	7,432	0B	NO	NO	LISO

Fuente: Autores

Se consideró las probetas más representativas que se ilustran en la tabla 3.31 que reflejan las características visuales que puede presentar el producto terminado.

Tabla 3.31 Características visuales de los recubrimientos (acabado, adherencia)

Ilustraciones de los experimentos	Características
	<p>Experimento 1: (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)</p> <p>En relación al grado de adherencia es 5B (0% de remoción de la capa de revestimiento de zinc). Presencia de floreado y brillo. Acabado liso y uniforme.</p>
	<p>Experimento 3: (0,25A/0,05B/0,07C/0,02Di-6min)</p> <p>Grado de adherencia de 4B (5% de remoción de la capa de revestimiento). Posee brillo, pero no floreado. Superficie poco rugosa.</p>
	<p>Experimento 11: (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-4min)</p> <p>Grado de adherencia de 4B (5% de remoción de la capa de revestimiento). No posee brillo y floreado. Acabado liso y uniforme.</p>
	<p>Experimento 12: (0,35A/0,054B/0,07C/0,025D-6min)</p> <p>Grado de adherencia de 0B (superior a 65% de remoción de la capa de revestimiento). No posee brillo y floreado. Acabado liso y uniforme.</p>

Fuente: Autores.



Universidad de Cuenca

Debido a que los experimentos 1 y 2 presentan una mayor aceptación en relación a las características observadas, se evalúa el floreado en la figura 3.43

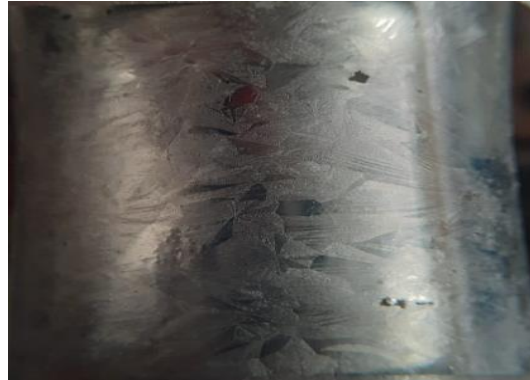
Experimento 1

(0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)



Experimento2

(0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)



Floreado regular o Flor regular, es estándar, cristales de tamaño ordinario (15-25 mm)

Floreado minimizado o Flor mínima, el grano es visible, pequeño y menos distintivo que lo que se ve en un patrón de floreado regular, son cristales de 1 mm aprox.

Figura 3.43: Tipos de floreado de zinc sobre la superficie de acero

Fuente: Autores.

En la tabla 3.32 y 3.33 se registran los valores correspondientes al ensayo de cámara salina.

Tabla 3.32 Masa inicial (g) de las probetas antes de su ingreso en la cámara salina

# Experimento	Tubos		
	#1	#2	#3
1	295	290,1	291,5
2	292,5	291,7	290,2
3	300,3	302,4	289,7
4	289,4	287,8	286,7
5	299,4	295	293,1
6	291,1	289,8	289,8
7	296,6	299,5	298



Universidad de Cuenca

8	303,6	300,6	299,4
9	302,2	301,9	308,2
10	298,8	303	-
11	304,6	303,3	-
12	306,7	305,2	-

Fuente: Autores

Tabla 3.33 Masa final (g) de las probetas después de la cámara salina

# Experimento	Tubos		
	#1	#2	#3
1	294,7	289,6	291,2
2	292,2	291,3	289,7
3	300	301,9	289,3
4	289,1	287,4	286,3
5	299	294,7	293,1
6	290,8	289,5	289,5
7	296,4	299,2	297,8
8	303,6	300,6	299,3
9	302	301,8	308,1
10	298,4	302,9	-
11	304,2	303,1	-
12	306,4	305	-

Fuente Autores.

Nota: No se registran valores del tercer tubo a partir del experimento 10 debido a que la capacidad de la cámara salina no es suficiente.

En la figura 3.44 se muestran los resultados obtenidos de pérdidas de masa (g) de los distintos experimentos.

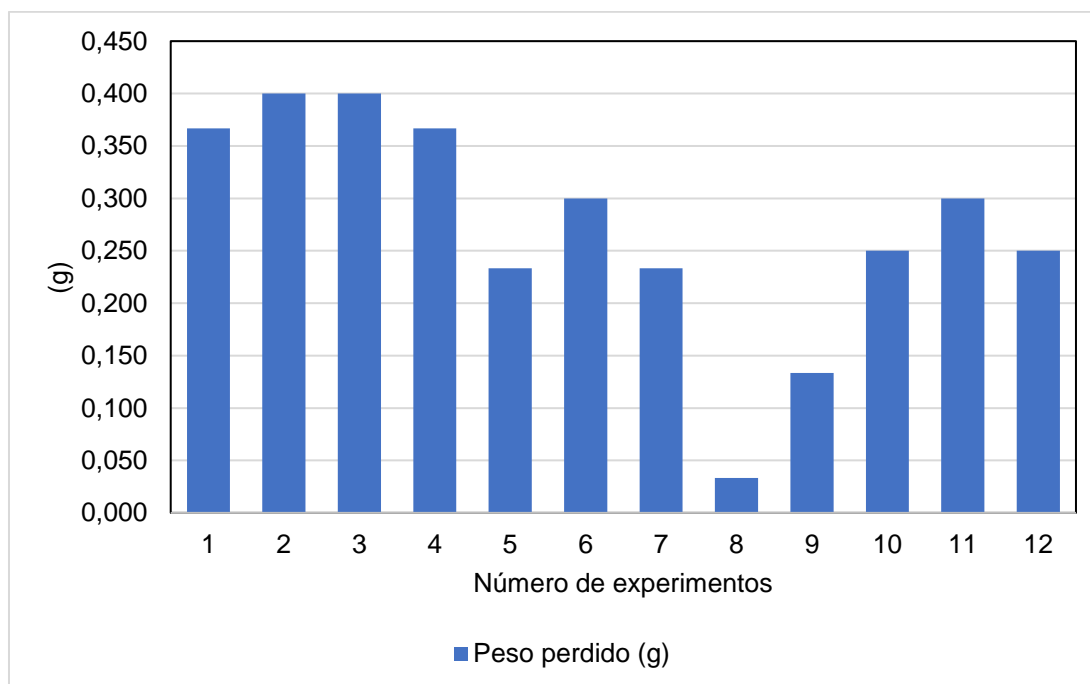


Figura 3.44: Masa perdida (g) de los distintos experimentos colocados en cámara salina

Fuente: Autores

Para reducir el valor de espesor de capa del experimento #1, se reduce su tiempo de inmersión a 1 minuto, los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.34.

Tabla 3.34 Características y valores obtenidos al variar el tiempo de inmersión en el experimento 1

Tiempo de inmersión	Acabado	Adherencia	Espesor de capa (μm)				Promedio (μm)
1 min	Liso-Satinado	5B	55,77	58,17	55,19	56,88	54,886
			56,93	49,39	54,2	52,56	

Fuente: Autores.

Para una mejor visualización y aprobación de la formación de las capas de revestimiento se emplea un análisis metalográfico de las probetas (figura 3.45-3.47) en comparación con el análisis de la probeta obtenida en planta (figura 3.48).

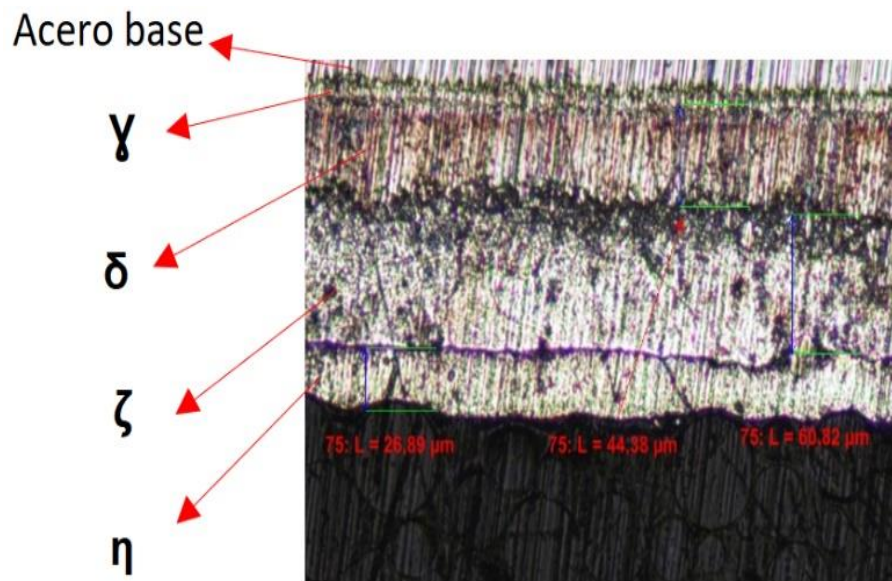


Figura 3.45: Micrografía de revestimiento del experimento 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min)

Fuente: Microscopio metalográfico invertido modelo GX51

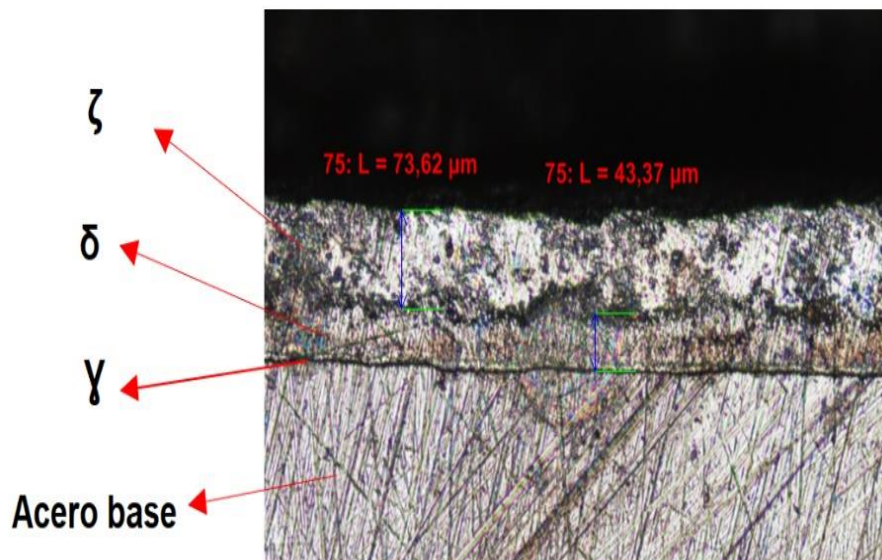


Figura 3.46: Micrografía de revestimiento del experimento 2 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-4min)

Fuente: Microscopio metalográfico invertido modelo GX51

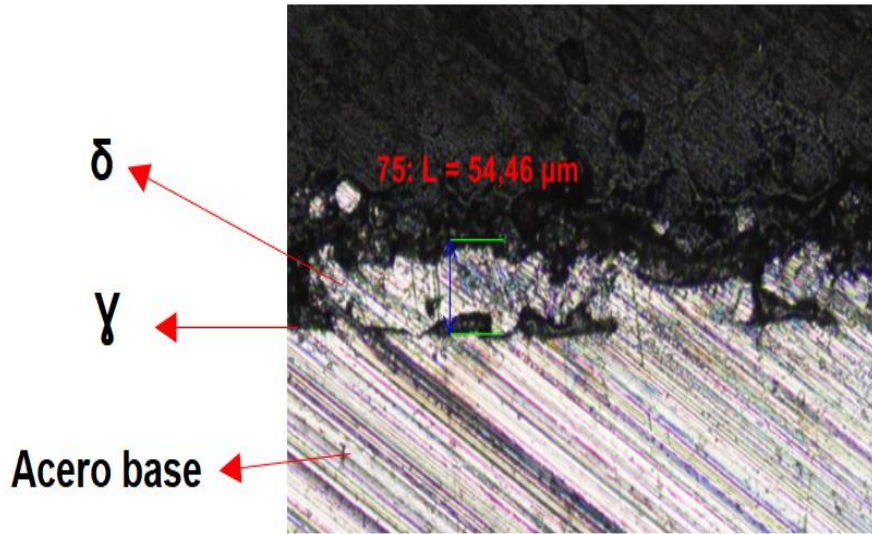


Figura 3.47: Micrografía de revestimiento del experimento 1 (0,25A/0,05B/0,07C/0,025D-2min) empleando un tiempo de inmersión de 1 min.

Fuente: Microscopio metalográfico invertido modelo GX51

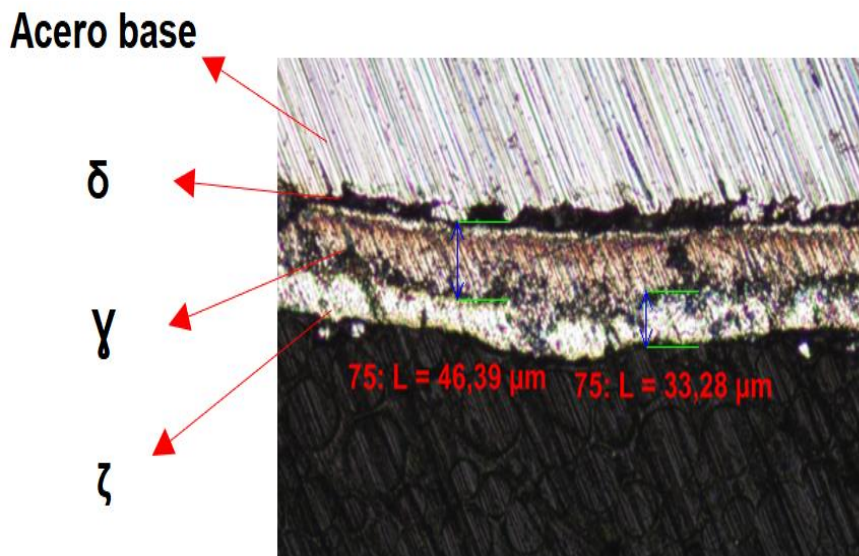


Figura 3.48: Micrografía de revestimiento de probeta en planta

Fuente: Microscopio metalográfico invertido modelo GX51

Análisis de resultados de la etapa de zincado:

- **Espesor de capa:** Para los experimentos con un tiempo de inmersión mayores a dos minutos el espesor de capa obtenido oscila entre 86-200 μm ; a tiempos menores a dos minutos oscila entre 79-86 μm , a excepción del experimento # 10



Universidad de Cuenca

que tiene un espesor de 122 μm ; en comparación al aplicar un baño a base de zinc puro, el espesor es 90-160 μm . En relación a la composición química al aumentar el %P/P del metal A y metal B en conjunto aumenta el espesor de capa.

- **Acabado de la pieza:** Para todos los experimentos se analizó adherencia, superficie, brillo y floreado (Tabla 3.30). Se acoplaron de manera satisfactoria a estas características los experimentos 1 y 2.
- **Corrosión:** Los experimentos con mayor peso perdido en la cámara salina fueron 2 y 3, y menor peso perdido fueron 8 y 9. El experimento 1 presenta un leve aumento de pérdida de peso por la formación de cristales grandes (figura 3.42) lo que implica el ingreso de la solución salina en la probeta a través de sus capas.
- **Análisis metalográfico:** De acuerdo a los resultados obtenidos en las figuras 3.45-3.47, la aleación que presenta las cuatro capas desarrolladas es el experimento 1 (figura 3.45) con un tiempo de inmersión de dos minutos; no es factible realizar una inmersión a menor tiempo debido a que no se desarrollan las capas en su totalidad como se observa en la figura 3.47 al igual que a mayor tiempo las capas son compactas con ausencia de la última capa (figura 3.46). La probeta proveniente de planta posee la formación de 3 capas (figura 3.48) la ausencia de cualquiera de las cuatro capas produce defectos de la pieza provocando aumento de corrosión, disminución de adherencia, mal acabado.

3.3 Análisis de costos

Se realiza un análisis de costos de implementación del proyecto para un periodo de 5 años, en base al tiempo de vida del desengrasado, el cual es el insumo limitante al momento de la preparación de la superficie. Las etapas de decapado y fluxado se proyectan al mismo tiempo y con respecto a la etapa de zincado se evalúa el costo al recargar totalmente la cuba con la respectiva formulación que cumple con la optimización del proceso.

Los valores presentados en la tabla 3.35 y 3.37 del costo de los insumos/ kilogramo se estimó a través de una empresa distribuidora que proporciona insumos a empresas de galvanizado de acero; por temas de confidencialidad la cantidad requerida se multiplica por un factor que solo los autores conocen, se asigna un factor f que indica la periodicidad de cambio (5 años) y el nombre de los metales empleados se sustituye por metal A,B,C y D.

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Tabla 3.35 Costo de implementación del proyecto evaluado en 5 años

Etapa	Capacidad de la Tina	Reactivo/ Metal	%p/p	Cantidad Requerida		f	Costo		
				Kg	m ³		Kg	Cantidad requerida	Etapa
Desengrasado	7,7m ³	H ₃ PO ₄	5	4277,000	1,750	1	\$ 5,00	\$ 21.385,00	\$ 21.385,00
Decapado	7,7m ³	HCl	16	5464,282	3,624	30	\$ 0,40	\$ 65.571,39	\$ 72.791,31
		Anti vapor	-	14,132	0,014		\$ 6,63	\$ 2.810,81	
		Inhibidor	-	28,264	0,028		\$ 5,20	\$ 4.409,11	
		Fluxado	7,7m ³	Sal de Cloruro Amonio/Zinc	33,77		5105,1	-		2	$ 2,00	$ 20.420,40	$ 20.420,40
Zincado	70000Kg	Zinc	98,5	89635	-		\$ 2,90	\$ 259.941,5	\$ 421.762,6
		A	0,25	227,5	-		\$ 466,60	\$ 106.151,5	
		B	0,05	45,5	-		\$ 682,30	\$ 31.044,65	
		C	0,07	63,7	-		\$ 288,32	\$ 18.365,98	
		D	0,025	22,75	-		\$ 275,12	\$ 6.258,98	
Costo total del proceso								\$ 536.359,3	

Fuente: Autores

Debido a que se debe comparar la diferencia de costos para la implementación, se evalúa el sistema actual que poseen escalado a 5 años (tabla 3.35), y considerando que se suma la cantidad de gramos de zinc que pierden promedio (14µm) con respecto a la tubería de 1" y 2,5 mm de espesor (tabla 3.36).

Tabla 3.36 Datos adicionales para la evaluación de costos de implementación

Promedio de acero tratado	351470,6	m ²		Kg de zinc consumidos	Costo total zinc
Micraje en planta (1" - 2,5mm)	94,64	µm	705g/m ²	247786,773	\$ 718.581,64
Micraje en experimentación (1" - 2,5mm)	79,233	µm	564g/m ²	198229,4184	\$ 574.865,31

Fuente: Autores



Tabla 3.37 Costo en planta en el periodo de 5 años

Etapa	Capacidad de la Tina	Reactivo/ Metal	%p/p	Cantidad Requerida		f	Costo		
				Kg	m ³		Kg	Cantidad requerida	Etapa
Desengrasado	7,7m ³	H ₃ PO ₄	3	2566,200	1,050	1	\$ 5,00	\$ 12.831,00	\$ 12.831,00
Decapado	7,7m ³	HCl	18	6147,318	4,076	60	\$ 0,40	\$ 147.535,62	\$163.780,4
		Antivapor	-	15,898	0,016		\$ 6,63	\$ 6.324,32	
		Inhibidor	-	31,796	0,032		\$ 5,20	\$ 9.920,50	
Fluxado	7,7m ³	Sal de Cloruro Amonio/Zinc	46,24	8108,1	-	2	\$ 2,00	\$ 32.432,40	\$ 32.432,40
Zincado	70000Kg	Zinc	98,5	89635	-		\$ 2,90	\$ 259.941,5	\$422.023,8
		Aluminio	0,07	63,7	-		\$ 288,32	\$ 18.365,98	
Total del proceso								\$631.067,6	

Fuente: Autores

Análisis de costos de implementación

Como se observa en la tabla 3.35 existe una diferencia del 15 % (reducción de costos del proceso en planta), si se reestructura la composición química y la dosificación de los baños tanto en las etapas de desengrasado, decapado, fluxado y zincado.

En la etapa de desengrasado existe una inversión significativa (60%) comparada con la de planta debido a que la concentración propuesta es alta para que el contenido de grasa se elimine en totalidad y el óxido de hierro sea menor al pasar a las siguientes etapas; esta concentración producirá una reducción de costo (47,5%) en la etapa de decapado (se reduce a la mitad los Kg de HCl a utilizar en cada dosificación) y fluxado (reducción de concentración de sal ya que la propuesta en planta es alta para este proceso).

En la etapa de zincado cambiando la composición química actual por la propuesta (A(0,25%P/P), B (0,05%P/P), C(0,07%P/P) y D(0,025%P/P)) se reduce en 0,06%, este valor no es significativo; se obtendría un mejor control en la calidad del recubrimiento ofreciendo al mercado un producto con mejores características.



3.4 Conclusiones

- Al realizar una evaluación de la situación de la Empresa TUGALT S.A. se determinó que mantienen una secuencia en su proceso en base a normativas, en las cuales considera como etapas: desengrasado ácido (H_3PO_4), decapado ácido (HCl), fluxado ($ZnCl_2+NH_4Cl$) y zincado (con adición de láminas de aluminio); por lo que se consideró la infraestructura con la que se maneja, óptima para su funcionamiento y cumplimiento con la demanda productiva y exigida por el mercado.
- Se determinó las variables críticas de cada etapa y su rango de operación mediante cartas de control: en el caso de la etapa de desengrasado pH (2-3), concentración (1-3) %P/P H_3PO_4 , tiempo de inmersión (10min) y concentración (12-30) g/L Fe; decapado, concentración (10-16) %P/P HCl, tiempo de inmersión (20-40min) y concentración (0-80) g/L Fe ; fluxado pH (4-5), °Be (28-32), tiempo de inmersión (1-2min) y concentración (0,6-1) g/L Fe; zincado, temperatura de secado (80-100°C), temperatura del proceso (baño de zinc 440-450°C) y tiempo de inmersión (1min). La mayoría de las variables mencionadas requieren un control estricto de funcionamiento para mejorar la calidad de las etapas a lo largo del proceso y determinar de manera acertada hacia dónde enfocar esfuerzos de la empresa en recursos, tiempo y mano de obra.
- En relación a la experimentación a escala de laboratorio, la etapa de desengrasado se debe implementar con las siguientes características: 5%P/P H_3PO_4 con un tiempo de inmersión de 10 minutos, el cual eliminó 0,1751g/ 0,7Kg de acero negro y 0,838 g/L Fe/0,7Kg de acero tratado, obteniendo una mayor eficiencia en la cantidad en peso a remover y contenido de hierro.
- En la etapa del decapado el rango óptimo de trabajo varía en función de la concentración de ácido clorhídrico y su contenido de hierro; por lo que se realizó un análisis para cada concentración con su respectivo tiempo de inmersión que se encuentran ilustradas en la tabla 3.26 que son aplicables a planta. Cabe mencionar que al utilizar un desengrasado al 5% P/P H_3PO_4 reduce el arrastre de hierro por parte de las probetas de acero hacia la etapa de decapado, aumentando la eficiencia del baño (1 mes) y disminuyendo el tiempo de inmersión (20min).
- En el fluxado no se debe trabajar a concentraciones mayores a 610 g/L, en consecuencia se produce un aumento de la capa de revestimiento mayores a 95µm, y la inestabilidad de la sal puede producir manchas negras o picaduras



Universidad de Cuenca

en la pieza; mientras que a concentraciones menores a 610g/L se debe trabajar en un rango de temperatura entre 60-65°C obteniendo una reducción de capa.

- Para la etapa de zincado se cuantificaron cuatro combinaciones a tres tiempos, siendo la más apta con un valor de espesor de capa (79,233 μm) en comparación con el valor obtenido en planta (94,6 μm) es el experimento número 1 con un tiempo de inmersión de dos minutos y una combinación A(0,25%P/P), B(0,05%P/P), C(0,07%P/P) y D(0,025%P/P); con un análisis de apariencia aceptable (brillo, floreado y acabado), con un desprendimiento de capa de 0% (adherencia) y con peso perdido de 0,365g en el análisis en cámara salina (corrosión).
- Los análisis realizados mediante el microscopio determinaron que el experimento 1 con 2 minutos de inmersión, las cuatro capas (gamma, delta, zeta y eta) se desarrollan por completo, indicando que en estas determinadas cantidades los metales A(0,25%P/P), B(0,05%P/P), C(0,07%P/P) y D(0,025%P/P) influyen en su formación y permiten una reducción de capa de 14 μm .
- La utilización del baño de zincado con una aleación: Zn(98,5%P/P)-A(0,25%P/P), B(0,05%P/P), C(0,07%P/P) y D(0,025%P/P) con un tiempo de inmersión de dos minutos (experimento 1), es apto para ser aplicado en planta ya que permite a) Reducción de costo \$ 261,2 b) Reducción de recubrimiento 14 μm .

3.5 Recomendaciones

- Para la cuantificación de los diferentes parámetros de control empleados a lo largo del proceso se recomienda una periodicidad diaria en el caso de las etapas de desengrasado, decapado y fluxado permitiendo una respuesta rápida al cambio de concentraciones antes que llegue a los límites superiores o inferiores de control. En el caso del control de temperaturas en el secado y el proceso se debe realizar cada hora debido a que la variación es elevada, permitiendo al operador tener un control estricto.
- Se recomienda la capacitación a los operadores sobre determinación de concentración en el proceso y que decisiones tomar en caso de que el proceso este fuera de los límites de control y de especificación.



Universidad de Cuenca

- Se debe aumentar la concentración de la etapa de desengrasado al 5%, para disminuir el arrastre de grasa a la etapa de decapado y aumentar la durabilidad de este.
- Se debe realizar una limpieza periódica de las etapas (desengrasado, fluxado) con un intervalo de dos meses. En la etapa de decapado se debe implementar el tiempo de inmersión adecuado a la concentración del baño para evitar desgaste de la pieza y del ácido.
- Se recomienda trabajar con una sal doble que cumpla con las especificaciones requeridas en planta, para evitar defectos en la pieza y consumo de sal innecesaria a la hora de realizar adiciones en el baño de fluxado.
- Se debe estandarizar el proceso indicando el tiempo que debe durar en inmersión la tubería dependiendo del diámetro que se trate y de la concentración que se encuentre cada etapa (g/L Fe, %P/P HCl, %P/P H₃PO₄, cloruro de amonio (g/L), cloruro de zinc (g/L)).
- Se recomienda que los operadores manejen un rango de estabilidad en el horno de secado y baño de zinc; y de esta manera disminuir fallas en la tubería galvanizada.
- Se recomienda utilizar la siguiente aleación: 98,5 %P/P Zn - A(0,25%P/P), B(0,05%P/P), C(0,07%P/P) y D(0,025%P/P) para reducir el micraje en la tubería de 1" de 2.5 mm en 14µm.
- Con el fin de minimizar la variación propia del proceso se sugiere evaluar la posibilidad de cambiar todos los baños por concentraciones propuestas ya que reduce en un 15% el costo total en cinco años, lo que constituiría una mejoría considerable y se tendría un control estadístico sin muchas variaciones con cumplimientos de especificaciones.



Bibliografía

- American Galvanizers Association. (2015). *Galvanizado en Caliente para protección contra la corrosión: guía del especificador*. Recuperado el 23 de Agosto de 2019, de https://galvanizeit.org/uploads/publications/Galvanizado_Caliente_guia_especificador_small.pdf
- ANDI-FEDIMENTAL. (2014). *Guía práctica de Galvanizado por inmersión en caliente*. Recuperado el 21 de Agosto de 2019, de Comité de Galvanizadores: [https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+\(1\).pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7423/guia_galvanizado_24nov14+(1).pdf)
- ARANGO MAZARIEGOS, C. G. (2004). Propuesta de control estadístico para el proceso de galvanizado de alambre por inmersión en caliente. (*Tesis de pregrado*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado el 9 de Septiembre de 2019, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0264_MI.pdf
- Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas. (2013). *Diagnóstico y Propuesta de acuerdo de producción limpia: Sector Galvanizado (L1-24-2012)*. Recuperado el 29 de Agosto de 2019, de https://www.asimet.cl/http://www2.asimet.cl/pdf/APL_galvanizadores/Informacion%20tecnica%20de%20apoyo/doc%20Diagnostico%20sectorial%20SECTOR%20GALVANIZADO.pdf
- ASTM D3359-9. (Julio de 2010). Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test.
- Besterfield, & H, D. (2009). *Control de calidad* (Vol. Octava). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- C.T. Philipp, P. (10 de Octubre de 2007). *Acid Purification Chemistry: The Kleingarn Curve*. AGA Tech Forum Pittsburgh. Recuperado el 29 de Agosto de 2019, de <https://www.pro-phx.com/docs/AGA%202007%20Acid%20Purification%20Chemistry%20Kleingarn%20Curve.pdf>



Universidad de Cuenca

- Campano, B. R. (2012). The Kleingarn Regenerated Spent Acid at Increasing Ferrous (Fe+2) and Ferric (Fe+3) Chloride Content. Recuperado el 29 de Agosto de 2019, de <https://www.finishing.com/library/campano/kleingarn.pdf>
- Chico Chamarro, J. J. (2018). Caracterización del grado de adherencia y difusión de la capa de aleación hierro-zinc para perfiles galvanizados de acero estructural de bajo contenido de carbono. (*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado el 4 de Diciembre de 2019, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19358/1/CD-8738.pdf>
- Coiras Mancera, M. d. (2006). Ampliación de una planta galvanizadora en discontinuo por inmersión en caliente. (*Memoría Descriptiva*). Universidad de Cádiz, Cádiz, España. Recuperado el 06 de Agosto de 2019, de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6548/32808483.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- De Lima, G., Guesser, W., & Masiero, I. (2007). Bismuth, Nickel, Tin and aluminium influence on galvanized coating thickness. *Matéria*, 549-567. Recuperado el 10 de Septiembre de 2019, de <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10959/>
- Delgado Enriquez, C. E., & Bravo Palacios, M. A. (1 de Diciembre de 2016). Estudio de la Pre-factibilidad de una Planta de Galvanizado en Caliente para el sector industrial metal mecánica. (*Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Industrial*). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe:https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/621668>
- Fonseca Vega, J. A., & Guamán Campoverde, Á. H. (Enero de 2011). Proceso de galvanizado en caliente con recubrimiento de zinc para piezas metálicas. (*Tesis de Titulación como Ingeniero Industrial*). Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador. Recuperado el 27 de Agosto de 2019, de <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/253/3/Proceso%20de%20galvanizado%20en%20caliente%20con%20recubrimiento%20de%20zinc%20para%20piezas%20met%C3%A1licas.pdf>



Universidad de Cuenca

- Gagné, M. (2018). *Bismuth, a viable option and in benefit of the Enviroment*. Recuperado el 10 de Abril de 2019, de International Zinc Association: http://www.amegac.com/wp-content/uploads/2018/03/IZA_Bismuto-una-opci%C3%83%C2%B3n-viable.pdf
- GAGNÉ, M. (2018). *Bismuth, a viable option and in benefit of the Enviroment*. Recuperado el 10 de Abril de 2019, de International Zinc Association: http://www.amegac.com/wp-content/uploads/2018/03/IZA_Bismuto-una-opci%C3%83%C2%B3n-viable.pdf
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill Iberoamericana.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. México: McGRAW-HILL.
- Hernández Betancur, J. D. (2018). Detección de los puntos críticos del proceso de galvanizado por inmersión e caliente: un enfoque hacia la sostenibilidad y el desarrollo sostenible. (*Tesis de investigación para el título de: Magíster en Ingeniería – Materiales y Procesos*). Universidad de Colombia. Recuperado el 24 de Agosto de 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co>: <http://bdigital.unal.edu.co/63398/1/1152440025.2018.pdf>
- Hernández Ledesma, D., & Hernández Sandoval, V. M. (2017). Obtención de recubrimientos de zinc por inmersión en caliente con adición de manganeso y níquel. (*Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico*). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado el 20 de Enero de 2020, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13879/tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NTE INEN 2483. (2009). Recubrimientos de zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos. 1, 5. Quito, Ecuador. Recuperado el 20 de Marzo de 2019, de <https://archive.org/details/ec.nte.2483.2009>
- International Zinc Association. (Julio de 2015). *Zinc Recycling: Closing the loop*. Obtenido de https://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/4/2015/04/Closing_the_Loop_July2015_Final.pdf



Universidad de Cuenca

- ISO 1461:2009. (2010). Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. Recuperado el 10 de Septiembre de 2019, de <https://www.sis.se/api/document/preview/911143/>
- Kania, H., & Liberski, P. (2012). Synergistic influence of Al, Ni, Bi and Sn addition to a zinc bath upon growth kinetics and the structure of coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 35. doi:10.1088/1757-899X/35/1/012004
- Kania, H., & Liberski, P. (2012). Synergistic influence of the addition of Al, Ni and Pb to a zinc bath upon growth kinetics and structure of coatings. *Solid State Phenomena*, 115-120. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.212.115>
- Kania, H., & Liberski, P. (2014). Synergistic influence of the addition of Al, Ni and Pb to a zinc bath upon growth kinetics and structure of coatings. *Solid State Phenomena*, 2012, 115-120. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.212.115
- LENNTECH. (2018). *Propiedades químicas de metales*. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>
- Lozano, J., & Guillermo. (2009). *Optimización*. Colombia. Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de https://www.academia.edu/36819425/Libro_Optimizacion
- Maldonado Flores, J. L. (1996). Acero y sus aplicaciones. (*Tesis en obtención al grado de maestro en ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en materiales*). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México. Recuperado el 22 de Octubre de 2019, de <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>
- Navadi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL Interamerica.
- Noriega del Olmo, I. (Abril de 2016). Descripción del flujograma de una planta de galvanización en caliente, de estructurales. (*Grado en Ingeniería Mecánica*). Universidad de Valladolid, Valladolid. Recuperado el 24 de Agosto de 2019, de <https://uvadoc.uva.es>:
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/19824/TFG-I-395.pdf;jsessionid=3A450C815A7828882AFC79D38FCB4A9A?sequence=1>



Universidad de Cuenca

- Pierdant Rodríguez, A., & Rodríguez Franco, J. (2009). Control estadístico de la calidad de un servicio mediante graficas X y R. *Política y Cultura*, 151-169. Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/polcul/n32/n32a9.pdf>
- Pokorny, J., Kolisco, L., Balik, L., & Novak, P. (2016). Effect of chemical composition of steel on the structure of hot-dip galvanized coating. *METALURGIJA*, 1(55), 115-118. Recuperado el 10 de Septiembre de 2019, de <https://hrcak.srce.hr/file/209307>
- Radu, T., & Vlad, M. (2011). Zinc coatings on steel substrate attained by different elements added. *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, 133-138. Recuperado el 10 de Septiembre de 2019, de http://www.fim.usv.ro/conf_1/tehnomusjournal/pagini/journal2011/files/21.pdf
- Rico O., Y., & Carrasquero, E. (2017). Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: Una revisión. *INGENIUS*(18), 30-39. doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n18.2017.04>
- Rico Oviedo, Y. (Octubre de 2012). Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. *REDIP.UNEXPO.VRB.*, 2(5), 370. Recuperado el 3 de Septiembre de 2019, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4208401>
- Rico, Y. (Mayo de 2015). Cinética de la disolución del hierro en el galvanizado por inmersión en caliente. *REDIP. UNEXPO. VRB.*, 6(1), 1114-1131. Recuperado el 15 de Marzo de 2019, de <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>
- Roa Saavedra, I. A. (2004). Estudio del comportamiento mecánico ante deformaciones y vibraciones de recubrimientos de galvanizado obtenidos por inmersión en caliente en baños con contenidos variables de Níquel y aluminio. (*Tesis para la obtención de Título de Ingeniero civil metalúrgico*). Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Recuperado el 14 de Octubre de 2019, de <https://docplayer.es/21173161-Departamento-de-ingenieria-metalurgica.html>
- S.A.LIPMES. (2007). *Sales de Cloruro de Zinc y Amonio*. Recuperado el 30 de Agosto de 2019, de www.lipmes.com: <https://www.lipmes.com/index.php/ES/productos-y-servicios/sales-de-cloruro-de-zinc-y-amonio>



Universidad de Cuenca

- Sabadell, J. (2018). Errores que no deberían cometerse al galvanizar y, sin embargo, se cometen frecuentemente (e incluso siempre). En A. T. Galvanización (Ed.), *Ponencia*. Recuperado el 27 de Agosto de 2019, de <http://www.amegac.com/wp-content/uploads/2018/03/Galvaforum-2018-ATEG.pdf>
- Tozin, R. (2017). *Buenas prácticas del proceso de Galvanización en caliente*. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <http://fedimetal.com.ec/wp-content/uploads/2017/11/buenas-practicas-tecnico.pdf>
- Tozin, R. (Noviembre de 2017). *Buenas prácticas del proceso de Galvanización en Caliente*. Recuperado el 30 de Agosto de 2019, de <http://fedimetal.com.ec:8080/wp-content/uploads/2017/11/buenas-practicas-tecnico.pdf>
- TUGALT S.A. (2019). *TUGALT S.A.* Recuperado el 26 de Enero de 2020, de TUGALT S.A Web site: <https://www.tugalt.com.ec/>
- Votorantim Metais. (2014). *El Futuro de la Galvanización: Inovando en busca de la competitividad*. Recuperado el 27 de Marzo de 2019, de http://www.icz.org.br/upfiles/arquivos/apresentacoes/7-Savio-Ce-Votorantim_El-futuro-de-la-galvanizacion.pdf



Apéndice A

Métodos de cuantificación

Método para determinar la acidez o alcalinidad de los baños.

A continuación, se describe la secuencia de actividades para determinar el pH de los baños:

- I. Se toma una muestra de 25ml del baño de desengrasado o fluxado.
- II. Se calibra el potenciómetro introduciendo el electrodo en una solución buffer pH=7.
- III. Luego de calibrar se introduce en la muestra, se visualiza el valor del pH.

Método para determinar la concentración %P/P de HCl, H₃PO₄ de los baños.

- I. Tomar una muestra de 50ml de los baños de desengrasado y decapado.
- II. Se filtran las muestras con papel Whatman #41, una vez filtrada se tomará una alícuota de 1ml de cada una y se añadirá 100ml de agua.
- III. A cada muestra se añadirá de 2-3 gotas de indicador de anaranjado de metilo.
- IV. Para la titulación se emplea una solución de hidróxido de sodio 0.2N; la verificación real de la neutralización se realizará con el potenciómetro cuyo valor deberá ser cercano a pH=7.
- V. Determinado el valor del volumen de viraje (V_1) se procederá a realizar los siguientes cálculos:

$$\text{HCl (g/L)} = 36.5 * 0.2N * V_1 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\text{HCl (\%P/P)} = \frac{\text{HCl} \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right) * 32}{371.2} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\text{H}_3\text{PO}_4 \text{ (g/L)} = 97.994 * 0.2N * V_1 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{H}_3\text{PO}_4 \text{ (\%P/P)} = \frac{\text{H}_3\text{PO}_4 \text{ (g/L)} * 100}{1180 \text{ g/L}} \quad \text{Ecuación 14}$$



Método de cuantificación de hierro en los baños de desengrasado, decapado y fluxado.

- I. Se toma muestras de 25 ml de los baños de desengrasado, decapado y fluxado.
- II. Se mide 100ml de agua, se añade 10ml de muestra y 5ml ácido orto fosfórico.
- III. Se titula con una solución de permanganato de potasio (KMNO_4) 0.1N, en caliente.
- IV. La muestra cambiará a una tonalidad rosada, esta debe permanecer sin desaparecer por 10 segundos.
- V. En el caso de que la titulación consuma más de 30ml de permanganato se tomará una alícuota de 10ml de muestra y se aforará con agua a 100ml, de este aforo se toma 2 ml y se añade 100ml de agua y 5ml de ácido orto-fosfórico (85%).
- VI. Se visualiza el valor de permanganato consumido (V_1) y se realiza los siguientes cálculos:

$$\text{Fe(g/L)}=0.5585 \cdot V_1 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\text{Muestra aforada Fe(g/L)}=2.7925 \cdot 10 \cdot V_1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Las dos fórmulas son aplicadas para la determinación de estos parámetros en los tres baños: desengrasado, decapado y fluxado.

Método de cuantificación de Cloruro de Amonio y Cloruro de zinc.

Cloruro de Zinc:

- I. En este caso se debe preparar una muestra con 100ml de agua, 25ml de tampón amoniacal ($\text{pH}=10$), 10ml de formaldehido al 10%, con la punta de la espátula negro de eriocromo T y 2ml de sal de flux (fluxado).
- II. Se debe titular con una solución de EDTA 0.1N, la solución se tornará de color azul.
- III. Una vez que haya cambiado el color de la muestra se aplica la siguiente fórmula para calcular los g/L de Cloruro de Zinc presentes en el baño de fluxado.

$$\text{ZnCl}_2(\text{g/L})=6.813 \cdot V_1 \quad \text{Ecuación 17}$$

V_1 = volumen de EDTA 0.1N consumidos en el viraje.



Universidad de Cuenca

Cloruro de Amonio:

- I. En el caso de Cloruro de Amonio se debe tomar 10ml de muestra de fluxado y aforarlos con 100ml de agua, una vez aforado tomar una alícuota de 2ml y adicionarla en 100ml de agua en un matraz Erlenmeyer con 1ml de cromato de potasio al 2%.
- II. La titulación se realizará con nitrato de plata 0.1N.
- III. El resultado del viraje se observará cuando la muestra adopte un color rojo ladrillo.
- IV. Con la siguiente fórmula se calcula los g/L de Cloruro de Amonio.

$$\text{Cloruro A (g/L)} = 3.546 * V_1 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\text{Cloruro B (g/L)} = 17.73 * V_2 \quad \text{Ecuación 19}$$

V_1 = ml de EDTA 0.1N consumidos en el viraje de la muestra para determinación de Cloruro de Zinc.

V_2 = ml de nitrato de plata 0.1N consumidos en el viraje de Cloruro de Amonio.

$$\text{Cloruro de amonio (g/L)} = 1.50 * (\text{Cloruro B} - \text{Cloruro A}) \quad \text{Ecuación 20}$$

Método para la valoración de Grados Baumé (°Be) en la solución de fluxado

- I. Emplear una probeta de 500ml para colocar muestra del baño de fluxado.
- II. Colocar el aerómetro en el centro de la probeta, esperar unos segundos hasta que el equipo se estabilice, y observar la lectura de grados Baumé que marca el menisco inferior del líquido en contacto con el equipo.



Apéndice B

Datos obtenidos de las etapas de galvanizado a nivel de planta

Desengrasado

Semana	Días	pH	%P/P H ₃ PO ₄	Fe (g/L)	Transformación (pH)
1	1	2,62	1,876	12,343	1,131
	2	2,35	1,981	16,755	-0,562
	3	2,5	2,606	19,548	0,634
	4	2,31	2,710	22,340	-0,841
	5	2,33	2,815	19,548	-0,710
2	6	2,48	3,127	25,133	0,514
	7	2,37	3,232	22,340	-0,397
	8	2,48	3,336	22,340	0,514
	9	2,35	3,127	19,548	-0,562
	10	2,42	3,544	22,340	0,055
3	11	2,38	3,336	16,755	-0,309
	12	2,45	3,127	27,925	0,304
	13	2,3	3,232	25,133	-0,900
	14	2,4	3,440	22,340	-0,126
	15	2,36	3,336	25,133	-0,481
4	16	2,29	2,606	27,925	-0,956
	17	2,5	2,502	27,925	0,634
	18	2,61	2,710	25,133	1,100
	19	2,77	2,606	27,925	1,493
	20	2,33	2,919	30,718	-0,710
5	21	2,38	2,815	27,925	-0,309
	22	2,73	2,919	30,718	1,412
	23	2,6	2,606	30,718	1,067
	24	2,5	2,710	27,925	0,634
	25	2,45	2,398	25,133	0,304
6	26	1,78	3,961	22,340	-2,145
	27	1,97	3,544	19,548	-1,881
	28	1,94	3,440	25,133	-1,930
	29	2,2	3,649	25,133	-1,342
	30	2,5	3,023	22,340	0,634
7	31	3,31	2,919	25,133	2,138
	32	3,18	3,232	25,133	2,027
	33	3	3,023	25,133	1,838
	34	2,5	2,606	25,133	0,634
	35	2,4	3,023	19,548	-0,126



Decapado

Semana	Días	Tina 1-% P/P HCl	Tina 1- g/L Fe	Tina 2-%P/P HCl	Tina 2-g/L Fe
1	1	16,425	19,548	16,236	2,066
	2	16,928	30,718	17,243	5,585
	3	17,369	33,510	16,677	11,170
	4	17,117	36,303	15,481	5,585
	5	16,614	39,095	16,677	11,170
2	6	16,75	44,680	16,299	13,963
	7	16,991	41,888	17,117	11,170
	8	14,978	47,473	15,355	11,170
	9	15,607	41,888	14,978	8,378
	10	15,544	44,680	15,166	13,963
3	11	15,544	39,095	15,733	8,378
	12	15,922	44,680	16,110	11,170
	13	15,670	41,888	16,362	11,170
	14	15,418	44,680	17,558	8,378
	15	15,418	47,473	16,866	11,170
4	16	13,593	53,058	15,544	11,170
	17	13,782	53,058	15,355	13,963
	18	14,034	53,058	15,859	13,963
	19	14,726	69,813	14,852	13,963
	20	14,348	58,643	14,034	16,755
5	21	13,341	58,643	13,845	13,963
	22	12,083	61,435	13,530	16,755
	23	11,957	53,058	13,971	11,170
	24	12,586	55,850	13,845	8,378
	25	12,901	64,228	14,159	11,170
6	26	12,901	67,020	13,971	11,170
	27	13,090	69,813	14,159	13,963
	28	13,908	67,020	13,027	13,963
	29	14,348	72,605	13,719	11,170
	30	13,971	64,228	14,034	16,755
7	31	12,334	78,190	13,656	25,133
	32	12,838	80,983	13,530	30,718
	33	12,775	83,775	11,579	19,548
	34	8,747	78,190	12,523	22,340
	35	9,566	83,775	13,216	19,548

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Fluxado

Semana	Días	°C	Transformación °C	pH	g/L Fe	°Be
1	1	44,6	1,261	4,32	0,614	29
	2	37,3	-0,443	4,43	0,726	29
	3	40	0,444	4,49	0,614	30
	4	38,2	-0,154	4,6	0,726	29
	5	35,9	-0,790	4,58	0,782	29
2	6	30,2	-1,511	4,68	0,782	30
	7	39,5	0,292	4,55	0,782	30
	8	36,2	-0,726	4,32	0,838	29
	9	32,9	-1,251	4,44	0,726	30
	10	39,5	0,292	4,54	0,670	30
3	11	43,3	1,101	4,29	0,670	31
	12	28,9	-1,609	4,42	0,838	31
	13	35,5	-0,870	4,5	0,726	30
	14	38,7	0,021	4,42	0,782	29
	15	40	0,444	4,6	0,670	28
4	16	38,3	-0,119	4,75	0,726	31
	17	38,3	-0,119	4,79	0,782	31
	18	39,7	0,355	4,43	0,838	30
	19	27	-1,732	4,62	0,894	32
	20	47,3	1,511	4,17	0,782	30
5	21	47	1,488	4,25	0,949	32
	22	37,1	-0,500	4,44	0,894	31
	23	36,9	-0,555	4,5	0,894	30
	24	38,6	-0,014	4,35	0,782	29
	25	37,5	-0,383	4,32	0,726	31
6	26	40,1	0,473	4,15	0,614	31
	27	43,11	1,075	4,22	0,726	31
	28	36,9	-0,555	4,55	0,670	30
	29	40,8	0,653	4,6	0,726	29
	30	47	1,488	4,25	0,782	29
7	31	40,4	0,554	4,33	0,726	29
	32	39,6	0,324	4,4	0,670	29
	33	41,8	0,863	4,29	0,782	29
	34	35,9	-0,790	4,36	0,670	28
	35	38,8	0,056	4,16	0,670	29



Semana	Días	Cloruro de zinc (g/L)	Cloruro de amonio (g/L)	Transformación de cloruro de amonio
1	1	357,683	147,334	-0,502
	2	363,133	152,655	-0,303
	3	425,131	173,399	0,817
2	4	398,561	71,807	-1,807
	5	400,604	86,168	-1,658
	6	397,879	141,485	-0,687
3	7	399,242	148,400	-0,465
	8	392,429	172,336	0,752
	9	390,385	176,591	1,005
4	10	385,616	159,038	-0,015
	11	380,165	163,293	0,210
	12	438,076	168,612	0,523
5	13	443,526	181,375	1,263
	14	424,45	149,996	-0,406
	15	421,725	165,421	0,332
6	16	388,341	183,506	1,367
	17	399,923	153,187	-0,281
	18	357,683	146,273	-0,538
7	19	424,45	184,569	1,417
	20	397,198	160,634	0,066
	21	374,715	143,613	-0,623



Zincado

Semana	Días	N° Veces	Secado (°C)	Proceso (°C)	Dross (°C)	Transformación (secado)
1	1	1	111,3	439,04	438,9	0,798
		2	111,6	441,6	439,8	0,864
		3	94,9	443,9	442,3	-0,893
		4	96,85	444,7	443,7	-0,8
		5	85	443,8	444,1	-1,243
	2	1	105,2	441,4	441,5	-0,2
		2	106,6	443,1	442	-0,038
		3	107,45	443,8	442,7	0,077
		4	110,45	443,6	442,8	0,612
		5	113,45	443,9	443,2	1,258
	3	1	100,7	439	439,1	-0,577
		2	102,5	438,9	438,7	-0,446
		3	103,8	439	438,5	-0,336
		4	106,5	439,7	439,3	-0,05
		5	107,35	439,8	439,4	0,063
	4	1	110,4	443,5	442,6	0,601
		2	108,55	442,1	441,7	0,248
		3	108,45	442,2	441,3	0,231
		4	110,05	441,7	441,4	0,528
		5	111,4	441,2	440,7	0,82
	5	1	97,7	446,2	447,1	-0,756
		2	105,55	446,1	445,7	-0,162
		3	108,5	446,6	446,6	0,239
		4	109,45	447,1	446,8	0,409
		5	110,1	447,4	447	0,538
2	1	1	113,25	443,3	443,7	1,218
		2	110	444,4	444,5	0,518
		3	102,45	442,4	443,2	-0,45
		4	112,3	442,8	443	1,019
		5	118,05	444,5	444,5	1,917
	2	1	67,25	441,2	442,6	-1,631
		2	109,7	440	434,8	0,458
		3	123,5	441,5	437,6	2,347
		4	114,15	442,1	440,3	1,388
		5	110,95	443,6	443	0,72
	3	1	111,55	443,8	443,5	0,853
		2	112,75	443,2	442,5	1,116
		3	114,55	443,1	441,6	1,457
		4	116,15	445,6	443,6	1,695
		5	115,9	445,2	443,5	1,661
	4	1	102,35	443,7	442,5	-0,458



Universidad de Cuenca

		2	106,85	443,3	442,3	-0,005
		3	109,7	442,7	441,6	0,458
		4	111	442,5	441,6	0,731
		5	109,2	442,3	443	0,362
		1	99,9	436,2	434,7	-0,629
	5	2	110,85	435,6	434,2	0,698
		3	134,45	442,1	437,9	2,831
		4	129,55	444,9	441,2	2,65
		5	98,3	447,1	444,3	-0,723
		3	1	1	68,5	447,4	447,2	-1,609
2	104,55			446,5	445,6	-0,266
3	68,95			447,3	447,2	-1,601
4	103,5			445,8	445,3	-0,363
5	82,6			445,3	446,1	-1,309
2	1		102,2	442,6	442,5	-0,469
	2		102,85	443,7	443,3	-0,418
	3		74,45	444,7	444,1	-1,496
	4		95,8	441,8	442,5	-0,851
	5		105	442,6	442,8	-0,221
3	1		109,15	444,2	442,9	0,353
	2		109,8	445	439,2	0,477
	3		109,6	444,7	444,7	0,438
	4		111,45	445,1	443,2	0,831
	5		112,8	445,5	443,8	1,126
4	1		109,85	443,5	441,5	0,487
	2		70,65	444,4	443,5	-1,57
	3		102,35	443,8	443,6	-0,458
	4		104,4	444,6	444,1	-0,281
	5		62,8	443	443,8	-1,704
5	1		111,6	441,1	440,4	0,864
	2		112,7	442,7	438,1	1,105
	3		114,25	443,6	441,7	1,405
	4		94,65	444,1	442,9	-0,904
	5		110,3	443,9	443,1	0,58
4	1	1	109,5	445,8	444,3	0,419
		2	106,8	447,7	447	-0,012
		3	98,6	447,2	447,3	-0,706
		4	110,15	448,3	446,8	0,549
		5	98,75	446,4	446,9	-0,698
	2	1	98,35	447	446,9	-0,72
		2	103,05	448,3	447,3	-0,401
		3	103,75	449,6	448,4	-0,341
		4	64,95	449,5	449	-1,669
		5	98,5	447,8	448,1	-0,712
	3	1	104,1	440,8	440,4	-0,309

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Universidad de Cuenca

		2	108,55	443	442,2	0,248
		3	108,4	443,4	431,2	0,223
		4	112,5	442	436,5	1,063
		5	110,55	442,6	438,6	0,633
	4	1	101,55	445,7	444,7	-0,518
		2	67,2	447,4	446	-1,632
		3	98,3	444,2	444,6	-0,723
		4	100,05	444,9	444	-0,619
		5	79,65	446,3	444,4	-1,382
	5	1	77,1	446,9	445,8	-1,44
		2	106,5	445,9	446,1	-0,05
		3	108,95	445,2	435,9	0,317
		4	108,8	444,8	439,3	0,291
		5	109,05	444,9	441,4	0,335
	5	1	1	88,75	447,2	445,6	-1,128
2			83	444,3	443,9	-1,298
3			89,15	443	440	-1,115
4			92,8	443,5	441,8	-0,982
5			92,8	444,6	442,9	-0,982



Apéndice C

Espesor de capa medidos durante 7 semanas en producto de planta

Fecha	Diámetro de tubería	Espesor (mm)	Numero de mediciones				
			1	2	3	4	5
26/8/2019	1/2 pulg	2	128,7	135,2	142,1	139,9	139,4
27/8/2019	1/2 pulg	2,65	160,3	130,8	120,9	161,9	150,5
28/8/2019	1 1/2 pulga	2,65	84,21	114,4	90,6	79,21	68,2
29/8/2019	1/2 pulg	2	122,3	110,9	123,4	120,8	113,4
30/8/2019	2 pulg	2,65	95,7	94,07	94,43	101,7	93,8
2/9/2019	2 pulg	3,6	83,07	81,58	82,4	87,87	78,3
3/9/2019	2 1/2 pulg	3,2	57,38	54,94	63,79	63,91	53,79
4/9/2019	2 1/2 pulg	5	77,59	75,1	97,46	59,63	72,37
5/9/2019	101,6 mm	3	51	63,39	61,63	64,75	65,9
6/9/2019	4 pulg	5	67,86	81,76	54,67	63,5	58,76
9/9/2019	4 pulg	5	61,45	51,37	58,88	83	80,9
10/9/2019	1/2 pulg	2	75,31	76,14	93,7	90,55	100,7
11/9/2019	1/2 pulg	2	92,76	110,3	99,79	115,4	105,1
12/9/2019	3 pulg	5	72,09	65,19	69,25	68,81	69,98
13/9/2019	3 pulg	5	72,64	77,29	75,62	58,4	68,7
16/9/2019	2 1/2 pulg	5	64,31	73,86	66,76	64,69	53,25
17/9/2019	2 1/2 pulg	3,2	74,9	65,07	55,8	51,91	47,59
18/9/2019	73 mm	2	56,3	66,8	71,6	73,4	55,2
19/9/2019	1 pulg	2,5	100,8	96,4	70,02	72,8	81,71
20/9/2019	1 pulg	2,5	128,7	96,05	132,7	127,8	96,7
23/9/2019	1 pulg	2,5	84,76	46,54	83,97	69,51	53,35
24/9/2019	1 pulg	2,5	92,39	100,2	134,1	95,2	87,04
25/9/2019	1 pulg	2,5	91,41	110,9	104	108	96,61
26/9/2019	1 pulg	3,2	95,6	109,8	89,4	89,19	88,32
27/9/2019	1 pulg	2,5	105,2	80,7	104,5	102,4	85,9
30/9/2019	1 pulg	3,2	78,66	86,59	68,57	84,35	72,15
1/10/2019	3/4 pulg	2,3	120,5	119,7	121,7	115,3	90,25
1/10/2019	3/4 pulg	2,3	116,9	103,7	77,91	82,65	104,8
2/10/2019	50,8mm	1,8	56,53	74,95	82,65	77,33	78,5
3/10/2019	3/4 pulg	2,3	99,94	79,19	97,88	91,36	70,81
3/10/2019	101,6 mm	2	57,73	47,22	62,51	57,23	53,5
4/10/2019	63,5mm	2	64,97	69,2	85,82	78,86	58,95
7/10/2019	38,1mm	2	53,67	69,19	80,7	77,19	77,79
8/10/2019	38,1mm	2	95,53	67,61	67,52	75,57	81,73
9/10/2019	1pulg	2,5	87,44	91,88	90,36	89,08	82,42
10/10/2019	1pulg	2,5	80,22	91,8	87,1	89,7	91,03
11/10/2019	1pulg	3,2	93,23	81,54	82,08	55,45	49,26
11/10/2019	1pulg	3,2	72,8	82,39	57,6	45,68	68,43



Apéndice D

Datos obtenidos a escala de laboratorio de cada una de las etapas de galvanizado

Desengrasado (antes de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	#1	#2	#3	#4	#5
1,1,5	137,245	136,510	138,261	138,124	142,724
2,1,10	137,934	140,757	144,703	142,482	136,716
3,1,15	137,681	143,708	138,478	143,072	136,854
4,3,5	138,189	143,206	137,313	138,290	141,805
5,3,10	138,055	142,758	138,817	138,993	143,638
6,3,15	145,982	142,023	141,225	141,252	143,910
7,5,5	138,576	144,395	137,528	138,651	142,575
8,5,10	143,178	143,489	142,049	138,982	136,329
9,5,15	142,861	142,117	138,452	137,537	141,311

Desengrasado (después de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	#1	#2	#3	#4	#5
1,1,5	137,183	136,449	138,190	138,038	142,653
2,1,10	137,821	140,634	144,582	142,344	136,609
3,1,15	137,500	143,529	138,331	142,927	136,697
4,3,5	138,083	143,072	137,296	138,185	141,734
5,3,10	137,907	142,598	138,687	138,821	143,460
6,3,15	145,797	141,775	141,036	141,066	143,671
7,5,5	138,479	144,303	137,422	138,566	142,463
8,5,10	142,996	143,256	141,908	138,815	136,177
9,5,15	142,617	141,921	138,205	137,289	141,104



Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 1%P/P H₃PO₄ (antes de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	#1	#2	#3	#4	#5
1,8,8	124,106	124,327	123,631	123,768	123,959
2,10,8	121,698	126,180	122,874	124,081	127,176
3,12,8	123,975	122,182	122,509	123,790	124,214
4,14,8	124,101	122,516	123,696	124,628	123,537
5,16,8	127,405	121,727	126,354	122,045	122,279
6,8,12	124,197	121,727	123,436	124,168	123,977
7,10,12	123,041	123,063	121,266	123,646	125,884
8,12,12	126,313	123,417	126,659	121,524	122,076
9,14,12	126,716	125,812	119,857	126,747	121,548
10,16,12	122,008	126,845	123,800	122,018	123,790
11,8,16	122,945	123,847	126,573	122,387	123,778
12,10,16	131,090	129,378	130,921	129,567	129,352
13,12,16	130,333	133,911	130,525	131,332	129,648
14,14,16	131,885	129,940	129,726	131,860	129,985
15,16,16	130,049	129,940	130,398	130,322	129,036
16,8,20	131,584	130,068	129,366	130,288	129,003
17,10,20	130,474	130,970	130,492	129,481	132,479
18,12,20	130,568	129,178	129,399	129,403	129,916
19,14,20	133,244	129,899	129,264	128,767	129,810
20,16,20	130,059	131,182	129,911	129,587	130,458

Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 1%P/P H₃PO₄ (después de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	#1	#2	#3	#4	#5
1,8,8	123,813	123,935	123,298	123,478	123,584
2,10,8	121,333	125,801	122,558	123,843	126,774
3,12,8	123,616	121,633	121,985	123,393	123,808
4,14,8	123,637	121,977	123,365	124,076	123,140
5,16,8	126,996	121,210	125,811	121,467	121,710
6,8,12	123,864	121,338	123,036	123,700	123,575
7,10,12	122,507	122,568	120,648	123,208	125,456
8,12,12	125,752	123,019	126,131	121,001	121,684
9,14,12	126,164	125,469	119,353	126,167	120,946
10,16,12	121,385	126,324	123,221	121,351	123,154



Universidad de Cuenca

11,8,16	122,553	123,543	126,133	122,004	123,457
12,10,16	130,296	128,731	130,279	128,786	128,795
13,12,16	129,768	133,234	129,954	130,518	129,079
14,14,16	131,203	129,227	128,882	131,199	129,178
15,16,16	129,473	129,390	129,743	129,540	128,336
16,8,20	130,817	129,509	128,814	129,751	128,373
17,10,20	129,698	130,262	129,879	128,906	131,777
18,12,20	129,974	128,452	128,610	128,849	129,168
19,14,20	132,553	129,143	128,669	127,934	129,220
20,16,20	129,254	130,020	129,367	128,993	129,702

Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 5%P/P H_3PO_4 (antes de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
1,8,8	141,986	139,359	139,935	140,234	141,470
2,10,8	136,931	137,707	138,529	140,988	139,566
3,12,8	143,002	143,531	137,887	136,260	138,617
4,14,8	142,796	140,384	142,459	145,759	142,479
5,16,8	143,185	140,999	138,462	139,458	141,883
6,8,12	145,516	139,570	141,021	143,612	139,522
7,10,12	141,160	142,946	138,422	142,351	141,460
8,12,12	142,268	140,327	137,011	138,244	138,584
9,14,12	143,413	139,019	141,913	144,681	138,847
10,16,12	142,252	139,767	137,498	137,321	143,407
11,8,16	142,935	138,472	141,983	142,944	144,076
12,10,16	142,243	145,906	140,682	138,693	142,325
13,12,16	141,901	142,441	141,798	142,841	137,443
14,14,16	142,503	143,079	139,466	136,995	140,403
15,16,16	138,476	142,927	140,138	144,431	143,356
16,8,20	143,034	137,238	144,063	137,303	141,469
17,10,20	140,479	142,153	142,174	136,929	142,812
18,12,20	142,102	137,112	138,604	142,571	138,228
19,14,20	142,651	136,705	141,614	138,970	142,195
20,16,20	143,908	144,614	141,849	142,408	142,065



Decapado al aplicar de manera previa un desengrasado al 5%P/P H₃PO₄ (después de la inmersión de las probetas en la solución)

Experimento	Tubos (peso-gramos)				
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
1,8,8	141,589	138,954	139,553	139,831	141,064
2,10,8	136,489	137,242	138,115	140,541	139,165
3,12,8	142,566	143,054	137,421	135,851	138,181
4,14,8	142,370	139,921	142,017	145,282	142,019
5,16,8	142,714	140,532	138,019	138,980	141,441
6,8,12	145,064	139,136	140,590	143,165	139,107
7,10,12	140,707	142,443	137,941	141,896	141,008
8,12,12	141,807	139,856	136,590	137,800	138,038
9,14,12	142,956	138,577	141,441	144,198	138,43
10,16,12	141,692	139,293	136,996	136,878	142,896
11,8,16	142,488	138,044	141,549	142,518	143,643
12,10,16	141,719	145,416	140,242	138,248	141,875
13,12,16	141,276	141,946	141,334	142,336	136,994
14,14,16	142,004	142,597	138,975	136,553	139,921
15,16,16	137,993	142,447	139,640	143,938	142,804
16,8,20	142,594	136,799	143,602	136,811	141,054
17,10,20	140,024	141,677	141,713	136,460	142,339
18,12,20	141,619	136,654	138,078	142,049	137,778
19,14,20	142,182	136,260	141,137	138,503	141,652
20,16,20	143,426	144,142	141,4	141,927	141,550

Valores medidos de cloruro de amonio-zinc en función de la temperatura y la concentración total

Orden	Concentración (g/L)	Temperatura (°C)	Cloruro de zinc (g/L)	Cloruro de amonio (g/L)
1	410	20	293,981	84,306
2	410	30	290,574	69,679
3	410	40	290,234	68,615
4	410	50	287,849	65,158
5	410	60	296,366	58,509
6	410	70	308,629	64,892
7	510	20	318,848	87,498
8	510	30	312,376	87,232



9	510	40	310,332	90,157
10	510	50	320,211	74,466
11	510	60	316,805	97,072
12	510	70	316,123	93,614
13	610	20	336,903	123,933
14	610	30	347,122	111,965
15	610	40	349,166	110,369
16	610	50	347,463	113,029
17	610	60	350,188	104,252
18	610	70	349,507	107,444
19	710	20	355,639	142,549
20	710	30	356,661	129,784
21	710	40	345,419	155,847
22	710	50	349,848	141,751
23	710	60	343,035	149,730
24	710	70	346,100	138,028
25	810	20	467,712	116,220
26	810	30	464,306	120,209
27	810	40	453,405	138,028
28	810	50	447,614	118,614
29	810	60	466,009	112,231
30	810	70	475,888	85,902

Relación espesor de capa, temperatura y concentración en la etapa de fluxado

Concentración (g/L)	Temperatura (°C)	# Mediciones (µm)				
410	30	105,2	123,6	100,8	116,9	108,9
		109	111,5	104,8	109,5	104,8
410	50	137,9	120	121	134,5	129,1
		116,4	89,2	88,4	109,4	84,6
410	70	76,67	74,14	93,77	80,93	74,78
		64,4	91,88	89,29	103,6	81,17
510	30	164,9	158,7	148,9	127,9	139,2
		99,02	98,06	97,02	98,01	103,3
510	40	83,38	103,5	94,27	97,37	94,37
		95,22	99,11	95	110,6	100,1
510	70	85,28	89,16	85,81	87,43	83,84
		86,09	93,97	90,75	97,54	94,39



Universidad de Cuenca

610	30	89,9	92,15	98,81	89,45	91,76
		77,21	81,14	82,44	95,42	90,45
610	50	84,92	92,49	106,7	93,58	91,99
		110,3	106	100	108,2	96,98
610	70	95,75	112,5	106,6	108,2	100,6
		99,8	98,59	111,6	118,1	103,3
710	30	90,63	95,4	90,13	89,5	87,55
		88,53	95,94	103,4	85,13	90,93
710	50	102,6	86,68	91,19	85,41	92,2
		94,93	103,2	92,75	104,7	90,51
710	70	103	88,41	99,63	97,42	109,7
		92,47	108,5	112,3	99,06	88,95
810	30	111,8	104,3	113	107,7	110,5
		101,2	106,7	107,3	114,3	107,9
810	50	94,51	102,4	93,43	103,4	109,5
		93,67	89,01	84,08	102,9	92,79
810	70	115,1	114,3	105,3	109,2	105,4
		96,28	90,66	104,3	99,49	94,7

Espesor de capa de cada uno los experimentos con las diferentes combinaciones en la etapa de zincado

Experimento	Mediciones (μm)					
	1	78,68	85,83	65,93	75,69	83,35	80,51
	87,24	65,16	87,52	84,21	83,66	73,02
2	78,18	82,05	91,22	97,76	85,32	75,25
	92,9	94,2	86,43	80,75	84,99	78,24
3	92,13	94,16	109,8	99,86	89,93	97,92
	91,11	102,7	99,48	106,4	105	110,2
4	80,21	76,35	71,36	98,01	96,91	77,46
	74,14	78,27	80,91	77,9	76,56	76,8
5	97,64	95,42	90,18	92,92	97,01	95,49
	88,57	99,29	82,93	86,89	95,47	98,19
6	90,48	96,54	104,9	105,1	91,18	101,4
	97,04	98,65	96,59	97,16	92,06	105,6
7	85,26	80,54	83,4	86,43	82,89	81,51
	86,94	97,29	90,77	83,31	83,84	83,91
8	95,4	91,59	110,2	100,5	91,99	91,14
	93,22	99,24	98	107,9	97,23	104,8
9	141,8	142,5	135,3	145	151	147,3
	149,8	135,5	137,3	136,7	147,4	144,2
10	126,5	134,6	115,3	130,4	118,8	113,2

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth



Universidad de Cuenca

	116	113,3	127,6	130,6	114,4	121,5
11	145,3	162,7	160,8	159,7	156,1	150,7
	151,3	142,2	146,2	163,1	164,8	148
12	198,4	211,6	195,9	194,8	189,3	205,8
	204,1	197,5	190,1	203,6	191,8	193,8
Zinc puro- 2min	101,2	91,75	83,3	86,45	103,5	106,5
	91,13	85,05	81,1	101,8	93,05	91,67
Zinc puro- 4min	119	111	98,07	104,2	113	97,2
	119,1	100,1	119,5	97,43	116,9	100,7
Zinc puro- 6min	163,6	163,3	159,8	164,8	147,3	169,1
	153,7	147,4	160,3	150,1	166,2	159,4

Acero Mainato Felipe Leonardo

Romoleroux Urgilez Karla Margoth