



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y
APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EFECTO METÁLICO BASE SOLVENTE, EN
LA VARIACIÓN DEL COLOR.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:
Ing. Yareni Navarro López

Dirigido por:
M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Presidente

Dra. Aurora Femat Díaz
Secretario

M. A. José Agustín Martínez Rodríguez
Vocal

M.C. Guillermo Hiyane Nashiro
Suplente

M.I. Javier García Pérez
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre, 2016

RESUMEN

En la presente investigación se estudió el proceso de aplicación de recubrimientos de efecto metálico base solvente. El objetivo de este estudio fue la determinación de los efectos de variables tales como la presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico, tiempo de flash off y número de manos, en la variación del color del recubrimiento. Mediante un diseño experimental fraccionado de dos niveles se determinó que, bajo una aplicación por atomización manual, la presión de atomización, la apertura del abanico, el flujo de material y el tamaño de boquilla son factores críticos para la luminosidad ΔL^* del color del recubrimiento. Sin embargo, al utilizar un equipo de aplicación automática por atomización, se determinó, con un diseño óptimo experimental, que para mantener la luminosidad ΔL^* del color del recubrimiento con valores altos, es conveniente considerar la presión de atomización, el control de flujo de material, el control de la apertura del abanico y el tiempo de flash off para evaporación del solvente posterior a la aplicación del recubrimiento.

(Palabras clave: recubrimientos de efecto metálico, color, atomización, diseño factorial fraccionado, diseño óptimo experimental)

SUMMARY

In this research, the metallic effect coating application process were studied. The approach of this study has been to determine the effects of application parameters, in the variation of color values. A Fractional factorial design of two-levels factors was used under manual spray gun application process considering the spray pressure, flow material, spray width, the size of nozzle as important in the process. Using an Optimal experimental design for an automatic spray application process, it was obtained that the spray pressure, the width spray, the flow material and the flash off time were important for the correct application of this kind of coatings and the behavior of the color values.

(Key words: metallic effect coatings, color, spray, fractional factorial design, Optimal experimental design)

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Mankiewicz México por el apoyo y recursos brindados para llevar a cabo esta investigación, además de darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo permitiéndome crecer profesionalmente.

A mis profesores del Posgrado de Ingeniería de Calidad y productividad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por compartir sus experiencias y conocimientos que me permitieron obtener las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

A mis padres Benjamín Navarro y Josefina Lopez que estuvieron ahí como siempre lo han hecho, a pesar de la distancia, brindándome su apoyo, comprensión y amor para impulsarme a cumplir con la meta.

A Carlos Macías por tu confianza, amor y apoyo incondicional durante esta aventura, alentándome a siempre dar más de mí y superar los límites.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
SUMMARY	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
INDICE DE ILUSTRACIONES	7
INDICE DE ECUACIONES	10
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Antecedentes de la industria automotriz en México.	13
1.2 Problemática del color en los sistemas de recubrimientos automotrices.	15
1.3 Importancia de los recubrimientos y justificación del análisis de los parámetros para su aplicación.	17
1.4 Objetivos de la parametrización de la aplicación de recubrimientos automotrices con efecto metálico.	19
2. OBJETIVOS	20
2.1 Recubrimientos.....	20
2.2 Recubrimientos con efectos especiales.....	21
2.3 El color en recubrimientos.....	24
2.3.1 Percepción visual del color.	24
2.3.2 Sistemas de clasificación de colores basado en muestras físicas.	24
2.4 Colorimetría.....	25
2.4.1 Espacios colorimétricos. Sistema CIELAB.....	26
2.4.2 Diferencias de color en el sistema CIELAB.....	27
2.5 Producción de recubrimientos de efecto metálico.	27
2.6 Herramientas de análisis.....	29
2.6.1 Estudio de capacidad de proceso.....	29
2.6.2 Análisis del sistema de medición.	31
2.6.3 Diseño Factorial Fraccionado $2k - p$	32
2.6.4 Análisis de la varianza (ANOVA).	33
2.6.5 Diseño Óptimo Experimental.....	34
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 Áreas consideradas en la investigación.	36
3.2 Material y métodos.....	37
3.2.1 Recubrimiento.....	37

3.2.2	Equipos.....	39
3.3	Variables de respuesta.....	41
3.4	Análisis del Sistema de Medición.....	45
3.4.1	Calibración del espectrofotómetro portátil Kónica Minolta.....	46
3.4.2	Estudio del sistema de medición.....	47
3.4.3	Estudio R&R del sistema de medición (cruzado).....	48
3.5	Fabricación del recubrimiento Carbon Black.....	50
3.6	Experimentación.....	58
3.6.1	Proceso de aplicación.....	58
3.6.2	Proceso de aplicación con equipo de aplicación automática.....	70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	90
4.1	Análisis del sistema de medición.....	90
4.1.1	Estudio de medición tipo 1.....	90
4.1.2	Estudio R&R para el sistema de medición.....	92
4.2	Análisis experimental.....	98
4.2.1	Diseño experimental fraccionado para el proceso de aplicación.....	98
4.2.2	Diseño óptimo experimental para el proceso de aplicación.....	105
4.2.3	Diseño experimental con punto central.....	113
4.2.4	Análisis estadístico basado en la relación Señal/ Ruido.....	115
4.3	Conclusiones.....	118
5.	REFERENCIAS.....	120

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Cadena de suministro del sector de autopartes. Elaboración propia.....	13
Figura 2. Principales problemas de calidad en recubrimientos de efecto metálico. Fuente: Mankiewicz México.	18
Figura 3. Reflectancia de los diferentes tipos de pigmentos. (Gmnh and Strasse).....	22
Figura 4. Imagen de típicas partículas de aluminio a través de un microscopio electrónico de barrido SEM (Klein, 2004).....	23
Figura 5. Los 3 factores de percepción visual: tono/ tonalidad cromática (rojo) - saturación /pureza (vivo) - claridad (claro).	24
Figura 6. Trinomio de percepción del color (Alain, 1997).	25
Figura 7. Espacio de color CIELAB.....	26
Figura 8. Procedimiento de fabricación, recubrimiento Carbon Black. Elaboración propia	28
Figura 9. Fuentes de variabilidad en las mediciones (Gutiérrez Pulido and De la Vara Salazar, 2009).	32
Figura 10. Metodología. Elaboración propia.....	35
Figura 11. Gráfica de Pareto de números de parte que han presentado problemas de calidad entre 2013 y 2015. Elaboración propia	36
Figura 12. Placa de ABS con recubrimiento Carbon Black bajo luz D65, luz del día.	38
Figura 13. Espectrofotómetro CM600-D.....	39
Figura 14. Pistola de aplicación Anest Iwata W400.....	40
Figura 15. Equipo de aplicación automática Spraymation.....	40
Figura 16. Comportamiento del ΔL^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.	42
Figura 17. Comportamiento del Δa^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.	43
Figura 18. Comportamiento del Δb^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.	44
Figura 19. Equipo utilizado para la medición de color: Software de medición, espectrofotómetro portátil Konica Minolta Cm600-D y placa de ABS con pintura aplicada.	45
Figura 20. Proceso de calibración de espectrofotómetro CM600-D.	46
Figura 21. Medición de placas con espectrofotómetro CM600-D.	47

Figura 22. Componentes del expediente de cada lote fabricado para el recubrimiento Carbon Black.	50
Figura 23. Proceso de fabricación de recubrimientos de efecto metálico.	51
Figura 24. Resumen estadístico para la variable Tiempo de Pre-humectación del proceso de fabricación del recubrimiento Carbon Black.	52
Figura 25. Resumen estadístico para la variable Velocidad de Dispersión del proceso de fabricación del recubrimiento Carbon Black.	53
Figura 26. Gráfica de dispersión para la velocidad de dispersión en el modelo de regresión lineal Carbon Black.	56
Figura 27. Gráfica de dispersión para el tiempo de pre-humectación en el modelo de regresión lineal Carbon Black.	57
Figura 28. Diagrama de proceso de aplicación Carbon Black. Laboratorio Mankiewicz ...	58
Figura 29. Diagrama de parámetros para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.	59
Figura 30. Pistola de aplicación manual por gravedad.	60
Figura 31. Cabina de aplicación y encendido del sistema de extracción.	61
Figura 32. Horno de secado marca Thermo Scientific.	62
Figura 33. Báscula digital para el pesaje de los componentes de la mezcla catalizada. ..	63
Figura 34. Preparación de placas de ABS para su aplicación.	63
Figura 35. Técnica de aplicación de pintura sobre placas ABS.	64
Figura 36. Equipo de aplicación automática.	70
Figura 37. Base metálica para montaje de piezas plásticas para aplicación de pintura.	71
Figura 38. Suministro de aire a equipo de aplicación automática.	71
Figura 39. Pistola automática de aplicación por gravedad.	72
Figura 40. Diagrama de parámetros para el proceso de aplicación automático de recubrimientos 46153.	74
Figura 41. Medidas de tendencia central y dispersión para las mediciones de placas ABS para la determinación de capacidad del proceso de aplicación.	76
Figura 42 Gráfica de análisis de capacidad del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.	77
Figura 43. Área de aplicación del laboratorio Mankiewicz: suministro de aire, cabinas de aplicación y equipo de aplicación automática.	80
Figura 44. Revisión de horno de secado.	80

Figura 45. Preparación de mezcla del recubrimiento Carbon black y sus componentes: a) Pintura y catalizador, b) solvente 70%, c) báscula, EPP y accesorios de trabajo.....	81
Figura 46. Pistola de aplicación automática	82
IFigura 47. Página principal equipo de aplicación automática Spraymation.	83
Figura 48. Estudio tipo 1 para el sistema de medición para ΔL^*	90
Figura 49. Estudio R&R de medición cruzado para medición de color del recubrimiento Carbon Black.	92
Figura 50. Gráfica de componentes de variación para el recubrimiento Carbon Black.....	93
Figura 51. Graficas \bar{X} y R para mediciones del recubrimiento Carbon Black.....	94
Figura 52. Gráfica para de puntos, medición por parte.	95
Figura 53. Gráfica medición por operador, recubrimiento Carbon Black.	96
Figura 54. Grafica de interacción Operador*Pieza.	97
Figura 55. Gráfico de intervalos de confianza para Presión de atomización.	99
Figura 56. Gráfico de intervalos de confianza para el Flujo de material.	100
Figura 57. Gráfico de intervalos para la apertura del abanico.	100
Figura 58. Gráfico de intervalos para el tamaño de boquilla.....	101
Figura 59. Gráfica de normalidad para residuales.....	103
Figura 60. Gráfico de efectos para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.	104
Figura 61. Gráfico de intervalos para presión de atomización para el modelo lineal optimizado.	106
Figura 62. Gráfico de intervalos del flujo de material para el modelo lineal optimizado. .	107
Figura 63 Gráfico de intervalos para la apertura del abanico para el modelo lineal optimizado.	107
Figura 64. Gráfico de intervalos para el tiempo de flash off para el modelo lineal optimizado.	108
Figura 65. Gráfico de normalidad para los residuales generados del modelo lineal optimizado.	110
Figura 66. Grafica de efectos para los factores significativos del modelo lineal optimizado.	111
Figura 67. Capacidad de proceso empleando niveles óptimos del diseño experimental optimizado.	112
Figura 68. Gráficos de efectos para factores significativos.....	114

Figura 69. Gráficos de efectos de Relación S/N para los factores: presión atomización, flujo de material, apertura del abanico, tiempo de flash off y cross coats.	116
Figura 70. Capacidad de proceso de los datos de corrida de confirmación del análisis señal-ruido.	117

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Media y desviación estándar para cartas de control de valores individuales y rangos móviles.....	30
Ecuación 2. Límites de control para valores individuales.	30
Ecuación 3. Hipótesis nula.....	33
Ecuación 4. Hipótesis alternativa	33
Ecuación 5. Hipótesis nula regresión.	53
Ecuación 6. Hipótesis alternativa para regresión.	53
Ecuación 7. Modelo de regresión lineal.	54
Ecuación 8. Modelo de regresión para dL^*	54
Ecuación 9. Modelo lineal para la aplicación del recubrimiento Carbon Black.....	67
Ecuación 10. Modelo simplificado para la aplicación del recubrimiento Carbon Black.	68
Ecuación 11. Nuevo modelo lineal para la aplicación del recubrimiento Carbon Black. ...	86
Ecuación 12. Modelo lineal optimizado mediante el comando step en el software R.	88
Ecuación 13. Hipótesis planteadas para la prueba de normalidad de los residuales.....	109
Ecuación 14. Modelo lineal para el diseño experimental con punto central.....	113

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de recubrimientos (Goldschmidt, 2007).	20
Tabla 2. Relación mezcla para recubrimiento Carbon Black. Elaboración propia	38
Tabla 3. Características de calidad del recubrimiento Carbon Black.....	41
Tabla 4. Análisis de varianza para mediciones de color del recubrimiento Carbon Black. 48	
Tabla 5. Análisis del estudio de medición R&R cruzado. Elaboración propia.	49
Tabla 6 Estimadores del modelo de regresión para la velocidad de dispersión y el tiempo de pre-humectación en el color.....	54
Tabla 7. Análisis de Varianza Carbon Black. Elaboración propia	55
Tabla 8. Análisis del modelo de regresión Carbo Black. Elaboración propia	55
Tabla 9. Factores considerados en el diseño experimental del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon black.	60
Tabla 10. Matriz experimental del diseño factorial 24-1 para el recubrimiento Carbon Black.	65
Tabla 11. Análisis de varianza ANOVA para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black	66
Tabla 12. Análisis del modelo lineal para la aplicación del recubrimiento Carbon Black. .	67
Tabla 13. Análisis de varianzas para el modelo lineal simplificado.....	68
Tabla 14. Análisis del modelo simplificado para la aplicación del recubrimiento Carbon Black.....	69
Tabla 15. Configuración de script para la aplicación de recubrimientos de la familia 46153.	73
Tabla 16. Condiciones de aplicación del recubrimiento Carbon Black para la determinación de la estabilidad del proceso.....	75
Tabla 17. Factores considerados para el diseño experimental para la aplicación automática del recubrimiento Carbon Black.	78
Tabla 18. Matriz experimental del diseño óptimo para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.....	79
Tabla 19. Resultados del diseño óptimo experimental realizado.....	84
Tabla 20. Análisis de varianza para los datos obtenidos de la experimentación.	85
Tabla 21. Análisis del modelo lineal para el diseño optimo experimental realizado (Ecuación 11).	87
Tabla 22. Análisis de varianza para el modelo lineal optimizado (Ecuación 12).....	88

Tabla 23. Análisis del modelo lineal optimizado (Ecuación 12).	89
Tabla 24. Coeficientes de factores para el modelo lineal.	98
Tabla 25. Tablas de coeficientes de factores significativos para el modelo lineal final (Ecuación 12).....	105
Tabla 26. Corrida de confirmación de niveles óptimos del diseño experimental optimizado.	111
Tabla 27. Análisis de varianza para presión, abanico, flujo, flash off y cross coat con puntos centrales.	113
Tabla 28. Análisis del modelo de regresión para el diseño experimental con puntos centrales.	113
Tabla 29. Matriz para cálculo de relación Señal/Ruido.....	115
Tabla 30. Valores de S/N para los factores: presión, flujo, abanico, flash off y cross coat.	115
Tabla 31. Corrida de confirmación del análisis Señal/Ruido.....	117

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de la industria automotriz en México.

En el año 2012, la producción de autopartes en México representó un 3.6% de la producción manufacturera total, siendo el 5° productor y exportador de autopartes a nivel global. En el segundo trimestre del año 2015, la industria de autopartes incrementó el PIB en un 4.8%, con respecto al año anterior x. Las grandes empresas de recubrimientos a nivel mundial, tienen los ojos puestos en México gracias al dinamismo del sector automotriz (Cruz, 2015).

Dentro del sector de la manufactura automotriz, existen diferentes proveedores que suministran a armadoras, y que a su vez abastecen el mercado de remplazo de autopartes para el parque vehicular existente (Medina Ramirez, 2013). La industria automotriz depende directamente de empresas especializadas en el procesado y maquinado de autopartes dentro de las que sobre salen la forja, maquinado, soldadura y la industria de los recubrimientos, entre otras.

Estas empresas proveen los materiales a diferentes niveles de producción de la industria automotriz para realizar componentes mayores y menores, para que estos a su vez suministren a las armadoras u OEM's (Original Equipment Manufacturers) (INEGI, 2014).

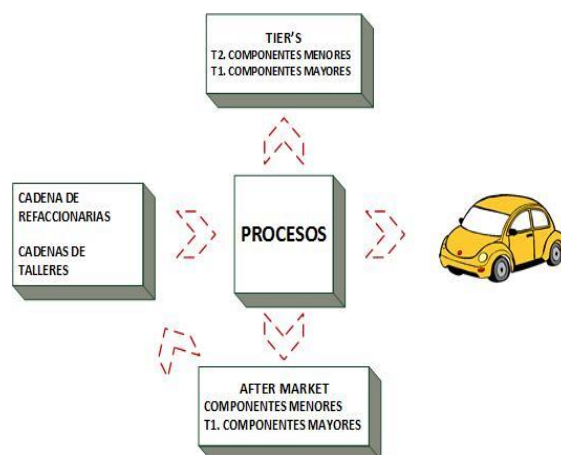


Figura 1. Cadena de suministro del sector de autopartes. Elaboración propia

Se prevé que el sector automotriz siga en ascenso durante los próximos años. México producirá más de 3.7 millones de vehículos ligeros al final de 2016, lo que significará un incremento de 28.5% respecto a los niveles de producción reportados en 2012. El crecimiento del sector automotriz beneficia directamente a la manufactura de autopartes, ya que el mercado demandará una alta gama de productos para satisfacer al parque vehicular existente y en servicio; aumentando la demanda del mercado de repuesto o aftermarket (Medina Ramirez, Promexico, 2013).

La industria que se ve indirectamente beneficiada con el crecimiento del mercado automotriz, es la de los recubrimientos la cual, en el año 2012, produjo 720 millones de litros de los distintos recubrimientos, en tanto que el valor del mercado de este sector es de aproximadamente 32 mil millones de pesos. Se prevé que la producción aumente a más de 998 mil toneladas métricas para 2018, lo que equivale a una tasa de crecimiento anual promedio de 2.9%. La empresa holandesa Akzo Nobel y la estadounidense PPG compiten por el liderazgo mundial- Cada una posee el 10% del mercado, quedando Sherwin-Williams con un 5% (Cruz, 2015).

Una de las compañías que a lo largo de los años se ha ido posicionando en el sector de manufactura de recubrimientos a nivel global, es la alemana Mankiewicz. La cual se ha especializado en recubrimientos para la industria general, aeroespacial y automotriz principalmente, y que actualmente se ha posicionado en el mercado mexicano como Mankiewicz México.

En 1998 inició sus operaciones en México, donde se ha mantenido a lo largo de 18 años, dedicándose a la producción y venta de sistemas de recubrimientos para los sectores de la industria general, aeroespacial y automotriz. En el sector automotriz, sus principales clientes son las empresas fabricantes de autopartes plásticas, teniendo proyectos importantes con empresas armadoras tales como Volkswagen, AUDI y Ford principalmente.

1.2 Problemática del color en los sistemas de recubrimientos automotrices.

En la industria automotriz, cada vez es más empleada la medición de reflexiones para el control de calidad del color (Jafari et al., 2016). Esto se debe a que las autopartes provienen de diversos proveedores, lo que hace del proceso de control de calidad de proveedores, una etapa crucial. El color es de gran importancia en la aprobación de autopartes, debido a que las diferencias de color entre el cuerpo del automóvil y la parte ensamblada son visibles para el usuario final (E. J J Kirchner and Ravi, 2014).

Para las empresas fabricantes de recubrimientos, el color representa un aspecto crucial ya que, como se mencionó, este debe de cumplir los altos estándares establecidos por las OEM's. A través de los años, se han propuesto técnicas matemáticas y estadísticas para la caracterización y evaluación del color en los recubrimientos (Germer, 2001). Los recubrimientos de efecto especial, los cuales se componen de pigmentos de metálicos o nacarados, han incrementado su demanda en la industria automotriz, lo que hace aún más importante conocer su comportamiento y establecer técnicas de medición más precisas (Kirchner and Cramer, 2012).

Los recubrimientos de efecto metálico se componen de pigmentos metálicos que se depositan en la superficie aplicada (Jandó et al., 2003). El uso de este tipo de recubrimientos presenta ciertas ventajas. La primera es la ilusión de profundidad óptica, la cual es creada por el arreglo de múltiples plaquetas del pigmento. Esta ilusión es resultado de la reflexión de la luz en las diferentes interfaces entre el pigmento y el aglutinante. La segunda ventaja es el sutil efecto llamativo de un color dependiente del ángulo de visión, lo que hace este tipo de recubrimientos atractivos en la industria automotriz (Maile et al., 2005).

Para el estudio de la medición de color de los recubrimientos de efecto metálico, se han empleado herramientas computacionales que, en conjunto con modelos matemáticos, han permitido desarrollar sistemas de gran precisión. Esto ha sido de gran importancia en las etapas de formulación de pintura y acabado final (Shimizu and Meyer, 2015). Se han empleado técnicas matemáticas, entre las que se encuentran las redes neuronales y algoritmos genéticos que, combinados con herramientas computacionales, han influido de manera considerable en la predicción de recetas de color en la industria de los recubrimientos (Mizutani, Eiji; Takagi, Hideyuki; Auslander, 2000).

La caracterización, medición y comprensión de recubrimientos de efecto metálico han sido objeto de estudio a lo largo del tiempo (Medina and Díaz, 2013). Desde el modelado del comportamiento de las partículas metálicas contenidas en el recubrimiento (Amookht et al., 2014), la influencia de la distribución y orientación de las partículas metálicas (Allred and Olkkonen, 2015), así como una mejor percepción del efecto que tienen en la apariencia final del recubrimiento (Dekker et al., 2011).

Los estudios realizados en este tipo de recubrimientos se han enfocado en la modificación de las condiciones de aplicación de los mismos (Prendi et al., 2008); determinando su influencia en la percepción y evaluación del color del recubrimiento. Adicional al impacto que la variación de las condiciones de aplicación de los recubrimientos ha tenido en la percepción del color, se ha observado la influencia de estos cambios en la reducción de defectos de calidad generados durante el proceso de pintura. Entre los defectos de calidad analizados se encuentra el desprendimiento de la pintura (peel off) (Bharathi and Baskaran, 2014) y la aparición de burbujas (blistering) en la superficie pintada (Srinivasan et al., 2014).

1.3 Importancia de los recubrimientos y justificación del análisis de los parámetros para su aplicación.

La industria automotriz es un sector de gran importancia económica alrededor del mundo (Prendi et al., 2008). La evaluación visual en el Control de calidad está siendo reemplazada, de forma gradual, por la evaluación instrumental. Esto ha permitido eliminar parcialmente la subjetividad de la visión humana, seleccionando el espectrofotómetro como alternativa para la evaluación cuantitativa del color en los recubrimientos automotrices (E. J. J. Kirchner and Ravi, 2014).

El recubrimiento de efecto metálico Carbon Black, desarrollado por la empresa Mankiewicz, se caracterizan por ser un tipo de recubrimiento de efecto cromado, con brillos mate medio, mate sedoso brillante y brillante. La aplicación principal de esta pintura es en el refinado y acabado superficial de material plástico en el interior de un automóvil. Tiene una excelente resistencia química a las cremas y lociones de protección solar, además de resistencia mecánica (Chromeffektlack, 2013).

La pintura Carbon Black ha presentado problemas de calidad relacionados con variaciones de color principalmente, lo que ha originado reclamaciones de clientes, reportando valores de color fuera de especificación.

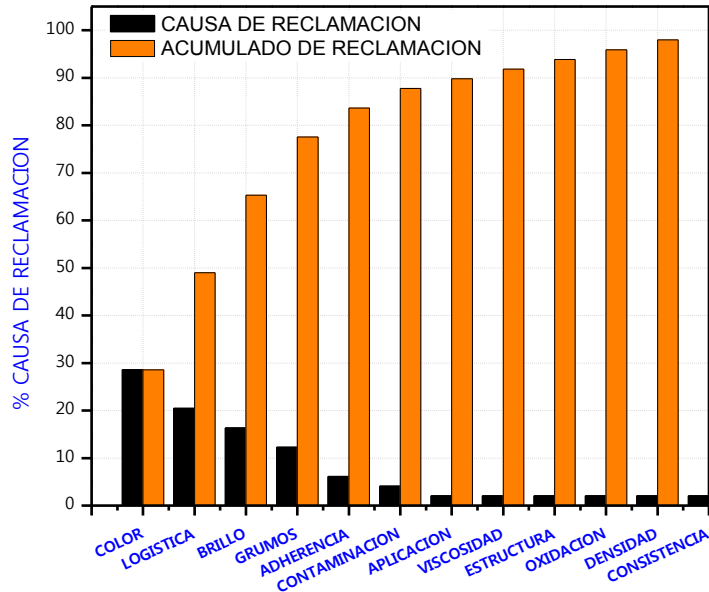


Figura 2. Principales problemas de calidad en recubrimientos de efecto metálico. Fuente: Mankiewicz México.

Para la producción de recubrimientos de efecto de tipo metálico, se establecen las fases en las que se llevará a cabo la producción del mismo; la relación mezcla de todas las materias primas, las condiciones de operación, tales como, velocidad de dispersión, tiempo de dispersión, reposo y pre-humectación. Se definen también, análisis físicos y químicos que permitirán conocer si el producto cumple con las especificaciones de calidad establecidas.

Las condiciones bajo las cuales el recubrimiento debe aplicarse, son establecidas con el objetivo de realizar mediciones de parámetros de color, espesor de película y brillo. De esta manera es posible determinar si el recubrimiento cumplirá la función para la cual fue fabricado. El conocimiento de los factores clave que influyen en los problemas de colorimetría de recubrimientos de efecto metálico y el impacto de los mismos, sería de gran utilidad para lograr predecir, desde la formulación de la pintura, los elementos necesarios y las relaciones mezcla de los mismos, para producir el color requerido. El estudio a profundidad de este tipo de pinturas, favorecería el desarrollo de nuevos colores y tecnologías; generando diseños más

robustos y procesos de fabricación más efectivos que contribuyan al cumplimiento de las especificaciones de color establecidas.

1.4 Objetivos de la parametrización de la aplicación de recubrimientos automotrices con efecto metálico.

El objetivo de esta investigación fue determinar el nivel óptimo de los parámetros de aplicación de un recubrimiento de efecto metálico base solvente, para reducir el rechazo interno del material debido a la variación del color. El desarrollo de este proyecto permitió comprobar la efectividad de la parametrización de las variables de aplicación del recubrimiento Carbon Black, en la reducción de la variabilidad del color.

Se realizaron diseños experimentales fraccionados y optimizados, aplicando, mediante el uso de un equipo de aplicación automática de dos ejes, el recubrimiento sobre placas de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), bajo diferentes condiciones. Esto permitió determinar la influencia de factores tales como, presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico de la pistola de aplicación y el tiempo de flash off en la variación de la tonalidad del recubrimiento de efecto metálico.

2. OBJETIVOS

2.1 Recubrimientos.

El estándar europeo DIN EN 971-1, define la pintura, como material de recubrimiento líquido, en pasta o polvo; la cual permite que materiales ópticamente opacos, sean producidos con propiedades técnicas específicas. Las pinturas pueden subdividirse de acuerdo con diversos criterios (Artur Goldschmidt, 2007).

Función del recubrimiento	Capa del sistema de recubrimiento	Propósito	Compatibilidad ambiental
• Barniz • Pintura metálica • Pintura sólida	• Primer • Primer de superficie • Topcoat	• Pintura automotriz • Decorativa • Industrial	• Base agua • Sólidos elevados • Radiación curable • Recubrimientos en polvo

Tabla 1. Clasificación de recubrimientos (Goldschmidt, 2007).

La composición genérica de una pintura es la siguiente, aun cuando algunos tipos pueden no contener todos los ingredientes:

- Pigmentos, son compuestos orgánicos o inorgánicos cuya misión es proporcionar a la pintura color y poder cubriente. Los pigmentos son opacos tanto en estado seco como húmedo.
- Cargas, son, en general, de naturaleza inorgánica, aportan cuerpo, materia sólida, y dan estructura, viscosidad y reología a la pintura. Las cargas son opacas cuando están secas pero son translucidas en estado húmedo.
- Ligante o resina, son productos cuya misión es la de mantener unidas las partículas sólidas, pigmentos y cargas, una vez que la pintura está seca. Según el tipo de resina utilizada, la pintura tendrá unas características de secado y resistencias determinadas.

- Disolvente, se llama así al agua y otros productos de naturaleza orgánica, cuya misión es la de dar a la pintura una viscosidad óptima, según el método de aplicación que debe utilizarse. Los disolventes se utilizan también, para solubilizar las resinas y regular la velocidad de evaporación.
- Aditivos. son productos que se dosifican en pequeñas cantidades para facilitar el proceso de fabricación de la pintura, aportar unas características concretas a la pintura seca, crear las condiciones adecuadas para que el secado se produzca de forma correcta y para estabilizar la pintura en el periodo de almacenamiento. Dentro de este grupo de productos encontramos, humectantes, dispersantes, espesantes y agentes reológicos.

2.2 Recubrimientos con efectos especiales.

Dentro de la clasificación de los recubrimientos se encuentran los recubrimientos de efecto especial, cuyo objetivo es que un objeto tenga una apariencia atractiva. En contraste con los colores sólidos convencionales, los colores con efecto cambian su apariencia en función del ángulo de observación (Artur Goldschmidt, 2007). Los acabados de interferencia, muestran no sólo un cambio en la intensidad del color, sino que también cambian su cromaticidad y el tono. Los desarrollos más recientes son los pigmentos de efecto especial, los cuales crean destellos cuando cambian las condiciones de iluminación desde la luz del sol a un cielo nublado (Klein, 2010).

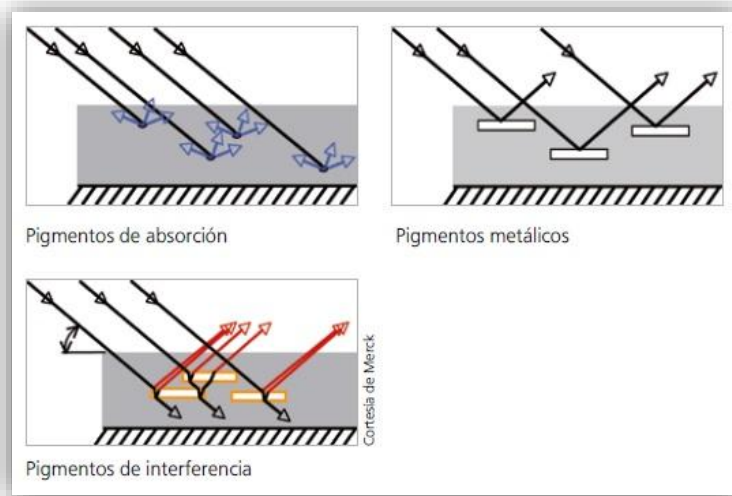


Figura 3. Reflectancia de los diferentes tipos de pigmentos. (Gmnh and Strasse)

Los recubrimientos automotrices modernos, están diseñados para evocar acabados metálicos brillantes, depositando pigmentos, en forma de hojuelas, en la capa base durante el proceso de pintura industrial. La armonía del color, entre carrocerías y autopartes, es una tarea compleja y requiere mucho tiempo, lo que eleva los costos de fabricación y exige métodos de inspección rigurosos, tanto en los proveedores de autopartes, como las plantas de fabricación de automóviles (Irchner et al., 2015). Los acabados metálicos incorporan pigmentos metálicos de hojuela de forma paralela al sustrato en un medio transparente. Las hojuelas metálicas actúan como reflectores “efecto espejo” en escala de micrones y son responsables de los cambios de luminosidad como una función del ángulo de visión. Los destellos son creados por las hojuelas que no están orientadas paralelamente al sustrato (Sung et al., 2002).

Un acabado metálico, se compone de hojuelas metálicas, típicamente hojuelas de aluminio, en un aglutinante polimérico. Las características clave, que afectan las propiedades ópticas de los recubrimientos metálicos son el tamaño, forma, rugosidad de la superficie, orientación espacial y otros pigmentos. La relación entre la orientación de la distribución de las hojuelas de aluminio y la reflectancia, puede

ser utilizada para evaluar los efectos de un cambio en la distribución de las hojuelas (Sung et al., 2002).

Los pigmentos metálicos se componen generalmente de un metal o aleación de metales. El brillo típico de un pigmento metálico es cada vez más brillante mientras las hojuelas estén orientadas de manera uniformemente paralelas a la superficie del recubrimiento. El llamado efecto metálico es principalmente una consecuencia de la reflexión difusa y direccional en la superficie y el borde de las hojuelas (Gmbh and Strasse).

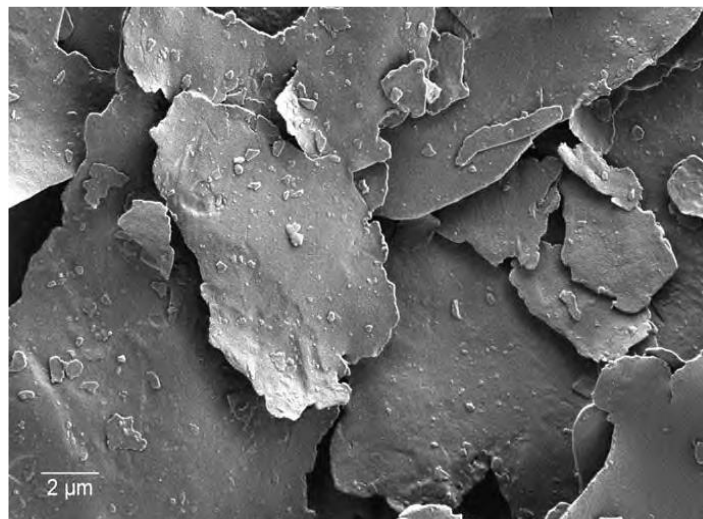


Figura 4. Imagen de típicas partículas de aluminio a través de un microscopio electrónico de barrido SEM (Klein, 2004)

2.3 El color en recubrimientos.

2.3.1 Percepción visual del color.

Existen numerosos métodos para la descripción de un color pero todos presentan la característica común del empleo de tres datos para definir un espacio de representación específica de tres dimensiones. En la visión de los colores, la sensación visual interpreta la impresión coloreada según:

- Tono o tonalidad cromática (Hue). Es el atributo de la sensación visual que ha dado lugar a las denominaciones de color como: violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo, púrpura, etc. Es el elemento psicosensoorial que corresponde aproximadamente a la longitud de onda dominante. La representación gráfica de las variaciones de tono puede esquematizarse mediante un círculo, llamado el círculo de color cromático.
- Saturación o pureza (Chroma). Este factor permite, en la sensación visual, realizar una estimación de la proporción de color cromáticamente puro contenido en la sensación visual total. La saturación define el carácter más o menos coloreado de una fuente luminosa o de la superficie de un objeto por oposición al blanco (acromático). Su variación es lineal entre el punto neutro y el color puro, es independiente del tono y puede representarse por el radio del círculo cromático.
- Claridad (Lightness). Es el atributo según el cual, un cuerpo puede transmitir o reflejar una fracción más o menos grande de la luz. Su variación lineal es independiente del tono y la saturación.



Figura 5. Los 3 factores de percepción visual: tono/ tonalidad cromática (rojo) - saturación /pureza (vivo) - claridad (claro).

Cada color puede caracterizarse por estos tres valores y tres valores identificar un solo factor, por lo que se puede definir un sistema de representación dimensional del color (Klein, 2010).

2.3.2 Sistemas de clasificación de colores basado en muestras físicas.

Existen diversos atlas de colores basados en distintos enfoques, la mayoría se basa en los siguientes principios.

- Un eje vertical que representa la claridad y se extiende del negro al blanco.
- La distribución de los dominantes cromáticos (tonos) en torno a este eje, formando un círculo.

Entre los diversos atlas de colores desarrollados a lo largo de la historia se encuentra el atlas de Munsell propuesto en 1905, el Color Harmony Manual de OSTWALD, el sistema DIN, el atlas NCS y entre los más recientes, el Normacolor Spatial System el cual fue creado sobre la base del espacio colorimétrico CIELAB.

El color es una interpretación, realizada por el córtex, de percepciones procedentes del ojo. El sistema de visión del ser humano le permite evaluar rápidamente y de forma permanente, el aspecto de los objetos de las fuentes luminosas. Con la finalidad de medir el color de los objetos y de los productos observados, los tres parámetros del trinomio deben analizarse. El primer parámetro es la fuente luminosa, el segundo el objeto y el tercero el observador.



Figura 6. Trinomio de percepción del color (Alain, 1997).

2.4 Colorimetría.

La base científica de la medición del color se basa en la existencia de tres distintos grupos de señales procedentes del ojo de un observador humano. Con la finalidad de identificar la respuesta de los estímulos de color mediante valores numéricos, los valores de las funciones colorimétricas del ojo han sido normalizados e incorporados a la definición del “observador patrón” de la Comisión Internacional de la Iluminación CIE.

2.4.1 Espacios colorimétricos. Sistema CIELAB.

Los espacios colorimétricos son el resultado de la extensión de la colorimetría de fuente a la colorimetría del objeto. Ilustran la posibilidad de definir los colores por números, aportando de ese modo un criterio de clasificación objetivo. Permiten representar y determinar la diferencia entre los colores, aplicándose esta última propiedad a la definición de aceptabilidad.

El espacio CIE 1976, llamado CIELAB, se basa en una transformación matemática del sistema CIE 1931. En el espacio CIELAB, se encuentra el método de identificación tridimensional, retomando la teoría de los tres pares antagonistas: blanco-negro, rojo-verde, amarillo-azul de la visión de los colores.

El sistema CIELAB tiene propiedades de un espacio euclidiano. Sus puntos pueden referenciarse por medio de coordenadas rectangulares:

- L^* representa la claridad
- a^* representa el componente cromático rojo-verde
- b^* representa el componente cromático amarillo-azul

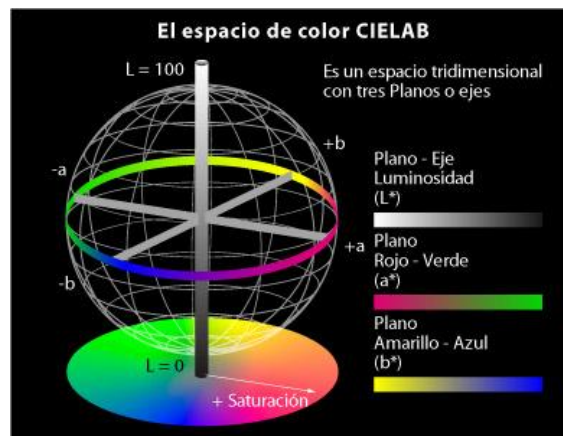


Figura 7. Espacio de color CIELAB.

2.4.2 Diferencias de color en el sistema CIELAB.

En el sistema CIELAB, la diferencia de color (ΔE^*) integra la diferencia de las tres variables independientes (ΔL^* , Δa^* , Δb^*). Al expresar ΔL^* la diferencia de claridad, el signo de la diferencia muestra el sentido de la variación en relación a la percepción psicosensoresal. Un valor negativo indica una diferencia hacia el lado oscuro (negro), mientras que un valor positivo, indica una diferencia hacia el lado claro (blanco).

De mismo modo las proyecciones sobre los otros dos componentes principales Δa^* y Δb^* que definen el plano cromático, se expresan de la siguiente manera: para Δa^* el valor negativo indica una diferencia cromática hacia el color verde, mientras que si el valor positivo, la diferencia tiene hacia el rojo. Para Δb^* , el valor negativo indica una tendencia hacia el color azul y el valor positivo una tendencia hacia el color amarillo (Alain, 1997).

2.5 Producción de recubrimientos de efecto metálico.

En el proceso de fabricación de recubrimientos de efecto metálico para la industria automotriz, se tiene la problemática referente a variaciones de color en este tipo de recubrimientos. Los procesos de fabricación y liberación de este tipo de recubrimientos, son definidos por el laboratorio de Investigación y desarrollo de Mankiewicz, posteriormente son transferidos a Sayer Lack para su ejecución.

En estos procedimientos, se establecen las fases en las que se llevará a cabo la producción del recubrimiento, la relación mezcla de todas las materias primas, las condiciones de operación, tales como, velocidad de dispersión, tiempo de dispersión, reposo y pre-humectación. Se definen también, los análisis y mediciones correspondientes a las características de calidad del recubrimiento.

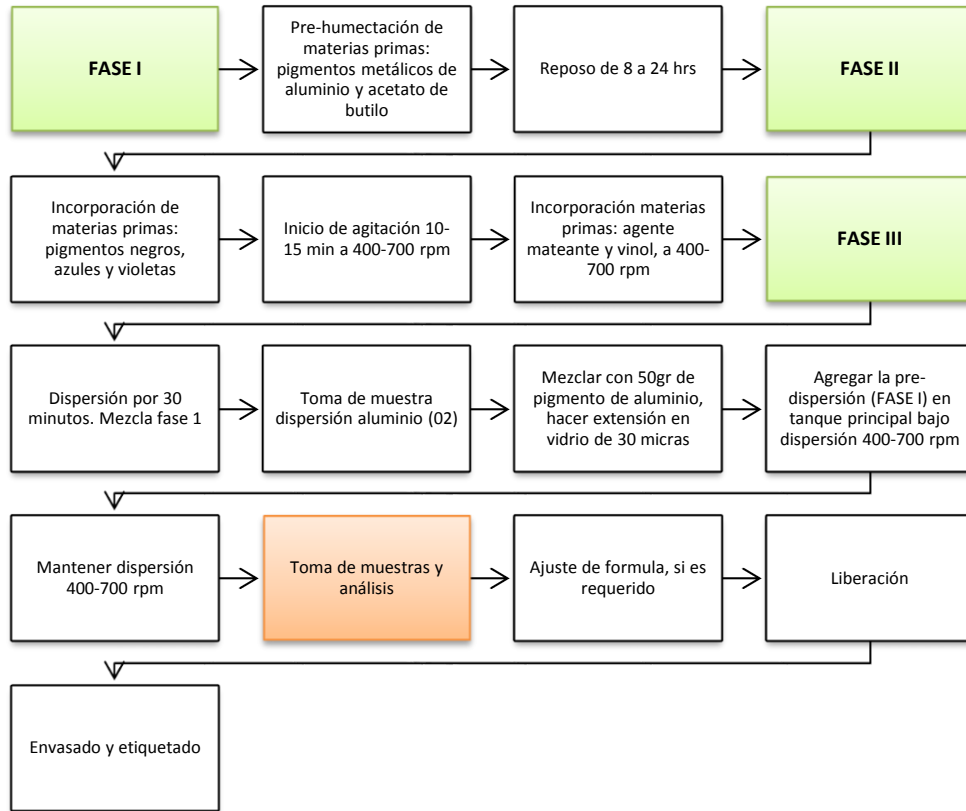


Figura 8. Procedimiento de fabricación, recubrimiento Carbon Black. Elaboración propia

Después de la fabricación del recubrimiento, es tomada una muestra para control de calidad de producto terminado. Se aplica parte de la muestra a una placa de Policarbonato/Acrilonitrilo butadieno estireno, llamada sustrato. Se hace pasar por una etapa de flash off y horneado, para posteriormente, realizar mediciones y análisis de los parámetros de calidad del recubrimiento.

A pesar de contar con las condiciones de operación y liberación definidas, es recurrente la necesidad de realizar ajustes finales al recubrimiento, previos a su liberación para envasado, con el fin de garantizar el cumplimiento de las especificaciones.

Los ajustes de fórmula implican la adición de aditivos y pigmentos, principalmente; los cuales mejoran las características del producto, de acuerdo con la especificación requerida. Esta etapa requiere de un mayor consumo de materias primas, tiempo de producción y mayores costos de proceso.

De acuerdo con la situación actual de estos procesos, surge la necesidad de determinar, las condiciones óptimas de fabricación y liberación de un lote de este recubrimiento. Con la finalidad de reducir las variaciones, descritas anteriormente, y así, reducir el rechazo interno del producto.

2.6 Herramientas de análisis.

2.6.1 Estudio de capacidad de proceso

Las variables de salida o de respuesta de un proceso deben cumplir con ciertas metas y/o especificaciones, a fin de que sea posible considerar que el proceso funciona de manera satisfactoria. Por ello, una tarea primordial del control de calidad es conocer la capacidad o habilidad de un proceso, que consiste en determinar la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada. Esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria.

2.6.1.1 Cartas de control de valores individuales y rangos móviles

La carta de individuales es un diagrama para variables de tipo continuo, pero en lugar de aplicarse a procesos semi-masivos o masivos como es el caso de la carta $\bar{X} - \bar{R}$, se emplea en procesos lentos, en los cuales para obtener una medición o una muestra de la producción se requieren periodos relativamente largos.

Ejemplos de este tipo de procesos son:

- Procesos químicos que trabajan por lotes.
- Industria de bebidas alcohólicas, en las que deben pasar desde una hasta más de 100 horas para obtener resultados de los procesos de fermentación y destilación.

- Procesos en los que las mediciones cercanas sólo difieren por el error de medición. Por ejemplo, temperaturas en procesos, humedad relativa en el medio ambiente, etcétera.
- Algunas variables administrativas cuyas mediciones se obtienen cada día, cada semana o más. Por ejemplo, mediciones de productividad, de desperdicio, de consumo de agua, electricidad, combustibles, etcétera.

En estos casos, la mejor alternativa es usar una carta de individuales, donde cada medición particular de la variable que se quiere analizar se registra en una carta.

Para determinar los límites de control se procede igual que en los casos anteriores, mediante la estimación de la media y la desviación estándar del estadístico W que se grafica en la carta, que en este caso es directamente la medición individual de la variable X . Por ello, los límites se obtienen con la expresión $\mu_x \pm 3\sigma_x$, donde μ_x y σ_x son la media y la desviación estándar del proceso, respectivamente. Es decir, los límites de control, en este caso, coinciden por definición con los límites reales. En un estudio inicial estos parámetros se estiman de la siguiente manera:

$$\mu_x = \bar{X} \text{ y } \sigma_x = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{\bar{R}}{1.128} \quad \text{Ecuación 1.}$$

donde \bar{X} es la media de las mediciones, y \bar{R} es la media de los rangos móviles de orden 2 (rango entre dos observaciones sucesivas en el proceso). Al dividir el rango promedio entre la constante d_2 se obtiene una estimación de la desviación estándar del proceso, σ . Además, como en este caso el rango móvil es de orden 2, entonces el valor de n para determinar d_2 será $n = 2$; por lo tanto, cuando $n = 2$, $d_2 = 1.128$. De lo anterior se concluye que los límites de control para una carta de individuales están dados por:

$$\bar{X} \pm 3 \left(\frac{\bar{R}}{1.128} \right) \quad \text{Ecuación 2.}$$

2.6.2 Análisis del sistema de medición.

Las 6 M determinan de manera global cualquier proceso. Parte de la variabilidad observada en el producto se debe a la variabilidad de las mediciones y no a la variabilidad propia del producto. Sin embargo, las *mediciones* se pueden pensar a su vez como el resultado de un proceso, el cual es influido por causas del mismo tipo que afectan al proceso de producción.

Un punto de partida clave es entender que cualquier proceso de medición genera un error. Por lo tanto, lo que se observa no es exactamente la realidad, más bien es la realidad más un error de medición. Esto se traduce en que la *variación total observada* en unos datos es el resultado de la variación propia del producto más el error del proceso de medición.

En particular, las fuentes principales que contribuyen al error del proceso de medición son el equipo de medición, los operadores (reproducibilidad) y la variación dentro de la muestra.

La variabilidad del equipo se divide a su vez en los siguientes componentes:

- *Calibración.* La exactitud y linealidad del instrumento.
- *Estabilidad.* El cambio del instrumento con el transcurso del tiempo.
- *Repetibilidad.* La variación observada cuando un operador mide de manera repetida la misma pieza con el mismo instrumento.
- *Linealidad.* La exactitud a lo largo del rango de operación del instrumento, por ejemplo en el caso de una báscula que mide un rango de 0 a 100 kilogramos, interesa que sea exacta en todo este rango.

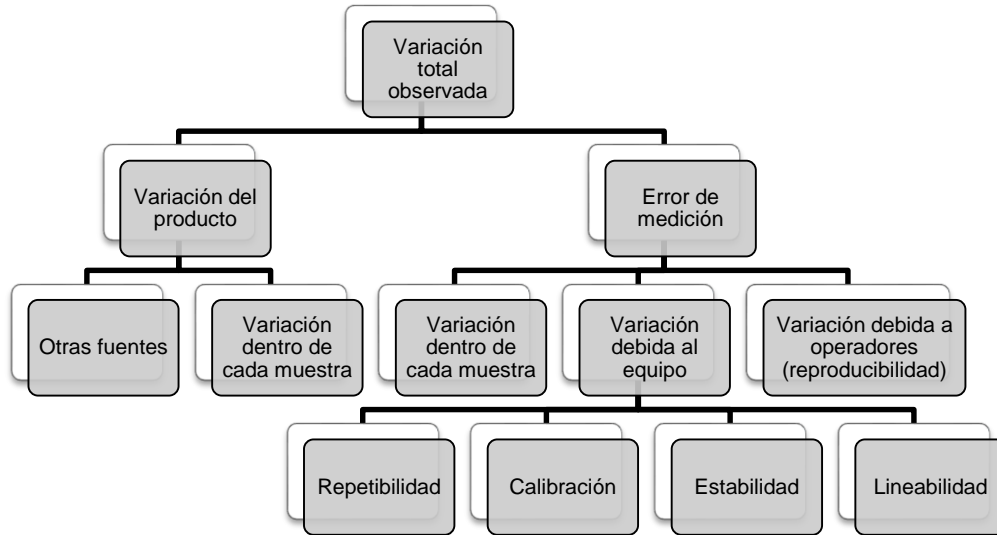


Figura 9. Fuentes de variabilidad en las mediciones (Gutiérrez Pulido and De la Vara Salazar, 2009).

2.6.3 Diseño Factorial Fraccionado 2^{k-p} .

Los diseños factoriales fraccionados son diseños en los que se elige adecuadamente una parte o fracción de los tratamientos de un diseño factorial completo, con la intención de estudiar el efecto de los factores utilizando menos corridas experimentales.

Una de las principales aplicaciones de los diseños factoriales fraccionados es en los experimentos de tamizado o exploración. Se trata de experimentos en los que se consideran muchos factores y el objetivo es identificar aquellos factores (en caso de haberlos) que tienen efectos grandes.

Los experimentos de tamizado suelen realizarse en las etapas iniciales de un proyecto, cuando es posible que muchos de los factores considerados en un principio tengan un efecto reducido o nulo sobre la respuesta. Entonces los factores que se identifican como importantes se investigan con mayor detalle en experimentos subsecuentes. El uso exitoso de los diseños factoriales fraccionados, se basa en tres ideas clave:

- El principio de efectos esparcidos o escasez de efectos. Cuando hay varias variables, es posible que el sistema o proceso esté dominado principalmente por algunos de los efectos principales y las interacciones de orden inferior.
- La propiedad de proyección. Los diseños factoriales fraccionados pueden proyectarse en diseños más fuertes (más grandes) en el subconjunto de los factores significativos.
- Experimentación secuencial. Es posible combinar las corridas de dos (o más) diseños factoriales fraccionados para ensamblar secuencialmente un diseño más grande para estimar los efectos de los factores y las interacciones de interés.

2.6.4 Análisis de la varianza (ANOVA).

El *análisis de varianza* (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. El objetivo del análisis de varianza en el Diseño Experimental es probar la hipótesis de igualdad de los tratamientos con respecto a la media de la correspondiente variable de respuesta:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ para algún } i \neq j \quad \text{Ecuación 4.}$$

2.6.5 Diseño Óptimo Experimental.

El propósito de un diseño óptimo es elegir los puntos de diseño según algunos criterios. Las capacidades de diseño óptimo se pueden usar con diseños factoriales generales completos, diseños de superficie de respuesta y diseños de mezcla.

3. METODOLOGÍA



Figura 10. Metodología. Elaboración propia

Durante la ejecución de este proyecto se siguió una metodología compuesta por las siguientes etapas:

- **Recolección de datos históricos.** Se revisó la base de datos de reclamaciones de calidad del periodo 2013-2015. Se obtuvieron los números de parte para los cuales se presentaron reclamaciones internas y externas; además de las causas de dichas reclamaciones. Se seleccionó el número de parte con un mayor impacto en las reclamaciones.
- **Variable de respuesta.** Se analizaron los datos de calidad para el recubrimiento Carbon Black, determinando como variable de respuesta la luminosidad del recubrimiento.
- **Análisis del Sistema de Medición.** Se realizaron estudios del sistema de medición para determinar su confiabilidad y la habilidad de los analistas para realizar mediciones de color.
- **Estabilidad del proceso.** Se verificó que el proceso de aplicación de pintura en el laboratorio de Mankiewicz fuera capaz y estable de generar placas de liberación dentro de especificación.
- **Modelo experimental.** Se realizaron corridas experimentales para determinar la influencia de los factores determinados en el color del recubrimiento.

3.1 Áreas consideradas en la investigación.

La investigación se llevó a cabo en la empresa Mankiewicz México en conjunto con la empresa Sayer Lack, la cual funge como proveedor de algunas materias primas y maquila del recubrimiento objeto de estudio. Se contemplaron las áreas de laboratorio de investigación y desarrollo de Mankiewicz. Las áreas de producción y control de calidad de producto terminado de Sayer Lack.

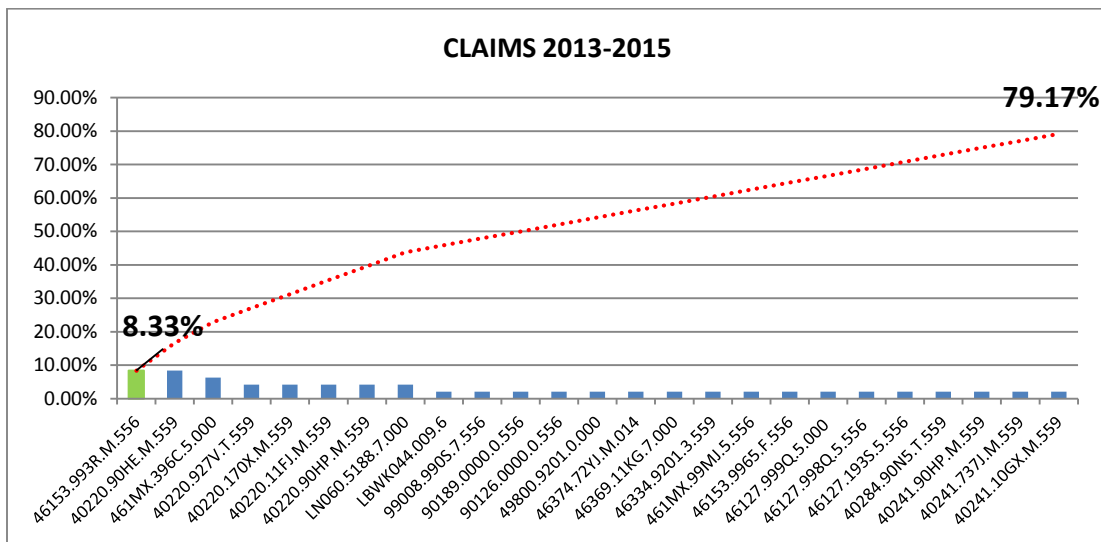


Figura 11. Gráfica de Pareto de números de parte que han presentado problemas de calidad entre 2013 y 2015. Elaboración propia

3.2 Material y métodos.

3.2.1 Recubrimiento.

Se realizó una revisión de la base de datos de calidad, en la cual la empresa Mankiewicz registra todas las reclamaciones generadas a los diferentes productos. Se revisaron los datos del periodo 2013 a 2015. Del total de materiales producidos y comercializados por Mankiewicz, 25 materiales representan el 79.17% de las reclamaciones generadas durante el periodo del 2013 al 2015. El código que conforma el número de parte de los materiales se describe de la siguiente manera:

46153	993R	M	556
(1)	(2)	(3)	(4)

1. Los primeros 5 dígitos indican la familia a la que pertenece el material y el tipo de tecnología del recubrimiento.
2. Los siguientes cuatro dígitos indican el color de recubrimiento.
3. El siguiente dígito indica la versión del material, varía según los requerimientos del cliente.
4. Los últimos tres dígitos indican la presentación en la que se comercializa el recubrimiento, para un recubrimiento se pueden tener varias presentaciones.

De acuerdo a la base de datos se seleccionó el producto 46153.993R.M Carbon Black. Este es un recubrimiento de efecto metálico de la familia Chromeffeklack 46153, utilizado para refinamiento y acabado superficial de material plástico en el interior del automóvil.



Figura 12. Placa de ABS con recubrimiento Carbon Black bajo luz D65, luz del día.

La apariencia final del recubrimiento se muestra en la figura 12. Un sistema de pintura requiere de componentes adicionales para su aplicación: un catalizador o harter que permite que el material se adhiera al sustrato y un solvente o verdunner que permite corregir la viscosidad en el recubrimiento. Los materiales que se utilizaron durante la ejecución del presente proyecto se mencionan en la tabla 2.

MATERIALES	PARTES
Alexit 46153.993R.M.000	5
Harter: 40550.0000.0.000	1
Verdunner: 90189.0000.0.000	70% Sobre mezcla (pintura + harter)
Flash off	15 minutos
Horneo a 80°C	30 minutos

Tabla 2. Relación mezcla para recubrimiento Carbon Black. Elaboración propia

El flash off corresponde al tiempo que se le da a la pintura, una vez aplicada, para la evaporación del solvente y la formación de la película. Posteriormente continúa una etapa de secado del recubrimiento, para esto la pieza aplicada se coloca dentro de un horno a 80° por 30 minutos.

Para la producción del recubrimiento se requirieron, de acuerdo con la fórmula establecida, los siguientes materiales:

- Pigmentos de aluminio, brindan efecto metálico
- Concentrados de color: negro, violeta y azul
- Agente mateante, da cuerpo al recubrimiento
- Acetato de butilo

3.2.2 Equipos.

- Espectrofotómetro portátil Konica minolta, geometría D/8°, modelo CM600-D.



Figura 13. Espectrofotómetro CM600-D.

- Master físico MSTD-0199.

Es el patrón de referencia contra el cual se comparan los valores de color y brillo del material. Dicho master, proviene de parte del cliente u OEM dependiendo del proyecto para el que este destinado el material.

- Pistola de aplicación por gravedad Anest Iwata, tamaños de boquilla 1.2 y 1.4mm.



Figura 14. Pistola de aplicación Anest Iwata W400

- Equipo de aplicación automática Spraymation, con pistola automática de gravedad DEVILLBISS con tamaño de boquilla 1.4mm.



Figura 15. Equipo de aplicación automática Spraymation

- Software para medición de color, el sistema utilizado para la medición del color es desarrollado por Mankiewicz.

Las características técnicas que debe cumplir este tipo de recubrimiento para ser aceptado y entregado al cliente son los siguientes.

CARACTERÍSTICAS	RANGO
Densidad	0.95-1.05 gr/cm ³
Viscosidad (DIN 4mm)	15-20 segundos
% de sólidos	24-27
Unidades de brillo	12 a 15
Espesor	15-25 micras
Color ΔL	1.50 a 2.0
Color Δa	-0.5 a 0.0
Color Δb	-0.5 a 0.0

Tabla 3. Características de calidad del recubrimiento Carbon Black

3.3 Variables de respuesta.

El objetivo de esta investigación fue la determinación del efecto que tienen los parámetros de aplicación y operación en la variación de color del recubrimiento de efecto metálico Carbon Black. El color se mide mediante coordenadas rectangulares del sistema CIELAB (L^* , a^* y b^*) (Alain, 1997). Se obtuvieron datos de 23 lotes, en promedio se producen lotes de 1500 Kg cada dos meses dependiendo del movimiento del material.

De acuerdo con el comportamiento histórico del recubrimiento, se tomó como variable de respuesta la coordenada L^* , la cual describe el comportamiento de la iluminación del color y es el parámetro que presentó mayor variación a lo largo del tiempo. Es importante recordar que el espectrofotómetro mide diferencias de las coordenadas de la muestra con respecto al patrón de referencia para este recubrimiento.

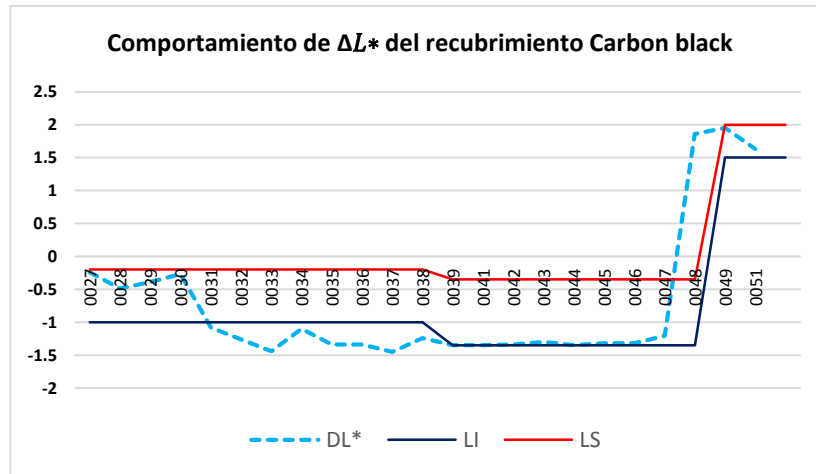


Figura 16. Comportamiento del ΔL^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.

La gráfica de control de la figura 16 indica cómo se ha comportado la iluminación del material. Como se mencionó anteriormente, la coordenada ΔL^* permite conocer la diferencia de claridad, donde el signo del valor representa el sentido de la variación en relación a la percepción psicosensores (Alain, 1997).

- El valor negativo indica una diferencia hacia el lado oscuro (negro)
- El valor positivo indica una diferencia hacia el lado claro (blanco).

Al inicio de la producción de este recubrimiento, la especificación para ΔL^* era de $(-1, -0.20)$. Se observó una tendencia del material hacia el lado oscuro, fuera del límite inferior de especificación. Como resultado de negociaciones con el cliente, se realiza un cambio de especificación a los valores $(-1.35, -0.35)$, mantenido estable la luminosidad del material hasta el lote 48. Por requerimiento del cliente, y dada la constante tendencia del material hacia el negro, se solicita una modificación a la fórmula del material, cambiando la especificación de la luminosidad a los valores $(1.5, 2.0)$ siendo la especificación que se ha mantenido hasta la fecha actual.

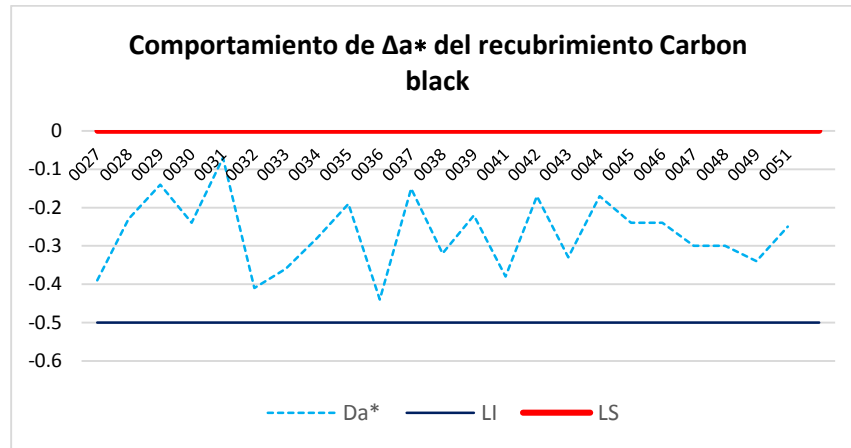


Figura 17. Comportamiento del Δa^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.

En la gráfica de la figura 17, se observa el comportamiento de la diferencia de una de las partes cromáticas del color (Δa^*), cabe mencionar que el valor esta diferencia cromática representa la tendencia del color de ir hacia el rojo, si el valor es positivo, y al verde si el valor es negativo. Al inicio de la producción se observa una gran variación en el comportamiento de este valor, variando entre el rojo y el verde constantemente, sin embargo llega a estabilizarse. Podría considerarse que el cambio en la especificación para la diferencia de luminosidad (ΔL^*) ha influido considerable en el comportamiento de las diferencias cromáticas (Δa^* y Δb^*). Esto ha evitado la necesidad de hacer cambios en la especificación de estos valores.

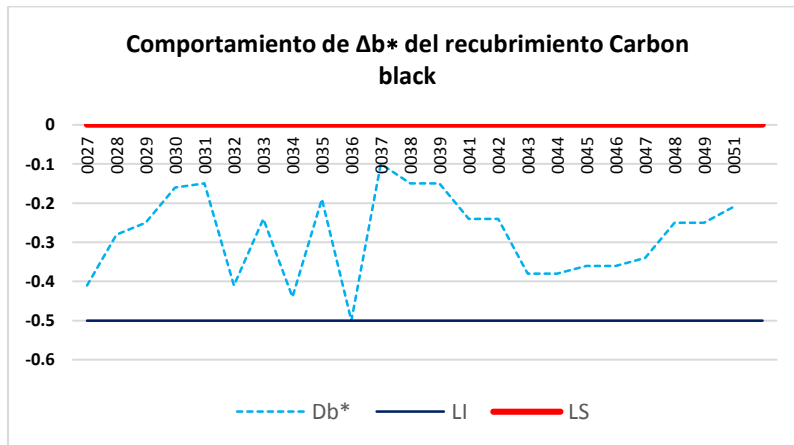


Figura 18. Comportamiento del Δb^* del recubrimiento Carbon Black durante el periodo 2013-2015.

En esta gráfica se observa un comportamiento del valor Δb^* similar al de los valores de Δa^* , por lo que no hubo necesidad de realizar un cambio en las especificaciones. Con base a las gráficas anteriores, se tomó la decisión de tomar como variable de respuesta la diferencia de luminosidad del recubrimiento.

3.4 Análisis del Sistema de Medición.

Un lote del recubrimiento Carbon Black es aceptado o rechazado según los valores de color reportados. Para esta investigación, los valores del color se obtuvieron mediante la medición de placas de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) aplicadas con el recubrimiento. El instrumento de aplicación utilizado fue una pistola de aplicación por gravedad de la marca Anest Iwata con boquilla de 1.4mm. Para realizar la medición de color se utilizó un espectrofotómetro portátil de la marca Konica Minolta modelo CM600-D.

Con el objetivo de determinar el estado del sistema de medición, se realizó una evaluación del mismo. Adicional a esta evaluación, se realizó un estudio R&R cruzado para determinar qué parte de las variaciones en la medición son debidas al sistema de medición y a los operadores.



Figura 19. Equipo utilizado para la medición de color: Software de medición, espectrofotómetro portátil Konica Minolta Cm600-D y placa de ABS con pintura aplicada.

El software Mankiewicz Color System cuenta con los valores de color de los patrones de referencia para todos los materiales desarrollados por Mankiewicz. El espectrofotómetro utilizado es calibrado constantemente, siendo el mismo software el que solicita la calibración después de 6 horas de uso.

3.4.1 Calibración del espectrofotómetro portátil Kónica Minolta.

El procedimiento de calibración del espectrofotómetro es indicado por el fabricante. Fue requerido calibrar para garantizar la mayor precisión en las mediciones. Se utilizaron con tapas de calibración para este procedimiento. Una tapa negra de calibración que permitió la calibración del equipo para ausencia de color; se colocó en el espectrofotómetro se realizan cinco mediciones. Posteriormente se utilizó una tapa de calibración blanca, la cual permitió calibrar el equipo para el conjunto de colores, de igual manera, se le colocó la tapa al equipo y se realizaron cinco mediciones. Después de estos pasos, el equipo está listo para utilizarse.



Figura 20. Proceso de calibración de espectrofotómetro CM600-D.

3.4.2 Estudio del sistema de medición.

Se inició con un análisis del sistema de medición. El objetivo de este estudio fue determinar si el sistema de medición era capaz de obtener valores uniformes. Se midió 25 veces una placa de ABS aplicada con el recubrimiento Carbon Black. El procedimiento de medición que se siguió estuvo basado en la experiencia de los analistas del laboratorio Mankiewicz como se indica en la figura 21.



Figura 21. Medición de placas con espectrofotómetro CM600-D.

Para obtener una medición de color, se realizaron tres mediciones, en la parte superior, central e inferior de una placa aplicada con el recubrimiento. Se calculó el promedio de tres mediciones realizadas en los tres puntos diferentes de la placa. Este procedimiento se repitió 25 veces para la obtención de las mediciones requeridas para el estudio.

Con apoyo del software Minitab 15 se realizó la evaluación del sistema, eligiendo la opción de “Estudio de medición 1”. La capacidad del sistema de medición para obtener datos confiables se determinó mediante los índices de capacidad C_g y C_{gk} . Los valores obtenidos para los índices fueron de 1.23 para C_g y 1.21 para C_{gk} , por lo tanto, se concluyó que el sistema de medición es capaz.

3.4.3 Estudio R&R del sistema de medición (cruzado).

Con los resultados obtenidos del estudio de medición, se verificó que el sistema es confiable. Se realizó un estudio R&R del sistema de medición para determinar en qué proporción, las fuentes de variación, contribuyen en la medición de los resultados del proceso de aplicación de pintura. Se contó con el apoyo de un técnico del Laboratorio de Mankiewicz, encargado del desarrollo de nuevos materiales de efecto metálico, y una analista del Laboratorio de Control de Calidad de Producto terminado de Sayer Lack, encargada de la evaluación de recubrimientos de efecto metálico de Mankiewicz producidos localmente.

Se realizó la medición de 10 placas de ABS aplicadas con recubrimiento Carbon Black. Cada placa fue medida por cada analista tres veces, siguiendo el procedimiento de medición especificado para el estudio 1. El objetivo de este estudio fue obtener información de las dos fuentes de variación propias de un proceso: el sistema de medición y la variación operador-operador. Para evaluar los datos obtenidos se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de las mediciones cruzadas obtenidas, es decir, de las mediciones realizadas repetidamente por los dos analistas.

FUENTE	GL	SC	MC	F	P
Pieza	9	0.101773	0.0113081	34.4699	0.000
Operador	1	0.000122	0.0001225	0.3734	0.556
Pieza*Operador	9	0.002953	0.0003281	1.7042	0.154
Repetibilidad	20	0.003850	0.0001925		
Total	39	0.108697			
Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25					

Tabla 4. Análisis de varianza para mediciones de color del recubrimiento Carbon Black.

La tabla 4 muestra un ANOVA de dos factores que indica el comportamiento de las fuentes de variabilidad. La pieza, representa la variación de las mediciones entre las diferentes placas medidas; el operador, representa la variación en las mediciones entre los analistas; Pieza*Operador, representa las variaciones en las diferentes combinaciones entre operador y parte.

Se puede observar que el valor P para Pieza ($P = 0.000$) muestra que existe evidencia significativa, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.25$, de que el valor promedio de ΔL es diferente. Mientras que los valores P para Operador y la interacción Pieza*Operador no resultan significativas al nivel de significancia $\alpha = 0.25$.

FUENTE	VARCOMP	% CONTRIBUCIÓN (DE VARCOMP)	DESV.EST.	VAR. DE ESTUDIO (6 * SD)	%VAR. DE ESTUDIO (%SV)
R&R del sistema de medición total	0.0002603	8.66	0.016133	0.09680	29.43
Repetibilidad	0.0001925	6.41	0.013874	0.08325	25.31
Reproducibilidad	0.0000678	2.26	0.008233	0.04940	15.02
OPERADOR	0.0000000	0.00	0.000000	0.00000	0.00
OPERADOR * PIEZA	0.0000678	2.26	0.008233	0.04940	
Parte a parte	0.0027450	91.34	0.052393	0.31436	95.57
Variación total	0.0030053	100.00	0.054820	0.32892	100.00
Número de categorías distintas = 4					

Tabla 5. Análisis del estudio de medición R&R cruzado. Elaboración propia.

En el análisis de la tabla 5 se observó que, R&R total del sistema de medición representa un 29.43% de la variación del estudio. De este total, el 25% es debido a las mediciones que realiza un operador varias veces para la misma placa, el resto de la variación se debe a las mediciones realizadas por ambos analistas a la misma placa. Cabe mencionar que la variación debida a las mediciones entre las diferentes placas es de 95.57%. Con esto se puede concluir que el sistema de medición es aceptable y la habilidad de los analistas es buena. El sistema de medición es capaz de distinguir cuatro placas distintas, por lo que se considera aceptable.

3.5 Fabricación del recubrimiento Carbon Black.

Se recolectó información histórica de los expedientes de los últimos 23 lotes del recubrimiento Carbon Black. Estos expedientes incluyen, como indica la figura 22, toda la información referente a la fabricación del recubrimiento, la cual es almacenada por el área de Control de Calidad de la empresa Sayer Lack, ya que esta empresa es responsable de la fabricación de este recubrimiento.

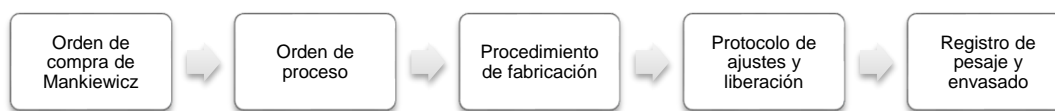


Figura 22. Componentes del expediente de cada lote fabricado para el recubrimiento Carbon Black.

Se tomó información correspondiente a los valores de color (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) con los cuales se liberó cada lote por parte del área de Control de Calidad; además de las condiciones del proceso de fabricación para determinar si existe algún efecto significativo. El proceso de fabricación para recubrimientos de efecto metálico de la familia 46153 se indica en la figura 23.

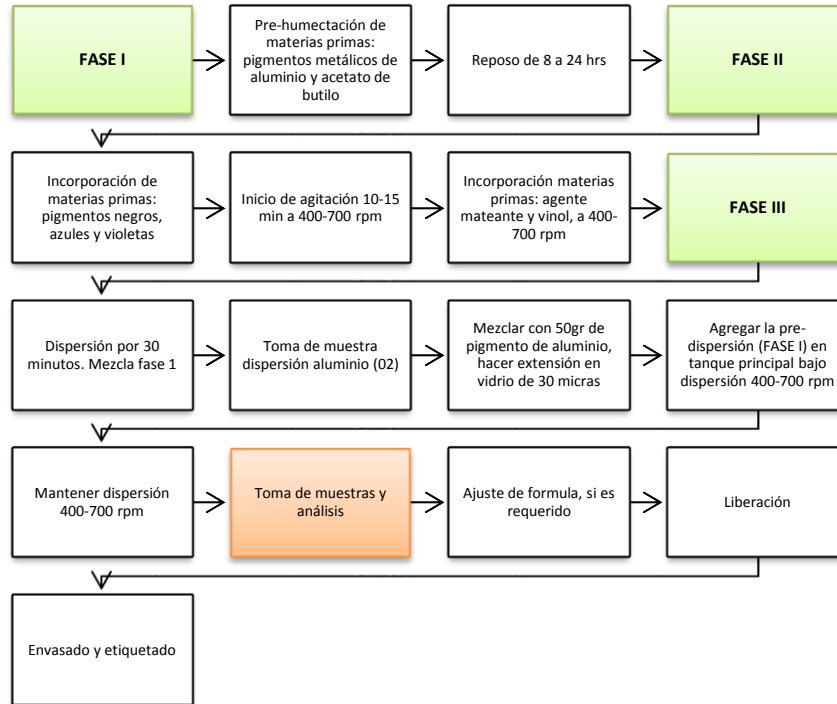


Figura 23. Proceso de fabricación de recubrimientos de efecto metálico.

Del proceso de fabricación que indica la figura 23, destacaron variables que, de acuerdo con la experiencia del personal de producción y del laboratorio Mankiewicz, se consideraron importantes para el proceso:

- Velocidad de dispersión, se especifica que la velocidad debe estar entre 400 y 700 RPM, esta es dependiente del tamaño del lote. Mezclar las materias primas a una velocidad no adecuada, puede ocasionar pérdida de propiedades del recubrimiento (adherencia, dureza) y problemas de calidad (%sólidos altos, baja viscosidad).
- Tiempo de pre-humectación, en esta etapa de humecta el pigmento de aluminio, el cual da el efecto metálico al recubrimiento, con acetato de butilo para que el pigmento no altere la densidad del recubrimiento al ser mezclado con el resto de las materias primas. El tiempo de pre-humectación varía de 8:00 a 24:00 horas, lo que llevó a considerar su influencia en el color final del recubrimiento.

Se obtuvieron las medidas de tendencia central y dispersión para las variables mencionadas para los 23 lotes.

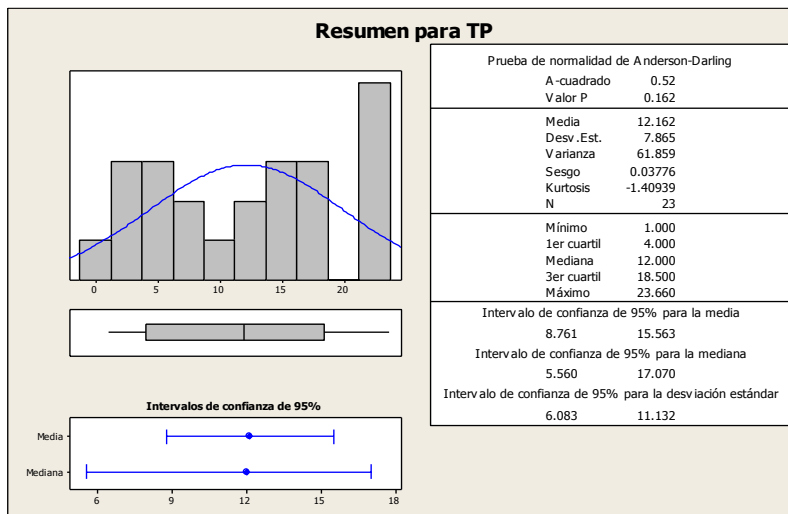
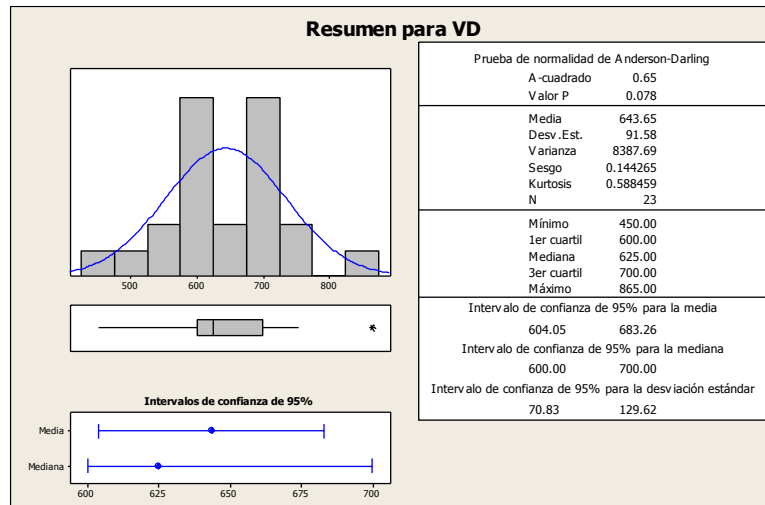


Figura 24. Resumen estadístico para la variable Tiempo de Pre-humectación del proceso de fabricación del recubrimiento Carbon Black.

En la figura 24 se muestra un histograma de los valores correspondientes al Tiempo de pre-humectación del pigmento de aluminio. Se observan las medidas de tendencia central y de dispersión. El tiempo de pre-humectación, medido en horas, tiene una media de 12.162 horas y una desviación estándar de 7.865 horas la cual es muy grande, esto puede deberse a la amplia tolerancia de esta condición (8 – 24 horas).



Figurar 25. Resumen estadístico para la variable Velocidad de Dispersión del proceso de fabricación del recubrimiento Carbon Black.

En el histograma de la figura 25 se graficaron los datos correspondientes a la velocidad de dispersión, medida por revoluciones por minuto (RMP), con la que se mezclaron las materias primas durante la fabricación del recubrimiento Carbon black. Estos datos tienen una distribución bimodal con una media de 643.65 y una desviación estándar de 91.58. De acuerdo con el valor P de la prueba de normalidad Anderson-Darling, se puede decir que los datos provienen de una población normal.

Para determinar si existe algún efecto significativo de las variables “velocidad de dispersión” y “Tiempo de pre-humectación” sobre la variable de respuesta ΔL^* , se realizó un modelo de regresión lineal bajo la siguiente hipótesis estadística: “Los factores Velocidad de dispersión y Tiempo de pre-humectación, influyen significativamente en la diferencia de luminosidad del color del recubrimiento Carbon Black.”

$$H_0: \mu_1 + \mu_2 = \mu_3 \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$H_1: \mu_1 + \mu_2 \neq \mu_3 \quad \text{Ecuación 6.}$$

Para verificar la certeza de esta hipótesis se planteó un modelo de regresión lineal para cada uno de los factores para determinar si existe algún efecto significativo en el color con respecto a los tiempos de pre-humectación y velocidad de dispersión. Se utilizó el software R como apoyo para el análisis estadístico. El modelo estadístico planteado fue el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad \text{Ecuación 7.}$$

Los coeficientes estimados para este modelo se muestran en la siguiente tabla:

β_0	β_1	β_2
-2.852324	0.003592	-0.15416

Tabla 6 Estimadores del modelo de regresión para la velocidad de dispersión y el tiempo de pre-humectación en el color.

El modelo de regresión quedó de la siguiente manera:

$$\Delta L^* = -2.852324 + 0.003592 x_1 - 0.15416 x_2 + \epsilon \quad \text{Ecuación 8.}$$

Siendo:

ΔL =Diferencia de luminosidad del recubrimiento Carbon Black

x_1 =Velocidad de dispersión

x_2 =Tiempo de pre-humectación

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ΔL					
	GL	SS	MSQ	F VALUE	P- VALUE
DISPERSIÓN	1	1.6280	1.62804	1.3827	0.2534
PREHUMECTACIÓN	1	0.2521	0.2521	0.2141	0.6486
RESIDUALES	20	23.5486	1.17743		

Tabla 7. Análisis de Varianza Carbon Black. Elaboración propia

La tabla 7 corresponde al análisis de varianza ANOVA de las variables para separar la variación total observada del modelo en sus fuentes de variación. La magnitud de la variación debida a la velocidad de dispersión es de 1.62804 la cual es mayor comparada con la variación debida al tiempo de Pre-humectación de 0.252. Esto podría indicar que la dispersión tiene una mayor influencia en la variación total. En cuanto a los valores los valores P, para las variables Dispersión (0.2534) y Pre-humectación (0.6486) su valor es mayor al nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$; por lo tanto no existe evidencia estadística de que las variables Dispersión y Pre-humectación tengan efecto significativo en la variación de la luminosidad del color ΔL del recubrimiento Carbon Black.

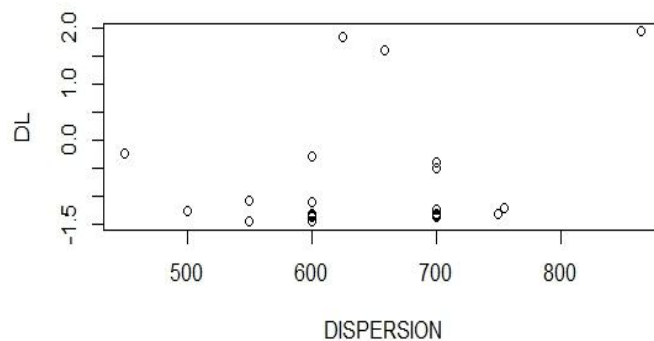
COEFICIENTES	ESTIMADORES	ERROR ESTÁNDAR	VALOR t	P-VALUE
(INTERCEPT)	-2.852324	1.704657	-1.673	0.110
DISPERSION	0.003592	0.002861	1.255	0.224
PREHUMECTACION	-0.015416	0.033316	-0.463	0.649
$R^2 = 0.07394$	$R^2_{adj} = -0.01867$		$p - value = 0.4639$	

Tabla 8. Análisis del modelo de regresión Carbo Black. Elaboración propia

En la tabla de análisis del modelo de regresión, se muestran los coeficientes calculados para las variables (β). Estos coeficientes estiman el cambio en la respuesta media por el aumento de x cuando el resto de los predictores se mantienen constantes.

Los valores P para los coeficientes de las variables del modelo son superiores al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, por lo que no resultan significativos. Los

coeficientes de correlación R^2 y R^2_{adj} miden la proporción o porcentaje de variabilidad en los datos experimentales que es explicada por el modelo considerado. Los valores correspondientes a este modelo fueron $R^2 = 7.394\%$ y $R^2_{adj} = -1.867\%$, indican que el modelo de regresión no resultó adecuado para describir el comportamiento de ΔL^* . El valor P del modelo resulta superior al nivel del significancia $\alpha = 0.05$, el modelo no resultó significativo.



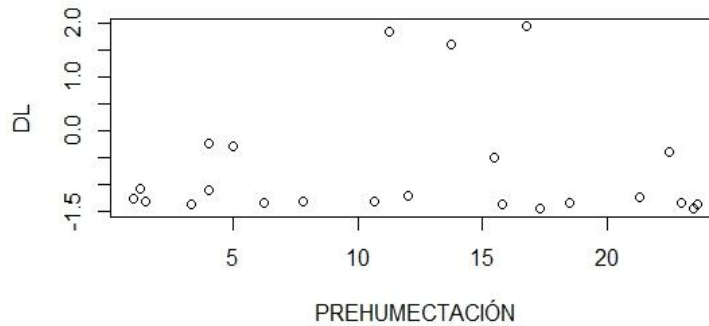


Figura 27. Gráfica de dispersión para el tiempo de pre-humectación en el modelo de regresión lineal Carbon Black.

Para el gráfico de dispersión del Tiempo de pre-humectación de la figura 27, se observa que los valores de ΔL no presentaron variación significativa por lo que, al igual que en el Análisis de Varianza, el tiempo de pre-humectación no influye significativamente en los valores de ΔL .

Con los análisis anteriores, se tuvo suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula H_0 , con un nivel de confianza del 95%. La velocidad de dispersión y el tiempo de pre-humectación, durante la fabricación del recubrimiento Carbon Black, no tuvieron efecto significativo en la luminosidad del color de la pintura.

3.6 Experimentación.

De acuerdo con el análisis de regresión realizado, se concluyó que no se tiene evidencia significativa de que las variables del proceso de fabricación fueran significativas. Por esta razón, se decidió analizar el proceso de aplicación de este para determinar el efecto de las variables de este proceso en el color de la pintura.

3.6.1 Proceso de aplicación.

La aplicación de recubrimientos en el laboratorio de Mankiewicz se lleva a cabo de acuerdo al procedimiento que se indica en la figura 28.

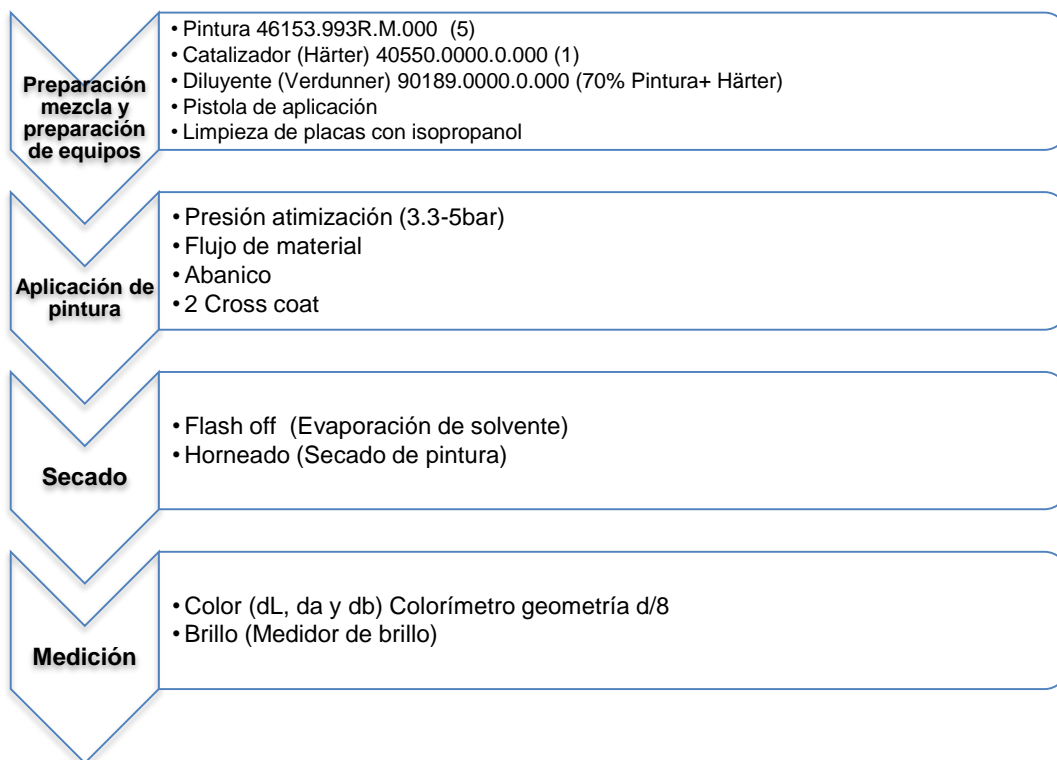


Figura 28. Diagrama de proceso de aplicación Carbon Black. Laboratorio Mankiewicz

Para la liberación de lotes de pintura, esta es aplicada sobre placas de ABS y medidas a un horno para posteriormente medir el color y el brillo de las mismas y determinar si el lote es aprobado o requiere de algún ajuste.

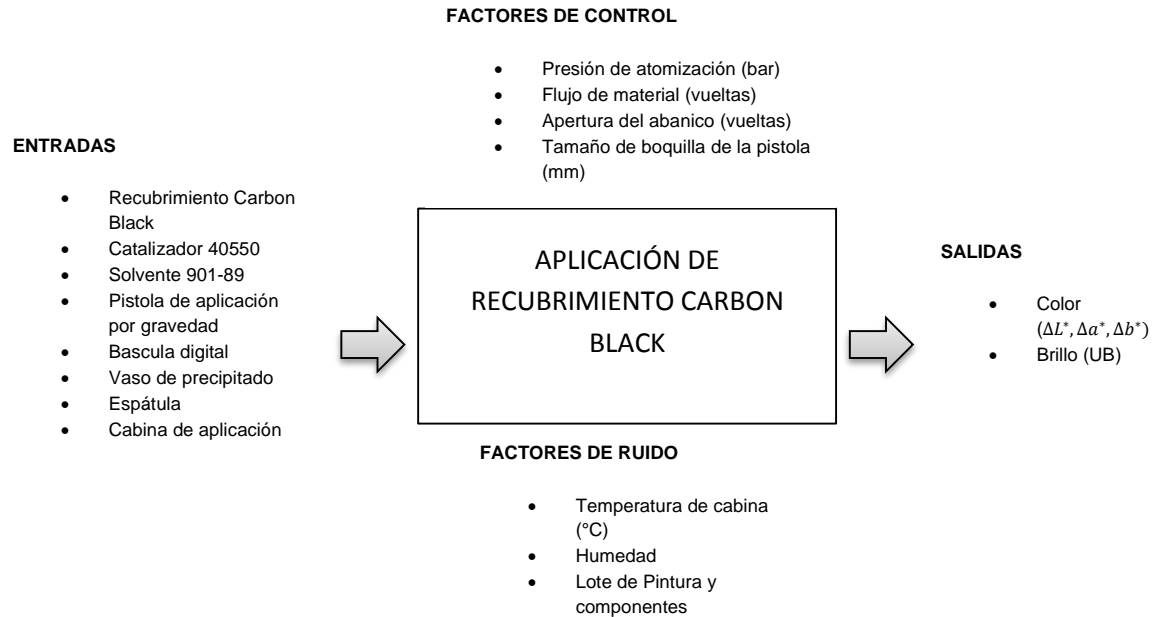


Figura 29. Diagrama de parámetros para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.

Elaboración propia.

Debido a que no se contó con información histórica de las condiciones bajo las cuales se aplicó este recubrimiento para la liberación de los lotes fabricados, se recurrió a la realización de un diseño experimental de carácter exploratorio. El objetivo de este diseño fue conocer el comportamiento inicial de los factores de control sobre las características de calidad medidas, especialmente el color, que es la característica que se estudió en este proyecto.

Se recurrió a un Diseño Factorial Fraccionado 2^{4-1} , cuatro factores de dos niveles, con una resolución de 5. Los factores a considerar en el experimento se muestran en la tabla:

FACTORES	NIVELES	
	BAJO (-1)	ALTO (1)
Presión de atomización	4	5
Flujo de material (vueltas en pistola)	3.5	4
Apertura de abanico (vueltas en pistola)	1	2
Tamaño de boquilla (mm)	1.2	1.4
REPLICAS	2	

Tabla 9. Factores considerados en el diseño experimental del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon black.

Se consideró la presión de atomización, la cual se mide mediante un manómetro y permite la salida del material de la pistola. Se seleccionó una pistola de aplicación manual, la cual funciona por gravedad teniendo un recipiente en la parte superior de esta, la mezcla catalizada es colocada en el recipiente.



Figura 30. Pistola de aplicación manual por gravedad.

Estudios realizados acerca de la aplicación de recubrimientos en estructuras de acero, sugieren considerar la presión, la potencia del compresor de aire, la distancia de aplicación de la pistola y la viscosidad de la pintura, como variables críticas para la aplicación de pintura (Bharathi and Baskaran, 2014).

La decisión de tomar en cuenta estos factores en la experimentación inicial se basó en la experiencia de los técnicos de laboratorio y su conocimiento en la aplicación de este tipo de recubrimientos, ya que como se mencionó, no existe información histórica del proceso.

El experimento se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se verificaron las condiciones de la cabina de aplicación: limpieza, funcionamiento de la extracción, suministro de aire y presión del mismo.



Figura 31. Cabina de aplicación y encendido del sistema de extracción.

La cabina de aplicación de la figura 31 es de aluminio, tiene instalado un sistema de extracción que permite que no se acumule la pintura al ser aplicada. La extracción es encendida o apagada según sea utilizada, el laboratorio de Mankiewicz cuenta con un área de aplicación con tres cabinas del mismo tamaño y un sistema de extracción instalado con una capacidad de extracción de 2,000 *cfm* (pie cúbico por minuto) para cada cabina, las cuales trabajan de forma individual.

- Se verificó el encendido y temperatura del horno de secado de la figura 32, el cual debe estar a una temperatura de 80°C.



Figura 32. Horno de secado marca Thermo Scientific.

- Preparación de la mezcla catalizada. Se preparó una mezcla de 200ml compuesta por 100ml de pintura Carbon Black, 20ml de catalizador 450 y el 70% de solvente 901-89 de acuerdo con la referencia de relación de mezcla 1:5 establecida en la hoja técnica del recubrimiento (Chromeffektlack, 2013). Para la preparación de la mezcla se utilizó una báscula digital de la marca Sartorius mostrada en la figura 33, guantes de nitrilo como protección y vasos de precipitado de plástico y espátulas. La mezcla tiene un tiempo de vida de 1 hora 20 minutos, es decir, solo puede ser aplicada durante ese periodo de tiempo.



Figura 33. Báscula digital para el pesaje de los componentes de la mezcla catalizada.

- Se contó con una pistola de aplicación por gravedad, con dos boquillas de dos tamaños diferentes 1.2 y 1.4mm. Se verificó que las perillas de control de flujo de material y apertura del abanico estuvieran cerradas para evitar errores al momento de contabilizar el número de vueltas requeridas en cada corrida experimental.
- Limpieza de las placas de ABS con isopropanol para eliminar rastros de agentes contaminantes (polvo, cremas, etc.), las placas fueron pegadas con cinta Masking en bases de madera y numeradas de acuerdo con el número de tratamiento correspondiente.



Figura 34. Preparación de placas de ABS para su aplicación.

- La aplicación del recubrimiento inició ajustando la pistola y la presión de atomización a los parámetros correspondientes al primer tratamiento. Se colocó la pistola en posición perpendicular a la horizontal, a una distancia aproximada de 10-15cm con respecto a la placa. Se aplicaron dos manos de pintura a cada placa, de forma vertical y horizontal como se muestra en la figura 35.

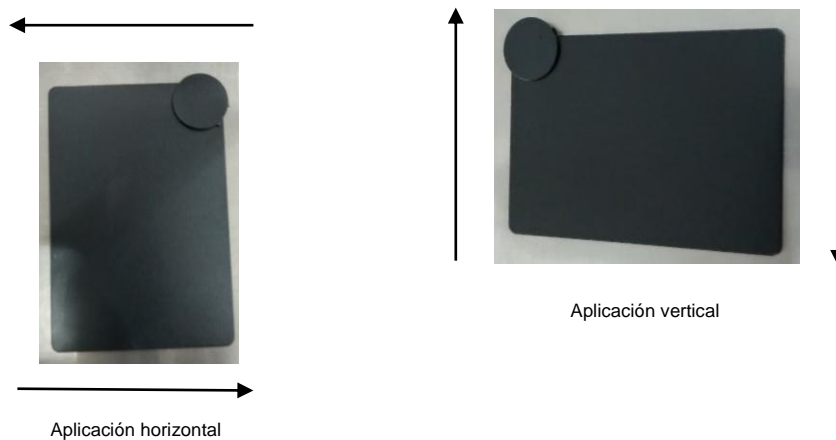


Figura 35. Técnica de aplicación de pintura sobre placas ABS.

- Posterior a cada aplicación, se le dio un tiempo de 15 minutos a la placa para la evaporación del solvente, previo a su ingreso al horno de secado, a este tiempo de evaporación se le llama Flash off.
- Después del tiempo de flash off, las placas se metieron al horno de secado por 30 minutos, el cual ya se encontraba temperizado a 80°C.
- Las placas fueron sacadas del horno, se les dio un tiempo de enfriamiento para realizar las mediciones.
- Al igual que para el análisis del sistema de medición, se realizaron tres mediciones, en la parte inferior, central y superior de la placa, para obtener el promedio de las mediciones como valores de color.

La matriz experimental fue correspondiente a un diseño 2^{4-1} con 2 réplicas, los resultados de cada corrida experimental se muestran en la siguiente tabla:

VARIABLES DE ENTRADA					RESPUESTA
CORRIDA	PRESIÓN	FLUJO	ABANICO	BOQUILLA	dL
1	4	3.5	2	1.2	-1.16
2	5	3.5	2	1.4	-0.62
3	4	4	2	1.4	0.1
4	5	4	2	1.2	-1.54
5	4	3.5	1	1.4	1.23
6	5	3.5	1	1.2	-0.72
7	4	4	1	1.2	-0.2
8	5	4	1	1.4	0
9	4	3.5	2	1.2	-0.49
10	5	3.5	2	1.4	-0.09
11	4	4	2	1.4	-0.47
12	5	4	2	1.2	-2.08
13	4	3.5	1	1.4	1.53
14	5	3.5	1	1.2	-0.49
15	4	4	1	1.2	0.17
16	5	4	1	1.4	0.09

Tabla 10. Matriz experimental del diseño factorial 24-1 para el recubrimiento Carbon Black.

En la matriz experimental se muestran 16 corridas experimentales correspondientes al diseño factorial fraccionado 2^{4-1} con las diferentes combinaciones de los factores y sus niveles altos y bajos. Se muestra también la columna de la variable de salida que corresponde al valor de la luminosidad del color ΔL^* . La especificación para esta variable es de 1.5 a 2.0, por lo que se puede apreciar que solo la corrida 13 se encuentra dentro de especificación. Se realizó un análisis de la varianza para determinar el efecto de los factores sobre ΔL^* .

Se planteó la siguiente hipótesis estadística:

“Es posible que las variables presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico y el tamaño de la boquilla de la pistola de aplicación influyan significativamente en la variación de la luminosidad del color ΔL^* en el recubrimiento Carbon Black”.

Para el análisis de varianza se plantean las correspondientes hipótesis nula y alternativa.

$$H_0: \mu_p = \mu_f = \mu_a = \mu_b = \mu_{\Delta L}$$

$$H_1: \mu_p \neq \mu_f \neq \mu_a \neq \mu_b \neq \mu_{\Delta L}$$

Con apoyo del software R, se calcularon las correspondientes Sumas de Cuadrados, las medias de cuadrados, el estadístico F y el valor P para cada factor y sus interacciones, las cuales se muestran en la tabla 11. Se observó en el análisis de varianza que los efectos principales de los factores presión, flujo, boquilla y abanico resultaron significativos. Los valores del estadístico F son mayores para los efectos principales, al igual que el valor P .

Análisis de varianza para ΔL^*					
Fuente	GL	SC	MC	F	Valor P
Presión	1	2.3716	2.3716	23.2197	0.0013236
Flujo	1	0.6084	0.6084	5.9567	0.0405246
Boquilla	1	4.2849	4.2849	41.9523	0.0001927
Abanico	1	3.9601	3.9601	39.7722	0.0002520
Presión:flujo	1	0.0006	0.0006	0.0061	0.9395700
Presión:boquilla	1	0.0012	0.0012	0.0120	0.9154910
Presión:abanico	1	0.1428	0.1428	1.4512	0.2627567
residuales	8	0.8171	0.1021		

Tabla 11. Análisis de varianza ANOVA para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black

De este análisis de varianza de la tabla 11, se puede concluir que si existe un efecto significativo de los factores presión, flujo, abanico y boquilla, en la luminosidad del color. Se planteó un modelo de regresión lineal para describir el comportamiento de la variable de respuesta con respecto a los factores y sus interacciones.

El modelo planteado quedó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta L^* = & \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{boquilla} + \beta_4 \text{abanico} + \beta_5 \text{presion} * \text{flujo} \\ & + \beta_6 \text{presion} * \text{boquilla} + \beta_7 \text{presion} * \text{abanico} + \beta_8 \text{flujo} \\ & * \text{abanico} + \beta_9 \text{flujo} * \text{boquilla} + \beta_{10} \text{abanico} * \text{boquilla} \\ & + \beta_{11} \text{presion} * \text{flujo} * \text{abanico} + \beta_{12} \text{presion} * \text{flujo} * \text{boquilla} \\ & + \beta_{13} \text{presion} * \text{boquilla} * \text{abanico} + \beta_{14} \text{flujo} * \text{abanico} \\ & * \text{boquilla} + \beta_{15} \text{presion} * \text{flujo} * \text{abanico} * \text{boquilla} + \varepsilon \end{aligned} \quad \text{Ecuación 9.}$$

El modelo fue analizado con apoyo del software R, obteniendo la siguiente tabla de análisis.

COEFICIENTES	ESTIMADORES	ERROR ESTÁNDAR	VALOR t	P-VALUE
(INTERCEPT)	2.2500	10.3337	0.218	0.8331
Presión	-1.5125	2.2823	-0.663	0.5262
Flujo	-0.5550	2.8940	-0.192	0.8527
Abanico	4.3875	7.2350	0.606	0.5610
Boquilla	-2.7275	1.4470	-1.885	0.0962
Presión*flujo	-0.0500	0.6392	-0.078	0.9396
Presión*boquilla	0.1750	1.5979	0.110	0.9155
Presión*abanico	0.3850	0.3196	1.205	0.2628
Flujo*boquilla	NA	NA	NA	NA
Flujo*abanico	NA	NA	NA	NA
Abanico*boquilla	NA	NA	NA	NA
Presión*flujo*abanico	NA	NA	NA	NA
Presión*flujo*boquilla	NA	NA	NA	NA
Presión*abanico*boquilla	NA	NA	NA	NA
Flujo*abanico*boquilla	NA	NA	NA	NA
Presión*flujo*abanico*boquilla	NA	NA	NA	NA
$R^2 = 0.933$	$R^2_{adj} = 0.8743$		$p - value = 0.0004125$	

Tabla 12. Análisis del modelo lineal para la aplicación del recubrimiento Carbon Black.

En la tabla 12 del análisis se observan todos los factores y sus interacciones. Para el análisis del modelo lineal se calcularon los estimadores para cada factor, nótese que a partir de la interacción doble “flujo*abanico” hasta la interacción de orden mayor “presión*flujo*abanico*boquilla” no se calcularon estimadores, esto se debe a que estas interacciones no son representativas en el modelo planteado. Los valores P para los factores e interacciones son superiores al nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$, lo que indicaría que el modelo no es capaz de predecir el comportamiento de ΔL^* y se aceptaría H_0 .

Con apoyo del software R, se modificó el modelo planteado, de manera que mostrara los factores e interacciones que podrían predecir el comportamiento de ΔL^* .

$$\Delta L^* = \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{boquilla} + \beta_4 \text{abanico} + \varepsilon \quad \text{Ecuación 10.}$$

En el modelo lineal planteado, se consideraron sólo los efectos principales para explicar el comportamiento de ΔL^* . Se realizó una análisis de varianzas para determinar la influencia de los factores en ΔL^* .

Análisis de varianza para ΔL^*					
Fuente	GL	SC	MC	F	Valor P
Presión	1	2.3716	2.3716	26.9730	0.0002974
Flujo	1	0.6084	0.6084	6.9195	0.0233863
Abanico	1	3.9601	3.9601	45.0395	3.326e⁻⁵
Boquilla	1	4.2849	4.2849	48.7336	2.327e⁻⁵
residuales	11	0.9672	0.0879		

Tabla 13. Análisis de varianzas para el modelo lineal simplificado.

En análisis de varianza de la tabla 13, muestras que todos los factores, al igual que en el ANOVA del primer modelo, son significativos ya que son inferiores al valor del nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Se realizó el análisis del modelo correspondiente para determinar si el modelo planteado es capaz de describir el comportamiento de ΔL^* .

COEFICIENTES	ESTIMADORES	ERROR ESTÁNDAR	VALOR t	P-VALUE
(INTERCEPT)	-1.0912	1.2515	-0.872	0.401852
Presión+	-0.7700	0.1483	-5.194	0.000297
Flujo+	-0.7800	0.2965	-2.631	0.023386
Abanico+	-0.9950	0.1483	-6.711	3.33e⁻⁵
Boquilla+	5.1750	0.7413	6.981	2.33e⁻⁵
$R^2 = 0.9207$	$R_{adj}^2 = 0.8918$		$p - value$ $= 5.365e^{-5}$	

Tabla 14. Análisis del modelo simplificado para la aplicación del recubrimiento Carbon Black.

La tabla 14 muestra el análisis del modelo de regresión de la ecuación 10, destacando que los efectos principales de los factores resultaron ser significativos. Estos efectos principales corresponden a la respuesta promedio observada en el nivel alto de cada factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo (Gutierrez Pulido and De la Vara Salazar, 2008).

Con base en los resultados obtenidos en el diseño experimental, se pudo determinar que la presión de atomización, el flujo de material, la apertura del abanico y el tamaño de la boquilla de la pistola tienen un efecto significativo en el color de la pintura. Como se mencionó anteriormente, este experimento fue de carácter exploratorio, debido a la falta de registros de las condiciones de aplicación.

La dirección comercial decidió modificar el proceso de liberación de los recubrimientos producidos localmente. Se hizo la compra de un equipo de aplicación automática de la marca Spraymation, el cual se utilizaría para la aplicación de placas de liberación de todos los materiales producidos en México.

Debido a este cambio, se decidió realizar un nuevo experimento tomando en cuenta los factores significativos de la experimentación anterior, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black haciendo uso del equipo de aplicación automática, descartando así, la variación que pudiera deberse a la habilidad de la persona encargada de realizar las aplicaciones.

3.6.2 Proceso de aplicación con equipo de aplicación automática.

3.6.2.1 Equipo de aplicación automática.

El equipo de aplicación automática Spraymation está diseñado para realiza varias aplicaciones automáticas utilizando pistolas de aplicación industriales. El área máxima de aplicación es de 61cm de ancho por 61cm de alto.



Figura 36. Equipo de aplicación automática.

El equipo cuenta con un soporte magnético en el cual se coloca una base metálica con las piezas plásticas a aplicar, lo que permite su fácil montaje. Esta base metálica, mostrada en la figura 37, tiene la capacidad de colocar un máximo de 12 placas de 10 x 10cm aproximadamente.

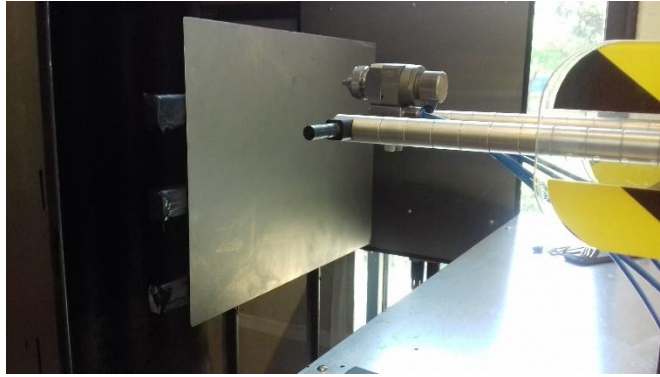


Figura 37. Base metálica para montaje de piezas plásticas para aplicación de pintura.

Para su funcionamiento, el equipo de aplicación automática requiere estar presurizado, por lo que se encuentra conectado al suministro de aire de las instalaciones del laboratorio, que se monitorea por medio de manómetros como se muestra en la figura 38.



Figura 38. Suministro de aire a equipo de aplicación automática.

La pistola de aplicación de la figura 39, se encuentra instalada en el equipo de aplicación automática. Esta trabaja de forma similar a la pistola manual, cuenta con un vaso de plástico que es colocado en la parte superior de la pistola, en este se vacía la pintura para ser aplicada.

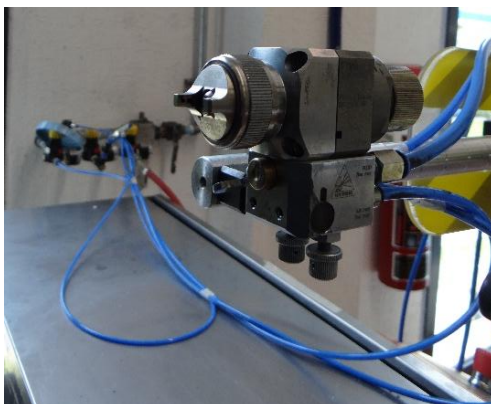


Figura 39. Pistola automática de aplicación por gravedad.

3.6.2.2 Hipótesis experimental y objetivo del experimento.

El objetivo de esta experimentación fue verificar si existe efecto significativo de las variables presión de atomización, apertura del abanico, flujo de material, cross coats y tiempo de flash off en las variaciones de la luminosidad del color del recubrimiento Carbon Black, durante el proceso de aplicación del recubrimiento mediante el equipo de aplicación automática Spraymation. Esto permitió parametrizar el proceso.

La hipótesis experimental planteada para esta experimentación fue la siguiente:

“Es posible determinar la influencia de factores tales como, presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico de la pistola de aplicación y el tiempo de flash off en la variación de la luminosidad del color del recubrimiento de efecto metálico”.

3.6.2.3 *Estabilidad del proceso de aplicación de recubrimientos de efecto metálico.*

Para verificar la estabilidad y capacidad del proceso de aplicación, haciendo uso del equipo de aplicación automática, con apoyo del personal del laboratorio Mankiewicz, se configuraron los parámetros adecuados para la correcta aplicación del recubrimiento. Por el hecho de emplear un equipo automatizado, se consideraron variables adicionales. Las condiciones establecidas en el equipo para la aplicación de recubrimientos de efecto metálico de la familia 46153, se muestran en la siguiente tabla.

Transverse speed	750 mm/s	Indica la velocidad a la que se mueve la pistola durante la aplicación.
Gun on Distance	2 cm	Indica la distancia entre la posición inicial de la pistola y el área de aplicación, en la cual se activa la pistola.
Spray Direction	Bi-direct	Indica la dirección de aplicación de la pistola, puede ser sólo hacia la izquierda, sólo hacia la derecha o bidireccional.
Gun On Before	1.5 s	El tiempo en el cual se activa la pistola, previo a iniciar la aplicación.
Gun	Gun 1 only	Especifica si se utilizará solo una pistola
Index distance	5 cm/stroke	La distancia entre cada una de las pasadas que componen una mano de pintura.
Strokes/coat	7	El numero de brazadas para una mano
Number of coats	2	El número de manos de aplicación

Tabla 15. Configuración de script para la aplicación de recubrimientos de la familia 46153.

Adicional a estas condiciones establecidas, se consideraron las variables ya mencionadas:

- Presión de atomización, la cual es controlada con un manómetro instalado en el área de suministro de aire del laboratorio.
- Apertura del abanico, controlada con una perilla de control en la pistola.
- Flujo de material, controlado de igual manera por una perilla en la pistola. Se han realizado estudios en los que el cambio en la posición de la perilla de

control del flujo del material genera un cambio en la apariencia del recubrimiento aplicado (Sung et al., 2002).

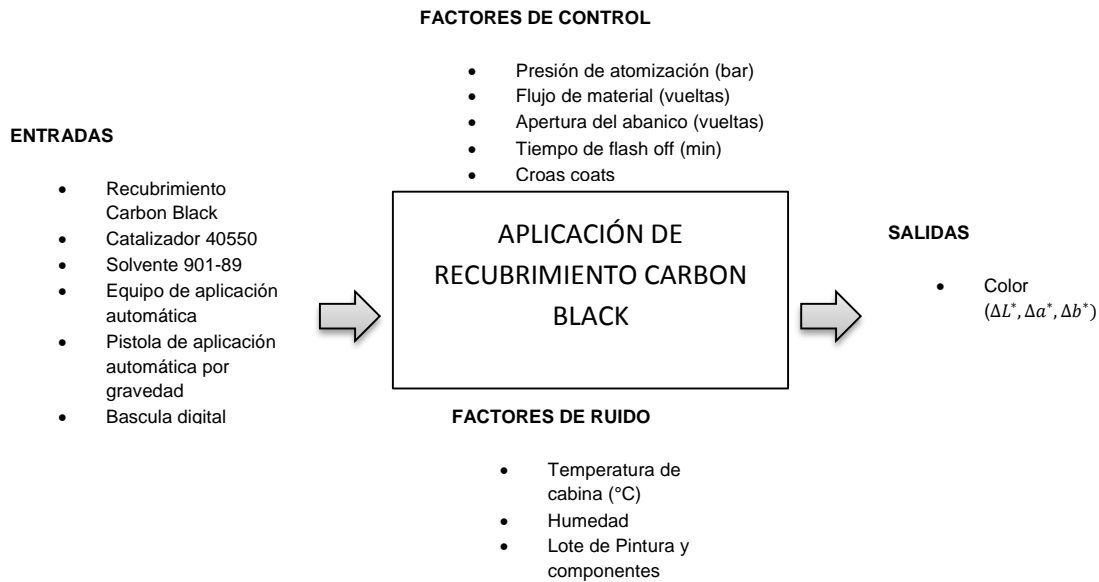


Figura 40. Diagrama de parámetros para el proceso de aplicación automática de recubrimientos 46153.

El tamaño de la boquilla fue estandarizado, como resultado de la experimentación anterior. Se decidió utilizar solo la boquilla de 1.4mm para tener buenos resultados. Adicionalmente, se tomaron en cuenta dos nuevos factores: el tiempo de Flash off y el numero de pasadas.

- Tiempo de Flash off. Tiempo para la evaporación del solvente, en estudios realizados acerca de cambios de apariencia en recubrimientos de efecto metálico, se ha considerado que una largo tiempo de evaporación de solvente influye de manera considerable en la apariencia de la superficie pintada, genera variaciones en color, brillo y espeso de película (Medina et al., 2014).
- Cross-coats o número de manos de pintura, se ha considerado su efecto en el poder de cobertura de la pintura sobre la pieza (Bharathi and Baskaran, 2014).

El diagrama de parámetros de la figura 40, muestra las entradas y salidas del proceso, que son similares al diseño exploratorio realizado. Se muestran los factores de control, que fueron las variables consideradas para el diseño experimental, los factores de ruido, temperatura de la cabina, % de humedad interior y el lote de la pintura, y de cada uno de sus componentes, solo fueron registrados más no medidos.

LAYER	
Material base	46153.993R.M.000 Carbon Black
Familia	ALEXIT Chromeffektlack 461-53
Catalizador	405-50
Relación mezcla	5:1
Solvente	901-89 90% de mezcla pintura+catalizador
PARÁMETROS DE APLICACIÓN	
Pistola de aplicación	Pistola automática tecnología de gravedad, boquilla de 1.4mm
Flujo de material	75 cc/min (3.5 vueltas)
Presión de atomización	4 bar
Cross coats	2, distancia de 25 cm, aplicación wet & wet
SECADO	
Flash-off	15 minutos
Secado	30 minutos
ESPESOR	
Espesor de película seca	15 – 25 μ m (requisitos)

Tabla 16. Condiciones de aplicación del recubrimiento Carbon Black para la determinación de la estabilidad del proceso.

Se aplicaron 13 placas de ABS bajo las condiciones indicadas en la tabla 16, para determinar la capacidad y estabilidad del proceso de aplicación con el uso del equipo de aplicación automática. La capacidad del proceso se determinó con apoyo del software Minitab 15, calculando los índices de capacidad C_p y C_{pk} .

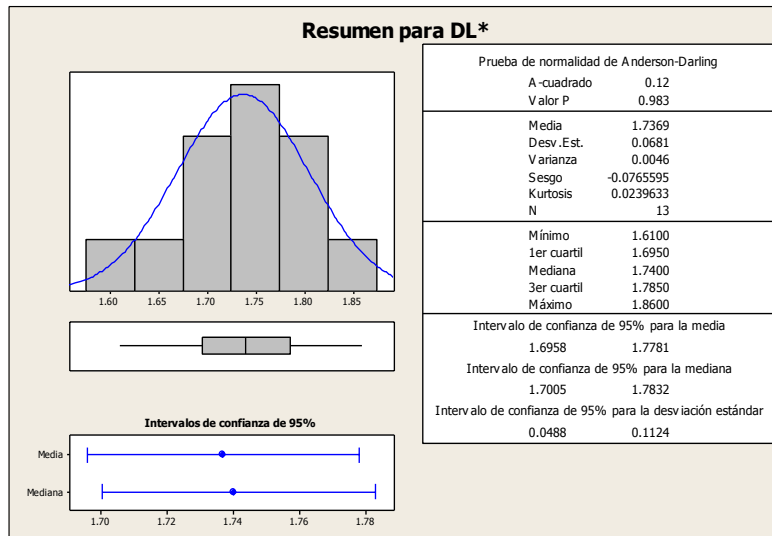


Figura 41. Medidas de tendencia central y dispersión para las mediciones de placas ABS para la determinación de capacidad del proceso de aplicación.

En la figura 41, se muestran las medidas de tendencia central y de dispersión de los datos obtenidos de las mediciones de las placas aplicadas con recubrimiento Carbon Black, para determinar la estabilidad del proceso de aplicación. Los intervalos de confianza de la media y la mediana son similares, el proceso se encuentra centrado con una media $\mu = 1.7369$, de acuerdo con las especificaciones superior (2.0) e inferior (1.75), el proceso debería centrarse cercano a un valor $\mu = 1.75$, por lo que la tendencia del proceso es adecuada.

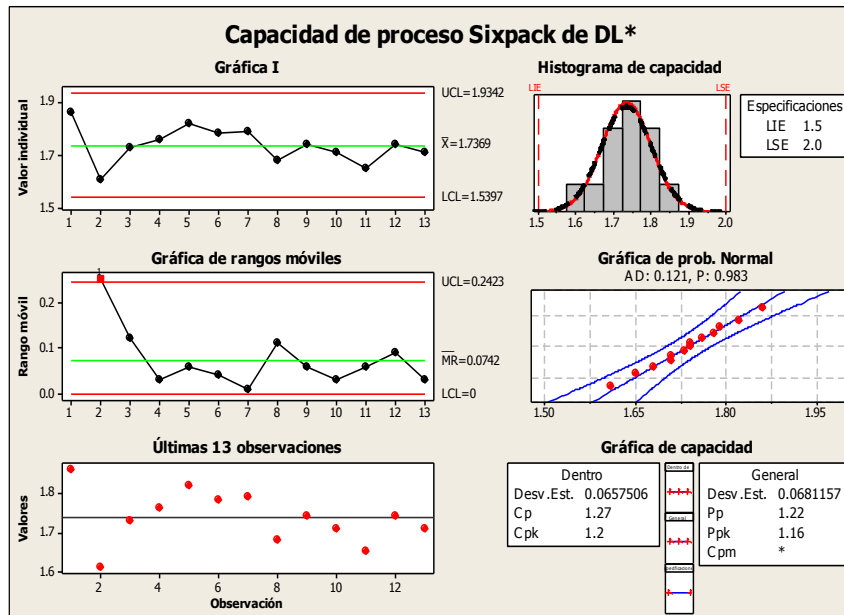


Figura 42 Gráfica de análisis de capacidad del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.

En la gráfica *I* de valores individuales y la gráfica *R* de rangos de la figura 42, los puntos están distribuidos aleatoriamente entre los límites de control, lo cual implica un proceso estable. Sin embargo, se observa que en la gráfica *R*, el rango de la muestra 2 es el único punto que sale fuera de los límites de control posteriormente los rangos se estabilizan. La gráfica de dispersión muestra una dispersión aleatoria en los datos indicando estabilidad en el proceso. En histograma de capacidad, se observa que el comportamiento de los datos tiene un comportamiento normal todas las mediciones se encuentran dentro de especificación. En la gráfica de probabilidad normal, se observa que los datos se ajustan a la línea recta y se encuentran dentro del intervalo de confianza estimado. Los índices de capacidad $C_p = 1.27$ y $C_{pk} = 1.2$ presentan valores superiores a la unidad, por lo que puede considerarse que el proceso es estable y su capacidad es buena, aunque podría mejorarse. La capacidad general del proceso $P_{pk} = 1.1$, lo que indica que el proceso es capaz

3.6.2.4 *Diseño experimental optimizado.*

Debido a que el proceso tuvo una modificación importante, es importante estandarizar los parámetros de aplicación para mantener la aplicación del recubrimiento estable y que el color no presente variaciones que generen rechazos de lotes de producción. Como se mencionó anteriormente, se tomaron en cuenta las variables utilizadas en el diseño experimental anterior ya que se demostró que tienen influencia significativa en la variación del color del recubrimiento. Para el nuevo diseño experimental se consideraron las variables indicadas en la tabla 17.

FACTOR	NIVEL ALTO	NIVEL BAJO
Flash off (min)	15	0
Presión de atomización (bar)	5.0	4.0
Cross-coat (manos)	4	2
Apretura del abanico	2	1.5
Flujo de material	4	3

Tabla 17. Factores considerados para el diseño experimental para la aplicación automática del recubrimiento Carbon Black.

El diseño experimental que se llevó a cabo es un diseño factorial completo 2^5 , cinco factores con 2 niveles y 3 réplicas de cada corrida. Llevar a cabo este diseño experimental consideraba la realización de 96 aplicaciones, lo que llevó a considerar la optimización de la matriz experimental para tener un total de 20 corridas experimentales con la máxima eficiencia posible, las cuales se muestran en la tabla 18. La eficiencia para este diseño óptimo experimental fue del 91.3%, calculada mediante el algoritmo de optimización Federov en el software R.

CORRIDA	PRESIÓN	FLUJO	ABANICO	FLASH	CC
1	-	-	-	-	+
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	-
10	+	-	-	+	+
14	+	-	+	+	-
18	+	-	-	-	-
24	+	+	+	-	-
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	-
31	-	+	+	+	-
32	+	+	+	+	+
34	+	-	-	-	-
35	-	+	-	-	-
36	+	+	-	-	+
37	-	-	+	-	-
41	-	-	-	+	-
44	+	+	-	+	-
45	-	-	+	+	+
46	+	-	+	+	-

Tabla 18. Matriz experimental del diseño óptimo para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.

El experimento se realizó siguiendo las siguientes etapas:

- Se inició con la verificación de las condiciones de la cabina de aplicación: limpieza, funcionamiento de la extracción, suministro de aire y presión del mismo. Se verificó que el equipo estuviera conectado a los suministros de aire y el funcionamiento de los manómetros.



Figura 43. Área de aplicación del laboratorio Mankiewicz: suministro de aire, cabinas de aplicación y equipo de aplicación automática.

- Se verificó el encendido y temperatura del horno de secado, el cual debe estar a una temperatura de 80°C.



Figura 44. Revisión de horno de secado.

- Preparación de la mezcla catalizada. Se preparó una mezcla de 300ml, como se muestra en la figura 45, compuesta por 150ml de pintura Carbon Black, 30ml de catalizador 450 y el 70% de solvente 901-89 de acuerdo con la referencia de relación de mezcla 1:5 establecida en la hoja técnica del recubrimiento (Chromeffektlack, 2013).



a)



b)



c)

Figura 45. Preparación de mezcla del recubrimiento Carbon black y sus componentes: a) Pintura y catalizador, b) solvente 70%, c) báscula, EPP y accesorios de trabajo.

- Se ajustó la pistola de aplicación automática, verificando la correcta colocación de las mangueras de suministro de aire.

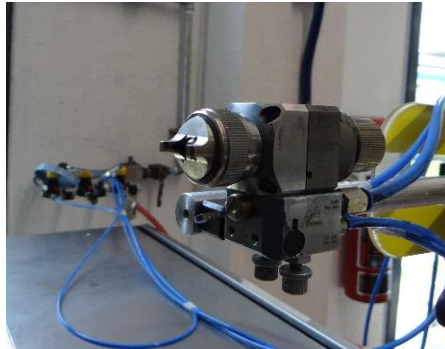


Figura 46. Pistola de aplicación automática

- Se limpiaron las placas de ABS con isopropanol para eliminar rastros de agentes contaminantes (polvo, cremas, etc.). Debido a que las corridas experimentales hacen referencia diferentes combinaciones de factores y niveles, las aplicaciones se realizaron individualmente. Cada placa fue pegada con cinta Masking sobre una lámina metálica que se colocó sobre el soporte imantado del equipo. A cada placa se le asignó el número de corrida correspondiente.
- La aplicación del recubrimiento inició ajustando la pistola y la presión de atomización a los parámetros correspondientes al primer tratamiento. Se seleccionó el script correspondiente al recubrimiento 461-53. Se vació la pintura en el vaso de gravedad colocado sobre la pistola. Se aplicaron dos cross coats de pintura a cada placa, las cuales constaron de 7 pasadas de 2cm de distancia entre cada una.

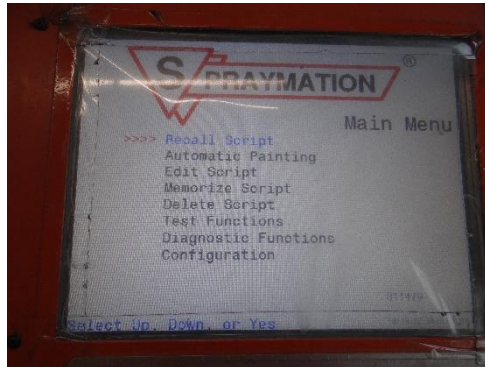


Figura 47. Página principal equipo de aplicación automática Spraymation.

- De acuerdo con el nivel de Flash off seleccionado para cada corrida, se dio un tiempo de 15 minutos las placas correspondientes, previo a su ingreso al horno de secado. Las placas a las cuales se les dio un tiempo de Flash off de 0 minutos, entraron directamente al horno después de la aplicación durante 30 minutos que se verificaron mediante un temporizador.
- Las placas fueron sacadas del horno después del tiempo establecido y se les dio un tiempo de enfriamiento para realizar las mediciones.
- Las mediciones fueron tomadas siguiendo el procedimiento establecido. Se realizaron tres mediciones, en la parte inferior, central y superior de la placa, para obtener el promedio de las mediciones como valores de color.

Las mediciones obtenidas de este experimento se muestran en la tabla19.

CORRIDA	PRESION	FLUJO	ABANICO	FLASH	CC	dL	da	db
1	-	-	-	-	+	1.09	-0.16	-0.05
6	+	-	+	-	+	1.23	-0.22	-0.11
7	-	+	+	-	+	1.29	-0.18	-0.06
8	+	+	+	-	-	1.56	-0.19	-0.06
10	+	-	-	+	+	1.42	-0.2	-0.16
14	+	-	+	+	-	1.4	-0.15	-0.05
18	+	-	-	-	-	1	-0.17	-0.04
24	+	+	+	-	-	1.53	-0.22	-0.14
27	-	+	-	+	+	1.45	-0.18	-0.07
28	+	+	-	+	-	1.35	-0.18	-0.1
31	-	+	+	+	-	1.27	-0.1	-0.15
32	+	+	+	+	+	1.98	-0.22	-0.17
34	+	-	-	-	-	0.97	-0.21	-0.13
35	-	+	-	-	-	1.18	-0.08	-0.07
36	+	+	-	-	+	1.46	-0.21	-0.1
37	-	-	+	-	-	1.24	-0.15	-0.1
41	-	-	-	+	-	1.3	-0.1	-0.05
44	+	+	-	+	-	1.49	-0.19	-0.15
45	-	-	+	+	+	1.35	-0.17	-0.07
46	+	-	+	+	-	1.44	-0.19	-0.12

Tabla 19. Resultados del diseño óptimo experimental realizado.

Los datos experimentales fueron analizados por medio de un ANOVA para determinar si alguno de los factores o sus interacciones explican la variación total observada de los datos. Para el análisis de varianza se plantean las correspondientes hipótesis nula y alternativa.

$$H_0: \mu_p = \mu_f = \mu_a = \mu_{flash} = \mu_{cc} = \mu_{\Delta L}$$

$$H_1: \mu_p \neq \mu_f \neq \mu_a \neq \mu_{flash} \neq \mu_{cc} \neq \mu_{\Delta L}$$

Con apoyo del software R, se calcularon las correspondientes varianzas de los factores, así como los valores P correspondientes, las cuales se muestran en la tabla 20. Se observó en el análisis de varianza que los efectos principales de los factores presión, flujo, flash off, cross coat y abanico resultaron significativos, además de las interacciones dobles flujo*flash off y abanico*cross coat.

Análisis de varianza para ΔL^*					
Fuente	GL	SC	MC	F	Valor P
Presión	1	0.082688	0.082688	28.7609	0.0058349
Flujo	1	0.224720	0.224720	78.1635	0.0009036
Abanico	1	0.124820	0.124820	43.4157	0.0027476
Flash	1	0.180500	0.180500	62.7826	0.0013731
Cross coat	1	0.070848	0.070848	24.6429	0.0076833
Presión:flujo	1	0.084801	0.084801	29.4959	0.0129161
Presión:abanico	1	0.052501	0.052501	18.2612	0.1811030
Presión:flash	1	0.007521	0.007521	2.6159	0.0574747
Presión:cc	1	0.020064	0.020064	6.9789	0.3191334
Flujo:abanico	1	0.003715	0.003715	1.2921	0.1792890
Flujo:flash	1	0.007601	0.007601	9.0437	0.0396567
Flujo:cc	1	0.026001	0.026001	0.6360	0.4698163
Abanico:flash	1	0.001829	0.001829	0.6360	0.4698163
Abanico:cc	1	0.001829	0.001829	11.1528	0.0288470
Flash:cc	1	0.032064	0.032064		
residuales	4	0.011500	0.002875		

Tabla 20. Análisis de varianza para los datos obtenidos de la experimentación.

En la tabla ANOVA este análisis se puede concluir que si existe un efecto significativo de los factores presión, flujo, abanico, flash off, cross coat, además de las interacciones flujo*flash y abanico*cross coat en la luminosidad del color. Se planteó un modelo de regresión lineal para describir el comportamiento de la variable de respuesta con respecto a los factores y sus interacciones.

El modelo planteado quedó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta L^* = & \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{abanico} + \beta_4 \text{flash} + \beta_5 \text{cc} + \beta_6 \text{presion} \\ & * \text{flujo} + \beta_7 \text{presion} * \text{abanico} + \beta_8 \text{presion} * \text{flash} \\ & + \beta_9 \text{presion} * \text{cc} + \beta_{10} \text{flujo} * \text{abanico} + \beta_{11} \text{flujo} * \text{flash} \\ & + \beta_{12} \text{flujo} * \text{cc} + \beta_{13} \text{abanico} * \text{flash} + \beta_{14} \text{abanico} * \text{cc} \\ & + \beta_{15} \text{flash} * \text{cc} + \beta_{16} \text{presion} * \text{flujo} * \text{abanico} + \beta_{17} \text{presion} \\ & * \text{flujo} * \text{flash} + \beta_{18} \text{presion} * \text{flujo} * \text{cc} + \beta_{19} \text{presion} \\ & * \text{abanico} * \text{flash} + \beta_{20} \text{presion} * \text{abanico} * \text{cc} + \beta_{21} \text{presion} \\ & * \text{flash} * \text{cc} + \beta_{22} \text{flujo} * \text{abanico} * \text{flash} + \beta_{23} \text{flujo} * \text{abanico} \\ & * \text{cc} + \beta_{24} \text{abanico+} : \text{flash+} : \text{cc} \\ & + \beta_{25} \text{presion+} : \text{flujo+} : \text{abanico+} : \text{flash} \\ & + \beta_{26} \text{presion+} : \text{flujo+} : \text{abanico+} : \text{cc} \\ & + \beta_{27} \text{presion+} : \text{flujo+} : \text{flash+} : \text{cc} \\ & + \beta_{28} \text{presion+} : \text{abanico+} : \text{flash+} : \text{cc} \\ & + \beta_{29} \text{flujo+} : \text{abanico+} : \text{flash+} : \text{cc} \\ & + \beta_{30} \text{presion+} : \text{flujo+} : \text{abanico+} : \text{flash+} : \text{cc} + \varepsilon \end{aligned}$$

Ecuación 11

El modelo de la ecuación 11 fue analizado con apoyo del software R, obteniendo la siguiente tabla de análisis.

COEFICIENTES	ESTIMADORES	ERROR ESTÁNDAR	VALOR t	Pr(> t)
(Intercept)	1.18375	0.05104	23.191	2.05E-05
presion+	-0.19875	0.05445	-3.65	0.02177
flujo+	-0.00375	0.05766	-0.065	0.95126
abanico+	0.05625	0.05766	0.976	0.3845
flash+	0.11625	0.05766	2.016	0.11398
cc+	-0.09375	0.05766	-1.626	0.17927
presion+:flujo+	0.285	0.05016	5.682	0.00474
presion+:abanico+	0.19	0.05016	3.788	0.0193
presion+:flash+	0.1125	0.05016	2.243	0.08833
presion+:cc+	0.1325	0.05016	2.642	0.05747
flujo+:abanico+	0.0325	0.05016	0.648	0.55232
flujo+:flash+	-0.075	0.05016	-1.495	0.20915
flujo+:cc+	0.155	0.05016	3.09	0.03656
abanico+:flash+	-0.04	0.05016	-0.798	0.46982
abanico+:cc+	-0.04	0.05016	-0.798	0.46982

flash+:cc+	0.1675	0.05016	3.34	0.02885
presion+:flujo+:a banico+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:fl ash+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:c c+	NA	NA	NA	NA
presion+:abanico +:flash+	NA	NA	NA	NA
presion+:abanico +:cc+	NA	NA	NA	NA
presion+:flash+:c c+	NA	NA	NA	NA
flujo+:abanico+:fl ash+	NA	NA	NA	NA
flujo+:abanico+:c c+	NA	NA	NA	NA
flujo+:flash+:cc+	NA	NA	NA	NA
abanico+:flash+: cc+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:a banico+:flash+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:a banico+:cc+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:fl ash+:cc+	NA	NA	NA	NA
presion+:abanico +:flash+:cc+	NA	NA	NA	NA
flujo+:abanico+:fl ash+:cc+	NA	NA	NA	NA
presion+:flujo+:a banico+:flash+:c c+	NA	NA	NA	NA

Tabla 21. Análisis del modelo lineal para el diseño optimo experimental realizado (Ecuación 11).

En la tabla 21 del análisis del modelo de regresión (Ecuación 11) se observan todos los factores y sus interacciones. Se calcularon los coeficientes para cada factor e interacción, nótese que a partir de las interacciones de tercer orden no se calcularon estimadores, esto se debe a que estas interacciones no son representativas en el modelo planteado. Los valores P para el factor presión y las interacciones presión*flujo, presión*abanico, flujo*flash y flujo*cc son menores al nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$, por lo que resultan significativos. El modelo tiene un nivel de significancia de 0.00459 y unos coeficientes $R^2 = 0.9877$ y $R^2_{adj} = 0.9415$, lo que indica que el modelo es capaz de describir casi a la perfección el comportamiento de la luminosidad del color ΔL^* .

Mediante el software R se optimizó el modelo lineal propuesto, descartando las interacciones que no fueron significativas. El modelo resultante fue el siguiente:

$$\Delta L^* = \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{abanico} + \beta_4 \text{flash} + \beta_6 \text{presion} * \text{flujo} + \varepsilon \quad \text{Ecuación 12.}$$

En el modelo lineal planteado en la ecuación 12, se consideraron sólo los efectos principales e interacciones significativas para explicar el comportamiento de ΔL^* . Se realizó una análisis de varianzas para determinar la influencia de los factores en ΔL^* .

FUENTE	DF	SUM SQ	MEAN SQ	F VALUE	PR(>F)
presión	1	0.082688	0.082688	4.9162	0.043664
flujo	1	0.22472	0.22472	13.3608	0.002598
abanico	1	0.12482	0.12482	7.4212	0.016458
flash	1	0.1805	0.1805	10.7317	0.005521
presión: flujo	1	0.084801	0.084801	5.0418	0.041411
Residuales	14	0.235472	0.016819		

Tabla 22. Análisis de varianza para el modelo lineal optimizado (Ecuación 12).

En análisis de varianza de la tabla 22, se muestran que los efectos principales de los factores y la interacción *presión * flujo* son significativos, ya que el valor *P* para cada uno es menor al valor del nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$. Se realizó el análisis del modelo correspondiente para determinar si el modelo planteado es capaz de describir el comportamiento de ΔL^* .

	ESTIMATE	STD. ERROR	t VALUE	PR(> t)
(Intercept)	1.071	0.076725	13.959	1.31E-09
presion+	-0.001667	0.083714	-0.02	0.9844
flujo+	0.0525	0.091704	0.572	0.57607
abanico+	0.158	0.057999	2.724	0.01646
flash+	0.19	0.057999	3.276	0.00552
presion+:flujo+	0.265833	0.11839	2.245	0.04141

Tabla 23. Análisis del modelo lineal optimizado (Ecuación 12).

Se analizó el modelo como se muestra en la tabla 23, destacando que los efectos principales de los factores abanico y flash off resultaron ser significativos, además de la interacción *presión*flujo*; se mantienen los factores *presión* y *flujo*, debido a que si interacción es significativa.

Con base en los resultados obtenidos en el diseño experimental, se pudo determinar que la *presión* de atomización, el *flujo* de material, la *apertura* del abanico, el *tiempo* de flash off y la combinación de la *presión* de atomización y el *flujo* de material tienen un efecto significativo en el color de la pintura.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del sistema de medición.

Se realizaron dos tipos de estudios para evaluar el sistema de medición, el estudio tipo 1, para la determinación de la confiabilidad del sistema de medición y el estudio R&R de medición cruzado, para determinar la proporción de la variación del proceso debida al sistema de medición.

4.1.1 Estudio de medición tipo 1.

En el estudio de medición tipo uno se determinó la capacidad del sistema para obtener mediciones confiables. Con apoyo del software Minitab 15 se realizó la evaluación del sistema, eligiendo la opción de “Estudio de medición 1”, obteniendo la siguiente gráfica.

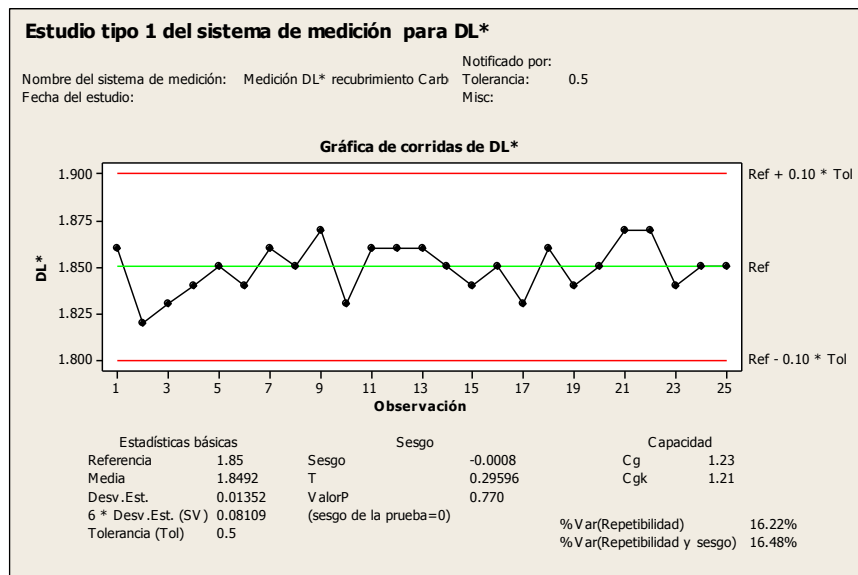


Figura 48. Estudio tipo 1 para el sistema de medición para ΔL^* .

Los datos graficados en la figura 49 corresponden a los valores de ΔL^* con respecto al número de veces que se midió la placa de ABS, aplicada con el recubrimiento. En el eje x se aprecia el número de mediciones realizadas, cuyos valores van de 1 a 25. El eje y representa los valores que tomó la luminosidad (ΔL^*) para cada una de las mediciones. La línea verde corresponde al valor de referencia tomado para la placa de 1.85, el cual se encuentra dentro de las tolerancias especificadas para el recubrimiento (1.5 – 2.0). El software toma como límites de control, representados por las líneas rojas, el valor de referencia $\pm 10\%$ multiplicado por la tolerancia especificada (0.5). La tolerancia corresponde a la diferencia entre límite superior (2.0) y el inferior (1.5) de las especificaciones establecidas para ΔL^* (Chromeffektlack, 2013).

Es posible apreciar que todas las mediciones de ΔL^* se encuentran dentro de las tolerancias. La media de las mediciones fue de 1.8492, ligeramente inferior al valor de referencia y la desviación estándar de 0.01352 es pequeña. Sin embargo, la tolerancia de 0.5 es un poco amplia, lo que podría permitir variaciones en las mediciones. Para la evaluación de sesgo en los datos, se observó un *valor P* = 0.770, lo que indica que no existe sesgo en los datos.

La capacidad del sistema de medición para obtener datos confiables se determinó mediante los índices de capacidad C_g y C_{gk} . Los valores obtenidos para los índices fueron de 1.23 para C_g , que representa el índice de capacidad potencial de sistema de medición, y 1.21 para C_{gk} , que representa el índice de capacidad real del sistema de medición. Con los datos obtenidos se concluyó que el sistema de medición es confiable.

4.1.2 Estudio R&R para el sistema de medición.

En el estudio R&R cruzado se evaluó de forma experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos de ΔL^* fue atribuible al error de medición; además, de cuantificar si dicho error es mucho o poco en comparación con la variabilidad del recubrimiento y con las tolerancias de la característica de calidad que se midió, que en este caso fue la luminosidad del color ΔL^* .

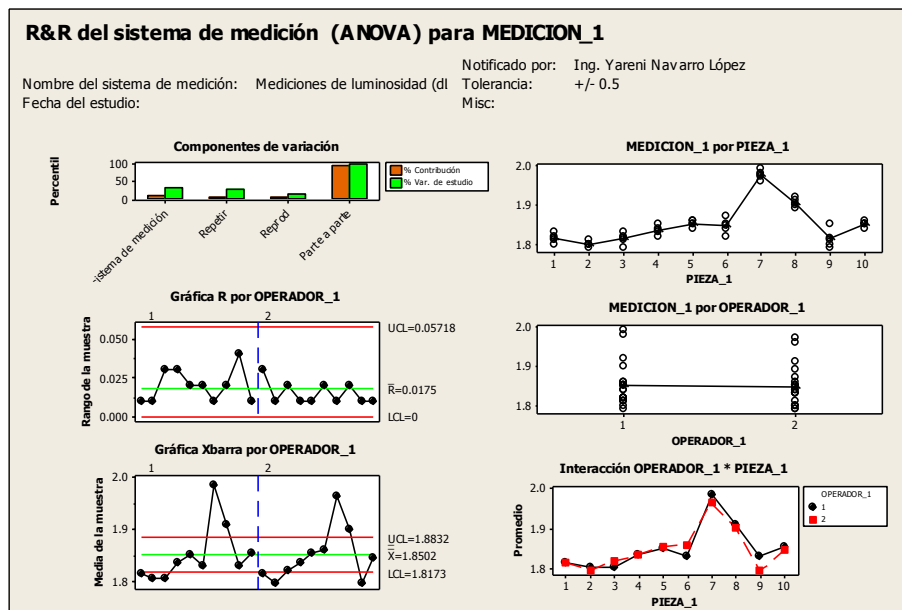


Figura 49. Estudio R&R de medición cruzado para medición de color del recubrimiento Carbon Black.

La gráfica del estudio R&R de la figura 50, muestra cada uno de los aspectos analizados para el sistema de medición. Se compone de varias gráficas en las que se aprecia la variación correspondiente a las fuentes de variación en el sistema de medición. Se tiene la gráfica de los componentes de la variación, ubicada en la esquina superior izquierda, en la cual se observa la contribución de los mismos a la variación total. Las siguientes gráficas corresponden a las medias y los rangos de las muestras medidas por los analistas del laboratorio, determinando su capacidad para obtener mediciones confiables y uniformes.

Se tienen las gráficas correspondientes a los factores “operador y pieza” de forma individual. En la gráfica “medición por pieza” se observa la variación de las todas las mediciones realizadas a cada pieza, independientemente del analista que las haya realizado. En la gráfica “medición por operador”, se graficaron las mediciones realizadas por cada analista, comparando la variación entre analistas. Finalmente se tiene la gráfica de interacción de factores “operador y pieza” donde se graficaron las mediciones promedio de cada analista para cada pieza. Cada una de las gráficas fue analizada de forma individual para concluir que el sistema de medición no es una fuente de variación significativa en el proceso de aplicación de pintura.

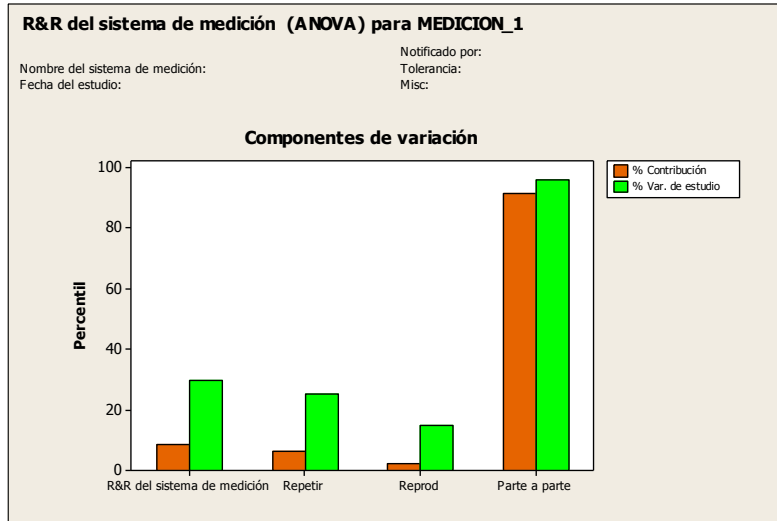


Figura 50. Gráfica de componentes de variación para el recubrimiento Carbon Black.

Como se mencionó anteriormente, la gráfica de componentes de variación de la figura 51, muestra la contribución de cada uno de los componentes del sistema de medición en la variación total observada. Se observó que la mayor parte de la variabilidad es explicada por las diferencias entre las placas medidas, representando un 95.57% de la variación del sistema. La contribución del sistema de medición a la variación total del estudio fue del 29.43%, este valor es menor a la

contribución de porcentaje parte a parte, lo que indica que gran parte de la variación se debe a diferencias entre las placas medidas.

Esta gráfica resaltó un punto de gran importancia para el objetivo principal de este proyecto, el cual es la determinación del efecto de los parámetros de proceso en las variaciones de color, puesto que se obtuvo evidencia estadística de que existe variabilidad en el proceso de aplicación de las placas del recubrimiento Carbon Black.

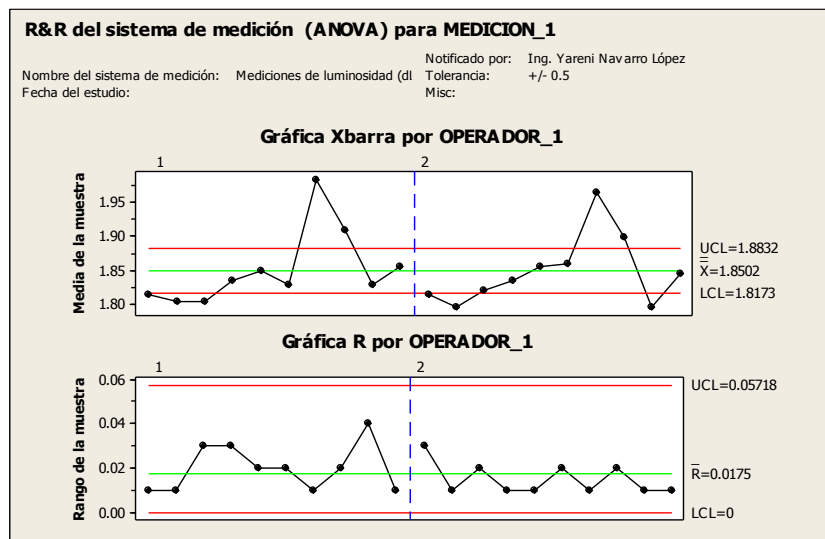


Figura 51. Gráficas \bar{X} y R para mediciones del recubrimiento Carbon Black.

La figura 52 muestra la gráfica \bar{X} por operador muestra las medias de las mediciones realizadas a cada una de las placas por cada analista. Se observa que algunas de las medias de las mediciones, se encuentran fuera de los límites de control los que indica que existe variación entre las placas medidas. La gráfica R por operador muestra los rangos R de las mediciones realizadas por los analistas. Esto indica que los analistas son capaces de realizar mediciones uniformes, ya que todos los puntos se encuentran dentro de control.

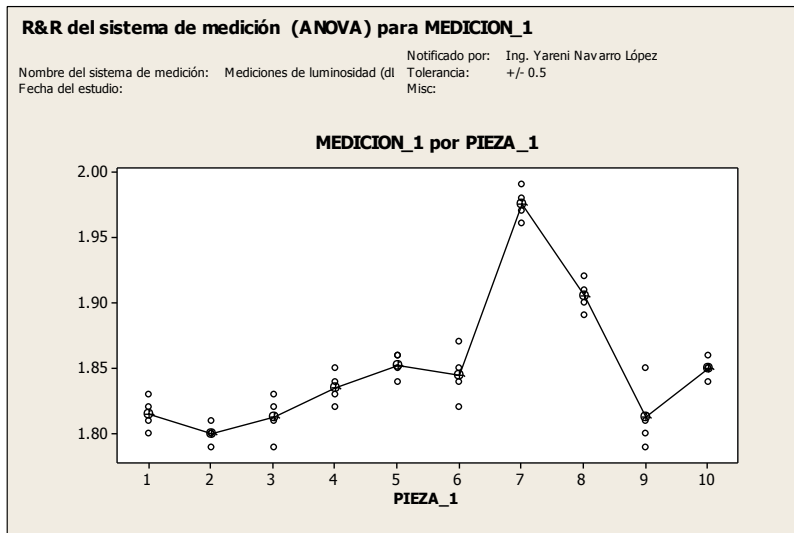


Figura 52. Gráfica para de puntos, medición por parte.

La gráfica Medición por pieza de la figura 53, muestra los valores de todas las mediciones realizadas para cada una de las placas de ABS. Se observa que los promedios de las partes no varían de forma notable. Las mediciones correspondientes a la placa 9 varían de manera significativa, lo que puede sugerir la necesidad de mejorar la habilidad de los operadores, o bien, revisar la calibración del equipo, ya que como se mencionó, este se calibra después de cada 6 horas de uso.

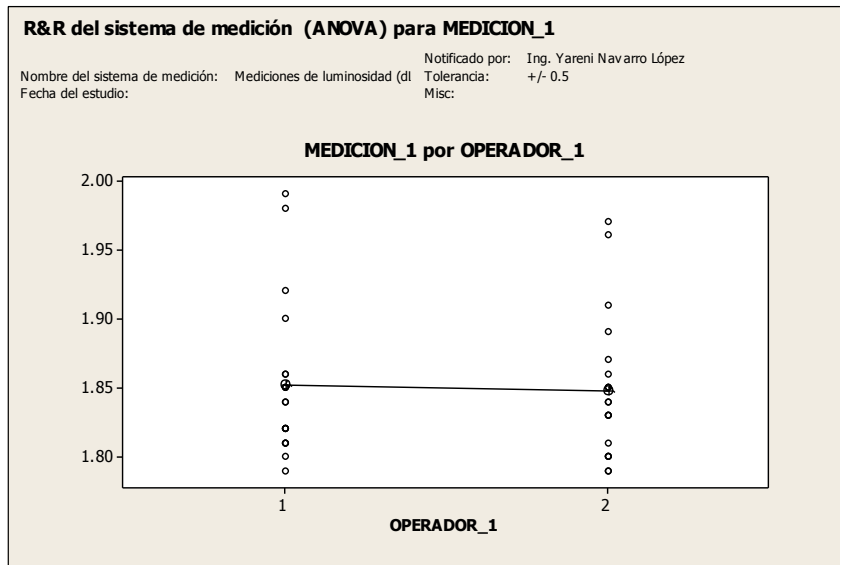


Figura 53. Gráfica medición por operador, recubrimiento Carbon Black.

La gráfica Medición por operador de la figura 54 muestra los valores de las mediciones de cada operador, sin tomar en cuenta la pieza medida. Se compara la variabilidad de las mediciones realizadas por cada analista. Los promedios de estas mediciones no varían de forma significativa, lo que indica que los analistas son capaces de realizar mediciones uniformes. Se aprecia una variación un poco más significativa en las mediciones realizadas por el analista 1, correspondiente al personal del laboratorio de Control de Calidad de Producto Terminado, encargado del análisis de las muestras de cada lote en la producción del recubrimiento Carbon Black.

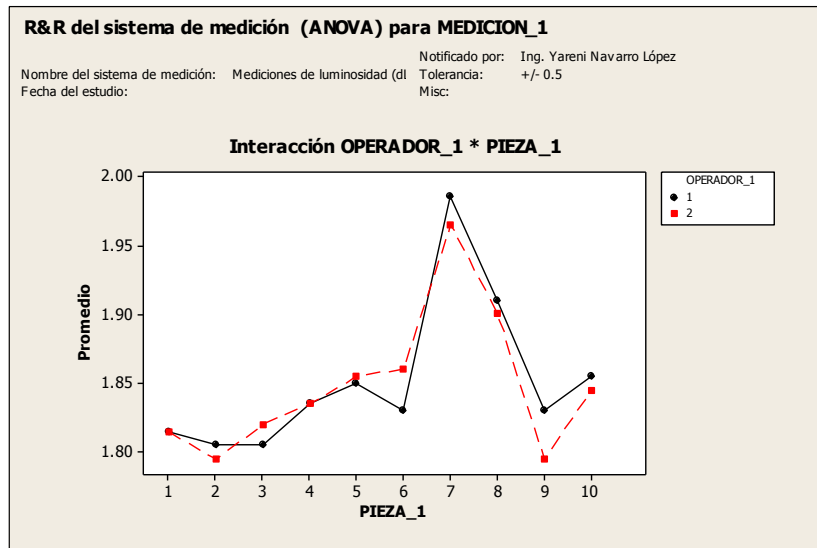


Figura 54. Grafica de interacción Operador*Pieza.

En la gráfica de interacción Operador*Parte de la figura 55, se observa la comparación de los valores promedio de las mediciones realizadas por cada analista para cada una de las piezas. Es posible distinguir claramente las mediciones entre cada placa, lo que indica diferencias entre las mismas. Las mediciones entre analistas varían significativamente en las placas 6 y 9, lo que indica que los analistas tuvieron problemas para medir estas placas de manera uniforme. Esta diferencia, de acuerdo con las conclusiones de las gráficas anteriores, puede indicar la necesidad de re calibración del espectrofotómetro. Con este estudio, se concluye que el sistema es aceptable para la medición del color de recubrimientos de efecto metálico, pero es importante considerar mantener el equipo calibrado para tener una mayor precisión en las mediciones.

4.2 Análisis experimental.

4.2.1 Diseño experimental fraccionado para el proceso de aplicación.

Para el diseño experimental exploratorio del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black, se consideró la hipótesis estadística: “Es posible que las variables presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico y el tamaño de la boquilla de la pistola de aplicación influyan significativamente en la variación de la luminosidad del color ΔL^* en el recubrimiento Carbon Black”.

Se plantearon las hipótesis de la siguiente forma:

$$H_0: \mu_p = \mu_f = \mu_a = \mu_b = \mu_{\Delta L}$$

$$H_1: \mu_p \neq \mu_f \neq \mu_a \neq \mu_b \neq \mu_{\Delta L}$$

El modelo lineal fue analizado mediante un ANOVA y el cálculo de estimadores y valores de significancia para los factores.

$$\Delta L^* = \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{boquilla} + \beta_4 \text{abanico} + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 12})$$

El modelo consideró como significativos los factores presión, flujo, boquilla y abanico.

- Significancia de los coeficientes. Se calcularon los coeficientes de los factores del modelo, demostrando que efectivamente los cuatro factores mencionados son capaces de describir el comportamiento de ΔL^* . Los valores P para los factores significativos se muestran en la siguiente tabla:

FACTORES	ESTIMADORES
Intersección β_0	-1.0912
<i>Presión</i> + (β_1)	-0.7700
<i>Flujo</i> + (β_2)	-0.7800
<i>Abanico</i> + (β_3)	-0.9950
<i>Boquilla</i> + (β_4)	5.1750

Tabla 24. Coeficientes de factores para el modelo lineal.

El coeficiente β_0 representa la intersección, indica el valor promedio que tomará ΔL^* si los factores tomaran un valor de 0.

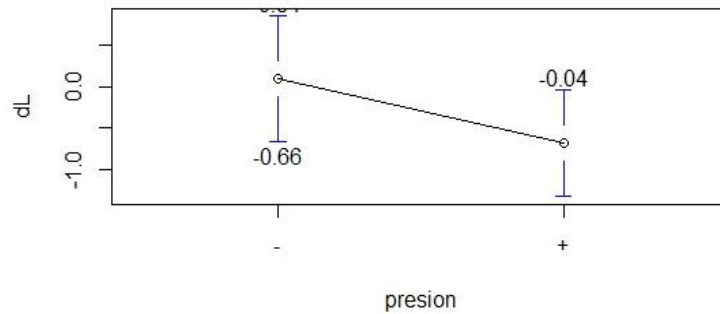


Figura 55. Gráfico de intervalos de confianza para Presión de atomización.

El coeficiente β_1 (-0.77) para la variable *presión* + , indica que por cada unidad del nivel bajo de la presión de atomización, el valor que toma ΔL^* con el nivel alto es 0.77 veces menor. Esto se puede observar en el gráfico de intervalos de confianza de la figura 56, en el cual se presentan, en el eje x , los niveles que tomó la presión de atomización en el diseño experimental, que corresponden a 4 *bar* para el nivel bajo y 5 *bar* para el nivel alto. El eje y corresponde a los valores tomados por la variable de respuesta ΔL^* , lo que nos indica que es conveniente mantener la presión de atomización en 4 *bar* durante la aplicación del recubrimiento, si se requiere que el valor de ΔL^* se mayor.

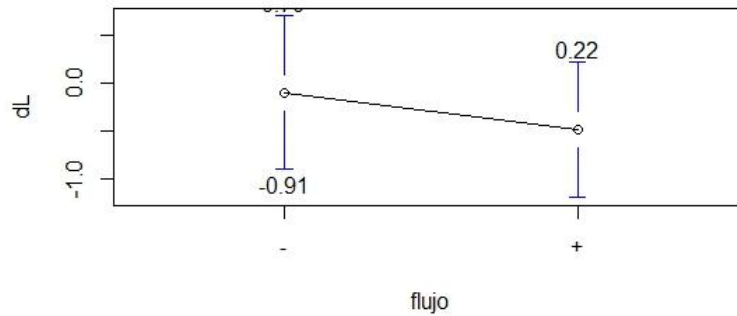


Figura 56. Gráfico de intervalos de confianza para el Flujo de material.

En la grafía de intervalos de la figura 57, se observa que el coeficiente β_2 (-0.78) para la variable *flujo* + , indica que por cada unidad del nivel bajo del flujo de material, el valor que tomará ΔL^* con el nivel alto, es 0.78 veces menor. Esto nos permite concluir que, si pretendemos mantener ΔL^* en niveles altos, es conveniente ajustar la perilla de control del flujo de material con 3.5 vueltas.

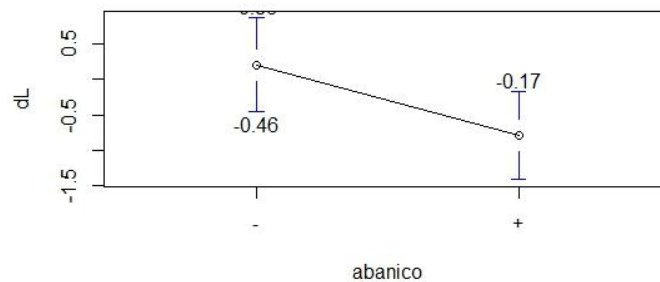


Figura 57. Gráfico de intervalos para la apertura del abanico.

El coeficiente estimado β_3 para *abanico* + corresponde al valor de -0.9950 . Lo que supone que por cada unidad de esta variable en su nivel bajo, el valor de la luminosidad del color ΔL^* será 0.9950 veces menor utilizando el nivel alto de la apertura del abanico. Es decir al aplicar el recubrimiento con una apertura de abanico de 2 vueltas, el valor de ΔL^* será 0.9950 veces menor, que si se aplica con

la apertura de abanico en 1.5 vueltas. Esto se puede apreciar en el gráfico de intervalos de confianza (figura 58), donde se grafican el rango de valores que puede tomar ΔL^* en cada uno de los niveles de apertura del abanico.

Para el tamaño de la boquilla sucede el caso opuesto a las tres variables anteriores, el coeficiente β_4 calculado para *boquilla +* tiene un valor de 5.1750. Lo que indica que por cada unidad que tome el valor bajo del tamaño de la boquilla, el valor que tomará ΔL^* con el nivel alto, será 5.1750 veces mayor. En este caso es conveniente utilizar la boquilla de 1.4mm para mantener ΔL^* con valores altos. Este supuesto se aprecia en el gráfico de intervalos de confianza para el tamaño de boquilla mostrado en la figura 59.

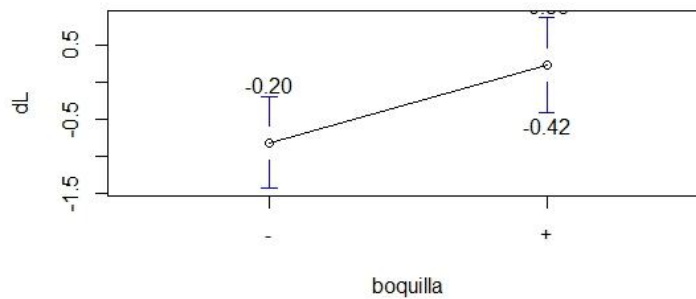


Figura 58. Gráfico de intervalos para el tamaño de boquilla.

- Significancia del modelo completo. La significancia del modelo se determina con base al *valor P* correspondiente al modelo en general. El valor correspondiente a la significancia del modelo es de $5.365e^{-5}$ que resulta ser inferior al nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$. Por lo que se puede considerar como significativo el modelo planteado para la evaluación del efecto de los factores en la luminosidad del color del recubrimiento Carbon Black.
- Correlación. R_2 y R_{adj}^2 permiten conocer qué tanto se ajustan nuestros datos al modelo lineal planteado. $R_2 = 0.933$ nos indica que el 93.3% de la variación de ΔL^* es explicada por la recta de mínimos cuadrados generada por el modelo planteado. El valor de $R_{adj}^2 = 0.8743$ indica el número de predictores en el modelo y es muy cercano a R_2 , por lo que se puede concluir que el modelo planteado es adecuado y puede predecir con gran precisión el comportamiento de ΔL^* .
- Residuales. Los residuales corresponden a la diferencia entre los datos observados y la recta generada por el modelo. Es de importancia verificar la normalidad de los residuales generados en este modelo. Se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilks, planteando las hipótesis correspondientes:

H_0 : *residuales siguen una distribución normal*

H_1 : *residuales no siguen una distribución normal*

Se obtuvo un valor de significancia de 0.3865, lo que indica que se debe aceptar H_0 , por lo tanto, se comprueba la normalidad de los residuales.

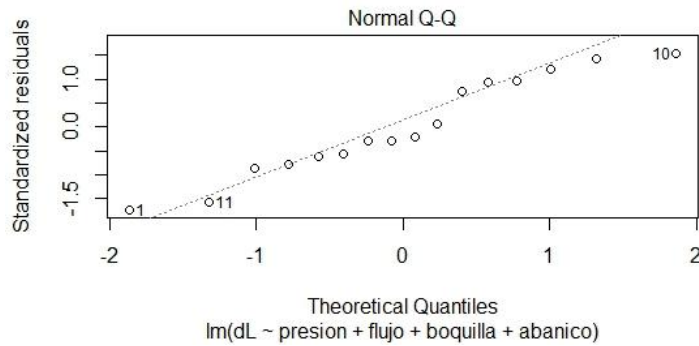


Figura 59. Gráfica de normalidad para residuales.

En el gráfico de normalidad de la figura 60, se muestra que los datos siguen un patrón aproximadamente normal, lo que confirma el resultado de la prueba de normalidad.

El modelo lineal que se obtuvo como resultados del diseño experimental fraccionado, resultó adecuado para describir el comportamiento de la luminosidad del color.

Como se mencionó anteriormente, el diseño experimental fue llevado a cabo como una técnica de muestreo, con el objetivo de conocer como influían las variables que se consideraron de importancia para el proceso de aplicación de pintura de efecto metálico. Se concluyó que los efectos principales de las variables presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico y tamaño de boquilla tienen un efecto significativo en la variación del color de la pintura.

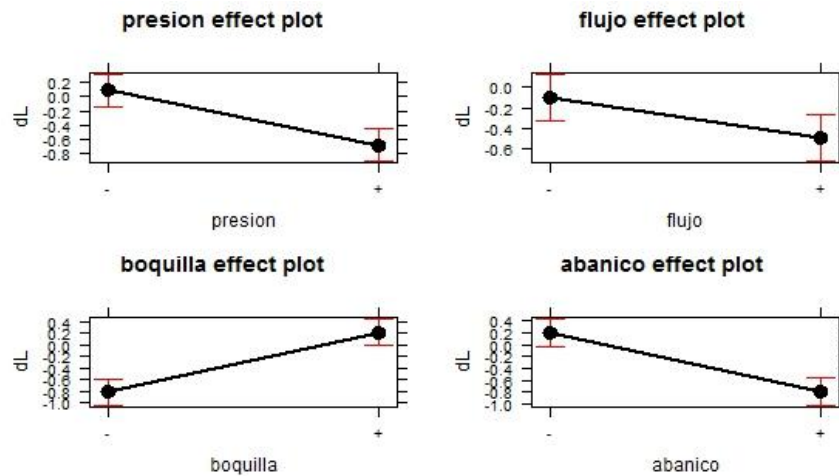


Figura 60. Gráfico de efectos para el proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black.

En la gráfica de efectos de la figura 61 se muestra el efecto que tienen las variables consideradas en el diseño experimental, sobre la variable de respuesta ΔL^* . Se concluye que para mantener la luminosidad del color del recubrimiento en con valores altos, es conveniente aplicar la pintura manteniendo la presión de atomización en 4 bar, la perilla de control de flujo de material con 3.5 vueltas, la perilla de control de la apertura del abanico con 1.5 vueltas y utilizar la boquilla de 1.4mm.

4.2.2 Diseño óptimo experimental para el proceso de aplicación.

Para el diseño experimental optimizado del proceso de aplicación del recubrimiento Carbon Black, se consideró la hipótesis estadística: “Es posible determinar la influencia de factores tales como, presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico de la pistola de aplicación y el tiempo de flash off en la variación de la luminosidad del color del recubrimiento de efecto metálico”.

Se plantearon las hipótesis de la siguiente forma:

$$H_0: \mu_p = \mu_f = \mu_a = \mu_{flash} = \mu_{cc} = \mu_{\Delta L}$$

$$H_1: \mu_p \neq \mu_f \neq \mu_a \neq \mu_{flash} \neq \mu_{cc} \neq \mu_{\Delta L}$$

El modelo lineal fue analizado mediante un ANOVA y el cálculo de estimadores y valores de significancia para los factores, siendo este el más adecuado para describir el comportamiento de la luminosidad del color.

$$\Delta L^* = \beta_0 + \beta_1 \text{presion} + \beta_2 \text{flujo} + \beta_3 \text{abanico} + \beta_4 \text{flash} + \beta_5 \text{presion} * \text{flujo} + \varepsilon \quad (\text{Ecuación. 12})$$

El modelo consideró como significativos los factores el flujo,

- Significancia de los coeficientes. Se calcularon los coeficientes de los factores del modelo, demostrando que efectivamente los cuatro factores mencionados y la interacción son capaces de describir el comportamiento de ΔL^* . Los coeficientes para los factores significativos se muestran en la tabla 25.

FACTORES	COEFICIENTES
Intersección β_0	1.071
Presión + (β_1)	-0.001667
Flujo + (β_2)	0.0525
Abanico + (β_3)	0.158
Flash + (β_4)	0.19
presión * flujo + (β_5)	0.265833

Tabla 25. Tablas de coeficientes de factores significativos para el modelo lineal final (Ecuación 12).

El coeficiente β_0 representa la intersección, indica el valor promedio que tomará ΔL^* si los factores tomaran un valor de 0.

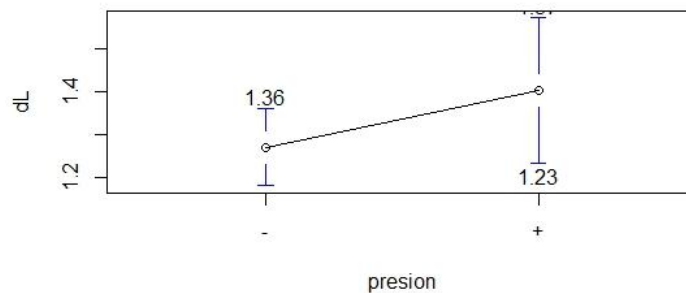


Figura 61. Gráfico de intervalos para presión de atomización para el modelo lineal optimizado.

El coeficiente β_1 (-0.001667) para la variable *presión +*, indica que por cada unidad del nivel bajo de la presión de atomización, el valor que toma ΔL^* con el nivel alto es 0.001667 veces menor. Esto se puede observar en el gráfico de intervalos de confianza (figura 59), en el cual se presentan, en el eje x , los niveles que tomó la presión de atomización en el diseño optimo experimental, que corresponden a 4 *bar* para el nivel bajo y 5 *bar* para el nivel alto. El eje y corresponde a los valores tomados por la variable de respuesta ΔL^* , lo que nos indica que, para el proceso de aplicación con el equipo de aplicación automática, es conveniente mantener la presión de atomización en 5 *bar* durante la aplicación del recubrimiento, si se requiere que el valor de ΔL^* se mayor.

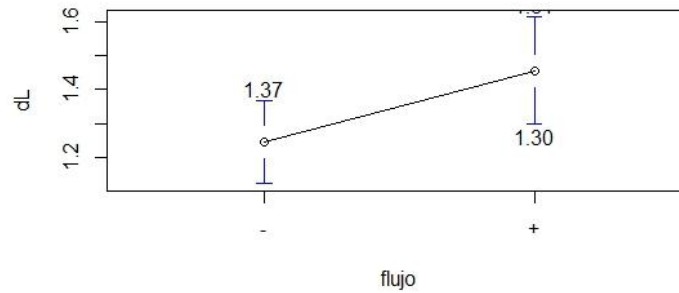


Figura 62. Gráfico de intervalos del flujo de material para el modelo lineal optimizado.

El coeficiente β_2 (0.0525) para la variable *flujo* + , indica que por cada unidad del nivel bajo del flujo de material, el valor que tomará ΔL^* con el nivel alto, es 0.0525 veces mayor. Esto nos permite concluir que, si pretendemos mantener ΔL^* en niveles altos, es conveniente ajustar la perilla de control del flujo de material con 4 vueltas.

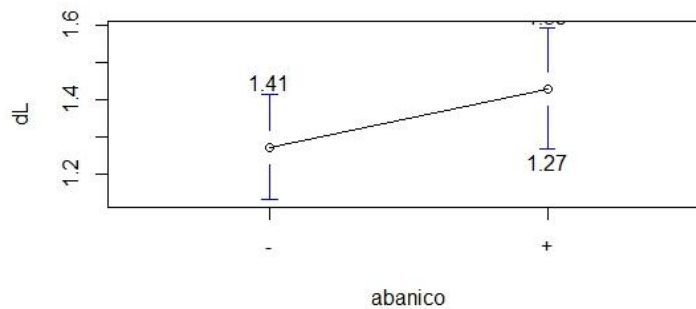


Figura 63 Gráfico de intervalos para la apertura del abanico para el modelo lineal optimizado.

El coeficiente estimado β_3 para *abanico* + corresponde al valor de 0.158. Lo que supone que por cada unidad de esta variable en su nivel bajo, el valor de la luminosidad del color ΔL^* será 0.158 veces mayor utilizando el nivel alto de la apertura del abanico. Es decir al aplicar el recubrimiento con una apertura de abanico de 2 vueltas, el valor de ΔL^* será 0.158 veces menor, que si se aplica con la apertura de abanico en 1.5 vueltas. Esto se puede apreciar en el gráfico de intervalos de confianza (figura 61), donde se grafican el rango de valores que puede tomar ΔL^* en cada uno de los niveles de apertura del abanico.

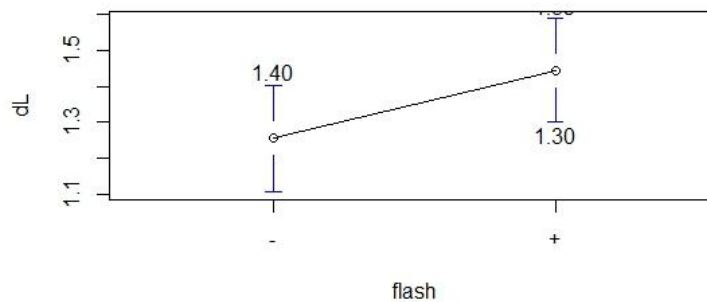


Figura 64. Gráfico de intervalos para el tiempo de flash off para el modelo lineal optimizado.

Para el tiempo de flash off, el coeficiente β_4 calculado para *flash* + tiene un valor de 0.19. En este caso es conveniente dar un tiempo de flash off de 15 minutos, como ya se venía realizando en el proceso manual, para mantener ΔL^* con valores altos. Este supuesto se aprecia en el gráfico de intervalos de confianza para el tiempo de flash off (figura 65).

- Significancia del modelo completo. La significancia del modelo se determina con base al *valor P* correspondiente al modelo en general. El valor correspondiente a la significancia del modelo es de 0.0007991 que resulta ser inferior al nivel de significancia seleccionado $\alpha = 0.05$. Por lo que se puede considerar como significativo el modelo planteado para la evaluación del efecto de las variables de aplicación, bajo la tecnología de aplicación automática, en la luminosidad del color del recubrimiento Carbon Black.
- Correlación. R_2 y R_{adj}^2 permiten conocer qué tanto se ajustan nuestros datos al modelo lineal planteado. $R_2 = 0.7476$ nos indica que el 74.76% de la variación de ΔL^* es explicada por la recta de mínimos cuadrados generada por el modelo planteado. El valor de $R_{adj}^2 = 0.6575$ indica el número de predictores en el modelo y es muy cercano a R_2 , por lo que se puede concluir que el modelo planteado es adecuado ΔL^* .
- Residuales. Es de importancia verificar la normalidad de los residuales generados en este modelo. Se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilks, planteando las hipótesis correspondientes:

H_0 : residuales siguen una distribución normal

Ecuación 13.

H_1 : residuales no siguen una distribución normal

Se obtuvo un valor de significancia de 0.6131, lo que indica que se debe aceptar H_0 , por lo tanto, se comprueba la normalidad de los residuales.

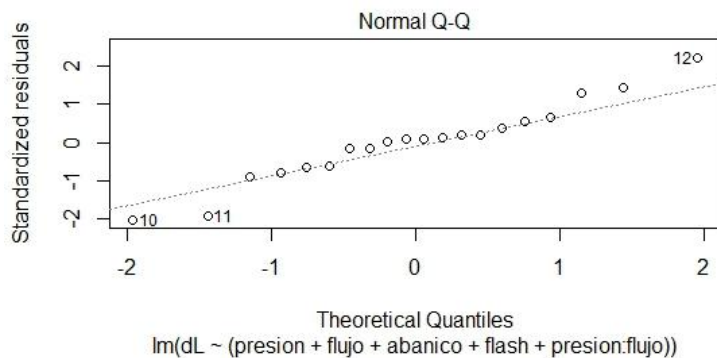


Figura 65. Gráfico de normalidad para los residuales generados del modelo lineal optimizado.

En el gráfico de normalidad de la figura 66, se muestra que los datos siguen un patrón aproximadamente normal, lo que confirma el resultado de la prueba de normalidad.

El modelo lineal que se obtuvo como resultados del diseño óptimo experimental, resultó adecuado para describir el comportamiento de la luminosidad del color. Como se mencionó anteriormente, el diseño óptimo experimental fue llevado a cabo con el objetivo de conocer el efecto de las variables consideradas en proceso de aplicación de pintura de efecto metálico bajo tecnología de aplicación automática. Se concluyó que los efectos principales de las variables presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico y tiempo de flash off, además de la interacción *presion * flujo* tienen un efecto significativo en la variación del color de la pintura.

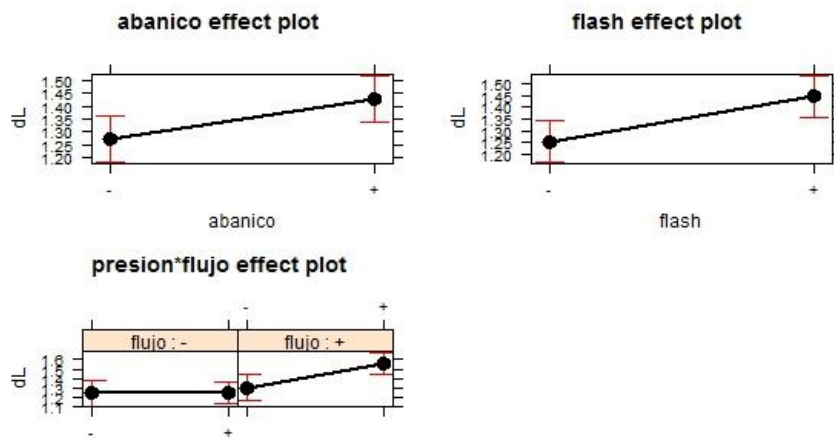


Figura 66. Grafica de efectos para los factores significativos del modelo lineal optimizado.

En la gráfica de efectos se muestra el efecto que tienen las variables consideradas en el diseño experimental, sobre la variable de respuesta ΔL^* . Se concluye que para mantener la luminosidad del color del recubrimiento con valores altos, es conveniente aplicar la pintura manteniendo la presión de atomización en 5 bar, la perilla de control de flujo de material podría tenerse con 3.5 o 4 vueltas ya que no influye significativamente en la variación del color, la perilla de control de la apertura del abanico con 2 vueltas y dar un tiempo de flash off de 15 minutos. De este modo se tendrían valores de ΔL^* dentro de especificación (1.5 – 2).

PLACA	DL*
1	1.83
2	1.71
3	1.73
4	1.76
5	1.82
6	1.78
7	1.79
8	1.78
9	1.74
10	1.71

Tabla 26. Corrida de confirmación de niveles óptimos del diseño experimental optimizado.

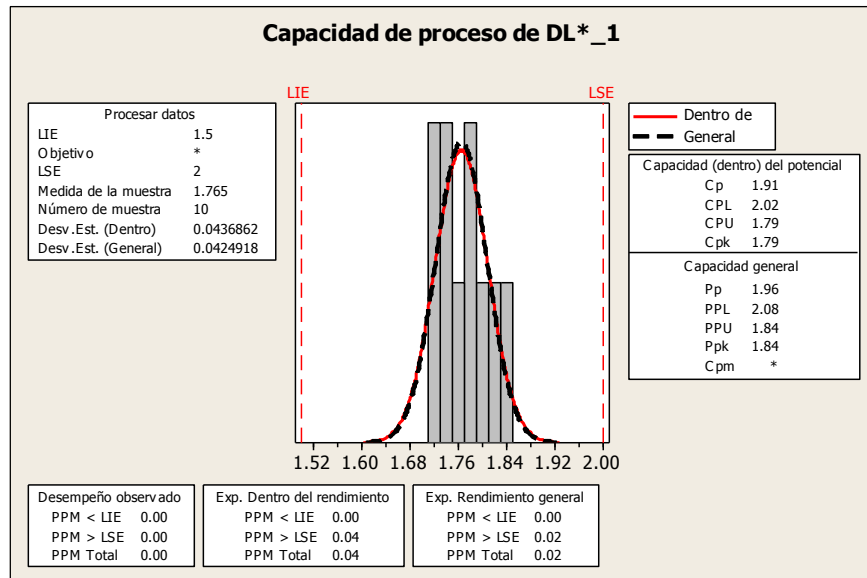


Figura 67. Capacidad de proceso empleando niveles óptimos del diseño experimental optimizado.

En la figura 67, se observa que la capacidad del proceso mejoró considerablemente, teniendo un índice de capacidad $C_{pk} = 1.79$ concluyendo que el proceso es capaz y estable. Sin embargo se observa que el proceso presenta un mínimo sesgo hacia la izquierda, pero la desviación estándar general es muy pequeña $\sigma = 0.0436862$.

4.2.3 Diseño experimental con punto central

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ΔL					
FACTORES	GL	SS	MSQ	F VALUE	P- VALUE
Presión	2	0.089209	0.044605	12.7984	0.001345
Flujo	1	0.22472	0.22472	64.4789	0.000006305
Abanico	1	0.12482	0.12482	35.8146	0.00009127
Flash off	1	0.1805	0.1805	51.7908	0.0000176
Cross coat	1	0.070848	0.070848	20.3285	0.0008884
Presión*flujo	1	0.084801	0.084801	24.3319	0.0004477
Presión*abanico	1	0.052501	0.052501	15.0641	0.0025579
Presión*Cross coat	1	0.020064	0.020064	5.757	0.035271
Flujo*Cross coat	1	0.026001	0.026001	7.4603	0.0195307
Flash off*Cross coat	1	0.028521	0.028521	8.1835	0.0154978
Residuales	11	0.038337	0.003485		

Tabla 27. Análisis de varianza para presión, abanico, flujo, flash off y cross coat con puntos centrales.

COEFICIENTES	ESTIMADORES	ERROR ESTÁNDAR	VALOR t	Pr(> t)
(Intercept)	1.17815	0.04711	25.007	4.81E-11
presión+	-0.15494	0.05272	-2.939	0.013479
flujo+	-0.02214	0.04989	-0.444	0.665792
abanico+	0.0325	0.04174	0.779	0.452668
flash+	0.12833	0.03408	3.765	0.003126
cc+	-0.10423	0.05671	-1.838	0.093192
presion+:flujo+	0.29071	0.05466	5.319	0.000245
presion+:abanico+	0.20917	0.05389	3.881	0.002558
presion+:cc+	0.1325	0.05522	2.399	0.035271
flujo+:cc+	0.14929	0.05466	2.731	0.019531
flash+:cc+	0.15417	0.05389	2.861	0.015498

Tabla 28. Análisis del modelo de regresión para el diseño experimental con puntos centrales.

$$y = 1.1785 - 0.15394x_1 - 0.02214x_2 + 0.0325x_3 + 0.12833x_4 - 0.10423x_5 + 0.29071x_1x_2 + 0.20917x_1x_3 + 0.1325x_1x_5 + 0.14929x_2x_5 + 0.15417x_4x_5 + \epsilon$$

Ecuación 14.

$y = \Delta L^*$ del recubrimiento Carbon Black
 $x_1 =$ presión de atomización
 $x_2 =$ flujo de material
 $x_3 =$ apertura del abanico
 $x_4 =$ Tiempo de flash off
 $x_5 =$ Cross coats

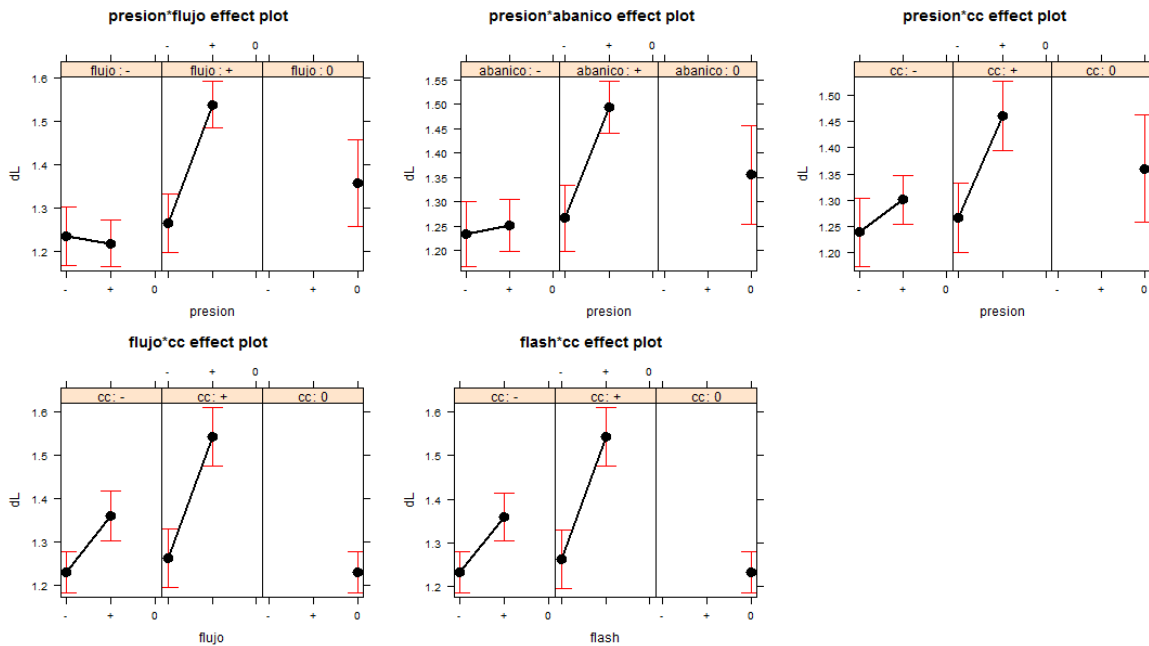


Figura 68. Gráficos de efectos para factores significativos.

En las gráficas de la figura 68, se muestra el efecto que tienen las variables consideradas en el diseño experimental, sobre la variable de respuesta ΔL^* . De acuerdo con el análisis del modelo lineal de la tabla 28, las variables significativas fueron: los efectos principales de la presión de atomización y del tiempo de flash off, además de las interacciones presión*flujo de material, presión*apertura del abanico, presión*cross coat, flujo*cross coat, tiempo de flash off*cross coat.

4.2.4 Análisis estadístico basado en la relación Señal/ Ruido

Debido a que el objetivo de este proyecto fue reducir la variación del color del recubrimiento. Se realizó un análisis utilizando como variable de respuesta la relación Señal/Ruido planteada en el diseño robusto desarrollado por Genichi Taguchi en 1950 (Gutierrez Pulido and De la Vara Salazar, 2008).

Se calculó la relación Señal/Ruido, en la tabla 26, para los factores empleados en el diseño óptimo experimental del proceso de aplicación automática.

FACTORES														$\sum x_i$	\bar{x}	σ	S/N
Presión	+	1.23	1.56	1.42	1.40	1.00	1.53	1.35	1.98	0.97	1.46	1.49	1.44	16.83	2.59	0.26437	1.9819
	-	1.09	1.29	1.45	1.27	1.18	1.24	1.30	1.35					10.17	2.26	0.10789	2.6422
Flujo	+	1.29	1.56	1.53	1.45	1.35	1.27	1.98	1.18	1.46	1.49			14.56	2.65	0.22152	2.1548
	-	1.09	1.23	1.42	1.40	1.00	0.97	1.24	1.30	1.35	1.44			12.44	2.26	0.17212	2.2372
Abanico	+	1.23	1.29	1.56	1.40	1.53	1.27	1.98	1.24	1.35	1.44			14.29	2.60	0.22561	2.1226
	-	1.09	1.42	1.00	1.45	1.35	0.97	1.18	1.46	1.30	1.49			12.71	2.31	0.19723	2.1376
Flash off	+	1.42	1.40	1.45	1.35	1.27	1.98	1.30	1.49	1.35	1.44			14.45	2.63	0.20018	2.2362
	-	1.09	1.23	1.29	1.56	1.00	1.53	0.97	1.18	1.46	1.24			12.55	2.28	0.20866	2.0777
Cross coat	+	1.09	1.23	1.29	1.42	1.45	1.98	1.46	1.35					11.27	2.50	0.26238	1.9596
	-	1.56	1.40	1.00	1.53	1.35	1.27	0.97	1.18	1.24	1.30	1.49	1.44	15.73	2.42	0.19190	2.2015

Tabla 29. Matriz para cálculo de relación Señal/Ruido

Los valores de S/N y medias de cada factor se muestran en la tabla 30.

Relación S/N					
Nivel	Presión	Flujo	Abanico	Flash off	Cross coat
+	1.982	2.15	2.12	2.24	1.96
-	2.642	2.24	2.14	2.08	2.20
∇	0.66	0.082	0.015	0.158	0.242
Rank	1	4	5	3	2

Tabla 30. Valores de S/N para los factores: presión, flujo, abanico, flash off y cross coat.

En la tabla 30 se observan los valores de las medias y S/R para todos los factores. Mediante los valores de la Señal/ruido se observa que la presión de atomización tiene un mayor efecto en la luminosidad del color del recubrimiento Carbon Black y la apertura del abanico presenta el menor efecto en la variable de respuesta mencionada. Por lo que es conveniente controlar con mayor precisión la presión de

atomización y el número de manos para tener mejores resultados en la aplicación del recubrimiento. Los resultados se verifican en las gráficas de la figura 69.

RELACIÓN SEÑAL/RUIDO

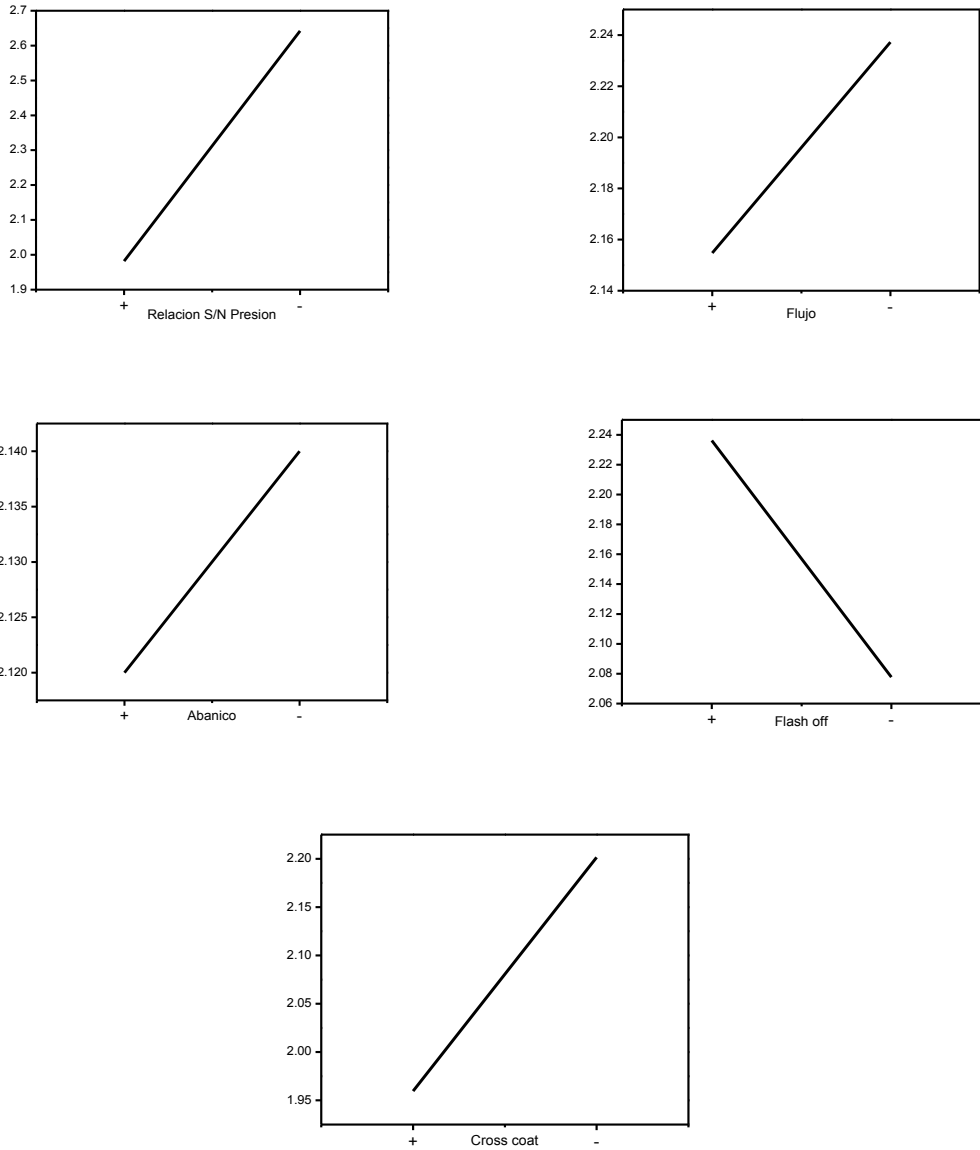


Figura 69. Gráficos de efectos de Relación S/N para los factores: presión atomización, flujo de material, apertura del abanico, tiempo de flash off y cross coats.

4.2.4.1 Corrida de confirmación

Placa	dL
1	1.86
2	1.82
3	1.83
4	1.84
5	1.85
6	1.8
7	1.86
8	1.83
9	1.87
10	1.83
11	1.86
12	1.8
13	1.86
14	1.85
15	1.89

Tabla 31. Corrida de confirmación del análisis Señal/Ruido.

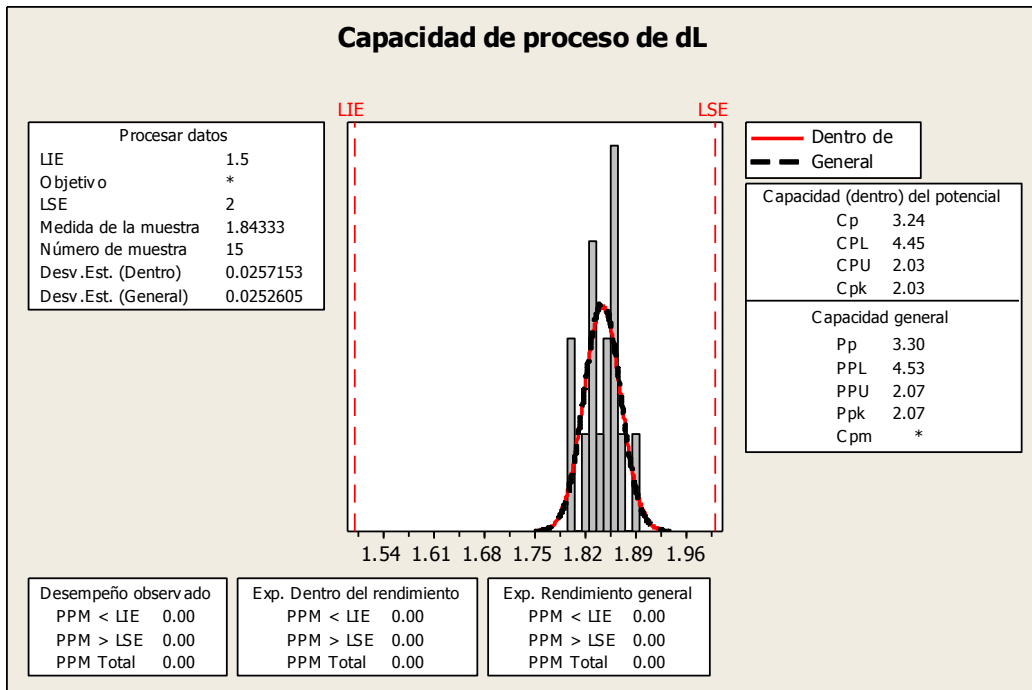


Figura 70. Capacidad de proceso de los datos de corrida de confirmación del análisis señal-ruido.

En la figura 70 se observa el comportamiento de los datos, se observa poca dispersión entre los datos $\sigma = 0.0257153$ y un índice de capacidad $C_{pk} = 2.03$, por lo que con estos niveles óptimos fue posible mejorar el proceso de aplicación de forma considerable.

4.3 Conclusiones.

Con base en análisis estadístico y experimental, se demostró que las variables presión de atomización, flujo de material, apertura del abanico y el tamaño de boquilla, del proceso de aplicación manual del recubrimiento de efecto metálico Carbon Black, tienen un efecto significativo en el comportamiento de la luminosidad del color ΔL^* del recubrimiento Carbon black de la empresa Mankiewicz.

Para la aplicación del recubrimiento por medio de una pistola de aplicación manual por gravedad, se concluyó que para mantener la luminosidad del color ΔL^* del recubrimiento con valores altos es conveniente aplicar la pintura manteniendo la presión de atomización en 4 bar, la perilla de control de flujo de material con 3.5 vueltas, la perilla de control de la apertura del abanico con 1.5 vueltas y utilizar la boquilla de 1.4mm.

Para el proceso de aplicación del recubrimiento con el equipo de aplicación automática las variables de aplicación significativas fueron la presión de atomización, el tiempo de flash off, la apertura de abanico y el flujo de material.

Se debe considerar la presión de atomización en 5 bar, la perilla de control de flujo de material podría mantenerse con 3.5 o 4 vueltas ya que no influye significativamente en la variación del color, la perilla de control de la apertura del abanico con 2 vueltas y dar un tiempo de flash off de 15 minutos, de este modo se tendrían valores de ΔL^* dentro de la especificación requerida (1.5 – 2).

Se demostró la hipótesis de investigación inicial, determinando que existe relación entre los parámetros de aplicación del recubrimiento de efecto metálico carbon black y el comportamiento del color del recubrimiento. Se determinaron los niveles de

operación adecuados para estos parámetros, con lo cual se mantendrá el valor de la luminosidad del color ΔL^* entre la especificación establecida.

Esta investigación permitió considerar la importancia de mantener registros de las condiciones de aplicación del recubrimiento, ya que la calidad final del recubrimiento fabricado solo puede ser medida después de que este fue aplicado; aquí es donde recae la importancia de controlar el proceso de aplicación. El uso de un equipo de aplicación automática, reduce la presencia de variaciones debidas al factor humano, sin embargo, es importante garantizar el uso correcto del equipo que permita tener aplicaciones más uniformes.

5. REFERENCIAS

Alain, C. 1997. LIBRO COLOR Y COLORIMETRIA.pdf. (E. 3C Conseil-París, editor.). París.

Allred, S. R., and M. Olkkonen. 2015. The effect of memory and context changes on color matches to real objects. *Atten. Percept. Psychophys.* 77:1608–24.

Available from:

<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=4468796&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>

Amookht, S., S. Gorji Kandi, and M. Mahdavian. 2014. Effect of surface texture on color appearance of metallic coatings. *Prog. Org. Coatings* 77:1221–1225.

Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300944014000769>

Bharathi, D., and R. Baskaran. 2014. Improvement of Painting Process in Steel Structure Using Taguchi ' s Method of Experimental Design. 2:1–9.

Chromeffektlack, A. 2013. ALEXIT Chromeffektlack 461-53 Relación de la mezcla. :12–14.

Cruz, S. 2015. Pinturas y recubrimientos. Una industria boyante y colorida.

Available from: <http://www.mundoferretero.com.mx/index.php/ferreteria/item/163-pinturas-y-recubrimientos-una-industria-boyante-y-colorida>

Dekker, N., E. J. J. Kirchner, R. Supér, G. J. Van Den Kieboom, and R. Gottenbos. 2011. Total appearance differences for metallic and pearlescent materials:

Contributions from color and texture. *Color Res. Appl.* 36:4–14.

Germer, T. a. 2001. Modeling the appearance of special effect pigment coatings.

Proc. SPIE 86:77–86. Available from:

<http://link.aip.org/link/?PSI/4447/77/1&Agg=doi>

Gmbh, B., and L. Strasse. Color Metalizado. :95–99.

Gutierrez Pulido, H., and R. De la Vara Salazar. 2008. Análisis y diseño de experimentos. 2° Edicion. (S. A. de C. V. Interamericana Editores, editor.). Mc

Graw Hill.

Gutiérrez Pulido, H., and R. De la Vara Salazar. 2009. Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma. 2° Edición. Mc Graw Hill, México, D.F.

INEGI. 2014. La industria automotriz en México 2014. Available from: <http://www.automotivemeetings.com/mexico/index.php/es/industria-automotriz-en-mexico>

Irchner, E. R. I. C. K., I. V. O. V. A. N. D. E. R. L. Ans, E. S. P. Erales, F. R. M. A. Erdú, J. O. C. Ampos, and A. L. F. Errero. 2015. Visibility of sparkle in metallic paints. 32:921–927.

Jafari, R., F. Ameri, and N. Khalili. 2016. Effect of the type of illumination on perceived blackness of automotive finishes. *J. Coatings Technol. Res.* 13:133–141. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11998-015-9734-8>

Jandó, G., T. Agostini, A. Galmonte, and N. Bruno. 2003. Measuring surface achromatic color: toward a common measure for increments and decrements. *Behav. Res. Methods. Instrum. Comput.* 35:70–81.

Kirchner, E., and W. Cramer. 2012. Making sense of measurement geometries for multi-angle spectrophotometers. *Color Res. Appl.* 37:186–198.

Kirchner, E. J. J., and J. Ravi. 2014. Setting tolerances on color and texture for automotive coatings. *Color Res. Appl.* 39:88–98.

Kirchner, E. J. J., and J. Ravi. 2014. Setting tolerances on color and texture for automotive coatings. *Color Res. Appl.* 39:88–98. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.21767>

Klein, G. A. 2010. *Industrial Color Physics*. (A. W.T. Rhodes, editor.). Springer Science+Business Media, LLC 2010, Herrenberg, Germany.

Maile, F. J., G. Pfaff, and P. Reynders. 2005. Effect pigments - Past, present and future. *Prog. Org. Coatings* 54:150–163.

Medina Ramirez, S. 2013. Industria de autopartes. Comer. Exter. Vol. 63, N:4.

Medina, J. M., and J. A. Díaz. 2013. Characterization of reflectance variability in the industrial paint application of automotive metallic coatings by using principal component analysis. *Opt. Eng.* 52:051202. Available from: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.OE.52.5.051202>

Medina, J. M., A. D. Jose, and C. Vignolo. 2014. Fractal Dimension of Sparkles in Automotive Metallic Coatings by Multispectral Imaging Measurements.

Mizutani, Eiji; Takagi, Hideyuki; Auslander, D. M. 2000. Evolving Color Paint.

Prendi, L., A. Ali, P. Henshaw, T. Mancina, and C. Tighe. 2008. Implementing DOE to study the effect of paint application parameters, film build, and dehydration temperature on solvent pop. *J. Coatings Technol. Res.* 5:45–56.

Shimizu, C., and G. W. Meyer. 2015. A Computer Aided Color Appearance Design System for Metallic Car Paint. *J. Imaging Sci. Technol.* 59:304031–3040310. Available from: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1062-3701&volume=59&issue=3&spage=304031>

Srinivasan, K., S. Muthu, N. K. Prasad, and G. Satheesh. 2014. Reduction of Paint line Defects in Shock Absorber Through Six Sigma DMAIC Phases. *Procedia Eng.* 97:1755–1764. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814033955>

Sung, L.-P., M. E. Nadal, M. E. McKnight, E. Marx, and B. Laurenti. 2002. Optical reflectance of metallic coatings: Effect of aluminum flake orientation. *J. Coatings Technol.* 74:55–63.