

Parametrización del proceso en la fabricación de referencias críticas para maximizar la resistencia al aplastamiento lineal usando la metodología de diseño estadístico de experimentos

Angie Catherine León Peña

Carlos Viuche Barajas

Universitaria Agustiniana
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Industrial
Bogotá D.C.
2018

Parametrización del proceso en la fabricación de referencias críticas para maximizar la resistencia al aplastamiento lineal usando la metodología de diseño estadístico de experimentos

Angie Catherine León Peña

Carlos Viuche Barajas

Director

Carlos Andrés Quiroz Castellanos

Trabajo de grado para optar al título profesional en Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Industrial

Bogotá D.C.

2018

Resumen

Este proyecto de investigación aplicada pretende ser de ayuda para la empresa Mc Tubos de cartón S.A.S. ubicada en la ciudad de Bogotá, generando una propuesta de parametrización del proceso de fabricación en las referencias críticas para la organización usando la metodología de diseños estadísticos experimentales. Para llevar esto a cabo se tomó como base el histórico de peticiones, quejas y reclamos en el periodo del 2013 a mayo del 2018, con lo cual se pretende identificar las referencias que han presentado algún tipo de reclamos y sus principales causas que han tenido impacto económico para la organización. Una vez obtenidas las referencias críticas se identifican los factores de diseño que puede tener un efecto significativo en la resistencia al aplastamiento lineal, seguido de la planificación y ejecución del experimento, obteniendo los datos que reflejan el comportamiento de la variable de respuesta en la unidad de medida, para ser analizados por medio del software Minitab dando como resultado una propuesta en los parámetros de fabricación que maximice la resistencia al aplastamiento lineal y con el menor costo de producción entre dichas referencias.

Palabras claves: Aplastamiento lineal; Diseño experimental; Experimento, Optimización, Resistencia; Tubos de cartón.

Contenido

Introducción.....	12
Capítulo 1. Identificación del problema	12
1.1. Descripción de la empresa	12
1.2. Planteamiento del problema.....	13
1.3. Pregunta de Investigación	13
Capítulo 2. Justificación de la investigación	14
Capítulo 3. Objetivos.....	16
3.1. Objetivo general.....	16
3.2. Objetivos específicos	16
Capítulo 4. Marco de referencia de la investigación	16
4.1. Estado del arte.....	16
4.2. Marco Teórico.....	20
4.2.1. Diseño de experimentos.....	20
4.2.2. Diseños factoriales.....	21
4.3. Marco conceptual.....	24
4.3.1. Aleatorización.....	24
4.3.2. Bloque.....	24
4.3.3. Calidad.....	24
4.3.4. Capa.....	24
4.3.5. Control.....	24
4.3.6. Diagrama De Espina De Pescado.	24
4.3.7. Diagrama Pareto.	25
4.3.8. Diámetro Interno.....	25
4.3.9. Diámetro externo.....	25

4.3.10. Diseño de experimentos.	25
4.3.11. Diseño factorial.....	25
4.3.12. Efecto de interacción.	25
4.3.13. Efecto de un factor.....	25
4.3.14. Efecto principal.....	25
4.3.15. Error aleatorio.....	26
4.3.16. Error experimental.....	26
4.3.17. Espesor de pared.....	26
4.3.18. Experimento.	26
4.3.19. Experimento factorial.	26
4.3.20. Factor.....	26
4.3.21. Factores controlables.....	26
4.3.22. Factores de ruido.	26
4.3.23. Factores no controlables.....	27
4.3.24. Factores perturbadores.....	27
4.3.25. Formación de bloques.....	27
4.3.26. Longitud.	27
4.3.27. Lote.....	27
4.3.28. Magnitud del efecto de interacción.....	27
4.3.29. Matriz de diseño.	27
4.3.30. Muestra.....	27
4.3.31. Niveles.....	28
4.3.32. Planeación.....	28
4.3.33. Proceso.	28
4.3.34. Repetición.....	28

4.3.35. Resistencia al aplastamiento lineal.....	28
4.3.36. Tratamientos.....	28
4.3.37. Unidad experimental.....	28
4.3.38. Variable de respuesta.....	29
4.4. Marco legal	29
4.4.1. Norma Técnica Colombiana NTC 1866.....	29
4.4.2. Norma Técnica Colombiana NTC 5342.....	30
4.4.3. Norma Técnica Colombiana NTC 1976.....	30
Capítulo 5. Metodología del proyecto	31
5.1. Tipo de estudio.....	31
5.2. Población	31
5.3. Técnicas de recolección de datos.....	31
Capítulo 6. Diagnóstico	31
6.1. Descripción del proceso de fabricación de tubos de cartón.....	31
6.1.1. Recibo de materias primas.....	32
6.1.2. Corte de papel.....	32
6.1.3. Fabricación de tubo de cartón.....	33
6.1.4. Refiladora uno y dos.....	34
6.1.5. Refiladora 3.....	35
6.1.6. Empaque.....	36
6.1.7. Distribución.....	36
6.2. Diagnóstico del PQR (Petición, quejas y reclamos)	36
6.3. Etapas de desarrollo del experimento	42
6.3.1. Identificación y exposición del problema.....	42
6.3.2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.....	42

6.3.3. Factores de Ruido	51
6.3.4. Selección de la variable de respuesta	52
6.3.5. Elección del diseño experimental.	52
6.3.6. Realización del experimento.	52
Capítulo 7. Análisis de los datos obtenidos en los experimentos	59
7.1. Experimento 1 para la referencia A	60
7.1.1. Análisis de la varianza.	61
7.1.2. Validación de supuestos.	63
7.1.3. Varianza constante.....	63
7.2. Experimento 2 de la referencia B.....	66
7.2.1. Análisis de la varianza.	68
7.2.2. Validación de los supuestos.....	70
7.2.3. Varianza constante.....	70
7.3. Experimento 3 de la referencia C.....	73
7.3.1. Análisis de la varianza.	74
7.3.2. Validación de supuestos.	76
7.3.3. Varianza constante.....	77
7.4. Experimento 4 de la referencia D	79
7.4.1. Análisis de la varianza.	81
7.4.2. Validación de supuestos.	83
7.4.3. Varianza constante.....	83
7.5. Análisis de unidades defectuosas por aplastamiento lineal.	88
Capítulo 8. Análisis Costo-Beneficio	88
8.1. Análisis Costo- Beneficio	94
8.1.1. Análisis de costos para la referencia A.....	94

8.1.2. Análisis de costo para la referencia B	94
8.1.3. Análisis de costos para la referencia C	95
8.1.4. Análisis de costos para la referencia D.....	96
Capítulo 9. Resultados.....	104
Capítulo 10. Conclusiones.....	105
Capítulo 11. Recomendaciones	106
Lista de referencias.....	109

Lista de figuras

Figura 1. Fachada de la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S. Elaboración propia.....	13
Figura 2. Ventas entre el periodo 2013 al 2017. Elaboración propia.	14
Figura 3. Clientes representativos en los ingresos en ventas entre el periodo 2013 al 2017.....	15
Figura 4. Diagrama de proceso en el de corte de las bobinas de cartón. Elaboración propia. ..	33
Figura 5. Diagrama de proceso en el formado de tubos de cartón. Elaboración propia.	34
Figura 6. Diagrama de proceso para el refilado de los tubos de cartón. Elaboración propia. ...	35
Figura 7. Análisis de causa raíz de los problemas presentados en los tubos de cartón. Elaboración propia.....	38
Figura 8. Identificación de las posibles causas generando problemas por aplastamiento lineal del tubo de cartón. Elaboración propia.	39
Figura 9. Identificación de las posibles causas generando problemas por diámetro interno del tubo de cartón. Elaboración propia.	39
Figura 10. Identificación de las posibles causas generando problemas por diámetro menor del tubo de cartón. Elaboración propia.	40
Figura 11. Consolidado de pérdidas agrupado. Elaboración propia.	41
Figura 12. Prueba de resistencia al aplastamiento lineal. Elaboración propia.	53
Figura 13. Diagrama de metodología usada en la ejecución de los experimentos. Elaboración propia.....	54
Figura 14. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.....	60
Figura 15. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.	60
Figura 16. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.	61

Figura 17. Análisis de varianza. Elaboración propia.....	62
Figura 18. Gráfica de residuos referencia A. Elaboración propia.	63
Figura 19. Residuales. Elaboración propia.....	65
Figura 20. Gráfica de probabilidad de residuales. Elaboración propia.	66
Figura 21. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.....	66
Figura 22. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.....	67
Figura 23. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.	68
Figura 24. Análisis de varianza. Elaboración propia.....	69
Figura 25. Figura de residuos. Elaboración propia.....	70
Figura 26. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.	71
Figura 27. Gráfica de probabilidad de residuos. Elaboración propia.	72
Figura 28. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.....	73
Figura 29. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.....	73
Figura 30. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.	74
Figura 31. Análisis de varianza. Elaboración propia.....	76
Figura 32. Gráficas de residuos. Elaboración propia.....	76
Figura 33. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.	78
Figura 34. Gráfica de probabilidad de residuales. Elaboración propia.	78
Figura 35. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.....	79
Figura 36. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.....	80
Figura 37. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.	81
Figura 38. Análisis de varianza. Elaboración propia.....	82
Figura 39. Gráfica de residuos. Elaboración propia.	83
Figura 40. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.	85
Figura 41. Gráfica de probabilidad de residuales. Elaboración propia.	85

Lista de tablas

Tabla 1. Estado del arte en la aplicación de la metodología del diseño estadístico experimental.	17
Tabla 2. <i>Reclamos presentados en el periodo de 2013 a mayo del 2018</i>	37
Tabla 3. <i>Relación de reclamos</i>	37
Tabla 4. <i>Referencias que presentan incumplimiento en las especificaciones</i>	40

Tabla 5. <i>Referencias seleccionadas para realizar el diseño experimental.</i>	42
Tabla 6. <i>Tipos de cartón usados en la fabricación de los tubos.</i>	43
Tabla 7. <i>Composición de la mezcla 1 para la referencia A</i>	44
Tabla 8. <i>Composición de la mezcla 2 para la referencia A</i>	44
Tabla 9. <i>Composición de la mezcla 3 para la referencia A</i>	44
Tabla 10. <i>Composición de la mezcla 4 para la referencia A</i>	45
Tabla 11. <i>Composición de la mezcla 1 para la referencia B.</i>	45
Tabla 12. <i>Composición de la mezcla 2 para la referencia B.</i>	46
Tabla 13. <i>Composición de la mezcla 3 para la referencia B.</i>	46
Tabla 14. <i>Composición de la mezcla 4 para la referencia B.</i>	46
Tabla 15. <i>Composición de la mezcla 5 para la referencia B.</i>	47
Tabla 16. <i>Composición de la mezcla 1 para la referencia C.</i>	47
Tabla 17. <i>Composición de la mezcla 2 para la referencia C.</i>	48
Tabla 18. <i>Composición de la mezcla 3 para la referencia C.</i>	48
Tabla 19. <i>Composición de la mezcla 4 para la referencia C.</i>	48
Tabla 20. <i>Composición de la mezcla 5 para la referencia C.</i>	49
Tabla 21. <i>Composición de la mezcla 1 para la referencia D</i>	49
Tabla 22. <i>Composición de la mezcla 2 para la referencia D</i>	50
Tabla 23. <i>Composición de la mezcla 3 para la referencia D</i>	50
Tabla 24. <i>Composición de la mezcla 4 para la referencia D</i>	50
Tabla 25. <i>Composición de la mezcla 5 para la referencia D</i>	51
Tabla 26. <i>Datos obtenidos en el experimento 1 de la referencia A</i>	55
Tabla 27. <i>Datos obtenidos en el experimento 2 de la referencia B</i>	56
Tabla 28. <i>Datos obtenidos en el experimento 3 de la referencia C</i>	58
Tabla 29. <i>Datos obtenidos en el experimento 4 de la referencia D.</i>	59
Tabla 30. <i>Resumen de cada una de las referencias de mayor a menor resistencia al aplastamiento lineal</i>	86
Tabla 31. <i>Análisis de unidades defectuosas por aplastamiento lineal</i>	88
Tabla 32. <i>Costo de cartón para la fabricación de los tubos.</i>	88
Tabla 33. <i>Costo de adhesivo para la fabricación de los tubos.</i>	88
Tabla 34. <i>Costo total para cada una de las mezclas de la referencia A</i>	90

Tabla 35. <i>Costo total para cada una de las mezclas de la referencia B</i>	91
Tabla 36. <i>Costo total para cada una de las mezclas de la referencia C</i>	92
Tabla 37. <i>Costo total para cada una de las mezclas de la referencia D</i>	93
Tabla 38. <i>Costos referencia A</i>	94
Tabla 39. <i>Costos referencia B</i>	95
Tabla 40. <i>Costos referencia C</i>	95
Tabla 41. <i>Costos referencia D</i>	96
Tabla 42. <i>Resumen de los tratamientos en orden descendente con sus respectivos costos</i>	97
Tabla 43. <i>Selección de tratamientos para cada referencia</i>	99
Tabla 44. <i>Tratamiento de la referencia A</i>	99
Tabla 45. <i>Análisis Costo beneficio para la referencia A</i>	100
Tabla 46. <i>Tratamiento de la referencia B</i>	100
Tabla 47. <i>Análisis Costo beneficio para la referencia B</i>	101
Tabla 48. <i>Tratamiento de la referencia C</i>	101
Tabla 49. <i>Análisis Costo beneficio para la referencia C</i>	102
Tabla 50. <i>Tratamiento de la referencia D</i>	103
Tabla 51. <i>Análisis Costo beneficio para la referencia D</i>	103

Introducción

En los últimos años la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S. dedicada a la fabricación y comercialización de tubos de cartón, ha tenido un crecimiento en las ventas gracias a la incursión de clientes del sector papelerero, los cuales representan una gran parte de la demanda e ingresos en la compañía, pero así mismo son clientes bastante exigentes y los cuales han venido presentado reclamaciones por la no conformidad en las especificaciones de los tubos, generando una mala imagen de la organización y del producto. Por tal motivo, a mediados del 2017 la empresa perdió un cliente importante debido a la demanda que requería, generando la necesidad de tomar medidas al respecto, ya que los procesos productivos se desarrollan de manera empírica, por este motivo estos procesos no son estandarizados ni controlados.

Por tal razón el presente trabajo se desarrollará en tres partes: en primer lugar se enfocará en identificar las causas que ha ocasionado dichas reclamaciones y medir económicamente como han afectado a la organización, partiendo del análisis de las peticiones, quejas y reclamos por medio de las herramientas del diagrama de espina de pescado y el diagrama de Pareto, seguido de la identificación de los factores de estudio con el fin de desarrollar la metodología de diseños estadísticos experimentales como segunda parte, y por último, concluyendo con el análisis de los datos obtenidos en los experimentos, brindando una propuesta de parametrización para cada una de las referencias con el objetivo de maximizar la resistencia al aplastamiento lineal teniendo en cuenta los costos asociados.

Capítulo 1. Identificación del problema

1.1.Descripción de la empresa

Mc Tubos de Cartón S.A.S es una empresa manufacturera colombiana, está constituida legalmente desde año 2012 con código CIUU 1709 correspondiente a la fabricación de otros productos de papel y cartón. Ubicada inicialmente en el barrio Ismael Perdomo en la ciudad de Bogotá D.C en el cual realizó sus actividades productivas durante cinco años.

Debido a los constantes inconvenientes que se presentaban por la obstaculización de la vía en el cargue y el descargue de los vehículos de carga, así como el desplazamiento de los operarios que arriesgaban su vida realizando traslados de producto en las tres bodegas. Los socios deciden a mediados del 2017 unificar la empresa en el sector de los Mártires, Carrera 24 N 23-07 del barrio Samper Mendoza en un área aproximada de 650 m² ver figura 1. Su estructura organizacional está compuesta de tres cargos administrativos, once cargos operativos, y dos Staff, dentro de su

maquinaria, cuenta con dos formadoras de tubo, dos sierras, tres refiladoras y al inicio del año 2018 decide hacer una inversión de más de \$100 000 000 reemplazando la máquina rebobinadora hechiza, por una máquina con mayor tecnología.



Figura 1. Fachada de la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S. Elaboración propia.

1.2.Planteamiento del problema

Mc Tubos de Cartón S.A.S. comenzó su actividad económica de forma empírica, ya que los fundadores no contaban con el conocimiento ni las herramientas necesarias para estandarizar y controlar sus procesos productivos. Aunque en los últimos años la empresa ha crecido económicamente, se ha visto afectada por reclamos que presentan algunos clientes, que demuestran la no conformidad del producto ya que en ocasiones no cumple con las especificaciones técnicas exigidas, posiblemente porque la empresa no cuenta con parámetros estandarizados en los procesos productivos que permitan saber a ciencia cierta si el incumplimiento en las especificaciones están asociadas con el proceso de fabricación del tubo, condiciones inadecuadas de almacenamiento, mala calidad del cartón o en los adhesivos u otro tipo de inconveniente que esté generando rechazos de producto que representan pérdidas económicas importantes, desconfianza en el producto y una mala imagen en el mercado. Con base en lo anterior se estudiarán los parámetros en el proceso de fabricación de los tubos de cartón de las referencias que se consideren como críticas en el diagnóstico realizado, para luego ser apoyados en el diseño estadístico de experimentos con el fin de atacar el problema y dar una solución parcial o definitiva en cuanto al cumplimiento de las especificaciones exigidas por los clientes.

1.3.Pregunta de Investigación

¿Cuáles son los parámetros que debe tener un diseño de los tubos de cartón para identificar un óptimo proceso en la fabricación de las referencias críticas en la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S., que permita maximizar la resistencia al aplastamiento lineal?

Capítulo 2. Justificación de la investigación

En el análisis de ventas realizado, la empresa encontró que desde el año 2013 al 2016, se incrementaron notablemente las ventas, sin embargo, el año 2017 presentó un decrecimiento del 3,1% con relación al año anterior como se muestra en la figura 1.



Figura 2. Ventas entre el periodo 2013 al 2017. Elaboración propia.

Así mismo, en la figura 3, se evidencian los cuatro clientes más importantes por su participación en los ingresos, representando un 49,62 % del total de las ventas.



Figura 3. Clientes representativos en los ingresos en ventas entre el periodo 2013 al 2017.

De acuerdo con lo anterior y tras la demanda de producción, la no conformidad del producto aumentó, provocando el concepto “no confiable como proveedor” en las evaluaciones de calidad, tanto así que en el 2017 Papeles y Corrugados Andina quien en promedio generaba ventas anuales de \$82 000 000, se retiró como cliente de MC Tubos de Cartón S.A.S afectándola considerablemente; aun así después de que el cliente se perdió, la empresa no ha realizado ningún cambio respecto a la problemática presentada, poniendo en riesgo la estabilidad en las ventas de los demás clientes.

A través de los conocimientos adquiridos, el objetivo es realizar un diseño de experimentos, que parta de la identificación de las referencias que han presentado incumplimiento en las especificaciones evidenciadas por medio de las PQR (Peticiónes, quejas y reclamos) y finalizando con la identificación de parámetros óptimos del proceso de producción, que permitan a través del proceso estandarizado generar control para cumplir con las especificaciones de resistencia al aplastamiento lineal en las referencias críticas.

Capítulo 3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Generar una propuesta de parametrización óptima para el proceso de fabricación de las referencias críticas en la empresa MC Tubos de Cartón S.A.S., usando la metodología del diseño y análisis estadístico de experimentos, con el fin de maximizar la resistencia al aplastamiento lineal.

3.2. Objetivos específicos

3.2.1. Identificar las referencias y las causas que están generando incumplimiento en las especificaciones de los tubos de cartón

3.2.2. Desarrollar los experimentos que determinen los factores de diseño que tienen efecto en la resistencia al aplastamiento lineal para las referencias críticas, dando cumplimiento a los principios del diseño experimental y con los requisitos expresados en las normas técnicas colombianas NTC 1866 Y NTC 1976

3.2.3. Establecer una propuesta de parámetros de las referencias críticas que obtuvieron el mejor desempeño en la resistencia al aplastamiento lineal, basados en el análisis de los resultados de cada experimento y considerando el costo-beneficio.

Capítulo 4. Marco de referencia de la investigación

4.1. Estado del arte

El diseño de experimentos ha sido aplicado en diferentes contextos y campos de investigación como se evidencia en la tabla 1, esta metodología permite encontrar posibles mejoras en productos y/o procesos existentes y nuevos, establecer parámetros óptimos en los procesos de fabricación y/o en la composición de los productos, conocer el comportamiento del sistema que se esté evaluando.

Los criterios de búsqueda, se basa en la aplicación de la metodología del diseño estadístico experimental orientados a la mejor de algún proceso o producto, con el fin de conocer el crecimiento y el alcance que ha logrado el diseño experimental en los últimos tiempos.

Tabla 1.

Estado del arte en la aplicación de la metodología del diseño estadístico experimental.

Año	Título	Autor(es)	Descripción
2003	Uso de la metodología de superficie de respuesta y la programación lineal para el desarrollo de un néctar de mora pasteurizado.	Félix Rafael Millán Trujillo; Manuel Alberto Algarbe Roye; María Soledad Tapía	La investigación aplicada que desarrollaron los autores Millán, Algarbe & Tapia (2003) un diseño experimental óptimo para la formulación de un néctar de mora a bajo costo, en el cual los factores de estudio que plantearon fue la cantidad de agua y la sacarosa, logrando disminuir hasta US\$10 607 anuales para 10n/dáa de néctar (p. 646).
2003	Fractional factorial design of experiments for PEM fuel cell performances improvement.	Roberto C Dante; José L Escamilla; Vicente Madrigal; Thomas Theuss; Juan de Dios Calderón; Omar Solorza; Rubén Rivera	En este artículo los autores Dante, Escamilla, Madrigal, Theuss, Calderón, Solorza & Rivera (2003) usaron la metodología de diseño de experimentos fraccionales con el fin de mejorar "la potencia de salida de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico", para el desarrollo del experimento tomaron en cuenta factores como las presiones de hidrógeno, presiones de oxígeno y factor como las tasas de flujo (pp. 343).
2006	Process improvement approach to the saponification reaction by using statistical experimental design.	Nihal Bursali, Suna Ertunc, Bulent Akay	En el presente trabajo de investigación los autores Bursali, Ertunc & Akay (2006) utilizaron el diseño estadístico de experimentos para determinar parámetros operativos efectivos y las condiciones operativas óptimas en un procesos de saponificación, en el cual se estudiaron los efectos principales y de interacción de cada uno de los factores.(pp.980).

2007	El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta.	Ilzarbe Izquierdo, Laura; Tanco, Martín; Viles, Elisabeth; Álvarez Sánchez	En este artículo los autores Izquierdo, Tanco, Viles & Álvarez (2007) expresan de manera teórica la metodología para el desarrollo del diseño experimental aplicado dicha teoría en un ejemplo de tiro de una catapulta (pp. 128).
2008	Aplicación del diseño de experimentos (DoE) para la mejora de procesos.	Martín Tanco	En este caso de estudio el autor Tanco (2008), aplica la metodología de diseño de experimentos en el proceso de soldadura láser el cual presentaba problemas de calidad en el formado de las partes laterales y el techo de un automóvil, logrando reducir el 97% de las imperfecciones en este proceso (pp. 85).
2009	Improvement of production of citric acid from oil palm empty fruit bunches: Optimization of media by statistical experimental designs.	Md. Niamul Bari; Md. Zahangir Alam; Suleyman A. Muyibi; Parveen Jamal; Abdullah-Al-Mamun	En este artículo trata de la optimización de componentes del medio para mejorar la producción de ácido cítrico partiendo de los manojos de fruta vacíos de palma aceitera usando la metodología del diseño estadístico experimental de un factor. (Bari, Alam, Muyibi, Jamal & Mamun, 2009 pp. 3113).
2010	Improvement of a two-stage fermentation process for docosahexaenoic acid production by <i>Aurantiochytrium limacinum</i> SR21 applying statistical experimental designs and data analysis.	Silvina Mariana Rosa; Marcelo Abel Soria; Carlos Guillermo Vélez; Miguel Angel Galvagno	En esta investigación los autores Rosa, Soria, Vélez & Galvagno (2010) realizaron la aplicación del diseño experimental con el fin de identificar las variables que son importantes en la producción de biomasa de <i>Aurantiochytrium limacinum</i> SR21, con los respectivos niveles. (pp. 2367).
2010	Experimental Design and Statistical Methods for Improved Hit Detection in High-Throughput Screening.	Nathalie Malo; James A. Hanley; Graeme Carlile; Jing Liu; Jerry Pelletier; David Thomas; Robert Nadon	Los autores Malo, Hanley, Carlile, Liu, Pelletier, Thomas & Nadon (2010), por medio de la metodología del diseño estadístico experimental pretenden demostrar que se puede presentar una mejora en la identificación de compuestos activos de selección de alto rendimiento usando esta herramienta. (pp. 990).
2011	Reconstrucción digital del muñón de un amputado transfemoral a partir de datos obtenidos de escáner 3D.	Jésica Isaza; Ana Serna; Diego Restrepo; Faviana Gutiérrez; Juan Ramírez; Alexander Correa	En este proyecto de investigación, se utilizó el diseño experimental con el fin de obtener sólidos digitales los cuales son analizados bajo la metodología de elementos finos en el desarrollo de imágenes 3D al ser escaneados los positivos de muñones amputados transfemorales (Isaza, Serna, Restrepo, Gutiérrez, Ramírez & Correa; 2011, pp. 43).

2012	Aplicación del diseño experimental para mejorar el proceso de desarrollo de nuevos productos de baldosas cerámicas.	Jorge Alejandro Ángel Tobón	El autor Ángel (2012), en este proyecto de investigación aplicada desarrollada en la empresa Corona, utiliza la herramienta de diseño de experimentos para dar solución al tiempo de desarrollo de nuevos productos de baldosas cerámicas (pp.VI).
2013	Diseño conceptual de una sonda Langmuir para caracterización de plasmas fríos mediante diseño estadístico de experimentos.	Suarez, Victor Hugo Camargo; Maya, Diego Andrés costa; Jaramillo, Juan Manuel O.	En el presente trabajo de investigación los autores desarrollan un Suarez, Maya & Jaramillo (2012) "Diseño y construcción de un sistema de caracterización de plasmas fríos por métodos electrostáticos, basados en conceptos de física plasma y herramientas de ingeniería diseño estadístico de experimentos y diseño conceptual" (p. 76).
2013	Diseño Box-Behnken para la optimización de la absorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores.	Ana Cristina Jaramillo; Ana María Echavarría; Angelina Hormaza	En este artículo los autores Jaramillo, Echavarría & Hormaza (2013) determinaron "las mejores condiciones para la recomoción del colorante Azul ácido 9 (AA9) a través de un diseño factorial completos 23 y su posterior optimización mediante un diseño de superficies Box-Behnken utilizando tallos florales como material absorbente"(p. 75).
2016	Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el área metropolitana del valle de Aburrá.	Leonardo Fabio Barrios Ziolo; Luisa Fernanda Gaviria Restrepo; Edison Alexánder Agudelos; Santiago Alonso Gallo Cardona	En este artículo los autores Barrios, Gaviria, Agudelo & Gallo (2016) utilizaron la metodología de diseños estadísticos experimentales, para lo cual "se correlacionó el efecto de la concentración, contenido de sólidos totales y la longitud de onda máxima absorción de diferentes colorantes sobre el organismo <i>Selenastrum Capricornutum</i> "(p. 61), logrando predecir en un 94% y un 99% los efectos principales, permitiendo un mayor control en los colorantes y pigmentos tóxicos en las aguas residuales.
2017	Estudio estadístico de la incidencia de ciertas variables de síntesis sobre la cristalinidad y otras propiedades de hidrotalcitas Ni, Fe.	Viky Mujica; Carlos Linares; Ingrid Velásquez	En este estudio los autores Mujica, Linares & Velásquez (2017) por medio del diseño estadístico experimental factorial fraccionado analizaron "incidencia de las variables en la síntesis de hidrotalcitas de composición NiFe(CO ₃) en sus características estructurales, asociada a los métodos de síntesis: radiación microondas y coprecipitación"(p. 85) utilizando el factor de Fisher co el objetivo de comprobar la influencia entre los factores de diseño.

Nota. Elaboración propia.

4.2. Marco Teórico

4.2.1. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es considerado como un enfoque científico para la planeación, por medio de métodos estadísticos se recolectan los datos con el fin de obtener conclusiones más acertadas y confiables para la toma de decisiones que dependen dos puntos importantes. El primero es el diseño experimental y el segundo, son los análisis estadísticos de los datos, uno depende del otro, no se puede llegar a un buen análisis en los datos recolectados, si el procedimiento no fue bien realizado, por tal motivo se requiere una correcta aplicación de los principios en la planeación de cualquier experimento (Montgomery, 2004, pp. 1).

El punto de partida para realizar cualquier actividad es realizar una planificación de una manera detallada, minimizando pérdidas en dinero y tiempo por improvisación en la ejecución del experimento, en un proyecto de investigación pasa lo mismo, por eso es de vital importancia hacer una buena planeación, que vaya de la mano con los objetivos que se quiere alcanzar en la investigación y que permita dar soporte para la toma de decisiones; según Kuelh, (2001) al comenzar cualquier proyecto de investigación se debe tener en cuenta una lista de puntos importantes como son: “Objetivos específicos del experimento, identificación de factores que influyen y cuales varían y cuales son constantes, características para medir, procedimiento para hacer las pruebas, número de repeticiones y los recursos y materiales disponibles” (p. 3).

En el diseño de experimentos su objetivo es conocer el comportamiento de dicho entorno con el fin de saber que variables puede estar afectando el comportamiento, es por medio de la estadística que se pretende conocer ciertos comportamientos para así ser ajustados en la vida real, para tener mayor exactitud del sistema. El autor Rodríguez (2005) en su artículo expone el diseño óptimo de experimentos, como propósito es maximizar la cantidad de información que puede ser vital en la experimentación para obtener mayor exactitud, pretende conocer las restricciones existentes en las muestras o probetas, del instrumento de medición y de los experimentadores, para así por medio de un modelo adaptar el comportamiento de la variable de respuesta a la realidad lo más cercano posible. (pp. 1-4). Según Ruiz, S. y López I. (2013), afirman si las muestras para el desarrollo del experimento se van a tomar de forma aleatoria, si esto es así, es conocido como un diseño de experimentos puro, pero al no poderse medir aleatoriamente, quiere decir que dicho diseño no es experimental. (pp.495).

En el diseño estadístico de experimentos intervienen unos principios que no pueden ser violados por ningún motivo, pues de ello depende el éxito del experimento; estos principios se basan en la realización de réplicas, aleatorización y formación de bloques. La realización de réplicas: consiste en la repetición que debe desarrollarse en el experimento, generando confiabilidad en los datos recolectados para calcular la varianza del error experimental. (Kuelh, 2001, pp. 16-20). El segundo principio es la aleatorización: consiste en realizar las corridas de los tratamientos totalmente aleatorios, con el objetivo de no afectar o manipular los datos recolectados en el experimento al no estimar algún factor que tiene un efecto significativo, con el fin de evitar patrones o tendencias crecientes o decrecientes. Y, por último, se habla del principio de formación de bloques: que es la manera de controlar algún factor perturbador que pueda tener efecto significativo en la variable respuesta, esperando que los resultados obtenidos en la ejecución del experimento por bloque sean semejantes entre los bloques, pero no en general. (Gutiérrez et al, 2008, pp. 12-13).

Para dar inicio a la metodología del diseño experimental Montgomery (2004) propone una serie de etapas para el desarrollo del experimento de una manera ordenada con el fin de garantizar el éxito en el experimento, estas etapas son: “Identificación y exposición del problema, elección de los factores, los niveles y los rangos, selección de la variable de respuesta, elección del diseño experimental, realización del experimento, análisis estadístico de los datos, conclusiones y recomendaciones”. (p.13-17).

En el estudio se clasifican una variedad de diseños que dependen del número de factores y niveles a evaluar, para motivos de esta investigación se pretende desarrollar diseños factoriales.

4.2.2. Diseños factoriales

El diseño factorial se encarga de estudiar el comportamiento de dos o más factores con sus respectivas interacciones y permiten por medio de gráficas tener un mayor entendimiento, este tipo de diseños se caracteriza porque el experimentador tiene en cuenta dos o más factores en el cual pretende la variación o manipulación de dichos factores para los cuales cada uno cuenta con dos o más niveles, así lo afirma Ramón (s.f., pp. 17), con el fin de conocer la interacción de manera gráfica y estadística. Existen dos clases de diseños factoriales: cualitativos y cuantitativos, en los cualitativos se evalúa el tipo de maquinaria, el tipo de materia, operadores entre otros y para los cuantitativos entre los más reconocidos se estudia la temperatura, velocidad, humedad entre otros.

A continuación, se presenta la ecuación (1) de un modelo de regresión del experimento factorial de dos factores tomado del libro de Montgomery (2004)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

En donde:

$\beta_0 =$ Promedio de las respuestas

$\beta_1 =$ Valores determinados por x_1

$\beta_2 =$ Valores determinados por x_2

$\beta_{12} =$ Valores de la interacción de los dos factores

$X_1 =$ Representa al valor factor A

$X_2 =$ Representa al valor factor B

$\varepsilon =$ Error aleatorio (p. 172)

Cuando alguno de los factores de estudio al parecer presenta un efecto muy poco significativo, pero la interacción resulta ser significativa, es porque el efecto de la interacción tiene un valor significativo enmascara el desempeño de los efectos principales de los factores de estudio.

En cuanto a las observaciones de un diseño de experimentos factorial, el modelo de los efectos se presenta con la ecuación (2) (Montgomery, 2004) de la siguiente manera:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$\mu =$ Promedio global

$\tau_i =$ Efecto del nivel i – ésimo del factor A de los renglones

$\beta_j =$ Efecto del nivel j – ésimo del factor B de las columnas

$(\tau\beta)_{ij} =$ Efecto de la interacción entre τ_i y β_j

$\varepsilon_{ijk} =$ Componente del error aleatorio (p.177)

Otro modelo que se puede presentar en un experimento factorial es el modelo de las medias con la ecuación (3), el modelo matemático se toma del libro de Montgomery (2004, p. 177) y es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

Donde la media de la celda ij -ésima en la ecuación (4) tomada del libro de Escalante (2014, p. 95) es:

$$\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} . \quad (4)$$

El modelo que permite el desarrollo de experimentos factoriales es el modelo de regresión, usados normalmente en el diseño factorial de dos factores, los factores a y b son n igual de interés para probar la hipótesis con la igualdad de los efectos de los tratamientos, con la ecuación (5) (Montgomery, 2004, pp,177):

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (5)$$

$$H_i = \text{al menos } \tau_i \neq 0$$

La ecuación (6) representa la igualdad de los efectos de los tratamientos de los factores b, (Montgomery, 2002, p.177)

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \quad (6)$$

$$H_i = \text{al menos } \beta_i \neq 0$$

La ecuación (7) representa los tratamientos de los factores que interactúan, (Montgomery, 2002, p.177):

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todas las } i, j \quad (7)$$

$$H_i = \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Se aprueban las hipótesis por medio del análisis de varianza:

La ecuación (8) y la ecuación (9) representan la suma de cuadrados total:

$$ST = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (8)$$

$$ST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (9)$$

La ecuación (10) representa la suma de cuadrados para el factor A:

$$SSA = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (10)$$

La ecuación (11) representa la suma de cuadrados para el factor B:

$$SSB = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (11)$$

La ecuación (12) representa la suma de cuadrados de los subtotales:

$$SS_{subtotales} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{abn} \quad (12)$$

La ecuación (13) representa la suma de cuadrados de la interacción de los factores:

$$SS_{AB} = SS_{SUBTOTALES} - SS_A - SS_B \quad (13)$$

La ecuación (14) y (15) representa la suma de cuadrados del error aleatorio:

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (14)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{SUBTOTALES} \quad (15)$$

4.3. Marco conceptual

4.3.1. Aleatorización.

La aleatorización según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008), “consiste en hacer corridas experimentales en orden aleatorio o al azar, este principio aumenta la posibilidad de que el supuesto independencia de los errores se cumpla” (p. 13).

4.3.2. Bloque.

El bloque en diseño de experimentos Mellado (s.f.) define como “Conjunto de unidades experimentales de lo más homogéneo posible que reciben el mismo tratamiento” (p.1).

4.3.3. Calidad.

La calidad es aquella cualidad o característica de un producto, proceso, servicio o sistema con el fin de cumplir con los requerimientos, satisfacer las necesidades, y expectativas del cliente, equivale a un buen desempeño para lo que fue creado e indicando excelencia dentro de los parámetros establecidos entre ambas partes (vendedor-cliente).

4.3.4. Capa.

La capa es el “elemento unitario de papel o de cartón que conforma la estructura cilíndrica del centro de cartón” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2006 (p. 1).

4.3.5. Control.

El control es aquella inspección u observación que se hace a los resultados obtenidos de dicho proceso o servicio, para verificar si cumplen con las cualidades, características, con los planes de acción establecidos anteriormente, con el fin de generar mejoras y dichos correctivos que sean necesarios.

4.3.6. Diagrama De Espina De Pescado.

La espina de pescado o también conocido como diagrama de Ishikawa, como lo afirma (Arturo Ruiz & Falco Rojas, 2009) “se utiliza para relacionar los efectos con las causas que los producen”.

4.3.7. Diagrama Pareto.

El diagrama de Pareto se basa en el principio 80 y 20, como lo afirma Arturo Ruiz & Falco Rojas (2009) “el 80% de los problemas están producidos por un 20% de las causas” para así contrarrestar las causas de los mayores problemas que se presentan.

4.3.8. Diámetro Interno.

El diámetro interno es la “dimensión del ancho interno del cilindro del centro de cartón” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2006, p. 2).

4.3.9. Diámetro externo.

El diámetro externo es la “dimensión del ancho externo del cilindro del centro cartón” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2006, p. 2).

4.3.10. Diseño de experimentos.

El diseño de experimentos según Gutiérrez et Al (2008) es la “aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un proceso o sistema, por medio de pruebas planteadas adecuadamente” (p. 5).

4.3.11. Diseño factorial.

El diseño factorial “sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas”. (Gutiérrez et al, 2008, p. 128).

4.3.12. Efecto de interacción.

El efecto de interacción “dos factores interactúan de manera significativa sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro (Montgomery, 2004, p. 129).

4.3.13. Efecto de un factor.

El efecto de un factor “es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio en el factor” (Montgomery, 2004, p. 129).

4.3.14. Efecto principal.

El efecto principal “es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor; la respuesta promedio en el nivel bajo” (Montgomery, 2004, p. 129).

4.3.15. Error aleatorio.

El error aleatorio Gutiérrez “et Al” (2008) la presenta como “la variabilidad observada que no se puede explicar por los factores estudiados; resulta del pequeño efecto de los factores no estudiados y del error experimental” (p. 9).

4.3.16. Error experimental.

El error experimental Gutiérrez et Al (2008) se refiere al “componente del error aleatorio que refleja los errores del experimentador en la planeación y ejecución del experimento” (p.9).

4.3.17. Espesor de pared.

El espesor de pared es la “distancia entre las caras interna y externa del centro de cartón”. Definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2006, p. 2).

4.3.18. Experimento.

Un experimento según Montgomery (2004) lo define como “una prueba o series de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entradas de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (p.1).

4.3.19. Experimento factorial.

El experimento factorial lo define Montgomery & Runger (2013) “cada ensayo completo o réplica del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores” (p. 622)

4.3.20. Factor.

El factor es un “grupo específico de tratamientos: temperatura, humedad y tipos de suelo se consideran un factor de cada uno” (Kuelh, 2001, p. 7).

4.3.21. Factores controlables.

Los factores controlables como indica Gutiérrez et Al (2008) “son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado” (p. 8).

4.3.22. Factores de ruido.

Los factores de ruido son aquellos que cuando varían de manera natural y no controlable en el proceso pero que puede ser controlables para fines del experimento” (Montgomery, 2004, p. 15).

4.3.23. Factores no controlables.

Los factores no controlables “son variables que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso” según lo afirma Gutiérrez et Al (2008) (p.8).

4.3.24. Factores perturbadores.

Los factores perturbadores como lo define Montgomery (2004) “son factores que pueden influir en la respuesta experimental, pero en las que no hay un interés específico” (p. 13).

4.3.25. Formación de bloques.

La formación de bloques Montgomery (2004) lo define como “una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés (p. 13).

4.3.26. Longitud.

La longitud es la “distancia entre las caras de los dos extremos del centro de cartón” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2006, p. 2).

4.3.27. Lote.

El lote es el “conjunto de papel o cartón de un mismo tipo, con características específicas producido bajo condiciones que se presumen son uniformes y que está disponible para muestreo en su totalidad” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2005, p. 2).

4.3.28. Magnitud del efecto de interacción.

La magnitud del efecto de interacción según Gutiérrez et Al (2008) “es la diferencia promedio de dos estos efectos” (p. 171).

4.3.29. Matriz de diseño.

La matriz de diseño Gutiérrez et al (2008) la define como “el arreglo formado por los tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones” (p.10).

4.3.30. Muestra.

La muestra es la “agrupación de todos los especímenes tomados del lote para que suministren información sobre su calidad promedio y posiblemente sirven de base para la toma de decisiones sobre el lote” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2005, p. 2).

4.3.31. Niveles.

Los niveles son los “diferentes valores que se asignan a cada factor de estudio en un diseño de experimental” Gutiérrez et Al (2008) (p.8).

4.3.32. Planeación.

Planeación según Gutiérrez et Al (2008) “son actividades encaminadas a entender, delimitar el problema, u objeto de estudio y seleccionar variables de respuesta y factores. Concluye con la especificación de los tratamientos a realizar y con la organización del trabajo experimental” (p. 10).

4.3.33. Proceso.

Un proceso es una secuenciación de pasos lógicos que se enfocan en obtener algún resultado, es un paso a paso, una cadena que depende una de la otra, si una acción no existe o no puede desarrollar otra acción, es un sistema de entradas y salidas, en donde las entradas alimentan a cada fase y las salidas son en su defecto la entrada de otra fase hasta lograr la salida que se pretende alcanzar.

4.3.34. Repetición.

La repetición como lo afirma, Gutiérrez et Al (2008) “es correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores. Es volver a realizar un tratamiento, pero no inmediatamente después de realizar la corrida del mismo tratamiento” (p. 13).

4.3.35. Resistencia al aplastamiento lineal.

La resistencia al aplastamiento lineal “cantidad calculada de la carga que actúa en ángulo recto al eje de la pieza de ensayo a la primera fuerza máxima de comprensión o de nivelación, de la curva de deformación de la carga” definido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2006, p. 2).

4.3.36. Tratamientos.

El tratamiento o también conocido como punto de diseño es la “combinación de niveles de todos los factores estudiados” Gutiérrez et Al (2008) (p.8).

4.3.37. Unidad experimental.

La unidad experimental la define Kuelh (2001) “como el sujeto expuesto al tratamiento independiente de otras unidades (..) y una vez expuesta al experimento constituye una sola réplica del tratamiento” (p. 4).

4.3.38. Variable de respuesta.

Las variables de respuesta las definen Gutiérrez et Al (2008) “a través de esta(s) variable(s) se conocen el efecto o los resultados de cada prueba experimental” pueden ser características de calidad y/o variables que miden el desempeño de un proceso (p. 7).

4.4. Marco legal

4.4.1. Norma Técnica Colombiana NTC 1866.

La norma Técnica Colombiana NTC 1866, Papel y cartón. Centros de cartón para rollos, tiene como fin, establecer los requisitos que deben cumplir los centros de cartón para rollos y a los ensayos que se deben someter, brinda conceptos claves (capa, centro de cartón, centro de cartón seccionado, diámetro interno y externo, espesor de pared, longitud, deformaciones y resistencia al aplastamiento), requisitos generales que se basan en el almacenamiento y condiciones adecuadas del tubo de cartón, para no presentar despegue y/o de laminación en el proceso de corte del tubo o al momento de ser embobinado por primera vez por el cliente, presentan requisitos más específicos en la fabricación del tubo de cartón, como lo es el diámetro interior, el espesor de la pared, la longitud, resistencia al aplastamiento lineal y a su respectivas tolerancias, estas se deben basar en la Norma Técnica Colombiana NTC 1976, Centros y envases de cartón. Métodos de ensayos, toma de muestras, aceptación o rechazo de las respectivas muestras, acondicionamientos a los que se expone los ensayos con referencia a la norma NTC 1976 y la rotulación con las que deben contar los tubos de cartón. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2006, pp. 1-6).

Con relación a este estudio, es importante conocer el acondicionamiento de las piezas de ensayo que van a ser evaluadas. En la Norma Técnica Colombiana 1866 en el numeral 6.3.2.2, según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, (2006):

“Las piezas de ensayo se colocan de forma que el aire pueda llegar a todas las superficies y se mantienen así hasta que alcancen la humedad de equilibrio. La humedad de equilibrio se alcanza cuando dos pesajes consecutivos efectuados a intervalos de tiempo mínimo de 48 horas no difieren entre si más de 0,1% del peso”. (p.4).

4.4.2. Norma Técnica Colombiana NTC 5342.

La norma Técnica Colombiana NTC 5342 - Papel y cartón. Muestreo para determinar la calidad promedio, esta norma especifica el método que se debe utilizar para obtener la muestra representativa de un lote de papel o cartón, con el fin de medir si la calidad cumple o no con las especificaciones y las condiciones que debe tener en un muestreo, presenta definiciones como lote, unidad, hoja, espécimen, muestra, pieza de ensayo, seleccionada al azar, brinda una explicación para obtener las muestras de las hojas de cartón y un detalle del procedimiento (selección de unidades, selección de hojas y la preparación de los especímenes) que se debe seguir para tener éxito al momento de tomar las muestras, cuenta con requisitos adicionales, como las marcas y las precauciones que deben llevar los especímenes y si se requiere de un muestreo adicional, por último se debe realizar un informe del muestreo (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2005, pp.1-8).

4.4.3. Norma Técnica Colombiana NTC 1976.

La Norma Técnica Colombiana NTC 1976, centros y envases de cartón. Métodos de ensayo. Esta norma da a conocer los métodos de ensayo que se deben utilizar para los centros de cartón con el fin preservar las características que se requieren para cada referencia, cuenta con cuatro métodos para determinar el diámetro interior y con tres métodos para establecer el diámetro del exterior del centro de cartón, cuenta con métodos para determinar el espesor de la pared, su debida longitud y la resistencia al aplastamiento lineal de los tubos de cartón (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2006, pp. 1-12).

En cuanto a la determinación de la resistencia al aplastamiento lineal se debe tener en cuenta: los equipos de medición que van a evaluar la compresión con una exactitud + ó - del 1%, por otro lado, se debe tener en cuenta la preparación de las piezas de ensayo, y el acondicionamiento de las piezas de ensayo, el procedimiento de evaluación y por último, un informe detallado de los resultados obtenidos. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2006, pp. 11-12).

Capítulo 5. Metodología del proyecto

5.1. Tipo de estudio

El estudio será de tipo cuantitativo con enfoque exploratorio, ya que nos permiten obtener información de la empresa como una guía de cómo llevar a cabo la investigación. Según Hernandez Sampieri, (1991) “Los estudios exploratorios nos sirven para aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos”.

5.2. Población

La empresa MC Tubos de Cartón S.A.S será la población en la que se realizará el estudio, en la cual se encuentran las áreas de producción sobre las que se dará inicio con la identificación de las referencias que presentan algún tipo de falla, evidenciadas por medio de las peticiones, quejas y reclamos PQR.

Después de tener claro en qué referencias se debe trabajar, se dará inicio a cada uno de los objetivos planteados en la investigación.

5.3. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de información se tomarán como referencia los históricos del PQR (Petitionen, quejas y reclamos), los históricos de ventas, diagrama de espina de pescado y Diagrama de Pareto.

En cuando a las técnicas de recolección de datos utilizadas en cada uno de los experimentos, el factor papel es el número de mezclas que requiere ser evaluadas y el factor adhesivo son los tres adhesivos utilizados por la empresa, para cada uno de los tratamientos se realizó cinco réplicas, esto es igual para los cuatro experimentos. En el desarrollo de los experimentos la muestra que requiere ser evaluada, es generada de manera aleatoria por medio del software Minitab para ser medida por un manómetro en Manómetro glicerina de 0-1500 Psi (lbf/in^2) que se encuentra en el instrumento de medición, los datos obtenidos se ingresan al software Minitab para posteriormente ser analizadas.

Capítulo 6. Diagnóstico

6.1. Descripción del proceso de fabricación de tubos de cartón

Los tubos de cartón son fabricados con cartón y adhesivo, el cartón llega a la empresa en bobinas que oscilan entre 250 y 1 200 kilos y en gramajes en un rango de 100 a 500 gramos dependiendo del proveedor, en cuanto al adhesivo usado en el producto, el 20% es suministrado por el proveedor Aserquim, mientras que el 80% restante es fabricado por la

empresa a base de Dextrinas (Dextrina) y Alcohol polivinílico (Pva). El proceso de fabricación a nivel general comienza con el corte del cartón, luego pasa por el proceso de formado, que consiste en fabricar el tubo con las especificaciones requeridas por el cliente, de ahí se desprenden dos etapas de producción, que son el refileado y/o el almacenamiento de producto en proceso, esto depende exclusivamente de las referencias que se estén realizando, en el proceso de refileado se encarga de cortar el tubo en medidas que oscilan entre 1 y 90 cm, seguidamente pasa a el área de almacenamiento de producto en proceso, en el cual los tubos deben permanecer durante 72 horas para su secado, posteriormente se empaca en bolsas y son trasladados al almacenamiento de producto terminado, para después enviarlo al cliente. En la fabricación se deben tener en cuenta como mínimo las especificaciones en cuanto a la longitud, el diámetro y espesor de pared exigida por el cliente para así mismo saber qué tipo de material se debe usar en el proceso. A continuación, se detalla cada proceso:

6.1.1. Recibo de materias primas.

En el proceso de recibo de mercancías se elabora la respectiva orden de entrada. En el caso del cartón el transportador hace entrega de su debida relación del material donde se especifica el tipo de cartón, el peso, ancho de la bobina, número de bobina y gramaje. Debido al peso de las bobinas de cartón, el material es descargado por medio de una montacargas encargada de almacenar el material dentro de la planta por gramaje, en el caso del adhesivo llega a la planta en tambores de 200 kilos, según el tipo de adhesivo (Pva, Dextrina, Aserquim) son almacenados en la planta cerca de las formadoras de tubos, otros insumos como por ejemplo (Cabuya, Film stretch, Zuncho, Grapas, Cinta, Flexómetros, Limas entre otros) son recibidos y llevados al respectivo almacén.

6.1.2. Corte de papel.

En este proceso, el cartón se monta entre dos dispositivos o piñas, estas atrapan la bobina, para posteriormente desplegar el cartón por una serie de rodillos, llegando al punto de las cuchillas, ubicadas en la máquina cortadora con antelación de acuerdo con las medidas solicitadas según la referencia del tubo, finalmente el cartón sale cortado en cintas con diámetros que oscilan entre 100 y 120 cm de diámetro externo y con peso aproximado de 35 kilos, en la figura 4 se presenta un diagrama de proceso de corte de papel y una imagen del mismo en el anexo 1.

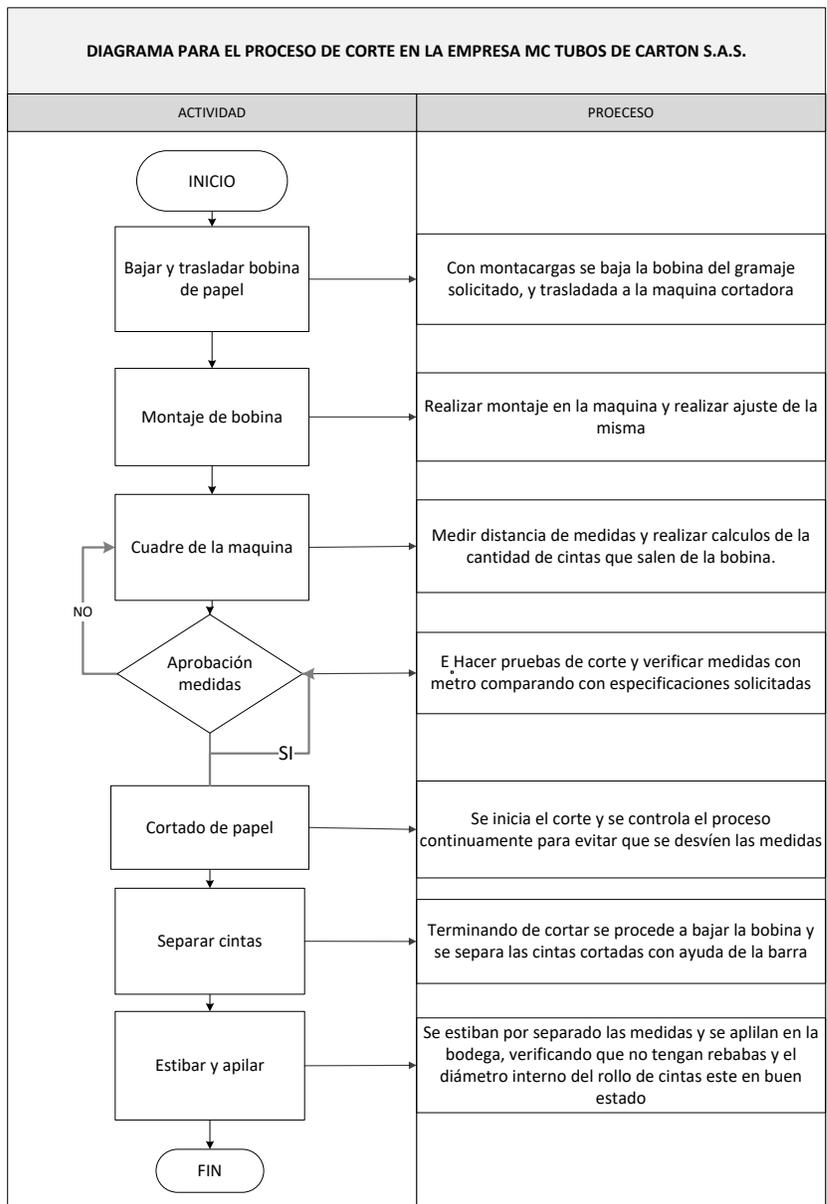


Figura 4. Diagrama de proceso en el de corte de las bobinas de cartón. Elaboración propia.

6.1.3. Fabricación de tubo de cartón.

Se trata de una unidad de alimentación donde se distribuyen las capas de cartón (diferentes gramajes) por medio de guías, pasando por gomeros donde son impregnadas de adhesivo en un trayecto determinado hasta llegar a la máquina formadora de tubos. En la sección final del trayecto, las capas de cartón entran a la máquina, llegando a una banda sintética que envuelve el cartón en un mandril donde es formando el tubo de cartón, ver anexo 2. Luego de estar el tubo formado, se desplaza a la sierra donde debido a restricción de la maquina es cortado en medidas superiores a 100 cm, luego de estar cortado el tubo, el operario de la maquina

formadora verifica la longitud, diámetro y espesor de pared de acuerdo con las especificaciones técnicas aportadas por el cliente. A continuación, en la figura 5 se puede evidenciar el diagrama de proceso de formado de tubos en la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S.:

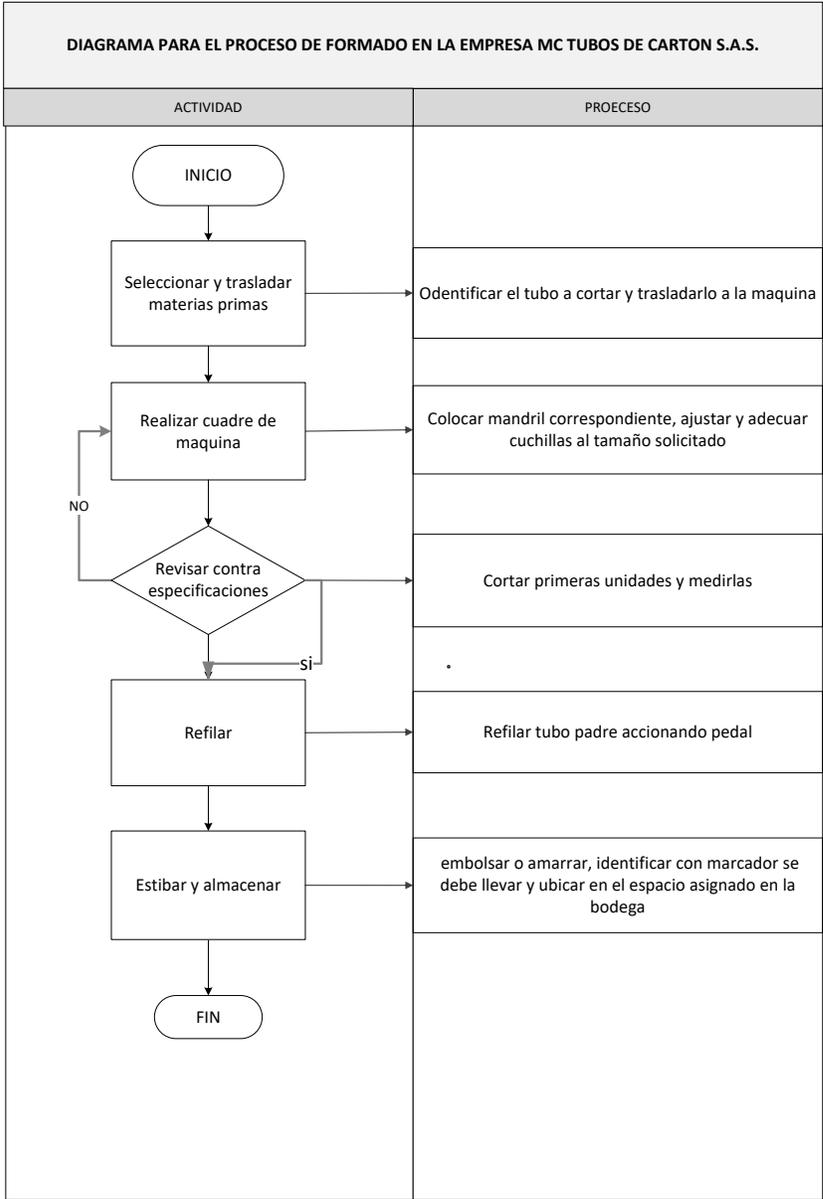


Figura 5. Diagrama de proceso en el formado de tubos de cartón. Elaboración propia.

6.1.4. Refiladora uno y dos.

Debido a que en el proceso de formado no es posible obtener una longitud menor de 100 cm, en este proceso se cortan los tubos cuyas medidas son menores a 100 cm, esto se hace por medio de una cuchilla de acero que es ubicada en la medida deseada para luego ingresar

el tubo que va a ser cortado en el mandril refilador de acuerdo con el diámetro interno del tubo como se muestra en anexo 3.

6.1.5. Refiladora 3.

En este proceso llegan los tubos que, según especificaciones, deben tener un corte limpio o sin rebaba, ya que el disco dentado de la sierra en el proceso de formado no permite que esto suceda. Además, esta máquina refiladora ver anexos 4, da una mayor exactitud en cuanto a la medida del tubo de cartón, con un margen de error alrededor del 0,05%, lo que garantiza al cliente una medida confiable para su proceso, pero teniendo en cuenta que para que esto suceda el tubo debe tener como mínimo un tiempo de secado de 72 horas.

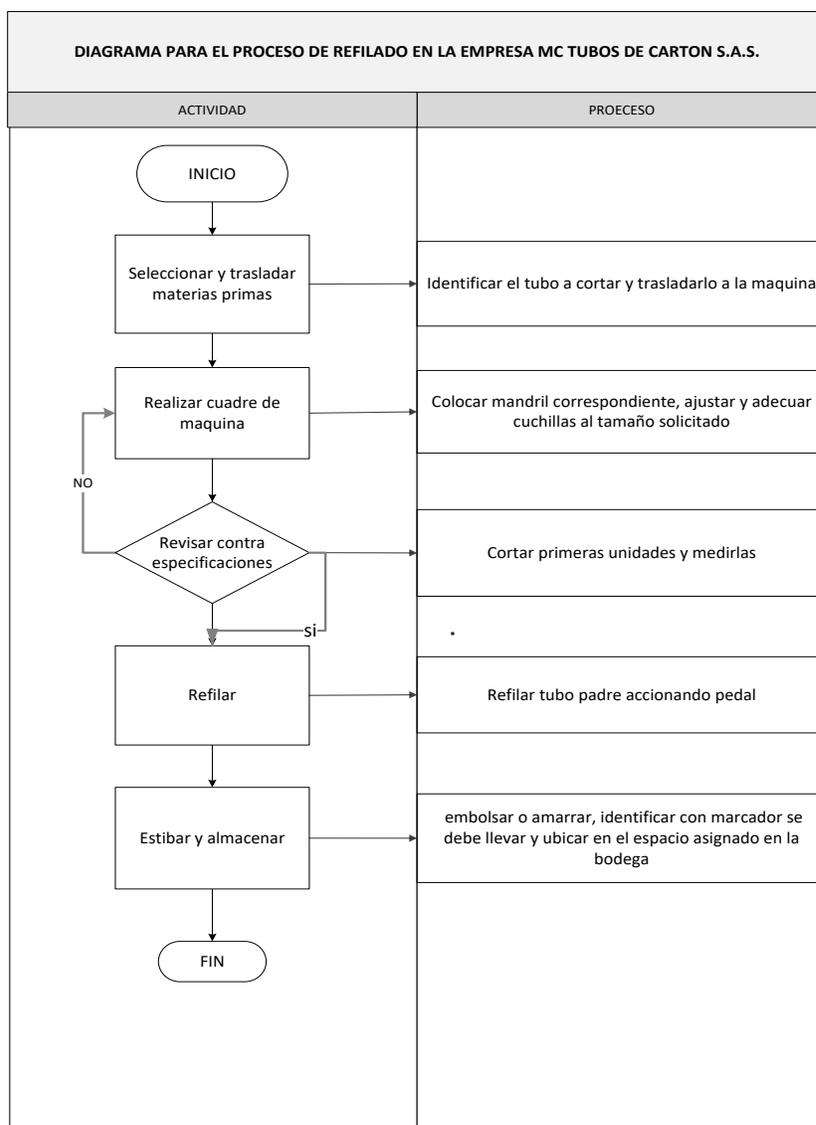


Figura 6. Diagrama de proceso para el refilado de los tubos de cartón. Elaboración propia.

6.1.6. Empaque.

En este proceso son empacados en bolsas todos los tubos que están en un rango de medida entre 16 y 32 cm y en diámetros de 27 a 40 mm, luego de este paso el operario cuenta, marca, sella y apila las bolsas en estibas en el área de producto terminado. En el caso de los tubos con diámetro mayor a 40 y hasta 101 mm, la unidad de empaque es de 10 tubos.

6.1.7. Distribución.

En este proceso los conductores y ayudantes, son los encargados de cargar los pedidos según corresponda. Cada pedido debe estar soportado por su respectiva remisión en la cual se encuentran los datos del cliente, así como las cantidades y referencias del producto. los pedidos son supervisados por el jefe inmediato quien es responsable de asegurar que el producto salga de la empresa en óptimas condiciones.

6.2. Diagnóstico del PQR (Petición, quejas y reclamos)

Según el diagnóstico realizado en Mc Tubos De Cartón SAS se encontraron veinte reclamos por parte del cliente, produciendo pérdidas económicas para la empresa. En la tabla 2, se encuentra detallado las referencias que han presentado algún tipo de reclamo, especificando la causa, el número de unidades rechazadas por el cliente y en la última columna, el costo de las unidades rechazadas por el cliente.

Tabla 2.

Reclamos presentados en el periodo de 2013 a mayo del 2018

Cliente	Referencia	Cantidad	Precio	Causa del reclamo	Costo
lactopack	1500X76,2X10MM	1000	\$ 5.290	Aplastamiento Lineal	\$4.943.925
Papeles y corrugados andina	2020X101X11,5MM	500	\$ 7.300	Aplastamiento Lineal	\$3.411.215
Papeles y corrugados andina	2020X101X11,5MM	400	\$ 9.095	Deterioro interno	\$3.400.000
lactopack	1500X76,2X10MM	300	\$ 5.819	Deterioro interno	\$1.631.495
Filmtex	1052X76,2X3MM	2000	\$ 780	Diámetro menor	\$1.457.944
Filmtex	1520X76,2X6MM	410	\$ 3.661	Deterioro interno	\$1.402.813
Filmtex	1042X76,2X6MM	500	\$ 2.973	Delaminación capas	\$1.389.252
Filmtex	1037X76,2X5MM	600	\$ 2.385	Longitud	\$1.337.383
Texsa de colombia	1150X60,8X2,3MM	800	\$ 1.173	Diámetro menor	\$877.009
Encajes de colombia	1550X76,2X1,9MM	2000	\$ 440	Diámetro Mayor	\$822.430
Filmtex	1300X76,2X10MM	150	\$ 4.418	Longitud	\$619.346
Empaque y cartones	1600X76,2X9,6MM	100	\$ 6.000	Diámetro menor	\$560.748
Empaque y cartones	1600X76,2X9,6MM	100	\$ 6.000	Diámetro mayor	\$560.748
Empaque y cartones	1600X76,2X9,6MM	100	\$ 6.000	Aplastamiento Lineal	\$560.748
Texsa de colombia	1150X60,8X2,3MM	500	\$ 1.173	Diámetro menor	\$548.131
Empaques minifilm	310X38X1,5MM	800	\$ 130	Aplastamiento Lineal	\$97.196
Coemflex	320X38X3MM	400	\$ 185	Aplastamiento Lineal	\$69.159
Coemflex	320X38X3MM	200	\$ 185	Aplastamiento Lineal	\$34.579
Coemflex	320X38X3MM	185	\$ 185	Aplastamiento Lineal	\$31.986
Coemflex	320X38X3MM	130	\$ 185	Aplastamiento Lineal	\$22.477
Total perdidas					\$23.778.584

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la información recolectada en la tabla 2, se analizan los datos por medio de un diagrama Pareto y el diagrama de espina de pescado, con el fin de conocer las posibles causas que generan el incumplimiento en las especificaciones. En la tabla 3, se relaciona las causas de los reclamos.

Tabla 3.

Relación de reclamos

Tipo de reclamo	
Aplastamiento lineal	1
Deterioro interno	2
Diámetro menor	3
Longitud	4
Delaminación	5
Diámetro mayor	6

Nota. Elaboración propia

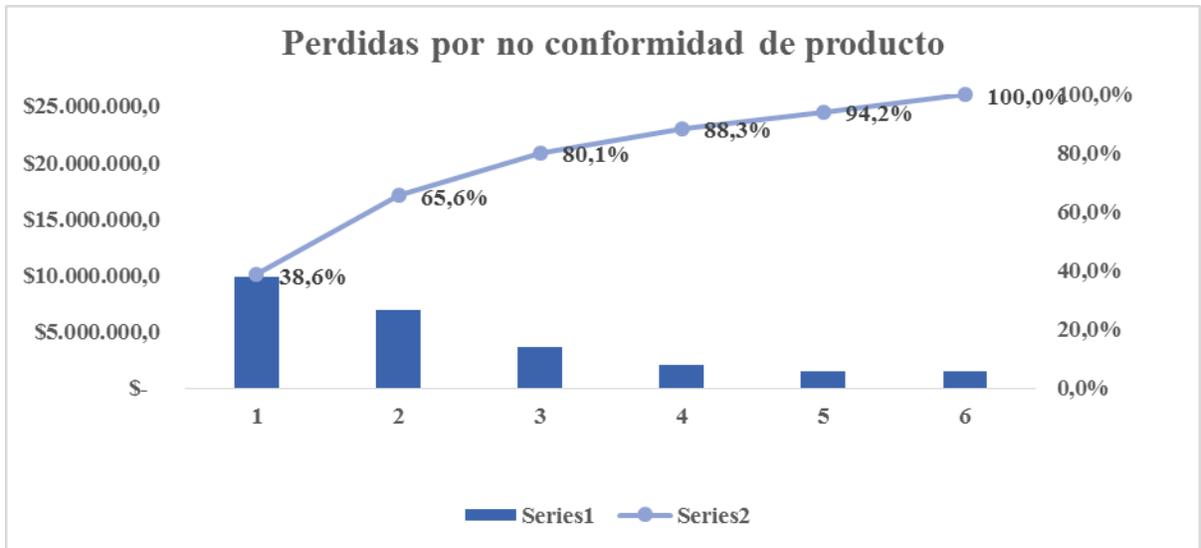


Figura 7. Análisis de causa raíz de los problemas presentados en los tubos de cartón. Elaboración propia.

En la figura 7, se observa que las pérdidas más representativas son por aplastamiento lineal, deterioro interno y diámetro menor, ocasionando devoluciones por un valor de \$19 049 425, siendo estas tres las causas principales que generan pérdidas económicas para la empresa; en el caso del diámetro mayor es importante la cantidad de devoluciones, pero el valor de la pérdida no alcanza el peso suficiente para ser evaluado. Después de evidenciar los problemas de incumplimiento en las especificaciones con mayor influencia, se realiza la lluvia de ideas en la empresa, dando a conocer por medio de un diagrama de espina de pescado las posibles causas al incumplimiento en las especificaciones del producto, como se muestra en las figuras 8, 9 y 10, respectivamente.

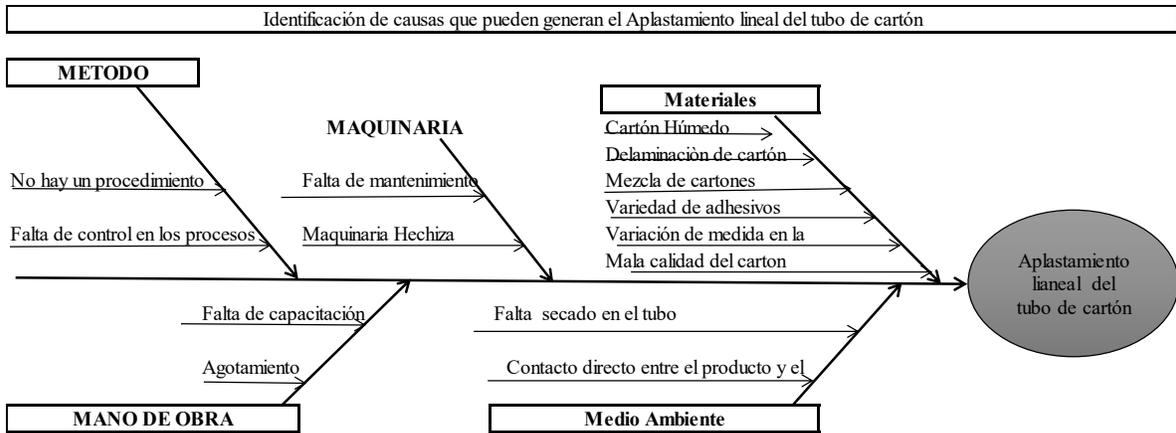


Figura 8. Identificación de las posibles causas generando problemas por aplastamiento lineal del tubo de cartón. Elaboración propia.

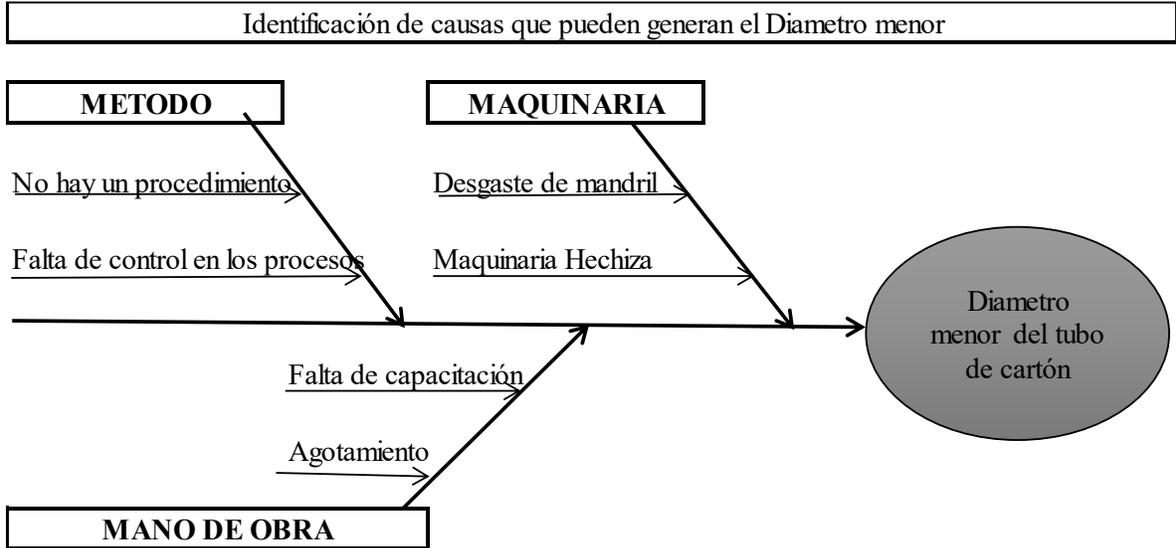


Figura 9. Identificación de las posibles causas generando problemas por diámetro interno del tubo de cartón. Elaboración propia.

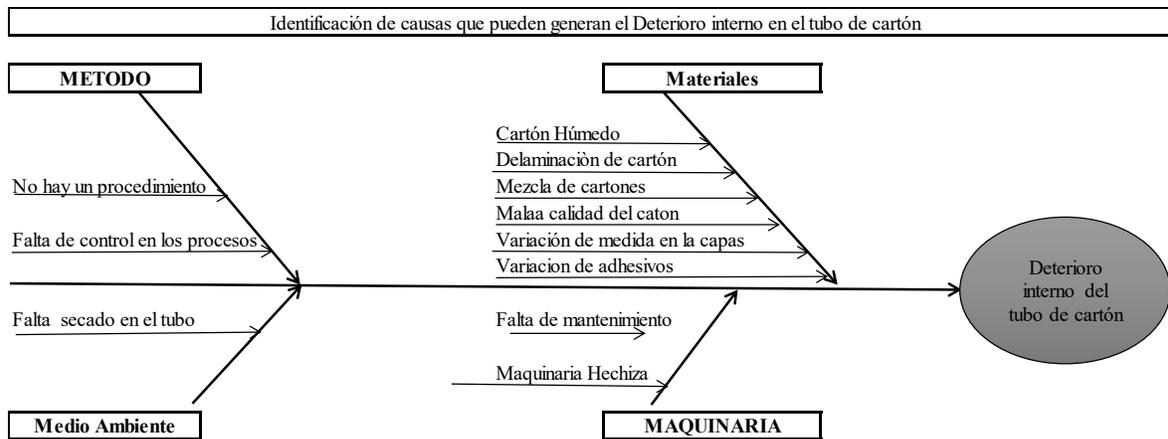


Figura 10. Identificación de las posibles causas generando problemas por diámetro menor del tubo de cartón. Elaboración propia.

Después de realizar los diagramas de espina de pescado, se puede observar varias similitudes, esto se debe a que estas causas fueron identificadas en el proceso de formado del tubo, sin embargo se realizan una serie de diagramas de Pareto con el objetivo de identificar cual puede ser el problema principal para no dar cumplimiento con las especificaciones de los tubos de cartón, en la tabla 4, se relacionan las referencias que han presentado algún tipo de reclamo, las cuales se identifican con las letras (A,B,C,D,E,F,G,H), con el fin de facilitar la lectura y comprensión del presente trabajo.

Tabla 4.

Referencias que presentan incumplimiento en las especificaciones

Referencias evaluadas	
2020X101X11,5MM	A
1500X76,2X10MM	B
1520X76,2X6MM	C
1052X76,2X3MM	D
1150X60,8X2,3MM	E
1600X76,2X9,6MM	F
310X38X1,5MM	G
320X38X3MM	H

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla 2, el problema de aplastamiento lineal lo presentan las referencias (A, B, F, G, H), así mismo el problema de deterioro interno lo presenta (A, B, C) y el problema del diámetro menor la referencia (D, E, F) ahora se quiere saber es cual(es) de estas referencias mencionadas en cada uno de los problemas son las más críticas.

Nota: Las referencias (C y D) no serán tenidas en cuenta en el siguiente análisis ya que los dueños de la empresa considerarán importante conocer los resultados de la resistencia al aplastamiento lineal sin pasar por este filtro.

El aplastamiento lineal es una forma en la que puede deteriorarse por la cantidad de peso o presión que realiza de manera vertical al tubo de cartón en posición lineal, generando una curva de deformación en el centro.

En el siguiente Pareto se presenta el consolidado de pérdidas agrupado por cada uno de los problemas presentados.

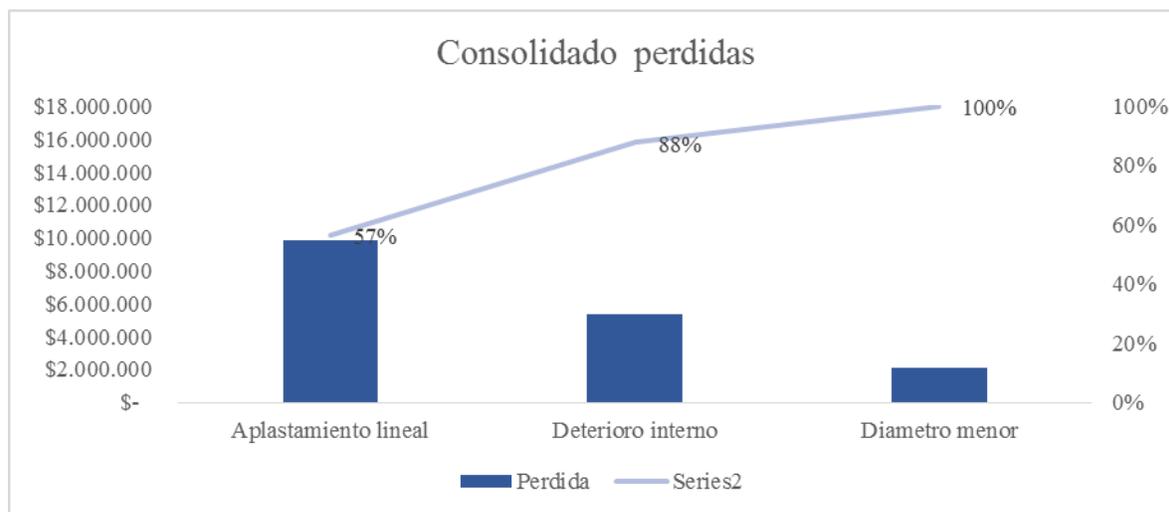


Figura 11. Consolidado de pérdidas agrupado. Elaboración propia.

En la figura 11, En el consolidado de pérdidas agrupado, se observa que el incumplimiento de especificaciones por aplastamiento lineal con las referencias (A y B) y deterioro interno con las referencias (A y B) tienen mayor porcentaje de incidencia en las pérdidas que ha tenido la empresa, siendo el 20% de las causas que ocasiona el 80% de las perdidas percibidas por la empresa.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se toma la decisión de enfocar el estudio estadístico de experimentos en la resistencia por aplastamiento lineal de las referencias críticas (A y B) ya que han representado a la empresa pérdidas por valor de \$ 9 813 275, lo que representa el 57% del total consolidado.

En la tabla 5, se muestran las referencias críticas seleccionadas para realizar el diseño experimental tomando en cuenta las referencias (C y D) ya estaban seleccionadas anteriormente.

Tabla 5.

Referencias seleccionadas para realizar el diseño experimental.

Referencia	Nombre
2020X101X11,5MM	A
1500X76,2X10MM	B
1520X76,2X6MM	C
1052X76,2X3MM	D

Nota. Elaboración propia.

6.3. Etapas de desarrollo del experimento

6.3.1. Identificación y exposición del problema.

Esta etapa de la identificación del problema se encuentra establecida de manera detallada en el literal llamado Diagnóstico. A partir del estudio realizado y tomando como referencia el periodo del 2013 a mayo del 2018, por medio de las peticiones, quejas y reclamos y la importancia que estas representan económicamente, se establece las cuatro referencias que requieren ser evaluadas, se presentan a continuación:

A= 2020 x 101 x 11,5 mm

B= 1500 x 76,2 x 10 mm

C= 1520 x 76,2 x 6 mm

D= 1052 x 76,2 x 3 mm

6.3.2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.

Para elegir los factores que se van a medir en este estudio, es necesario saber cuál es su composición:

El factor A, está compuesto por los porcentajes de cartón de los diferentes gramajes que se usan en cada referencia fabricada.

El factor B, está compuesto por los tres tipos de adhesivo que son usados para unir las capas de los tubos de cartón.

Con base en lo anterior, se definen los factores de diseño a evaluar:

Nota: Los porcentajes de cartón que debe llevar cada mezcla, ya se encuentran preestablecidos por la empresa.

Factor A: Mezclas de cartón. Es cada mezcla conformada por un porcentaje de participación de las capas de diferentes gramajes de cartón (ver tabla 6), dando como resultado el espesor de pared del tubo.

Tabla 6.

Tipos de cartón usados en la fabricación de los tubos.

Tipos de cartón		
Proveedor	Gr/m ²	Espesor/mm
Cartones América	135	0,2
Corrugados de Colombia	240	0,4
Cartonera pacifico	320	0,55
Cartonera pacifico	380	0,7
Cartones América	420	0,7
Cartones América	450	0,8
Indugevi	500	0,9

Nota. Elaboración propia.

En Mc Tubos De Cartón S.A.S las mezclas se establecen por las diferentes combinaciones en las capas de cartón y para su realización se deben tener en cuenta las siguientes restricciones:

La cantidad de capas en el tubo no puede ser más de quince, debido a la limitación existente de espacio.

La capa externa del tubo de cartón debe estar entre 100 y 200 gramos, con el fin de evitar desprendimiento de la capa, cuando el tubo es cortado por la sierra en el proceso de formado.

La tolerancia del espesor de pared debe ser de + o - el 5% como lo indica la Norma Técnica Colombiana NTC 1866.

Niveles del factor A para la referencia A. Para la referencia A, se definen cuatro niveles de acuerdo con la participación de cartón obtenida. Su composición se muestra en la tabla 7, donde se evidencia que para la mezcla uno, el mayor porcentaje en cartón es de 450 g, es decir, 98,25% del proveedor de Cartones América; para la mezcla dos en la tabla 8, el 94,74% de participación es del proveedor Indugevi con cartón de 500 g; en cuanto a la tercera mezcla, su composición es de 55,65% de cartón fabricado por Cartones América con cartón de 450g ver tabla 9, seguido de un papel de 500 g que brinda el proveedor Indugevi con el 39,13% y por último, la mezcla cuatro, está fabricado con papeles de 500 g y 380 g, con un porcentaje de 55,26% y 42,98% respectivamente ver tabla 10.

Tabla 7.

Composición de la mezcla 1 para la referencia A

Mezcla 1 Referencia A		
Gramaje	Proveedor	% participación
450	América	98,25%
135	América	1,75%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8.

Composición de la mezcla 2 para la referencia A

Mezcla 2 Referencia A		
Gramaje	Proveedor	% participación
240	Corrugados	3,51%
500	Indugevi	94,74%
135	América	1,75%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 9.

Composición de la mezcla 3 para la referencia A

Mezcla 3 Referencia A		
Gramaje	Proveedor	% participación
240	Corrugados	3,48%
450	América	55,65%
500	Indugevi	39,13%
135	América	1,74%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 10.

Composición de la mezcla 4 para la referencia A

Mezcla 4 Referencia A		
Gramaje	Proveedor	% participación
380	Corrugados	42,98%
500	Indugevi	55,27%
135	América	1,75%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Niveles del factor A para la referencia B. Para la referencia B, se definen cinco niveles de acuerdo con la participación de cartón obtenida. Para la mezcla uno, el 90% de la composición es de cartón de 500 g fabricado por el proveedor Indugevi como se muestra en la tabla 11; la mezcla dos tiene un 88,44% del cartón adquirido a Cartones América de 450 g ver tabla 12, la tercer mezcla tiene el 98% de 420 g fabricado por el proveedor Cartones América ver tabla 13; en cuanto a la mezcla cuatro, su composición está dada por el 63% y del 35% de cartones con 500 g y 420 g respectivamente ver tabla 14, para la quinta mezcla está compuesta por cartón de América con 49,50% y del Pacífico con 48,48% ver tabla 15.

Tabla 11.

Composición de la mezcla 1 para la referencia B.

Mezcla 1 Referencia B		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	2,00%
240	Corrugados	8,00%
500	Indugevi	90,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 12.

Composición de la mezcla 2 para la referencia B.

Mezcla 2 Referencia B		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	2,01%
240	Corrugados	4,02%
500	Pacífico	5,53%
450	América	88,44%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13.

Composición de la mezcla 3 para la referencia B.

Mezcla 3 Referencia B		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	2,00%
420	América	98,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 14.

Composición de la mezcla 4 para la referencia B.

Mezcla 4 Referencia B		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	2,00%
420	América	35,00%
500	Indugevi	63,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 15.

Composición de la mezcla 5 para la referencia B.

Mezcla 5 Referencia B		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	2,02%
420	América	49,50%
450	Pacífico	48,48%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Niveles del factor A para la referencia C. Para la referencia C, se definen cinco niveles de acuerdo con la participación de cartón obtenida y se presenta en las tablas (16 al 20), respectivamente; para la mezcla uno, su composición está dada por el 83,19% con cartón de 320 g; para la mezcla dos el 93,33% de cartón es de 450 g; la mezcla tres con el 90% de cartón de 500 g; el 80,99% de cartón de 420 g es para la mezcla cuatro y por último para la mezcla cinco, con el 61,02% de cartón de 500g el cual es suministrado por el proveedor Indugevi.

Tabla 16.

Composición de la mezcla 1 para la referencia C.

Mezcla 1 Referencia C		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	3,36%
240	Corrugados	13,45%
500	Pacífico	83,19%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17.

Composición de la mezcla 2 para la referencia C.

Mezcla 2 Referencia C		
Gramaje	Proveedor	% participación
450	América	93,33%
135	América	6,67%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 18.

Composición de la mezcla 3 para la referencia C.

Mezcla 3 Referencia C		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	3,33%
240	Corrugados	6,67%
500	Pacífico	90,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19.

Composición de la mezcla 4 para la referencia C.

Mezcla 4 Referencia C		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	3,31%
240	Corrugados	6,61%
320	Pacífico	9,09%
420	América	80,99%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 20.

Composición de la mezcla 5 para la referencia C.

Mezcla 5 Referencia C		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	3,33%
420	América	6,67%
500	Indugevi	90,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Niveles del factor A para la referencia D. Para la referencia D, se definen cinco niveles de acuerdo con la participación de cartón obtenida y se muestran en las tablas del 21 al 25, respectivamente. Las mezclas se diferencian por tener un gran porcentaje de participación de los diferentes cartones usados en la composición del tubo en el cual se esperan sean representativos para el estudio en particular.

Para la mezcla uno, el 93% es de 240 g del proveedor Corrugados de Colombia, en la mezcla dos el 93,22% es de cartón de 320 g del proveedor de Cartonera Pacifico; en cuanto a la mezcla tres su composición está dada con el 93,3% de cartón de 380 g, y el 80% de la fabricación de la mezcla cuatro cuenta con cartón de 450 g y por último la mezcla cinco que cuenta con el 93,10% de cartón de 500 g que suministra el proveedor Indugevi.

Tabla 21.

Composición de la mezcla 1 para la referencia D

Mezcla 1 Referencia D		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	7,00%
240	Corrugados	93,00%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 22.

Composición de la mezcla 2 para la referencia D

Mezcla 2 Referencia D		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	6,78%
320	Pacífico	93,22%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 23.

Composición de la mezcla 3 para la referencia D

Mezcla 3 Referencia D		
Gramaje	Proveedor	% participación
380	Pacífico	93,33%
135	América	6,67%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 24.

Composición de la mezcla 4 para la referencia D

Mezcla 4 Referencia D		
Gramaje	Proveedor	% participación
240	Corrugados	13,33%
450	América	80,00%
135	América	6,67%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 25.

Composición de la mezcla 5 para la referencia D

Mezcla 5 Referencia D		
Gramaje	Proveedor	% participación
135	América	6,90%
500	Indugevi	93,10%
Total		100,00%

Nota. Elaboración propia.

Factor B: Tipos de adhesivo. El factor B está conformado por tres tipos de adhesivo (PVA, Dextrina, Aserquim), donde cada uno de ellos es usado al 100% en cada una de las mezclas para observar su efecto.

Se destaca que los dos primeros adhesivos (PVA y Dextrina) son fabricados de forma artesanal por la empresa, sus componentes principales son el alcohol polivinílico y el Coragum BF respectivamente, en cuanto al Aserquim es suministrado por el proveedor Preflex.

Niveles del factor B. A continuación, se definen los niveles del factor B para cada una de las mezclas a evaluar en el experimento:

Nivel 1: PVA (alcohol polivinílico)

Nivel 2: Dextrina Coragum BF

Nivel 3: Aserquim

Una vez definidos los factores de diseño, se definen otros factores que deben ser tenidos en cuenta en los experimentos y los cuales se describen a continuación:

Factores Constantes. Método, Instrumento de medición, Experimentador, Longitud de la unidad experimental, Lote.

Factores No Constantes. Parámetros de calidad del proveedor

6.3.3. Factores de Ruido

6.3.3.1. Factores de Ruido Controlables. Medición, Calentamiento del instrumento de medición, Fatiga del experimentador.

6.3.3.2. Factores de Ruido No controlables. Condiciones ambientales, Humedad, Iluminación.

6.3.4. Selección de la variable de respuesta

6.3.4.1. Unidad experimental. La unidad experimental son las muestras de las referencias de los tubos que se van a evaluar en cada experimento.

6.3.4.2. Unidad de medida. La unidad de medida en la que se va a evaluar la resistencia al aplastamiento lineal es en lb/ in² en cada uno de los experimentos.

6.3.4.3. Variable de respuesta. La variable de respuesta que va a medir el efecto en los cuatro experimentos es la resistencia al aplastamiento lineal, según la Norma Técnica Colombiana NTC 1866.

6.3.5. Elección del diseño experimental.

Para fines de este estudio, el diseño que se va a desarrollar es de dos factores; de acuerdo con los factores de diseño elegidos anteriormente se define que para el factor (A); de acuerdo con la participación de cartón en la referencia (A) es de cuatro niveles; y para las referencias (B, C, D) de acuerdo a la participación de cartón es de cinco niveles cada una. En el caso del factor (B); de acuerdo con adhesivo usado en las referencias (A, B, C, D) es de tres niveles. El número de réplicas son cinco para cada uno de los tratamientos; las corridas se van a realizar de manera aleatorizada por medio del programa Minitab, el cual indica la secuencia que se debe seguir para realizar las pruebas de cada muestra, en este experimento no se requiere la formación de bloques porque no hay un factor que pueda afectar de manera significativa los datos obtenidos en el desarrollo del experimento.

6.3.6. Realización del experimento.

En el desarrollo del experimento se contó con número suficiente de probetas de las mezclas correspondientes a cada referencia, se verificó la exactitud y precisión del instrumento de medición y se realizaron las pruebas de ensayo para conocer posibles fallas en la ejecución del experimento evitando en lo posible imprevistos.

El experimentador en cada uno de los tratamientos de los experimentos fue el mismo, el ángulo en que realizó las mediciones se procuró que fuera el mismo, con el fin de minimizar posibles efectos perturbadores.

6.3.6.1. Instrumento de medición. El instrumento usado para realizar la prueba de aplastamiento lineal está compuesto por: Estructura metálica, gato mecánico y manómetro glicerina de 0-1500 Psi

6.3.6.2. Procedimiento. Esta prueba comienza, colocando de forma horizontal el tratamiento que va ser evaluado, posteriormente el experimentador le ejerce presión al gato mecánico por medio de una palanca, subiendo el embolo que lleva en su extremo una placa metálica, hasta atrapar el tratamiento que va ser sometido a la prueba, cuando el tratamiento se encuentra en este punto, el experimentador se ubica de tal forma que se pueda observar con mayor exactitud el manómetro, luego vuelve a la palanca del gato mecánico y comienza a ejercer presión de forma continua, de tal modo que la aguja del manómetro comience a indicar en psi la resistencia del tratamiento, la prueba termina cuando el tratamiento colapsa y la aguja del manómetro cae, en ese momento el experimentador toma la lectura que indica la resistencia del tratamiento evaluado ver figura 12.



Figura 12. Prueba de resistencia al aplastamiento lineal. Elaboración propia.

En el siguiente diagrama de flujo se describe la metodología usada para la ejecución del diseño estadístico de experimentos ver figura 13.

Metodología para la ejecución de un diseño estadístico

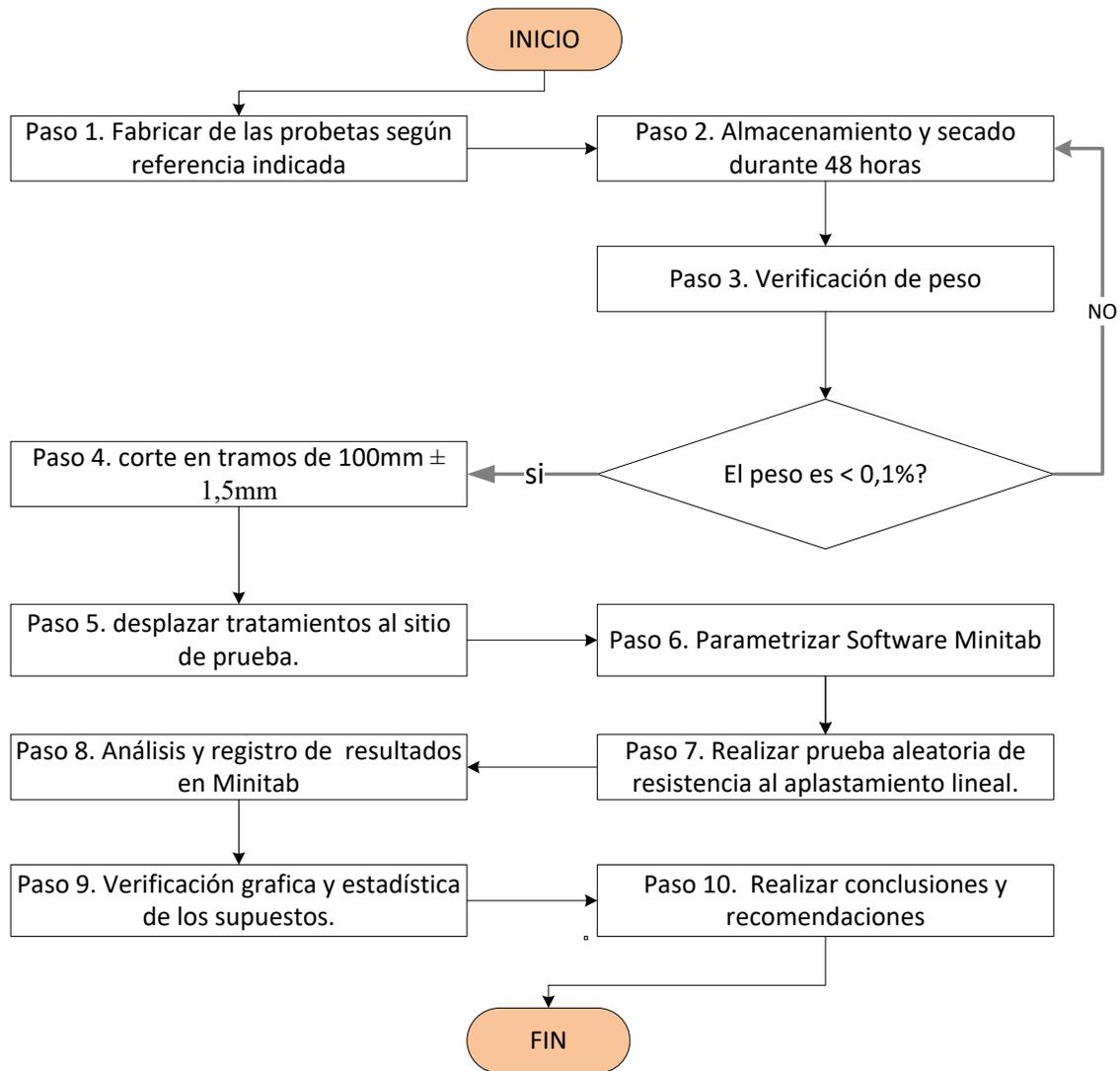


Figura 13. Diagrama de metodología usada en la ejecución de los experimentos. Elaboración propia.

Fabricación de las probetas para cada experimento con longitud de 100 cm y secado mínimo de 48 horas de acuerdo con especificaciones de diámetro y espesor de pared para cada una de las referencias.

Verificación de secado de probetas con variación de peso $< 0,1\%$ según NTC 1866.

Corte longitudinal de tratamientos = $100 \text{ mm} \pm 1,5\text{mm}$ según NTC 1976.

Prueba piloto de resistencia al aplastamiento para comprobar el óptimo funcionamiento del instrumento de medición.

Por medio del software Minitab se obtienen las mediciones que se deben hacer de forma aleatoria a los tratamientos.

Realizar prueba de resistencia al aplastamiento lineal y registro de resultados en Software Minitab.

Análisis de resultados por medio del software Minitab, evaluando los efectos principales de cada factor de estudio y las posibles interacciones de forma gráfica y estadística.

Realizar conclusiones y recomendaciones basadas en el análisis de los datos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los experimentos de las referencias evaluadas (A, B, C, D). Cada uno de estos resultados representan la resistencia medida en Psi, que obtuvo cada tratamiento en la prueba al aplastamiento lineal ver tabla 25, 26, 27 y 28, respectivamente.

Tabla 26.

Datos obtenidos en el experimento 1 de la referencia A

Factor B		Factor A			
		Mezclas			
		M 1	M2	M3	M4
Adhesivo	P1	230	210	220	200
		220	210	210	195
		240	230	230	185
		230	210	220	200
		230	230	230	190
	P2	330	290	295	280
		330	270	290	270
		320	280	310	290
		340	260	300	270
		330	270	300	270
P3	300	280	300	260	
	300	280	290	270	
	325	270	280	270	
	310	260	290	240	
		300	280	280	260

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 26, se encuentran los datos recolectados de los tratamientos que se realizaron en el experimento uno para la referencia A, en el cual está conformado por cuatro mezclas y tres adhesivos, cada uno con cinco réplicas.

Tabla 27.

Datos obtenidos en el experimento 2 de la referencia B

Referencia B						
Factor B	Factor A					
	Mezclas					
	M1	M2	M3	M4	M5	
Adhesivo	P1	230	250	300	250	250
		230	250	295	245	250
		225	245	280	235	245
		225	250	270	230	250
		225	250	290	240	250
	P2	240	270	310	270	265
		245	265	300	270	260
		250	250	310	270	260
		235	260	290	250	280
		255	260	280	260	260
	P3	225	240	280	255	255
		225	250	290	270	270
		230	240	285	240	270
		230	250	265	240	250
		225	250	270	260	255

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 27, se encuentran los datos obtenidos en el desarrollo del experimento dos para cada uno de los tratamientos para la referencia B, en el cual está conformado por cinco mezclas y tres adhesivos, cada uno con cinco réplicas.

Tabla 28.

Datos obtenidos en el experimento 3 de la referencia C

Referencia C					
Factor B	Factor A				
	Mezclas				
	M 1	M2	M3	M4	M5
P1	163	160	138	160	140
	172	150	138	145	140
	180	163	130	160	150
	183	160	140	150	140
	176	160	145	160	135
Adhesivo P2	178	180	150	162	138
	162	170	140	165	130
	170	162	130	170	140
	180	160	138	150	138
	170	170	140	150	130
P3	170	167	145	170	145
	165	165	140	160	140
	165	165	135	165	138
	170	170	140	160	140
	180	165	148	170	150

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 28, se encuentra los datos obtenidos en la ejecución del experimento 3 para la referencia C, que está conformado por cinco mezclas y tres adhesivos, cada uno con cinco réplicas.

Los datos obtenidos en la ejecución del experimento cuatro para la referencia D se puede evidenciar en la tabla 29, para la cual está conformada por cinco mezclas y tres adhesivos, con cinco réplicas cada uno.

Tabla 29.

Datos obtenidos en el experimento 4 de la referencia D.

Referencia D						
Factor B	Factor A					
	Mezclas					
	M 1	M2	M3	M4	M5	
Adhesivo	P1	39	39	36	31	29
		39	39	38	30	28
		39	37	38	30	30
		40	34	37	32	24
		41	37	39	30	29
	P2	40	32	38	32	30
		40	35	39	36	29
		40	32	36	38	28
		41	36	39	38	24
		40	35	37	34	30
P3	42	38	35	34	25	
	44	39	37	32	30	
	39	37	34	32	30	
	41	32	36	32	29	
	40	34	35	32	30	

Nota. Elaboración propia.

Capítulo 7. Análisis de los datos obtenidos en los experimentos

EXPERIMENTO # 1: Referencia 2020X101X11, 5 mm

Nota: Todo el análisis de los resultados de los experimentos se realizó con ayuda del software estadístico MINITAB®.

7.1. Experimento 1 para la referencia A

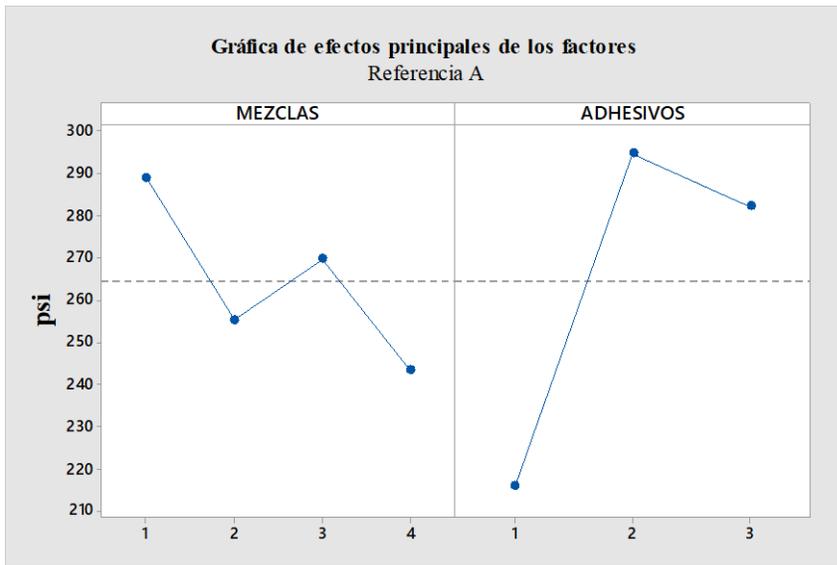


Figura 14. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.

En la figura 14, se observa que el factor mezcla y el factor adhesivo, aparentemente tienen efectos significativos en la resistencia al aplastamiento lineal. Para el factor A, la mezcla cuatro tiene el más bajo desempeño, mientras que la mezcla dos y tres tienen una resistencia promedio, en cuanto a la mezcla uno, es la que presentó mayor resistencia frente a las otras. En el caso de los adhesivos, se observa que el adhesivo uno, tiene la menor resistencia al aplastamiento lineal, en cambio el adhesivo dos y tres tienen un comportamiento similar.

A continuación, se presenta la interacción de los factores de la referencia A

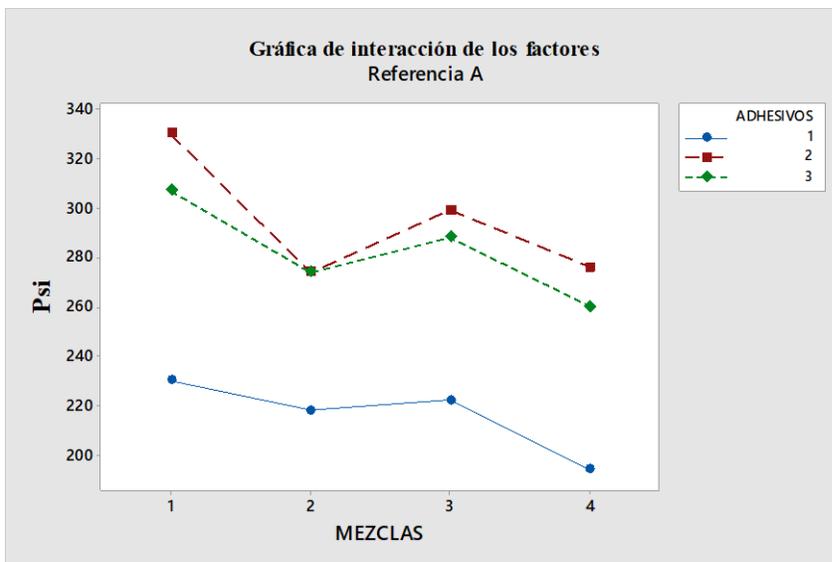


Figura 15. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.

En la figura 15, se puede observar que existe interacción entre los factores, siendo el adhesivo dos y tres los que presentan en promedio el mejor comportamiento en cuanto a la resistencia por aplastamiento lineal, en cambio el adhesivo uno, presenta el menor desempeño sin importar la mezcla que se utilice, pero si se requiere un mejor desempeño se recomienda utilizar el adhesivo dos en cualquier mezcla.

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto para ser analizado.

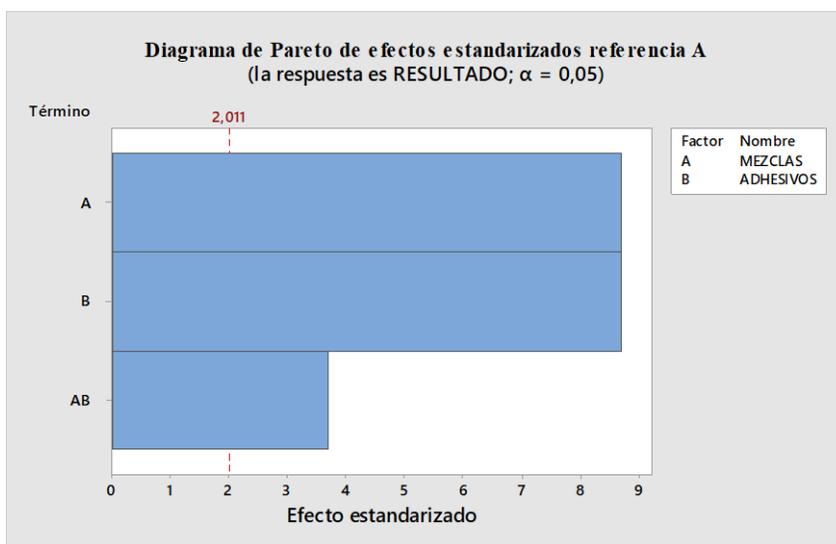


Figura 16. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.

En la figura 16, se observa la importancia de los efectos del factor mezcla y del factor adhesivo en la resistencia al aplastamiento lineal, sin embargo, el efecto de la interacción también es importante, pero no tanto como el efecto de los factores.

7.1.1. Análisis de la varianza.

A continuación, se presenta el modelo matemático (4) análisis de la varianza ANOVA por medio del cual explica la resistencia al aplastamiento lineal en función de los factores:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Dónde:

$$Y_{ijk} = \text{Representa cada una de las observaciones} \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5 \end{cases}$$

μ = Media general de las observaciones.

τ_i = Efecto del factor A $i = 1,2,3,4.$

β_j = Efecto del factor B $j = 1,2,3.$

$(\tau\beta)_{ij} = \text{Efecto de interacción del factor A y del factor B} \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \end{cases}$

$k = \text{Número de réplicas } k = 1,2,3,4,5$

$\varepsilon_{ijk} = \text{Error aleatorio} \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$

Se distribuyen en forma normal, media = 0 y varianza constante

Luego de definir las variables, se hace la comparación de cada factor y su interacción probando las hipótesis dadas:

Para el factor A la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0 \quad (5)$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i.$$

Para el factor B la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (6)$$

$$H_1 = \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j.$$

Para la interacción la hipótesis a probar es:

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j. \quad (7)$$

$$H_1 = (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos una } i \text{ y una } j.$$

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	91503	8318,5	98,10	0,000
Lineal	5	89029	17805,8	210,00	0,000
MEZCLAS	3	17383	5794,4	68,34	0,000
ADHESIVOS	2	71646	35822,9	422,48	0,000
Interacciones de 2 términos	6	2474	412,4	4,86	0,001
MEZCLAS*ADHESIVOS	6	2474	412,4	4,86	0,001
Error	48	4070	84,8		
Total	59	95573			

Figura 17. Análisis de varianza. Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de varianza que se pueden observar en la figura 17, se confirma que el factor A es estadísticamente significativo con una significancia del 5%, pues el valor p de la prueba es 0, siendo menor que la significancia, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

Para el factor B también es estadísticamente significativo, ya que el valor p de la prueba es 0, por tal motivo, se rechaza la hipótesis nula.

La interacción entre los dos factores estadísticamente muestra que es significativo porque el valor de p de la prueba es 0,001, así que es menor que la significancia, por eso, se rechaza la hipótesis nula.

7.1.2. Validación de supuestos.

Para tomar como válidas las conclusiones del experimento es necesario validar los supuestos sobre los errores del modelo ajustado, los errores o residuales son la diferencia entre el valor observado y el valor ajustado que genera el modelo. Para que el modelo ajustado sea válido se debe cumplir que:

Los errores son independientes

Los errores tienen una distribución normal con media de cero y varianza constante.

Inicialmente la validación se realizará de manera gráfica:

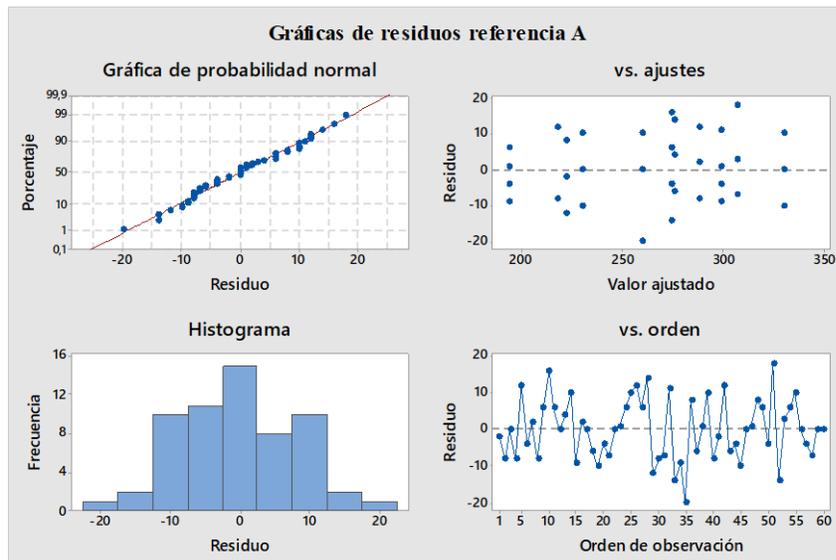


Figura 18. Gráfica de residuos referencia A. Elaboración propia.

7.1.3. Varianza constante.

Este supuesto se puede verificar con la figura 18, en la parte superior derecha de los residuos versus los valores ajustados, en esta se puede observar que los residuales se encuentran dentro de una franja horizontal, que es indicio de que la varianza es constante. No se observan patrones o tendencias crecientes o decrecientes, por lo tanto, se puede concluir que el supuesto de varianza constante se cumple.

7.1.3.1. Independencia. Este supuesto se puede verificar con la figura 18, en la parte inferior derecha de los residuos versus el orden de corrida, a partir de esta figura se puede ver que la secuencia de residuales se mueve de manera aleatoria alrededor de cero, no hay rachas de puntos, patrones o tendencias, por lo tanto, se puede concluir a partir de esta figura que los residuales son independientes y que tienen una media de cero.

7.1.3.2. Normalidad. La normalidad se puede verificar con las dos gráficas de la izquierda que se encuentran en la figura 18, en la parte inferior izquierda se puede observar el histograma de los errores, que se parece mucho a la forma normal (campana de gauss), por lo tanto, se cumple este supuesto y en todo caso en análisis de varianza es válido aun cuando la normalidad no es perfecta, pero está cerca de serlo. De igual manera con la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) se observa que los puntos si se ajustan a la línea de regresión con pequeñas desviaciones, por lo tanto, se puede decir que el supuesto de normalidad aparentemente se cumple de manera aceptable.

Para comprobar el supuesto de normalidad, se emplea la fórmula 16 de regresión donde el residual asociado a la observación y_{ijk} esta dado por:

$$e_{ijk} = Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \quad (16)$$

Dónde:

$$\begin{aligned}
 e_{ijk} &= \text{Error experimental} && \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\
 Y_{ijk} &= \text{Representa cada una de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\
 \bar{Y}_{ij} &= \text{Promedio de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \end{cases}
 \end{aligned}$$

A continuación, se realiza el cálculo y validación de residuales para la referencia A, para lo cual se evidencia en la figura 19 y 20.

Mezclas			
A1	A2	A3	A4
24,67	-9	5,33	-21

Adhesivos		
B1	B2	B3
-48,33	30,42	17,92

Interacciones											
AB11	AB12	AB13	AB21	AB22	AB23	AB31	AB32	AB33	AB41	AB42	AB43
-10,67	10,58	0,08	11	-11,75	0,75	0,67	-1,08	0,42	-1	2,25	-1,25

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij}=Y_{ij} - \bar{Y}_i$									
230	230	0	210	218	-8	220	222	-2	200	194	6
220	230	-10	210	218	-8	210	222	-12	195	194	1
240	230	10	230	218	12	230	222	8	185	194	-9
230	230	0	210	218	-8	220	222	-2	200	194	6
230	230	0	230	218	12	230	222	8	190	194	-4
330	330	0	290	274	16	295	299	-4	280	276	4
330	330	0	270	274	-4	290	299	-9	270	276	-6
320	330	-10	280	274	6	310	299	11	290	276	14
340	330	10	260	274	-14	300	299	1	270	276	-6
330	330	0	270	274	-4	300	299	1	270	276	-6
300	307	-7	280	274	6	300	288	12	260	260	0
300	307	-7	280	274	6	290	288	2	270	260	10
325	307	18	270	274	-4	280	288	-8	270	260	10
310	307	3	260	274	-14	290	288	2	240	260	-20
300	307	-7	280	274	6	280	288	-8	260	260	0

Figura 19. Residuales. Elaboración propia.

A partir de los residuos obtenidos, se realiza la prueba de Anderson Darling para comprobar la normalidad de los datos. Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las gráficas anteriores, por lo tanto se hace la comparación probando las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha=5\%$.

$$H_0 = \text{Los datos proceden de una distribución normal} \quad (17)$$

$$H_1 = \text{Los datos no proceden de una distribución normal}$$

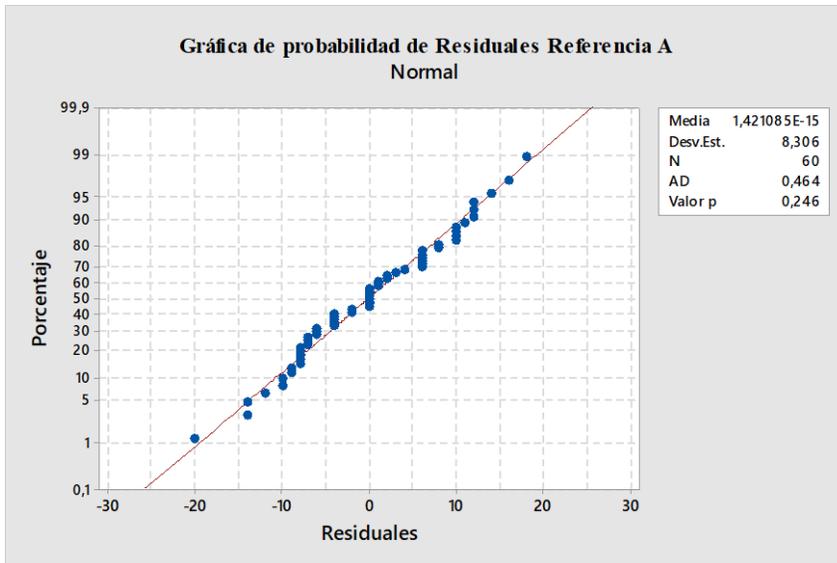


Figura 20. Gráfica de probabilidad de residuos. Elaboración propia.

A partir de estos resultados, con una significancia del 5%, los datos proceden de una distribución normal, pues el valor p de la prueba es 24,6% por lo tanto, se aprueba la hipótesis nula.

EXPERIMENTO # 2: Referencia 1500X76, 2X10 mm

Nota: Todo el análisis de los resultados de los experimentos se realizó con ayuda del software estadístico MINITAB®.

7.2. Experimento 2 de la referencia B

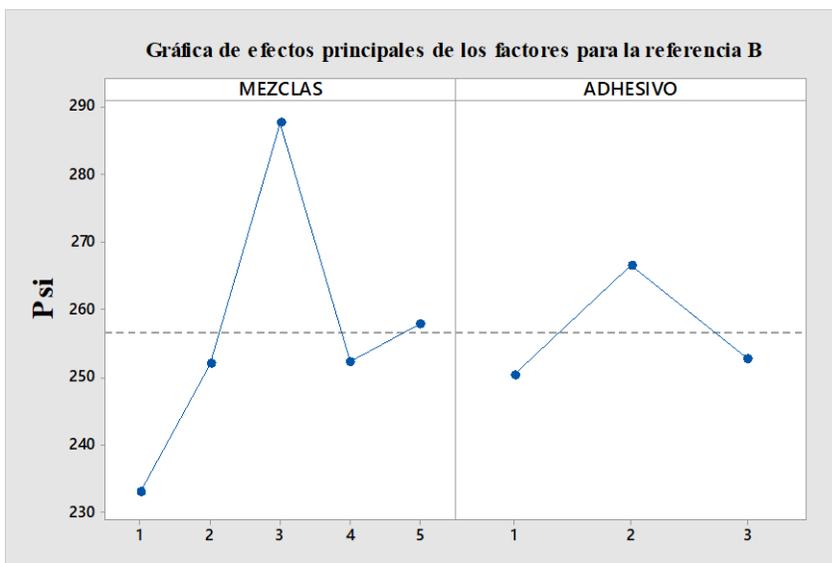


Figura 21. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.

En la figura 21, se puede evidenciar que los factores aparentemente son significativos. Para el factor A, las mezclas dos, cuatro y cinco tienen un desempeño promedio, en cuanto a

la mezcla uno su desempeño es el más bajo y la mezcla tres se puede decir que tiene el mejor desempeño en la resistencia al aplastamiento lineal. Con respecto al adhesivo uno y tres presentan una resistencia promedio, pero el adhesivo dos tiene un mejor comportamiento.

A continuación, se presenta la interacción de los factores:

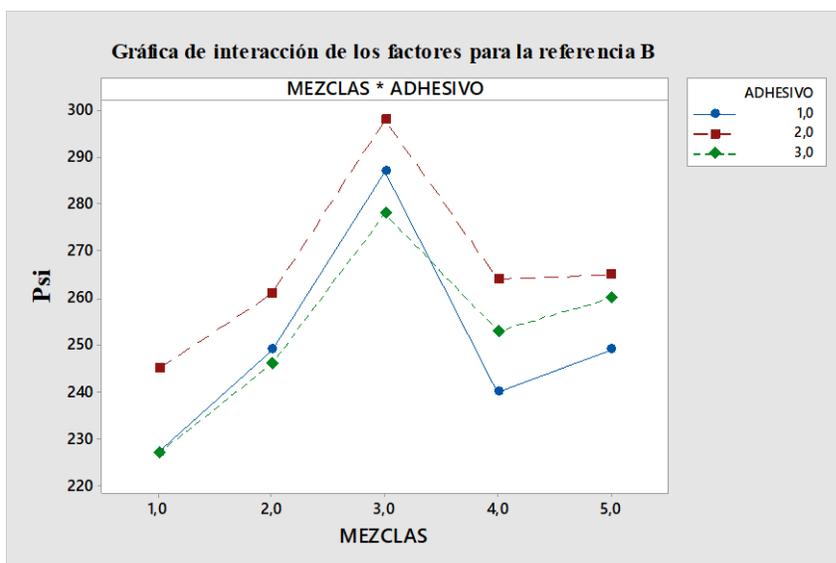


Figura 22. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.

En la figura 22, se puede observar que existe interacción entre los factores, ya que se cruzan en diferentes puntos. En cuanto al factor B, el adhesivo dos presenta el mejor desempeño sin importar la mezcla que se utilice, sin embargo, su mayor desempeño se logra con la mezcla tres. Si se quiere evaluar los otros dos adhesivos en cada una de las mezclas sin tener en consideración el adhesivo dos, se puede concluir que para las mezclas uno y dos presentan una resistencia promedio, para lo cual se puede utilizar cualquiera de los dos adhesivos, en cuanto a la mezcla tres presenta mejor desempeño con el adhesivo uno y para las mezclas cuatro y cinco el mejor desempeño se da con el adhesivo tres.

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto para ser analizado.

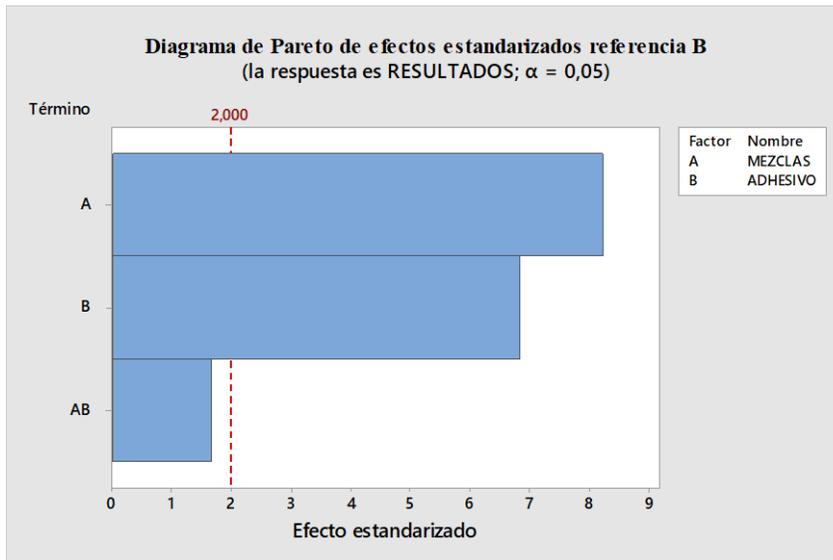


Figura 23. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.

En la figura 23, el diagrama de Pareto muestra que el efecto del factor A y B son significativos en la resistencia al aplastamiento lineal, pero el efecto de la interacción aparentemente no es tan significativo como el efecto de los factores.

7.2.1. Análisis de la varianza.

A continuación, se presenta el modelo matemático (4) análisis de la varianza ANOVA por medio del cual se quiere conocer el posible efecto de los factores y la posible interacción que pueden presentar.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Dónde:

$$Y_{ijk} = \text{Representa cada una de las observaciones} \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5 \end{cases}$$

μ = Media general de las observaciones.

τ_i = Efecto del factor A $i = 1,2,3,4.$

β_j = Efecto del factor B $j = 1,2,3.$

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de interacción del factor A y del factor B $\begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \end{cases}$

k = Número de réplicas $k = 1,2,3,4,5$

$$\varepsilon_{ijk} = \text{Error aleatorio} \begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$$

Se distribuyen en forma normal, media = 0 y varianza constante

Luego de definir las variables, se hace la comparación de cada factor y su interacción probando las hipótesis dadas:

Para el factor A la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0 \quad (5)$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i.$$

Para el factor B la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (6)$$

$$H_1 = \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j.$$

Para la interacción la hipótesis a probar es:

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j. \quad (7)$$

$$H_1 = (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos una } i \text{ y una } j.$$

Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las figuras de efectos principales, efecto de interacción y el diagrama de Pareto, para lo cual, se generan las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	28278	2019,86	28,32	0,000
Lineal	6	27273	4545,56	63,72	0,000
MEZCLAS	4	23451	5862,83	82,19	0,000
ADHESIVO	2	3822	1911,00	26,79	0,000
Interacciones de 2 términos	8	1005	125,58	1,76	0,103
MEZCLAS*ADHESIVO	8	1005	125,58	1,76	0,103
Error	60	4280	71,33		
Total	74	32558			

Figura 24. Análisis de varianza. Elaboración propia.

A partir de estos resultados obtenidos en la figura 24, se confirma que el factor A es estadísticamente significativo para la resistencia de la referencia B, con una significancia del 5%, pues el valor p de la prueba es 0 siendo menor que la significancia, por esto se puede rechazar la hipótesis nula.

En cuanto al factor adhesivo, se puede comprobar estadísticamente que con una significancia del 5%, y el valor p de la prueba es 0, por lo tal motivo se rechaza la hipótesis nula.

En cuanto a la interacción, se puede comprobar estadísticamente que con significancia del 5%, y el valor p de la prueba es de un 10,3%, se acepta la hipótesis nula.

7.2.2. Validación de los supuestos.

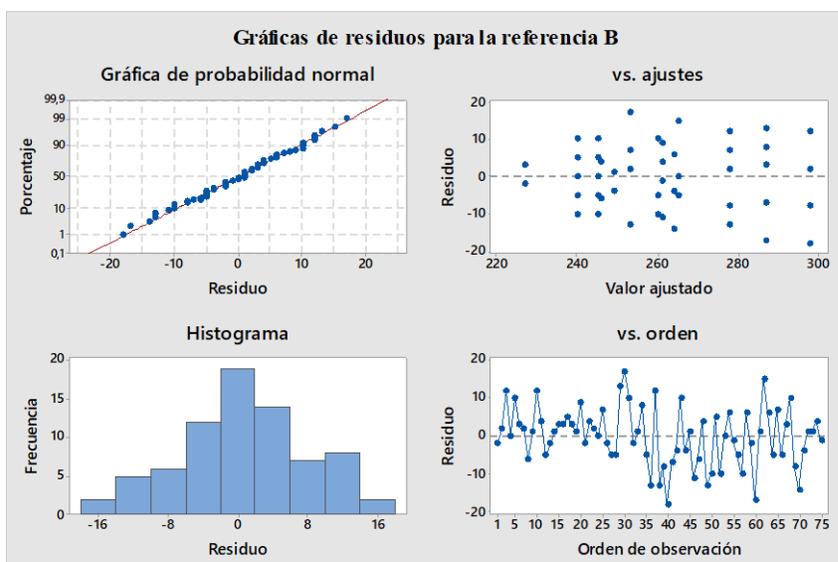


Figura 25. Figura de residuos. Elaboración propia.

7.2.3. Varianza constante.

Este supuesto se puede verificar con la figura 25, en la parte superior derecha de los residuos versus los valores ajustados, en esta se puede observar que los residuales se encuentran dentro de una franja horizontal, que es indicio de que la varianza es constante. No se observan patrones o tendencias crecientes o decrecientes, por lo tanto, se puede concluir que el supuesto de varianza constante se cumple.

7.2.3.1. Independencia. Este supuesto se puede verificar con la figura 25 inferior derecha de los residuos versus el orden de corrida, a partir de esta gráfica se puede ver que la secuencia de residuales se mueve de manera aleatoria alrededor de cero, no hay rachas de puntos, patrones o tendencias, por lo tanto, se puede concluir a partir de esta gráfica que los residuales son independientes y que tienen una media de cero.

7.2.3.2. Normalidad. La normalidad se puede verificar con las dos gráficas de la izquierda presentadas en la figura 25, en la parte inferior izquierda se puede observar el histograma de los errores, forma normal (campana de gauss), no se viola este supuesto. De igual manera

con la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) se observa que, aunque algunos puntos en los extremos están dispersos, se ajustan a la línea de regresión, por lo tanto, se puede decir que el supuesto de normalidad se cumple.

Para comprobar el supuesto de normalidad, se emplea la fórmula de regresión donde el residual asociado a la observación y_{ij} esta dado por:

$$e_{ijk} = Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \tag{16}$$

Dónde:

$$e_{ijk} = \text{Error experimental} \quad \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$$

$$Y_{ijk} = \text{Representa cada una de las observaciones} \quad \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$$

$$\bar{Y}_{ij} = \text{Promedio de las observaciones} \quad \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \end{cases}$$

A continuación, se realiza el cálculo y validación de residuales para la referencia B

Mezclas				
A1	A2	A3	A4	A5
-23,6	-4,6	31,07	-4,27	1,4

Adhesivos		
B1	B2	B3
-6,2	10	-3,8

Interacciones														
AB11	AB12	AB13	AB21	AB22	AB23	AB31	AB32	AB33	AB41	AB42	AB43	AB51	AB52	AB53
0,2	2	-2,2	3,2	-1	-2,2	5,53	0,33	-5,87	-6,13	1,67	4,47	-2,8	-3	5,8

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij=V_{ij}} - \bar{y}_i$
230	227	3
230	227	3
225	227	-2
225	227	-2
225	227	-2
240	245	-5
245	245	0
250	245	5
235	245	-10
255	245	10
225	227	-2
225	227	-2
230	227	3
230	227	3
225	227	-2

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij=V_{ij}} - \bar{y}_i$
250	249	1
250	249	1
245	249	-4
250	249	1
250	249	1
270	261	9
265	261	4
250	261	-11
260	261	-1
260	261	-1
240	246	-6
250	246	4
240	246	-6
250	246	4
250	246	4

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij=V_{ij}} - \bar{y}_i$
300	287	13
295	287	8
280	287	-7
270	287	-17
290	287	3
310	298	12
300	298	2
310	298	12
290	298	-8
280	298	-18
280	278	2
290	278	12
285	278	7
265	278	-13
270	278	-8

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij=V_{ij}} - \bar{y}_i$
250	240	10
245	240	5
235	240	-5
230	240	-10
240	240	0
270	264	6
270	264	6
270	264	6
250	264	-14
260	264	-4
255	253	2
270	253	17
240	253	-13
240	253	-13
260	253	7

Y_{ij}	\bar{Y}_i	$e_{ij=V_{ij}}$
250	249	1
250	249	1
245	249	-4
250	249	1
250	249	1
265	265	0
260	265	-5
260	265	-5
260	265	-5
280	265	15
260	265	-5
255	260	-5
270	260	10
270	260	10
250	260	-10
255	260	-5

Figura 26. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.

A partir de los residuos obtenidos, se realiza la prueba de Anderson Darling para comprobar la normalidad de los datos. Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron gráficamente sobre la normalidad, por lo tanto, se hace la comparación probando las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha=5\%$.

$H_0 =$ Los datos proceden de una distribución normal (17)

$H_1 =$ Los datos no proceden de una distribución normal

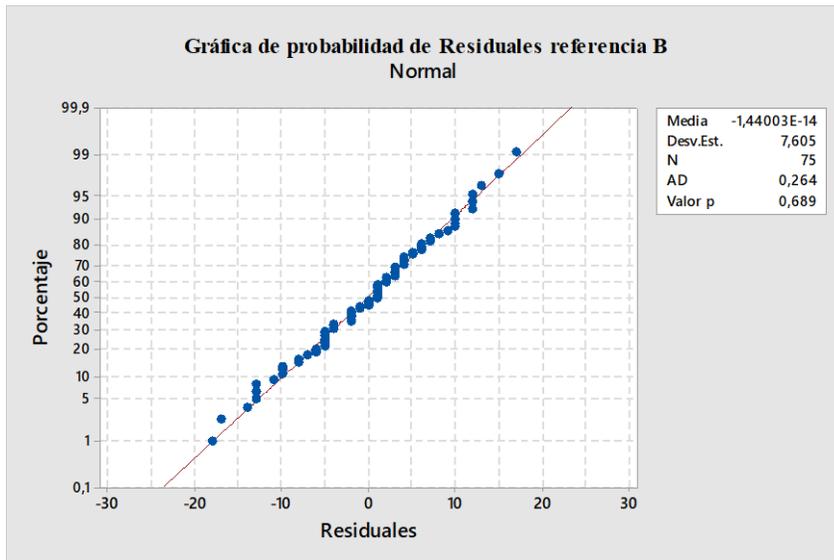


Figura 27. Gráfica de probabilidad de residuos. Elaboración propia.

A partir de estos resultados se confirma que con una significancia del 5%, los datos de la referencia B, proceden de una distribución normal, pues el valor p de la prueba es 68,9% por lo tanto, se aprueba la hipótesis nula.

Conclusión: En general vemos que se cumplen todos los supuestos, por lo tanto, las conclusiones enunciadas a partir del análisis gráfico y el análisis de varianza son válidas.

EXPERIMENTO # 3: Referencia 1520X76, 2X6 mm

Nota: Todo el análisis de los resultados de los experimentos se realizó con ayuda del software estadístico MINITAB®.

7.3. Experimento 3 de la referencia C

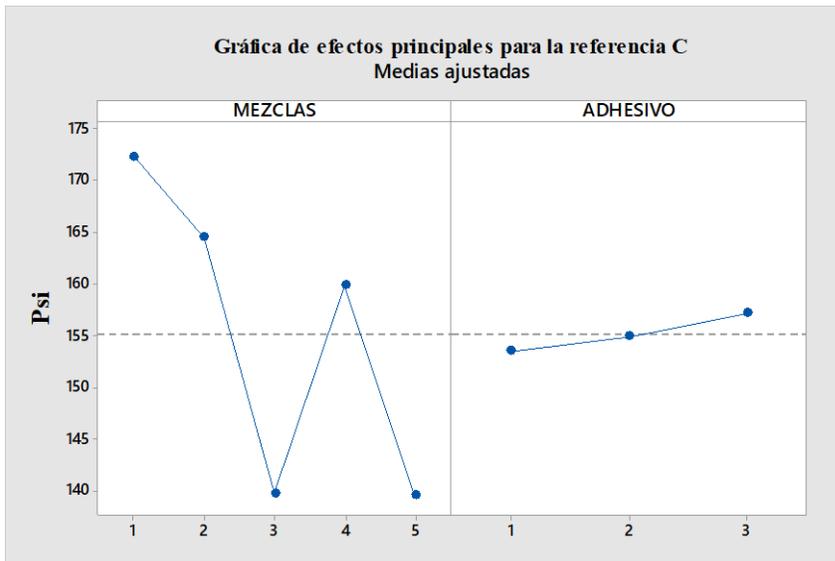


Figura 28. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.

En la figura 28 se muestra la gráfica de los efectos principales en la cual se observa los efectos significativos de los factores principales. En el factor A, la mezcla uno presenta el mejor comportamiento a la resistencia al aplastamiento lineal, seguido de las mezclas dos y cuatro con una resistencia promedio y para las referencias tres y cinco presentan el desempeño más bajo de todas las mezclas. En cambio, para el factor B tiene un comportamiento similar entre los tres adhesivos, para escoger alguno de los tres adhesivos se basará en otros criterios, como por ejemplo el costo.

A continuación, se presenta el análisis de la interacción de los factores.

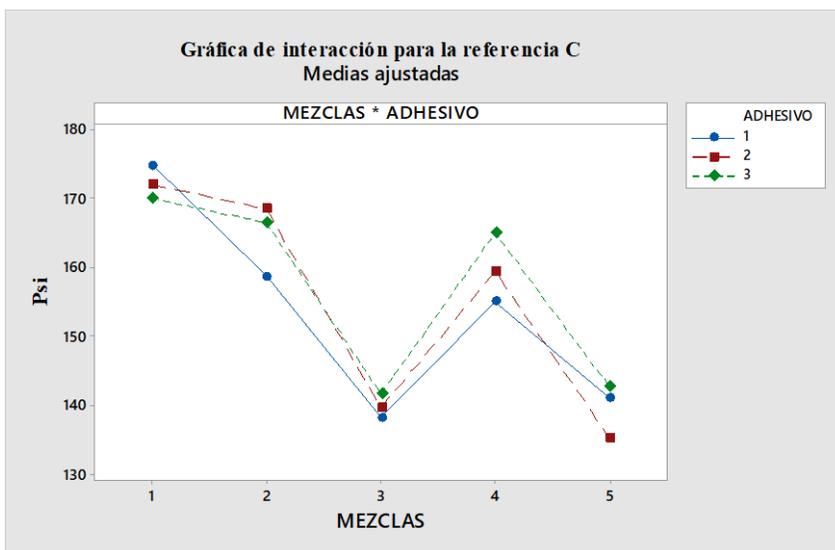


Figura 29. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.

En la figura 29, se observa que existe una interacción entre el factor mezcla y el factor adhesivo, pues existe un cruce entre las líneas de interacción. Para el factor A, la mezcla uno y tres presentan un desempeño similar entre los tres adhesivos, para la mezcla dos tiene un mejor desempeño con el adhesivo dos, en cambio, para la mezcla cuatro el adhesivo que presenta mejor desempeño es el tres y, por último, para la mezcla cinco, presenta un comportamiento a la resistencia por aplastamiento lineal similar con los adhesivos uno y tres.

Considerando la similitud de los adhesivos en cualquiera de las mezclas aun presentándose interacción entre ellos, se puede sospechar que esto no incide en la resistencia al aplastamiento lineal.

A continuación, se analiza en la figura 30 se presenta el diagrama de Pareto de los efectos de los factores

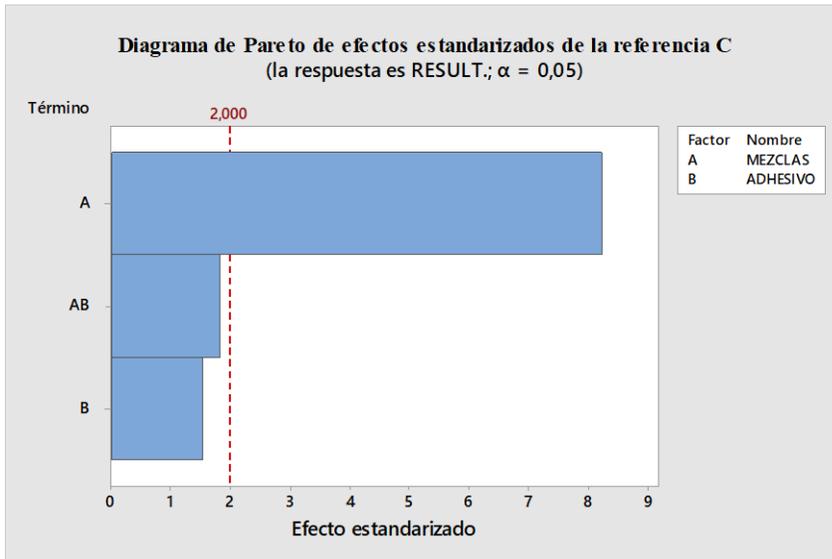


Figura 30. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.

En la figura 30 del diagrama de Pareto, se observa que el factor A es el más significativo en cuanto a la resistencia por aplastamiento lineal, en cambio para la interacción de los factores se puede ver que está muy cerca de ser significativa pero no lo es, al igual que el efecto del factor B.

7.3.1. Análisis de la varianza.

A continuación, se presenta el modelo matemático (4) análisis de la varianza ANOVA por medio del cual se quiere conocer el posible efecto de los factores y la posible interacción que pueden presentar.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Dónde:

Y_{ijk} = Representa cada una de las observaciones $\begin{cases} i = 1,2,3,4. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5 \end{cases}$

μ = Media general de las observaciones.

τ_i = Efecto del factor A $i = 1,2,3,4,5.$

β_j = Efecto del factor B $j = 1,2,3.$

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de interacción del factor A y del factor B $\begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \end{cases}$

k = Número de réplicas $k = 1,2,3,4,5$

ε_{ijk} = Error aleatorio $\begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$

Se distribuyen en forma normal, media = 0 y varianza constante

Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las gráficas anteriores por lo tanto se generan las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

Para el factor A la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0 \quad (5)$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i.$$

Para el factor B la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (6)$$

$$H_1 = \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j.$$

Para la interacción la hipótesis a probar es:

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j. \quad (7)$$

$$H_1 = (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos una } i \text{ y una } j.$$

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	13940,6	995,76	25,68	0,000
Lineal	6	13347,0	2224,50	57,36	0,000
MEZCLAS	4	13182,3	3295,58	84,98	0,000
ADHESIVOS	2	164,7	82,33	2,12	0,129
Interacciones de 2 términos	8	593,6	74,20	1,91	0,074
MEZCLAS*ADHESIVOS	8	593,6	74,20	1,91	0,074
Error	60	2326,8	38,78		
Total	74	16267,4			

Figura 31. Análisis de varianza. Elaboración propia.

A partir de estos resultados obtenidos en el análisis de varianza en la figura 31, se confirma que el factor A es estadísticamente significativo para la resistencia de la referencia C con una significancia del 5%, pues el valor p de la prueba es 0, que es menor que la significancia, por lo tanto, se puede rechazar la hipótesis nula.

En cuanto al factor adhesivo, se puede comprobar estadísticamente que con una significancia del 5%, y el valor p de la prueba es de un 12,9%, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

En cuanto a la interacción, se puede comprobar estadísticamente que con una significancia del 5%, y el valor p de la prueba es de un 7,4 %, se acepta la hipótesis nula.

7.3.2. Validación de supuestos.

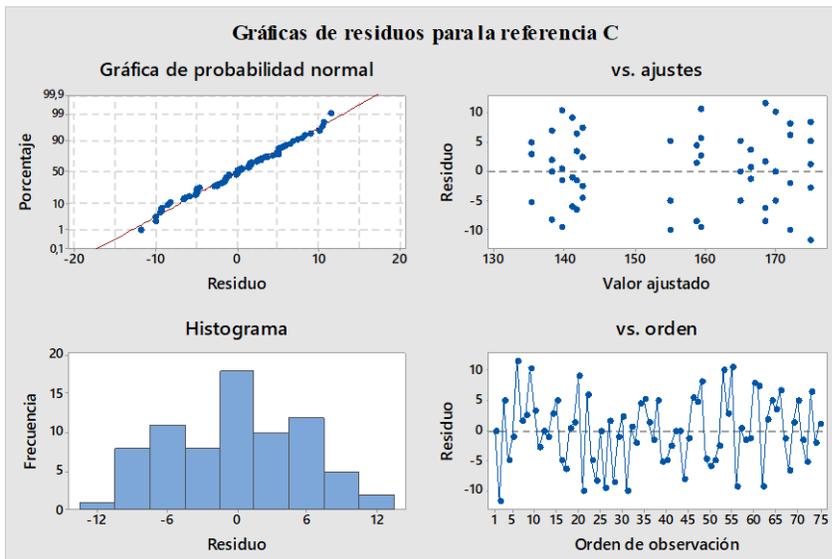


Figura 32. Gráficas de residuos. Elaboración propia.

7.3.3. Varianza constante.

Este supuesto se puede verificar en la figura 32 con la gráfica superior derecha de los residuos versus los valores ajustados, en esta se puede observar que los residuales se encuentran dentro de una franja horizontal, que es indicio de que la varianza es contante. No se observan patrones o tendencias crecientes o decrecientes, por lo tanto, se puede concluir que el supuesto de varianza constante se cumple.

7.3.3.1. Independencia. Este supuesto se puede verificar en la figura 32 con la gráfica inferior derecha de los residuos versus el orden de corrida, a partir de esta gráfica se puede ver que la secuencia de residuales se mueve de manera aleatoria alrededor de cero, no hay rachas de puntos, patrones o tendencias, por lo tanto, se puede concluir a partir de esta gráfica que los residuales son independientes y que tienen una media de cero.

7.3.3.2. Normalidad. La normalidad se puede verificar con las dos gráficas de la izquierda, en la parte inferior izquierda de la figura 32, se puede observar el histograma de los errores, que la forma normal (campana de gauss) es muy parecida, por lo tanto, no se viola este supuesto. De igual manera con la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) se observa que los puntos se ajustan a la línea de regresión, por lo tanto, se puede decir que el supuesto de normalidad también se cumple.

Para comprobar el supuesto de normalidad, se emplea la fórmula 16 de regresión donde el residual asociado a la observación y_{ij} esta dado por:

$$e_{ijk} = Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \quad (16)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} e_{ijk} &= \text{Error experimental} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\ Y_{ijk} &= \text{Representa cada una de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\ \bar{Y}_{ij} &= \text{Promedio de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \end{cases} \end{aligned}$$

A continuación, se realiza el cálculo y validación de residuales para la referencia C

Mezclas				
A1	A2	A3	A4	A5
17,08	9,28	-15,39	4,61	-15,59

Adhesivos		
B1	B2	B3
-1,67	-0,27	1,93

Interacciones														
AB11	AB12	AB13	AB21	AB22	AB23	AB31	AB32	AB33	AB41	AB42	AB43	AB51	AB52	AB53
4,2	0	-4,2	-4,2	4,2	0	0,07	0,07	-0,13	-3,13	0,13	3,27	3,07	-4,13	1,07

Y_{ij}	$\bar{Y}_{.j}$	$e_{ij}=y_{ij}-\bar{y}_{.j}$												
163	175	-11,8	160	159	1,4	138	138	-0,2	160	155	5,0	140	141	-1,0
172	175	-2,8	150	159	-8,6	138	138	-0,2	145	155	-10,0	140	141	-1,0
180	175	5,2	163	159	4,4	130	138	-8,2	160	155	5,0	150	141	9,0
183	175	8,2	160	159	1,4	140	138	1,8	150	155	-5,0	140	141	-1,0
176	175	1,2	160	159	1,4	145	138	6,8	160	155	5,0	135	141	-6,0
178	172	6,0	180	168	11,6	150	140	10,4	162	160	2,3	138	135	2,8
162	172	-10,0	170	168	1,6	140	140	0,4	165	160	5,3	130	135	-5,2
170	172	-2,0	162	168	-6,4	130	140	-9,6	170	160	10,3	140	135	4,8
180	172	8,0	160	168	-8,4	138	140	-1,6	150	160	-9,7	138	135	2,8
170	172	-2,0	170	168	1,6	140	140	0,4	150	160	-9,7	130	135	-5,2
170	170	0,0	167	166	0,6	145	142	3,4	170	165	5,0	145	143	2,4
165	170	-5,0	165	166	-1,4	140	142	-1,6	160	165	-5,0	140	143	-2,6
165	170	-5,0	165	166	-1,4	135	142	-6,6	165	165	0,0	138	143	-4,6
170	170	0,0	170	166	3,6	140	142	-1,6	160	165	-5,0	140	143	-2,6
180	170	10,0	165	166	-1,4	148	142	6,4	170	165	5,0	150	143	7,4

Figura 33. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.

A partir de los residuos obtenidos, se realiza la prueba de Anderson Darling para comprobar la normalidad de los datos. Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las gráficas anteriores, por lo tanto, se hace la comparación probando las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

$$H_0 = \text{Los datos proceden de una distribución normal} \quad (17)$$

$$H_1 = \text{Los datos no proceden de una distribución normal}$$

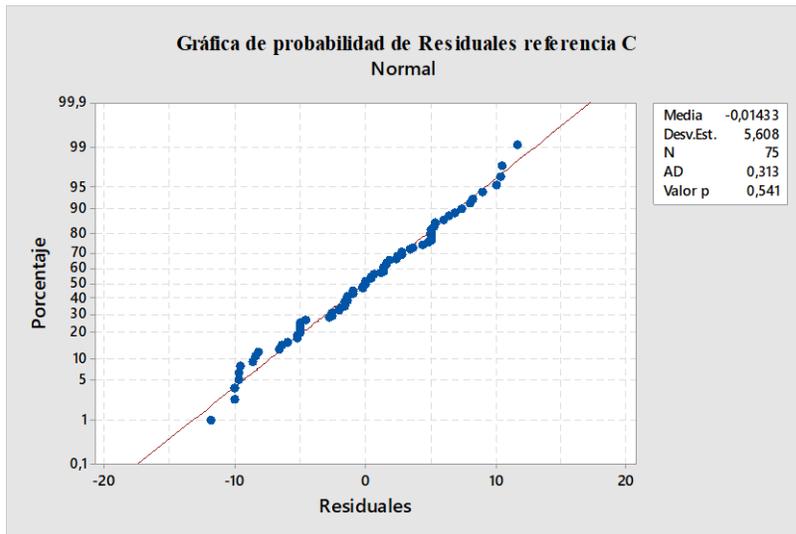


Figura 34. Gráfica de probabilidad de residuales. Elaboración propia.

Si se observa la gráfica de residuales de la referencia C presentada en la figura 34, se confirma que los datos proceden de una distribución normal, pues el valor p de la prueba es

54,1%, comparado con significancia del 5% es muy superior, por lo tanto, se aprueba la hipótesis nula.

Conclusión: En general vemos que para la referencia C, se cumplen todos los supuestos, por lo tanto, las conclusiones enunciadas a partir del análisis gráfico y el análisis de varianza son válidas

EXPERIMENTO # 4: Referencia 1052X76, 2X3 mm

Nota: Todo el análisis de los resultados de los experimentos se realizó con ayuda del software estadístico MINITAB®.

7.4. Experimento 4 de la referencia D

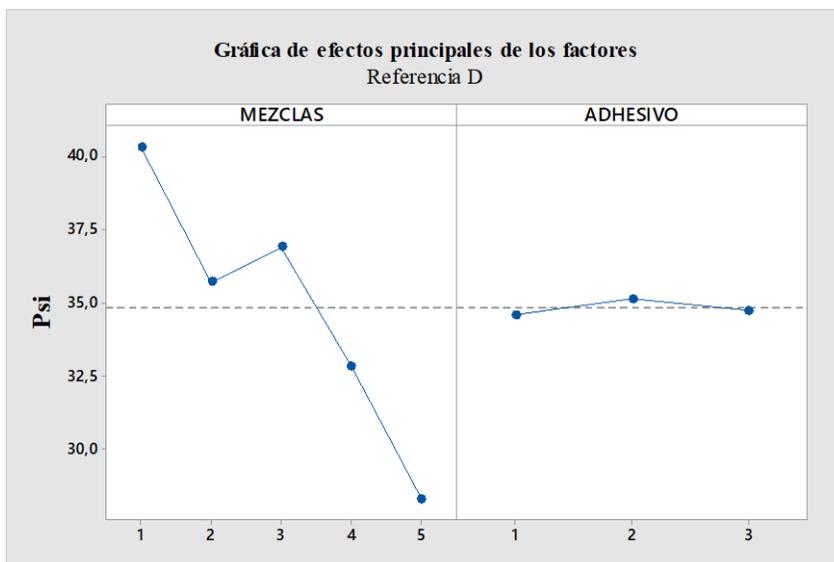


Figura 35. Gráfica de efectos principales. Elaboración propia.

Lo primero que se puede observar de en la figura 35, es que por un lado el factor Mezclas parece ser significativo para explicar la resistencia al aplastamiento lineal, debido a que se observan diferencias en la resistencia promedio cuando se cambia de mezcla, por otro lado, se puede observar que el factor adhesivo aparentemente no es significativo para explicar la resistencia al aplastamiento lineal, según la gráfica la resistencia promedio es similar sin importar el tipo de adhesivo que se use.

Analizando más detalladamente el factor mezcla, se puede observar que el mejor desempeño (resistencia más alta al aplastamiento lineal) se logra al usar la mezcla uno, siendo este desempeño superior que con cualquier otra mezcla. Las mezclas dos y tres muestran un desempeño similar, mientras que el uso de las mezclas cuatro y cinco presentan el peor desempeño, siendo esta última mezcla la que genera el desempeño más bajo.

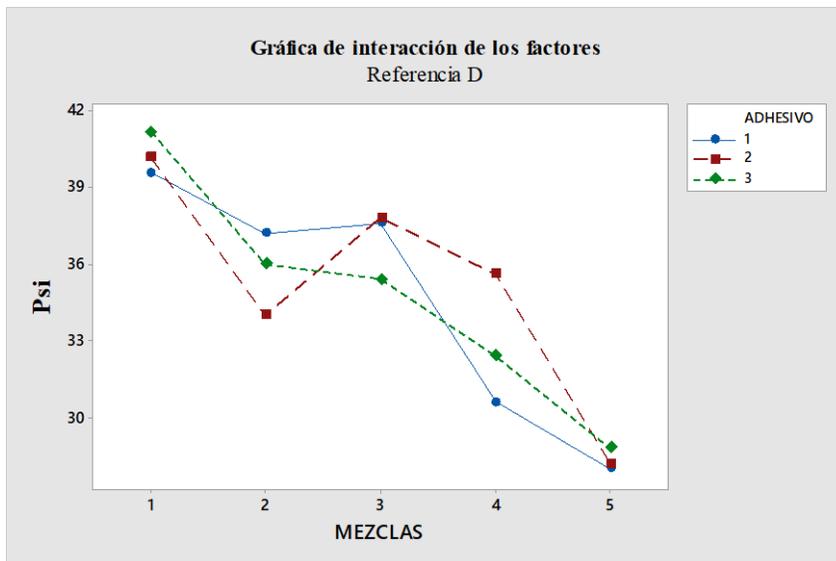


Figura 36. Gráfica de la interacción. Elaboración propia.

En la figura 36, es de vital importancia y permite observar que existe interacción entre el factor mezclas y el factor adhesivo, esto quiere decir que la resistencia al aplastamiento lineal se ve afectado no solo por la mezcla que se use (como se puede observar en la gráfica de efectos principales) sino que la interacción de una mezcla con un adhesivo en particular puede afectar la resistencia, incluso se puede afirmar que la interacción es fuerte debido a la naturaleza cruzada de las líneas de interacción.

En particular se puede observar que si se usa la mezcla uno no importará el tipo de adhesivo que se use pues la resistencia promedio obtenida será similar, por lo tanto, se podrá seleccionar el adhesivo como los criterios que más convengan a la empresa como el menor costo, por ejemplo.

Si se usa la mezcla dos, se recomienda usar el adhesivo uno pues genera la mayor resistencia promedio. Si se usa la mezcla tres se puede usar de manera indiferente el adhesivo uno o dos. Si se usa la mezcla cuatro se obtiene un mejor desempeño al combinarla con adhesivo dos y si se usa la mezcla cinco nuevamente es indiferente usar cualquiera de los tres adhesivos.

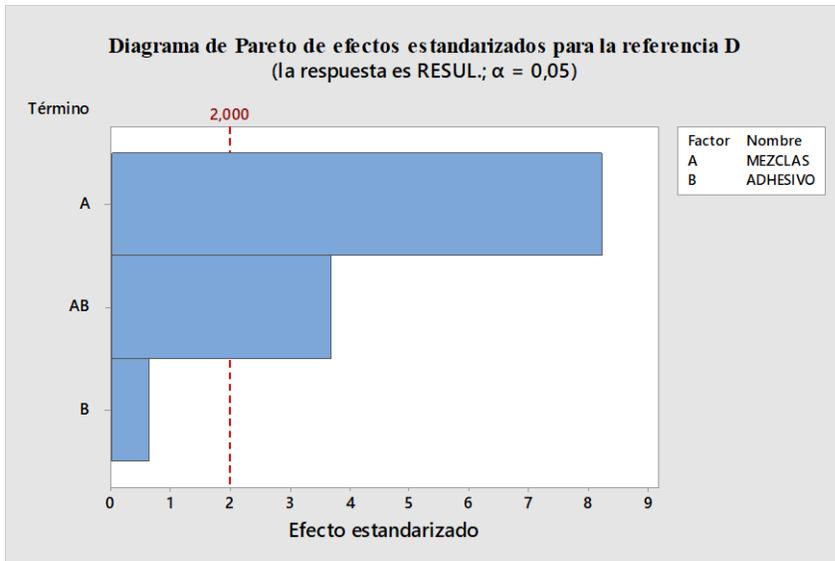


Figura 37. Diagrama de Pareto. Elaboración propia.

En la figura 37, se observa el diagrama de Pareto, en el cual se puede analizar que el factor A presenta el efecto más significativo, seguido de la interacción existente entre los factores, lo que no sucede en el factor B que no es tan significativo respecto al factor A y la interacción entre los factores de diseño.

7.4.1. Análisis de la varianza.

A continuación, se presenta el modelo matemático (4) análisis de la varianza ANOVA por medio del cual se quiere conocer el posible efecto de los factores y la posible interacción que pueden presentar.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Dónde:

$$Y_{ijk} = \text{Representa cada una de las observaciones} \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5 \end{cases}$$

μ = Media general de las observaciones.

τ_i = Efecto del factor A $i = 1,2,3,4,5.$

β_j = Efecto del factor B $j = 1,2,3.$

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de interacción del factor A y del factor B $\begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \end{cases}$

k = Número de réplicas $k = 1,2,3,4,5$

$$\varepsilon_{ijk} = \text{Error aleatorio} \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases}$$

Se distribuyen en forma normal, media = 0 y varianza constante

Luego de definir las variables, se hace la comparación de cada factor y su interacción probando las hipótesis dadas por:

Para el factor A la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0 \quad (5)$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i.$$

Para el factor B la hipótesis a probar son:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \quad (6)$$

$$H_1 = \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j.$$

Para la interacción la hipótesis a probar es:

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j. \quad (7)$$

$$H_1 = (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos una } i \text{ y una } j.$$

Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las gráficas anteriores por lo tanto se generan las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	1340,08	95,720	28,72	0,000
Lineal	6	1227,97	204,662	61,40	0,000
MEZCLAS	4	1223,81	305,953	91,79	0,000
ADHESIVO	2	4,16	2,080	0,62	0,539
Interacciones de 2 términos	8	112,11	14,013	4,20	0,000
MEZCLAS*ADHESIVO	8	112,11	14,013	4,20	0,000
Error	60	200,00	3,333		
Total	74	1540,08			

Figura 38. Análisis de varianza. Elaboración propia.

Con el análisis de varianza, el cual se puede observar en la figura 38, se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron en las figuras anteriores por lo tanto se generan las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

A partir de estos resultados se confirma que el factor mezclas es estadísticamente significativo con una significancia del 5%, pues el valor p de la prueba es cero, que es menor que la significancia, por lo tanto, se puede rechazar la hipótesis nula.

Para el factor adhesivo se confirma estadísticamente que con una significancia del 5%, debido a que el valor p de la prueba es de 53,9% se aprueba la hipótesis nula.

A partir de los resultados estadísticos se confirma que la interacción con una significancia del 5% debido a que el valor de p es 0, se rechaza la hipótesis nula.

Es importante anotar que, aunque el factor adhesivo no es significativo según la prueba, es curioso anotar que la interacción si lo es, por lo tanto, se puede concluir que el efecto principal del adhesivo se ve enmascarado por la interacción, lo que indica que de cierto modo el adhesivo puede afectar la resistencia dependiendo de la mezcla con que se use.

7.4.2. Validación de supuestos.

Para tomar como válidas las conclusiones del experimento es necesario validar los supuestos sobre los errores del modelo ajustado, los errores o residuales son la diferencia entre el valor observado y el valor ajustado que genera el modelo. Para que el modelo ajustado sea válido se debe cumplir que:

Los errores son independientes

Los errores tienen una distribución normal con media de cero y varianza constante.

Inicialmente la validación se realizará de manera gráfica:

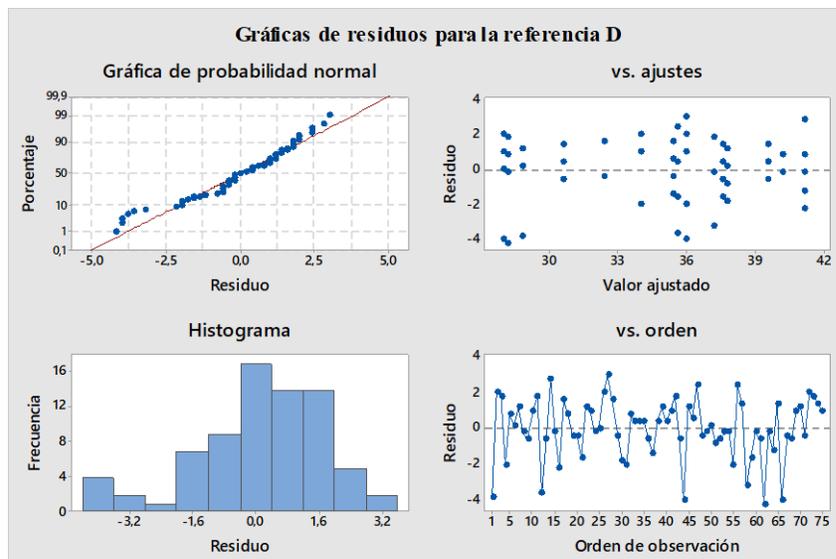


Figura 39. Gráfica de residuos. Elaboración propia.

7.4.3. Varianza constante.

Este supuesto se puede verificar con la figura 39 en la gráfica superior derecha de los residuos versus los valores ajustados, en esta se puede observar que los residuales se encuentran dentro de una franja horizontal, que es indicio de que la varianza es constante. No

se observan patrones o tendencias crecientes o decrecientes, por lo tanto, se puede concluir que el supuesto de varianza constante se cumple.

7.4.3.1. Independencia. Este supuesto se puede verificar con la figura 39 en la gráfica inferior derecha de los residuos versus el orden de corrida, a partir de esta gráfica se puede ver que la secuencia de residuales se mueve de manera aleatoria alrededor de cero, no hay rachas de puntos, patrones o tendencias, por lo tanto, se puede concluir a partir de esta gráfica que los residuales son independientes y que tienen una media de cero.

7.4.3.2. Normalidad. La normalidad se puede verificar con las dos gráficas de la izquierda expuestas en la figura 39, en la parte inferior izquierda se puede observar el histograma de los errores no tiene exactamente la forma normal (campana de gauss), por lo tanto, existe la posibilidad de violar este supuesto de normalidad en el análisis de varianza. De igual manera con la figura de probabilidad normal (superior izquierda) se observa que algunos puntos se encuentran alejados de la línea de regresión, por lo tanto, se puede decir que dichas conclusiones son parcialmente válidas ya que al parecer no se cumple este supuesto

Para comprobar el supuesto de normalidad, se emplea la fórmula 16 de regresión donde el residual asociado a la observación y_{ij} esta dado por:

$$e_{ijk} = Y_{ijk} - \bar{Y}_{ij} \tag{16}$$

Dónde:

$$\begin{aligned}
 e_{ijk} &= \text{Error experimental} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\
 Y_{ijk} &= \text{Representa cada una de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \\ k = 1,2,3,4,5. \end{cases} \\
 \bar{Y}_{ij} &= \text{Promedio de las observaciones} && \begin{cases} i = 1,2,3,4,5. \\ j = 1,2,3. \end{cases}
 \end{aligned}$$

A continuación, se realiza el cálculo y validación de residuales para la referencia D

Mezclas				
A1	A2	A3	A4	A5
5,493	0,893	2,093	-1,973	-6,507

Adhesivos		
B1	B2	B3
-0,24	0,32	-0,08

Interacciones														
AB11	AB12	AB13	AB21	AB22	AB23	AB31	AB32	AB33	AB41	AB42	AB43	AB51	AB52	AB53
-0,493	-0,493	0,947	1,707	-2,053	0,347	0,907	0,547	-1,45	-2,03	2,413	-0,387	-0,09	-0,45	0,547

Y_{ij}	$\bar{Y}_{.i}$	$e_{ij}=Y_{ij}-\bar{y}_i$												
39	39,6	-0,6	39	37,2	1,8	36	37,6	-1,6	31	30,6	0,4	29	28,0	1,0
39	39,6	-0,6	39	37,2	1,8	38	37,6	0,4	30	30,6	-0,6	28	28,0	0,0
39	39,6	-0,6	37	37,2	-0,2	38	37,6	0,4	30	30,6	-0,6	30	28,0	2,0
40	39,6	0,4	34	37,2	-3,2	37	37,6	-0,6	32	30,6	1,4	24	28,0	-4,0
41	39,6	1,4	37	37,2	-0,2	39	37,6	1,4	30	30,6	-0,6	29	28,0	1,0
40	40,2	-0,2	32	34,0	-2,0	38	37,8	0,2	32	35,6	-3,6	30	28,2	1,8
40	40,2	-0,2	35	34,0	1,0	39	37,8	1,2	36	35,6	0,4	29	28,2	0,8
40	40,2	-0,2	32	34,0	-2,0	36	37,8	-1,8	38	35,6	2,4	28	28,2	-0,2
41	40,2	0,8	36	34,0	2,0	39	37,8	1,2	38	35,6	2,4	24	28,2	-4,2
40	40,2	-0,2	35	34,0	1,0	37	37,8	-0,8	34	35,6	-1,6	30	28,2	1,8
42	41,2	0,8	38	36,0	2,0	35	35,4	-0,4	34	32,4	1,6	25	28,8	-3,8
44	41,2	2,8	39	36,0	3,0	37	35,4	1,6	32	32,4	-0,4	30	28,8	1,2
39	41,2	-2,2	37	36,0	1,0	34	35,4	-1,4	32	32,4	-0,4	30	28,8	1,2
41	41,2	-0,2	32	36,0	-4,0	36	35,4	0,6	32	32,4	-0,4	29	28,8	0,2
40	41,2	-1,2	34	36,0	-2,0	35	35,4	-0,4	32	32,4	-0,4	30	28,8	1,2

Figura 40. Cálculos de los residuos. Elaboración propia.

A partir de los residuos obtenidos, se realiza la prueba de Anderson Darling para comprobar la normalidad de los datos. Con este análisis se espera confirmar estadísticamente las conclusiones que se obtuvieron gráficamente sobre la normalidad, por lo tanto, se hace la comparación probando las siguientes hipótesis con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

$H_0 =$ Los datos proceden de una distribución normal. (17)

$H_1 =$ Los datos no proceden de una distribución normal.

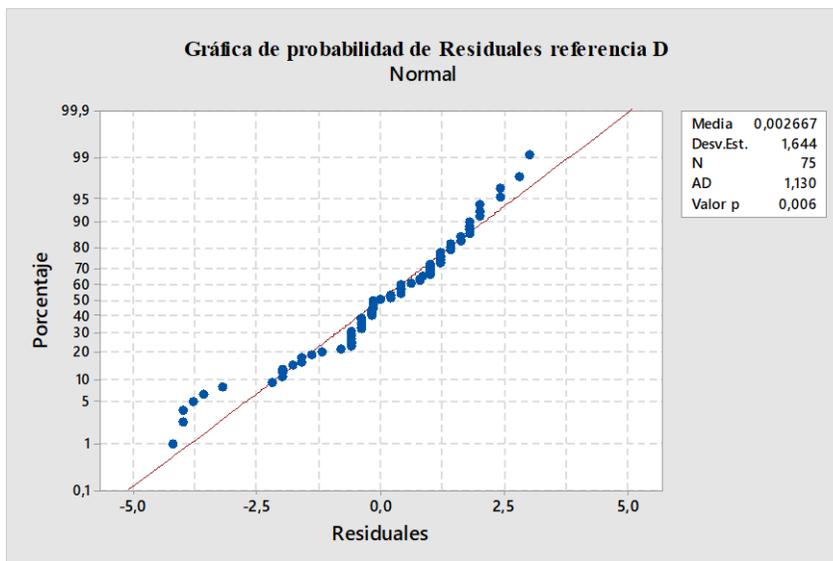


Figura 41. Gráfica de probabilidad de residuos. Elaboración propia.

A partir de los resultados se confirma que con una significancia del 5%, los datos no proceden de una distribución normal, pues el valor p de la prueba es 0,6% por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula., ver figura 41.

A continuación, en la tabla 30 se observa un resumen de los tratamientos para cada una de las cuatro referencias de estudio, en orden descendente en cuanto a la resistencia al aplastamiento lineal que se presentó en los experimentos. Las casillas que se encuentra sombreadas muestran los tratamientos que presentaron similitudes en su desempeño.

Tabla 30.

Resumen de cada una de las referencias de mayor a menor resistencia al aplastamiento lineal

Tabla Resumen		
Tratamientos	\bar{x}	Psi
Referencia A	M1P2	330
	M1P3	307
	M3P2	299
	M3P3	288
	M4P2	276
	M2P2	274
	M2P3	274
	M4P3	260
	M1P1	230
	M3P1	222
	M2P1	218
	M4P1	194
	M3P2	298
	M3P1	287
	M3P3	278
	M5P2	265
M4P2	264	
M2P2	261	
M5P3	260	

Referencia B	M4P3	253	
	M5P1	249	
	M2P1	249	
	M2P3	246	
	M1P2	245	
	M4P1	240	
	M1P1	227	
	M1P3	227	
	Referencia C	M1P1	175
M1P2		172	
M1P3		170	
M2P2		168	
M2P3		166	
M4P3		165	
M2P1		159	
M4P2		159	
M4P1		155	
M5P3		143	
M3P3		142	
M5P1		141	
M3P2		140	
M3P1		138	
M5P2		135	
Referencia D		M1P3	41
		M1P2	40
	M1P1	40	
	M3P1	38	
	M3P2	38	
	M2P1	37	
	M2P3	36	
	M4P2	36	
	M3P3	35	
	M2P2	34	
	M4P3	32	
	M4P1	31	
	M5P3	29	
	M5P2	28	
	M5P1	28	

Nota. Elaboración propia.

7.5. Análisis de unidades defectuosas por aplastamiento lineal.

Tabla 31.

Análisis de unidades defectuosas por aplastamiento lineal

	Cantidad U defectuosas	% participacion
Aplastamiento lineal	3315	29,66%
Total de U defectuosas	11175	

Nota. Elaboración propia.

Al observar la tabla 2, se puede analizar que, de un total de 11 175 unidades defectuosas, 3 315 fueron rechazadas por aplastamiento lineal lo que corresponde a un 29,66% con un costo de \$9 171 285 lo que constituye un ahorro bastante importante para la empresa si se tienen en cuenta las mezclas óptimas de este estudio como se presenta en la tabla 31.

Capítulo 8. Análisis Costo-Beneficio

De acuerdo con los resultados obtenidos estadísticamente, se establecen los costos de las cuatro referencias analizadas.

Para analizar los costos, es necesario tener en cuenta que el tubo de cartón se fabrica con un 80% de cartón y un 20% de adhesivo como se muestra en las tablas 32 y 33.

Tabla 32.

Costo de cartón para la fabricación de los tubos.

Proveedor	\$/Kilo	80%
Indugevi	\$1.640	\$1.312
Corrugados	\$1.550	\$1.240
America	\$1.610	\$1.288
Pacifico	\$1.560	\$1.248

Nota. Elaboración propia.

Tabla 33.

Costo de adhesivo para la fabricación de los tubos.

Adhesivo	\$/Kilo	20%
Pva	\$1.300	\$260
Dextrina	\$1.400	\$280
Aserquim	\$2.300	\$460

Nota. Elaboración propia.

El costo total del tubo se realizó teniendo en cuenta los porcentajes de participación de cada una de las mezclas multiplicado por el peso del tubo, el resultante se multiplica por la suma del costo del cartón y el adhesivo, así se obtiene el subtotal y por último se suman cada uno de estos costos para obtener el costo total del tubo de cartón como se observan en las tablas de la 34 a la 37, para cada una de las cuatro referencias.

Tabla 34.

Costo total para cada una de las mezclas de la referencia A

Referencia	Adhesivo	Mezclas	Proveedor	% Participación	Sub-total	Costo total
2020X101X11, 5mm PESO TUBO (kg) 5,4	PVA	1	America	100,0%	\$ 8.489	\$ 8.489
			Corrugados	3,5%	\$ 284	
		2	America	17,5%	\$ 1.463	\$ 8.316
			Pacifico	39,5%	\$ 3.217	
			Indugevi	39,5%	\$ 3.353	
			Corrugados	3,5%	\$ 284	
		3	America	55,7%	\$ 4.656	\$ 8.397
			Indugevi	39,1%	\$ 3.319	
			Pacifico	1,7%	\$ 138	
			Pacifico	43,0%	\$ 3.502	
		4	Indugevi	55,3%	\$ 4.694	\$ 8.311
			America	1,8%	\$ 150	
	DEXTRINA	1	America	100,0%	\$ 8.467	\$ 8.467
			Corrugados	3,5%	\$ 287	
		2	America	17,5%	\$ 1.482	\$ 8.424
			Pacifico	39,5%	\$ 3.259	
			Indugevi	39,5%	\$ 3.396	
			Corrugados	3,5%	\$ 287	
		3	America	55,7%	\$ 4.716	\$ 8.505
			Indugevi	39,1%	\$ 3.361	
		Pacifico	1,7%	\$ 140		
		Pacifico	43,0%	\$ 3.548		
4		Indugevi	55,3%	\$ 4.754	\$ 8.454	
		America	1,8%	\$ 152		
ASERQUIM	1	America	100,0%	\$ 9.439	\$ 9.439	
		Corrugados	3,5%	\$ 321		
	2	America	17,5%	\$ 1.652	\$ 9.396	
		Pacifico	39,5%	\$ 3.643		
		Indugevi	39,5%	\$ 3.780		
		Corrugados	3,5%	\$ 321		
	3	America	55,7%	\$ 5.258	\$ 9.477	
		Indugevi	39,1%	\$ 3.741		
		Pacifico	1,7%	\$ 157		
		Pacifico	43,0%	\$ 3.966		
	4	Indugevi	55,3%	\$ 5.292	\$ 9.427	
		America	1,8%	\$ 170		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 35.

Costo total para cada una de las mezclas de la referencia B

Referencia	Adhesivo	Mezclas	Proveedor	% Participación	Sub-total	Costo total	
1500X76,2X10MM PESO TUBO (kg) 3,65	PVA	1	Corrugados	0,08	438	\$ 5.715	
			Indugevi	0,9	5164,02		
			America	0,02	113,004		
		2	Corrugados	0,04	219	\$ 5.635	
			Pacifico	0,055	302,731		
			America	0,905	5113,431		
		3	America	1	5650,2	\$ 5.650	
		4	America	0,37	2090,574	\$ 5.705	
			Indugevi	0,63	3614,814		
		5	America	1	5650,2	\$ 5.650	
		DEXTRINA	1	Corrugados	0,08	443,84	\$ 5.788
				Indugevi	0,9	5229,72	
				America	0,02	114,464	
			2	Corrugados	0,04	221,92	\$ 5.708
				Pacifico	0,055	306,746	
	America			0,905	5179,496		
	3		America	1	5723,2	\$ 5.723	
	4		America	0,37	2117,584	\$ 5.778	
			Indugevi	0,63	3660,804		
	5		America	1	5723,2	\$ 5.723	
	ASERQUIM		1	Corrugados	0,08	496,4	\$ 6.445
				Indugevi	0,9	5821,02	
				America	0,02	127,604	
			2	Corrugados	0,04	248,2	\$ 6.365
				Pacifico	0,055	342,881	
America		0,905		5774,081			
3		America	1	6380,2	\$ 6.380		
4		America	0,37	2360,674	\$ 6.435		
		Indugevi	0,63	4074,714			
5		America	1	6380,2	\$ 6.380		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 36.

Costo total para cada una de las mezclas de la referencia C

Referencia	Adhesivo	Mezclas	Proveedor	% Participación	Sub-total	Costo total	
1520x76,2X6MM PESO TUBO (kg) 1,65	PVA	1	Corrugados	6,7%	\$ 166	\$ 2.585	
			Indugevi	90,0%	\$ 2.334		
			America	3,3%	\$ 84		
		2	America	100,0%	\$ 2.554	\$ 2.554	
			3	Corrugados	6,7%	\$ 166	\$ 2.585
				Indugevi	90,0%	\$ 2.334	
		America		3,3%	\$ 84		
		4	Corrugados	6,6%	\$ 163	\$ 2.543	
			Pacifico	9,1%	\$ 226		
			America	84,3%	\$ 2.153		
		5	America	39,0%	\$ 996	\$ 2.578	
			Indugevi	61,0%	\$ 1.582		
			1	Corrugados	6,7%		\$ 168
		Indugevi		90,0%	\$ 2.364		
		America		3,3%	\$ 85		
	2	America	100,0%	\$ 2.587	\$ 2.587		
		3	Corrugados	6,7%	\$ 168	\$ 2.615	
			Indugevi	90,0%	\$ 2.364		
	America		3,2%	\$ 83			
	4	Corrugados	6,6%	\$ 166	\$ 2.576		
Pacifico		9,1%	\$ 229				
America		84,3%	\$ 2.181				
5	America	39,0%	\$ 1.009	\$ 2.611			
	Indugevi	61,0%	\$ 1.602				
	1	Corrugados	6,7%		\$ 188	\$ 2.915	
Indugevi		90,0%	\$ 2.631				
America		3,3%	\$ 95				
2	America	100,0%	\$ 2.884	\$ 2.884			
	3	Corrugados	6,7%	\$ 188	\$ 2.915		
		Indugevi	90,0%	\$ 2.631			
America		3,3%	\$ 95				
4	Corrugados	6,6%	\$ 185	\$ 2.873			
	Pacifico	9,1%	\$ 256				
	America	84,3%	\$ 2.431				
5	America	39,0%	\$ 1.125	\$ 2.908			
	Indugevi	61,0%	\$ 1.784				
	ASERQUIM						

Nota. Elaboración propia.

Tabla 37.

Costo total para cada una de las mezclas de la referencia D

Referencia	Adhesivo	Mezclas	Proveedor	% Participación	Sub-total	Costo total	
1052X76,2X3MM PESO TUBO (kg)	PVA	1	America	6,7%	\$ 171	\$ 2.480	
			Corrugados	93,3%	\$ 2.309		
		2	America	6,8%	\$ 174	\$ 2.493	
			Pacifico	93,2%	\$ 2.319		
		3	Pacifico	93,3%	\$ 2.321	\$ 2.493	
			America	6,7%	\$ 171		
		4	Corrugados	13,3%	\$ 329	\$ 2.544	
			America	86,7%	\$ 2.214		
		5	Corrugados	6,9%	\$ 171	\$ 2.586	
			Indugevi	93,1%	\$ 2.415		
		DEXTRINA 0,55	1	America	6,7%	\$ 173	\$ 2.513
				Corrugados	93,3%	\$ 2.340	
			2	America	6,8%	\$ 176	\$ 2.526
				Pacifico	93,2%	\$ 2.350	
			3	Pacifico	93,3%	\$ 2.352	\$ 2.526
	America			6,7%	\$ 173		
	4		Corrugados	13,3%	\$ 334	\$ 2.577	
			America	86,7%	\$ 2.243		
	5		Corrugados	6,9%	\$ 173	\$ 2.619	
			Indugevi	93,1%	\$ 2.446		
	ASERQUIM		1	America	6,7%	\$ 193	\$ 2.810
				Corrugados	93,3%	\$ 2.617	
			2	America	6,8%	\$ 196	\$ 2.823
				Pacifico	93,2%	\$ 2.627	
			3	Pacifico	93,3%	\$ 2.629	\$ 2.823
America		6,7%		\$ 193			
4		Corrugados	13,3%	\$ 373	\$ 2.874		
		America	86,7%	\$ 2.501			
5		Corrugados	6,9%	\$ 194	\$ 2.916		
		Indugevi	93,1%	\$ 2.722			

Nota. Elaboración propia.

8.1. Análisis Costo- Beneficio

Para hacer el análisis de costo-beneficio se toman los resultados obtenidos en los experimentos, teniendo en cuenta el mejor desempeño de las mezclas y los adhesivos que presentaron mayor resistencia al aplastamiento lineal.

8.1.1. Análisis de costos para la referencia A

En los resultados del experimento de la referencia A, se observó que los adhesivos dos y tres tienen el mejor desempeño en la resistencia al aplastamiento lineal, por lo tanto, en el análisis de costo-beneficio que se hace para la referencia A, no se tendrá en cuenta el adhesivo 1 por tener el peor desempeño.

Tabla 38.

Costos referencia A

Costos con adhesivo 2				Costos con adhesivo 3			
	Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)
M1	\$ 8.467	\$ 6.774	\$ 1.693	M1	\$ 9.439,00	\$ 7.551	\$ 1.888
M2	\$ 8.424	\$ 6.739	\$ 1.685	M2	\$ 9.396,00	\$ 7.517	\$ 1.879
M3	\$ 8.505	\$ 6.804	\$ 1.701	M3	\$ 9.477	\$ 7.582	\$ 1.895
M4	\$ 8.454	\$ 6.763	\$ 1.691	M4	\$ 9.427,00	\$ 7.542	\$ 1.885

Nota. Elaboración propia.

En el análisis se puede observar una diferencia de \$962 en cualquiera de las mezclas en las que se use el adhesivo dos ya que debido al costo del cartón como del adhesivo es evidentemente más barato y además cumple para obtener un producto resistente al aplastamiento lineal de acuerdo con los resultados del experimento de la referencia A.

8.1.2. Análisis de costo para la referencia B

Si se analizan los resultados del experimento de la referencia B, se observa que el mejor desempeño al aplastamiento lineal se obtiene cuando se usa el adhesivo 2 en la mezcla 3 por lo tanto se analiza su costo-beneficio.

Tabla 39.

Costos referencia B

Costos con adhesivo 1				Costos con adhesivo 2				Costos con adhesivo 3			
	Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)
M1	\$ 5.715	\$ 4.572	\$ 1.143	M1	\$ 5.788	\$ 4.630	\$ 1.158	M1	\$ 6.445	\$ 5.156	\$ 1.289
M2	\$ 5.635	\$ 4.508	\$ 1.127	M2	\$ 5.708	\$ 4.567	\$ 1.142	M2	\$ 6.365	\$ 5.092	\$ 1.273
M3	\$ 5.650	\$ 4.520	\$ 1.130	M3	\$ 5.723	\$ 4.579	\$ 1.145	M3	\$ 6.380	\$ 5.104	\$ 1.276
M4	\$ 5.705	\$ 4.564	\$ 1.141	M4	\$ 5.778	\$ 4.623	\$ 1.156	M4	\$ 6.435	\$ 5.148	\$ 1.287
M5	\$ 5.650	\$ 4.520	\$ 1.130	M5	\$ 5.723	\$ 4.579	\$ 1.145	M5	\$ 6.380	\$ 5.104	\$ 1.276

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo a esta información se observa en la tabla que el costo de hacer la mezcla tres con el adhesivo dos, es de \$5 723 Ud. esto quiere decir que con respecto al costo con el adhesivo uno es \$73/Ud. más costoso, pero teniendo en cuenta que el adhesivo uno tiene menor desempeño, no es viable esta opción, por lo tanto se ve el beneficio si se compara su costo cuando se hace la mezcla tres con el adhesivo tres, ya que la diferencia es de \$657 /Ud. Correspondiente este valor al 11% de beneficio.

8.1.3. Análisis de costos para la referencia C

Debido a los resultados obtenidos en el experimento C, se observa que el mejor desempeño al aplastamiento lineal es cuando existe interacción de los adhesivos en la mezcla uno. Por lo tanto, se analizan sus costos:

Tabla 40.

Costos referencia C

Costos con adhesivo 1				Costos con adhesivo 2				Costos con adhesivo 3			
	Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)
M1	\$ 2.585	\$ 2.068	\$ 517	M1	\$ 2.615	\$ 2.092	\$ 523	M1	\$ 2.915	\$ 2.332	\$ 583
M2	\$ 2.554	\$ 2.043	\$ 511	M2	\$ 2.587	\$ 2.070	\$ 517	M2	\$ 2.884	\$ 2.307	\$ 577
M3	\$ 2.585	\$ 2.068	\$ 517	M3	\$ 2.618	\$ 2.094	\$ 524	M3	\$ 2.915	\$ 2.332	\$ 583
M4	\$ 2.543	\$ 2.034	\$ 509	M4	\$ 2.576	\$ 2.061	\$ 515	M4	\$ 2.873	\$ 2.298	\$ 575
M5	\$ 2.578	\$ 2.063	\$ 516	M5	\$ 2.611	\$ 2.089	\$ 522	M5	\$ 2.908	\$ 2.327	\$ 582

Nota. Elaboración propia.

En el análisis se observa que es más beneficioso fabricar la mezcla uno con el adhesivo uno ya que su diferencia en el costo del adhesivo dos es de \$30 /Ud. y en comparación con el costo del adhesivo tres es de \$330 /Ud, ahora si se hace otro tipo de mezclas se observa que la diferencia es directamente proporcional a la obtenida en el primer análisis.

8.1.4. Análisis de costos para la referencia D

Tabla 41.

Costos referencia D

Costos con adhesivo 1				Costos con adhesivo 2				Costos con adhesivo 3			
	Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)		Costo total	Carton (80%)	Adhesivo (20%)
M1	\$ 2.480	\$ 1.984	\$ 496	M1	\$ 2.513	\$ 2.011	\$ 503	M1	\$ 2.810	\$ 2.248	\$ 562
M2	\$ 2.493	\$ 1.994	\$ 499	M2	\$ 2.526	\$ 2.020	\$ 505	M2	\$ 2.823	\$ 2.258	\$ 565
M3	\$ 2.493	\$ 1.994	\$ 499	M3	\$ 2.526	\$ 2.021	\$ 505	M3	\$ 2.823	\$ 2.258	\$ 565
M4	\$ 2.544	\$ 2.035	\$ 509	M4	\$ 2.577	\$ 2.061	\$ 515	M4	\$ 2.874	\$ 2.299	\$ 575
M5	\$ 2.586	\$ 2.068	\$ 517	M5	\$ 2.619	\$ 2.095	\$ 524	M5	\$ 2.916	\$ 2.332	\$ 583

Nota. Elaboración propia.

Según los resultados del experimento de la referencia D, la interacción que existe en los factores cuando se fabrica la mezcla uno es la que presenta mayor desempeño. Si se analizan los costos de esta mezcla se observa que es beneficioso hacerla con el adhesivo uno, ya que el costo es de \$2 480 /Ud., lo que significa que es un 8% más barato que el adhesivo dos y un 13% más económico que el adhesivo tres.

A continuación, en la tabla 42 se observa un resumen de los tratamientos para cada una de las cuatro referencias de estudio, en orden descendente en cuanto a la resistencia al aplastamiento lineal que se presentó en los experimentos con sus costos asociados.

En ella se puede analizar los tratamientos que tuvieron un desempeño similar y los costos de cada uno de los tratamientos con el fin, de que la empresa pueda escoger la que más se adapte a sus necesidades. Ya que puede encontrar resistencias al aplastamiento lineal muy parecidas a un menor costo y que puede ser de preferencia para la organización.

Tabla 42.

Resumen de los tratamientos en orden descendente con sus respectivos costos

Tabla Resumen				
	Tratamientos	\bar{x}	Psi	Costo
Referencia A	M1P2		330	\$ 8.467
	M1P3		307	\$ 9.439
	M3P2		299	\$ 8.505
	M3P3		288	\$ 9.477
	M4P2		276	\$ 8.454
	M2P2		274	\$ 8.424
	M2P3		274	\$ 9.396
	M4P3		260	\$ 9.427
	M1P1		230	\$ 8.489
	M3P1		222	\$ 8.397
	M2P1		218	\$ 8.316
	M4P1		194	\$ 8.311
	Referencia B	M3P2		298
M3P1			287	\$ 5.650
M3P3			278	\$ 6.380
M5P2			265	\$ 5.723
M4P2			264	\$ 5.778
M2P2			261	\$ 5.708
M5P3			260	\$ 6.380
M4P3			253	\$ 6.435
M5P1			249	\$ 5.650
M2P1			249	\$ 5.635
M2P3			246	\$ 6.365
M1P2			245	\$ 5.788
M4P1			240	\$ 5.705
M1P1			227	\$ 5.715
M1P3		227	\$ 6.445	

Referencia C	M1P1	175	\$	2.585
	M1P2	172	\$	2.618
	M1P3	170	\$	2.915
	M2P2	168	\$	2.587
	M2P3	166	\$	2.884
	M4P3	165	\$	2.873
	M2P1	159	\$	2.554
	M4P2	159	\$	2.576
	M4P1	155	\$	2.543
	M5P3	143	\$	2.908
	M3P3	142	\$	2.915
	M5P1	141	\$	2.578
	M3P2	140	\$	2.615
	M3P1	138	\$	2.585
	M5P2	135	\$	2.611
	Referencia D	M1P3	41	\$
M1P2		40	\$	2.513
M1P1		40	\$	2.480
M3P1		38	\$	2.493
M3P2		38	\$	2.526
M2P1		37	\$	2.493
M2P3		36	\$	2.823
M4P2		36	\$	2.577
M3P3		35	\$	2.823
M2P2		34	\$	2.526
M4P3		32	\$	2.874
M4P1		31	\$	2.544
M5P3		29	\$	2.916
M5P2		28	\$	2.619
M5P1		28	\$	2.586

Nota. Elaboración propia.

A continuación en la tabla 43, se presenta el tratamiento para cada referencia, para las tres primeras referencias el criterio de selección fue la que presentó la mayor resistencia pues el costo asociado no es el más alto pero tampoco el más económico, y para la última referencia el criterio de selección fue el costo, no es el más alto de las resistencias pero no varía mucho, pero su costo si es más bajo con respecto al tratamiento que presentó la resistencia más alta con 41 Psi.

Para referencia A el tratamiento que fue seleccionado fue M1P2, la referencia B es M3P2, para la referencia C el tratamiento es M1P1 y para la referencia D fue M1P1.

Tabla 43.

Selección de tratamientos para cada referencia

Selección del tratamiento para cada referencia					
Referencia	Tratamiento	Resistencia	Costo	Criterio	Beneficio
A	M1P2	330	\$8.467	Resistencia	Menor costo de fabricación
B	M3P2	298	\$5.723	Resistencia	Menor costo de fabricación
C	M1P1	175	\$2.585	Resistencia	Menor costo de fabricación
D	M1P1	40	\$2.480	Costo	Menor costo de fabricación

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de resistencia al aplastamiento lineal de la referencia A, se propone utilizar el tratamiento M1P2 ya que comparado con el resultado de los demás tratamientos, es en promedio el 30,1% más resistente, ver tabla 44.

Tabla 44.

Tratamiento de la referencia A

Tratamiento seleccionado	Resistencia	Costo	Produccion mensual (Ud)	Costo total mensual/tratamiento
M1P2	330	\$ 8.467	2500	\$21.167.500

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, si se tiene en cuenta que la empresa fabrica 2500 Ud. De la referencia A, se puede hacer una comparación del costo del tratamiento seleccionado y el promedio de los demás tratamientos, observando que hay un beneficio de \$795000 mensuales.

Tabla 45.

Análisis Costo beneficio para la referencia A

Tratamientos	\bar{x} Resistencia (Psi)	(%) Resistencia	Costo ud	Costo total mensual/tratamiento
M1P3	307	7,49%	\$9.439	\$23.597.500
M3P2	299	10,37%	\$8.505	\$21.262.500
M3P3	288	14,58%	\$9.477	\$23.692.500
M4P2	276	19,57%	\$8.454	\$21.135.000
M2P2	274	20,44%	\$8.424	\$21.060.000
M2P3	274	20,44%	\$9.396	\$23.490.000
M4P3	260	26,92%	\$9.427	\$23.567.500
M1P1	230	43,48%	\$8.489	\$21.222.500
M3P1	222	48,65%	\$8.397	\$20.992.500
M2P1	218	51,38%	\$8.316	\$20.790.000
M4P1	194	70,10%	\$8.311	\$20.777.500
	Promedio	30,31%		\$21.962.500

Nota. Elaboración propia.

En los resultados obtenidos en la prueba de resistencia al aplastamiento lineal de la referencia B, se propone utilizar el tratamiento M1P2 ya que comparado con el resultado de los demás tratamientos, es en promedio el 18 % más resistente, ver tabla 46.

Tabla 46.

Tratamiento de la referencia B

Tratamiento seleccionado	Resistencia	Costo	Produccion mensual (Ud)	Costo total mensual/tratamiento
M3P2	298	\$5.723	1600	\$9.157.120

Nota. Elaboración propia.

Actualmente de la referencia B se fabrican 1 600 Ud. Si se hace una comparación del costo del tratamiento seleccionado y el promedio de los demás tratamientos, la empresa puede beneficiarse en \$369 705 mensuales.

Tabla 47.

Análisis Costo beneficio para la referencia B

Tratamientos	\bar{x} Resistencia (Psi)	(%) Resistencia	Costo ud	Costo total mensual/tratamiento
M3P1	287	3,8%	\$5.650	\$9.040.320
M3P3	278	7,2%	\$6.380	\$10.208.320
M5P2	265	12,5%	\$5.723	\$9.157.120
M4P2	264	12,9%	\$5.778	\$9.245.421
M2P2	261	14,2%	\$5.708	\$9.133.059
M5P3	260	14,6%	\$6.380	\$10.208.320
M4P3	253	17,8%	\$6.435	\$10.296.621
M2P1	249	19,7%	\$5.635	\$9.016.259
M5P1	249	19,7%	\$5.650	\$9.040.320
M2P3	246	21,1%	\$6.365	\$10.184.259
M1P2	245	21,6%	\$5.788	\$9.260.838
M4P1	240	24,2%	\$5.705	\$9.128.621
M1P3	227	31,3%	\$6.445	\$10.312.038
M1P1	227	31,3%	\$5.715	\$9.144.038
Promedio		18,0%		\$9.526.825

Nota. Elaboración propia.

En los resultados obtenidos en la prueba de resistencia al aplastamiento lineal de la referencia C, se propone utilizar el tratamiento M1P1 ya que su resistencia es de 175 Psi, lo que significa que es en promedio el 14,5 % más resistente que los demás tratamientos, ver tabla 47.

Tabla 48.

Tratamiento de la referencia C

Tratamiento seleccionado	Resistencia	Costo	Produccion mensual (Ud)	Costo total mensual
M1P1	175	\$2.585	4000	\$10.338.134

Nota. Elaboración propia.

Actualmente de la referencia C se fabrican 4 000 Ud. Si se hace una comparación del costo del tratamiento seleccionado y el promedio de los demás tratamientos, la empresa puede beneficiarse en \$450 908 mensuales.

Tabla 49.

Análisis Costo beneficio para la referencia C

Tratamientos	\bar{x} Resistencia (Psi)	(%) Resistencia	Costo ud	Costo total mensual
M1P2	172	1,6%	\$2.618	\$10.470.134
M1P3	170	2,8%	\$2.915	\$11.658.134
M2P2	168	3,8%	\$2.587	\$10.348.800
M2P3	166	5,0%	\$2.884	\$11.536.800
M4P3	165	5,9%	\$2.873	\$11.491.867
M4P2	159	9,7%	\$2.576	\$10.303.867
M2P1	159	10,2%	\$2.554	\$10.216.800
M4P1	155	12,8%	\$2.543	\$10.171.867
M5P3	143	22,6%	\$2.908	\$11.633.424
M3P3	142	23,4%	\$2.915	\$11.658.134
M5P1	141	24,0%	\$2.578	\$10.313.424
M3P2	140	25,2%	\$2.615	\$10.459.786
M3P1	138	26,5%	\$2.585	\$10.338.134
M5P2	135	29,3%	\$2.611	\$10.445.424
Promedio		14,5%		\$10.789.043

Nota. Elaboración propia.

Actualmente de la referencia D se fabrican 3500 Ud. Si se hace una comparación del costo del tratamiento seleccionado y el promedio de los demás tratamientos, la empresa puede beneficiarse en \$598765 mensuales.

Tabla 50.

Tratamiento de la referencia D

Tratamiento seleccionado	Resistencia	Costo	Produccion mensual (Ud)	Costo total mensual
M1P1	40	\$2.480	3500	\$8.681.072

Nota. Elaboración propia.

En los resultados obtenidos en la prueba de resistencia al aplastamiento lineal de la referencia D, se propone utilizar el tratamiento M1P1, aunque no es la más resistente, la diferencia no es significativa con los demás tratamientos, ver tabla 50.

Tabla 51.

Análisis Costo beneficio para la referencia D

Tratamientos	\bar{x} Resistencia (Psi)	Resistencia	Costo ud	Costo total mensual
M3P1	38	2	\$2.493	\$8.724.177
M2P1	37	2	\$2.493	\$8.724.408
M1P2	40	-1	\$2.513	\$8.796.572
M3P2	38	2	\$2.526	\$8.839.677
M2P2	34	6	\$2.526	\$8.839.908
M4P1	33	7	\$2.544	\$8.902.832
M4P2	36	4	\$2.577	\$9.018.332
M5P1	28	12	\$2.586	\$9.049.610
M5P2	28	11	\$2.619	\$9.165.110
M1P3	41	-2	\$2.810	\$9.836.072
M3P3	35	4	\$2.823	\$9.879.177
M2P3	36	4	\$2.823	\$9.879.408
M4P3	32	7	\$2.874	\$10.057.832
M5P3	29	11	\$2.916	\$10.204.610
Promedio				\$9.279.838

Nota. Elaboración propia.

Capítulo 9. Resultados

Según el diagnóstico realizado en la empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S donde se evaluaron las peticiones, quejas y reclamos, se llegó a la conclusión que la causa principal del incumplimiento en las especificaciones del producto, es por aplastamiento lineal, identificando la referencias A Y B como críticas, ocasionando que se dejaran de percibir ventas por \$8 940 000 y tomando la decisión de realizar un diseño estadístico de experimentos donde se evaluó la resistencia al aplastamiento lineal no solo de la referencia A Y B, sino también se tuvieron en cuenta las referencia C y D por petición de la empresa, por si en el futuro se llegan a presentar problemas de este tipo en dichas referencias.

Dando cumplimiento a las NTC 1866 y 1976 se tuvieron en cuenta para realización del experimento la medida de cada uno de los tratamientos son de 10 cm y el pre-secado, colocando cada tratamiento de forma que el aire entrará por todas las superficies hasta alcanzar la humedad de equilibrio y la diferencia en el peso estuviera en $< 1\%$. Lo anterior con el objetivo de la homogenización en los tratamientos y la confianza en los resultados del experimento.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este experimento donde se identificó que, en todas las referencias, el factor mezcla es vital para dar mayor resistencia a los tubos de cartón, se aconseja a Mc Tubos de Cartón S.A.S realizar las mezclas que generen una mayor resistencia y a un menor costo, con el objetivo de mejorar sus procesos productivos y de fidelizar los clientes potenciales.

Por medio del análisis de varianza se analizaron los datos estadísticos, los cuales fueron evaluados con una significancia del 5% y donde los supuestos de normalidad, independencia y varianza constante dieron como resultado que las referencia (A, B, C) cumplieron con cada uno de los supuestos, a excepción de la referencia D que arrojó en la prueba de normalidad de Anderson Darling un valor p de 0,6%, lo que significa que los datos no cumplen con una distribución normal y por lo tanto se debe aceptar la hipótesis nula.

Debido a los resultados obtenidos en los experimentos y evaluando los costos- beneficio se determina que para la referencia A, se debe utilizar la mezcla uno con el adhesivo dos con costo de \$8 467/Ud. para la referencia B, se debe utilizar la mezcla tres con el adhesivo dos, con costo de \$5 723/Ud. para la referencia C, se debe utilizar la mezcla uno con el adhesivo uno con costo de \$2 585/Ud. para la referencia D, se debe utilizar la mezcla uno con el

adhesivo uno con costo de \$2 480/Ud. por lo tanto se concluye que no es recomendable el uso del adhesivo tres debido a su elevado costo y además no cambia significativamente la resistencia al aplastamiento lineal comparado con el adhesivo uno y dos.

Capítulo 10. Conclusiones

Como resultado del diagnóstico realizado en las peticiones, quejas y reclamos de la empresa MC Tubos de cartón S.A.S., se evidenció que el principal reclamo por incumplimiento en las especificaciones dadas por el cliente se debe al aplastamiento lineal, por no contar con una parametrización adecuada en el proceso de fabricación de los tubos de cartón.

Con el desarrollo del diseño y análisis estadístico de experimentos se conoció la importancia del factor mezcla, el factor adhesivo y la interacción de estos dos factores en la composición del tubo de cartón para la resistencia al aplastamiento lineal para los cuatro experimentos, en especial el factor mezcla de mostro tener un efecto significativo.

Con los resultados obtenidos en el desarrollo y análisis del diseño estadístico experimental para las cuatro referencias, se seleccionó el tratamiento que obtuvo los mejores desempeños en la resistencia al aplastamiento lineal y a un costo de fabricación acorde para la empresa, con esto se pretende generar una reducción en los costos de fabricación entre \$33 a \$1 010 para cada unidad dependiendo de la referencia obteniendo una máxima resistencia.

La empresa Mc Tubos de Cartón S.A.S. fabrica los adhesivos a base de PVA y Dextrina, los cuales demostraron tener un buen desempeño en alguna de las referencias estudiadas, lo que puede generar una reducción al adquirir estos adhesivos con respecto al adhesivo Aserquim adquirido en el mercado a un elevado costo de \$2 300 por kilo, generando una reducción entre \$1 000 y \$900 por kilo, y con la confianza de que dichos adhesivos son de buena calidad en cuanto a la resistencia al aplastamiento lineal.

Al realizar el diseño y análisis estadístico de experimento se pretende obtener los parámetros óptimos en el proceso de fabricación para las referencias críticas, esperando generar una reducción del 29% de las reclamaciones presentadas por resistencia al aplastamiento lineal en dichas referencias, que presentan pérdidas aproximadas en nueve millones.

Capítulo 11. Recomendaciones

En el presente trabajo se evidenció la importancia de las mezclas para cada una de las referencias, es recomendar continuar con un diseño de experimentos, en el cual se evalué el desempeño del cartón adquirido por cada uno de los proveedores y así, saber si la composición de estas afecté de manera representativa, con el fin de buscar alternativas en la fabricación de los tubos que se adapten a las necesidades de la empresa.

Recomendando para este fin usar el cartón del proveedor Cartones América con el adhesivo 2 ya que los resultados así lo demuestran.

Se recomienda a la Empresa Mc tubos de cartón S.A.S tener en cuenta las mezclas óptimas para el mejoramiento de las referencias críticas que afecten el buen desempeño en las especificaciones del producto.

Se recomienda aplicar las mezclas y los adhesivos que generan mayor resistencia y realizar seguimiento continuo de los resultados.

Se recomienda adaptar un laboratorio de pruebas de ensayo con el objetivo de controlar los procesos de fabricación de los tubos de cartón.

Se recomienda hacer uso constante del instrumento de medición con el objetivo de cumplir con las especificaciones exigidas por el cliente.

Anexos

Anexo 1. Proceso corte de papel



Nota. Elaboración propia

Anexo 2 Proceso Formadora de tubos de cartón



Nota. Elaboración propia

Anexo 3. Proceso de refilado



Nota. Elaboración propia.

Anexo 4. Formadora de tubo textil



Nota. Elaboración propia.

Anexo 5. Sierra de disco dentado



Nota. Elaboración propia.

Anexo 6. Instrumento de medición.



Nota. Elaboración propia.

Lista de referencias

- Ángel, Tobon J.A. (2012). *Aplicación del diseño experimental para mejorar el proceso de desarrollo de nuevos productos de baldosas cerámicas* (Tesis maestría, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/9222/1/8100516.2012.pdf>
- Bari, M., Alma, A., Muyibo, S., Jamal, P. y Al.mamun. (2009). Improvement of production of citric acid from oil palm empty fruit bunches: Optimization of media by statistical experimental designs. *Bioresource Technology*, volumen (100). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409000297>
- Bursali, N., Ertunc, S. y Akay, B. (2006). Process improvement approach to the saponification reaction by using statistical experimental design. *Chemical Engineering and processing: Process Intensification*, volumen (45). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270106000730#!>
- Dante, R., Escamilla, J., Madrigal, V., Theuss, T., Calderón J., Solorza, O. y Rivera R., (2003). Fractional factorial design of experiments for PEM fuel cell performances improvement. *International Journal of Hydrogen Energy*, volumen (28). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902000691>

- Escalante, E. (2014). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2008). *Diseños y análisis de experimentos*. México D.F.: McGraw-Hill Education
- Iizarbe L., Tanco, M., Viles, E., Sanches A, y Arjona, M. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta. *Redalyc- Red de revistas científicas de America Latina, el Caribe, España y Portugal* 10(20). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012011>.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *Norma Técnica Colombiana NTC 1866: Papel y cartón. Centros de cartón para rollos*. Bogotá D.C., Colombia: Editorial Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). *Norma Técnica Colombiana NTC 5342: Papel y cartón. Muestreo para determinar la calidad promedio*. Bogotá D.C., Colombia: Editorial Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *Norma Técnica Colombiana NTC 1976 Papel y cartón. Centros de cartón. Métodos de ensayo.*, Colombia: Editorial Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Isaza, J., Serna, A., Restrepo, D., Gutiérrez, F., Ramírez, J. y Correa, A. (2011). Reconstrucción digital del muñón de un amputado transfemoral a partir de datos obtenidos de escáner 3D. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 15 (1). Recuperado de: <https://search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co/docview/1663355691/FACB4F529DDF48D9PQ/1?accountid=25548>
- Jaramillo, A., Echavarría, A. y Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. Universidad EAFIT, 9(18). Recuperado de: www.search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co.
- Malo, N., Hanley, J., Carlile, G., Liu, G., Pelletier, J., Thomas, D., Less, Show, y Nadon Robert. (2010). *Experimental Design and Statistical Methods for Improved Hit Detection*

- in High-Throughput Screening. Sage Journals, volumen (990). Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1087057110377497>.
- Medallo, J. (s.f.). Recuperado de: <http://www.uaaan.mx/~jmelbos/disexp/deapu1a.pdf>, 22, 10,2018.
- Millán, F., Algarbe, M. y Tapia, M. (2003). Uso de la metodología de superficie de respuesta y la programación lineal para el desarrollo de un néctar de mora pasteurizado. *Interciencia* 28(11). Recuperado de <https://search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co/docview/748683646/3196D2A6B94A4D8EPQ/1?accountid=25548>
- Minitab Inc.(2018). Minitab [Software de computador]. Recuperado de: <http://www.minitab.com/es-mx/>.
- Montgomey, D.; Runger, G. (2013). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México D.F, México: Editorial Limusa Wiley.
- Montgomey, D. y Runger, G. (2004). *Diseños y análisis de experimentos*. México D.F, México: Editorial Limusa Wiley.
- Mujica-F, V., Linares, C. y Velásquez, I. (2017). Estudio estadístico de la incidencia de ciertas variables de síntesis sobre la cristalinidad y otras propiedades de hidrotalcitas Ni, Fe. *Universidad de Tarapacá* 25(1). Recuperado de <https://search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co/docview/1879086847/749FF384875747A2PQ/1?accountid=25548>.
- Ramón, G. (s.f.). Diseños experimentales. Recuperado de: http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf, 20,10,2018.
- Rosa, S., Soria, M., Vélez, C. y Galvagno, M. (2010). Improvement of a two-stage fermentation process for docosahexaenoic acid production by *Aurantiochytrium limacinum* SR21 applying statistical experimental designs and data analysis. *Bioresourcetechnolog*, volumen (101). Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409015600>.
- Ruiz, A. y Rojas, F. (2009). Herramientas de calidad. Universidad Pontificia. Recuperado de <http://web.cortland.edu/matresearch/HerraCalidad.pdf>

- Rodríguez, L (2005). Introducción al diseño óptimo de experimentos: Aplicaciones a la ecuación de Arrhenius. Universidad Rey Juan Carlos. Recuperado de: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouncsp/detail.action?docID=3159904>
- Ruiz, S., y López, I. (2013). Metodología del diseño experimental. Metodología de Investigación social y de la empresa. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/283351444_Metodologia_del_Diseño_Experimental
- Sampieri, H. (1991). *Metodología de investigación*. Mexico: Mc Graw-Hill Interamericana de México S.A. de C.V.
- Suarez, V., Maya, D. y Jaramillo, M. (2013). Diseño conceptual de una sonda Langmuir para caracterización de plasmas fríos mediante diseño estadístico de experimentos. Universidad de Antioquia, (67). Recuperado de: <https://search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co/docview/1612427974/ACF1F1C46BA34B96PQ/1?accountid=25548>
- Tanco, M., y Viles E. (2008). Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos. *Universidad de Navarra* 55 (6). http://www.um.edu.uy/_upload/_investigacion/web_investigacion_55_Memoria_7_DiseñoExperimentos.pdf
- Ziolo, L., Restrepo, L., Agudelo, E. y Gallo, Alonso. (2016). Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el área metropolitanas del Valle de Aburrá. *Escuela de Ingeniería de Antioquia* 13(26). Recuperado de: <https://search-proquest-com.recursosselectronicos.uniagustiniana.edu.co/docview/2006750672/96B1931286844833PQ/2?accountid=25548>.