

**METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE
RESPUESTA APLICADO A LA OPTIMIZACIÓN
DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN
COMPUESTO DE RESIDUOS DE MADERA Y
PLÁSTICO RECICLADO**

Tesis

PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**Maestro en Ciencia y
Tecnología en la
Especialidad de Ingeniería
Industrial y Manufactura**

PRESENTA

Javier Cruz Salgado

TUTOR

Dr. Sergio Alonso Romero

ÍNDICE

I. INTRODUCCION 9

II. ANTECEDENTES..... 10

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16

IV. JUSTIFICACIÓN..... 17

V. OBJETIVO GENERAL..... 21

VI. OBJETIVOS PARTICULARES..... 22

VII. HIPÓTESIS 23

VIII. ESTADO DEL ARTE 24

 8.1 Conclusiones principales de los artículos consultados. 27

IX. MARCO TEÓRICO..... 29

 9.1 Manufactura. 29

 9.1.1 Fundamentos de los Materiales..... 30

 9.2 Plásticos..... 31

 9.2.1 Polietilentereftalato. 31

 9.2.2 Polietileno..... 34

 9.2.3 Polipropileno..... 36

 9.3 Materiales Compuestos..... 38

 9.3.1 Compuestos en Matriz Polimérica..... 40

 9.3.2 Madera. 40

 9.4 Procesamiento de Plásticos..... 44

 9.4.1 Extrusión..... 45

 9.4.2 Extrusión de Perfiles. 45

 9.5 Diseño de Experimentos..... 46

 9.5.1 Diseños Factoriales 2^k 46

 9.5.2 Diseño Factorial 2^k No Replicado. 46

 9.5.3 Gráfico de Efectos en Papel Normal (Gráfico de Daniel)..... 47

 9.5.4 Diagrama de Pareto de Efectos. 48

 9.5.5 Factorial 2^k con Puntos al Centro 48

 9.6 Optimización de Procesos con Metodología de Superficie de Respuesta. 48

 9.6.1 Diseños de Segundo Orden..... 50

 9.6.2 Diseño de Composición Central con Centros en las Caras..... 50

 9.7 Optimización Simultánea de Varias Respuestas. 51

9.7.1	Método de la Función de Deseabilidad.....	51
X.	METODOLOGÍA.....	55
10.1	Descripción global de la metodología	55
10.2	Construcción del Anteproyecto.....	56
10.3	Diseño del Proceso de Manufactura.	57
10.4	Optimización del Material.....	58
XI.	PROCEDIMIENTO	60
11.1	Actividades Preliminares.....	60
11.2	Experimento Exploratorio.....	61
11.3	Experimento Principal.....	64
11.3.1	Preparación de Materiales.....	64
11.3.2	Preparación del Extrusor.	65
11.3.3	Extrusión del Material.	66
11.3.4	Molienda del Material Extruido.	67
11.3.5	Moldeo por Compresión.	68
11.3.6	Maquinado de Probetas.....	69
11.3.7	Medición de Probetas.....	70
11.3.8	Pruebas Mecánicas.....	70
XII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
12.1	Diseño Factorial (Cribado).....	72
12.2	Diseño Factorial 2 ^k No Replicado.	73
12.3	Resistencia a la Flexión.	74
12.3.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Flexión.	76
12.3.2	Interpretación.....	79
12.4	Resistencia a la Tensión.	82
12.4.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión.....	84
12.4.2	Interpretación.....	86
12.5	Conclusiones del Diseño Factorial 2 ⁴	88
12.6	Diseño Factorial 2 ² con repeticiones al centro (Búsqueda I).	89
12.6.1	Resistencia a la flexión.	90
12.6.1.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Flexión.	96
12.6.2	Resistencia a la Tensión.	98
12.6.2.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión.....	102
12.6.3	Conclusiones del Diseño Factorial 2 ² con Puntos al Centro.	104
12.7	Diseño de Composición Central (Búsqueda II).	105

12.7.1	Resistencia a la Flexión DCC.	106
12.7.1.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión (DCC).	111
12.7.2	Resistencia a la Tensión DCC.	113
12.7.2.1	Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión (DCC).	118
12.7	Optimización Simultánea de Varias Respuestas (Tensión y Flexión).....	120
XIII	CONCLUSIONES.	125
XIII	BIBLIOGRAFÍA	127

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

Figura 1. Consumo y producción de madera..... 17

Figura 2. Materiales de Ingeniería..... 30

Figura 3. Representación de una cadena de PET..... 32

Figura 4. Estructura molecular del PE. 35

Figura 5. Estructura molecular del PP..... 36

Figura 6. Esquema de los elementos de la MSR en su contexto amplio. 49

Figura 7. Representación de los DCC con centros en las caras para k=2 factores..... 51

Figura 8. Función con condición de deseables individuales para la optimización simultánea. 53

Figura 9. Descripción Global de la Metodología. 56

Figura 10. Proceso de operación experimento exploratorio..... 62

Figura 11. Caracterización del tamaño de partícula..... 64

Figura 12. Deshidratación de materiales..... 65

Figura 13. Preparación de materiales. 65

Figura 14. Parámetros operacionales. 66

Figura 15. Material extruido. 67

Figura 16. Molino de plásticos. 68

Figura 17. Placa del material compuesto. 68

Figura 18. Prensa hidráulica de moldeo..... 69

Figura 19. Molde, material extruido y placa..... 69

Figura 20. Maquinado de probetas..... 69

Figura 21. Medición de probetas. 70

Figura 22. Prueba resistencia a la flexión. 71

Figura 23. Prueba de resistencia a la tensión..... 71

Figura 24. Grafico mitad –normal de Daniels para flexión..... 74

Figura 25. Grafico de Pareto para flexión. 75

Figura 26. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión..... 75

Figura 27. Grafica de residuos contra predichos flexión 2^4 77

Figura 28. Graficas de residuos contra cada factor. 77

Figura 29. Grafica de probabilidad normal para flexión 2^4 78

Figura 30. Prueba de normalidad para la flexión 2^4 78

Figura 31. Grafica de residuos contra el orden de corrida para flexión 2^4 79

Figura 32. Grafico mitad-normal de Daniels para tensión..... 82

Figura 33. Grafico de Pareto para tensión..... 83

Figura 34. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión 2^4 83

Figura 35. Grafica de residuos contra predichos 2^4 84

Figura 36. Graficas de residuos contra cada factor 2^4 85

Figura 37. Grafica de probabilidad normal para tensión 2^4 85

Figura 38. Prueba de normalidad para tensión 2^4 86

Figura 39. Grafica de residuos contra el orden de corrida 2^4 86

Figura 40. Arreglo óptimo de los factores 2^4 89

Figura 41. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (factorial 22)..... 91

Figura 42. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (factorial 22)..... 92

Figura 43. Grafica de interacción 1 para la prueba de flexión (factorial 22). 93

Figura 44. Grafica de interacción 2 para la prueba de flexión (factorial 22). 94

Figura 45. Grafica de medias para la prueba de flexión (factorial 22). 95

Figura 46. Grafica de dispersión para la prueba de flexión (factorial 22). 95

Figura 47. Grafica de residuos contra predichos flexión 2^2 96

Figura 48. Grafica de probabilidad normal para flexión 2^2 97

Figura 49. Prueba de normalidad para la flexión 2^2 97

Figura 50. Grafica de residuos contra el orden de corrida para flexión 2^2 98

Figura 51. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión (factorial 22). 98

Figura 52. Análisis de regresión múltiple para la prueba de tensión (factorial 22). 100

Figura 53. Grafica de interacción 1 para la prueba de tensión (factorial 22). 101

Figura 54. Grafica de interacción 2 para la prueba de tensión (factorial 22). 101

Figura 55. Grafica de medias para la prueba de tensión (factorial 22). 101

Figura 56. Grafica de dispersión para la prueba de tensión (factorial 22). 102

Figura 57. Grafica de residuos contra predichos tensión 2^2 103

Figura 58. Grafica de probabilidad normal para tensión 2^2 103

Figura 59. Prueba de normalidad para la tensión 2^2 104

Figura 60. Grafica de residuos contra el orden de corrida para tensión 2^2 104

Figura 61. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (DCC). 107

Figura 62. Prueba de falta de ajuste para la prueba de flexión (DCC). 108

Figura 63. Grafica de interacción 1 para la prueba de flexión (DCC). 109

Figura 64. Grafica de interacción 2 para la prueba de flexión (DCC). 109

Figura 65. Superficie de respuesta para la prueba de flexión (DCC). 110

Figura 66. Gráfico de contornos para la prueba de flexión (DCC). 110

Figura 67. Grafica de residuos contra predichos (DCC). 112

Figura 68. Grafica de probabilidad normal para flexión (DCC). 112

Figura 69. Grafica de residuos contra el orden de corrida (DCC). 113

Figura 70. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión (DCC). 114

Figura 71. Prueba de falta de ajuste para la prueba de tensión (DCC). 115

Figura 72. Grafica de interacción 1 para la prueba de tensión (DCC). 116

Figura 73. Grafica de interacción 2 para la prueba de tensión (DCC). 116

Figura 74. Superficie de respuesta para la prueba de tensión (DCC). 117

Figura 75. Gráfico de contornos para la prueba de tensión (DCC). 117

Figura 76. Grafica de residuos contra predichos (DCC). 119

Figura 77. Grafica de probabilidad normal para flexión (DCC). 119

Figura 78. Grafica de residuos contra el orden de corrida (DCC). 120

Figura 79. Superficie de respuesta para la deseabilidad estimada. 123

INDICE DE ILUSTRACIONES

Cuadros

Cuadro 1. Descripción general del estado del arte de WPC con PET como matriz..... 14

Cuadro 2. Valor por metro cubico rollo (pesos). 18

Cuadro 3. Matriz de estado del arte. 26

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de las propiedades mecánicas de maderas mexicanas en condición verde Dávalos y Bárcenas (1998). 42

Cuadro 5. Clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas (libre de defecto) en condición verde Dávalos y Bárcenas (1998). 42

Cuadro 6. Réplicas o corridas en diseños 2k..... 47

Cuadro 7. Diseño factorial exploratorio..... 61

Cuadro 8. Temperaturas del extrusor..... 66

Cuadro 9. Diseño Factorial (cribado). 73

Cuadro 10. Coeficientes de regresión para flexión 2^4 79

Cuadro 11. Valores estimados para flexión 2^4 80

Cuadro 12. Respuesta óptima para flexión 2^4 81

Cuadro 13. Coeficientes de regresión para tensión. 87

Cuadro 14. Valores estimados para tensión..... 88

Cuadro 15. Respuesta óptima para tensión. 88

Cuadro 16. Diseño Factorial 22..... 90

Cuadro 17. Diseño de Composición Central..... 106

Cuadro 18. Arreglo óptimo de los niveles de los factores para flexión (DCC). 111

Cuadro 19. Arreglo óptimo de los niveles de los factores para tensión (DCC)..... 118

Cuadro 20. Cálculo de las funciones de deseabilidad predicha DGp y observada DGo... 121

Cuadro 21. Valores máximos y mínimos observados en el experimento..... 122

Cuadro 22. Arreglo de los factores que optimiza las dos variables de respuesta. 122

Cuadro 23. Calculo de las funciones del desplazamiento ideal. 124

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ecuaciones

Ecuación 1..... 48
Ecuación 2..... 50
Ecuación 3..... 52
Ecuación 4..... 53
Ecuación 5..... 53
Ecuación 6..... 54
Ecuación 7..... 80
Ecuación 8..... 87
Ecuación 9..... 91
Ecuación 10..... 99
Ecuación 11..... 107
Ecuación 12..... 114
Ecuación 13..... 123

I. INTRODUCCION

En este trabajo se ha dado respuesta a las crecientes exigencias que se plantean en la industria de procesos de transformación, donde el modelo de fabricación se desplaza de la producción masiva de productos de bajo costo, a uno donde la calidad, la adaptación rápida al mercado y el respeto al medio ambiente, cobran cada vez más importancia.

La perenne trascendencia de sectores como el de los polímeros plásticos nos ha llevado al estudio del proceso de producción de un compuesto de residuos de madera (aserrín) con plástico reciclado (PET), con el objetivo de sustituir la madera empleada en la fabricación de estructuras auxiliares en la industria de la construcción y la reutilización de los abundantes desechos plásticos.

Esto se logra mediante el diseño y optimización del proceso de manufactura del material compuesto empleando la metodología de superficie de respuesta y optimización simultanea de respuestas múltiples.

II. ANTECEDENTES

En México, un importante sector que consume madera es la industria de la construcción. Este sector representa el segundo segmento más importante en consumo de madera, alrededor de 600,000 m³ solamente en 1999 (Forster Et Al. 2004). Entre los diferentes usos que este sector asigna a la madera, se encuentran las estructuras auxiliares utilizadas para el colado de castillos y techos, conocidas como cimbras.

El utilizar madera para fabricar dichas estructuras o cimbras no solo representa un problema ecológico importante; además, en México es un material poco conveniente para este tipo de aplicación, por sus propiedades mecánicas, defectos y costos ambientales elevados.

La madera, al ser un producto natural, presenta las características de un material complejo y variable. Sus propiedades mecánicas pueden cambiar según la especie vegetal, las zonas geográficas, la temperatura y la humedad [1]. Por otra parte, Ordóñez y Dávalos (1996) indican que la clasificación de piezas de madera ofrecida comercialmente para fines estructurales se encuentra todavía en estado bastante rudimentario, al no existir normas sobre tolerancias y dimensiones.

Se debe tener en cuenta también que en el proceso de secado de la madera se producen una serie de defectos como rajaduras, torceduras y grietas, lo que ocasiona que la calidad de la madera pueda disminuirse (Ordoñez et al. 1998).

Algunas de las razones por las que los costos de la madera son elevados son debidas al almacenamiento, a su manejo y transporte, y a su vida útil limitada. Es por esto que la sustitución de la madera por otro material más económico y confiable puede contribuir a reducir los problemas de tala inmoderada, deficiencias mecánicas de las cimbras y costos elevados de operación en la industria de la construcción.

Esta situación ha generado una creciente necesidad de nuevos materiales con propiedades muy específicas, iniciando una búsqueda de diferentes alternativas para su obtención. Muchas de estas opciones o no cumplen con todas las exigencias del

mercado, o logran obtener excelentes propiedades mecánicas mediante procesos costosos.

Teniendo en mente la selección de un material que logre un balance entre estos dos últimos puntos dentro de la gran cantidad de materiales que se pudieran emplear para sustituir la madera, se propone utilizar un compuesto de madera plástico con PET (Polietilén Tereftalato) como matriz polimérica y aserrín como relleno. La razón para decidir utilizar este compuesto es que tiene importantes ventajas competitivas contra la madera, dichas ventajas se comentan más adelante.

Es importante notar que el refuerzo de materiales termoplásticos, como el PET, con fibras naturales, como el aserrín, ha sido un tema de interés mundial, considerado como vital en la búsqueda de procesos y productos industriales limpios, tecnologías menos agresivas con el medio ambiente y además económicamente viables (Cerrada 2003).

De acuerdo a Wolcott, en el 2003 el volumen de la demanda de productos plásticos rellenos con fibras de celulosa, particularmente de madera, se ha incrementado en los últimos años en mercados como el europeo y norteamericano. Aunque para este último, Smith en el 2001 aseguraba que la industria de los materiales de plástico compuesto con fibras de madera o Wood-Plastic Composites (WPC), cubrirían solo una fracción del porcentaje total de productos de madera. En ese mismo sentido, Mapleston estudio que el tamaño de mercado en el 2001 fue de 700 millones de libras y la expectativa de crecimiento para el 2005 fue de más del doble.

Este interés y demanda por compuestos termoplásticos con relleno de fibras naturales se debe a que nuestra sociedad produce una materia prima muy valiosa: la basura. Los plásticos forman una importante parte (45% en volumen) y entre éstos, el PET es uno de los que más sobresale. Basta con analizar que en el año 2005 se consumieron alrededor de 700 mil toneladas de PET en México y actualmente se recupera sólo el 20% aproximadamente de PET post consumo. En los vertederos de toda la república mexicana, si se suman las cantidades que se consumieron los años anteriores, se estima que, en forma de botellas, existen más de 5 millones de toneladas de este plástico. La

mayoría fueron utilizadas para envase de bebidas carbonatadas, aguas, aceite, alimentos, medicamentos y cosméticos (José Rémech, c., 2006).

El reciclado del PET es un negocio cada vez más rentable, debido a que este material se ha encarecido por el aumento de los precios del petróleo. Dado que el PET para reciclaje es abundante, los precios de este son relativamente bajos: el precio por un kilogramo de botella de PET es en promedio de 4 pesos (David Zuñiga 2005).

En este punto vamos a retomar la descripción de los compuestos de madera-plástico, con el objetivo de familiarizar más al lector sobre este tipo de material. Al inicio los compuestos de madera plástico fueron diseñados para sustituir a la madera. La bakelita, inventada en 1909 por Leo H. Baekeland, es uno de los primeros compuestos de madera-plástico, al estar formada por finas partículas de madera, a las que se añaden resinas de fenol y formaldehído.

En años recientes, este tipo de compuestos ha tenido un rápido aumento en producción comercial. En la última década, la producción de estos productos ha aumentado un 300% anual con un incremento de 60% proyectado para los próximos 5 años (Eckert 2000).

Una característica interesante de los materiales compuestos es que ofrecen la posibilidad de fabricar productos específicamente adaptados a las necesidades requeridas y mejorar la relación precio/funcionalidad.

Estos compuestos disponen de ventajas con relación a productos competidores, aportando numerosas cualidades funcionales: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, libertad de formas enriqueciendo las posibilidades de diseño.

La gran mayoría de los productos de madera plástico que se fabrican actualmente incorporan los mismos productos: por un lado materiales termoplásticos, y por otro, madera en forma de polvo. Esta combinación no parecía muy prometedora, ya que por un lado las fibras de madera son muy cortas, absorben mucha humedad y son menos resistentes que las fibras de vidrio o de carbono; y por otro lado los materiales

termoplásticos son más débiles que los termoendurecibles. Sin embargo, los resultados de la combinación han sido sorprendentes.

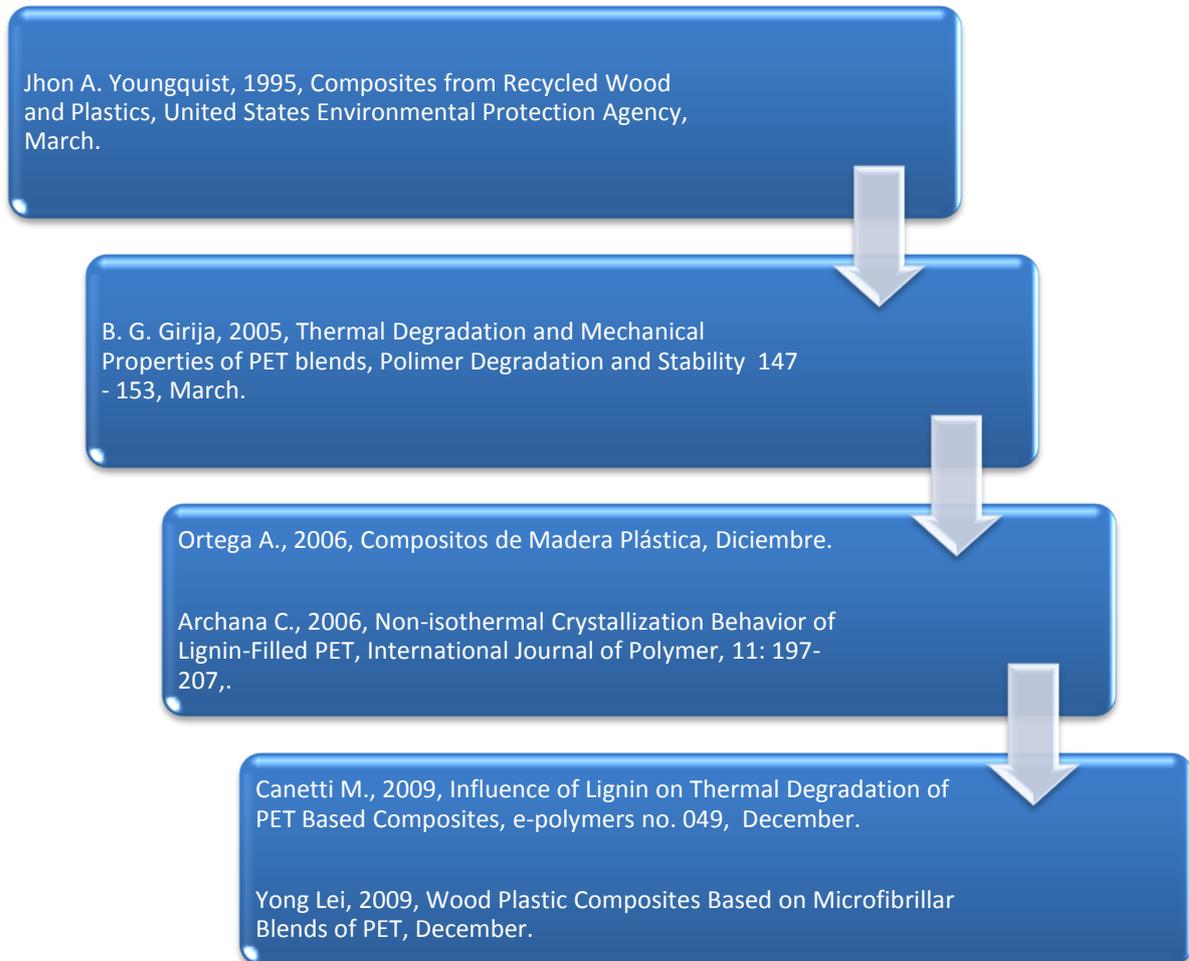
Para productos de aplicación en la construcción, estos materiales son extruidos y son usados principalmente en puertas, ventanas y productos de recubrimiento, donde la durabilidad y la resistencia a la humedad es la principal meta (Eckert 2000). Muchos de estos materiales son extruidos en complicadas formas estructurales para facilitar el rendimiento mecánico minimizando el uso de material. La forma de economizar este tipo de formas es logrando mejorar la estabilidad térmica con adiciones de madera de más del 50% en peso (Wolcot and Englund 1999).

En los compuestos de madera plástico, la madera, como material de refuerzo, puede llegar a usarse en forma de virutas, harina o fibras preparadas hasta en un 90%.

Por regla general, se utiliza al Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Cloruro de Polivinilo (PVC) y Poliestireno (PS), como matriz polimérica (Beate T. 2007).

En este sentido, el esfuerzo para determinar una materia prima que sea viable se centra en los termoplásticos y los aditivos. La revisión de los termoplásticos ha sido limitada a homopolímeros con temperaturas de procesamiento menores a 200 °C. Los termoplásticos que se conocen que trabajan bajo este criterio son: polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE). Estas poliolefinas han sido extensamente estudiadas para este tipo de aplicación. El uso de otros polímeros, como el PET, continúa siendo material de investigación.

Es importante resaltar la falta de investigación de compuestos de madera plástico con PET como matriz polimérica, una descripción general de los estudios que se han realizado hasta el momento se describe en el siguiente cuadro:



Cuadro 1. Descripción general del estado del arte de WPC con PET como matriz.

Con el cuadro anterior podemos señalar que es muy escasa la información que existe sobre compuestos de madera plástico con PET como matriz polimérica, lo cual deja ver una gran área de oportunidad en materia de investigación. Una descripción más profunda y detallada de esta información se dará más adelante en el capítulo titulado estado del arte.

Para finalizar el apartado de los antecedentes, vamos a resumir los conceptos antes mencionados.

Primero, tenemos un material estructural fabricado de madera (cimbra) que, por lo comentado, podemos determinar que es un material:

- Con malas propiedades mecánicas para una aplicación estructural (Cimbras de pino hechas en México).

- Que representa un problema ecológico serio en México.
- Que tiene costos elevados de producción por su materia prima limitada, equipo industrial y periférico altamente costoso y dificultades en almacenamiento y distribución.

Segundo, se tiene identificada la necesidad de desarrollar alternativas de materiales inocuos al medio ambiente. Por lo general los materiales primeramente estudiados para la sustitución de la madera representan alguna de estas categorías:

- Materiales con buenas propiedades mecánicas pero costos elevados de producción.
- Materiales que no cumplen con las exigencias del mercado.

Tercero, se ubica al PET como una alternativa viable y que puede lograr un punto intermedio entre las dos categorías antes mencionadas para sustituir a la madera, alternativa que puede ofrecer:

- Buenas propiedades mecánicas y ventajas en diseño.
- Costos bajos de producción y abundancia en materia prima.
- Grandes ventajas ecológicas.
- Área de oportunidad en materia de investigación científica.

Este resumen tiene la función de servir como un embudo entre todas las razones que originaron el desarrollo de este estudio y el planteamiento del problema de investigación, el cual será expuesto en el capítulo siguiente.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el capítulo anterior mencionamos las razones o causas que motivaron el desarrollo de esta investigación; resumimos estas causas en tres puntos principales: un material inadecuado para una aplicación estructural, una clara justificación ambiental y una inmensa área de oportunidad en materia de investigación.

Con lo anterior podemos concluir que, en nuestro estudio, debemos emprender una exploración del proceso de manufactura de un nuevo material compuesto de residuos de madera y PET reciclado, con el objetivo de generar un material viable para sustituir a la madera. Este proceso debe incluir: los materiales y sus proporciones, maquinaria, equipo y herramientas, tiempos y procedimientos de operación y especificaciones de proceso necesarias para el desarrollo de dicho material, esto con un enfoque de desarrollo de un nuevo producto en la primera etapa de manufactura; además, determinar el mecanismo estadístico experimental idóneo para optimizar las propiedades mecánicas necesarias para tal aplicación.

Las principales dificultades que se tienen identificadas son que el PET funde a temperaturas cercana a los 260 °C, lo que puede generar que la madera se quemé o degrade. Además que el PET es demasiado rígido y tiene poca resistencia a la flexión, motivos por los que existe poca investigación en materia de PET. Como elemento estructural.

Otros termoplásticos tienen puntos de fusión mucho más bajos y cuentan con buena resistencia a la flexión, pero estos termoplásticos no representan un problema ecológico tan grande en los tiraderos de México, no son tan abundantes como el PET y han sido extensamente estudiados en comparación con el PET.

IV. JUSTIFICACIÓN

Según el quinto informe de gobierno (2005), la producción forestal maderable ha disminuido considerablemente. Mientras que en el año 2000, ésta era de 9.4 millones de m³, para 2002 la producción maderable fue de 6.6 millones de m³.

La disminución en la producción forestal se ha visto acompañada por un incremento en el consumo. Los cambios generados en el consumo se deben, por un lado, al crecimiento de la población, y por otro lado, al incremento en el consumo per cápita de madera experimentado desde 2002, con excepción de 2004 (Figura 1).

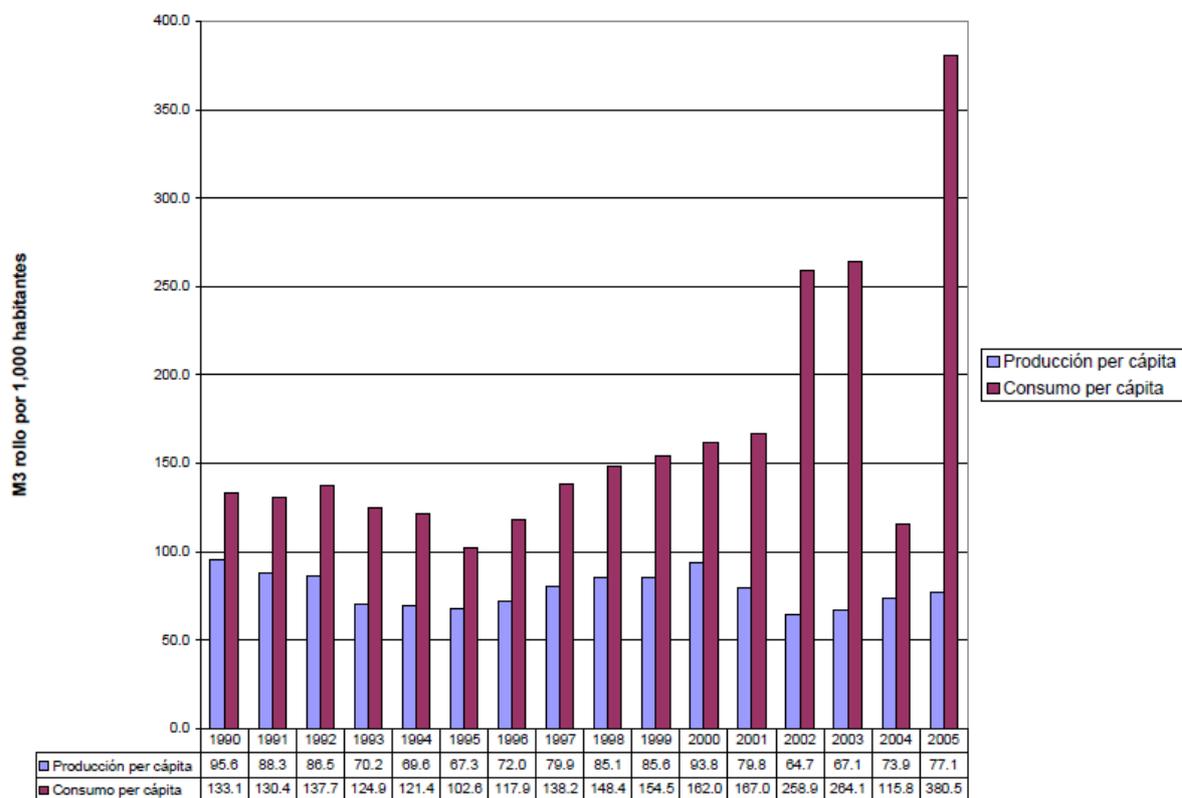


Figura 1. Consumo y producción de madera¹.

Entre 1990 y el año 2005, el consumo per cápita de madera prácticamente se ha triplicado. En el mismo periodo, la producción per cápita ha pasado de 95.6 m³/1000 habitantes a 73.9 m³/1000 habitantes en el 2004. La combinación entre la disminución en la producción por persona en este periodo y el crecimiento del consumo per cápita,

¹ Fuente: Presidencia de la República. Quinto Informe de Gobierno, 2005. Anexo. México, D.F., 2005.

ha provocado una brecha cada vez mayor, en donde se calcula que la producción nacional puede satisfacer solamente al 20% de la demanda de consumo nacional[2].

Aunado a esto, el valor por m³ de especies ha mantenido un patrón de crecimiento (Cuadro 2). Por ejemplo, en 1980 el pino valía 1 peso por m³ producido, para 1990 esta cifra había aumentado hasta 117 pesos por m³, y para el año 2000 el m³ de pino valía 555 pesos. A partir del año 2000 el valor se incrementa a una tasa de alrededor del 23% anual, pero en 2004 el valor por m³ disminuye en 4%. Para finales del 2005, se estimaba un incremento en el valor de la producción de pino por m³ de alrededor del 4%, para alcanzar un valor de 955 pesos por m³.

	Valor Total	Pino	Oyamel	Otras coníferas	Encino	Otras latifoliadas	Preciosas	Otras
1980	1.07	1.06	0.83	1.21	0.77	0.96	3.41	1.08
1985	10.04	10.32	8.19	7.80	6.59	4.36	24.37	9.71
1990	113.15	117.77	66.09	93.34	63.73	75.10	304.32	108.72
1995	235.08	242.78	163.20	187.68	137.85	200.62	735.39	258.03
2000	555.59	554.05	535.08	456.73	501.03	294.24	1833.55	762.20
2001	642.80	682.70	577.47	443.92	334.07	314.57	2839.55	732.97
2002	796.37	848.83	696.84	638.74	454.98	354.98	2359.30	847.19
2003	955.08	1048.30	720.99	501.32	581.05	295.35	2248.29	683.93
2004 ^{/p}	916.51	998.96	694.02	497.82	578.54	292.62	2219.43	623.57
2005 ^{/e}	955.15	1048.30	720.99	501.32	581.05	295.35	2248.28	683.93

Cuadro 2. Valor por metro cubico rollo (pesos).

El incremento en los precios de la madera origina que los costos de los productos elaborados con madera, como las cimbras, sean cada vez mayores, lo que genera incrementos en los costos de operación en la industria constructora.

Con esta información es fácil detectar un interesante área de negocio, en cuanto a producir cimbras elaboradas por otro material cuyos costos sean menores al de la madera y que además, sea un material abundante, como es el caso del PET.

El PET es uno de los materiales comúnmente utilizados en la industria embotelladora de bebidas y embalaje por sus características muy particulares que favorecen la distribución, el almacenaje y la presentación de algunos productos. Tan sólo en el

Distrito Federal, la Asociación para Promover el Reciclaje del PET A.C. estima que la demanda de PET para la fabricación de envases en la actualidad es de 55,800 toneladas al año.

Derivado de los altos niveles de consumo de estos productos, los costos del PET han ido en decremento, empresas de reciclaje como Reciclados Crisol paga actualmente entre 1.50 y 2.20 pesos por kilo (lo que equivale aproximadamente a 100 botellas de un litro y medio), otras empresas compran los envases vacíos de PET para reciclarlos hasta el nivel de chips para exportarlos a China, Corea o Japón, principalmente, aunque también a Estados Unidos y pagan alrededor de 13 pesos por Kg en la actualidad.

Por otro lado, los altos niveles de consumo de PET, han originado que existan grandes cantidades de residuos, además, según datos manejados por el PNUMA² en 1996, una botella de PET tarda en degradarse 500 años dentro de un tiradero.

De igual forma, los envases de plástico, en particular, son asociados con el bloqueo de los drenajes, lo que ocasiona inundaciones en la época de lluvias. Por ello existe una gran presión social para que este tipo de envases se reutilice o recicle.

Existe interés por parte de las instancias responsables de la gestión de los residuos para que se identifiquen y establezcan instrumentos económicos y de otra índole, así como mecanismos que faciliten el acopio de materiales potencialmente reciclables para evitar contaminar el ambiente o que sean llevados a sitios de disposición final sin aprovechar su valor.

En conclusión podemos señalar que existen grandes ventajas competitivas de las cimbras fabricadas con PET contra las fabricadas en madera. Algunos ejemplos son:

- Se pueden lograr un precio de venta de cimbras de plástico competitivo en comparación al de las cimbras de madera.

² Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

- Por ser un material plástico es posible darle una geometría a la cimbra que permita: optimizar el uso de material y obtener un diseño adecuado para su almacenamiento y transportación.
- Las cimbras de plástico no tendrían problemas de plagas por ser un material sintético.
- Los problemas que se presentan en cuanto al deterioro de la madera por la humedad no se presentarían en las cimbras de PET.

Podemos terminar diciendo que el desarrollo de este proyecto tiene un impacto económico, social, ecológico y científico.

V. OBJETIVO GENERAL

Diseñar el proceso de manufactura óptimo de un nuevo compuesto de residuos de madera con plástico reciclado, que permita desarrollar el prototipo de una estructura auxiliar con propiedades mecánicas, costos y una geometría adecuada para sustituir a la actual cimbra fabricada con madera empleada en la industria de la construcción.

VI. OBJETIVOS PARTICULARES

- Operacionalizar el proceso de manufactura de un compuesto de madera-plástico, para indicar los procedimientos de operación necesarios en su fabricación, de modo que se garantice la correcta elaboración del material estructural.
- Determinar la estrategia de optimización experimental estadística más adecuada a las características del problema, para asegurar que el estudio sea efectuado de una manera eficiente, rentable y precisa.
- Identificar los factores y variables de respuesta que deberán ser estudiadas para lograr las características del compuesto necesarias en la sustitución de la cimbra de madera.
- Identificar de qué forma las variables del proceso de manufactura afectan las propiedades mecánicas del compuesto.

VII. HIPÓTESIS

Si se identifican los procedimientos de operación adecuados del proceso de manufactura, es posible realizar un compuesto de residuos de madera (aserrín) con PET reciclado que sea viable para una aplicación estructural.

La manipulación de las variables de proceso: Tipo de PET (viscosidad), concentración de madera, tipo de agente de acoplamiento y el tamaño de la partícula del aserrín, genera un cambio en la resistencia a la tensión y flexión del compuesto de madera-plástico.

VIII. ESTADO DEL ARTE

Actualmente existe una gran cantidad de artículos relacionados al estudio de los compuestos de madera plástico. La gran mayoría de ellos hablan de compuesto que fueron desarrollados con matrices poliméricas como: polietileno (PE), polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC).

Por otra parte, la información de compuestos de madera plástico con PET como matriz polimérica es muy escasa.

A continuación se explica cuál fue la estrategia de búsqueda y posteriormente se proporcionaran los resultados obtenidos.

En la revisión del estado del arte se utilizaron las siguientes bases de datos:

- Isi web of knowledge
- Science Direct
- Scifinder

La búsqueda inicial se realizó utilizando las palabras “Wood plastic composites” en las tres bases de datos. Para el caso de Isi web of knowledge se encontraron 412 resultados, para el Science Direct 15,074 y para el Scifinder 624. Dentro de los resultados que se obtuvieron se encuentran artículos, libros y patentes.

Dentro de los resultados obtenidos se realizó una segunda búsqueda con la palabra polyethylene terephthalate o poly(ethylene terephthalate), para cada una de las bases de datos se obtuvieron 274, 555 y 260 resultados, respectivamente.

Cada una de las bases de datos ofrece diferentes alternativas para poder filtrar información en la búsqueda. En forma general se puede comentar que en el tercer nivel de búsqueda, se excluyeron: libros, trabajos referenciados, revistas de áreas diferentes a

la investigación y temas que se consideran como no relevantes. Con estos filtros los resultados se redujeron a 186, 251 y 150 respectivamente.

Al término del tercer nivel de búsqueda, se comenzó la revisión individual de los artículos que se esperaban fueran de interés.

Durante la búsqueda individual se trataba de localizar artículos de compuestos con PET como matriz polimérica, que mostraran estudios de caracterización mecánica, propiedades térmicas, plásticos reciclados, influencia de las partículas de relleno, agentes de acoplamiento y procedimientos de manufactura del compuesto.

Por último, se presenta una matriz (cuadro 3), donde se enlistan los artículos que fueron guía de la investigación y la construcción del marco teórico.

	Año	Autor	Título	Fuente	FI
1	1995	John A. Youngquist	Composites from Recycled wood and plastics	Environmental protection agency	N/A
2	2003	Antonio F. Ávila	A mechanical analysis on recycled PET/PE composites	Polymer Degradation and Stability	2,154
3	2003	Susan E. Selke	Wood fiber/polyolefin composites	Applied Science and Manufacturing	2,41
4	2004	Antonio da Silva Maciel	Paineis de particulas aglomeradas de madera de pinus (PS)/(PET)	Árvore	N/A
5	2004	Constantinescu, Gabriela	Composites from recycled wood and plastics	Environmental Engineering and Management	0,885
6	2005	B. G. Girija	Thermal degradation and mechanical properties of pet blends	Polymer degradation and stability	2,154
7	2006	Luis Cervantes	Compositos de madera plástica	CIQA	N/A
8	2007	Maurizio Canetti	Supermolecular structure and thermal properties of pet/lignin composites	Composites science and technology	2,901
9	2007	Ching-Wen Lou	PET/PP blend with bamboo charcoal to produce functional composites	Materials Processing Technology	1,42
10	2008	Yong Lei	Engineered wood polymer composites based recycled PE PET blends	Polymer materials science and engineering	N/A
11	2008	Satapathy, Sukanya	Mechanical properties and fracture behavior of short PET fiber-waste polyethylene composites	REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES	0,763
12	2008	Ahmad, I.	The effect of alkali treatment and filler size on the properties of sawdust/UPR composites based on recycled PET wastes	APPLIED POLYMER SCIENCE	1,203
13	2009	Maurizio Canetti	Influence of the lignin on thermal degradation and melting behaviour of PET composites	e-polymers	0,644
14	2010	Kiziltas, Alper	Determining the mechanical properties of microcrystalline cellulose (MCC)-filled PET-PPT Blend composites	WOOD AND FIBER SCIENCE	0,654
15	2010	Yong Lei	Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly(ethylene terephthalate)	BIORESOURCE TECHNOLOGY	4,253

Cuadro 3. Matriz de estado del arte.

En el cuadro 5 se muestra que el primer compuesto de madera plástico con PET como matriz polimérica, fue desarrollado en 1995 por John A. Youngquist, y el último trabajo publicado fue en el 2010 por Yong Lei.

Es importante comentar que algunos de los artículos mostrados en el cuadro 3 son de compuestos con PET como matriz polimérica, pero utilizan rellenos diferentes a la madera. Se decidió incluir tales artículos dentro del estado del arte por considerarlos como una tendencia en la elaboración de materiales compuestos base PET.

8.1 Conclusiones principales de los artículos consultados.

A continuación se muestra un listado con las principales conclusiones obtenidas de las investigaciones realizados por los autores consultados (Cuadro 3):

1. Incorporar un agente de acoplamiento incrementa o mejora las propiedades del compuesto de madera-plástico, además mejora la dispersión de la fibra al momento del mezclado (John A. Youngquist, 1995).
2. Adicionar partículas del polietileno de alta densidad (HDPE) reduce la rigidez en el compuesto de madera-plástico con PET como matriz polimérica (Antonio F. Ávila, 2003).
3. Incorporar HDPE maleatado incrementa la adhesión entre la fibra y la matriz polimérica, además mejora significativamente la resistencia a la tensión (Susan E. Selke, 2003).
4. Realizar paneles de PET/PS sin agente de acoplamiento reduce significativamente su resistencia (Antonio da Silva Maciel, 2004).
5. El modulo de elongación decrece al incrementar la concentración del relleno de madera (Constantinesou Gabriela, 2004).
6. No hay un cambio significativo en la temperatura de descomposición del PET mezclado con diferentes rellenos naturales. Esto sugiere que existe cierto grado de interacción entre los componentes de la mezcla. Las propiedades mecánicas de las mezclas se reduce drásticamente debido a la mala dispersión del material de relleno en la matriz de PET, mientras que el módulo de Young aumenta con la adición de relleno (B. G. Girija, 2005).
7. Es técnicamente factible la realización de compuestos útiles de PET y madera (Luis Cervantes, 2006).
8. La lignina produce un notable incremento en la cristalización del PET (Maurizio Canetti, 2007).
9. Las propiedades mecánicas de compuestos de PET/PP y madera fueron mejores con un 10 y 20% de composición poliéster (Ching-Wen Lou, 2007).
10. El comportamiento de cristalización del HDPE y del PET influyen el uno con el otro. La adición de 20% de harina de madera en las mezclas incrementa la resistencia a la tracción, flexión y resistencia al impacto, especialmente en el

- módulo. La adición de 40% de harina de madera reduce la resistencia al impacto (Yong Lei, 2008).
11. La resistencia mecánica se mejora al incrementar el relleno de fibra arriba del 50% al peso. El PE maleatado como agente de acoplamiento incrementa la resistencia a la flexión cuando se mezcla con PET (Satapathy, 2008).
 12. El tamaño de partícula del aserrín juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas, con un tamaño menor de partícula se obtiene una mayor resistencia del material y se incrementa el modulo. Esto es debido a que hay una mayor área de contacto entre la fibra y la matriz lo que incrementa la interacción (Ahmad, 2008).
 13. La presencia de lignina en la matriz polimérica de PET influye fuertemente en el comportamiento de fusión del compuesto (Maurizio, 2009).
 14. La resistencia al impacto de compuestos de PET y celulosa microcristalina disminuye al incrementar el porcentaje de relleno de la celulosa (Kiziltas, 2010).
 15. Un compuesto de madera plástico con PET como matriz polimérica fue exitosamente desarrollado a través de una tecnología de extrusión reactiva de dos pasos (Yong, 2010).

La revisión del estado del arte llevo a las siguientes conclusiones:

- No se encuentra artículo publicado a la fecha respecto a compuestos de madera plástico con PET como matriz polimérico para aplicaciones estructurales.
- Existe un interés actual por la investigación de compuestos con PET como matriz polimérica y diferentes fibras de relleno, ya que se encuentra en la frontera del conocimiento.
- El factor de impacto de las revistas de los artículos mostrados en la matriz nos indica que la calidad en la investigación en cuanto a los compuestos es muy alta.
- La cantidad de publicaciones para este tema va en aumento.

IX. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan algunos aspectos generales relacionados con fundamentos de manufactura, plásticos y materiales compuestos, así como de conceptos de diseño de experimentos y optimización, considerando estos tópicos como esenciales en el desarrollo del proyecto.

9.1 Manufactura.

La palabra manufactura se deriva del latín manus (manos) y factus (hacer); la combinación de términos significa hacer con las manos, casi siempre como una sucesión de operaciones. También involucra actividades en que el producto manufacturado mismo se utiliza para fabricar otros productos; este término apareció por primera vez en 1567.

La manufactura, en el contexto moderno, puede definirse de 2 maneras: tecnológica y económica.

Tecnológicamente es la aplicación de procesos químicos y físicos que alteran la geometría, las propiedades, o el aspecto de un determinado material para elaborar partes o productos. Incluye también el ensamble de partes. Los procesos para realizar la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual.

Económicamente es la transformación de materiales en artículos de mayor valor, a través de operaciones o procesos de ensamble.

Actualmente existe el departamento de ingeniería de manufactura que tiene la responsabilidad de instruir en la forma de cómo elaborar el producto, la secuencia y los recursos que se deben emplear, en otras palabras, el proceso de diseño. El proceso de diseño de un producto requiere primero de la comprensión clara de las funciones y del rendimiento esperado del producto, el cual puede ser nuevo o una versión revisada de un producto ya existente. Es una actividad crítica por qué se ha estimado que del 70 a

80% del costo de desarrollo de un producto y su manufactura queda determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño.

Otra función que se asigna a la manufactura es la de control de procesos. Se realizan continuamente mediciones de calidad durante un proceso como parte de la evaluación del desempeño.

9.1.1 Fundamentos de los Materiales.

La tarea de los ingenieros de manufactura es un verdadero reto, debido a la amplia variedad de materiales ahora disponibles (Figura 2).

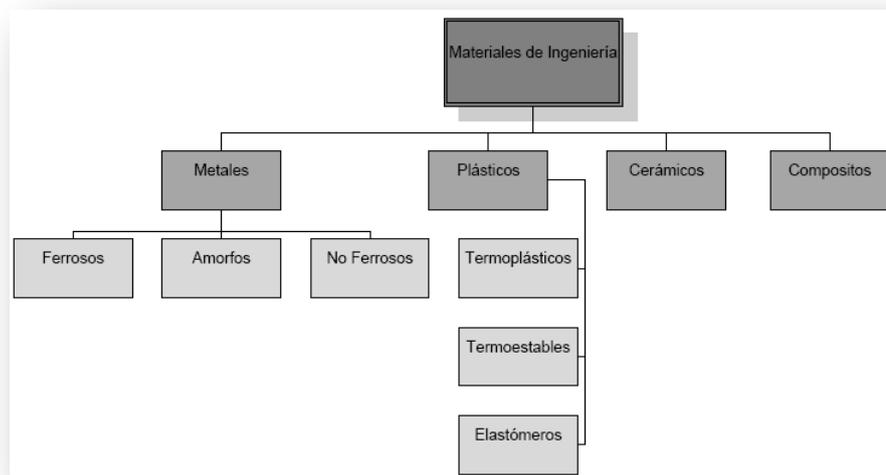


Figura 2. Materiales de Ingeniería.

La mayoría de los materiales de ingeniería se pueden clasificar en una de las cuatro categorías básicas: metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos. Tanto sus características físicas y mecánicas como sus propiedades químicas son diferentes. Estas diferencias afectan los procesos de manufactura que se usan para transformarlos en productos finales.

Por la naturaleza de la investigación los materiales que se van a revisar son los plásticos y los materiales compuestos.

9.2 Plásticos.

Los plásticos son un gran grupo de materiales orgánicos que contienen como elemento principal el carbono, combinado con otros ingredientes como el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Las propiedades favorables más importantes que ofrecen los plásticos con respecto a otros materiales son la ligereza, la elasticidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, costo, son reciclables y fáciles de fabricar.

Los plásticos se clasifican en tres grandes grupos: termoplásticos, termofijos y elastómeros.

Termoplásticos: Son plásticos con moléculas colocadas de manera tal que, cuando el material es calentado, sus relaciones intermoleculares se debilitan y se vuelven más suaves. Cuando el material se enfría se endurece y vuelve a su estado rígido. El material mantiene la mayoría de sus propiedades y puede utilizarse para una nueva fabricación.

Termofijos: Son llamados también termoestables. No sufren deformaciones al ser calentados. Una vez que estos polímeros adquieren rigidez no pueden volverse a trabajar, se presentan en forma líquida viscosa y al añadirle un catalizador se entrecruzan y se endurecen de forma irreversible.

Elastómeros: Materiales plásticos de origen vegetal o sintético que tienen la cualidad de elongación de hasta 30 veces su tamaño normal pudiendo regresar a su estado original sin sufrir cambios.

Nuestra atención se centra en los termoplásticos, ya que se utilizara polietileno (PE) y polipropileno (PP) como agentes de acoplamiento y PET como matriz polimérica. Estos tres plásticos pertenecen a la familia de los termoplásticos.

9.2.1 Polietilentereftalato.

El PET es un polímero de condensación formado a partir del dimetiltereftalato (DMT) y el etilenglicol (EG). El DMT es obtenido como un subproducto de la refinación del

petróleo y el EG es un subproducto del gas natural perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres.

El PET fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickinson en 1941. Catorce años más tarde, en 1955 comenzó la producción comercial de fibra de poliéster.

Desde entonces hasta hoy en día la fabricación de PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico, logrando un alto nivel de calidad y una diversificación en sus empleos.

A partir de 1976 se emplea el PET en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente para bebidas. Al principio eran botellas gruesas y rígidas, pero hoy en día, sin perder sus excelentes propiedades como envase, son mucho más ligeros.

La fórmula química del polietilentereftalato o politereftalato de etileno se muestra en la figura 3.

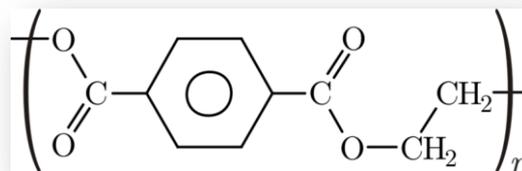


Figura 3. Representación de una cadena de PET.

Algunas propiedades del PET son las siguientes:

- Procesable por soplado, inyección, extrusión.
- Transparencia y brillo con efecto lupa.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Barrera de los gases.
- Biorientable-cristalizable.
- Esterilizable por gamma y óxido de etileno.

- Costo/ performance.
- Ubicado N°1 en reciclado.
- Liviano
- Punto de fusión aprox. 252/260.

Las desventajas que presenta el PET se enlistan a continuación:

Secado: Todo poliéster tiene que ser secado a fin de evitar pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005%.

Resistencia Química: poca resistencia a solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.

Por otra parte las ventajas que tiene el PET son:

Propiedades únicas: Claridad, brillo, transparencia, barrera a gases u aromas, impacto, termoformabilidad, fácil de imprimir con tintas, permite cocción en microondas.

Costo: El precio del PET ha sufrido menos fluctuaciones que el de otros polímeros como PVC-PP-LDPE en los últimos 5 años.

Disponibilidad: Hoy se produce PET en Sur y Norteamérica, Europa, Asia y Sudáfrica.

Reciclado: El PET puede ser reciclado dando lugar al material conocido como RPET. Lamentablemente el RPET no puede emplearse para producir envases para la industria alimenticia debido a que las temperaturas implicadas en el proceso no son lo suficientemente altas como para asegurar la esterilización del producto.

Biorientación: Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

Cristalización: Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.

Esterilización: El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.

Resistencia química: Buena resistencia general en especial a grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes.

El PET presenta una estructura molecular con la regularidad estructural necesaria para tener un potencial de cristalización. Debido a la presencia de anillos aromáticos en su cadena, el PET presenta una moderada flexibilidad molecular que se refleja en que su temperatura de transición vítrea (T_g) se encuentre en torno a los 70-80°C. Esto hace que su capacidad de cristalizar sea controlada por las condiciones de enfriamiento. Así, la densidad del PET puede variar desde 1,33-1,34 g/cm³ para un material amorfo hasta aproximadamente 1,45-1,51 g/cm³ para el caso semicristalino.

El parámetro de solubilidad del PET es aproximadamente de 21,8MPa^{1/2} lo que lo haría sensible a algunos solventes. Aunque es un polímero polar, sus propiedades como aislante eléctrico a temperatura ambiente son buenas a altas frecuencias, debido a que el material, al estar por debajo de la T_g , tiene restricciones en la orientación de dipolos.

Otro factor a tener en cuenta durante el procesamiento es su carácter higroscópico, de ahí que sea práctica común en la industria realizar ciclos previos de secado por periodos de hasta 6 horas antes de cualquier etapa de procesamiento.

9.2.2 Polietileno.

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado.

Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después encontraron muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y para envases. Una representación de la estructura molecular del PE se muestra en la figura 4.

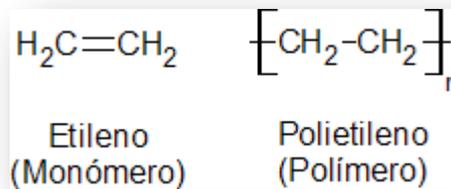


Figura 4. Estructura molecular del PE.

En general existen dos tipos de PE, el polietileno de baja densidad (LDPE) y el polietileno de alta densidad (HDPE). El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta.

El polietileno de baja densidad fue producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores, necesitando presiones de 14.500 psi (100 Mpa) y una temperatura de unos 300 °C.

El PE de alta densidad fue producido comercialmente por primera vez en 1956-1959 mediante los procesos de Philips y Ziegler utilizando un catalizador especial. En estos procesos la presión y temperatura para la reacción de conversión del etileno en PE fueron considerablemente más bajas. Por ejemplo, el proceso Philips opera de 100 a 150 °C y 290 a 580 psi (2 a 4 MPa) de presión.

Como el PE es un termoplástico, pueden ser ablandados mediante calor repetidas veces y endurecidos mediante enfriamiento.

El PE presenta tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas a su vez dependen del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno.

Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para miles de artículos manufacturados son: poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes.

La enorme competencia en el mercado ha traído consigo más trabajos acerca de las modificaciones del PE con propiedades específicas para aplicaciones determinadas.

9.2.3 Polipropileno.

El polipropileno (PP) es un termoplástico semicristalino, que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estereo específico. El PP tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor desarrollo en el futuro.

Es un producto inerte, totalmente reciclable, su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental. Esta es una característica atractiva frente a materiales alternativos. En la figura 5 se presenta una representación de la estructura molecular del PP.

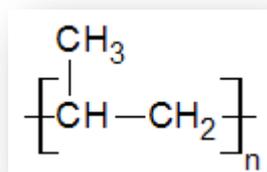


Figura 5. Estructura molecular del PP.

La polimerización catalítica del propileno fue descubierta por el italiano Giulio Natta en 1954 y marcó un notable hito tanto por su interés científico, como por sus importantes aplicaciones en el ámbito industrial. Empleando catalizadores selectivos, se obtuvo un polímero cristalino formado por la alineación ordenada de moléculas de propileno monómero. Los altos rendimientos de reacción permitieron su rápida explotación comercial. Aunque el PP fue dado a conocer a través de patentes y publicaciones en 1954, su desarrollo comercial comenzó en 1957 y fue debido a la empresa italiana Montecatini. Pocos años más tarde, otras empresas, entre ellas I.C.I. y Shell fabricaban también dicha poliolefina. Este descubrimiento impulsó la investigación de los sistemas catalíticos estereoespecíficos para la polimerización de olefinas y le otorgó a Natta, junto al alemán Karl Ziegler, el premio Nobel de química en 1963.

Hoy en día el PP es uno de los termoplásticos más vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en los mercados.

La gran aceptación que ha tenido ha estado directamente relacionada con su versatilidad, sus buenas propiedades físicas y la competitividad económica de sus procesos de producción. Varios puntos fuertes lo confirman como material idóneo para muchas aplicaciones:

- Baja densidad
- Alta dureza y resistente a la abrasión
- Alta rigidez
- Buena resistencia al calor
- Excelente resistencia química
- Excelente versatilidad

Por la excelente relación entre sus prestaciones y su precio, el polipropileno ha sustituido gradualmente a materiales como el vidrio, los metales o la madera, así como polímeros de amplio uso general (ABS y PVC).

9.3 Materiales Compuestos.

Se puede distinguir una cuarta categoría de materiales además de los metales, los cerámicos y los polímeros. Esta cuarta categoría son los materiales compuestos.

De alguna forma son los más interesantes en ingeniería porque su estructura es más compleja que los otros tres tipos. Podemos definir los materiales complejos como: Un sistema de materiales formado por dos o más fases físicas distintas, cuya combinación produce propiedades conjuntas que son diferentes de las de sus constituyentes.

La importancia tecnológica y comercial de los materiales compuestos se debe a que sus propiedades no solamente son diferentes de sus componentes, sino que son superiores. La combinación de fases crea un material cuyo desempeño conjunto excede al de sus partes. El efecto es sinérgico. Algunas de las ventajas son:

- Diseños fuertes, rígidos y de peso muy ligero, obteniendo relaciones de resistencia y rigidez al peso mucho mejores a la de materiales convencionales.
- Con los materiales compuestos es posible lograr combinaciones de propiedades que no se pueden lograr con los metales, los cerámicos o los polímeros por sí solos.
- Es posible lograr mejor apariencia y control de la superficie.

Junto con estas ventajas, hay también desventajas y limitaciones asociadas a los materiales compuestos, algunas pueden ser:

- Las propiedades de muchos compuestos son anisotrópicas³.
- Muchos compuestos basados en polímeros están expuestos al ataque de agentes químicos o solventes.
- Algunos de los métodos de manufactura para su conformado son lentos y costosos.

³ Las propiedades de estos compuestos pueden cambiar en función de la dirección en la cual se miden.

Una posible clasificación de los materiales compuestos distingue entre: tradicionales y compuestos sintéticos.

Los compuestos tradicionales son aquellos que existen en la naturaleza⁴. Los compuestos sintéticos son sistemas de materiales modernos asociados normalmente con la industria manufacturera, donde los componentes se producen primero en forma separada y luego se combinan bajo control para lograr la estructura, las propiedades y la geometría deseada. Estos materiales sintéticos se conciben normalmente en el contexto de la ingeniería de productos.

En la forma más simple de la definición, un material compuesto consiste de dos fases: una primaria y la otra secundaria. La fase primaria forma la matriz dentro de la cual se incorpora la segunda fase. La segunda fase sirve como refuerzo del compuesto. La fase de refuerzo puede ser en forma de fibra, partículas u otras. Las fases son generalmente insolubles una en otra, pero debe existir una fuerte adhesión entre sus interfaces.

El sistema de clasificación para materiales compuestos con base en la fase matriz son: Compuesto en matriz metálica, en matriz cerámica y en matriz polimérica.

En cualquiera de estos tres tipos de compuesto se tiene lo que se conoce como fase de refuerzo, las fases de refuerzo más comunes se presentan en forma de: *Fibra, partícula y hojuela*.

Fibra: son filamentos de material de refuerzo, generalmente de sección transversal circular, aunque se usan a veces formas alternativas. El refuerzo con fibras brinda la mejor oportunidad para mejorar la resistencia de las estructuras compuestas, se considera a la fibra el constituyente principal ya que soporta la mayor parte de la carga.

El diámetro de la fibra tiene un efecto en la resistencia a la tensión, a medida en que el material se orienta más hacia la dirección del eje de la fibra la probabilidad de defecto en la estructura decrece significativamente, lo que da como resultado un aumento en la resistencia a la tensión.

⁴ La madera es un material compuesto que se encuentra en la naturaleza.

Partículas: las partículas son una forma importante del material para los metales y los cerámicos. La distribución de partículas en la matriz del compuesto es aleatoria y, por tanto, la resistencia y otras propiedades del material compuesto son generalmente isotrópicas. El mecanismo de reforzamiento depende del tamaño de las partículas.

Hojuelas: son básicamente partículas bidimensionales, plaquetas pequeñas. Que generalmente se usan como agentes de refuerzo en los plásticos. Son de costo más bajo que los polímeros y añaden resistencia y rigidez a los compuestos para el moldeo de plásticos [3].

9.3.1 Compuestos en Matriz Polimérica.

Un compuesto de matriz de polímero consiste en una fase de polímero primaria en la cual es embebida una fase secundaria a base de fibras, partículas y hojuelas.

Los ingredientes de la fase secundaria se llaman rellenos cuando se usan en compuestos para moldeo de polímeros. Los rellenos se dividen en dos categorías: refuerzos y extensores.

- Los rellenos de refuerzo sirven para fortalecer o mejorar de alguna manera las propiedades mecánicas del polímero.
- Los extensores simplemente incrementan el volumen y reducen el costo por unidad del peso del polímero, que tiene poco o ningún efecto en las propiedades mecánicas. Los extensores se pueden formular para mejorar las características de moldeo de las resinas [3].

9.3.2 Madera.

La madera es un material compuesto de origen vegetal que se obtiene de los árboles. La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, poliosas (hemicelulosas) y ligninas, que están presente en todas las maderas; el

otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad, y las sustancias minerales.

La proporción y composición química de la lignina y las poliosas difiere para las maderas de coníferas y latifolias, mientras que la celulosa es uniforme en composición en todas las maderas [4].

A continuación se revisaran algunas propiedades y características de maderas comúnmente usadas en México para la fabricación de diferentes productos como las cimbras.

Es de suma importancia, para obtener un diseño óptimo de una cimbra, que quienes estén relacionados con los aspectos de la construcción de cimbras entiendan las propiedades básicas de los materiales de que se dispone.

La madera por sus características y costos, en comparación con algunos materiales, ha sido el material más usado en la construcción. La mayoría de las cimbras se construyen basándose en la experiencia. En diseños especiales de cimbras es casi imposible aplicar el conocimiento empírico, ya que es necesario calcular la cimbra estáticamente para los diversos miembros que la construyen. De esta manera se obtienen formas más seguras y económicas.

El criterio de clasificación de las maderas mexicanas de acuerdo con Dávalos y Bárcenas (1998) es la densidad relativa. Este sistema permite clasificar las maderas en cinco grupos: muy bajo, bajo, mediano, alto y muy alto. Los límites de densidad para los diferentes grupos son los mismos que para las referencias citadas (Dávalos y Bárcenas, 1998; 1999), es decir: 0.70, 0.55, 0.45 y 0.30 respectivamente [5].

En este apartado se presentara un sistema de clasificación o agrupación de las maderas mexicanas en condición verde desarrollado por Dávalos y Bárcenas, (1998). Esta forma de clasificación permite hacer comparaciones entre especies.

Para cada propiedad mecánica se presentan los valores de los parámetros estadísticos usuales: mínimo, máximo, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. En

la Cuadro 4 se incluyen los parámetros correspondientes a las diferentes propiedades. En la Cuadro 5 se muestran los valores de las propiedades mecánicas determinados como límites entre las diferentes categorías.

VALORES	FLEXION		COMPRESION		CORTANTE	DUREZA	
	Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Paralela Esf. Máx. (kg/cm ²)	Perpendicular Esf. Lim.Prop (kg/cm ²)	Paralelo Esf. Máx. (kg/cm ²)	Lateral (kg)	Extremos (kg)
Mínimo	224	20,290	109	15	31	98	125
Máximo	1540	187,560	703	201	137	1223	1367
Promedio	697	106,080	331	63	83	438	480
Desv. Est.	285	34,690	135	47	26	255	262
Coef. Var.	30	33	41	75	31	58	55

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de las propiedades mecánicas de maderas mexicanas en condición verde Dávalos y Bárcenas (1998).

	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
FLEXION					
Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	< 290	291 - 500	501 - 650	651 - 900	> 900
Módulo de Elasticidad (kg/cm ²) (*1000)	< 55	56 - 80	81 - 100	100 - 125	> 125
COMPRESION					
PARALELA (E. Máx.)(kg/cm ²)	< 160	161 - 250	251 - 310	311 - 400	> 400
PERP. (E.Lim. Prop.)(kg/cm ²)	< 15	16 - 35	36 - 50	51 - 85	> 85
CORTANTE					
Esf. Máx.(kg/cm ²)	> 45	46 - 65	66 - 85	86 - 110	> 110
DUREZA					
Lateral (kg)	> 130	131 - 275	276 - 400	401 - 620	> 620
Extremos (kg)	< 150	151 - 300	301 - 430	431 - 650	> 650

Cuadro 5. Clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas (libre de defecto) en condición verde Dávalos y Bárcenas (1998).

Las propiedades mecánicas de la madera varían considerablemente con la temperatura y la humedad y a pesar de que los cálculos pueden sugerir secciones muy delgadas para una aplicación específica, se recomienda “sobrediseñar”. El diseñador debe tener en cuenta que la madera es sometida a esfuerzos considerables durante periodos largos cuando se usa como obra falsa.

La densidad de la madera se ha usado tradicionalmente como un indicador de sus propiedades mecánicas (Ortega y Angeles, 1998) y sirvió de base para el sistema de clasificación de las maderas mexicanas propuesta por Dávalos y Bárcenas (1998; 1999),

La orientación de las fibras que componen la madera da lugar a la anisotropía⁵ de su estructura, por lo que a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

Podemos ver que los árboles están diseñados por la naturaleza para resistir con eficacia los esfuerzos a los que va a estar sometido en su vida; principalmente los esfuerzos de flexión producidos por la acción del viento y los de compresión producidos por la gravedad.

Sobre la madera como material se han realizado muchos estudios e investigaciones mediante ensayos realizados sobre probetas pequeñas libres de defectos o madera limpia, pero la madera estructural comprende piezas en las que aparecen numerosos defectos. Por eso, la tendencia actual es la de estudiar e investigar piezas de madera comercial o reales que permiten evaluar mejor la presencia e influencia de dichas particularidades.

En los productos estructurales de la madera es importante tener en cuenta que se trata de productos que han sido clasificados para su uso estructural, y por lo tanto no se pueden utilizar o buscar correlación con otro tipo de clasificaciones; por ejemplo en la madera aserrada no se pueden utilizar o correlacionar las clasificaciones decorativas con las estructurales o utilizar los valores obtenidos con probetas pequeñas.

Para referirse a las propiedades mecánicas en madera estructural se suelen dar los valores característicos, que se definen como aquellos que son seguros con un 95% de probabilidad, y son los que se emplean, por ejemplo, para comprobar la resistencia.

⁵ Propiedad de la materia según la cual determinadas propiedades físicas (p. ejemplo: temperatura, elasticidad, conductividad, etc.) varían según la dirección en que son examinadas. Una materia anisótropa puede presentar diferentes características según la dirección.

A continuación se muestran las características más significativas de las propiedades mecánicas de la madera estructural [6].

Tracción paralela a la fibra: la resistencia a tracción paralela a la fibra es elevada. En la madera clasificada, los valores característicos oscilan entre 8 y 18 N/mm².

Compresión paralela a la fibra: la resistencia a compresión paralela a la fibra es elevada, alcanzando valores característicos en la madera clasificada de 16 a 23 N/mm².

Flexión: su resistencia a flexión es muy elevada, sobre todo comparada con su densidad. Sus valores característicos para coníferas, que se utilizan normalmente para estructuras, varían entre 14 y 30 N/mm².

Tracción perpendicular a la fibra: su resistencia a la tracción perpendicular a la fibra es muy baja (del orden de 30 a 70 veces menos que en la dirección paralela). Su valor característico es de 0.3 a 0.4 N/mm².

Compresión perpendicular a la fibra: Su resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la de la dirección paralela. Sus valores característicos varían entre 4.2 y 5.7 N/mm², lo que representa la cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra.

9.4 Procesamiento de Plásticos.

A partir de los polímeros y de acuerdo con el tipo de artículo que se desea manufacturar se emplean distintos procedimientos, siendo los principales:

- Moldeo por inyección
- Moldeo por extrusión
- Moldeo por soplado
- Moldeo por vacío
- Calandrado

9.4.1 Extrusión.

En el moldeo por extrusión se utiliza un transportador de tornillo helicoidal. El polímero es transportado desde la tolva, a través de la cámara de calentamiento, hasta la boca de descarga, en una corriente continua. A partir de gránulos sólidos, el polímero emerge de la matriz de extrusión en un estado blando. Como la abertura de la boca de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada.

Una extrusora cuenta con tres zonas principales: Zona de alimentación, zona de compresión y zona de dosificación [7].

Zona de alimentación: En esta zona el material se precalienta y transporta a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante, la alimentación varía un poco con los diferentes polímeros.

Zona de compresión: Tiene una profundidad de canal decreciente. Primeramente se expulsa el aire atrapado entre los gránulos, después, se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril calentado conforme el material se vuelve menos espeso, por último, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión.

Zona de dosificación: Profundidad de tornillo constante. Su función es la de homogenizar el material fundido a temperatura y presión constante.

9.4.2 Extrusión de Perfiles.

La extrusión de perfiles es la manufactura directa de un producto en el dado del extrusor. Estos productos son largos y continuos cuyo perfil de sección transversal se obtiene mediante la forma del dado. El diseño de los dados para estos procedimientos no es cosa fácil. Si el perfil que se necesita no es circular, los patrones de flujo y las velocidades varían. La obtención de perfiles complejos requiere gran habilidad y experiencia en diseño.

Es importante recordar que, algunos polímeros son cristalinos, la orientación de las cadenas moleculares en los polímeros cristalinos tiene consecuencias importantes sobre sus propiedades [7].

Un componente clave de una línea de perfiles es el sistema de calibración al vacío. Esta técnica comprende el uso de un bloque de calibración o de medida que tira del perfil contra sus paredes mediante un vacío parcial [8].

9.5 Diseño de Experimentos.

En el campo de la industria es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea (conjetura, hipótesis); por ejemplo, hacer algunos cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso, probar varias temperaturas en una máquina hasta encontrar la que da el mejor resultado o crear un nuevo material con la intención de lograr mejoras o eliminar algún problema [9].

9.5.1 Diseños Factoriales 2^k .

Los diseños factoriales 2^k se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. El diseño 2^k es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con los que puede estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores [10].

9.5.2 Diseño Factorial 2^k No Replicado.

Al aumentar el número de factores en el diseño 2^k crece rápidamente el número de tratamientos y, por lo tanto, el número de corridas experimentales. En ocasiones el realizar las corridas experimentales puede ser muy costoso y tardado, o puede ser demasiado complicado, es por esto que se debe realizar el menor número posible de corridas experimentales. De acuerdo con el cuadro 6, cuando se trata de cuatro factores se recomienda, en primera instancia, correr una sola vez el diseño.

Diseño	Réplicas recomendadas	Número de corridas
2 ²	3 o 4	12, 16
2 ³	2	16
2 ⁴	1 o 2	16, 32

Cuadro 6. Réplicas o corridas en diseños 2k.

Note que ninguno de los diseños listados en el cuadro 6 tiene más de 32 corridas. Más aún, un máximo de 16 pruebas son suficientes para la mayoría de los problemas en una primera etapa de experimentación.

Una sola réplica o corrida del factorial 2^k completo es una estrategia adecuada cuando se tienen cuatro o más factores, considerando que a partir de k=4 se comienza a tener mucha información con el diseño factorial completo. Además se pueden estimar interacciones de alto orden, que por lo general no son significativas. Tales interacciones pueden utilizarse para estimar un error que permita construir un ANOVA⁶ aproximado.

Cuando se corre sólo una réplica del experimento, el cuadrado medio del error necesario para probar la significancia de cada efecto debe construirse a partir de efectos pequeños o despreciables [9]. Existen varias técnicas que ayudan a detectar con bastante seguridad y sin la necesidad de un ANOVA, los efectos que pueden utilizarse para conformar el error.

9.5.3 Gráfico de Efectos en Papel Normal (Gráfico de Daniel).

Al usar los efectos como sumas de variables aleatorias (diferencia de medias), Daniel se dio cuenta de que los efectos no significativos deben seguir una distribución normal con media igual a cero y varianza constante. Esto implica que si los efectos se grafican en papel probabilístico normal⁷, los que no son significativos tenderán a formar una línea recta, mientras que los efectos activos aparecerán alejados de la línea de normalidad [11]. Cuando se tienen efectos positivos y negativos es mejor utilizar el papel

⁶ El análisis de la varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento.

⁷ Sirve para verificar visualmente si los datos siguen una distribución de probabilidad específica.

probabilístico medio normal (half normal), para tener una mejor perspectiva de cuáles efectos se alinean y cuáles no. Como su nombre lo indica, el papel medio normal sólo utiliza la parte positiva de la distribución normal estándar, aprovechando su simetría y el hecho de que dos efectos de signo contrario y de la misma magnitud son igualmente importantes.

9.5.4 Diagrama de Pareto de Efectos.

El diagrama de Pareto para los efectos sin estandarizar representa una manera práctica de ver cuáles efectos son los más grandes en cuanto a su magnitud. Con el Pareto y el gráfico de Daniel se logra detectar los efectos significativos, y una vez que se construya el error, el ANOVA sólo confirmará lo que ya se ha encontrado con estos gráficos. La forma de analizar el gráfico de Pareto consiste en identificar cuáles efectos, en forma de barras, son los más pequeños o menos significativos, en comparación a las demás, para de esta forma, decidir si se deben de eliminar o mandar al error [9].

9.5.5 Factorial 2^k con Puntos al Centro

Cuando en un diseño factorial 2^k los k factores admiten un nivel de prueba intermedio, es recomendable implementar un tratamiento adicional formado por la combinación del nivel intermedio o medio de todos los factores. Esta combinación se le conoce como punto central. Las razones por las que es deseable correr el punto central son: para obtener grados de libertad adicionales para el error en la tabla de ANOVA y que las repeticiones al centro permiten detectar la presencia de curvatura en al menos uno de los factores objeto de estudio. La curvatura son los efectos A^2, B^2, \dots Una vez detectados estos efectos, el experimento se aumenta con más puntos experimentales para analizar dicha curvatura [9].

El modelo que se utiliza es básicamente un polinomio. De esta manera, si se tienen k factores, el modelo de primer orden está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon$$

Ecuación 1

9.6 Optimización de Procesos con Metodología de Superficie de Respuesta.

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es la estrategia experimental y de análisis que permite resolver problemas de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso o las características de calidad del producto.

En la mayoría de los problemas de MSR la forma de la relación entre las respuestas y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre y y el conjunto de variables independientes.

En la figura 6 se presenta un esquema de la metodología de superficie de respuesta, donde se distinguen tres etapas en la búsqueda del punto óptimo, que son: cribado, búsqueda I o de primer orden y búsqueda II o de segundo orden.

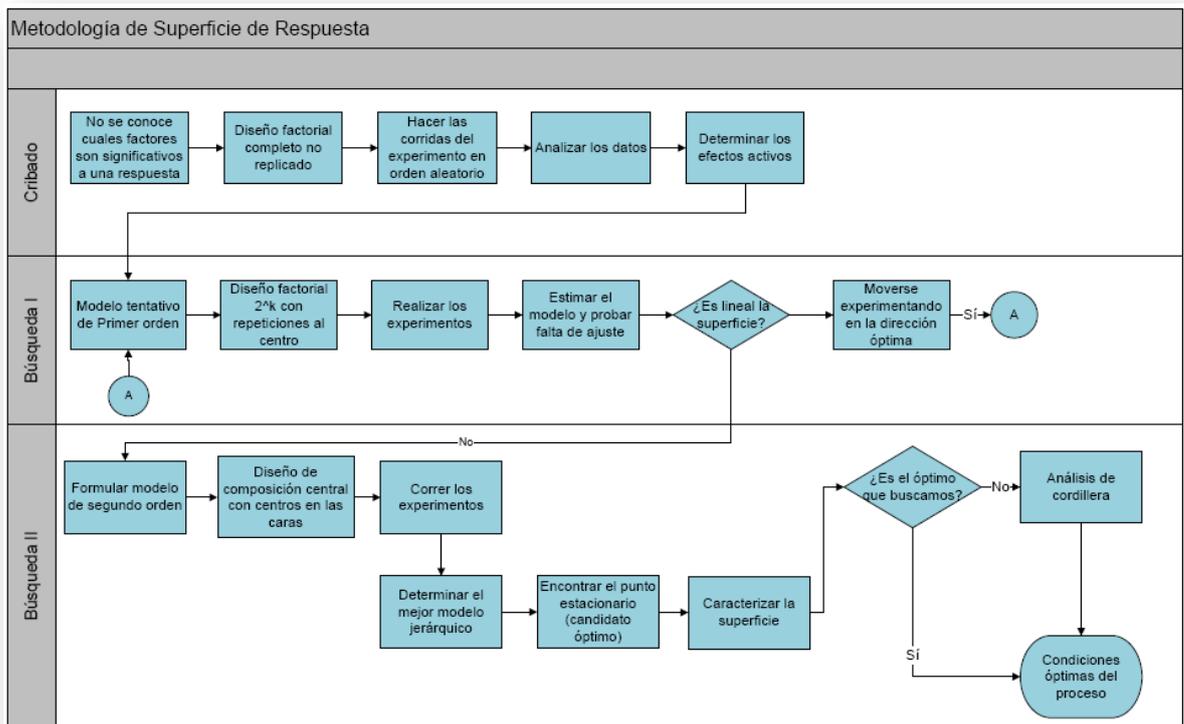


Figura 6. Esquema de los elementos de la MSR en su contexto amplio.

A continuación se da una breve descripción de cada una de las etapas de la MSR.

Cribado: La optimización de un proceso inicia cuando se tienen demasiados factores y no se sabe cuáles de estos factores influyen en la variabilidad de interés.

Búsqueda I o de Primer Orden: Esta etapa se aplica cuando se tienen identificados cuales son los factores que afectan a la variable de respuesta; por lo general se tienen pocos factores. En esta etapa se corre un diseño de primer orden que permita detectar curvatura, como un diseño factorial con puntos al centro.

Búsqueda II o de Segundo Orden: En el momento en el que se detecta la presencia de curvatura. Se completa un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura.

9.6.1 Diseños de Segundo Orden.

Se llaman diseños de segundo orden aquellos que permiten ajustar un modelo de segundo orden para así estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura. Estos diseños se emplean cuando se quiere explorar una región que se espera sea más compleja o cuando se cree que el punto óptimo ya se encuentra dentro de la región experimental. El modelo de segundo orden está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{<j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Ecuación 2

9.6.2 Diseño de Composición Central con Centros en las Caras

En este diseño los puntos axiales se localizan en el centro de las caras. Esta variante resulta particularmente útil cuando ya se corrió el diseño 2^k y se quiere completar un diseño de composición central⁸, pero se complica correr los tratamientos con niveles más allá de los valores -1 y +1 debido a restricciones del proceso. Una representación grafica del diseño de composición central (DCC) con centros en las caras se muestra en la figura 7.

⁸ Se emplea en la etapa de búsqueda de segundo orden. Se puede construir a partir de un diseño factorial 2^k agregando puntos sobre los ejes y al centro del diseño.

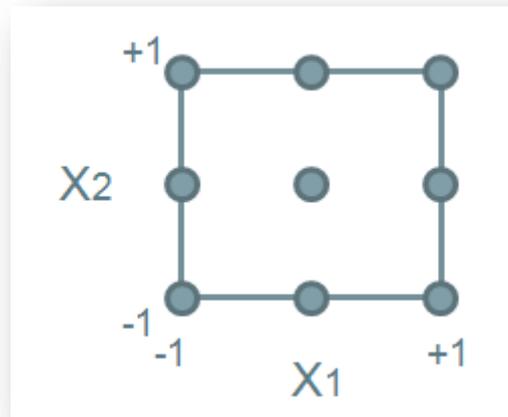


Figura 7. Representación de los DCC con centros en las caras para $k=2$ factores.

9.7 Optimización Simultánea de Varias Respuestas.

En la MSR se busca el punto óptimo considerando sólo una variable de respuesta. Sin embargo, es típico considerar diversas características (variables de respuesta) para lograr productos con mejor calidad y propiedades. Si la optimización sólo se hace para una característica del producto podría resultar condiciones inadecuadas para las otras características. Por ello es imprescindible realizar una optimización simultánea de todas las respuestas de interés.

El problema de la optimización simultánea radica en que, por lo general, los óptimos individuales no son las mismas combinaciones de los factores de control. Esto hace necesario buscar una solución compromiso, donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio.

9.7.1 Método de la Función de Deseabilidad

Este fue propuesto originalmente por Harrington [12] y después fue mejorado por Derringer y Suich [13] y Derringer [14]. Consiste en definir una función en el espacio de factores que estima la deseabilidad global (DG) del producto en cada punto; de esta forma, convierte el problema de optimización multivariado en un problema de optimización univariado. Basta maximizar DG para obtener el punto óptimo buscado; para esto se requiere que todas las Y estén en la misma escala. Esto se logra transformando cada respuesta predicha (y_i) en un valor de deseabilidad individual (d_i)

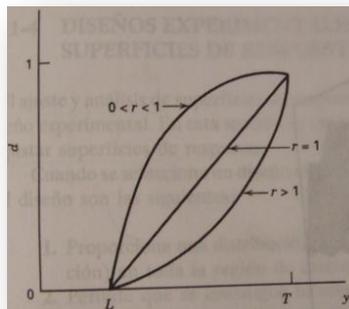
que cae en el intervalo $[0, 1]$, donde si la respuesta y_i está en su meta u objetivo, entonces $d_i=1$, y si la respuesta está fuera de una región aceptable, $d=0$. La transformación de las d_i se hace en términos de las especificaciones y del valor objetivo de cada Y. Después las variables del diseño se eligen para maximizar la condición de deseable global:

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/n}$$

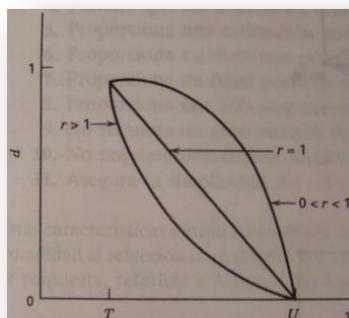
Ecuación 3

Donde hay n respuestas.

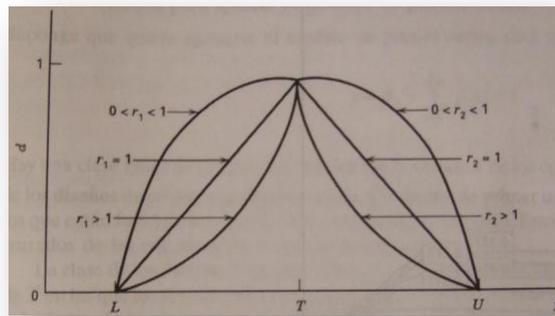
Las funciones con condición de deseable individual están estructuradas como se indica en la figura 8.



a) El objetivo es maximizar y.



b) El objetivo es minimizar y.



c) El objetivo es que y esté tan cerca como sea posible de la especificación.

Figura 8. Función con condición de deseables individuales para la optimización simultánea.

Si el objetivo T para la respuesta y es un valor máximo,

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1, & y > T \end{cases}$$

Ecuación 4

Cuando la ponderación $r = 1$, la función con condición de deseable es lineal. Al elegir $r > 1$ se pone más interés en estar cerca del valor objetivo, y cuando se elige $0 < r < 1$ esto tiene menos importancia. Si el objetivo para la respuesta es un valor mínimo,

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0, & y > U \end{cases}$$

Ecuación 5

La función con condición de deseable de dos colas supone que el objetivo se localiza entre los límites inferior (L) y superior (U), y se define como

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases}$$

Ecuación 6

X. METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se describe la metodología empleada para la optimización del proceso de manufactura de un compuesto de residuos de madera y plástico reciclado. Para facilitar la comprensión del lector se hará uso de diagramas de flujo que sirvan como una referencia visual del procedimiento empleado.

10.1 Descripción global de la metodología

A groso modo podemos resumir la metodología en tres fases consecutivas:

1. Construcción del anteproyecto.
2. Diseño del proceso de manufactura.
3. Optimización del material.

En la figura 9 se muestra un diagrama de flujo que indica la secuencia de estas tres fases.

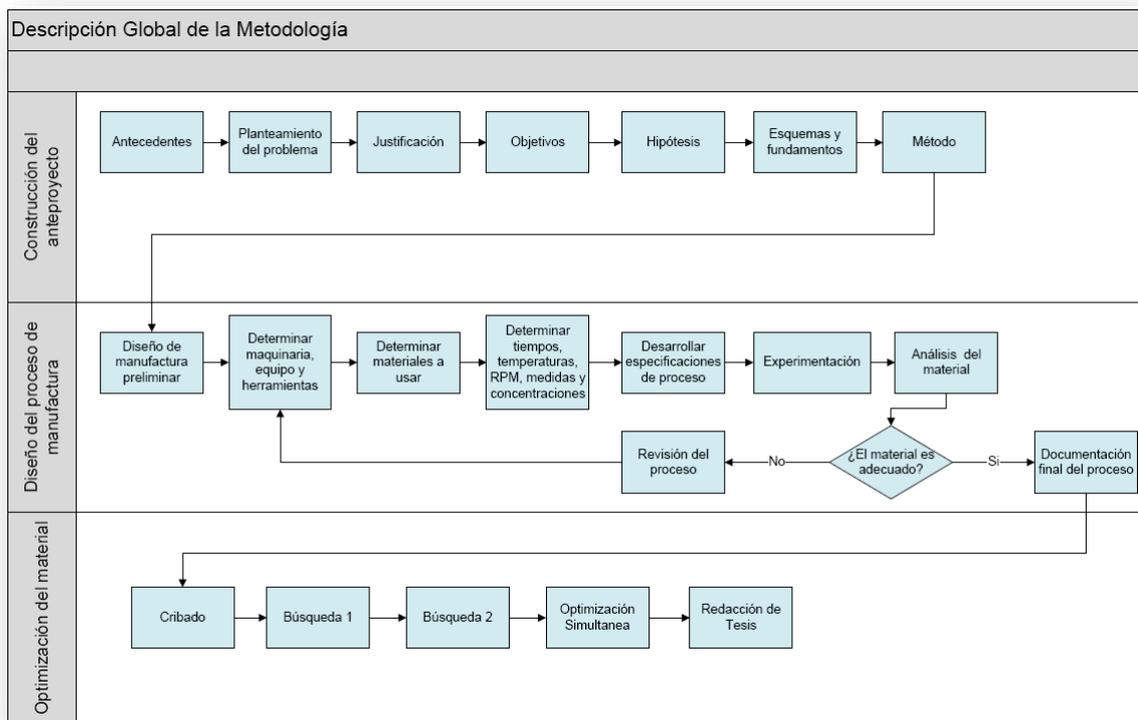


Figura 9. Descripción Global de la Metodología.

10.2 Construcción del Anteproyecto.

El éxito de un experimento radica en gran medida en la calidad de su planeación. Por ello, antes de comenzar alguna prueba se conceptualiza el problema y se decide cual es la mejor estrategia para abordar el problema.

A continuación se presenta las etapas de la construcción del anteproyecto, señalando algunas actividades específicas que fueron desarrolladas.

1. *Definición del problema y objetivos.* En esta parte se hizo un gran esfuerzo en entender el problema y cuál era el objetivo que se pretendía alcanzar. Para esto se realizaron las siguientes actividades:
 - a) Se asignó un título al estudio experimental para indicar la intención del mismo.
 - b) Se describió el problema destacando los puntos de por qué era importante hacer el estudio.

- c) Se definieron indicadores para medir el éxito del trabajo experimental.
 - d) Se desarrolló un análisis de lo que actualmente se está haciendo relacionado al tema de estudio.
 - e) Se definió el objetivo del experimento.
2. *Esquema del estudio para el problema planteado.* Se destacaron las variables de salida o respuesta, las variables de operación (parámetros) del proceso y las principales entradas.
 3. *Determinación de los factores a investigar.* Para seleccionar de manera adecuada los factores a investigar se realizaron las siguientes actividades:
 - a) Se realizó una lista de todas las causas o variables independientes involucradas en el problema.
 - b) Se eligieron los niveles de prueba para cada factor y la separación entre un nivel y otro.
 4. *Determinación de las variables de respuesta.* Estas variables fueron el objetivo del experimento. Para poder definir las se realizó un listado de todas las respuestas que eran necesarias medir; además, se definió la manera en que se iban a medir estas respuestas.
 5. *Selección de un diseño de experimentos adecuado a los factores y al objetivo del experimento.* Se eligió el conjunto de pruebas que debían correrse contemplando el costo y tiempo necesario.
 6. *Planeación y organización del trabajo experimental.* A partir del diseño seleccionado se organizó con detalle el trabajo experimental.

10.3 Diseño del Proceso de Manufactura.

Para el diseño del proceso de manufactura se utiliza como guía el trabajo de Alberto Ortega [4], el cual trata de un proyecto similar. La intención fue optimizar el experimento y obtener conclusiones. Se detectaron una gran cantidad de áreas de

oportunidad referente a las propiedades del material. Con el objetivo de desarrollar al máximo el material se realizó un análisis para optimizar los procedimientos de operación. Al finalizar el análisis se detectaron mejoras en las características del material, por lo que se toma la decisión de fijar los procedimientos de operación e iniciar la etapa de optimización del proceso respecto a los parámetros de operación.

Una descripción detallada del proceso de producción del material compuesto se dará en el siguiente capítulo titulado procedimiento.

10.4 Optimización del Material.

Para la optimización del material se utiliza la metodología de superficie de respuesta resumida en el marco teórico (Véase figura 6).

De la revisión bibliográfica se identifican cuatro factores que se esperaba tendrían un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a la tensión y flexión del material, dos factores son de carácter categórico y los otros dos son numéricos.

El primer paso (Cribado) fue analizar, mediante un diseño de experimentos factorial 2^4 no replicado, cuáles de los factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre las variables de respuesta.

El segundo paso (Búsqueda 1) consistió en correr un diseño de primer orden para permitir caracterizar de forma preliminar el tipo de superficie de respuesta y detectar la presencia de curvatura. Para esto se utiliza un diseño factorial completo con repeticiones al centro.

En el tercer paso (Búsqueda 2), ya que se había detectado la presencia de curvatura, se completó un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura. Con este modelo se determinaron las condiciones óptimas de operación del proceso.

En los pasos anteriores la búsqueda del punto óptimo se llevó a cabo para cada una de las variables de respuesta de manera independiente, es decir, se realizaron dos estudios

separados y se identificaron dos puntos óptimos para cada variable. Dado que se tienen dos variables de respuesta es necesario localizar una solución compromiso, donde las dos variables tengan un nivel satisfactorio. A esa solución la llamaremos óptimo simultáneo.

Para la localización del óptimo simultáneo se emplearon dos métodos, uno gráfico [15] y el otro analítico, basado en una función de deseabilidad [13]. Ambos métodos proveen soluciones consistentes tanto con los datos observados en el experimento como con la información que se les provee. Para aplicar estos métodos es importante contar con el software apropiado. El software empleado fue Statgraphics Centurion.

Es importante mencionar que para cada diseño experimental se verificó que cada modelo cumpliera con los supuestos tradicionales de normalidad, varianza constante y la independencia de los residuos, y que el coeficiente de determinación R^2_{aj} de cada modelo fuera de al menos 70% [9].

La última parte de la metodología consistió en la documentación detallada de los parámetros óptimos de operación del proceso para poder replicar los resultados obtenidos en el estudio.

XI. PROCEDIMIENTO

11.1 Actividades Preliminares.

La primer parte del trabajo experimental consiste en el desarrollo de diferentes pruebas preliminares dirigidas a entender cómo es que el material debe ser manufacturado. Es muy importante alcanzar un cierto dominio y conocimiento del proceso, a fin de asegurar que se están controlando todas las variables involucradas.

Para determinar los parámetros operacionales se realizaron las siguientes pruebas preliminares:

1. Fundido de PET en el mezclador Brabender: con el objetivo de conocer las dificultades que se pueden tener al manipular el PET en estado fundido y determinar las temperaturas y RPMs.
2. Limpieza del Brabender: con la intención de aprender el mecanismo más eficiente en el limpiado del mezclador, ya que cualquier residuo de pruebas anteriores puede alterar la composición de cada tratamiento.
3. Moldeado de placas de PET: una de las actividades más críticas en el proceso de producción de las probetas es el moldeo por compresión. El compuesto es extremadamente sensible al tiempo del moldeo por compresión; si no se realiza con el tiempo y temperaturas exactas las placas se queman o no se moldean satisfactoriamente.
4. Maquinado de probetas: se maquinaron probetas con la intención de determinar la mejor estrategia de fabricación.
5. Pruebas mecánicas: Se realizaron pruebas de flexión y compresión con el objetivo de aprender el uso del equipo.

11.2 Experimento Exploratorio.

El experimento exploratorio tiene la intención de dar un primer acercamiento sobre la determinación de los factores operacionales que se cree tienen un efecto sobre las dos variables de respuesta que se estudian, además de todos aquellos factores que no son de interés en el estudio pero que tienen un efecto en la respuesta y deben ser bloqueados.

Para este primer acercamiento se desarrolla un diseño de experimentos factorial fraccionado mixto ($3 \times 2^{3-1}$). Con este primer experimento se pretendió obtener la mayor información posible de los factores operacionales pero con el menor número de corridas posible.

Los factores que se estudiaron fueron:

1. La concentración de aserrín en el compuesto con 3 niveles (20, 30 y 40%).
2. Tipo de PET con dos niveles (baja y alta viscosidad).
3. Tipo de agente de acoplamiento con dos niveles (PE y PP).
4. Concentración del agente de acoplamiento con dos niveles (0 y 3%).

Una representación del diseño factorial en unidades reales se muestra en el cuadro 7.

PESOS (BASE 270 gr)					
EXP.	EXP. ALEAT.	madera	Tipo de PET	Aditivo	Conc. Adit.
1	12	108 gr	162 gr (alta)	PP	0 gr
2	10	54	216 (alta)	PP	0
3	2	81	189 (baja)	PE	8,1
4	6	108	162 (alta)	PE	0
5	9	108	162 (baja)	PP	8,1
6	11	81	189 (alta)	PP	0
7	7	54	216 (baja)	PP	8,1
8	5	81	189 (alta)	PE	0
9	3	108	162 (baja)	PE	8,1
10	1	54	216 (baja)	PE	8,1
11	4	54	216 (alta)	PE	0
12	8	81	189 (baja)	PP	8,1

Cuadro 7. Diseño factorial exploratorio.

Una representación del proceso de operaciones para el diseño exploratorio se muestra en la figura 10.



Figura 10. Proceso de operación experimento exploratorio.

Al terminar de realizar el experimento exploratorio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Es necesario incluir como un nuevo factor el tamaño de partícula de la madera. Durante la prueba se supuso que la incorporación y la distribución de las partículas de madera no dependería de su tamaño, pero el tamaño de partícula puede causar un incremento en la interacción entre el PET y la madera.
2. El mezclador Brabender no es suficientemente eficiente en el mezclado de los materiales, ya que para concentraciones mayores de madera, el compuesto obtenido se quema. Por otra parte, la homogenización de los componentes de la mezcla varía demasiado entre mezcla y mezcla.
3. La cantidad de PET debe ser la misma en todas las mezclas para evitar variación en la respuesta debida a la interacción del PET con el agente de acoplamiento.
4. La cantidad de madera estudiada debe ser menor, ya que se observa una mayor interacción entre el PET y la madera para porcentajes menores de madera.
5. El uso de un extrusor puede ayudar a la homogenización más constante entre los experimentos.
6. La geometría de las probetas rectangulares no es la indicada para la caracterización mecánica, debe ser cambiada por una geometría especial para pruebas destructivas.
7. El tiempo de enfriamiento del molde al salir de la prensa debe ser el mismo para todos los experimentos, de modo que no afecte la cristalización del compuesto.

Es importante señalar que los resultados obtenidos del análisis estadístico del diseño propuesto en el experimento exploratorio no fueron satisfactorios, por lo que se toma la decisión de no incluirlos en este documento. La razón de haber obtenido resultados negativos en el experimento se debe a dificultades en la repetitividad de las mezclas por falta de experiencia en el proceso, además, por falta de bloqueo en algunos factores operacionales.

Todos los aspectos que impidieron la obtención de resultados satisfactorios en el experimento fueron extensamente estudiados y replanteados. En el siguiente apartado se presenta el experimento principal que fue desarrollado con base a lo aprendido en el experimento exploratorio.

11.3 Experimento Principal

11.3.1 Preparación de Materiales.

La primera etapa en la fabricación del compuesto de madera plástico, consiste en la preparación de los materiales que van a ser mezclados los cuales son:

1. PET (de alta y baja viscosidad según sea el tipo de mezcla).
2. Madera (aserrín de pino).
3. Agente de acoplamiento (PE y PP).

La madera primeramente tiene que ser tamizada con un equipo para cribar y mallas (Figura 11.) con una abertura específica conforme a la norma ASTM E 11. Esto con el objetivo de caracterizar el tamaño de partícula de la madera, los tamaños utilizados en el experimento fueron de 1, 1.4 y 2 mm, correspondientes a un tamaño de malla de 18, 14 y 10 respectivamente.



Figura 11. Caracterización del tamaño de partícula.

Los tres materiales son deshidratados en un horno de secado a una temperatura de 100 °C durante un tiempo de 8 horas (Figura. 12). Los materiales se deshidratan para evitar la formación de burbujas o huecos en el compuesto a la hora del prensado.



Figura 12. Deshidratación de materiales.

Una vez que el material ha sido deshidratado, con la ayuda de una balanza analítica, se pesan los materiales para elaborar las diferentes concentraciones de cada tratamiento del diseño experimental (Figura. 13). Es importante que cada mezcla se realice con la cantidad exacta indicada con el fin de no generar variabilidad en el diseño.



Figura 13. Preparación de materiales.

La siguiente tarea corresponde al mezclado de los materiales. Los materiales se introducen en un tambo, cuidadosamente cerrado y rotado durante 10 minutos hasta que se consigue una mezcla homogénea de los materiales.

11.3.2 Preparación del Extrusor.

Una vez que los materiales han sido preparados se procede a fijar los parámetros operacionales en el extrusor como: RPM y las temperaturas (figura. 14).



Figura 14. Parámetros operacionales.

Las temperaturas fueron fijadas conforme a una curva reológica (Paar Physica MCR 300); las temperaturas correspondientes a las 4 zonas de calentamiento son las siguientes:

zona 1	zona 2	zona 3	zona 4
240 °C	250 °C	260 °C	260 °C

Cuadro 8. Temperaturas del extrusor.

Las revoluciones por minuto fueron de 90 en todos los tratamientos al igual que las temperaturas de las 4 zonas de calentamiento del extrusor.

11.3.3 Extrusión del Material.

Cuando los materiales han sido preparados, los parámetros operacionales han sido fijados y se han alcanzado las temperaturas en la máquina, se procede a extruir el material. El objetivo es mezclar los materiales y formar el compuesto de madera plástico.

El material entra al extrusor por la tolva de alimentación y es empujado a través de las 4 zonas de calentamiento por un tornillo sin fin llamado husillo. Cuando el PET entra en contacto con las paredes del cilindro del extrusor, se comienza a fundir y la madera es

encapsulada por el material fundido. El agente de acoplamiento, que tiene un punto de fusión menor al del PET, se funde más rápido, lo que hace que se adhiera al PET y a la madera antes de que la madera sea encapsulada por el PET.

Cuando el material ha atravesado las 4 zonas de calentamiento se encuentra completamente mezclado y reblandecido lo que le permite ser maleado en formas diversas.

Al final del cilindro se encuentra un dado, que es el que le da la forma final al material extruido. En este caso la forma es la de un churro redondo (Figura. 15).



Figura 15. Material extruido.

11.3.4 Molienda del Material Extruido.

Después de la extrusión del material ya se cuenta con un compuesto formado por PET y madera con un agente de acoplamiento. En este punto se tiene la intención de moler el compuesto para obtener un polvo fino, la molienda se llevó a cabo en un molino de plásticos con una malla de 5 mm de diámetro (diámetro de los orificios de la malla), el molino se muestra en la figura 16.



Figura 16. Molino de plásticos.

11.3.5 Moldeo por Compresión.

Cuando se cuenta con el polvo fino del compuesto es posible llenar casi cualquier tipo de molde y generar diferentes formas plásticas. En este estudio se pretendía moldear placas cuadradas que permitieran maquinar probetas (figura 17).



Figura 17. Placa del material compuesto.

El moldeo se realizó en una prensa hidráulica de moldeo con una temperatura de 260 °C durante 3 minutos (Figura 18). La cantidad de material compuesto en el molde fue de 90 gramos, una representación del molde, el material compuesto extruido y una placa del compuesto moldeada por compresión se muestra en la figura 19.



Figura 18. Prensa hidráulica de moldeo.



Figura 19. Molde, material extruido y placa.

11.3.6 Maquinado de Probetas.

Cuando las placas del material compuesto terminaron de ser moldeadas se procede al maquinado de las probetas. Para esto se utilizó un suaje que posee la forma de la probeta que se desea obtener, además, una máquina manual para suajar.

El procedimiento consiste en colocar la placa del compuesto en la máquina de suajar, encima de la placa se coloca el suaje, el cual fue calentado anteriormente a 260°C con una parrilla. La máquina para suajar presionara el suaje caliente contra la placa plástica y la corta, obteniendo así la forma de la probeta (figura 20).



Figura 20. Maquinado de probetas.

11.3.7 Medición de Probetas.

Una vez que se tienen las probetas estas deben ser medidas, aunque en teoría todas deberían tener las mismas dimensiones, existen variaciones entre las medidas de las probetas debidas a la composición de las diferentes mezclas. El largo de la probeta es de 50 mm, el largo de la sección transversal de la parte más angosta de la probeta debe ser de 30 mm, el ancho y la profundidad de la probeta es muy variada entre las probetas.

La medición de las probetas se realizó con un vernier digital. Se midió la sección longitudinal que corresponde a la distancia entre mordazas que debe ser de 30 mm. Para el ancho y profundidad se midieron tres puntos diferentes a lo largo de la sección longitudinal respectivamente y se calculó el promedio de los tres valores obtenidos, una representación de la medición de las probetas se muestra en la figura 21.



Figura 21. Medición de probetas.

11.3.8 Pruebas Mecánicas.

Las probetas que se suajaron fueron utilizadas para analizar la resistencia a la tensión y a la compresión del material compuesto. Para esto se utilizó una máquina universal de ensayos Instron, la cual mide la carga en kilogramos fuerza que soporta el material antes de romperse. Una representación de las pruebas de flexión y tensión se muestran en las figuras 22 y 23.

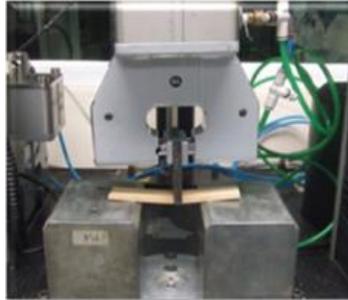


Figura 22. Prueba resistencia a la flexión.



Figura 23. Prueba de resistencia a la tensión.

En el próximo capítulo se expone a detalle los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas realizadas a las probetas, así como el análisis estadístico de los datos.

XII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En experimentos previos se han estudiado diferentes propiedades mecánicas de mezclas de PET con diferentes tipos de rellenos naturales, así como la evaluación de la maquinabilidad del compuesto [16]. Estudios anteriores permitieron adquirir información importante relacionada a como determinar las propiedades mecánicas mediante la medición de la resistencia a la tensión y flexión [17]. Además existe información referente al diseño del compuesto y la influencia de agentes de acoplamiento en las propiedades del compuesto [18].

12.1 Diseño Factorial (Cribado).

En este apartado se presenta un diseño factorial 2^k (k factores con dos niveles de prueba cada uno), que es una de las familias de diseños de mayor impacto en la industria y en la investigación, debido a su eficacia y versatilidad. Los factoriales 2^k son útiles cuando el número de factores a estudiar está entre dos y cinco.

El diseño factorial implementado en unidades codificadas es presentado en el cuadro 9, el cual presenta las variables estudiadas (Tipo de PET, Concentración de madera, tipo de aditivo y tamaño de partícula) y las respuestas obtenidas para la resistencia a la flexión y tensión.

El diseño utilizado es un factorial 2^4 no replicado. La decisión de no realizar replica para este diseño fue tomada con base al análisis de recursos, materiales y tiempo disponible para el experimento.

Una sola réplica o corrida del factorial 2^k completo es una estrategia adecuada cuando se tiene cuatro o más factores, considerando que a partir de $k=4$ se comienza a tener mucha información con el diseño factorial completo (Ver cuadro 6).

	Variables Codificadas				Respuesta	
	Tipo de PET	Concentración de Madera	Tipo de Aditivo	Tamaño de Partícula	yld load Flexión	yld load Tensión
1	-1	1	1	1	2.79	11.64
2	1	-1	1	1	2.85	19.29
3	1	1	-1	1	2.57	11.33
4	-1	-1	-1	-1	2.11	12.81
5	-1	-1	1	1	2.69	15.24
6	1	1	1	-1	2.79	18.09
7	1	1	-1	-1	2.04	20.72
8	-1	1	1	-1	4.38	18.49
9	-1	1	-1	-1	3.01	21.35
10	1	1	1	1	3.59	19.21
11	-1	-1	1	-1	2.64	21.64
12	-1	-1	-1	1	4.04	23.31
13	1	-1	-1	-1	2.05	15.71
14	-1	1	-1	1	2.2	17.57
15	1	-1	-1	1	1.21	14.2
16	1	-1	1	-1	3.72	23.1

Cuadro 9. Diseño Factorial (cribado).

Es fácil observar que la resistencia a la flexión es en gran medida menor comparada con la resistencia a la tensión, de igual forma la variación de la respuesta es menor en la resistencia a la flexión que en la resistencia a la tensión.

El análisis del cuadro 9 muestra que las corridas 8 y 12 son las que presentan una mayor resistencia a la flexión, mientras que para el caso de la tensión las corridas 12 y 16 son las que muestran resultados más altos.

12.2 Diseño Factorial 2^k No Replicado.

Dado que el diseño no fue replicado no existen suficientes grados de libertad para el error (SC_E), lo que no permite construir una tabla del ANOVA. La construcción de la suma de cuadrados del error (SC_E) para el ANOVA de un factorial 2^k con una sola réplica se realiza a través de los dos pasos siguientes:

1. Se puede suponer de antemano que las interacciones de tres o más factores no son significativas y enviarlas directamente al error. Sin embargo, antes de esto se debe verificar que efectivamente son efectos despreciables.

2. Se utilizan técnicas gráficas para decidir cuáles de los efectos principales, interacciones dobles, triples y cuartas se pueden enviar al error.

12.3 Resistencia a la Flexión.

Se utilizó una gráfica de Daniels y una gráfica de Pareto para los efectos estandarizados con el objetivo de identificar los factores que tienen un porcentaje de contribución muy bajo y enviarlos al error para poder construir la tabla del ANOVA (Ver 9.5.3 y 9.5.4).

En la figura 24 se muestra el grafico mitad normal de Daniels para la resistencia a la flexión. En esta grafica podemos notar que la mayoría de los efectos siguen una línea recta, excepto el factor principal tipo de aditivo, por lo que no es fácil decidir cual efecto mandar al error para poder construir la tabla de la ANOVA. Por esto se decidió utilizar el grafico de Pareto para los efectos estandarizados como una segunda herramienta que ayude a tomar una decisión.

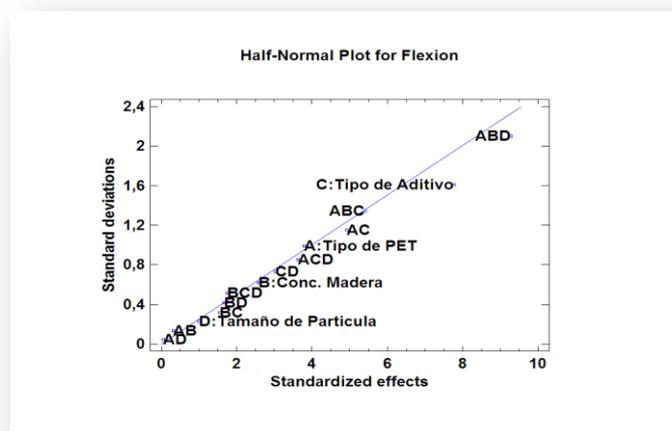


Figura 24. Grafico mitad –normal de Daniels para flexión.

En la figura 25 se muestra el grafico de Pareto para los efectos estandarizados. En esta grafica es mucho más fácil determinar que el efecto de interacción doble AD es despreciable por no ser significativo, con esto se tomo la decisión de enviar al error dicho efecto.

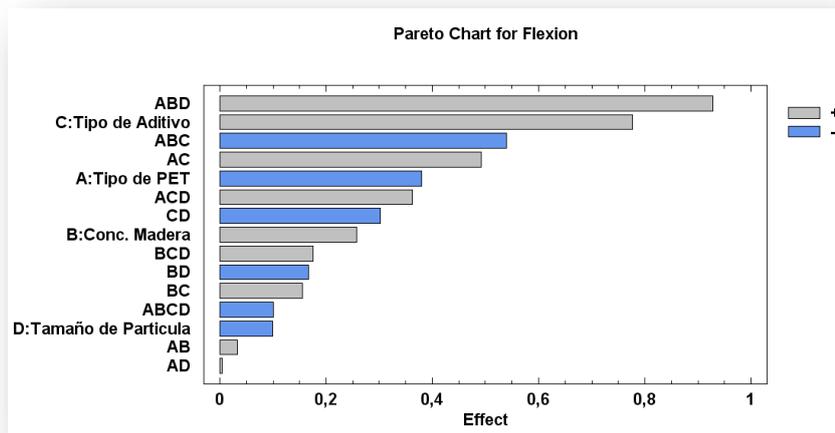


Figura 25. Grafico de Pareto para flexión.

Luego de enviar al error el efecto de interacción doble AD se obtiene la tabla del ANOVA que se muestra en la figura 26.

Analysis of Variance for Flexion

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Tipo de PET	0,5776	1	0,5776	5776,00	0,0084
B:Conc. Madera	0,265225	1	0,265225	2652,25	0,0124
C:Tipo de Aditivo	2,41803	1	2,41803	24180,25	0,0041
D:Tamaño de Particula	0,04	1	0,04	400,00	0,0318
AB	0,004225	1	0,004225	42,25	0,0972
AC	0,970225	1	0,970225	9702,25	0,0065
BC	0,0961	1	0,0961	961,00	0,0205
BD	0,112225	1	0,112225	1122,25	0,0190
CD	0,366025	1	0,366025	3660,25	0,0105
ABC	1,1664	1	1,1664	11664,00	0,0059
ABD	3,44102	1	3,44102	34410,25	0,0034
ACD	0,525625	1	0,525625	5256,25	0,0088
BCD	0,1225	1	0,1225	1225,00	0,0182
ABCD	0,04	1	0,04	400,00	0,0318
Total error	0,0001	1	0,0001		
Total (corr.)	10,1453	15			

R-squared = 99,999 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9852 percent
 Standard Error of Est. = 0,01
 Mean absolute error = 0,0025

Figura 26. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión.

La tabla del ANOVA para la prueba de flexión muestra que son significativos, dado que tienen un valor-p menor o igual a 0.05 (nivel de significancia prefijado), cuatro efectos principales (A, B, C y D), cuatro efectos de interacción doble (AC, BC, BD y CD), cuatro efectos de interacción triple (ABC, ABD, ACD y BCD) y el efecto de interacción cuarta ABCD.

Estos efectos explican, según el estadístico R^2 , 99,99% de la variabilidad observada, el valor del estadístico R^2_{aj} es muy parecido 99,99%. Esto significa que los factores estudiados, junto con todas sus interacciones, son responsables o explican un alto porcentaje de la variabilidad observada en la variable de respuesta (resistencia a la flexión).

12.3.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Flexión.

Los supuestos del modelo de análisis de la varianza deben verificarse antes de dar por válidas las conclusiones de la etapa de interpretación. La tabla del ANOVA supone que los residuos se distribuyen normalmente, independientes y con varianza constante. La violación grave de cualquiera de estos supuestos conduce a conclusiones erróneas.

El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, para concluir que el supuesto se cumple.

En la figura 27 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la flexión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

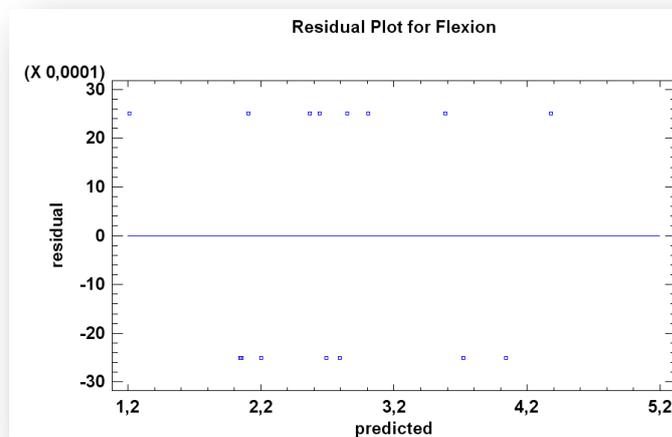


Figura 27. Grafica de residuos contra predichos flexión 2⁴.

Otro gráfico que sirve para comprobar el supuesto de varianza constante es el de residuos contra cada factor. En la figura 28 se dibujan los residuos contra cada factor. Se observa que las columnas de puntos en los niveles bajo y alto de los 4 factores, tienen “más o menos” la misma dispersión, por lo tanto se cumple el supuesto de varianza constante.

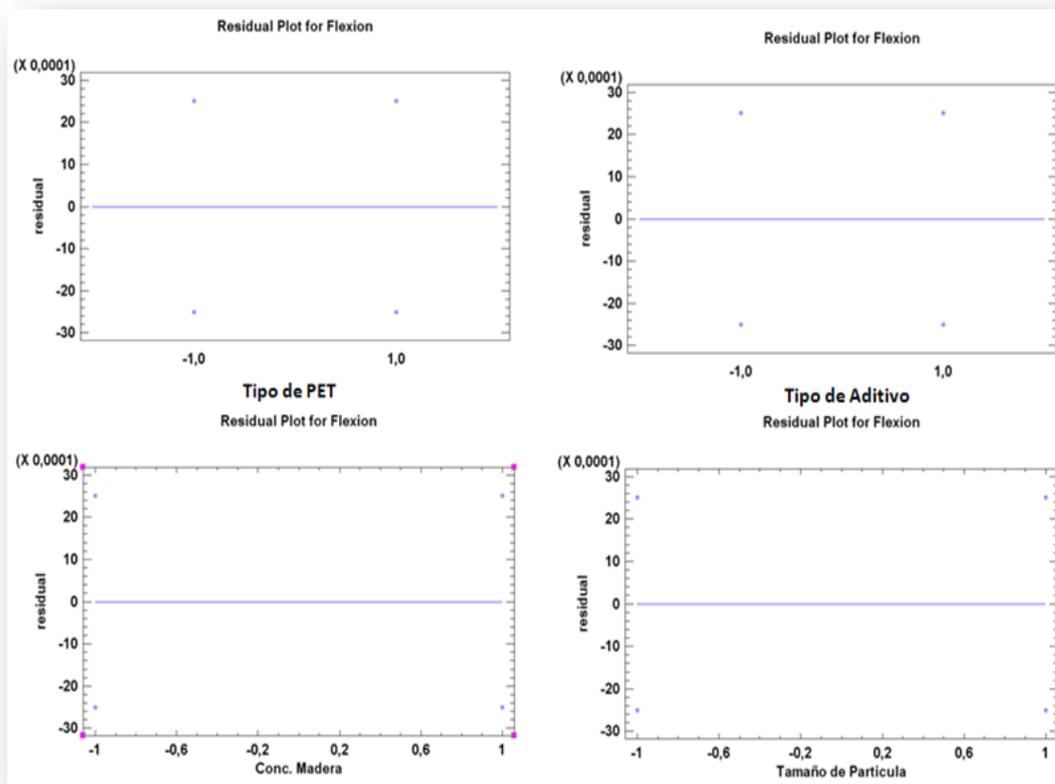


Figura 28. Graficas de residuos contra cada factor.

El la figura 29 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Como los puntos se apegan a la línea colocada visualmente (no es línea de regresión), se concluye que no hay violaciones al supuesto de normalidad.

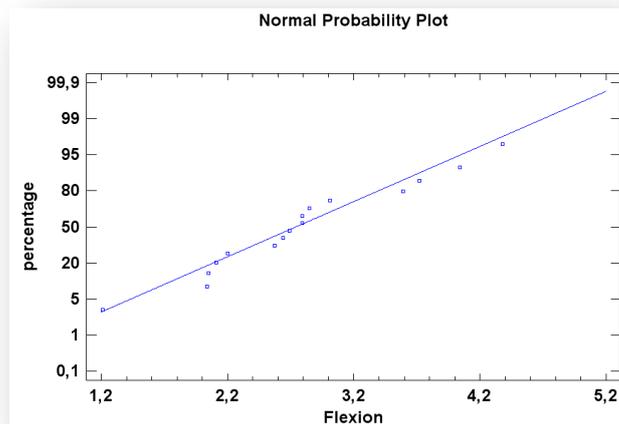


Figura 29. Grafica de probabilidad normal para flexión 2⁴.

En la figura 30 se muestra la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si la flexión puede ser adecuadamente modelada por una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk se basa en la comparación de los cuantiles de la distribución normal instalados en los cuantiles de los datos. Dado que el valor-p de la prueba realizada es mayor o igual a 0.05, no podemos rechazar la idea de que los datos para la flexión provienen de una distribución normal con un 95% de confianza.

Tests for Normality for Flexion		
Test	Statistic	P-Value
Shapiro-Wilk W	0,962562	0,682238

Figura 30. Prueba de normalidad para la flexión 2⁴.

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 31). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

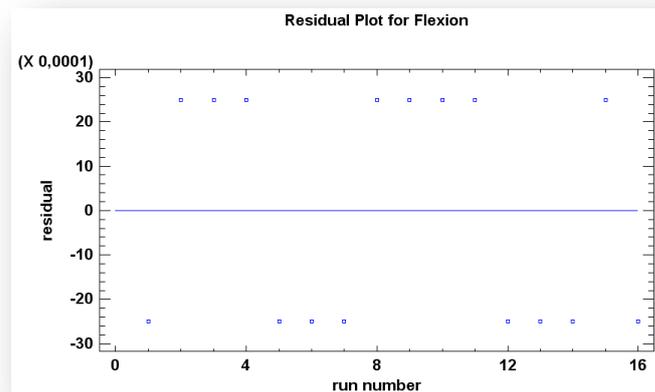


Figura 31. Grafica de residuos contra el orden de corrida para flexión 2⁴.

12.3.2 Interpretación.

Se procede a interpretar los efectos que resultaron significativos en el análisis de la varianza (figura 26). Para predecir la resistencia a la flexión y determinar cuál es el mejor tratamiento, se obtiene el modelo de regresión ajustado relacionado al ANOVA. En el cuadro 10 se muestran los coeficientes de regresión para la resistencia a la flexión.

Regression coeffs. for Flexion	
Coefficient	Estimate
constant	2,7925
A: Tipo de PET	-0,19
B: Conc. Madera	0,12875
C: Tipo de Aditivo	0,38875
D: Tamaño de Particula	-0,05
AB	0,01625
AC	0,24625
BC	0,0775
BD	-0,08375
CD	-0,15125
ABC	-0,27
ABD	0,46375
ACD	0,18125
BCD	0,0875
ABCD	-0,05

Cuadro 10. Coeficientes de regresión para flexión 2⁴.

A continuación se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned}
 \text{Flexion} = & 2,7925 - 0,19*\text{Tipo de PET} + 0,12875*\text{Conc. Madera} + 0,38875*\text{Tipo de Aditivo} - \\
 & 0,05*\text{Tamaño de Particula} + 0,01625*\text{Tipo de PET*Conc. Madera} + 0,24625*\text{Tipo de} \\
 & \text{PET*Tipo de Aditivo} + 0,0775*\text{Conc. Madera*Tipo de Aditivo} - 0,08375*\text{Conc.} \\
 & \text{Madera*Tamaño de Particula} - 0,15125*\text{Tipo de Aditivo*Tamaño de Particula} - 0,27*\text{Tipo de} \\
 & \text{PET*Conc. Madera*Tipo de Aditivo} + 0,46375*\text{Tipo de PET*Conc. Madera*Tamaño de} \\
 & \text{Particula} + 0,18125*\text{Tipo de PET*Tipo de Aditivo*Tamaño de Particula} + 0,0875*\text{Conc.} \\
 & \text{Madera*Tipo de Aditivo*Tamaño de Particula} - 0,05*\text{Tipo de PET*Conc. Madera*Tipo de} \\
 & \text{Aditivo*Tamaño de Particula}
 \end{aligned}$$

Ecuación 7

En el modelo de regresión ajustado se calculan los valores estimados para la respuesta esperada de los 16 tratamientos (Cuadro 11).

Row	Observed Value	Fitted Value
1	2,79	2,7925
2	2,85	2,8475
3	2,57	2,5675
4	2,11	2,1075
5	2,69	2,6925
6	2,79	2,7925
7	2,04	2,0425
8	4,38	4,3775
9	3,01	3,0075
10	3,59	3,5875
11	2,64	2,6375
12	4,04	4,0425
13	2,05	2,0525
14	2,2	2,2025
15	1,21	1,2075
16	3,72	3,7225

Cuadro 11. Valores estimados para flexión 2⁴.

Con el cuadro 11 se puede determinar que el valor máximo estimado para la resistencia a la flexión es de 4,37 kgf, dicho valor corresponde al número de corrida 8, en el cuadro 12 se presenta el arreglo de los factores que maximiza la resistencia a la flexión.

Optimum value = 4,3775

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Tipo de PET	-1,0	1,0	-1,0
Conc. Madera	-1,0	1,0	1,0
Tipo de Aditivo	-1,0	1,0	1,0
Tamaño de Particula	-1,0	1,0	-1,0

Cuadro 12. Respuesta óptima para flexión 2⁴.

12.4 Resistencia a la Tensión.

Para el caso de la resistencia a la tensión se siguió el mismo proceso de análisis que se emplea en la resistencia a la flexión. En primer lugar se utilizaron las gráficas de Daniels y Pareto para los efectos estandarizados con el objetivo de identificar los factores pocos o no significativos y enviarlos al error para construir la tabla del ANOVA.

En las figuras 32 y 33 se muestran los gráficos de Daniels y Pareto para los datos obtenidos en el análisis de la resistencia a la flexión. El gráfico de Daniels solo revela como posibles factores significativo a la interacción doble AC y la interacción triple ACD, todos los demás efectos siguen una línea recta, por lo que se necesita analizar el gráfico de Pareto. El gráfico de Pareto revela claramente los diferentes escalones de factores que tienen un nivel de significancia similar, el efecto principal A (tipo de PET) es el efecto menos significativo por lo que será este el que se envíe al error para poder construir la tabla del ANOVA.

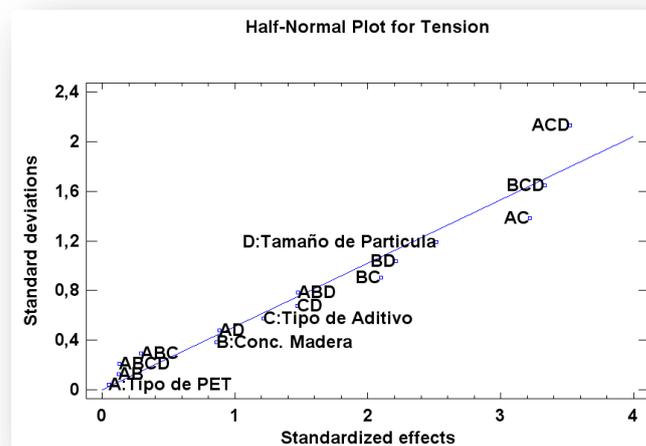


Figura 32. Grafico mitad-normal de Daniels para tensión.

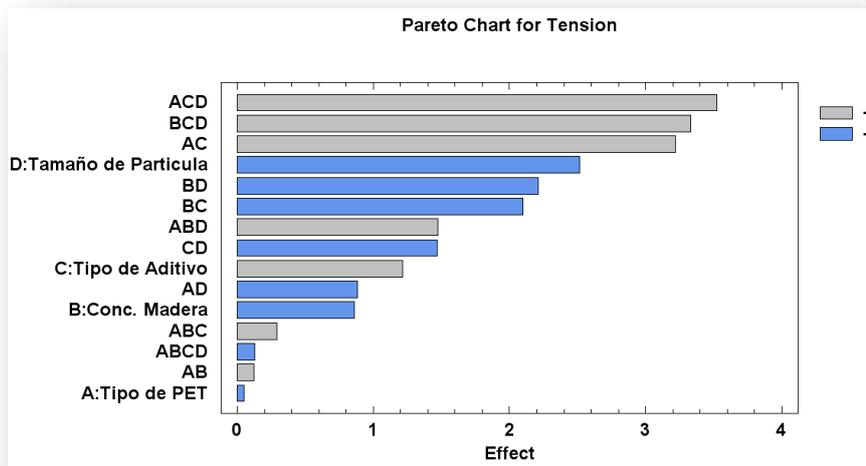


Figura 33. Grafico de Pareto para tensión.

Después de enviar al error el efecto principal A se obtiene la tabla del ANOVA que se muestra en la figura 34.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
B:Conc. Madera	2,96701	1	2,96701	312,11	0,0360
C:Tipo de Aditivo	5,89276	1	5,89276	619,88	0,0256
D:Tamaño de Particula	25,3261	1	25,3261	2664,15	0,0123
AB	0,0612562	1	0,0612562	6,44	0,2389
AC	41,4414	1	41,4414	4359,39	0,0096
AD	3,10641	1	3,10641	326,78	0,0352
BC	17,619	1	17,619	1853,41	0,0148
BD	19,5143	1	19,5143	2052,79	0,0140
CD	8,62891	1	8,62891	907,71	0,0211
ABC	0,339306	1	0,339306	35,69	0,1056
ABD	8,65831	1	8,65831	910,80	0,0211
ACD	49,5968	1	49,5968	5217,28	0,0088
BCD	44,3223	1	44,3223	4662,44	0,0093
ABCD	0,0637563	1	0,0637563	6,71	0,2346
Total error	0,00950625	1	0,00950625		
Total (corr.)	227,547	15			

R-squared = 99,9958 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9373 percent

Figura 34. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión 2^4.

La tabla del ANOVA para la prueba de tensión muestra que son significativos, dado que tienen un valor-p menor o igual a 0.05, tres factores principales (B, C y D), cinco factores de interacción doble (AC, AD, BC, BD y CD) y tres efectos de interacción triple (ABD, ACD y BCD).

Estos efectos explican, según el estadístico R^2 , 99,99% de la variabilidad observada, el valor del estadístico R^2_{aj} es muy parecido 99,93%. Esto significa que los factores estudiados, junto con todas sus interacciones, son responsables o explican un alto porcentaje de la variabilidad observada en la variable de respuesta (resistencia a la tensión).

12.4.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión.

Al igual que en la prueba para la resistencia a la flexión, los supuestos del modelo de análisis de la varianza deben verificarse antes de dar por válidas las conclusiones de la etapa de interpretación. La tabla del ANOVA supone que los residuos se distribuyen normalmente, independientes y con varianza constante. La violación grave de cualquiera de estos supuestos conduce a conclusiones erróneas.

En la figura 35 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la flexión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

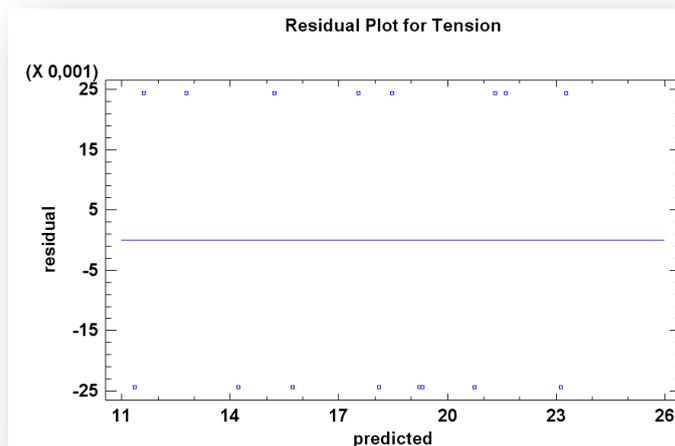


Figura 35. Grafica de residuos contra predichos 2^4 .

En la figura 36 se dibujan los residuos contra cada factor. Se observa que las columnas de puntos en los niveles bajo y alto de los 4 factores, tienen “más o menos” la misma dispersión, por lo tanto se cumple el supuesto de varianza constante. La grafica para el

factor A (tipo de PET) no aparece en la figura 36 ya que el factor principal se envió al error.

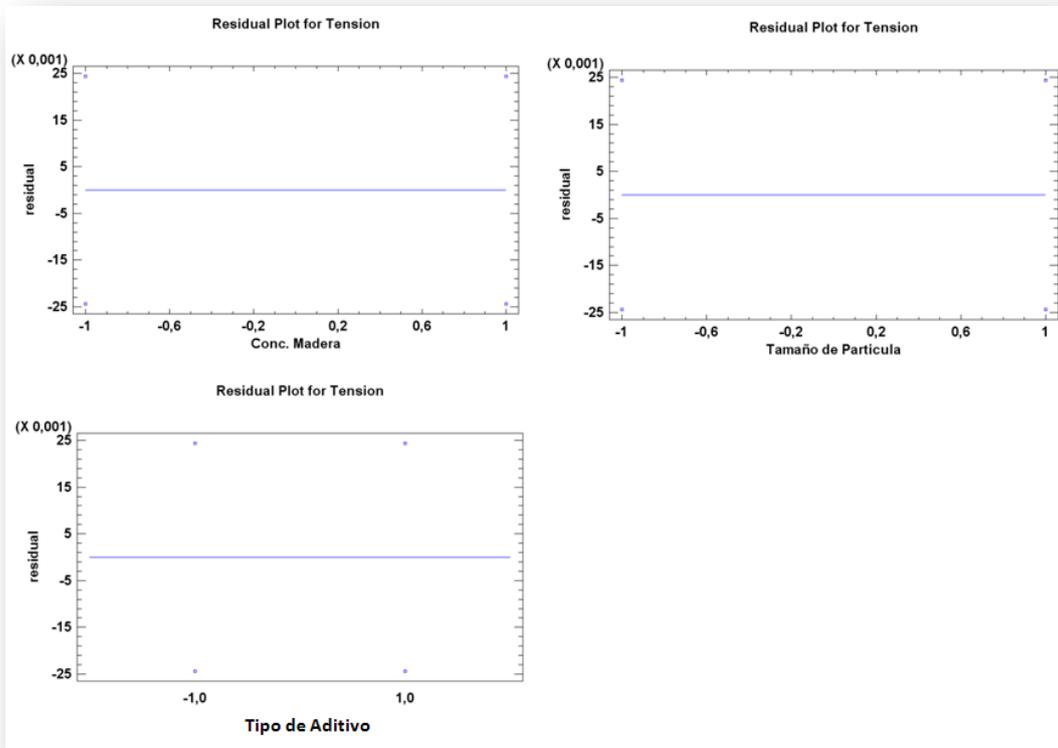


Figura 36. Graficas de residuos contra cada factor 2^4 .

En la figura 37 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Como los puntos se apegan a la línea colocada visualmente, se concluye que no hay violaciones al supuesto de normalidad.

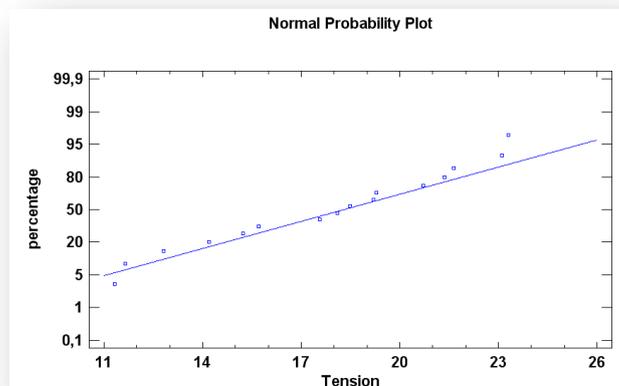


Figura 37. Grafica de probabilidad normal para tensión 2^4 .

En la figura 38 se muestra la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si la tensión puede ser adecuadamente modelada por una distribución normal. Dado que el valor-p de la prueba realizada es mayor o igual a 0.05, no podemos rechazar la idea de que los datos para la tensión provienen de una distribución normal con un 95% de confianza.

Tests for Normality for Tension		
Test	Statistic	P-Value
Shapiro-Wilk W	0,950111	0,479159

Figura 38. Prueba de normalidad para tensión 2⁴.

Para probar el supuesto de independencia se captura los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 39). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

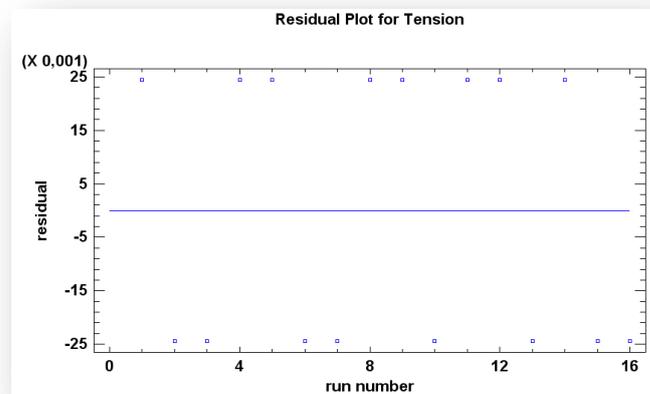


Figura 39. Grafica de residuos contra el orden de corrida 2⁴.

12.4.2 Interpretación.

Se procede a interpretar los efectos que resultaron significativos en el análisis de la varianza (figura 34). Para predecir la resistencia a la tensión y determinar cuál es el mejor tratamiento, se obtiene el modelo de regresión ajustado relacionado al ANOVA. En el cuadro 13 se muestran los coeficientes de regresión para la resistencia a la tensión.

Regression coeffs. for Tension	
Coefficient	Estimate
constant	17,7306
B:Conc. Madera	-0,430625
C:Tipo de Aditivo	0,606875
D:Tamaño de Particula	-1,25812
AB	0,061875
AC	1,60937
AD	-0,440625
BC	-1,04938
BD	-1,10438
CD	-0,734375
ABC	0,145625
ABD	0,735625
ACD	1,76063
BCD	1,66438
ABCD	-0,063125

Cuadro 13. Coeficientes de regresión para tensión.

A continuación se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned}
 \text{Tensión} = & 17,7306 - 0,430625 * \text{Conc. Madera} + 0,606875 * \text{Tipo de Aditivo} - \\
 & 1,25812 * \text{Tamaño de Particula} + 0,061875 * \text{Tipo de PET} * \text{Conc. Madera} + \\
 & 1,60937 * \text{Tipo de PET} * \text{Tipo de Aditivo} - 0,440625 * \text{Tipo de PET} * \text{Tamaño de Particula} - \\
 & 1,04938 * \text{Conc. Madera} * \text{Tipo de Aditivo} - 1,10438 * \text{Conc. Madera} * \text{Tamaño de} \\
 & \text{Particula} - 0,734375 * \text{Tipo de Aditivo} * \text{Tamaño de Particula} + 0,145625 * \text{Tipo de} \\
 & \text{PET} * \text{Conc. Madera} * \text{Tipo de Aditivo} + 0,735625 * \text{Tipo de PET} * \text{Conc. Madera} * \text{Tamaño} \\
 & \text{de Particula} + 1,76063 * \text{Tipo de PET} * \text{Tipo de Aditivo} * \text{Tamaño de Particula} + \\
 & 1,66438 * \text{Conc. Madera} * \text{Tipo de Aditivo} * \text{Tamaño de Particula} - 0,063125 * \text{Tipo de} \\
 & \text{PET} * \text{Conc. Madera} * \text{Tipo de Aditivo} * \text{Tamaño de Particula}
 \end{aligned}$$

Ecuación 8

En el modelo de regresión ajustado se calculan los valores estimados para la respuesta esperada de los 16 tratamientos (Cuadro 14).

Estimation Results for Tension

	<i>Observed</i>	<i>Fitted</i>
<i>Row</i>	<i>Value</i>	<i>Value</i>
1	11,64	11,6156
2	19,29	19,3144
3	11,33	11,3544
4	12,81	12,7856
5	15,24	15,2156
6	18,09	18,1144
7	20,72	20,7444
8	18,49	18,4656
9	21,35	21,3256
10	19,21	19,2344
11	21,64	21,6156
12	23,3	23,2756
13	15,71	15,7344
14	17,57	17,5456
15	14,2	14,2244
16	23,1	23,1244

Cuadro 14. Valores estimados para tensión.

Con el cuadro 14 se puede determinar que el valor máximo estimado para la resistencia a la tensión es de 23.27 kgf, dicho valor corresponde al número de corrida 12. En el cuadro 15 se presenta el arreglo de los factores que maximiza la resistencia a la tensión.

Optimum value = 23,2756

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Tipo de PET	-1,0	1,0	-1,0
Conc. Madera	-1,0	1,0	-1,0
Tipo de Aditivo	-1,0	1,0	-1,0
Tamaño de Particula	-1,0	1,0	1,0

Cuadro 15. Respuesta óptima para tensión.

12.5 Conclusiones del Diseño Factorial 2⁴.

Con los resultados obtenidos en el diseño factorial 2⁴ sabemos que los 4 factores estudiados tienen un efecto estadísticamente significativo sobre las dos variables de respuesta (efectos activos. Ver Figura 6), además, conocemos en qué nivel los dos factores categóricos (Tipo de PET y Tipo de agente de acoplamiento) deben correrse para maximizar las variables de respuesta. Para la elección del tipo de PET tanto para la flexión como para la tensión la mejor alternativa es el de baja viscosidad (Ver cuadro 12 y 15), mientras que para el tipo de agente de acoplamiento la elección se toma en base a

la conveniencia del proyecto, como se vio en el cuadro 12 y 15 el PE favorece la resistencia a la flexión y el PP a la tensión, es importante destacar que la resistencia a la tensión se incrementa en mayor medida al utilizar PP que lo que se incrementa la resistencia a la flexión utilizando PE.

Con el objetivo de despejar dudas se recurre a la técnica de optimización simultanea para determinar el tipo de agente de acoplamiento que debe ser empleado, en la figura 40 se muestra el arreglo que maximiza las dos variables de respuesta de manera simultánea, con lo que se llega a la conclusión de que el PP resulta ser más conveniente. En este punto termina la etapa del cribado (Ver figura 6).

Optimize Desirability
Optimum value = 0,944306

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Tipo de PET	-1,0	1,0	-1,0
Conc. Madera	-1,0	1,0	-1,0
Tipo de Aditivo	-1,0	1,0	-1,0
Tamaño de Particula	-1,0	1,0	1,0

<i>Response</i>	<i>Optimum</i>
Flexion	4,0425
Tension	23,2756

Figura 40. Arreglo óptimo de los factores 2⁴.

El siguiente paso consiste en fijar los factores categóricos en su nivel óptimo (Ver cuadro 12 y 15) y continuar la exploración con los factores continuos en busca de un mejor óptimo. Esta etapa corresponde a la búsqueda I (Ver figura 6), donde utilizando un diseño factorial 2² con repeticiones al centro (Ver 9.5.5), se determina si existe una falta de ajuste o la posible presencia de curvatura en al menos uno de los factores.

El diseño factorial 2² con repeticiones al centro y su análisis se presenta en el siguiente apartado.

12.6 Diseño Factorial 2² con repeticiones al centro (Búsqueda I).

Cuando en un diseño factorial 2^k los k factores admitan un nivel de prueba intermedio, es recomendable implementar un tratamiento adicional formado por la combinación del nivel intermedio o medio de todos los factores. Esta combinación se le conoce como punto central (Ver 9.5.5).

Para la realización de la búsqueda I se utiliza un diseño factorial 2^2 con tres puntos centrales. Los factores estudiados, son los factores continuos concentración de madera y tamaño de partícula del experimento anterior.

El diseño factorial implementado en unidades codificadas se presenta en el cuadro 16, el cual muestra las variables estudiadas y las respuestas obtenidas para la resistencia a la flexión y tensión.

	Concentracion de Madera	Tamaño de Partícula	Flexión	Tensión
1	-1	-1	2.11	11.28
2	1	-1	3.01	21.35
3	-1	1	4.04	23.3
4	1	1	2.2	17.57
9	0	0	2	10.89
10	0	0	2.99	11.6
11	0	0	2.6	12.4

		-1	0	1
Conc. De Madera		25 gr.	37,5 gr.	50 gr.
Tamaño de Partícula		18	14	10
PET	250 gr.			
PP	6,2 gr.			

Malla

Cuadro 16. Diseño Factorial 22.

12.6.1 Resistencia a la flexión.

El ANOVA para los valores de la resistencia a la flexión del experimento mostrado en el cuadro 16 se muestra en la figura 40.

Análisis de Varianza para Flexión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentracion madera	0.2209	1	0.2209	0.89	0.4454
B:Tamaño partícula	0.3136	1	0.3136	1.26	0.3782
AB	1.8769	1	1.8769	7.55	0.1109
Falta de ajuste	0.164743	1	0.164743	0.66	0.5012
Error puro	0.4974	2	0.2487		
Total (corr.)	3.07354	6			

R-cuadrada = 78.4567 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 56.9134 por ciento
Error estándar del est. = 0.498698

Figura 41. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (factorial 22).

La tabla del ANOVA para la prueba de flexión del diseño factorial 2² muestra que ninguno de los efectos principales ni la interacción es significativa, dado que tienen un valor-p mayor al nivel de significancia prefijado de 0.05.

Con los datos obtenidos se ajusta un modelo de primer orden y se estima la curvatura mediante la prueba de falta de ajuste⁹. Si ya se está cerca del óptimo, entonces la curvatura será significativa y el modelo de primer orden no describirá de manera satisfactoria la región que se explora. En este caso será necesario completar un diseño de segundo orden que permita ajustar un modelo de segundo orden para encontrar las condiciones de los factores que maximizan las variables de respuesta.

El modelo final está dado por:

$$Flexión = 2,70714 - 0,235*Concentración\ madera + 0,28*Tamaño\ partícula - 0,685*Concentración\ madera*Tamaño\ partícula$$

Ecuación 9

Se analizan los datos y no hay presencia de efectos de curvatura pura, al no resultar significativa la prueba de falta de ajuste dado que el valor-p para la prueba es mayor a 0.05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados al nivel de confianza del 95%.

⁹ La prueba de falta de ajuste verifica la calidad del ajuste del modelo, en particular ayuda a evaluar si el orden del modelo es el correcto.

En este caso los coeficientes de determinación R^2_{aj} y R^2 son pequeños, esto indica que el efecto o variabilidad atribuible a los factores estudiados es pequeña en comparación con el resto de la variación observada en el experimento.

Como se vio en el punto 12.3 (análisis de la resistencia a la flexión del diseño 2^4), el tipo de aditivo o agente de acoplamiento es el factor que más influencia tiene sobre la resistencia a la flexión, como en el experimento actual (2^2) este factor no se está analizando los valores de los coeficientes de determinación R^2_{aj} y R^2 son pequeños.

Es importante señalar que si se envía al error el efecto principal “concentración madera” el efecto de interacción resulta significativo con un valor-p de 0.043 y los coeficientes de determinación R^2_{aj} y R^2 mantienen el mismo valor (Figura 41). Se dice que dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentra el otro.

Analysis of Variance for Flexion					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
B:Tamaño partícula	0,3136	1	0,3136	1,42	0,2992
AB	1,8769	1	1,8769	8,50	0,0434
Total error	0,883043	4	0,220761		
Total (corr.)	3,07354	6			

R-squared = 71,2695 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 56,9043 percent
Standard Error of Est. = 0,469852

Figura 42. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (factorial 2^2).

El efecto de interacción de los dos factores de la figura 40 se pueden graficar como en la figura 42; en el eje vertical se pone una escala que represente la magnitud de la variable de respuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final, cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta. Resulta que cuando existe interacción las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente, como se observa en la figura 42, y si no hay interacción las líneas tienen pendientes muy similares, que son aproximadamente paralelas. En la figura 42 se

muestra la interacción de los dos factores, poniendo el factor concentración de madera en el eje horizontal, mientras que en la figura 43 se representa el mismo efecto de interacción pero ahora con el factor tamaño de partícula en el eje horizontal.

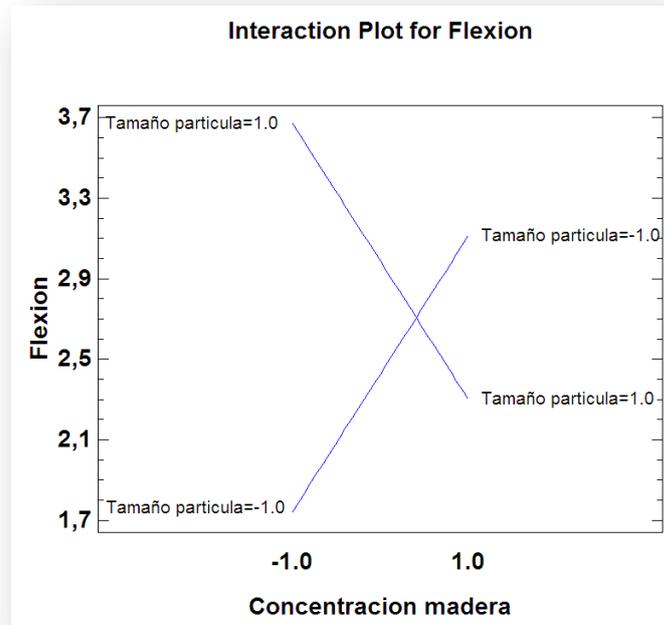


Figura 43. Grafica de interacción 1 para la prueba de flexión (factorial 22).

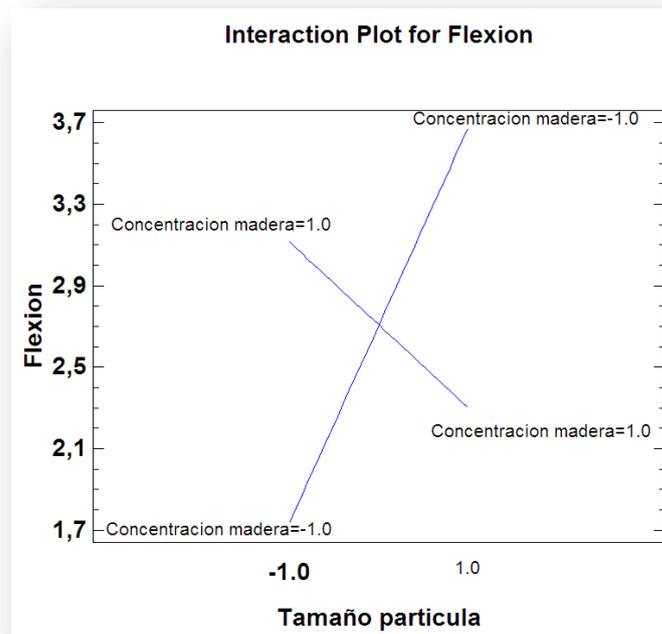


Figura 44. Grafica de interacción 2 para la prueba de flexión (factorial 22).

En la figura 42 se aprecia que si la concentración de madera se cambia de su nivel (-1) al (1), cuando el tamaño de partícula es (-1), la respuesta (Flexión) se incrementa; pero si el tamaño de partícula es (1), la respuesta decrece de manera importante. En otras palabras, el factor concentración de madera tiene un efecto positivo o negativo sobre la resistencia a la flexión, dependiendo del nivel del tamaño de partícula.

Otro aspecto importante cuando los factores son cuantitativos y se puede apreciar en las diferentes gráficas: de medias y de dispersión (Figura 44 y 45), es la posible presencia de curvatura en los factores.

Se puede notar en la grafica de medias (figura 44), que aunque es posible trazar una recta que pase por el interior de los tres intervalos de confianza, tanto para la concentración de madera como para el tamaño de partícula, las medias de los niveles presentan un cierto efecto de curvatura, lo cual podría sugerir cierta evidencia de la presencia de curvatura en los factores.

En la figura 45 permite observar la variabilidad de la respuesta en cada punto experimental, además detecta la posible presencia de observaciones atípicas. En este

caso para los dos factores se aprecia que la menor variabilidad de la respuesta se presenta en los niveles intermedios de los factores, la mayor variabilidad para la concentración de madera es en el nivel inferior y para el tamaño de partícula se presenta en el nivel superior.

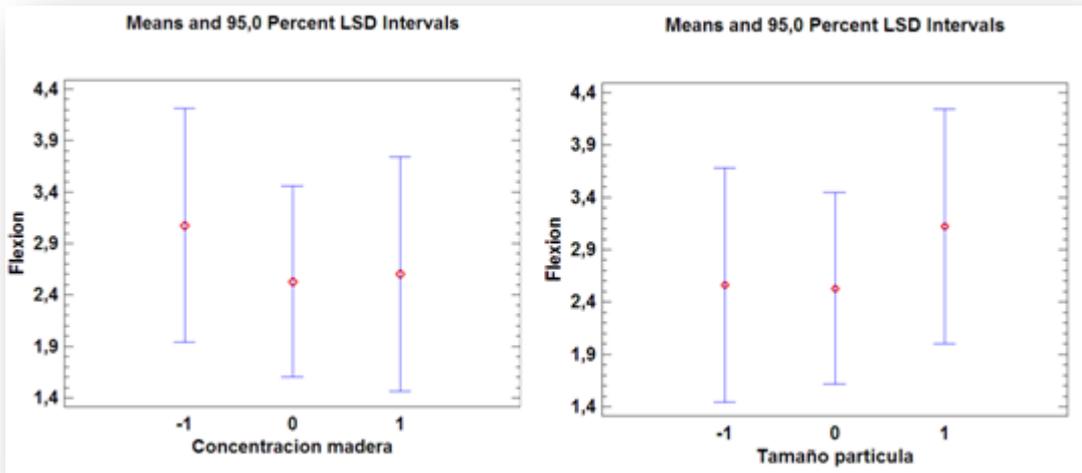


Figura 45. Grafica de medias para la prueba de flexión (factorial 22).

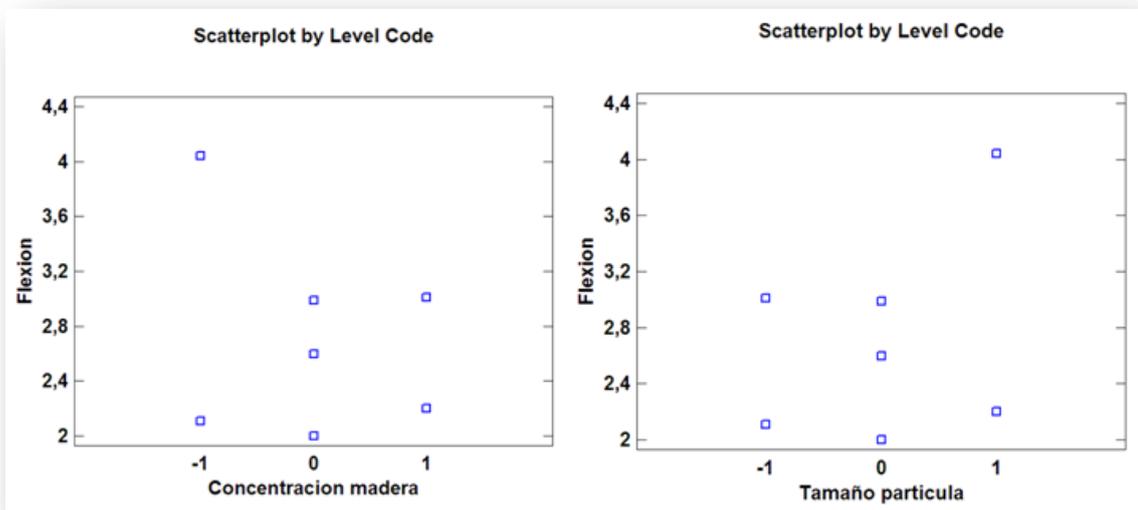


Figura 46. Grafica de dispersión para la prueba de flexión (factorial 22).

Más adelante se darán las conclusiones generales del diseño 2^2 con puntos al centro, tanto para la resistencia a la flexión como para la tensión.

12.6.1.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Flexión.

El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, para concluir que el supuesto se cumple.

En la figura 46 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la flexión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

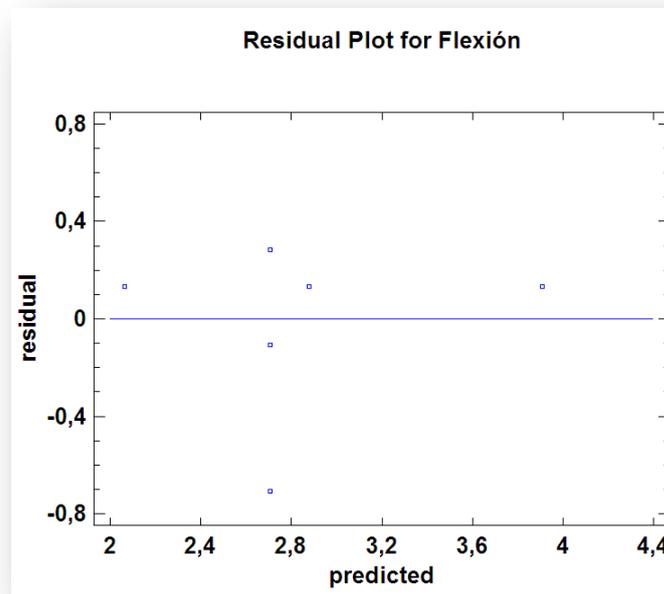


Figura 47. Grafica de residuos contra predichos flexión 2².

El la figura 47 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Los puntos parecen apegarse a la línea colocada visualmente, aunque queda la duda por un punto que parece alejarse por lo que se realizara una prueba de normalidad para corroborar el supuesto de normalidad.

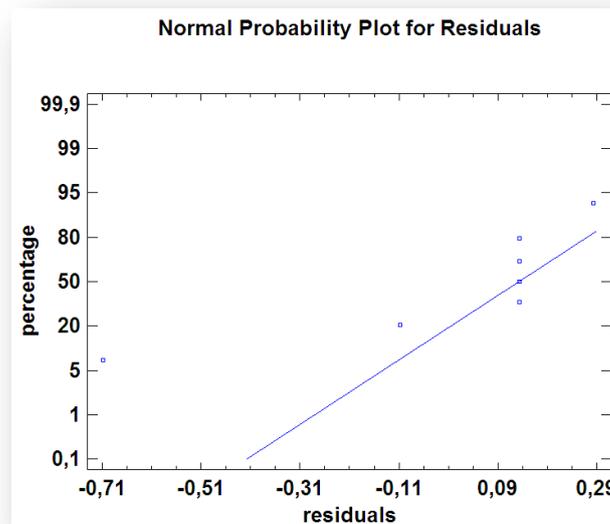


Figura 48. Grafica de probabilidad normal para flexión 2^2.

En la figura 48 se muestra la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si la flexión puede ser adecuadamente modelada por una distribución normal. Dado que el valor-p de la prueba realizada es mayor o igual a 0.05, no podemos rechazar la idea de que los datos para la flexión provienen de una distribución normal con un 95% de confianza.

Tests for Normality for Flexión		
Test	Statistic	P-Value
Shapiro-Wilk W	0,891169	0,291974

Figura 49. Prueba de normalidad para la flexión 2^2.

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 49). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

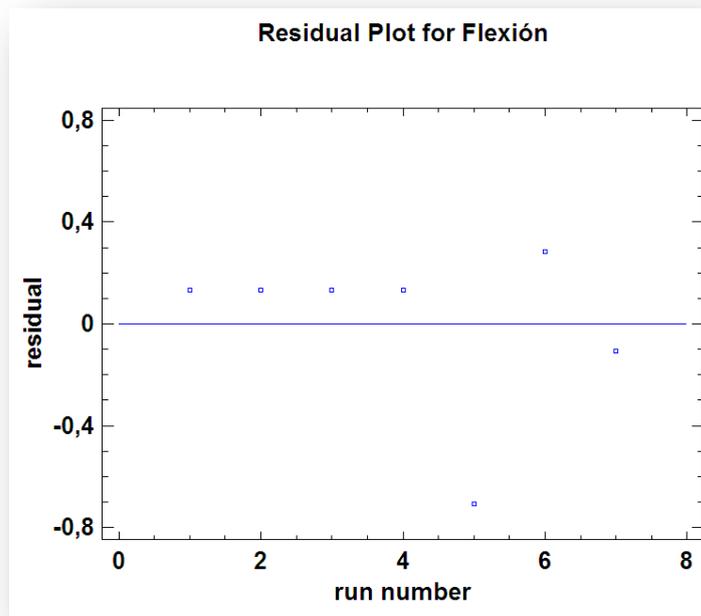


Figura 50. Grafica de residuos contra el orden de corrida para flexión 2².

12.6.2 Resistencia a la Tensión.

El ANOVA para los valores de la resistencia a la tensión del experimento mostrado en el cuadro 16 se muestra en la figura 50.

Análisis de Varianza para Tensión					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentracion madera	4.7089	1	4.7089	8.25	0.1028
B:Tamaño partícula	16.9744	1	16.9744	29.74	0.0320
AB	62.41	1	62.41	109.36	0.0090
Falta de ajuste	77.9915	1	77.9915	136.66	0.0072
Error puro	1.1414	2	0.5707		
Total (corr.)	163.226	6			

R-cuadrada = 51.5195 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 3.03899 por ciento
Error estándar del est. = 0.755447

Figura 51. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión (factorial 2²).

La tabla del ANOVA para la prueba de tensión del diseño factorial 2² muestra que el efecto tamaño de partícula y el efecto de interacción son significativos dado que tienen un valor-p menor al nivel de significancia prefijado de 0.05.

Con los datos obtenidos se ajusta un modelo de primer orden y se estima la curvatura mediante la prueba de falta de ajuste. Se analizan los datos y se detecta una fuerte presencia de efectos de curvatura pura, al resultar significativa la prueba de falta de ajuste dado que el valor-p para la prueba es menor a 0.05, existe una falta de ajuste estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0%. Esto significa que el modelo así ajustado no representa adecuadamente a los datos. Lo cual implica que alguno o ambos términos cuadráticos puros influyen fuertemente sobre la resistencia a la tensión.

El modelo final está dado por:

$$Tensión = 15,0486 - 0,0275 * Concentración\ madera + 1,2975 * Tamaño\ partícula - 5,0625 * Concentración\ madera * Tamaño\ partícula$$

Ecuación 10

Para investigar los efectos cuadráticos puros se debe aumentar el experimento para convertirlo en un diseño de composición central con puntos axiales en las caras. El aumento del diseño se presenta más adelante.

En este caso los coeficientes de determinación R^2_{aj} y R^2 son demasiado pequeños, esto indica que el efecto de curvatura es significativo, lo cual se puede comprobar realizando un análisis de regresión múltiple como el que se muestra en la figura 51.

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	11,63	0,436157	26,6647	0,0014
Concentracion Madera	-0,0275	0,377723	-0,0728046	0,9486
Tamaño de Particula	1,2975	0,377723	3,43505	0,0753
Interaccion	-5,0625	0,377723	-13,4027	0,0055
Curvatura	5,9825	0,576982	10,3686	0,0092

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	170,607	4	42,6519	74,74	0,0132
Residual	1,1414	2	0,5707		
Total (Corr.)	171,749	6			

R-squared = 99,3354 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,0063 percent
Tension = 11,63 - 0,0275*Concentracion Madera + 1,2975*Tamaño de Particula - 5,0625*Interaccion + 5,9825*Curvatura

Figura 52. Análisis de regresión múltiple para la prueba de tensión (factorial 22).

En la figura 51 se muestra que la curvatura (A^2 o B^2) es significativa. En el análisis de la varianza se aprecia que el modelo de regresión es significativo, y de acuerdo con los coeficientes de determinación, R^2 y R^2_{aj} , el modelo explica bien la variabilidad presente en los datos.

En la figura 52 se muestra la interacción de los dos factores, poniendo el factor concentración de madera en el eje horizontal, mientras que en la figura 53 se representa el mismo efecto de interacción pero ahora con el factor tamaño de partícula en el eje horizontal.

En la figura 52 se aprecia que si la concentración de madera se cambia de su nivel (-1) al (1), cuando el tamaño de partícula es (-1), la respuesta (Tensión) se incrementa; pero si el tamaño de partícula es (1), la respuesta decrece de manera importante. En otras palabras, el factor concentración de madera tiene un efecto positivo o negativo sobre la resistencia a la tensión, dependiendo del nivel del tamaño de partícula.

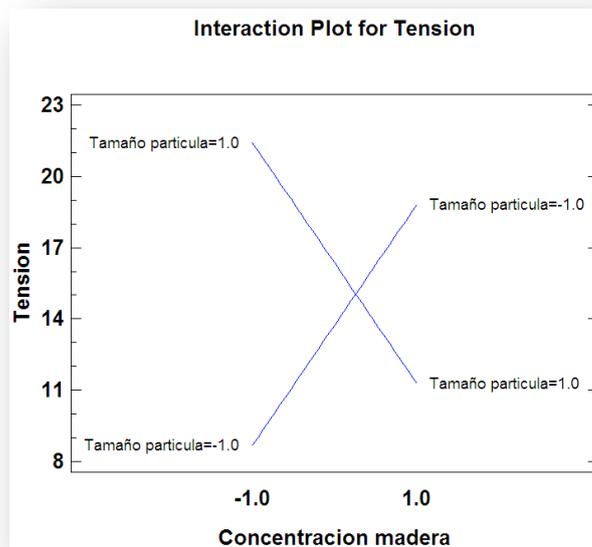


Figura 53. Grafica de interacción 1 para la prueba de tensión (factorial 22).

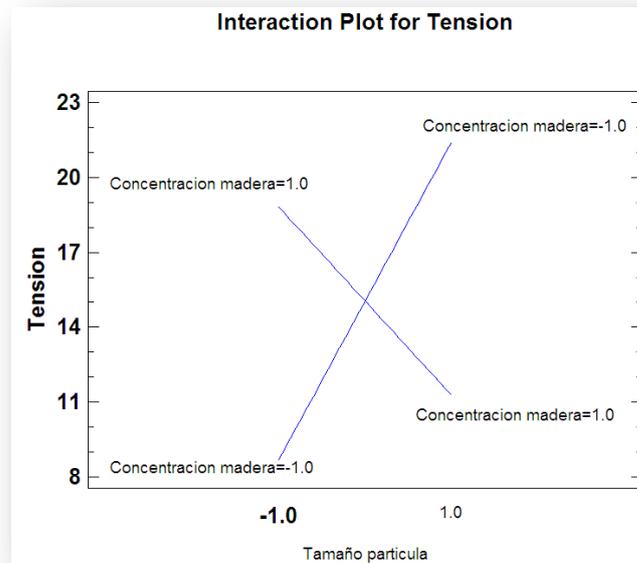


Figura 54. Grafica de interacción 2 para la prueba de tensión (factorial 22).

Otro aspecto importante cuando los factores son cuantitativos y se puede apreciar en las diferentes gráficas: de medias y de dispersión (Figura 54 y 55), es la posible presencia de curvatura en los factores.

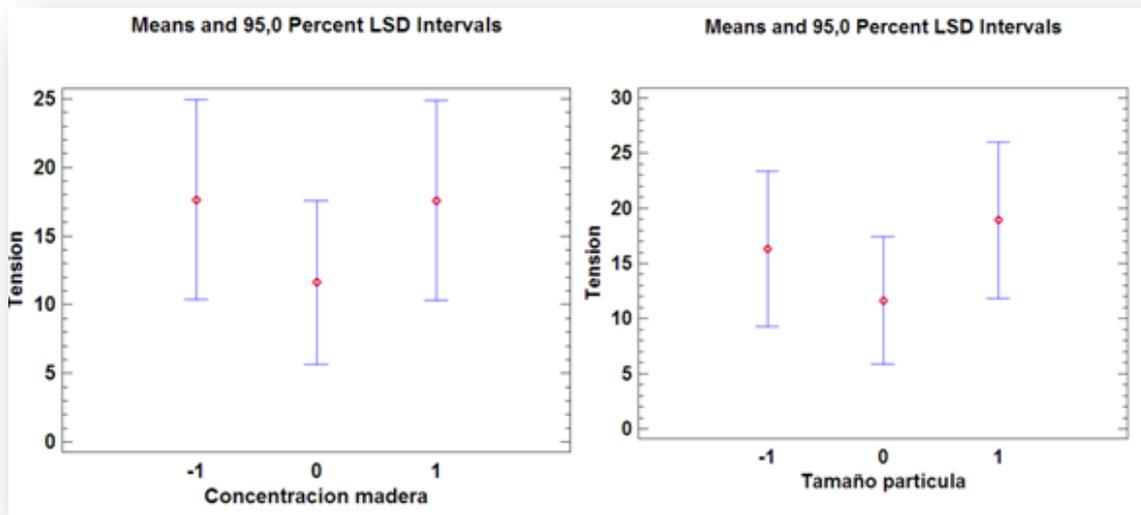


Figura 55. Grafica de medias para la prueba de tensión (factorial 22).

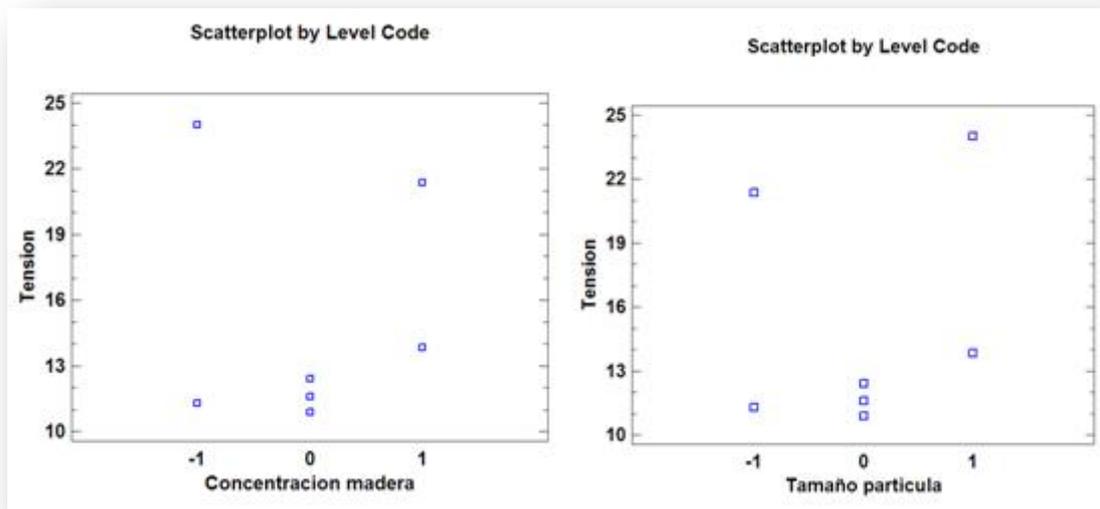


Figura 56. Grafica de dispersión para la prueba de tensión (factorial 2²).

Tanto en la grafica de medias (figura 54) como en la grafica de dispersión (figura 55) se detecta una presencia de curvatura en los factores para la prueba de tensión, es muy notorio que para los niveles intermedios de los factores el valor de la resistencia a la tensión disminuye considerablemente, además de que la dispersión es menor en los niveles intermedios.

En el siguiente apartado se muestran las conclusiones referentes al análisis de las dos variables de respuesta del diseño de experimentos factorial 2² con puntos al centro.

12.6.2.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión.

El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, para concluir que el supuesto se cumple.

En la figura 56 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la tensión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

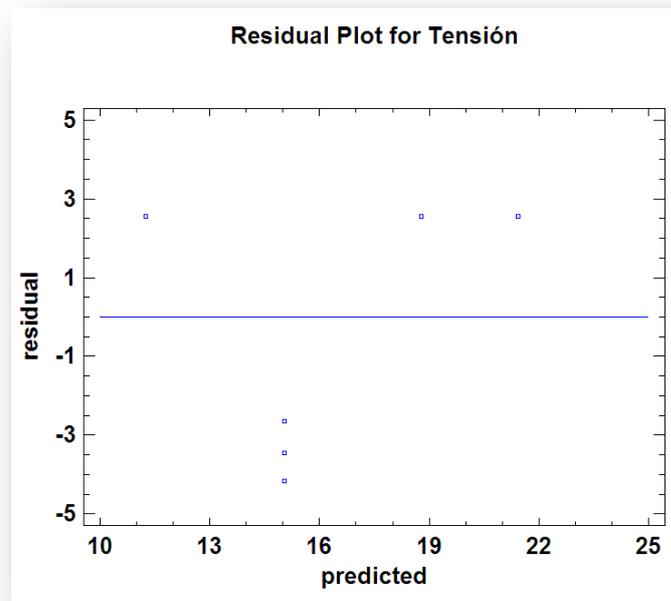


Figura 57. Grafica de residuos contra predichos tensión 2².

En la figura 57 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Los puntos parecen apearse a la línea colocada visualmente, aunque queda la duda por un punto que parece alejarse por lo que se realizara una prueba de normalidad para corroborar el supuesto de normalidad.

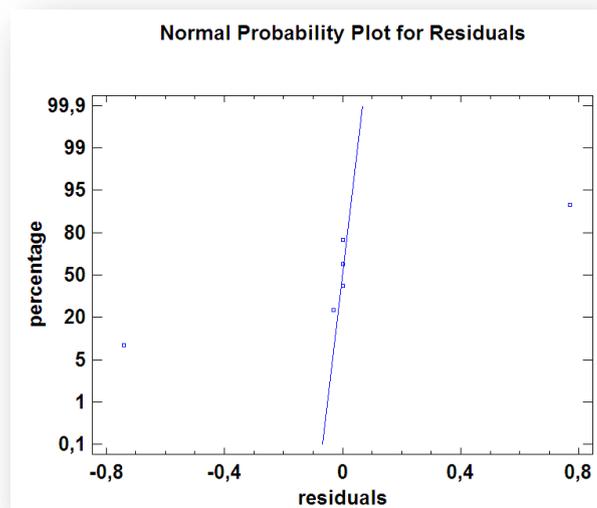


Figura 58. Grafica de probabilidad normal para tensión 2².

En la figura 58 se muestra la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si la flexión puede ser adecuadamente modelada por una distribución normal. Dado que el valor-p de la prueba realizada es mayor o igual a 0.05, no podemos rechazar la idea de que los datos para la flexión provienen de una distribución normal con un 95% de confianza.

Test	Statistic	P-Value
Shapiro-Wilk W	0,821563	0,0836571

Figura 59. Prueba de normalidad para la tensión 2².

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 59). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

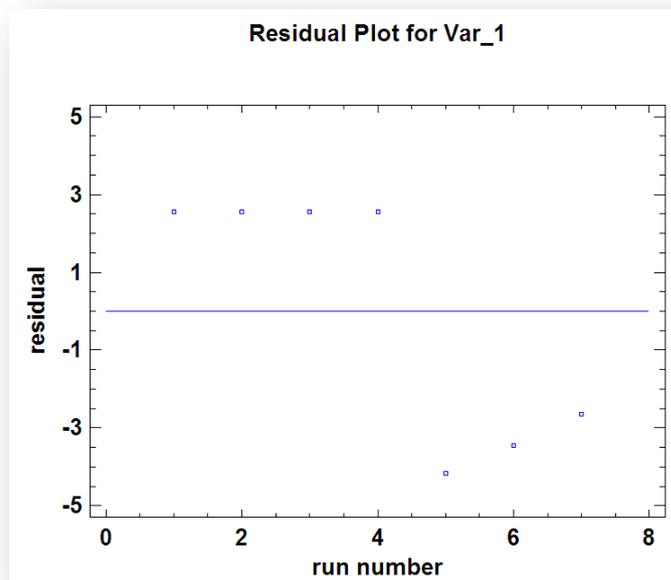


Figura 60. Grafica de residuos contra el orden de corrida para tensión 2².

12.6.3 Conclusiones del Diseño Factorial 2² con Puntos al Centro.

Por los resultados mostrados en el diseño 2^2 con puntos al centro se toma la decisión de completar un diseño de composición central con puntos axiales en las caras, con el objetivo de estudiar los efectos cuadráticos puros y de esta forma determinar cuál es el arreglo de los factores que optimiza tanto la resistencia a la flexión como a la tensión.

12.7 Diseño de Composición Central (Búsqueda II).

El diseño de composición central (DCC) es el más utilizado en la etapa de búsqueda de segundo orden debido a su gran flexibilidad: se puede construir a partir de un diseño factorial completo 2^2 agregando puntos sobre los ejes y al centro [9].

En este caso utilizaremos un DCC con puntos axiales en las caras, esta variante resulta útil cuando se quiere completar un DCC, pero se complica correr los tratamientos con niveles más allá de los valores -1 y +1 debido a restricciones del proceso [9].

El DCC implementado en unidades codificadas se presenta en el cuadro 17, el cual muestra las variables estudiadas y las respuestas obtenidas para la resistencia a la flexión y tensión.

	Concentracion de Madera	Tamaño de Partícula	Flexión	Tensió
1	-1	-1	2.11	11.28
2	1	-1	3.01	21.35
3	-1	1	4.04	24
4	1	1	2.2	13.82
5	-1	0	1.84	7.22
6	1	0	1.438	7.6
7	0	-1	1.258	10.55
8	0	1	1.349	12.35
9	0	0	2	10.89
10	0	0	2.99	11.6
11	0	0	2.6	12.4

	-1	0	1
Conc. De Madera	25 gr.	37,5 gr.	50 gr.
Tamaño de Partícula	18	14	10
PET	250 gr.		
PP	6,2 gr.		

Malla

Cuadro 17. Diseño de Composición Central.

12.7.1 Resistencia a la Flexión DCC.

El ANOVA para los valores de la resistencia a la flexión del experimento mostrado en el cuadro 17 se muestra en la figura 60; se está considerando un efecto de bloque debido a que los tratamientos de los puntos axiales fueron corridos en otro momento. Cuando se usan diseños de superficie de respuesta, con frecuencia es necesario considerar la formación de bloques para eliminar las variables perturbadoras [10].

Analysis of Variance for Flexión

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Concentracion Madera	0,300161	1	0,300161	2,62	0,1664
B:Tamaño Particula	0,24442	1	0,24442	2,13	0,2039
AA+block	0,276892	1	0,276892	2,42	0,1807
AB	1,8769	1	1,8769	16,39	0,0098
blocks	3,72795	1	3,72795	32,55	0,0023
Total error	0,572672	5	0,114534		
Total (corr.)	7,15905	10			

R-squared = 92,0007 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 84,0014 percent
Standard Error of Est. = 0,338429

Figura 61. Tabla del ANOVA para la prueba de flexión (DCC).

La tabla del ANOVA para la prueba de flexión del DCC muestra que ninguno de los efectos principales ni los efectos cuadráticos son significativos, dado que tienen un valor-p mayor al nivel de significancia prefijado de 0.05. Se decide enviar al error el efecto cuadrático B (tamaño de partícula). Por otra parte, el efecto de interacción de los dos factores resulta significativo con un valor-p de 0.0223, el efecto de los bloques también es significativo por lo que es importante tener en mente que un porcentaje de la variabilidad de la respuesta es debida a que los experimentos realizados para completar el DCC se realizaron en un tiempo diferente.

El modelo final está dado por:

$$Flexión = 1,91809 - 0,223667*Concentración Madera + 0,201833*Tamaño Partícula + 0,319395*Concentración Madera^2 - 0,685*Concentración Madera*Tamaño Partícula.$$

Ecuación 11

Estos efectos explican, según el estadístico R², 92% de la variabilidad observada, el valor del estadístico R²_{aj} es parecido 84%. Esto significa que los factores estudiados, junto con su interacción, son responsables o explican un alto porcentaje de la variabilidad observada en la variable de respuesta (resistencia a la flexión).

En la figura 61 se muestra la prueba para la falta de ajuste para el diseño del cuadro 17 respecto a la resistencia a la flexión. Dado que el valor-p en la tabla del ANOVA es

mayor a 0.05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados al 95% de confianza.

Analysis of Variance for Flexión

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Concentracion Madera	0,300161	1	0,300161	1,21	0,3865
B:Tamaño Particula	0,24442	1	0,24442	0,98	0,4260
AA+block	0,276892	1	0,276892	1,11	0,4020
AB	1,8769	1	1,8769	7,55	0,1109
blocks	3,72795	1	3,72795	14,99	0,0607
Lack-of-fit	0,0752724	3	0,0250908	0,10	0,9523
Pure error	0,4974	2	0,2487		
Total (corr.)	7,15905	10			

R-squared = 92,0007 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 84,0014 percent

Figura 62. Prueba de falta de ajuste para la prueba de flexión (DCC).

El efecto de interacción de los dos factores de la figura 60 se pueden graficar como en las figuras 62 y 63; en el eje vertical se pone una escala que represente la magnitud de la variable de respuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final, cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta. Resulta que cuando existe interacción las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente, como se observa en las figuras 62 y 63, y si no hay interacción las líneas tienen pendientes muy similares, que son aproximadamente paralelas. En la figura 62 se muestra la interacción de los dos factores, poniendo el factor concentración de madera en el eje horizontal, mientras que en la figura 63 se representa el mismo efecto de interacción pero ahora con el factor tamaño de partícula en el eje horizontal.

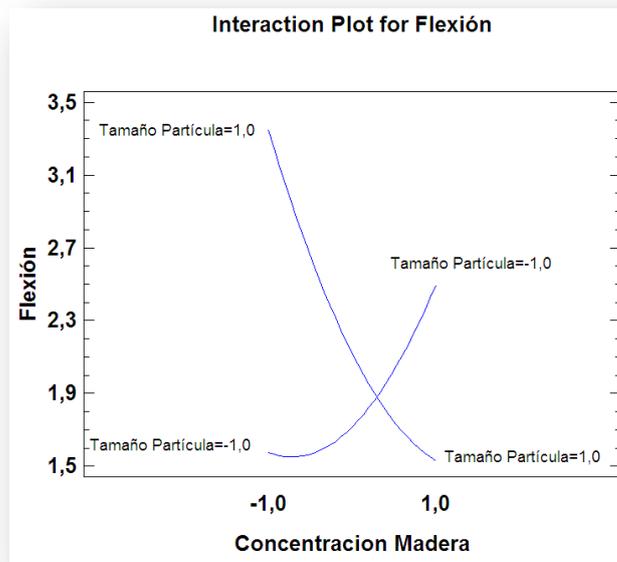


Figura 63. Grafica de interacción 1 para la prueba de flexión (DCC).

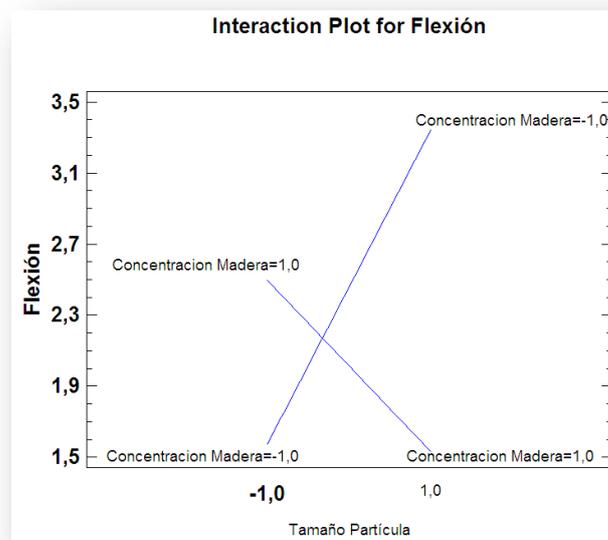


Figura 64. Grafica de interacción 2 para la prueba de flexión (DCC).

La interpretación a las graficas de interacción son muy parecidas a las conclusiones obtenidas de las graficas de interacción del diseño 2^2 con puntos al centro, solo que en la figura 62 se puede apreciar un efecto de curvatura de los factores.

Las gráficas de superficie de respuesta y de contornos del modelo ajustado se presentan en las figuras 64 y 65 respectivamente. En estas se muestra que la superficie de

respuesta tiene una forma de punto de silla, los valores más altos de la respuesta se encuentran en el nivel (-1) de la concentración de madera y en el nivel (1) del tamaño de partícula.

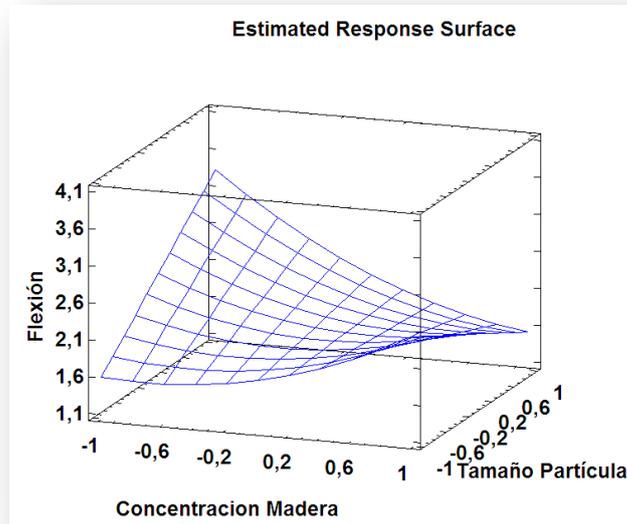


Figura 65. Superficie de respuesta para la prueba de flexión (DCC).

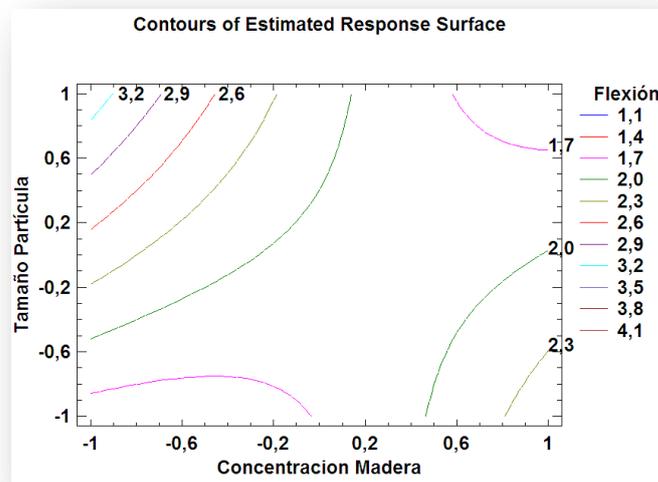


Figura 66. Gráfico de contornos para la prueba de flexión (DCC).

El cuadro 18 muestra la combinación de los niveles de los factores que maximizan la respuesta (resistencia a la flexión) en la región indicada.

Optimize Response
 Goal: maximize Flexión
 Optimum value = 3,34799

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Concentracion Madera	-1,0	1,0	-1,0
Tamaño Particula	-1,0	1,0	1,0

Cuadro 18. Arreglo óptimo de los niveles de los factores para flexión (DCC).

12.7.1.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión (DCC).

La tabla del ANOVA supone que los residuos se distribuyen normalmente, independientes y con varianza constante. La violación grave de cualquiera de estos supuestos conduce a conclusiones erróneas.

El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, para concluir que el supuesto se cumple.

En la figura 66 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la flexión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, salvo por dos puntos que presentan una dispersión mayor lo que no parece ser grave, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

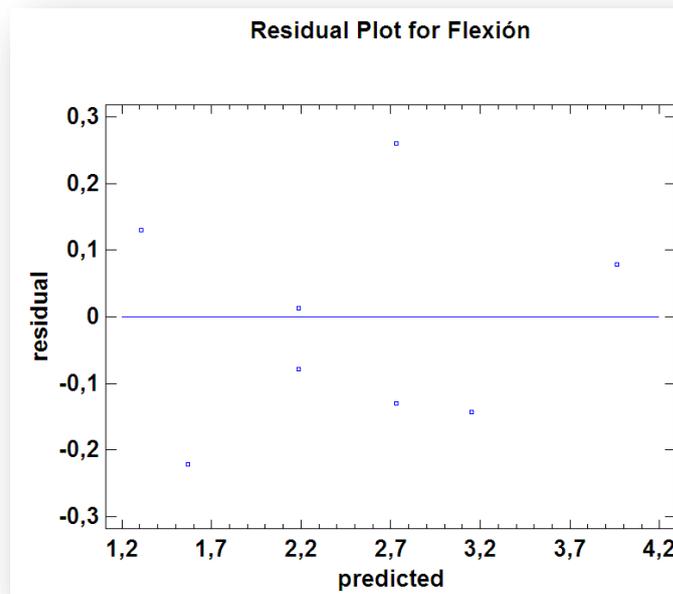


Figura 67. Grafica de residuos contra predichos (DCC).

El la figura 67 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Como los puntos se apegan a la línea colocada visualmente (no es línea de regresión), se concluye que no hay violaciones al supuesto de normalidad.

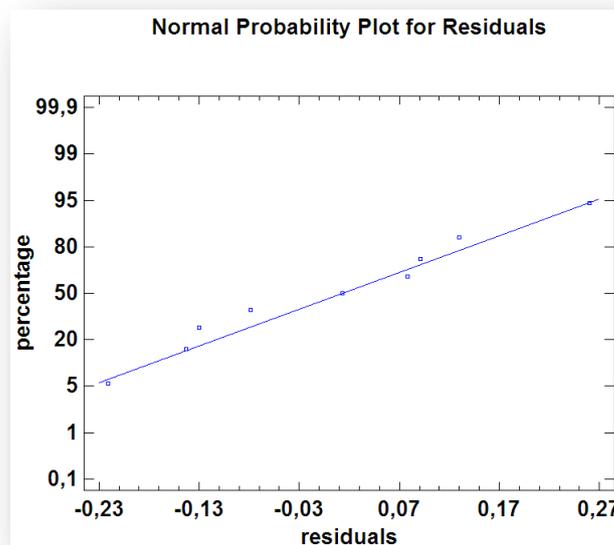


Figura 68. Grafica de probabilidad normal para flexión (DCC).

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 68). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

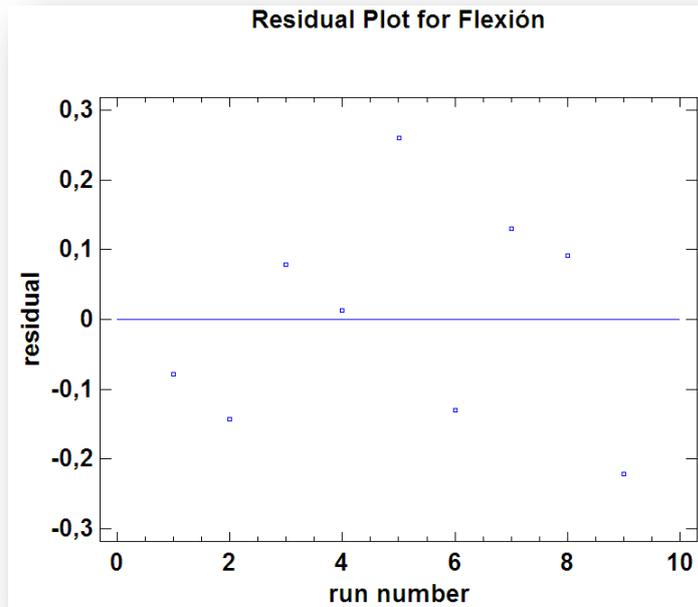


Figura 69. Grafica de residuos contra el orden de corrida (DCC).

12.7.2 Resistencia a la Tensión DCC.

El ANOVA para los valores de la resistencia a la tensión del experimento mostrado en el cuadro 17 se muestra en la figura 69; se está considerando un efecto de bloque debido a que los tratamientos de los puntos axiales fueron corridos en otro momento. Cuando se usan diseños de superficie de respuesta, con frecuencia es necesario considerar la formación de bloques para eliminar las variables perturbadoras [10].

Analysis of Variance for Tensión

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
B:Tamaño Partícula	8,14335	1	8,14335	28,53	0,0031
AA+block	2,38314	1	2,38314	8,35	0,0342
AB	102,516	1	102,516	359,12	0,0000
BB+block	63,4424	1	63,4424	222,25	0,0000
blocks	68,0819	1	68,0819	238,50	0,0000
Total error	1,4273	5	0,28546		
Total (corr.)	270,118	10			

R-squared = 99,4716 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,9432 percent
Standard Error of Est. = 0,534285

Figura 70. Tabla del ANOVA para la prueba de tensión (DCC).

La tabla del ANOVA para la prueba de tensión del DCC muestra que el efecto principal A (concentración de madera) no es significativo, por lo que se decide mandar al error por tener un porcentaje de contribución muy pequeño, por otro lado el factor principal B (tamaño de partícula) es significativo dado que tiene un valor-p de 0.0087, el efecto de interacción AB es significativo y es el efecto que presenta el mayor porcentaje de contribución, los efectos cuadráticos también son significativos, el efecto cuadrático de B tiene un porcentaje de contribución mucho mayor al del efecto cuadrático de A, el efecto de los bloques también es significativo por lo que es importante tener en mente que un porcentaje de la variabilidad de la respuesta es debida a que los experimentos realizados para completar el DCC se realizaron en un tiempo diferente.

El modelo final está dado por:

$$\text{Tensión} = 9,03437 + 1,165 * \text{Tamaño Partícula} + 0,97125 * \text{Concentración Madera}^2 - 5,0625 * \text{Concentración Madera} * \text{Tamaño Partícula} + 5,01125 * \text{Tamaño Partícula}^2.$$

Ecuación 12

Estos efectos explican, según el estadístico R², 99.4% de la variabilidad observada, el valor del estadístico R²_{aj} es muy parecido 98.9%. Esto significa que los factores estudiados, junto con su interacción, son responsables o explican un alto porcentaje de la variabilidad observada en la variable de respuesta (resistencia a la tensión).

En la figura 70 se muestra la prueba para la falta de ajuste para el diseño del cuadro 17 respecto a la resistencia a la tensión. Dado que el valor-p en la tabla del ANOVA es mayor a 0.05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados al 95% de confianza.

Analysis of Variance for Tensión

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
B:Tamaño Particula	8,14335	1	8,14335	20,13	0,0207
AA+block	2,38314	1	2,38314	5,89	0,0936
AB	102,516	1	102,516	253,42	0,0005
BB+block	63,4424	1	63,4424	156,83	0,0011
blocks	68,0819	1	68,0819	168,30	0,0010
Lack-of-fit	0,2137	2	0,10685	0,26	0,7840
Pure error	1,2136	3	0,404533		
Total (corr.)	270,118	10			

R-squared = 99,4716 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,9432 percent
Standard Error of Est. = 0,636029

Figura 71. Prueba de falta de ajuste para la prueba de tensión (DCC).

El efecto de interacción de los dos factores de la figura 70 se pueden graficar como en las figuras 71 y 72; en el eje vertical se pone una escala que represente la magnitud de la variable de respuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final, cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta. Resulta que cuando existe interacción las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente, como se observa en las figuras 71 y 72, y si no hay interacción las líneas tienen pendientes muy similares, que son aproximadamente paralelas. En la figura 71 se muestra la interacción de los dos factores, poniendo el factor concentración de madera en el eje horizontal, mientras que en la figura 72 se representa el mismo efecto de interacción pero ahora con el factor tamaño de partícula en el eje horizontal.

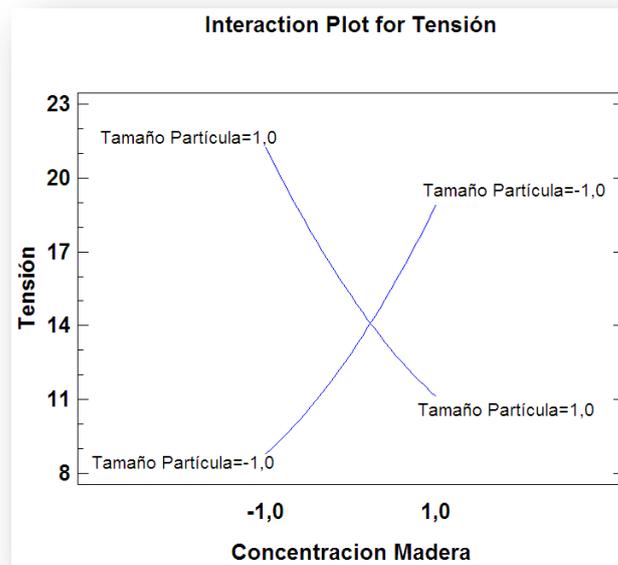


Figura 72. Grafica de interacción 1 para la prueba de tensión (DCC).

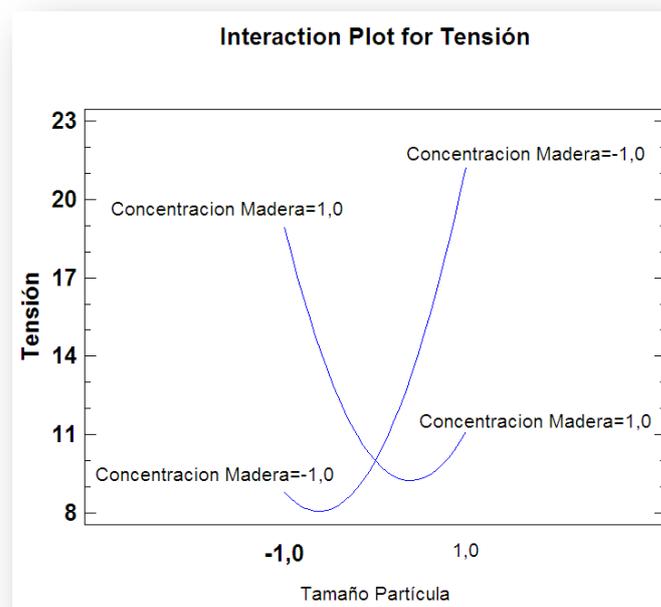


Figura 73. Grafica de interacción 2 para la prueba de tensión (DCC).

La interpretación a las graficas de interacción son muy parecidas a las conclusiones obtenidas de las graficas de interacción del diseño 2^2 con puntos al centro, solo que en la figura 72 se puede apreciar un efecto de curvatura muy marcado de los factores.

Las gráficas de superficie de respuesta y de contornos del modelo ajustado se presentan en las figuras 73 y 74 respectivamente. En estas se muestra que la superficie de respuesta tiene una forma de cresta, los valores más altos de la respuesta se encuentran en el nivel (-1) de la concentración de madera y en el nivel (1) del tamaño de partícula, esto coincide con el arreglo óptimo que se vio en la prueba de resistencia a la flexión.

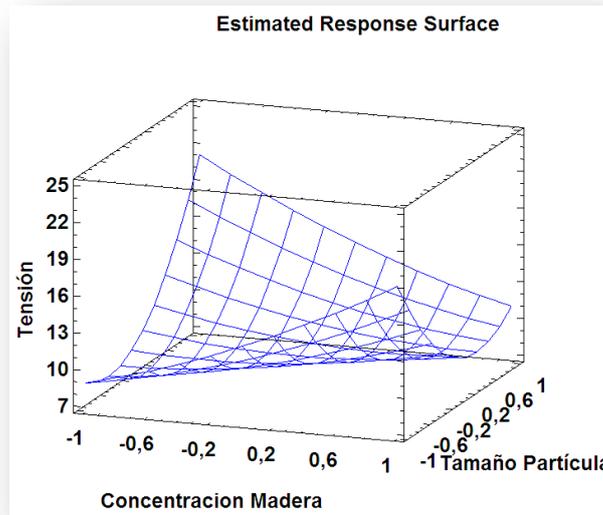


Figura 74. Superficie de respuesta para la prueba de tensión (DCC).

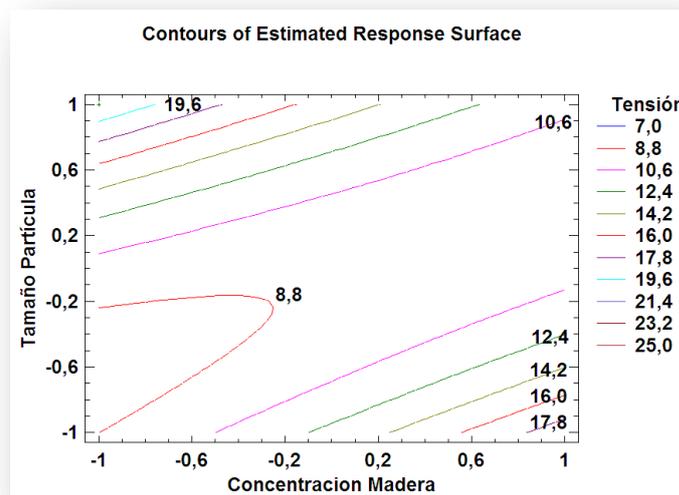


Figura 75. Gráfico de contornos para la prueba de tensión (DCC).

El cuadro 19 muestra la combinación de los niveles de los factores que maximizan la respuesta (resistencia a la tensión) en la región indicada.

Optimize Response
 Goal: maximize Tensión
 Optimum value = 21,2444

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Concentracion Madera	-1,0	1,0	-1,0
Tamaño Particula	-1,0	1,0	1,0

Cuadro 19. Arreglo óptimo de los niveles de los factores para tensión (DCC)

12.7.2.1 Verificación de los Supuestos para la Resistencia a la Tensión (DCC).

El supuesto de varianza constante se puede verificar graficando los residuos contra los predichos, y los puntos deben caer aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, para concluir que el supuesto se cumple.

En la figura 75 se muestra la grafica de residuos contra los predichos para la resistencia a la tensión, la dispersión de las columnas de puntos en relación con las otras es muy similar, salvo por dos puntos que presentan una dispersión mayor lo que no parece ser grave, por lo que no habría sospecha para decir que no se cumple el supuesto de varianza constante.

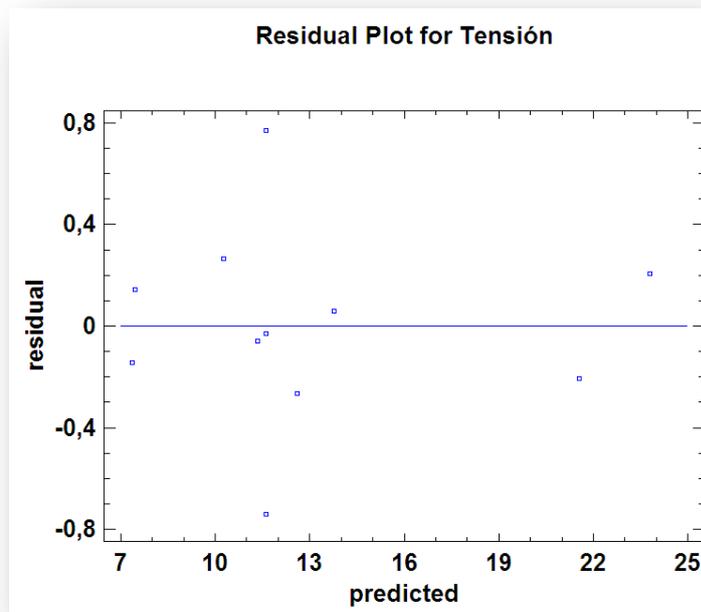


Figura 76. Grafica de residuos contra predichos (DCC).

El la figura 76 se grafican los residuos en papel probabilístico normal. Como los puntos se apegan a la línea colocada visualmente (no es línea de regresión), se concluye que no hay violaciones al supuesto de normalidad.

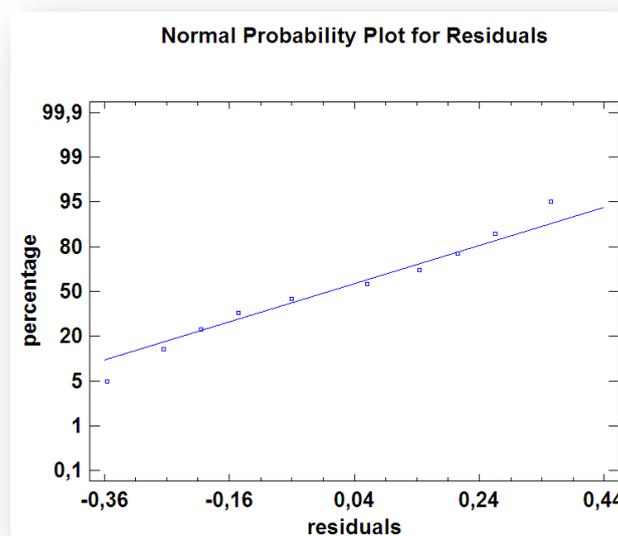


Figura 77. Grafica de probabilidad normal para flexión (DCC).

Para probar el supuesto de independencia se requiere capturar los datos en el orden en que fueron obtenidos, a fin de que el software pueda graficar los residuos con respecto al tiempo u orden de corrida (figura 77). Al no observar ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) se concluye que no existe problema con la declaración de independencia.

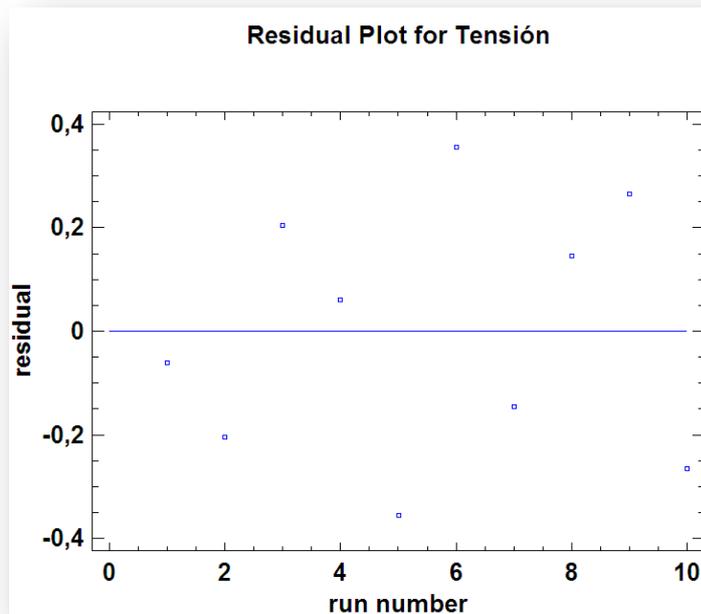


Figura 78. Grafica de residuos contra el orden de corrida (DCC).

12.7 Optimización Simultánea de Varias Respuestas (Tensión y Flexión).

En los puntos 12.4 y 12.5 el análisis estadístico busca encontrar el punto óptimo considerando sólo una variable de respuesta (Flexión o Tensión). Sin embargo, es necesario considerar las dos variables estudiadas para lograr un compuesto con las mejores propiedades. Si la optimización sólo se hace para una propiedad del compuesto podrían resultar condiciones inadecuadas para la otra propiedad. Por ello, es imprescindible emplear una técnica que sirva para que, en la medida de lo posible, se optimicen simultáneamente las dos respuestas de interés.

El problema de la optimización simultánea radica en que, por lo general, los óptimos individuales no son las mismas combinaciones de los factores de control. Esto hace

necesario buscar una solución compromiso, donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio. A esta solución compromiso la llamamos óptimo simultáneo.

En este apartado presentamos un método de optimización simultaneo analítico basado en una función de deseabilidad (Derringer y Suich, 1980). Este método provee soluciones consistentes con los datos observados en el experimento. Asimismo, es intuitivo y flexible en el sentido de que permite balancear de diversas formas la importancia relativa de las respuestas. Para aplicar este método es importante contar con el software apropiado, en este caso se utiliza el software statgraphics.

Cada una de las dos respuestas (Flexión y Tensión) a optimizar, está modelada adecuadamente por un modelo de segundo orden en términos de los mismos k factores de control (Ver ecuaciones 11 y 12).

Utilizando la ecuación (3) se desea maximizar la deseabilidad en la región experimental común a las dos variables de respuesta. El objetivo es maximizar ambas respuestas por ello se utilizara la ecuación (4). En las columnas del cuadro 20 se presentan las deseabilidades globales D en cada uno de los tratamientos tanto los datos observados de las variables de respuesta (D_o) como en los datos predichos (D_p) por cada uno de los modelos correspondientes.

Corrida	Flexión	Tensión	Deseabilidad	Deseabilidad
			Predicha	Observada
1	2,11	11,28	0,285392	0,272213
2	3,01	21,35	0,752808	0,728222
3	4,04	24	0,978486	1
4	2,2	13,82	0,350959	0,364941
5	2	10,89	0,345915	0,241524
6	2,99	11,6	0,345915	0,403122
7	2,6	12,4	0,345915	0,385893
8	1,84	7,22	0,0430483	0
9	1,438	7,6	0,0274133	0,0382784
10	1,258	10,55	0	0
11	1,349	12,35	0,171799	0,100001

Cuadro 20. Cálculo de las funciones de deseabilidad predicha D_{Gp} y observada D_{Go} .

Para fijar ideas, se presenta el cálculo de la función deseabilidad predicha y observada en el tratamiento 1. Los valores máximos y mínimos observados en el experimento son los que se usaron como referencia y estos se presentan en el cuadro 21.

Valores	Mínimo Observado	Máximo Observado
Y1: Flexión	1,258	4,04
Y2: Tensión	7,22	24

Cuadro 21. Valores máximos y mínimos observados en el experimento.

Las deseabilidades individuales para los valores predichos en las respuestas son:

$$d_1 = \frac{2,11 - 1,258}{4,04 - 1,258} = 0.306 \quad y \quad d_2 = \frac{11,28 - 7.22}{24 - 7.22} = 0.241$$

Así, la deseabilidad observada para el primer tratamiento es:

$$D_o = (0.0740997)^{1/2} = 0,272213$$

En este caso, la D_o y la D_p representa a las dos respuestas a la vez, y el objetivo es optimizar ésta para obtener máxima deseabilidad simultánea. En el cuadro 22 se muestra que la corrida que maximiza la deseabilidad en la región indicada es el tratamiento 3 (ver cuadro 20).

Optimize Desirability			
Optimum value = 0,790292			
Factor	Low	High	Optimum
Concentración Madera	-1,0	1,0	-1,0
Tamaño Partícula	-1,0	1,0	1,0
Response	Optimum		
Flexión	3,34362		
Tensión	21,1994		

Cuadro 22. Arreglo de los factores que optimiza las dos variables de respuesta.

En la grafica 78 se muestra la superficie de respuesta estimada para la función de deseabilidad en la cual se aprecia que el nivel de los factores que maximiza las dos respuestas de manera simultánea es cuando la concentración de la madera está en su nivel bajo y el tamaño de partícula en su nivel alto. Con este gráfico a igual que con las graficas de interacciones del análisis individual de las dos respuestas es muy notorio el suponer que puede incrementarse las dos variables de respuesta si se realiza una mezcla con una concentración de madera menor a 25 gr. Y con un tamaño de partícula mayor un tamaño de malla de 10.

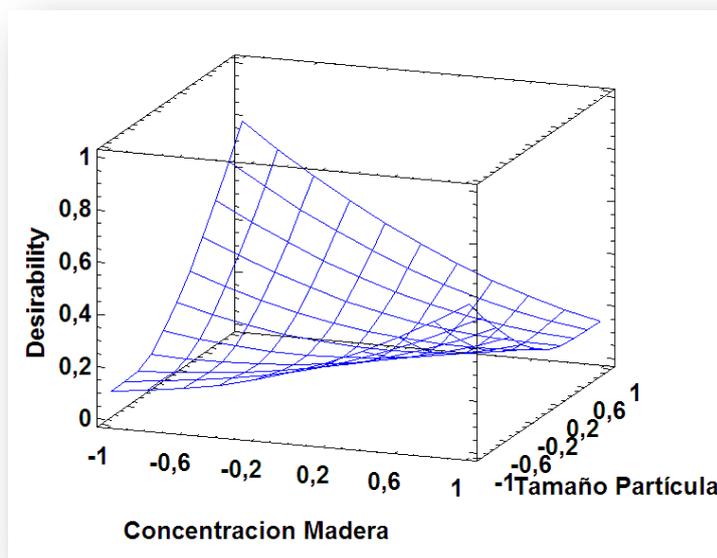


Figura 79. Superficie de respuesta para la deseabilidad estimada.

Otro método propuesto para obtener un óptimo global lo propuso Zeleny en [19] y se conoce como el método del desplazamiento ideal, así la mejor alternativa se puede obtener por la función definida como:

$$F(x) = \left\{ \sum_{j=1}^r \left[\frac{1}{r} \left(1 - d_j(\hat{Y}_j(x)) \right) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$x \in R(x)$.

Ecuación 13

De forma análoga a la función de deseabilidad aplicando la ecuación (13) se obtiene el óptimo mediante el método del desplazamiento ideal; el óptimo que genera la función F, es $F(x) = 11.6$, este valor pertenece al tratamiento 3 (Ver cuadro 23), lo que coincide con el método de la función de deseabilidad.

Corrida	Flexión	Tensión	Deseabilidad
			Observada
1	2,11	11,28	0,8825
2	3,01	21,35	8,5000
3	4,04	24	11,600
4	2,2	13,82	2,2215
5	2	10,89	0,7292
6	2,99	11,6	1,1016
7	2,6	12,4	1,4196
8	1,84	7,22	0,5870
9	1,438	7,6	0,6140
10	1,258	10,55	0,7410
11	1,349	12,35	1,4678

Cuadro 23. Calculo de las funciones del desplazamiento ideal.

Para verificar lo adecuado de este punto se realizan 5 corridas confirmatorias en este punto y los valores de Y_1 (resistencia a la flexión) y Y_2 (resistencia a la tensión) son de 2.93, 3.49, 4.99, 3.82 y 4.09 para Y_1 , mientras que para Y_2 son de 22.12, 24.8, 23.41, 24.0 y 23.12. De esta manera, si se considera que en el centro de la región experimental inicial los valores promedio de Y_1 son de 2.79, mientras que para Y_2 son de 17.73 (ver cuadro 9), y en el óptimo se alcanzan valores promedio de 3.86 para Y_1 , y para Y_2 22.89, entonces se logró incrementar 38% la resistencia a la flexión y un 30% la resistencia a la tensión con el desarrollo de este proyecto de investigación aplicada mediante la metodología de superficie de respuesta.

XIII CONCLUSIONES.

El compuesto de madera-plástico formado por PET como matriz polimérica, madera como relleno natural y PP como agente de acoplamiento, ha mostrado ser una alternativa para desarrollar estructuras auxiliares actualmente fabricadas con madera de pino.

El proceso de manufactura del compuesto desarrollado requiere de procedimientos de operación demasiado precisos y controlados, ya que los experimentos revelaron la complejidad que representa trabajar con compuestos de madera-plástico. Si los procedimientos mostrados en este trabajo para la producción del compuesto son minuciosamente llevados a cabo, las propiedades que ofrece el material pueden ser empleadas en una gama muy amplia de aplicaciones industriales.

Se ha presentado una metodología estadística que ilustra como a través de una adecuada planeación experimental se alcanzan importantes mejoras en procesos y productos. Esto se da en el contexto de los procesos de un nuevo producto, sin embargo en la investigación y desarrollo tecnológico, la planeación experimental es un auxiliar para que el ingeniero logre una mayor competitividad con el desarrollo de productos existentes. Además ayudara, al investigador a conocer más sobre los factores que impactan en la calidad de los productos y procesos.

Con la revisión bibliográfica consultada a lo largo del trabajo y la experiencia adquirida con la experimentación en el laboratorio, se determinaron los factores y el modo en que estos afectan a las variables de respuesta de interés. Es importante resaltar que es posible alcanzar un mayor nivel de entendimiento del material compuesto con una exploración más profunda y robusta de los factores operacionales que influyen en el desempeño del material, para esto será necesario un enfoque puramente científico y disponer de una mayor cantidad de tiempo.

Es evidente por los resultados experimentales y lo observado en el laboratorio que existe una enorme área de oportunidad en materia de investigación sobre el compuesto

desarrollado, el conocimiento que puede llegar a generarse justificaría el desarrollo de cualquier proyecto sucesivo.

Además de las estructuras auxiliares, el material podría ser evaluado en otras aplicaciones como: aglomerados, sustitutos de azulejos, autopartes, entre otras.

XIV BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.jecomposites.com/composites-news/1771/wood-plastics-composites.html>.
- [2] Presidencia de la República. Quinto Informe de Gobierno, 2005. Anexo. México, D.F.
- [3] Daniel T. Koenig, (1990). Productividad y Optimización Ingeniería de Manufactura, Publicaciones Marcombo.
- [4] Alberto Ortega, Luis Cervantes, (2006). Compositos de Madera-Plástico, Centro de Investigaciones en Química Aplicada.
- [5] Dávalos S. y Bárcenas P., (1998). Clasificación de las Propiedades Mecánicas de las Maderas Mexicanas en Condición “Verde”. Madera y Bosque 4(1): 65-70.
- [6] http://www.infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_72_mecanicaEstructural.pdf
- [7] Morton, Jones, (1997), Procesamiento de Plásticos, México: Limusa.
- [8] Charles A. Harper, (2004), Manual de Plásticos Volumen 1, México: Mc Graw Hill.
- [9] Humberto Gutiérrez, Román de la Vara, (2004), Análisis y Diseño de Experimentos, México: Mc Graw Hill.
- [10] Douglas C. Montgomery, (2006), Diseño y análisis de Experimentos, México: Limusa.
- [11] Daniel, C. (1959). Use of half-normal plots in interpreting factorial two-level experiments. Technometrics 1, 311-341.

- [12] Harrington, E. (1965). The desirability function. *Industrial QUALITY Control* 21, pp. 494-498.
- [13] Derringer, G. C. y R. Suich (1980). Simultaneous optimization of several responses. *Journal of Quality Technology*, 12, 214-219.
- [14] Derringer, G. C. (1990). A balancing act: Optimizing a product's properties, *Quality Progress*, junio de 1994.
- [15] De la Vara, R. y J. Domínguez (2002). Métodos de superficie de multirespuesta: un estudio comparativo. *Revista Matemática: Teoría y Aplicaciones* 9, 47-65.
- [16] Antonio F. Ávila (2003). A mechanical analysis on recycled PET/PE composites. *Polymer Degradation and Stability*, 8, 373-382.
- [17] B. G. Girija (2005). Thermal degradation and mechanical properties of pet blends. *Polymer degradation and stability*, 90, 147-153.
- [18] Yong Lei (2008). Engineered wood polymer composites based recycled PE PET blends. *Polymer materials science and engineering*, 236, 17-21.
- [19] Milan Zelany (1974). A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal. *Computers & Operations Research*, 1, 479-496.
- [20] Jorge Domínguez (2006). Optimización simultánea para la mejora continua y reducción de costos en procesos. *Ingeniería y Ciencias*, 2, 145-162.
- [21] Miguel Miranda et al. (2010). Response surface methodology optimization applied to rubber tyre and plastic wastes thermal conversion. *Fuel*, 89, 2217-2229.
- [22] Jorge Domínguez (2010). Optimización estadística de procesos mult-respuesta. *Sociedad Mexicana de Matemáticas*.