

EVALUACION DE LA INFLUENCIA DEL PIGMENTO BLANCO Y EL TiO_2 , EN
LA FORMULACION DE UNA TEJA OPACA BLANCA.

LAURA MILENA MELO TORRES

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2019

EVALUACION DE LA INFLUENCIA DEL PIGMENTO BLANCO Y EL TiO_2 , EN
LA FORMULACION DE UNA TEJA OPACA BLANCA.

LAURA MILENA MELO TORRES

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
JUAN ANDRÉS SANDOVAL HERRERA
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2019

Nota de aceptación

Ing. David Leonardo Sotelo Tobón

Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelán

Bogotá D.C., octubre de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento.

Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Doy infinitas gracias a Dios por permitirme alcanzar este sueño y por todas las bendiciones que recibo a diario. Gracias a mis padres, Gloria Amanda Torres Cañón y José Gustavo Melo León, quienes, con enormes esfuerzos, dedicación y amor incondicional, me han formado como persona, me brindan en todo momento su apoyo, son los motores de mi vida, y sin ellos este logro no sería posible. A mi hermano y a mi familia por su apoyo, su conocimiento, sus consejos y experiencias.

Laura Milena Melo Torres

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A mis padres, quienes me brindaron su amor y apoyo incondicional en la culminación de esta gran meta, son mi principal inspiración.

Al ingeniero Juan Sandoval, director de este trabajo de grado quien me apoyó, guió y brindó confianza para realizar el proyecto.

Al ingeniero Luis Daniel Arévalo Cervantes, Subgerente de producción, quien me brindó su conocimiento y apoyo incondicional en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 TEJAS Y CUBIERTAS	21
1.2 MATERIALES COMPUESTOS (MCs)	21
1.2.1 Compuestos de matriz polimérica (CMP)	22
1.2.2 Compuestos de matriz metálica	25
1.2.3 Compuestos de matriz cerámico	25
1.3 COMPOSICIÓN DE UNA TEJA OPACA EN PRFV	25
1.3.1 Matriz polimérica: resina poliéster insaturada	25
1.3.2 Promotores y catalizadores	27
1.3.3 Cargas	27
1.3.4 Aditivos	29
1.3.5 Pigmentos	30
1.3.6 Monómeros o agentes de enlace reticular	30
1.3.7 Refuerzo: fibra de vidrio	31
1.4 DISPERSIÓN DE CARGAS	31
1.5 OPACIDAD	31
1.5.1 Índice de refracción	32
1.5.2 Reflectancia	33
1.5.3 Medición de color	34
1.5.4 Luz	34
1.5.5 Luminosidad	35
1.5.6 Poder cubriente	35
1.5.7 Lux	36
2. CARACTERISTICAS DE UNA TEJA OPACA	37
2.1 GENERALIDADES DEL PRODUCTO	37
2.2 FORMULACION ACTUAL	37
2.3 MATERIAS PRIMAS	39
2.3.1 Resina de poliéster insaturado	39
2.3.2 Fibra de vidrio	42
2.3.3 Carga seca	42
2.3.4 Dióxido de titanio	43
2.3.5 Pigmento blanco	44
2.3.6 Estireno	46
2.3.7 Peróxido Orgánico	47
2.4 CONCLUSIONES	47
3 MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	50
3.1 MATERIALES	50
3.2 EQUIPOS	50

3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	50
3.3.1	Selección del material y tamaño de muestra	51
3.3.2	Condiciones de operación	53
3.3.3	Tratamiento de la matriz polimérica	55
3.4	EVALUACION DE PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN Y DISPERSIÓN DE LUZ	57
3.5	REACTIVIDAD	59
3.6	VISCOSIDAD DE LA RESINA	61
3.7	FABRICACIÓN O ELABORACIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO	62
3.7.1	Adecuación de la superficie	62
3.7.2	Tamaño y espesor de la probeta	63
3.7.3	Alistamiento resina poliéster y fibra de vidrio	64
3.7.4	Aplicación de la resina	65
3.7.5	Humectación entre la resina poliéster y la fibra de vidrio	65
3.7.6	Laminación de la probeta	66
3.7.7	Desmolde	67
3.7.8	Etiquetado	67
3.8	PRE EXPERIMENTACIÓN	68
3.8.1	Comportamiento de la viscosidad	69
3.8.2	Comportamiento de la translucidez	70
3.8.3	Selección de la mejor proporción de tamaño de partícula	73
3.9	EXPERIMENTACIÓN	75
3.9.1	Selección niveles de diseño experimental	75
3.9.2	Evaluación de la reactividad del diseño experimental	76
3.9.3	Diseño experimental	78
3.9.4	Análisis de resultados	80
3.9.5	Comportamiento de la viscosidad en el diseño experimental	83
3.9.6	Selección de alternativa	85
4	COSTOS DE PRODUCCIÓN	87
4.1	MATERIA PRIMA DIRECTA	87
4.2	MANO DE OBRA DIRECTA	87
4.3	COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN CIF	87
4.4	COSTO TOTAL DE UN KILOGRAMO DE TEJA OPACA BLANCA	88
4.5	PROYECCIÓN DE AHORRO	90
5.	CONCLUSIONES	91
6.	RECOMENDACIONES	92

BIBLIOGRAFIA

92

ANEXOS

98

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials

NTC: Norma Técnica Colombiana.

PRFV: poliéster reforzado con fibra de vidrio.

PVC: concentración en volumen de pigmentos.

PHR: partes por 100gr de resina.

UV: ultra violeta.

MPC: máquina de procesamiento continuo.

MECK: metil etil cetona peróxido

CVPC: concentración crítica de pigmento en volumen.

CVP: concentración en volumen de pigmento

g: gramos

kg: kilogramos

m: metros

cm: centímetros

mm: milímetros

%: porcentaje

pH: potencial de Hidrógeno

s: segundo

rpm: revoluciones por minuto

T: Temperatura

L: Longitud

°C: Grados Celsius

min: minutos

lx: lux

lm: lumen

n : Índice de refracción

C: Velocidad de la luz en el vacío

V_a : Velocidad de la luz en el medio

ρ : Densidad

m : Masa

V : Volumen

\mathcal{V} : Viscosidad cinemática

μ : Viscosidad dinámica

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades de los termoplásticos.	23
Tabla 2. Características y aplicaciones de algunos polímeros termoestables	24
Tabla 4. Formulación actual de la matriz polimérica para la fabricación de una teja opaca blanca	38
Tabla 5. Condiciones de mezcla para cada componente de la matriz polimérica	38
Tabla 6. Porcentaje total de dióxido de titanio con base a los aditivo a la resina.	38
Tabla 7. Costo actual de la formulación de un kilogramo de matriz polimérica	39
Tabla 8. Influencia del TiO ₂ y el pigmento blanco en el costo de materia prima directo	39
Tabla 9. Especificaciones de la resina Cristalan 1967 de la empresa Andercol.	41
Tabla 10. Especificaciones del carga seca	43
Tabla 11. Especificaciones dióxido de titanio R902	44
Tabla 12. Especificaciones del pigmento blanco de la empresa Andercol	45
Tabla 13. Especificaciones del monómero estireno	46
Tabla 14. Especificaciones del peróxido orgánico	47
Tabla 15. Influencia de cada materia prima en la matriz polimérica.	48
Tabla 16. Cantidad de resina requerida en la medición de reactividad y viscosidad	51
Tabla 17. Cantidad de materia prima empleada en cada probeta	52
Tabla 18. Cantidad total de materia prima empleada en la experimentación	53
Tabla 19. Cantidad total de componentes para el acondicionamiento de la matriz polimérica.	53
Tabla 20. Parámetros normalizados para el desarrollo experimental	54
Tabla 21. Parámetros de velocidad de dispersión para CaCO ₃ y TiO ₂	56
Tabla 22. Especificaciones cámara de opacidad	57
Tabla 23. Resultados de viscosidad con variación en el tamaño de partícula del TiO ₂	69
Tabla 24. Análisis estadístico de los resultados de viscosidad por cada proporción.	69
Tabla 25. Resultados de traslucidez con variación en el tamaño de partícula del TiO ₂ .	71
Tabla 26. Resultados de traslucidez por cada proporción de TiO ₂	72
Tabla 27. Matriz de selección de la proporción tamaño de partícula TiO ₂	74
Tabla 28. Costo de un kilogramo de formulación, con diferentes porcentajes de pigmento blanco y dióxido de titanio	75
Tabla 29. Comportamiento de la reactividad del diseño experimental	76
Tabla 30. Diseño experimental	79
Tabla 31. Resultados de traslucidez de los laminados en PRFV	80
Tabla 32. ANOVA, análisis de varianza para la traslucidez	81
Tabla 33. Resultados de viscosidad del diseño de experimentos	84
Tabla 34. Matriz de selección de la mejor alternativa a la formulación actual	86
Tabla 37. Costo actual de 0,73 kg de matriz polimérica	89

Tabla 38. Costo alternativa A2 de 0,73 kg de matriz polimérica	89
Tabla 39. Costo alternativa B3 de 0,73 kg de matriz polimérica	89
Tabla 40. Costo de producción de las tres alternativas	90
Tabla 41. Impacto en el costo de cada formulación alternativa	90

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Matriz y refuerzo en un material compuesto	22
Imagen 2. Aditivos BYK	30
Imagen 3. Luz reflejada por un objeto azul	33
Imagen 4. Dispersión de la luz	34
Imagen 5. Leneta, ensayo de poder cubriente de un pigmento.	35
Imagen 6. Resina de poliéster pre-acelerada Cristalan 1967 de la empresa Andercol.	40
Imagen 7. Carga seca	42
Imagen 8. Dióxido de titanio R902	43
Imagen 9. Pigmento blanco Cristalan de la empresa Andercol	44
Imagen 10. Metodología experimental	51
Imagen 11. Termohigrometro digital	54
Imagen 12. Protocolo para el tratamiento y adecuación de la matriz polimérica	55
Imagen 13. Cámara de opacidad de la empresa	57
Imagen 14. Montaje para la determinación de la temperatura exotérmica	60
Imagen 15. Molde y casting para ensayo de dureza	61
Imagen 16. Viscosímetro brookfield	62
Imagen 17. Superficie de fabricación de las probetas	63
Imagen 18. Marco de fabricación de probetas	64
Imagen 19. Alistamiento de la resina para la elaboración de las probetas	64
Imagen 20. Aplicación y distribución de la resina en el molde	65
Imagen 21. Humectación de la resina poliéster y la fibra de vidrio	66
Imagen 22. Laminación de la probeta	66
Imagen 23. Identificación del laminado en la fase experimental	67
Imagen 24. Coeficientes del polinomio cuadrático de la superficie de respuesta	83

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Comportamiento promedio de la viscosidad según la proporción del tamaño de partícula de TiO ₂ .	70
Grafica 2. Comportamiento promedio de la traslucidez según la proporción del tamaño de partícula de TiO ₂ .	72
Grafica 3. Curva de reactividad con diferentes concentraciones de TiO ₂ y pigmento blanco.	77
Gráfica 4. Interacciones entre las variables independientes y la variable respuesta respuesta	82
Gráfica 5. Gráfico de superficie estadístico del comportamiento del diseño experimental	83

GLOSARIO

ACELERADOR: o promotor, tiene como fin descomponer rápidamente el catalizador y acelerar la reacción de polimerización.

ABSORCIÓN: la luz pasa por un medio y se transforma, en otro tipo de energía.

ABSORBENTE: posee un alto poder de absorber.

CARGAS: materiales que se agregan a una formulación polimérica, para reducir el costo del compuesto o para mejorar sus propiedades.

COLOR INDEX: también conocido como C.I. o índice de color, corresponde a un parámetro internacional para la identificación de los pigmentos.

CUBIERTA: estructura de cierre superior, sirve como cerramiento exterior cuya función es ofrecer protección contra agentes climáticos y otros factores.

CURADO: de termoestables; empieza con la formación y el crecimiento lineal de monómeros que se entrecruzan durante la reacción de polimerización, genera un aumento del peso molecular del polímero y la dureza respectiva.

GELIFICACIÓN: es considerado como un aumento de viscosidad, provocado por una reacción de polimerización.

ÍNDICE DE REFRACCIÓN: es la acción o consecuencia que logra cierta radiación, modificando su dirección al pasar de una manera oblicua, de un medio hacia otro; puede variar la velocidad dependiendo del material que se esté utilizando.

INTENSIDAD: es el grado de partida de un color a partir del color neutro del mismo valor. Los colores de baja intensidad son llamados débiles y los de máxima intensidad se denominan saturados o fuertes.

LENETA: es una carta que presenta un patrón de prueba con combinación de áreas blancas y negras donde se realiza observaciones visuales de opacidad, tono y color.

MATERIAS PRIMAS: son los materiales que una industria o persona utilizan para la elaboración de productos. Bienes transformados durante el proceso de producción hasta convertirse en un bien de consumo.

MEZCLA HOMOGÉNEA: es un tipo de mezcla conformada por dos o más elementos, que a simple vista no se pueden diferenciar entre sí. Sin embargo, los componentes pierden sus características al ser mezclados.

POLÍMERO: son compuestos formados de macromoléculas, mediante reacciones químicas de polimerización, que son la unión de moléculas simples, por medio de enlaces covalentes.

PODER CUBRIENTE: aptitud de un recubrimiento para ocultar, por opacidad, el color o las diferencias de color de un substrato.

PULTRUSIÓN: proceso productivo de conformado de materiales plásticos termofijos, como resultado se obtienen materiales con refuerzos.

REFLEXIÓN: cuando la luz cambia de dirección, en la superficie exterior o interior de un objeto.

REOLOGÍA: es la ciencia que estudia la deformación y el fluir de los materiales. En general, es el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.

TRANSMISIÓN: se origina cuando la luz atraviesa un material.

TRANSLUCIDEZ: es aquel efecto de luz que cuando tiene contacto con un material en su superficie y la atraviesa no es totalmente opaco.

TEJA: son elementos estructurales, piezas, que conforman cubiertas o tejados.

RESUMEN

En el presente documento evaluó la influencia del pigmento blanco y el dióxido de titanio, en la formulación de una teja opaca blanca, con el fin de valorar si es posible, disminuir el costo de producción de este producto, sin afectar, las especificaciones técnicas de opacidad, reactividad y viscosidad. Se presenta primeramente el diagnóstico realizado para las propiedades físicas y químicas de las materias primas involucradas en el proceso de fabricación, a partir de una revisión bibliográfica y los certificados de análisis, provistos por los proveedores de cada componente, esto, con el fin de identificar la función de cada materia prima en la formulación de este producto.

Seguidamente, se evaluó el efecto del tamaño de partícula del TiO_2 en la formulación, realizando ensayos de viscosidad y traslucidez, con la referencia actual "R902" que maneja la compañía, y una referencia de menor tamaño "R706", puesto que a partir de la revisión bibliográfica el tamaño óptimo para lograr opacidad corresponde a un % del rango de luz visible entre 400 nm y 700nm. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionó una mezcla de 50% de cada referencia, empleada posteriormente en el diseño experimental.

Se realizó un diseño experimental en el que se evaluó el efecto en la traslucidez, del dióxido de titanio y el pigmento blanco, en cuatro niveles de concentración combinados. Consecutivamente, se realizó el análisis de los datos y se obtuvo una gráfica de superficie con el comportamiento de estas tres variables. Paralelamente, para cada tratamiento se evaluó el comportamiento de la reactividad y viscosidad.

Finalmente, se efectuó el análisis de costos de producción y se seleccionó una alternativa con igual desempeño y menor costo, otorgando un beneficio a la empresa.

Palabras clave: materiales compuestos, opacidad, mezcla homogénea, resina poliéster, fibra de vidrio, etc.

INTRODUCCIÓN

La compañía, es una empresa líder en sistemas y soluciones en poliéster reforzado con fibra de vidrio; son expertos en iluminación natural y desarrollo de envolventes inteligentes certificadas, que incluyen tecnología termoselectiva, aislamiento térmico, resistencia en ambientes químicos agresivos y retardancia al fuego.¹ Actualmente, fabrican y comercializan una teja 100% opaca de color blanco; este producto presenta un alto precio de venta, lo que le impide ser competitiva ante su producto sustituto, tejas en acero o zinc, que presentan un precio por debajo del 8,6% por metro lineal. Aunque este producto presenta mayor resistencia mecánica y química, debe disminuir su costo de producción. El costo de las materias primas, constituye el 80% del precio de venta final, por lo que, al evaluar la formulación actual, se encuentra que el 63,1% del costo de la formulación corresponde al pigmento blanco y al dióxido de titanio. Al evaluar la influencia de estos componentes se busca tener una alternativa a la formulación actual, que impacte sobre el costo de producción.

La finalidad de este proyecto, es evaluar la influencia del pigmento blanco y el TiO_2 , en la formulación de una teja opaca blanca, elaborada en resina poliéster reforzada con fibra de vidrio. Para cumplir este propósito, fue necesario primero determinar las propiedades físicas y químicas de las materias primas empleadas en la fabricación actual de las tejas opacas blancas. Posteriormente, se evaluaron diferentes proporciones de TiO_2 y pigmento blanco en la formulación de la teja opaca mediante un diseño de experimentos. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se seleccionó una alternativa de formulación más económica, en cuanto a materias primas y se realizó el análisis de costo de producción para la formulación actual y la propuesta, con el fin de verificar la viabilidad de la alternativa seleccionada.

¹ ORTIZ ARANGO, Enrique. Quiénes somos. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: S.A.S. [21, julio, 2019]. Disponible en: <http://www..com/quienes-somos/>.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia del pigmento blanco y el TiO_2 , en la formulación de una teja opaca blanca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físicas y químicas de las materias primas empleadas en la fabricación de una teja opaca blanca .
- Evaluar diferentes proporciones de TiO_2 y pigmento blanco en la formulación de la teja opaca mediante un diseño de experimentos.
- Realizar el análisis de costo de producción para la formulación actual y propuesta

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo hace énfasis en los conceptos que se deben tener en cuenta para la evaluación de la influencia, del pigmento blanco y el TiO₂, en la formulación de una teja opaca blanca para la compañía.

1.1 TEJAS Y CUBIERTAS

Las cubiertas surgen de la necesidad del hombre de protegerse y resguardarse del fuerte sol, el viento, la lluvia, entre otros fenómenos climáticos. Están compuestas por tejas, que son los elementos que soportan mayores cambios de temperatura y dilataciones; por lo que existen diversos tipos de tejas y cubiertas, con distintos espesores, materiales y composiciones. Estos se eligen según la infraestructura de la edificación, implicaciones del entorno, condiciones climáticas y medios para su instalación².

Una de los requisitos de dichas cubiertas es su completa opacidad, con el fin de disminuir la luminosidad y transferencia de energía térmica al interior de una superficie. Para la fabricación de tejas opacas usualmente se emplea arcilla, zinc, acero, y aluminio, los cuales presentan problemas de corrosión. Para evitar dicho problema, se ofrecen cubiertas opacas en plásticos termofijos o materiales compuestos como poliéster reforzado con fibra de vidrio, pvc, resinas fenólicas, entre otros³.

1.2 MATERIALES COMPUESTOS (MCs)

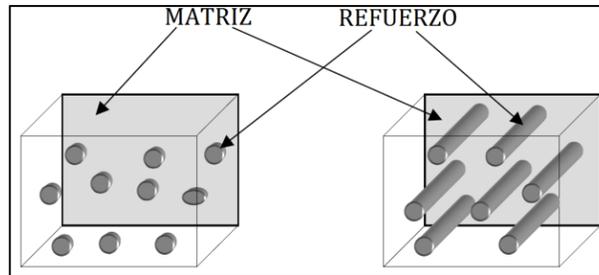
Son combinaciones de dos o más materiales de diferente naturaleza, insolubles entre sí, con el fin de mejorar las propiedades finales de un producto. Se caracterizan por presentar tres fases; un medio continuo o matriz, otra discontinua o refuerzo, y la que se encuentra comprendida entre ellos, conocida como la interface⁴. La imagen 1, ilustra la matriz y los constituyentes de refuerzo en un MC.

² KOTTAS, Dimitris. Plástico: arquitectura y construcción. Manuales y construcción. [en línea]. 2013, 08003 (1). 11-21. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: https://www.architectureopenlibrary.com/spa/libro/303-0-PLASTICO_ARQUITECTURA_Y_CONSTRUCCION.

³ BROTO, Carles. Cubiertas, innovación y diseño. Cubiertas, innovación y diseño. [en línea]. 2013, 08003. 1-184. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: https://www.architectureopenlibrary.com/spa/libro/12-0-INNOVACION_Y_DISENO_ESCALERAS

⁴ TREJOS, Daniel. Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. [en línea]. Tesis. Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira: 2014. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4466>

Imagen 1. Matriz y refuerzo en un material compuesto



Fuente: TREJOS, Daniel. Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira: 2014. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4466>

Existen varias clasificaciones de MCs; en esta investigación se hace énfasis en la clasificación según su tipo de matriz:

1.2.1 Compuestos de matriz polimérica (CMP). Los CMP, presentan una matriz de origen polimérico como fase continua, pueden ser de carácter termoplástico, termoestable o elastómero. Estos materiales son fáciles de procesar, ligeros, presentan propiedades mecánicas apropiadas y en general son económicos. En los compuestos de matriz polimérica se pueden emplear refuerzos en forma de fibras o partículas⁵.

Los elastómeros, son compuestos químicos constituidos por miles de monómeros, que forman cadenas flexibles, desordenadas y entrelazadas. Cuando se estiran, las moléculas se alinean y con frecuencia toman una distribución ordenada (cristalina); cuando se dejan de tensionar retornan a su desorden natural, moléculas entrecruzadas.⁶

Los polímeros termoplásticos (Ver Tabla 1), son conformables al suministrar temperatura y presión; entre los métodos más usados para su manufactura se encuentran la inyección, extrusión, soplado y termo formado. Una clasificación para

⁵ *Ibíd.*, p. 60.

⁶ FACULTAD INGENIERIA INDUSTRIAL. Plásticos protocolo. [en línea]. Informe. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.: 2007. [Consultado 13, enero, 2019]. Disponible en: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf

este tipo de plástico, está dada por el arreglo molecular que presentan, esto influye en su proceso de fusión, solidificación, y puede determinar las propiedades físicas y mecánicas.⁷

Tabla 1. Propiedades de los termoplásticos.

Estructura	Formación	Características	Ejemplos
Amorfa	Las moléculas no presentan ningún tipo de orden; están dispuestas aleatoriamente.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son normalmente transparentes. ▪ La fusión se realiza en un intervalo de temperatura, no existe un punto de fusión preciso. ▪ A medida que la temperatura aumenta, el material pasa de un estado sólido a uno pastoso, hasta convertirse en un fluido muy viscoso. ▪ En el intervalo de fusión pueden ser manufacturados por inyección, extrusión, soplado, etc. ▪ Sin carga, tienen una contracción en el molde de 0,3% a 0,9%; con carga este valor es menor. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PVC ▪ PS ▪ SAN ▪ ABS ▪ PMMA ▪ PC
Cristalina	Al enfriarse, sus cadenas tienden a enlazarse ordenadamente, por lo que se procede un empaquetamiento muy ordenado, que se denomina cristalización.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son opacos. ▪ Poseen un punto característico de fusión. ▪ El intervalo útil de transformación está limitado a pocos grados centígrados: un poco bajo el punto de fusión, está todavía sólido y no se puede moldear; y no es prudente superar la temperatura de fusión porque puede intervenir el fenómeno de degradación térmica. ▪ Tienen contracción elevada en el moldeo. La contracción para un polímero no reforzado varía de 1 al 5%. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PE ▪ PP ▪ POM ▪ PA ▪ PET

Fuente: FACULTAD INGENIERIA INDUSTRIAL. Plásticos protocolo. [En línea]. Informe. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.: 2007. [Consultado 13, enero, 2019]. Disponible en: https://www.escuelainq.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf

⁷ *Ibíd.*, p.11.

Los termoplásticos y termoestables, presentan una estructura molecular en forma tridimensional, con fuertes enlaces covalentes después de ser curados. Si se calienta en el caso de los termoplásticos, la resina curada se descompone y ablanda. La estructura del polímero proporciona al material propiedades mecánicas, térmicas y resistencia química especiales, que lo convierten en una buena opción para emplear como matriz de MCs.

Los polímeros termoestables, pasan del estado líquido al sólido, por medio de una reacción irreversible y la acción de un sistema de catálisis. Son duros, resistentes, más frágiles que los termoplásticos y presentan mayor estabilidad dimensional⁸. En la tabla 2 se pueden apreciar características y aplicaciones de algunos polímeros termoestables.

Tabla 2. Características y aplicaciones de algunos polímeros termoestables.

Termoestables	Características de las principales aplicaciones	Aplicaciones típicas
Epoxis	Excelente combinación de propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, dimensionalmente estables, buena adherencia, relativamente baratos y buenas propiedades eléctricas.	Enchufes, adhesivos, protectores, laminas reforzadas con fibra de vidrio.
Fenólicas	Excelente estabilidad térmica hasta los 150°C, susceptible de formar materiales compuestos con muchas resinas, material de rellenos, barato, etc.	Carca de motores, teléfonos, distribuidores de automóvil, accesorios eléctricos.
Poliésteres	Excelentes propiedades eléctricas y barato, se puede utilizar a temperaturas ambiente o elevada; se suele reforzar con fibras.	Cascos, barcos pequeños, paneles de automóvil, sillas, ventiladores.
Siliconas	Excelentes propiedades eléctricas, químicamente inerte, pero atacable por el vapor, extraordinaria, resistencia al calor, relativamente económica.	Láminas y cintas aislantes a elevadas temperaturas.

Fuente: CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. Barcelona. [En línea] 1996. pg 97. [consultado: 12, abril, 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/EzioCordovaHernandez/callister-introduccion-a-la-ciencia-e-ingeniera-de-los-materiales-65832618>

⁸ CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. Barcelona. [en línea] 1996. pg 978. [consultado: 12, abril, 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/EzioCordovaHernandez/callister-introduccion-a-la-ciencia-e-ingeniera-de-los-materiales-65832618>

1.2.2 Compuestos de matriz metálica. Los metales más usados en la fabricación de materiales compuestos, son; aluminio, magnesio, titanio, metales dúctiles y esencialmente isotrópicos. Para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas se realizan diferentes aleaciones y tratamientos térmicos. A diferencia de los compuestos de matriz polimérica, los aumentos de rigidez lograda por la incorporación del refuerzo en metales, es con frecuencia, relativamente pequeña.⁹

Los metales reforzados con partículas de cerámicas, mejoran la rigidez, la resistencia a la tracción, fatiga, aumento de dureza, resistencia a la abrasión y al desgaste, aumentando las temperaturas de operación de estos materiales.¹⁰

1.2.3 Compuestos de matriz cerámico. Estos materiales se caracterizan por su resistencia a elevadas temperaturas, tienen baja densidad y muy buenas propiedades mecánicas. Su mayor desventaja es la fragilidad, por lo tanto, uno de los objetivos de combinarlos con otros materiales para formar materiales compuestos, es incrementar su tenacidad y tenacidad a la fractura. Para ello, se adicionan fibras y partículas de naturaleza cerámica o metálica. Algunos de los cerámicos que usualmente son reforzados son el carburo de silicio (SiC), nitruro de silicio (Si₃N₄), alúmina (Al₂O₃), vidrios cerámicos y zirconio (ZrO₂), los cuales presentan relativa facilidad de procesamiento.¹¹

1.3 COMPOSICIÓN DE UNA TEJA OPACA EN PRFV

Las tejas opacas fabricadas en poliéster reforzado con fibra de vidrio, constan de una serie de subproductos, líquidos o sólidos, que le confieren propiedades características al producto final. A continuación, se describen los principales componentes de las tejas en PRFV:

1.3.1 Matriz polimérica: resina poliéster insaturada. La resina poliéster, se obtiene a partir de la reacción de un ácido dicarboxílico y un alcohol polihídrico, a temperaturas superiores a 100°C, que genera poliéster y agua.

El poliéster insaturado, consta de una cadena lineal capaz de polimerizar con monómeros de estireno o vinilo para la formación de plásticos termofijos, de acuerdo con el tipo de ácidos y alcoholes empleados se establece la protección y resistencia química de la matriz polimérica. A partir de la composición, la resistencia química y mecánica, se caracteriza la resina poliéster en resinas ortoftálicas, tereftálica, isoftálicas y bisfenolicas, su aplicación depende de las especificaciones y

⁹ TREJOS. Op. Cit. p.110.

¹⁰ *Ibíd.*, p. 111.

¹¹ *Ibíd.*, p. 111.

propiedades requeridas en el producto final.¹² Las resinas ortoftálicas tienen mayor aplicación con materiales de refuerzo, poseen buena resistencia al intemperismo, se pueden emplear en procesos a temperatura ambiente y ocasionalmente tienen absorbentes UV. Las resinas tereftálicas son resistentes a ácidos y a bases, así como a disolventes, resistencia química media, poseen un 20% de pet reciclado y tienen una alta sensibilidad al calor.¹³ Las resinas isoftálicas y bisfenólicas, se incluyen en el grupo de ésteres vinílicos, poseen buenas características de estabilidad y curado en procesos de prensado, además, presentan la mayor resistencia química y mecánica en resinas poliéster. A continuación, en el cuadro 1, se presentan los tipos de resinas poliéster, con sus respectivos ácidos, glicoles y monómeros empleados en su fabricación.¹⁴

Cuadro 1. Tipos de resinas poliéster más utilizados en procesos industriales

Tipos	Ácidos o anhídridos insaturados	Ácidos o anhídridos saturados	Glicoles	Monómero
Ortoftálico	Anhídrido maleico	Anhídrido ftálico	Propilenglicol etilenglicol	Estireno
Isoftálicas	Anhídrido maleico	Anhídrido isoftálico	Propilenglicol dietilenglicol	Estireno
Tereftálicas	Anhídrido maleico	Anhídrido tereftálico	Propilenglicol	Estireno
Tetrahydroftálica	Anhídrido maleico	Anhídrido tetrahydroftálico	Propilenglicol	Estireno
Bisfenólicas	Anhídrido fumarico	Anhídrido ftálico	Bisfenol A	Estireno
Resinas de ácido tetracloroftálico	Anhídrido maleico	Anhídrido tetracloroftálico	Etilenglicol	Estireno
Resinas de ácido HET	Anhídrido maleico	Ácido HET	Etilenglicol dietilenglicol	Estireno
Resina al metacrilato metilo	Anhídrido maleico	Anhídrido ftálico	Propilenglicol	Estireno + MMA

Fuente: CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. Barcelona. [en línea] 1996. pg 63.[consultado: 12, abril, 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/EzioCordovaHernandez/callister-introduccion-a-la-ciencia-e-ingenieria-de-los-materiales-65832618>

¹² SolteQ.. Resina poliéster, plástico reforzado. 1 ed. Bogotá D.C.: Akzo Nobel, 2010. 21 p. ISBN 9001128196-0

¹³ Ibíd., p. 5.

¹⁴ TREJOS. Op. Cit.p.150.

1.3.2 Promotores y catalizadores. En la reacción de polimerización de la resina poliéster, el monómero en el que se encuentra disuelta la resina líquida, reacciona con los grupos no saturados para formar un compuesto termofijo. Esta reacción de polimerización se clasifica como reacción de adición, debido a que no se forman subproductos. La transformación total de la resina líquida a estado sólido, en la industria del plástico reforzado, se denomina “curado”.

Los promotores son los encargados de descomponer rápidamente el catalizador y acelerar la reacción de polimerización, su aplicación principal es en procesos a temperatura ambiente. Para la selección de sistema catalizador – promotor se deben establecer los parámetros óptimos de tiempo de gel, tiempo de curado, temperatura de curado, y tipo de producto a obtener. Los promotores son sales metálicas como: naftenato de cobalto o cobre, octoato de cobalto o magnesio; aminas como dimetilnilina, dimetil paratoluidina, dimetil acetato acetamida; mercaptanos, entre otros. Los catalizadores pueden ser de tipo peróxido o hidroperóxido, entre los que se encuentran: peróxido de metil etil cetona, hidroperóxido de cumeno, peróxido de benzoilo, peróxido de laurilo, hidroperóxidos de alquil y peróxidos de arilo¹⁵.

1.3.3 Cargas. Son materiales sólidos, líquidos o gaseosos, usualmente inertes, que se agregan a la formulación del polímero con el fin de reducir el costo del compuesto y/o mejorar sus propiedades. Según los requisitos básicos de procesamiento, comportamiento mecánico y demás propiedades que se buscan, se determinará el tipo de carga óptimo, su equilibrio en costo y rendimiento. Una alta concentración de la mayoría de cargas aumenta el tiempo de gelificación de las resinas.¹⁶

Existen dos tipos de cargas:

- Las cargas extensoras ocupan principalmente espacio, aumentando el volumen de mezcla como se muestra en la ecuación 1. Así mismo, aumentan el módulo de flexión y permiten la reducción del costo de formulación. Las características ideales que se esperan de este tipo de carga son: una distribución de tamaño de partícula apropiado para su empaque; no reactividad; baja gravedad específica; forma esférica para permitir la retención de las propiedades anisotrópicas; color e índice de refracción deseado; y, bajo costo.¹⁷
- Las cargas funcionales mejoran propiedades específicas en el polímero, además de que reducen costos y aumentan volumen. Dependiendo de su concentración

¹⁵ SCHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. 1 ed. Alemania: Universidad de Heidelberg, 2005. 288p. ISBN 8479787074

¹⁶ REYNOSO, Sara Luisa. Los polímeros plásticos. 1 ed. Cd de Mexico DF: Kindle, 2018. 120p. ISBN 9781790826001

¹⁷ *Ibíd.*, p.121.

en el polímero, pueden aumentar rigidez, así como resistencia eléctrica, al desgaste, al fuego, entre otros¹⁸.

Ecuación 1. Volumen proporcionado por la carga

$$\%V_c = \frac{\%C * Gr}{(\%R * Gc) + (\%C * Gr)} * 100\%$$

Fuente: SCHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. 1 ed. Alemania: Universidad de Heidelberg, 2005. 288p. ISBN 8479787074

Donde:

%C = Porcentaje en peso de carga

Gc = Gravedad específica de la carga

%R = Porcentaje en peso de resina

Gr = Gravedad específica de la resina

Las cargas dependiendo de su estructura morfológica, composición química y geometría de las partículas presentan diferentes características que influyen en el sistema de aplicación en el que se empleen. La granulometría de las partículas, por ejemplo, se debe tener en cuenta para garantizar la homogeneidad en la mezcla y así asegurar las propiedades de la misma. En el cuadro 2, se mencionan algunas características de las cargas y su influencia en aplicaciones técnicas.

Cuadro 2. Influencia de la carga mineral en la aplicación técnica¹⁹

Características de las cargas	Influencia en su aplicación técnica
Composición química	Inercia y compatibilidad con dispersiones, resistencia a la intemperie y a la acidez de la lluvia, resistencia a microorganismos.
Morfología de la partícula	Reología, consumo de dispersante, porosidad, resistencia a la intemperismo y a la acidez de la lluvia.
Índice de refracción	De importante influencia en el poder cubriente.
Color	Blancura y la nitidez del olor de los pigmentos.
pH	La estabilidad de la dispersión de las cargas, resistencia a microorganismos, comportamiento en la intemperie.
Dureza Mohs	Resistencia a la abrasión

Fuente: SCHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. 1 ed. Alemania: Universidad de Heidelberg, 2005. 288p. ISBN 8479787074

¹⁸ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.26.

¹⁹ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.27.

1.3.4 Aditivos. Los aditivos para plásticos, son componentes que se añaden a los polímeros en pequeñas cantidades, entre 0,005% y 5% en peso, con el fin de mejorar propiedades inherentes del polímero. Actualmente, hay una amplia variedad de aditivos, que se ajustan a las necesidades de los procesos industriales²⁰.

Para procesos de resina poliéster reforzados con fibra de vidrio se emplean los siguientes aditivos de la marca BYK, como se muestra en la imagen 2: ²¹

- Humectante – dispersante: Mejora la dispersión de todos los rellenos convencionales, como el carga seca e hidróxido de aluminio. Reduce la viscosidad de la resina llena, permitiendo un nivel de llenado más alto.²²
- Desaireante: Aditivo de liberación de aire a base de polímero libre de silicona para resinas de poliéster insaturado. Adecuado para todo tipo de resinas de poliéster insaturado y métodos de procesamiento. Muestra su máxima eficacia eliminando el aire ocluido de casi todas las resinas de poliéster insaturado en cualquiera de los procedimientos de aplicación. ²³
- Antisedimentante: Estabiliza las partículas sólidas en el sistema de resina y evita la sedimentación de las cargas y la flotación de pigmentos. Se usa principalmente en pastas de color y *Gel Coats* basados en resinas de poliéster insaturado.²⁴
- Reductor de estireno: Reduce la emisión de monoestireno en resinas ortoftálicas para técnicas de procesamiento de moldes abiertos. El uso del producto no afecta adversamente la adhesión interlaminar. También se puede usar en resinas isoftálicas.²⁵

²⁰ ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aplicaciones/plastics-industry.php>

²¹ PARRILLA CORZAS, Felipe. Resinas poliéster, plásticos reforzados. 14 ed. México D.F.: Solteq S.A.S, 1998. 359p. ISBN 970-92083-0-6

²² ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aditivos-por-nombre/byk-w-903-9012.php>

²³ ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aditivos-por-nombre/byk-a-500-560.php>

²⁴ ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aplicaciones/coatings-industry.php>

²⁵ ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aditivos-por-nombre/byk-s-706-782.php>

Imagen 2. Aditivos BYK



Fuente: ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aplicaciones/plastics-industry.php>

1.3.5 Pigmentos. Los pigmentos son sustancias finas cristalinas con índice de refracción menor a 1,7; poseen un color definido, cuyo uso está orientado a definir el tono de color y opacidad del producto terminado. Los pigmentos incorporados a una pintura, permanecen relativamente inactivos o químicamente inalterados, bajo condiciones determinadas. Algunos de los pigmentos minerales más usados en la industria de pinturas y recubrimientos plásticos son: el dióxido de titanio – TiO_2 de color blanco, óxidos de hierro micronizados de color rojo y el óxido de cromo (III) – Cr_2O_3 de color verde. Existen pigmentos inhibidores que retardan, o previenen, la corrosión de metales mediante mecanismos químicos y/o electroquímicos, como por ejemplo, el plomo rojo y el cromato de zinc.²⁶

En la industria de pinturas predomina ampliamente el color blanco. En menor escala se aplican recubrimientos de colores pastel; y muy escasamente, se aplican colores intensos o pinturas de tono lleno. El pigmento más usado para la tonalidad blanca es el dióxido de titanio.²⁷

1.3.6 Monómeros o agentes de enlace reticular. Los compuestos de enlace para resina poliéster son los monómeros de vinilo. El monómero más empleado en esta industria es el monómero de estireno, líquido oleoso transparente, que aporta al polímero rigidez y resistencia a la ruptura, en combinación con monómeros acrílicos. Es un componente importante en las dispersiones para pinturas y contribuye al brillo de la superficie del producto terminado.

²⁶ GONZÁLEZ, Yuly Viviana; RODRÍGUEZ REYES, María Fernanda; SALINAS BARRETO, Alejandra. Propuesta de mejora del proceso productivo en la fábrica de Pinturas Alcor S.A.S. [en línea]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2016. [Consultado 4, febrero, 2019]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/443>

²⁷ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.43.

Se utiliza para fabricar plásticos, pinturas, cauchos sintéticos, revestimientos protectores y resinas. Este componente es de bajo costo, comparado con otros compuestos; tiene gran compatibilidad con las resinas poliéster; presenta una alta reactividad; disminuye la viscosidad, por su alto poder de dilución; no es un disolvente, puesto que no se evapora, entre otras características. La cantidad óptima de estireno oscila entre el 30% y 40% en peso, porque brinda mejores propiedades físicas en la resina de poliéster curada, e influye en la elongación, la resistencia mecánica, la absorción del agua, la resistencia al calor y al intemperismo.²⁸ Si se desea mejorar la transparencia y resistencia al intemperismo, se emplea monómero de metil metacrilato sustituyendo parcialmente al monómero de estireno.

1.3.7 Refuerzo: fibra de vidrio. Material fibroso, que en combinación con la resina poliéster, mejora características físicas y químicas del producto terminado. Es empleado con alta frecuencia en la industria del plástico como refuerzo, por su alta resistencia a la tensión, completamente incombustible, biológicamente inerte, presenta una excelente resistencia al intemperismo, gran estabilidad dimensional y baja conductividad térmica.²⁹ La fibra de vidrio se emplea en diferentes formas: *roving* es una mecha de fibra, que se emplea con mayor frecuencia en la fabricación de artículos plásticos con refuerzo por aspersion y *pultrusión*; velos, que se emplean principalmente para pantallas de lámpara; filamentos cortados, empleados en compuestos moldeables; fibra molida, es la presentación de fibra en polvo y tejidos especiales.³⁰

1.4 DISPERSIÓN DE CARGAS

Es la mezcla de una sustancia dispersada dentro de otra como burbujas, gotas o partículas. Una fase dispersa es la disgregación o distribución de una fase dentro de otra, como burbujas de gas suspendidas, partículas más pequeñas o partículas sólidas dispersas en un líquido.

1.5 OPACIDAD

Es una propiedad óptica de la materia, que se puede entender como la medida en que un medio es opaco a las radiaciones electromagnéticas, especialmente a la luz; es decir, un material presenta opacidad cuando no deja pasar luz o espectros visibles en proporción apreciable. Esta propiedad es recíproca con la transmisión, puesto que un material translúcido es aquel que deja pasar la luz. Generalmente, para aplicaciones técnicas, se estudian la transparencia, o la opacidad, a la radiación infrarroja, a la luz ultravioleta, a los rayos X, a los rayos gamma, y en

²⁸ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.10.

²⁹ *Ibíd.*, p.12.

³⁰ *Ibíd.*, p.20.

cada una de ellas se caracteriza su función de opacidad. Dicha función, generalmente involucra tanto la frecuencia de la luz que interacciona con el objeto, como la temperatura de dicho objeto. Es importante recalcar que existen diferentes funciones de opacidad para diferentes objetos y condiciones físicas.³¹

1.5.1 Índice de refracción. Indica la relación existente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad que lleva la luz en dicho medio. El índice de refracción de la luz en el vacío vale 1. También se dice que el valor del índice de refracción del medio es una medida de su “densidad óptica”: La luz se propaga a velocidad máxima en el vacío, pero más lentamente en los demás medios transparentes; por tanto, en todos ellos $n > 1$.³² La ecuación 2 que permite la determinación del índice de refracción (n) es la siguiente:

Ecuación 2. Determinación de índice de refracción.

$$n_a = \frac{c}{V_a}$$

Fuente: GEOFIS. Determinación de índices de refracción. [Sitio WEB]. Colombia: Geofis. [22 junio, 2019]. Disponible: <https://webs.ucm.es/info/Geofis/practicas/prac22.pdf>

Donde:

n =Índice de refracción

c =Velocidad de la luz en el vacío (m/s) = $3 \cdot 10^8$ m/s

V_a =Velocidad de la luz en el medio (m/s)

Cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de separación entre dos medios diferentes, el haz incidente se divide en tres: el más intenso penetra en el segundo medio formando el rayo refractado; otro es reflejado en la superficie; y, el tercero se descompone en numerosos haces débiles que surgen del punto de incidencia en todas direcciones, creando un conjunto de haces de luz difusa³³.

³¹ KO, Frank K, WAN, Yuqin. Chemical Dispersion. En: Introduction to Nanofiber Materials. Vancouver: Cambridge University Press, 2014. 23-80.

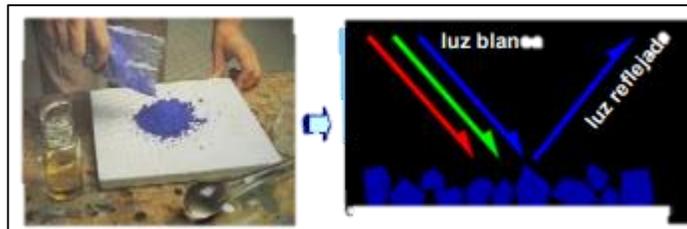
³² MAYZO. Optical brighteners. [Sitio WEB]. Suwanee, Georgia, USA: Mayzo. [08, junio, 2017]. Disponible en: <http://www.mayzo.com/optical-brighteners.html>

³³ GEOFIS. Determinación de índices de refracción. [Sitio WEB]. Colombia: Geofis. [22 junio, 2019]. Disponible: <https://webs.ucm.es/info/Geofis/practicas/prac22.pdf>

1.5.2 Reflectancia. Se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interfase. Los espectrofotómetros de reflectancia miden la cantidad proporcional de luz reflejada por una superficie como una función de las longitudes de onda para producir un espectro de reflectancia. El espectro de reflectancia de una muestra se puede usar, junto con la función del observador estándar y la distribución relativa de energía espectral de un iluminante.³⁴

La reflectancia de una muestra se expresa como una fracción entre 0 y 1, o como un porcentaje entre 0 y 100. Es importante considerar que los valores de reflectancia obtenidos son valores relativos y, para muestras no fluorescentes, son independientes de la calidad y cantidad de la luz usada para iluminar la muestra. Así, aunque los factores de reflectancia se midan usando una fuente de luz concreta, es perfectamente correcto calcular los valores colorimétricos para cualquier iluminante conocido.³⁵ Como se muestra en la imagen 4, la materia puede absorber la luz debido a una serie de fenómenos que incluyen vibraciones y rotaciones atómicas, orbitaciones moleculares y transferencia de cargas. Un cuerpo opaco, es decir no transparente, absorbe gran parte de la luz que lo ilumina y refleja una parte más o menos pequeña.

Imagen 3. Luz reflejada por un objeto azul



Fuente: NUÑEZ, Nuria, OCAÑA, Manolo. El color en los materiales. Instituto de ciencias de materiales de Sevilla. España. [en línea]. 2009.1 [consultado: 15, mayo, 2019]. Disponible en: https://www.ciccartuja.es/fileadmin/CARTUJA/cicCartuja/imagenes/ICMS_Poster_2.pdf

³⁴ GUSGSM. Relación entre densitometría y colorimetría. [Sitio WEB]. Colombia: GUSGSM. [14, julio, 2004]. Disponible en: http://www.gusgsm.com/funciona_espectrofotometro_reflectancia

³⁵ *Ibíd.*, prr. 3.

1.5.3 Medición de color. Siendo el color una sensación subjetiva, en términos estrictamente físicos no podría ser medido. Sin embargo, la cantidad de luz reflejada de la superficie de un objeto opaco, o transmitida por el material transparente si se puede medir, pero la relación entre el valor experimental y la descripción cuantitativa del color es compleja. Todos los instrumentos que sirven para "medir" el color tienen tres componentes principales: una fuente de luz para iluminar el objeto a analizar, un sistema para seleccionar una región específica del espectro y un fotodetector. Entre estos últimos se tiene a los colorímetros, densitómetros, espectrofotómetros, etc. También se pueden medir los colores por comparación con una serie de muestras estándar. La ventaja de este método es la simplicidad, pero las muestras no son del todo estables, y, en consecuencia, no se tiene la precisión del espectrofotómetro.³⁶

1.5.4 Luz. La luz es una forma de radiación electromagnética, llamada energía radiante, capaz de excitar la retina del ojo humano y producir, en consecuencia, una sensación visual. El concepto *luz* tiene absoluta relación con quien la percibe, y es a través de ella que el hombre se conecta visualmente con el mundo que lo rodea. La energía radiante fluye en forma de ondas en cualquier medio con una dirección determinada (propagación rectilínea), y sólo es perceptible cuando interactúa con la materia, que permite su absorción o su reflejo. Hay entonces un cuerpo emisor de la energía radiante y otro que la recibe. Esta interacción o transferencia de energía de un cuerpo a otro se denomina radiación.³⁷ En la imagen 6 se muestra de dispersión de la luz en un prisma.

Imagen 4. Dispersión de la luz



Fuente: VALENZUELA, David. Fisic.[Sitio WEB]. Alemania. La entidad. [consultado: 22, mayo, 2019]. Disponible en: <https://www.fisic.ch/contenidos/optica/refracci%C3%B3n-de-la-luz-y-ley-de-snell/>

³⁶ *Ibíd.*, prr. 4.

³⁷ SIRLIN, Eli. Física de la luz. [en línea]. Informe. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires: 2006. [Consultado 12, diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.elisirlin.com.ar/11_fisica%20de%20la%20luz.pdf

1.5.5 Luminosidad. La propiedad que diferencia los colores es la luminosidad. Los colores de un solo tono se denominan cromáticos o monocromáticos. Los colores neutros; blanco, gris o el negro no poseen tono ni saturación, puesto que la saturación es el grado de cromaticidad, los colores puros del espectro son los de mayor saturación y los colores blanco, gris o negro, no tienen tono y su saturación es nula. Un objeto es negro perfecto si absorbe toda la luz visible que recibe, es decir, 0% de reflexión, en el sentido físico del término. Por el contrario, el blanco perfecto, refleja totalmente la luz que recibe, lo cual corresponde al 100% de reflexión, por tanto, su luminosidad es 100.³⁸

1.5.6 Poder cubriente. Según la norma ASTM-D-2805 para la determinación del poder cubriente de pinturas mediante reflectometría, éste se define como el inverso del espesor para el cual la relación de contraste es de 0.98 y se expresa comúnmente en m^2/L ³⁹. La relación de contraste (RC) se define como el cociente de la reflectancia lumínica de la película aplicada sobre un sustrato negro entre la correspondiente aplicada sobre un sustrato blanco.⁴⁰ Se espera que cuando este cociente alcanza un valor de 0.98, a un observador estándar no le sea posible distinguir la diferencia entre sustratos y se habla entonces de cubriente total.⁴¹

Imagen 5. Leneta, ensayo de poder cubriente de un pigmento.



Fuente: Neutek, Cartulinas lenetas. [En línea] España 2018 [consultado: 25 septiembre 2019] Disponible en: <https://www.neurtek.com/descargas/neurtek-cartulinas-leneta-es.pdf>

³⁸ ESPINOZA FERNÁNDEZ, Héctor. Pigmentos orgánicos e inorgánicos utilizados en las industrias de pinturas o recubrimientos y del plástico. [en línea]. Tesis. Universidad de Chile, Chile: 2008. [Consultado 14, noviembre, 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105252>

³⁹ "Hiding Power of Air Drying Nonchromatic Paint", German Standards Institute (DIN), DIN 53162.

⁴⁰ "Determination of contrast ratio (opacity) of light coloured paints at a fixed spreading rate (using black and white charts)" ISO 3905, Iso Standards Handbook. Vol. 24, 1985, p.499

⁴¹ *Ibid.*, p.4.

En la imagen 7 se muestra el comportamiento de un pigmento blanco con alto poder cubriente, costado derecho y un pigmento blanco bajo poca capacidad de cubrimiento de lado izquierdo, el cual permite observar el patrón de color de la leneta.

1.5.7 Lux. Un lux es la incidencia perpendicular de un lumen en una superficie de 1 metro cuadrado. Equivale a 0.0929 lúmenes. Al definir que un lux equivale a un lumen por metro cuadrado, se especifica que un lumen equivale a una candela por estereorradián. El flujo luminoso total de una fuente de una candela equivale a 4π lúmenes (puesto que una esfera comprende 4π estereorradianes). Resumiendo, se puede expresar que un lux es una unidad derivada, basada en el lumen, que a su vez es una unidad derivada basada en la candela. Se usa en fotometría como medida de la intensidad luminosa, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad, es un modelo estándar de la sensibilidad a la luz del ojo humano.⁴²

⁴²CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS. Luminotecnia. [en línea]. Informe. E.T.S. Arquitectura, Colombia: 2018. [Consultado 12, diciembre, 2017]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12732/L%20U%20M%20I%20N%20O%20T%20E%20C%20N%20I%20A.pdf?sequence=1>

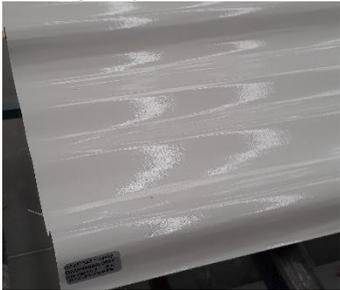
2. CARACTERISTICAS DE UNA TEJA OPACA

En este capítulo se presentan las condiciones actuales de operación, proceso de fabricación, generalidades y características de materias primas usadas en la fabricación de una teja opaca blanca, elaborada en resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio.

2.1 GENERALIDADES DEL PRODUCTO

De acuerdo con la información obtenida de la compañía, se describe el producto “” teja opaca blanca, como se muestra en el cuadro 3:

Cuadro 3. Generalidades de una teja opaca blanca

Características	Descripción
Nombre del producto	Teja opaca blanca 
Tipo de producto	Poliéster reforzado con fibra de vidrio, resistente a la corrosión, 100% opaco.
Uso del producto	<ul style="list-style-type: none">• Cubiertas multiusos para superficies de uso industrial.• Disminución de transmisión térmica en interiores.• Poca luminosidad en interiores (pesebreras y corrales).

Fuente: elaboración propia

2.2 FORMULACION ACTUAL

Para fabricar una teja opaca blanca, se emplean cinco componentes. En la tabla 4 se observan las proporciones de las materias primas que se le adicionan a la matriz polimérica y en la tabla 3, se evidencian las condiciones de mezcla de cada sustancia, (orden, tiempo y velocidad en rpm).

Tabla 3. Formulación actual de la matriz polimérica para la fabricación de una teja opaca blanca

Nombre del componente	Proporción (% en peso)
Resina poliéster	202,5
Carga seca	54
Dióxido de titanio R902	20
Pigmento blanco	7,5
Estireno	4

Fuente: elaboración propia

El refuerzo de la cubierta se realiza con fibra de vidrio, empleando una relación de 20% de resina blanca y 70% de fibra de vidrio. La resina se inicia con el 2% de peróxido orgánico.

Tabla 4. Condiciones de mezcla para cada componente de la matriz polimérica

Orden	Componente	Tiempo (min)	Velocidad periférica (m/s)
1	Aditivos	10	12
2	Pre mezcla	10	12
3	Dióxido de titanio	20	16
4	Carga seca	20	16

Fuente: SCHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. 1 ed. Alemania: Universidad de Heidelberg, 2005. 288p. ISBN 8479787074

Partiendo de estos porcentajes, en la tabla 4 se muestra la proporción de dióxido de titanio y pigmento blanco, respecto a la cantidad de aditivos que se le agregan actualmente a la resina:

Tabla 5. Porcentaje total de dióxido de titanio con base a los aditivos adicionados a la resina.

Total Aditivos	85,5 %
TiO ₂ Polvo	55,4 %
Pigmento Blanco	7,69 %
Total de TiO₂	63,1 %

Fuente: elaboración propia

El porcentaje total de dióxido de titanio corresponde a la sumatoria entre la proporción del TiO₂ en polvo y el pigmento blanco, el cual presenta alrededor de 60% de TiO₂ disperso en resina poliéster. Con el fin de identificar la influencia de cada aditivo en el costo de la formulación de la matriz polimérica actual, se realizó la tabla 7, en la cual se estima el costo por kilogramo de matriz polimérica.

Tabla 6. Costo actual de la formulación de un kilogramo de matriz polimérica

Componente	Costo Unitario	% En Peso	Costo / 1 kg
Resina Poliéster Insaturada	38862	202,5	\$ 14631,85
Dióxido de Titanio	16795	54	\$ 6943,10
Carga seca	859	20	\$ 937,30
Pasta Pigmento Blanca	18056	7,5	\$ 451,40
Estireno	14850	4	\$ 197,00
Total	89422	288,0	\$ 21160,65

Fuente: elaboración propia

Esta estimación de costo permitió evidenciar en la tabla 7, que el dióxido de titanio, además de ser el 95% del costo de los aditivos, representa el 33,44% del costo total de la formulación actual.

Tabla 7. Influencia del TiO₂ y el pigmento blanco en el costo de materia prima directo

Costo del TiO₂ por 1 kg	\$	4394,50
% Costo Total Formulación		33,44
Costo Aditivos	\$	3528,80
% TiO ₂ del Costo Aditivos		94,69

Fuente: elaboración propia

2.3 MATERIAS PRIMAS

A continuación, se muestran las principales propiedades y características de las materias primas empleadas en la fabricación de una teja opaca blanca a partir de la revisión de las fichas técnicas de los proveedores e información bibliográfica disponible.

2.3.1 Resina de poliéster insaturado. La resina de poliéster es una estructura lineal, obtenida de la reacción entre ácidos y glicoles, que son capaces de polimerizar a partir de una reacción de adición, bajo la acción de un catalizador. Actualmente, en el proceso se emplea peróxido de metil etil cetona (MEK). La resina se considera como vehículo, por ser el medio en que se encuentran en contacto todos los componentes del recubrimiento. Para este producto, se emplea una resina tereftálica pre acelerada, puesto que las cubiertas (producto terminado) requieren especificaciones de opacidad, alta resistencia química y mecánica⁴³.

Esta resina tereftalica, está elaborada a partir de ácido maleico y anhídrido tereftálico, presenta un color turbio ámbar, lo cual favorece la fabricación de

⁴³ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.65.

productos opacos. La resina, contiene un 20% del pet reciclado, lo que le impide obtener un alto grado de transparencia.

Imagen 6. Resina de poliéster pre-acelerada Cristalan 1967 de la empresa Andercol.



Fuente: laboratorio planta de producción

Los parámetros de aceptación de las propiedades físicas y químicas de la resina que se manejan actualmente en el proceso, se presentaron en la tabla 8. La apariencia se determinó a partir de la ASTM D2090 que corresponde al método de prueba para el examen visual de cualquier líquido no pigmentado para uso en pinturas y tintas,⁴⁴ incluidos aceites y ácidos grasos, soluciones más secas, disolventes, productos químicos diversos, barnices, soluciones de resina, lacas transparentes y otros revestimientos para detectar la presencia o ausencia de componentes indeseables. La viscosidad brookfield se midió según la ASTM D2196. Este método de prueba determina la viscosidad aparente, el adelgazamiento por cizallamiento y las propiedades tixotrópicas de los materiales no newtonianos en el rango de velocidad de cizallamiento de 0.1 a 50 s⁻¹ utilizando un viscosímetro rotacional que opera en un fluido contenido en un volumen de 600 mL. La cantidad de sólidos presentes en la resina se estimó a partir de la ASTM D1259, método de prueba estándar para determinar el contenido de no volátiles en soluciones de resina. La gravedad específica y la densidad de la resina, se evaluaron según las normas ASTM D1963 y D1475 -13, que proporcionan el método de prueba estándar para la densidad de recubrimientos líquidos, tintas y productos relacionados. La acidez de la resina se determinó según la norma ASTM D1639, método de prueba para la medición de la acidez libre presente en la proporción no volátil de barnices, aceites, resinas, vehículos de pinturas, mediante la reacción con una solución alcalina estándar. Por último, el análisis de reactividad de la resina, se realizó conforme a la norma ASTM D2471, que establece el método de prueba estándar para el tiempo de gel, de curado y la temperatura exotérmica máxima de las resinas

⁴⁴ GONZÁLEZ; RODRÍGUEZ REYES; SALINAS BARRETO. Op. Cit. p. 66.

termoendurecibles de reacción. Los valores aceptables para la implementación de la resina en el proceso de fabricación de tejas opacas se evidencian en la tabla 8:

Tabla 8. Especificaciones de la resina Cristalan 1967 de la empresa Andercol.

Aspecto físico	Valor		Método	
Estado físico a 20°C	Líquido		ASTM D2090	
Aspecto	Opaco			
Color	Marrón			
Olor	Característico			
Caracterización del producto	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo	Método
Densidad a 20°C	kg/m ³	-	1012,9	ASTM D1963
Viscosidad Brookfield	cP @ 25 °C	150	300	ASTM D2196
Calor específico	cal/g.°C	0,35	-	ASTM D2090
Sólidos	%nvm	58	62	ASTM D1259
Acidez	mg KOH/g	-	3	ASTM D1639
Reactividad	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo	Método
Tiempo de gel	Min @ 25	6	8	ASTM D2471
Tiempo de máxima exotermia	°C Min @	9	15	ASTM D2471
Temperatura de máxima exotermia	25 °C	140	150	ASTM D2471

Fuente: ficha técnica resina poliéster Cristalan 1967, Andercol

Una de las propiedades físicas más influyentes en la opacidad de los polímeros, es el índice de refracción. Para esta resina se realizó la medición cumpliendo con la norma DIN-53491, en la que se miden las propiedades de la resina endurecida sin cargas a 20°C, dando como resultado que la resina completamente sólida, posee un índice de refracción de 1,567.

En el laboratorio de la compañía se realizaron análisis de reactividad y viscosidad, con el fin de verificar las condiciones del lote recibido, y con el cual, se va a realizar todo el desarrollo experimental.

2.3.2 Fibra de vidrio. Actualmente, se emplean hilos cortados, conocidos industrialmente como “mat 450”, el cual, se distribuye multidireccionalmente en el plano, o laminado. Está diseñado para aplicaciones de resina poliéster y viniléster, específico para procesos de moldeo abierto, otorgando el refuerzo necesario para el laminado estándar.⁴⁵ Cumple con la norma ASTM D578-99 que establece la retardancia a la llama de la fibra. Las demás propiedades físicas y químicas que debe cumplir la fibra de vidrio, se consignan en la norma ASTM D3982-08, que proporciona las especificaciones estándar y métodos de prueba, en la fabricación de conductos y cubiertas, en poliéster, viniléster, u otros sistemas calificados de matriz de resina con refuerzo de fibra, fabricados en procesos de moldeo por contacto. Las propiedades físicas y químicas de la fibra de vidrio que influyen en las características finales del material compuesto se muestran en el anexo 1.

Según la ASTM D542-14, método de prueba para medir esta propiedad, controlar la pureza y la composición con fines de identificación simple para el diseño de piezas ópticas, se determinó que esta materia prima, consta de un índice de refracción de 1,56.

2.3.3 Carga seca

Imagen 7. Carga seca



Fuente: Laboratorio planta de producción

El agente de carga seca es un compuesto químico (oxisal), abundante en la naturaleza; polvo de color blanco que posee baja absorción de aceite; aunque no reacciona, modifica algunas características en los laminados: aumenta la rigidez, reduce la exotérmica, reduce la dilatación térmica, mejora la resistencia a la abrasión, aumenta el peso, mejora el acabado y disminuye el costo de producción al aumentar el volumen de la mezcla. La concentración de dicha carga se establece teniendo como restricción la viscosidad del sistema coloidal y el precio de la misma. La composición y propiedades de esta carga se presentan en la tabla 9.

⁴⁵ TREJOS. Op. Cit. p.170.

Tabla 9. Especificaciones del carga seca

Propiedades físicas	Valor
Apariencia	Material en polvo fino
Color	Blanco
Olor	Característico

Fuente: certificado de análisis IMPADOC SA.

2.3.4 Dióxido de titanio

Imagen 8. Dióxido de titanio R902



Fuente: Laboratorio planta de producción

El dióxido de titanio es un compuesto inorgánico de altas cualidades como pigmento blanco, entre las que se destacan el alto índice de refracción, alto brillo, alto índice de blancura, insolubilidad en soluciones alcalinas y acidas y baja toxicidad. Como se menciona en el ítem 2.2, la fase de dióxido de titanio empleado actualmente en la fabricación de tejas opacas es RUTILIO, el cual posee estructura cristalina tetragonal, más compacta que el tipo anatasa de estructura octaédrica. El dióxido de titanio de tipo rutilo, presenta una textura más dura que el tipo anatasa, un color más amarillento, mayor solidez a la luz y a la intemperie, y proporciona una mayor opacidad.⁴⁶ Es importante resaltar, que esta fase del TiO_2 es la más empleada para obtener matrices opacas; sin embargo, la opacidad que un pigmento confiere a un sustrato en el cual está disperso, como este sistema, viene de las diferencias entre los índices de refracción del pigmento y el medio: se logra mayor opacidad proporcionalmente a cuanto mayor sea la diferencia entre los índices⁴⁷, entendiendo el índice de refracción como el responsable del contraste entre el pigmento y el vehículo (resina poliéster), valor clave para estimar la reflectividad de la película.⁴⁸ Contiene un porcentaje de alúmina de 4,3% en peso. El dióxido de titanio empleado

⁴⁶ ESPINOZA FERNÁNDEZ. Op. Cit. p. 43.

⁴⁷ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.87.

⁴⁸ KEYMAN FREIRE, Ana Carolina. Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. [en línea]. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, México: 2011. [Consultado 23, enero, 2019]. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2012/abril/0679331/Index.html>

actualmente, según la ASTM D3720-90⁴⁹ que establece el método de prueba para la determinación de la proporción de anatasa y rutilo en los pigmentos de dióxido de titanio, para la fabricación de pigmentos y recubrimientos, se encuentra en fase rutilo; una fase estable, con un tamaño de partícula de 0,435 micras, determinado por la ASTM D476-15⁵⁰ que proporciona la clasificación estándar y los métodos de prueba para productos de dióxido de titanio pigmentario seco. Su índice de refracción es 2,75; uno de los de mayor índice de refracción. Algunas propiedades físicas y químicas del dióxido de titanio, empleado en el proceso de fabricación de tejas opacas se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones dióxido de titanio R902

Aspecto físico	Valor
Apariencia	Material en polvo fino
Color	Blanco
Olor	Característico

Fuente: certificado de análisis DuPont™ Ti-Pure®

Según bibliografía, el tamaño de partícula óptimo para películas opacas, deben poseer un diámetro de partícula menor que la mitad de la longitud de onda de luz dispersada⁵¹, en este caso, la luz visible que se encuentra entre 400 nm a 700 nm. Es decir, el tamaño de partícula óptimo es de 0.20 μm y 0.35 μm .⁵²

2.3.5 Pigmento blanco

Imagen 9. Pigmento blanco Cristalan de la empresa Andercol



Fuente: laboratorio planta de producción

⁴⁹ American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Ratio of Anatase to Rutile in Titanium Dioxide Pigments by X-Ray Diffraction. ASTM D3720. Philadelphia: ASTM international, 2015. 2p.

⁵⁰ American Society For Testing And Materials. Standard Classification for Dry Pigmentary Titanium Dioxide Products. ASTM D476-15. Philadelphia: ASTM international, 2018. 1p.

⁵¹ *Ibíd.*, p.44.

⁵² *Ibíd.*, p.45.

El pigmento blanco fabricado por la compañía Andercol, empleado en la formulación de la teja opaca, es un pigmento inorgánico de gran uso a nivel industrial, especialmente en la coloración de pinturas y plásticos. También conocido como blanco titanio, presenta una concentración de dióxido de titanio del 60% en peso. Según la información suministrada por Héctor Espinoza Fernández en su tesis denominada “Pigmentos orgánicos e inorgánicos utilizados en la industria de pinturas o recubrimientos y de plástico”, el color índice (parámetro internación para la identificación de pigmentos), que corresponde a este pigmento es White 6 – 77891⁵³. Sus principales características son: excelente opacidad, alto poder de reflexión de la luz, alto nivel de blancura, alto rendimiento, buena estabilidad química y térmica⁵⁴. Según la ficha técnica, este producto es elaborado con dióxido de titanio rutilo. Mediante el método de prueba estándar para la finura de la dispersión de los sistemas de pigmento-vehículo, mediante un medidor tipo Hegman⁵⁵, ASTM D1210, una vez se ha dispersado el TiO₂ en el pigmentó, se determina el tamaño de partícula que debe estar entre 6 y 8 hegman, es decir, de 0 micras a 25 micras, respectivamente.⁵⁶Las especificaciones del pigmento, según el certificado de análisis reportado por Andercol y la ficha técnica del producto, se evidencian en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones del pigmento blanco de la empresa Andercol

Aspecto físico		Valor	
Estado físico a 20°C		Líquido	
Aspecto		Pasta manejable	
Color		Blanco	
Olor		Característico	
Composición	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo
Resina poliéster insaturado	% peso	25	60
Pigmento dióxido de titanio	% peso	40	75
Características	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo
Molienda poliéster	Hegman	6	8
Viscosidad brookfield	cP	4500	7500
Densidad	kg/gal	7.7	8.00

Fuente: certificado de análisis Andercol

⁵³ESPINOZA FERNÁNDEZ. Op. Cit. p. 2

⁵⁴Ibíd., p.25.

⁵⁵ American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Fineness of Dispersion of Pigment-Vehicle Systems by Hegman-Type Gage. ASTM D1210. Philadelphia: ASTM international, 2014. 1p.

⁵⁶Sawyer/Hanson. Finura de molienda. [en línea]. Alemania (2018). Grindometros (consultado:12Dic19).Disponible en:<http://www.sawyerhanson.com/uploads/docs/SawyerHanson%20Particle%20size%20chart%201.pdf>

2.3.6 Estireno. El estireno es un hidrocarburo aromático, líquido incoloro que se emplea para reducir la viscosidad y permitir la polimerización del poliéster insaturado. Se obtiene del etileno y el benceno, es muy fuerte y quema la piel. La resina poliéster insaturada, suministrada por Andercol, presenta una cantidad de monómero estireno entre el 25% y el 40% en peso del polímero. Pueden agregarse cantidades adicionales de monómero (estireno, vinil tolueno, metil metacrilato, etc.) como disolvente para adelgazar y proporcionar diferentes características a la resina poliéster⁵⁷. El exceso de estireno, perjudica algunas propiedades en el laminado, la resina pasa a ser poli estireno y no obtiene dureza, genera amarilla miento en las piezas fabricadas, disminuye la resistencia química de la resina y genera un aumento en la temperatura de exotermia durante el ciclo de curado. Las características y especificaciones del monómero estireno empleado actualmente se presentan en la tabla 12.

El monómero estireno es el componente que otorga al polímero rigidez, dureza, resistencia a la ruptura, influye en las propiedades mecánicas y a la resistencia al agua⁵⁸. Este componente se tiende a descomponer con los rayos uv, se amarilla y disminuye el poder ligante ocasionando un defecto denominado *caleo*, en los recubrimientos. El contenido se monómero estireno en la resina aumenta la elongación y absorción de agua, disminuyendo la resistencia mecánica, la resistencia al calor y la resistencia a la intemperie⁵⁹.

Tabla 12. Especificaciones del monómero estireno

Parámetros certificados	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo	Resultado
Pureza de estireno	%	99,60	-	99,94
Contenido de polímero	Ppm	-	10	2
Densidad a 20°C	g/mL	0,901	0,907	0,904
Color	Pt-Co	-	10	5
Humedad – Karl Fischer	Ppm	-	400	251

Fuente: certificado de análisis Inquimicol .

⁵⁷ SCHWEIGGER. Op. Cit.p.98.

⁵⁸ XAVIER RAMIS, Juan. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado. [en línea]. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España: 2006. [Consultado 05, marzo, 2019]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=6661>

⁵⁹PARRILLA

CORZAS. Op. Cit.p.25.

2.3.7 Peróxido Orgánico. El peróxido orgánico es un líquido claro y oloroso, de apariencia transparente. Este compuesto es el iniciador de la reacción de polimerización de la resina poliéster. Se recomienda adicionar de proporción de 1 – 2% según en peso de la resina. La reacción se inicia por la producción de radicales libres que atacan y se adicionan a los dobles enlaces del monómero. El compuesto formado ataca otro enlace y así comienza una reacción en cadena, la cual se detiene cuando la molécula no se encuentra activa, provocando así lo que se conoce como la polimerización de la resina⁶⁰. En la tabla 13, se presentan las especificaciones técnicas del peróxido orgánico empleado para la polimerización de la resina y obtención de la teja en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Este peróxido también denominado metil-etil-cetona o MEK, es una solución al 50 % en dimetil-ftalato, fabricado por la misma empresa Oxider.

Tabla 13. Especificaciones del peróxido orgánico

Características generales	Unidad	Valor
Viscosidad a 20°C	mPa.s	21
Contenido de Oxígeno activo	%	4 – 4,2
Densidad a 20°C	g/cm ³	1,05 ± 0,005
Aspecto físico		Valor
Estado físico		Líquido transparente
Olor		Característico
Color		Incoloro
Solubilidad en agua		Parcialmente en agua

Fuente: certificado de análisis empresa Oxider.

2.4 CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada de las características y propiedades ópticas, físicas y químicas, de cada materia prima empleada en la fabricación de una teja opaca, se determinó la función e influencia de cada componente como se muestra en la tabla 14.

⁶⁰XAVIER RAMIS. Op. Cit. p.34.

Tabla 14. Influencia de cada materia prima en la matriz polimérica.

Nombre del componente	Color	AFECTA O MEJORA	Función
Resina poliéster	Ámbar turbio	Opacidad	Matriz polimérica
Fibra de vidrio	Transparente	Opacidad y resistencia	Refuerzo estructural
Carga seca	Blanco	Volumen	Carga extensora
Dióxido de titanio	Blanco	Opacidad y volumen	Carga extensora
Pigmento blanco	Blanco	Opacidad	Color y opacidad
Monómero estireno	Transparente	Viscosidad y rigidez	Solvente
Meck Peróxido	Transparente	Reactividad	Iniciador de la reacción

Fuente: elaboración propia

El enfoque de este proyecto es evaluar la influencia entre el dióxido de titanio y el pigmento blanco, que son en conjunto con la resina los componentes de la formulación actual que influyen en la opacidad de la teja opaca blanca; poseen un elevado poder cubriente, excelente resistencia a la luz solar, y elevada resistencia a los agentes químicos⁶¹. Además, a partir de la revisión bibliográfica, el diámetro de partícula óptimo para películas opacas debe ser menor a la mitad de la longitud de onda de luz dispersada⁶², luz visible, se encuentra entre 400 nm a 700 nm, es decir, el tamaño de partícula óptimo es de 0.20 μm y 0.35 μm .⁶³

Por esta razón se buscó con el proveedor de dióxido de titanio, DuPont, una referencia de este componente con menor tamaño de partícula al que se emplea actualmente, R902 de 0,405 μm . El proveedor solo maneja una referencia que se adapta a esta solicitud, el dióxido de titanio R706 de 0,36 μm , ligeramente superior al rango de la bibliografía; sin embargo, a partir del cuadro 4, se puede observar que la referencia R706, presenta una mayor proporción de subtono negro carbón, favorable para el objetivo de mayor opacidad, debido a que el color negro, tiene la propiedad de absorber la longitud de luz del rango visible, sin impactar significativamente en el color y apariencia del producto terminado. Además, con base en la tesis de maestría Propiedades ópticas de los polímeros aplicados a

⁶¹ KEYMAN FREIRE. Op. Cit. p.44.

⁶² *Ibíd.*, p.44.

⁶³ *Ibíd.*, p.45.

pinturas decorativa, elaborada por Ana Carolina Keiman FREIRE⁶⁴, recomienda emplear dióxido de titanio con la menor absorción de aceite y un pH de 8, con el fin de garantizar la estabilidad y la dispersión de la carga en la matriz polimérica. Por esta razón se va a evaluar, posteriormente en la fase experimental, el desempeño de estas dos referencias de TiO₂.

Cuadro 4. Comparación de propiedades entre dos referencias de TiO₂

Propiedades físicas	R902	R706
Alúmina	SI	SI
Gravedad específica	4,0	4,0
Valor de estabilización, L/kg	0,25 (0,03)	0,25 (0,03)
Tratamiento orgánico	SI	SI
Color, CIEL*	99,6	99,6
Tamaño medio de partículas*, µm	0,405	0.360
Absorción de aceite	16,2	13.9
pH	7,9	8,2
Subtono negro carbón	11,7	13,8

Fuente: elaboración propia

⁶⁴Ibíd., p.48.

3 MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo describe los detalles sobre materiales, equipos y métodos utilizados en el presente trabajo de investigación. Se incluyen criterios de selección, cantidades y preparación de los materiales y se evalúa la influencia del dióxido de titanio y el pigmento blanco en el proceso de fabricación de una lámina en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Además, describe los ensayos de opacidad para plásticos acorde con normas internacionales. Finalmente, se definen las proporciones apropiadas para obtener el mejor desempeño de opacidad y viscosidad en la formulación de una teja opaca.

3.1 MATERIALES

- Vidrio
- Rodillo
- Marco
- Cinta den mascarar
- Recipiente
- Resina poliéster
- Fibra de vidrio
- Espátula

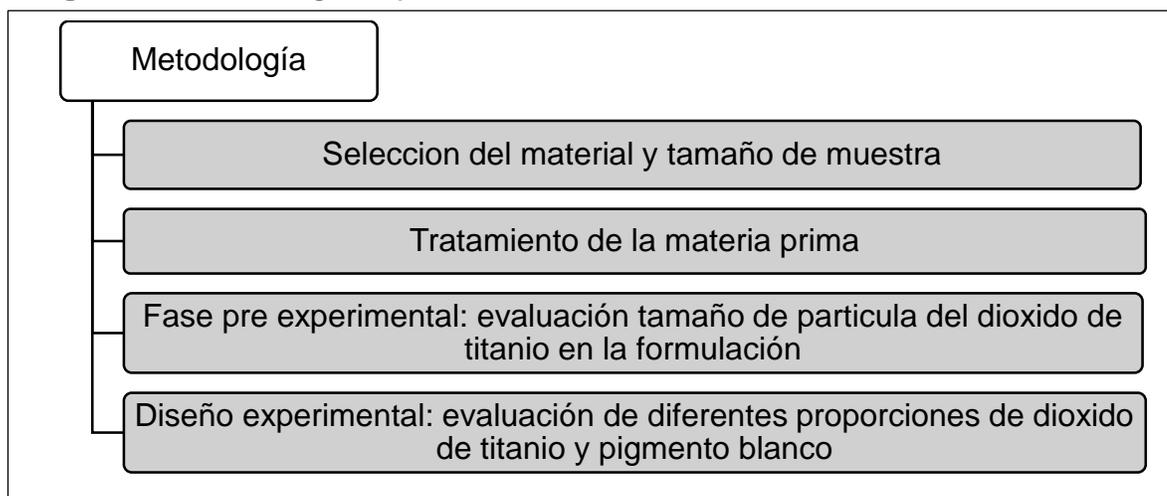
3.2 EQUIPOS

- Balanza analítica
- Agitador del laboratorio
- Viscosímetro
- Durómetro
- Cronómetro
- Termómetro
- Termohigrometro
- Calibrador
- Luxómetro
- Cabina de opacidad
- Emisor de luz

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de este proyecto se ilustra en la imagen 10:

Imagen 10. Metodología experimental



Fuente: elaboración propia

3.3.1 Selección del material y tamaño de muestra. En esta etapa se procedió a seleccionar y cuantificar la materia prima que se requiere para el desarrollo experimental de este proyecto. Con el fin de trabajar con el mismo material en todas las etapas de la investigación, disminuir errores y realizar una comparación precisa.

El tamaño de la muestra se cuantificó teniendo en cuenta la cantidad de material empleado por cada ensayo; viscosidad, tiempo de gel, curado y probeta para medición de transmisión de luz.

Para establecer la cantidad de resina requerida para el ítem 3.3.3, se determinó la cantidad de material, necesaria para la medición de reactividad y viscosidad por tratamiento como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Cantidad de resina requerida en la medición de reactividad y viscosidad

Medición de reactividad	Cantidad de material	Unidad	Método
Gel	100	g	ASTM D2471
Curado	50	g	
Medición de Viscosidad	Cantidad de material	Unidad	Método
Viscosidad brookfield	200	g	ASTM D2196

Fuente: elaboración propia

El tamaño de la probeta para la medición de opacidad, es de 30 cm de ancho por 30 cm de largo, con una desviación máxima de $\pm 0,1$ %, con un espesor promedio de 1,2 mm, desviación máxima de ± 10 % respectivamente. La relación de resina - fibra que se debe mantener durante toda la experimentación es 70% de resina, 30% de fibra. A partir de las ecuación 3, se determinó la cantidad de material requerido por tratamiento, es decir, por probeta, como se muestra a continuación en la tabla 17.

Según las generalidades de la teja que se muestran en el cuadro 3, en el capítulo anterior, el peso de un metro cuadrado de teja debe ser 2,14 kg, para que cumpla con las especificaciones de una teja clase 7 para la compañía, se determinó el peso que debía cumplir cada probeta empleando la ecuación 3, mediante la cual se obtuvieron los datos que se muestran en a tabla 16.

Ecuación 3.
Determinación peso
de cada probeta

$$\frac{A_2 * M_1}{A_1} = M_2$$

Donde:

A₁: un metro cuadrado de teja

M₁: peso teórico (2,14 kg) de un metro cuadrado de teja

A₂: área de cada probeta

M₂: peso teórico de cada probeta

Tabla 16. Cantidad de materia prima empleada en cada probeta

Cantidad de material por tratamiento		Unidad
Área de laminado	0,09	m ²
Peso teórico del lamina	0,1926	kg
30% Resina	0,1348	kg
70% Fibra	0,05778	kg

Fuente: elaboración propia

Con esta información y el diseño experimental de este proyecto se estimó la cantidad total de material requerida, que se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Cantidad total de materia prima empleada en la experimentación

Cantidad total de material		Unidad
Cantidad de tratamientos	21	-
Cantidad de replicas	2	-
Resina total	20,4	kg
Fibra total	2,43	kg

Fuente: elaboración propia

La cantidad total de materias primas para el acondicionamiento de la matriz polimérica, empleando la mayor proporción de dióxido de titanio y pigmento blanco, propuesto para la experimentación, se muestra en la tabla 18:

Tabla 18. Cantidad total de componentes para el acondicionamiento de la matriz polimérica.

Acondicionamiento de la matriz polimérica		
Componente	Masa, kg	%
Resina poliéster	15,11	74,07
Dióxido de titanio	3,02	14,81
Carga seca	1,51	7,41
Pigmento blanco	0,45	2,22
Estireno	0,30	1,48
Total	20,4	100

Fuente: elaboración propia

3.3.2 Condiciones de operación. Durante el desarrollo experimental se realizaron cuatro ensayos; viscosidad, tiempo de gel, curado y probetas para medición de transmisión de luz. Se tomó como referencia la norma NTC 718 de 1999, acondicionamiento de plásticos y materiales aislantes eléctricos para ensayos, adoptando los parámetros de normalización de tiempos, humedad y temperatura⁶⁵, como se muestran en la tabla 19, con el fin de establecer comparaciones confiables, manteniendo las especificaciones antes y durante los ensayos, teniendo en cuenta una tolerancia de temperatura ambiente de ± 2 °C y humedad relativa de $\pm 5\%$.

⁶⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Acondicionamiento de plásticos para ensayo. NTC 718. Bogotá D.C.: NTC, 1999. 3 p.

Tabla 19. Parámetros normalizados para el desarrollo experimental

Parámetros ambientales	Unidad	Valor	
Temperatura ambiente	°C	20	
Humedad relativa	%	40	
Resina líquida (Matriz polimérica)	Unidad	Valor	
Acondicionamiento/Tratamiento	min	30	
Temperatura final después del tratamiento	°C	22	
Probetas de ensayo	Unidad	Valor Min	Valor Max
Elaboración	min	15	20
Temperatura final de la probeta	°C	18	20
Curado	min	40	60
Dureza	Shore D	50	70

Fuente: elaboración propia

La medición de las condiciones ambientales a las que se encontraba el laboratorio de la empresa , se realizó con ayuda del termohigrometro, que se muestra en la imagen 11, ubicado a una distancia de las probetas y equipos donde se realizaron los ensayos mencionados, de entre 25 cm y 50 cm, conforme a la norma.

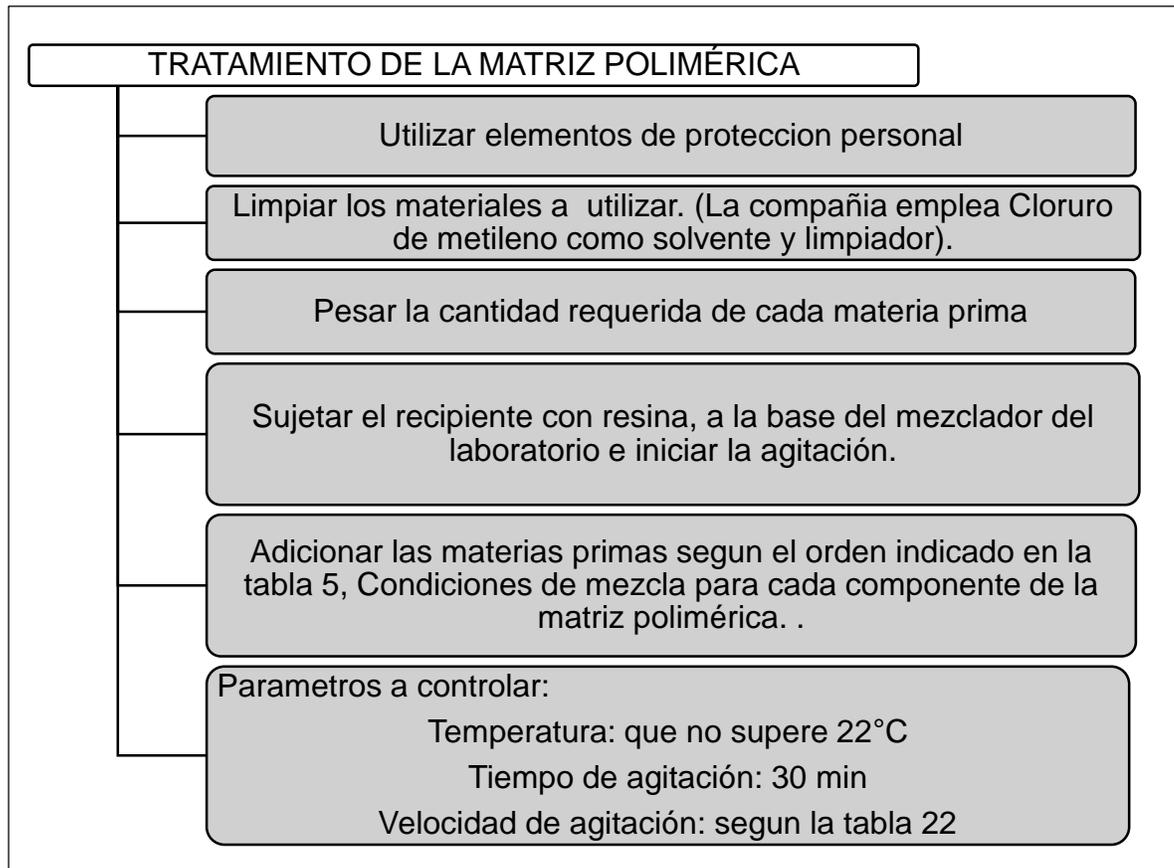
Imagen 11. Termohigrometro digital



Fuente: laboratorio planta de producción

3.3.3 Tratamiento de la matriz polimérica. En la imagen 12 se describe la adecuación o tratamiento que se realizó a la resina para simular las condiciones de proceso, obtener opacidad y el color requerido.

Imagen 12. Protocolo para el tratamiento y adecuación de la matriz polimérica



Fuente: elaboración propia

Para la mezcla de la resina se empleó el agitador del laboratorio de la compañía, en el cuadro 5 se muestran las especificaciones de este equipo.

A continuación, usando la ecuación 4, se estimó la velocidad adecuada a la que se debía emplear el agitador, para dispersar el dióxido de titanio y el carga seca, según el tamaño del disco dispersor y la velocidad de dispersión periférica teórica, mencionada en el ítem 2.3.3 y 2.3.4.

Cuadro 5. Especificaciones del equipo de agitación del laboratorio

Agitador	Motor	Valor	Unidad	
	Marca	Siemens	-	
	Potencia	1,5	HP	
	Velocidad	3440	rpm	
	Peso neto	16	kg	
	Variador de frecuencia		Valor	Unidad
	Velocidad mínima	0,1	rpm	
	Velocidad máxima	2000	rpm	
	Aspa tipo cowles		Valor	Unidad
	Diámetro del disco	8	cm	
	Grosor del disco	1,5	cm	

Fuente: elaboración propia

Ecuación 4. Velocidad periférica

$$Vel (m/s) = D(m) * \pi * \frac{rpm}{60}$$

Fuente: LINA GONZALEZ, ALEJANDRA SALINAS, Propuesta de mejora del proceso productivo en la fábrica de pinturas Alcor S.A.S, consultado: 10/05/2019 Disponible en: Lumieres. Universidad América.

Donde:

Vel (m/s): velocidad periférica

D (m): diámetro del disco dispersor

rpm: velocidad de dispersión

π : numero pi (3,1416)

Los parámetros de velocidad para lograr la dispersión de cada carga se establecen en la tabla 20, la velocidad de dispersión periférica es un dato teórico, el cual permite, a través del tamaño del disco, calcular la velocidad angular del equipo.

Tabla 20. Parámetros de velocidad de dispersión para CaCO₃ y TiO₂

Carga	Parámetro	Valor	Unidad
Carga seca	Velocidad periférica	16	m/s
	Diámetro del disco	0,16	m
	Velocidad del agitador	1910	rpm
Dióxido de titanio	Velocidad periférica	18	m/s
	Diámetro del disco	0,16	m
	Velocidad del agitador	2200	rpm

Fuente: elaboración propia

3.4 EVALUACION DE PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN Y DISPERSIÓN DE LUZ.

Con el fin de evaluar la opacidad (propiedades de transmisión y dispersión de luz) en un laminado plano, elaborado en poliéster reforzado con fibra de vidrio, la empresa , cuenta con una cabina de opacidad, completamente negra, como se muestra en la imagen 13, la cual se describe en la tabla 21, diseñada conforme a la norma NTC 3337.⁶⁶ Esta norma establece dos métodos para medir la transmitancia de un plástico, por espectrofotometría o por receptor luminoso.

Imagen 13. Cámara de opacidad de la empresa



Fuente: elaboración propia

La cámara de opacidad cuenta con tres secciones, al costado izquierdo se ubica el emisor de luz; la compañía posee una luz led para realizar el ensayo, de color blanco, posee una potencia de 30 W, marca Ilumax, con número de referencia ILMPAETOI38215⁶⁷. La segunda sección, se ubica exactamente en la mitad de la cabina, es el soporte de la probeta a evaluar. Por último, al costado derecho se encuentra el receptor de la luz transmitida por el cuerpo evaluado, para este proyecto, el receptor empleado es un luxómetro.

Tabla 21. Especificaciones cámara de opacidad

Descripción	Especificación	Valor / Tamaño	Unidad
Dimensiones	Largo	0,80	m
	Ancho	0,50	m
	Alto	0,50	m
Probeta	Lámina plana	0,30 x 0,30	m

⁶⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos. Determinación de la opacidad y la transmitancia luminosa de plásticos Transparentes. NTC 3337. Bogotá D.C.: NTC, 2007. 2 p.

⁶⁷ GRUPO C&M. Ficha técnica luxómetro LUX29. [Sitio WEB]. Colombia: C&M. [24, diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-LUXOMETRO-LUX29.pdf

Tabla 21 (continuación)

Equipos	Descripción	Características	Valor
Emisor	Luz blanca	Flujo luminoso Voltaje	2050 lumenes 30 W
Receptor	Luxómetro profesional Datalogger	Respuesta espectral CIE fotópica	Niveles de medición desde 0,1 lux

Fuente: elaboración propia

El luxómetro profesional Datalogger versión ALC1000A/CEM8809A, es un instrumento de precisión para medir iluminancia en luxes (lux). Presenta un fotodiodo de silicón de larga vida, estable y filtro de respuesta espectral, en el medidor, como componente sensible a la luz. Las especificaciones de este instrumento se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Especificaciones del instrumento empleado para medir la transmitancia

Instrumento receptor	Descripción		
	Nombre	Luxómetro	
	Marca	Datalogger	
	Referencia	ALC1000A/CEM8809A	
Especificación	Unidad	Valor	
Precisión espectral: CIE V λ función	%	F1' < 6	
Respuesta coseno	%	F2' < 2	
Repetibilidad	%	± 3	
Precisión:			
X > 10000 lux	%	± 3	
X < 10000 lux	%	± 4	
Dimensiones foto detector:			
Largo	mm	115	
Ancho	mm	60	
Alto	mm	20	
Condiciones de uso	Unidad	Valor Min	Valor Max
Temperatura de funcionamiento	°C	0	40
Humedad de funcionamiento	%	0	80

Fuente: elaboración propia

3.5 REACTIVIDAD

El ensayo de reactividad de la resina poliéster insaturada, se realizó en el laboratorio de la compañía, conforme a la norma internacional ASTM D2471, método de prueba estándar para el tiempo de gel y la temperatura exotérmica máxima de las resinas termoendurecibles que reaccionan.⁶⁸ La empresa, realiza este ensayo como parámetro de calidad en la recepción de materia prima y según la referencia de la resina a manejar, cuenta con estándares de tiempo de gel, pico exotérmico y tiempo de curado, que garantizan la procesabilidad en la máquina y la calidad del producto terminado.

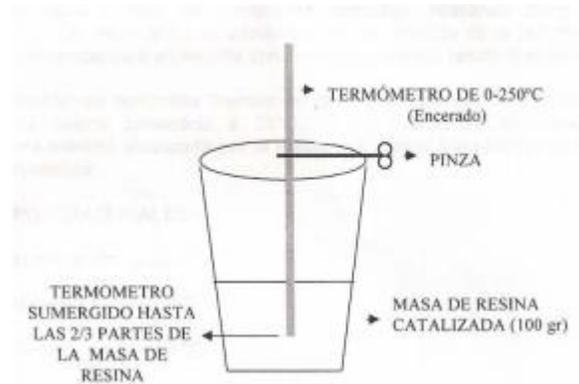
El tiempo de gel se refiere al método usado para determinar el tiempo transcurrido desde la adición del peróxido a la muestra de resina, hasta el punto en el que pasa de estado líquido a un estado viscoso llamado gel⁶⁹. La temperatura exotérmica es la expresión de la energía que produce la reacción de polimerización en la resina poliéster insaturado, mientras cambia de estado líquido a estado sólido, se mide con un termómetro dentro de la muestra a analizar como se ve en la imagen 14, y es la máxima temperatura que alcanza la reacción, en un volumen de 100 g de resina⁷⁰.

⁶⁸ American Society For Testing And Materials. Standard Specification for Glas -Fiber - Reinforced Poliester Maholes. ASTM D2471. Philadelphia: ASTM international, 1991. 2p. [en línea] [consultado:04, agosto, 2019] Disponible en: https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd247199?qclid=EAlaIQobChMIye7M56305AIViLzACh1ZPQ24EAAYASAAEqLRrFD_BwE

⁶⁹ RODRIGUEZ, JERLY. Análisis Del Sistema Catalítico De La Resina De Poliéster Insaturado Para Laminación.[en línea] Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana.Medellin:2014. [Consultado 16 Octubre, 2019]. Disponible en:<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1980/AN%C3%81LISIS%20DEL%20SISTEMA%20CATAL%C3%8DTICO%20DE%20LA%20RESINA%20DE%20POLI%C3%89STER%20INSATURADO%20PARA%20LAMINACION.pdf?sequence=1>

⁷⁰ RODRIGUEZ, JERLY. Análisis Del Sistema Catalítico De La Resina De Poliéster Insaturado Para Laminación.[en línea] Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana.Medellin:2014. [Consultado 16 Octubre, 2019]. Disponible en:<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1980/AN%C3%81LISIS%20DEL%20SISTEMA%20CATAL%C3%8DTICO%20DE%20LA%20RESINA%20DE%20POLI%C3%89STER%20INSATURADO%20PARA%20LAMINACION.pdf?sequence=1>

Imagen 14. Montaje para la determinación de la temperatura exotérmica



Fuente: RODRIGUEZ, JERLY. Análisis Del Sistema Catalítico De La Resina De Poliéster Insaturado Para Laminación.[en línea] Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana.Medellin:2014. [Consultado 16 Octubre, 2019]. Disponible en:<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1980/AN%C3%81LISIS%20DEL%20SISTEMA%20CATAL%C3%8DTICO%20DE%20LA%20RESINA%20DE%20POLI%C3%89STER%20INSATURADO%20PARA%20LAMINACION.pdf?sequence=1>

Para determinar el tiempo que tarda la resina en alcanzar la dureza óptima para el corte y manipulación de las tejas en proceso, se realiza el siguiente procedimiento. Una vez empieza la reacción, se inicia el cronometro, se agita durante un minuto y luego se depositan 50 gramos de resina, en un molde llamado *casting* como se muestra en la imagen 15. Una vez la resina, alcanza el pico exotérmico, empieza el desarrollo de dureza⁷¹, se midió la temperatura del casting por medio de un pirómetro laser digital de propiedad de la compañía, y cuando el casting alcanza una temperatura de 80°C, se empieza a medir la dureza Shore D, con el durómetro como se muestra en el anexo 4.

⁷¹ GIL, Alexander. Guia de manejo de resina poliéster. EAFIT. [en línea] 2012 [consultado: 25 junio 2019] Disponible en:

Imagen 15. Molde y casting para ensayo de dureza



Fuente: elaboración propia

Se registra el tiempo, cuando se alcanza 50 shore D, parámetro de dureza establecido por la compañía.

3.6 VISCOSIDAD DE LA RESINA

La medición de la viscosidad se realizó conforme a la norma ASTM D2196 – 99, métodos de prueba estándar para propiedades reológicas de materiales no newtonianos por viscosímetro rotacional (tipo brookfield).⁷²

Este experimento se ejecutó con el viscosímetro brookfield que se muestra en la imagen 16. Se verificó la calibración del equipo, y a partir de los rangos de medición se estableció que las pruebas se debían realizar con la aguja numero 2 a 20 rpm⁷³, con una temperatura constante a 22°C, de tal forma que el porcentaje de aceptación o precisión de lectura del instrumento se encuentre dentro del intervalo predeterminado de 20% – 80%.⁷⁴ Una vez este ajuste sea correcto, se procede a leer la magnitud de la viscosidad en cP.

⁷² American Society For Testing And Materials. Standard Test Methods For Rheological Properties Of Non-Newtonian Materials By Rotational (Brookfield Type) Viscometer. ASTM D2196. Philadelphia: ASTM international, 1999. 2p.

⁷³ BRICEÑO ROJAS, Jason, GALÁN JIMÉNEZ, Pablo, MENDOZA QUIROGA, Ricardo, MARQUEZ SANTOS, Mauricio. Comportamiento mecánico de un compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de yute. Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. [En línea]. 2014. 2-7. [Consultado 13,marzo,2019]. Disponible en: <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/StudentPapers/SP018.pdf>

⁷⁴ *Ibíd.*, p.5.

Imagen 16. Viscosímetro brookfield



Fuente: elaboración propia

Como parámetro de procesabilidad en máquina, establece que sus resinas, deben tener entre 200 cP y 400 cP; con el fin de asegurar, la humectación y compactación de la resina - fibra, asegurar la interfase del material compuesto. Además, la viscosidad es uno de los factores que más favorece la estabilidad de la suspensión, pues se opone al efecto de segregación gravitacional (precipitación de partículas), a mayor viscosidad, aumenta la resistencia química que presenta el fluido al movimiento relativo de sus moléculas.⁷⁵

3.7 FABRICACIÓN O ELABORACIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO

Las probetas de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio para este trabajo, se fabricaron en el laboratorio de la empresa, bajo la supervisión del técnico químico y el subgerente de producción de la compañía, haciendo uso de los implementos de seguridad requeridos (bata, gafas de seguridad, tapabocas, cofia y guantes). A continuación, se describe el procedimiento para la elaboración de las probetas para los ensayos:

3.7.1 Adecuación de la superficie. Se debe limpiar por completo la superficie donde se va a elaborar la probeta. En este caso, se va a emplear un vidrio, sobre el mesón del laboratorio de la planta, como se muestra en la imagen 17, verificando que la superficie este completamente nivelada. La limpieza se realizó con el solvente cloruro de metileno, posteriormente aplicar 3 capas de desmoldante en la superficie, según indicaciones del proveedor y dejar secar durante 15 minutos.

⁷⁵ GONZÁLEZ, RODRÍGUEZ REYES, SALINAS BARRETO. Op. Cit.p.34.

Imagen 17. Superficie de fabricación de las probetas



Fuente: Laboratorio planta de producción

3.7.2 Tamaño y espesor de la probeta. El tamaño y espesor de las probetas empleadas en este trabajo, están condicionadas a la cabina de opacidad de la compañía, para realizar la medición de transferencia de luz y opacidad, conforme a la norma NTC 3337, Determinación de la opacidad y la transmitancia luminosa de plásticos⁷⁶, la cual está adaptada a la norma internacional ASTM D1003:2000⁷⁷. Las probetas son láminas fabricadas en resina poliéster con fibra de vidrio, con geometría cuadrada, con un tamaño de 30 cm por 30 cm. Se realiza colocando un marco, sobre la superficie mencionada en el ítem 3.7.1, el cual posee el espesor requerido, conforme a la clase de la teja que se requiere fabricar. En este caso, las condiciones establecidas en la delimitación del trabajo se establecieron como clase 7, espesor de 2,2 mm. Este marco se adhiere a la superficie con cinta de enmascarar con el fin de asegurar el soporte durante la elaboración de la probeta, como se muestra en la imagen 18.

⁷⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos. Determinación de la opacidad y la transmitancia luminosa de plásticos Transparentes. NTC 3337. Op. Cit.p.3.

⁷⁷ American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. ASTM D1003. Philadelphia: ASTM international, 2000. 3p.

Imagen 18. Marco de fabricación de probetas



Fuente: Laboratorio planta de producción

3.7.3 Alistamiento resina poliéster y fibra de vidrio . Una vez preparada la resina, como se indica en el ítem 3.4 tratamiento de la matriz polimérica, se procede a pesar la cantidad requerida de resina y fibra de vidrio, conforme a la relación que emplea la compañía para este producto que corresponde al 30% de resina poliéster insaturada y el 70% de fibra de vidrio picado, conociendo que el peso teórico de un laminado de 1,2 mm corresponde a 4,44 kg por m². Este procedimiento se realiza con una balanza analítica, marca Lexus, con tres cifras significativas y los cálculos establecidos en el ítem 3,6 tamaños de muestras. Como se muestra en la imagen 19, se pesa la resina requerida y se cataliza al 2%, una vez agregado el peróxido, se toma el tiempo con el cronómetro y se agita durante un minuto, con el fin de homogenizar la resina y el iniciador.

Imagen 19. Alistamiento de la resina para la elaboración de las probetas



Fuente: Laboratorio planta de producción

3.7.4 Aplicación de la resina. Luego de iniciada la reacción de polimerización de la resina poliéster, se tienen entre 12 y 15 minutos para realizar el laminado, puesto que después de este tiempo la resina gelifica, aumenta su viscosidad y pierde la maleabilidad. La resina se debe aplicar en el centro del molde; posteriormente, con un rodillo, se distribuye la resina por todo el tamaño de la pieza, como se ilustra en la imagen 20. Este procedimiento ayuda a la resina a desairearse, lo cual es muy importante para evitar el aire en el laminado final.

Imagen 20. Aplicación y distribución de la resina en el molde



Fuente: Laboratorio planta de producción

3.7.5 Humectación entre la resina poliéster y la fibra de vidrio. Cuando se tiene completamente distribuida la resina en el molde, se adiciona la cantidad requerida de fibra de vidrio, que cubra toda la superficie del marco. Posteriormente, se rola, imprimiendo presión a la resina y la fibra con el fin de garantizar una buena compactación entre los componentes. Se deja de rolar, cuando se percibe la humectación total de la fibra de vidrio y la resina (una sola fase), este procedimiento, el cual se ilustra en la imagen 21, también ayuda a eliminar el aire acumulado entre las fases del material compuesto.

Imagen 21. Humectación de la resina poliéster y la fibra de vidrio



Fuente: Laboratorio planta de producción

3.7.6 Laminación de la probeta. El proceso de laminación consiste en adicionar el papel tratado sobre la superficie del laminado. El papel empleado tiene la propiedad de adherirse al compuesto y proporciona proyección uv al producto terminado si lo requiere. Al colocar el papel sobre la superficie, con la ayuda de una espátula, se retira el aire y se compacta el laminado, como se muestra en la imagen 22.

Imagen 22. Laminación de la probeta



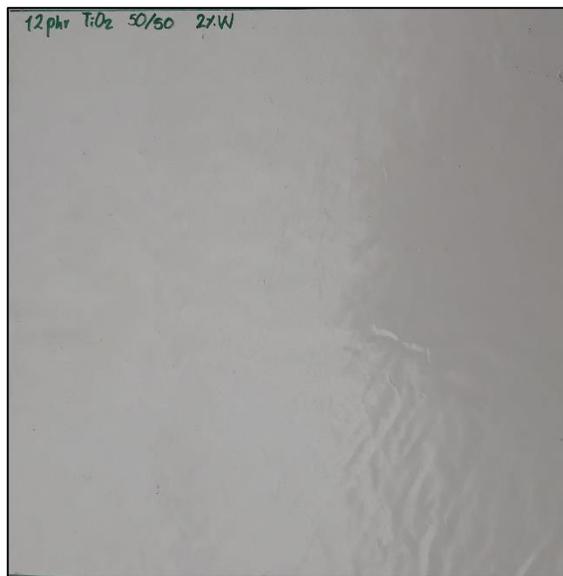
Fuente: Laboratorio planta de producción

Una vez realizado este procedimiento, el laminado se observa sin poros, el papel completamente adherido y la superficie uniforme.

3.7.7 Desmolde. Esta etapa se desarrolla luego de obtener el curado de la pieza. El parámetro para desmoldar la probeta es la dureza shore D, que debe ser 50 shore D, para evitar la fractura del laminado y cortar el desperdicio lateral. Este parámetro está establecido en los protocolos de la compañía. Durante el proceso se debe asegurar que la teja tenga como mínimo una dureza de 50 shore D⁷⁸.

3.7.8 Etiquetado. Posterior al desmolde, se identifica cada probeta o laminado, con la proporción de dióxido de titanio y pigmento blanco según la formulación del acondicionamiento de la matriz polimérica que corresponda, como se muestra en la imagen 23.

Imagen 23. Identificación del laminado en la fase experimental



Fuente: elaboración propia

En los laminados de la fase experimental, el primer número, en este caso el 12 corresponde a la concentración de dióxido de titanio; el 50/50, especifica la proporción de la combinación de las dos referencias de TiO₂ que se están empleando en este trabajo de grado. El 2%W, expresa el porcentaje de pigmento blanco de referencia Andercol adicionado a la matriz polimérica.

Las probetas de la fase pre experimental se identifican solo con la proporción de cada referencia de dióxido de titanio, puesto que se realiza al 0% de pigmento blanco; ejemplo 50% R706 / 50% R902, seguido del número de ensayo, M1 si corresponde al primer tratamiento, o M2 si corresponde a una réplica.

⁷⁸ TREJOS. Op. Cit.p.11.

3.8 PRE EXPERIMENTACIÓN

Para la realización de la fase pre experimental, se evaluó el desempeño de dos tamaños de partícula distintos de dióxido de titanio; la referencia actual que emplea la compañía R902 de 0,42 μm y la alternativa propuesta R706 de 0,36 μm , las dos suministradas por la línea Ti-Pure® de la compañía DuPont™⁷⁹, con el fin de identificar la proporción que provee menor traslucidez en el laminado.

Esta experimentación se realizó con 0% de pigmento blanco en la formulación, manteniendo constante el porcentaje de dióxido de titanio total de la formulación actual. A continuación, en el cuadro 8, se muestran los niveles o proporciones de cada tamaño de partícula seleccionado para la pre experimentación.

Cuadro 7. Pre experimentación

Factor de tratamiento Tamaño de partícula	Proporción de tamaño de partícula TiO ₂	
	0,40 μm	0,36 μm
Niveles	100%	0%
	75%	25%
	50%	50%
	25%	75%
	0%	100%

Fuente: elaboración propia

En esta fase, se evalúa la viscosidad de la matriz polimérica, y traslucidez del laminado, de cada nivel de combinación de tamaños de partícula de TiO₂, con el fin de seleccionar la mejor alternativa para el diseño de experimentos, teniendo en cuenta, que las dos referencias de dióxido de titanio, poseen el mismo costo.

En el cuadro 9 se establecen las convenciones de las diferentes alternativas de combinación de tamaños de partícula de TiO₂, asignando una letra para cada uno de las proporciones evaluadas.

⁷⁹ CHEMOURS. Dióxido de titanio Ti-Pure™ R-902+. [Sitio WEB]. Colombia: Chemours Company. [16, febrero, 2017]. Disponible en: https://www.chemours.com/Titanium_Technologies/es_US/products/902plus/

Cuadro 8. Convenciones de alternativas tamaño de partícula TiO₂

R902 (0,40 µm)	R706 (0,36 µm)	Proporción
100%	0%	A
75%	25%	B
50%	50%	C
25%	75%	D
0%	100%	E

Fuente: elaboración propia

3.8.1 Comportamiento de la viscosidad. La medición de la viscosidad se realizó conforme al ítem 3.5 descrito anteriormente. Se realizó un tratamiento, y dos réplicas de cada proporción de tamaño de partícula de dióxido de titanio, obteniendo los resultados expresados en la tabla 23:

Tabla 22. Resultados de viscosidad con variación en el tamaño de partícula del TiO₂

Medición a 22°C Proporción	Ensayo 1 Viscosidad cP	Ensayo 2 Viscosidad cP	Ensayo 3 Viscosidad cP
A	302	298	278
B	309	305	285
C	323	316	299
D	338	341	320
E	355	360	316

Fuente: elaboración propia

A partir de la tabla 23, se determinó el valor máximo, el promedio, la desviación estándar, la varianza y el porcentaje de error de las mediciones, por cada nivel evaluado, como se muestra en la tabla 24.

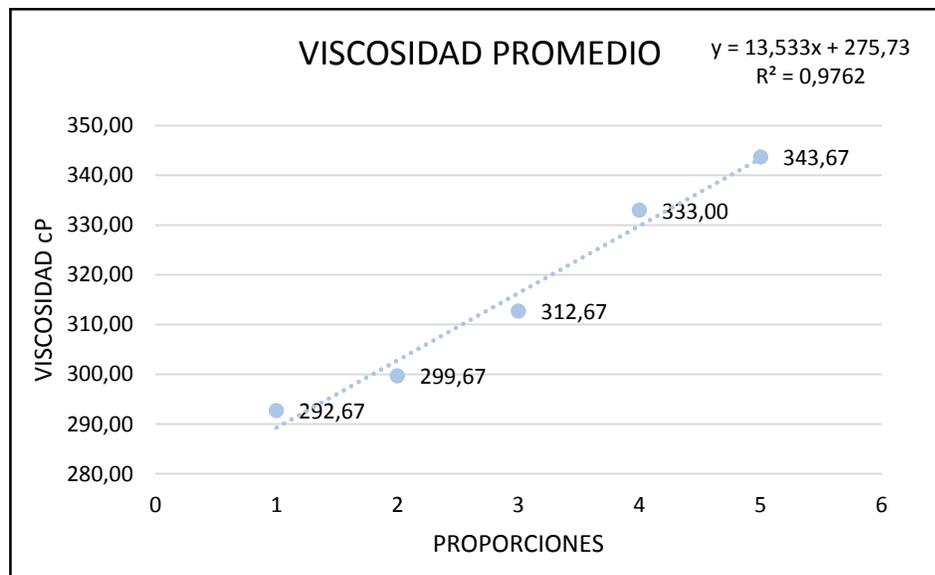
Tabla 23. Análisis estadístico de los resultados de viscosidad por cada proporción.

Proporción	Máximo (cP)	Promedio (cP)	Desviación estándar	Varianza
A	302	292.67	12.86	165.33
B	309	299.67	12.86	165.33
C	323	312.67	12.34	152.33
D	341	333.00	11.36	129.00
E	360	343.67	24.09	580.33

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

En los resultados de la tabla 24, se observa que ningún nivel de combinación entre los dos tamaños de partícula de dióxido de titanio, superan 400 cP, parámetro de procesabilidad de la compañía, siendo la viscosidad máxima durante la experimentación 360 cP, el cual corresponde al 100% del menor tamaño de partícula, es decir, 0,36 μm , referencia TiO_2 - R706, esta proporción, presenta el mayor valor de desviación estándar, debido a la inestabilidad de la partícula, la cual puede generar mayor o menor aglomeración, lo cual puede afectar la dispersión de esta carga. En la gráfica 1, se evidencia el comportamiento de la viscosidad promedio de cada nivel evaluado. Se observa un aumento de viscosidad al aumentar la proporción del menor tamaño de partícula evaluado.

Grafica 1. Comportamiento promedio de la viscosidad según la proporción del tamaño de partícula de TiO_2 .



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

3.8.2 Comportamiento de la traslucidez. La medición de traslucidez de los laminados mencionados en el ítem 3.6 fabricación o elaboración de probetas de ensayo, se realizó conforme al ítem 3.4 evaluación de propiedades de transmisión y dispersión de luz mencionado anteriormente, se realizó un tratamiento, y dos réplicas de cada proporción según el tamaño de partícula de dióxido de titanio, descritos en la tabla 20, pre experimentación, obteniendo los resultados expresados en la tabla 25.

Tabla 24. Resultados de traslucidez con variación en el tamaño de partícula del TiO₂.

Proporción	Ensayo 1 Traslucidez (lx)	Ensayo 2 Traslucidez (lx)	Ensayo 3 Traslucidez (lx)
A	0,40	0,60	0,50
B	0,60	0,60	0,40
C	0,30	0,50	0,50
D	0,50	0,70	0,60
E	0,60	0,60	0,70

Fuente: elaboración propia

Los datos recopilados de traslucidez, establecen la relación de opacidad obtenida a partir de la variación del tamaño de partícula de dióxido de titanio, con 0% de pigmento blanco, este último será evaluado posteriormente en el diseño experimental.

La tabla 25, muestra el valor promedio, la desviación estándar y la varianza, de los datos recopilados en la tabla 26. Además, se tuvieron en cuenta las especificaciones de la tabla 19, en la que se proporciona la cantidad de luz incidente que emite la lámpara blanca, empleada en este ensayo, que corresponde a 2050 lúmenes, en un área de 0,25 m². Estos datos se usan para estimar la cantidad de lux incidentes en el laminado durante la experimentación⁸⁰, utilizando la ecuación 5.

Ecuación 5. Conversión de lux a lumen por metro cuadrado

$$1 \text{ lm/m}^2 = 1 \text{ lx}$$

Fuente: Cantidad de luz para una habitación. [En línea] 2018 [consultado 26 septiembre 2019] Disponible en: <https://www.consumer.es/bricolaje/como-calcularla-cantidad-de-luz-apropiada-para-una-habitacion.html#targetText=luminaci%C3%B3n%20ser%C3%A1%20de%20100%20lx>.

Estimación de la cantidad de luz incidente:

$$\frac{2050 \text{ lm}}{0,25 \text{ m}^2} = 8200 \text{ lx} = I$$

El valor I, es esencial para la estimación del valor de transmitancia y absorbancia, es un valor constante para la experimentación de este proyecto.

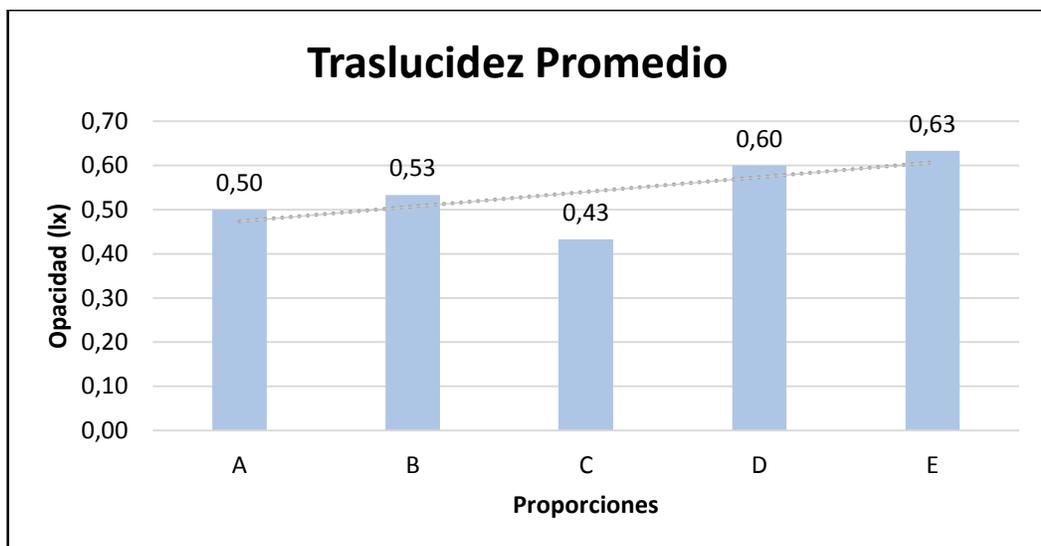
Tabla 25. Resultados de traslucidez por cada proporción de TiO₂

Proporción	Promedio (lx)	Desviación Estándar	Varianza
A	0,50	0,10	0,010
B	0,53	0,12	0,013
C	0,43	0,12	0,013
D	0,60	0,10	0,010
E	0,63	0,06	0,003

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

En la tabla 26, se observa que los resultados de traslucidez se encuentran entre 0,4lux y 0,7 lux, como se muestra en la gráfica 2.

Grafica 2. Comportamiento promedio de la traslucidez según la proporción del tamaño de partícula de TiO₂.



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de los datos de traslucidez promedio de los tres ensayos que se muestran en la tabla 26. Por literatura, el comportamiento esperado de los datos es que a menor tamaño de partícula, se obtendría menor traslucidez y mayor opacidad⁸¹; sin embargo, según los resultados obtenidos, se observa que la combinación en proporciones iguales de 50%R902 y 50%R706,

⁸¹ Cantidad de luz para una habitación. [en línea] 2018 [consultado 26 septiembre 2019] Disponible en: <https://www.consumer.es/bricolaje/como-calculer-la-cantidad-de-luz-apropiada-para-una-habitacion.html#targetText=iluminaci%C3%B3n%20ser%C3%A1%20de%20100%20lx>.

genera la menor opacidad de los niveles evaluados. El 100% de R706 obtiene una mayor traslucidez, es decir menor opacidad, lo cual, se puede presentar puesto que esta referencia al poseer un menor tamaño de partícula necesita una mayor cantidad de material para producir un mejor desempeño, y en esta pre experimentación, la cantidad de dióxido de titanio se mantiene constante. Adicionalmente, la referencia R706, aumenta en 60 cP la viscosidad de la matriz polimérica, lo cual perjudica la dispersión del material particulado en la resina⁸². También, a menor tamaño de partícula, menor estabilidad, por lo cual, se aumenta la probabilidad de generar aglomeración entre las partículas y mala distribución de los componentes en el material compuesto⁸³. La proporción actual, 100% de R902, presenta una traslucidez de 0,50 lux, siendo este valor, el segundo, con menor de traslucidez.

3.8.3 Selección de la mejor proporción de tamaño de partícula. Para realizar la selección de la proporción apropiada de tamaño de partícula de TiO₂ que cumpla con la mayor opacidad, es decir, menor traslucidez, y se encuentre dentro del rango de viscosidad aceptable para el caso en estudio, se tomó como base el modelo de una matriz Pugh, basados en los siguientes artículos: “3DCAD conceptual design of the next-generation impulse turbine using the Pugh decision-matrix.”⁸⁴ y “Applied digital library project management using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations.”⁸⁵. La metodología de decisión multicriterio Pugh, es una técnica cuantitativa que se utiliza en ingeniería para evaluar y elegir una opción de una lista de posibles alternativas⁸⁶. Primero, se establecen los criterios que son relevantes para llevar a cabo la selección de la mejor proporción de tamaño de partícula, de acuerdo con el criterio de la empresa. Posteriormente, se les asigna un valor que

⁸² KEYMAN FREIRE, Ana Carolina. Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. [en línea]. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, México: 2011. [Consultado 23, enero, 2019]. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2012/abril/0679331/Index.html>. P 31

⁸³ Op. Cit. p 32

⁸⁴ THAKKER, A., et al. 3DCAD conceptual design of the next-generation impulse turbine using the Pugh decision-matrix. Elsevier. [en línea]. 2008. 9 p. [Consultado 2, julio, 2019]. ISSN 2676-2684. Disponible en: <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Thakker,%202009.%203DCAD%20conceptual%20design%20of%20the%20next-generation%20impulse%20turbine%20using%20the%20Pugh%20decision-matrix.pdf>

⁸⁵ CERVONE, H. Frank. Applied digital library project management using Pugh matrix analysis in complex decision making situations. Emerald group publishing limited. [en línea]. 2009,25 (4). 5 p. [Consultado 5, julio, 2019]. Disponible en: <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Cervone,%202009.%20Applied%20digital%20library%20project%20management%20Using%20Pugh%20matrix%20analysis%20in%20complex%20decision-making%20situations.pdf>

⁸⁶ PUGH, S. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. EE.UU.: Addison-wesley publishing company, 1991. p. 5. ISBN 9780201416398.

varía entre 1 y 4, el cual corresponde a la importancia que posee cada criterio definido por la empresa, siendo el número 4 el de mayor importancia y 1 el de menor.

Las convenciones descritas anteriormente, en el cuadro 7, se usaron en la tabla 27, Matriz de selección de la proporción de tamaño de partícula de TiO₂.

Tabla 26. Matriz de selección de la proporción tamaño de partícula TiO₂

Criterios de selección	Importancia	A	B	C	D	E
Costo de las materias primas	4	0	0	0	0	0
Traslucidez del laminado	3	0	-1	+1	-1	-1
Viscosidad de la matriz polimérica	1	0	-1	-1	-1	-1
Total		0	-4	2	-4	-4

Fuente: elaboración propia

Para la elección de la proporción más adecuada de dióxido de titanio en la formulación, se calificó cada combinación (A, B, C, D, E) de la siguiente forma⁸⁷:

0: hace referencia a la característica que no es relevante, ya que, se comporta de la misma forma que la proporción actual de tamaño de partícula.

+1: Hace referencia al criterio que prevalece, ya que, se comporta de una mejor manera en comparación con la proporción actual de tamaño de partícula.

-1: Hace referencia al criterio que se comporta desfavorablemente respecto a la proporción actual de tamaño de partícula.

Para hallar el valor total de cada uno de los criterios, se multiplicaron los valores asignados a cada criterio por la calificación que se le dio a cada proporción. Luego, se sumó el total de estas multiplicaciones para cada combinación y se eligió el de mayor valor, el cual corresponde a la proporción 50% R902 de 0,42 micras - 50% R706 de 0,36 micras (alternativa C).

Esta combinación seleccionada, no cambia el costo de materias primas en la formulación, puesto que la nueva referencia presenta el mismo costo que la actual, los resultados de translucidez fueron los más favorables entre las alternativas evaluadas, la viscosidad se encuentra dentro del rango de procesabilidad establecidos por la compañía.

⁸⁷ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena, CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. [en línea]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017 [Consultado 17, julio, 2019]. Disponible en: file:///C:/Users/lenovo/Downloads/matriz%20de%20seleccion.pdf

3.9 EXPERIMENTACIÓN

Con base en la fase pre experimental, en la que se encontró una alternativa con mejor desempeño, disminuyendo la traslucidez en la teja al usar dos tamaños de partícula de dióxido de titanio rutilo, de la marca Du Pont, se va a evaluar un diseño experimental, con el fin de identificar la influencia de diferentes proporciones de TiO₂ y pigmento blanco en la traslucidez de la teja en PRFV.

Además, se evaluaron cambios en la reactividad y viscosidad, como parámetros de aceptación de la compañía.

3.9.1 Selección niveles de diseño experimental. El criterio para la selección de los niveles empleados en el diseño experimental se desarrolló en conjunto con el gerente de producción de la compañía. Se realizó una comparación de costos de materia prima cambiando diferentes proporciones de dióxido de titanio y pigmento blanco como se muestra en la tabla 28, manteniendo constante los demás componentes de la formulación.

Tabla 27. Costo de un kilogramo de formulación, con diferentes porcentajes de pigmento blanco y dióxido de titanio

Costo 1 kg % TiO ₂	% Pigmento Blanco			
	2,5	2	1	0
20	\$ 32.576,90	\$ 32.325,03	\$ 31.821,30	\$ 31.317,57
18	\$ 28.642,60	\$ 28.418,72	\$ 27.970,96	\$ 27.523,20
16	\$ 21.245,97	\$ 21.078,06	\$ 20.742,24	\$ 20.406,42
12	\$ 24.236,35	\$ 24.040,45	\$ 23.648,66	\$ 23.256,87

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

El costo base, para la comparación son los porcentajes actuales, 18% dióxido de titanio y 2,5% pigmento blanco, los cuales se mencionan en el ítem 2.3. Formulación. Los porcentajes de pigmento blanco, se seleccionaron con el fin de disminuir el porcentaje de este en la formulación, puesto que esta materia prima tiene el mayor costo por kilo de los aditivos que se le agregan a la matriz polimérica y evaluar el desempeño del TiO₂, empleando la combinación de tamaños de partícula seleccionada en el ítem 3.7.4. Cabe resaltar, que se debe conservar constante la cantidad de niveles evaluados por factor durante toda la experimentación. En la tabla 29 se observa que al evaluar el 20% de dióxido de titanio con el 2,5% y el 2% de pigmento blanco el costo de materia prima aumenta, sin embargo, para con las otras dos proporciones disminuye este valor, por ende, es una opción viable a evaluar. Adicionalmente, se van a evaluar tres porcentajes de dióxido de titanio, menores a la concentración empleada actualmente, con el objetivo de disminuir cantidad de materia prima, costo y tiempo de preparación de la matriz polimérica.

En el cuadro 10, se presentan los cuatro niveles seleccionados para cada factor del diseño experimental de este proyecto.

Cuadro 9. Niveles de cada factor del diseño de experimentos

Niveles	
Pigmento Blanco (%)	Dióxido de Titanio (%)
2,5	22
2	20
1	16
0	12

Fuente: elaboración propia

3.9.2 Evaluación de la reactividad del diseño experimental. Con el fin de identificar el comportamiento de la reactividad, de la matriz polimérica, en los niveles mencionados en el cuadro 9, se realizaron curvas de reactividad siguiendo el ítem 3.6 y la norma internacional ASTM D2471, método de prueba estándar para el tiempo de gel y la temperatura exotérmica máxima de las resinas termoendurecibles que reaccionan.⁸⁸

Este desarrollo experimental se realizó evaluando los cuatro niveles de dióxido de titanio del diseño experimental y dos niveles de pigmento blanco; un nivel alto, que corresponde al 2,5% de pigmento blanco, como máxima concentración evaluada; y un nivel bajo, que corresponde al 0% de pigmento blanco como mínima concentración disponible. En la tabla 30, se muestra los resultados obtenidos del tiempo de gel, pico exotérmico y tiempo de curado, de cada proporción evaluada.

Tabla 28. Comportamiento de la reactividad del diseño experimental

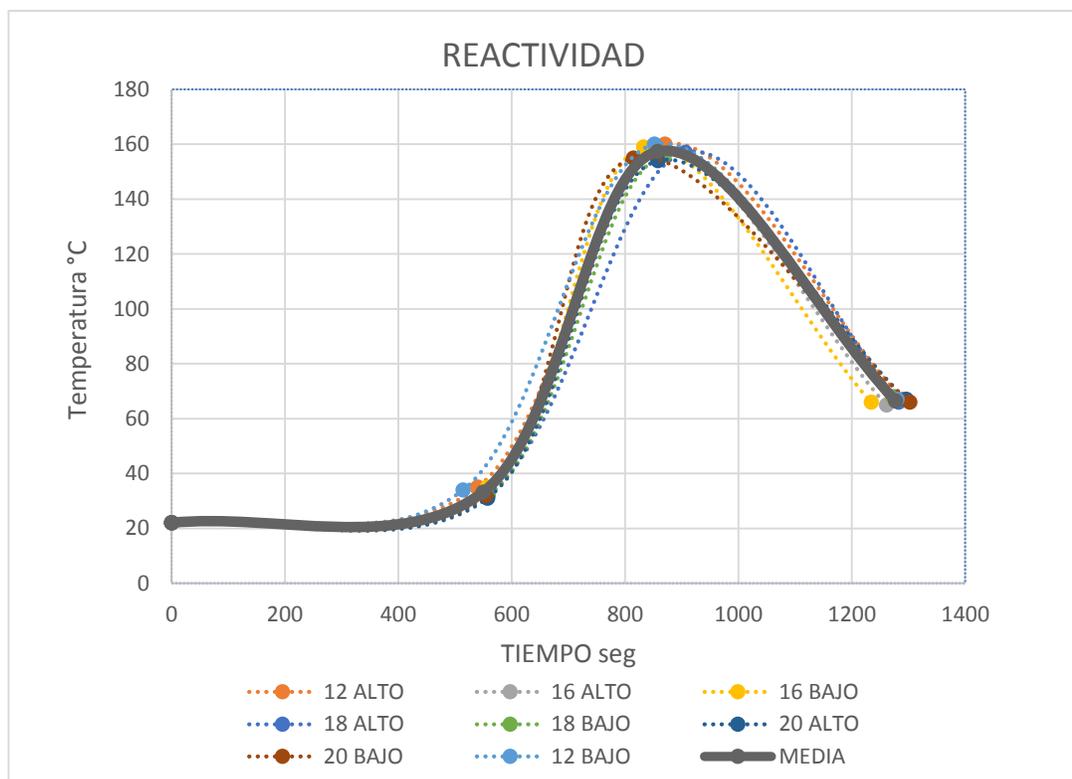
Niveles		Tiempo de Gel		Pico Exotérmico		Dureza	
Pig. Blanco	%TiO ₂	°C	s	°C	S	°C	s
Alto		35	540	160	870	67	1289,4
Bajo	12	34	514,2	160	852	67	1279,8
Alto		34,6	559,8	158	854,4	65	1261,2
Bajo	16	35	556,8	159	832,8	66	1234,2
Alto		31,5	555	157	906	66	1282,8
Bajo	20	32	558,6	156	869,4	68	1272
Alto		31	557,4	154	858	67	1296
Bajo	22	32	553,8	155	814,8	66	1302
Promedio		33,14	549,45	157,38	857,18	66,50	1277,18
% Desviación		5,06	2,83	1,44	3,16	1,39	1,70

Fuente: elaboración propia

Al comparar los rangos de reactividad estándar que maneja la compañía , mencionados en el ítem 3.5 Reactividad, ningún resultado de la tabla 29 se encuentra por fuera del estándar, es decir, todos los niveles evaluados son viables bajo el parámetro de reactividad.

La grafica 3, muestra las curvas de reactividad de todos los niveles evaluados en el diseño experimental. Todos los ensayos se realizaron con temperatura inicial de 22°C. La propagación de los datos con respecto a la media que se percibe en la gráfica 4 y el resultado obtenido de desviación estándar relativa respecto a todas las mediciones, no supera un 5,5%, por lo que se puede concluir que la variación de estos niveles de concentración de dióxido de titanio y pigmento blanco, sobre la resina Cristalan 1967 de Andercol, no proporciona cambios significativos que impliquen realizar ajustes de reactividad adicionando promotores como cobalto, lo cual es muy favorable para el desarrollo de este proyecto, puesto que no se agrega ninguna materia prima al proceso.

Grafica 3. Curva de reactividad con diferentes concentraciones de TiO₂ y pigmento blanco.



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

La concentración máxima de pigmento fue 3% y al disminuir esta proporción, no se observaron cambios significativos en la reactividad de la matriz polimérica, lo cual es congruente con las recomendaciones de proceso suministradas en la ficha

técnica del pigmento de la compañía andercol, en la que se recomienda emplear una concentración máxima del 10% respecto al peso de la resina⁸⁹, con el fin de evitar cambios en el proceso de curado, ya sea retardando o acelerando significativamente la matriz polimérica.

Las gráficas comparativas por cada nivel de concentración de dióxido de titanio, se pueden observar en los anexos 6, 7, y 8. En ellos no se observan diferencias relevantes en el comportamiento de las curvas. Además, todas cumplen con los parámetros mencionados en el cuadro 7, parámetros para garantizar las condiciones normales de operación en la máquina de procesamiento continuo.

3.9.3 Diseño experimental . Se realizó un diseño de experimentos factorial con una réplica⁹⁰, puesto que se desea evaluar los efectos e interacciones existentes entre la concentración de dióxido de titanio y el pigmento blanco, con respecto a la opacidad de un laminado en PRFV. Teniendo una idea clara del número de niveles a evaluar, determinado en el ítem 3.9.1, se establece que esta experimentación corresponde a un diseño 4², el cual proporciona 16 combinaciones, más la réplica, para un total de 32 tratamientos.

La concentración de dióxido de titanio y pigmento blanco, corresponden a las variables de entrada, de carácter categórico, en los que se va evaluar 4 niveles de concentración para el dióxido de titanio y cuatro para el pigmento blanco, manteniendo constante las proporciones de los demás compuestos de la formulación actual. La variable respuesta, o de salida de este diseño experimental, es la traslucidez del material compuesto, mediante el procedimiento descrito en el ítem 3.4 evaluación de propiedades de transmisión y dispersión de luz.

⁸⁹ Andercol SA. Pasta pigmento Cristalan, Ficha técnica .[en línea]Medellín.

2009.[consultado 10 de agosto 2019]. Disponible en: www.andercol.com.co . pg 1

⁹⁰ Lara Porras, A.M. (2000). “Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS.” Proyecto Sur de Ediciones

Tabla 29. Diseño experimental

Variables de entrada	Factor tratamiento	
	TiO₂ (%)	Pigmento Blanco (%)
Niveles	22	2.5
		2
		1
		0
	20	2.5
		2
		1
		0
	16	2.5
		2
		1
		0
	12	2.5
		2
		1
		0

Fuente: elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en la fase pre experimental de este proyecto, el porcentaje empleado de dióxido de titanio corresponde a una proporción 50% de R902 y 50% de R706, como se mencionó en el ítem 3.8.5.

En la Tabla 31, se muestran los resultados obtenidos de la medición de traslucidez realizada a un laminado en PRFV, de 1,2 mm de espesor promedio, fabricado con la concentración de dióxido de titanio y pigmento blanco correspondientes, con un parámetro de dureza de 50 shore D. La traslucidez fue medida con un luxómetro, cuantificando la cantidad de lux que pasan a través de una lámina cuadrada de 30 cm* 30cm, con una proporción 30% de matriz polimérica y 70% de fibra.

Tabla 30. Resultados de traslucidez de los laminados en PRFV

Factores del tratamiento		Traslucidez (Ix)		
TiO ₂ (%)	Pig. Blanco (%)	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Promedio
22	2.5	0	0	0,00
	2	0	0,1	0,05
	1	0,2	0,1	0,15
	0	0,5	0,4	0,50
20	2.5	0,2	0	0,10
	2	0,2	0,3	0,25
	1	0,7	0,7	0,73
	0	0,8	0,9	0,84
16	2.5	0,6	0,7	0,62
	2	0,6	0,8	0,69
	1	0,7	0,9	0,80
	0	0,9	0,9	0,87
12	2.5	1,5	1,9	1,71
	2	1,9	1,8	1,87
	1	1,9	1,6	1,73
	0	2,0	2,8	2,42

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

3.9.4 Análisis de resultados. Para el análisis del diseño de experimentos se utilizó el software Minitab 17 en su modo de prueba de 30 días⁹¹, con él cual se realizó un análisis ANOVA bidireccional, que permite evaluar si los efectos de dos factores en una variable de respuesta son de interés.⁹² Esta herramienta permitió reconocer, si los niveles de concentración evaluados de dióxido de titanio y pigmento blanco empleados en la formulación de una teja en poliéster reforzado con fibra de vidrio, ejercen algún efecto en su traslucidez u opacidad, bajo el espectro visible en longitudes de onda entre 320 nm - 400 nm. Además, se buscó identificar el comportamiento de esta variable con respecto a cada cambio de nivel en cada factor y sí existe una interacción entre ellos, es decir, “el efecto de uno depende del nivel al que se encuentra el otro”.

En este trabajo de grado, la hipótesis nula planteada para el experimento es: H0: $\mu A1 = \mu A2 = \mu A3$, no Existe efecto de A; H0: $\mu B1 = \mu B2 = \mu B3$, no Existe efecto de B; H0: $\mu AB1 = \mu AB2 = \mu AB3$, no hay interacción AB. Lo que quiere decir, que sin importar la cantidad de pigmento blanco y dióxido de titanio que se le agregue a la matriz polimérica, la variable respuesta analizar, la traslucidez, no cambia; mientras

⁹¹ Lara Porras, A.M. (2000). “Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS.” Proyecto Sur de Ediciones

⁹²Ibit . Op cit p56

que la hipótesis alternativa es: $H_0: \mu A1 \neq \mu A2 \neq \mu A3$, Existe efecto de A; $H_0: \mu B1 \neq \mu B2 \neq \mu B3$, Existe efecto de B; $H_0: \mu AB1 \neq \mu AB2 \neq \mu AB3$, hay interacción AB. Lo cual expresa que la variable respuesta, depende de la cantidad de pigmento blanco y dióxido de titanio adicionado a la matriz polimérica.

A continuación, se muestran las gráficas de interacción y la tabla ANOVA con una réplica. Cabe destacar que el programa calcula un valor-P, el cual compara con un nivel de significancia del 5%, a partir de esto permite rechazar o aceptar las hipótesis de la siguiente manera; Si el valor-P es mayor que el valor de significancia, muestra que las medias de los experimentos son iguales, señalando así que no existe ninguna relación entre la variable respuesta (dependiente) y las variables independientes (de entrada); contrario a esto si el valor-P es menor que el nivel de significancia se evidencia que existe una relación entre la variable dependiente y las variables independientes.

Tabla 31. ANOVA, análisis de varianza para la traslucidez

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A:Dioxido de titanio	14,2013	3	4,73375	140,26	0,0000
B:Pigmento blanco	1,31125	3	0,437083	12,95	0,0002
Interacciones					
AB	0,39625	9	0,0440278	1,30	0,3077
Residuos	0,54	16	0,03375		
Total (Corregido)	16,4487	31			

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE MINITAB 17

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de la traslucidez en contribuciones debidas a los factores A y B. En este caso, los valores-P prueban la significancia estadística de A y B, teniendo en cuenta que dos valores-P son menores que 0,05, (valores de color rojo) que corresponden a la concentración de dióxido de titanio y pigmento blanco, los cuales tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la traslucidez con un 95,0% de nivel de confianza.

Además, se verificó el valor F, para un diseño experimental 4^2 , con una réplica, en las tablas de distribución estadísticas del libro Diseño y análisis de experimentos de Douglas Montgomery, el cual corresponde a un valor de 4,49⁹³. Los resultados de la tabla 32, superiores a este valor, indican que se rechaza la hipótesis nula, es decir, los factores A y B, presentan un efecto significativo en la variable respuesta,

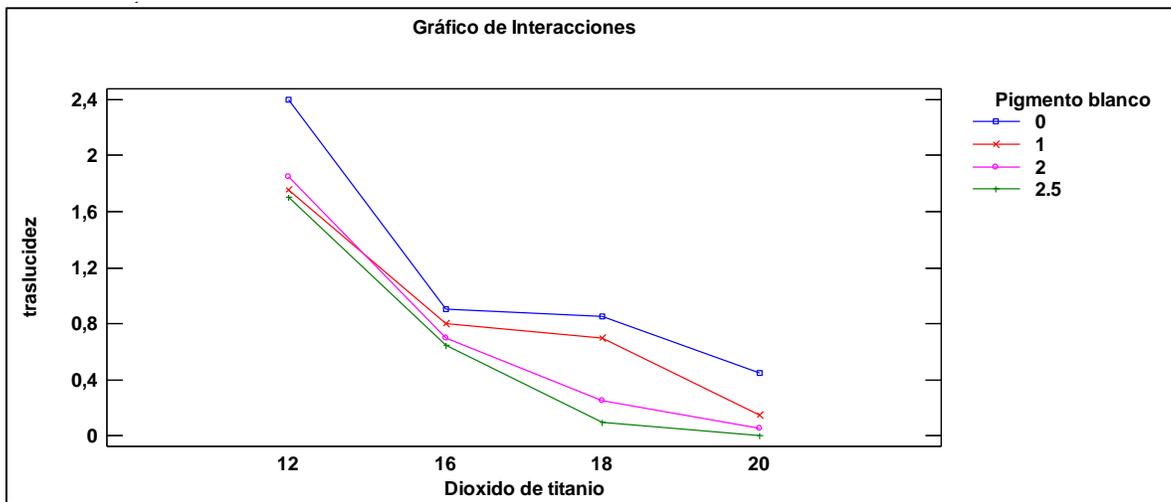
⁹³ MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. 2 ed. Mexico: Limusa Willey, 2002.p.15.ISBN 9681861566.

en este caso, la proporción de dióxido de titanio y pigmento blanco, tienen un efecto significativo en la opacidad del laminado en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Así mismo, se rechaza un efecto de la interacción AB, puesto que el valor P, es mayor a 0,05, y el valor F, es menor a 4,49, indicando que se cumple la hipótesis alterna; no existe un efecto significativo del factor AB, sobre la variable respuesta.

A continuación, se muestra en la gráfica 4, las interacciones identificadas por el software, entre los niveles de las variables independientes (porcentaje de dióxido de titanio y porcentaje de pigmento blanco) y el comportamiento de la variable respuesta (traslucidez en lux).

Gráfica 4. Interacciones entre las variables independientes y la variable respuesta



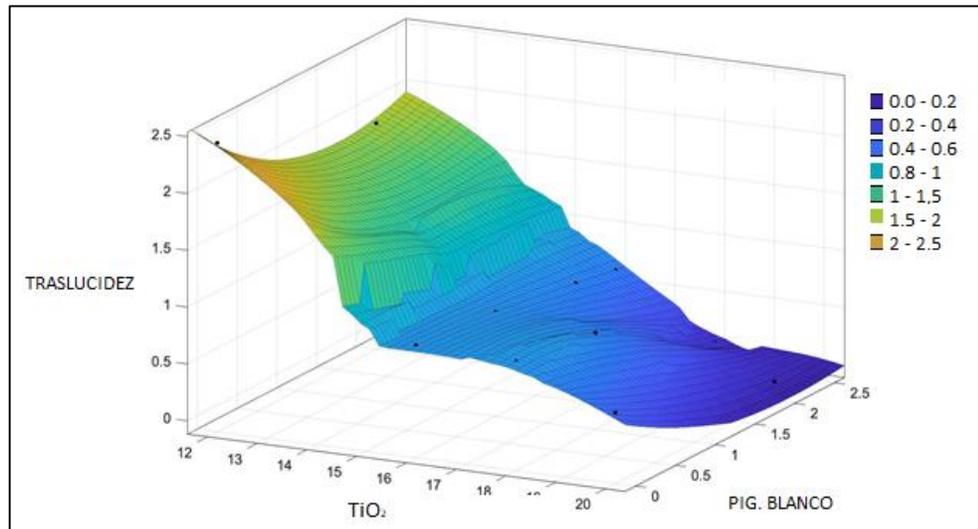
Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE MINITAB 17

La gráfica 4, muestra el comportamiento de cada nivel de concentración de pigmento blanco, respecto a las concentraciones evaluadas de TiO_2 y los resultados obtenidos de la medición de la traslucidez de los laminados en poliéster reforzado con fibra de vidrio. La mayor concentración de pigmento blanco empleada en esta experimentación, 2,5%, obtuvo los menores niveles de traslucidez en todas las proporciones de dióxido de titanio. Además, se observa que, a menor porcentaje de pigmento blanco y dióxido de titanio, mayor traslucidez presenta el laminado. Las concentraciones de dióxido de titanio 12% y 16%, presentan niveles de traslucidez por encima del 0,2 lx; (parámetro de aceptación impuesto por la empresa), en todos los niveles de pigmento blanco.

Con el fin de identificar el comportamiento de la traslucidez en función de la concentración del pigmento blanco y el dióxido de titanio, se realizó la gráfica 6 de superficie, en la cual, el eje z corresponde a la variable respuesta del diseño de

experimentos, y el eje xy corresponden a los factores o variables independientes del diseño.

Gráfica 5. Gráfico de superficie estadístico del comportamiento del diseño experimental



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE MINITAB 17

En la gráfica 5, se observa la predicción del comportamiento para todos los valores intermedios entre los niveles evaluados en el diseño experimental, a partir de la imagen 24, calculada por el software, computando una regresión no lineal, con un coeficiente de determinación o correlación múltiple, r^2 mayor a 0,99.

Imagen 24. Coeficientes del polinomio cuadrático de la superficie de respuesta

Goodness of fit:
SSE: 0.04659
R-square: 0.9942
Adjusted R-square: 0.9913
RMSE: 0.06826

Fuente: software Minitab 17

3.9.5 Comportamiento de la viscosidad en el diseño experimental. La viscosidad, variable dependiente de este diseño experimental, se empleó como criterio de selección y parámetro de procesabilidad en máquina. La viscosidad final de la matriz polimérica, debe estar entre 200 cP y 400 cP.

Durante todo el diseño experimental, se realizó el ensayo de viscosidad, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 33.

Tabla 32. Resultados de viscosidad del diseño de experimentos

Temperatura a 22°C		Viscosidad (cP)		
TiO ₂ (%)	Pig. Blanco (%)	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Promedio
22	2.5	340	339	339,5
	2	334	336	335,0
	1	325	320	322,5
	0	323	300	311,5
20	2.5	321	318	319,5
	2	319	316	317,5
	1	317	312	314,5
	0	315	320	317,5
16	2.5	303	308	305,5
	2	294	290	292,0
	1	289	295	292,0
	0	286	283	284,5
12	2.5	239	238	238,5
	2	236	240	238,0
	1	235	233	234,0
	0	230	234	232,0

Fuente: elaboración propia

Todos los resultados de viscosidad se encuentran dentro del rango de aceptación establecido por la empresa. Se realizaron dos tratamientos, el segundo corresponde a la réplica del primero con el fin de obtener una mayor confiabilidad de los datos. Este ensayo se realizó conforme a la norma internacional ASTM D2196 – 99, métodos de prueba estándar para propiedades reológicas de materiales no newtonianos por viscosímetro rotacional (tipo brookfield)⁹⁴.

⁹⁴ American Society For Testing And Materials. Op. Cit., p 2

3.9.6 Selección de alternativa. Para realizar la selección de la mejor alternativa a la formulación actual, variando la proporción de dióxido de titanio y pigmento blanco, a partir de los resultados obtenidos durante la experimentación de este trabajo de grado, se empleó el modelo de una matriz Pugh, basados en los artículos mencionados en el ítem 3.7.4⁹⁵. Los criterios de selección y el valor asignado entre 1 y 4, el cual corresponde a la importancia que posee cada criterio empleado en el ítem 3.7.4 en la fase pre experimental, se conservan para la fase experimental, puesto que son los parámetros más importantes o relevantes para la empresa, teniendo en cuenta que:

El costo es afectado por las cantidades empleadas en la formulación de cada materia prima y el tiempo empleado en la preparación de la matriz polimérica. A menor cantidad de uso de materiales, menor tiempo empleado por el colaborador en esta labor, menor costo, mayor productividad.

La viscosidad y la reactividad de la matriz polimérica, son parámetros de procesabilidad en máquina, establecidos por la compañía. A menor viscosidad, mejor humectación, favorece la compactación fibra-resina. En cuanto a reactividad, se deben mantener el comportamiento de la curva estándar, con el fin de no afectar la velocidad de la máquina, los procedimientos de moldeo, y en general las condiciones actuales de proceso.

Traslucidez, es una especificación técnica y característica diferenciadora del producto que se debe cumplir. Se busca una translucidez entre 0 lx y 0,25 lx.

Con el fin de facilitar la elaboración de la matriz Pugh, se elaboró el siguiente cuadro de convenciones:

Cuadro 10. Convenciones del diseño experimental

Combinaciones	% Pigmento Blanco	0	1	2	2,5
% Dióxido de titanio	22	A1	A2	A3	A4
	20	B1	B2	B3	B4
	16	C1	C2	C3	C4
	12	D1	D2	D3	D4

Fuente: elaboración propia

En la tabla 34, se muestra la matriz desarrollada para la selección de la mejor propuesta alternativa a la formulación actual empleada en la fabricación de una teja opaca, en ella, se calificó cada combinación (A1, B1, C1, D1, ...) mencionada en el cuadro 11, empleando los valores 0, 1, y -1, dependiendo de su impacto, es decir, igual, favorable o desfavorable respectivamente, para cada criterio, tomando como punto de partida, las condiciones, especificaciones, el comportamiento y los

⁹⁵CERVONE, H. Frank. Op. Cit., p 34

parámetros óptimos de la teja opaca , que se obtiene empleando la formulación actual de la matriz polimérica⁹⁶:

Tabla 33. Matriz de selección de la mejor alternativa a la formulación actual

Criterios	Valor	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
Costo	4	1	1	-1	-1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Traslucidez	3	-1	0	1	1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Viscosidad	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reactividad	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		1	4	0	-1	-1	1	4	0	0	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia

Para hallar el valor total de cada uno de los criterios, se multiplicaron los valores asignados a cada criterio por la calificación que se le dio a cada alternativa. Luego, se sumó el total de estas multiplicaciones para cada combinación, se eligieron las dos opciones con mayor valor, las cuales corresponden a la alternativa A2 y B3, 22% de dióxido de titanio y 2% de pigmento blanco y 20% de dióxido de titanio y 2% de pigmento blanco, respectivamente.

Estas dos alternativas van a ser evaluadas y comparadas con la formulación actual, en el capítulo 4: Análisis de costos.

⁹⁶ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena, CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. [en línea]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017 [Consultado 17, julio, 2019]. Disponible en: file:///C:/Users/lenovo/Downloads/matriz%20de%20seleccion.pdf

4. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Al finalizar las etapas de experimentación que se desarrollaron a lo largo de todo el proyecto, se procede a analizar cuál es la mejor alternativa de formulación, de las combinaciones seleccionadas por la matriz pugh del diseño experimental, ítem 3.9.6 evaluando el costo, las mejoras de calidad, procesabilidad y beneficio económico para la compañía.

Según lo anterior se procede a cuantificar los costos de producción, que se generan durante el proceso de transformación de la materia prima en un producto terminado⁹⁷, empleando las ecuaciones pertinentes para determinar el valor final de un kilogramo de teja opaca blanca.

La compañía cuenta con un sistema informático (SAP), con el fin de administrar recursos humanos, inventarios, planificación de recursos de producción, costos, logística, entre otros usos.⁹⁸

4.1 MATERIA PRIMA DIRECTA

El costo por kilogramo de cada materia prima directa empleada en la fabricación de una teja opaca blanca, descrito en SAP, es aproximadamente \$65000 pesos colombianos.

4.2 MANO DE OBRA DIRECTA

En SAP, se relaciona un costo de mano de obra directa, de los operarios encargados del almacén de materias primas, quienes son los responsables del alistamiento y entrega de las materias primas a la máquina de procesamiento continuo, proceso mencionado en el ítem 2.1 generalidades del producto. El costo reportado corresponde a \$1220 pesos colombianos por cada kilogramo de teja opaca blanca producido.

4.3 COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACIÓN, CIF

Son todos los costos que no están clasificados como mano de obra directa ni como materiales directos, pero son diferentes a los gastos de ventas, de administración y financieros.⁹⁹

⁹⁷ ROJAS MEDINA, Ricardo Alfredo. Sistemas de costos, un proceso para la implementación. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.2007.pg 153. ISBN 978-958-8280-09-07

⁹⁸ MANAGEMENT [Sitio WEB] Bogotá DC. 2017 [28-09-2019]. Disponible en:<https://www.iebschool.com/blog/que-es-para-que-sirve-sap-management/>

⁹⁹ Universidad Militar Nueva Granada. Costos indirectos de fabricación. Administración de empre. Bogotá D.C. FAEDIS [en línea] pg 18 [consultado 28, septiembre 2019]. Disponible

Algunos costos indirectos contemplados en el CIF de la empresa son:

- Costo de insumos de producción
- Mano de obra indirecta
- Energía consumida para la fabricación
- Costos de sostenimiento a la infraestructura
- Arriendo y servicios públicos
- Costos de QHSE
- Logística

Este valor es calculado por el sistema de información SAP, a partir de una estimación de los costos indirectos de los últimos 2 años, se actualiza mensualmente, con los últimos consumos reales de la compañía. El costo del CIF que se tuvo en cuenta para este proyecto corresponde a \$7.700,56 pesos colombianos por cada kilogramo de teja opaca blanca producido, valor reportado en el mes de septiembre.

4.4 COSTO TOTAL DE UN KILOGRAMO DE TEJA OPACA BLANCA

El costo de producción total de un kilogramo de teja opaca blanca, corresponde a la sumatoria de los costos de materia prima directa, costo de mano de obra y los costos indirectos de fabricación. En la ecuación 6, se encuentra la expresión usada en la estimación de los costos para la formulación de un kilogramo de teja opaca blanca, empleando los costos unitarios mencionados en la tabla 7, y teniendo en cuenta la relación fibra – resina en la que se fabrica este producto que hace referencia al 30% de resina y 70% de fibra de vidrio.

Ecuación 6. Costo de la formulación para la producción de un kilogramo de teja

$$\text{Costo} = \sum \text{cantidad del componente} * \text{costo unitario por Kg}$$

Fuente: elaboración propia

A continuación, en las tablas 36, 37, 38, se realiza la estimación del costo empleando la formulación de la matriz polimérica actual y las dos alternativas seleccionadas en la fase experimental.

en:

http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/ovas/administracion_empre/contabilidad_de_costos/unidad_4/DM.pdf

Tabla 34. Costo actual de 0,73 kg de matriz polimérica

Formulación Matriz Polimérica Actual				
Componente	Costo Unitario	%	kg	Costo
Resina Poliéster Insaturada	\$ 34.310	\$ 338	\$ 2,465	\$ 16.906
Dióxido De Titanio	\$ 48.578	\$ 81	\$ 0,590	\$ 6.383
Carga seca	\$ 1.492	\$ 40	\$ 0,292	\$ 109
Pasta Pigmento Blanca	\$ 63.196	\$ 9	\$ 0,063	\$ 1.153
Estireno	\$ 14.550	\$ 6	\$ 0,045	\$ 212
Total	\$ 162.126	\$ 473	\$ 3	\$ 24.764

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Tabla 35. Costo alternativa A2 de 0,73 kg de matriz polimérica

Formulación Matriz Polimérica A2				
Componente	Costo Unitario	%	kg	Costo
Resina Poliéster Insaturada	\$ 34.310	\$ 335	\$ 2,465	\$ 16.781
Dióxido De Titanio	\$ 48.578	\$ 90	\$ 0,657	\$ 7.092
Carga seca	\$ 1.492	\$ 40	\$ 0,292	\$ 109
Pasta Pigmento Blanca	\$ 63.196	\$ 4	\$ 0,025	\$ 461
Estireno	\$ 14.550	\$ 6	\$ 0,045	\$ 212
Total	\$ 162.126	\$ 475	\$ 3	\$ 24.656

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Tabla 36. Costo alternativa B3 de 0,73 kg de matriz polimérica

Formulación Matriz Polimérica B3				
Componente	Costo Unitario	%	kg	Costo
Resina Poliéster Insaturada	\$ 34.310	\$ 340	\$ 2,480	\$ 17.032
Dióxido De Titanio	\$ 48.578	\$ 81	\$ 0,590	\$ 6.383
Carga seca	\$ 1.492	\$ 40	\$ 0,292	\$ 109
Pasta Pigmento Blanca	\$ 63.196	\$ 7	\$ 0,053	\$ 923
Estireno	\$ 14.550	\$ 6	\$ 0,045	\$ 212
Total	\$ 162.126	\$ 474	\$ 3	\$ 24.659

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Todas las formulaciones que se emplearon a lo largo del proyecto, se realizaron teniendo en cuenta que la suma de los porcentajes de cada componente debe sumar 100% (normalización de datos).

En la tabla 39, se estimaron los costos totales de producción actual y de las alternativas A2 y B3, resultantes del desarrollo experimental. Cabe aclarar, que el costo de la fibra de vidrio, corresponde al 27% de la composición de la teja, por esta razón la formulación de la matriz polimérica calculada anteriormente se evaluó por 0,73 kilogramos, para estimar el costo de un kilogramo de teja opaca blanca.

Tabla 37. Costo de producción de las tres alternativas

Costo de producción	Actual	A2	B3
Matriz Polimérica	\$ 26.136	\$ 25.811	\$ 25.932,100
Fibra De Vidrio	\$ 18.225	\$ 18.225	\$ 18.225,000
Papel No tratado	\$ 320	\$ 320	\$ 320,000
Mano De Obra Directa	\$ 2.170	\$ 2.170	\$ 2.170,000
CIF	\$ 8.102	\$ 8.102	\$ 8.101,680
Total	\$ 54.953	\$ 54.627	\$ 54.749

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Al realizar la comparación de costos entre las dos alternativas seleccionadas a partir del desarrollo experimental y el costo de producción actual que presenta la compañía, mostrados en la tabla 40, se calculó la reducción en el costo de producción de la alternativa A2 y B3, obteniendo los siguientes valores de reducción de costos.

Tabla 38. Impacto en el costo de cada formulación alternativa

Impacto	Actual vs A2	Actual vs B3
Diferencia de costo	\$ 65,15	\$ 40,85
Porcentaje de reducción	0,51%	0,32%

Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

La alternativa que presenta mayor impacto en el costo, es la alternativa A2, con una disminución de \$65,15 pesos colombianos por kilogramo de teja opaca blanca producido, lo cual equivale al 0,51% de disminución en el costo.

4.5 PROYECCIÓN DE AHORRO

La producción de la referencia, de color blanco, clase 7, en la compañía, desde el 01 de enero 2019 hasta el 30 de agosto del mismo año, se estima en 20 toneladas de teja fabricadas, las cuales tuvieron un costo de producción de \$507'113.200 pesos colombianos.

Si la compañía, mantuviera esta misma proyección de ventas en los siguientes ocho meses, y fabricara el producto usando la alternativa A2, el costo de producción de las 20 toneladas sería \$504'507.200 pesos colombianos, teniendo un ahorro de \$2'606.000 pesos colombianos. Este ahorro se podría ver reflejado en las utilidades de la compañía o en la posibilidad de evaluar una disminución del precio de venta de esta teja, aumentando su competitividad en el mercado.

5. CONCLUSIONES

- De los componentes de la formulación actual para la fabricación de una teja opaca Blanca, se determinó a partir de las propiedades físicas y químicas que las materias primas que proporcionan opacidad en el producto (material compuesto), son el dióxido de titanio y el pigmento blanco. Los demás componentes de la formulación proporcionan volumen, actúan como solventes y como vehículo de los demás componentes.
- La variación en el tamaño de partícula de dióxido de titanio proporcionó mayor opacidad en el laminado en PRFV, cuando se mezclan las partículas de 0.4 micras y 0.36 micras, en una proporción 50 % R706 – 50 % R902. No afectó la reactividad de la matriz polimérica, presentando una desviación estándar máxima del 5%; y presentó un aumento en la viscosidad que no sobre pasa 400cP, parámetro máximo de viscosidad procesable en la empresa .
- A partir del diseño experimental se evidencio que las proporciones de dióxido de titanio y pigmento blanco tienen un efecto significativo en la traslucidez de la teja opaca blanca evaluada.
- El pigmento blanco en la formulación es un componente clave para lograr la opacidad del producto, puesto que durante la experimentación todos los niveles con 0% de este componente, dieron una traslucidez por encima de 0.43 luz. Este valor esta por fuera del parámetro de aceptación de la compañía. La necesidad de este componente en la formulación, puede depender de las velocidades periféricas que se alcanzan para dispersar el dióxido de titanio, las cuales están dentro de los límites inferiores de la velocidad de dispersión reportadas en literatura.
- El dióxido de titanio y el pigmento blanco son factores que si afectan la traslucidez de la teja opaca blanca. Este efecto se evidencia en la gráfica 6 de superficie, encontrándose que no es recomendable disminuir la proporción de dióxido de titanio, por debajo de 18%, concentración actual, puesto que se obtendrían resultados de traslucidez mayor a 0,25 lux.
- Se logró obtener una alternativa a partir del diseño de experimentos que proporciona una disminución en el costo de producción actual, del 0,51%. Este resultado es un beneficio para la empresa, quien puede tomar la decisión de emplear el cambio en la formulación con el fin de tener un ahorro y aumento en la utilidad bruta por la venta de este producto, o disminuir el precio de venta de este producto para aumentar competitividad en el mercado.

6. RECOMENDACIONES

Se debe evaluar y verificar la velocidad periférica y la potencia de los motores de los agitadores tipo cowles, empleados por la empresa, en la adecuación de la resina, con el fin de asegurar las condiciones de dispersión del dióxido de titanio.

Comprobar las características de los certificados de análisis que proporciona el proveedor de cada materia prima mediante la realización de análisis propios.

Evaluar otro proveedor de dióxido de titanio, o un pigmento blanco con mayor contenido de TiO_2 , buscando mejores propiedades de poder cubriente.

Estudiar las posibles mejoras en la etapa de laminación debido a las fallas observadas en la heterogeneidad del espesor y la presencia de aire en el laminado.

Se observó que la referencia de dióxido de titanio R706, (menor tamaño de partícula), no presentó el desempeño deseado, lo cual, se puede presentar por problemas de dispersión y estabilidad de las partículas de menor tamaño, para lo cual se recomienda adicionar agentes dispersantes como el BYK – W 960, aditivo humectante y dispersante contra la sedimentación y aglomeración de cargas en sistemas de resinas poliéster.

BIBLIOGRAFIA

American Society For Testing And Materials. Standard Specification for Glas -Fiber - Reinforced Poliester Maholes. ASTM D3720. Philadelphia: ASTM international, 1991. 2p.

ALTANA. Aditivos BYK. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [20, marzo, 2019]. Disponible en: <https://www.byk.com/es/aditivos/aplicaciones/plastics-industry.php>

American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics. ASTM D1003. Philadelphia: ASTM international, 2000. 3p

American Society For Testing And Materials. Standard Test Methods For Rheological Properties Of Non-Newtonian Materials By Rotational (Brookfield Type) Viscometer. ASTM D2196. Philadelphia: ASTM international, 1999. 2p

Área. Universo Formulas © 2019. Disponible en: <https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/area/>

BRICEÑO ROJAS, Jason, GALÁN JIMÉNEZ, Pablo, MENDOZA QUIROGA, Ricardo, MARQUEZ SANTOS, Mauricio. Comportamiento mecánico de un compuesto de matriz poliester reforzado con fibra de yute. Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. [En línea]. 2014. 2-7. [Consultado 13,marzo,2019]. Disponible en: <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/StudentPapers/SP018.pdf>

BROTO, Carles. Cubiertas, innovación y diseño. Cubiertas, innovación y diseño. [en línea].2013, 08003. 1-184. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: https://www.architectureopenlibrary.com/spa/libro/12-0-INNOVACION_Y_DISENO_ESCALERAS

CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté.Barcelona. [en línea] 1996. pg 97.[consultado: 12, abril, 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/EzioCordovaHernandez/callister-introduccion-a-la-ciencia-e-ingeniera-de-los-materiales-65832618>

CERVONE, H. Frank. Applied digital library project management using Pugh matrix analysis in complex decision making situations. Emerald group publishing limited. [en línea]. 2009,25 (4). 5 p. [Consultado 5, julio, 2019]. Disponible en: <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Cervone,%202009.%20Applied%20digital%20library%20project%20management%20Using%20Pugh%20matrix%20analysis%20in%20complex%20decision-making%20situations.pdf>

CHEMOURS. Dióxido de titanio Ti-Pure™ R-902+. [Sitio WEB]. Colombia: Chemours Company. [16, febrero, 2017]. Disponible en: https://www.chemours.com/Titanium_Technologies/es_US/products/902plus/

Determination of contrast ratio (opacity) of light coloured paints at a fixed spreading rate (using black and white charts)" ISO 3905, Iso Standards Handbook. Vol. 24, 1985, p.499

ESPINOZA FERNÁNDEZ, Héctor. Pigmentos orgánicos e inorgánicos utilizados en las industrias de pinturas o recubrimientos y del plástico. [en línea]. Tesis. Universidad de Chile, Chile: 2008. [Consultado 14, noviembre, 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105252>

FACULTAD INGENIERIA INDUSTRIAL. Plásticos protocolo. [en línea]. Informe. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.: 2007. [Consultado 13, enero, 2019]. Disponible en: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf

GEOFIS. Determinación de índices de refracción. [Sitio WEB]. Colombia: Geofis. [22 junio, 2019]. Disponible: <https://webs.ucm.es/info/Geofis/practicas/prac22.pdf>

GONZÁLEZ, Mónica. Transmitancia y absorbancia [Sitio WEB]. Colombia: La guía. [09, junio, 2017]. Disponible en: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/transmitancia-y-absorbancia>.

GONZÁLEZ, Yuly Viviana; RODRÍGUEZ REYES, María Fernanda; SALINAS BARRETO, Alejandra. Propuesta de mejora del proceso productivo en la fábrica de Pinturas Alcor S.A.S. [en línea]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2016. [Consultado 4, febrero, 2019]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/443>

GRUPO C&M. Ficha técnica luxómetro LUX29. [Sitio WEB]. Colombia: C&M. [24, diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-LUXOMETRO-LUX29.pdf

GUSGSM. Relación entre densitometría y colorimetría. [Sitio WEB]. Colombia: GUSGSM. [14, julio, 2004]. Disponible en: http://www.gusgsm.com/funciona_espectrofotometro_reflectancia

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 P.

_____. Plásticos. Determinación de la opacidad y la transmitancia luminosa de plásticos Transparentes. NTC 3337. Bogotá D.C.: NTC, 2007. 2 p

_____. Acondicionamiento de plásticos para ensayo. NTC 718. Bogotá D.C.: NTC, 1999. 3 p.

“Hiding Power of Air Drying Nonchromatic Paint”, German Standards Institute (DIN), DIN 53162.

KEYMAN FREIRE, Ana Carolina. Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. [en línea]. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, México: 2011. [Consultado 23, enero, 2019]. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2012/abril/0679331/Index.html>

KO, Frank K, WAN, Yuqin. Chemical Dispersion. En: Introduction to Nanofiber Materials. Vancouver: Cambridge University Press, 2014. 23-80.

KOTTAS, Dimitris. Plástico: arquitectura y construcción. Manuales y construcción. [en línea]. 2013, 08003 (1). 11-21. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: https://www.architectureopenlibrary.com/spa/libro/303-0-PLASTICO_ARQUITECTURA_Y_CONSTRUCCION.

LINA GONZALEZ, ALEJANDRA SALINAS, Propuesta de mejora del proceso productivo en la fábrica de pinturas alcor s.a.s, consultado: 10/05/2019 Disponible en: luminaris. Universidad América

MAYZO. Optical brighteners. [Sitio WEB]. Suwanee, Georgia, USA: Mayzo. [08, junio, 2017]. Disponible en: <http://www.mayzo.com/optical-brighteners.html>

NUÑEZ, Nuria, OCAÑA, Manolo. El color en los materiales. Instituto de ciencias de materiales de Sevilla. España. [en línea]. 2009.1 [consultado: 15, mayo, 2019]. Disponible en: https://www.ciccartuja.es/fileadmin/CARTUJA/cicCartuja/imagenes/ICMS_Poster_2.pdf

CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS. Luminotecnia. [en línea]. Informe. E.T.S. Arquitectura, Colombia: 2018. [Consultado 12, diciembre, 2017]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12732/L%20U%20M%20I%20N%20O%20T%20E%20C%20N%20I%20A.pdf?sequence=1>

ORTIZ ARANGO, Enrique. Quiénes somos. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: S.A.S. [21, julio, 2019]. Disponible en: <http://www..com/quienes-somos/>

PARRILLA CORZAS, Felipe. Resinas poliéster, plásticos reforzados. 14 ed. México D.F.: Solteq S.A.S, 1998. 359p. ISBN 970-92083-0-6

PUGH, S. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. EE.UU.: Addison-wesley publishing company, 1991. p. 5. ISBN 9780201416398

REYNOSO, Sara Luisa. Los polímeros plásticos. 1 ed. Cd de Mexico DF: Kindle, 2018. 120p. ISBN 9781790826001

ROJAS MEDINA, Ricardo Alfredo. Sistemas de costos, un proceso para la implementación. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. 2007. pg 153. ISBN 978-958-8280-09-07

SCHWEIGGER, Enrique. Manual de pinturas y recubrimientos plásticos. 1 ed. Alemania: Universidad de Heidelberg, 2005. 288p. ISBN 8479787074

SIRLIN, Eli. Física de la luz. [en línea]. Informe. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires: 2006. [Consultado 12, diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.elisirlin.com.ar/11_fisica%20de%20la%20luz.pdf

SolteQ.. Resina poliéster, plástico reforzado. 1 ed. Bogotá D.C.: Akzo Nobel, 2010. 21 p. ISBN 9001128196-0

THAKKER, A., et al. 3DCAD conceptual design of the next-generation impulse turbine using the Pugh decision-matrix. Elsevier. [en línea]. 2008. 9 p. [Consultado 2, julio, 2019]. ISSN 2676-2684. Disponible en: <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Thakker,%202009.%203DCAD%20conceptual%20design%20of%20the%20next->

TREJOS, Daniel. Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. [en línea]. Tesis. Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira: 2014. [Consultado 12, enero, 2019]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4466>

VALENZUELA, David. Fisic.[Sitio WEB]. Alemania. La entidad. [consultado: 22, mayo, 2019]. Disponible en: <https://www.fisic.ch/contenidos/optica/refracci%C3%B3n-de-la-luz-y-ley-de-snell/>

VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena, CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. [en línea]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.: 2017 [Consultado 17, julio, 2019]. Disponible en: <file:///C:/Users/lenovo/Downloads/matriz%20de%20seleccion.pdf>

XAVIER RAMIS, Juan. Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado. [en línea]. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España: 2006. [Consultado 05, marzo, 2019]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=6661>

ANEXOS

Anexo A.

Especificaciones de la fibra de vidrio

Propiedades	Valor
Densidad (g/m²)	450
Contenido de agua	< 0,2%
Pérdida en la ignición	3,7 %
Resistencia a la tensión	T: ≥ 172 N / 5 cm
Resistencia a la flexión	U: ≥ 180 N / 5 cm

Fuente: ficha técnica de la fibra de vidrio

Anexo B.

Especificaciones adicionales del TiO₂, referencia R902

Composición	Unidad	Valor
TiO ₂	% peso	91
Alúmina	% peso	4,3
Sílice amorfo	% peso	1,4
Características	Unidad	Valor
Gravedad específica	-	4
Color, CIEL*	CIEL*	99,8
Tamaño medio de partícula	µm	0,42
Absorción de aceite	%	16,1
pH	-	8,1
Subtono negro carbón	-	11,7
Tratamiento orgánico	-	No

Fuente: certificado de análisis DuPont™ Ti-Pure®

Anexo C.

Especificaciones del carga seca

Granulometría	Unidad	Valor
TiO ₂	% peso	91
Alúmina	% peso	4,3
Sílice amorfo	% peso	1,4
Propiedades Químicas	Unidad	Valor
Calcio	-	4
Magnesio	CIEL*	99,8
Hierro total Fe ₂ O ₃	µm	0,42
Silicio SiO ₂	%	16,1
Insolubles en HCl	-	8,1

Fuente: certificado de análisis IMPADOC SA.

Anexo D.

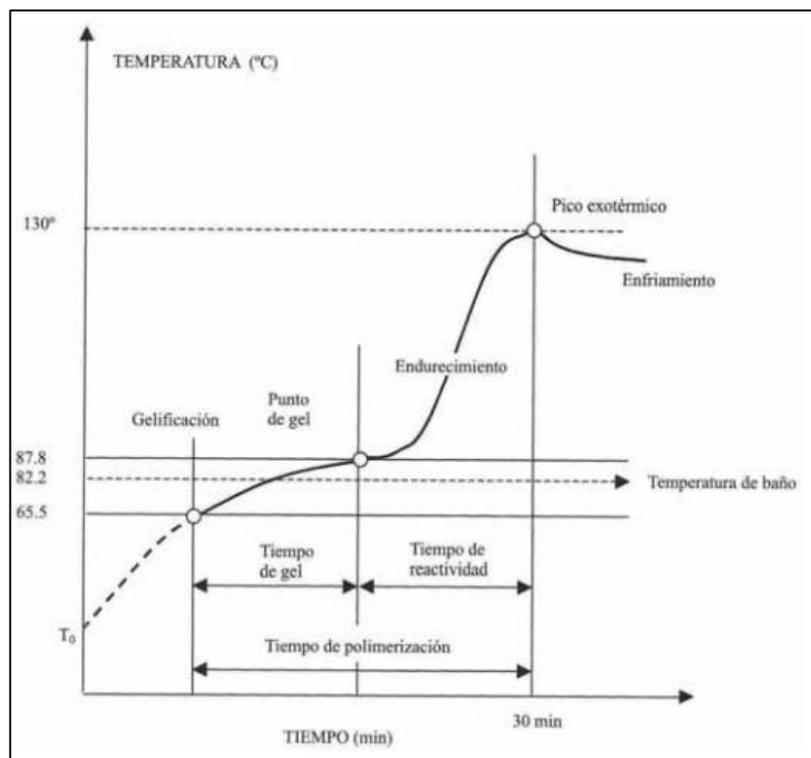
Monómero estireno

Características generales	Unidad	Valor
Viscosidad a 25°C	cP	0,696
Presión de vapor a 25°C	mmHg	6,4
[t-butilcatecol]	mg/kg	10
Porcentaje de volátiles	% en peso	29,5
VOC proporcional	g/L	336
Solubilidad en agua a 25°C	mg/L	310
Aspecto físico		Valor
Estado físico		Líquido viscoso
Olor		Dulce y muy penetrante

Fuente: certificado de análisis Inquimicol .

Anexo E.

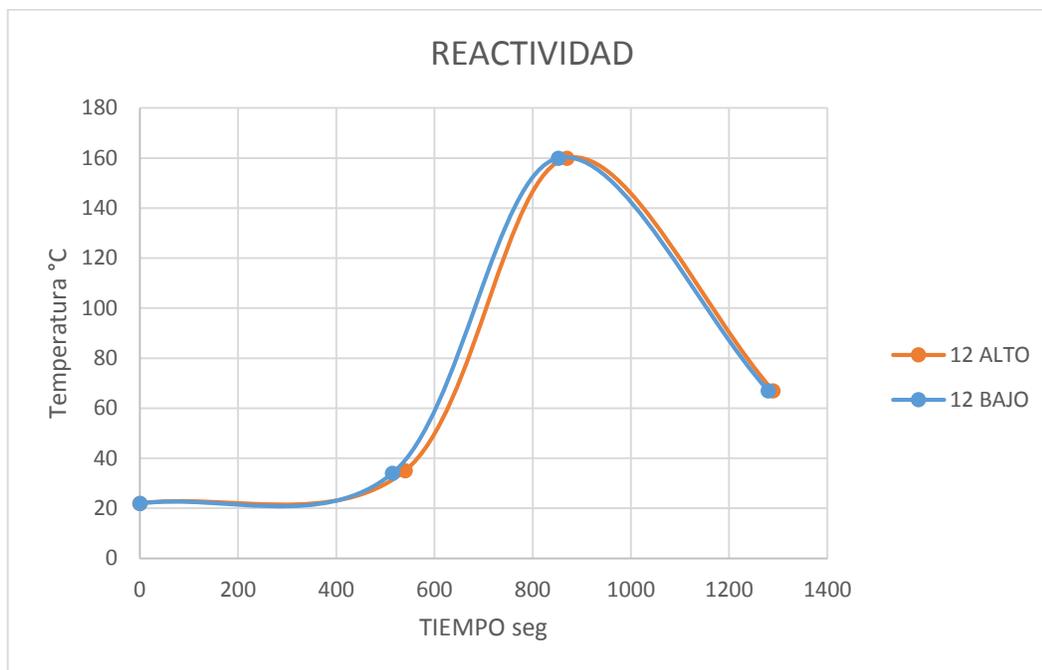
Curva teórica de reactividad de las resinas poliéster insaturado



Fuente: RODRIGUEZ, JERLY. Análisis Del Sistema Catalítico De La Resina De Poliéster Insaturado Para Laminación.[en línea] Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana.Medellin:2014.

Anexo F.

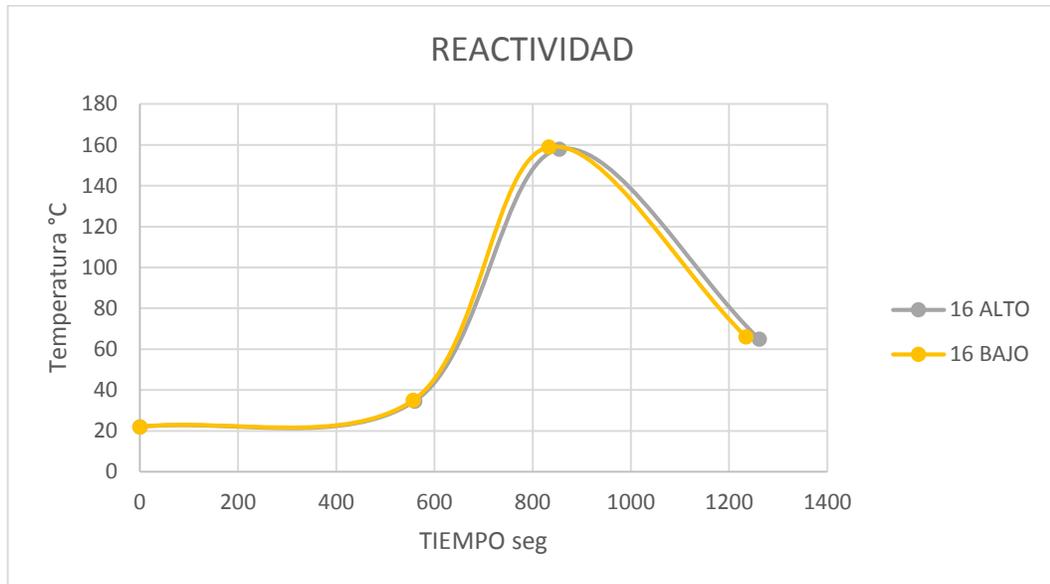
Curva de reactividad del 12% de TiO₂



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Anexo G.

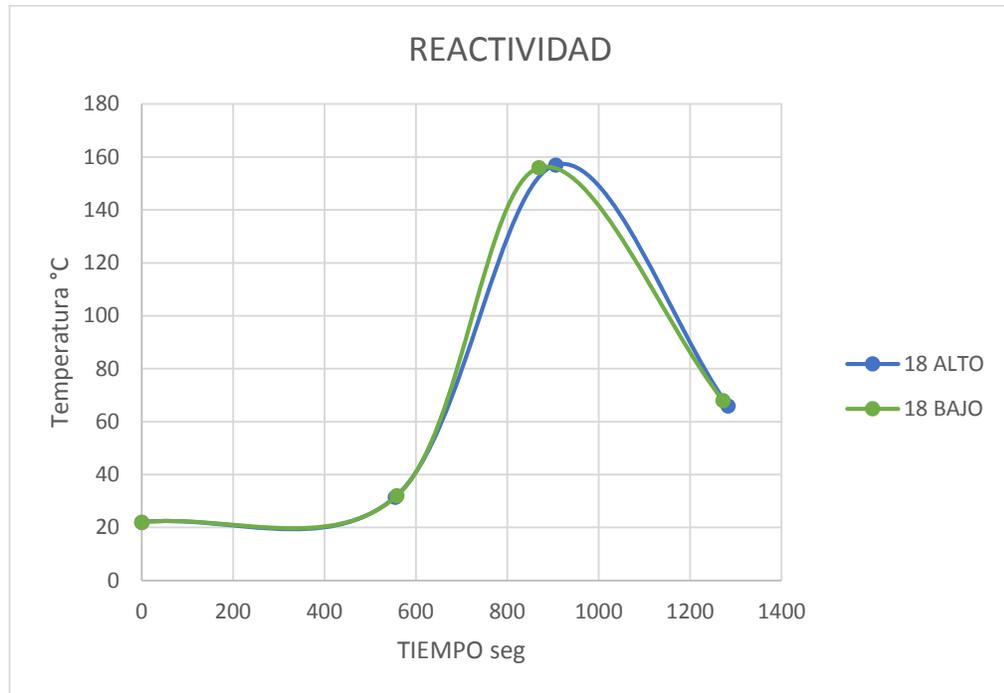
Curva de reactividad del 16% de TiO₂



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Anexo H.

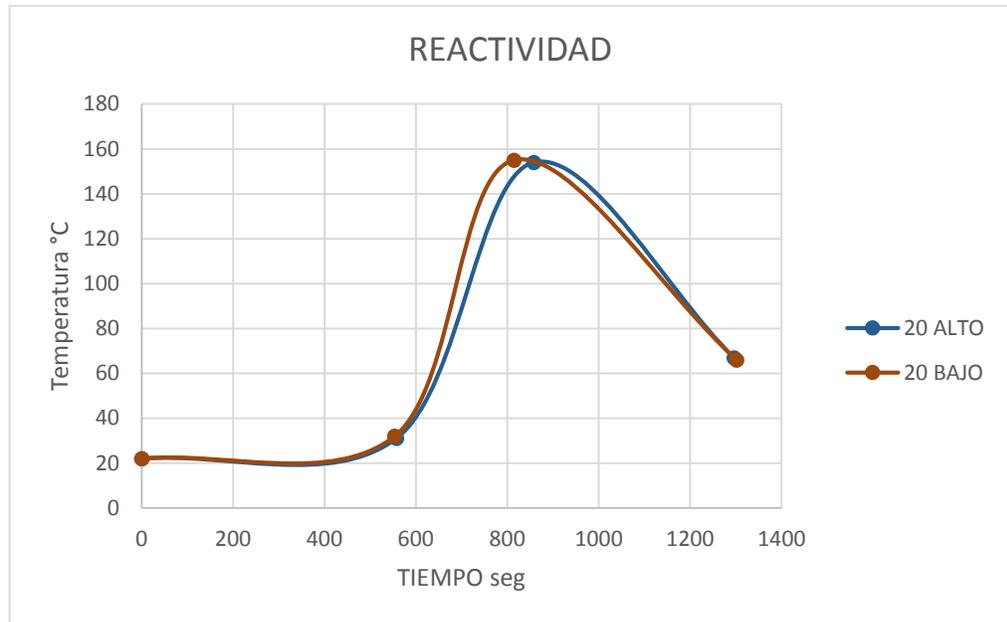
Curva de reactividad del 18% de TiO₂



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL

Anexo I.

Curva de reactividad del 20% de TiO₂



Fuente: elaboración propia, con base en: SOFTWARE EXCEL