

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CURADO MEDIANTE RADIACIÓN
DE MATERIALES COMPUESTOS DE RESINA DE POLIÉSTER
INSATURADO CON FIBRA DE VIDRIO**

JUANITA ROJAS ÁLVAREZ

ANDRÉS FELIPE CÁRDENAS GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN**

2014

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CURADO MEDIANTE RADIACIÓN
DE MATERIALES COMPUESTOS DE RESINA DE POLIÉSTER
INSATURADO CON FIBRA DE VIDRIO**

**JUANITA ROJAS ÁLVAREZ
ANDRÉS FELIPE CÁRDENAS GARCÍA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

LUIS JAVIER CRUZ RIAÑO, Ph.D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN**

2014

Nota de Aceptación

Firma
Nombre
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Medellín, __ de __ 2014

DEDICATORIA

Gracias a Dios por poner a las personas indicadas, en el momento oportuno y a nuestros padres por su apoyo incondicional en este proceso, por su paciencia y porque gracias a ellos y a su insistencia hoy culminamos con éxito este trabajo y esta etapa de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer principalmente a nuestro director de trabajo de grado, PhD. Luis Javier Cruz Riaño por el apoyo prestado durante el desarrollo del mismo, por su persistencia a pesar de los inconvenientes, su disposición constante y apoyo incondicional para sacar adelante este proyecto, además por haber depositado su confianza en nosotros y nuestro interés en culminar lo que habíamos comenzado.

Yo, Juanita Rojas Álvarez, agradezco a mis padres que son mi mayor motivación en la vida por su entrega, por su gran aporte a mi crecimiento profesional que implicó muchos esfuerzos económicos para que hoy fuera una realidad. Gracias a ellos y a mi hermana por creer en mí y en que era posible sacar adelante el sueño de ser Ingeniera. De igual manera agradezco a mi novio su dedicación en la realización de este proyecto, porque hoy se ve el resultado de un excelente trabajo en equipo.

Por mi parte yo, Andrés Felipe Cárdenas García, agradezco en primera medida a mis padres quienes hicieron grandes esfuerzos y sacrificios a lo largo de estos años para brindarme la posibilidad de tener una buena educación, además quiero agradecer a mis tíos y abuelos quienes siempre estuvieron presentes y su apoyo fue incondicional especialmente en los momentos difíciles que es donde más se necesita. De igual forma agradezco profundamente a mi novia y compañera de tesis quien se apropió del proyecto y tomó las riendas del mismo en el momento en que más lo necesitábamos, poniendo todo su empeño y dedicación para obtener lo que en este documento se refleja, que es el fruto de un gran trabajo en equipo a pesar de las adversidades y dificultades encontradas en el camino

A la empresa Andercol S.A. por su interés y disposición desde el momento que conocieron el proyecto. Gracias por su aporte al desarrollo de esta investigación.

A la ingeniería AnaMaria Henao, del área de investigación y desarrollo de Andercol S.A. que se apropió del proyecto como si fuera suyo y en conjunto logramos sacarlo adelante.

Y, por último, a la Universidad Pontificia Bolivariana por la formación personal y académica que nos permite hoy aspirar al título de ingenieros.

Tabla de contenido	6
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
1 ESTADO DEL ARTE	22
1.1 Curado con radiación	22
1.2 Curado con UV	24
1.2.1 Comparación de la vida útil según la tecnología de curado	27
1.2.2 Emisiones de estireno residual	28
2 MARCO TEÓRICO	28
2.1 Materiales compuestos	28
2.2 Fibra de vidrio	30
2.3 Resina de poliéster insaturado	31
2.4 Catalizadores y aceleradores	35
2.5 Polimerización	37
2.6 Curado tradicional	39
2.7 Curado UV	41
3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	44
3.1 ELEMENTOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN	44
3.1.1 Materiales	44
3.1.2 Equipo de Radiación	48
3.2 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	50
3.2.1 Curado con radiación	51
3.2.2 Curado tradicional	52
3.3 FABRICACIÓN DEL MOLDE PARA PROBETAS DE RESINA	53
3.4 PRUEBAS DE CURADO CON UV	56

3.4.1	Procedimiento para el curado de resina con fotoiniciador.....	58
3.4.2	Procedimiento para el curado de resina con fotoiniciador y fibra de vidrio	60
3.5	PRUEBAS DE CURADO TRADICIONAL	61
3.5.1	Curado tradicional de la resina de poliéster insaturado.....	61
3.5.2	Curado tradicional de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio	63
3.6	ANÁLISIS PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS.....	64
3.6.1	Dureza.....	64
3.6.2	Flexión a tres puntos	65
3.6.3	Estireno residual.....	66
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
4.1	Curado con radiación UV de resina de poliéster insaturado.....	68
4.2	Comportamiento de la temperatura variando el tiempo de exposición a la radiación.....	72
4.3	Dureza de la resina de poliéster insaturado durante el curado con radiación ultravioleta variando porcentaje de fotoiniciador.....	77
4.4	Comportamiento de la temperatura de la resina de poliéster insaturado variando el porcentaje de fotoiniciador.....	80
4.5	Curado con radiación ultravioleta de la resina de poliéster insaturado reforzada con fibra de vidrio.....	87
4.6	Comportamiento de la temperatura durante el proceso de curado del plástico reforzado variando el porcentaje de fibra de vidrio.....	95
4.7	Ensayos de flexión a tres puntos.....	100
4.7.1	Flexión a tres puntos en la resina de poliéster insaturado bajo curado tradicional.....	101
4.7.2	Flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado variando el porcentaje de fotoiniciador bajo curado UV.....	103
4.7.3.	Flexión a tres puntos del material reforzado curado mediante el método tradicional.....	111
4.7.4.	Flexión a tres puntos para el material reforzado curado con radiación UV, variando el porcentaje de fotoiniciador.....	114

CONCLUSIONES 124
RECOMENDACIONES 127
BIBLIOGRAFÍA 129

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Espectro electromagnético.....	26
Figura 2. Comparación de la vida útil y el tiempo de curado entre el curado térmico y curado UV.....	27
Figura 3. Comparación de las emisiones de estireno residual.....	28
Figura 4. Materiales compuestos en el tiempo.....	29
Figura 5. Estructura química glicoles a) Etilenglicol b) Propilenglicol c) Neopentilglicol.....	32
Figura 6. Estructura química anhídrido ortoftálico.....	33
Figura 7. Estructura química ácidos insaturados a) Acido fumárico b) Anhídrido maleico	34
Figura 8. Curva Exotérmica resina poliéster insaturado.....	39
Figura 9. Reacción de polimerización resina de poliéster insaturado.....	40
Figura 10. Esquema de transición del curado UV.....	42
Figura 11. Curado UV vs Curado térmico.....	44
Figura 12. Estructura química del fotoiniciador.....	46
Figura 13. Espectro de absorción del fotoiniciador.....	47
Figura 14. Equipo de radiación Andercol S.A.....	49
Figura 15. Esquema de la metodología de la experimentación.....	50
Figura 16. Molde para el curado tradicional de la resina.....	53
Figura 17. Molde de silicona para el curado de la resina.....	55
Figura 18. Molde final para el curado UV.....	56
Figura 19. Muestras del curado variando % fotoiniciador.....	57
Figura 20. Máquina Universal para pruebas mecánicas.....	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas fibra de vidrio tipo E.....	30
Tabla 2. Tipos de resina de poliéster insaturado.....	35
Tabla 3. Dureza de la resina de poliéster insaturado variando la exposición a los rayos UV en un intervalo de 15 a 60 minutos.....	69
Tabla 4. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 5 pasadas en la cámara UV.....	74
Tabla 5. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 10 pasadas en la cámara UV.....	75
Tabla 6. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 15 pasadas en la cámara UV.....	76
Tabla 7. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 20 pasadas en la cámara UV.....	77
Tabla 8. Dureza de la resina de poliéster insaturado variando el % de fotoiniciador, entre 15 y 60 min.....	78
Tabla 9. Medición de la temperatura en la resina de poliéster Insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.1%.....	82
Tabla 10. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.2%.....	83
Tabla 11. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.3%.....	84
Tabla 12. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.4%.....	85
Tabla 13. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 15 min.....	88
Tabla 14. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 30 min.....	90

Tabla 15. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 45 min.....	92
Tabla 16. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 60 min.....	93
Tabla 17. Medición de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 75% y de fibra del 25%.....	96
Tabla 18. Medición de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 70% y de fibra del 30%.....	97
Tabla 19. Medición de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 65% y de fibra del 35%.....	99
Tabla 20. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con método tradicional.....	101
Tabla 21. Resultados prueba a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con método tradicional.....	102
Tabla 22. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.....	104
Tabla 23. Resultados prueba a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.2%.....	104
Tabla 24. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.....	106
Tabla 25. Resultados prueba a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.3%.....	106
Tabla 26. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.....	108
Tabla 27. Resultados prueba a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.4%.....	109
Tabla 28. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión del material	

reforzado curado mediante curado tradicional.....	112
Tabla 29. Resultados prueba a flexión del material compuesto con curado tradicional.....	113
Tabla 30. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.....	115
Tabla 31. Resultados prueba a flexión del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.2%.....	116
Tabla 32. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.....	118
Tabla 33. Resultados prueba a flexión del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.3%.....	119
Tabla 34. Dimensiones de las probetas para el ensayo a flexión del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.....	121
Tabla 35. Resultados prueba a flexión del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.4%.....	121

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Comportamiento de la dureza de la resina de poliéster insaturado variando la exposición a los rayos UV, de 15 a 60 minutos.....	70
Gráfica 2. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 5 pasadas en la cámara UV.....	73
Gráfica 3. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 10 pasadas en la cámara UV.....	74
Gráfica 4. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 15 pasadas en la cámara UV.....	76
Gráfica 5. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 20 pasadas en la cámara UV.....	77
Gráfica 6. Comportamiento de la dureza de la resina de poliéster insaturado variando el % de fotoiniciador, de 15 a 60 minutos.....	79
Gráfica 7. Variación de la temperatura en la resina de poliéster insaturado con un porcentaje de fotoiniciador de 0.1%.....	82
Gráfica 8. Variación de la temperatura en la resina de poliéster insaturado con un porcentaje de fotoiniciador de 0.2%.....	83
Gráfica 9. Variación de la temperatura en la resina de poliéster insaturado con un porcentaje de fotoiniciador de 0.3%.....	85
Gráfica 10. Variación de la temperatura en la resina de poliéster insaturado con un porcentaje de fotoiniciador de 0.4%.....	86
Gráfica 11. Comparación de la temperatura variando porcentaje fotoiniciador...	87
Gráfica 12. Comportamiento de la dureza del material reforzado variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 15 min.....	89
Gráfica 13. Comportamiento de la dureza del material reforzado variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 30 min.....	91
Gráfica 14. Comportamiento de la dureza del material reforzado	

variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 45 min.....	92
Gráfica 15. Comportamiento de la dureza del material reforzado variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 60 min.....	94
Gráfica 16. Comparación del comportamiento de la dureza del material reforzado variando la cantidad de fibra entre 25-35%.....	95
Gráfica 17. Comportamiento de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 75% y de fibra del 25%.....	97
Gráfica 18. Comportamiento de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 70% y de fibra del 30%.....	98
Gráfica 19. Comportamiento de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 65% y de fibra del 35%.....	99
Grafica 20. Ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con método tradicional.....	103
Grafica 21. Ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.....	105
Grafica 22. Ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.....	107
Grafica 23. Ensayo a flexión de la resina de poliéster insaturado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.....	110
Grafica 24. Ensayo a flexión del material compuesto curado tradicional.....	113
Grafica 25. Ensayo a flexión del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.....	117
Grafica 26. Ensayo a flexión del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.....	120
Grafica 27. Ensayo a flexión del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.....	123

RESUMEN

Este trabajo es realizado con la finalidad de comparar el método de curado tradicional de resinas con métodos innovadores y poco explorados en el país como la aplicación de radiación con luz Ultravioleta, buscando tener una base comparativa y real mediante la cual se puede definir la efectividad de estos nuevos métodos y la posibilidad de implementarlos a gran escala en el sector industrial de los materiales compuestos en el país.

Para comenzar, se realizó una búsqueda y recopilación exhaustiva de información y bibliografía que nos permitiera obtener la mayor cantidad de conocimiento teórico alrededor del tema, teniendo en cuenta desde las bases de las reacciones de polimerización, hasta los últimos avances en curado UV.

Posteriormente y luego de tener las bases teóricas necesarias, se comienza a realizar la búsqueda del equipo apropiado para llevar a cabo la realización de ensayos experimentales de curado con radiación UV. Dicho equipo se encontró con la empresa de químicos Andercol S.A, quienes a la vez aportaron para el proyecto el acceso a la resina y el fotoiniciador, este último componente es indispensable en este proceso y de difícil consecución en el país.

Luego de tener la información y los equipos, se procedió a desarrollar pruebas experimentales, buscando que a través del método de experimentación conocido como “ensayo y error”, fuera posible identificar las variables más críticas del proceso, para establecer de esta forma y en base a los resultados obtenidos, cuáles de estas deberían dejarse como constantes y cuáles deberían variarse con cada ensayo. Durante esta parte del desarrollo del documento se encontraron resultados que evidenciaron la necesidad de dejar variables del equipo en un valor

constante, tales como la velocidad de la banda transportadora a través de la cual se ingresa la pieza a curar en el equipo, esto debido a que las diferentes velocidades ofrecidas por el equipo son demasiado altas, de tal manera que se deja en la menor de estas, con el fin de tener mejor maniobrabilidad sobre las muestras y de maximizar el tiempo de exposición a los rayos UV con cada pasada de la muestra a través de la banda.

También se decide dejar constante la potencia lumínica del equipo. Estas dos características estuvieron constantes durante todos los experimentos y las demás variables, tales como la cantidad de fotoiniciador, cantidad de resina o fibra de vidrio, tiempo de exposición o número de pasadas por el equipo etc., se variaron de acuerdo al experimento específico que se estuviese desarrollando y según la necesidad del mismo.

Como paso a seguir, se realizaron todas las pruebas para la obtención de datos de acuerdo a lo planteado anteriormente, a la vez que se fabricaron las probetas que posteriormente fueron utilizadas para llevar a cabo los ensayos mecánicos establecidos o propuestos.

Durante los experimentos enfocados en curado UV se pudieron observar resultados bastante interesantes, encontrando que la resina cura en mayor o menor medida de acuerdo a la cantidad de fotoiniciador utilizado. Se necesita al menos 0.2% de fotoiniciador para obtener un curado apropiado, además se pudo encontrar que el curado se lleva a cabo en cuestión de segundos y que bajo las condiciones apropiadas, en menos de 30 minutos se pueden obtener piezas de resina o de compuesto de resina y fibra de vidrio con valores de dureza hasta de 50 Barcol.

También se fabricaron probetas con el método de curado tradicional y ambos tipos de muestras fueron sometidos a los ensayos mecánicos, esto con la finalidad de

obtener una comparación directa entre ambos métodos y entender de mejor manera la posibilidad latente de establecer el método de curado UV como algo común para trabajar en la industria de los plásticos reforzados.

Al llevar a cabo los ensayos o pruebas mecánicas realizadas a la resina de poliéster insaturado curada con el método de radiación ultravioleta, se encuentra que los resultados obtenidos no son tan buenos como se esperaba, en cuanto a esfuerzo y carga de flexión máxima se refiere, incluso dichos datos presentan en su gran mayoría valores muy por debajo de los obtenidos al realizar la misma prueba a la resina curada con el método tradicional. Cabe anotar que los datos para las probetas de resina curada con UV presentan una dispersión muy alta, lo que demuestra que se pueden obtener buenos resultados pero se debe buscar mayor consistencia en el curado, de tal manera que las propiedades mecánicas sean iguales a lo largo de toda la probeta. A pesar de esto, es indispensable mencionar que los ensayo para los laminados de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio curados con rayos UV, arrojaron resultados muy satisfactorios en cuanto a las mismas propiedades se refiere, incluso obteniendo valores superiores a los encontrados con el mismo laminado pero curado tradicionalmente. En términos generales, es relevante decir que los mejores resultados respecto a propiedades mecánicas se obtuvieron con los curados que se llevaron a cabo utilizando 0.3% de fotoiniciador en la mezcla.

De manera paralela a estos desarrollos y ensayos experimentales, se llevó a cabo la interpretación de los datos a través de la realización de gráficas y evaluación del comportamiento de los materiales, toda vez que se dejaba registro de los resultados a medida que se realizaban los ensayos.

Finalmente se hizo la labor comparativa entre los valores encontrados a través de la experimentación con radiación UV y con curado tradicional, tal y como se mencionó anteriormente y se encontraron y desarrollaron las conclusiones

alrededor de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta de igual manera las bases teóricas.

Del trabajo realizado se puede concluir que las condiciones mas adecuadas para obtener el curado con radiación mas eficiente de un laminado de resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio, se obtienen con un porcentaje de fotoiniciador de 0.3% y 25% de fibra de vidrio, manteniendo fijas las variables del equipo; tiempo de exposición a la radiación en 15 pasadas y potencia lumínica en el 50%; Obteniendo así para este ensayo una dureza de 45 Barcol a los 15 minutos y de 50Barcol a los 30 minutos de la radiación, además de unos valores de carga y esfuerzo máximo de flexión de 513.82 N y 202.26 MPa respectivamente. Lo que implica que presenta valores de carga muy cercanos a los del curado tradicional (673 N) e inclusive valores de esfuerzo máximo de flexión superiores, ya que el curado tradicional arroja valores de 187Mpa en promedio.

INTRODUCCIÓN

Los materiales a través del tiempo han sido, indudablemente, la base para la evolución, crecimiento y desarrollo de las sociedades, razón por la cual el nivel de avance tecnológico alrededor del tema aumenta cada día más, generando así un interés superior en el estudio e investigación sobre el desarrollo de los nuevos materiales, lo que se traduce en la búsqueda y creación de materiales sustitutos con los que se pueda realizar de igual o mejor manera el trabajo que se ha realizado durante años con materiales tradicionales como los metales, cerámicos, plásticos, etc.

De este tema se desprenden innumerables ramas de estudio, pero una de las más relevantes o tal vez en la que más se ha profundizado es la de los materiales compuestos o composites, mediante la cual se busca, básicamente, obtener materiales que cumplan con propiedades físicas, químicas y mecánicas adecuadas para suplir necesidades que toda la vida se han cubierto con materiales tradicionales, pero que además, puedan proporcionar otro tipo de propiedades y beneficios tales como facilidad de fabricación y/u obtención, economía, bajo peso, entre otros, según la aplicación. Este es el caso del compuesto de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio, que se ha implementado ya en varias aplicaciones de la ingeniería que tradicionalmente ocupaban otros materiales (tuberías de acueducto, tanques de almacenamiento, postes, tejas para viviendas, etc.).

Teniendo esto en cuenta y a partir del ya mencionado interés generado por la ciencia de los materiales y sus múltiples e innumerables aplicaciones en los diversos sectores de la ingeniería, se presenta en esta ocasión la oportunidad de realizar un trabajo investigativo y experimental con el fin de profundizar en un tema poco tratado y de gran conveniencia para el crecimiento tecnológico de la industria de los materiales compuestos en el país, es decir, el curado de la resina de poliéster, incluyendo su derivado compuesto con fibra de vidrio.

En la actualidad y desde hace algunos años, los llamados plásticos reforzados vienen creciendo como alternativa para el uso en innumerables campos de aplicación, tales como la construcción, la electrónica, la aeronáutica, medicina, transporte y muchos más (Miravete, 2007); gran parte de este éxito se debe al continuo desarrollo y avance tecnológico presente en la búsqueda de la ampliación del conocimiento respecto a la fabricación, tratamiento, procesamiento y aplicaciones de las resinas termoendurecibles, especialmente en resinas de vinilésteres, ester-uretano y poliéster insaturado (Valea, Mondragón, & González, 2006), siendo esta última, una de las más utilizadas e implementadas en cuanto a las aplicaciones de ingeniería, especialmente por la capacidad y facilidad de

modificar sus propiedades en pro de la aplicación, tales como la resistencia mecánica, al calor y a la intemperie, absorción de agua, al igual que la resistencia a productos químicos y a temperaturas hasta 250°C (Parrilla, 1993, pp. 22-28). A todos estos beneficios se agrega la alta compatibilidad de la resina con la fibra de vidrio, que es probablemente el reforzante más utilizado en el área de los “composites”.

La velocidad con la que se descubren cada vez más aplicaciones y propiedades para los materiales compuestos de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio es sorprendente y conlleva al constante estudio alrededor del tema y sus respectivos procesos.

Es por esto que se ha decidido llevar a cabo un trabajo que permita encontrar una alternativa confiable para el mejoramiento del proceso de curado de los materiales y de esta manera aportar para que la industria del sector a nivel local pueda estar a la vanguardia en el desarrollo de un tema cuyo avance nunca se detiene.

Hoy en día, las empresas que trabajan en este sector en nuestro país no utilizan técnicas novedosas de curado de resina tales como la radiación UV y se espera que a través de trabajos como este se pueda abrir campo a la investigación en pro del desarrollo y mejoramiento de estas técnicas, pues se ha demostrado que la eficiencia comparativa es notablemente superior.

A lo largo de este trabajo, se podrán observar claramente los resultados obtenidos al realizar un desarrollo experimental alrededor del curado de resina de poliéster y laminados de la misma resina con fibra de vidrio, tanto de forma tradicional como con implementación de rayos UV, mostrando así la diferencia entre ambos, especialmente en el tiempo necesario para obtener un curado completo con ambos procesos e identificando a la vez las debilidades o fortalezas del proceso de radiación con UV en cuanto a propiedades mecánicas se refiere y concluyendo, además, acerca de la viabilidad de implementar dicho proceso y la posibilidad de

escalarlo de manera industrial, presentándola como una oportunidad de mejora continua en el sector de plásticos reforzados en el país.

OBJETIVOS

Objetivo general

- ✓ Definir mediante una experimentación comparativa de laboratorio, una metodología eficaz para el curado con radiación de la resina de poliéster insaturado

Objetivos específicos

- ✓ Recopilar la información necesaria para la revisión exhaustiva del proceso de curado tradicional, realizando un estudio teórico sobre el sistema catalítico de la resina y las inherentes reacciones químicas de sus grupos funcionales, sus componentes y la función que cumplen, teniendo en cuenta el desarrollo de la polimerización y sus variables.
- ✓ Analizar otros procesos de curado existentes, tales como la implementación de temperatura y radiación en sus diferentes formas (UV, microondas y EB) con el fin de evaluar experimentalmente las más apropiadas.
- ✓ Evaluar las propiedades mecánicas (dureza, flexión a tres puntos) y químicas (Estireno residual) de la resina sola y con fibra de vidrio en diferentes proporciones, utilizando el método de radiación más adecuado y

el método tradicional para el curado de las muestras, de manera que se visualicen las diferencias entre ellos.

- ✓ Identificar claramente la influencia de la fibra de vidrio en el proceso de curado del material, con el fin de interpretar la eficiencia de los métodos de polimerización en función de la cantidad de fibra empleada.
- ✓ Confrontar los resultados obtenidos mediante el proceso experimental, con la teoría existente y los trabajos realizados con anterioridad alrededor del tema con el fin de contribuir al desarrollo tecnológico de la industria de plásticos reforzados.

1 ESTADO DEL ARTE

1.1 Curado con radiación

Como se ha venido mencionando, la tecnología en el desarrollo de los nuevos materiales viene creciendo a pasos agigantados, lo que da un indicio que dicho crecimiento no hace referencia solo a la creación o elaboración de materiales como tal, sino también, a la investigación y desarrollo de procesos relacionados, es decir, procesos de fabricación, almacenamiento, mejoramiento del producto, etc.

En este caso en particular se habla del proceso de curado de las resinas y/o materiales compuestos, ya que es el cuello de botella del proceso general de fabricación de un compuesto, esto debido a que suele ser bastante engorroso, complejo y, por lo general, el tiempo necesario para llevarlo a cabo es bastante largo, lo que conlleva a reprocesos, pérdidas de propiedades, fallas de calidad y obviamente desmejoras en la productividad.

Durante los últimos años, especialmente las últimas dos décadas, el desarrollo y los avances relacionados con la tecnología de curado por radiación han sido

bastante representativos, debido principalmente a los altos costos operativos y productivos que genera en las industrias del sector, la implementación de las complejas técnicas actuales, las cuales a su vez, restringen de manera importante la utilización a gran escala de los materiales compuestos (Papargyris, Day, Nesbitt, & Bakavos, 2008),

Por medio de algunas investigaciones realizadas se ha encontrado que al aplicar el curado con radiación se ha logrado una mejora representativa en la estabilidad de la resina, ya que cuando se les ha aplicado dicho proceso, no son fácilmente “auto-curables” a temperatura ambiente, lo que hace completamente innecesario el almacenamiento a bajas temperaturas que suele ser común con los otros procesos. También se ha mostrado que mejora la compatibilidad de los materiales, logrando que compuestos que tienen varias fibras se puedan curar fácilmente y sin distorsiones, a diferencia del curado térmico por ejemplo; todas estas ventajas técnicas han llevado a demostrar que el costo del proceso de curado en sí mismo sea muy bajo, estimando que este sea un 20-30% más bajo que el de curado térmico. Con base en esto, el proceso de curado con radiación ha ido en constante aumento, a pesar del hecho que esta tecnología ha sufrido de una estrecha e importante vigilancia por la sociedad y los medios reguladores, debido a los mitos que existen alrededor de todo lo que implique el uso de la radiación. (singh, 2001; SINGH, SAUNDERS, BARNARD, & LOPATA, 1996).

Es tan amplio el espectro de aplicaciones de los métodos de radiación, que se han implementado también para procesos de post curado de las piezas y de iniciación de polimerización de las mismas, ya que este tema es bastante importante debido a la complejidad existente en dicho proceso, especialmente en cuanto a las resinas de poliéster insaturado, debido a que dentro de la mezcla (monómero y polímero) se presentan dos fases, una en la cual hay una gran cantidad de estireno y otra en la cual la presencia del monómero es muy poca; debido a este fenómeno, las dos fases suelen curarse a diferentes velocidades y obviamente de diferentes maneras, llevando a que la iniciación ocurra mayormente en la fase rica

de estireno, mientras que el núcleo de poliéster tiene una iniciación escasa. Se ha demostrado que estos inconvenientes se pueden evitar mediante la iniciación con radiación ya que esta es mucho más homogénea a través de todo el sistema (Pucic & Ranogajec, 2003).

Alrededor del tema y en pro de investigar a fondo el comportamiento de los compuestos luego de que han sido irradiados para su curado, se han desarrollado estudios de análisis de piezas curadas con radiación durante los días posteriores a tal proceso, encontrando que existe una degradación posterior a la irradiación aunque esto depende mucho del polímero que se esté trabajando. De cualquier manera se ha demostrado que el estudio posterior a la irradiación es indispensable realizarlo para corroborar por completo que el método es tan efectivo en el momento del curado como en el posterior uso del material (Jurkin & Pucic, 2006).

1.2 Curado con UV

Si bien el curado por radiación viene creciendo y posicionándose como una técnica viable para llevar a cabo dicho proceso sin problemas, es importante resaltar que la radiación más utilizada es la de luz ultra violeta y esto tiene sentido pues es tal vez la de mayor accesibilidad en el mercado, la de menor complejidad para su implementación y a la vez la de menor riesgo para la salud, además de ser un proceso bastante estable.

Adicional a esto, se ha encontrado que las ventajas y beneficios del curado con radiación UV son bastantes y de gran magnitud, tales como obtener un curado casi instantáneo, poca generación de compuestos orgánicos volátiles o emisiones contaminantes peligrosas y formulaciones de larga vida útil (CYTEC ENGINEERED MATERIALS, 2013).

Aunque pareciera que el curado UV es algo de lo que se viene hablando hace muy poco, en realidad no es así, pues este proceso ha estado en investigación y se ha aplicado en teoría desde 1940 cuando salió la primera patente para una tinta que se curaba con radiación UV, pero comercialmente no se vino a mencionar hasta mediados de 1970, cuando las preocupaciones ambientales por las emisiones VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles) tomaron fuerza, sin embargo, desde esa época y hoy por hoy el uso de esta tecnología es impulsado sin duda alguna por argumentos bastante relevantes, tales como: mejorar el rendimiento del producto y/o materia prima y obtener al final del proceso una mayor productividad (Clean Air Technology Center, 2004).

Todo esto hace que la tecnología del curado se haya querido aplicar en muchas industrias del sector, pero inicialmente estaba limitada al curado de planchas planas, principalmente en las industrias de los productos de madera y de impresión, pero la mejora en las tecnologías de las plantas de producción tales como los transportes giratorios, multiplicidad y aumento de fuentes de radiación UV (lámparas), adicional a la evolución en los ajustes y mejoras de los equipos de radiación implementados, llevaron a que la aplicación se pudiera extender hasta poder curar sin problemas piezas tridimensionales de gran tamaño (Clean Air Technology Center, 2004).

De tal forma que en la actualidad esta técnica está creciendo y tomando fuerza en la industria manufacturera de los materiales compuestos, particular y especialmente en áreas específicas de dicha industria tales como el curado in situ de tuberías, el proceso de pultrusión y el de *filament winding* o como es conocido en el sector, enrollado de filamentos, que incluye fabricación de tuberías, tanques, postes o elementos cilíndricos y/o cónicos. Estos sectores y beneficios demostrados durante el desarrollo de dicha tecnología en los últimos años, son los que están impulsando y llevando a que los fabricantes de materiales compuestos estén adoptando dicha tecnología de curado con radiación ultravioleta

y a la vez adaptándola en cada uno de sus procesos, debido a la flexibilidad de aplicación de la misma (Clean Air Technology Center, 2004).

Es tal el auge de este tema en el mundo de los materiales compuestos que en la actualidad ocupa puestos o lugares prioritarios en las discusiones de los congresos o convenciones de este sector industrial que se organizan en el mundo; tanto así que en Enero del presente año (2013), durante la exhibición y convención de compuestos realizada en Orlando, Florida (“COMPOSITES 2013: The premier exhibition and convention”), el tema del curado UV fue parte central y fundamental de la misma y de allí se lograron sacar algunos apartes importantes acerca del tema y que certifican lo que se viene mencionando. El curado con radiación UV, definitivamente tiene ventajas que lo destacan como proceso alternativo de curado: Incremento de la productividad, reducción o eliminación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (solvente), bajas temperaturas de proceso, relativo a otros procesos térmicos de la misma naturaleza, alto grado de curado. Sin embargo, y también es importante mencionarlo, el curado UV tiene desventajas como cualquier tipo de proceso nuevo e innovador, por ejemplo la seguridad y cuidados para la salud de quienes manipulan la fuente de radiación y el costo de los materiales para llevar a cabo el proceso tales como los fotoiniciadores.

A manera informativa y de acuerdo a lo concluido en el congreso mencionado, es importante destacar que el curado UV se da en una longitud de onda específica y que es básico tener esto en consideración según el requerimiento de curado o el tipo de proceso que se desea llevar a cabo, pues no cualquier lámpara UV puede curar y más importante aún, al variar dichas características el proceso de curado como tal podrá tener también variaciones tales como tiempo de curado, temperaturas, etc. Teniendo esto presente y entendiendo que la energía de la luz ultravioleta está concentrada en un rango de 200 a 425nm, se ha concluido que este es el rango apropiado para llevar a cabo el proceso en mención (figura 1).

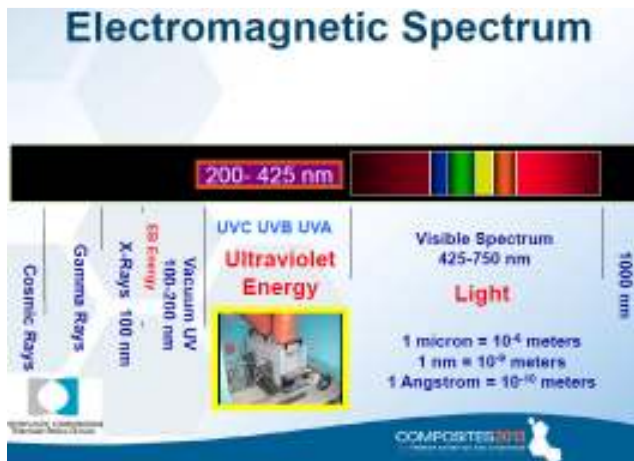


Figura 1. Espectro electromagnético. Fuente: (Bronk, 2013).

1.2.1 Comparación de la vida útil según la tecnología de curado

Las resinas curadas mediante UV, debido a que su formulación solo contiene fotoiniciador, resina base y monómero, presentan una vida útil más larga que aquellas que contienen catalizadores, es decir, no hay espacio de almacenamiento para estos, ni manipulación de peróxidos. Generalmente se espera que las resinas curadas mediante radiación UV tengan una vida útil de aproximadamente 6 meses (figura 2), esto se debe a diferentes paquetes de estabilizador presente en las resinas.

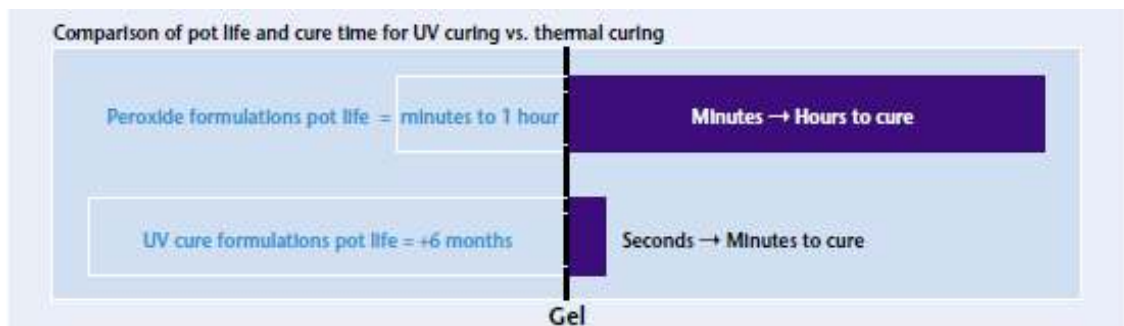


Figura 2. Comparación de la vida útil y el tiempo de curado entre el curado térmico y curado UV. Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2003).

1.2.2 Emisiones de estireno residual

Con curado UV las emisiones de estireno residual se reducen considerablemente, a diferencia del curado térmico (figura 3), el curado con radiación se realiza a temperatura ambiente y se inicia rápidamente. Este ciclo de endurecimiento de tiempo-temperatura es lo que impulsa la reducción de las emisiones de compuestos volátiles. Un aumento inmediato de la viscosidad al comienzo de la foto-polimerización minimiza la cantidad de estireno propenso a la evaporación. Este estireno "atrapado" está entonces disponible para la polimerización en curso.

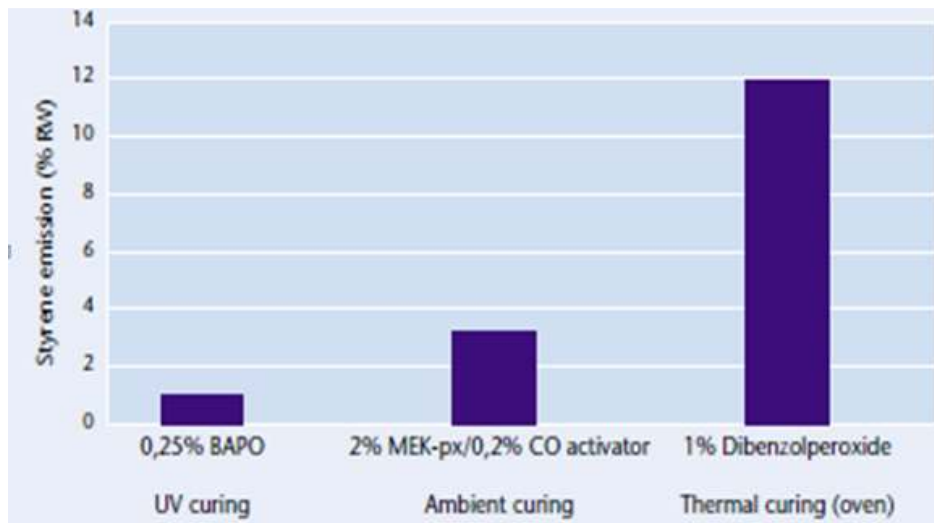


Figura 3. Comparación emisiones estireno residual. Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2003)

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Materiales compuestos.

Los materiales compuestos son aquellos, que como su nombre lo indica están formados por dos materiales diferentes en cuanto a su naturaleza, bien sea del

mismo origen o de diferente. Normalmente se conforman por un material matriz (metálico, polimérico o cerámico), el cual es la base del compuesto, y por un material reforzante, que por lo general se trata de una fibra de vidrio o de carbono, aunque de cualquier manera, todos estos materiales se pueden combinar con el fin de lograr valores de propiedades mecánicas, químicas y físicas que no es posible conseguir en un único material (Askeland & Phulé, 2004, pp. 721-722), estas razones han generado que en las áreas más determinantes de la ingeniería se empleen continuamente los materiales compuestos, especialmente los plásticos reforzados. Debido a las buenas características de ambos materiales, uno de los composites mas implementados es la resina de poliéster insaturado reforzada con fibra de vidrio.

Es de esta manera como se ha venido apreciando un crecimiento en la utilización de los materiales compuestos, que han ido reemplazando a materiales como los metales, ver figura 4.

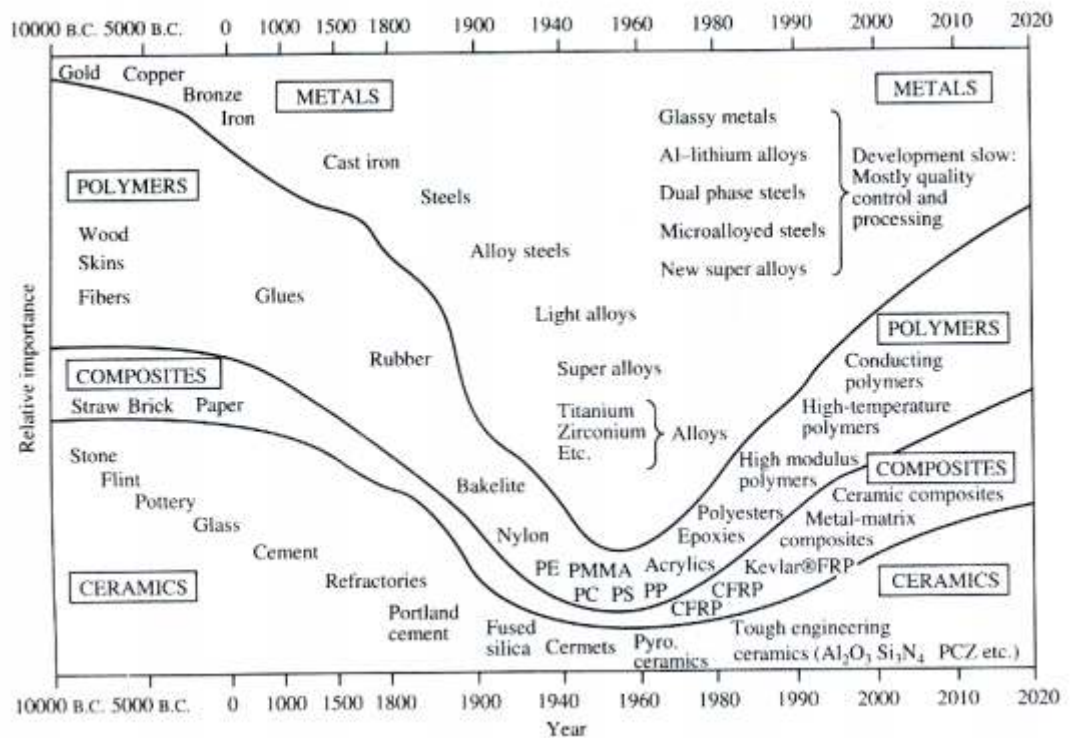


Figura 4. Materiales compuestos en el tiempo. Fuente: (Weber Viladoms, 2003).

2.2 Fibra de vidrio.

Es el reforzante mas empleado en la industria de los plásticos reforzados, esto se debe principalmente a las interesantes propiedades que la misma presenta: alta resistencia a la tensión, completamente incombustible, biológicamente inerte, alta resistencia a la intemperie y agentes químicos, además de su baja conductividad térmica. Aunque estas características cumplen para todas las fibras de vidrio, la que se emplea comúnmente en la fabricación de plásticos reforzados es la tipo E, que es un compuesto borosilícico con escaso contenido de álcalis y mayor contenido de óxidos de aluminio, calcio y magnesio (ANDERCOL S.A, 1991; Parrilla, 1993). En la tabla 1 pueden apreciarse las características mas importantes de la fibra de vidrio tipo E.

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad	<i>lbs/in³</i>	0.092
Dureza	Escala Mohs	6.5
Resistencia a la tracción	Gpa	3.5
Modulo de elasticidad	Gpa	75
Coefficiente de Poisson		0.22
Recuperación elástica	%	100
Alargamiento a rotura	%	2 - 4
Coefficiente de conductividad térmica	<i>W/m°C</i>	1.035
Calor especifico	<i>KJ/m°C</i>	0.795
Punto de ablandamiento	°C	850
Perdida de tenacidad	°C	350
Contenido de humedad	%	0
Rigidez dieléctrica	<i>KV/mm</i>	> 20
Constante dieléctrica	50-10 ⁶ Hz	6 - 6.4
Índice de refracción		1.529
Transmisión ultravioleta		opaca

Tabla 1. Propiedades físicas más comunes de la fibra de vidrio tipo E (Orrego & Vélez, 1987).

Existen diferentes tipos de presentaciones comerciales de las fibras, en este caso se trabajó con fibra tipo Mat gramaje 450 (450g/m^2), compuesta por una serie de “*Hilos cortados, entrelazados aleatoriamente, aglomerados y prensados, que constituyen una manta que tiene un alto poder de absorción de las resinas de poliéster*”. (Tecnopol, 2008), es decir, se presenta como un arreglo multidireccional o aleatorio y que se caracteriza por presentar las mismas propiedades mecánicas sin importar la dirección de las fibras.

Las mantas para laminación manual se desarrollan para obtener cualidades en el procesado, como lo son: facilitar la impregnación y penetración de la resina en el laminado y por último facilitar la remoción de aire (González, 2003).

2.3 Resina de poliéster insaturado.

Las resinas de poliéster insaturado son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, en las que actúan como matriz o como fase continua de un material compuesto. Se obtienen por reacción de glicoles con ácidos o anhídridos insaturados, dando como resultado cadenas lineales y/o ramificadas, las cuales presentan insaturaciones alifáticas que son susceptibles de un posterior entrecruzamiento (Ramis Juan, 1994). Los puntos de insaturación son dobles enlaces covalentes entre átomos de carbono contiguos, estos enlaces pueden ser fácilmente rotos por la acción de radicales libres derivados de sustancias catalizadoras apropiadas.

Las resinas, en general pueden ser clasificadas en termoplásticas y termofijas. Las termoplásticas se presentan sólidas a temperatura ambiente siendo procesadas por calentamiento, fusión y enfriamiento en un molde apropiado. Por su parte las termofijas o termoestables son aquellas que cambian irreversiblemente bajo la

influencia de calor, luz, agentes químicos y fotoquímicos, pasando de un material que se puede fundir y es soluble a otro no fundible e insoluble. Las resinas termoestables, sobre todo las epoxi, las de poliéster insaturado y las de poliuretano, son utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones en las que actúan como matriz o fase continua de un material compuesto (Gil, 2012).

Formulación resina de poliéster

El poliéster está formado por la reacción de ácidos polibásicos (saturados e insaturados) con glicoles, que son luego mezclados con un monómero polimerizable.

Algunos de los mayores componentes de la resina de poliéster son:

- **Glicoles:** Tienen una influencia importante en las características finales de la resina en que se emplean, ya que la flexibilidad, la resistencia al calor y al agua, son propiedades que se ven afectadas por este componente (Gutierrez, Materias primas, 2004):

Los más comunes en las resinas de poliéster son: el etilenglicol, el propilenglicol y el neopentilglicol, cuyas estructuras se muestran a continuación:

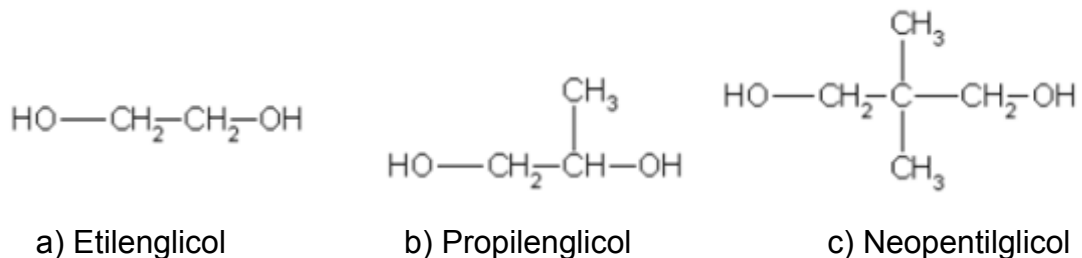


Figura 5. Estructura química glicoles. Fuente: (Herrera, 2009).

Como puede observarse la molécula de etilenglicol (figura 5a) es simétrica, mientras que el en caso del propilenglicol (figura 5b) su molécula es asimétrica y ramificada lo que da al poliéster mejor resistencia al impacto, a altas temperaturas, adicional de la característica que otorga el grupo metilo de proteger a los esteres de la acción del agua. Por otro lado el neopentilglicol (figura 5c) con la presencia de los dos grupos metilo permite la protección a los grupos hidroxilo, lo que se traduce en una resina con alta resistencia a la intemperie, pequeña absorción de agua y excelente brillo, sin embargo, el etilenglicol por su costo y desempeño es el más utilizado en la síntesis de resinas de poliéster (Plastiquimicas, 2010).

- **Ácidos/anhídridos:** un gran número de ácidos sirven para la síntesis de la resinas de poliéster insaturado. Las características de los ácidos influirán en la resina mejorando la resistencia química, al fuego e incrementando la dureza. Los grupos insaturados de las resinas de poliéster provienen de los ácidos (Gutierrez, Materias primas, 2004).

Los ácidos saturados más usados en la resina de poliéster son el ortoftálico (en forma de anhídrido) y el isoftálico. El ácido ortoftálico otorga a la resina características como: rigidez, tiempo de gel más largo, menor susceptibilidad al ampollamiento, menor resistencia al agua y hace las resinas menos viscosas (Plastiquimicas, 2010), su estructura es tal como se muestra en la figura 6.

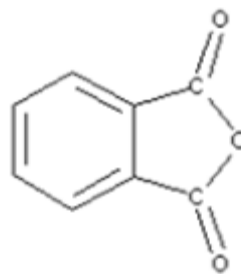


Figura 6. Estructura química Anhídrido Ortoftálico. Fuente: (Plastiquimicas, 2010).

Por último, dentro de los ácidos insaturados los más usados son el anhídrido maléico (figura 6b) y su isómero el ácido fumárico (figura 6a) que proporcionan a la resina las insaturaciones. Adicional a que el anhídrido maléico al no tener “agua” de condensación, hace a la resina mucho más estable ante la acción del agua (Ramis Juan, Tesis Doctorales en Red, 1994).

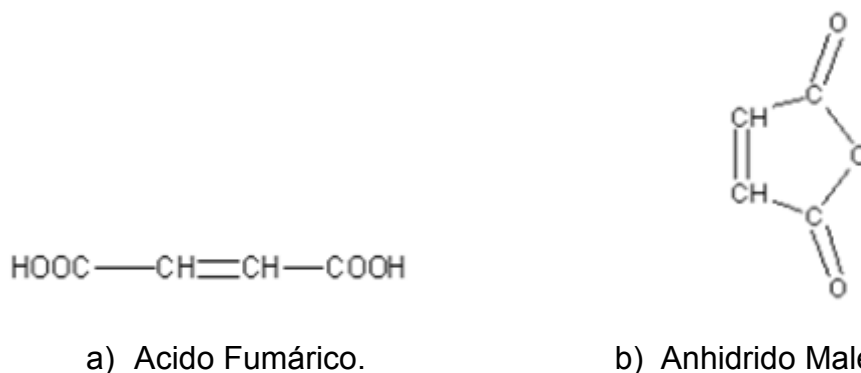


Figura 7. Estructura química Ácidos insaturados. Fuente: (Plastiquimicas, 2010).

- **Monómeros:** empleados para copolimerizar con los puntos de insaturación de las cadenas lineales del polímero, desarrollando la estructura del termofijo, igualmente sirve como solvente para las resinas. El estireno es el más usado debido a su bajo costo, compatibilidad, facilidad de adquisición y buenas propiedades de curado (Gutierrez, Materias primas, 2004).

Otro componente importante en la fabricación de las resinas de poliéster son los inhibidores que logran que la resina no reaccione, es decir, no gele antes del tiempo en el que son incorporados los promotores de la reacción. Es por esto que se habla de dos tipos de inhibidores. Los más fuertes son efectivos en las condiciones de almacenamiento y de polimerización y muchas veces es preferible su eliminación antes de la reacción, a fin de obtener una velocidad de curado

deseada. El segundo tipo es aquél cuya efectividad termina por la acción de promotores o por calor que inducen la polimerización. Aunque existen gran cantidad y tipo de inhibidores, para resinas de poliéster insaturado, normalmente suelen utilizarse el terbutilcatecol y la hidroquinona (Ramis Juan, Tesis Doctorales en Red, 1994).

Según lo expuesto es de esperarse entonces que existan diferentes tipos de resinas de poliéster, por lo que a continuación se presenta una tabla con las mas usadas (tabla 2):

Tipos	Ácidos o Anhidridos Insaturados	Ácidos o Anhidridos Saturados	Glicoles	Monómero
Ortoftálicas	Anhídrido Maleico	Anhídrido Ftálico	Propilenglicol Etilenglicol	Estireno
Isoftálicas	Anhídrido Maleico	Anhídrido Isoftálico	Propilenglicol Dietilenglicol	Estireno
Tereftálica	Anhídrido Maleico	Ácido Tereftálico	Propilenglicol	Estireno
Tetrahidroftálica	Anhídrido Maleico	Anhídrido tetrahidroftálico	Propilenglicol	Estireno
Bisfenólicas	Anhídrido Fumárico	Anhídrido Ftálico	Bisfenol A	Estireno
Resinas de ácido tetracloroftálico	Anhídrido Maleico	Ácido Tetracloroftálico	Etilenglicol	Estireno
Resinas de ácido Het	Anhídrido Maleico	Ácido HET	Etilenglicol Dietilenglicol	Estireno
Resinas de Metacrilato metilo	Anhídrido Maleico	Anhídrido Ftálico	Propilenglicol	Estireno + MMA

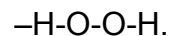
Tabla 2. Tipos de resinas de poliéster más utilizados. Fuente: (Miravete, 2007).

2.4 Catalizadores y aceleradores

Para que una resina pase de estado líquido a sólido, se hace reaccionar el monómero que se encuentra disuelto en ella. Esto se logra con la adición de un catalizador.

- **El catalizador:** es el elemento que se descompone en la solución e inicia la reacción de curado ya que activa al monómero, originando que reaccione con los grupos saturados de la cadena de poliéster, obteniendo así un producto sólido termofijo, para que esto sea posible se puede hacer de dos maneras básicas. La primera, es con la implementación de un catalizador y agregando calor a la mezcla, o la segunda se hace a temperatura ambiente empleando también un catalizador y a la vez un preacelerante. Los más comunes son (Gutierrez, Catalizadores y aceleradores, 2004):
 - ✓ Peróxido de benzoilo (BPO).
 - ✓ Peróxido de metil etil cetona (MEK peróxido o MEK-P).
 - ✓ Peróxido de ciclohexanona.
 - ✓ Peróxido de diacetil.

Los peróxidos orgánicos presentan una fuente importante de radicales libres, debido al grupo químico característico –O-O, derivados del peróxido de hidrógeno:



Reemplazando uno o ambos átomos de hidrógeno por el grupo orgánico se pueden formar diferentes tipos de peróxidos:



Siendo R1 un grupo orgánico y R2 también grupo orgánico o hidrógeno (Plastiquimicas, 2010).

- **El acelerador** es un elemento químico que actúa directamente sobre el catalizador, regulando la velocidad de descomposición a temperatura

ambiente, permitiendo prolongar o reducir el tiempo en el que se lleva a cabo la reacción de curado. El acelerador debe mezclarse perfectamente con la resina y con anticipación al mezclado con el catalizador, ya que mezclarlos de manera conjunta podría generar explosión. Los más comunes son (Gutierrez, Catalizadores y aceleradores, 2004) :

- ✓ Octoato o naftaleno de Cobalto (Cobalto).
- ✓ Dimetilanilina (DMA).
- ✓ Dietilanilina (DEA).
- ✓ Dimetilparatoluidina (DMPT)

En este caso específico, la resina de poliéster insaturado empleada es a base de MEK (metil étil cetona peróxido) peróxido, donde es común el uso de sales organometálicas de cobalto como el naftaleno de cobalto o el octoato de cobalto que actúan como acelerador (Lopez Oliveros & Mejia Ordoñez, 2004).

2.5 Polimerización.

Para llevar a cabo el proceso de gelado y curado de la resina poliéster, se debe pasar por una reacción de polimerización que consta de tres etapas básicas.

1. La iniciación, donde el movimiento del sistema molecular, ayudado por calor o luz solar, origina que algunas moléculas de estireno rompan su doble enlace, generando cada vez mas rompimientos de las dobles ligaduras al interior de toda la resina, ocasionando que ésta gele antes de lo deseado. Para evitar esto, se utilizan inhibidores que al reaccionar con los radicales libres, impiden el gelado prematuro de la resina, cuando se desea lograr el efecto contrario, se adicionan catalizadores que liberan radicales libres altamente activos.

La iniciación consiste entonces en la ruptura homolítica del iniciador, para formar radicales libres por efecto térmico.



La acción del radical libre sobre el monómero da lugar a la formación de un monómero activado, $\text{RM} \cdot$, que vamos a representar por M^*



2. Propagación, en la cual dichos radicales, reaccionan con los inhibidores, generando tres posibles reacciones de polimerización en la mezcla: Homopolimerización de las moléculas del monómero, Homopolimerización de la cadena de poliéster o la copolimerización de ambos elementos entre sí, que conlleva a que el monómero (estireno) se una a varios puntos de la cadena del polímero (poliéster), creando puentes entre estas y formando una molécula mayor con forma de red.



Al final de la etapa se obtiene la cadena activada M_n^* .

3. Terminación, donde finalmente las cadenas se unen dando lugar a posibles reacciones como la de adición, transferencia de cadena y la más aceptada que es la de agotamiento, que surge cuando se terminan las moléculas reaccionables (Carrillo & Mejía, 2003; Parrilla, 1993; Gutierrez, 2004).

Es conveniente indicar que la velocidad de dicha reacción normalmente dependerá de la resina y la actividad que tenga el catalizador, por lo cual, es probable que sin la adición de un acelerador, calor o el efecto de la radiación, el curado de la resina tenga una duración de horas o incluso hasta días.

2.6 Curado tradicional

El curado de una resina comienza cuando se le agrega un acelerador, por la aplicación de temperatura o por la radiación. Los encargados de controlar el tiempo de gel de la resina son la temperatura ambiente y la cantidad de catalizador. El curado debe llevarse a cabo a temperaturas superiores a los 15°C, temperatura a la cual se activa la reacción de reticulación. Reacciones por debajo de esta temperatura afectan considerablemente las propiedades mecánicas de los laminados. La reacción que se lleva a cabo es exotérmica y puede alcanzar valores de 150°C. La curva exotérmica es tal cual como se muestra en la figura 7 (Lopez Oliveros & Mejia Ordoñez, 2004).

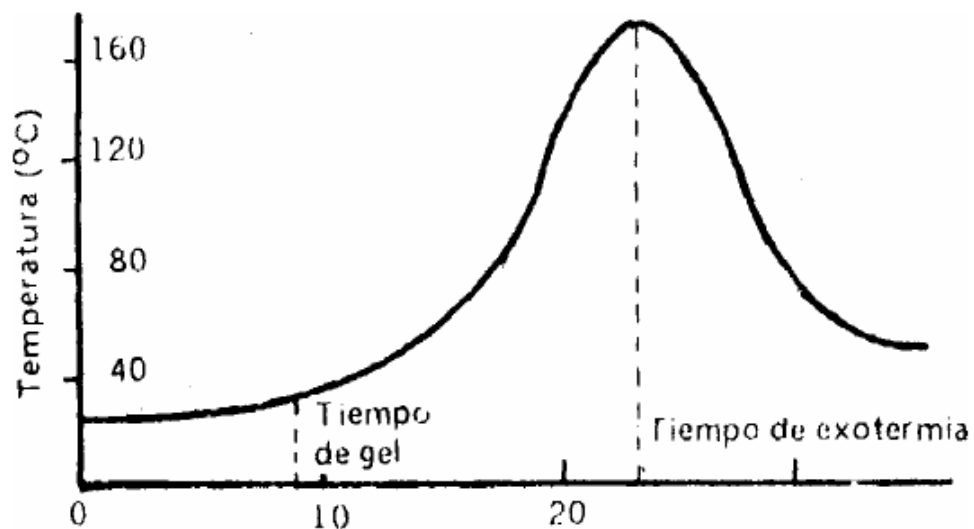


Figura 8. Curva exotérmica de la resina de poliéster insaturado. Fuente: tomada del manual de aplicaciones de poliéster reforzado con fibra de vidrio de Andercol S.A.

Pueden apreciarse tres fases de la reacción (Londoño Martínez & Montoya Ramirez, 2005):

- Tiempo de gelificación: tiempo transcurrido entre la adición del catalizador, hasta la formación de un gel blando. Este tiempo es el que permite trabajar con la resina. El tiempo de gel puede variar de acuerdo al contenido de iniciador, el contenido del acelerador, la temperatura ambiente, la pérdida del monómero por evaporación, la diferencia de tiempo entre la adición del catalizador y la adición del acelerador, así como la presencia de inhibidores.
- Tiempo de exotermia: tiempo que transcurre entre la adición del catalizador hasta el punto máximo de temperatura alcanzado por la resina al curar.
- Tiempo de endurecimiento: tiempo transcurrido desde que la resina gelifica, hasta el punto en el que está lo suficientemente dura para ser retirada del molde.

Generalmente el paso final es el postcurado, proceso en el cual el laminado es llevado a un horno caliente con aire seco a una temperatura de 80°C aproximadamente durante 3 horas (Andercol S.A, 2011).

La reacción de polimerización que se lleva a cabo durante el curado tradicional de la resina de poliéster insaturado se muestra en la figura 8.



Figura 9. Reacción de polimerización de la resina de poliéster insaturado. Fuente: (Tecnopol, 2008).

2.7 Curado UV

El curado mediante radiación UV es un proceso químico en el que se forma instantáneamente un polímero como resultado de una reacción en cadena inducida por la luz, este proceso también es denominado fotopolimerización.

Para que se lleve a cabo es necesario que la formulación sea a base de monómeros y oligómeros líquidos. *“Los monómeros son materiales de bajo peso molecular utilizados como diluyentes reactivos para ajustar la viscosidad de las formulaciones”* (Ciba Specialty Chemicals, 2003). La mezcla de estos con los oligómeros y un porcentaje bajo de fotoiniciador es sometido a la radiación UV que genera entre ellos un cruce de enlaces formando compuestos duros.

El proceso de curado UV requiere una fuente de luz visible que incide en el producto formulado, son los fotoiniciadores los encargados de absorber la energía UV de la fuente de luz y permitir la reacción química que se desencadena (Ciba Specialty Chemicals, 2003).

En la figura 10 se puede observar un esquema en el que se esboza el comportamiento de la resina al agregarle fotoiniciador y aplicar la energía de la luz ultravioleta.

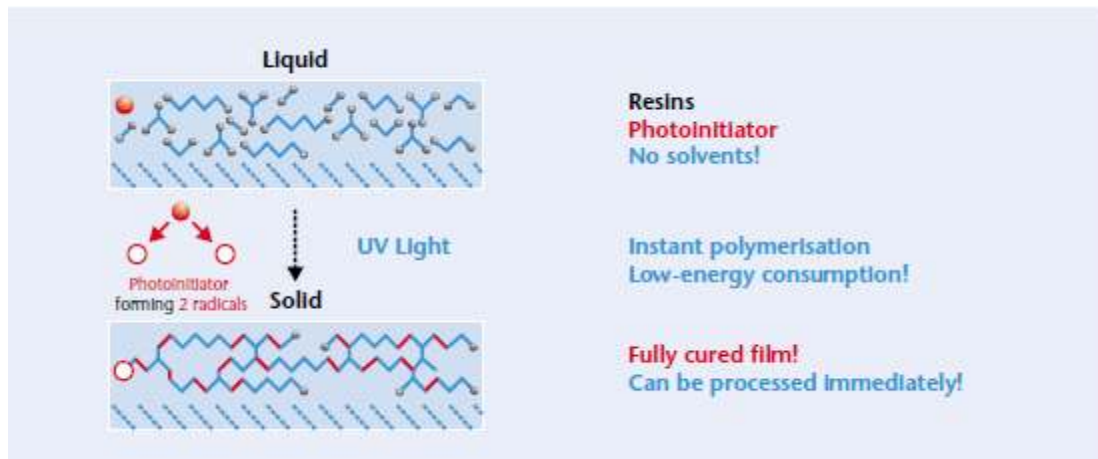


Figura 10. Esquema de la transición del curado UV. Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2003).

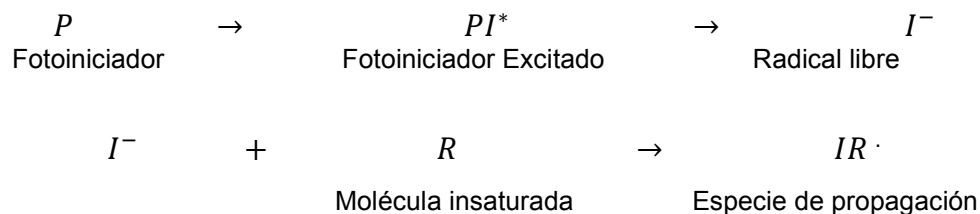
Ahora se especificarán las etapas de reacción que se desarrollan durante el curado UV:

- ✓ La etapa de iniciación en el curado ultravioleta implica el uso de fotoiniciadores que tienen tendencias a generar radicales libres cuando se exponen a los rayos UV. Estos fotoiniciadores, que pueden ser utilizados en diversas combinaciones, se utilizan en niveles que van desde el 1% hasta el 10% en peso del contenido total de resina.
- ✓ En la etapa de propagación tal como se representa en el esquema de reacciones b, se identifica el movimiento de la polimerización por medio de extensiones, es decir se da el crecimiento de la cadena polimérica.

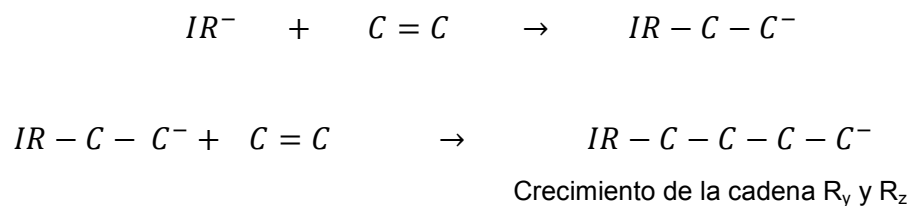
Finalmente en la etapa de terminación se da una combinación en la que dos cadenas de propagación se unen para formar una molécula de polímero.

De acuerdo a lo mencionado, se muestra la ruta de reacción seguida durante el curado UV (Blair, 1996):

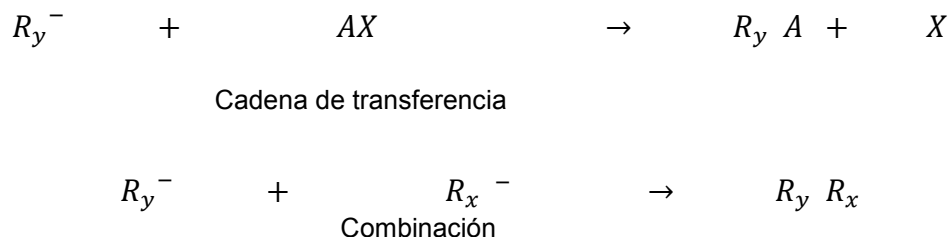
a) Iniciación:



b) Propagación:



c) Terminación:



En conclusión puede decirse entonces que la fotopolimerización utiliza energía luminosa para iniciar reacciones en cadena y permitir así la formación de materiales poliméricos, tiene muchas ventajas sobre polimerizaciones térmicas y redox en las que el sistema de reacción se calienta para producir centros activos, es decir, los sistemas fotocurados actúan bajo temperatura ambiente, característica que se traduce en menores costos de operación y producción (Blair, 1996).

Así como los sistemas tradicionales, el curado UV contiene iniciador, monómero, y aditivos que imparten propiedades deseadas como: color, fuerza y flexibilidad. La reacción se inicia por los centros activos que se producen cuando la luz es absorbida por el fotoiniciador. Con el fin de producir radicales libres que inicien la polimerización, los fotoiniciadores absorben luz de una determinada frecuencia. Después de la absorción, la molécula de fotoiniciador se promueve desde el estado electrónico fundamental a un estado electrónico excitado (Cai & Jessop, 2004). Los procesos de curado a temperatura ambiente o curado térmico, suelen utilizar peróxido como parte del catalizador. En la tecnología de curado UV el peróxido se sustituye en su totalidad por el fotoiniciador (figura 11).

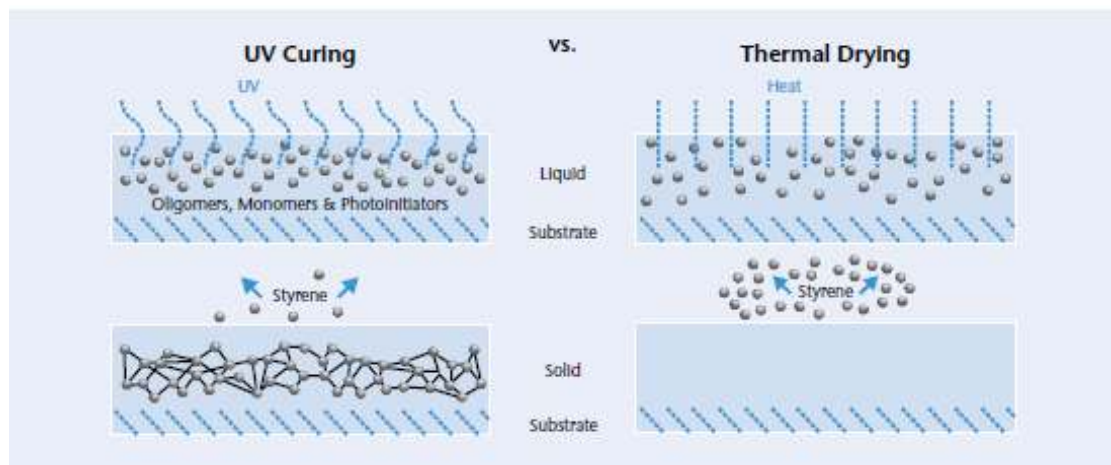


Figura 11. Curado UV vs Curado térmico. Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2003).

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 ELEMENTOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN

3.1.1 Materiales

Como ya se ha mencionado, los plásticos reforzados más utilizados en la industria actualmente son aquellos compuestos por resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio, lo cual fue una de las razones principales para concentrar los esfuerzos experimentales de este trabajo en dicho material compuesto.

En la actualidad y debido al auge de los plásticos y los materiales compuestos, existen gran cantidad de fabricantes de resinas en todo el mundo, y Colombia no es la excepción, por lo cual se decidió buscar e implementar una resina con características particulares que fueran favorables a los ensayos experimentales que se iban a realizar y que adicionalmente no estuviera afectada por ningún tipo de aditivo que pudiera perjudicar de alguna manera los ensayos de curado con radiación o que a la vez, generara información errónea adjudicada al origen de la resina.

Teniendo en cuenta la naturaleza de los ensayos, las únicas características físicas que se debían tener en cuenta para la selección de la resina, eran las siguientes: garantizar que no tuviera incorporado en la mezcla ningún tipo de catalizador, ni acelerador y que fuera, en lo posible, de excelente resistencia al ambiente, debido a que se iba a irradiar con rayos Ultra Violeta a alta intensidad. Para asegurar esto, se contactó la empresa de fabricación de químicos Andercol S.A, quienes proporcionaron en pro del desarrollo del experimento, la materia prima y el equipo de radiación.

De tal manera que teniendo esto en cuenta, la resina utilizada para todos y cada uno de los ensayos que se evidenciarán posteriormente fue la resina CRISTALAN® 422T, la cual es una resina de poliéster ortoftálica.

El otro material, vital e imprescindible para realizar cualquier tipo de curado con radiación UV, es el denominado fotoiniciador, el cual a diferencia de la resina, no es de fácil consecución en el país y mucho menos en la ciudad, debido a que el

campo de aplicación en Colombia para este tipo de elementos, no es muy amplio todavía. De tal forma que a través de Andercol S.A se logró conseguir el fotoiniciador IRGACURE® 819 (óxido de bis (2,4,6-trimetilbenzoil)-fenilfosfina), el cual es un fotoiniciador versátil para la polimerización radical de resinas insaturadas sobre exposición a la luz UV, es adecuado especialmente para el curado de compuestos de resina de poliéster con fibra de vidrio y además es posible implementarlo en elementos de espesor grueso.

Entendiendo la poca relación del sector industrial de plásticos reforzados con este tipo de compuestos o materiales, a continuación se presentan las características y propiedades más relevantes del fotoiniciador como una base de lo que se debe trabajar en el proceso de curado UV (Ciba Specialty Chemicals, 2001):

- **Estructura química del fotoiniciador:** esta se aprecia en la figura 12.

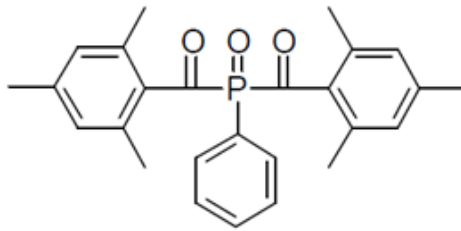


Figura 12. Estructura química de fotoiniciador. Fuente Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2001).

- **Espectro de Absorción del fotoiniciador (% En acetonitrilo):** En donde se muestra la fracción de la radiación electromagnética incidente que el fotoiniciador absorbe en un rango de frecuencias (figura 13).

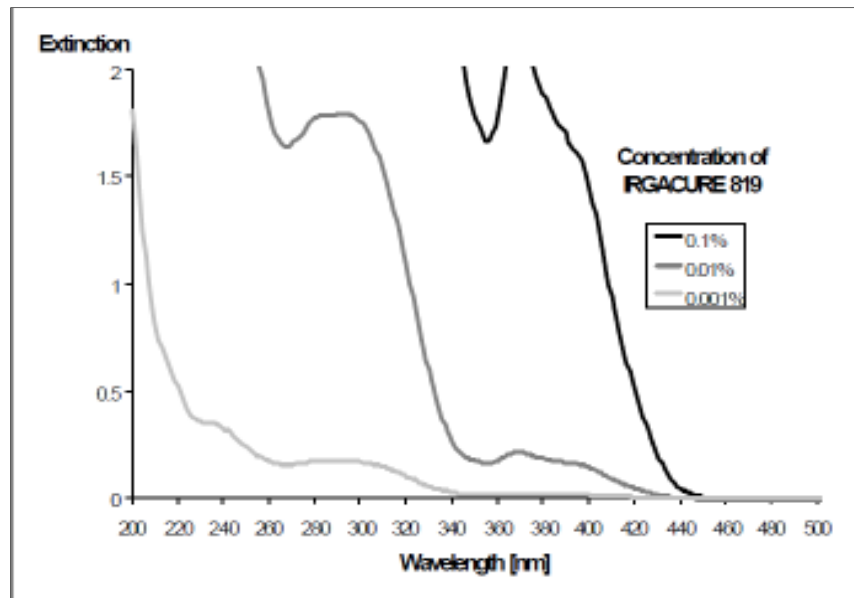


Figura 13. Espectro de absorción fotoiniciador. Fuente: (Ciba Specialty Chemicals, 2001).

- **Propiedades Físicas del fotoiniciador:**

Aspecto: polvo amarillo

Punto de fusión: 127-133 ° C

Solubilidad a 20 ° C (g/100 g de solución):

- ✓ Acetona 14
- ✓ Butilo 6
- ✓ Metanol 3
- ✓ Tolueno 22
- ✓ Hexanodiol (HDDA) 9
- ✓ Oligómero acrilato de 3

La concentración recomendada de fotoiniciador es de 0.2 a 0.4% en peso de la cantidad de resina a utilizar, lo que fue utilizado durante el proceso y desarrollo experimental, como se podrá ver más adelante.

Finalmente, es importante mencionar que la fibra de vidrio utilizada en todos los laminados del compuesto fue MAT 450, que es fibra de vidrio común y que se puede conseguir en cualquier distribuidor apropiado.

3.1.2 Equipo de Radiación

Fusion UV systems, consiste en un irradiador tipo “Light Hammer” 6 (LH6) y bombilla tipo D, con capacidad de curado de 6 pulgadas y cuello o tubería para extracción en la parte superior, puede ser utilizado en procesos industriales en línea o para fines de laboratorio. Dicho equipo tiene la posibilidad de graduar el suministro de potencia, es decir de manera variable, desde 25 W/cm a 100 W/cm.

Funciona con energía de microondas y sin electrodos metálicos, utilizando un sistema único de excitación para energizar la lámpara de manera que presente un arranque muy rápido, las bombillas cuentan con salidas espectrales estables produciendo así energía constante.

El mecanismo del equipo que permite realizar el proceso de curado como tal, consiste en un conveyor o banda transportadora con dirección derecha- izquierda, además de una perilla que permite graduar la velocidad y moverla entre 16.7 y 77.5 m/min, además de un sensor de velocidad cero, con el fin de proteger la banda transportadora que está hecha de teflón y kevlar, contiene túneles de secado y aislamiento de luz en ambos lados (Heraeus Noblelight Fusión UV Learning Center, 2013).

En la figura 14 se muestran una serie de imágenes del equipo provisto por Andercol S.A, para la realización de las pruebas de curado, según lo descrito anteriormente.



Figura 14. Equipo de radiación UV. Fuente: foto tomada en Andercol S.A.

3.2 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

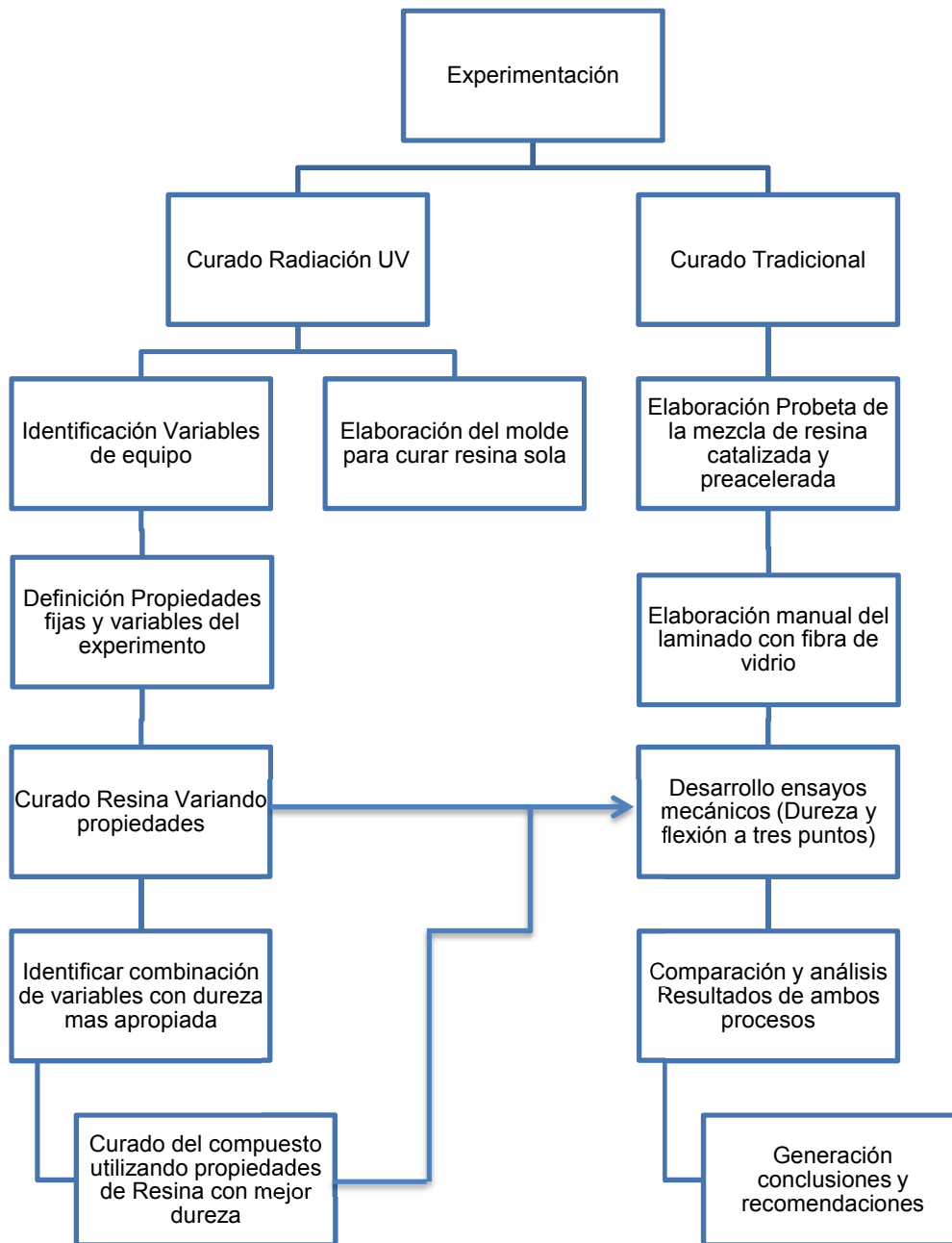


Figura 15. Esquema metodología de la experimentación

3.2.1 Curado con radiación

Definición de elementos variables y fijos del experimento:

En primer lugar se identificó cuales propiedades del equipo se podían variar, encontrando que se podía hacer tanto con la potencia lumínica como con la velocidad de la banda transportadora, es decir, variando el tiempo de exposición de la muestra a curar.

Luego se identificó que en cuanto a las muestras se podía variar tanto el porcentaje de fotoiniciador de acuerdo a la cantidad de resina utilizada y según las especificaciones encontradas en la literatura, como la cantidad de fibra de vidrio en los laminados

De acuerdo a lo anterior y buscando dar una orientación clara al experimento, se decidió conservar como elementos fijos tanto la velocidad de la banda del equipo como la potencia del mismo. La primera variable se dejó fija en el valor mínimo debido a que las velocidades ofrecidas eran bastante altas y buscando optimizar el proceso de curado en cuanto a tiempo de exposición de la muestra a la radiación, como se puede ver en el numeral 4.1 del capítulo de Resultados. Así mismo la potencia se dejó en el 50% de la capacidad del equipo, dado que los resultados obtenidos con radiación entre 25% y 50% no eran favorables ya que se apagaban las lámparas y los resultados entre 50% y 100% no tenían diferencias representativas entre sí. De esta manera se podrían realizar pruebas variando el porcentaje de fotoiniciador en el curado de resina sola y el porcentaje de fibra de vidrio en los laminados.

✓ Curado de resina sola variando fotoiniciador:

Se lleva a cabo el curado con radiación UV de la resina sola, variando la cantidad de fotoiniciador y a la vez realizando mediciones de tiempo y dureza para identificar la combinación de resina y fotoiniciador mas apropiada para realizar

posteriormente los laminados con fibra de vidrio. También se realizan durante el proceso de curado, mediciones de temperatura a fin de identificar el comportamiento de la reacción exotérmica del proceso.

✓ Curado de laminados compuestos de resina y fibra de vidrio:

Se elaboran los laminados de fibra de vidrio con la resina y la cantidad de fotoiniciador adecuada de acuerdo a los resultados obtenidos en el punto anterior. Dado que para este punto, el porcentaje de fotoiniciador ya es fijo, se debe variar el porcentaje de fibra de vidrio para identificar el efecto que se tiene en el curado con relación a la cantidad de fibra.

3.2.2 Curado tradicional

Se prepara la resina de poliéster insaturado Cristalan 422T pre acelerada y con el porcentaje de catalizador de acuerdo a la especificación del proveedor, se adiciona el inhibidor con el fin de evitar la polimerización inmediata y alargar el tiempo de gelado de la mezcla y finalmente se realiza el vaciado de la misma en el molde tipo sánduche (figura 15) que se ha preparado para dicha actividad. Luego se realiza el curado tradicional a temperatura ambiente y post curado en horno.



Figura 16. Molde para curado tradicional de resina.

3.3 FABRICACIÓN DEL MOLDE PARA PROBETAS DE RESINA

Una vez seleccionados todos los materiales y teniendo clara la metodología a través de la cual se iba a llevar a cabo toda la experimentación y los ensayos con radiación UV, fue necesario implementar el desarrollo de un diseño de molde para realizar las pruebas de curado solo de resina, pues el equipo no había sido utilizado con esta finalidad y no se tenía información al respecto.

Durante este proceso se realizaron varios tipos de molde en diferentes materiales, teniendo en cuenta que debían cumplir con ciertas características inherentes para llevar a cabo el experimento completo sin sufrir ningún tipo de daño o sin afectar la resina en el proceso.

El primer paso para comenzar con el desarrollo consistió en determinar las dimensiones apropiadas del molde de tal forma que pudiese entrar en el equipo de radiación sin problema alguno y que además fuera lo suficientemente largo para sacar buena cantidad de probetas pero que a la vez se pudiese garantizar un buen

tiempo de exposición de toda la muestra en cada una de las pasadas a la menor velocidad que permite el equipo.

Teniendo esto claro, se fabricó un primer prototipo de molde, que consistía en un marco hecho en aluminio y al cual se le pegaría en la parte inferior una lámina de acetato desmoldante (mylar), pero la muestra no conservaba el espesor constante, esto debido a que el peso de la resina superaba la fuerza del acetato y las muestras quedaban deformes, por lo que no era apto para tomar dureza ni mucho menos para analizar propiedades mecánicas. Adicional a esto el marco se calentaba más de lo esperado, de tal manera que se decidió ponerlo sobre un bloque de madera de dimensiones similares buscando darle consistencia a la resina y a la vez proteger al experimentador de una posible quemadura, pero los resultados no fueron satisfactorios ya que a pesar de esto, la resina se seguía deformando y presentaba gran cantidad de ondulaciones, generando problemas de espesores.

Posteriormente, se aprovechó el bloque de madera para fabricar un molde con silicona líquida, buscando evitar los problemas de temperatura y esperando que la muestra fuera uniforme. El resultado obtenido, si bien fue mejor que el anterior, no fue completamente satisfactorio, ya que este nuevo molde no era tan rígido como el marco de aluminio, por lo cual, se pandeaba y generaba nuevamente problemas en el espesor de la lámina de resina curada, ver Figura 16. Se decide poner nuevamente una lámina de madera bajo el molde para evitar el pandeo, pero debido a que la resina no llenaba completamente la cavidad del molde, cada vez que se pasaba por el equipo, la resina se movía de un lado a otro, por lo cual no se lograba eliminar por completo el problema de los espesores, ya que al gelar quedaba un lado con mayor cantidad de resina que otro.



Figura 17. Molde de silicona para el curado de la resina.

Con base en los resultados, se comprendió que era absolutamente necesario que el molde contara con dos superficies rígidas de tal manera que pudieran cubrir ambas caras de la resina líquida y así impedir que esta se moviera mientras se llevaba a cabo el proceso de curado, garantizando el espesor constante a lo largo de la muestra o lámina y que a la vez generan presión para evitar el efecto del pandeo o las ondulaciones. De tal manera que se vuelve a la idea inicial del marco metálico, pero esta vez hecho en un acero y de un calibre mayor, y las dos superficies rígidas estaban hechas de vidrio, de tal manera que se ponía una base de vidrio y se pegaba el marco de acero al vidrio con cinta, luego se vaciaba la resina al interior del marco y posteriormente se ponía la otra lámina de vidrio encima. El resultado fue bastante bueno, sin embargo, una vez curada la resina, comenzaba a ondularse, a medida que se enfriaba y se notaba que el espesor no estaba completamente parejo a lo largo de la muestra. Se identificó que la causa de esto era que al vaciar la resina al interior del marco y tener que poner luego la otra lámina de vidrio, no se podía llenar a ras el marco con resina, ya que se podría regar antes de poner la lámina de vidrio, por lo cual finalmente se decidió conformar todas las piezas como un molde único (Figura 17), de tal manera que se hizo un pequeño corte en uno de los lados del marco y se unieron las 3 piezas. Luego, se pone el molde de manera vertical con el corte hacia arriba, de tal

manera que por allí se vacíe la resina y de esta forma garantizar que al hacer el llenado, la resina ocupe todo el espacio entre una lámina de vidrio y otra, teniendo como espesor la dimensión exacta del marco de metal. Al llenar por completo la cavidad, se sella el corte por donde se ingresó la resina y así se puede poner de manera horizontal todo el molde garantizando que la resina no tiene libertad de movimiento y que el espesor no va a variar durante el curado.



Figura 18. Molde final para el curado de la resina con UV.

Para evitar el pandeo o las ondulaciones posteriores al curado, es decir en el proceso de enfriamiento, la lámina de resina curada es puesta entre dos bloques de vidrio y con un peso sobre ellos.

3.4 PRUEBAS DE CURADO CON UV

Las pruebas de curado con radiación ultravioleta se realizan implementando el equipo de radiación Fusion UV Systems.

Como primera medida se utilizaron unas tapas metálicas en las cuales se vació resina sola con diferentes porcentajes de fotoiniciador, de acuerdo a la recomendación de la literatura (0.2 a 0.4%). Este primer paso o ensayo se realizó con dichas tapas, en lugar del molde, por simple practicidad, ya que la finalidad de este desarrollo inicial consistía en determinar básicamente dos cosas:

- Comportamiento de la dureza del material curado vs cantidad de fotoiniciador
- Tiempo de exposición necesario de la resina para alcanzar dureza

Teniendo esto en cuenta, se decidió que no era indispensable la implementación del molde, ya que con las tapas utilizadas se garantizaba el espesor necesario para realizar las pruebas de dureza y a la vez brindaba agilidad al ejercicio experimental. En la siguiente imagen (Figura 18) pueden apreciarse las muestras de resina curada, variando el porcentaje de fotoiniciador, desde 0.1% hasta 0.4%, de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

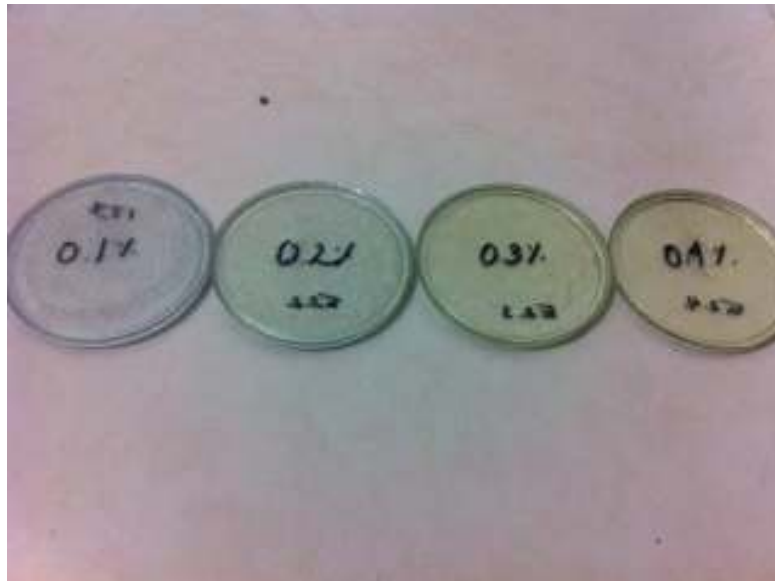


Figura 19. Muestras de curado variando porcentaje de fotoiniciador.

3.4.1 Procedimiento para el curado de resina con fotoiniciador

Para dar claridad en cuanto al procedimiento y con el fin de entender el desarrollo práctico del curado con radiación, se enumeran a continuación la serie de pasos y el orden respectivo en el que fueron llevados para realizar dicho proceso.

- I. Se enciende con unos minutos (5 minutos aproximadamente) de anticipación el dispositivo de radiación, de acuerdo a las instrucciones del fabricante y se establecen en un valor fijo las variables del equipo como son la potencia y la velocidad de la banda transportadora.
- II. Se pesa la cantidad de resina que se va a utilizar y se adiciona el porcentaje de fotoiniciador que se desea agregar a la muestra. Por ejemplo: si se pesan 100g de resina de poliéster insaturado y se desea tener una concentración de fotoiniciador del 0.3%, entonces se agrega a la resina pesada 0.3g de fotoiniciador en polvo.
- III. Se agita suavemente la mezcla de resina de poliéster insaturado y fotoiniciador en el recipiente en el cual se pesó. Debe realizarse de manera suave buscando generar la menor cantidad de burbujas posible. Este proceso también puede ser llevado a cabo con un mezclador a vacío, el cual fue implementado durante el desarrollo de este trabajo experimental. Dicho dispositivo además de evitar la generación de burbujas o incrustaciones de aire por agitación fuerte, también garantiza que la mezcla sea homogénea e impide que el fotoiniciador quede mal distribuido en la misma. Esto es fundamental ya que una incorrecta distribución del fotoiniciador en la resina puede producir que el curado no sea uniforme y esto se aprecia en la lámina ya curada, pues, se obtienen diferencias de dureza bastante representativas entre diferentes regiones de la lámina y,

además, se puede observar una veta de color diferente en donde hay mayor concentración de fotoiniciador.

- IV. Se hace el vaciado de la mezcla en el molde o en las tapas metálicas mencionadas, según el requerimiento posterior de la probeta. Este proceso también debe hacerse suavemente para no generar turbulencias durante el vaciado que puedan producir incrustaciones de aire y aparición de burbujas.
- V. Se ubica el molde con la mezcla a la entrada del equipo de radiación para que la banda transportadora lo ingrese al equipo y se comienza a tomar el tiempo. Como se vio en el numeral 3.1.2, el tiempo de permanencia de la muestra dentro del equipo, utilizando la velocidad de banda más lenta, es de aproximadamente 1 s (un segundo), por lo cual se requieren dos personas, una que ingrese la muestra y otra que la reciba y se la devuelva a la primera persona para que se repita el proceso las veces que sea necesario de acuerdo al número de pasadas establecido. Para este experimento en particular, el número de pasadas implementado y los resultados que acompañan esta decisión se evidencian en el numeral 4.1.
- VI. La muestra se pasa por el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en el punto anterior y se comienza a tomar el tiempo desde el momento en que el molde entra por primera vez en el dispositivo de radiación, de tal forma que se pueda medir la temperatura de la muestra cada minuto y así obtener la curva de temperatura de la reacción exotérmica.
- VII. Se realizan mediciones de dureza Barcol cada 15 minutos contados, igualmente, desde el momento en que la muestra ingresa por primera vez en el equipo. Las mediciones se realizan hasta los 60 minutos.

3.4.2 Procedimiento para el curado de resina con fotoiniciador y fibra de vidrio

Para esta parte del proceso o desarrollo experimental cabe anotar que se hicieron varios tipos de laminados de acuerdo a lo requerido, es decir, en primer lugar se fabricaron laminados de resina con la cantidad de fotoiniciador fija, tomando la más adecuada de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de dureza del curado de resina sola.

Posteriormente, se dejó la cantidad de fibra de vidrio fija de acuerdo a las recomendaciones de la literatura para laminados de este compuesto en particular y se realizaron muestras variando la cantidad de fotoiniciador en el mismo rango mencionado en el procedimiento anterior, buscando interpretar si la incidencia del porcentaje de fotoiniciador en la mezcla, cambiaba respecto a la obtenida en el procedimiento mencionado en el numeral 3.4.1, al agregar la fibra de vidrio como una variable adicional al proceso. El proceso de curado con UV del material compuesto se realiza con el siguiente procedimiento:

- I. Se enciende con unos minutos (5 minutos aproximadamente) de anticipación el dispositivo de radiación, de acuerdo a las instrucciones del fabricante y se establecen en un valor fijo las variables del equipo como son la potencia y la velocidad de la banda transportadora.
- II. Se pesa la cantidad de resina que se va a utilizar y se adiciona el porcentaje de fotoiniciador que se desea agregar a la muestra.
- III. Se agita suavemente la mezcla de resina de poliéster insaturado y fotoiniciador en el recipiente en el cual se pesó, siguiendo fielmente todas y cada una de las indicaciones mencionadas en este mismo paso del numeral anterior, debido a los requerimientos de distribución de la mezcla.

- IV. Se recortan trozos de fibra de vidrio tipo MAT 450, teniendo en cuenta las dimensiones del equipo de radiación de tal manera que el laminado posterior pueda entrar sin problemas en la banda transportadora del equipo.
- V. Se pone el acetato desmoldante (mylar) como base del laminado que se va a fabricar, luego sobre este se pone una primera lámina de fibra de vidrio y se aplica una capa de la mezcla de resina fabricada en el paso II. Dicha mezcla se aplica con una brocha de cerdas suaves, finas y delgadas, de tal manera que la impregnación en la lámina de fibra sea buena y total y que a la vez, las cerdas de la brocha no se suelten generando contaminación en el laminado. Este procedimiento se repite cuatro veces hasta formar las 4 capas requeridas para este caso, ya que se necesita obtener un laminado con espesor de 3 mm aproximadamente para llevar a cabo con éxito las pruebas mecánicas de acuerdo a la norma ASTM D790.
- VI. Finalmente se pone sobre las capas del compuesto realizado, otra lámina de acetato desmoldante y se hace un barrido a presión con una espátula con el fin de eliminar la mayor cantidad de burbujas posible y de esta manera se somete el laminado al mismo proceso de curado, tal como se describe a partir del paso V del numeral 3.4.1.

3.5 PRUEBAS DE CURADO TRADICIONAL

3.5.1 Curado tradicional de la resina de poliéster insaturado

Se realiza según el procedimiento que se describe continuación:

- I. Se prepara el molde tipo sándwich (figura 15) con dos placas de vidrio pegadas cada una a un marco de madera, entre ellas el marco en “u” metálico, el cual finalmente da las dimensiones de la placa de resina.

Alrededor del marco metálico se pone un empaque de caucho con el fin de sellar para evitar derrames de resina

- II. Se realiza el vaciado de la resina al interior del molde a la vez que se la van aplicando las gotas de inhibidor con el fin de sobre inhibir la mezcla, buscando incrementar el tiempo de gel de 7 minutos a 25 minutos aproximadamente. Realizando esto se pretende que el aire que se acumula en la mezcla generando burbujas se pueda eliminar o desaparecer de manera natural al proceso antes que la mezcla comience a gelar y queden las burbujas atrapadas.
- III. Se sella por completo el molde, tapando el lado por el cual se hizo el vaciado y se deja el molde con la mezcla en el interior, de manera vertical a temperatura ambiente (23°C aprox.), durante un periodo de 24 horas; tiempo aproximado requerido para el curado.
- IV. Se prepara el horno para realizar el post curado, es decir, se enciende con anticipación y se pone el set point de temperatura al interior en 80°C aproximadamente. El momento en que se debe encender el horno dependerá de las especificaciones del mismo y del tiempo que le tome alcanzar la temperatura requerida, teniendo en cuenta que debe coincidir lo más cerca posible con las 24 horas de curado.
- V. Transcurrido el tiempo de curado, se procede a realizar el desmolde de la placa y se ingresa al horno con la temperatura ya estable en 80°C, donde debe permanecer por un tiempo aproximado de 3 horas. La placa debe ingresarse al horno entre dos placas de vidrio, para prevenir que sufra un efecto de pandeo durante el proceso de post curado.

- VI. Una vez pasen las 3 horas que tarda el proceso de post curado, se debe dejar la placa de resina al interior del horno hasta que este enfríe totalmente de manera controlada para evitar que dicha placa sufra problemas por efectos de choque térmico.
- VII. Finalmente, cuando el horno esté frío se retira la placa y queda lista para cortar y fabricar las probetas.

3.5.2 Curado tradicional de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio

Se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- I. En primera medida se recortan las láminas de MAT de acuerdo a la cantidad de muestras que se desean realizar.
- II. Se pone una placa de MAT y sobre esta se hace el vaciado de resina con la ayuda de una brocha que permita impregnar de manera uniforme toda la placa de fibra de vidrio.
- III. Luego de hacer el vaciado se pone nuevamente sobre esta mezcla una capa de MAT de manera que se pueda vaciar otra vez resina sobre esta y repetir este proceso cuantas veces sea necesario de acuerdo a la cantidad de capas que requiera el laminado. Para este caso, el laminado se ha realizado de cuatro capas.
- IV. Una vez se tiene el laminado, se deja curando a temperatura ambiente (23°C aprox) durante un período de 24 horas aproximadamente y se repite el proceso mencionado en el numeral 3.5.2 a partir del punto IV.

3.6 PROPIEDADES MECÁNICAS Y QUÍMICAS

3.6.1 Dureza

Las pruebas de dureza, como se ha visto y mencionado durante todo el desarrollo del documento, se realizaron a la par con las pruebas de curado, debido a que era la forma más apropiada de encontrar la curva de dicha propiedad asociada al comportamiento del curado con radiación UV y el proceso o reacción de polimerización, teniendo en cuenta la efectividad del proceso. Adicionalmente nos brindaba la información directa e inmediata de manera que se pudiera verificar que el procedimiento establecido para realizar el curado con rayos ultravioleta si había sido el adecuado.

La dureza medida durante todos los ensayos experimentales fue dureza tipo Barcol y las mediciones realizadas se llevaron a cabo de acuerdo a las indicaciones de la norma ASTM D2583, realizándose de la siguiente manera para las muestras curadas con radiación UV, tanto de resina sola como del compuesto con fibra de vidrio:

Una vez terminado el proceso de curado establecido de acuerdo a lo mencionado en el procedimiento 3.4 se comienzan a realizar mediciones de dureza, pasados 15 minutos y hasta los 60 minutos con intervalos del mismo tiempo, teniendo en cuenta que el proceso de curado como tal se lleva a cabo aproximadamente en los primeros 10 a 12 minutos, por lo cual no es apropiado realizar mediciones de dureza antes de este tiempo ya que puede generar información errónea pues a esa altura aun se desarrolla una reacción al interior del material. Adicional, es importante tener en cuenta que en piezas sencillas a partir de los 60 minutos ya comienza el proceso de post-curado.

Se pone la placa de resina sobre una superficie plana y estable y a la misma altura de la muestra, sobre una superficie paralela, se posiciona el durómetro de tal manera que pueda presionarse contra la resina y que no se generen falsas lecturas. Las mediciones se realizan en varios puntos de la muestra, desde el centro de la misma hacia los extremos, proporcionando así varios datos que den la certeza que la medición es real, que no existe concentración de fotoiniciador en una zona de la muestra y que, efectivamente, el dato que se va a tomar es representativo para el proceso aplicado.

Teniendo esto en cuenta, se realiza un promedio ponderado de los valores encontrados y este es el que se toma como dato oficial para la comparación y realización de la gráfica que indicará la tendencia y comportamiento de esta propiedad con la variación de fotoiniciador.

Este proceso se lleva a cabo de la misma manera para los laminados de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio, de tal manera que se identifica el valor de dureza para cada uno de los laminados:

- Laminados de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio variando el porcentaje de fotoiniciador de 0.2% a 0.4%.
- Laminados de resina de poliéster insaturado con porcentaje de fotoiniciador fijo y variando la cantidad de fibra de vidrio de 25% a 35% con intervalos de 5%.

3.6.2 Flexión a tres puntos

Una vez se tengan todas las placas curadas de resina de poliéster insaturado y los laminados de la misma resina con fibra de vidrio, tanto por el método tradicional como por el método de radiación ultravioleta, se procede a cortar las probetas de acuerdo a la norma establecida: ASTM D790 (Métodos de prueba estándar para

las propiedades de flexión de los plásticos no reforzados y reforzados y materiales de aislamiento eléctrico). Teniendo dichas probetas, se realiza flexión a tres puntos; primero con las muestras de curado tradicional a fin de tener una base de comparación para realizar posteriormente la prueba a las probetas de curado con radiación.

De acuerdo a esto se siguieron las especificaciones mencionadas en la norma, utilizando la máquina universal (Figura 19), estableciendo la celda de carga de 100 KN y de acuerdo a las dimensiones de las probetas se definía una distancia entre soportes, tal y como se muestra en la figura.



Figura 20. Máquina Universal de pruebas mecánicas.

3.6.3 Estireno residual

El estireno se utiliza ampliamente en la fabricación de materiales compuestos, debido a las propiedades químicas y físicas deseadas que imparte al producto final. Sin embargo, el estireno tiene un olor fuerte, es irritante y es una fuente

principal de compuestos orgánicos volátiles durante el curado térmico o a temperatura ambiente. El control de las emisiones de estireno sigue siendo una preocupación ambiental y de salud en la fabricación de materiales compuestos.

Durante el desarrollo total de este trabajo, se buscó la manera de realizar mediciones que permitieran revisar y analizar de manera comparativa los ensayos realizados durante todo el proyecto, sin embargo, esta iniciativa fue imposible de llevar a cabo pues las pruebas de estireno residual certificadas no se realizan por ninguna compañía o laboratorio especializado de manera oficial en el país. Algunos laboratorios están en desarrollos alrededor del tema pero en la actualidad, realizar este tipo de análisis es bastante costoso y complejo, inclusive compañías de gran envergadura en el país, si requieren realizarlo, deben hacerlo en el exterior.

Por estas razones y teniendo en cuenta la importancia de saber o conocer acerca del comportamiento de las emisiones de estireno en el proceso de curado de radiación UV, es importante mencionar que dichas emisiones en este proceso específico son menores, es decir que presentan una reducción importante en comparación con los otros procesos de curado, tal y como se puede ver en la figura 3 y el apartado correspondiente a las investigaciones que se han realizado alrededor del tema y que se mencionan en el capítulo de “Estado del arte” en este mismo documento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se recopilan todos y cada uno de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas durante el tiempo del desarrollo del trabajo. Se muestran por medio de gráficas y tablas, no solo los resultados individuales, sino que también se lleva a cabo una labor comparativa con fines académicos que muestra las oportunidades existentes en la actualidad con este tipo de procesos, y

también las falencias y posibilidades de crecimiento y mejoramiento en los procesos de alta tecnología como el curado a través de radiación Ultravioleta.

4.1 Curado con radiación UV de resina de poliéster insaturado

Como se describió en el capítulo 3.4 (“Pruebas de curado UV”), el tiempo de exposición de la muestra está dado por el número o cantidad de veces que se pasa la muestra por el interior del equipo a través de la banda transportadora, es decir, lo que se determinará de ahora en adelante como número o cantidad de pasadas.

Teniendo esto en cuenta y en virtud de realizar la exposición de los datos y resultados obtenidos lo más ordenada y estructuradamente posible, se evidenciarán en primera medida aquellos que se obtuvieron para determinar el número de pasadas necesario para curar una muestra de resina de poliéster insaturado de 6 mm de espesor aproximadamente, implementando el método de radiación UV.

Para tal fin, se curaron las muestras de resina en tapas metálicas de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 3.4, usando un porcentaje de fotoiniciador de 0.4%, porcentaje máximo recomendado por el fabricante para agregar a este tipo de resinas. Se hace con este valor buscando la veracidad y efectividad de la mezcla, el equipo y el experimento; entendiendo que si con esta cantidad de fotoiniciador, el curado no es exitoso, simplemente el experimento es fallido.

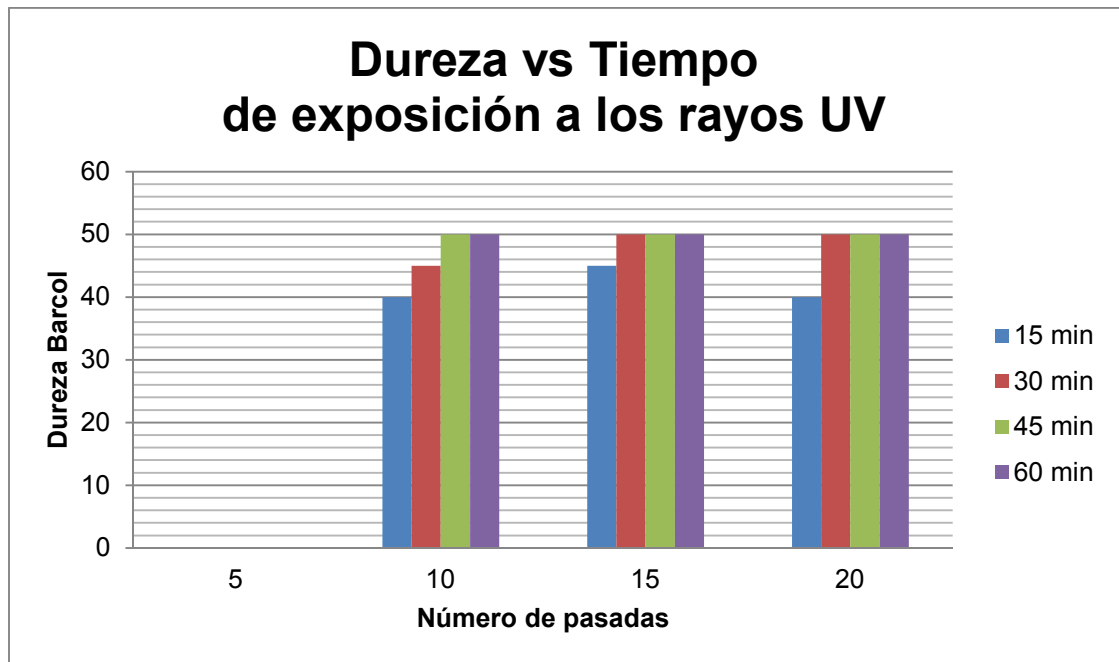
Basados en esto, se realizaron 4 muestras de resina de poliéster insaturado con 0.4% de fotoiniciador cada una y se curaron con el equipo variando la cantidad de pasadas (tiempo de exposición) desde 5 hasta 20 con intervalos de 5 pasadas entre cada muestra (Tabla 3). En la gráfica 1 se puede observar claramente el comportamiento de la dureza a través del tiempo con cada una de las muestras, lo que da un indicio de la efectividad del método de radiación ultravioleta para curar

resina de poliéster insaturado y su comportamiento respecto al tiempo de exposición. Se hizo un seguimiento de la dureza alcanzada en la resina tomando mediciones cada 15 minutos después del proceso de curado.

Número de Pasadas	Dureza Barcol 15 min	Dureza Barcol 30 min	Dureza Barcol 45 min	Dureza Barcol 60 min
5	0	0	0	0
10	40	45	50	50
15	45	50	50	50
20	40	50	50	50

Tabla 3. Dureza de la resina de poliéster insaturado variando la exposición a los rayos UV en un intervalo de tiempo de 15 a 60 minutos.

Se puede observar en la gráfica 1 que con 15 pasadas por el equipo de radiación se obtiene una muy buena dureza a los 15 minutos posteriores al experimento, mientras que se identifica claramente que con 5 pasadas no es suficiente para alcanzar dureza, al menos durante estos primeros 15 minutos. Además, en la tabla 3 se evidencia que a las 20 pasadas, la dureza es menor que a las 15 pasadas durante los primeros 15 minutos, lo que puede ser provocado por el tiempo de exposición de la muestra, ya que al tener mayor exposición a los rayos, la prueba de 20 pasadas conserva mas calor al interior del material, lo que hace que a los 15 minutos exista la probabilidad de que el material no esté lo suficientemente firme para obtener un dato de medición de la dureza que sea confiable.



Grafica 1. Comparación de la dureza Barcol en el tiempo de acuerdo a número de pasadas.

En la primera medición (15 minutos) se observa que la dureza entre las 10 y las 20 pasadas es bastante similar y además con muy buenos resultados (entre 40 y 45 Barcol), lo que da un primer indicio de la eficiencia del curado a través de los rayos ultravioleta, encontrando que a los 15 minutos de realizar el proceso, ya la resina ha curado satisfactoriamente.

Transcurridos 30 minutos luego del proceso propio de irradiación, se realizan nuevamente las mediciones, mostrando de manera precisa que la tendencia que se observaba en la medición a los 15 minutos se conserva, es decir, a pesar de haber transcurrido más tiempo, la muestra de 5 pasadas no da dureza y la diferencia entre las otras tres muestras (10, 15 y 20) sigue siendo muy poca (5 Barcol aproximadamente). Además para este punto, las muestras de 15 y 20 pasadas tienen el mismo valor de dureza (50 Barcol).

En términos generales, a los 30 minutos de haber curado las muestras, el valor general o rango de dureza aumenta de 40-45 a 45-50 Barcol.

De acuerdo a lo descrito en capítulos anteriores, se realizó otra prueba a los 45 minutos del procedimiento de curado con rayos UV. Es evidente que la dureza se conserva en un valor igual y estable luego de las 10 pasadas, pero también es estable a través del tiempo, pues es el valor que venía mostrando en la prueba de los 30 minutos (50 Barcol), solo que a diferencia de la prueba anterior, en esta se muestra que el ensayo de las 10 pasadas también alcanza dicho valor.

El resultado para la muestra de 5 pasadas sigue siendo constante: no alcanza valor de dureza alguno a pesar del transcurrir del tiempo, es la única muestra que no aumenta dureza con el paso de los minutos (tiempo de post curado).

Finalmente, transcurridos 60 minutos y de acuerdo a lo definido en los procedimientos de experimentación, se realiza la última prueba de dureza y se identifica claramente que no existe diferencia alguna con la prueba anterior, es decir, la de 45 minutos. La gráfica 1, muestra también los resultados de este último ensayo y se ve que se conserva la dureza de 50 Barcol para las pruebas o muestras de 10, 15 y 20 pasadas y, así mismo, la muestra de 5 pasadas, termina sin dar valor de dureza alguno transcurrida una hora de post curado.

En términos generales y según lo presentado en la gráfica 1, luego de 15 pasadas por el equipo de radiación, la diferencia en el curado es casi nula. Es decir, el delta del valor de dureza, no es muy significativo. Además, se identifica que con 10 pasadas también se obtiene un curado apropiado, hablando en términos de dureza, ya que al transcurrir una hora, el resultado es exactamente igual. Finalmente, lo que se observa también de manera general es que se requieren como mínimo 10 pasadas por el equipo para garantizar una dureza adecuada, pues al hacerlo con 5 pasadas nunca se obtienen resultados de dureza satisfactorios.

Es claro también que realizando este procedimiento de curado con radiación ultravioleta, el punto máximo de dureza se obtiene 45 minutos después de realizar el proceso, ya que luego de esto, la dureza se conserva estable en 50 Barcol.

4.2 Comportamiento de la temperatura variando el tiempo de exposición a la radiación.

Aquí se analizará y revisará detalladamente la respuesta que ofrece la temperatura de la reacción exotérmica propia del proceso de curado o polimerización en función de la cantidad de veces que se pasa la muestra por el equipo de radiación ultravioleta, es decir, el comportamiento de la temperatura de acuerdo al tiempo de exposición de la resina a los rayos UV.

Esta parte del proceso experimental se llevó a la par con el numeral anterior, es decir, que la cantidad de ensayos o experimentos realizados son los mismos. Teniendo esto presente, no sobra explicar que durante este tramo del documento se revisarán los ensayos de las muestras que fueron sometidas a un número de pasadas que osciló entre 5 y 20 por el equipo de radiación con intervalos de 5 pasadas entre cada ensayo.

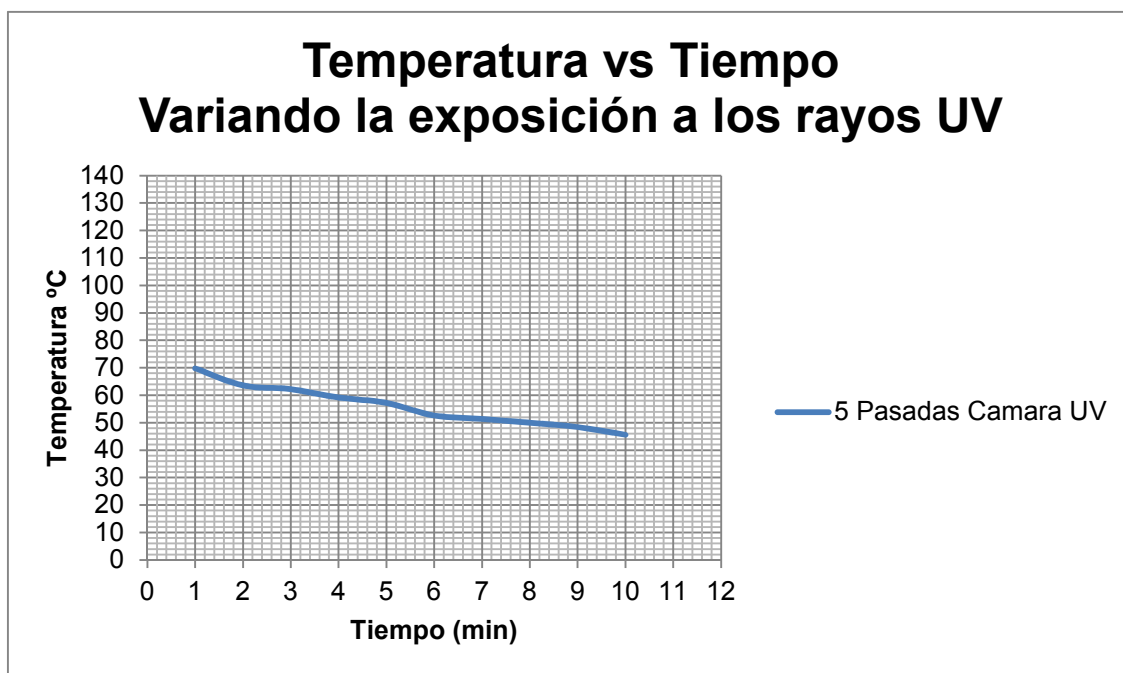
La frecuencia de medición de la variable (temperatura) se estableció cada 60 segundos (1 minuto), contados a partir del momento en que se ingresa por primera vez la muestra de resina al dispositivo de curado con radiación. Este proceso de medición se lleva a cabo durante 10 minutos, lo que arroja un total de 10 resultados o mediciones por cada ensayo.

Este tiempo se determinó considerando la teoría encontrada en la literatura relacionada con el tema de curado tradicional, en donde se menciona o se hace referencia al tiempo de gel de la resina, que de acuerdo a las propiedades y aditivos de la misma, normalmente varía entre 5 y 7 minutos pero en ocasiones puede llegar hasta los 10 minutos.

En la gráfica 2, se presenta el comportamiento del primer ensayo, en donde se podrán obtener indicios de los resultados obtenidos en cuanto a mediciones de temperatura se refiere, teniendo siempre como base los datos mostrados en la tabla 4.

Número Pasadas	Temperatura									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
5	70	64	62	59.2	57.2	52.6	51.4	50	48.4	45.6

Tabla 4. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 5 pasadas en la cámara UV.



Gráfica 2. Variación de la temperatura en el tiempo después de someter la resina de poliéster insaturado a una exposición de 5 pasadas en la cámara UV.

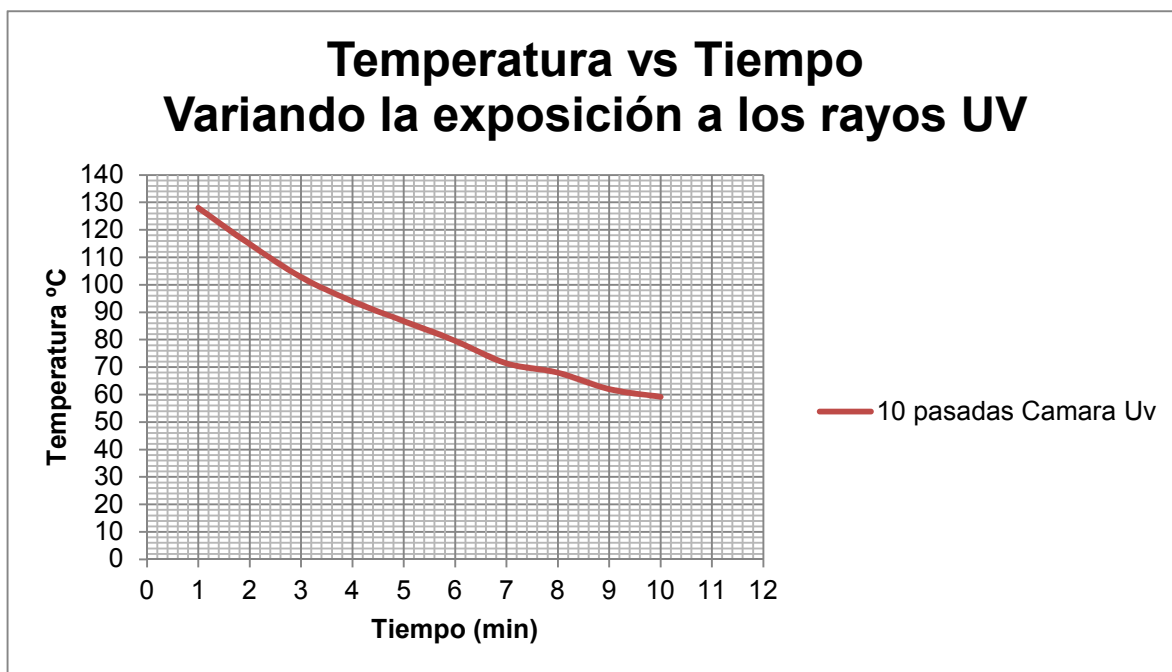
Se puede observar en la tabla 4 que el comportamiento de la temperatura con 5 pasadas es bastante estable, teniendo como valor máximo 70°C en la primera medición y mostrando una leve tendencia a disminuir hasta 50°C aproximadamente, pero dicha tendencia está dada por el proceso de enfriamiento propio de la muestra al ponerla a temperatura ambiente, ya que al ser tan pocas pasadas, la mayoría de mediciones se realizan luego de haber culminado el sometimiento a la radiación con UV.

Este comportamiento podría ser un indicador claro que sustenta el hecho de que la resina con 5 pasadas no hubiese alcanzado nunca un valor de dureza, tal y como se mostró en el numeral anterior.

Posteriormente, se comienza a analizar el comportamiento de la variable en cuestión (temperatura) para 10 pasadas, de tal manera que se presentan los resultados obtenidos para cada una de las mediciones en la tabla 5 y cuyo comportamiento se refleja o evidencia con la ayuda de la gráfica 3.

Número Pasadas	Temperatura °C									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
10	128	115	103	94	86.8	79.6	71.4	68	62	59.2

Tabla 5. Medición de la temperatura después de ser sometida la resina de poliéster insaturado a 10 pasadas en la cámara UV.



Gráfica 3. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 10 pasadas en la cámara UV.

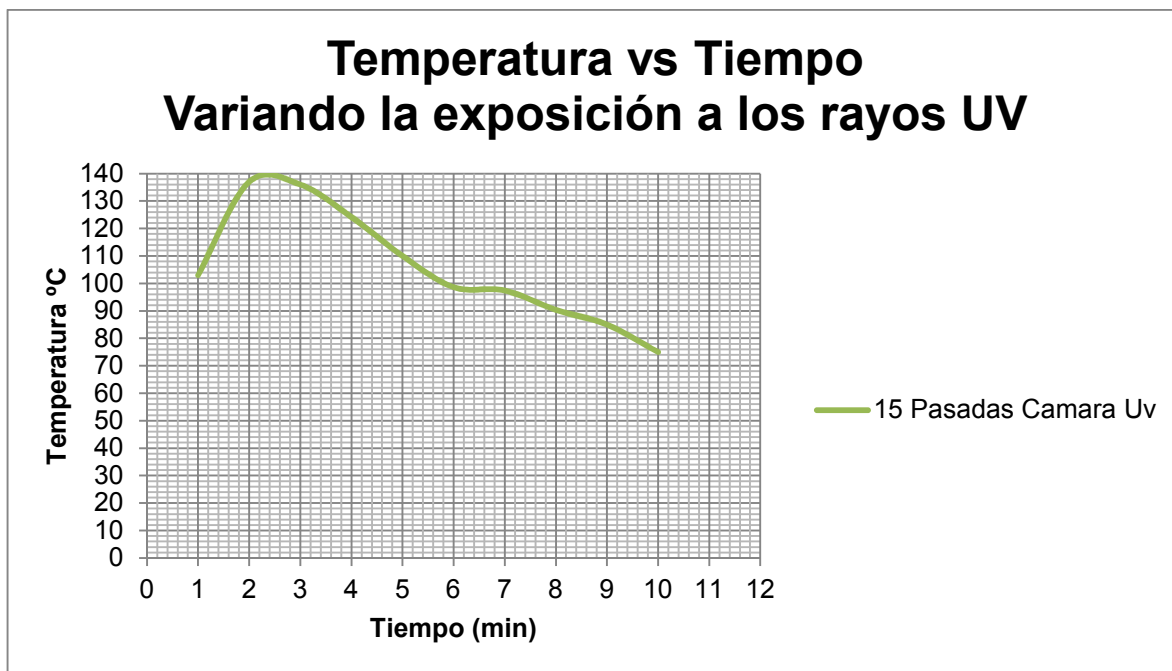
Analizando la gráfica 3 se puede ver como la tendencia de disminución o pendiente negativa se conserva igual que en la gráfica de 5 pasadas, pero esta vez se observa mucho más pronunciada, con un delta de temperatura más alto (68.8°C). Se puede ver que el valor más alto de temperatura sigue siendo en la primera medición, es decir a los 60 segundos la muestra presenta una temperatura de 128°C, lo que es más cercano al valor máximo teórico de la reacción exotérmica en curado tradicional del poliéster insaturado que es de 150 – 160 °C.

Al analizar el comportamiento de la temperatura de la resina con 15 pasadas (gráfica 4) por el equipo de radiación UV, se encuentra que este varía un poco respecto a los dos ensayos anteriores (5 y 10 pasadas, respectivamente), lo que se evidencia en la tabla 6 al comparar con los datos expuestos en las tablas 4 y 5.

Número Pasadas	Temperatura									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
15	103	137	136	124	110	98.6	97.4	90.4	85	75

Tabla 6. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 15 pasadas en la cámara UV.

La gráfica 4 muestra que la tendencia ya no es lineal como en las otras dos (gráficas 2 y 3), sino que se observa un pico o punto máximo que esta vez no corresponde al primer valor medido. Sin embargo, dicho valor (136 – 137°C) se conserva estable durante un par de minutos, como se observa en las mediciones 2 y 3 de la tabla 6 lo que es algo más aproximado a la teoría del tiempo de gel, que supone debería conservar una temperatura estable en su punto máximo por un periodo de tiempo mayor a 1 minuto.



Gráfica 4. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 15 pasadas en la cámara UV.

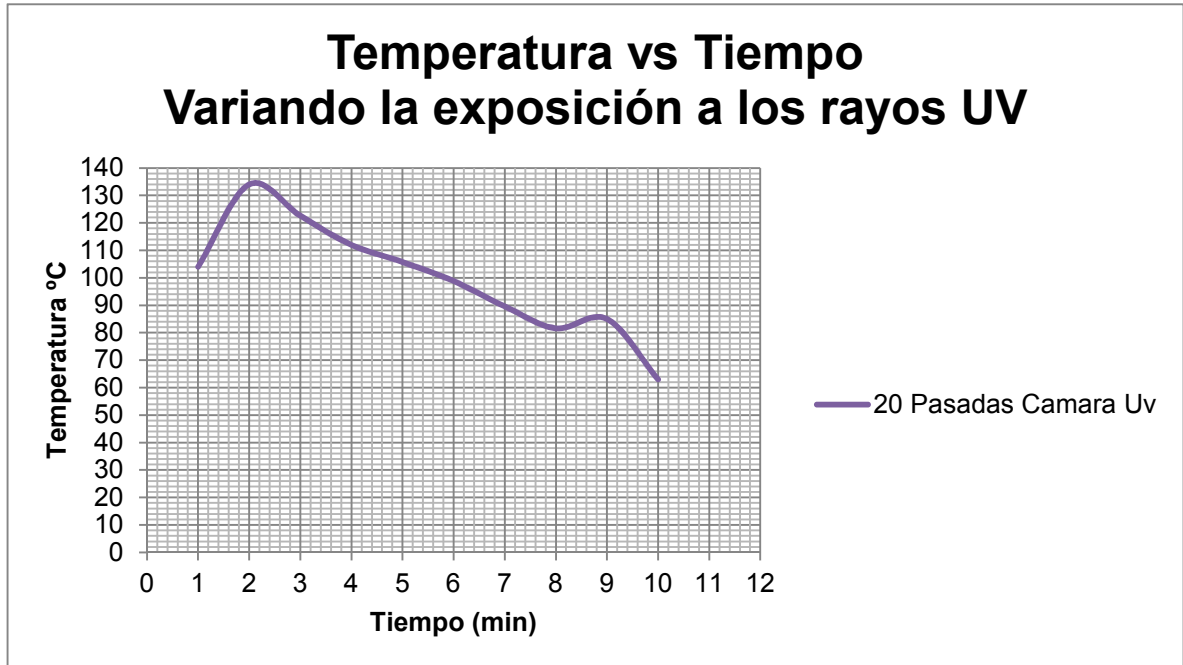
Finalmente, revisando los resultados del último ensayo, resina sometida a 20 pasadas en la cámara UV, y que se identifican en la tabla 7, se nota claramente que el comportamiento de la variable en cuestión es bastante similar y los valores de las mediciones individuales también.

Número Pasadas	Temperatura °C									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
20	104	134	123	112	106	98.8	89.6	81.6	85	63

Tabla 7. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, transcurridas 20 pasadas en la cámara UV.

Al observar la gráfica 5 se aprecia la similitud en los resultados de dureza de los ensayos con 15 y 20 pasadas, teniendo como implicación el hecho que conservando el máximo porcentaje de fotoiniciador y bajo las mismas condiciones

de curado con radiación, la temperatura del pico exotérmico no debería pasar de 140°C, aun cuando el número de pasadas o tiempo de exposición se aumente.



Gráfica 5. Variación de la temperatura sometiendo la resina de poliéster insaturado a una exposición de 20 pasadas en la cámara UV.

4.3 Dureza de la resina de poliéster insaturado durante el curado con radiación ultravioleta variando porcentaje de fotoiniciador.

Se revisarán los resultados obtenidos al realizar la prueba de dureza a las muestras de resina de poliéster insaturado, curadas con el método de radiación, pero esta vez variando el porcentaje de fotoiniciador.

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, el fotoiniciador es un componente fundamental para llevar a cabo el proceso de curado a través de este método, es por ello que se decidió verificar experimentalmente la incidencia de este componente en los resultados finales del curado de la resina. Para tal fin se ha

determinado implementar un tiempo de exposición a la radiación equivalente a 15 pasadas por el equipo de radiación ultravioleta.

De acuerdo a los datos y resultados analizados en los numerales 4.1 y 4.2 del documento, se pueden deducir las razones por las cuales se decidió en primera medida implementar esta cantidad de pasadas, ya que los valores de dureza y temperatura o mejor, el comportamiento de estas dos variables para ambos procesos (15 y 20 pasadas) es muy similar, con valores máximos y mínimos bastante cercanos, por lo cual se concluyó que no es necesario implementar mas tiempo y mayor cantidad de energía de radiación, teniendo en cuenta que el resultado es muy similar.

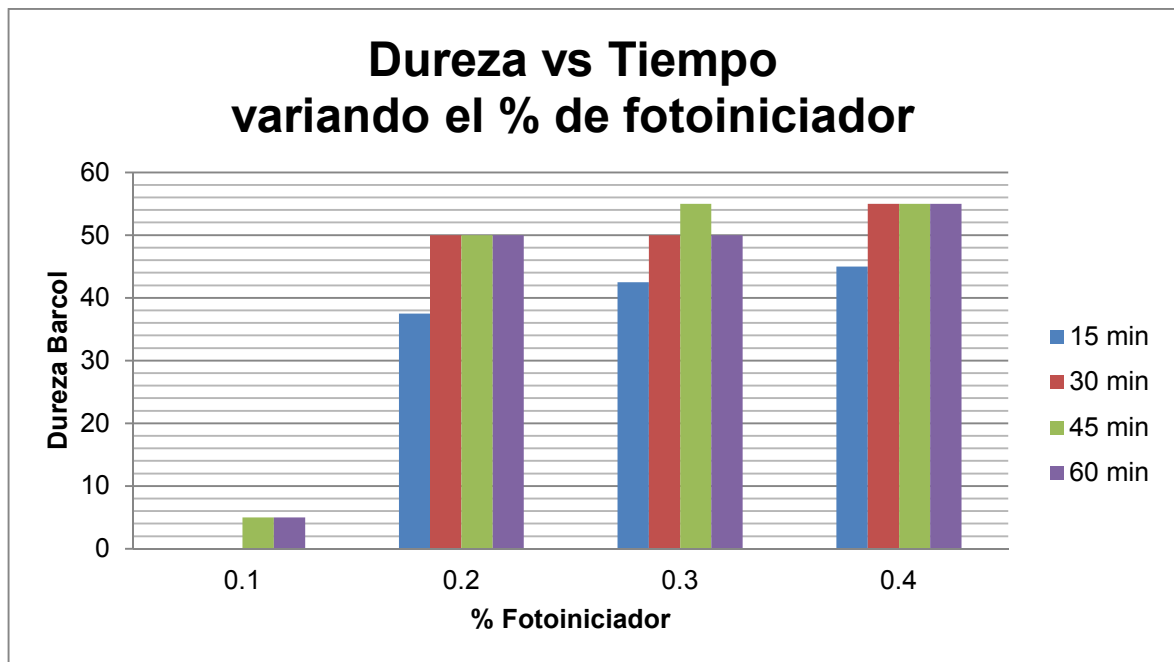
Ahora, si bien es claro que con 10 pasadas también se obtuvieron valores de dureza satisfactorios, se decide implementar el tiempo de exposición correspondiente a 15 pasadas como factor de seguridad, pues no se puede perder de foco el hecho de que este es un desarrollo nuevo y que es preferible trabajar teniendo tranquilidad o seguridad en este sentido.

Finalmente y como ya se ha mencionado también en apartados anteriores, los valores del porcentaje de fotoiniciador para estos ensayos oscilan entre 0.1 y 0.4% del peso total de la muestra, basados en la recomendación de la literatura y los fabricantes. La medición de dureza se hace desde los 15 hasta los 60 minutos, tal como se muestra en la tabla 8.

% Fotoiniciador	Dureza Barcol a los 15 min	Dureza Barcol a los 30 min	Dureza Barcol a los 45 min	Dureza Barcol a los 60 min
0.1	0	0	5	5
0.2	37.5	50	50	50
0.3	42.5	50	55	50
0.4	45	55	55	55

Tabla 8. Dureza de la resina de poliéster insaturado variando el % de fotoiniciador en un intervalo de tiempo de 15 a 60 min.

Como era de esperarse, analizando la grafica 6, las mediciones de dureza a los 15 minutos de haber realizado el proceso de curado, muestran claramente que a mayor porcentaje de fotoiniciador, mayor valor presenta la dureza, al menos durante los primeros 15 minutos del proceso. También se ve claramente que en este tiempo de medición, el menor porcentaje recomendado por la literatura (0.1%) no alcanza valor de dureza alguno.



Gráfica 6. Comportamiento de la dureza de la resina de poliéster insaturado variando el % de fotoiniciador, en un intervalo de tiempo de 15 a 60 minutos.

Una vez pasados o transcurridos los 15 minutos siguientes, es decir 30 minutos después que se ha realizado el proceso de curado, se obtienen los resultados evidenciados en la segunda columna de la Tabla 8 y representados por la gráfica 6, mediante los cuales podemos interpretar que, al igual que en el experimento inicial, es decir el del numeral 4.1, a medida que transcurre el tiempo los valores de dureza incrementan. Sin embargo, ya en este punto se comienzan a ver valores muy cercanos entre un porcentaje de fotoiniciador y otro, es decir, entre

0.2 y 0.3% de fotoiniciador los valores de dureza no tienen diferencia alguna (50 Barcol), mientras que con 0.4%, evidentemente el valor de dureza a este tiempo, sigue siendo mayor.

Al continuar con el experimento, se evalúa la dureza a los 45 minutos, encontrando, como es de esperarse, cierta estabilidad en los valores de dicha variable. Particularmente se observa que en este tiempo, la muestra con 0.1% de fotoiniciador proporciona valores de dureza, aunque como indica la lógica, no son valores muy representativos (5 Barcol de acuerdo a la tabla 8). Es evidente que transcurridos 45 minutos, igual que en las mediciones anteriores (30 minutos) la diferencia de dureza entre los diferentes porcentajes de fotoiniciador, excluyendo el de 0.1%, es muy baja, 5 Barcol aproximadamente. Pero adicional a esto, se comienza a notar una estabilidad en las mediciones respecto a las de la prueba de 30 minutos, lo que ha sido una constante durante la mayoría de los experimentos.

En el último ensayo correspondiente a los 60 minutos, se observan cambios mínimos o poco representativos respecto a las mediciones anteriores (30 y 45 minutos), igual que lo sucedido en los análisis de dureza vistos en el numeral 4.1. El único valor de dureza que cambia es el correspondiente a 0.3% de fotoiniciador, el que alcanza un valor de 50 Barcol, incluso en mediciones anteriores había alcanzado hasta 55 Barcol. De cualquier manera esta diferencia no es representativa de acuerdo a los valores encontrados y puede ser adjudicada inclusive al proceso de medición y los errores inherentes al mismo.

4.4 Comportamiento de la temperatura de la resina de poliéster insaturado variando el porcentaje de fotoiniciador.

Realizando un símil con las pruebas anteriores, es decir las correspondientes a la medición de dureza y temperatura de reacción de la resina de poliéster insaturado con el porcentaje de fotoiniciador fijo en 0.4% (numerales 4.1 y 4.2), se lleva a

cabo el mismo análisis para los ensayos realizados cambiando o variando el porcentaje de fotoiniciador.

Se observarán y analizarán los resultados obtenidos una vez tomada la temperatura de cada una de las muestras sometidas a curado con radiación ultravioleta y variando el porcentaje de fotoiniciador en el rango que se ha trabajado durante todo el proyecto.

Basados en lo anterior, es importante tener presente que para estas pruebas el tiempo de exposición a la radiación o el número de pasadas se conserva, es decir es de 15 pasadas, ya que estas mediciones se realizaron a la par con las de dureza y sobre las mismas muestras.

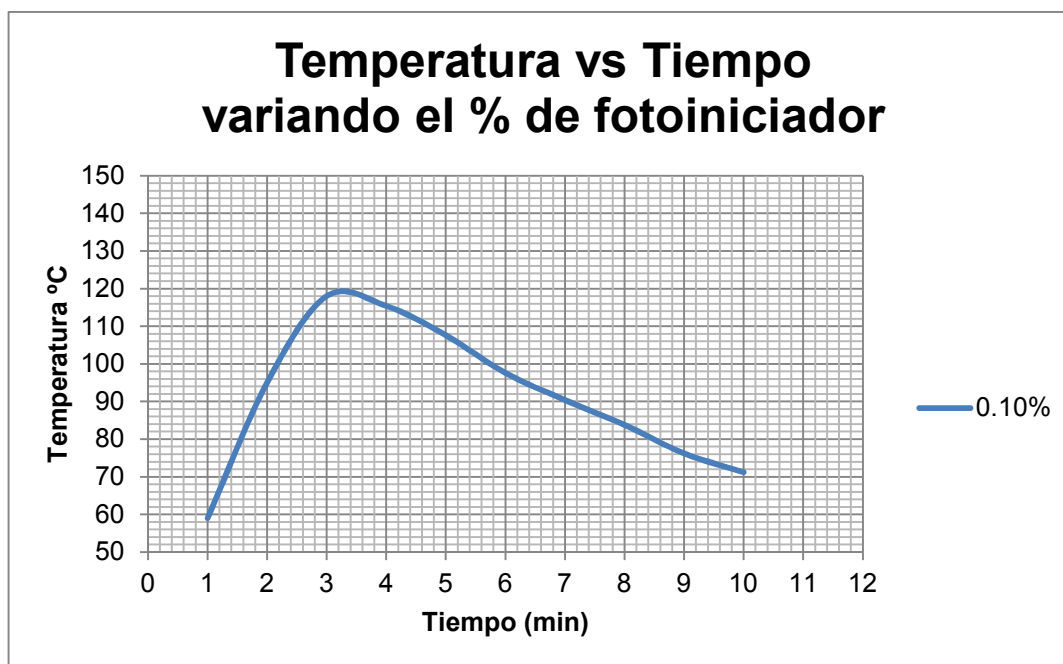
Las mediciones se realizan cada minuto hasta los 10 minutos, esto basados en lo explicado anteriormente en el numeral 4.2 respecto al comportamiento del tiempo de gel y la necesidad de obtener valores que sean realmente representativos de acuerdo a lo que se desea evaluar y analizar. Además, también con el fin de no variar en ningún momento la forma y proceso de medición, de tal manera que los resultados puedan ser comparables y fácilmente analizables respecto a la variable crítica en cada uno de ellos, evitando generar ruidos innecesarios o variables externas que de una u otra manera puedan interferir con los resultados o posibles análisis, provocando interpretaciones erróneas.

Inicialmente se revisan los datos arrojados por el primer ensayo, es decir el de 0.1% de fotoiniciador y que corresponden a los mostrados en la tabla 9, donde se puede deducir que el comportamiento es el mismo que se mostraba con 0.4% en las pruebas presentadas en el numeral 4.2.

% Fotoiniciador	Temperatura (°C)									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
0.1	59	95	118	115.4	107.6	97.6	90.4	83.8	76.2	71.2

Tabla 9. Medición de la temperatura en el tiempo después de someter la resina de poliéster insaturado a 15 pasadas en la cámara UV, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.1%

Entendiendo lo anterior, se puede pensar que es bastante lógico, pues la cantidad o número de pasadas, respecto a dicho ensayo se conservan (15 pasadas), por lo cual se puede asumir que por lo menos el comportamiento de la temperatura debería conservarse; sin embargo, los valores exactos no coinciden, es decir que lo que se replica es la tendencia de la gráfica, tal y como se ve en la gráfica 7.



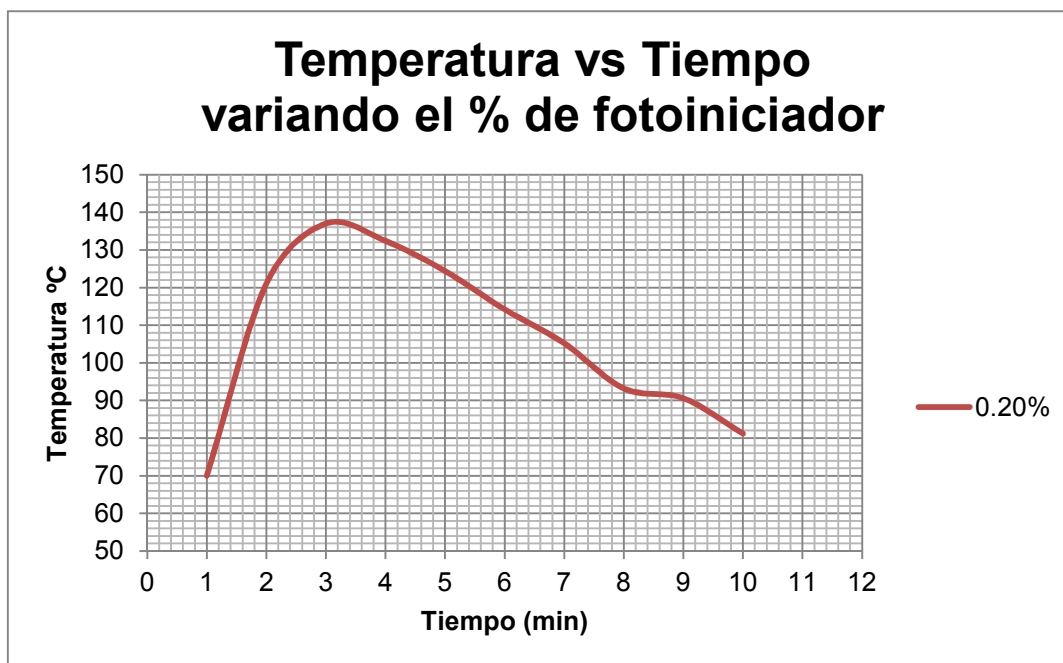
Gráfica 7. Variación de la temperatura en el tiempo después de someter la resina de poliéster insaturado a 15 pasadas en la cámara UV con un porcentaje de fotoiniciador de 0.1%.

Al analizar el segundo ensayo o prueba, es decir en el que se realizaron las mediciones de temperatura para muestras de resina de poliéster insaturado con

0.2% de fotoiniciador y cuyos resultados se muestran en la tabla 10, se observa que evidentemente la tendencia se conserva (Gráfica 8), esta vez con un punto máximo de temperatura en la reacción exotérmica de 137°C como lo muestra la Tabla 10.

% Fotoiniciador	Temperatura (°C)									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
0.2	70	121	137	132.4	124.4	114.2	105.2	93.2	90.6	81.2

Tabla 10. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.2%.



Gráfica 8. Variación de la temperatura en la resina de poliéster insaturado con un porcentaje de fotoiniciador de 0.2%.

Aunque los valores de temperatura arrojados por las mediciones de este experimento son significativamente más altos que la prueba de 0.1% de fotoiniciador, cabe anotar que se conservan las tendencias de aumento y disminución en ambos ensayos, es decir, de uno a tres minutos se ve un incremento bastante significativo con un incremento de temperatura de 59°C para

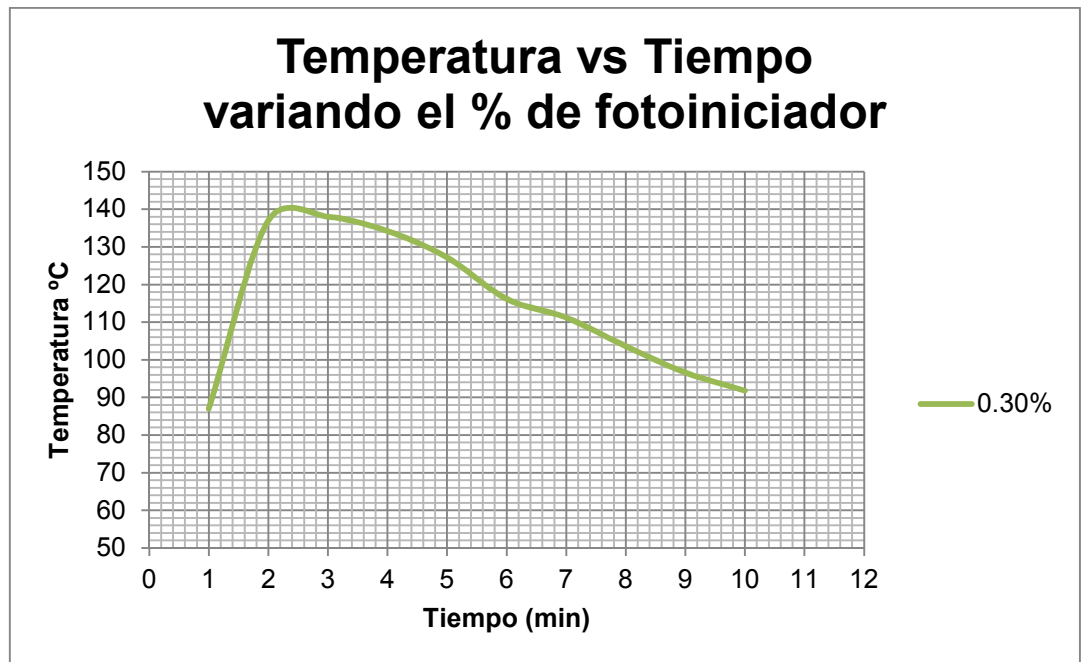
0.1% y 67°C para 0.2% de fotoiniciador; de igual manera en el periodo de tiempo comprendido entre los tres y diez minutos, donde se da el período de disminución de temperatura, se observa un incremento de temperatura de 47°C y 53°C para 0.1 y 0.2% de fotoiniciador , respectivamente. Se puede observar como las tendencias se conservan a pesar de variar o aumentar el porcentaje de fotoiniciador (Gráficas 7 y 8), pero es claro que al menos para este rango (0.1 a 0.2%), la temperatura de la reacción exotérmica aumenta con el incremento de fotoiniciador.

De igual manera como se viene haciendo, en la tabla 11, se describen los datos correspondientes a las mediciones de temperatura realizadas a la muestra curada con 0.3% de fotoiniciador y cuyo comportamiento se visualiza en la gráfica 9, ya que de esta manera se mantiene el orden lógico en el análisis de los resultados.

% Fotoiniciador	Temperatura (°C)									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
0.3	87	137	138	134. 2	127. 2	116. 2	111. 2	103. 6	96.6	91.8

Tabla 11. Medición de la temperatura en la resina de poliéster insaturado, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.3%.

En la gráfica 9, se puede identificar rápidamente el cambio que se presenta en la tendencia de aumento de temperatura respecto a las gráficas o ensayos anteriores, aunque el valor del punto máximo es el mismo que en el experimento con 0.2% de fotoiniciador, en este caso se obtiene dicho valor mucho mas rápido, es decir, se llega a 137°C a los 2 minutos como lo muestra la Tabla 11 y aunque se conserva en este valore por más tiempo que en las dos pruebas anteriores, la tendencia de disminución es básicamente la misma que se ha presentado desde el principio del análisis.



Gráfica 9. Variación de la temperatura en el tiempo después de que la resina de poliéster insaturado se ha sometido a 15 pasadas en la cámara UV con un porcentaje de fotoiniciador de 0.3%.

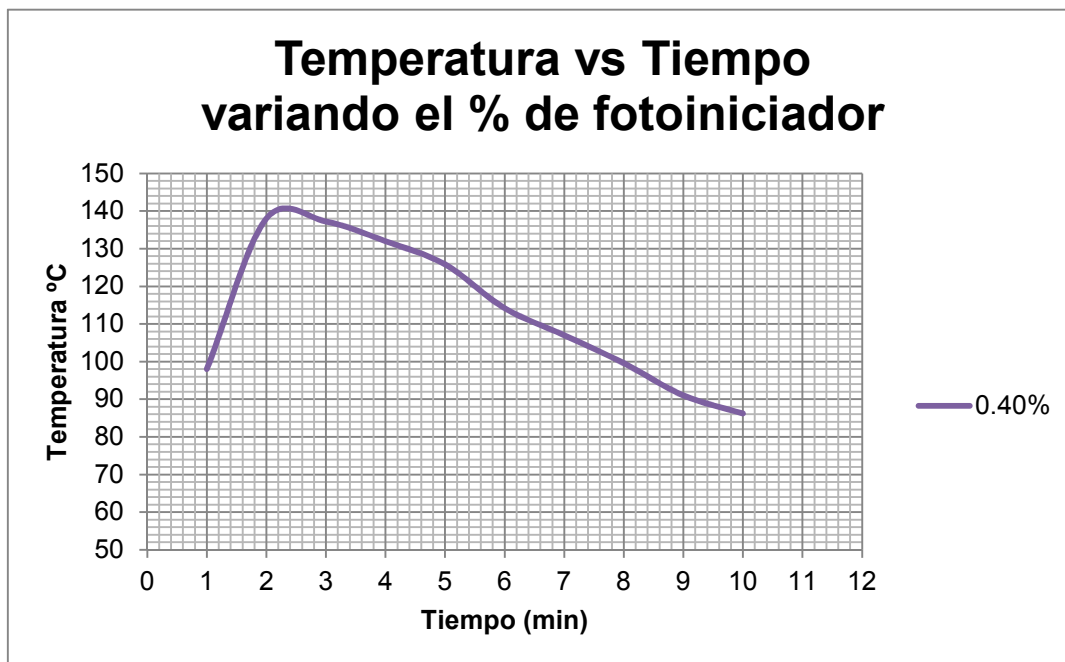
Finalmente, en la tabla 12 se indican los datos proporcionados por las mediciones de temperaturas realizadas a las muestras de 0.4% de fotoiniciador y a la vez se grafican los mismos (Gráfica 10) para una mejor interpretación que permita entender y visualizar la diferencia con las mediciones anteriores.

% Fotoiniciador	Temperatura (°C)									
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
0.4	98	138	137.2	132	125.8	114.2	107	99.6	91	86.2

Tabla 12. Medición de la temperatura en el tiempo después de que la resina de poliéster insaturado ha sido sometida a 15 pasadas en la cámara UV, con un porcentaje de fotoiniciador del 0.4%.

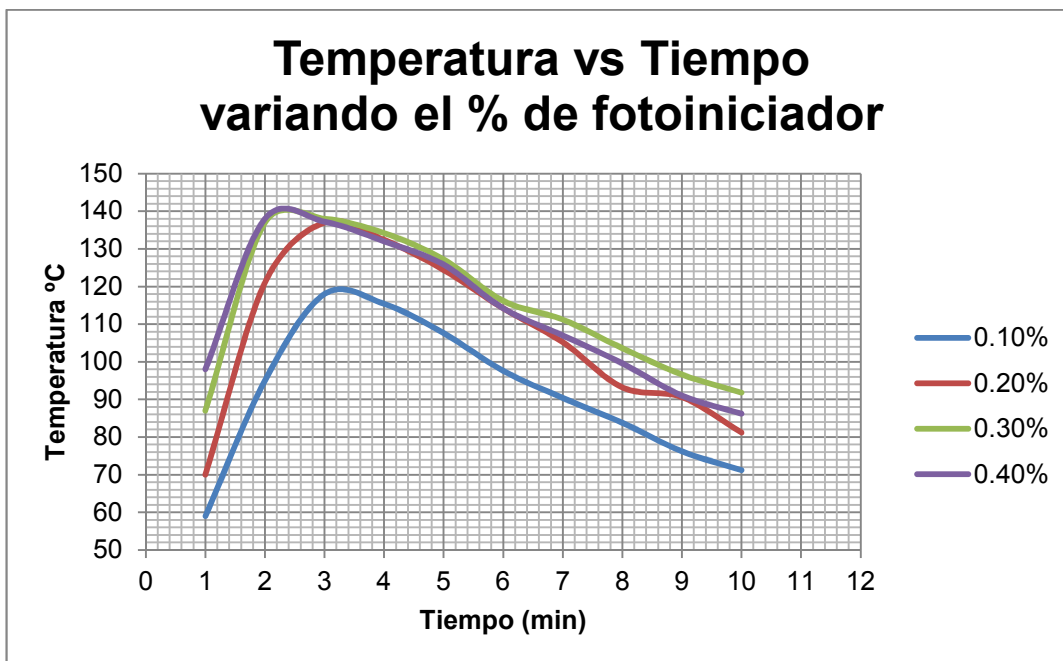
En este caso se observa que los valores de dichas mediciones se conservan bastante similares durante todo el proceso de medición, es decir durante los 10 minutos, especialmente en comparación con los datos arrojados por la prueba de

0.3%. Como se ve en las tablas 11 y 12, el valor máximo de temperatura en la reacción exotérmica para ambos experimentos es básicamente el mismo (138°C) y además la diferencia de los valores de cada una de las mediciones luego de los 2 minutos no superan los 5°C.



Gráfica 10. Variación de la temperatura en el tiempo después de que la resina de poliéster insaturado ha sido sometida a 15 pasadas en la cámara UV con un porcentaje de fotoiniciador de 0.4%.

Con el fin de poder observar de forma mas clara el comportamiento de la temperatura con el aumento de fotoiniciador en el proceso de curado con radiación UV, se ha decidido recopilar todos los resultados en una sola gráfica (Gráfica 11), en la cual se puede ver e identificar sin duda alguna que el aumento de fotoiniciador afecta representativamente la temperatura de la reacción exotérmica cuando se varía de 0.1 a 0.2%, pero para mayores porcentajes el cambio es poco significativo entre las diferentes variaciones del porcentaje de fotoiniciador. Sin embargo la temperatura inicial, es decir la de la primera medición en cada una de las pruebas, si aumenta constantemente con el incremento de este componente



Gráfica 11. Comparación temperatura variando porcentaje fotoiniciador.

4.5 Curado con radiación ultravioleta de la resina de poliéster insaturado reforzada con fibra de vidrio.

En este apartado existirá un cambio en la metodología de la experimentación debido al cambio en el material de las pruebas, ya que esta vez en lugar de la resina se analizará el comportamiento del curado con radiación ultravioleta de probetas de resina de poliéster insaturado con adición de fibra de vidrio, es decir, sometiendo a prueba de curado propiamente el plástico reforzado.

Las pruebas correspondientes se llevaron a cabo dejando fijo el porcentaje de fotoiniciador, trabajando en el nivel o valor máximo recomendado por la literatura y el fabricante, es decir de 0.4%.

En esta caso es importante analizar el efecto del contenido de fibra de vidrio en el proceso de curado. Para tal efecto, el porcentaje en peso de fibra de vidrio respecto a la cantidad total de la muestra se ha variado de 25% a 35% con

intervalos de 5% cada uno, y con la finalidad de interpretar de manera más fácil los ensayos realizados y poder identificar claramente a que porcentajes corresponde cada uno, se han nombrado de la siguiente manera:

- E3.1 ensayo con porcentaje de fibra/resina de 25%/75%, respectivamente
- E3.2 ensayo con porcentaje de fibra/resina de 30%/70%, respectivamente
- E3.3 ensayo con porcentaje de fibra/resina de 35%/65%, respectivamente

Cada uno de los ensayos mencionados ha sido sometido a pruebas de dureza Barcol, realizando mediciones durante 60 minutos, luego de haber llevado a cabo el proceso de curado y con intervalos de 15 minutos en cada medición.

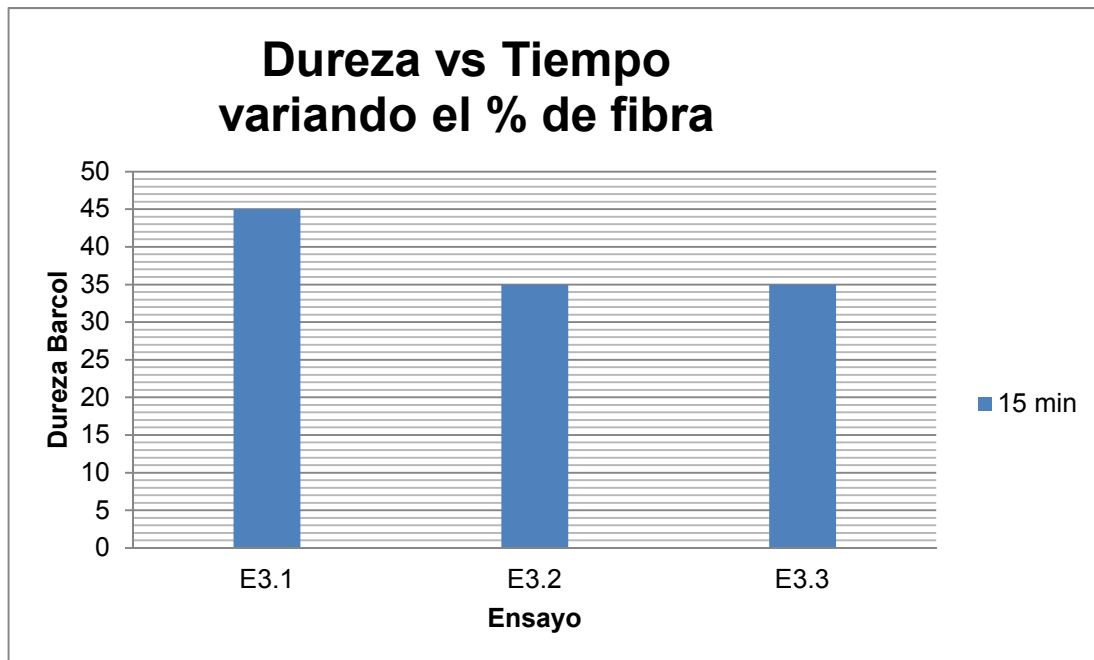
Inicialmente, en la tabla 13, se presentan los resultados correspondientes a la medición de dureza a los 15 min.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Peso resina(g)	Peso fibra(g)	Dureza Barcol 15min
E3.1	75%	25%	42	13	45
E3.2	70%	30%	30	14	35
E3.3	65%	35%	23	12	35

Tabla 13. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio, variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 15 minutos.

Haciendo la revisión de las primeras mediciones, es decir, las correspondientes a los 15 minutos inmediatamente posteriores al curado de las probetas, se puede ver una tendencia de disminución en el valor de dureza Barcol (Gráfica 12) obtenida a medida que se aumenta el porcentaje de fibra en el compuesto. Sin embargo, es evidente que al conservar la cantidad de fotoiniciador en el valor más alto recomendado, todas y cada una de las muestras dieron valores de dureza bastante significativos, indicando claramente que hay un buen proceso de curado y que el hecho de agregar fibra de vidrio no debería afectar el proceso como tal, al

menos durante los primeros minutos, tiempo en el que fue realizada dicha medición.



Gráfica 12. Comportamiento de la dureza del material reforzado con fibra de vidrio, variando la cantidad de fibra entre 25-35 % en peso, transcurridos 15 min.

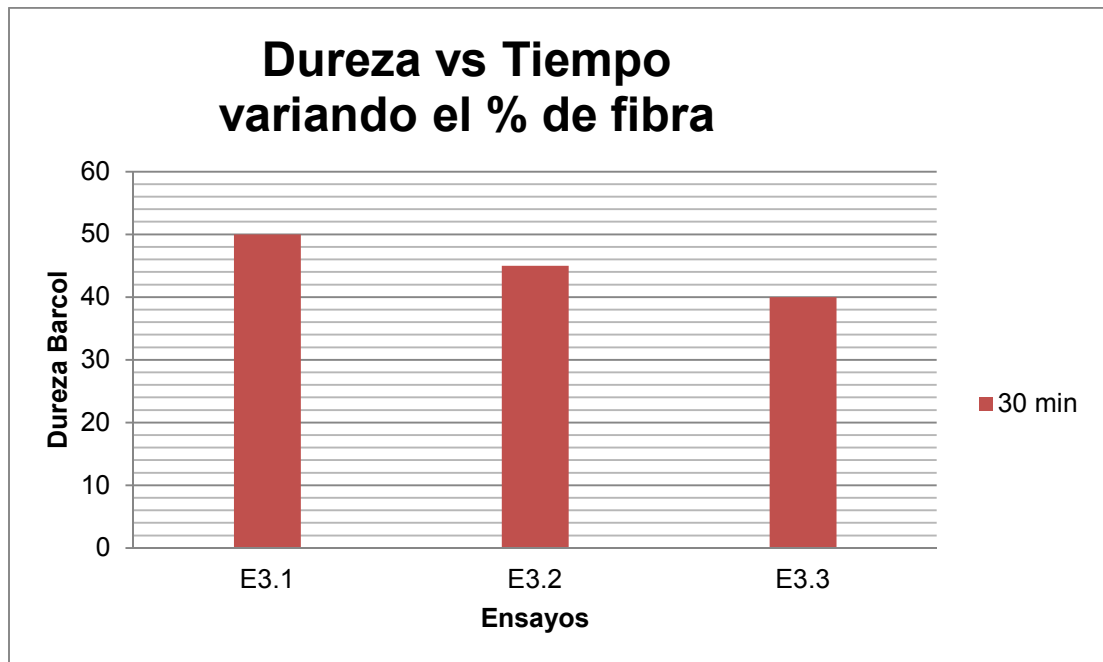
Para reforzar este concepto es apropiado recordar los resultados obtenidos en el numeral 4.3 “Resultados dureza del curado con radiación ultravioleta variando el porcentaje de fotoiniciador”, donde se pudo observar que con un porcentaje de fotoiniciador de 0.4%, la resina sola obtenía valores de dureza de hasta 45 Barcol durante los primeros 15 minutos luego del curado. De tal manera que estos resultados no se ven tan afectados, al menos comparativamente en este mismo lapso de tiempo, aunque cabe resaltar que la diferencia es mas notoria a medida que se aumenta la cantidad de fibra en el compuesto, ya que para los ensayos E3.2 y E3.3 los valores obtenidos fueron de 35 Barcol según se muestra en la Tabla 13. Ello, posiblemente, debido a que cierto porcentaje de radiación UV puede ser absorbida por la fibra de vidrio disminuyéndose así su poder o capacidad de polimerizar.

En los ensayos correspondientes a las mediciones realizadas 30 minutos después del curado, y reflejadas en los datos mostrados en la Tabla 14 y la gráfica 13, se aprecia un aumento de 5 unidades Barcol de dureza, aproximadamente, respecto a las mediciones anteriores.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Peso resina(g)	Peso fibra(g)	Dureza Barcol 30min
E3.1	75%	25%	42	13	50
E3.2	70%	30%	30	14	45
E3.3	65%	35%	23	12	40

Tabla 14. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio, variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 30 minutos después del curado.

Teniendo estos datos como base, se puede ver como el proceso de curado con radiación sigue arrojando buenos resultados de dureza a pesar de haber agregado o adicionado una carga como fibra de vidrio al material en cuestión y como es de esperarse se observa un resultado inversamente proporcional entre la cantidad de fibra y el valor de la dureza, es decir que a mayor cantidad de fibra menor valor de dureza presenta el compuesto, comportamiento que puede apreciarse en la Gráfica 13 y cuya explicación es similar a la dada en el caso anterior.



Gráfica 13. Comportamiento de la dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 30 minutos.

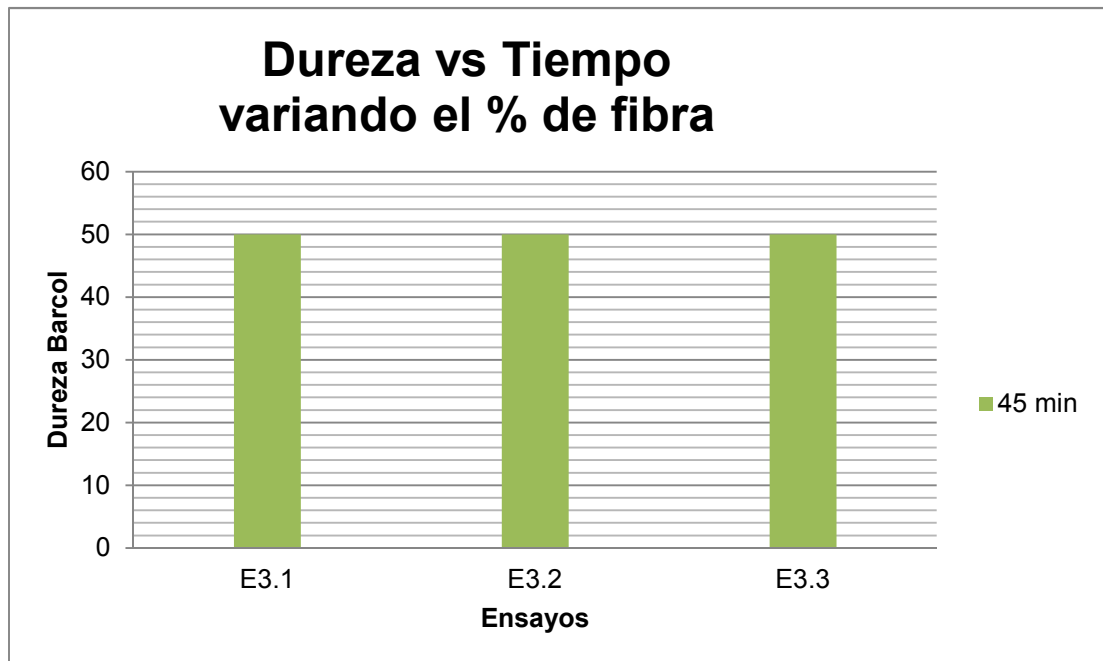
Al menos es lo que se identifica durante la primera parte del proceso de post curado, teniendo presente que en este punto (30 minutos) el proceso como tal no ha llegado a su fin y los valores de dureza arrojados no han alcanzado un valor estable que permita identificarlo como valor final de dureza para cada uno de los ensayos.

Para la tercera medición, es decir la correspondiente a los 45 minutos posteriores al proceso de curado, se han obtenido valores de dureza muy particulares y que se pueden observar en la tabla 15, aunque bastante esperados o predecibles de acuerdo a todo lo revisado en los numerales anteriores de este mismo capítulo.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Peso resina(g)	Peso fibra(g)	Dureza Barcol 45 min
E3.1	75%	25%	42	13	50
E3.2	70%	30%	30	14	50
E3.3	65%	35%	23	12	50

Tabla 15. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio, variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 45 min.

En este punto del proceso ya se observa una estabilidad cercana a un valor, que para este caso en particular es de 50 Barcol en los tres ensayos (Gráfica 14), lo que da un indicio para concluir que la cantidad de fibra en el compuesto no afecta el curado o específicamente los valores de dureza de la muestra, sin embargo si afecta el tiempo que tarda dicha muestra en llegar a estos valores.



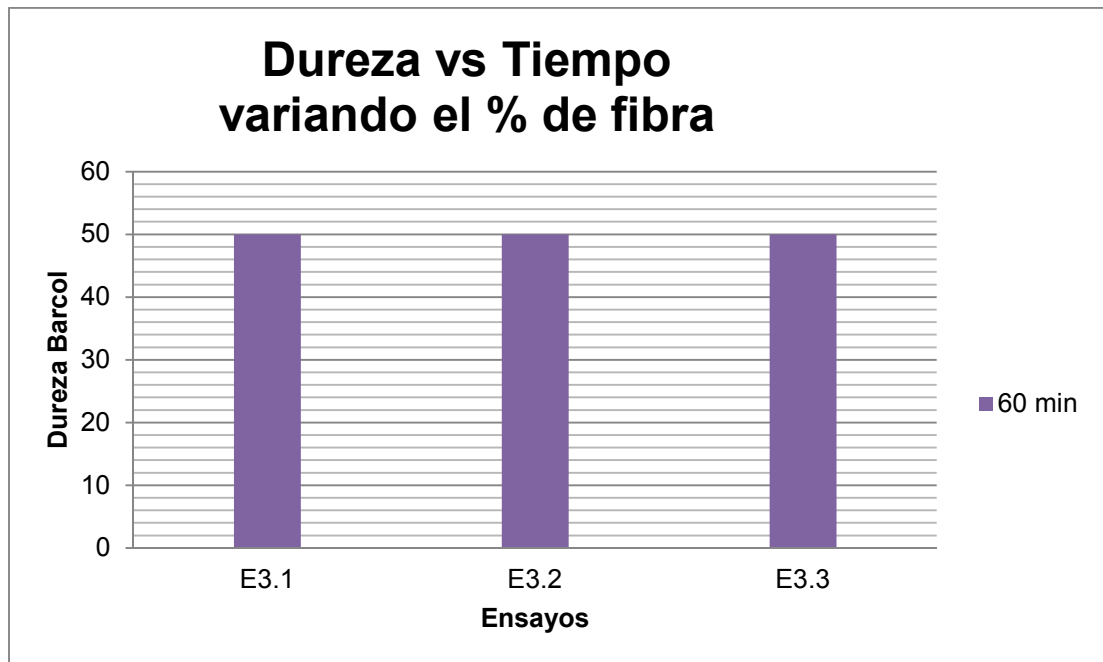
Gráfica 14. Comportamiento de la dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 45 min.

Efectivamente y de acuerdo a lo observado en el punto anterior, los resultados obtenidos en las mediciones a los 60 minutos y que se ven reflejados en la Tabla 16, muestran y ratifican lo mencionado, es decir que se encuentra un valor de estabilidad para la dureza y es el mismo para todos y cada uno de los ensayos (50 Barcol).

Ensayo	% Resina	% Fibra	Peso resina(g)	Peso fibra(g)	Dureza Barcol 60 min
E3.1	75%	25%	42	13	50
E3.2	70%	30%	30	14	50
E3.3	65%	35%	23	12	50

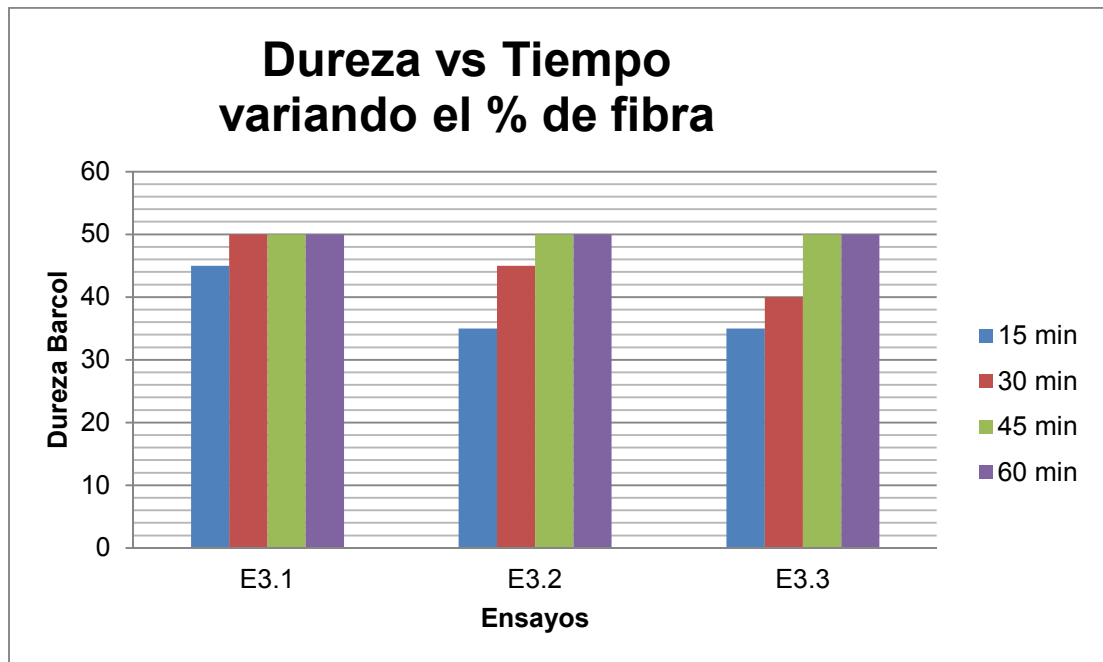
Tabla 16. Dureza del material reforzado con fibra de vidrio, variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 60 min.

Teniendo esto presente se puede afirmar que el valor máximo de dureza que se puede obtener para este experimento en particular, es decir el curado con radiación ultravioleta de resina de poliéster insaturado reforzada con fibra de vidrio es de 50 Barcol, tal como se aprecia en la Gráfica 15, es decir aproximadamente 5 Barcol menos que la resina sola, de acuerdo a los resultados obtenidos y evidenciados en el numeral 4.4. Como ya se indicó antes ello se debe a que posiblemente parte de la radiación UV es absorbida por la fibra de vidrio.



Gráfica 15. Comportamiento de la dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%, transcurridos 60 min.

Finalmente y con el objetivo de tener una visión general de los resultados obtenidos en esta parte del documento se muestra la gráfica 16 donde se observa claramente la evolución de cada uno de los ensayos durante las mediciones realizadas. Aunque se ve que la evolución del ensayo E3.3 es la mas lenta por llamarlo de alguna manera, finalmente llega al mismo valor que los otros dos ensayos, es decir el valor máximo de dureza de 50 Barcol.



Gráfica 16. Comportamiento de la dureza del material reforzado con fibra de vidrio variando la cantidad de fibra entre 25-35%.

4.6 Comportamiento de la temperatura durante el proceso de curado del plástico reforzado variando el porcentaje de fibra de vidrio

Para continuar con la metodología de análisis que se viene aplicando y con el fin de tener un panorama más amplio acerca de los resultados de los experimentos desarrollados, se decidió durante el proceso propio de la experimentación, tomar también mediciones de temperatura a todas y cada una de las muestras de laminados de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio.

El proceso de medición se lleva a cabo exactamente igual que el de los procedimientos mencionados en los numerales 4.2 y 4.4, es decir, tomando temperaturas de la muestra curada, un minutos después que comienza el proceso de curado y con intervalos de un minuto también durante 10 minutos sucesivos. Las razones que llevan a la selección de esta cantidad de tiempo y la frecuencia de medición son las mismas mencionadas anteriormente que implican el rango en

el cual se da el tiempo de gel de una resina durante el proceso de curado, de acuerdo a las propiedades mismas de la resina, claro está.

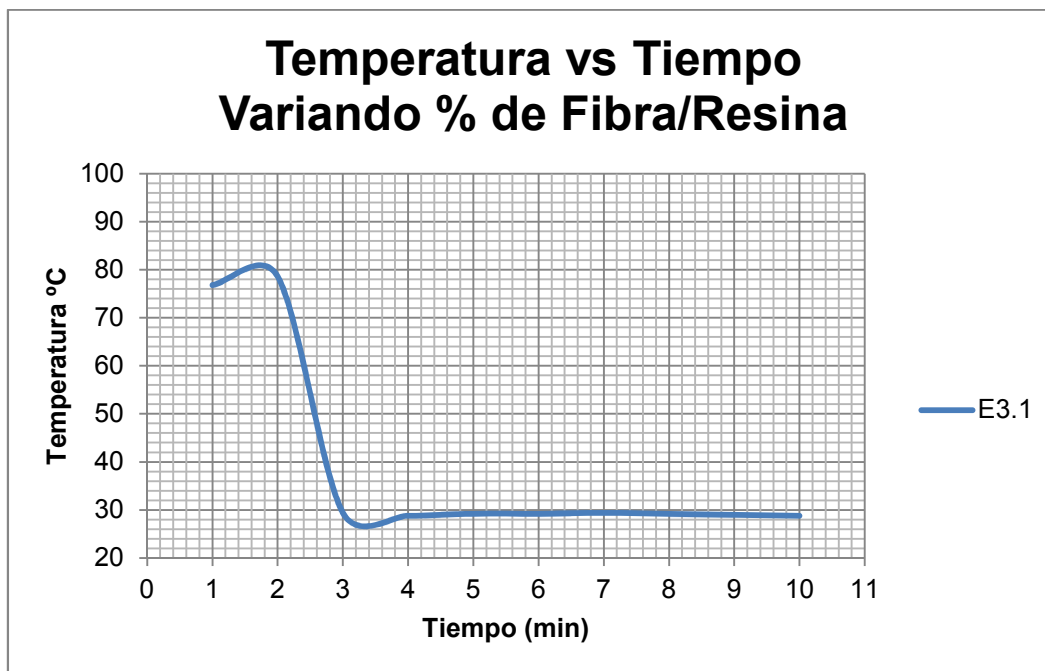
Teniendo presente estos puntos, se revisarán durante el desarrollo de esta parte del capítulo, los resultados obtenidos al medir y analizar el comportamiento de la temperatura en el tiempo, medida en probetas o laminados de los materiales mencionados, buscando entender cómo puede afectar la cantidad de fibra en la reacción de curado de la mezcla. Es por esto que los datos se han obtenido a la par con el experimento expuesto en el numeral anterior, por lo cual las probetas son las mismas y serán llamadas de la misma manera (E3.1, E3.2, E3.3).

Basados en lo anterior, se comienza con la revisión de los resultados relacionados con la probeta E3.1 la cual corresponde a 25% de fibra y cuyos datos se observan en la tabla 17, a partir de la cual se genera la tendencia mostrada en la gráfica 17.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Temperatura (°C)									
			1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
E3.1	75%	25%	76.8	78.6	29.4	28.8	29.2	29.2	29.4	29.2	29	28.8

Tabla 17. Comportamiento de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 75% y de fibra del 25%.

En la gráfica 17 se ve el comportamiento de la temperatura para un laminado con 25% de fibra y se observa como tiene una caída de temperatura de mas de 50°C en un minuto aproximadamente (del minuto 2 al 3) y luego de eso se ve estabilizar en 30° durante el resto de las mediciones, es decir hasta los 10 minutos.



Gráfica 17. Comportamiento de la temperatura durante el curado del plástico reforzado con un contenido de fibra de vidrio del 25%.

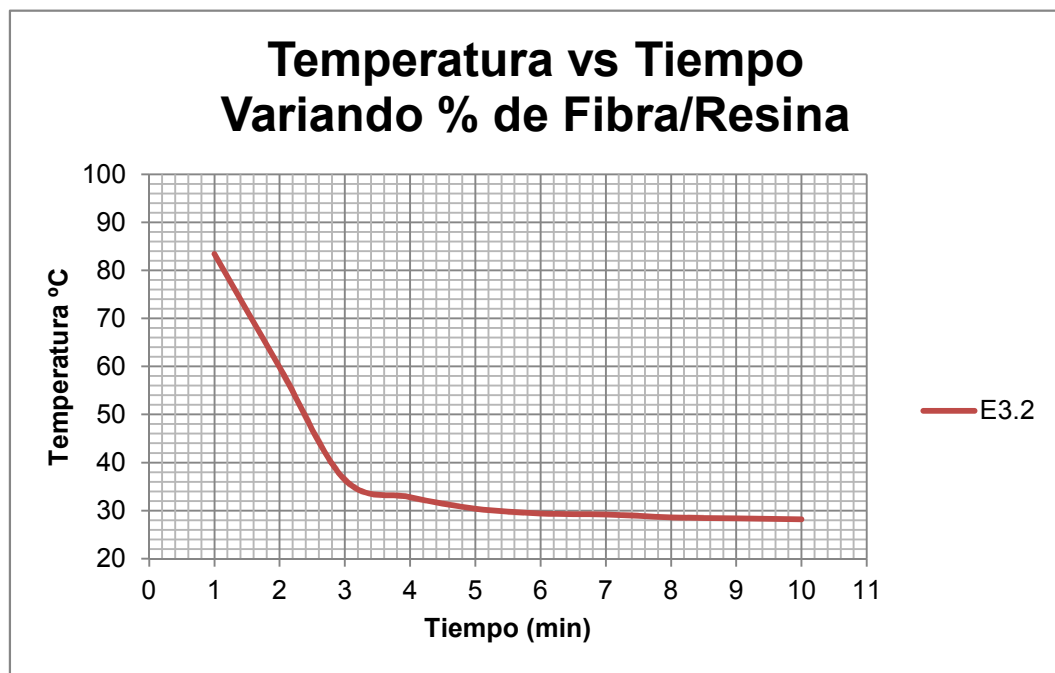
Revisando particularmente este ensayo en comparación con los ensayos del numeral 4.4 correspondientes al curado de resina con 0.4% de fotoiniciador, se nota que para este caso el proceso de enfriamiento es mucho más rápido que en el curado de la resina sola.

En el segundo ensayo (E3.2) se ve un comportamiento similar al del ensayo E3.1, es decir de un enfriamiento súbito luego de la primera medición como se muestra en la Tabla 18 y que se evidencia en la Gráfica 18, pero esta vez es menor que la anterior ya que la diferencia es de 23°C, aproximadamente, entre la primera medición y la segunda.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Temperatura (°C)									
			1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
E3.2	70%	30%	83.4	59.8	36.4	32.8	30.4	29.4	29.2	28.6	28.4	28.2

Tabla 18. Temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad de fibra del 30%.

También es evidente que se sigue conservando la estabilización de la temperatura alrededor de los 30°C como se observa en el comportamiento de la gráfica 18. Sin embargo, se demora aproximadamente 5 minutos en alcanzar este valor, a diferencia del experimento anterior donde este valor se alcanzaba a los tres minutos, lo que da un indicio que al aumentar el porcentaje de fibra el calor se puede conservar durante un poco más de tiempo seguramente debido a las características de aislamiento térmico en caliente propio de los cerámicos como la fibra de vidrio. Sin embargo, los valores de temperatura en ambos casos son bastante similares.



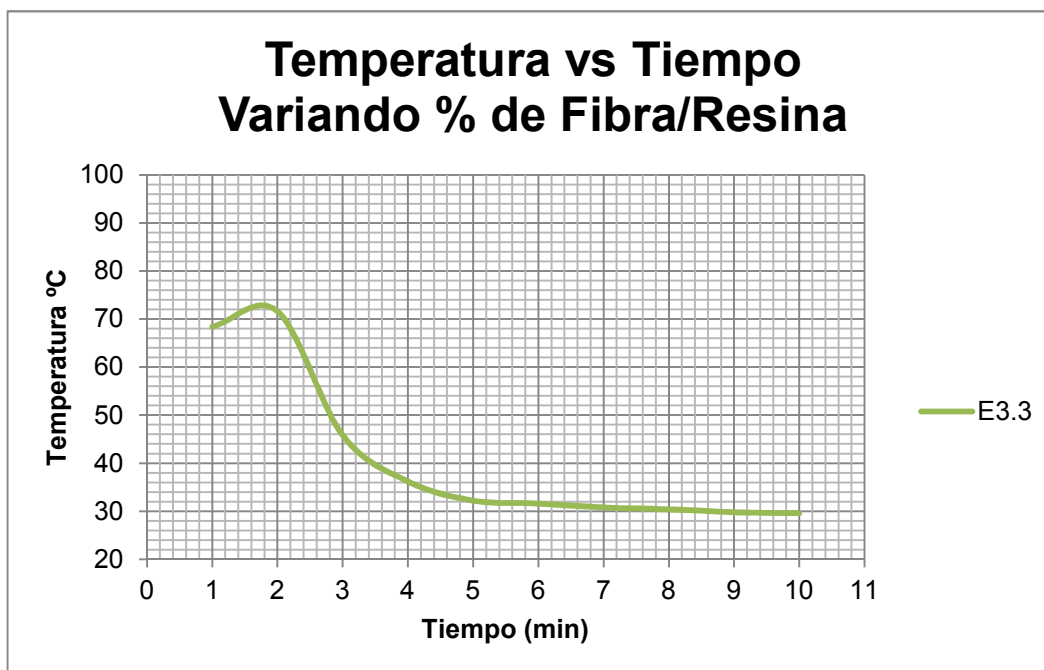
Gráfica 18. Comportamiento de la temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad resina del 70% y de fibra del 30%.

Finalmente, al analizar el último de los tres experimentos, se observa un comportamiento diferente o atípico a lo que se viene dando. Por ejemplo, la primera medición presenta un valor más bajo y el segundo dato muestra un valor superior al primero como lo muestra la Tabla 19, lo que es completamente diferente a los ensayos anteriores, en donde el primer valor era más alto.

Ensayo	% Resina	% Fibra	Temperatura (°C)									
			1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
E3.3	65%	35%	68.4	71.6	45.8	36.2	32.2	31.6	30.8	30.4	29.8	29.6

Tabla 19. Temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad de fibra del 35%.

Es por esto que en la gráfica 19, se ve un tramo con pendiente positiva (entre uno y dos minutos) y luego la caída súbita de temperatura que si es común a los experimentos E3.1 y E3.2. Ello se debe, posiblemente, a que la mayor cantidad de fibra presenta cierta interferencia inicial a la acción de los rayos UV. postergándose levemente al aparición del pico exotérmico.



Gráfica 19. Temperatura del material reforzado con fibra de vidrio con una cantidad de fibra del 35%.

Sin embargo y de acuerdo a lo que se viene analizando, el delta en el tramo de enfriamiento es menor que los dos anteriores, debido al aumento en la cantidad o porcentaje de fibra en el compuesto. También se identifica que la estabilización es en el mismo valor (30°C) y que, como era de esperarse, se demora un poco más

en alcanzarlo, debido a que al haber mayor cantidad de fibra de vidrio presente, se aísla térmicamente el sistema.

4.7 Ensayos de flexión a tres puntos.

De acuerdo a todo lo discutido y revisado durante el desarrollo del documento, se debe analizar sin duda alguna el comportamiento respecto a las propiedades mecánicas de los ensayos realizados con curado de radiación ultravioleta y así mismo comparar estos resultados o los datos obtenidos con pruebas iguales realizadas a las probetas curadas con el método tradicional o a temperatura ambiente.

En esta parte del documento se verá claramente cómo se comportan las probetas curadas al someterlas a la prueba o ensayo mecánico de flexión a tres puntos, buscando realizar las pruebas de la manera más similar posible, desde los espesores y dimensiones de las probetas hasta la posición de las mismas en el equipo y la adecuación de la máquina universal, todo esto basados en las recomendaciones de la norma ASTM D790-03 tal y como se mencionó en el capítulo 3, numeral 3.6.2.

Es importante aclarar que el objetivo final de este capítulo es obtener una visión mas amplia, de manera comparativa, que permita entender qué tanta incidencia pudiese tener el proceso de curado con radiación UV en el resultado final de las propiedades mecánicas de una pieza bien sea solo de resina de poliéster insaturado o un compuesto de dicha resina con fibra de vidrio; todo esto entendiendo que los experimentos realizados con este proceso son totalmente inéditos y cuyo desarrollo y evolución apenas comienza.

4.7.1 Flexión a tres puntos en la resina de poliéster insaturado bajo curado tradicional

Inicialmente se interpretarán los resultados obtenidos al realizar el ensayo de flexión a tres puntos a las probetas correspondientes al experimento de curado tradicional de la resina de poliéster insaturado y que servirán de base comparativa respecto al curado con radiación UV.

Las dimensiones que se muestran en la tabla 20 corresponden a las de las probetas de dicho ensayo y, además, en la tabla 21 al igual que en la gráfica 20, se presentan los datos y el comportamiento de las probetas curadas de manera tradicional en cuanto a propiedades mecánicas se refiere, específicamente en relación a la carga y el esfuerzo de flexión.

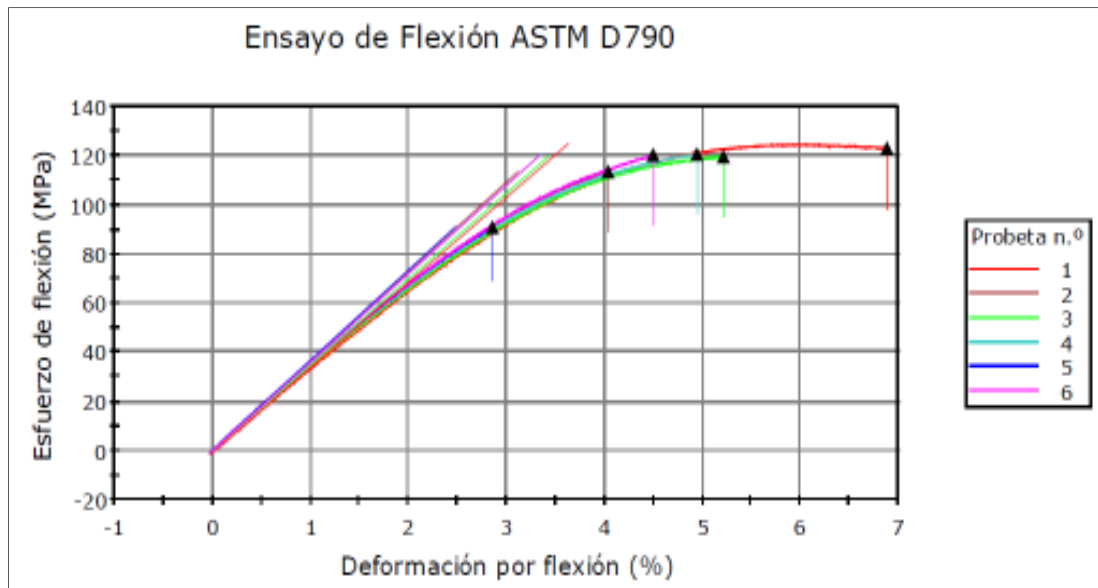
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	9.92	5.95
2	9.97	6.3
3	9.98	6.25
4	9.96	6.47
5	9.88	6.49
6	9.91	5.99
Desviación estándar	0.03109	0.19873
Media	9.955	6.2525

Tabla 20. Dimensiones de las probetas para el ensayo de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con el método tradicional.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga de flexión a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión a la rotura (MPa)
1	3.45922	299.70587	122.88876
2	3.64753	311.66034	113.41429
3	3.49243	323.52634	119.50375
4	3.58977	349.17194	120.59628
5	3.65745	262.54977	90.85060
6	3.60778	296.88184	120.23166
Desviación estándar	0.06588	22.11373	3.3788
Media	3.58438	320.31011	118.4365

Tabla 21. Resultados prueba de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con el método tradicional.

Se puede observar en la gráfica 20 como las probetas presentan todas valores muy cercanos a 120 MPa de esfuerzo de flexión inclusive con un promedio de 118MPa y apenas un valor por debajo de la expectativa, es decir en 90MPa. Si se decidiera obviar este último valor en el experimento, se obtendría que el promedio de esfuerzo de flexión para la prueba aumentaría en 5 MPa.



Gráfica 20. Ensayo flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con el método tradicional.

4.7.2 Flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado variando el porcentaje de fotoiniciador bajo curado UV.

A continuación se analizarán los resultados obtenidos en el ensayo de flexión a tres puntos para las muestras de resina curadas con radiación UV.

En primer lugar y como se puede observar en las tablas 22 y 23 al igual que en la gráfica 21, se revisará el comportamiento o respuesta de las mediciones realizadas a las cinco probetas de resina de poliéster insaturado curadas con radiación UV y con un porcentaje de fotoiniciador de 0.2%.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	9.96	5.83
2	9.83	5.88
3	9.87	5.91
4	9.83	5.84
5	9.83	5.93
Desviación estándar	0.05639	0.04324
Media	9.864	5.878

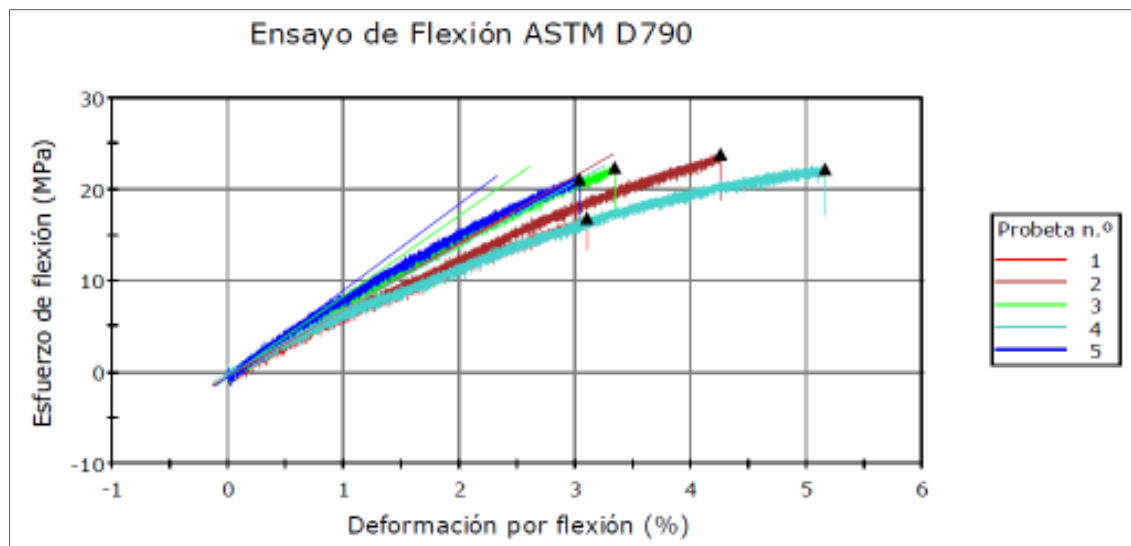
Tabla 22. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.

Cabe anotar que no se realizaron ensayos para las muestras curadas con 0.1% de fotoiniciador ya que, como se observó en el numeral 4.1, en las pruebas de dureza los resultados de esta no fueron satisfactorios y evidenciaron que al no proporcionar valores de dureza significativos, definitivamente no tendrían ninguna respuesta positiva en términos de esfuerzo.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga de flexión a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión a la rotura (MPa)
1	0.77217	39.69246	16.88395
2	0.73135	56.29683	23.85274
3	0.87917	53.60855	22.39259
4	0.70008	51.78414	22.24232
5	0.94573	50.74707	21.14027
Desviación estándar	0.10974	6.35908	2.65166
Media	0.7957	50.42581	21.30237

Tabla 23. Resultados de la prueba de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.2%.

Como se ve en la tabla 23, los valores arrojados por los ensayos realizados a esta muestra (curado UV con 0.2% de fotoiniciador), son bastante bajos en comparación con los obtenidos en los ensayos realizados a las probetas de resina curada a temperatura ambiente y que se evidenciaron en el numeral inmediatamente anterior.



Grafica 21. Ensayo flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.

Se puede observar que existe una diferencia de más de 100 MPa entre las medias de ambos ensayos a favor del resultado de la resina curada con el método tradicional. Este resultado, si bien no es el esperado, es apenas lógico, teniendo en cuenta la cantidad de fotoiniciador usado y la manera de fabricar y curar las muestras, es decir con las implicaciones respectivas que pueden generar apariciones de burbujas o atrapamientos de gases o aire que finalmente debilitan la muestra para ensayos mecánicos de este tipo.

Al continuar con la revisión de los ensayos realizados a las probetas curadas con rayos ultravioleta y apoyados en los valores o datos mostrados por la tabla 25, en la que se observan los datos de carga y esfuerzo de flexión de las probetas

curadas con 0.3% de fotoiniciador, teniendo en cuenta los datos de dimensiones de las probetas que se muestran en la tabla 24, se ve que los resultados obtenidos con este porcentaje son evidentemente mejores que los de la resina con 0.2% de fotoiniciador (Tabla 23).

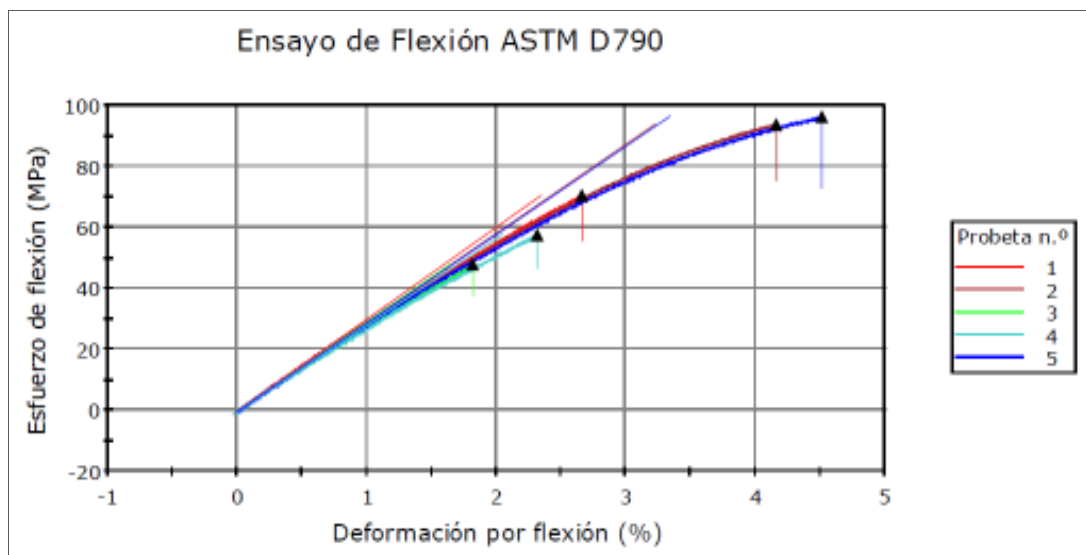
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	9.8	5.87
2	9.8	5.85
3	9.77	5.81
4	9.8	5.9
5	9.81	5.88
Desviación estándar	0.01517	0.03421
Media	9.796	5.862

Tabla 24. Dimensiones de las probetas para el ensayo de flexión de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga de flexión a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión a la rotura (MPa)
1	3.01747	165.18881	70.44349
2	2.91702	218.22162	93.6963
3	2.94234	109.69072	47.89449
4	2.84941	136.20947	57.49628
5	2.89659	226.36632	96.10603
Desviación estándar	0.06212	50.74002	21.44372
Media	2.92457	171.13539	73.12732

Tabla 25. Resultados de la prueba de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.3%.

Entendiendo lo mencionado anteriormente y de acuerdo a lo mostrado por la gráfica 22 en comparación con la gráfica 21, se puede decir que esto no concuerda con los datos arrojados por las mediciones de dureza de ambos ensayos (0.2% y 0.3%), en los que se mostró que los dos llegan a valores de dureza de 50 Barcol a los 60 minutos después del curado, es decir que en teoría y de acuerdo a los ensayos o mediciones previas, estos resultados deberían ser muy similares. Sin embargo, es de amplio conocimiento que en el proceso de curado intervienen muchos factores adicionales a los porcentajes de los elementos de la mezcla y que pueden afectar al final del proceso, la resistencia y/o propiedades mecánicas de las muestras. Inclusive hay que tener presente que la resistencia a la flexión es una propiedad mucho más sensible que la dureza a una gran variedad de factores, tales como: microdefectos, acabado superficial, etc.



Gráfica 22. Ensayo de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.

Teniendo esto presente, se puede entender que si bien el porcentaje de fotoiniciador afecta directamente los resultados de dureza de las muestras, no necesariamente se relacionará de la misma manera con la resistencia mecánica

de la muestra o pieza curada con el método de radiación. Si bien estas dos cosas pudiesen estar relacionadas, habrá otros factores que se deberán tener en cuenta.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos para los mismos ensayos realizados a las probetas curadas con 0.4% de fotoiniciador, cuyos datos están recopilados en la tabla 27 y visualizados en la gráfica 23 para entender mejor su comportamiento. Adicional a esto se presenta, como en los ensayos anteriores, la tabla 26 que corresponde a las dimensiones de las probetas analizadas.

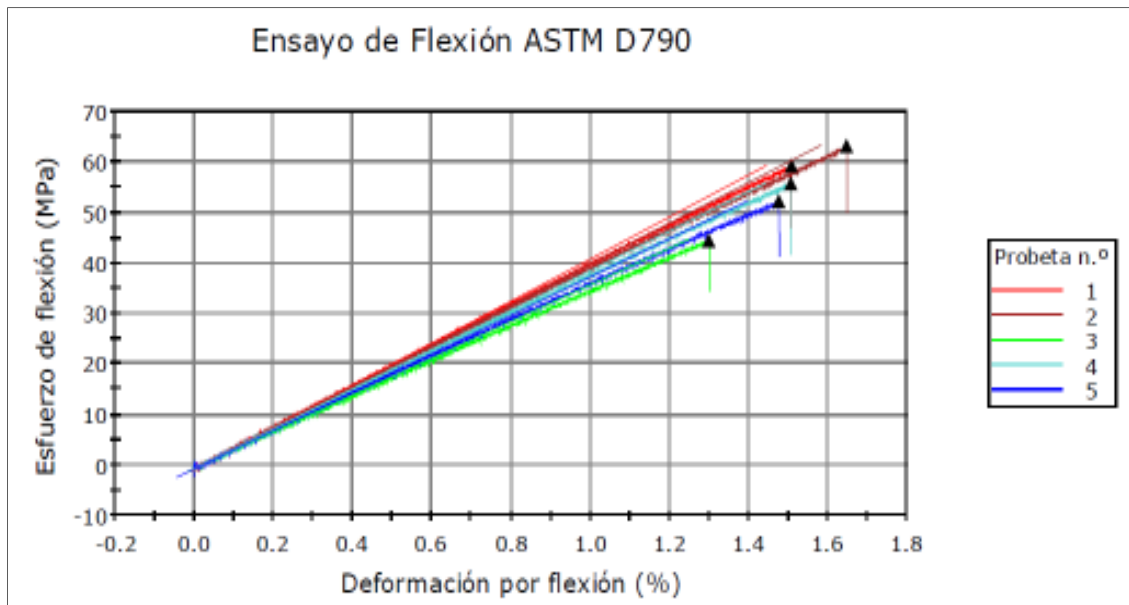
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	9.71	5.85
2	9.89	5.91
3	9.86	5.78
4	9.82	5.82
5	9.71	5.96
Desviación estándar	0.08408	0.07162
Media	9.798	5.864

Tabla 26. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.

Probeta	Módulo de Young (GPa)	Carga de flexión a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión a la rotura (MPa)
1	4.17083	136.9187	59.33273
2	4.04908	151.57982	63.18771
3	3.63532	101.69772	44.4571
4	3.92613	128.77606	55.74939
5	3.7972	125.08966	52.22424
Desviación estándar	0.20955	18.25605	7.16292
Media	3.91571	128.81239	54.99023

Tabla 27. Resultados prueba flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado curada con radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.4%.

Es inevitable darse cuenta que los resultados, en virtud de lo que se venía observando en los dos numerales anteriores, no son lo esperado, pues se obtienen valores inclusive menores que los arrojados por las pruebas hechas a las probetas curadas con 0.3% de fotoiniciador. Con una diferencia promedio de 43 N en la carga de flexión a favor de las probetas de 0.3% y una diferencia promedio de 20MPa en el esfuerzo de flexión a favor de la misma probeta. Inclusive se puede ver que los valores máximos de las muestras de 0.3% están bastante por encima de sus símiles de 0.4%, teniendo en cuenta que el espesor de las probetas utilizadas para ambos ensayos es básicamente igual (5.8mm de acuerdo a las tablas 24 y 26, respectivamente).



Gráfica 23. Ensayo de flexión a tres puntos de la resina de poliéster insaturado, curada con radiación UV con un % de fotoiniciador del 0.4%.

Sin embargo, a pesar de lo mencionado, es importante revisar al detalle estos dos ensayos, encontrando que en el primero de ellos (0.3% fotoiniciador) los resultados son bastante dispersos (desviación estándar de 50 para la carga y 21 para el esfuerzo, de acuerdo a la Tabla 25). Inclusive se ve que para probetas cortadas de la misma lámina se obtienen algunos valores de 100N y otros de 220N. Mientras que la dispersión del experimento con 0.4% es mucho menor (18N y 7MPa aproximadamente), mostrando resultados, en promedio de peor desempeño, pero en general de mayor consistencia, lo que puede indicar claramente que la forma de curar de la placa es fundamental, ya que en la de 0.3% la mezcla pudo haber quedado menos homogénea, generando valores altos y bajos de esfuerzos y cargas de flexión en un mismo experimento, mientras que la otra muestra pudo haber sido mas homogénea pero a la vez con mayor cantidad de burbujas o incrustaciones de aire que pudiesen generar la falla de las probetas de manera prematura.

Es muy importante entender que a mayor cantidad de fotoiniciador en la mezcla, el proceso de curado se desarrolla mas rápido, por lo que hay menos tiempo y menos posibilidad para la evacuación efectiva de gases y, posiblemente, mayor nivel de porosidad, lo que afecta sustancialmente la resistencia a la flexión.

De cualquier manera, es importante destacar que evidentemente los valores obtenidos por los ensayos hechos con curado con radiación ultravioleta, son considerablemente menores que los obtenidos a través del curado tradicional o a temperatura ambiente, sin embargo, vistos individualmente, son bastante satisfactorios y abren un gran campo de acción para continuar con la experimentación alrededor del tema.

4.7.3. Flexión a tres puntos del material reforzado curado mediante el método tradicional

A partir de este punto comienza la segunda parte del análisis de los resultados de las pruebas o ensayos mecánicos al experimentar con las láminas de resina reforzadas con fibra de vidrio.

Como primera medida y en busca de continuar con un orden apropiado y que brinde mayor visibilidad y comprensión alrededor del tema, se comenzarán analizando los resultados que se obtienen al someter al experimento de flexión a tres puntos a las probetas obtenidas al curar dicho material compuesto por medio del método tradicional. En la tabla 28 se presentan las dimensiones de las probetas correspondientes (Tabla 28) y en la tabla 29 y la gráfica 24 el comportamiento y los valores específicos de esfuerzo y carga de flexión de dichas probetas.

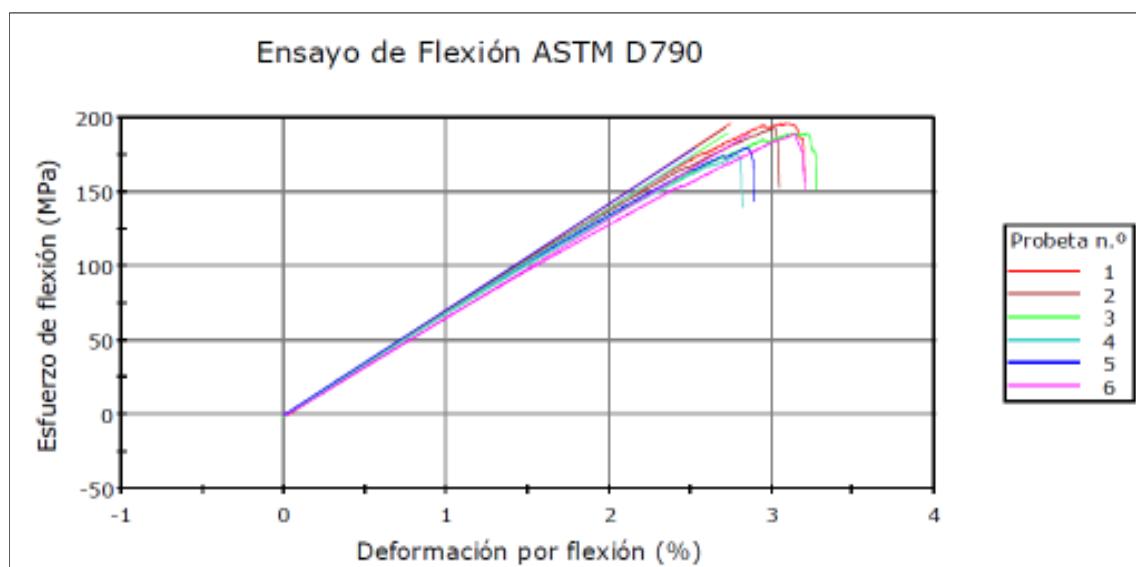
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	16.26	4.22
2	16.34	4.76
3	16.39	4.04
4	16.34	4.81
5	16.43	4.97
6	16.31	4.77
Desviación estándar	0.05958	0.37238
Media	16.3450	4.595

Tabla 28. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión del material reforzado curado mediante curado tradicional.

En la tabla 29 se pueden observar valores o resultados bastante buenos en cuanto a esfuerzo y carga a flexión se refiere, es decir que por lo menos están de acuerdo a lo esperado para un laminado con características similares a las del experimento. Se observan promedios de carga máxima de 673N aproximadamente y esfuerzo máximo de 187MPa. Adicional a esto, en la gráfica 24 se puede ver como todas las probetas tienen un comportamiento bastante similar, presentando fallas siempre por encima de los 170MPa, es decir, las 6 probetas fallan por encima de este valor.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga máxima de flexión(N)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)
1	7.21	591.5531	196.11893
2	7.16	745.03217	193.18806
3	6.98	527.97937	189.47264
4	6.98	687.96454	174.70088
5	7.12	758.89514	179.51579
6	6.66	730.78003	189.04587
Desviación estándar	0.19903	93.58495	8.23441
Media	7.02	673.70072	187.00703

Tabla 29. Resultados de la prueba de flexión a tres puntos del material compuesto con curado tradicional.



Gráfica 24. Ensayo de flexión a tres puntos del material compuesto sometido a curado tradicional.

Cabe resaltar que a diferencia del comportamiento que se ha venido evidenciando en la experimentación con radiación ultravioleta, en este caso la consistencia de

los datos es evidente, mostrando valores de desviación estándar bastante pequeños de acuerdo a cada una de las mediciones, como se puede observar en la tabla 29, donde se ve por ejemplo que el rango de valores obtenidos para el esfuerzo máximo de flexión es bastante ajustado, con un valor de desviación estándar de 8.23, en general se ven datos agrupados con muy poca dispersión.

4.7.4. Flexión a tres puntos para el material reforzado curado con radiación UV, variando el porcentaje de fotoiniciador.

Se continúa con el análisis de los resultados obtenidos al someter a flexión la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, pero esta vez, curado a través del método de radiación, de tal manera que sea fácilmente comparable con el punto inmediatamente anterior.

Se analizarán cuidadosamente los resultados obtenidos al someter a un esfuerzo de flexión los laminados compuestos del material mencionado curados con radiación UV y con diferentes porcentajes de fotoiniciador, buscando comparar las diferencias entre cada uno de ellos y a la vez las diferencias generales con los resultados arrojados por las pruebas realizadas a las probetas de curado tradicional.

Para comenzar con la comparación respectiva, es imprescindible mencionar la similitud en dimensiones de las muestras o probetas de laminados tanto de curado tradicional como de curado con UV, estando todas alrededor de 16.4 mm de ancho y 4 mm de espesor aproximadamente, como se puede observar en las tablas 28, 30, 32 y 34.

En primera medida se revisan los resultados obtenidos sobre las probetas curadas con radiación UV con un porcentaje de fotoiniciador del 0.2%, donde se observan datos bastante positivos, tal como se muestran en la tabla 30 y que se pueden

evidenciar en la tendencia mostrada por la gráfica 25, teniendo en cuenta lo que se venía observando con los resultados arrojados por los ensayos realizados a las muestras de resina sola, ya que en esta ocasión se logran obtener valores de esfuerzo hasta de 200 MPa con un promedio general de 169 MPa y 448.5 N de carga máxima de flexión, de acuerdo a lo que muestra la tabla 31. Adicional a esto, en la tabla 30 se identifican las dimensiones, datos que serán bastante importantes para futuras comparaciones.

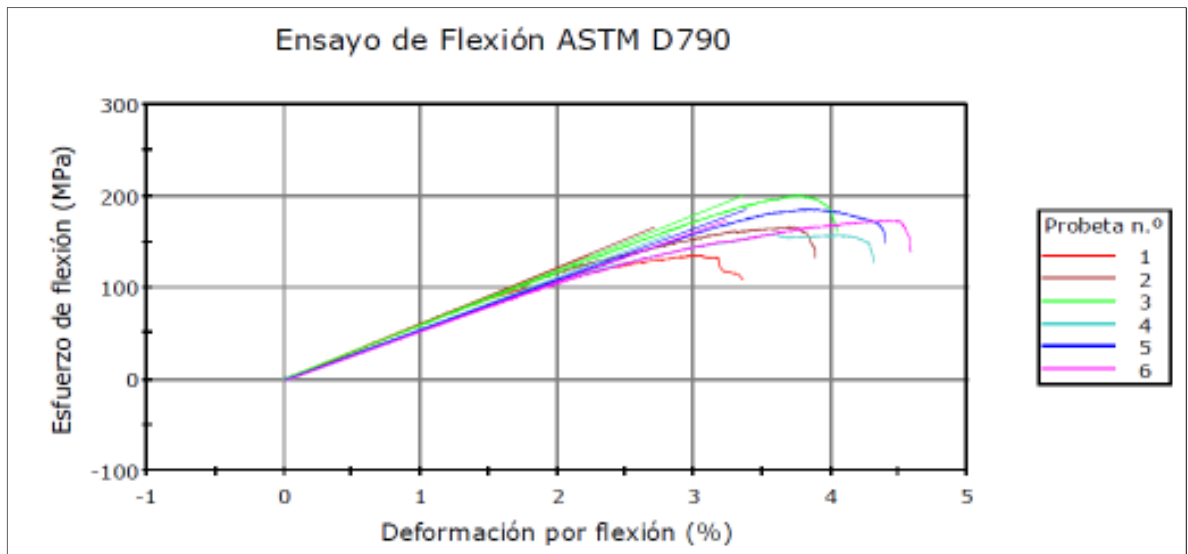
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	16.48	4.05
2	16.50	3.91
3	16.43	4.07
4	16.47	3.75
5	16.51	4.07
6	16.41	3.66
Desviación estándar	0.03933	0.17804
Media	16.46667	3.91833

Tabla 30. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga máxima de flexión(N)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)
1	6.11	380.99942	135.30949
2	6.18	436.05933	165.95081
3	5.97	567.43994	200.15422
4	5.70	382.16696	158.40477
5	5.53	528.05042	185.35774
6	5.42	396.29898	173.07066
Desviación estándar	0.31525	80.38793	22.39791
Media	5.82	448.50251	169.70795

Tabla 31. Resultados de la prueba de flexión a tres puntos del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.2%.

Indudablemente al comparar los resultados presentados en la gráfica 25 que corresponden a los datos arrojados por las probetas de 0.2% de fotoiniciador, con los resultados mostrados en el numeral inmediatamente anterior, en donde se observó el comportamiento a la flexión de los laminados sometidos a curado tradicional, se pueden deducir varias cosas: ambos experimentos muestran resultados cercanos al rango entre 150 y 200 MPa de esfuerzo máximo; contrario a lo que pasaba con las comparaciones de curado de resina sola con UV y de forma tradicional, donde se encontraba una diferencia absolutamente significativa entre ambos. También se puede ver que a pesar de tener valores o rangos bastante similares, tanto en carga máxima como en esfuerzo máximo, el curado con radiación presenta mayor dispersión que el curado tradicional, lo que si viene siendo una constante a lo largo de las comparaciones y que se corrobora en el desarrollo de este capítulo.



Grafica 25. Ensayo de flexión a tres puntos del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.2%.

Esta situación, como ya se ha mencionado puede asociarse básicamente a la mezcla irregular o mala homogenización de la misma a la hora de disolver el fotoiniciador en la resina de poliéster insaturado, ya que este proceso, durante todo el desarrollo del trabajo, se realizó de forma manual y completamente empírica, tanto para los experimentos de resina sola como para los de laminados compuestos con fibra de vidrio, lo que implica que en ambos casos se encontrarán incrustaciones de aire o burbujas en la mezcla, que a la hora del curado del material, presentan interrupciones o discontinuidades en el mismo, generando microfisuras, por donde probablemente fallan las probetas.

Aunque de cualquier manera es evidente que al contar con el refuerzo de la fibra de vidrio, el material compuesto presenta un mejor comportamiento en cuanto a las propiedades mecánicas se refiere, es decir que la fibra absorbe gran parte de la carga aplicada al material y el entrecruzamiento propio de la misma genera mayor resistencia a lo largo de todo el material compuesto, mejorando así la condición de debilidad generada por la mala mezcla de la resina y el fotoiniciador.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	16.47	3.66
2	16.43	3.93
3	16.44	4.00
4	16.41	4.01
5	16.41	4.02
6	16.41	3.56
Desviación estándar	0.02714	0.20126
Media	16.4383	3.86333

Tabla 32. Dimensiones de las probetas para el ensayo de flexión a tres puntos del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.

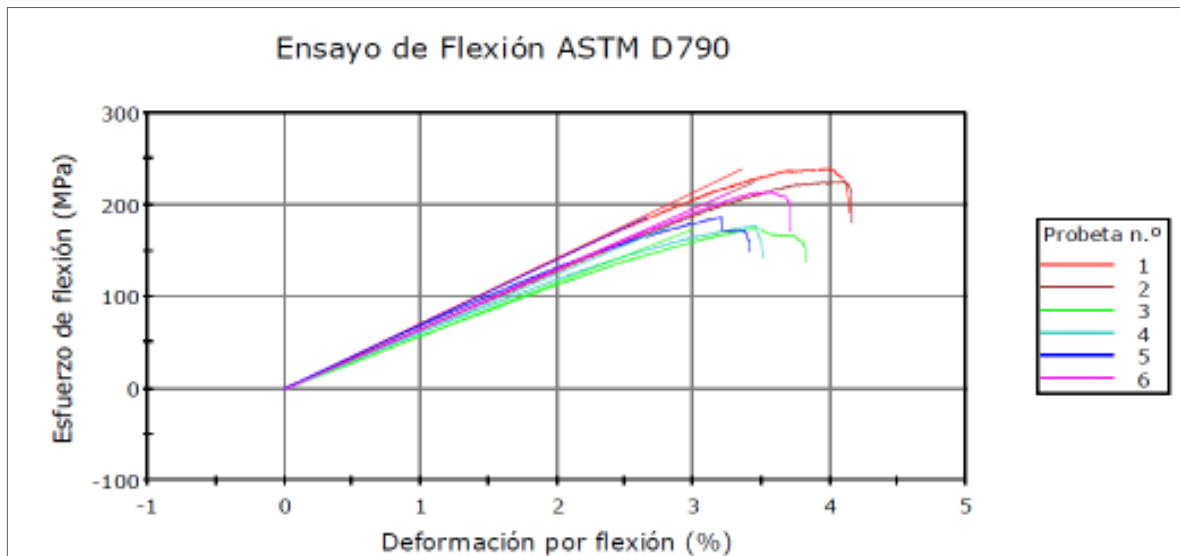
Como se puede observar, al analizar los datos presentados en la tabla 33, se encuentran valores o datos realmente buenos. Se puede ver un promedio de esfuerzo máximo de flexión de 202.25 MPa, e inclusive se ven valores superiores a los 224 MPa, es decir que supera ampliamente los valores arrojados por el experimento anterior (0.2% de fotoiniciador), pero también, y aun mas importante, estos valores se encuentran sobre los resultados mostrados en la tabla 29, es decir la correspondiente al curado tradicional.

La razón para el aumento de la resistencia a la flexión, en este caso, probablemente se deba al efecto de dos factores: Por un lado, entre más alto sea el contenido de fotoiniciador hay un mayor pico exotérmico, y por tanto mayor energía calórica que ayuda al mejor desarrollo del proceso de curado; y por el otro, la presencia de la fibra de vidrio aísla térmicamente el sistema, llevándolo a que esté mas tiempo a mayores temperaturas lo que favorece un mejor y mas uniforme postcurado del laminado y, a la vez, genera mas tiempo para la evacuación de gases, lo que se convierte directamente en un menor nivel de porosidad en dicho laminado.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga máxima de flexión(N)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)
1	7.16	548.64508	238.72997
2	6.54	593.82599	224.6507
3	5.82	475.13593	173.40727
4	6.3	486.04971	176.82945
5	7.05	516.52057	186.30013
6	6.57	462.80203	213.62787
Desviación estándar	0.4923	49.98303	27.18286
Media	6.57	513.82988	202.25756

Tabla 33. Resultados de la prueba flexión a tres puntos del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.3%.

Si bien la gráfica 26 refleja claramente que los resultados de los ensayos de flexión a tres puntos realizados a las probetas curadas con 0.3% siguen mostrando bastante dispersión, los resultados individuales se encuentran todos en niveles bastante aceptables, lo que demuestra que a pesar de conservar los problemas de no homogeneidad en la mezcla, el resultado de curar la resina y la fibra con un contenido de 0.3% de fotoiniciador, es muy positivo, inclusive comparado con el método tradicional y que se ha utilizado durante años. Es decir que a pesar de ser dispersos los resultados, el peor de los valores obtenidos (173.4 MPa) ya es un valor que se podría considerar aceptable para lo que se esperaría del curado de un compuesto de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio.



Grafica 26. Ensayo de flexión a tres puntos del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.3%.

Finalmente, para culminar los análisis correspondientes a las pruebas o ensayos mecánicos realizados a las probetas de laminados de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio y curados a través del método de radiación ultravioleta, con la ayuda de los datos mostrados en la tabla 35 y su respectivo comportamiento visualizado en la gráfica 27, se revisarán los resultados encontrados al desarrollar dichas pruebas a las muestras o probetas que fueron curadas agregando 0.4% de fotoiniciador en la mezcla de resina, es decir, el mayor valor recomendado para este tipo de procesos.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	16.47	3.83
2	16.45	3.52
3	16.44	3.91
4	16.44	3.66
5	16.5	3.97
6	16.48	3.95
Desviación estándar	0.02422	0.18007
Media	16.4633	3.80667

Tabla 34. Dimensiones de las probetas del ensayo de flexión del material reforzado curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.

Contrario a lo esperado luego de ver los resultados mostrados por la tabla 33 y reflejados en la gráfica 26, al revisar los datos de las pruebas con 0.4%, se observa que los resultados tanto de carga como de esfuerzo máximos de flexión, son menos satisfactorios que los arrojados por las pruebas realizadas a las probetas de 0.3%, sin significar esto que sean malos.

Probeta	Módulo Young (GPa)	Carga máxima de flexión(N)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)
1	6.35	521.30676	207.14452
2	6.72	426.91333	201.07576
3	6.67	417.58987	159.50189
4	6.59	408.44931	178.05141
5	6.49	553.05426	204.16159
6	6.03	519.31458	193.88774
Desviación estándar	0.25528	63.61747	18.45394
Media	6.47	474.43802	190.63715

Tabla 35. Resultados de la prueba flexión a tres puntos del material compuesto curado mediante radiación UV y un % de fotoiniciador de 0.4%.

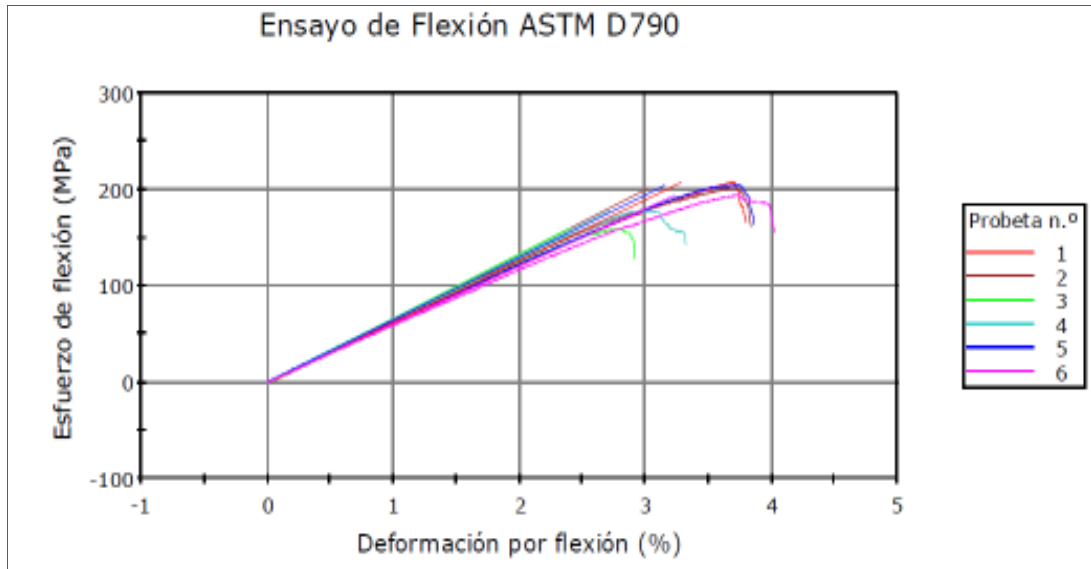
Ambos valores promedios son menores que el ensayo anterior, sin embargo, todos los valores, como ya se ha mencionado, son buenos o aceptables para el curado de este tipo de material y van acorde con el proceso que se ha analizado durante este capítulo, en el cual se ha visto que la cantidad de fotoiniciador favorece de manera significativa el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los laminados.

Es probable que la reducción en valores obtenidos de carga y esfuerzo para este experimento en particular (0.4%) se deba a que para la cantidad de resina aplicada, dicho valor de fotoiniciador ya está en el límite permisible para favorecer de manera apropiada la generación de radicales libres y propiciar así la reacción con las moléculas de estireno, es decir que es posible que la mezcla esté saturada de fotoiniciador y por esta razón la reacción no sea la mas apropiada, quedando así en el producto final, algunas partículas de fotoiniciador que no alcanzan a reaccionar en el tiempo estipulado para el curado.

Esto se puede asociar a todos los experimentos realizados con dicho valor de fotoiniciador; por ejemplo en el capítulo 4.3 se observó como a medida que transcurría el tiempo, los valores de dureza para 0.4% y 0.3% se asemejaban cada vez mas, lo que efectivamente ratificaría lo que se ha mencionado del exceso de fotoiniciador en la mezcla y va de la mano con las recomendaciones del fabricante cuyo rango presenta como valor máximo 0.4% y da a entender que ninguno de los límites (0.1% y 0.4%) ofrece resultados excelentes o mejores que los demás valores del rango.

En la gráfica 27 se evidencia también la dispersión que se ha mencionado y que ha estado presente a lo largo de todos los experimentos realizados a las probetas curadas con rayos ultravioleta, lo que ratifica aún más la teoría de las incrustaciones de aire y el procedimiento manual e inadecuado para la dilución del fotoiniciador en la resina. Sin embargo, al igual que la gráfica 26, también se ve una tendencia similar e inclusive mejor que la mostrada en la gráfica

correspondiente al curado tradicional (gráfica 24), de hecho se puede observar que la deformación por flexión en general es mayor, estando en un rango de 3 a 4%, más cercano al límite superior, mientras que en el curado tradicional, estos valores del rango son más cercanos al límite inferior.



Grafica 27. Ensayo de flexión a tres puntos del material compuesto curado con radiación UV y un % de fotoiniciador del 0.4%.

CONCLUSIONES

Para la resina de poliéster insaturado y el material compuesto por resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio, el curado a través del método de radiación ultravioleta es notablemente más rápido que el curado tradicional, es decir el curado a temperatura ambiente con catalizadores. Mientras que este último proceso puede tardar inclusive más de 24 horas, el curado con rayos UV se da en menos de 30 minutos, inclusive, las piezas curadas a través de este método llegan al punto de gel y pasan a estado completamente sólido en cuestión de segundos.

El fotoiniciador es un factor fundamental y altamente impactante en el proceso de curado con radiación, la variación del porcentaje del mismo afecta el resultado final de manera significativa, hasta tal punto que siguiendo las recomendaciones del fabricante, se encuentra que con 0.1% de fotoiniciador el material o la resina no curan y con 0.2 ya se obtienen resultados de dureza hasta de 50 Barcol.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y lo visto a lo largo del desarrollo del presente documento, es importante mencionar que el valor o porcentaje de fotoiniciador más adecuado para llevar a cabo el proceso de curado de la resina de poliéster insaturado o del material compuesto de resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio es de 0.3%, ya que a pesar de ser un valor intermedio, presenta resultados en cuanto a dureza y propiedades mecánicas muy similares al valor máximo recomendado, y a la vez muestra una diferencia importante respecto a valores o porcentajes menores. Sin embargo, de acuerdo a la necesidad y/o aplicación objetivo del material o pieza, se podría pensar en utilizar mayor o menor cantidad, teniendo siempre presente que el valor monetario de este elemento (fotoiniciador) es bastante alto y por consiguiente, su consecución en el mercado es igualmente difícil.

El comportamiento de la temperatura, es decir la reacción exotérmica de todos los elementos curados con radiación ultravioleta muestra un comportamiento similar al mostrado por la literatura para este tipo de resina, lo que da un indicio claro de que

el curado con radiación UV ejerce el mismo efecto térmico que el generado por el curado tradicional y que, por lo tanto, la reacción de polimerización, en teoría cumple la misma función.

A pesar de la evidente dificultad para realizar o llevar a cabo la llamada prueba de estireno residual, debido a la imposibilidad de acceder a los equipos necesarios para hacerlo en el país, la literatura y las investigaciones realizadas a través del tiempo en este tema, demuestran y aseguran que el proceso de curado a través de la radiación ultravioleta reduce en un alto porcentaje o prácticamente elimina las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, lo que se traduce en una ventaja mas de este proceso.

Las pruebas mecánicas realizadas a las probetas de resina de poliéster insaturado curadas con rayos UV, arrojaron resultados negativos respecto a la expectativa generada por las pruebas de dureza que evidenciaban un buen curado de la muestra en muy poco tiempo; sin embargo, los bajos valores de esfuerzo y carga máxima de flexión para dichos experimentos, son debidos principalmente a la presencia de burbujas o incrustaciones de aire en las piezas curadas y que se generan básicamente al momento de realizar la mezcla o la dilución del fotoiniciador en la resina, previo al curado, ya que este proceso se hace completamente manual y no hay aún un procedimiento establecido que se enfoque en reducir estas burbujas generadas por la agitación de la mezcla. Cabe anotar que se consideran resultados negativos comparados con probetas curadas mediante el método tradicional en el que el proceso de eliminación de gases es mas eficaz y, por ende, el nivel de porosidad es menor.

Las pruebas de dureza realizadas a las probetas de resina de poliéster insaturado con fibra de vidrio, mostraron que para este caso, la variación del porcentaje de fibra en la mezcla o material compuesto, no afecta de manera significativa la dureza o curado del mismo, siempre y cuando se mantenga constante la cantidad

de fotoiniciador, el cual realmente afecta este valor, tal y como se mencionó anteriormente.

Las probetas de laminados compuestos por resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio curadas con radiación ultravioleta y sometidas a la prueba de flexión a tres puntos mostraron resultados bastante positivos de acuerdo a la comparación con el método tradicional, contrario a lo que se esperaría, luego de entender e interpretar los resultados de la misma naturaleza para las probetas de resina sola. Esto es debido a dos razones principales relacionadas con el material compuesto: En primer lugar, la fibra de vidrio tipo MAT ayuda a mantener la distribución de la carga a lo largo de la muestra y de esta manera, el efecto generado por las burbujas o incrustaciones de aire en la mezcla de resina y fotoiniciador, no afectará de manera tan significativa. Y en segundo lugar, la presencia de la fibra de vidrio aísla térmicamente el sistema, prolongando significativamente el tiempo de postcurado a una temperatura mayor, lo que a la vez genera un lapso de tiempo mayor para evacuación de gases atrapados generados por efecto de la reacción.

En general durante el desarrollo de este trabajo se encontró que efectivamente el curado con radiación UV es totalmente viable. A través de éste se pueden llegar a obtener resultados muy satisfactorios y que cumplan con los mismos requisitos que los proporcionados por los métodos tradicionales que actualmente se utilizan, además es evidentemente más práctico y se puede llevar a cabo en el 4% del tiempo que tarda en la actualidad realizar el mismo proceso, todo esto enfocado especialmente en el material compuesto debido a los resultados que se han observado, ya que para la resina sola es necesario ampliar y continuar la investigación, especialmente en la optimización de un procedimiento eficaz para la eliminación de gases que afectan sustancialmente la resistencia mecánica del material compuesto.

De acuerdo a lo revisado y analizado a lo largo del documento, se puede decir que las condiciones mas adecuadas para obtener el curado con radiación mas eficiente de un laminado de resina de poliéster insaturado y fibra de vidrio, se obtienen con un porcentaje de fotoiniciador de 0.3% y 25% de fibra de vidrio, manteniendo fijas las variables del equipo; tiempo de exposición en 15 pasadas y potencia en el 50%.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta todo lo expuesto en el presente documento, es importante tener en cuenta que en caso de continuar con investigaciones alrededor del tema, se debe buscar un mecanismo de dilución o mezclado de resina y fotoiniciador que permita hacerlo de una forma mas automatizada, de tal manera que la agitación de dicha mezcla sea suave y a velocidad constante para que se evite en la mayor medida posible la generación de burbujas o incrustaciones de aire en la mezcla.

La implementación o adición de otro tipo de cargas a la resina de poliéster insaturado puede ayudar a disminuir errores de dimensionamiento de las piezas, pandeo de las láminas y otra serie de defectos, por lo cual se podría pensar en evaluar el proceso de curado con radiación para piezas que contengan este tipo de cargas, ya que mejoraría el producto final obtenido y se seguirían aprovechando los beneficios del curado UV.

A raíz de las dificultades encontradas para realizar el curado UV a la resina sola, es importante tener en cuenta para futuros experimentos que se debe contar con un molde adecuado y con la precisión requerida para que el proceso de experimentación como tal fluya lo mas eficientemente posible; de igual manera si se pensase en trasladar esto al área industrial, se debe tener en cuenta para la

manipulación de la resina en grandes cantidades y la búsqueda del equipo apropiado.

De acuerdo a los buenos resultados y teniendo presente que este método podría ser el futuro del curado de resinas o materiales compuestos, sería absolutamente importante o conveniente que tanto las universidades del país en conjunto con la industria de los materiales, se dieran a la tarea de investigar qué otro tipo de elementos podrían ser usados como material alternativo al fotoiniciador para la iniciación de la reacción en el curado con radiación, esto basados en la dificultad de consecución del fotoiniciador en el país y teniendo en cuenta, la importancia del mismo para la efectividad del proceso.

La continuación de este trabajo o de experimentos relacionados con el mismo, debería ser enfocada en el desarrollo de los materiales compuestos, ya que se ha demostrado que la eficiencia de curado de los mismo se aumenta notablemente y que además no se pierden o inclusive aumentan sus propiedades mecánicas, por lo cual este debería ser el centro de atención para continuar explorando el tema.

BIBLIOGRAFÍA

- Andercol S.A. (2011). Ficha Técnica Cristalan. En A. S.A, *Resina poliéster ortoftálica pre-acelerada, de alta transparencia, con protector UV*. (pág. 1). Medellín.
- Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México D.F: Thomson.
- Blair, I. (1996). The fundamental chemistry of ultra-violet curing technology. *Paintindia*, 25-28.
- Bronk, J. M. (2013). Screening Techniques for UV Photoinitiator Systems in Curing Thermoset Resins. *Composites. The premier Exhibition and Convention*. Orlando.
- Cai, Y., & Jessop, J. L. (2004). Encyclopedia Of Polymer Science and Technology. En Y. Cai, & J. L. Jessop, *Encyclopedia Of Polymer Science and Technology* (págs. 807-836).
- Ciba Specialty Chemicals. (2001). Photoinitiator. En C. S. Chemicals, *Ciba® IRGACURE® 819* (págs. 1-3). Ciba Specialty Chemicals.
- Ciba Specialty Chemicals. (2003). Composites in a New Light. *UV Curing Technology for Composites and Gel Coats*. Suiza.
- Clean Air Technology Center. (Julio de 2004). *EPA*. Recuperado el 9 de Octubre de 2012, de EPA: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/fuv-eps.pdf>
- Clean Air Technology Center. (Julio de 2004). *EPA*. Recuperado el 9 de Octubre de 2012, de EPA: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/fuv-eps.pdf>
- CYTEC ENGINEERED MATERIALS. (15 de Febrero de 2013). *jeccomposites*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013, de jeccomposites: <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/cure-power-light>
- Gil, A. (30 de Marzo de 2012). *Google*. Recuperado el 13 de Agosto de 2013, de Google: https://www.google.com.co/?gws_rd=cr&ei=7buLUtDBC8mosQT_I4FI#q=guia+de+manejo+resinas+de+poliester

- González, M. (Julio de 2003). *Scribd*. Recuperado el 16 de Octubre de 2013, de Scribd: <http://es.scribd.com/doc/113348855/17/FUNCIONES-DEL-CATALIZADOR-Y-DEL-ACELERANTE>
- Gutierrez, E. (2004). Catalizadores y aceleradores. En E. Gutierrez, *Desarrollo del poliéster insaturado. Un inventario de aplicaciones* (págs. 32-33). Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Gutierrez, E. (2004). Desarrollo del poliéster insaturado. Un inventario de aplicaciones. *Desarrollo del poliéster insaturado. Un inventario de aplicaciones*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Gutierrez, E. (2004). Desarrollo del poliéster insaturado. Un inventario de aplicaciones. *Catalizadores y aceleradores*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Gutierrez, E. (2004). Desarrollo del poliéster insaturado. Un inventario de aplicaciones. *Materias primas*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Heraeus Noblelight Fusión UV Learning Center. (2013). *Heraeus*. Recuperado el Mayo de 2013, de Heraeus: http://www.fusionuv.com/uvlearning_center.aspx
- Herrera, A. (01 de Junio de 2009). *SlidesShare*. Recuperado el Marzo de 2013, de SlidesShare: <http://www.slideshare.net/annaherrera/proceso-de-elaboracion-de-resinas-de-poliester>
- Jurkin, T., & Pucic, I. (2006). Post-irradiation crosslinking of partially cured. *Radiation Physics and Chemistry* 75, 1060-1061.
- Londoño Martínez, A., & Montoya Ramírez, R. (2005). Evaluación de la contracción en materiales compuestos a partir de poliéster insaturado. *Evaluación de la contracción en materiales compuestos a partir de poliéster insaturado*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Lopez Oliveros, C., & Mejia Ordoñez, D. (2004). *Obtención, evaluación y aplicación de resinas de poliéster magnéticas*. Bucaramanga: Universidad industrial de santander.
- Miravete, A. (2007). *Materiales Compuestos*. Barcelona: REVERTÉ.

- Orrego, N., & Vélez, R. (1987). El poliéster insaturado reforzado con fibra de vidrio y no reforzado. En N. Orrego, & R. Vélez, *El poliéster insaturado reforzado con fibra de vidrio y no reforzado* (pág. 52). Medellín: Andercol S.A.
- Parrilla, F. (1993). *Resinas poliéster, plásticos reforzados*. México D.F: LA ILUSTRACION.
- Plastiquimicas. (2010). *Catalizadores y Acelerantes*. Recuperado el 11 de Agosto de 2012, de Catalizadores y Acelerantes: http://www.plastiquimica.cl/pdf/Resinas_Poliester_y_Vinilester.pdf
- Pucic, I., & Ranogajec, F. (2003). Phase separation during radiation crosslinking of unsaturated. *Radiation Physics and Chemistry* 67, 415.
- Ramis Juan, X. (13 de Enero de 1994). *Tesis doctorales en red*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2012, de Tesis doctorales en red: <http://hdl.handle.net/10803/6686>
- singh, A. (2001). Radiaton processing of carbon fibre-reinforced advanced composites. *Nuclear Instruments and Methods in Physis Research*, 51-52.
- SINGH, A., SAUNDERS, C. B., BARNARD, J. W., & LOPATA, V. J. (1996). ELECTRON PROCESSING OF FIBRE-REINFORCED. *Radiat. Phys. Chem. Vol. 48*, 153.
- Tecnopol. (2008). *Tecnología en poliéster. Estudios y proyectos en PRFV*. Recuperado el 22 de Agosto de 2012, de Tecnología en poliéster. Estudios y proyectos en PRFV: <http://www.tecnopol.com/pdf/materias%20primas.pdf>
- Weber Viladoms, J. J. (19 de Mayo de 2003). *Colección de tesis digitales Universidad de las Américas Puebla*. Recuperado el 21 de Febrero de 2012, de Colección de tesis digitales Universidad de las Américas Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/