

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE EL
MÉTODO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

JUAN ESTEBAN TORRES ENK

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2006

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MEDIANTE EL
MÉTODO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

JUAN ESTEBAN TORRES ENK

Propuesta de Anteproyecto

Asesor

ANDRES FRANCO

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2006

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que ofrecieron sus conocimientos, tiempo, apoyo y experiencia para mi proyecto

El Ingeniero Andrés Franco, mi asesor de Proyecto de Grado, quien mostró gran interés en el desarrollo del proyecto y brindó apoyo incondicional, facilitándome la ejecución del proyecto.

El personal de Safety Composites, quienes me prestaron su ayuda en la elaboración de las probetas y me brindaron desinteresada y pacientemente capacitación en todo lo referente a los materiales compuestos y el diseño de experimentos, además de su disposición en todo momento.

Al personal del centro de laboratorios de la Universidad EAFIT, en especial el Laboratorio de Materiales, por su diligencia en la totalidad de los ensayos y pruebas realizadas.

A mi familia, por su apoyo y palabras de aliento en todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| TABLA DE CONTENIDO | 4 |
| LISTA DE ILUSTRACIONES | 7 |
| LISTA DE TABLAS | 8 |
| 1. PRESENTACIÓN | 5 |
| 2. REVISION A LOS MODELOS EXISTENTES | 6 |
| 2.1 LÁMINAS CON FIBRAS UNIDIRECCIONALES | 9 |
| 2.1.1 Regla de las mezclas. | 9 |
| 2.1.2 Ecuaciones de Tsai. | 11 |
| 2.1.3 Ecuaciones de Halpin – Tsai. | 13 |
| 2.1.4 Modelo de Hashin. | 15 |
| 2.1.5 Ecuación de Antonio Carvalho. | 15 |
| 2.1.6 Ecuaciones de Miravete. | 16 |
| 3. REVISION A LAS NORMAS PARA PRUEBAS EN MATERIALES COMPUESTOS | 18 |
| 3.1 ENSAYO PARA HALLAR EL VALOR DE V_F | 18 |
| 3.1.1 Espécimen de prueba. | 19 |
| 3.1.2 Acondicionamiento. | 19 |
| 3.1.3 Cálculos. | 19 |
| 3.2 PRUEBA DE TENSIÓN | 21 |
| 3.2.1 Interferencias. | 21 |
| 3.2.2 Aparato. | 22 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.3 | Muestreo y especímenes. | 28 |
| 3.2.4 | Procedimiento. | 31 |
| 3.2.5 | Cálculos | 34 |
| 3.2.6 | Reporte. | 36 |
| 4. | METODOLOGIA | 37 |
| 4.1 | DETERMINACION DE PROPIEDADES NECESARIAS | 38 |
| 4.2 | PLAN DE PRUEBAS | 40 |
| 4.3 | METODO DE FABRICACION DE LAS PROBETAS | 42 |
| 4.4 | PREPARACION DEL MOLDE | 43 |
| 4.5 | RECURSOS PARA EL PROYECTO | 46 |
| 4.5.1 | Insumos. | 46 |
| 4.5.2 | Pruebas y ensayos. | 46 |
| 5. | RESULTADOS | 47 |
| 5.1 | RESULTADOS ANALÍTICOS | 47 |
| 5.2 | RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN | 49 |
| 5.3 | DIFICULTADES EN LA OBTENCION DE RESULTADOS | 50 |
| 5.3.1 | Inyección de resina. | 50 |
| 5.3.2 | Ensayos mecánicos. | 51 |
| 6. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 53 |
| 6.1 | ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS A TRACCIÓN | 53 |
| 6.1.1 | Análisis para Módulo de Elasticidad E_1 . | 53 |
| 6.1.2 | Análisis para Módulo de Elasticidad E_2 . | 59 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2 | OPTIMIZACIÓN DE RESULTADOS | 64 |
| 6.2.1 | Optimización de E_1 . | 64 |
| 6.2.2 | Optimización de E_2 . | 65 |
| 6.2.3 | Optimización de E_1 y E_2 en conjunto. | 66 |
| 7. | FUTUROS PROYECTOS | 68 |
| 8. | CONCLUSIONES | 69 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA | 70 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Definición De Ejes Para Una Lámina | 9 |
| Figura 2. Valores Extremos De Contigüidad De Fibras | 11 |
| Figura 3. Ubicación De Galgas Para El Chequeo De Alineación | 24 |
| Figura 4. Códigos De Fallas En La Prueba A Tensión | 32 |
| Figura 5. Molde Con Su Escalonamiento | 44 |
| Figura 6. Refuerzo En Acero Para El Molde | 45 |
| Figura 7. Resultado Teórico De E_1 Según Diferentes Modelos | 47 |
| Figura 8. Resultado Teórico De E_2 Según Diferentes Modelos | 48 |
| Figura 9. Zona En Donde Se Dificulta El Flujo De Resina | 50 |
| Figura 10. Esquema De Funcionamiento Del Extensómetro Biaxial | 51 |
| Figura 11. Máquina Universal, Laboratorio De Materiales Universidad Eafit | 52 |
| Figura 12. Cubo De Respuestas Para E_1 | 53 |
| Figura 13. Ecuación Final Para Módulo De Elasticidad E_1 | 54 |
| Figura 14. Grado De Significancia De Cada Variable Y Cada Interacción Sobre E_1 | 55 |
| Figura 15. Superficie De Respuesta Para E_1 Con Variable Presión Constante En 30psi | 56 |
| Figura 16. Superficie De Respuesta Para E_1 Con Variable Presión Constante En 35psi | 57 |
| Figura 17. Superficie De Respuesta Para E_1 Con Variable Presión Constante En 40psi | 58 |
| Figura 18. Cubo De Respuestas Para E_2 | 59 |
| Figura 19. Grado De Significancia De Cada Variable Y Cada Interacción Sobre E_2 | 60 |
| Figura 20. Ecuación Final Para Módulo De Elasticidad E_2 | 60 |
| Figura 21. Superficie De Respuesta Para E_2 Con Variable Porcentaje De Catalizador En 1.0% | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Superficie De Respuesta Para E_2 Con Variable Porcentaje De Catalizador En 2.0% | 62 |
| Figura 23. Superficie De Respuesta Para E_2 Con Variable Porcentaje De Catalizador En 3.0% | 63 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Principales Propiedades Mecánicas De Los Componentes | 8 |
| Tabla 2. Requisitos Geométricos Del Espécimen Para Prueba A Tensión | 29 |
| Tabla 3. Recomendaciones Geométricas Del Espécimen Para Prueba A Tensión | 30 |
| Tabla 4. Primer Carácter | 33 |
| Tabla 5. Segundo Carácter | 33 |
| Tabla 6. Tercer Carácter | 33 |
| Tabla 7. Ángulo Entre Fibras Y Eje De Carga | 38 |
| Tabla 8. Rangos De Trabajo De Los Factores Y Alias Para La Superficie De Respuesta | 40 |
| Tabla 9. Combinaciones Y Número De Repeticiones Por Punto | 41 |
| Tabla 10. Resultados De Las Pruebas A Tracción | 49 |
| Tabla 11. Configuración De Restricciones Para Optimización De E_1 | 64 |
| Tabla 12. Conjunto De Soluciones Para Optimizar E_1 | 65 |
| Tabla 13. Configuración De Restricciones Para E_2 | 65 |
| Tabla 14. Conjunto De Soluciones Para Optimizar E_2 | 66 |
| Tabla 15. Configuración De Restricciones Y Conjunto De Soluciones Para Optimizar E_1 Y E_2 | 67 |

1. PRESENTACIÓN

Es el fin de este trabajo encontrar la manera de modelar el comportamiento de las propiedades mecánicas del poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en el rango elástico lineal.

Al momento del proceso de construcción del material, factores tales como posición, dirección, cantidad y tipo de fibras, tiempo y temperatura de curado de la resina, volumen relativo de fibras y de resina, etc. tienen un efecto sobre las propiedades finales del material.

Este trabajo se centra en modelar las propiedades del material resultante, más concretamente el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras E_1 , y en la dirección transversal a las fibras E_2 , el módulo de rigidez G_{12} y la relación de Poisson ν_{12} . Los datos se hallaron mediante ensayos normalizados de Tracción bajo la norma ASTM D 3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) y la modelación se hizo a partir del análisis de los resultados usando el método del diseño de experimentos DOE.

El diseño de experimentos es esencial para la determinación de un nuevo modelo a partir de datos obtenidos con características y condiciones previamente diseñadas. Con el uso del DOE, utilizando el modelo encontrado, también se pueden generar superficies de respuesta, con las cuales es posible optimizar el proceso de fabricación de compuestos, logrando mejores propiedades utilizando los mismos recursos.

2. REVISION A LOS MODELOS EXISTENTES

El estudio de los materiales compuestos se divide en dos áreas de comportamiento del material, la micro- y la macro-mecánica (Jones, 1998):

- Micromecánica: es el estudio del comportamiento del material compuesto, en donde la interacción de los materiales constituyentes es examinada en detalle como parte de un material heterogéneo.
- Macromecánica: es el estudio del comportamiento del material compuesto, en donde el material se asume como homogéneo, y los efectos de los materiales constituyentes se promedian para dar como resultado propiedades del material compuesto como un todo.

El estudio micromecánico sirve, como complemento al estudio macromecánico, para determinar matemáticamente las propiedades mecánicas del material compuesto final con base en las propiedades de los materiales constituyentes. Sin embargo, las teorías y modelos deben estar respaldadas por pruebas experimentales, lo cual resultaría como una gran fuerza de diseño, si los resultados teóricos coinciden con los resultados prácticos.

Por otro lado, se debe tener atención con los resultados, ya que los modelos poseen algunas suposiciones, tales como un perfecto enlace entre fibras y matriz, lo cual en caso de no cumplirse, produciría unas propiedades reales por debajo de los resultados teóricos.

A continuación se enumeran las suposiciones básicas utilizadas por los modelos micromecánicos, antes de pasar a analizarlos dichos modelos:

- La lámina es:
 - Inicialmente libre de esfuerzos
 - Linealmente elástica
 - Macroscópicamente homogénea y ortotrópica

- Las fibras son:
 - Homogéneas
 - Linealmente elásticas
 - Isotrópicas
 - Regularmente espaciadas
 - Perfectamente alineadas y enlazadas

- La matriz es:
 - Homogénea
 - Linealmente elástica
 - Isotrópica
 - Libre de espacios vacíos

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los modelos no son los mismos si se trata de láminas en donde las fibras se encuentran distribuidas paralelamente, o si poseen una distribución aleatoria, en donde las propiedades del material compuesto final tienden a ser isotrópicas. Es importante aclarar que en este trabajo se utilizaron fibras de vidrio unidireccionales y resina de poliéster insaturado para los estudios. A continuación en la Tabla 1 se enumeran las principales propiedades mecánicas de los materiales con que se trabajó:

Tabla 1. Principales propiedades mecánicas de los componentes

| PROPIEDAD | FIBRAS (f) | RESINA (m) |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Módulo de elasticidad (E) | 72,5 GPa | 4,6 GPa |
| Relación de Poisson (ν) | 0,22 | 0,38 |
| Resistencia a la tensión | 3,4 MPa | 90 MPa |
| Módulo de rigidez al cortante (G) | 29,7 GPa | 1,7 GPa |
| Densidad (ρ) | 2580 kg/m ³ | 1220 kg/m ³ |

BASF, 2000, 1 / Miravete, 2000, 21 / Vaughan, 1998, 135 / Barbero, 1998, 17

2.1 LÁMINAS CON FIBRAS UNIDIRECCIONALES

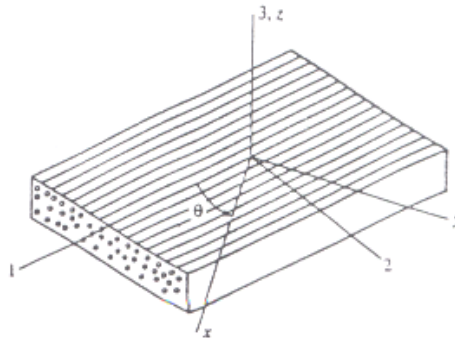
Para el caso de fibras unidireccionales, se adiciona la suposición de que por efecto de tensión, las deformaciones de las fibras son iguales a las deformaciones de la matriz.

Existen diferentes modelos para predecir las constantes elásticas de una lámina a partir de las propiedades de sus constituyentes, basados en el estudio micromecánico, como se exponen a continuación:

2.1.1 Regla de las mezclas.

El modelo más simple es la regla de las mezclas, el cual asume que las fibras y la resina actúan en paralelo a la dirección 1, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Definición de ejes para una lámina



Gibson, 1997, 169

Las cuatro propiedades elásticas del sistema son expresadas según las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m \quad (1)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{1}{V_f/E_f + V_m/E_m} \quad (3)$$

$$G_{12} = \frac{1}{V_f/G_f + V_m/G_m} \quad (4)$$

Donde:

- E_m = Módulo de elasticidad de la matriz [Pa]
- E_f = Módulo de elasticidad de las fibras [Pa]
- G_m = Módulo de rigidez al cortante de la matriz [Pa]
- G_f = Módulo de rigidez al cortante de las fibras [Pa]
- ν_m = Relación de Poisson de la matriz [mm/mm]
- ν_f = Relación de Poisson de las fibras [mm/mm]
- V_m = Fracción volumétrica de la matriz [m^3/m^3]
- V_f = Fracción volumétrica de las fibras [m^3/m^3]

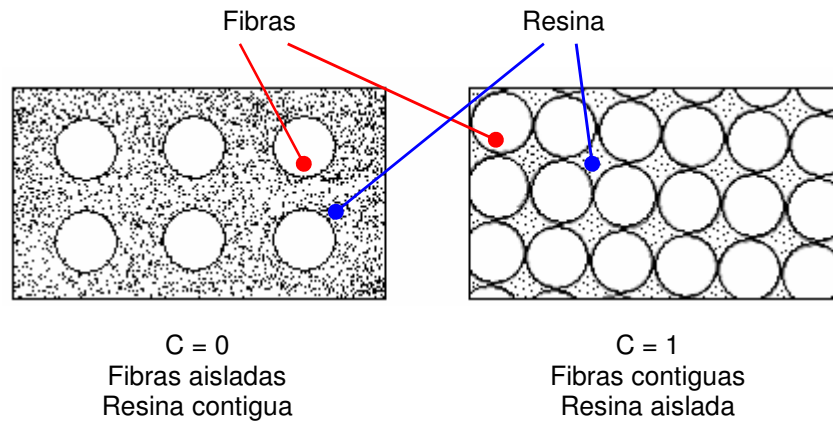
Este modelo es una buena aproximación a los valores de E_1 y G_{12} , de acuerdo con los valores obtenidos experimentalmente reportados en (Seo, 1997) y (Jones, 1998).

La desventaja de utilizar el modelo de la regla de las mezclas es que su sencillez podría sacrificar un poco la precisión, pues no tiene en cuenta algunos factores que igualmente pueden afectar las propiedades mecánicas del compuesto, tales como parámetros de fabricación del compuesto. Sin embargo es de gran aceptación general.

2.1.2 Ecuaciones de Tsai.

Tsai (Tsai, 1964) introdujo un nuevo concepto, el cual cuantifica el nivel de contigüidad entre las fibras, es decir, un valor C, el cual se hace $C = 0$ para el caso en que las fibras están totalmente aisladas, y va aumentando a medida que las fibras se estrechan hasta llegar al valor de $C = 1$, en donde las fibras están totalmente contiguas, según se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Valores extremos de contigüidad de fibras



Jones, 1998, 148

Con base en el uso de la contigüidad de fibras, Tsai obtiene la siguiente ecuación para determinar el módulo de elasticidad transversal a las fibras:

$$E_2 = 2[1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m)V_m] \left[(1 - C) \frac{K_f(2K_m + G_m) - G_m(K_f - K_m)V_m}{(2K_m + G_m) + 2(K_f - K_m)V_m} + C \frac{K_f(2K_m + G_f) + G_f(K_m - K_f)V_m}{(2K_m + G_f) - 2(K_m - K_f)V_m} \right] \quad (5)$$

En donde:

$$K_f = \frac{E_f}{2(1-\nu_f)}; \quad G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}; \quad K_m = \frac{E_m}{2(1-\nu_m)}; \quad G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}; \quad (6)$$

Desde un punto de vista práctico, el valor de C puede ser determinado por medio de la comparación entre curvas de E_2 vs. V_f (utilizando diferentes valores de C), y resultados experimentales. Es también de esperarse que el valor de C sea bajo, puesto que en la mayoría de casos es más probable que las fibras estén aisladas por la resina. Sin embargo, para altos valores de fracción volumétrica de las fibras V_f , es muy probable que el valor de C se acerque a la unidad.

Tsai obtiene también ecuaciones para determinar el valor de la relación de Poisson ν_{12} y el módulo de rigidez G_{12} , en donde C tiene el mismo valor que en la ecuación (5) y aplican los mismos valores obtenidos en las ecuaciones (6), de la siguiente manera:

$$\nu_{12} = (1-C) \frac{K_f \nu_f (2K_m + G_m) V_f + K_m \nu_m (2K_f + G_m) V_m}{K_f (2K_m + G_m) - G_m (K_f - K_m) V_m} + C \frac{K_m \nu_m (2K_f + G_f) V_m + K_f \nu_f (2K_m + G_m) V_f}{K_f (2K_m + G_m) + G_f (K_m - K_f) V_m} \quad (7)$$

$$G_{12} = (1-C) \frac{2G_f - (G_f - G_m) V_m}{2G_m + (G_f - G_m) V_m} + C G_f \frac{(G_f + G_m) - (G_f - G_m) V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) V_m} \quad (8)$$

Tsai modificó también la regla de las mezclas para el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras E_1 , de manera que el modelo tome en cuenta las imperfecciones en la alineación de las fibras:

$$E_1 = k(V_f E_f + V_m E_m) \quad (9)$$

El factor de desalineación k varía de 0.9 a 1, de manera que la ecuación (9) no representa un gran cambio con respecto a la regla de las mezclas original. El valor de k es determinado experimentalmente y es altamente dependiente al proceso de manufactura (Jones, 1998, 149).

2.1.3 Ecuaciones de Halpin – Tsai.

Halpin y Tsai (Halpin & Tsai, 1969) han desarrollado ecuaciones para aproximar los resultados a un análisis micromecánico más exacto. Ellos buscaban desarrollar ecuaciones más simples que las anteriores, lo cual lograron a partir de interpolaciones basadas en resultados reales. Los resultados son muy exactos mientras la fracción volumétrica de las fibras V_f no se acerque mucho a la unidad (Jones, 1998, 151).

Para el módulo transversal, la magnitud puede calcularse por medio de las ecuaciones (10) y (11).

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi} \quad (11)$$

Donde:

ξ = Parámetro empírico obtenido por ajuste de curvas [adimensional].

El valor de ξ es una medida del refuerzo de fibra del material compuesto que depende de la geometría, geometría de empaquetamiento y condiciones de carga. Un valor de $\xi = 2$ usualmente da buenos resultados en el caso de fibras circulares

o cuadradas. En el caso de fibras rectangulares, se calcula $\xi = 2a/b$, donde a/b es la relación de aspecto de la sección transversal (Jones, 1998, 152) (Barbero, 1998, 72).

Las ecuaciones de Halpin – Tsai, también se aplican para el cálculo del módulo de rigidez al cortante G_{12} , según las ecuaciones (12) y (13).

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1 + \xi\eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{(G_f/G_m) - 1}{(G_f/G_m) + \xi} \quad (13)$$

Para este caso, se asigna un valor de $\xi = 1$ si se está trabajando con fibras de sección transversal circular o cuadrada. De igual manera, si la sección transversal de las fibras es rectangular, se aplica la ecuación $\log \xi = 1.73 \cdot \log (a/b)$ para obtener valores con alta precisión.

Sin embargo Hewitt y de Malherbe (Hewitt & de Malherbe, 1970) plantean que los resultados de Halpin – Tsai producen un valor subestimado del módulo de rigidez G_{12} a medida que la fracción volumétrica V_f aumenta a partir de 0.5, si se utiliza el valor de $\xi = 1$ para fibras circulares.

Por ello, proponen que el valor de ξ se aumente a medida que aumente el valor de V_f . Una muy buena aproximación, con la cual obtuvieron buenos resultados, sería $\xi = 1 + 40 \cdot V_f^{10}$. Existen también otras formas de calcular el valor de ξ , obteniendo resultados aún más exactos, sin embargo utilizar ecuaciones muy complejas va en contra del objetivo de las ecuaciones de Halpin – Tsai, el cual es encontrar un modelo simple con resultados precisos.

2.1.4 Modelo de Hashin.

Usando la solución al modelo propuesto por Hashin (Hashin, 1969), el valor de G_{12} puede calcularse por medio de la expresión (14).

$$G_{12} = G_m \left[\frac{(1+V_f) + (1-V_f)G_m/G_f}{(1-V_f) + (1+V_f)G_m/G_f} \right] \quad (14)$$

Otros modelos para la obtención “a priori” de las constantes elásticas están basados en la forma y construcción del elemento de refuerzo, es decir, las propiedades dependen de la morfología del refuerzo.

2.1.5 Ecuación de Antonio Carvalho.

Antonio Carvalho (Carvalho, 1992) se centra en la predicción de las propiedades de láminas de resina reforzada con fibra de vidrio, de acuerdo con el ángulo de orientación de las fibras. Para tejidos equilibrados (igual cantidad de fibra tanto en la trama como en la urdimbre) la ecuación es (15).

$$E_\theta = \frac{1}{2}(\cos^2 \theta)V_v E_v + \frac{1}{2}(\text{sen}^2 \theta)V_v E_v + (1-V_v)E_f \quad (15)$$

También establecen otros criterios de cálculo para el módulo elástico dependientes directamente del método de fabricación. Sugiere una relación de Poisson ν de 0.25 para cualquier laminado de fibra de vidrio y no hace mención respecto al módulo de rigidez al cortante.

2.1.6 Ecuaciones de Miravete.

Un conjunto de ecuaciones para estimar las características mecánicas de la rigidez de un determinado material compuesto, son citadas en (Miravete, 2000, 196) las cuales se muestran a continuación.

Para láminas unidireccionales se considera un material ortotrópico. El módulo de elasticidad en la dirección 1, E_1 , y la relación de Poisson en el plano 1-2, ν_{12} , se calculan según la regla de las mezclas (ecuaciones (1) y (2)). Las demás propiedades se obtienen según las ecuaciones (16) y (17) (Miravete, 2000, 196).

$$E_2 = \frac{\frac{E_m}{(1-\nu_m^2)(1+0.85V_f^2)}}{(1-V_f)^{1.25} + \frac{\frac{E_m V_f}{E_f}}{1-\nu_m^2}} \quad (16)$$

$$G_{12} = \frac{G_m (1+0.6V_f^{0.5})}{(1-V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{(1-\nu_m^2)}} \quad (17)$$

Para un tejido equilibrado, se considera que el módulo longitudinal en la dirección 1 coincide con el módulo longitudinal en la dirección 2 (Miravete, 2000, 196):

$$E_1 = E_2 = V_f \left(\frac{1}{2} E_f + \frac{3}{2} E_m \right) + E_m \quad (18)$$

$$G_{12} = \frac{3E_m}{4V_f + 1} \quad (19)$$

$$\nu_{12} = \frac{G_{12}}{E_1} \quad (20)$$

Hasta ahora se han presentado algunos de los más representativos modelos micromecánicos, no obstante no es posible determinar a priori cuál de ellos predice de manera más acertada las propiedades mecánicas del compuesto final.

Lo anterior significa que los modelos anteriores no tienen en cuenta variables del proceso de fabricación del compuesto, las cuales pueden afectar en mayor o menor medida las propiedades finales, aún con las mismas propiedades y cantidades de los componentes del compuesto.

Es por esto que es necesario efectuar pruebas mecánicas, para así obtener resultados reales, los cuales se puedan comparar con los modelos existentes, y de esta manera, determinar cual se ajusta más a la realidad.

3. REVISION A LAS NORMAS PARA PRUEBAS EN MATERIALES COMPUESTOS

A continuación se enumeran algunas normas ASTM, las cuales sirven como guía al momento de llevar a cabo pruebas para determinar propiedades mecánicas. En este caso, éstas son especializadas para materiales compuestos.

3.1 ENSAYO PARA HALLAR EL VALOR DE V_F

Los valores de fracción volumétrica de fibra V_f y de resina V_m no son controlables con precisión por el fabricante. Éste, basado en su experiencia, puede distribuir mayor ó menor cantidad de fibras en el laminado, de manera que V_f aumente o disminuya, pero sin predecir exactamente cual serán los valores de fracción volumétrica.

Es por esto que, una vez fabricado el compuesto, es posible determinar su composición de fibras y de resina. Para este fin, se utiliza en este trabajo el método de la incineración de resinas curadas reforzadas, basado en la norma ASTM D 2584 – 02 (Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins).

Se trata de una prueba sencilla, en la cual se enciende el espécimen de prueba en un crisol, y se deja quemar hasta que sólo quede ceniza y carbón. Luego se reduce a cenizas el residuo carbonoso calentándolo en un horno a 565°C, se enfría en un desecador y se pesa.

A continuación se enumeran algunos aspectos a tener en cuenta:

3.1.1 Espécimen de prueba.

Generalmente se utiliza un mínimo de 3 especímenes para cada muestra, en donde cada espécimen debe pesar aproximadamente 5 g con un tamaño máximo de 2.5 x 2.5 cm. x espesor.

3.1.2 Acondicionamiento.

Los especímenes deben ser acondicionados a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa mínimo 40 horas antes de la prueba, de acuerdo con el Procedimiento A de la Práctica ASTM D 618. En estas mismas condiciones debe ser efectuada la prueba.

3.1.3 Cálculos.

Se calcula la pérdida por ignición del espécimen en porcentaje de peso de la siguiente manera:

$$\text{Pérdida por encendido, peso \%} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad (24)$$

En donde:

W_1 = Peso inicial del espécimen [g]

W_2 = Peso del residuo [g]

Este cálculo se efectúa para las tres muestras para luego hallar su desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n(\bar{X})^2}{n-1}} \quad (25)$$

En donde:

- s = Desviación estándar
- X = Valor de una observación
- n = Número de observaciones
- \bar{X} = Promedio de las observaciones

En este caso, la desviación estándar es útil para el caso en que se lleve a cabo el mismo procedimiento en diferentes laboratorios, de manera que se puedan comparar los resultados obtenidos.

3.2 PRUEBA DE TENSIÓN

Esta prueba determina las propiedades de tensión para un material compuesto. En este trabajo se utiliza la norma ASTM D 3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials). Una tira plana delgada con una sección transversal rectangular constante se monta con ayuda de unas lengüetas en una máquina de prueba, en donde se le aplica una carga de tensión, la cual es grabada a lo largo de la prueba. La resistencia última del material puede ser determinada a partir de la máxima carga soportada antes de la falla. Si el alargamiento del espécimen es también monitoreado por medio de galgas, entonces se puede obtener una curva de esfuerzo-alargamiento del material, de donde se pueden determinar la deformación última, el módulo de elasticidad, y la relación de Poisson.

3.2.1 Interferencias.

Los siguientes son los aspectos que pueden interferir en las pruebas, distorsionando así los resultados.

- Preparación del material y del espécimen: prácticas pobres de fabricación de material, falta de control de alineación de fibras y daños inducidos por mal maquinado del espécimen son causas conocidas para un alto nivel de ruido en los resultados para materiales compuestos.
- Agarre: un alto porcentaje de fallas inducidas por el agarre son un indicador de problemas de agarre del espécimen.
- Alineación del sistema: doblaje excesivo de la probeta causará fallas prematuras así como una medida altamente imprecisa del módulo de

elasticidad. Cualquier esfuerzo debe ser hecho para evitar doblaje, el cual puede ocurrir como resultado de una mala alineación de los agarres o del propio espécimen, si los agarres fueron mal instalados.

3.2.2 Aparato.

Un micrómetro con una interfaz de doble bola de 4-5 mm. de diámetro debe ser usado para medir el espesor del espécimen. La precisión de los instrumentos de medida debe ser suficiente para medir el ancho y la profundidad de la muestra con tolerancia máxima del 1% de la medida.

La máquina de prueba debe tener una cabeza fija y una cabeza móvil. El mecanismo que mueve la cabeza móvil debe impartirle a ésta una velocidad controlada con respecto a la cabeza fija.

El indicador de carga debe ser capaz de medir la carga total sobre el espécimen y estar libre de atraso por inercia. También debe medir la carga con una precisión del 1% del valor medido.

El rango de interés de la carga puede ser bajo para medidas del módulo de elasticidad, y puede ser alto para determinación de la resistencia. Por esto, en caso de haber interés en medir los dos valores en la misma prueba, se deben tener consideraciones especiales de precisión. Incluso en algunos casos, puede ser necesario ejecutar una prueba por separado para cada medida para tener mayor seguridad.

Cada cabeza de la máquina de prueba debe tener un agarre para sostener el espécimen, de manera que la carga aplicada a éste coincida con su propio eje longitudinal. Estos agarres deben aplicar suficiente presión lateral para prevenir deslizamientos. Los agarres deben ser también auto-alineantes rotacionalmente

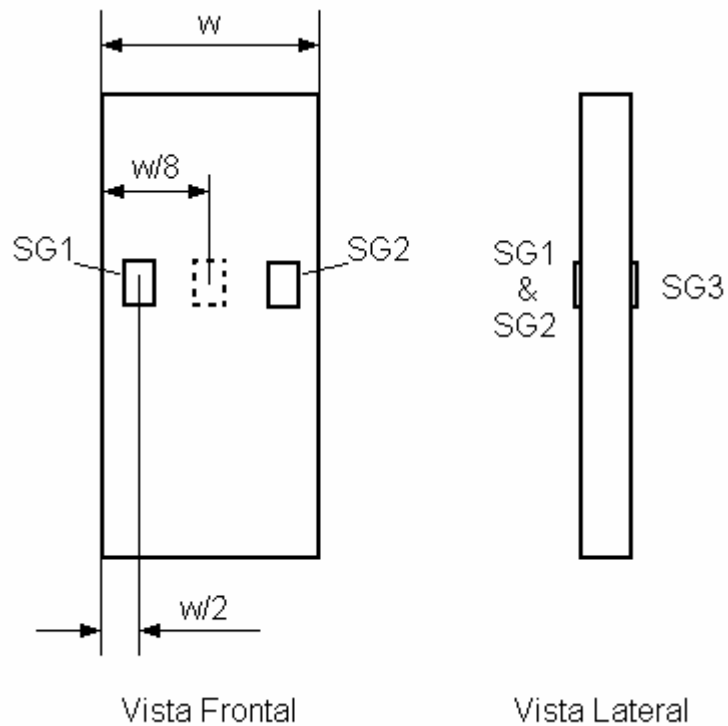
para minimizar esfuerzos de doblaje en el espécimen. Superficies de agarre que son ligeramente dentadas, aproximadamente 1 diente/mm., han sido satisfactorias si son mantenidas limpias y filudas. Dentaduras gruesas pueden producir fallas inducidas por los agarres.

Una baja alineación del sistema puede ser un contribuyente a falla prematura o a ruido en los datos recogidos. Ya que el doblaje en la probeta es un síntoma de mala alineación del sistema, se enuncia a continuación cómo por medio de galgas extensométricas puede ser medido:

- a. Una probeta rectangular de alineación, preferiblemente similar en tamaño y rigidez al espécimen de interés, se instrumenta con un mínimo de 3 galgas extensométricas de manera longitudinal, dos en la cara frontal y una en la cara trasera, como se observa en la figura 3.

Alguna diferencia en la deformación indicada entre las galgas provee una medida de la cantidad de doblaje en el plano de espesor (B_y) y en el plano de profundidad (B_z). La ubicación de las galgas suele ser normalmente en la región del centro de la probeta (si la determinación del módulo es la preocupación), cerca de los agarres (si problemas de fallas prematuras por los agarres es un problema), ó una combinación de ambos.

Figura 3. Ubicación de galgas para el chequeo de alineación



- b. Se recomienda chequear la alineación del sistema utilizando la misma probeta en las cuatro posibles combinaciones de instalación, es decir, inicial (lado superior-frontal hacia el observador), rotada hacia atrás (lado superior-trasero hacia el observador), rotada hacia abajo (lado inferior-trasero hacia el observador), y rotada hacia delante de nuevo (lado inferior-frontal hacia el observador). Estas cuatro posiciones proveen información acerca de si el doblaje es debido al sistema en sí, o si se debe a tolerancias en la alineación.
- c. El punto de deformación nula puede ser tomado antes o después de haber fijado la probeta con los agarres. A partir de esto, se monitorea la respuesta de deformación de la probeta mientras ocurre el proceso de agarre, el proceso de aplicación de carga, o ambos. Por medio de las ecuaciones 34

a 35 se puede determinar el porcentaje de doblaje para cada plano de la probeta, B_y y B_z y el porcentaje de doblaje total B_{total} con respecto a la deformación promedio medida por las tres galgas. Elaborar gráficas de doblaje versus deformación promedio permite determinar tendencias en el comportamiento del sistema.

$$B_y = \frac{\epsilon_{prom} - \epsilon_3}{\epsilon_{prom}} * 100 \quad (34)$$

$$B_z = \frac{4 * (\epsilon_3 - \epsilon_1)}{3 * \epsilon_{prom}} * 100 \quad (35)$$

Donde:

- B_y = Porcentaje de doblaje con respecto al eje Y (el plano estrecho) del sistema [%]
- B_z = Porcentaje de doblaje con respecto al eje Z (el plano ancho) del sistema [%]
- $\epsilon_{1,2,3}$ = Deformación indicada en las galgas mostradas en la Figura 6 [$\mu\text{m.}$]
- ϵ_{prom} = Deformación promedio [mm.] $\epsilon_{prom} = \frac{|\epsilon_1| + |\epsilon_2|}{2} + \frac{|\epsilon_3|}{2}$

El componente total de doblaje es:

$$B_{total} = |B_y| + |B_z| \quad (36)$$

- d. Problemas de fallas durante la fijación mediante los agarres sería razón suficiente para examinar deformaciones de doblaje cerca de los agarres. Preocupación por ruido en datos del módulo es razón para examinar en la región del medio. Muchas fallas en la región cerca de los agarres dan razón para evaluar cerca de los agarres a altos niveles de carga. Una buena práctica de prueba debe limitar el porcentaje de doblaje a 3 - 5% para

niveles moderados de deformación ($>1000 \mu\text{m}$.). Un sistema mostrando un nivel mayor de doblaje debería ser reajustado o modificado.

La información de carga-deformación debe ser determinada por medio de un transductor, galgas extensométricas ó un extensómetro, el cual no debe causar daño a la superficie del espécimen. Si se va a determinar la relación de Poisson, el espécimen debe tener dos instrumentos para medir deformación, uno en dirección axial, y el otro en dirección lateral. Si se va a determinar el módulo de elasticidad, entonces la deformación debe ser medida en ambas caras del espécimen para corregir datos por causa del doblaje en el espécimen. A continuación se enumeran algunas consideraciones que se deben tener para los diferentes tipos de medida de la deformación de la probeta:

a. Galgas extensométricas:

La selección de una galga es dependiente del material. Se recomienda una longitud activa de ésta de 6mm para la mayoría de materiales. Sin embargo, cuando se prueban tejidos de laminados en woven, la longitud mínima de la galga debe ser mayor a la característica repetitiva.

La preparación de la superficie en materiales compuestos de acuerdo a la Práctica E 1237 puede penetrar la resina del material y causar daño a las fibras de refuerzo, lo cual causaría fallas prematuras. Las fibras no deben ser expuestas o dañadas durante el proceso de preparación de la superficie. El fabricante de la galga debe ser consultado en cuanto a guías de preparación y pegantes recomendados para compuestos.

Se debe tener consideración con respecto a galgas con resistencias altas para reducir efectos de recalentamiento en materiales de baja conductividad. Resistencias de 350Ω o más son recomendadas. Adicionalmente se debe considerar el mínimo posible voltaje de excitación

consistentemente con la precisión deseada (1 a 2V es recomendado) para reducir la energía consumida por la galga. Recalentamiento del espécimen por parte de la galga puede afectar el rendimiento de éste directamente, o puede afectar la deformación mostrada como resultado de una diferencia entre el factor de compensación de temperatura de la galga y el coeficiente de expansión termal del material del espécimen.

Se recomienda entonces tener consideraciones de compensaciones por temperatura, aún cuando se está probando a temperatura estándar de laboratorio.

También se deben tener consideraciones con respecto a la sensibilidad transversa de la galga seleccionada. El fabricante de ésta debe ser consultado para recomendaciones al respecto y analizar correcciones y efectos sobre materiales compuestos. Esto es particularmente importante cuando se utilizan una galga montada transversalmente para determinar la relación de Poisson.

b. Extensómetros:

Para la mayoría de propósitos, la galga del extensómetro debe tener una longitud dentro del rango de 10 a 50 mm. Para materiales extremadamente rígidos, o para medidas de deformación transversal, el error fijo puede ser significativo. El extensómetro debe ser libre de retraso por inercia a la velocidad de prueba, y el peso del extensómetro no debe inducir deformaciones de doblaje de más del 5%.

Es generalmente más sencillo llevar a cabo una calibración en extensómetros con una galga más larga, ya que una menor precisión en el desplazamiento es requerida por el instrumento de calibración.

3.2.3 Muestreo y especímenes.

a. Muestreo

Se deben probar por lo menos 5 especímenes por condición de prueba, a menos que resultados válidos se puedan ganar por medio del uso de menos experimentos, como es el caso del uso de Diseño de Experimentos.

b. Geometría

El diseño de probetas de prueba, especialmente aquellas que utilizan lengüetas en los extremos, continua siendo más un arte que una ciencia. Cada laboratorio de pruebas de compuestos ha desarrollado su propio método de agarre para sus pruebas a nivel interno, lo cual dificulta recomendar un método universal. Por esto, diferentes aspectos de la geometría de la probeta se dejan abiertos a criterio y conveniencia del experimentador.

- Requisitos generales

Los requisitos generales de la forma, dimensiones y tolerancias se enumeran en la Tabla 2 a continuación.

Las lengüetas no son obligatorias. La clave en la selección de las tolerancias del espécimen y del método de agarre es la exitosa introducción de carga al espécimen y la prevención de fallas prematuras como resultado de una discontinuidad significativa. Por lo tanto, se determina la necesidad de lengüetas por el resultado final: si las fallas de la probeta en la prueba son aceptables y con frecuencia razonable, entonces no hay necesidad de cambiar el método de agarre.

Tabla 2. Requisitos geométricos del espécimen para prueba a tensión

| Parámetro | Requerimiento |
|--------------------------------------|--|
| Requerimiento de la probeta | |
| forma | sección transversal constante rectangular |
| longitud mínima | agarre + 2 veces ancho + longitud de galga |
| ancho | como sea necesario (ver tabla siguiente) |
| tolerancia del ancho | 1% del ancho |
| espesor | como sea necesario |
| tolerancia del espesor | 4% del espesor |
| llanura | plano con ligera presión del dedo |
| Requerimiento de la lengüeta | |
| material | como sea necesario |
| orientación de fibras | como sea necesario |
| espesor | como sea necesario |
| variación entre espesor de lengüetas | 1% del espesor de lengüetas |
| ángulo biselado | |

- Recomendaciones específicas

Ancho, espesor y largo: seleccionar el ancho y el espesor, de manera que se promuevan las fallas en la sección donde están ubicadas las galgas, y asegurar que el espécimen tenga un número suficiente estadísticamente representativo de fibras en la sección transversal. La longitud debe ser suficientemente grande para evitar esfuerzos de doblaje causados por excentricidades menores en los agarres. Las galgas se deben ubicar lo suficientemente alejadas de los agarres. Los requisitos mínimos para el diseño del espécimen, mostrados en la Tabla 1 son insuficientes para crear un sistema correctamente dimensionado, por lo tanto, se enumeran algunas recomendaciones sobre otras dimensiones importantes en la Tabla 2. Estas geometrías han sido utilizadas por un gran número de laboratorios con

excelentes resultados en una amplia variedad de materiales, aunque su uso no garantiza el éxito para todos los materiales.

Agarre y uso de lengüetas: existen muchas configuraciones de material, tales como laminados multidireccionales, las cuales no necesitan uso de lengüeta. Sin embargo, éstas son altamente recomendadas para probar materiales unidireccionales.

En cuanto a la geometría, algunas recomendaciones sobre dimensiones importantes para configuraciones de materiales típicas se enumeran en la Tabla 3. Estas dimensiones han sido calificadas por un gran número de laboratorios de pruebas como suficientes para obtener modos de fallas aceptables en una amplia variedad de materiales. La selección de una configuración de lengüeta depende del material del espécimen, de la orientación de las fibras y el tipo de agarres usados.

El material más usado consistentemente para lengüetas es PRFV de vidrio-E, el cual se aplica a 45° a la dirección de la carga para proveer una interfase suave. También se han obtenido buenos resultados utilizando lengüetas de acero, o utilizando lengüetas fabricadas del mismo material que se está probando.

Tabla 3. Recomendaciones geométricas del espécimen para prueba a tensión

| Orientación de fibras | ancho [mm] | longitud [mm] | espesor | longitud de lengüeta [mm] | espesor de lengüeta [mm] |
|------------------------|------------|---------------|---------|---------------------------|--------------------------|
| 0° unidireccional | 15 | 250 | 1 | 56 | 1,5 |
| 90° unidireccional | 25 | 175 | 2 | 25 | 1,5 |
| balanceada y simétrica | 25 | 250 | 2,5 | - | - |
| aleatoria-discontinua | 25 | 250 | 2,5 | - | - |

c. Preparación del espécimen

El control de la alineación de fibras es crítico, ya que una mala alineación reducirá las propiedades medidas. Por eso, el método de preparación debe ser reportado.

La preparación del espécimen es extremadamente importante para los compuestos. En lo posible, se deben moldear los especímenes por separado para evitar efectos de borde o de corte. De lo contrario, en caso de moldear varios especímenes juntos, se debe tener extremas precauciones a la hora de cortarlos de la placa. Las esquinas deben ser planas y paralelas, dentro de las tolerancias.

Se recomienda etiquetar los especímenes sin afectar el material, para distinguirlos de los demás, en caso de volver a necesitarlos.

3.2.4 Procedimiento.

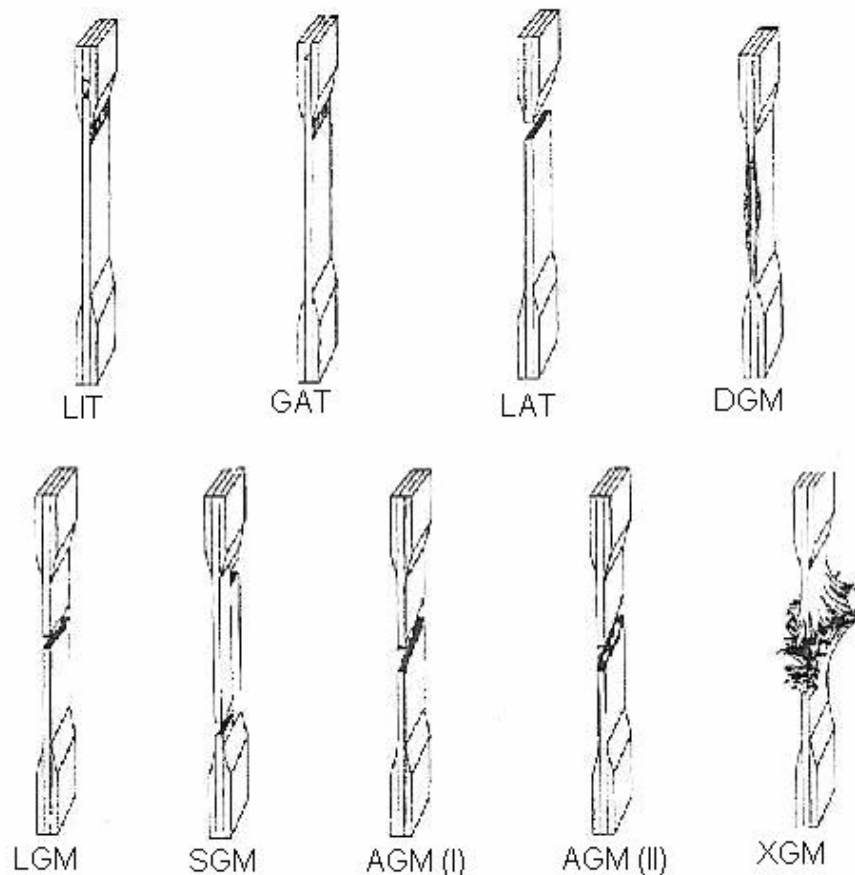
El método de muestreo de tensión del espécimen, el tipo de probeta y su geometría, el formato de reporte de datos y las condiciones ambientales de la prueba deben ser especificados antes de comenzar la prueba. También se debe determinar el área del espécimen como $A = \text{espesor} \times \text{ancho}$, midiendo cada unidad en tres puntos diferentes de éste y promediando los resultados.

La velocidad de prueba debe producir una tasa constante de deformación en la sección en donde se encuentran las galgas. En caso de que la máquina no tenga un control de deformación, se puede ajustar manualmente la velocidad de aplicación de la carga, de manera que la falla se produzca entre 1 y 10 minutos.

Para insertar el espécimen en los agarres, se debe tener cuidado de alinearlos ejes longitudinales de éste con la dirección de prueba. Luego apretar las mordazas y, en caso de ser posible, chequear la presión de agarre de éstos.

Recolectar los datos de carga versus deformación continuamente, o frecuentemente a intervalos regulares. Cuando el espécimen falle, recolectar los datos de carga máxima, carga de falla y la deformación al momento de ruptura. También es importante chequear el modo y la ubicación de la falla, y si es posible, escoger una descripción estándar usando el código de tres letras, mostrado en la Figura 4.

Figura 4. Códigos de fallas en la prueba a Tensión



ASTM D 3039, 2000

En las Tablas 4 a 6 se observa el significado de los Códigos para cada caso:

Tabla 4. Primer Carácter

| Tipo de Falla | Código |
|------------------------|--------|
| En ángulo | A |
| Delaminación del borde | D |
| Agarre / Lengüeta | G |
| Lateral | L |
| Multi-modo | M |
| Explosivo | X |
| Otro | O |

ASTM D 3039, 2000

Tabla 5. Segundo Carácter

| Tipo de Falla | Código |
|-----------------------------|--------|
| Dentro de agarre / lengüeta | I |
| Galga | G |
| Áreas múltiples | M |
| Varios | V |
| Desconocido | U |

ASTM D 3039, 2000

Tabla 6. Tercer Carácter

| Tipo de Falla | Código |
|---------------|--------|
| Abajo | B |
| Arriba | T |
| Medio | M |
| Varios | V |

Reexaminar las maneras de transmisión de carga al material, si una fracción significativa de las fallas ocurre dentro de la sección de las lengüetas. Entre los factores considerados se deben incluir la alineación de lengüetas como su material, ángulo y adhesivo utilizado, también el tipo de agarre y la presión y alineación de los agarres.

3.2.5 Cálculos

A continuación se enumeran los diferentes cálculos que se deben efectuar para determinar las diferentes propiedades de tensión del material en prueba:

- Resistencia a la Tensión

Para calcular la resistencia última a la tensión, usar la Ecuación (37)

$$F^{tu} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (37)$$

Donde:

- F^{tu} = Resistencia última a la Tensión [MPa.]
- P_{\max} = Máxima carga antes de falla [N]
- A = Área transversal promedio [mm².]

- Deformación Unitaria

En caso de ser necesario determinar el módulo de elasticidad, la deformación unitaria se calcula según la Ecuación (38).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_g} \quad (38)$$

Donde:

- ε = Deformación unitaria [mm./mm.]
- δ = Deformación del extensómetro
- L_g = Longitud de la galga

Para este cálculo se recomienda utilizar dos galgas, una en cada lado del espécimen, y promediar las deformaciones.

- Módulo de Elasticidad en Tensión

Calcular el módulo de elasticidad según la Ecuación (39), y utilizando preferiblemente un diferencial de deformación unitaria de 0.002.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (39)$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad en tensión [GPa]
- $\Delta\sigma$ = Diferencia de esfuerzos axiales entre dos puntos cuya diferencia de deformaciones unitarias sea $\Delta\varepsilon$ [MPa]
- $\Delta\varepsilon$ = Diferencia de deformaciones unitarias, nominalmente 0.002 [mm./mm.]

- Relación de Poisson

Para determinar la relación de Poisson, se debe inicialmente determinar la deformación transversal, ε_t , para cada uno de los dos valores de deformación longitudinal, paralela a la carga, ε_p . Con estos valores, se puede hacer uso de la Ecuación (40), teniendo en cuenta que si se está haciendo uso de galgas adheridas, el error producido por la sensibilidad transversal es mucho mayor

para compuestos que para metales, por lo cual es recomendable contactar al fabricante de las galgas para obtener información sobre factores de corrección.

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} \quad (40)$$

Donde:

- ν = Relación de Poisson en tensión
- $\Delta\varepsilon_t$ = Diferencia lateral de deformaciones unitarias [mm./mm.]
- $\Delta\varepsilon_l$ = Diferencia de deformaciones unitarias longitudinales, nominalmente 0.001, 0.002 ó 0.005 [mm./mm.]

3.2.6 Reporte.

Es recomendable incluir los siguientes datos en el reporte de prueba:

- Fecha y ubicación de la prueba
- Nombre del operador de la prueba
- Alguna variación con respecto a la prueba estándar
- Identificación del material, incluyendo especificación del material, fabricante, peso por área de la fibra utilizada, etc.
- Descripción de los pasos para fabricar el laminado
- Orientación de las fibras
- Fechas de calibración de las maquinas de prueba, así como tipo de agarres, método y velocidad de adquisición de datos de esta
- Dimensiones y parámetros de acondicionamiento de cada espécimen, así como número de estos
- Ambiente en el cual se efectúan las pruebas
- Velocidad de prueba
- Valores de las propiedades buscadas
- Área y modo de falla de la probeta

4. METODOLOGIA

El proceso de caracterizar muestras en compuestos consta de diferentes fases. Primero se debe elaborar un plan y determinar las propiedades que se desean o se necesitan obtener, y con base en esto, se determina el tipo de pruebas necesarias y revisan las normas pertinentes, las cuales sirven más como guía o consejo que obligación. Luego se determina la geometría, el número de probetas necesario y el método con el cual se fabricarán éstas.

A continuación se enumera el procedimiento que se llevó a cabo para la toma de datos a lo largo de este trabajo.

4.1 DETERMINACION DE PROPIEDADES NECESARIAS

Para este trabajo, se determinó que las propiedades mecánicas más importantes a determinar son el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras E_1 , y en la dirección transversal a las fibras E_2 , el módulo de rigidez G_{12} y la relación de Poisson ν_{12} . Sin embargo, para esto es necesario un extensómetro biaxial, es decir, que mida las deformaciones en las dos direcciones, tanto paralela como transversal al eje de carga. En vista de que solo se cuenta con un extensómetro uniaxial, solo se pueden determinar las propiedades que involucran una sola dirección, en este caso, el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras E_1 , y en la dirección transversal a las fibras E_2 .

Una vez decidido cuáles propiedades se van a caracterizar, se determinaron los tipos de pruebas necesarios a llevar a cabo. En este caso, es necesario hacer pruebas a tracción para determinar las dos propiedades, teniendo en cuenta para cada una, la dirección de las fibras con respecto al eje de carga.

En la Tabla 7 se observa la dirección en la cual se deben ubicar las fibras con respecto al eje de carga.

Tabla 7. Ángulo entre fibras y eje de carga

| Propiedad | Ángulo entre la dirección de las fibras y el eje de carga |
|-----------|---|
| E_1 | 0° |
| E_2 | 90° |

Después de esto, se buscaron las normas pertinentes para la realización de las pruebas. En este trabajo, las pruebas se basan en la norma ASTM D 3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials). De aquí se obtiene, entre otros, el tamaño que deben tener las probetas, en este caso, ellas deben tener 25 x 250 mm. Este dato es necesario para el diseño del molde.

4.2 PLAN DE PRUEBAS

Existen diferentes factores, como se dijo anteriormente, que afectan las propiedades en los compuestos. Estos son entre otros:

- Propiedades mecánicas de los mismos componentes
- Fracción volumétrica de cada componente
- Disposición de las fibras, sea en una o dos direcciones o en distribución aleatoria
- Proceso de fabricación
- Aditivos utilizados, tales como catalizadores, aceleradores, etc.
- Condiciones de trabajo, etc.

Sin embargo, para este trabajo se tomarán en cuenta 3 factores, primero porque sería muy extenso y costoso analizar todos los factores en conjunto, y segundo, porque existen algunas cuyo efecto se puede despreciar.

Es por esto que este trabajo se centra en analizar el efecto de las variables fracción volumétrica de las fibras V_f , presión de inyección de la resina P y porcentaje de catalizador utilizado C . En la Tabla 8, se observan los rangos entre los cuales se trabajó con dichas variables.

Tabla 8. Rangos de trabajo de los factores y alias para la superficie de respuesta

| Variable | Rango | Alias |
|-------------------------------------|------------------|-------|
| fracción volumétrica de las fibras | [0.2 – 0.8] | X_1 |
| presión de inyección de la resina | [30 - 40] [psi.] | X_2 |
| porcentaje de catalizador utilizado | [1.0 – 3.0] [%] | X_3 |

Con estas tres variables se construyó una superficie de respuesta para cada propiedad, es decir, dos superficies de respuesta en total. Además de esto, se utilizaron 3 puntos para cada variable, el mínimo, el intermedio, y el máximo valor, de donde resultan 27 diferentes combinaciones, las cuales se aprecian en la Tabla 9.

Tabla 9. Combinaciones y número de repeticiones por punto

| No. | X2 | X3 | X1 | Réplicas |
|-----|----|-----|-----|----------|
| P1 | 30 | 1,0 | 0,2 | 2 |
| P2 | 30 | 1,0 | 0,2 | 2 |
| P3 | 40 | 1,0 | 0,2 | 2 |
| P4 | 40 | 1,0 | 0,2 | 2 |
| P5 | 30 | 3,0 | 0,2 | 2 |
| P6 | 30 | 3,0 | 0,2 | 2 |
| P7 | 40 | 3,0 | 0,2 | 2 |
| P8 | 40 | 3,0 | 0,2 | 2 |
| P9 | 30 | 1,0 | 0,8 | 2 |
| P10 | 30 | 1,0 | 0,8 | 2 |
| P11 | 40 | 1,0 | 0,8 | 2 |
| P12 | 40 | 1,0 | 0,8 | 2 |
| P13 | 30 | 3,0 | 0,8 | 2 |
| P14 | 30 | 3,0 | 0,8 | 2 |
| P15 | 40 | 3,0 | 0,8 | 2 |
| P16 | 40 | 3,0 | 0,8 | 2 |

4.3 METODO DE FABRICACION DE LAS PROBETAS

Las probetas fueron fabricadas por el método RTM Light.

Para las inyecciones se manejaron diferentes variables de control, algunas de ellas variables para el diseño de experimentos y otras se mantuvieron constantes.

Las variables constantes fueron las siguientes:

- Octoato de Cobalto: éste es un pre-acelerador, el cual se le adiciona a la resina en un 0.2%, antes de ser inyectada, de manera que el proceso de curado sea mas rápido.
- Presión de vacío: para ayudar a las burbujas de aire a salir del molde al momento de inyectar la resina, se aplica una presión de vacío de 10 pulgadas de Mercurio. Este valor es muy importante, pues si es muy bajo, no surtirá efecto suficiente y si es demasiado alto, las partículas del aditivo se dilatarán y evaporarán fácilmente.

Después de cada inyección, cada una de las probetas fue desmoldada, cortada y pulida con papel abrasivo, desde grano 80, y luego 150, garantizando un óptimo acabado en las mismas y la reducción de micro-fisuras o concentradores de esfuerzos, que pudieran alterar los datos.

4.4 PREPARACION DEL MOLDE

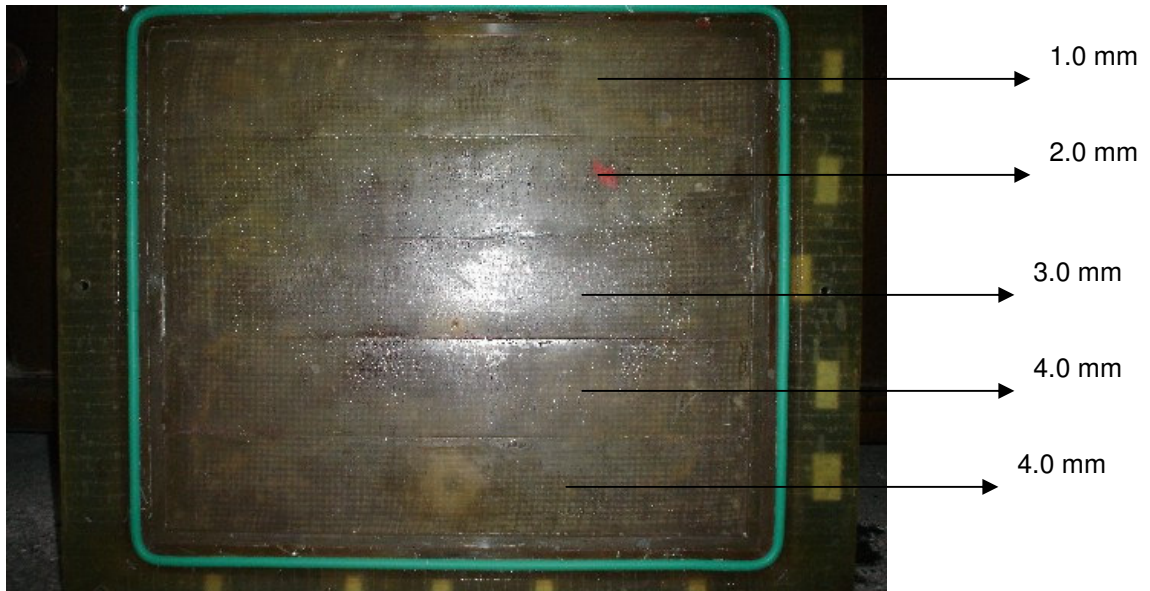
Con base en el tamaño necesario de las probetas (250 x 25 mm.) se puede diseñar el molde. Sin embargo, se debe tomar también en cuenta que la fracción volumétrica de fibras es una variable que no se puede controlar directamente. Ésta es una variable vital para los resultados, sin embargo, depende de otros parámetros, de la siguiente manera:

El volumen de lámina está compuesto por una tela de fibras unidireccionales, la cual tiene espesor constante, y de resto, por resina, cuyo espesor se puede controlar de acuerdo al espesor que se le dé al molde. Entre mayor sea el espesor de la probeta (manteniendo constante la tela de fibra), mayor parte del volumen estará compuesto por resina, y por ende, mayor será la fracción volumétrica de éste.

Por tal razón, y debido a que V_f es una variable para el diseño de experimentos, se diseñó un molde para diferentes probetas con 5 diferentes espesores escalonados, para luego, mediante la prueba de ignición, determinar el respectivo valor de V_f para cada espesor de probeta.

También debido a la necesidad de probar un gran número de probetas, se dimensionó el molde de tal manera que de cada espesor, se puedan obtener 6 probetas. En la Figura 5 se puede observar el escalonamiento del molde.

Figura 5. Molde con su escalonamiento



En la anterior figura se puede observar además el canal que hay alrededor del molde. Éste sirve para que el vacío que se aplica al momento de inyectar se distribuya equitativamente en todo el molde, logrando así un flujo uniforme de la resina inyectada. Es de anotar que el molde fue fabricado en fibra de vidrio, y que su parte superior es transparente y su parte inferior es roja, de manera que se pueda observar fácilmente el flujo de la resina en el momento de la inyección.

Para proveer un fácil desmoldado posterior de las probetas, los moldes fueron preparados con los siguientes productos

- Limpiador TR 905: Mezcla especial de solventes diseñada para disolver y remover ceras de moldes fabricados en poliéster sin producir daños a la superficie. El limpiador TR 905 puede ser usado para limpiar superficies de moldes metálicos, epóxicos y para la limpieza de equipos.
- Sellador TR 910: Producto formulado específicamente como sellador de moldes en poliéster reforzado con fibra de vidrio, epoxi y otro tipo de

moldes usados en la industria de transformación de Fibra de Vidrio. Este producto ofrece una película que evita que la resina aplicada sobre el molde se adhiera a la superficie del mismo.

- Desmoldante TR 930: Agente desmoldante que seca rápidamente y provee múltiples desmoldadas de resinas poliéster.

Finalmente, debido a las altas presiones y al gran tamaño del molde, fue necesario construir un refuerzo en acero que evitara deformaciones en el centro del molde al momento de inyectar, para así garantizar un espesor constante en las probetas. En la Figura 6 se puede observar este refuerzo.

Figura 6. Refuerzo en acero para el molde



4.5 RECURSOS PARA EL PROYECTO

4.5.1 Insumos.

La preparación del molde y de las probetas se hizo con la asesoría y recursos de SAFETY COMPOSITES, una empresa pionera en Colombia dedicada a la investigación y fabricación de materiales compuestos.

4.5.2 Pruebas y ensayos.

Los ensayos fueron realizados con recursos y apoyo del centro de laboratorios de la Universidad EAFIT, específicamente el Laboratorio de Materiales. Estos ensayos incluyen 32 pruebas a tracción y 15 ensayos para determinar el V_f .

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADOS ANALÍTICOS

Con ayuda del Software Matlab, se escribió un programa para determinar el módulo de Elasticidad en las dos direcciones, E_1 y E_2 , para los diferentes valores de fracción volumétrica de fibras V_f utilizando los diferentes modelos, y así lograr compararlos.

A continuación en las Figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos para E_1 y para E_2 , respectivamente.

Figura 7. Resultado teórico de E_1 según diferentes modelos

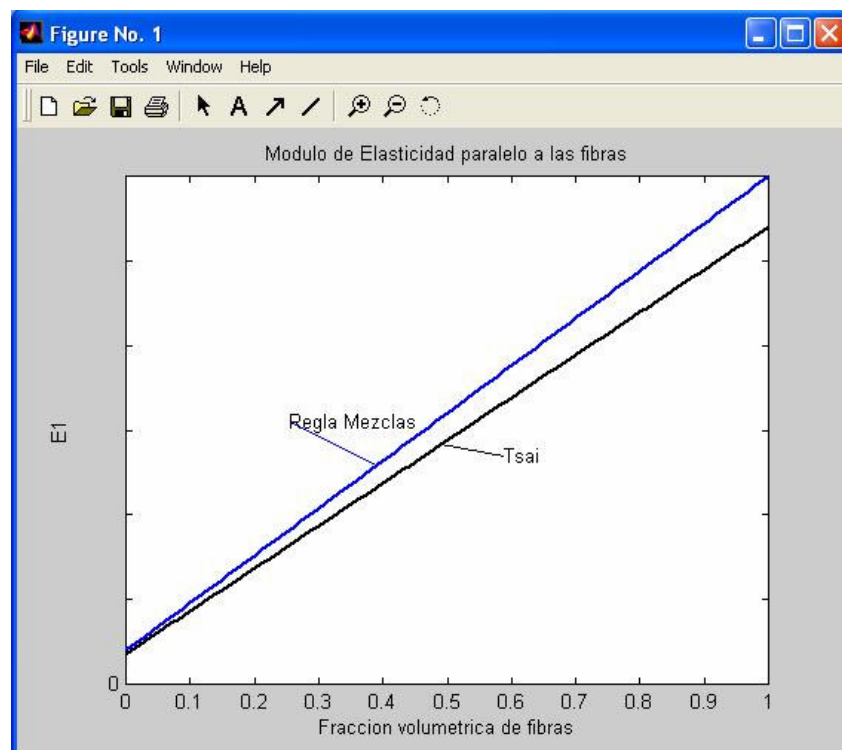
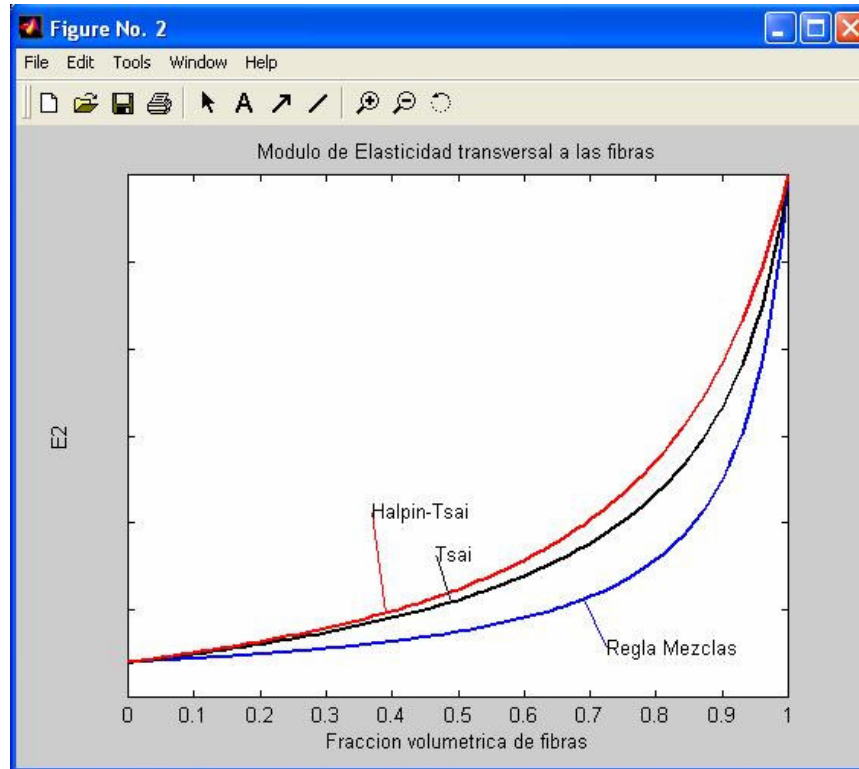


Figura 8. Resultado teórico de E_2 según diferentes modelos



De las figuras anteriores se observa que debido al mayor Módulo de Elasticidad de las fibras, a medida que V_f aumenta, también aumentan los valores de E_1 tanto como de E_2 .

También se observa que para el caso de E_1 , el modelo de Tsai es más conservador, es decir, el modelo cuyo resultado es un menor módulo de elasticidad, que el de la Regla de las Mezclas, mientras que para E_2 , el modelo de la Regla de las Mezclas es el más conservador, seguido por el modelo de Tsai, y por último, el modelo de Halpin-Tsai.

5.2 RESULTADOS DE ENSAYOS A TRACCIÓN

Las pruebas a tracción se efectuaron con una tasa de aplicación de carga de 2MPa / s, y se utilizó una escala de deformación de 1/5 para las gráficas en todos los ensayos. A continuación se muestran los resultados de la prueba a tracción para cada una de las probetas en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de las pruebas a tracción

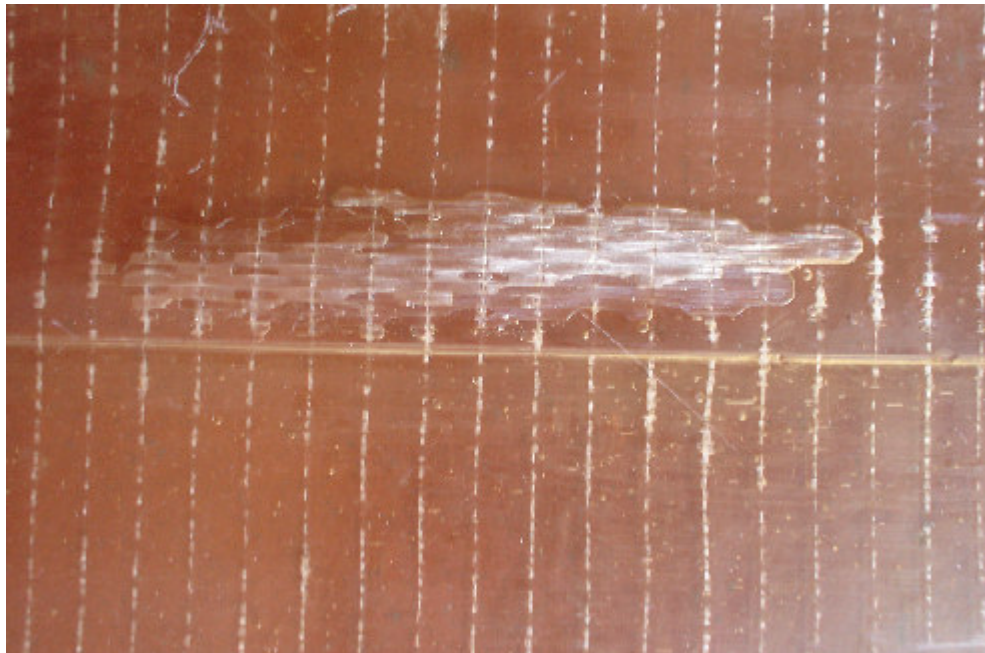
| Nº | E1 | E2 |
|-----|--------|-------|
| P1 | 25.511 | 1.541 |
| P2 | 20.045 | 1.569 |
| P3 | 20.047 | 2.037 |
| P4 | 6.750 | 1.044 |
| P5 | 4.155 | 869 |
| P6 | 12.570 | 635 |
| P7 | 17.068 | 2.403 |
| P8 | 17.338 | 2.273 |
| P9 | 4.297 | 1.166 |
| P10 | 3.639 | 1.385 |
| P11 | 9.828 | 715 |
| P12 | 1.898 | 732 |
| P13 | 1.604 | 699 |
| P14 | 6.887 | 811 |
| P15 | 3.579 | 606 |
| P16 | 6.371 | 639 |

5.3 DIFICULTADES EN LA OBTENCION DE RESULTADOS

5.3.1 Inyección de resina.

Debido al gran tamaño del molde y a su pequeño espacio entre paredes, el flujo de resina se dificultaba, especialmente en la dirección perpendicular a las fibras, por lo cual hubo zonas del laminado, al cual no llegaba suficiente resina para ser absorbida por las fibras. En la Figura 9 se observa el efecto de este fenómeno sobre el laminado.

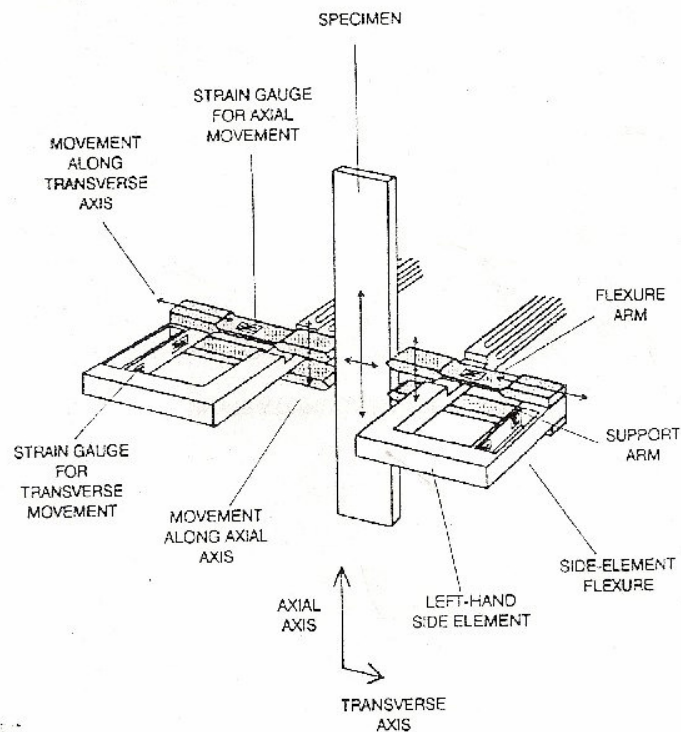
Figura 9. Zona en donde se dificulta el flujo de resina



5.3.2 Ensayos mecánicos.

En la fase de planteamiento del proyecto, se contaba con la utilización de un extensómetro biaxial. El uso de dicho extensómetro tiene dos ventajas, primero que no requiere de galgas extensométricas, lo cual ahorra tiempo en preparación de probetas y dinero en dichas galgas; y segundo que mide las deformaciones en dos dimensiones para el mismo ensayo, lo cual es primordial para medir propiedades que relacionan deformaciones simultáneas en dos direcciones, tales como el módulo de rigidez G_{12} y la relación de Poisson ν_{12} . En la Figura 10 se puede observar el esquema de funcionamiento del extensómetro biaxial.

Figura 10. Esquema de funcionamiento del extensómetro biaxial



Instron, 1991

Este extensómetro necesita de un software especializado, el cual fue adquirido por el laboratorio en donde opera. Sin embargo, el software resultó ser incompatible con el extensómetro, por lo cual no fue posible utilizar este recurso. Por lo tanto, se optó por utilizar la máquina universal del laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT. En la Figura 11 se observa dicha máquina Universal.

Figura 11. Máquina universal, laboratorio de Materiales Universidad EAFIT



La máquina universal sirve también para realizar pruebas a tracción, pero sólo mide las deformaciones en la dirección de la carga. Por esto no se pudieron evaluar las propiedades en dos direcciones, es decir, el módulo de rigidez G_{12} ni la relación de Poisson ν_{12} .

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

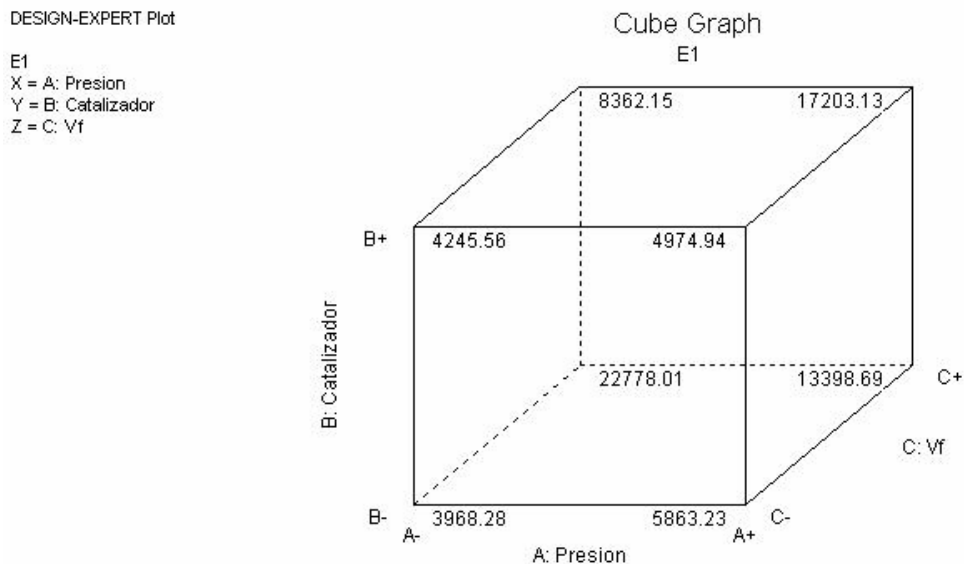
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS A TRACCIÓN

Con base en los resultados obtenidos, se efectuó un diseño de Experimentos para cada variable de respuesta, E_1 y E_2 , por separado. Esto se hizo con ayuda del Programa Computacional DESIGN EXPERT 6.0.6.

6.1.1 Análisis para Módulo de Elasticidad E_1 .

Con los resultados obtenidos, se construyó inicialmente el cubo de respuestas, como se observa en la Figura 12. Los valores están dados en Mega Pascales [MPa.].

Figura 12. Cubo de respuestas para E_1



A partir de estos valores, se obtuvo la ecuación que modela la variable de salida, como se observa a continuación en la Figura 13.

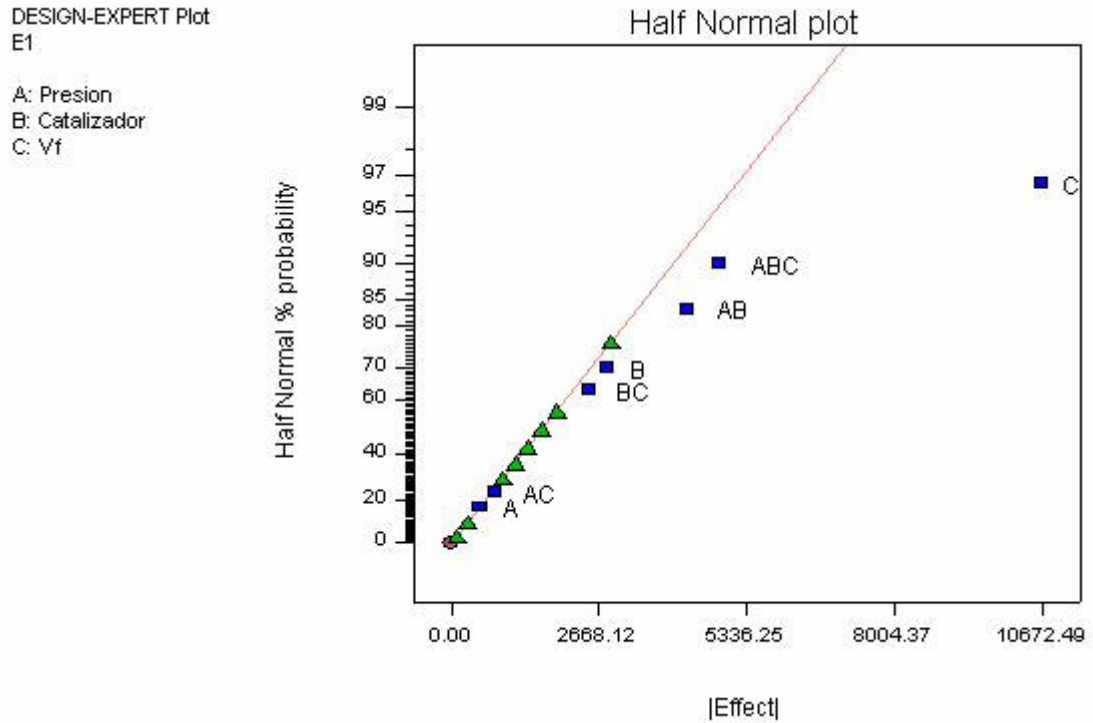
Figura 13. Ecuación final para Módulo de Elasticidad E_1

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned} E_1 = & \\ & -33289.53369 \\ & +946.68012 * Presion \\ & +14028.78875 * Catalizador \\ & +1.48430E+005 * Vf \\ & -381.37637 * Presion * Catalizador \\ & -3494.53425 * Presion * Vf \\ & -60708.96270 * Catalizador * Vf \\ & +1615.48922 * Presion * Catalizador * Vf \end{aligned}$$

De esta ecuación se observa claramente que el coeficiente de la variable V_f es el mayor de todos, por lo tanto es la variable más significativa, mientras que la presión de inyección es la variable menos significativa para el modelo. Esta medida también se puede obtener en el programa, como se ve en la Figura 14, en donde las variables más alejadas de la línea son las más significativas y las más cercanas son las menos significativas.

Figura 14. Grado de significancia de cada variable y cada interacción sobre E₁



Por último se procedió a construir la superficie de respuesta del modelo con la información y el modelo resultante. Sin embargo, debido a que se tienen 3 variables de entrada y una de salida, se necesitarían 4 dimensiones para graficar, por lo tanto se decidió dibujar 3 superficies de respuesta, manteniendo constante la presión en cada una, puesto que es la variable menos significativa. A continuación se muestra la superficie de respuesta, con el valor de Presión constante en 30psi, como se ve en la Figura 15.

Figura 15. Superficie de respuesta para E_1 con variable Presión constante en 30psi

DESIGN-EXPERT Plot

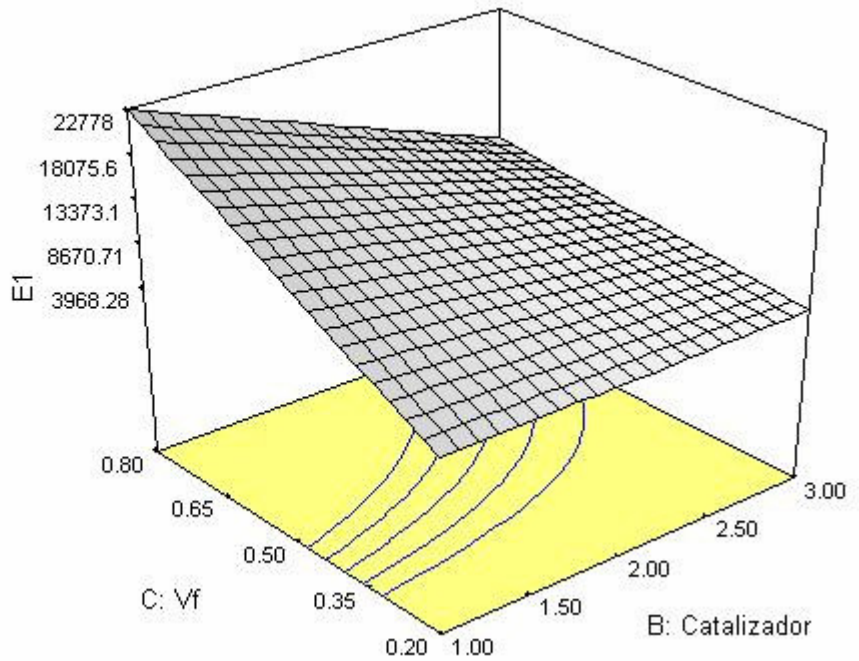
E_1

X = B: Catalizador

Y = C: Vf

Actual Factor

A: Presion = 30.00



Ahora se muestra la superficie de respuesta con la presión constante en 35psi en la Figura 16.

Figura 16. Superficie de respuesta para E₁ con variable Presión constante en 35psi

DESIGN-EXPERT Plot

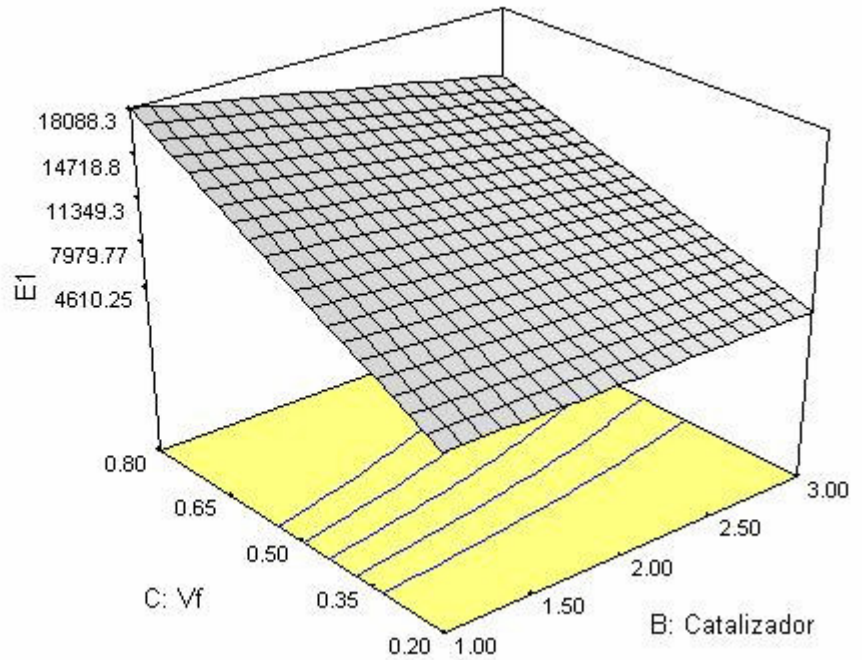
E1

X = B: Catalizador

Y = C: Vf

Actual Factor

A: Presion = 35.00



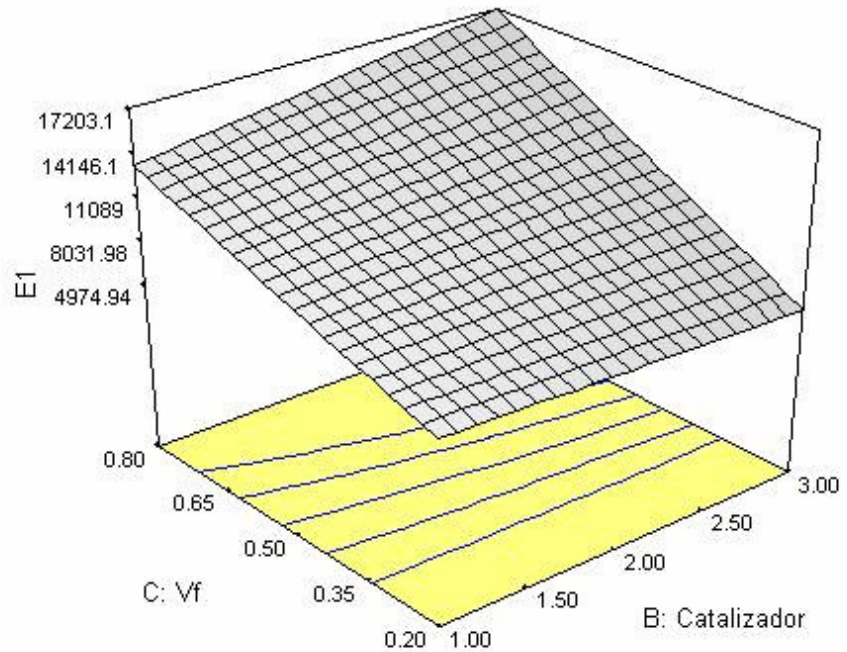
Por último se muestra la superficie de respuesta con la presión constante en 40psi en la Figura 17.

Figura 17. Superficie de respuesta para E_1 con variable Presión constante en 40psi

DESIGN-EXPERT Plot

E1
 X = B: Catalizador
 Y = C: Vf

Actual Factor
 A: Presion = 40.00



En las 3 superficies se observa que a pesar de que la presión no es muy significativa directamente sobre el resultado, la interacción de esta variable con las otras sí es significativa. Esto se observa especialmente en las curvas de nivel para cada superficie, las cuales varían notablemente de una a otra.

Además también se observa que en todos los casos, la superficie tiende a subir para valores altos de V_f , lo cual era de esperarse, puesto que el Módulo de Elasticidad de la fibra es mayor que el de la resina. Por otro lado, para valores de presión de 30 y de 35psi, se obtienen mayores valores de E_1 con los valores mínimos de porcentaje de catalizador, mientras que para presión de 40psi, el catalizador hace efecto despreciable sobre la variable de respuesta E_1 .

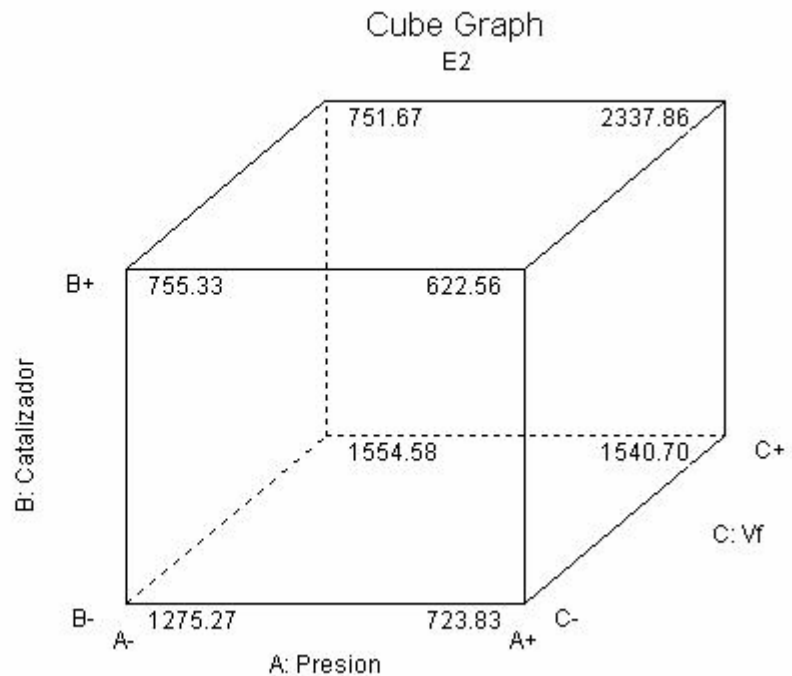
6.1.2 Análisis para Módulo de Elasticidad E_2 .

Con los resultados obtenidos, se construyó inicialmente el cubo de respuestas, igual que como se procedió con E_1 , como se observa en la Figura 18. Los valores están dados en Mega Pascales [MPa.].

Figura 18. Cubo de respuestas para E_2

DESIGN-EXPERT Plot

E2
X = A: Presion
Y = B: Catalizador
Z = C: Vf



Ahora se procede a hallar el grado de significancia de las variables, y el modelo para E_2 , como se observa en las Figuras 19 y 20, respectivamente.

Figura 19. Grado de significancia de cada variable y cada interacción sobre E₂

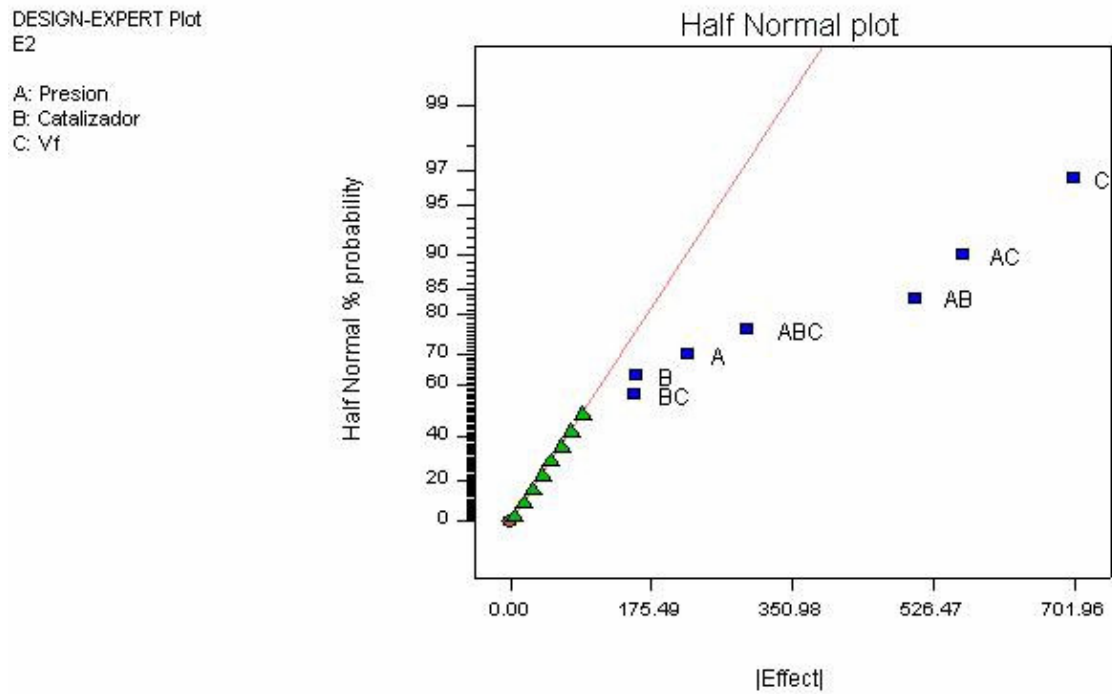


Figura 20. Ecuación final para Módulo de Elasticidad E₂

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned}
 E_2 = & \\
 & +3624.18741 \\
 & -74.30681 * \text{Presion} \\
 & -250.13333 * \text{Catalizador} \\
 & +967.01855 * \text{Vf} \\
 & +1.24401 * \text{Presion} * \text{Catalizador} \\
 & -8.85656 * \text{Presion} * \text{Vf} \\
 & -3189.29611 * \text{Catalizador} * \text{Vf} \\
 & +98.44972 * \text{Presion} * \text{Catalizador} * \text{Vf}
 \end{aligned}$$

De las anteriores Figuras, se observa que la variable Vf sigue siendo la más significativa, mientras que ahora la variable menos significativa es ahora el porcentaje de catalizador. Ahora se procede a construir las 3 superficies de

respuesta, utilizando el porcentaje de catalizador como una constante en 1.0%, 2.0% y 3.0% en las Figuras 21, 22 y 23, respectivamente.

Figura 21. Superficie de respuesta para E_2 con variable Porcentaje de Catalizador en 1.0%

DESIGN-EXPERT Plot

E2
X = A: Presion
Y = C: Vf

Actual Factor
B: Catalizador = 1.00

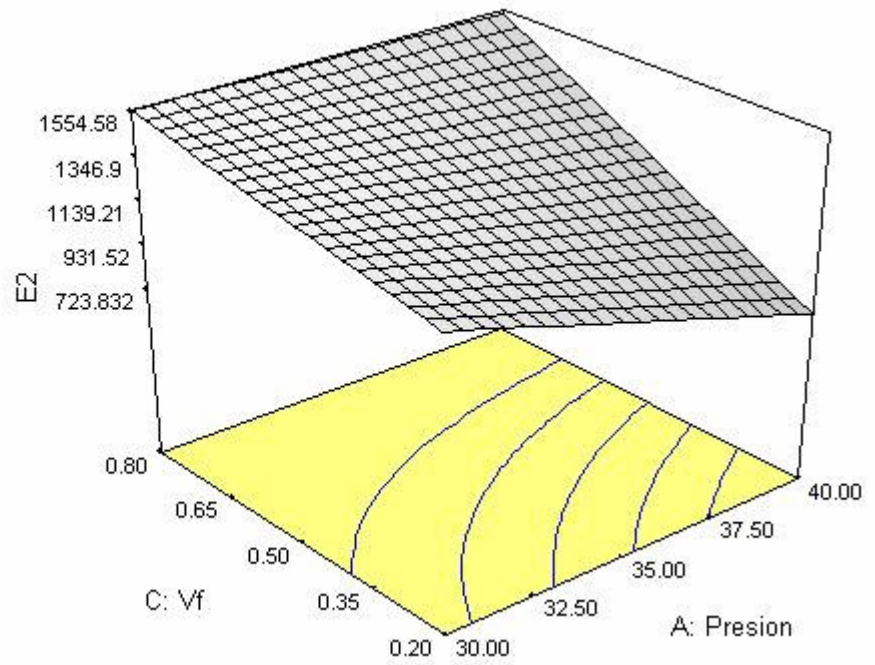


Figura 22. Superficie de respuesta para E₂ con variable Porcentaje de Catalizador en 2.0%

DESIGN-EXPERT Plot

E₂
X = A: Presion
Y = C: Vf

Actual Factor
B: Catalizador = 2.00

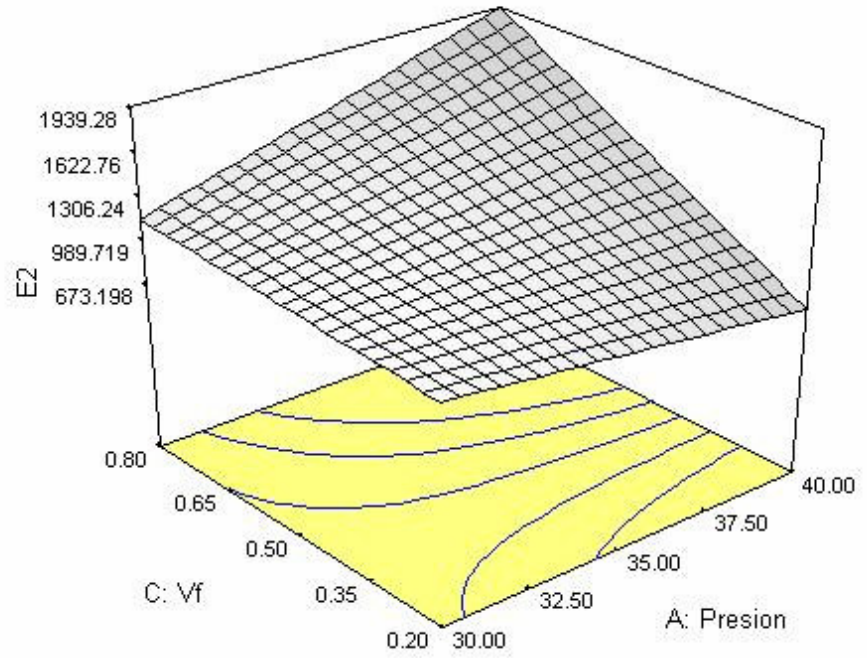
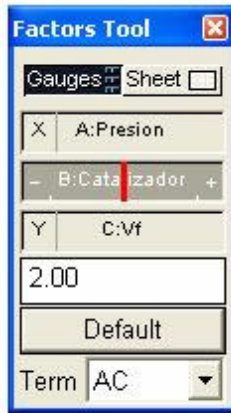
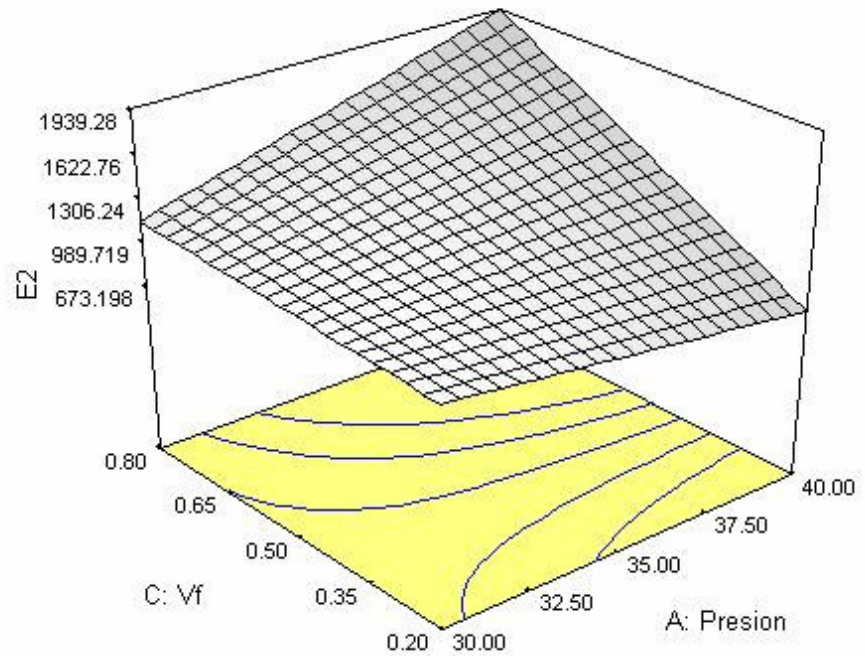
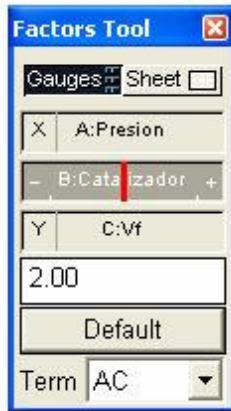


Figura 23. Superficie de respuesta para E_2 con variable Porcentaje de Catalizador en 3.0%

DESIGN-EXPERT Plot

E2
 X = A: Presion
 Y = C: Vf

Actual Factor
 B: Catalizador = 2.00



De las 3 superficies se observa que para todos los casos, cuando el porcentaje de catalizador está en 1.0, 2.0 y 3.0%, el mayor valor de E_2 tiende a ser cuando V_f es máximo y la Presión de inyección es máxima.

Por lo tanto se puede decir que para la dirección transversa a las fibras, el Módulo de Elasticidad de las fibras es mayor que el de la resina, independientemente de los valores de Presión de inyección y de Porcentaje de Catalizador.

6.2 OPTIMIZACIÓN DE RESULTADOS

Con base en las superficies de respuesta y los modelos obtenidos, se procedió a optimizar las variables de respuesta, es decir, buscar las combinaciones en donde las respuestas sean las mayores. Se hicieron 3 optimizaciones, una para E_1 y una para E_2 por separado, y luego se buscó la mezcla en la cual las dos variables sean máximas.

6.2.1 Optimización de E_1 .

Con ayuda del programa, se buscó el mayor valor para E_1 , manteniendo las demás variables dentro de su rango. La configuración de variables se muestra a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Configuración de restricciones para optimización de E_1

| Name | Goal | Lower Limit | Upper Limit | Lower Weight | Upper Weight | Importance |
|-------------|-------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Presion | is in range | 30 | 40 | 1 | 1 | 3 |
| Catalizador | is in range | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| Vf | is in range | 0.2 | 0.8 | 1 | 1 | 3 |
| E1 | maximize | 1604.41 | 25510.6 | 1 | 1 | 5 |
| E2 | is in range | 606.339 | 2403 | 1 | 1 | 4 |

Con estos criterios se obtienen 6 soluciones, cuyo resultado máximo se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Conjunto de soluciones para optimizar E_1

| Solutions | | | | | | |
|-----------|---------|-------------|------|---------|---------|--------------|
| Number | Presion | Catalizador | Vf | E1 | E2 | Desirability |
| 1 | 30.00 | 1.00 | 0.80 | 22778 | 1554.58 | 0.886 |
| 2 | 31.71 | 1.00 | 0.80 | 21170.7 | 1552.2 | 0.818 |
| 3 | 35.14 | 1.00 | 0.80 | 17959.4 | 1547.45 | 0.684 |
| 4 | 40.00 | 3.00 | 0.80 | 17203.1 | 2337.85 | 0.652 |
| 5 | 39.15 | 2.09 | 0.80 | 15423.8 | 1902.1 | 0.578 |
| 6 | 40.00 | 1.83 | 0.80 | 14978.8 | 1871.78 | 0.559 |

De la Tabla 12 se observa que el mayor valor posible de E_1 es de 22778 MPa., y que se logra a partir de una configuración de 30psi de Presión, 1% de catalizador y 0.2 de fracción volumétrica de fibras. También se observa adicionalmente que el valor de E_2 para esta configuración es de 1554.58 MPa.

6.2.2 Optimización de E_2 .

Con ayuda del programa, se buscó el mayor valor para E_2 , manteniendo las demás variables dentro de su rango. La configuración de variables se muestra a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Configuración de restricciones para E_2

| Name | Goal | Lower Limit | Upper Limit | Lower Weight | Upper Weight | Importance |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|
| Presion | is in range | 30 | 40 | 1 | 1 | 3 |
| Catalizador | is in range | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| Vf | is in range | 0.2 | 0.8 | 1 | 1 | 3 |
| E1 | is in range | 1604.41 | 25510.6 | 1 | 1 | 5 |
| E2 | maximize | 606.339 | 2403 | 1 | 1 | 5 |

Con este criterio se obtienen 10 soluciones. El resultado máximo se observa en la Tabla 14.

Tabla 14. Conjunto de soluciones para optimizar E_2

| Solutions | | | | | | |
|-----------|--------------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|
| Number | Presion | Catalizador | Vf | E1 | E2 | Desirability |
| 1 | <u>40.00</u> | <u>3.00</u> | <u>0.80</u> | <u>17203.1</u> | <u>2337.86</u> | <u>0.691</u> |
| 2 | 40.00 | 3.00 | 0.78 | 16716.5 | 2269.6 | 0.462 |
| 3 | 40.00 | 3.00 | 0.70 | 15228.5 | 2060.88 | 0.121 |
| 4 | 40.00 | 3.00 | 0.68 | 14847.3 | 2007.39 | 0.083 |
| 5 | 40.00 | 1.91 | 0.80 | 15121.4 | 1901.67 | 0.038 |
| 6 | 40.00 | 1.31 | 0.80 | 13992.3 | 1665.07 | 0.005 |
| 7 | 30.01 | 1.00 | 0.80 | 22773.2 | 1554.57 | 0.002 |
| 8 | 30.00 | 1.01 | 0.80 | 22703.5 | 1550.43 | 0.002 |
| 9 | 34.74 | 1.00 | 0.80 | 18323.2 | 1547.95 | 0.002 |

6.2.3 Optimización de E_1 y E_2 en conjunto.

Con ayuda del programa, se buscó el mayor valor para E_1 y E_2 , manteniendo las demás variables dentro de su rango. La configuración de restricciones y la solución obtenida se muestran a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Configuración de restricciones y conjunto de soluciones para optimizar E_1 y E_2

| Constraints | | | | | | |
|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Name | Goal | Lower Limit | Upper Limit | Lower Weight | Upper Weight | Importance |
| Presion | is in range | 30 | 40 | 1 | 1 | 3 |
| Catalizador | is in range | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| Vf | is in range | 0.2 | 0.8 | 1 | 1 | 3 |
| E1 | maximize | 1604.41 | 25510.6 | 1 | 1 | 5 |
| E2 | maximize | 606.339 | 2403 | 1 | 1 | 3 |

| Solutions | | | | | | |
|------------------|----------------|--------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|
| Number | Presion | Catalizador | Vf | E1 | E2 | Desirability |
| 1 | <u>40.00</u> | <u>3.00</u> | <u>0.80</u> | <u>17191.1</u> | <u>2336.18</u> | <u>0.755</u> |
| 2 | 40.00 | 2.99 | 0.80 | 17166.5 | 2330.97 | 0.753 |
| 3 | 40.00 | 3.00 | 0.79 | 17081.5 | 2320.8 | 0.749 |
| 4 | 40.00 | 3.00 | 0.78 | 16836.3 | 2286.4 | 0.736 |
| 5 | 30.00 | 1.00 | 0.80 | 22767.8 | 1554.01 | 0.729 |
| 6 | 30.05 | 1.00 | 0.80 | 22734.2 | 1554.52 | 0.728 |
| 7 | 30.00 | 1.00 | 0.80 | 22671.7 | 1553 | 0.727 |
| 8 | 30.00 | 1.00 | 0.79 | 22482.6 | 1550.2 | 0.722 |
| 9 | 37.65 | 2.44 | 0.80 | 15257.7 | 1846.57 | 0.613 |
| 10 | 36.71 | 1.61 | 0.80 | 15818.2 | 1627.63 | 0.585 |

En la Tabla 15 se observa que para lograr un valor máximo en conjunto de las dos variables, es necesario sacrificar en parte cada una. En este caso, la variable que más se sacrificó fue E_1 , puesto que se redujo de 22.778 a 17.191 MPa.

7. FUTUROS PROYECTOS

En vista de las dificultades que se tuvieron con la utilización del extensómetro biaxial, por lo cual no se efectuaron pruebas para determinar propiedades de módulo de rigidez G_{12} y la relación de Poisson ν_{12} , se propone para el momento en el que se disponga de dicho extensómetro, complementar esta investigación actual con la caracterización de las dos propiedades restantes.

Por otro lado, se propone efectuar la caracterización de las propiedades mecánicas de un compuesto, utilizando ya sea otro tipo de resina u otro tipo de fibra, por ejemplo, fibra bidireccional.

Es importante tener en cuenta, tomando en cuenta la experiencia con el molde, que debido al pequeño espesor de las probetas, es preferible fabricar o utilizar un molde de dimensiones más pequeñas, evitando así problemas de flujo de resina en las inyecciones.

8. CONCLUSIONES

Tanto en los modelos como en las pruebas de tracción se obtuvieron mayores valores de E_1 y de E_2 para valores altos de V_f , lo cual era de esperarse debido a la dependencia de las propiedades del composite final de la magnitud de las propiedades del refuerzo, como lo expresan los autores consultados en sus modelos micromecánicos.

Con esta investigación se obtuvieron modelos complementarios a los actuales, en donde se tienen en cuenta otras variables que afectan el proceso de fabricación de laminados. Los resultados obtenidos les serán útiles especialmente a los fabricantes para así maximizar las propiedades mecánicas de sus productos a partir de parámetros comunes de proceso. No obstante es importante aclarar que el estudio debe extenderse a las otras dos propiedades (G_{12} y ν_{12}) debido a que describen completamente el comportamiento del material y son completamente independientes.

Las variables Presión de Inyección y Porcentaje de Catalizador tienen efecto sobre las variables de respuesta y, como se mostró anteriormente, se maximizan las respuestas si se utiliza un valor alto de catalizador (3.0%) y valor alto de presión (40psi), además de obtener un corto tiempo de curado de la resina.

Los modelos encontrados concuerdan con los modelos micromecánicos existentes, además de ser más completos, puesto que incluyen variables del proceso de fabricación.

9. BIBLIOGRAFÍA

AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence J. Analysis and performance of fiber composites. Segunda edición. Editorial John Wiley & Sons, Inc. Nueva York. Estados Unidos. 1990. ISBN 0 195 4288. pp449.

ASTM D 2584 – 02. (2002). Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins

ASTM D 3039. (2000). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

BASF. Información técnica resina de poliéster insaturado Palatal. Basf Química Chile. 2000.

BARBERO, Ever J. Introduction to Composite Materials Design. Primera edición. Editorial Taylor & Francis Group. Filadelfia. Estados Unidos. 1998. ISBN 1 5603 2701 4. pp336.

CARVALHO, A. Fiberglass x Corrosao. Associacao Brasileira do Plastico Reforcado. Sao Paulo. Brasil. 1992. pp441.

FRANCO BEDOYA, Andrés Felipe. Metodología de Diseño y análisis de elementos estructurales fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio usando el método de los elementos finitos. Proyecto de grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad EAFIT. 2005.

GIBSON, R. F. Micromechanics. Composites engineering handbook. Primera Edición. Editorial Marcel Dekker, Inc. Michigan. Nueva York. Estados Unidos. 1997. pp167-202. ISBN 0 8247 9304 8.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas. Primera Edición. Editorial Prentice-Hall, México D.F., México. 1997. pp220-238. ISBN 968 880 846 6.

HALPIN, J.C. TSAI, S.W. Effects of environmental factors on composite materials. AFML-TR. 1969. pp 67-423.

HELWITT, R. L. DE MALHERBE, M. C. An Approximation for the Longitudinal Shear Modulus of Continuous Fibre Composites, Journal of Composite Materials, Abril 1970, pp 280-282.

JONES, Robert M. Mechanics of composite materials. Segunda edición. Filadelfia. Estados Unidos. Editorial Taylor & Francis Group. 1998. 1 5603 2712 X. 519p

MATTHEWS, F.L. RAWLINGS R.D. Composite materials: Engineering and Science. Primera edición. Editorial Chapman & Hall. Londres. 1994. ISBN 0 412 55960 9.

MIRAVETE, Antonio. Materiales Compuestos I. Primera edición. Publicado por INO Reproducciones S.A. Zaragoza. España. 2000. ISBN 84 921349 7 6.

SEO, Minwhan. Mechanical behavior of composite materials: elastic moduli, nonlinear behavior, and fracture. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Stevens Institute of Technology. 1997.

TSAI, Stephen W. Structural Behavior of Composite Materials. NASA CR-71, Julio 1964.

VAUGHAN, Denniss. Fiberglass Reinforcement. Handbook of composites. Segunda edición. Editorial Chapman & Hall. Londres. Inglaterra. 1998. pp131-155 ISBN 0 412 54020 7.