



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Síntesis y caracterización de las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica para cajas de impacto de automóviles

EDGAR JAVIER LOOR SOLÓRZANO

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR


OCTUBRE 2023

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Edgar Javier Loor Solórzano, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, octubre de 2023.



Edgar Javier Loor Solórzano
C.I.: 080390644-5

© 2023, Edgar Javier Loor Solórzano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo, titulado **Síntesis y caracterización de las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica para cajas de impacto de automóviles**, de responsabilidad del señor Edgar Javier Loor Solórzano, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos y legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba, Mgtr.

PRESIDENTE



Firmado electrónicamente por:
SOCRATES MIGUEL
AQUINO ARROBA

Ing. Santiago Alejandro López Ortiz, Mgtr.

DIRECTOR



Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO ALEJANDRO
LOPEZ ORTIZ

Ing. Edison Patricio Abarca Pérez, Mgtr.

MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:
EDISON PATRICIO
ABARCA PEREZ

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes, Mgtr.

MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:
JORGE ISAIAS
CAICEDO REYES

Riobamba, octubre 2023

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su constante apoyo.

Edgar Loor

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente al Gran Arquitecto del Universo, dado que sin él nada sería posible. A mis padres, José Loor y María Solórzano, por su apoyo incondicional en todo momento, sin importar las circunstancias. A mis hermanos, Leonardo y Selena, que brindan su ayuda en cualquier momento sin esperar nada a cambio. Además extendiendo mis agradecimientos a los ingenieros Santiago López, Patricio Abarca e Isaías Caicedo, por la guía prestada en el desarrollo de este trabajo.

Edgar Loor

TABLA DE CONTENIDO

| | Páginas |
|---|----------------|
| RESUMEN | xx |
| SUMMARY | xxi |
| CAPÍTULO I | |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 2 |
| <i>1.1.1 Situación de la problemática</i> | 2 |
| <i>1.1.2 Formulación del problema</i> | 5 |
| 1.2 Justificación de la investigación | 5 |
| 1.3 Objetivos | 5 |
| <i>1.3.1 Objetivo general</i> | 5 |
| <i>1.3.2 Objetivos específicos</i> | 6 |
| 1.4 Hipótesis | 6 |
| CAPÍTULO II | |
| 2 MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1 Marco referencial | 7 |
| 2.2 Bases teóricas | 9 |
| <i>2.2.1 Materiales compuestos</i> | 9 |
| <i>2.2.2 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos</i> | 11 |
| <i>2.2.3 Cajas de impacto</i> | 12 |
| <i>2.2.3.1 Triggers</i> | 13 |
| <i>2.2.4 Configuración de refuerzo en materiales compuestos laminados</i> | 13 |
| <i>2.2.4.1 Numero de capas</i> | 13 |
| <i>2.2.4.2 Orientación de fibras</i> | 14 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 2.2.5 | <i>Fracción volumétrica</i> | 15 |
| 2.2.6 | <i>Proceso de conformado de materiales compuestos</i> | 17 |
| 2.2.7 | <i>Técnicas de procesamiento</i> | 17 |
| 2.2.7.1 | <i>Moldeo por estratificación manual</i> | 18 |
| 2.2.7.2 | <i>Moldeo por transferencia de resina</i> | 18 |
| 2.2.7.3 | <i>Moldeo por vacío</i> | 19 |
| 2.2.7.4 | <i>Moldeo por compresión</i> | 19 |
| 2.2.8 | <i>Comportamiento mecánico</i> | 20 |
| 2.2.8.1 | <i>Ensayo de tracción</i> | 20 |
| 2.2.8.2 | <i>Modulo elástico</i> | 22 |
| 2.2.8.3 | <i>Coefficiente de Poisson</i> | 22 |
| 2.2.8.4 | <i>Carga máxima</i> | 23 |
| 2.2.8.5 | <i>Esfuerzo máximo</i> | 23 |
| 2.2.8.6 | <i>Porcentaje de elongación</i> | 23 |
| 2.2.9 | <i>Diseño de experimentos</i> | 23 |
| 2.2.9.1 | <i>Diseño factorial</i> | 25 |
| 2.2.9.2 | <i>Verificación de supuestos en análisis de varianza</i> | 27 |
| 2.3 | Identificación de variables | 28 |
| 2.4 | Matriz de operacionalización de variables | 28 |
| 2.5 | Matriz de consistencia | 29 |

CAPÍTULO III

| | | |
|------------|--|----|
| 3 | METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN | 32 |
| 3.1 | Tipo y diseño de la investigación | 32 |
| 3.2 | Método de la investigación | 32 |
| 3.3 | Enfoque de la investigación | 32 |
| 3.4 | Alcance de la investigación | 32 |
| 3.5 | Población | 33 |

| | | |
|---------------|--|----|
| 3.6 | Muestras | 33 |
| 3.7 | Técnica de recolección de datos | 34 |
| 3.8 | Tratamiento de datos | 34 |
| 3.9 | Sintetizado de material compuesto laminado | 34 |
| 3.9.1 | <i>Materiales principales: matriz y refuerzo</i> | 34 |
| 3.9.1.1 | <i>Resina epóxica</i> | 34 |
| 3.9.1.2 | <i>Fibra de vidrio</i> | 35 |
| 3.9.2 | <i>Herramientas y otros materiales</i> | 37 |
| 3.9.3 | <i>Proceso de síntesis de material compuesto laminado</i> | 38 |
| 3.9.3.1 | <i>Determinación experimental de densidad de fibra de vidrio</i> | 38 |
| 3.9.3.2 | <i>Fracción volumétrica de componentes del material compuesto laminado</i> | 40 |
| 3.9.3.3 | <i>Obtención de material compuesto laminado</i> | 40 |
| 3.10 | Laminados de material compuesto sintetizados | 44 |
| 3.11 | Caracterización de material compuesto laminado | 45 |
| 3.11.1 | <i>Probetas del material compuesto laminado</i> | 45 |
| 3.11.2 | <i>Ensayo de tracción</i> | 47 |
| 3.12 | Influencia de factores en el material laminado por diseño de experimentos | 49 |
| 3.12.1 | <i>Tipo de diseño factorial utilizado</i> | 49 |
| 3.12.2 | <i>Niveles, tratamientos y corridas en el diseño factorial</i> | 49 |
| 3.12.3 | <i>Modelo estadístico del diseño factorial</i> | 49 |
| 3.12.4 | <i>Hipótesis de interés del diseño factorial</i> | 50 |
| 3.12.5 | <i>Verificación de supuestos</i> | 50 |
| 3.12.5.1 | <i>Supuesto de normalidad</i> | 50 |
| 3.12.5.2 | <i>Supuesto de varianza constante</i> | 51 |
| 3.12.5.3 | <i>Supuesto de independencia</i> | 52 |
| 3.12.5.4 | <i>Transformación para la estabilización de varianza y normalidad de datos</i> | 52 |
| 3.13 | Simulación numérica de material compuesto lamiando | 53 |

| | | |
|---------------|--|-----------|
| 3.13.1 | Modelación y validación de material compuesto laminado..... | 54 |
| 3.13.1.1 | Geometría CAD y propiedades de material..... | 54 |
| 3.13.1.2 | Modelación laminados..... | 56 |
| 3.13.1.3 | Generación de malla y condiciones de contorno | 57 |
| 3.13.1.4 | Criterio de falla..... | 58 |
| 3.14 | Material compuesto laminado en cajas de impacto como propuesta | 60 |
| 3.14.1 | Geometría base de caja de impacto | 60 |
| 3.14.2 | Mallado de geometría | 61 |
| 3.14.3 | Condiciones de contorno..... | 62 |
| 3.14.4 | Contactos | 63 |
| 3.14.5 | Materiales | 64 |
| 3.14.6 | Modelación de cajas de impacto con material compuesto laminado | 66 |
| 3.14.7 | Controles en la simulación | 67 |
| 3.14.8 | Validación de calibración del modelo FEM de material compuesto | 68 |
| 3.15 | Criterios de evaluación de resistencia al impacto en cajas de impacto | 70 |
| 3.16 | Optimización de parámetros de diseño para caja de impacto | 72 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 73 |
| 4.1 | Resultados de caracterización de material compuesto laminado..... | 73 |
| 4.1.1 | Resultados de configuración A: laminado de 8 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}$ | 74 |
| 4.1.2 | Resultados de configuración B: laminado de 8 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}$ | 76 |
| 4.1.3 | Resultados de configuración C: laminado de 8 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 30^{\circ}/\pm 60^{\circ}$ | 78 |
| 4.1.4 | Resultados de configuración D: laminado de 12 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}$ | 80 |
| 4.1.5 | Resultados de configuración E: laminado de 12 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}$ | 82 |
| 4.1.6 | Resultados de configuración F: laminado de 12 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 30^{\circ}/\pm 60^{\circ}$ | 84 |
| 4.2 | Análisis de resultados de caracterización | 86 |
| 4.3 | Validación del material compuesto por modelación numérica | 89 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.3.1 | <i>Casi isotropía en laminados</i> | 92 |
| 4.4 | Influencia de ángulo de orientación de fibra y numero de capas en el material compuesto por diseño de experimentos (DOE) | 93 |
| 4.4.1 | <i>Datos experimentales</i> | 93 |
| 4.4.2 | <i>Verificación de supuestos</i> | 94 |
| 4.4.2.1 | <i>Verificación de supuesto de normalidad</i> | 94 |
| 4.4.2.2 | <i>Supuesto de varianza constante</i> | 96 |
| 4.4.2.3 | <i>Supuesto de independencia</i> | 97 |
| 4.4.3 | Análisis de varianza ANOVA | 97 |
| 4.4.4 | <i>Interpretación de efectos activos</i> | 98 |
| 4.4.5 | <i>Verificación de la calidad del modelo estadístico del diseño factorial</i> | 100 |
| 4.5 | Evaluación de la hipótesis | 100 |

CAPÍTULO V

| | | |
|---------|---|-----|
| 5 | PROPUESTA | 102 |
| 5.1 | Aplicación de material compuesto laminado en caja de impacto | 102 |
| 5.1.1 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración A</i> | 103 |
| 5.1.2 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración B</i> | 105 |
| 5.1.3 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración C</i> | 107 |
| 5.1.4 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración D</i> | 109 |
| 5.1.5 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración E</i> | 111 |
| 5.1.6 | <i>Resultados de modelo de caja de impacto con configuración F</i> | 113 |
| 5.1.7 | <i>Resultados de aplicación de material compuesto laminado</i> | 115 |
| 5.1.7.1 | <i>Mecanismos de falla</i> | 115 |
| 5.1.7.2 | <i>Influencia de la configuración del material</i> | 116 |
| 5.2 | Optimización de diseño de caja de impacto | 118 |
| 5.2.1 | <i>Optimización por diseño de geometría</i> | 118 |
| 5.2.1.1 | <i>Evaluación de desempeño de absorción de energía</i> | 119 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.2.1.2 | <i>Influencia de la geometría</i> | 128 |
| 5.2.2 | <i>Optimización por aplicación de triggers</i> | 132 |
| 5.2.2.1 | <i>Evaluación de desempeño de absorción de energía</i> | 135 |
| 5.2.2.2 | <i>Influencia de la implementación de triggers</i> | 139 |
| 5.3 | Análisis de modelo de caja de impacto con mejor desempeño | 141 |
| 5.4 | Implementación de caja de impacto optimizada en barra de parachoques | 142 |
| 5.4.1 | <i>Condiciones para la simulación numérica</i> | 143 |
| 5.4.2 | <i>Materiales</i> | 145 |
| 5.4.3 | <i>Comparación de resultados</i> | 145 |
| 5.5 | Verificación de resultados simulados | 148 |
| | CONCLUSIONES | 149 |
| | RECOMENDACIONES | 151 |
| | GLOSARIO | |
| | BIBLIOGRAFÍA | |
| | ANEXOS | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Tabla 1-2: | Propiedades de fibras comunes | 11 |
| Tabla 2-2: | Propiedades de matrices poliméricas comunes | 12 |
| Tabla 3-2: | Tabla ANOVA de diseño factorial a x b | 25 |
| Tabla 4-2: | Tabla ANOVA de diseño factorial a x b | 26 |
| Tabla 5-2: | Matriz de operacionalización de variable dependiente e independiente..... | 28 |
| Tabla 6-2: | Matriz de consistencia de variable independiente y dependiente..... | 29 |
| Tabla 1-3: | Características de la población de probetas de material compuesto..... | 33 |
| Tabla 2-3: | Grupos de muestras de material compuesto laminado | 33 |
| Tabla 3-3: | Características y especificaciones técnicas de resina epóxica | 35 |
| Tabla 4-3: | Características y especificaciones técnicas de fibra de vidrio..... | 36 |
| Tabla 5-3: | Herramientas y otros materiales utilizados | 37 |
| Tabla 6-3: | Densidades experimentales de muestras de la fibra de vidrio..... | 39 |
| Tabla 7-3: | Masa y volúmenes de refuerzo y matriz por laminado..... | 41 |
| Tabla 8-3: | Características de laminados sintetizados..... | 45 |
| Tabla 9-3: | Tabla de transformaciones de la..... | 53 |
| Tabla 10-3: | Criterio Jacobiano para calidad de malla..... | 57 |
| Tabla 11-3: | Propiedades de lámina fibra de vidrio y resina epóxica | 64 |
| Tabla 12-3: | Parámetros adicionales de carta de material tipo 54 | 65 |
| Tabla 13-3: | Propiedades para material tipo 20 | 66 |
| Tabla 14-3: | Parámetros de controles..... | 68 |
| Tabla 1-4: | Resumen comparativo de resultados experimentales y simulados..... | 89 |
| Tabla 2-4: | Matriz de diseño..... | 94 |
| Tabla 3-4: | Residuos y predichos..... | 94 |
| Tabla 4-4: | Residuos y predichos con transformación | 95 |
| Tabla 5-4: | Análisis de varianza | 98 |
| Tabla 6-4: | Comparación de valores de significancias calculadas | 101 |
| Tabla 1-5: | Criterios de desempeño en la absorción de energía..... | 117 |
| Tabla 2-5: | Resultados de optimización por geometría con configuración A..... | 130 |
| Tabla 3-5: | Resultados de optimización por geometría con configuración B..... | 131 |
| Tabla 4-5: | Resultados de optimización por geometría con configuración C..... | 131 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Tabla 5-5: | Resumen de criterios en la implementación de triggers | 140 |
| Tabla 6-5: | Parámetros de materiales | 145 |
| Tabla 7-5: | Comparación de modelos de barra de parachoques | 146 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 1-1: | Variación en el mercado de materiales compuestos con refuerzo de fibras | 3 |
| Figura 2-1: | Materiales en un automóvil | 4 |
| Figura 1-2: | Comparación de materiales compuestos de distinta matriz..... | 10 |
| Figura 2-2: | Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo | 10 |
| Figura 3-2: | Caja de impactos o crash box: a) Geometría típica, b) Ubicación en el vehículo.... | 13 |
| Figura 4-2: | Laminado simétrico y antisimétrico..... | 15 |
| Figura 5-2: | Fracción en volumen vs fracción en peso de diferentes fibras | 16 |
| Figura 6-2: | Proceso de estratificación manual..... | 18 |
| Figura 7-2: | Proceso de moldeo de infusión de resina por vacío | 19 |
| Figura 8-2: | Proceso de moldeo por compresión | 20 |
| Figura 9-2: | Máquina de ensayo universal | 21 |
| Figura 10-2: | Diagrama de esfuerzo – deformación unitaria..... | 22 |
| Figura 11-2: | Clasificación de los distintos tipos de diseños experimentales | 24 |
| Figura 1-3: | Propiedades de distintas clases de fibra de vidrio..... | 36 |
| Figura 2-3: | a) Muestras de fibra de vidrio, (b) pesaje (b), y c) determinación de volumen | 39 |
| Figura 3-3: | a) Áreas de corte, b) colocación de cinta adhesiva, y c) cortes del tejido | 40 |
| Figura 4-3: | Remoción de cinta adhesiva | 41 |
| Figura 5-3: | Aplicación de agente desmoldante | 42 |
| Figura 6-3: | Preparación de la resina epóxica..... | 42 |
| Figura 7-3: | Proceso de estratificación manual de laminados | 43 |
| Figura 8-3: | Laminados con diferentes configuraciones (continuación) | 45 |
| Figura 9-3: | Dimensiones de especímenes utilizados | 46 |
| Figura 10-3: | Especímenes para caracterización de laminados | 47 |
| Figura 11-3: | Maquina universal de ensayos utilizada..... | 48 |
| Figura 12-3: | Especímenes sometidos a ensayos de tracción | 48 |
| Figura 13-3: | Geometría tipo <i>Shell</i> de probeta | 54 |
| Figura 14-3: | Curva esfuerzo-deformación de lamina | 55 |
| Figura 15-3: | Diagrama polar de propiedades elásticas de la lámina..... | 56 |
| Figura 16-3: | Flujo de proceso de modelación de laminado | 57 |
| Figura 17-3: | Condiciones de contorno en espécimen de laminado | 58 |
| Figura 18-3: | Codificación de Falla en laminado por <i>IRF</i> | 59 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 19-3: | Esfuerzo normal de laminado con configuración a 0/90/45 | 60 |
| Figura 20-3: | Esquema del a) sistema de parachoques con b) caja de impacto | 60 |
| Figura 21-3: | Característica de malla | 61 |
| Figura 22-3: | Condiciones de contorno de la simulación..... | 63 |
| Figura 23-3: | Configuración de contactos..... | 64 |
| Figura 24-3: | Definición de parámetros de laminado MCL_B..... | 67 |
| Figura 25-3: | Modelo FEM para validación a) geometría, b) carta del material | 69 |
| Figura 26-3: | Resultado experimental y simulado para calibración..... | 70 |
| Figura 27-3: | Fuerza-deformación en deformación a) progresiva y b) catastrófica..... | 71 |
| Figura 28-3: | Niveles de optimización de diseño de caja de impacto | 72 |
| Figura 1-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-A..... | 75 |
| Figura 2-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-B | 77 |
| Figura 3-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-C | 79 |
| Figura 4-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-D | 81 |
| Figura 5-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-E..... | 83 |
| Figura 6-4: | Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-F..... | 85 |
| Figura 7-4: | Cuevas de esfuerzo-deformación a) ingenieriles y b) verdaderos | 87 |
| Figura 8-4: | Esfuerzo de fluencia y módulo de Young | 88 |
| Figura 9-4: | Resultados experimentales y simulados..... | 90 |
| Figura 10-4: | Visualización de falla en laminado de configuración A | 90 |
| Figura 11-4: | IRF de las capas constituyentes en laminado de configuración A..... | 92 |
| Figura 12-4: | Representación polar de las propiedades en las distintas configuraciones del material..... | 93 |
| Figura 13-4: | Prueba de normalidad a) sin y b) con transformación..... | 96 |
| Figura 14-4: | Prueba de a) varianza constante y b) homogeneidad | 97 |
| Figura 15-4: | Independencia de observaciones..... | 97 |
| Figura 16-4: | Efectos principales..... | 99 |
| Figura 17-4: | Interacción completa de factores | 100 |
| Figura 1-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_A..... | 104 |
| Figura 2-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_B..... | 106 |
| Figura 3-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_C..... | 108 |
| Figura 4-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_D | 110 |
| Figura 5-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_E..... | 112 |
| Figura 6-5: | Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_F | 114 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Figura 7-5: | Mecanismos de falla en las distintas configuraciones..... | 115 |
| Figura 8-5: | Comparación de a) Fuerza inicial máxima, b) energía absorbida, c) absorción de energía específica y d) factor de eficiencia de aplastamiento..... | 116 |
| Figura 9-5: | Diseños de diferentes geometrías de cajas de impacto | 118 |
| Figura 10-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-01..... | 120 |
| Figura 11-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-02..... | 120 |
| Figura 12-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-03..... | 121 |
| Figura 13-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-04..... | 121 |
| Figura 14-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-05..... | 122 |
| Figura 15-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-06..... | 122 |
| Figura 16-3: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-07..... | 123 |
| Figura 17-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-08..... | 123 |
| Figura 18-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-09..... | 124 |
| Figura 19-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-10..... | 124 |
| Figura 20-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-11..... | 125 |
| Figura 21-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-12..... | 125 |
| Figura 22-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-13..... | 126 |
| Figura 23-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-14..... | 126 |
| Figura 24-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-15..... | 127 |
| Figura 25-5: | Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-16..... | 127 |
| Figura 26-5: | Comparación de fuerza inicial máxima por diseño de geometría..... | 128 |
| Figura 27-5: | Comparación de energía absorbida por diseño de geometría | 129 |
| Figura 28-5: | Comparación de absorción de energía específica por diseño de geometría | 129 |
| Figura 29-5: | Comparación de eficiencia de aplastamiento por diseño de geometría..... | 130 |
| Figura 30-5: | Modelo de trigger CI-T01 (grupo 1)..... | 132 |
| Figura 31-5: | Modelo de trigger CI-T02 (grupo 1)..... | 133 |
| Figura 32-5: | Modelo de <i>trigger</i> CI-T03 (grupo 1) | 133 |
| Figura 33-5: | Modelo de <i>trigger</i> CI-T04 (grupo 2) | 133 |
| Figura 34-5: | Modelo de <i>trigger</i> CI-T05 (grupo 2) | 134 |
| Figura 35-5: | Modelo de <i>trigger</i> CI-T06 (grupo 2) | 134 |
| Figura 36-5: | Modelo de trigger CI-T07 (grupo 3)..... | 134 |
| Figura 37-5: | Modelo de trigger CI-T08 (grupo 3)..... | 135 |
| Figura 38-5: | Modelo de trigger CI-T08 (grupo 3)..... | 135 |
| Figura 39-5: | Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 1..... | 136 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Figura 40-1: | Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 2..... | 137 |
| Figura 41-5: | Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 3..... | 138 |
| Figura 42-5: | Graficas de fuerza-deformación de grupo a) 1, b) 2, y c) 3..... | 139 |
| Figura 43-5: | Comparación de a) Fuerza inicial máxima, b) energía absorbida, c) absorción de absorción de energía específica y d) factor de eficiencia de aplastamiento..... | 141 |
| Figura 44-5: | Esquema de modelo de caja de impacto optimizado | 142 |
| Figura 45-5: | Sistema de barra de parachoques con caja de impacto optimizada..... | 143 |
| Figura 46-3: | Condiciones para simulación numérica del sistema de parachoques | 144 |
| Figura 47-5: | Comportamiento de modelo de optimizado y original..... | 146 |
| Figura 48-5: | Deformación de cajas de impacto en sistemas de barra de parachoques | 147 |
| Figura 49-5: | Relación de energía Hourglass y energía interna..... | 148 |

ANEXOS

ANEXO A: Informes de laboratorio

ANEXO B: Curvas esfuerzo-deformación de acero

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue sintetizar y caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica, como material alternativo en cajas de impacto de automóviles, mediante simulación numérica. La caracterización del material se realizó mediante ensayos de tracción, utilizando muestras con porcentaje volumétrico de refuerzo y matriz de 40% y 60% respectivamente. Estos porcentajes están basados en el tipo y arquitectura del refuerzo utilizado. Las muestras se agruparon en 6 grupos distintos, variando en cada uno la configuración del material en cuanto a orientación de fibra y número de capas. El análisis de influencia de dichos factores sobre el material laminado se realizó con la herramienta estadística de diseño de experimentos. Para validar el material, se modeló considerando cada aspecto propio del mismo, y simuló por el método del elemento finito. Las diferentes configuraciones de material se aplicaron en un modelo rectangular de caja de impacto mediante simulación, para posteriormente, utilizando las 3 mejores configuraciones con mejor desempeño en cuanto absorción de energía, se realizó la optimización del modelo basado en el diseño de geometría y aplicación de *triggers*. Se observó que la de orientación de fibra tiene mayor influencia en el material en relación con el número de capas. Se obtuvo un error por debajo del 10% entre resultados experimentales y simulados, en base al modelado del material. Con una orientación de fibra a 0°/90° y 8 capas, y aplicando una geometría hexagonal cónica y *trigger* al inicio de la caja de impacto se alcanzó un mejor desempeño. Se concluye que el material compuesto estudiado es idóneo para atizarse como sustituto en cajas de impacto. Se recomienda utilizar los resultados obtenidos en este trabajo en futuros estudios para llevar a cabo pruebas reales de impacto en automóviles.

Palabras clave: <MATERIAL COMPUESTO LAMINADO>, <FIBRA DE VIDRIO>, <RESINA EPÓXICA>, <CAJA DE IMPACTO>, <VEHÍCULOS>, <SIMULACIÓN NUMÉRICA>, <MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO>



Firmado electrónicamente por:
LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS



0116-DBRA-UPT-IPEC-2023

26-09-2023

SUMMARY

The objective of this research was to synthesize and characterize the mechanical properties of a laminated composite material with glass fiber reinforcement in epoxy resin matrix, as an alternative material for automotive crash boxes, by means of numerical simulation. The characterization of the material was carried out by tensile tests, using samples with volumetric percentages of reinforcement and matrix of 40% and 60% respectively. These percentages are based on the type and architecture of the reinforcement used. The samples were grouped into 6 different groups, varying in each one the material configuration in terms of fiber orientation and number of layers. The analysis of the influence of these factors on the laminated material was performed with the statistical tool of design of experiments. To validate the material, it was modeled considering each aspect of the material and simulated by the finite element method. The different material configurations were applied in a rectangular impact box model by simulation, and then, using the 3 best configurations with the best performance in terms of energy absorption, the optimization of the model was performed based on the geometry design and application of triggers; it was observed that the fiber orientation has a greater influence on the material in relation to the number of layers. An error of less than 10% was obtained between experimental and simulated results, based on the modeling of the material. With a fiber orientation at 0°/90° and 8 layers, and applying a conical hexagonal geometry and trigger at the beginning of the impact box, a better performance was achieved. It is concluded that the composite material studied is suitable to be used as a substitute in impact boxes. It is recommended to use the results obtained in this work in future research to carry out real impact tests in automobiles.

Keywords: <LAMINATED COMPOSITE MATERIAL>, <GLASS FIBER>, <EPOXIC RESIN>, <IMPACT BOX>, <VEHICLES>, <NUMERIC SIMULATION>, <FINITE ELEMENT METHOD>, <FINITE ELEMENT METHOD>.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

Una parte fundamental en lo que a diseño mecánico concierne, es el área de materiales, ya que estos juegan un papel clave a la hora de ser aplicados en diferentes componentes. Dentro de la amplia gama de materiales existentes, existe un grupo en particular que en los últimos años han empezado a tomar importancia, es de ahí que surgen nuevas investigaciones relacionados a los mismos.

Estos materiales en cuestión son los materiales compuestos, que son producto de la combinación de dos o más materiales, obteniendo así uno con mejores propiedades. Al igual que con los metales, los materiales compuestos se clasifican en diferentes tipos, principalmente en dependencia de sus componentes.

Los materiales compuestos con refuerzo de fibra en matriz polimérica son los más utilizados en diversas áreas de la industria donde se requiere obtener una buena relación de peso-resistencia, tal como en industria automotriz, donde la fibra de carbono, kevlar y vidrio son las predominantes en lo que a estos materiales se refiere.

Considerando que la fibra de carbono y kevlar son relativamente más caras que la de vidrio, los materiales compuestos a base de fibra de vidrio con resina epóxica o poliéster, actuando como matriz, tienden a emplearse más en componentes automotrices, tales como parachoques, capós, tableros, puertas, neumáticos, patillas de frenos y embragues, buscando principalmente sustituir al acero, ya que poseen buena resistencia mecánica, química y térmica, además de una menor densidad.

En este trabajo se sintetiza por conformado manual un material compuesto a base de refuerzo de fibra de vidrio de tipo tejido plano clase *E*, en matriz polimérica de resina epóxica, como material alternativo en cajas de choques de automóviles. En base a la literatura científica disponible, se plantea un valor de fracción volumétrica adecuado a utilizarse, con la finalidad de determinar las principales propiedades mecánicas del material compuesto propuesto en distintas configuraciones, variando así la orientación del refuerzo y número de capas o laminas, por medio de por ensayos de laboratorio a tracción, y así observar así los cambios que se registran al variar dichos parámetros por la metodología de diseño de experimentos. Así mismo, el material se valida modelándolo por el método del elemento finito o *FEM*.

Mediante un enfoque por simulación basado en el método del elemento finito, que ahorra la necesidad de construir especímenes para ensayar, se estudia las diferentes configuraciones planteadas aplicadas a cajas de impacto mediante impacto a baja velocidad y así analizar la dependencia de los resultados en base a la variación de dichas configuraciones. Previo a la utilización de la herramienta mencionada,

el modelo es calibrado para propósitos de validación y comprobación con información disponible en la literatura.

En base a los resultados obtenidos, se determina las configuraciones con mejor desempeño y se propone la optimización del diseño, basado en el cambio de geometría de sección y aplicación de triggers en las cajas de impactos para observar el efecto que dichos cambios tienen sobre el comportamiento de las mismas. Finalmente se incorpora en un sistema de barra de parachoques para su comparación con el modelo original.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Situación de la problemática

Un material compuesto está formado por al menos dos fases o componentes distintos, de lo surge un nuevo material con propiedades nuevas y mejoradas. Entre estas dos fases se distingue la matriz y el refuerzo (Esnaola, 2016). La clasificación de los materiales compuestos dependerá principalmente del tipo de matriz utilizado, pudiendo ser en principio de tipo cerámica, metálica o polimérica; o en su defecto del tipo de refuerzo, donde dominan principalmente los refuerzos a base de fibras y material particulado.

En un material compuesto, sus propiedades mecánicas pueden verse influenciadas por factores externos, como producto de la síntesis del material, o por factores que tienen que ver con las características propias de sus materiales constituyentes. Defectos en el proceso de síntesis de los materiales compuestos, como porosidades, agrietamientos o una deficiente unión entre matriz y refuerzo, puede dar origen a afectar negativamente las propiedades mecánicas del material (Ogin, Brondsted y Zangenberg, 2016). Por otra parte, dependiendo del tipo de matriz y refuerzo, arquitectura, geometría y tamaño del refuerzo, fracción volumétrica de matriz y refuerzo o la compatibilidad entre estos, pueden así mismo marcar una diferencia en las propiedades mecánica del material (Zweben, 2015; Sawalha et al., 2022).

Realizando una comparativa en cuanto a la producción a nivel mundial de materiales compuestos de matrices poliméricas y refuerzos de fibras, o FRPs por sus siglas en inglés, en relación con el acero, que es el material más ampliamente utilizado hoy en día en cualquier industria, se puede evidenciar que este último sobrepasa por mucho la producción del primero. Datos estimados apuntan que solo en el 2020 se produjeron alrededor 1878 millones de toneladas de acero a nivel mundial (M'barek Badr et al., 2022), un numero por encima de las 7.7 millones de toneladas de FRPs producidas en el mismo año, previendo un aumento a 10.3 millones de toneladas para el 2027 (GlobeNewswire, 2020). Con el acero por su parte, se estima que aumente la demanda de este a 2500 millones de toneladas para el año 2050 (Hasanbeigi et al., 2022, p. 2).

Dentro del continente, América de Norte mantendrá un ritmo de creciente constante dentro del mercado de materiales compuestos con refuerzo de fibras en los próximos años, mientras que para la parte Sur del continente, aunque también presentará un crecimiento constante, este será mucho menor en comparación con su contraparte norte, tal como se aprecia en la figura 1-1. En definitiva, apoyados por datos estadísticos y estimaciones, Sudamérica se posiciona como una región donde la producción de materiales compuestos esta por detrás de otras regiones.

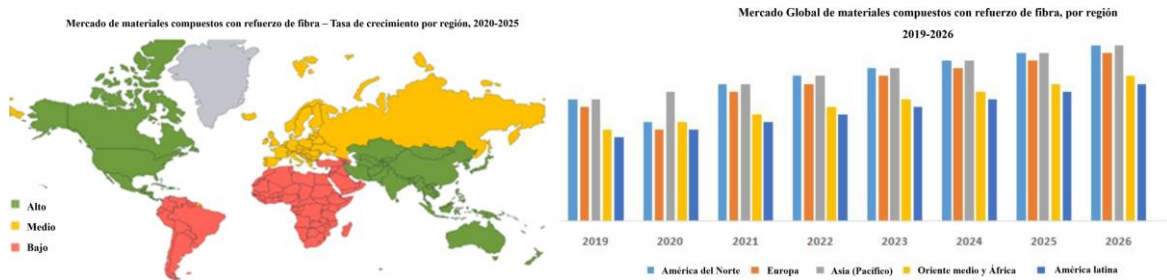


Figura 1-1: Variación en el mercado de materiales compuestos con refuerzo de fibras

Fuente: (Maximize Market Research, 2020; Mordor Intelligence, 2022)

En el Ecuador el tema de los materiales compuestos no esta tan desarrollado como en otros países, donde la investigación sobre el tema es fomentada mediante inversión pública y privada. Las pocas investigaciones realizadas sobre materiales compuestos en el país se basan en trabajos de grado en instituciones de educación superior principalmente, a pesar del hecho que dentro del país existe una creciente necesidad del uso de estos materiales en los últimos años. Por citar un ejemplo, dentro de la industria automotriz de vehículos de pasajeros.

En el país, según datos de la CINAIE (2022), entre enero y octubre del año 2022 se ensamblaron 12671 vehículos, en los cuales se usaron al menos un 19% de las autopartes fabricadas localmente. Y es que en el país también se cuentan con empresas metalmecánicas dedicadas al rubro de la fabricación de autopartes y elementos estructurales, como chasis, baldes, pisos, estructuras de asientos, parachoques, etc., donde el tema de materiales compuestos aportaría mucha ventaja a la industria misma, tal como se ve en otros países.

Y es que, en la fabricación de vehículos de pasajeros, estos son construidos en su mayor parte en aceros y otros metales principalmente, como muestra la figura 2-1, donde en promedio utiliza alrededor de 900 kilogramos de estos materiales, distribuido principalmente en la carrocería, transmisión, suspensión y otros componentes (FerrePro, 2020).

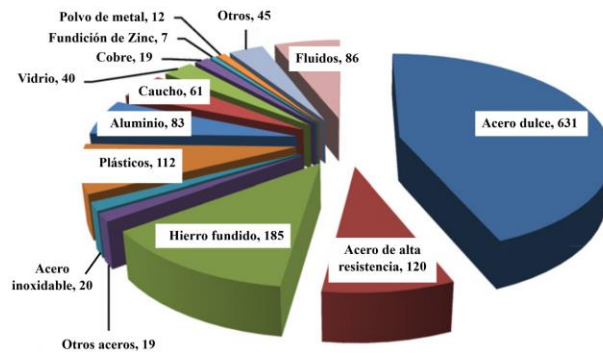


Figura 2-1: Materiales en un automóvil

Fuente: (Mohammad, 2011)

Realizado por: Loor, 2023

La preferencia en el uso de estos materiales para la mayoría de las partes estructurales de un automóvil no se basa principalmente en que puedan llegar a ser mejores que los materiales compuestos con refuerzos de fibras durante su desempeño de trabajo, sino que su uso surge debido a que con estos se predice de cierta manera mejor el comportamiento ante eventos de impacto por ejemplo, lo que les da una cierta ventaja frente a los materiales compuestos.

Un importante punto para tomar en cuenta es que al usarse principalmente acero y otros metales en la construcción de un automóvil, esto tendera a aumento su masa, lo que se traduce en un mayor consumo de combustible y por ende un aumento de emisiones de CO₂. Y es que se debe considerar, que estudios han mostrado que por cada 100 kilogramos que se reduzca en la masa de un vehículo, significara una disminución de entre 7.5 y 10 gramos de CO₂ emitido por kilómetro recorrido (Fontaras et al., 2017).

De lo mencionado hasta el momento, es imperativo la implementación de materiales alternativos dentro del diseño del automóvil, y los materiales compuestos a base de matrices poliméricas con refuerzo de fibras son la mejor opción, ya que estos materiales aparte de caracterizarse por poseer bajas densidades, traen consigo otras cualidades en cuando a su implementación en ciertas partes del automóvil, como es la disminución en la complejidad de montaje, libertad y multifuncionalidad en el proceso de diseño, y mejoras frente a posibles colisiones (Bru, 2018). Así mismo, dada los avances de la industria automotriz, es importante el empleo de herramientas que faciliten la puesta a prueba de estos materiales en situaciones de trabajo, tal como lo son las herramientas de simulación numérica.

1.1.2 Formulación del problema

¿Es factible sintetizar y caracterizar de las propiedades mecánicas de un material compuesto de tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio y matriz de resina epóxica para modelarse por simulación numérica y utilizarse como material alternativo en cajas de impactos de automóviles?

1.2 Justificación de la investigación

Justificación teórica: en esta investigación se abordarán tópicos relacionado con el campo de los materiales compuestos, los cuales en la actualidad están siendo el foco de atención de diversos campos ingenieriles y no ingenieriles, por las excepcionales propiedades que ofrecen en comparación a otros materiales ampliamente utilizados. La información que se proporciona en este trabajo es pertinente y concisa sobre ciertos puntos claves del tema en particular, que puede ser aprovechada por estudiantes e investigadores que desarrollen sus investigaciones en esta área en cuestión.

Justificación práctica: mediante ensayos tracción de laboratorio se caracteriza las propiedades básicas de un material compuesto con matriz polimérica y refuerzo de fibra, analizando los parámetros más influyentes en sus propiedades durante sintetizado del material en cuestión, para obtener así la configuración más idónea, lo permitirá plantearse como una alternativa de material para poderse utilizar en las cajas de impacto de los automóviles, y reemplazar el uso de aceros y materiales metálicos comunes. La aplicación práctica de la herramienta numérica facilitara el análisis de comportamiento de los componentes donde se aplique el material,

Justificación metodológica: utilizando herramientas de simulación por el método del elemento finito (*FEM*) se podrá evaluar el desempeño del material en estudio como propuesta en un modelo de estructura de caja de impacto a baja velocidad. En la simulación se tomará en cuenta parámetros como orientación de fibra, fracción volumétrica, numero de capas para la modelación del material compuesto, y el diseño de la estructura, que tienen un efecto directo sobre el comportamiento de la misma, es así que la metodología seguida brinda una oportunidad para que sirva como una guía metodológica en el estudio de estos materiales aplicando herramientas numéricas, dado los pocos estudios sobre el tema en el país.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Sintetizar y caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica para cajas de impacto de automóviles mediante simulación numérica.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Determinar el porcentaje de fracción volumétrica conveniente a utilizarse en el material compuesto propuesto mediante revisión y análisis de la literatura científica.
- Obtener muestras del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante un proceso de conformado por estratificación manual para su caracterización mecánica.
- Evaluar el comportamiento mecánico del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante ensayos experimentales por tracción para su modelación por simulación numérica.
- Analizar los efectos de configuración del refuerzo en el material compuesto laminado para su comparación mediante enfoque estadístico de diseño de experimentos.
- Evaluar el comportamiento ante aplastamiento de estructuras de caja de impacto mediante simulación numérica como propuesta de utilización del material compuesto laminado basado en diseño de sus geometrías y aplicación de *triggers*.

1.4 Hipótesis

Las propiedades mecánicas de un material compuesto de tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica sí se verán influenciadas en dependencia de la manipulación de ciertos factores en la síntesis y caracterización del mismo.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Marco referencial

En el campo de materiales compuesto muchos factores inciden en sus propiedades finales, y por ende en su comportamiento, los cuales se deben considerar al momento de su síntesis, y de allí que nacen muchos estudios referentes al tema, tal como los que se mencionan a continuación.

En la investigación realizada por Oliveira et al. (2017), se compararon las propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos a base de dos tipos de matrices poliméricas distintas, resina epóxica y de poliéster. Como refuerzo se utilizó fibra de eucalipto en diferentes valores de fracción volumétrica, variando desde 0 hasta 50%.

Entre los resultados obtenidos, se observó que con la matriz de tipo poliéster se evidenciaban mejores propiedades sobre la epóxica. En cuanto al refuerzo utilizado, se notó que este no aportaba mayor beneficio al material sin importar la cantidad utilizada, por el contrario, disminuía los valores de esfuerzos máximo que de por sí las propias matrices exhibían sin refuerzo alguno. Los módulos de elasticidad por el contrario mostraron cierta variación en ambos tipos de matrices, en donde a mayor fracción volumétrica de refuerzo estos aumentaban, habiendo una tendencia a aumentar más para el caso de la resina epóxica. Con la resina de poliéster se alcanzó valores mayores de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad. Por último, por microscopia de barrido electrónico se observó una débil adhesión entre matrices y refuerzo, lo cual es común en materiales compuestos con refuerzo naturales, que requieren ser procesados de una forma adecuada para ser utilizados.

Por otro lado, en un estudio similar realizado por Rohen et al., (2018), donde del mismo modo realizó una comparación de los mismos tipos de matrices antes mencionadas, epóxica y poliéster, pero utilizando otro tipo de fibra como refuerzo, como lo es la fibra de cáñamo, se observó que el material compuesto utilizando resina epóxica mostraba una resistencia superior, obteniendo un mayor esfuerzo máximo. Mientras que utilizando resina de poliéster el material exhibía mayor rigidez, lo que significaba valores de módulo de elasticidad más altos. La implementación de fibra de cáñamo en el material varió desde 0 a 30% de fracción volumétrica, donde a mayor volumen se observaron mejores resultados de esfuerzos máximos para el material con la resina epóxica, lo que no paso con el poliéster, cuyos valores se mantuvieron casi constantes sin importar la cantidad de refuerzo.

En el trabajo desarrollado por Subhedar et al. (2020), se estudió la influencia de la orientación de fibra y el número de capas en las propiedades a flexión de un laminado a base de resina epóxica y fibra de carbono unidireccional. El laminado fue sintetizado con cuatro tipos de configuraciones diferentes,

utilizando ocho capas en cada uno, variando así la orientación de fibra dentro de sus capas en ángulos de 0° y $\pm 45^\circ$. La primera configuración se basó en orientar todos sus ocho capas a 0° ; para la segunda configuración se usó una secuencia de 0, 45, 0, 0, 0, 0, -45, 0; para la tercera configuración una secuencia de 0, 0, 0, 45, -45, 0, 0, 0; mientras que para la cuarta se configuró a 0, 45, -45, 0, 0, 45, -45, 0.

De las cuatro configuraciones de laminados estudiadas, aquella con todas sus capas de fibra unidireccional orientadas a 0° se logró valores más altos en cuanto a esfuerzos de flexión. Por el contrario, con la cuarta configuración se consiguieron valores más altos de deformación a flexión. Los resultados obtenidos experimentalmente fueron comparados con resultados simulados por *FEA*, mostrando una buena correlación de resultados.

Ali y Anjaneyulu (2018), en su estudio evaluaron el efecto de volumen de fibra-matriz en materiales compuestos en ensayos a tracción, utilizando fibra de carbono unidireccional como refuerzo y resina epóxica como matriz. Los valores de volumen de fibra y resina variaron de 40% a 80% con incrementos de 10%. A partir de los resultados obtenidos se seleccionó la opción con mejores resultados, y mediante el método del elemento finito se modeló el material compuesto laminado para ser aplicado en un sistema de suspensión de doble horquilla de un automóvil. Por simulación se evaluó el material laminado con cuatro capas a diferentes orientaciones de fibra, desde 0° a 90° , con incrementos de 10° . En cada configuración, el ángulo de orientación de fibra se mantenía para cada una de cuatro capas.

De los resultados obtenidos por los ensayos de tracción, los autores observaron que la opción con un volumen de fibra-matriz de 70-30 se obtenían resultados satisfactorios, utilizando dichos valores para las subsecuentes simulaciones. A partir del análisis por simulación numérica aplicando una variación en la orientación de fibra en los laminados probados, se encontró que la configuración a 0° mostraba un mejor desempeño al usarse en el sistema de suspensión estudiado, obteniendo un valor para el factor inverso inverso (*IRF*) de 0.96609, el cual es un valor importante en el análisis de fallo de materiales compuestos. Utilizando el material en estudio se consiguió una reducción de peso del sistema de suspensión del 53.28%.

Entre los distintos estudios relacionados con la aplicación de materiales compuestos, vale la pena mencionar al trabajo de tesis de maestría de Richardson y Bahaadini (2015), donde llevo a cabo la modelación, aplicación y simulación por herramientas numéricas de un material compuesto en un crash box o caja de impacto de geometría cilíndrica, y una viga de impacto lateral de la puerta de un automóvil. Su metodología se basó primeramente en la calibración del modelo de material compuesto,

mediante información disponible en la literatura. Posterior, dichos componentes fueron sometidos a cargas dinámicas y estáticas para su respectivo estudio.

Basado en los resultados obtenidos, el autor considera que aparte del material, otros factores, como por ejemplo los *triggers*, tienen gran influencia en el desempeño de la caja de impacto. Además que la utilización de material compuesto en elementos estructurales de vehículos, como caja de impacto y viga de impacto lateral de la puerta para este caso, en la característica de absorción de energía absorción de energía de impacto puede jugar un papel importante el tipo de material, orientación de fibra y geometría de los componentes. El autor da a notar que mediante la aplicación de herramientas de simulación numérica en materiales compuestos, siguiendo una correcta calibración del modelo, se permite estudiar de forma razonable el diseño y comportamiento de componentes contra predicciones teóricas de los mismos.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos, o también conocidos como *composites*, son definidos como materiales formados por al menos dos fases distintas, que, al combinar sus propiedades, dan lugar a las nuevas propiedades del material en cuestión. La matriz, o fase continua, trabaja como un aglomerante, que aparte de proteger al refuerzo, o fase discontinua, proporciona rigidez y transmite las cargas externas a las que podría estar sometido el conjunto (Esnaola, 2016). La clasificación de los materiales compuestos puede estar basada en diferentes factores, pero principalmente esta se tiende a realizar en base al tipo de refuerzo y matriz que lo constituyen.

En base al tipo de matriz, se tiene materiales compuestos de matriz cerámica, metálica y polimérica. Los de tipo cerámico son generalmente fuertes y rígidos, pero a la vez quebradizos; los metálicos poseen valores de resistencia y módulos de elasticidad intermedios, junto con una buena ductilidad; y por último, los poliméricos tienen resistencias y módulos de elasticidad bajo.

Como generalización, los polímeros tienen bajas resistencias y el módulo de Young es alto, las cerámicas son fuertes, rígidas y quebradizas, y los metales tienen resistencias y módulos intermedios junto con una buena ductilidad, es decir, no son quebradizos (Park y Seo, 2011). Un resumen comparativo de algunas propiedades generales de estos tres tipos de materiales compuestos se especifica en la figura 1-2.

| | Cerámico | Metálico | Polimérico |
|--------------------------------|----------|-----------------------------|------------|
| Dureza | ↑ | ↓ | ↓ |
| Modulo elástico | ↑ | ↑ | ↓ |
| Resistencia a alta temperatura | ↑ | ↓ | ↓ |
| Expansión térmica | ↓ | ↑ | ↑ |
| Ductilidad | ↓ | ↑ | ↑ |
| Resistencia a la corrosión | ↑ | ↓ | ↓ |
| Resistencia al desgaste | ↑ | ↓ | ↓ |
| Conductividad eléctrica | ↔ | ↑ | ↓ |
| Densidad | ↓ | ↑ | ↓ |
| Conductividad térmica | ↔ | ↑ | ↓ |
| ↑ Tendencia a valores altos | | ↓ Tendencia a valores bajos | |

Figura 1-2: Comparación de materiales compuestos de distinta matriz

Fuente: Park y Seo, 2011

Realizado por: Loor, 2023

Park y Seo (2011) así mismo consideran, que, basado en el refuerzo, que es la fase que determinará principalmente las propiedades del nuevo material, se tiene materiales compuestos fibrosos y particulados, pudiéndose así mismo realizar una subclasificación dependiendo el caso, con lo que se puede tener materiales compuestos de tipo laminado de una sola capa o multicapa, con refuerzo de fibra continua o discontinua y de tipo laminado o híbrido respectivamente. Por el lado de los materiales compuesto particulado, la subclasificación está basada en el arreglo u orientación de las partículas de refuerzo. Para una mejor comprensión de lo mencionado, una esquematización de la clasificación y subclasificación de los materiales compuestos basado en el refuerzo se muestra en la figura 2-2.

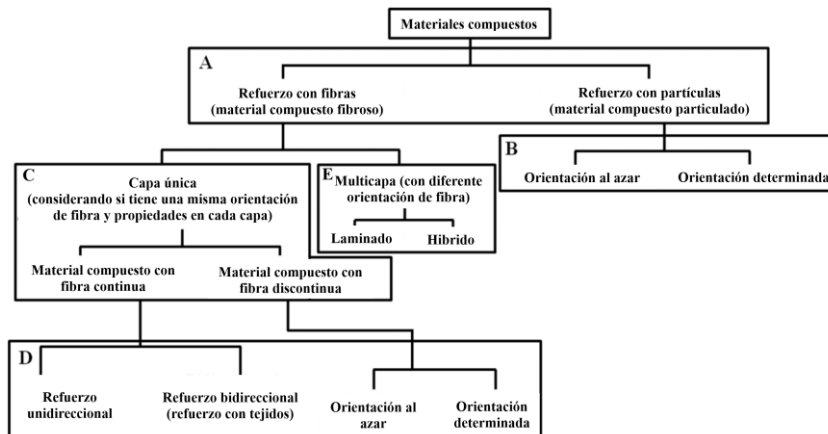


Figura 2-2: Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo

Fuente: Park y Seo, 2011

Realizado por: Loor, 2023

2.2.2 Propiedades mecánicas de los materiales compuestos

Las propiedades mecánicas de un material son aquellas que se presentan como respuesta ante una carga conectada. Mediante estas propiedades se logra caracterizar y distinguir a un cierto material (Srinivas, Lakshumu y Raju, 2017). En los materiales compuestos se logra la mayoría de sus propiedades mecánicas en base a una unión fuerte entre el refuerzo, con sus notables características en fuerza y rigidez, con la matriz, que tiende a ser más débil y menos rígida. Una disminución en las propiedades mecánicas de un material compuesto puede darse principalmente por defectos en la fabricación de estos, tales como porosidades, agrietamiento por contracción o pobre adhesión entre la matriz y fibra (Ogin, Brondsted y Zangenberg, 2016).

En los materiales compuestos, factores como el tipo, geometría y tamaño del refuerzo; fracción volumétrica de refuerzo; la adhesión interfacial entre el refuerzo y la matriz; así como los métodos y condiciones de conformado del material, llegan a afectar directamente en sus propiedades mecánicas (Zweben, 2015; Sawalha et al., 2022). Considerando a los materiales compuestos de tipo fibroso, donde destacan principalmente las fibras naturales y sintéticas como refuerzos, se puede distinguir varios tipos de estas, con ciertas diferencias en sus principales propiedades mecánicas, tal como se detalla en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Propiedades de fibras comunes

| Fibra | Módulo de Young (GPa) | Elongación (%) | Resistencia a tensión (MPa) | Densidad (g/cm ³) |
|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Fibras naturales | | | | |
| Coco | 4.0-6.0 | 15.0-30.0 | 10 | 1.2 |
| Ramio | 44-128 | 2.0-3.8 | 12-17 | 1.5 |
| Cáñamo | 70 | 1.6 | 8 | 1.48 |
| Sisal | 9.0-38.0 | 2.0-14 | 11 | 1.33-1.5 |
| Yute | 10-30 | 1.5-1.8 | 12 | 1.3-1.46 |
| Lino | 27.6-80 | 1.2-3.2 | 7 | 1.4-1.5 |
| Algodón | 5.5-12.6 | 3.0-10.0 | 8-25 | 1.5-1.6 |
| Piña | 34.5-82.5 | 2.0 | 413-1627 | 1.4 |
| Fibras sintéticas | | | | |
| Carbono | 230.0-40.0 | 1.4-1.8 | 4000 | 1.4 |
| Vidrio | 73 | 3 | 2400 | 2.55 |
| Vidrio – clase E | 70.0 | 2.5-3.0 | 2000-3500 | 2.5 |

Fuente: Taiwo, Yahya y Haron, 2019

Realizado por: Loor, 2023

Las matrices de tipo poliméricas, que se utilizan comúnmente en conjunto con refuerzos de tipo fibra, por su parte se distinguen por poseer propiedades mecánicas con valores relativamente menores al de los refuerzos, donde su principal papel se basa en proteger y mantener unido el arreglo de fibras, así como transferir las cargas a las que está sometido el material compuesto a las mismas. Se distinguen principalmente dos tipos de matrices poliméricas, las termoplásticas o *thermoplastics*, y las termoestables o *thermosets*.

La principal característica de las matrices termoplásticas es que pueden fundirse y endurecerse de forma reversible en función de la temperatura de trabajo. Por otra parte, las termoestables pueden inducirse permanentemente con la interacción de un segundo componente, que comúnmente se conoce como un endurecedor o agente de curado, haciendo a este tipo de matrices las más utilizadas en aplicaciones aeroespaciales, construcción o automovilísticas (Manaia, Manaia y Rodrigues 2019). En la tabla 2-2 se describen las principales propiedades físicas y mecánicas de algunas de las matrices poliméricas que más se utilizan.

Tabla 2-2: Propiedades de matrices poliméricas comunes

| Polímero | Precio/kg (USD) | Densidad (g/cm ³) | Tensión de falla (%) | Resistencia a tensión (MPa) | Módulo de Young (GPa) |
|----------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Thermoplastics | | | | | |
| PP | 1.65 | 0.89–0.92 | 20–400 | 30–40 | 1.1–1.6 |
| HDPE | 1.76 | 0.94–0.96 | 2–130 | 14.5–38 | 0.4–1.5 |
| PS | 2.14 | 1.04–1.06 | 1–2.5 | 25–69 | 4–5 |
| PLA | 2.42 | 1.21–1.25 | 2.5–6 | 21–60 | 0.35–3.5 |
| Thermosets | | | | | |
| Epóxica | - | 1.1–1.4 | 1–6 | 35–100 | 3–6 |
| Poliéster | - | 1.2–1.5 | 4–7 | 40–90 | 2–4.5 |

Fuente: Manaia, Manaia y Rodrigues, 2019

Realizado por: Loor, 2023

2.2.3 Cajas de impacto

Las cajas de impacto o *crash boxes* son estructuras de pared delgada comúnmente instalados entre el parachoques y rieles laterales en vehículos liviano de pasajeros, aunque puede también encontrárselos en la parte traera de estos. Son fabricados principalmente en metal, como aceros y aluminios, aunque en los últimos años en base a los desarrollos tecnológicos e investigativos, nuevos materiales, como polímeros, están siendo empleados, con el fin de mejorar la relación de peso en el vehículo.

El propósito de estos elementos de seguridad pasiva, junto con el parachoques y barra del parachoques, es la absorción o disipación de energía cinética durante una colisión, para que esta no se transmita a las partes subsecuentes del vehículo, y por ende a los ocupantes de este, y así reducir el grado de daños en ambas partes. Este elemento está pensado principalmente para trabajar en rangos de velocidades bajas, entre 2.5 ± 1 km/h y 15 ± 1 km/h, que son velocidades en las que comúnmente se producen las colisiones dentro de la ciudad. En la figura 3-2a y b se muestra el aspecto típico que puede tener una caja de impacto y la ubicación dentro del cuerpo del vehículo respectivamente.

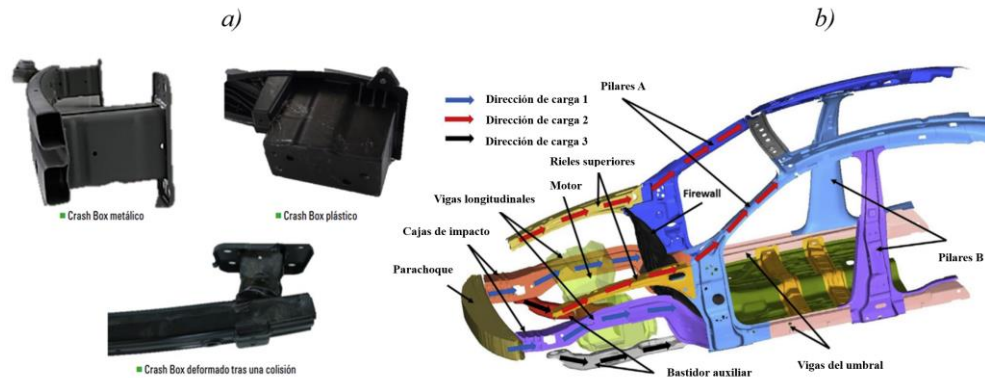


Figura 3-2: Caja de impactos o crash box: a) Geometría típica, b) Ubicación en el vehículo

Fuente: Revista Autocrash, 2018; Vangi, 2020

En el diseño de una caja de impacto, varias son los factores que influyen en el desempeño de su función, que pueden variar desde su geometría, dimensiones, iniciadores de la deformación, material, condiciones de carga, etc.

2.2.3.1 Triggers

En muchos de los casos, con el fin de evitar modos de fallo catastróficos en una caja de impacto al momento de la colisión, que se caracteriza por un incremento repentino de fuerza para luego disminuir abruptamente, en el diseño de las cajas de impactos se implementan iniciadores de deformación o *triggers*, que permiten una deformación progresiva, lo que se refleja en una curva de fuerza-deformación más esterilizada, con una reducción en la fuerza inicial que da paso al aplastamiento.

2.2.4 Configuración de refuerzo en materiales compuestos laminados

En el campo de los materiales compuestos la forma como se configure estos al momento de su síntesis, tendrán un impacto directo en la propiedades y desempeño estructural que luego este exhibirá. En los materiales compuestos de tipo laminado, que son producto del arreglo o agrupación de varias capas o láminas de fino espesor hechas a partir de un refuerzo, generalmente fibras, dispuestas a diferentes configuraciones, la degradación, penetración y propagación de grietas pueden verse influido por parámetros tales como tipo, longitud u orientación de las fibras, e incluso el espesor del laminado o números de capas, los cuales terminaran determinando su desempeño durante y después de la exposición a diversas condiciones de trabajo (Bazli et al., 2019).

2.2.4.1 Numero de capas

El número de capas hace referencia a la cantidad de láminas presente en el material compuesto, especialmente al tratarse de laminados. En un laminado, el espesor dependerá del número de láminas o capas que constituyen este. A partir de la relación mostrada en la ecuación 1, es posible estimar el espesor final que tendrá en material compuesto laminado luego del proceso de curado o secado,

tomando en consideración algunos parámetros tanto del refuerzo de fibra como la matriz de resina (Gurit, s.f.).

$$E_{Laminado} = \frac{AW_f}{\rho_f * V_f * 1000} * N \quad [1]$$

Donde AW_f es el peso por área de la capa de refuerzo de fibra utilizada en el lamina en unidades de g/m^2 , ρ_f es la densidad de la fibra en unidades de g/cm^3 , V_f es la fracción volumétrica utilizada en el material, y N es el número de láminas o capas que componen el laminado.

Anto, Mía y Hasib (2019), afirman que la rigidez de un laminado es en parte dependiente del número de capas, por lo que se puede inferir que la resistencia del material, sin importar el tipo de fibra de refuerzo ni geometría del mismo, estará en función de su número de capas, lo que en ensayos de laboratorio se verá reflejado en los resultados numéricos que se obtendrán.

2.2.4.2 Orientación de fibras

La orientación de las fibras es la forma en que estas están posicionadas sobre cada lamina o capa del laminado, formando así un cierto ángulo con un eje determinado. En el diseño de materiales compuestos laminados, esta orientación no siempre es uniforme, pudiendo así tener un laminado con diferentes orientaciones de fibras por cada lamina, dependiendo de la aplicación o propiedades que se busque obtener en el producto final.

La orientación de las fibras puede ir entre los 0° y 180° , en donde se considera que si se tiene una orientación mayor a 90° se puede especificar que se tiene una orientación con ángulo de valor negativo, es decir que una orientación de fibra a 135° , se trataría como una orientación a -45° . Las orientaciones estándar en el diseño de laminados con fibras son 0° , 90° y 45° , que son usadas generalmente en la industria de los materiales compuestos.

La orientación de fibra a 0° es la más frecuente, ya que se orienta en dirección de la carga a la que se somete el material, proporcionando así más resistencia al mismo. Con la orientación a 90° se puede evitar el aplastamiento o pandeo del material cuando a este se le aplica una carga. Es común la utilización de capas con esta orientación de fibras junto con capas de 0° para tener un arreglo bidimensional o de tipo *cross-ply*, consiguiéndose propiedades similares en ambas direcciones. Con orientaciones a 45° , es común mantener una paridad en capas a este ángulo, es de decir, colocar una capa con orientación a $+45^\circ$ adyacente a una de -45° , lo que contribuye contribuyen a la rigidez y la resistencia a la torsión del material.

En base a la combinación de las capas en un laminado a diferentes orientaciones es posible obtener laminados con propiedades casi isotrópicas (Rock West Composites, 2018), lo que facilita su aplicabilidad al utilizarse como materiales en simulaciones numéricas.

Un laminado con capas a distinta orientación de fibra puede ser simétrico o antisimétrico. En un laminado simétrico se tiene generalmente un numero impar de capas, cuya orientación de fibra es simétrico con respecto a la línea de centro del laminado, habiendo una capa idéntica en material y espesor a una distancia igual por debajo de dicho centro. En la codificación de laminado simétricos se suele utilizar como subíndice la letra *s* para indicar la simetría, es decir, $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$ (Campbell, 2010). Mientras que, con un laminado antisimétrico, aunque se tiene capas de un mismo material y espesor, la orientación de fibra de estas es contrario por encima y debajo de la línea de centro del laminado, es decir, orientadas a un ángulo $+\theta$ y $-\theta$.

La figura 4-2 presenta una ilustración grafica de la diferencia entre un laminado con orientación de capas de tipo simétrico y antisimétrico.

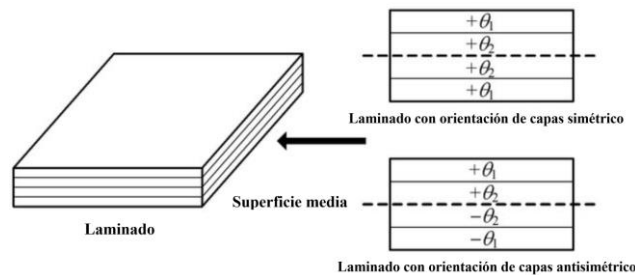


Figura 4-2: Laminado simétrico y antisimétrico

Fuente: Zhang, Zhang y Zhu, 2011

2.2.5 Fracción volumétrica

El termino de fracción volumétrica hace referencia al porcentaje en volumen de cada constituyente que forman un compuesto específico. En el campo de los materiales compuesto con refuerzo de fibras, es común tomar en cuenta proporción de volumen de fibras en relación con el volumen total del material, lo que se conoce como fracción volumétrica de fibras.

En la obtención de un material compuesto es habitual la existencia de vacíos que se forman entre la matriz y refuerzo durante el proceso de curado, los cuales en la teoría se asumen como nulos, ya que no repercuten en gran medida el desempeño del material. Es por ello que, asumiendo un material compuesto ideal con refuerzo de fibras con la inexistencia de vacíos, se tiene una relación de fracción volumétrica de la fibra y fracción volumétrica de la matriz igual a 1, o 100% traducido en porcentaje, del volumen total del material compuesto, tal como se muestra con la siguiente relación:

$$V_{fibra} + V_{matriz} = 1 \quad [2]$$

Por facilidad en la manufactura de materiales compuesto se suele trabajar en lugar de fracción volumétrica, con la fracción en peso de los constituyentes. Cabe acotar que, si se tiene un valor determinado en fracción de volumen de fibra, esto no será directamente igual en fracción de peso, ya se necesita realizar una conversión de volumen a peso. Para la conversión de fracción de volumen de una fibra determinada a fracción de peso y viceversa, se puede utilizar las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$W_f = \frac{(\rho_f/\rho_m)*V_f}{1+(\rho_f/\rho_m-1)*V_f} \quad [3]$$

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + (1-W_f)/\rho_m} \quad [4]$$

Dónde W_f es la fracción en peso de la fibra, V_f la fracción en volumen de la fibra, ρ_f la densidad de la fibra, y ρ_m la densidad de la matriz.

En la figura 5-2 se muestra una gráfica de conversión de diferentes valores de fracción en volumen a peso y viceversa de fibra, considerando valores estándar de densidad de los principales tipos disponibles en el mercado.

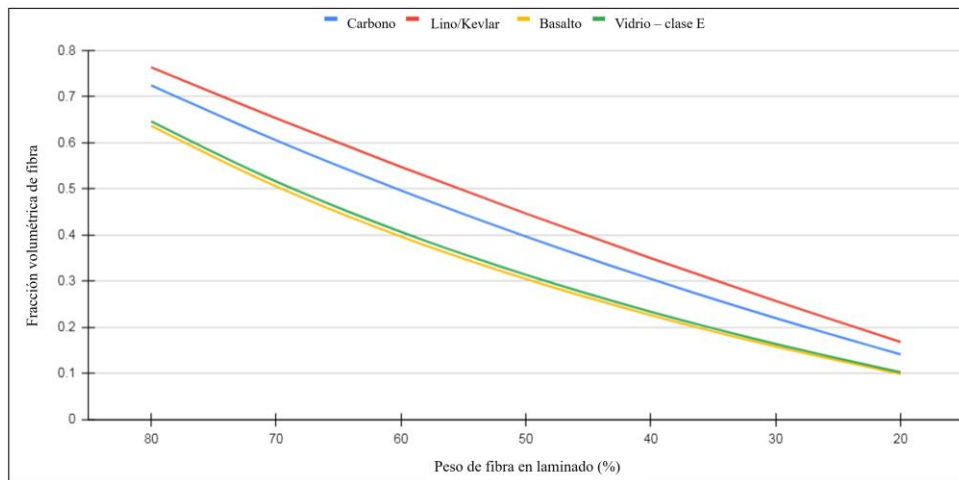


Figura 5-2: Fracción en volumen vs fracción en peso de diferentes fibras

Fuente: Rogers, 2022

La fracción volumétrica de fibra es también un punto clave que influye en gran medida en las propiedades mecánicas de una lámina tales como módulo de *Young* longitudinal, coeficiente de Poisson y esfuerzos, por ejemplo, lo que así mismo repercutirá en el laminado final compuesto por

dichas laminas, como tal, es importante utilizar una cantidad volumétrica adecuada de fibra (Buragohain, 2017).

En teoría, un valor máximo de fibra en fracción volumétrica que se debería utilizar en la síntesis de materiales compuestos a base de fibra es de 80%, siempre y cuando se cumpla con la condición de tener un arreglo con un empaquetamiento uniforme de la fibra dentro de la matriz, lo que es difícil en la práctica por la variada naturaleza de los diferentes tipos de fibra que pueden llegar a utilizarse.

En la mayoría de las investigaciones con referencia a los resultados obtenidos en función de la fracción volumétrica de refuerzo de fibra a utilizado, hay un punto de coincidencia en que un rango óptimo se encuentra entre 20% y 70%, ya que un valor fuera de ese rango tiende a afectar críticamente las propiedades mecánicas del material en cuestión (Rogers, 2022; Ali y Anjaneyulu, 2018).

En un material compuesto con un arreglo de fibras unidireccionales, donde comúnmente se tiene un empaquetamiento de fibra más ajustado, un valor típico de fracción volumétrica que se utiliza es de 65%; mientras que, si hay un cambio en dicha configuración de arreglo, este valor tiende a disminuir (Clarke, 1996).

Por otro lado, al trabajar con un refuerzo de fibra de tipo tejido bidireccional se suele utilizar un valor de entre 40% (Clarke, 1996) y 45% (Bunsell y Renard, 2005). Finalmente, para un arreglo donde la fibra está dispuesta de forma aleatoria, sin ninguna orientación en particular, 20% es la fracción de volumétrica recurrente (Clarke, 1996).

2.2.6 *Proceso de conformado de materiales compuestos*

Los procesos de conformado en los materiales compuestos permiten obtener un componente o forma final por medio de la combinación de refuerzos de fibra y las matrices de resina, buscando principalmente que exista la mínima cantidad de defectos o vacíos en el material y una máxima humectación de la fibra con la resina.

La selección del correcto proceso de conformado para una aplicación en particular debe considerarse en base a parámetros tales como costos de producción, cantidad, tamaño, forma y complejidad en la geometría del componente o forma a producir (Kuppusamy, Rout y Kumar, 2020).

2.2.7 *Técnicas de procesamiento*

Varios son las técnicas tradicionales utilizados en el conformados de los materiales compuesto con los que se logran obtener resultados de calidad, entre las que destacan principalmente la estratificación manual o *hand lay-up*, infusión al vacío, moldeo por transferencia de resina y moldeo por compresión.

Otras técnicas, como la pultrusión, por ejemplo, son procesos automatizados, para producción de componentes a gran escala (Jamir, Majid & Khasri, 2018).

2.2.7.1 Moldeo por estratificación manual

El proceso por estratificación manual o *hand lay-up* es el método más simple basado en la fabricación de materiales compuestos mediante molde abierto. El método consiste principalmente en la colocación manual del refuerzo de fibra en un molde, para posteriormente con la ayuda de una brocha aplicar la matriz de resina sobre esta. Con rodillos manuales, especiales para trabajo con matrices de resina, se procede a realizar una distribución uniforme y homogénea de la misma sobre la superficie del refuerzo, para así conseguir una mejor humectación y un espesor requerido en el material. Finalmente, pasado el tiempo requerido de endurecimiento parcial de la resina, el laminado se deja curar a condiciones atmosféricas estándar durante un periodo determinado, que normalmente es indicado por el fabricante de la resina (Jamir, Majid y Khasri 2018).



Figura 6-2: Proceso de estratificación manual

Fuente: Kuppusamy, Rout y Kumar, 2020

Con este método se puede obtener piezas o geometrías con un bajo costo de inversión (Kuppusamy, Rout y Kumar, 2020). En la figura 6-2 se muestra un esquema del proceso a realizar en un moldeo por estratificación manual.

2.2.7.2 Moldeo por transferencia de resina

En este proceso la resina es enviada al laminado por medio la presión de vacío generada por un dispositivo de vacío. El proceso inicia colocando la fibra seca y los agentes o películas de desmoldeo sobre la superficie de un molde, posteriormente se sella dentro de una bolsa de vacío. Mediante la fuerza de vacío se extrae la resina contenida en un recipiente llevándola a través de la línea de alimentación del sistema hasta donde se encuentra la fibra. El tiempo de la impregnación de la fibra con la resina, dependerá de la cantidad que se utiliza de esta primera.

Este es un proceso de moldeo que es conveniente en la manufactura de grandes componentes y que demandar un excelente acabado para su utilización, tales como piezas para turbinas eólicas, barcos, vehículos y trenes (Roy et al., 2021). En la figura 7-2 se esquematiza el proceso de infusión por vacío con los diferentes elementos involucrados en este.

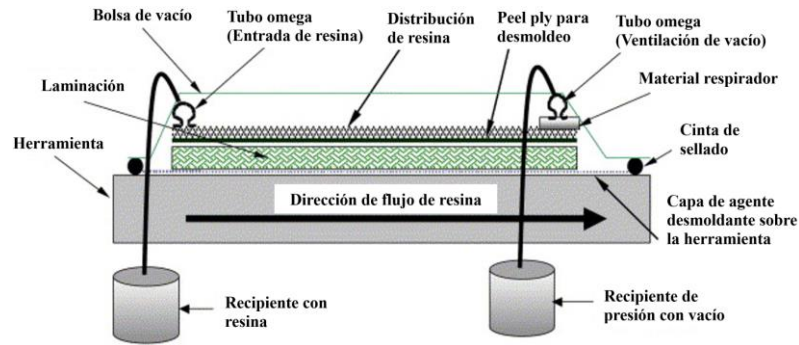


Figura 7-2: Proceso de moldeo de infusión de resina por vacío

Fuente: Bender, Schuster y Heider, 2006

2.2.7.3 Moldeo por vacío

El moldeo por vacío o *vacuum bag* es una extensión del moldeo por estratificación manual, con la diferencia que se coloca el conjunto del refuerzo de fibra impregnado con resina dentro de una película plástica sellada, donde el aire almacenado dentro de la bolsa es extraído mediante una bomba de vacío, consiguiendo la consolidación del laminado. Comúnmente se colocan también mantas de absorción dentro de la bolsa para absorber el exceso de resina en el material.

Ya que no todos los tipos de resina son aptas para trabajarse con este proceso, principalmente se utiliza con resinas epóxicas y fenólicas; la resina de poliéster y ésteres de vinilo no se recomiendan usar debido a la excesiva extracción de estireno de la resina por parte de la bomba de vacío. Hay que considerar que con este proceso es natural que el coste de manufactura incremente, debido a la mano de obra, componentes y materiales a utilizar (Jamir, Majid y Khasri, 2018).

2.2.7.4 Moldeo por compresión

A diferencia del proceso por moldeo al vacío, en el moldeo por compresión la temperatura juega un papel crucial en la consolidación del material compuesto. El material toma la forma final, antes de haber alcanzado un curado total, al aplicar una carga de compresión con una prensa de metal calentada a una determinada temperatura. Dicha temperatura varía entre 40 °C y 50 °C para un moldeo en frío, y entre 80 °C y 100 °C para un moldeo en caliente (Jamir, Majid y Khasri, 2018). Generalmente se hace uso de equipos programable para controlar el tiempo de presión y la aplicación de temperatura (Kuppusamy, Rout y Kumar, 2020). En la figura 8-2 se observa un esquema de la ejecución del proceso.

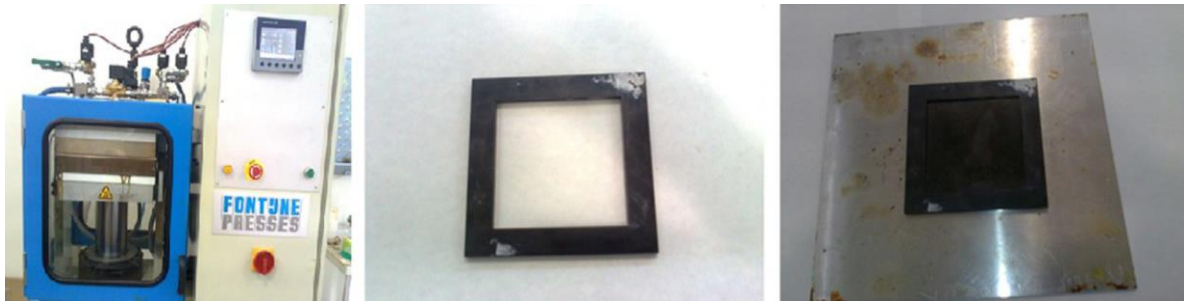


Figura 8-2: Proceso de moldeo por compresión

Fuente: Kuppusamy, Rout y Kumar, 2020

2.2.8 *Comportamiento mecánico*

En el campo de los materiales, el comportamiento mecánico es la conducta que estos exhiben al estar sometidos a cargas externas, alterando así su estado de equilibrio. Estas cargas pueden ser de tipo compresivo, de tensión, flexión o una combinación de estas tres. El efecto de estas cargas sobre los elementos se traduce en deformaciones elásticas y plásticas, hasta alcanzar un punto de falla o rotura del material (Figueroa, Ordoñez y Carvajal de la Osa, 2019).

Para el estudio de comportamiento mecánico de un material en particular, es necesario someter a dicho material a ensayos mecánicos de laboratorio, con lo que se conseguirá, dependiendo del tipo de ensayo, algunas propiedades principales como resistencia a rotura, elasticidad, plasticidad, dureza, tenacidad, fragilidad, rigidez, ductilidad, maleabilidad, cohesión, resistencia al de impacto, fatigar, deformación, etc. (Saif, 2022), con lo que se facilita el proceso de diseño de estructuras, elementos o piezas.

2.2.8.1 *Ensayo de tracción*

El ensayo de tracción o tensión es un procedimiento experimental realizado en condiciones estáticas en el cual una muestra o probeta de un material determinado es sometido a una carga uniaxial de tracción que incrementa gradualmente hasta originarse una falla por fractura.

Para llevar a cabo este ensayo se requiere de una máquina que pueda generar cargas axiales graduales sobre la probeta del material, lo que se consigue con una máquina de ensayo universal, como la que se muestra en la figura 9-2, donde la probeta es colocada y ajustada entre dos mordazas de la máquina para dar inicio al ensayo. Este tipo de máquina viene comúnmente implementada con celdas de cargas y controladores para medir el valor de carga y desplazamiento respectivamente. Estos datos luego son enviados a un sistema de adquisición de datos en un computados para ser analizados (Alvarez y Orozco, 2022).



Figura 9-2: Máquina de ensayo universal

Fuente: Goodno y Gere 2016

Producto de la aplicación de la carga gradual aplicada en la probeta, se genera una elongación por cada dato de esta carga aplicada, donde a partir de ellos se calcula el esfuerzo ingenieril, que es la relación entre la carga de tensión y el área de la probeta; y la deformación ingenieril, que indica la proporción de estiramiento de la probeta con referencia a su longitud original (Aristizabal y Manrique, 2017). Estas relaciones son expresadas en las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [5]$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad [6]$$

Dónde σ es el esfuerzo ingenieril, F el valor de cada intervalo de carga aplicada a la probeta, A_0 es el promedio del área transversal de la probeta, ε es la deformación ingenieril unitaria en dirección de la carga aplicada, l la longitud de la probeta entre cada intervalo de carga, y l_0 la longitud inicial de la probeta ensayada.

Luego del ensayo de tracción y con los datos generados de esfuerzo y deformación, se construye un diagrama de esfuerzo – deformación unitaria, que representa una característica particular para dicho material ensayado, proporciona información de relevancia sobre sus principales propiedades mecánicas y tipo de comportamiento (Goodno y Gere, 2016). Un ejemplo de este tipo de diagrama, obtenido a partir del ensayo de una muestra de acero estructural, se muestra en la figura 12-2, donde se señalan las partes y puntos claves de interés para su análisis.

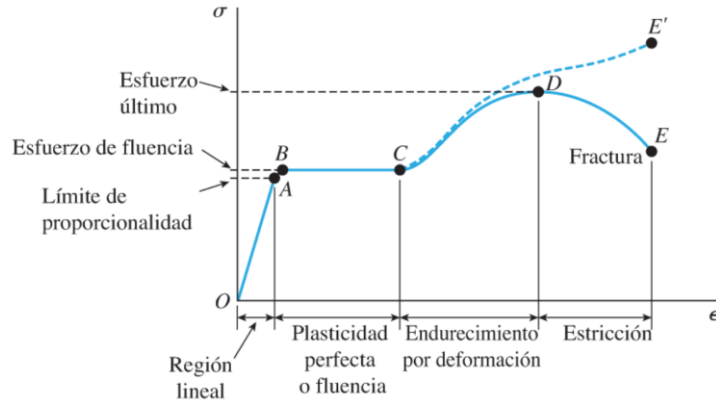


Figura 10-2: Diagrama de esfuerzo – deformación unitaria

Fuente: Goodno y Gere, 2016

2.2.8.2 Modulo elástico

El módulo elástico, o comúnmente conocido como módulo de *Young*, es considerado como una medida de rigidez de un material, con lo que definirá cuanta carga este podrá soportar sin sufrir una deformación permanente. En el diagrama de esfuerzo – deformación unitaria este representa la pendiente que se forma por debajo del límite de proporcionalidad, dentro de la región lineal elástica mostrada en la figura 10-2. Su valor puede ser calculado mediante la relación mostrada en la ecuación 7.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad [7]$$

Donde $\Delta\sigma$ es la diferencia de esfuerzos dentro de la zona lineal elástica, y $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de deformación de cada valor de esfuerzo dentro de dicha misma zona (Aristizabal y Manrique, 2017). Sus unidades son típicamente expresadas en psi, ksi o pascales, dependiendo si se trabaja con el sistema de unidades inglés o internacional (Goodno y Gere, 2016).

2.2.8.3 Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson representa la relación entre la deformación transversal y longitudinal que sufre un sólido al ser sometido a una carga de estiramiento. Esta relación viene dada por la ecuación 8.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad [8]$$

Dónde ε_t y ε_l son la deformación transversal y longitudinal respectivamente. De la ecuación mostrada se puede inferir que esta relación es adimensional. En materiales completamente frágiles este valor es cero, mientras que, para materiales completamente elásticos, este puede llevar a valores de hasta 0.7 (Poplavko, 2019).

En la relación mostrada anteriormente, el signo menos compensa el hecho que las deformaciones transversales y longitudinales generalmente tienen signos opuestos dada el sentido de deformación de las mismas durante el ensayo (Goodno y Gere, 2016).

2.2.8.4 *Carga máxima*

Es la fuerza máxima que soporta la probeta del material ensayado hasta romperse. La carga que se aplica en un ensayo de tracción va incrementando de forma gradual hasta alcanzar un punto donde se presenta un modo de falla en el material, produciendo la fractura en la probeta (Aristizabal y Manrique, 2017).

2.2.8.5 *Esfuerzo máximo*

El esfuerzo máximo o resistencia a la tracción define el punto en el ensayo donde se alcanza un valor máximo de esfuerzo justo antes que la probeta alcance la fractura (Kar et al., 2022).

Esta propiedad es una de las más importante para describir el comportamiento mecánico de un material nuevo en estudio (Arumugaprabu et al., 2019). En materiales compuestos con refuerzo de fibras, esta propiedad está ligada con factores como la resistencia de la fibra, longitud de fibra, y la capacidad de unión con la matriz u otras fibras (Bajpai, 2018).

2.2.8.6 *Porcentaje de elongación*

El porcentaje de elongación, o deformación en la fractura, es la relación de cambio entre la longitud inicial y la longitud después de la fractura en una probeta de un material específico sometida a ensayo de tracción (Djafari, 2017). Esta relación está definida por medio de la ecuación 9.

$$\%EL = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad [9]$$

Dónde L_0 es la longitud inicial de la probeta y L_f es la longitud luego de la de fractura.

2.2.9 *Diseño de experimentos*

En estadística, un diseño de experimentos hace referencia a la realización de una o varias pruebas buscando la caracterización de los factores que tienen un grado mayor de influencia dentro un proceso o ensayo en particular, esto mediante la evaluación de la variable de respuesta, obtenida por la variación, ya sea de forma controlada o deliberada, de los factores estudiados. En el proceso es necesario que se pueda cuantificar u observar los cambios en la variable de respuesta para llevar a cabo el análisis estadístico (Melo, López y Melo, 2020).

En base al diseño y análisis de experimentos se puede dar solución a típicos problemas en varios campos tales como en la selección de materiales con mejor desempeño, comparación de instrumentos

de medición, determinación de factores que influyen en las características de un producto, análisis de condiciones de operación, entre otros (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Varios son los tipos de diseños experimentales utilizados a la hora del estudio de situaciones o problemas particulares, con lo que se hace necesario escoger el adecuado para cada situación. En general, basado en el objetivo del experimento, los diseños experimentales se agrupan en cinco grupos. La figura 11-2 muestra un diagrama que enumera cada uno de estos grupos con los distintos tipos de diseños de experimentos.

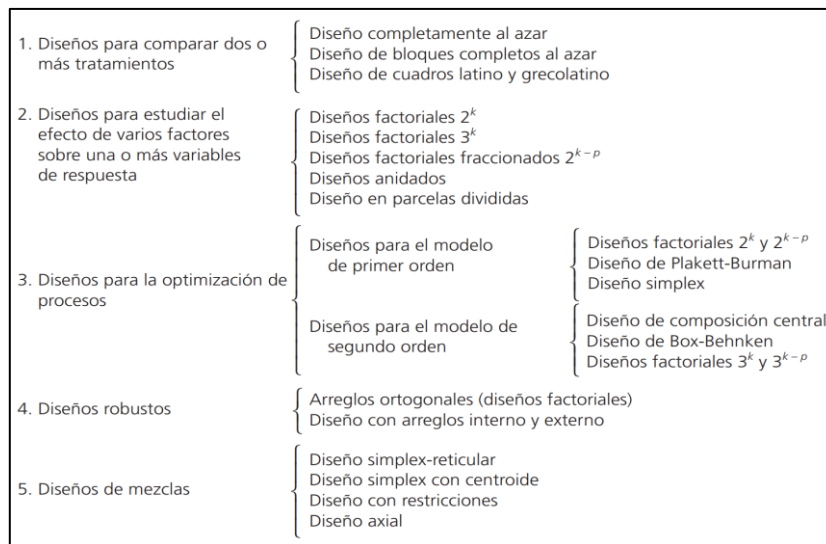


Figura 11-2: Clasificación de los distintos tipos de diseños experimentales

Fuente: (Gutiérrez y de la Vara, 2012)

Para la correcta elección del tipo de diseño a utilizar en un problema, es importante basarse en cinco aspectos importantes:

- Objetivo del experimento.
- Número de factores.
- Número de niveles por factor.
- Principales efectos que se investigan.
- Costo, tiempo y precisión buscada del experimento (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Es importante tener en cuenta que en un diseño de experimentos los resultados experimentales son puramente observaciones muestrales y no poblacionales, por lo que es común la utilización de la técnica de análisis de varianza *ANOVA* para saber la significancia estadística de los efectos en la variable de respuesta de la muestra poblacional (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

2.2.9.1 Diseño factorial

El diseño factorial es una técnica muy útil en el estudio de los efectos principales y de interacción de los factores elegidos en un diseño de experimentos. Con esta técnica se logra principalmente investigar la interacción de los efectos de interacción de varias variables independientes sobre las variables dependientes o variable de respuesta (Rahman, 2019).

Gutiérrez y de la Vara (2012) mencionan que los factores de estudio pueden de dos tipos: de tipo cuantitativo, tal como temperatura, humedad, presión, velocidad, cantidad de material, etc.; o de tipo cualitativo, por ejemplo, maquinas, tipo de material, operador, etc. Además, es necesario que, para el estudio de la influencia de cada factor sobre la variable de respuesta, cada factor deber tener al menos dos niveles, es decir que si se tiene un factor de tipo cualitativo llamado color, sus niveles podrían ser blanco y rojo.

Los tratamientos o número de combinaciones que serán corridos a partir de los diferentes factores en un diseño factorial son agrupados en una matriz de diseño. El número de tratamientos o combinaciones en un diseño experimental se obtiene por la multiplicación de número de niveles de los factores. En la tabla 3-2 se muestra un ejemplo de una matriz de diseño de un diseño factorial 4x3, que consta de dos factores, profundidad y velocidad, donde el primer factor tiene cuatro niveles, 0.15, 0.18, 0.21 y 0.24, y el segundo tres, 0.20, 0.25 y 0.30. Dado el número de niveles del diseño se tienen 12 combinaciones o tratamientos, donde en tratamiento existen 3 réplicas o corridas del experimento (Gutiérrez y de la Vara, 2012). Los tipos de diseño factorial estándares y más comunes son de tipo 2^k y 3^k , de dos y tres niveles respectivamente con k factores.

Tabla 3-2: Tabla ANOVA de diseño factorial a x b

| | | B: velocidad | | | Total $Y_{i..}$ |
|-------------------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | 0.20 | 0.25 | 0.30 | |
| A: profundidad | 0.15 | 74 64 60 | 92 86 88 | 99 98 102 | 763 |
| | 0.18 | 79 68 73 | 98 104 88 | 104 99 95 | 808 |
| | 0.21 | 82 88 92 | 99 108 95 | 108 110 99 | 881 |
| | 0.24 | 99 104 96 | 104 110 99 | 114 111 107 | 944 |
| Total $Y_{.j.}$ | | 979 | 1 171 | 1 246 | $Y_{...} = 3 396$ |

Fuente: Gutiérrez y de la Vara, 2012

Como anteriormente se había planteado, en el diseño de experimentos es importante la utilización de una técnica que permita analizar los datos experimentales, es por ello que como técnica central se

construye una tabla de análisis de varianza *ANOVA* para tal propósito. Tal tabla está construida en base a sumas de cuadrados de efectos, grados de libertad, cuadrados medios, estadísticos de prueba y significancia calculada o valor-*p*. En la tabla 4-2 se sintetiza los elementos constituyentes en una tabla *ANOVA* de un diseño factorial *a x b* (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Tabla 4-2: Tabla *ANOVA* de diseño factorial *a x b*

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | F_0 | Valor- <i>p</i> |
|------------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Efecto A | SC_A | $a - 1$ | CM_A | CM_A/CM_E | $P(F > F_0^A)$ |
| Efecto B | SC_B | $b - 1$ | CM_B | CM_B/CM_E | $P(F > F_0^B)$ |
| Efecto AB | SC_{AB} | $(a - 1)(b - 1)$ | CM_{AB} | CM_{AB}/CM_E | $P(F > F_0^{AB})$ |
| Error | SC_E | $ab(n - 1)$ | CM_E | | |
| Total | SC_T | $abn - 1$ | | | |

Fuente: Gutiérrez y de la Vara, 2012

Dónde SC_A , SC_B , SC_{AB} , SC_E , y SC_T , son la suma de cuadrados del efecto o factor *A*, *B*, de combinación *AB*, de error y totales, respectivamente. Estos valores se obtienen mediante las expresiones mostradas desde la ecuación 10 a la 22.

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \left(\frac{Y_{i.}^2}{b*n} - \frac{Y_{...}^2}{N} \right) \quad [10]$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \left(\frac{Y_{.j}^2}{a*n} - \frac{Y_{...}^2}{N} \right) \quad [11]$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \left(\frac{Y_{ij}^2}{a*n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B \right) \quad [12]$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad [13]$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \left(Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N} \right) \quad [14]$$

$$Y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk}) \quad [15]$$

$$\bar{Y}_{...} = \frac{Y_{...}}{a*b*n} \quad [16]$$

$$Y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (Y_{ijk}) \quad [17]$$

$$\bar{Y}_{i..} = \frac{Y_{i..}}{b*n} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, a \quad [18]$$

$$Y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n (Y_{ijk}) \quad [19]$$

$$\bar{Y}_{.j} = \frac{Y_{.j}}{a*n} \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, b \quad [20]$$

$$Y_{ij.} = \sum_{k=1}^n (Y_{ijk}) \quad [21]$$

$$\bar{Y}_{ij.} = \frac{Y_{ij.}}{n} \quad [22]$$

Dónde la $Y \dots$ es la suma de las observaciones, $\bar{Y} \dots$ es la media global, $Y_{i.}$ es el total del factor A en el nivel i , $\bar{Y}_{i.}$ es la media global del factor A en el nivel i , $Y_{.j}$ es el total del factor B en el nivel j , $\bar{Y}_{.j}$ es la media global del factor B en el nivel j , $Y_{ij.}$ es el total de la combinación de los factores A y B en el nivel i y j , $\bar{Y}_{ij.}$ es la media global de la combinación de los factores A y B en el nivel i y j , Y_{ijk} es el total en el nivel i, j y k de los factores, n es el número de replicas por tratamiento, N es el número total de observaciones en el experimento, y por ultimo a y b son el número de niveles de los factores A y B respectivamente (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Del mismo modo para encontrar lo valores de los respectivos cuadrado medios CM , se requiere dividir los cuadrados medios SC para sus respectivos grados de libertad; además si en el valor- p se obtiene un valor menor al nivel de significancia α escogido en el diseño, que comúnmente puede ser de 10%, 5%, 1% o 0.1%, es decir, 0.1, 0.05, 0.01 o 0.001 respectivamente, la hipótesis nula H_0 es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa H_A , con lo que se logra concluir que tal efecto o efectos tienen influencia en la variable de respuesta (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

2.2.9.2 Verificación de supuestos en análisis de varianza

En un diseño factorial es importante que se cumplan principalmente tres supuestos para una validez en los resultados que se obtengan.

El primer de estos supuestos es la normalidad, basándose en que los datos de la respuesta, Y , deben estar distribuidos de una forma normal en cada tratamiento, es decir cada combinación de factores. Como segundo supuesto se encuentra la varianza constante, donde los datos de la respuesta deben poseer la misma varianza en cada uno de los tratamientos presentes. Por último, se encuentra el supuesto de independencia, donde los datos de la respuesta deben ser independientes entre o presentar aleatoriedad (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Comúnmente, la verificación de esos supuestos está basado en los residuos, e_{ij} , que son obtenidos por la diferencia entre la j -enésima respuesta observada en el tratamiento i , Y_{ij} , y la respuesta predicha o media del correspondiente tratamiento i , $\bar{Y}_{i.}$. La ecuación 23 muestra la ecuación para el cálculo de los residuos (Gutiérrez & de la Vara, 2012).

$$e_{ij} = Y_{ij} - \bar{Y}_i. \quad [23]$$

2.3 Identificación de variables

Para el desarrollo de un trabajo de investigación es importante diferenciar aquellas variables que están sujetas a cambios o son manipuladas de cierta manera (variables independientes); y aquellas que se ven afectadas por dicha manipulación (variable dependiente). Para este trabajo se estableció como variable dependiente e independiente las mostradas a continuación:

- Variable independiente: Material compuesto.
- Variable dependiente: Propiedades mecánicas.

2.4 Matriz de operacionalización de variables

Para la medición de las variable dependiente e independiente establecidas anteriormente se establecen las dimensiones, indicadores, técnicas e instrumentos necesarias para llevar a cabo tal proceso, como se observa en la tabla 5-2.

Tabla 5-2: Matriz de operacionalización de variable dependiente e independiente

| Variable | Tipo de variable | Concepto | Dimensiones | Indicadores | Técnica | Instrumento |
|--------------------|------------------|--|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|
| Material compuesto | Independiente | Los materiales compuestos son materiales en fase continua (matriz) y discontinua (refuerzo). En materiales compuestos con refuerzo de fibra, factores tales como el tipo de fibra, condiciones ambientales, métodos de procesamiento, tratamientos sobre las fibras, volumen de fibra, orientación, etc., tienen un efecto directo en las propiedades mecánicas finales del material (Esnaola 2016; Amico, Angrizani y Drummond 2010). | Configuración de refuerzo | Nº de capas | - Cantidad de laminas | - Ficha de toma de datos |
| | | | | Orientación de fibras | - Ángulo de la fibra | - Transportador de ángulos - Ficha de toma de datos |
| | | | Fracción volumétrica | % en volumen de refuerzo | - Cantidad de fibra | - Balanza - Probeta graduado - Ficha de toma de datos |
| | | | | % en volumen de matriz | - Cantidad de resina | - Balanza - Probeta graduado - Ficha de toma de datos |
| | | | Proceso de conformado | Estratificación manual | -Modo de aplicación de resina | - Rodillo de laminación |

| | | | | | | |
|-----------------------|-------------|--|-------------------------|----------------------|---------------------|---|
| Propiedades mecánicas | Dependiente | Las propiedades mecánicas están conectadas a la respuesta que este tiene ante una carga determinada. En general, en todo material compuesto las propiedades mecánicas son un parte esencial en el desempeño del componente o producto donde se lo pretende utilizar (Faruk et al., 2012; Srinivas, Lakshumu & Raju, 2017). | Comportamiento mecánico | Modulo elástico | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | | Carga máxima | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | | Esfuerzo máximo | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | | Esfuerzo de fluencia | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | Diseño de experimentos | Diseño factorial | - Análisis de datos | - Software estadístico |

Realizado por: Loor, 2023

2.5 Matriz de consistencia

Para la evaluación de una relación coherente entre los objetivos establecidos en este trabajo y las variables dependiente e independiente, se establecen cada una de las dimensiones, indicadores, técnicas e instrumentos de cada variable, como se muestra en la tabla 6-2.

Tabla 6-2: Matriz de consistencia de variable independiente y dependiente

| Formulación del problema | Objetivo general | Hipótesis | Dimensión | Indicadores | Técnicas | Instrumentos | |
|--|--|--|--|--------------------------|-----------------------|---|---|
| Las propiedades mecánicas de un material compuesto con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica para cajas de impacto de automóviles. | Sintetizar y caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica para cajas de impacto de automóviles. | Las propiedades mecánicas de un material compuesto tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica sí variarán en dependencia de la manipulación de ciertos factores en la síntesis y caracterización de este. | Variable independiente: Material compuesto | | | | |
| | | | D1: Configuración del refuerzo | Nº de capas | - Cantidad de laminas | - Ficha de toma de datos | |
| | | | | Ángulo de orientación | - Ángulo de la fibra | -Transportador de ángulos - Ficha de toma de datos | |
| | | | D2: Fracción volumétrica | % en volumen de refuerzo | - Cantidad de fibra | - Cantidad de resina | - Balanza - Probeta graduado - Ficha de toma de datos |
| | | | | % en volumen de matriz | | | |
| D3: Proceso de conformado | Estratificación manual | - Modo de aplicación de resina | - Rodillo de laminación | | | | |

| Formulación del problema | Objetivos específicos | Hipótesis | Dimensión | Indicadores | Técnicas | Instrumentos |
|--|--|--|---|----------------------|---------------------|---|
| El porcentaje de fracción volumétrica conveniente a utilizarse en el material compuesto propuesto mediante revisión y análisis de la literatura científica. | Determinar el porcentaje de fracción volumétrica conveniente a utilizarse en el material compuesto propuesto mediante revisión y análisis de la literatura científica. | El porcentaje de fracción volumétrica conveniente a utilizarse en el material compuesto propuesto sí se podrá determinar mediante revisión y análisis de la literatura científica. | Variable dependiente: Propiedades mecánicas | | | |
| | | | D1: Comportamiento mecánico | Modulo elástico | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | | Carga máxima | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| | | | | Esfuerzo máximo | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| Muestras del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante un proceso de conformado por estratificación manual para su caracterización mecánica. | Obtener muestras del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante un proceso de conformado por estratificación manual para su caracterización mecánica. | Muestras del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo sí se podrán obtener mediante un proceso de conformado por estratificación manual para su caracterización mecánica. | | Esfuerzo de fluencia | - Ensayo mecánico | - Máquina universal - ASTM D3039 - Ficha de toma de datos |
| El comportamiento mecánico del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante ensayos experimentales por tracción para su modelación por simulación numérica. | Evaluar el comportamiento mecánico del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo mediante ensayos experimentales por tracción para su modelación por simulación numérica. | El comportamiento mecánico del material en estudio en las distintas configuraciones de refuerzo sí se podrá evaluar mediante ensayos experimentales por tracción para su modelación por simulación numérica. | D2: Diseño de experimentos | Diseño factorial | - Análisis de datos | - Software estadístico |
| Los efectos de configuración del refuerzo en el material compuesto laminado para | Analizar los efectos de configuración del refuerzo en el material compuesto | Los efectos de configuración del refuerzo en el material compuesto laminado para | | | | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| para su comparación mediante enfoque estadístico de diseño de experimentos. | laminado para para su comparación mediante enfoque estadístico de diseño de experimentos. | para su comparación sí se podrá analizar mediante enfoque estadístico de diseño de experimentos. | | | | |
| El comportamiento ante aplastamiento de estructuras de caja de impacto mediante simulación numérica como propuesta de utilización del material compuesto laminado basado en diseño de sus geometrías y aplicación de triggers. | Evaluar el comportamiento ante aplastamiento de estructuras de caja de impacto mediante simulación numérica como propuesta de utilización del material compuesto laminado basado en diseño de sus geometrías y aplicación de triggers. | El comportamiento ante aplastamiento de estructuras de caja de impacto sí se podrá evaluar mediante simulación numérica como propuesta de utilización del material compuesto laminado basado en diseño de sus geometrías y aplicación de triggers. | | | | |

Realizado por: Loor, 2023

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo se realiza en base a una investigación de tipo experimental, ya que la manipulación de variables se realiza bajo condiciones controladas y definidas, en lo relacionado con la cantidad de refuerzo de fibra y orientación de las mismas, en un material compuesto del tipo laminado con refuerzo de fibras y matriz de resina epóxica, que se somete posteriormente a ensayos de laboratorio a tracción, para a partir de los resultados aplicarse en estructuras de impacto de automóviles, lo cual se realiza por simulación numérica por el método del elemento finito o *FEM*.

Tomando en consideración que este trabajo se lo lleva a cabo dentro de un periodo de tiempo determinado, además sumado al hecho de que son varios los parámetros manipulados dentro de una misma variable, se considera como tal que se está aplicando un tipo de estudio con características transversales.

3.2 Método de la investigación

Para el desarrollo de esta investigación se utiliza el método hipotético-deductivo como método de investigación, ya que, a partir de una hipótesis inicial se procede a la comprobación de la misma de forma experimental, para finalmente alcanzar conclusiones particulares sobre el tema.

3.3 Enfoque de la investigación

Esta investigación posee un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo. Con base en un enfoque cualitativo se recurre a diversas fuentes bibliográficas como libros, revistas y artículos científicos, tesis, guías y normas técnicas, con el fin de recabar información pertinente en relación con la síntesis y caracterización de materiales compuestos, para establecer así las bases de partida en el inicio de este trabajo.

Posteriormente, manejando un enfoque cuantitativo se obtuvieron resultados con valores numéricos a partir de la manipulación de variables con cualidades cuantitativas, los cuales serán analizados con ayuda de herramientas estadísticas como lo es el diseño de experimentos.

3.4 Alcance de la investigación

Al abordarse la temática de materiales compuestos para su utilización en el campo automotriz, la cual no se le ha dado la importancia necesaria dentro del país para un desarrollo más profundo, ya que aún existe una gran brecha investigativa por cubrir, la presente investigación en primera instancia es de tipo exploratorio-diagnostico. Además, basado en la manipulación de ciertos factores en el material

estudiado, se realiza la correlación que existe entre la variación de dichos factores sobre las características finales del material en cuestión.

3.5 Población

En este trabajo se tiene como población todas las probetas o muestras utilizadas en la caracterización por ensayo de tracción bajo la norma ASTM D3039, del material compuesto de tipo laminado elaboradas a partir de un refuerzo de tejido plano de fibra de vidrio clase E y matriz polimérica termoestable de resina epóxica, definidas por las características reunidas en la tabla 1-3, las cuales fueron establecidas posterior a la recolección y análisis de la literatura científica.

Tabla 1-3: Características de la población de probetas de material compuesto

| Matriz | Refuerzo | Fracción volumétrica del refuerzo (% v/v) | Fracción volumétrica de la matriz (% v/v) |
|----------------|---|---|---|
| Resina epóxica | Tejido plano de fibra de vidrio clase E de 600 g/m ² | 40% | 60% |

Realizado por: Loor, 2023

3.6 Muestras

El número de muestras para este trabajo está basado en la combinación de determinados parámetros o factores en el material, con la finalidad de observar la influencia que tienen estos factores sobre las propiedades mecánicas finales del material sometido a ensayos de tracción. La combinación está basada principalmente en el número de capas o laminas que componen el laminado, y en el ángulo de orientación en el arreglo del refuerzo. En la tabla 2-3 se detalla la división por grupos de las muestras a ensayar en base a la combinación de los parámetros mencionados.

Tabla 2-3: Grupos de muestras de material compuesto laminado

| Identificador de grupo | Nº de capas | Orientación | Cantidad |
|---|-------------|--|----------|
| MCL_A | 8 | [(0/90)] _{4s*} | 3 |
| MCL_B | 8 | [(0/90) / (±45)] _{2s} | 3 |
| MCL_C | 8 | [(0/90) / (30/-60) / (60/-30) / (0/90)] _s | 3 |
| MCL_D | 12 | [(0/90)] _{6s} | 3 |
| MCL_E | 12 | [(0/90) / (±45)] _{3s} | 3 |
| MCL_F | 12 | [(0/90) / (30/-60) / (60/-30)] _{2s} | 3 |
| TOTAL | | | 18 |
| NOTA (*): | | | |
| - El subíndice <i>s</i> hace referencia a simetría en el laminado. | | | |
| - El subíndice con valor numérico indica las veces que se repite el conjunto de secuencia de apilamiento de capas o laminas contenidas por los corchetes. | | | |

Realizado por: Loor, 2023

3.7 Técnica de recolección de datos

Con base en un tipo de técnica secundaria se realiza la recolección de datos, a partir de la revisión de documentos con literatura científica en concordancia con el tema, la cual proviene, como se mencionó en apartados anteriores, de libros, revistas y artículos científicos, tesis, guías y normas técnicas.

La técnica de observación, como técnica primaria, teniendo contacto directo con el objeto de estudio con lo que se logra recabar y compendiar los diversos resultados obtenidos a lo largo del trabajo en fichas de toma de datos, para posteriormente ser analizados.

3.8 Tratamiento de datos

Para la determinación de la configuración del material compuesto laminado con las mejores propiedades es necesario analizar los resultados obtenidos a través de los ensayos de tracción de las distintas configuraciones. Como herramienta para este propósito se hace uso de un diseño experimental de tipo factorial, tomando en cuenta el número de factores a analizar, y así también poder determinar la influencia que cada uno de estos factores tienen sobre las propiedades mecánicas finales del material.

3.9 Sintetizado de material compuesto laminado

3.9.1 *Materiales principales: matriz y refuerzo*

Los principales materiales que son la base para la elaboración de las muestras del material compuesto laminado son la resina epóxica, que actúa como matriz; y la fibra de vidrio, que actúa como refuerzo del material.

3.9.1.1 *Resina epóxica*

La resina epóxica es un polímero líquido de tipo termoestable de apariencia viscosa que también es conocida con el nombre de poliepóxidos, conteniendo al menos dos o más grupos epóxido o grupos de glicidilo u oxirano (Ammar et al., 2019). Este tipo de resina posee mejores propiedades mecánicas en comparación a otras resinas, como la poliéster o éster de vinilo (Komus y Beley, 2018). Para que la resina epóxica pueda endurecer se requiere que esta se mezcle con un segundo componente o correactivo, que puede ser aminas, ácidos, anhídridos, fenoles, alcoholes o tioles, que comúnmente son llamados endurecedores o agentes de curado. La relación de mezcla entre la resina y el endurecedor puede variar desde 1:1 a 4:1 (Greene, 2021), en volumen o peso, en dependencia de su aplicación.

Entre sus principales cualidades destacan una excelente adhesión, nula producción de gases tóxicos durante el proceso de curado, buena resistencia al calor, solventes y fluencia, y además poca contracción durante su curado (Huang, Fu Gan 2019).

En la elaboración del material compuesto de este trabajo se utilizó resina epóxica de la marca *WESCO DURA QUARZ CAST-11*, que viene en una presentación de dos componentes, A y B, este último con una apariencia ligeramente más oscura, los cuales deben ser mezclados en una relación de 1:1 en volumen. En la tabla 3-2 se detallan las principales características y especificaciones técnicas de la resina epóxica en cuestión.

Tabla 3-3: Características y especificaciones técnicas de resina epóxica

| | | |
|---|---|-----------------------------|
|  | Marca | WESCO DURA QUARZ CAST-11 |
| | Apariencia | Transparente |
| | Relación de mezcla (% v/v) | 1:1 |
| | Tiempo de trabajo de la resina (min) | 30 - 35 a 25°C |
| | Tiempo de curado (h) | 3 - 4 a 25°C |
| | Tiempo de secado (h) | 12 - 14 a 25°C |
| | Espesor máximo de aplicación (cm) | 1 - 2 cm |
| | Dureza (Shore D) | 84 |
| | Densidad (g/cm³) | 1.1 |
| | Viscosidad de la mezcla (cp) | 2000 a 3000 a 25°C |

Fuente: PINTULAC, 2022

Realizado por: Loor, 2023

3.9.1.2 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es el tipo de refuerzo más utilizado en la manufactura de materiales compuestos poliméricos, pudiéndose usar en conjunto con una variedad de resinas orgánicas e inorgánicas (Kar, Naqvi y Ramkumar, 2022). El principal constituyente de la fibra de vidrio es la sílice, SiO_2 , pudiendo añadirsele otros óxidos como Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , etc., y así variando sus propiedades.

Comercialmente existe una variedad de clases de fibras de vidrios, tales como *A, B, C, D, E, ECR, AR, R* y *S-2*, que varían en sus propiedades, tal como se muestra en la figura 1-3 (Derradji, Wang y Liu, 2018). Así mismo, la fibra de vibra de vidrio es comercializada principalmente en forma de hilo cortado, fibra molida, *roving*, filamento continuo, tejidos y velos (Vázquez, 2020).

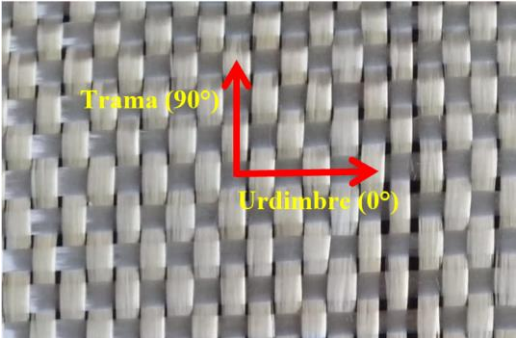
| Clases de fibra de vidrio | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|-----------|---------|-----------|----------|---------|-----------|
| | A-Glass | C-Glass | D-Glass | E-Glass | ECR-Glass | AR-Glass | R-Glass | S-2-Glass |
| Densidad (g/cm ³) | 2.44 | 2.52 | 2.11–2.14 | 2.58 | 2.72 | 2.70 | 2.54 | 2.46 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 3310 | 3310 | 2415 | 3445 | 3445 | 3241 | 4135 | 4890 |
| Módulo de tracción (GPa) | 68.9 | 68.9 | 51.7 | 72.3 | 80.3 | 73.1 | 85.5 | 86.9 |
| Elongación (%) | 4.8 | 4.8 | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 4.4 | 4.8 | 5.7 |

Figura 1-3: Propiedades de distintas clases de fibra de vidrio

Fuente: Derradji, Wang y Liu, 2018

El tipo de fibra de vidrio utilizado en este trabajo fue de tipo tejido *Roving* o *Woven Roving* clase *E*, en presentación de tejido plano bidireccional a 0° y 90°, de una apariencia de color blanco, con un espesor de 0.6 mm aproximadamente, con buenas propiedades mecánicas y un peso por área de 600 g/m², utilizada generalmente en procesos de estratificación manual o *hand lay-up*, para aplicaciones en buques, cascos de barcos, partes automotrices, etc. En este tipo de fibra, tanto la urdimbre o *warp*, tejido en dirección a 0°, como la trama o *weft*, tejido a 90°, poseen la misma cantidad de hilos, por lo tanto, poseen las mismas propiedades en ambos sentidos. La tabla 4-3 detalla las características y especificaciones técnicas de la fibra de vidrio utilizada.

Tabla 4-3: Características y especificaciones técnicas de fibra de vidrio

| | | |
|---|--------------------------------------|--------------------|
|  | Marca | Taishan Fiberglass |
| | Código del producto | EWR600 |
| | Peso por área | 600 |
| | Densidad de la urdimbre (hilos/10cm) | 25 |
| | Densidad de la trama (hilo/10cm) | 25 |
| | Masa lineal de la urdimbre (tex) | 1200 |
| | Masa lineal de la trama (tex) | 1200 |
| | Contenido de humedad (%) | ≤ 0.10 |
| | LOI (%) | ≤ 0.70 |




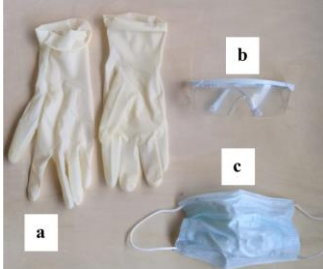
Fuente: QUINVENSA CIA. LTDA, 2022



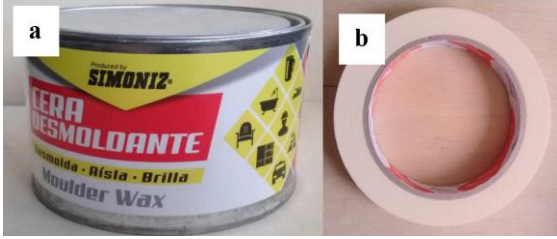
Realizado por: Loor, 2023

3.9.2 Herramientas y otros materiales

Para el sintetizado de un material compuesto dependiendo del proceso a utilizarse, se deben emplear las herramientas adecuadas para tal caso. Dado que para este estudio se hace uso del conformado por estratificación manual, las herramientas utilizadas estas basadas en herramientas de corte, de medición, de impregnación y consolidación del laminado, y de protección. Otros materiales requeridos en el proceso de sintetizado son agente desmoldante, *peel ply*, acetona, cinta adhesiva y placas para realizar el proceso de estratificación. La tabla 5-3 muestra un resumen de las diversas herramientas y materiales utilizadas.

Tabla 5-3: Herramientas y otros materiales utilizados

| | Herramienta/ Material | Imagen | Descripción |
|--|--|--|---|
| Herramientas de corte | a) Cutter b) Tijeras c) Sierra de mano |  | Utilizado para la realización de cortes precisos en la dirección u orientación de fibra deseada sobre la fibra de vidrio (a, b); y para el corte de las muestras de material compuesto ensayadas (c). |
| Herramientas de medición | a) Escuadras y transportador de ángulos b) Calibrador Vernier c) Envases graduados d) Balanza |  | Utilizado para el trazado de las zonas corte sobre el tejido de fibra de vidrio con las dimensiones adecuadas y la orientación de fibra deseada (a); y la medición de volúmenes (b), espesores (c) y masas (d) en la proporción adecuada. |
| Herramientas de impregnación y consolidación | a) Brochas b) Rodillo de compactación |  | Con la utilización de brochas se realiza la para la impregnación de la resina sobre la fibra de vidrio (a). Para posteriormente realizar la compactación del material compuesto con un rodillo especial (b). |
| Equipo de protección | a) Guantes b) Lentes de seguridad c) Mascarilla de seguridad |  | Para a protección de la piel (a); ojos (b); y sistema respiratorio (c), dada la atención que conlleva el manejo de fibra a de vidrio, resina y otros materiales químicos. |

| | | | |
|------------------|---|---|---|
| Otros materiales | Placas para estratificado |  | Placas de vidrio de 36x22x0.4 cm sobre la que se realiza el proceso de estratificación manual del material compuesto y posterior compactación del mismo. |
| | Peel ply |  | Tejido a base de poliamida con gramaje de 80 g/m ² , que se coloca sobre las superficies del laminado para un mejor acabado superficial y absorción del excedente de resina luego del proceso de estratificación. |
| | a) Cera desmoldante b) Cinta Masking |  | Agente desmoldante para evitar la adhesión de los laminados una vez curados a las superficies de las placas (a). La cinta se utiliza para la delimitación de las zonas de corte sobre el tejido de fibra de vidrio (b), la cual es retirada posteriormente con acetona. |

Realizado por: Loor, 2023

3.9.3 Proceso de síntesis de material compuesto laminado

3.9.3.1 Determinación experimental de densidad de fibra de vidrio

Dado que el fabricante no proporciona la densidad exacta de la fibra de vidrio, esta se determinó de forma experimental mediante la técnica de desplazamiento de volumen, donde el procedimiento básicamente esta basa en la obtención del volumen aproximado de un determinado cuerpo, con masa previamente conocida, el cual se lo sumerge dentro de un recipiente con graduación volumétrica que contiene agua a una temperatura aproximada de 4°C.

Producto de la inserción del cuerpo dentro del envase con agua, se producirá un desplazamiento volumétrico del líquido, la diferencia entre el volumen final y el inicial, anterior a la inserción del cuerpo, representará el volumen del elemento. Posterior, conocido la masa y volumen del elemento en cuestión, mediante la fórmula de densidad mostrada en la ecuación 24 se procede al cálculo la misma (Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, s.f.).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [24]$$

Dónde ρ es la densidad en g/cm^3 , m la masa en gramos, y v volumen en cm^3 .

Se utilizaron cinco muestras de fibra de vidrio, las cuales fueron pesadas y posteriormente se las sumergió por separado dentro de una probeta graduada con agua en su interior, como se muestra en la figura 2-3. Las muestras de fibra de vidrio fueron tomadas de forma aleatoria resultando en masas con diferentes valores. Así mismo, la cantidad de agua utilizada para el ensayo de cada una de las muestras difería.

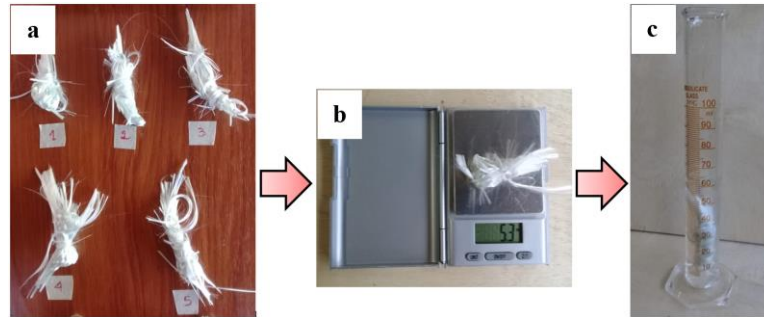


Figura 2-3: a) Muestras de fibra de vidrio, (b) pesaje (b), y c) determinación de volumen

Realizado por: Loor, 2023

Posterior a la obtención de la masa y volumen de las muestras, se calculó la densidad de las mismas. La densidad aproximada del tejido de fibra de vidrio utilizada en este trabajo se obtiene a partir del promedio de las densidades de las cinco muestras. La tabla 6-3 resume los resultados obtenidos en el proceso, tanto de las masas, desplazamientos de volumen y densidades experimentales de las muestras.

Tabla 6-3: Densidades experimentales de muestras de la fibra de vidrio

| Numero de la muestra | Masa medida (g) | Volumen medido (cm^3) | | Densidad calculada (g/cm^3) |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|------------|--|
| | | Desplazado | Diferencia | |
| Muestra #1 | 5.3 | $V_o = 91$ | 2 | 2.65 |
| | | $V_f = 93$ | | |
| Muestra #2 | 7.4 | $V_o = 83$ | 2.75 | 2.70 |
| | | $V_f = 85.75$ | | |
| Muestra #3 | 6.0 | $V_o = 60$ | 2.50 | 2.40 |
| | | $V_f = 62.5$ | | |
| Muestra #4 | 6.3 | $V_o = 46$ | 2.50 | 2.52 |
| | | $V_f = 48.5$ | | |
| Muestra #5 | 6.2 | $V_o = 55$ | 2.50 | 2.48 |
| | | $V_f = 57.5$ | | |
| Promedio | | | | 2.55 |

Realizado por: Loor, 2023

El resultado experimental de la densidad de la fibra de vidrio con un valor de 2.55 g/cm^3 , obtenido por el ensayo experimental de desplazamiento de volumen muestra un resultado concordante con la literatura científica, tal como lo indica Faizal et al. (2006), considerando además que tiene un valor nominal de densidad para este tipo de fibra de entre 2.54 (Kwak et al., 2019) y 2.6 g/cm^3 (Pandita et al., 2014).

3.9.3.2 *Fracción volumétrica de componentes del material compuesto laminado*

En base a la revisión de la literatura científica, de la cual se reunieron los puntos más importantes sobre el tema en el capítulo 2, se planteó la utilización de una fracción volumétrica de refuerzo de fibra de 40%, considerando que se está trabajando con fibra de vidrio de grado *E* de tipo tejido plano bidireccional. La utilización de ese valor de fracción también significó que se utilizara la suficiente cantidad de resina epóxica para logran una completa humectación de la fibra, sin que esto signifique que los resultados se puedan ver afectados.

3.9.3.3 *Obtención de material compuesto laminado*

En primera instancia el tejido de fibra de vidrio se extendió sobre una supervise limpia, evitando la presencia de suciedad o grasa, para proceder con el marcaje de las zonas a cortar en base a las dimensiones requeridas.

Mediante una regla graduada y transportador de ángulos, se realizaron las mediciones de áreas rectangulares de $300 \pm 5 \times 15 \pm 5 \text{ mm}$ sobre el tejido, con las orientaciones de fibra deseada. Alrededor de dichas zonas se le colocó cinta adhesiva *Masking* como se observa en la figura 3-3, esto con dos propósitos, el primero es facilitar el proceso de corte, y el segundo, para evitar el desprendimiento innecesario de hebras de fibra de vidrio en las orillas del tejido.

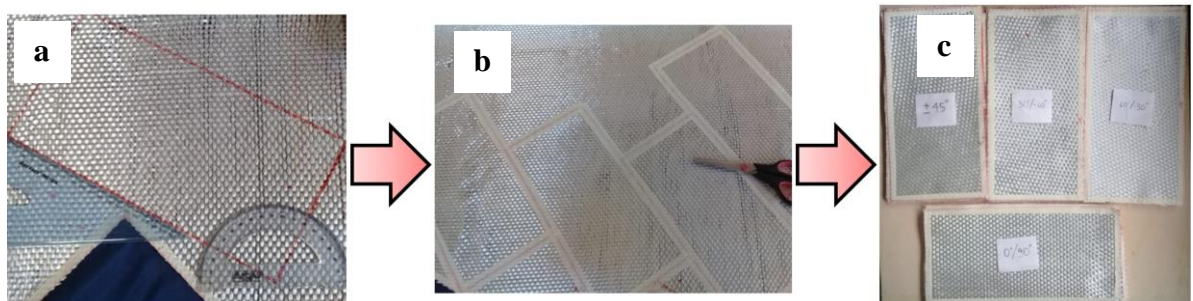


Figura 3-3: a) Áreas de corte, b) colocación de cinta adhesiva, y c) cortes del tejido

Realizado por: Loor, 2023

Cortada la cantidad necesaria de tejido de fibra de vidrio, de acuerdo con las configuraciones de laminado establecidas, en orientación y número de capas o laminas, se procedió a retirar la cinta adhesiva colocada en los bordes de cada una de ellas durante el proceso de corte. La remoción de la

cinta adhesiva se la puede realizar con un paño mojado con acetona, tratando de humedecer levemente la cinta adhesiva para diluir el pegamento de esta, y así retirarla sin esfuerzo. En la figura 4-3 se muestra el resultado posterior proceso descrito.



Figura 4-3: Remoción de cinta adhesiva

Realizado por: Loor, 2023

La cantidad en volumen necesaria de matriz, o resina epóxica, a utilizarse por cada laminado se determinó a partir de la cantidad de refuerzo utilizado en este. Tomando en cuenta que se estableció utilizar un valor de fracción volumétrica de refuerzo del 40% para el conformado cada laminado, el volumen del refuerzo por laminado se calcula mediante la ecuación 23 antes mostrada, considerando la masa de todas las capa o láminas de refuerzo que lo conforman, y la densidad del mismo. El porcentaje de volumen restante del 60%, corresponderá a la cantidad de resina requerida. La tabla 7-3 detalla las masas y volúmenes de refuerzo y matriz, en cada uno de los laminados con las configuraciones establecidas.

Tabla 7-3: Masa y volúmenes de refuerzo y matriz por laminado

| Identificador de grupo | N° de capas | Orientación | Masa - refuerzo (g) | Volumen – refuerzo (cm ³) | Volumen – matriz* (cm ³) |
|--|-------------|--|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| MCL-A | 8 | [(0/90)] _{4s} | 215.3 | 82.8 | 124.2 |
| MCL-B | 8 | [(0/90) / (±45)] _{2s} | 220.3 | 84.7 | 127.1 |
| MCL-C | 8 | [(0/90) / (30/-60) / (60/-30) / (0/90)] _s | 219.3 | 84.4 | 126.5 |
| MCL-D | 12 | [(0/90)] _{6s} | 327.4 | 125.9 | 188.9 |
| MCL-E | 12 | [(0/90) / (±45)] _{3s} | 331.6 | 127.5 | 191.3 |
| MCL_F | 12 | [(0/90) / (30/-60) / (60/-30)] _{2s} | 331.3 | 127.4 | 191.1 |
| NOTA (*): - La cantidad en volumen de la matriz o resina epóxica, comprende a un 50% en componente A y 50% en componente B. | | | | | |

Realizado por: Loor, 2023

Posterior se inició con el proceso de conformado de los laminados. Para ello, lo primero fue el acondicionamiento de los moldes o superficies donde se realizó el conformados de laminación, que en este caso se llevó a cabo sobre placas de vidrio.

Las placas de vidrios fueron limpiadas con cera, la cual actúa a la vez como agente de limpieza y desmoldante de los laminados posterior al curado y secado. El proceso de aplicación de la cera desmoldante se lo realizó con un paño limpio, para luego con otro paño, proceder con su remoción, hasta obtener una superficie lo limpia y pulida, para así lograr separar el material elaborado de las superficies de las placas de vidrios de una forma fácil. Se recomienda realizar el proceso mencionado de 3 a 5 veces como mínimo antes de empezar con el proceso de laminación, tal como se puede observar en la figura 5-3.



Figura 5-3: Aplicación de agente desmoldante

Realizado por: Loor, 2023

Realizado el proceso de colocación del agente desmoldante, se realizó la preparación de la resina en base a la cantidad en volumen requerida por cada laminado que se vaya a obtener. Su preparación se realizó combinando el componente A y B en proporción 1:1 en volumen, tal como indica el fabricante y se observa en la figura 6-3.



Figura 6-3: Preparación de la resina epóxica

Realizado por: Loor, 2023

Preparada la resina, se aplicó una capa inicial de esta sobre la superficie de la placa de vidrio, de una manera uniforme, utilizando una brocha. Consecutivamente, se colocó sobre esta la primera capa o lámina de tejido de fibra de vidrio. Una segunda capa de resina epóxica se aplicó sobre la superficie de tejido, para proceder con su compactación con la ayuda del rodillo. La figura 7-3 detalla el proceso realizado.

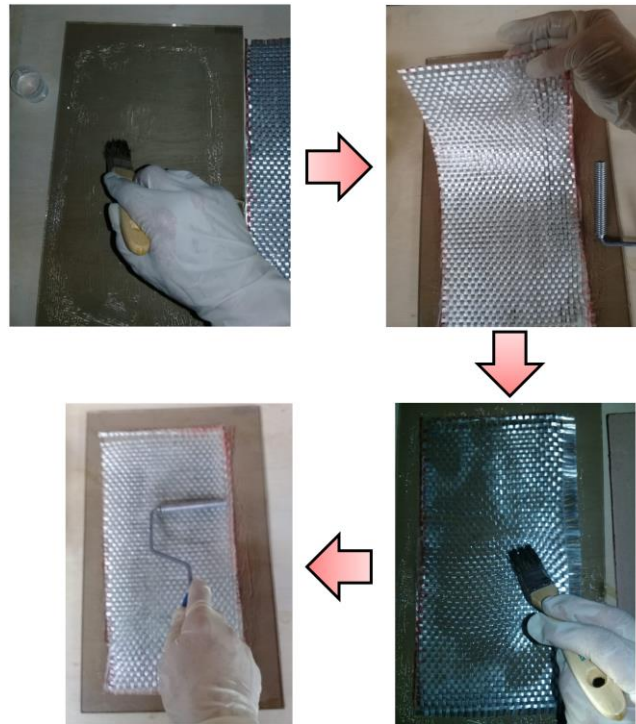


Figura 7-3: Proceso de estratificación manual de laminados

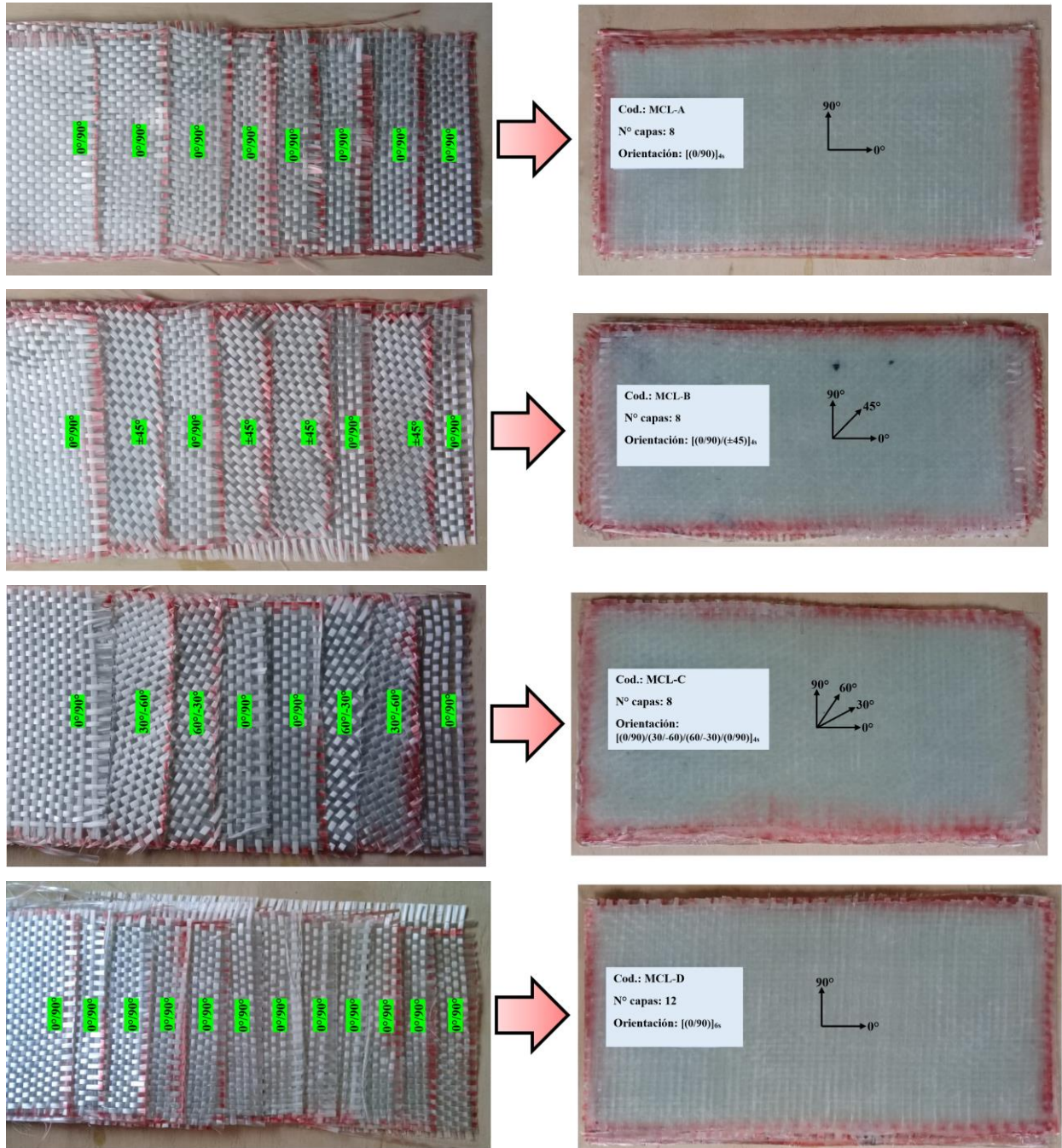
Realizado por: Loor, 2023

El proceso se repitió para las capas subsecuentes de tejido de fibra de vidrio, siguiendo la secuencia de apilamiento establecida para el laminado en cuestión que se buscaba obtener. Realizada la puesta y compactación de cada una de las capas que componen el laminado, se colocó el tejido *peel ply* sobre estas.

Para cada laminado se procedió con el mismo procedimiento, abarcando desde el punto de aplicación del agente desmoldante, hasta la colocación del tejido *peel ply*, para posteriormente dejarlos secar a temperatura ambiente por aproximadamente 24 horas, y proceder a su desmoldeo y retiro del tejido *peel ply*.

3.10 Laminados de material compuesto sintetizados

Posterior al proceso de sinterización, se obtuvieron laminados de material compuesto con refuerzo de fibra de vidrio en matriz polimérica de resina epóxica en las diferentes configuraciones propuestas en base con la orientación de fibra y número de capas, como se muestra en la figura 8-3.



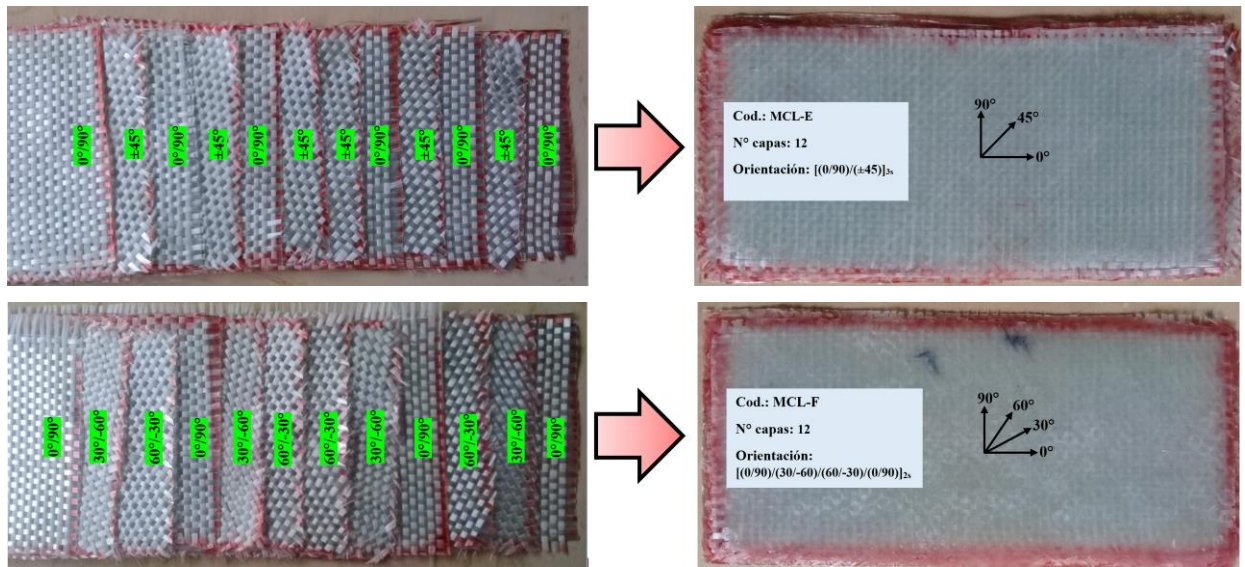


Figura 8-3: Laminados con diferentes configuraciones (continuación)

Realizado por: Loor, 2023

La tabla 1-4 resume las principales características observadas una vez los diferentes laminados fueron sintetizados.

Tabla 8-3: Características de laminados sintetizados

| Identificador | N° de capas | Orientación | Dimensiones [mm] | Espesor [mm] |
|---------------|-------------|---|------------------|--------------|
| MCL-A | 8 | $[(0/90)]_{4s}$ | 305 x 153 | 3.80 |
| MCL-B | 8 | $[(0/90) / (\pm 45)]_{2s}$ | 302 x 151 | 3.90 |
| MCL-C | 8 | $[(0/90) / (30/-60) / (60/-30) / (0/90)]_s$ | 300 x 155 | 4.10 |
| MCL-D | 12 | $[(0/90)]_{6s}$ | 298 x 152 | 5.97 |
| MCL-E | 12 | $[(0/90) / (\pm 45)]_{3s}$ | 301 x 150 | 5.92 |
| MCL_F | 12 | $[(0/90) / (30/-60) / (60/-30)]_{2s}$ | 300 x 152 | 5.89 |

Realizado por: Loor, 2023

3.11 Caracterización de material compuesto laminado

3.11.1 Probetas del material compuesto laminado

Con el propósito de realizar la caracterización de las principales propiedades mecánicas de los laminados sintetizados, se procedió a la obtención de especímenes a partir de los mismos. Tomando como referencia los parámetros estipulados en la norma ASTM D3039, destinada para ensayos de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica, que establece como base que los especímenes para el ensayo en cuestión deben tener una forma rectangular con dimensiones mínimas de 250x25 mm, se cortaron especímenes a partir de los laminados con la forma indicada con medidas de 260x25 mm, tal como se representa en la figura 9-3, tomando en consideración la orientación de

fibra en lo laminado al momento de realizar los cortes. El espesor de los especímenes depende en sí de la configuración dada a cada laminado.

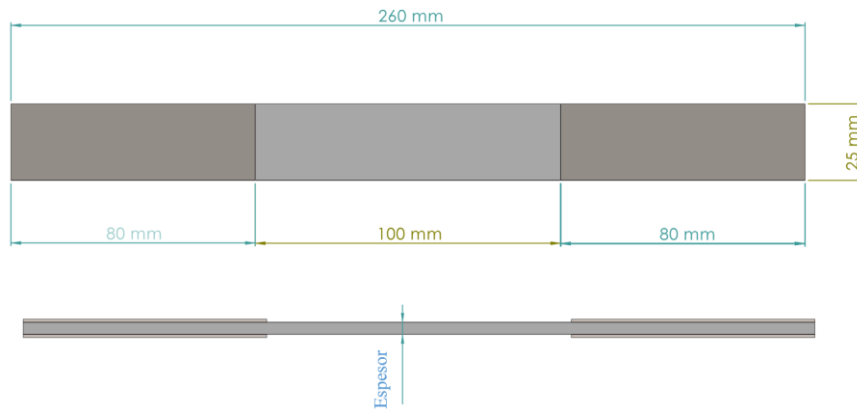


Figura 9-3: Dimensiones de especímenes utilizados

Realizado por: Loor, 2023

Los cortes se realizaron utilizando herramienta de corte convencional utilizando una sierra de mano, ya que previamente se identificó que usar otros equipos de corte, como amoladoras o sierras de banco, producía quemaduras y delaminación en los bordes de los especímenes, lo que las volvía inadecuadas para los ensayos. Además, para asegurar bordes con relieve uniforme en las mismas, estas fueron lijadas de una manera controlada utilizando papel lija de grano 120.

Para conseguir un agarre eficiente por parte de las mordazas de sujeción de la máquina universal de ensayos, a los especímenes se les colocó unas sobre montas a base de papel de lija de grano 50, de dimensiones aproximadas de 80x25 mm, las cuales fueron fijadas en ambos lados de cada extremo de las mismas con pegamento adhesivo a base de cianoacrilato, de forma que se consiga una buena adhesión entre la superficie del espécimen y de la lija, como se observa en la figura 10-3.

Por cada laminado se obtuvieron 5 probetas, de las cuales se seleccionaron las 3 con mejores características de acuerdo con un criterio de dimensiones y calidad de superficie. Las probetas sobrantes fueron igualmente reservadas en el posible evento que sean necesarias utilizárselas para solventar cualquier inconveniente durante los ensayos.

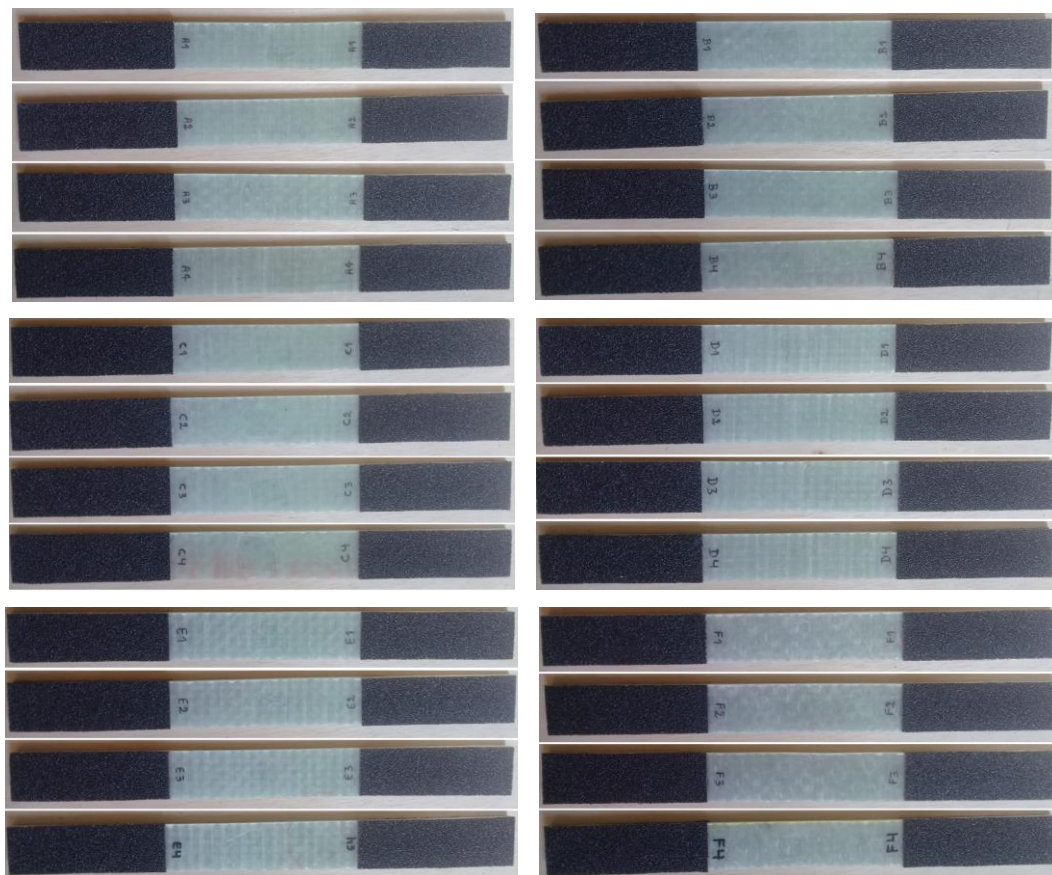


Figura 10-3: Especímenes para caracterización de laminados

Realizado por: Loor, 2023

3.11.2 Ensayo de tracción

Para la obtención de las principales propiedades mecánicas de los diferentes laminados, se realizaron ensayos de tracción, el cual es un ensayo básico para tal propósito. El ensayo a tracción es por excelencia la base en el procedo de diseño mecánico de cualquier componente.

El ensayo estuvo regido bajo los parámetros de la norma ASTM D3039, que es destinado para materiales compuestos con matriz polimérica, tal como se indicó anteriormente. Los mismos fueron llevados a cabo utilizando una maquina universal de ensayos servohidráulica, de la marca *JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO. LTD*, modelo WAW-600B, serie 7136, con numero de certificación LMN-F-2016500064D, y una capacidad máxima de carga de 600 KN, que se muestra en la figura 11-3. Además, la máquina cuenta con un sistema de adquisición de datos que permite realizar el control y registro de los resultados de un maneral eficaz.



Figura 11-3: Máquina universal de ensayos utilizada

Realizado por: Loor, 2023

Para propósitos del ensayo de tracción, se marcó una sección rectangular de 50x25 mm justo en el centro de cada probeta, como punto de referencia para el computo de las deformaciones. Las probetas son colocadas en las mordazas de la máquina para la aplicación gradual de una carga longitudinal, a una velocidad de ensayo de 2 mm/min. Durante el ensayo se obtienen registros de la fuerza aplicada (F) y la medida del desplazamiento del cabezal de la máquina, que corresponde a la medida de alargamiento de la probeta ensayada (ΔL). Con la respectiva información, se logra obtener los valores de esfuerzo-deformación de la probeta, con los que se traza una curva con dichos parámetros, consiguiendo así estimar las propiedades mecánicas del laminado. La figura 12-4 muestra el proceso de caracterización de las diferentes muestras de material compuesto a tracción.

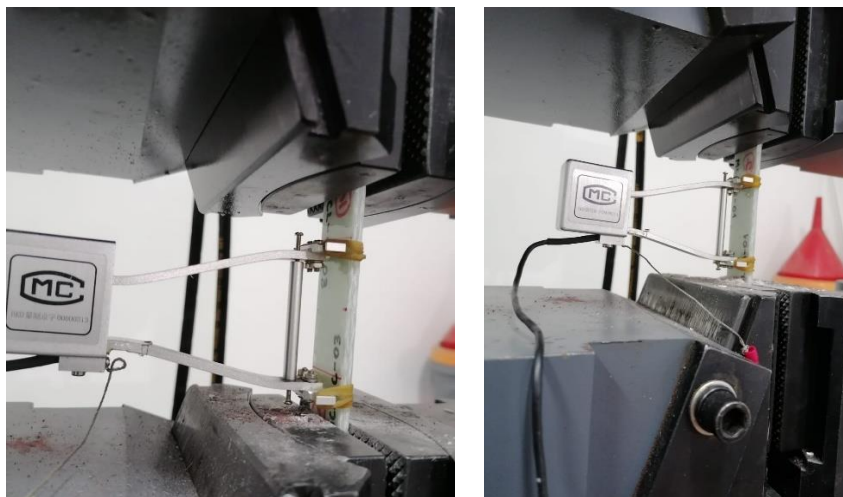


Figura 12-3: Especímenes sometidos a ensayos de tracción

Realizado por: Loor, 2023

3.12 Influencia de factores en el material laminado por diseño de experimentos

Con el propósito de analizar estadísticamente la influencia que los factores manejados en la síntesis de los laminados, como lo son la orientación de fibra y el número de capas, tienen sobre los resultados obtenidos experimentalmente por medio de los ensayos de tracción, se hizo uso de la herramienta estadística de diseño de experimentos factorial.

3.12.1 Tipo de diseño factorial utilizado

El tipo diseño experimental factorial utilizado para este caso particular, corresponde a un diseño factorial de 3x2, al estar compuesto por dos factores en estudio, como lo son la orientación de fibra y número de capas o laminas en el laminado, con tres y dos niveles respectivamente.

3.12.2 Niveles, tratamientos y corridas en el diseño factorial

Como ya se estableció en el apartado anterior, los dos factores considerados para el estudio no cuentan con el mismo número de niveles. Para el factor A, correspondiente a la orientación de fibra, los tres niveles del mismo están representados con cada una de las tres configuraciones con respecto a la orientación de fibra con la que se sintetizaron los diferentes laminados, es decir $0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$, y $0^\circ/90^\circ/\pm 30^\circ/\pm 60^\circ$; mientras que los dos niveles del factor B, que se refiere al número de capas o laminas, corresponde a la sinterización de los laminados con 8 y 12 capas. El número de tratamientos en el diseño de experimentos está basado en el tipo de diseño factorial utilizado, siendo así que al tener un diseño factorial de 3x2 se tuvieron seis tratamientos, realizándose 18 corridas experimentales.

3.12.3 Modelo estadístico del diseño factorial

El modelo estadístico para el análisis de los efectos principales y de interacción en este diseño factorial, está planteado en base a la expresión mostrada en la ecuación 25.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{para} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad [25]$$

Dónde μ representa la media general, α_i y β_j son los efectos del nivel i-ésimo y j-ésimo del factor A y B respectivamente, $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción de los factores A y B en la combinación ij , y ε_{ijk} es el error aleatorio, bajo la suposición de cumplir con una distribución normal de media cero y varianza constante, e independencia en las observaciones (Gutiérrez y de la Vara, 2012). Para este modelo se cumple con la restricción de que todo lo efectos sumen cero, con el fin de asegurar que el modelo sea único (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0; \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0; \quad \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad [26]$$

3.12.4 Hipótesis de interés del diseño factorial

De este modo en base a lo planteado en el modelo estadístico, es posible plantear las hipótesis nulas y alternas de interés para el modelo factorial en cuestión, tomando en cuenta que $a = 3$, $b = 2$, y $n = 3$, que representan el número de niveles del factor A, B y número de réplica respectivamente. Es así que:

- $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$ (efecto de orientación de ángulo $A = 0$).
 $H_A: \alpha_i \neq 0$, para algún valor de i (efecto de orientación de ángulo $A \neq 0$).
- $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$ (efecto del número de capas $B = 0$).
 $H_A: \beta_j \neq 0$, para algún valor de j (efecto del número de capas para $B \neq 0$)
- $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$, para todo valor de ij (efecto de la interacción de la orientación de fibra y número de capas) para $AB = 0$)
 $H_A: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$, para algún valor de ij (efecto de la interacción de la orientación de fibra y número de capas $AB \neq 0$).

Para poder aceptar o rechazar estas hipótesis, se debe hacer uso de una herramienta estadística adecuada para el caso, como lo es la técnica de análisis de varianza *ANOVA*.

3.12.5 Verificación de supuestos

3.12.5.1 Supuesto de normalidad

Para la verificación de este supuesto los residuos son graficados en una gráfica de probabilidad normal, cuya característica principal se basa en el trazado de una línea recta. La normalidad se verifica cuando los puntos de los residuos tienden a distribuirse de una forma alineada con esta recta.

Algo a destacar es que los puntos graficados no necesariamente tienen que estar alineados perfectamente con la recta, ya que al ser el análisis de varianza una técnica robusta, esta permite desviaciones moderadas con respecto a la presencia de normalidad (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Para comprobar este supuesto, también es posible la aplicación de métodos analítico, siendo la prueba de Anderson-Darling, Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov las más utilizadas. La prueba de Anderson-Darling tiende a ser la que más se recomienda según Gutiérrez y de la Vara (2012), ya que tiene una mayor potencia en la detección de ausencia de normalidad en comparación a otras pruebas (Levin et al., 2012).

Las hipótesis para comprobar con la prueba de Anderson-Darling están basadas en que, si el *valor-p* es mayor al nivel de significancia α utilizado, se acepta la hipótesis nula H_0 , concluyendo que los datos siguen una distribución normal; mientras que si se tiene un *valor-p* menor o igual al nivel de

significancia α , se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna H_A , teniendo así que los datos no siguen una distribución normal (Guthrie, 2022). Esta prueba está representada por la ecuación 27.

$$AD = -N - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{N-i+1}))] \quad [27]$$

Dónde N es el tamaño de la muestra, $F(X)$ es la función de distribución acumulativa, e i es la i -ésima muestra, que es calculada cuando los datos se ordenan en forma ascendente (Guthrie, 2022).

3.12.5.2 Supuesto de varianza constante

Una forma de comprobar este supuesto es realizando una gráfica de los residuos, en el eje vertical, contra los predichos, en el eje horizontal. A partir de esta gráfica, si se observa que los puntos se presentan de una forma aleatoria sin ningún patrón en particular, entonces se puede decir que se está cumpliendo con el supuesto de que los tratamientos poseen una varianza igual; caso contrario, cuando se divise un patrón claro o marcado, como una especie de embudo, por ejemplo, entonces no se estará cumpliendo con este supuesto (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Por otra parte, al igual que en el caso del supuesto de normalidad, también se puede verificar este supuesto de una forma analítica. Principalmente existen dos técnicas que se utilizan con este fin, la prueba de Bartlett y la de Levene.

La prueba de Bartlett es principalmente una técnica usada para probar la homogeneidad en la varianza, la cual es susceptible a la falta de normalidad en los datos analizados, por lo que antes de utilizarse se debe estar seguro de la existencia en los datos de esta (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

En la prueba de Bartlett si el *valor-p* es mayor al nivel de significancia α utilizado, entonces se acepta la hipótesis nula H_0 , es decir que la varianza será igual o constante en cada tratamiento; mientras que si se tiene un *valor-p* menor o igual al nivel de significancia α , se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna H_A , teniendo así que en al menos un tratamiento la varianza no es igual a la de las demás (Gutiérrez y de la Vara, 2012). Esta prueba está representada por la ecuación 28.

$$BT = \frac{(N-k) \ln S_p^2 - \sum_{i=1}^k (N_i - 1) \ln S_i^2}{1 + \left(\frac{1}{3(k-1)}\right) \left(\left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{(N_i - 1)}\right) - \frac{1}{N-k}\right)} \quad [28]$$

Dónde N es el tamaño de la muestra, k es el número de tratamientos, N_i es el tamaño de la muestra en el i -ésimo tratamiento, S_i^2 es la varianza del i -ésimo tratamiento, y S_p^2 es la varianza agrupada, la cual es definida por la ecuación 29.

$$S_p^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - 1) S_i^2}{N - k} \quad [29]$$

Por otra parte, la prueba de Levene es una alternativa a la prueba de Bartlett para probar la homogeneidad de la varianza entre los grupos o tratamientos, con menos sensibilidad a la normalidad que esta última (Guthrie, 2022). Esta prueba está definida por la ecuación 30.

$$LT = \frac{(N-k)}{(k-1)} * \frac{\sum_{i=1}^k N_i (\bar{Z}_i - \bar{Z}_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad [30]$$

Dónde Z_{ij} puede adoptar uno de los siguientes casos

$$\begin{cases} 1. Z_{ij} = |Y_{ij} - \bar{Y}_i| \\ 2. Z_{ij} = |Y_{ij} - \tilde{Y}_i| \\ 3. Z_{ij} = |Y_{ij} - \bar{Y}_i'| \end{cases} \quad [31]$$

Dónde N es el tamaño de la muestra, k el número de subgrupos, N_i el tamaño del i -enésimo tratamiento, Y_{ij} es el i -enésimo dato del tratamiento j , \bar{Z}_i . Son las medias de los tratamientos de los Z_{ij} , $\bar{Z}_{..}$ es la media global de los Z_{ij} , \bar{Y}_i . es la media del i -enésimo tratamiento, \tilde{Y}_i . la mediana del i -enésimo tratamiento y \bar{Y}_i' es la media reducida del 10% de i -enésimo tratamiento (Guthrie, 2022).

3.12.5.3 *Supuesto de independencia*

Una manera fácil de verificar este supuesto es mediante una gráfica de los residuos, ubicados en el eje vertical, y el orden de las observaciones o corridas, en el eje horizontal. En caso de detectarse un patrón definido con no aleatoriedad, significaría que no se está cumpliendo con este supuesto, por el contrario, si se tiene un patrón donde los puntos graficados están ubicados de forma aleatoria dentro de una zona con apariencia de banda horizontal, entonces se estará cumpliendo con el supuesto de independencia (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

3.12.5.4 *Transformación para la estabilización de varianza y normalidad de datos*

Una manera de lograr cumplir con el supuesto de varianza constante, y por ende también cumplir con la normalidad, es la aplicación de una transformación de las observaciones o datos de estudio Y_{ij} , con lo que se consigue disminuir las diferencias en la dispersión, sin que esto afecte los resultados del análisis (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

Una de las técnicas utilizada para este propósito es la transformación de *Box-Cox*, que se basa en una transformación de tipo exponencial, con lo cual se consigue corregir la asimetría en las varianzas, logrando así una distribución normal (R-CORDER, 2022).

La transformación Box-Cox está basada en la ecuación 32, tanto para valores de λ positivos como negativos (Statistics How To, 2022).

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \frac{(Y_i + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1}, & \text{si } \lambda_1 \neq 0; \\ \log(Y_i + \lambda_2), & \text{si } \lambda_1 = 0; \end{cases} ; Y_i + \lambda_2 > 0 \quad [32]$$

Dónde:

$$\lambda_2 = \frac{Z_i(\text{máximo}) - Z_i(\text{mínimo})}{10} - Z_i(\text{mínimo}) \quad [33]$$

$$Z_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{s} \quad [34]$$

Dónde Y_i representa la muestra a transformar en función de un valor dado de λ_1 óptimo, para la obtención de normalidad y varianza constante en la muestra; \bar{Y} y s son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente (Flanagan, 2011).

Básicamente esta transformación trabaja en base a la utilización de un exponente λ , el cual varía entre -5 y 5. Al estimar el valor óptimo de λ , y si este se presenta en decimales, se recomienda que se utilice el valor más cercano como se presenta en la tabla 9-3, que muestra las principales transformaciones de la familia *Box-Cox*, para facilidad en la interpretación posterior de resultados (R-CORDER, 2022).

Tabla 9-3: Tabla de transformaciones de la familia Box-Cox

| Valor Lambda (λ) | Transformación (Y') |
|---|-------------------------|
| -2 | Y^{-2} |
| -1 | $Y^{-0.5}$ |
| -0.5 | Y^{-1} |
| 0 | $\log(Y)$ |
| 0.5 | $Y^{0.5}$ |
| 1 | Y^1 |
| 2 | Y^2 |
| **Nota: Y representa la respuesta o valor a transformar | |

Realizado por: Loor, 2023

Como se puede observar en la tabla anterior, cuando λ asume un valor de uno, los datos no pasan por ninguna transformación, manteniéndose así los valores originales de la muestra.

3.13 Simulación numérica de material compuesto lamiando

A través de método de elemento finito (*FEM*) se replica el proceso de caracterización del material laminado por ensayo de tracción en las diferentes configuraciones plateadas en este trabajo, y así comparar dichos resultados con los obtenidos en los ensayos experimentales. Los laminados son

modelados tomando en cuenta dirección de fibra, número de capas, etc., que son características típicas para este tipo de material.

3.13.1 Modelación y validación de material compuesto laminado

3.13.1.1 Geometría CAD y propiedades de material

La generación de la geometría CAD de la probeta se realizó en base a la utilización de elementos de tipo superficie o *Shell*. Las dimensiones de la geometría están basadas en las mismas utilizadas para las muestras utilizadas en los ensayos experimentales, tal como se observa en la figura 13-3.

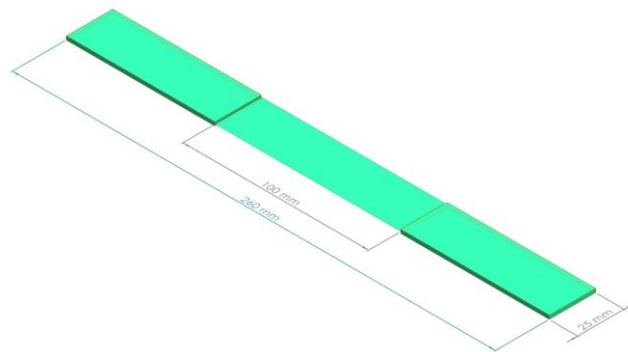


Figura 13-3: Geometría tipo *Shell* de probeta

Realizado por: Loor, 2023

La utilización de elementos tipo *Shell* se sustenta en el hecho de que, en la modelación de materiales compuestos, sobre todo laminados, se requiere de una superficie base donde a partir de esta se apilara las distintas capas o laminas para generar así el espesor final del laminado (ANSYS, 2013, p. 16).

Ya que la lámina es la unidad fundamental del laminado, las principales propiedades mecánicas de estas son necesarias para su modelado, con lo que posteriormente se podrá establecer la configuración de arreglo deseada en cuanto al ángulo de orientación de fibra y número de capas.

En la obtención de las propiedades mecánicas de una lámina de material compuesto tres enfoques pueden considerarse. El primero se basa en la obtención de las propiedades mecánicas de la lámina aplicando el concepto de la regla de mezclas, a partir de las proporciones en volumen de refuerzo (v_f) y matriz (v_m), pudiéndose ajustar esta expresión en base a las propiedades requeridas, como se expresa en la ecuación general 35; el segundo enfoque se basa en la utilización de información disponible en la literatura de acuerdo a las especificaciones de los materiales constituyentes; y el último, a través de ensayos de laboratorio sobre muestras de la propia lámina, lo que resulta en la obtención de las principales propiedades mecánicas principales.

$$E_{11} = E_f v_f + E_m v_m \quad [35]$$

$$G_{12} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{vf} \left(1 - \frac{G^m}{G_{12}^f} \right)} \quad [36]$$

Para este caso, mediante ensayos de laboratorio se procuraron las principales propiedades mecánicas requeridas de la lámina con refuerzo de fibra de vidrio y matriz de resina epóxica, de donde se puede además obtener otras propiedades requeridas a través de estos valores mediante la aplicación de ecuaciones generales, como la mostrada en la ecuación 36.

La figura 14-3 muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas por ensayos de tracción de diversas muestras de lámina de fibra de vidrio en tejido plano al 40% de fracción volumétrica con resina epóxica como matriz.

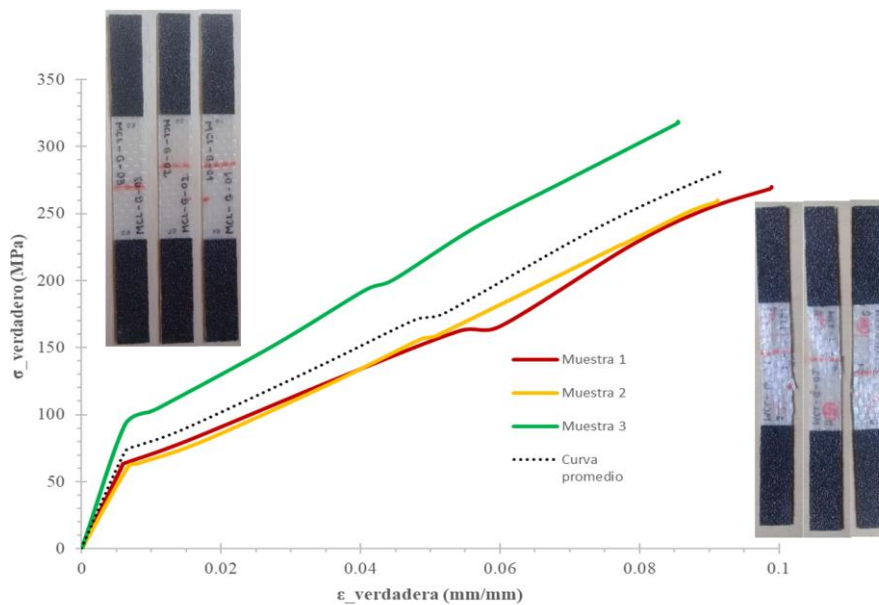


Figura 14-3: Curva esfuerzo-deformación de lamina

Realizado por: Loor, 2023

Dado el hecho que la lámina caracterizada está compuesta por fibra de vidrio en forma de tejido plano, donde su urdimbre y trama presentan las mismas cualidades en cuando al número de hilos por metro cuadrado, esto da origen a que se tenga propiedades de igual magnitud en las direcciones longitudinal y transversal de la lámina, como es el caso para los módulos de elasticidad (E) por ejemplo, como se observa en la figura 15-3.

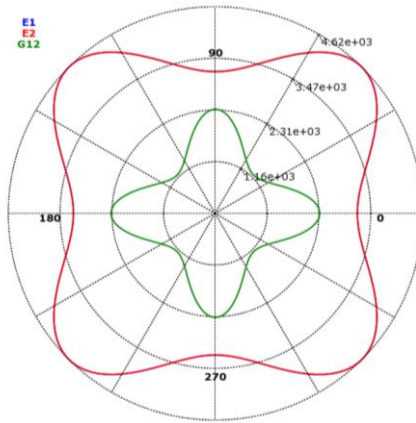


Figura 15-3: Diagrama polar de propiedades elásticas de la lámina

Realizado por: Loor, 2023

3.13.1.2 Modelación laminados

Para la modelación del material compuesto laminado en las diversas configuraciones se hace uso del módulo *Ansys Composite PrepPost o ACP*, dentro del software *Ansys Workbench* (versión estudiantil), el cual permite modelar materiales compuestos en general, logrando que estos se modelen con las mismas características como se realizaría en la síntesis real de estos.

Se carga de la geometría *CAD* de elemento tipo *Shell* sobre el que se le aplicara las diferentes capas de material compuesto laminado. Para el modelado del laminado primero se debe establecer las características de la lámina a utilizar, basado en la asignación de un espesor y las principales propiedades mecánicas de esta.

Dentro de la generación del laminado, se establecen las diferentes direcciones de orientación del refuerzo en base a las configuraciones planteados generando los *Stackups* deseados. La dirección longitudinal y transversal de dirección de fibra en el laminado se definen generando *Rossetes*. Del mismo modo, se establece la dirección de apilamiento de las láminas de sobre las superficies a laminar, mediante la creación de *Oriented Selection Sets*.

Por último, se establecen *Modelling Groups* para integrar así todos los parámetros anteriormente configurados, con el fin de completar el modelado del material laminado sobre la superficie de la geometría *CAD*, obteniéndose el espesor final que este tendrá para el posterior análisis.

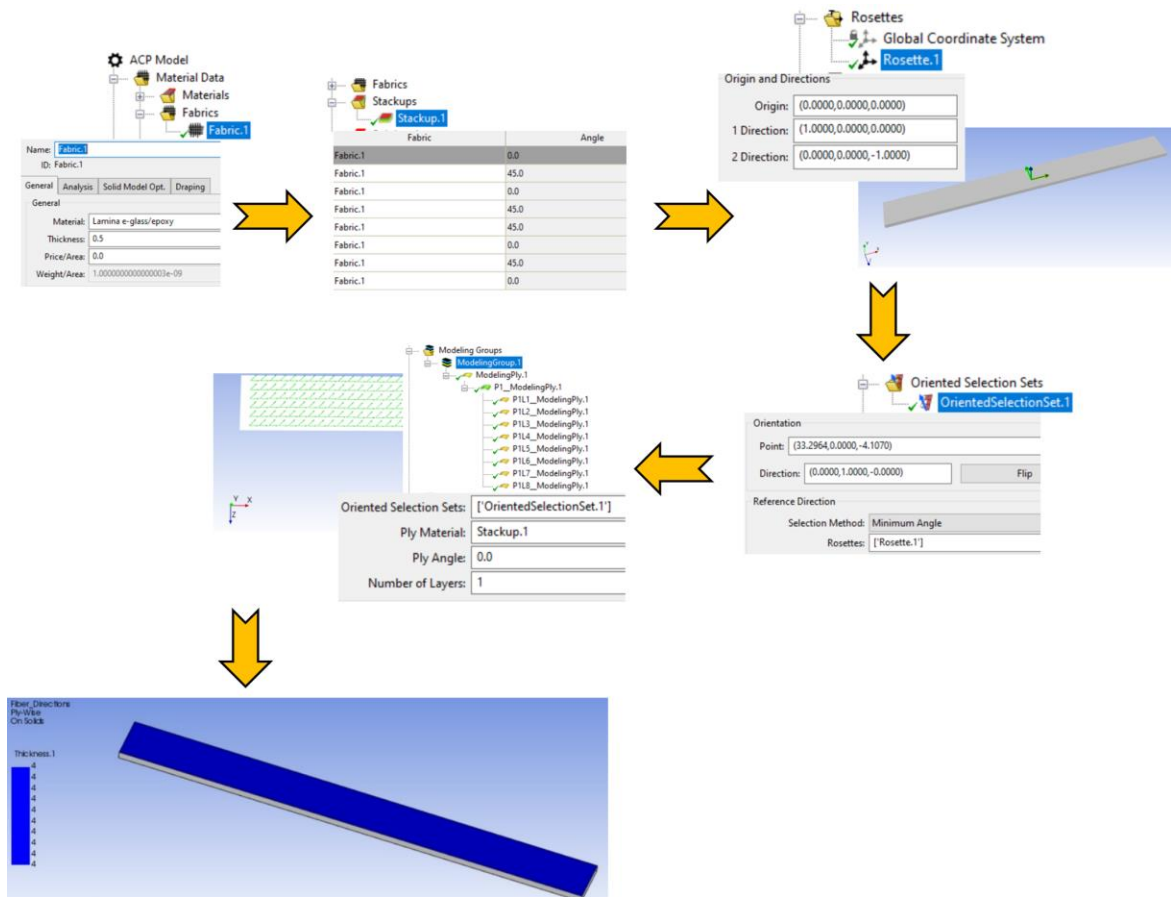


Figura 16-3: Flujo de proceso de modelación de laminado

Realizado por: Loor, 2023

Completado el proceso de modelado del material laminado se transfiere la información del modelo del material laminado generado al módulo de análisis estructural implícito de *Ansys* para el respectivo análisis. La figura 16-3 muestra el flujo del proceso anteriormente descrito.

3.13.1.3 Generación de malla y condiciones de contorno

Para la verificación de la calidad de malla de un modelo analizado por el método del elemento finito, varios son los criterios que se pueden utilizar para tal propósito. Para este trabajo se utilizó el criterio Jacobiano, con el cual se puede evaluar si la malla cumple con los parámetros indicado o no en base a una serie de rango de valore, tal como lo que se presentan en la tabla 10-3.

Tabla 10-3: Criterio Jacobiano para calidad de malla

| Inaceptable | Malo | Aceptable | Bueno | Muy bueno | Excelente |
|--------------|-------------|-------------|------------|-----------|------------|
| -1.00 / -0.6 | -0.5 / -0.2 | -0.1 / 0.00 | 0.00 / 0.1 | 0.2 / 0.5 | 0.6 / 1.00 |

Realizado por: Loor, 2023

Fuente: (ANSYS, 2021)

El modelo en general está constituido por de 354 elementos y 420 nodos, obteniéndose un valor para el criterio Jacobiano de 0.989, el cual se encuentra dentro de un rango excelente en cuanto a la calidad de malla.

Para las condiciones de contorno, al espécimen de laminado sometido a tracción se le aplica una restricción fija y una de desplazamiento. Para simular el ensayo de tracción en sí, se aplica una restricción de movimiento con *Fixed support* en uno de los extremos de la geometría para representar el agarre de las mordazas de la máquina de ensayos, y un *Displacement* en el otro extremo, establecido para que el movimiento se de en una única dirección, tal como se muestra en la figura 17-3.

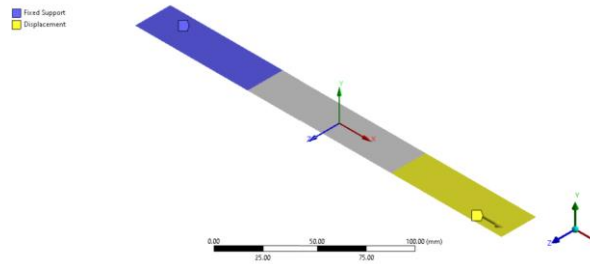


Figura 17-3: Condiciones de contorno en espécimen de laminado

Realizado por: Loor, 2023

3.13.1.4 Criterio de falla

Con el fin de comparar los resultados experimentales obtenidos para cada una de las configuraciones de laminados propuestas, y dar validez a los mismos, a cada espécimen de estos se le aplico a un valor de deformación máxima, la cual fue alcanzada durante los ensayos, hasta alcanzar el punto donde todas o la mayoría de las capas o laminas en el laminado fallan, estableciendo para esto un determinado criterio de falla.

La evaluación de falla en los laminados se realizó en base al valor generado por el *Factor Reverso Inverso* o *IRF* por sus siglas en inglés, que define el margen inverso de falla como una medida a la probabilidad de que el material falle (Mastrogiannakis y Vosniakos, 2020) utilizado como un parámetro de falla en materiales compuesto, tal como se muestra en la ecuación 37.

$$IRF = \frac{\text{Esfuerzo aplicado}}{\text{Esfuerzo último}} \begin{cases} > 1 \rightarrow \text{falla} \\ < 1 \rightarrow \text{no falla} \end{cases} \quad [37]$$

Se estableció el criterio de *Tsai-Wu* como criterio principal de falla, que se basa en la energía de falla de deformación total de *Beltram* (Kaw, 2006, pp. 153-156), en donde se considera que la lámina en un laminado fallara si se viola la expresión de la ecuación 38.

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_2\sigma_2 + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad [38]$$

Dónde las componentes H_1 , H_2 , H_{12} , H_{11} , H_{22} , H_6 y H_{66} son expresadas en función de los esfuerzos últimos de la lámina (Kaw, 2006, pp. 153-156), como se presentan a continuación:

$$H_1 = \left(\frac{1}{X_1^t} - \frac{1}{X_1^c} \right) \quad [39]$$

$$H_2 = \left(\frac{1}{X_2^t} - \frac{1}{X_2^c} \right) \quad [40]$$

$$H_{12} = -\frac{1}{2*(X_1^t)^2} \quad [41]$$

$$H_{11} = \frac{1}{X_1^t * X_1^c} \quad [42]$$

$$H_{22} = \frac{1}{X_2^t * X_2^c} \quad [43]$$

$$H_6 = 0 \quad [44]$$

$$H_{66} = \frac{1}{t_{12}^2} \quad [45]$$

Mediante la evaluación de falla en el laminado es posible determinar los puntos en donde una cierta lamina es más susceptible a fallar, como se muestra en la figura 18-3.

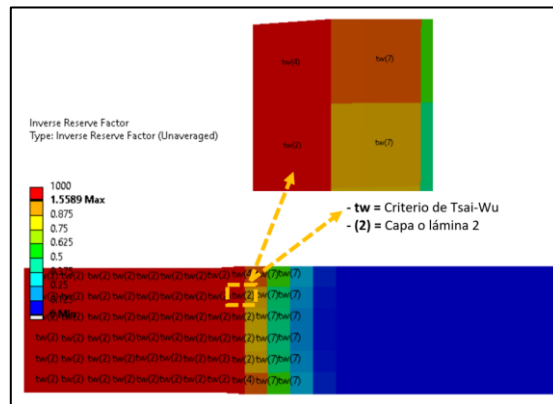


Figura 18-3: Codificación de Falla en laminado por *IRF*

Realizado por: Loor, 2023

El esfuerzo máximo soportado por cada laminado en la simulación, para ser comparado con su contraparte experimental, se evalúa a partir del del esfuerzo normal generado en la dirección correspondiente en el espécimen , como se ilustra de la figura 19-3.



Figura 19-3: Esfuerzo normal de laminado con configuración a 0/90/45

Realizado por: Loor, 2023

3.14 Material compuesto laminado en cajas de impacto como propuesta

El material compuesto de tipo laminado propuesto en este estudio se aplicó en cajas de impacto de vehículos. Para esto, mediante herramientas por simulación numérica o *FEM* se modeló el material en cuestión, considerando factores que intervienen en estos materiales en particular, como lo son orientación de fibra, cantidad de láminas que conforman el laminado, y otros.

3.14.1 Geometría base de caja de impacto

Como geometría base, donde se prueban las diferentes configuraciones de material compuesto laminado antes propuestas, se utiliza un modelo *CAD* de una caja de impacto rectangular, siendo esta la forma más común a encontrarse en los sistemas de parachoques de los vehículos. Las dimensiones internas de la caja de impacto en cuestión son 120x82x62 mm, con redondeos en las esquinas de radio de 6 mm, tal como se muestra en la figura 20-3 .

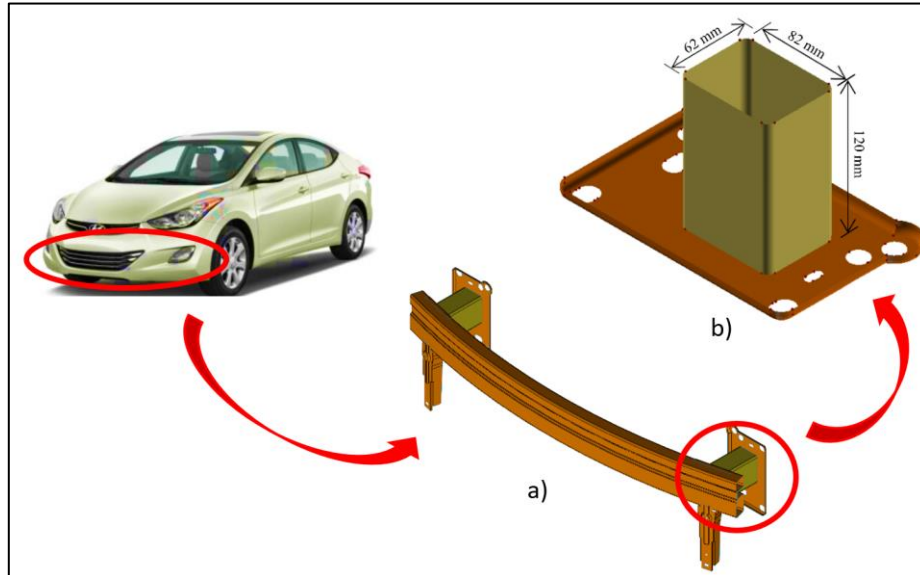


Figura 20-3: Esquema del a) sistema de parachoques con b) caja de impacto

Realizado por: Loor, 2023

Además se generó una geometría plana de 120x120 mm, que actúa como un elemento impactador. Este elemento impactará a una velocidad dada en dirección longitudinal de la caja de impacto, emulando así el impacto que se produciría durante la colisión frontal de un vehículo.

Las geometrías fueron modeladas en base a elementos de tipo *shell*, lo que facilita el proceso de modelado del material compuesto y brinda una buena eficiencia computacional.

3.14.2 Mallado de geometría

Los modelos geométricos se mallaron en base a elementos de 2D de 4 nodos, basado en la formulación de elemento tipo *shell* de *Belytschko-Tsay*, con un tamaño de elemento de 2 mm, tanto para la geometría de la caja de impacto como plato impactador. Con un tamaño de elemento de malla en un rango entre 2 y 5 mm no se afecta la sensibilidad de los resultados tal como lo mencionan Cherniaev et al. (2018, pp. 6-7), Rabiee y Ghasemnejad (2022, pp. 16-18), y Li (2019, pp. 63-64) en sus trabajos, consiguiéndose así una mejora en la relación de resultados-eficiencia computacional.

El modelo está constituido por 11388 elementos y 11810 nodos, que incluye la geometría de caja de impacto y plato impactador, con una calidad de malla en base al criterio Jacobiano de 0.997, considerándose una malla excelente según la tabla 10-3. Las características de malla generada se presentan en la figura 21-3.

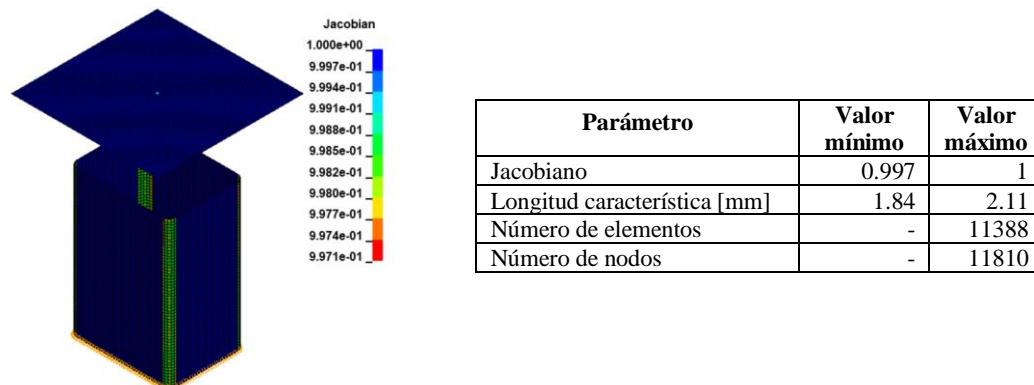


Figura 21-3: Característica de malla

Realizado por: Loor, 2023

Considerando la no linealidad de un problema de naturaleza explícita, es necesario lograr una estabilidad en la solución del mismo, considerando el tamaño de malla establecido en función de un paso o intervalo de tiempo crítico. La comprobación de dicho proceso está basada en el cumplimiento de la condición *Courant-Friedrichs-Lewy*, la cual establece que este incremento de tiempo debe ser menor al tiempo necesitado para una onda acústica recorra la longitud característica del elemento más pequeño de la malla, tal como se muestra en la ecuación 46.

$$\Delta t \leq f * \left(\frac{L}{c}\right) \quad [46]$$

Dónde f es el factor de seguridad, que se asume que tiene que ser ≤ 1 ; L la longitud característica del elemento más pequeño de la malla; y C la velocidad de la onda en el material, la cual está definida por la ecuación 47.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [47]$$

Dónde E y ρ representan el módulo de elasticidad y densidad.

En base a la característica de malla generada y aplicando la condición antes mencionada, es recomendable utilizar un paso incremental crítico menor a $1.46e-6$ en la solución del problema.

3.14.3 Condiciones de contorno

Dentro de las condiciones de contorno necesarias para establecer una simulación de impacto, se encuentra la velocidad de impacto y las restricciones de movimiento de las geometrías actuantes.

Existen ciertas regulaciones internacionales, como la *RCAR*, *UN ECE R42*, *AZT Test*, *FMVSS 581*, etc., que se utilizan para evaluar el comportamiento de los sistemas de seguridad pasiva de los vehículos. Estas normativas establecen que dichas pruebas se deben realizar a bajas velocidades, que varían entre un rango de 2.5 a 16 km/h, ya que se consideran que los componentes, tal como barras de cajas de impacto, están pensados para funcionar plenamente dentro de estos rangos.

Para este estudio se tomó en consideración el valor máximo dentro de dicho rango de velocidad, estableciendo así la velocidad de 16 km/h como velocidad en la que el plato impactador con una masa de 100 kg impactara longitudinalmente la caja de impacto a base de material compuesto laminado.

Para la restricción de movimiento se estableció que el extremo longitudinal inferior de la de la caja de impacto estuviera fija, para ello se fijaron los nodos de los elementos presentes en este extremo, restringiendo así el movimiento traslacional y rotacional de la caja en todas sus direcciones.

También se estableció una restricción de movimiento, tanto rotacional como traslacional, a excepción de la dirección longitudinal de la caja de impacto, que será la dirección de impacto, para todos los nodos del plato impactador, tal como se observa en la figura 22-3.

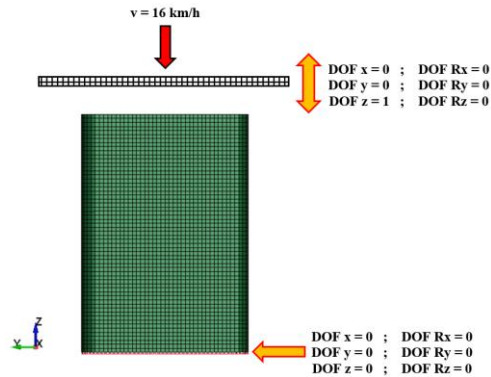


Figura 22-3: Condiciones de contorno de la simulación

Realizado por: Looor, 2023

3.14.4 Contactos

Durante la solución de un problema numérico, más aún cuando este es de naturaleza explícita, es importante establecer los contactos que dará paso a la correcta interacción entre los diferentes elementos presentes en la simulación.

Para este estudio se implementó un contacto automático de superficie simple (*Contact_Automatic_Single_Surface*), que es un tipo de contacto recomendado para casos en donde la superficie de un cuerpo entrara en contacto con otro producto de un impacto. En este tipo de contacto no surge la necesidad de definir superficies maestras o esclavas, ya que la herramienta numérica las define estos parámetros de acuerdo con la situación. Con este contacto además se evita que los elementos de paredes de la caja de impacto se penetren entre sí mismas durante la deformación de esta. Para los coeficientes de estático y dinámico de fricción de 0.3 y 0.2 respectivamente (Tribology-abc, s.f.).

Dentro de la misma carta del contacto se activan ciertos controles adicionales para mejorar el desempeño del contacto. Cuando un material rígido entra en contacto con uno más suave es importante establecer una formulación de restricción suave (*SOFT*), mediante la opción de restricción suave. Algo adicional a considerar, es que hay que asegurarse que todos los espesores de las superficies, incluyendo cuerpos rígidos, sean consideradas dentro del algoritmo del contacto (*SHLTHK*). La figura 23-3 resume los dos parámetros mencionados.

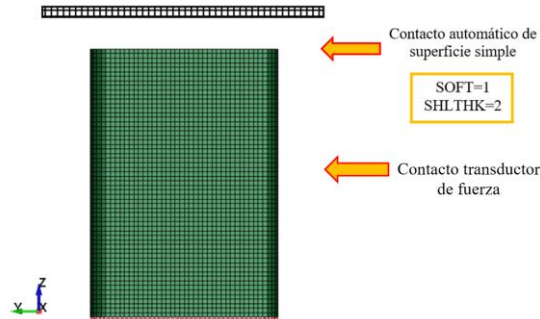


Figura 23-3: Configuración de contactos

Realizado por: Loor, 2023

Con el fin de extraer la información generada por el contacto establecido, se estableció un contacto de tipo transductor de fuerza (*Contact_Force_Trasducer*), lo que permitirá posteriormente obtener las gráficas de las fuerzas de generadas por la colisión entre el plato impactador y la caja de impacto. El único parámetro para definir dentro de esta opción es el elemento esclavo, el cual es la caja de impacto.

3.14.5 Materiales

La modelación de un material compuesto laminado se realiza en base al agrupamiento de láminas, como anteriormente se había mencionado, ya sean estas de un mismo o diferente material. Basado en este hecho, es importante conocer las propiedades mecánicas y físicas principales de dichas laminas.

Mediante ensayos de tracción se obtuvieron las propiedades constitutivas de la lámina de fibra de vidrio de tejido bidireccional plano grado *E* y resina epóxica, en fracción volumétrica de 40% y 60% respectivamente, utilizadas para la conformación de los diferentes laminados de este estudio, tal como se muestra en la tabla 11-3.

Tabla 11-3: Propiedades de lámina fibra de vidrio y resina epóxica

| Propiedad | | Valor [unidad] |
|-------------------------|---------|---------------------------|
| Módulo de elasticidad | EA = EB | 3.17 [GPa] |
| Módulo de corte | GAB | 2.33 [GPa] |
| | GBC | 0.9 [GPa] |
| | GCA | 0.9 [GPa] |
| Coefficiente de Poisson | PR | 0.31 [-] |
| Esfuerzo último | XT = YT | 282.96 [MPa] |
| | XC = YC | 282.96 [MPa] |
| | SC | 97.1 [MPa] |
| Espesor | THICK | 0.5 [mm] |
| Densidad | RO | 2000 [kg/m ³] |

Realizado por: Loor, 2023

El modelo de material usado está basado en un modelo de falla mejorado de materiales compuesto, *tipo 54 (Mat_Enhanced_Composite_Damage)*, el cual está basado en la teoría de falla de *Chang-Chang* (Livermore Software Technology Corporation, 2016, pp. 298-308), que se utiliza comúnmente para simular la progresión de daño en materiales ortotrópicos en problemas de impacto, siendo además el que muestra un mejor comportamiento en la predicción del comportamiento basado en el desempeño de absorción de energía ante impacto con relación a otros modelos disponibles (Li, 2019, p. 66; Rabiee y Ghasemnejad, 2022, pp. 14-15).

Considerándose que al estar trabajando con materiales compuestos estos están constituidos por dos partes esenciales, como lo son el refuerzo y matriz, es vital que se calibren ciertos parámetros no físicos relacionados a los mismos dentro de la carta del modelo del material, lo que permitirá obtener un comportamiento más preciso y estable del material compuesto en la simulación. Estos parámetros son en principio calibrados en base a la información sugerida en el manual de la herramienta numérica o la información de la literatura disponible.

Varios son los enfoques que se pueden seguir en la calibración del modelo de material en cuestión. Un enfoque común, teniendo en cuenta la naturaleza del problema a simular, es la calibración de dos parámetros principales, como lo son el límite de esfuerzo mínimo en compresión longitudinal (*SLIMC1*) y el factor de reducción de la resistencia en el frente de impacto (*SOFT*) de los elementos que comparten nodos con aquellos elementos que fallan (Cherniaev et al., 2018, pp. 7-10; Li, 2019, p. 97). Estos parámetros se establecieron en 0.375 y 0.8 respectivamente, como valores recomendados.

Para la definición adecuada de la dirección de la fibra para cada elemento tipo *shell*, es prudente precisar un sistema de referencia para tal propósito. Por tal motivo se estableció la dirección del material como globalmente ortotrópico dentro de la carta del material (*AOPT*). Así mismo considerando que se trabaja con un tejido de fibra bidireccional, se estableció un comportamiento para la fibra tanto en sentido longitudinal como transversal (*2WAY*). La tabla 12-3 resume los parámetros adicionales a las propiedades constitutivas establecidos en la carta del modelo de material *tipo 54*.

Tabla 12-3: Parámetros adicionales de carta de material tipo 54

| Parámetro | | Valor | Unidad | Descripción |
|------------|--|---------|--------|---|
| AOPT | Configuración de ejes locales del material ortotrópico | 2 | - | Se establece un sistema de ejes de material globalmente ortotrópico. |
| A1, A2, A3 | Dirección longitudinal de la fibra | 0, 0, 1 | - | Dirección de vectores para sistema de ejes de material globalmente ortotrópico. |
| D1, D2, D3 | Dirección transversal de la fibra | 0, 1, 0 | - | |
| 2WAY | Configuración unidireccional o bidireccional de la fibra | 1 | - | Comportamiento bidireccional de la fibra. |

| | | | | |
|--------|---|-------|---|---|
| TFAIL | Criterio del tiempo incremental o paso crítico para eliminación de elementos después de falla | 1e-07 | s | En base al criterio de paso incremental crítico calculado en apartado anteriores. |
| SOFT | factor de reducción de la resistencia en el frente de impacto | 0.8 | - | Valor calibrado acorde a la literatura (Cherniaev et al., 2018; Li, 2019). |
| FBRT | Reducción de la resistencia a la fibra en tensión | 0 | - | Determinado por el valor del esfuerzo último (XT). |
| YCFAC | Factor de reducción de resistencia de la fibra a compresión posterior a la falla de la matriz | 2 | - | Valor recomendado acorde al manual (Livermore Software Technology Corporation, 2016). |
| CRIT | Criterio de falla | 54 | - | Modelo de material tipo 54. |
| SLIMT1 | Factor del límite de esfuerzo mínimo en tensión longitudinal | 0.01 | - | Valor recomendado acorde al manual (Livermore Software Technology Corporation, 2016). |
| SLIMC1 | Factor del límite de esfuerzo mínimo en compresión longitudinal | 0.375 | - | Valor calibrado acorde a la literatura (Cherniaev et al., 2018; Li, 2019). |
| SLIMT2 | Factor del límite de esfuerzo mínimo en tensión transversal | 0.1 | - | Valor recomendado acorde al manual (Livermore Software Technology Corporation, 2016). |
| SLIMC2 | Factor del límite de esfuerzo mínimo en compresión transversal | 1 | - | Valor recomendado acorde al manual (Livermore Software Technology Corporation, 2016). |
| SLIMS | Factor del límite de esfuerzo mínimo en corte | 1 | - | Valor recomendado acorde al manual (Livermore Software Technology Corporation, 2016). |

Realizado por: Loor, 2023

Dado que se requiere principalmente analizar el comportamiento ante colisión de la caja de impacto en las distintas configuraciones del material, es necesario que el impactador no sufra deformaciones durante el proceso, asumiéndose este como un cuerpo rígido. Para tal caso se utilizó un modelo de material rígido, *tipo 20 (Mat_Rigid)*, cuya carta requiere solo definir las propiedades constitutivas básicas del material, como lo son la densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de *Poisson*. La tabla 12-3 muestra las propiedades típicas del acero, que fue el material utilizado para aplicarse en el impactador.

Tabla 13-3: Propiedades para material *tipo 20*

| Propiedad | | Valor [unidad] |
|------------------------|----|---------------------------|
| Densidad | RO | 7830 [kg/m ³] |
| Módulo de elasticidad | E | 200 [GPa] |
| Coeficiente de Poisson | PR | 0.30 |

Realizado por: Loor, 2023

3.14.6 Modelación de cajas de impacto con material compuesto laminado

Para la modelación de las cajas de impacto a base de material compuesto laminado, es importante definir la orientación de fibra, número de láminas o capas y espesor de estas, y así establecer correctamente las propiedades mecánicas del material ortotrópico.

Para establecer que la caja de impacto está hecha de material compuesto, dicha parte debe definirse como tal (*Part_Composite*), donde se asigna la carta de material compuesto, ya anteriormente generada, espesor, y la orientación de fibra para cada capa o lamina que conforma la configuración del material compuesto laminado. Dependiente de cuantas capas se asigne al material en dicha carta, dependerá el espesor de la caja de impacto.

Se estableció la superficie interior de la geometría de la caja de impacto como superficie de referencia para de inicio de la conformación del laminado (*NLOC*), así el espesor del laminado es generado desde el interior hacia el exterior de la caja de impacto. Un factor de corrección de cizallamiento transversal (*SHRF*) recomendado de 0.833 fue establecido. La figura 24-3 presenta un esquema general de la modelación de la caja de impacto en base a la configuración del laminado *MCL_B*.

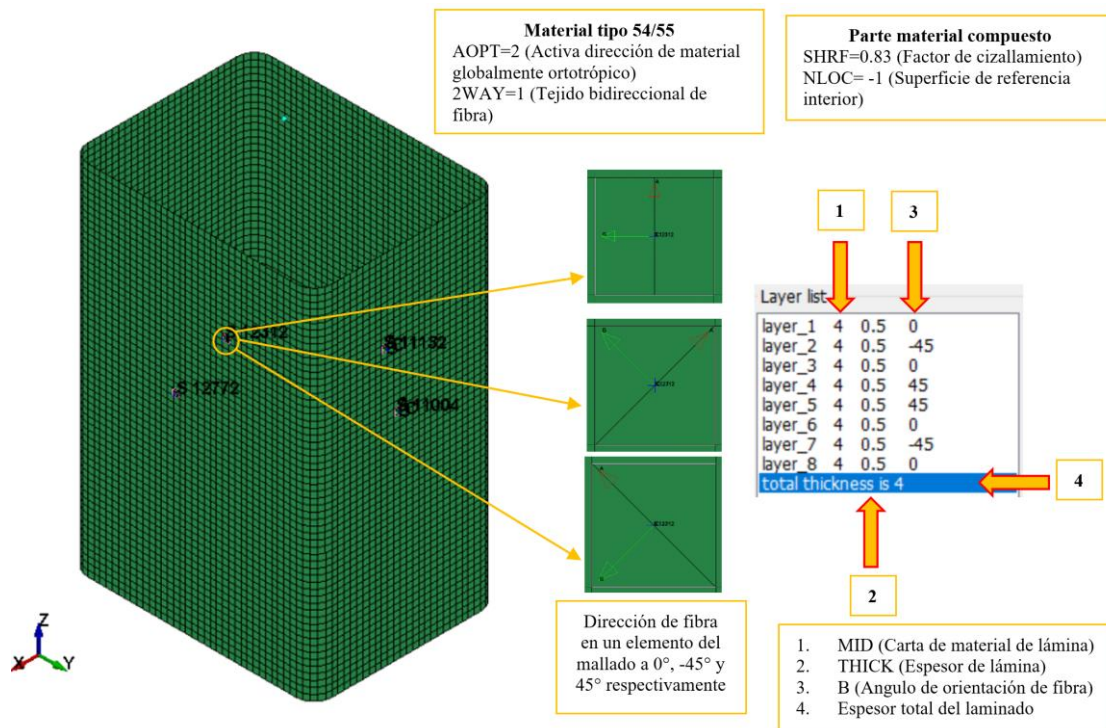


Figura 24-3: Definición de parámetros de laminado *MCL_B*

Realizado por: Loor, 2023

3.14.7 Controles en la simulación

La incorporación de ciertos de controles es importante durante el proceso la simulación, ya que así se disminuye la ocurrencia de errores en esta y se promueve la estabilidad de la misma, complementando del mismo modo la modelación del material compuesto.

Con el objetivo de minimizar la sensibilidad que pueda provocar la actualización automática del sistema de coordenadas del elemento producto de la rotación del mismo durante la deformación, se

activa la numeración de nodos invariantes para elementos de tipo *shell* y sólidos mediante un control de precisión (*Control_Accuracy*). Así mismo, para ayudar en la estabilización de la respuesta ante compresión a la que está sometida la caja de impacto durante la colisión, se establece un control de la viscosidad (*Control_Bulk_Viscosity*), y así en el balance general de energías, la energía interna que se disipa por la viscosidad de los elementos tipo *shell* sea estimada y considerada, con un coeficiente de viscosidad lineal y cuadrático de 0.

Dado el tipo de material utilizado sobre elementos tipo *shell*, se generó un control de este tipo (*Control_Shell*), activando así la teoría de laminado para elementos *shells*, consiguiendo corregir la presunción de una deformación constante de cizallamiento a través del espesor de dichos elementos. Dentro del mismo control, además se desactiva la opción de cambio de espesor para elementos deformables tipo *shell* (*ISTUPD*).

Por último, para evitar modos de deformación no físicos con de energía cero, los cuales no producen esfuerzos ni deformaciones, se estableció un control de *Hourglass* (*Control_Hourglass*) de tipo 4 de *Flanagan-Belytschko*, con un coeficiente de 0. La tabla 14-3 resume los principales parámetros establecido en los distintos controles antes mencionados.

Tabla 14-3: Parámetros de controles

| Control | Parámetro | Valor |
|------------|---------------|-------|
| Precisión | <i>INN</i> | 4 |
| | <i>OSU</i> | 1 |
| Viscosidad | <i>TIPO</i> | -2 |
| | <i>Q1</i> | 0 |
| | <i>Q2</i> | 0 |
| Shell | <i>LAMSHT</i> | 1 |
| | <i>ISTUPD</i> | 0 |
| Hourglass | <i>IHQ</i> | 4 |
| | <i>QH</i> | 0 |

Realizado por: Loor, 2023

3.14.8 Validación de calibración del modelo FEM de material compuesto

Con el propósito de validar la calibración del modelo *FEM* del material compuesto se realizó la simulación de un modelo experimental llevado a cabo en trabajo realizado por Tabiei et al. (2005), en donde somete a impacto un tubo de geometría cuadrada a base de material compuesto.

El modelo experimental consiste en un tubo cuadrado de 50.8x50.8 mm y una altura de 250 mm, como se observa en la 25-3a. sometido a aplastamiento por impacto. El tubo en cuestión está hecho a

base de material compuesto laminado utilizando fibra de vidrio unidireccional, con dos capas de 0.945 mm de espesor y orientación de fibra a $[30^\circ/-30^\circ]$.

Para la realización de la simulación se utilizaron los mismos parámetros descritos en apartados anteriores, en cuanto a las restricciones de movimiento, tamaño y formulación de elementos, contactos, controles, y tipo de modelo de material con sus respectivos valores calibrados, con el propósito de comprobar de que dichos parámetros fueron establecidos correctamente en cuanto a la modelación de materiales compuestos. Para mantener las condiciones del modelo experimental, donde se estudió el comportamiento del tubo dentro de una deformación de 100 mm, el tiempo de simulación se estableció en 10 ms. La velocidad de impacto indicada fue de 10 mm/ms.

En cuanto a las propiedades del material compuesto laminado de tipo unidireccional, se utilizaron las misma proporcionadas por el autor. La 25-3b muestra la carta del modelo de material compuesto utilizado con los respectivos campos requeridos.

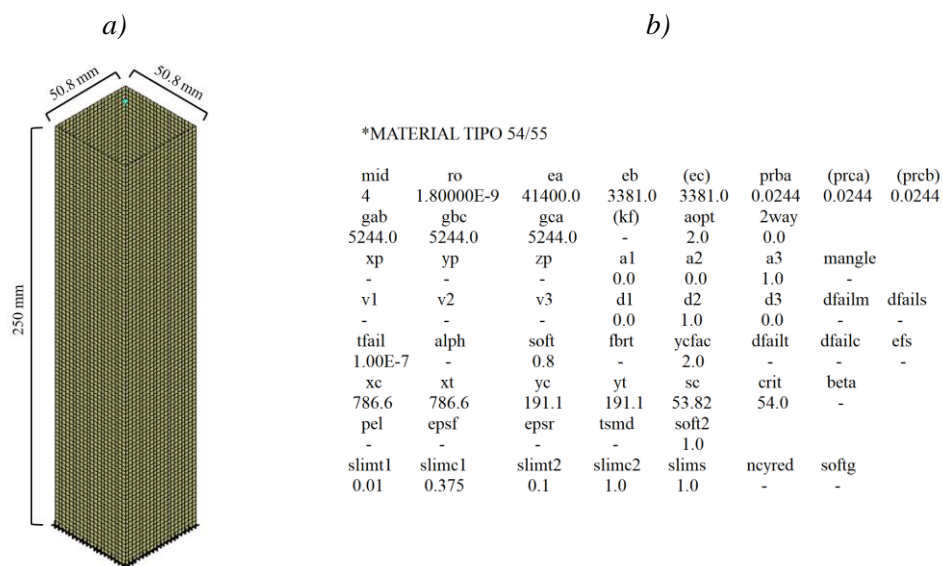


Figura 25-3: Modelo FEM para validación a) geometría, b) carta del material

Realizado por: Loor, 2023

La comparación de resultados se realizó por medio de la gráfica de fuerza-deformación, basado en los resultados experimentales reportados por el autor y los obtenidos por la simulación realizada en el presente trabajo, como se presenta en la figura 26-3, donde se observa una buena correlación de resultados entre la parte experimental y la simulada, en base a la calibración generada del modelo del material para este trabajo.

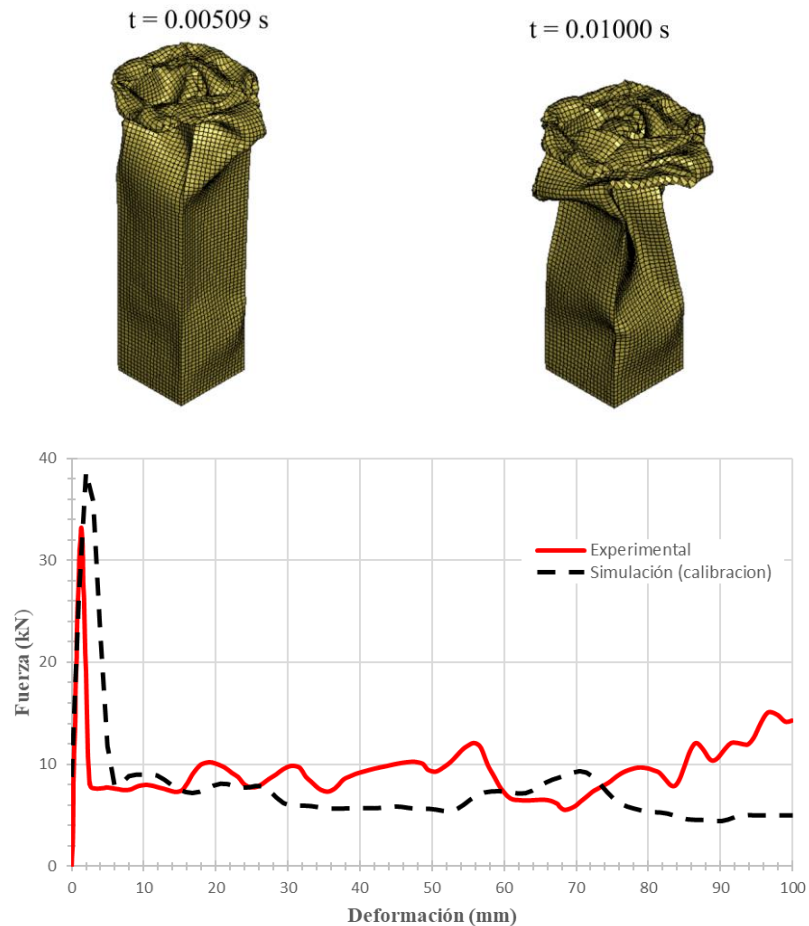


Figura 26-3: Resultado experimental y simulado para calibración

Realizado por: Loor, 2023

3.15 Criterios de evaluación de resistencia al impacto en cajas de impacto

La evaluación del comportamiento de una caja de impacto, y otras estructuras similares, está basada en el estudio de sus características en lo que al desempeño absorción de energía se refiere. Para esto es importante partir del análisis de la curva de fuerza-deformación generada posterior al impacto.

La energía que la caja de impacto puede absorber en un impacto representa el área bajo la curva de la gráfica antes mencionada, tal como se muestra en la figura 27-3, que representa una deformación progresiva (a), lo cual es deseable en un espécimen de caja de impacto en material compuesto, y una deformación de tipo catastrófico al momento de la colisión (b), que se caracteriza por un incremento repentino de fuerza para luego disminuir abruptamente.

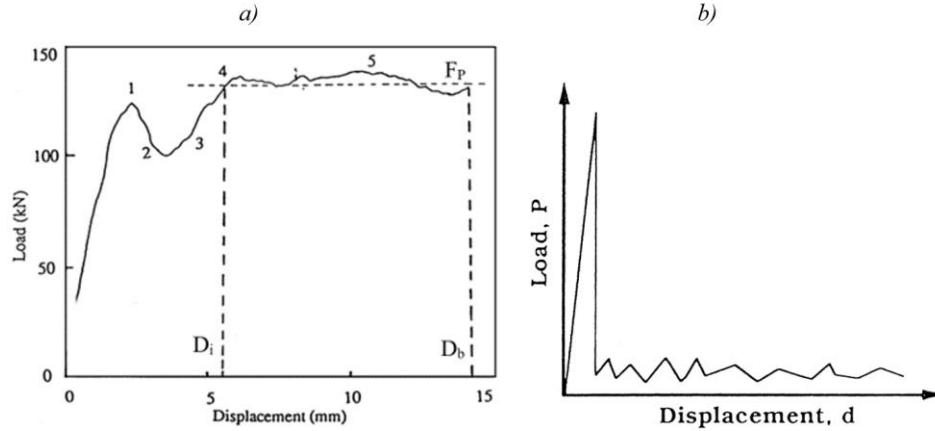


Figura 27-3: Fuerza-deformación en deformación a) progresiva y b) catastrófica

Realizado por: Loor, 2023

La expresión que define una aproximación del área bajo la curva, y por ende la cantidad de energía absorbida (EA), de una caja de impacto durante una colisión está definida por la ecuación 48.

$$EA = \int_0^{D_{max}} F * dD = F_{prom} * D_{max} \quad [48]$$

Dónde F es la fuerza instantánea, D_{max} la distancia deformada en la estructura, y F_{prom} la fuerza promedio generada.

Aunque la energía absorbida juega un papel importante en el diseño de cajas de impacto, un criterio clave a analizar es la absorción de energía específica (SEA), que representa la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de la estructura deformada, en donde lo idóneo es obtener valores altos, ya que esto significara una mayor absorción a menor masa en la caja de impactos. La absorción de energía específica está definida por la ecuación 49.

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad [49]$$

Otro criterio analizado en a lo que estructuras de impacto se refiere es la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE), que es una relación entre la fuerza promedio (F_{prom}) y la fuerza máxima de (F_{max}) alcanzada cuando inicia el proceso de aplastamiento, como se muestra en la ecuación 50, en donde lo ideal para este criterio es un valor cercano a la unidad.

$$CFE = \frac{F_{prom}}{F_{max}} \quad [50]$$

De la ecuación anterior se puede notar que es deseable que la fuerza máxima inicial (F_{max}) debería ser lo suficientemente baja, con lo que se evita la transmisión de cargas a las demás partes del vehículo, y así asegurar la integridad de los pasajeros.

3.16 Optimización de parámetros de diseño para caja de impacto

Algunos parámetros en el diseño de una caja de impacto pueden llegar a influir directamente en las características de resistencia al impacto de estas. Dos de estos parámetros están basados en la geometría que esta adopta y en la presencia de los denominados *triggers*.

En este estudio, primeramente, posterior a la aplicación de las distintas configuraciones de material compuesto laminado como propuesta de material alternativo en una caja de impacto con su geometría base o inicial, y habiendo identificado la o las que presentan mejores resultados en cuanto a los criterios de desempeño de absorción de energía, se plateo una serie de diseños de caja de impacto con diferentes geometrías aplicando dicha(s) configuración(es).

Luego, basado en la geometría y configuración de material con mejores características, se aplican una serie configuraciones de *triggers* y así observar si se consigue mejorara los resultados antes obtenidos. La figura 28-3 esquematiza el proceso de optimización de los parámetros de diseño antes mencionados.

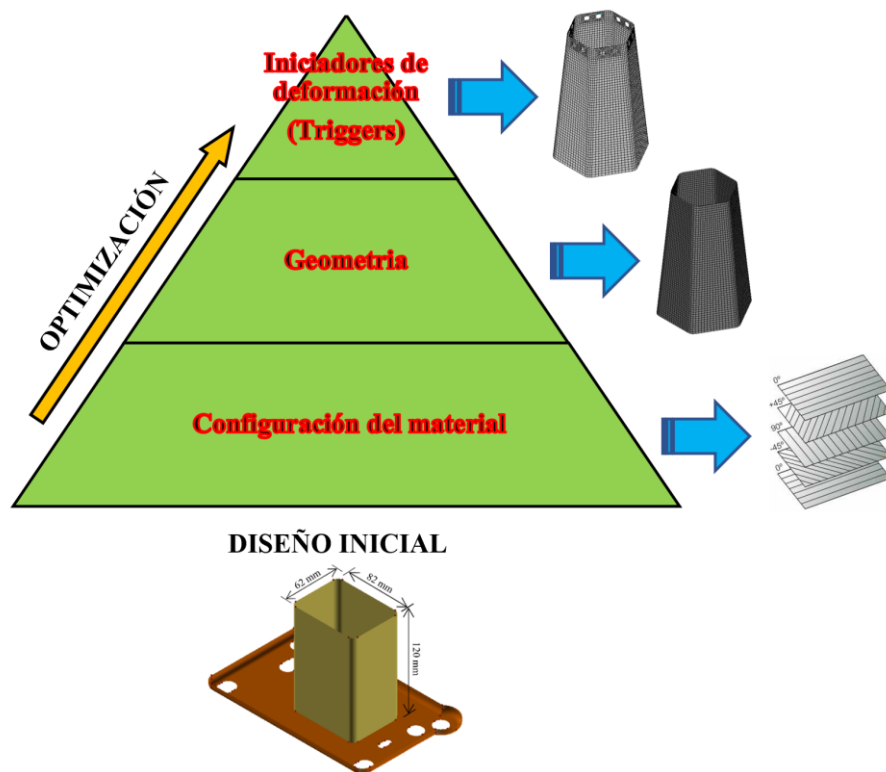


Figura 28-3: Niveles de optimización de diseño de caja de impacto

Realizado por: Loor, 2023

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de caracterización de material compuesto laminado

Sometidas los especímenes de los diferentes laminados sintetizados a ensayos de tracción, se logró obtener las principales propiedades mecánicas que este tipo de ensayo proporciona a través de las curvas de esfuerzo-deformación.

Ya que en un ensayo de tracción la curva de esfuerzo-deformación es obtenida a partir de las dimensiones originales del espécimen ensayado, se debe tomar en cuenta que este está sometido a un cambio continuo de dimensiones a lo largo del ensayo, por lo que dicha curva, conocida como curva ingenieril, no entrega un indicativo verdadero de deformación (ASM International, 2002).

Para la esquematización de una curva verdadera, se debería conocer los cambios de sección presentes en el espécimen en diferentes puntos de carga a lo largo del ensayo, algo que en la práctica se vuelve complicado. Con el fin de obtener una aproximación cercana de esta curva, es posible la aplicación de ciertas expresiones matemáticas en base a los conceptos de esfuerzo y deformación verdaderos, tal como se indica en las siguientes ecuaciones siguientes (Elkady, 2021).

Deformación unitaria verdadera:

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad [51]$$



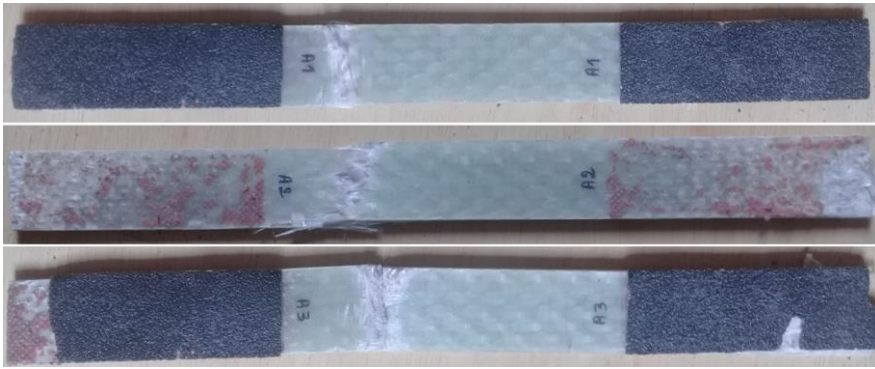
Esfuerzo verdadero hasta de esfuerzo máximo σ_{max_v} :

$$\sigma_v = \sigma * (1 + \varepsilon) \quad [52]$$

Esfuerzo verdadero posterior al esfuerzo máximo hasta fractura:

$$\sigma_v = \sigma_{max_v} * \varepsilon + \sigma_{max_v}(1 - \varepsilon_{max_v}) \quad [53]$$

4.1.1 Resultados de configuración A: laminado de 8 capas a 0°/90°

|  <div style="text-align: center;"> ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA </div>  | | | |
|--|--|----------------------|--------------|
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | |
| Solicitado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% |
| N° de capas: | 8 | | |
| Orientación de fibra: | 0°/90° | | |
| RESULTADOS | | | |
| Designación del material: | MCL - A - 01 | MCL - A - 02 | MCL - A - 03 |
| Espesor [mm]: | 3.76 | 3.75 | 3.83 |
| Anchura [mm]: | 25.11 | 25.09 | 25.38 |
| Longitud inicial [mm]: | 50 | 50 | 50 |
| Sección transversal [mm²] | 94.41 | 94.09 | 97.21 |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 5.34 | 4.79 | 3.36 |
| Carga de fluencia [KN] | 11.38 | 14.12 | 15.90 |
| Esfuerzo de fluencia [MPa]: | 121 | 150 | 164 |
| Carga Máxima [KN]: | 22.72 | 28.22 | 31.78 |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 241 | 300 | 327 |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.10 | 0.13 | 0.15 |
| IMÁGENES | | | |
|  | | | |

GRÁFICAS

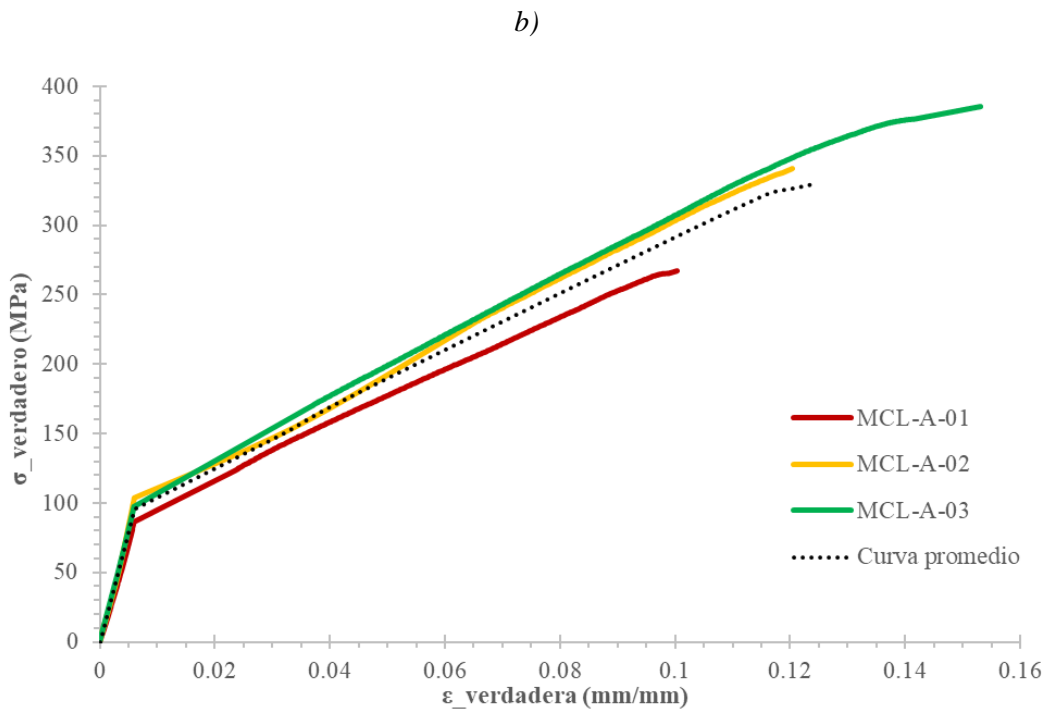
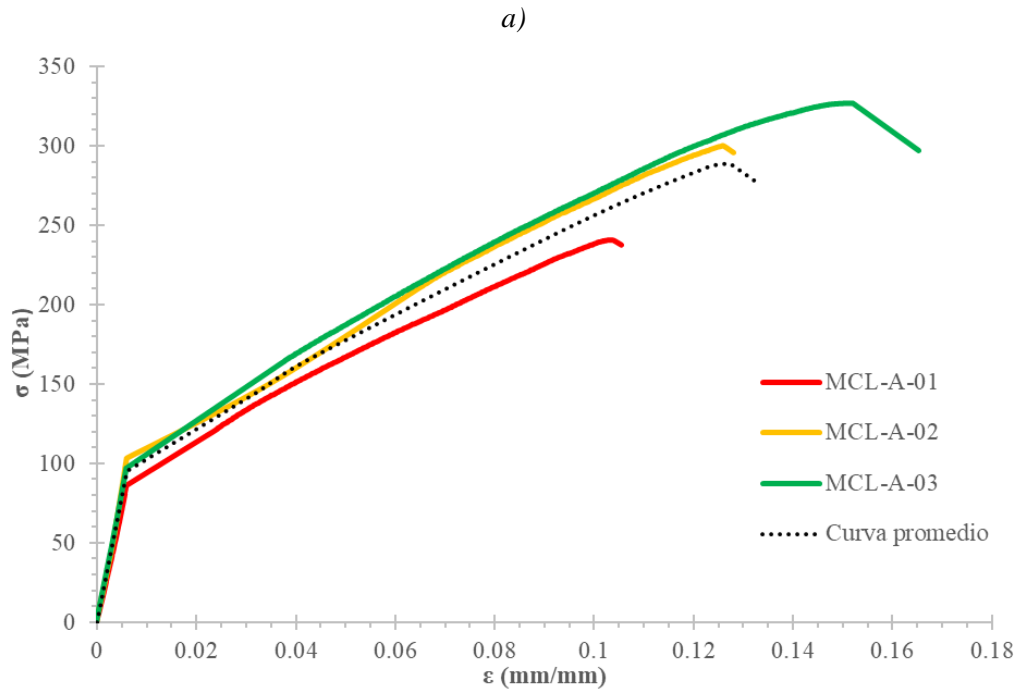


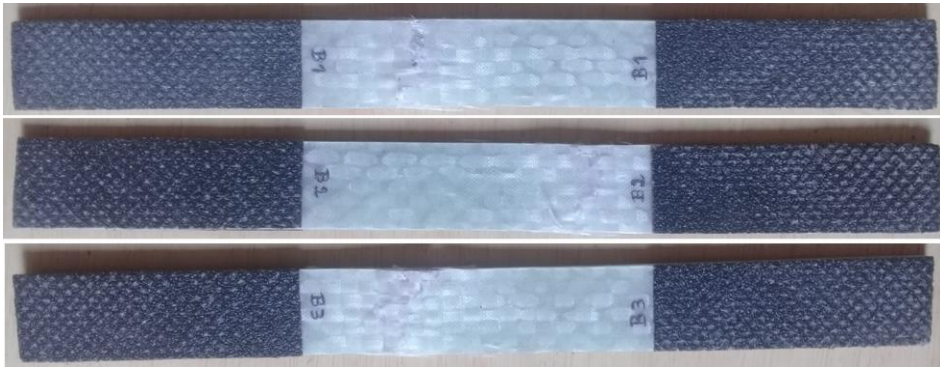


Figura 1-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-A

Realizado por: Loor, 2023

4.1.2 Resultados de configuración B: laminado de 8 capas a 0°/90°/±45°

| | | | | | |
|--|--|---|--------------|---|--|
|  | | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA | |  | |
| FICHA DE TOMA DE DATOS | | | | | |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 | | |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | | | |
| Solicitado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% | | |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% | | |
| N° de capas: | 8 | | | | |
| Orientación de fibra: | 0°/90°/±45° | | | | |
| RESULTADOS | | | | | |
| Designación del material: | MCL - B - 01 | MCL - B - 02 | MCL - B - 03 | | |
| Espesor (mm): | 3.74 | 3.74 | 3.72 | | |
| Anchura (mm): | 25.18 | 24.93 | 24.73 | | |
| Longitud inicial (mm): | 50 | 50 | 50 | | |
| Sección transversal (mm²): | 94.17 | 93.24 | 92 | | |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 2.16 | 2.64 | 3.1 | | |
| Carga de fluencia [KN] | 10.28 | 9.68 | 10.46 | | |
| Esfuerzo de fluencia[MPa]: | 109 | 104 | 114 | | |
| Carga Máxima [KN]: | 20.56 | 19.32 | 20.9 | | |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 218 | 207 | 227 | | |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.23 | 0.16 | 0.15 | | |
| IMÁGENES | | | | | |
|  | | | | | |

GRÁFICAS

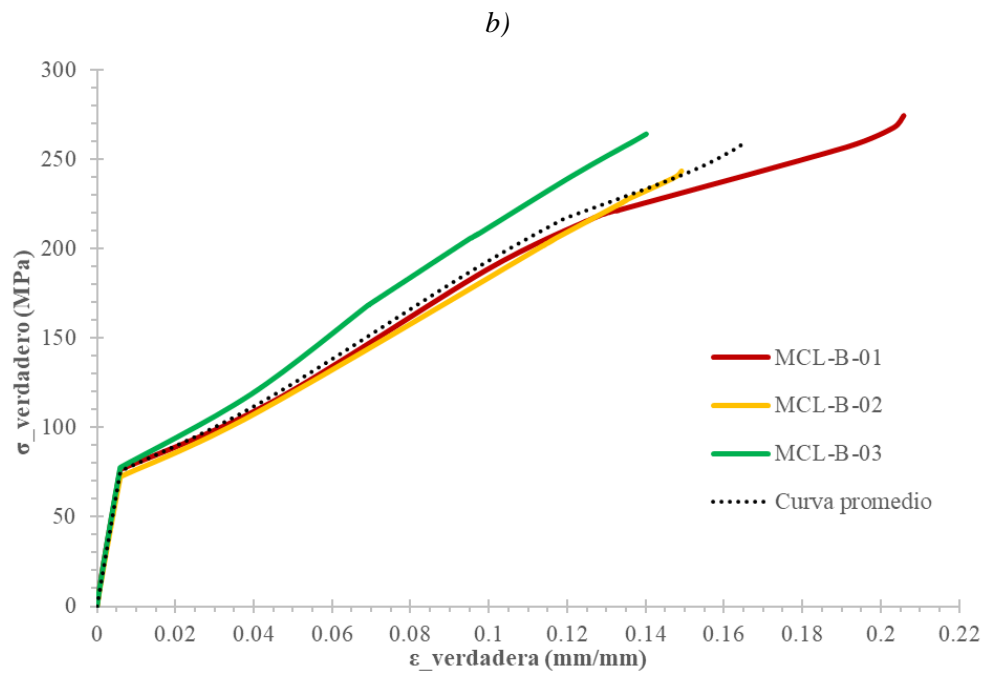
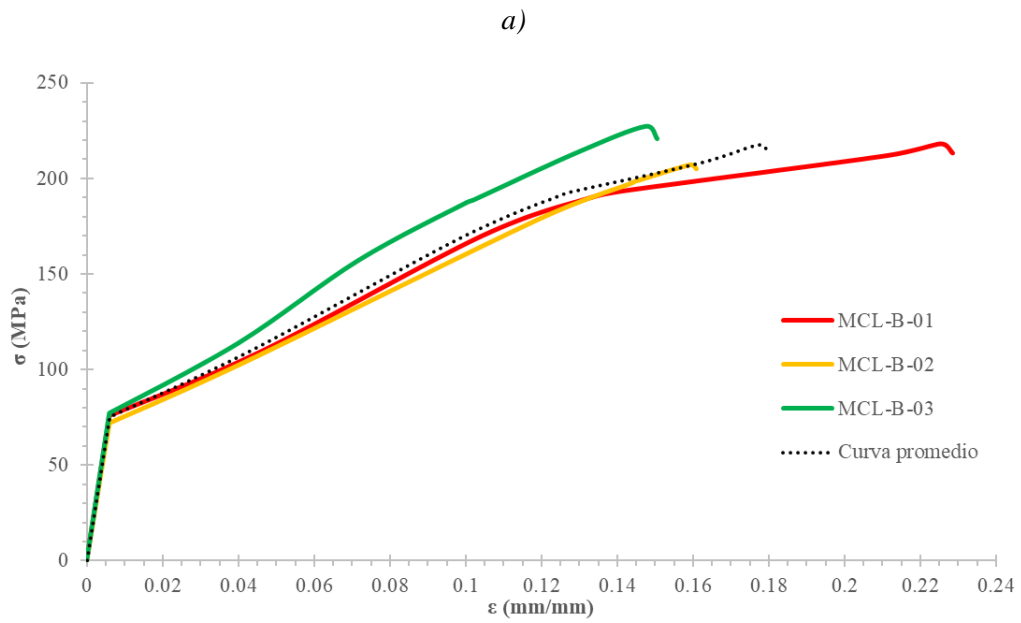


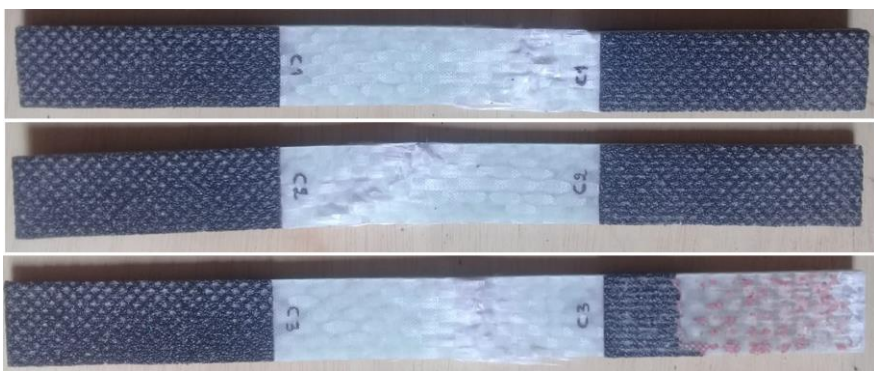


Figura 2-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-B

Realizado por: Loor, 2023

4.1.3 Resultados de configuración C: laminado de 8 capas a $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 30^{\circ}/\pm 60^{\circ}$

| | | | |
|--|---|----------------------|---|
|  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO | |  |
| | INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA | | |
| FICHA DE TOMA DE DATOS | | | |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | |
| Solicitado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% |
| N° de capas: | 8 | | |
| Orientación de fibra: | $0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 30^{\circ}/\pm 60^{\circ}$ | | |
| RESULTADOS | | | |
| Designación del material: | MCL - C - 01 | MCL - C - 02 | MCL - C - 03 |
| Espesor (mm): | 4.19 | 4.14 | 4.18 |
| Anchura (mm): | 24.91 | 25.36 | 24.71 |
| Longitud inicial (mm): | 50 | 50 | 50 |
| Sección transversal (mm²) | 104.37 | 104.99 | 103.29 |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 8.68 | 4.45 | 5.69 |
| Carga de fluencia [KN] | 11.5 | 12.68 | 11.68 |
| Esfuerzo de fluencia [MPa]: | 110 | 121 | 113 |
| Carga Máxima [KN]: | 22.98 | 25.32 | 23.34 |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 220 | 241 | 226 |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.15 | 0.17 | 0.3 |
| IMÁGENES | | | |
|  | | | |

GRÁFICAS

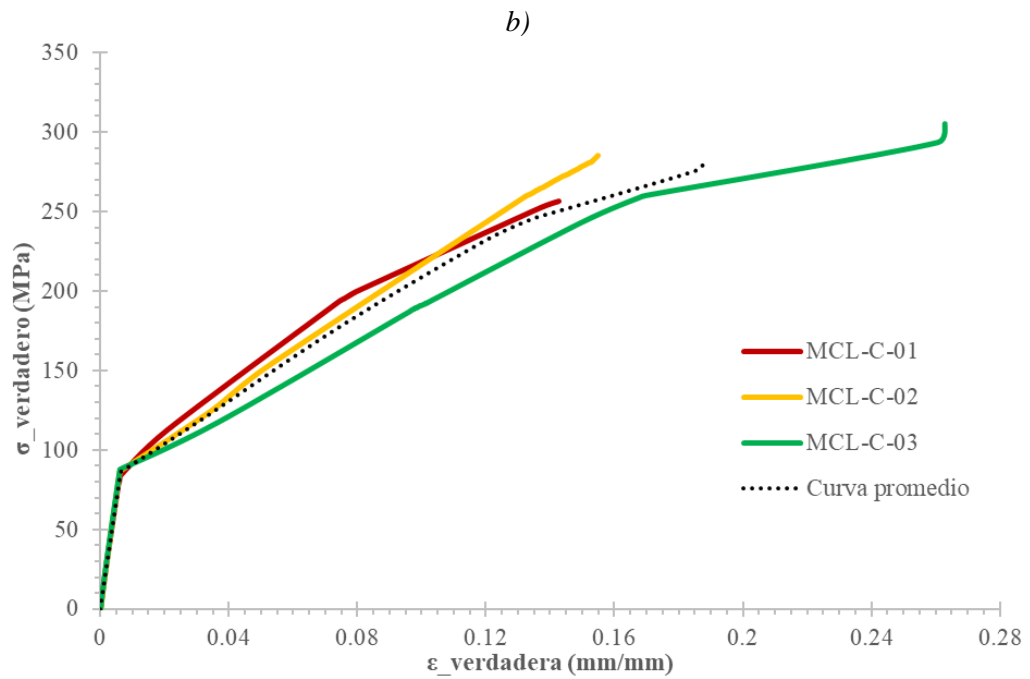
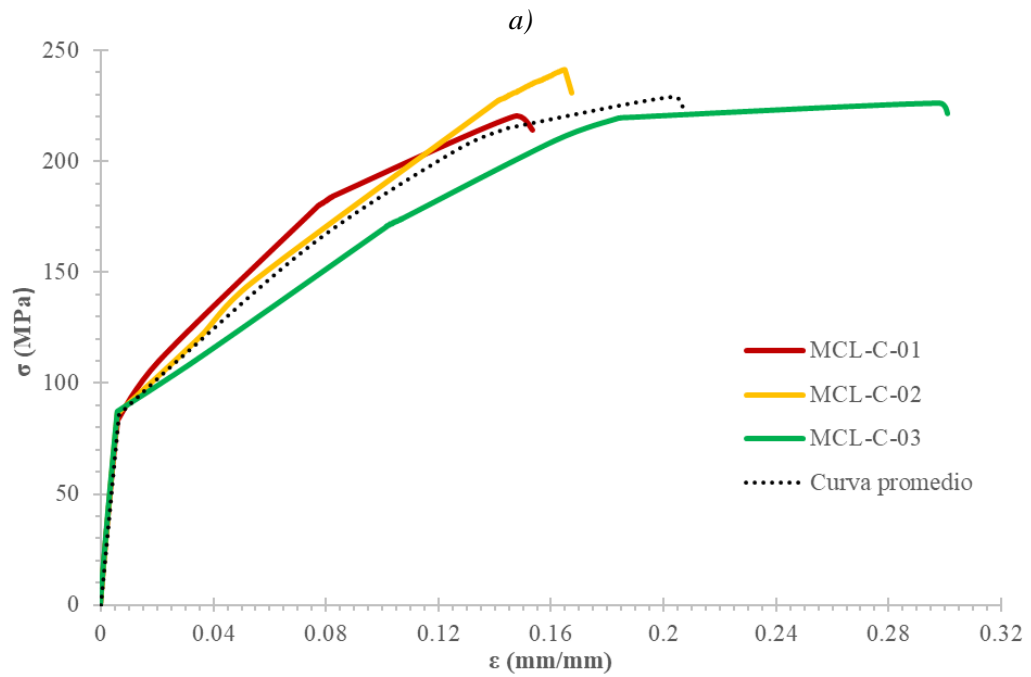





Figura 3-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-C

Realizado por: Loor, 2023

4.1.4 Resultados de configuración D: laminado de 12 capas a 0°/90°

| | | | |
|--|---|----------------------|---|
|  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO | |  |
| | INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA | | |
| FICHA DE TOMA DE DATOS | | | |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | |
| Solicitado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% |
| N° de capas: | 12 | | |
| Orientación de fibra: | 0°/90° | | |
| RESULTADOS | | | |
| Designación del material: | MCL – D - 01 | MCL - D - 02 | MCL - D - 03 |
| Espesor (mm): | 6.09 | 6.1 | 5.72 |
| Anchura (mm): | 25.17 | 25.53 | 26 |
| Longitud inicial (mm): | 50 | 50 | 50 |
| Sección transversal (mm²) | 153.29 | 155.73 | 148.72 |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 1.89 | 2.27 | 2.02 |
| Carga de fluencia [KN] | 20.04 | 21.20 | 19.30 |
| Esfuerzo de fluencia[MPa]: | 131 | 136 | 130 |
| Carga Máxima [KN]: | 40.06 | 42.40 | 38.56 |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 261 | 272 | 259 |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.11 | 0.10 | 0.10 |
| IMÁGENES | | | |
|  | | | |

GRÁFICAS

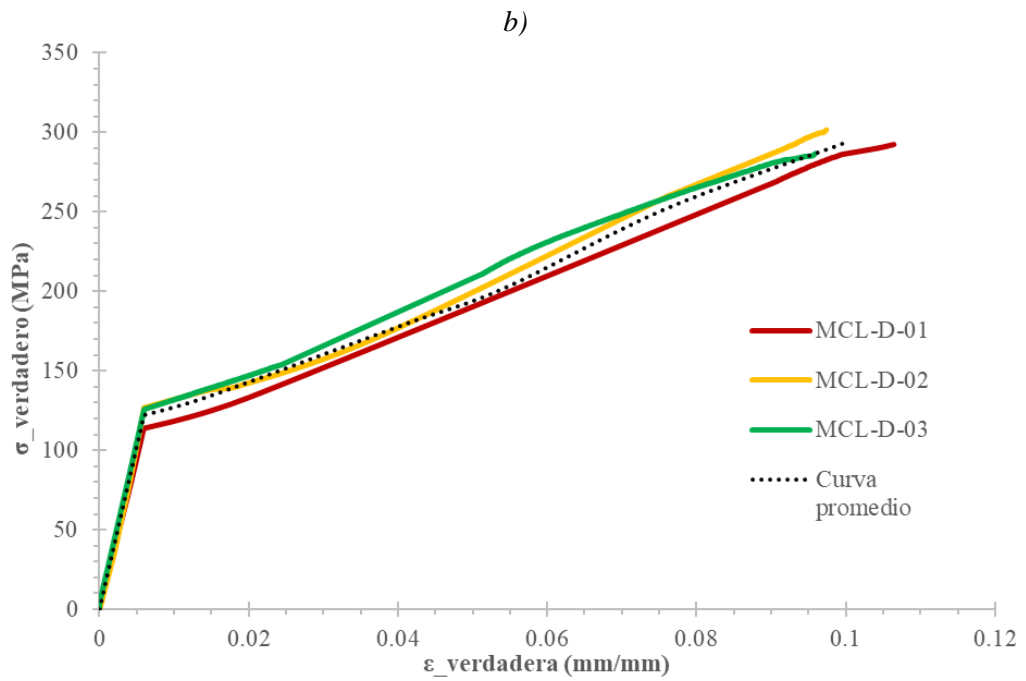
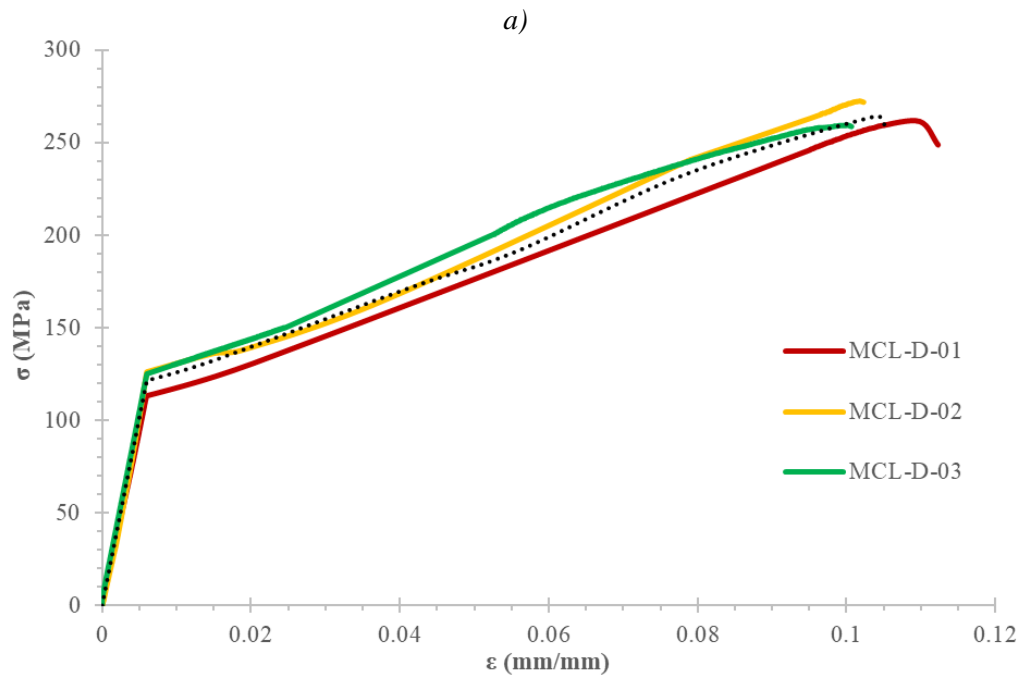





Figura 4-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-D

Realizado por: Loor, 2023

4.1.5 Resultados de configuración E: laminado de 12 capas a 0°/90°/±45°

|  <div style="text-align: center;"> ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA </div>  | | | |
|--|--|----------------------|--------------|
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% |
| N° de capas: | 12 | | |
| Orientación de fibra: | 0°/90°/±45° | | |
| RESULTADOS | | | |
| Designación del material: | MCL - E - 01 | MCL - E - 02 | MCL - E - 03 |
| Espesor (mm): | 5.95 | 5.91 | 5.91 |
| Anchura (mm): | 25.38 | 24.91 | 25.63 |
| Sección transversal (mm²) | 151.01 | 147.12 | 151.47 |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 2.18 | 1.37 | 5.54 |
| Carga de fluencia [KN] | 15.94 | 29.88 | 15.88 |
| Esfuerzo de fluencia[MPa]: | 106 | 103 | 105 |
| Carga Máxima [KN]: | 31.84 | 30.96 | 3.74 |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 211 | 210 | 210 |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.15 | 0.13 | 0.17 |
| IMÁGENES | | | |
|  | | | |

GRÁFICAS

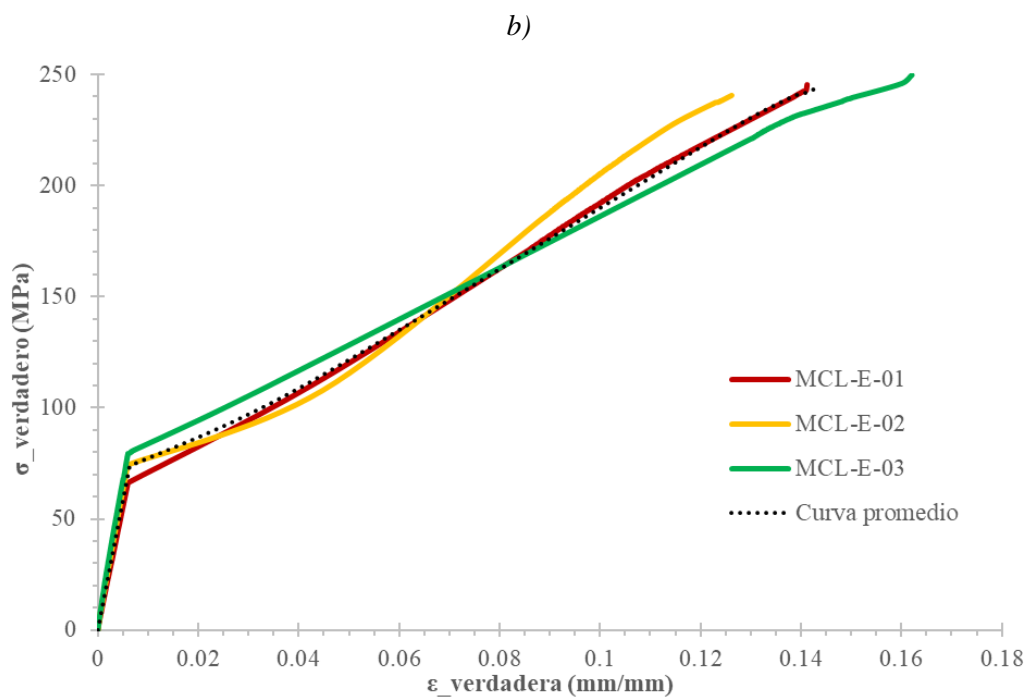
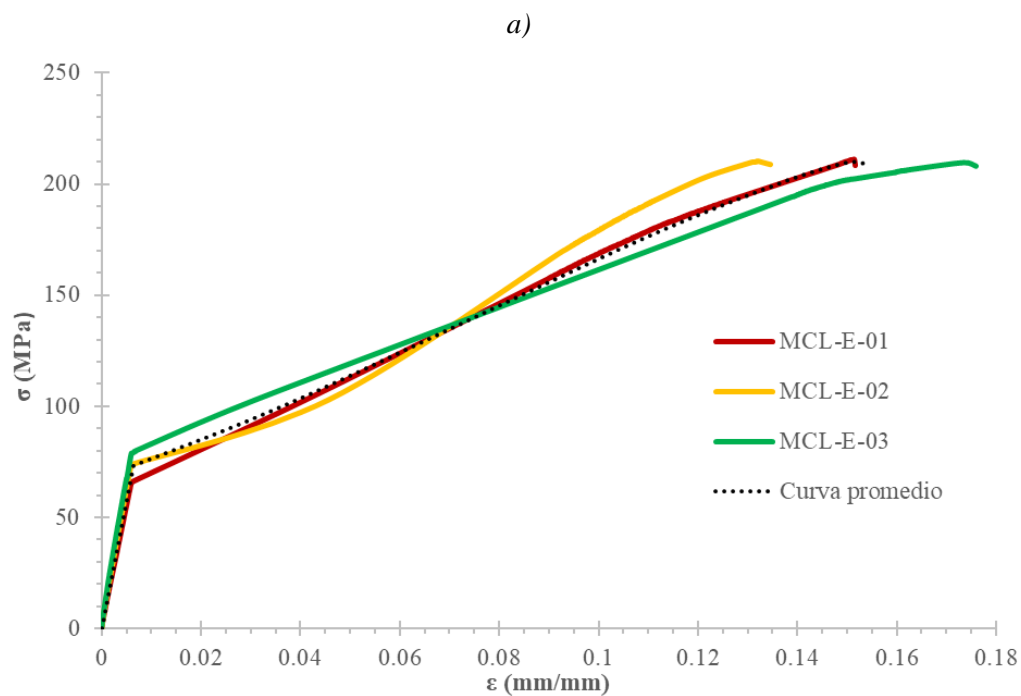


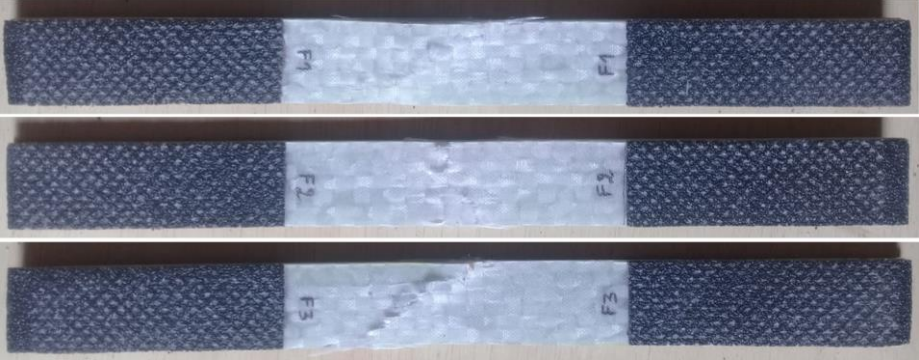


Figura 5-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-E

Realizado por: Loor, 2023

4.1.6 Resultados de configuración F: laminado de 12 capas a 0°/90°/±30°/±60°

| | | | |
|--|---|----------------------|---|
|  | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA | |  |
| FICHA DE TOMA DE DATOS | | | |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | | |
| Tipo de estudio: | Ensayo experimental de tracción | Normativa: | ASTM D3039 |
| Fecha de ejecución: | 30 de agosto de 2022 | | |
| Lugar de ejecución: | Laboratorio de ensayo de materiales "LenMav" | | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| DATOS DE PROBETAS ENSAYADAS | | | |
| Tipo de material: | Material compuesto laminado | | |
| Tipo de matriz: | Polimérica – resina epóxica | % en volumen: | 60% |
| Tipo de refuerzo: | Sintético - fibra de vidrio E tejida | % en volumen: | 40% |
| N° de capas: | 12 | | |
| Orientación de fibra: | 0°/90°/±30°/±60° | | |
| RESULTADOS | | | |
| Designación del material: | MCL - F - 01 | MCL - F - 02 | MCL - F - 03 |
| Espesor (mm): | 6.03 | 5.92 | 5.74 |
| Anchura (mm): | 25.24 | 25.37 | 25.23 |
| Sección transversal (mm²) | 152.20 | 150.19 | 114.82 |
| Módulo de elasticidad [GPa]: | 1.16 | 9.23 | 9.73 |
| Carga de fluencia [KN] | 1.92 | 13.86 | 13.38 |
| Esfuerzo de fluencia [MPa]: | 91 | 92 | 92 |
| Carga Máxima [KN]: | 27.82 | 27.70 | 26.74 |
| Esfuerzo máximo [MPa]: | 183 | 184 | 185 |
| Deformación unitaria [mm/mm]: | 0.16 | 0.13 | 0.18 |
| IMÁGENES | | | |
|  | | | |

GRÁFICAS

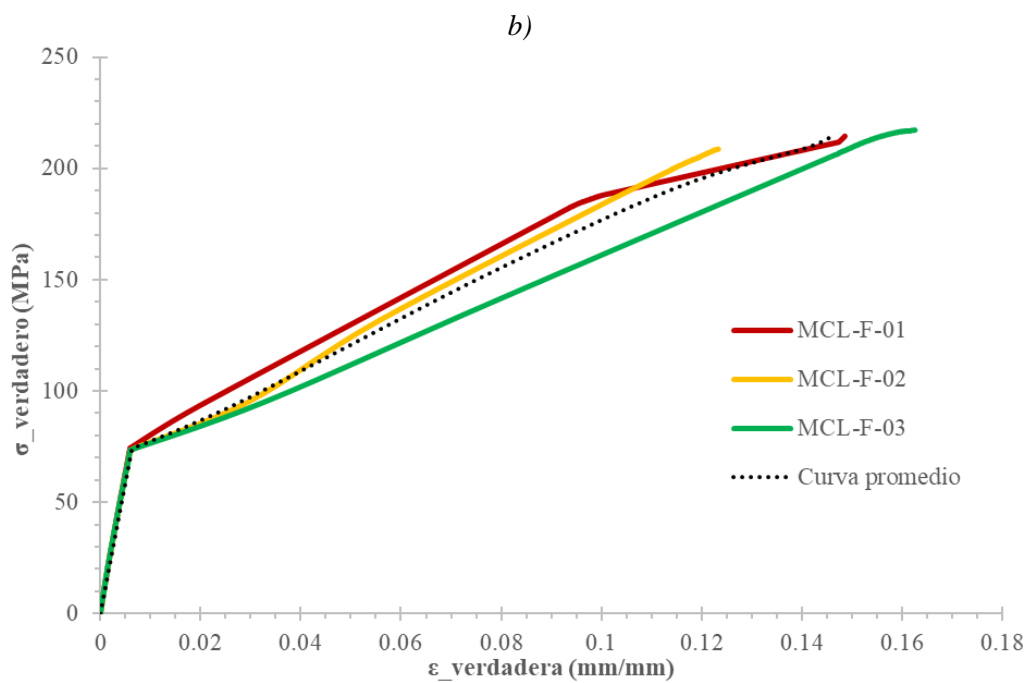
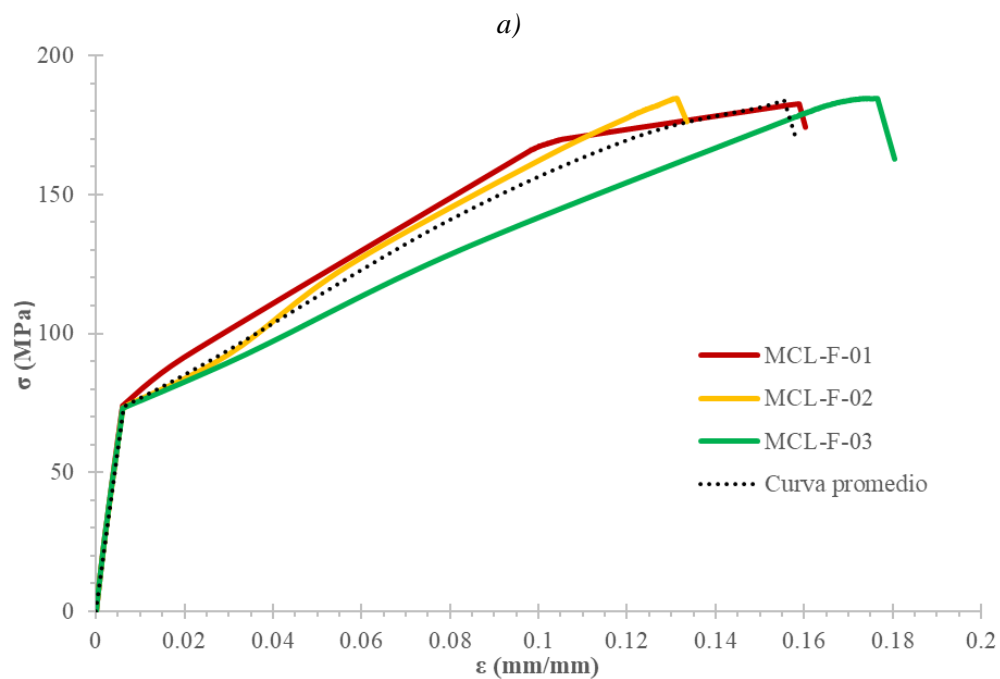


Figura 6-4: Curva a) verdadera y b) ingenieril de laminado MCL-F

Realizado por: Loor, 2023

4.2 Análisis de resultados de caracterización

Basado en el comportamiento de las curvas obtenidas, todos los especímenes de laminado alcanzan un punto de proporcionalidad por debajo del 0.5%. Al alcanzarse el límite elástico, en el material compuesto se empiezan a generar pequeñas fisuras en la matriz polimérica de resina epóxica. Estas fisuras se propagan a medida que la carga aumenta, sin embargo, el material aun no alcanza un punto de falla completo, debido a la resistencia que la fibra de vidrio aun aporta al material compuesto.

Cuando se llega a un punto en donde la fibra de vidrio ya no soporta la carga aplicada, se produce la falla completa del material compuesto laminado, alcanzándose así el esfuerzo máximo que este puede soportar, y dando lugar a una fractura abrupta del mismo. La figura 7-4a muestra un resumen de las curvas ingenieriles de esfuerzo - deformación unitaria ($\sigma - \epsilon$) de las diferentes configuraciones de material compuestos caracterizadas.

De los diferentes laminados ensayados, la configuración A es la que alcanza un esfuerzo máximo de 289.17 MPa, siendo mayor en comparación con los valores de las configuraciones B, C, D, E y F que alcanzan 217.57 MPa, 229.57 MPa, 264.29 MPa, 210.31 MPa y 183.95 MPa respectivamente.

En cuanto a la deformación alcanzada por cada una de las configuraciones, se muestra que el laminado de la configuración C es el que exhibe una mayor deformación unitaria, con un valor de 0.207 mm/mm, seguido por la configuración B y F con 0.177 mm/mm y 0.156 mm/mm respectivamente. Por detrás de los valores mencionados, se obtienen valores de 0.152 mm/mm, 0.127 mm/mm y 0.104 mm/mm para las configuraciones E, A y D respectivamente.

Ya que las curvas obtenidas por los ensayos experimentales representan las curvas ingenieriles de los especímenes ensayados, a partir de estas se pueden obtener los valores de esfuerzos verdaderos aproximados, o curvas verdaderas, que son necesarios si se requiere aplicar el material en problemas de simulación numérica. La figura 7-4b muestra las curvas verdaderas promedio de esfuerzo-deformación unitaria de los especímenes ensayados en las diferentes configuraciones de laminado.

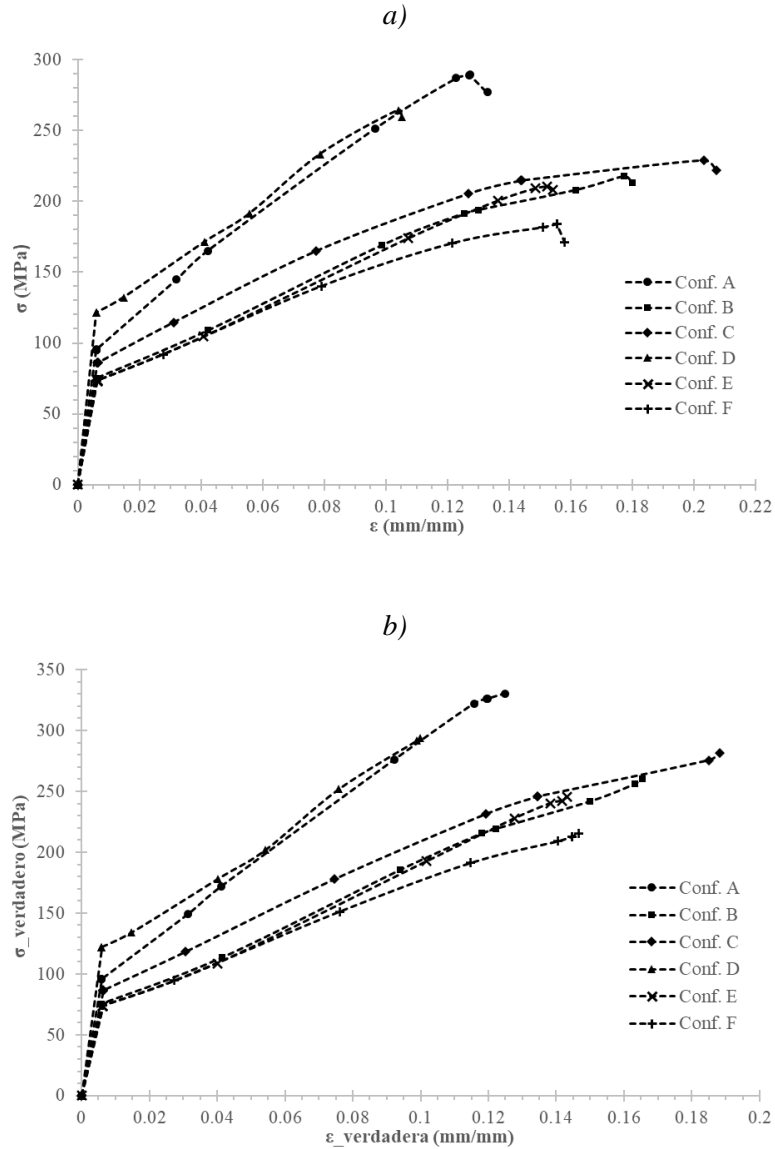


Figura 7-4: Cuevas de esfuerzo-deformación a) ingenieriles y b) verdaderos

Realizado por: Loor, 2023

De las diferentes configuraciones de laminados, en base su valor de módulo de Young se evidencia valores de 4.50 GPa, 2.63 GPa, 6.27 GPa, 3.03 GPa, 2.06 GPa y 9.48 GPa para las configuraciones A, B, C, D, E y F respectivamente, como se observa en la figura 8-4a, con una tendencia a aumentar con el incremento del número de capas y variando la orientación en el laminado. Notándose que particularmente que esta última configuración está sujeta a una menor deformación dentro de la zona elástica en comparación con las otras, dado su elevado valor de módulo de Young.

La variación de los módulos de Young en las diferentes configuraciones da a entender que este, tal como sucede con el esfuerzo máximo, se va a ver fuertemente influenciado por la orientación de la fibra en el laminado, tal como indica Wang et al. (2014).

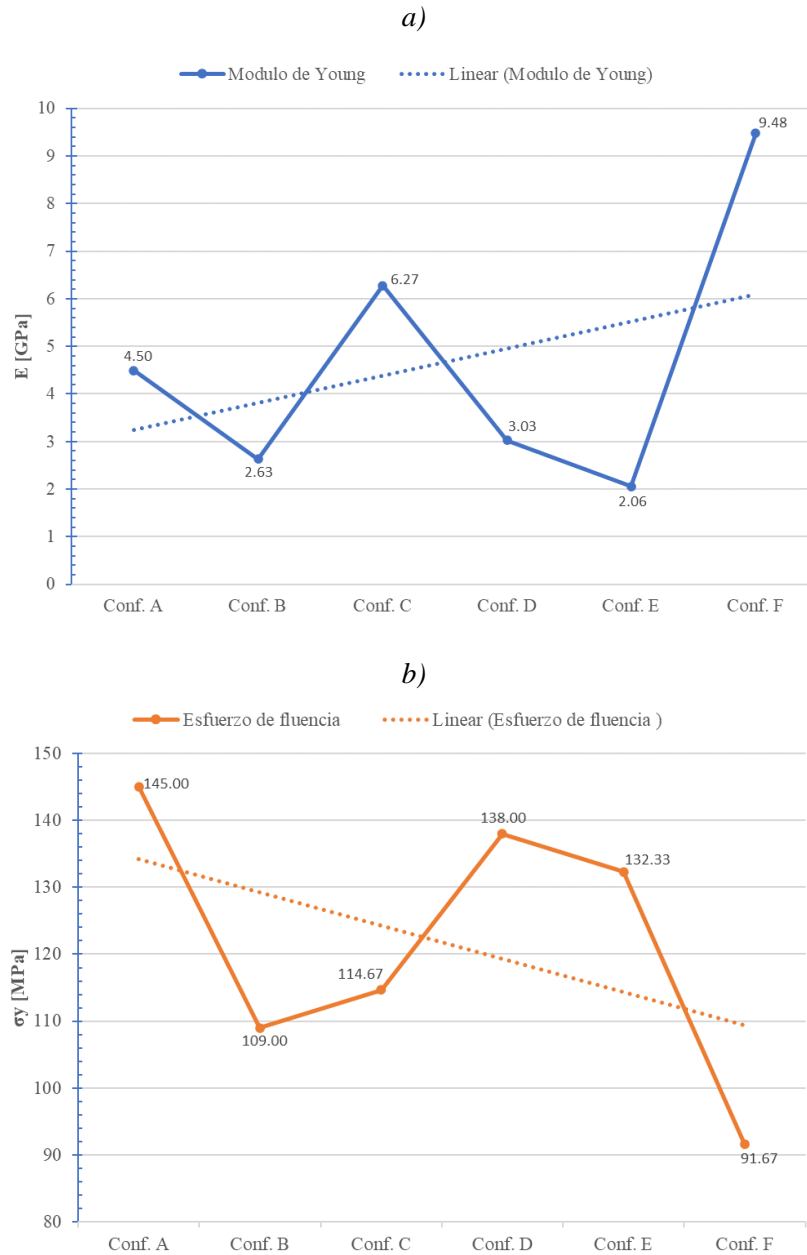


Figura 8-4: Esfuerzo de fluencia y módulo de Young

Realizado por: Loor, 2023

Del mismo modo, se observa que la configuración A exhibe un mejor comportamiento en cuanto al esfuerzo que puede soportar sin deformarse completamente, con un valor de 145 MPa, seguido de cerca por las configuraciones D y E con 138 y 132.33 MPa respectivamente. Por el contrario, con la configuración F se consigue el un valor menor de 91.67 MPa, lo cual se alinea con el hecho de particularmente en esta configuración se obtuvo un elevado valor de su módulo de Young. Este valor

tiende a disminuir al aumentar el número de capas y variando la orientación de fibra en el laminado, como se observa en la figura 8-4.

4.3 Validación del material compuesto por modelación numérica

Posterior al modelado y análisis por simulación por el método del elemento finito en base a la caracterización por ensayo de tracción de los diferentes laminados, los resultados de estos son comparados con los experimentales, y se calcula el error porcentual existente entre estos.

Como se mencionó anteriormente, se consideró que el laminado falla completamente cuando cada una de las capas que lo componen, o la mayoría estas, alcanzan un punto de falla, lo que se comprueba por el valor del *IRF*. La tabla 1-4 resume los resultados obtenidos vía experimental y por simulación de la caracterización del material para su respectiva comparación.

Tabla 1-4: Resumen comparativo de resultados experimentales y simulados

| Configuración | | Esfuerzo máximo (MPa) | | | Criterio de falla (Tsai-Wu) | | | |
|---------------|---------------------------|-----------------------|--------|-----------|-----------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | Orientación (N° de capas) | Exp. | Sim. | Error (%) | Capa | IRF | Capa | IRF |
| A | 0/90 (8 capas) | 330.27 | 302.44 | 8.4% | 1 ^a : 0/90 | 1.064 | 5 ^a : 0/90 | 1.054 |
| | | | | | 2 ^a : 0/90 | 1.064 | 6 ^a : 0/90 | 1.053 |
| | | | | | 3 ^a : 0/90 | 1.063 | 7 ^a : 0/90 | 1.051 |
| | | | | | 4 ^a : 0/90 | 1.061 | 8 ^a : 0/90 | 1.049 |
| B | 0/90/±45 (8 capas) | 260.43 | 269.30 | 3.4% | 1 ^a : 0/90 | 1.078 | 5 ^a : ±45 | 1.522 |
| | | | | | 2 ^a : ±45 | 1.559 | 6 ^a : 0/90 | 0.928 |
| | | | | | 3 ^a : 0/90 | 0.992 | 7 ^a : ±45 | 1.519 |
| | | | | | 4 ^a : ±45 | 1.531 | 8 ^a : 0/90 | 0.932 |
| C | 0/90/±30/±60 (8 capas) | 281.77 | 287.73 | 2.1% | 1 ^a : 0/90 | 1.059 | 5 ^a : 0/90 | 1.046 |
| | | | | | 2 ^a : 30/-60 | 1.538 | 6 ^a : 60/-30 | 1.512 |
| | | | | | 3 ^a : 60/-30 | 1.524 | 7 ^a : 30/-60 | 1.517 |
| | | | | | 4 ^a : 0/90 | 1.048 | 8 ^a : 0/90 | 1.041 |
| D | 0/90 (12 capas) | 293.57 | 278.93 | 5.0% | 1 ^a : 0/90 | 1.092 | 7 ^a : 0/90 | 0.983 |
| | | | | | 2 ^a : 0/90 | 1.092 | 8 ^a : 0/90 | 0.985 |
| | | | | | 3 ^a : 0/90 | 1.080 | 9 ^a : 0/90 | 0.987 |
| | | | | | 4 ^a : 0/90 | 1.042 | 10 ^a : 0/90 | 0.989 |
| | | | | | 5 ^a : 0/90 | 0.989 | 11 ^a : 0/90 | 0.991 |
| | | | | | 6 ^a : 0/90 | 0.981 | 12 ^a : 0/90 | 0.993 |
| E | 0/90/±45 (12 capas) | 245.21 | 237.52 | 3.1% | 1 ^a : 0/90 | 0.969 | 7 ^a : ±45 | 1.300 |
| | | | | | 2 ^a : ±45 | 1.494 | 8 ^a : 0/90 | 0.769 |
| | | | | | 3 ^a : 0/90 | 0.875 | 9 ^a : ±45 | 1.307 |
| | | | | | 4 ^a : ±45 | 1.402 | 10 ^a : 0/90 | 0.773 |
| | | | | | 5 ^a : 0/90 | 0.786 | 11 ^a : ±45 | 1.314 |
| | | | | | 6 ^a : ±45 | 1.301 | 12 ^a : 0/90 | 0.777 |
| F | 0/90/±30/±60 (12 capas) | 215.43 | 233.29 | 8.3% | 1 ^a : 0/90 | 0.965 | 7 ^a : 60/-30 | 1.318 |
| | | | | | 2 ^a : 30/-60 | 1.513 | 8 ^a : 30/-60 | 1.318 |
| | | | | | 3 ^a : 60/-30 | 1.460 | 9 ^a : 0/90 | 0.764 |
| | | | | | 4 ^a : 0/90 | 0.819 | 10 ^a : 60/-30 | 1.327 |
| | | | | | 5 ^a : 30/-60 | 1.348 | 11 ^a : 30/-60 | 1.327 |
| | | | | | 6 ^a : 60/-30 | 1.315 | 12 ^a : 0/90 | 0.770 |

Realizado por: Loor, 2023

Realizando una comparación de los resultado experimentales y simulados, se observa que el material laminado exhibe un comportamiento similar en ambos casos en relación al esfuerzo máximo que alcanza antes de fallar por completo, con errores de 8.5%, 3.4%, 2.1%, 5%, 3.1% y 8.3% para las configuraciones *A*, *B*, *C*, *D*, *E* y *F* respectivamente, como se representa gráficamente en la figura 9-4, estando dentro del margen de error por debajo del 10%, tomando en cuenta que una diferencia entre 10% y 15% en la comparación de resultados simulados y experimentales aún se considera como una buena correlación de resultados (Altair University, 2019, pp. 470-471).

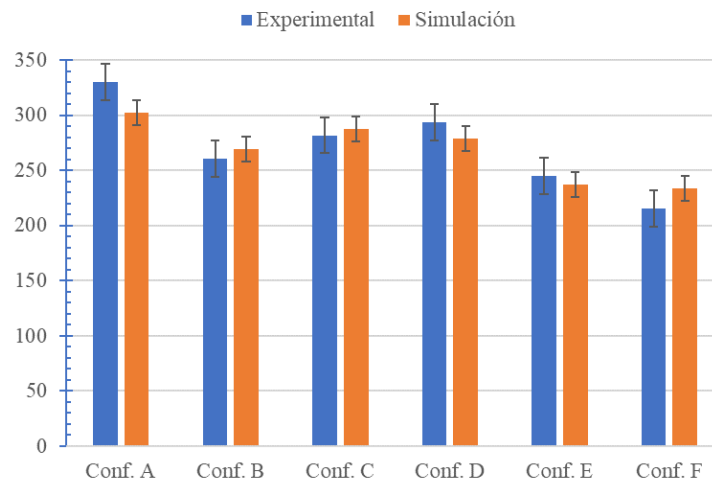


Figura 9-4: Resultados experimentales y simulados

Realizado por: Loor, 2023

Por otra parte, se observa una correlación, tanto experimental como por simulación, de forma visual en la tendencia de falla de los especímenes ensayados en zonas cercanas al agarre de la máquina de ensayos, tal como se observa en la figura 10-4.

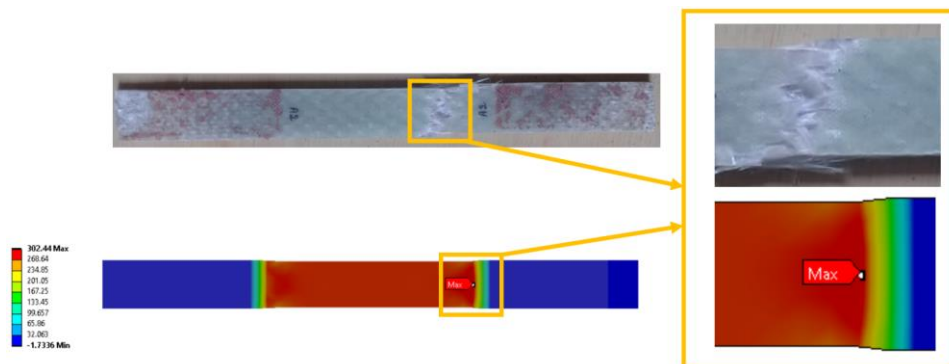
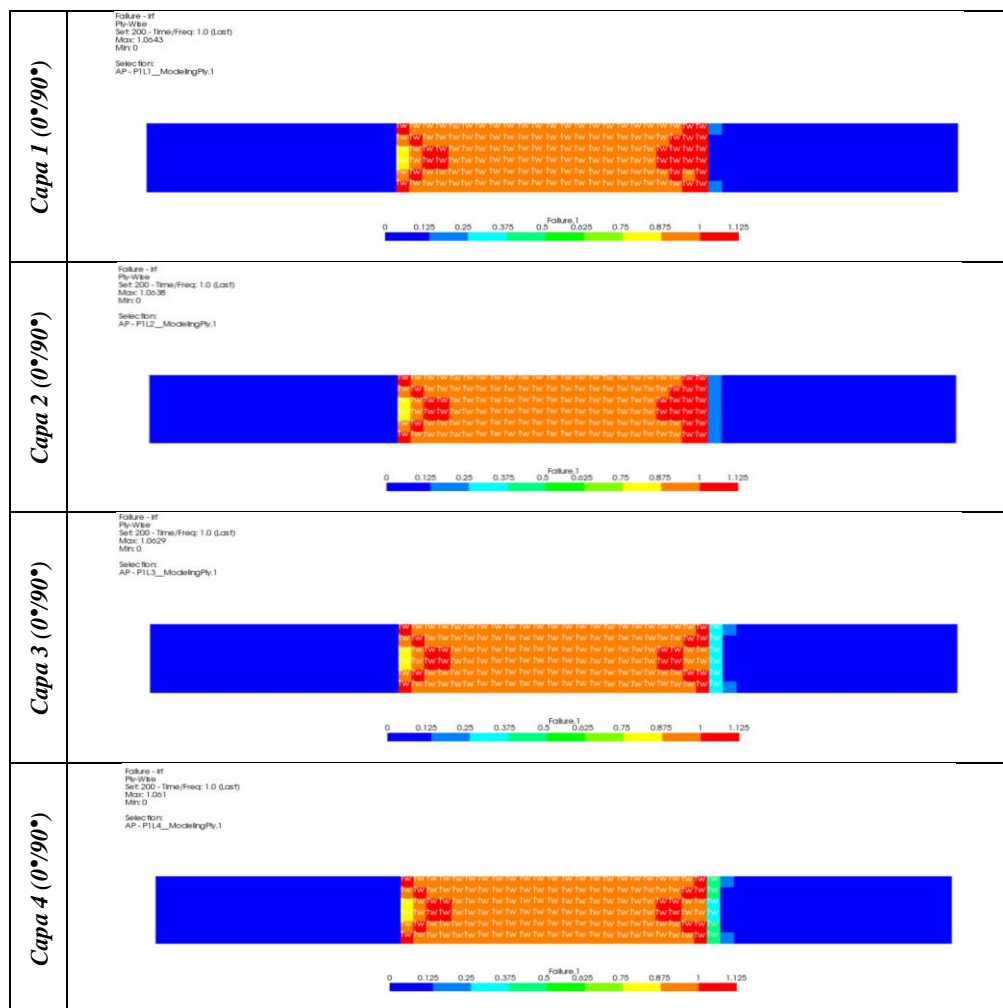


Figura 10-4: Visualización de falla en laminado de configuración A

Realizado por: Loor, 2023

Analizando la falla que se produce en cada laminado, se puede notar que en dependencia de la orientación que tiene la fibra de vidrio en cada una de las capas, estas tenderán a fallar antes o después que otras. A partir de los valores del *IRF* se evidencia que las capas con orientación de fibra a $\pm 45^\circ$ y $\pm 30^\circ/\pm 60^\circ$ tienden a fallar antes que aquellas a $0^\circ/90^\circ$, ya que los valores de estas primeras tienden a ser altos, lo que sugiere puede ser debido a que estas últimas están alineadas de forma paralela con las cargas axiales que se aplican.

Por citar un ejemplo general, para el caso de la configuración A, con un arreglo de la fibra de vidrio a $0^\circ/90^\circ$, las capas fallan casi simultáneamente, obteniéndose un valor de *IRF* similar en cada una de las ocho capas, tal como se detalla en la figura 11-4.



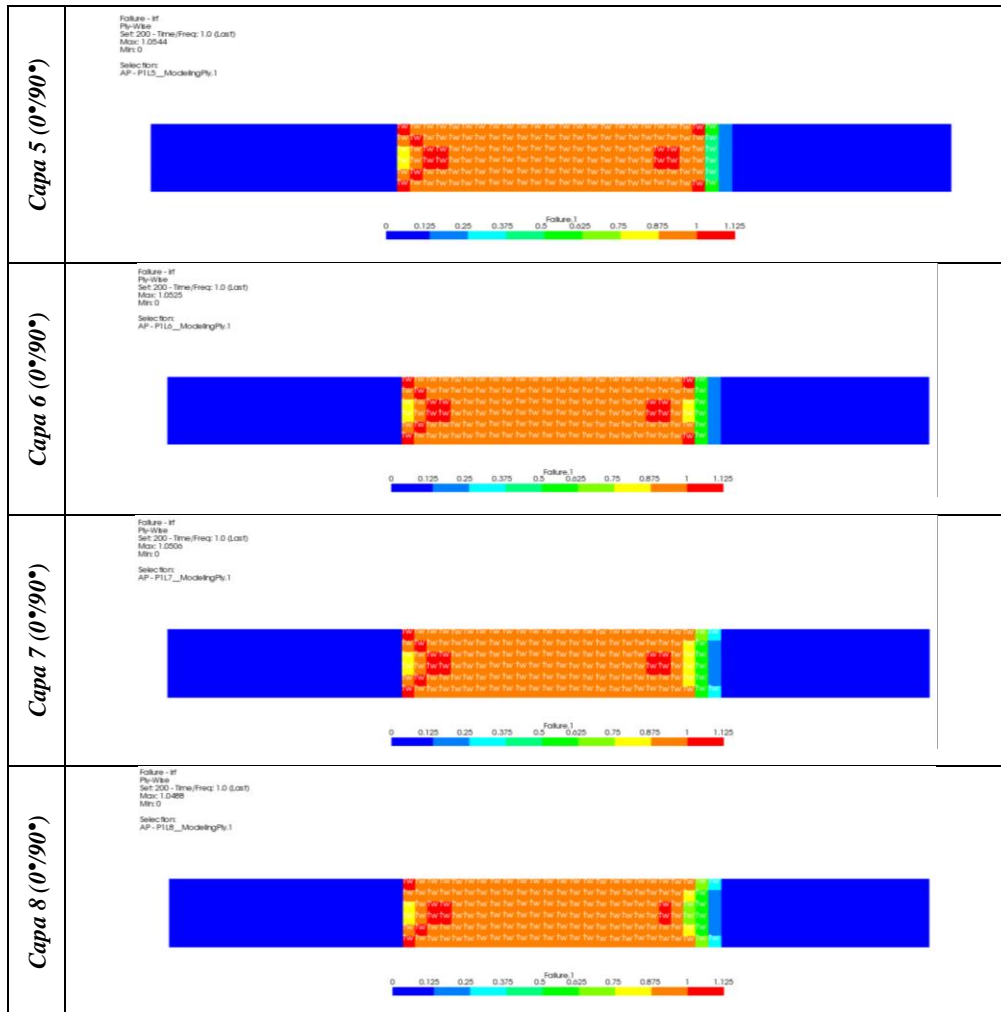


Figura 11-4: IRF de las capas constituyentes en laminado de configuración A

Realizado por: Loor, 2023

4.3.1 Casi isotropía en laminados

Mediante el modelado por simulación numérica de los laminados, es posible determinar si estos presentan cualidades casi isotrópicas en el plano.

A partir de la modelación de los diferentes laminados por la herramienta de simulación numérica, se pudo observar que las configuraciones *B*, *E* y *F* presentan cualidades de material casi isotrópicas en el plano, esto debido al arreglo de la orientación fibra que estos poseen, como se muestra en la figura 12-4, es decir que tienden a comportarse prácticamente de la misma manera como lo haría un material isotrópico al aplicársele una carga dada en cualquier dirección en el plano.

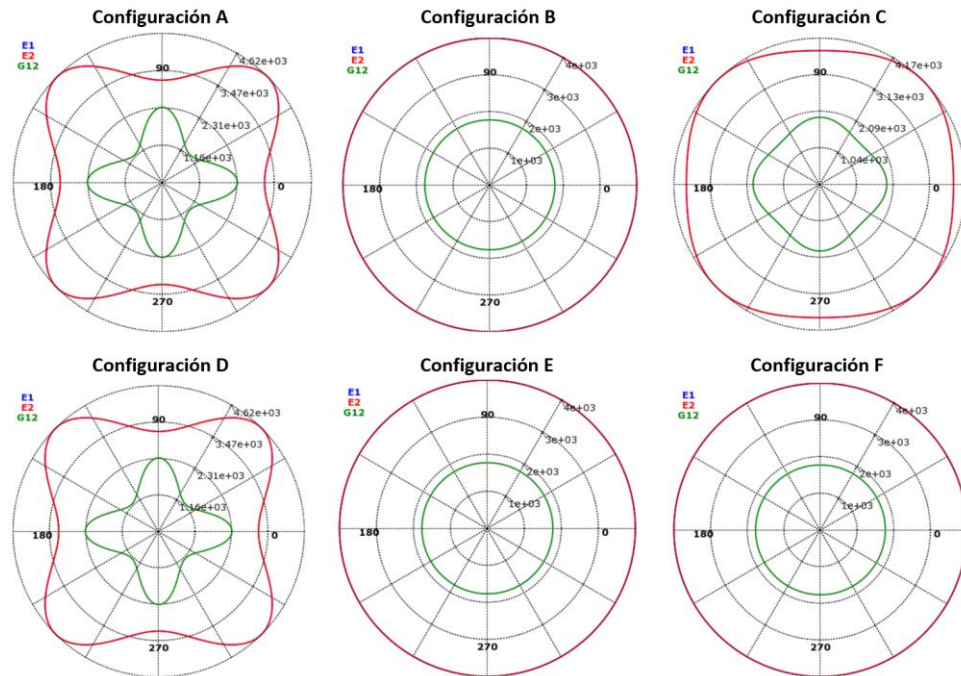


Figura 12-4: Representación polar de las propiedades en las distintas configuraciones del material
 Realizado por: Loor, 2023

4.4 Influencia de ángulo de orientación de fibra y número de capas en el material compuesto por diseño de experimentos (DOE)

4.4.1 Datos experimentales

A partir de los datos experimentales obtenidos en el ensayo de tracción de cada uno de los laminados estudiados, se analizó el efecto que la orientación de ángulo, A, y número de capas, B, tienen sobre el desempeño mecánico de los mismos, que en esencia es representado por el esfuerzo máximo, el cual se toma como variable respuesta.

El análisis de esta propiedad es imprescindible para asegurar la correcta selección de un material para su aplicación en el proceso de diseño mecánico de cualquier componente, y así asegurar una vida útil sin incidentes del mismo (Velling, 2020).

A partir de los datos de corridas experimentales se construyó una matriz de diseño tal como se muestra en la tabla 2-4, donde se especifican los factores de estudio con sus respectivos niveles, y por consecuencia las combinaciones de los factores que se dan o tratamientos. Dentro de cada tratamiento se agrupan las respectivas replicas realizadas.

Tabla 2-4: Matriz de diseño

| | | Factor A: Ángulo de orientación | | | Total (Y _{i..}) |
|---------------------------------|----|---------------------------------|----------|--------------|---------------------------|
| | | 0/90 | 0/90/±45 | 0/90/±30/±60 | |
| Factor B: Número de capas | 8 | 241 | 218 | 220 | 2207 |
| | | 300 | 207 | 241 | |
| | | 327 | 227 | 226 | |
| | 12 | 261 | 211 | 183 | 1975 |
| | | 272 | 210 | 184 | |
| | | 259 | 210 | 185 | |
| Total (Y _{.j}) | | 1660 | 1283 | 1239 | Y... = 4182 |

Realizado por: Loor, 2023

4.4.2 Verificación de supuestos

Para llevar a cabo cualquier diseño factorial es necesario que se cumplan ciertos supuestos. Como ya se mencionó anteriormente, para la aplicación de la técnica estadística del análisis de varianza ANOVA es necesario que se dé el cumplimiento de los supuestos de normalidad, varianza constante de residuos e independencia de las observaciones o corridas.

Ya que en la practica la respuesta puede no seguir una distribución normal, pudiéndose presentar con una distribución de tipo binomial, Poisson, entre otras, se requiere en algunos casos que se le aplique una transformación con el fin de estabilizar la varianza (Gutiérrez y de la Vara, 2012).

4.4.2.1 Verificación de supuesto de normalidad

Para la verificación del supuesto de normalidad, así como de los demás supuestos, primero es importante la determinación de los residuos, que como se vio en apartados anteriores, estos dependen de las observación o corridas del experimento y de los predichos o medias de los tratamientos. Lo respectivos residuos de cada observación son presentados en la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Residuos y predichos

| $\lambda = 1$ | | Factor A: Ángulo de orientación | | | | | |
|---------------------------------|----|---------------------------------|----------|-----------|----------|--------------|----------|
| | | 0/90 | | 0/90/±45 | | 0/90/±30/±60 | |
| | | Predichos | Residuos | Predichos | Residuos | Predichos | Residuos |
| Factor B: Número de capas | 8 | 289.33 | -48.33 | 217.33 | 0.67 | 229 | -9 |
| | | | 10.67 | | -10.33 | | 12 |
| | | | 37.67 | | 9.67 | | -3 |
| | 12 | 264 | -3 | 210.33 | 0.67 | 184 | -1 |
| | | | 8 | | -0.33 | | 0 |
| | | | -5 | | -0.33 | | 1 |

Realizado por: Loor, 2023

A partir de los residuos obtenidos de las observaciones de cada uno de los seis tratamientos se construyó la gráfica de probabilidad contra residuos de la figura 13-4a, mediante la aplicación de la prueba de normalidad de Anderson-Darling, en la que se obtuvo un *valor-p* menor a 0.005, el cual es

menor al nivel de significancia que se utilizó, el cual fue de $\alpha = 0.05$, lo que lleva a indicar el rechazo de H_0 en cuanto a normalidad en los residuos.

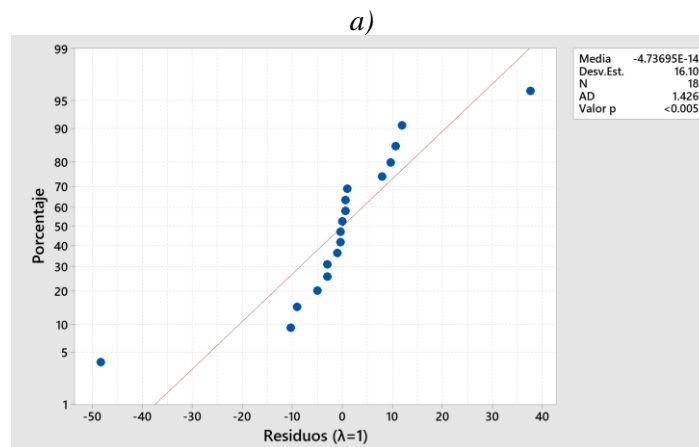
Con el fin de cumplir con este supuesto se realizó una transformación de la respuesta para así una obtener normalidad en la muestra utilizando la técnica de *Box-Cox*. Como valor óptimo de λ se obtuvo un valor de -2.88 , el cual se redondeó a -2 , de acuerdo con la tabla de transformaciones típicas de la familia *Box-Cox*. La tabla 4-4 muestra los residuos y predichos posterior a la transformación, con la cual se logró minimizar los valores originales de la respuesta, obteniéndose así predichos muy pequeños que ayudan a la estabilización de la varianza.

Tabla 4-4: Residuos y predichos con transformación

| $\lambda = -2$ | | Factor A: Ángulo de orientación | | | | | |
|------------------------------|----|---------------------------------|------------|------------|------------|--------------|------------|
| | | 0/90 | | 0/90/±45 | | 0/90/±30/±60 | |
| | | Predichos | Residuos | Predichos | Residuos | Predichos | Residuos |
| Factor B: Número de capas | 8 | -1.256E-05 | -4.657E-06 | -2.126E-05 | 2.201E-07 | -1.915E-05 | -1.508E-06 |
| | | | 1.449E-06 | | -2.075E-06 | | 1.935E-06 |
| | 12 | | 3.208E-06 | | 1.855E-06 | | -4.262E-07 |
| | | -1.436E-05 | -3.119E-07 | -2.260E-05 | 1.429E-07 | -2.953E-05 | -3.219E-07 |
| | | 8.514E-07 | | -7.147E-08 | | 1.744E-09 | |
| | | -5.395E-07 | | -7.147E-08 | | 3.201E-07 | |

Realizado por: Loor, 2023

Aplicando un valor de $\lambda = -2$ se obtuvo una optimización en la normalidad de los datos, consiguiéndose que los puntos graficados tiendan a un alineamiento más eficaz a lo largo de la línea recta de la gráfica en cuestión, lo que se comprueba con un *valor-p* de 0.079 , mayor al nivel de significancia utilizado, con lo que estaría aceptando H_0 para la presencia de normalidad, y dando así cumplimiento a dicho supuesto, como se observa en la figura 13-4b.



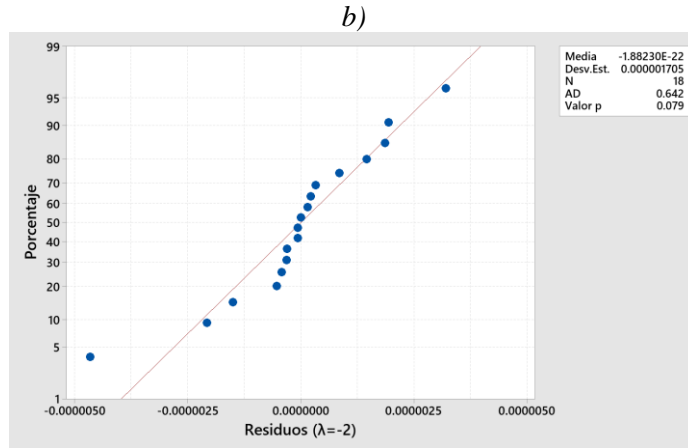


Figura 13-4: Prueba de normalidad a) sin y b) con transformación

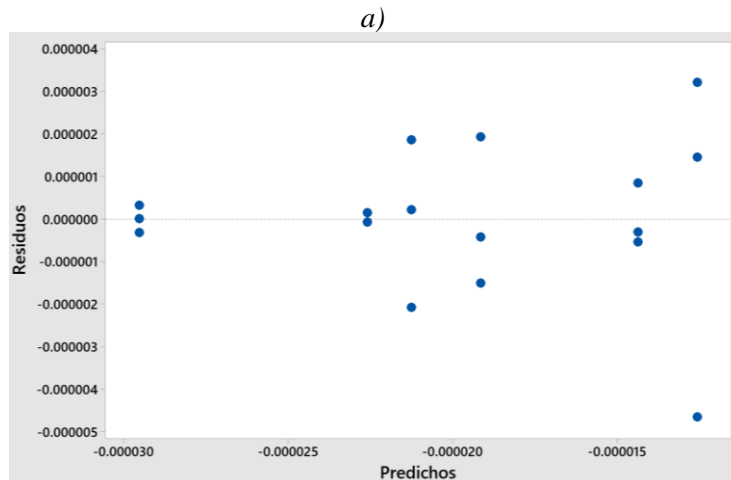
Realizado por: Loor, 2023

Es adecuado destacar que con la transformación no se elimina completamente el efecto de dispersión, el cual es propio de los datos de la muestra, pero esto permite un mejor análisis de los efectos sobre la media de esta.

4.4.2.2 *Supuesto de varianza constante*

Posterior a la verificación del supuesto de normalidad, y a la transformación para la estabilización de la varianza, se procedió a la verificación de esta última.

Al graficar residuos contra predichos, posterior a la aplicación de la transformación, se obtuvo una gráfica donde los puntos se distribuyen de forma aleatoria en sentido vertical a lo largo de una banda horizontal, confirmando el supuesto de varianza constante, como se observa en la figura 14-4a. Al aplicar la prueba de homogeneidad de *Levene*, se obtuvo un *valor-p* de 0.35, lo que indica la aceptación de la hipótesis nula H_0 de varianza constante, y así verificando dicho supuesto, como se observa en la figura 14-4b.



b)

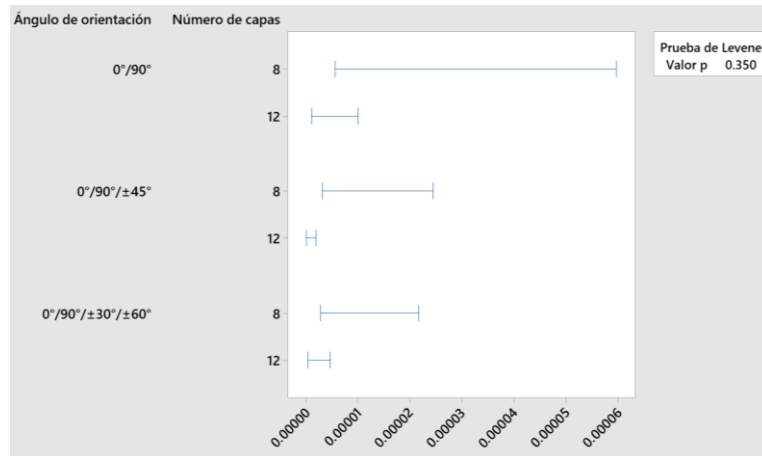


Figura 14-4: Prueba de a) varianza constante y b) homogeneidad

Realizado por: Loor, 2023

4.4.2.3 *Supuesto de independencia*

Para verificar este supuesto se realizó una gráfica los residuos contra observaciones, tal como se muestra en la figura 15-4, en donde no se detecta un patrón o tendencia definida, al contrario, se observa que los puntos se distribuyen de forma aleatoria dentro de una banda horizontal, cumpliéndose con el supuesto en cuestión.

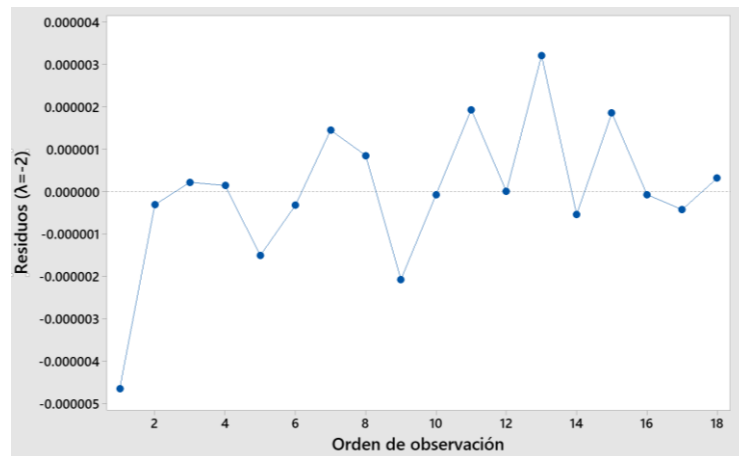


Figura 15-4: Independencia de observaciones

Realizado por: Loor, 2023

4.4.3 *Análisis de varianza ANOVA*

En base a teoría planteada en el capítulo I, del apartado de diseño factorial, y posterior a la transformación para conseguir una estabilización de la varianza, y dar cumplimiento con los supuestos, se construye la tabla de análisis de varianza *ANOVA*, que está compuesta principalmente de una columna con la suma de cuadrados *SC* de efectos, error y total; grados de libertad; cuadrados

medios *CM* de efectos y error; estadístico de distribución de *Fisher*, que resulta de dividir los respectivos cuadrado medios de cada efecto para el cuadrado medio del error; y una columna final para la significancia calculada o *valor-p*.

En la tabla 5-4 se detalla cada una de las variables descritas, posterior a la aplicación de las respectivas ecuaciones mostradas en [10] a [22] del capítulo I.

Tabla 5-4: Análisis de varianza

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios ajustados | F ₀ | Valor-p |
|------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|----------------|----------|
| Efecto A | 3.92E-10 | 2 | 1.96E-10 | 47.57 | 0.000002 |
| Efecto B | 9.16E-11 | 1 | 9.16E-11 | 22.24 | 0.000501 |
| Interacción AB | 7.78E-11 | 2 | 3.89E-11 | 9.44 | 0.003440 |
| Error | 4.94E-11 | 12 | 4.12E-12 | | |
| Total | 6.11E-10 | 17 | | | |

Realizado por: Loor, 2023

4.4.4 Interpretación de efectos activos

En primera instancia, partir de los resultados obtenidos mediante la prueba *ANOVA*, se puede establecer que, entre los efectos principales, el efecto principal *A*, orientación de fibra, es el que tiene mayor significancia en comparación con el efecto principal *B*, número de capas. Por otra parte, el aporte del efecto de interacción *AB* sobre la respuesta es casi escasa, lo que se nota por su bajo valor *F₀*, que es mucho menor en comparación con los de los efectos principales, dando a entender que el efecto de interacción *AB* es estadísticamente significativo.

A partir de la figura 16-4, se puede observar que ambos efectos principales tienden a presentar pendientes negativas, lo que sugiere que el valor medio de la respuesta se será afectado negativamente al ir de un nivel bajo a alto.

Para el caso particular del efecto *A*, que se dijo tiene una fuerte significancia según su valor estadístico de prueba *F₀*, si se tiene una orientación de fibra a *0/90* en el laminado, esto contribuye en gran medida a incrementar o maximizar la respuesta, es decir, el esfuerzo máximo que puede alcanzar dicho laminado antes de fallar, en comparación si se tiene una orientación a *0/90/±45* o *0/90/±30/±60*, que parecen no producir cambios relevantes en la respuesta si se utilizara cualquiera de ellos, dada la poca inclinación de pendiente al cambio de nivel de uno al otro punto.

En el caso del efecto *B*, se logra apreciar que existe un cambio en la respuesta en dependencia del nivel utilizado. Para obtener un valor de respuesta mayor, es necesario que se utilicen menos capas

en el laminado, ya que al aumentar el número de estas produce una caída sustancial en el valor de respuesta.

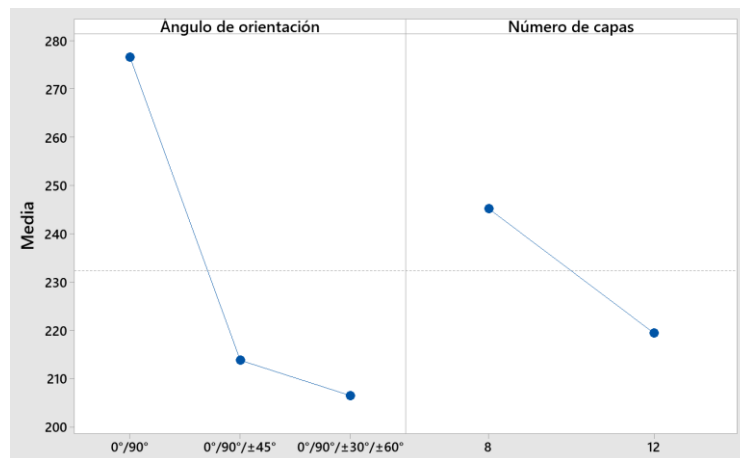


Figura 16-4: Efectos principales

Realizado por: Loor, 2023

Al analizar la figura 17-4 que muestra la interacción completa de los factores intervinientes, se puede identificar que para lograr una maximización en la variable respuesta, se debe considerar el nivel más bajo del factor *A*, es decir *A1*, y los dos niveles del factor *B*, es decir *B1* y *B2*, tendiendo así que se puede trabajar con los tratamientos *A1/B1* y *A1/B2* con valores medios de 289.33 MPa y 264 MPa respectivamente, siendo este primero el más representativo.

Por el contrario, una minimización de la respuesta se da con el tratamiento en los niveles más altos de los factores *A* y *B*, es decir *A3/B3*, consiguiéndose un valor medio por debajo de 184 MPa.

La interacción estadísticamente significativa que se mencionó anteriormente se da particularmente para los tratamientos *A2/B1*, *A2/B2*, *A3/B1* y *A3/B2*, dada la presencia de una intersección de pendientes, exhibiendo valores mucho menores en comparación con los dos con los que se logra maximizar la respuesta.

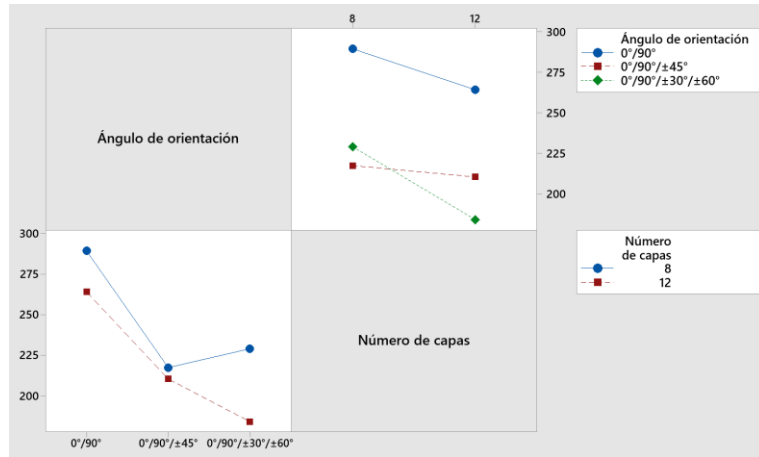


Figura 17-4: Interacción completa de factores

Realizado por: Loor, 2023

4.4.5 Verificación de la calidad del modelo estadístico del diseño factorial

Para la verificación o medición de la calidad del modelo estadístico, se hace uso de los coeficientes de determinación R^2 y de determinación ajustada R_{aj}^2 , con los que se puede medir la variabilidad en porcentaje de los datos experimentales en explicada por el modelo estadístico. De acuerdo con Gutiérrez y de la Vara (2012), para dar validez al modelo estadístico se espera que para R^2 y R_{aj}^2 se tenga un valor mayor al 70%, prefiriéndose el análisis de este último cuando exista la presencia de varios factores por cuestiones de precisión.

Para el cálculo de los respectivos coeficientes, es necesario del mismo modo los datos del análisis de varianza ANOVA, como se muestra en las ecuaciones 54 y 55.

$$R^2 = \frac{SC_{total} - SC_{error}}{SC_{total}} * 100\% \quad [54]$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_{total} - CM_{error}}{CM_{total}} * 100\% \quad [55]$$

A partir de las ecuaciones mencionadas, se obtiene valores de R^2 y R_{aj}^2 de 91.91% y 88.53% respectivamente, que indican que los efectos de los factores de orientación de fibra y número de capas y su respectiva interacción, son responsables o explican entre un 88.53% y 91.91% de la variabilidad en la variable respuesta del diseño experimental.

4.5 Evaluación de la hipótesis

A partir de la hipótesis general planteada en este trabajo, surgen dos hipótesis, una nula H_0 y una alterna H_A , como se enuncia a continuación:

- H_0 : Las propiedades mecánicas de un material compuesto de tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica no se verán influenciadas en dependencia de la manipulación de ciertos factores durante su síntesis.
- H_A : Las propiedades mecánicas de un material compuesto de tipo laminado con refuerzo de fibra de vidrio en matriz de resina epóxica sí se verán influenciadas en dependencia de la manipulación de ciertos factores durante su síntesis.

En donde los factores hacen referencia a los dos que fueron analizadas para este estudio, que se basan en la orientación de fibra y el número de capas que componen a los diferentes laminados. Para el rechazo de la hipótesis nula, y por ende la aceptación de la alterna, o viceversa, se maneja la comparación de las significancias calculadas o valor- p del análisis de varianza ANOVA, con la significancia α que se utilizó, el cual fue del 0.05, como se muestra en la tabla 6-4.

Tabla 6-4: Comparación de valores de significancias calculadas

| Efecto | Valor-p | Valoración | |
|---|-----------------------------|-------------------|------------------|
| Efecto del factor de orientación de fibra | 0.000002 | valor- $p < 0.05$ | Se rechaza H_0 |
| Efecto del factor de numero de capas | 0.000501 | valor- $p < 0.05$ | Se rechaza H_0 |
| Efecto combinatorio de factores | 0.003440 | valor- $p < 0.05$ | Se rechaza H_0 |

Realizado por: Looor, 2023

A partir de estos valores, se puede constatar que los diferentes valores de significación calculados son menores al valor de significación utilizado en el análisis estadístico, lo que lleva al rechazo de la hipótesis nula H_0 , y la aceptación de la alterna H_A .

CAPÍTULO V

5 PROPUESTA

Como se ha habido mencionado anteriormente, los materiales compuestos a base de fibra de y matriz polimérica poseen un vasto campo de aplicaciones en diversas áreas dentro y fuera de la ingeniería.

Como parte de este trabajo se plantea la utilización del material compuesto laminado con refuerzo de fibra de vidrio de tipo tejido clase *E* en matriz polimérica de resina epóxica para cajas de impacto o *crash box* de automóviles, aplicando puramente herramientas de simulación numérica.

En primera instancia, en base a la aplicación de las diferentes configuraciones de material laminado planteadas en este trabajo en un diseño base de caja de impacto, se analiza con que configuración(es) se obtienen mejores resultados bajo los criterios mencionados en el capítulo III, relacionado con el desempeño de absorción de energía.



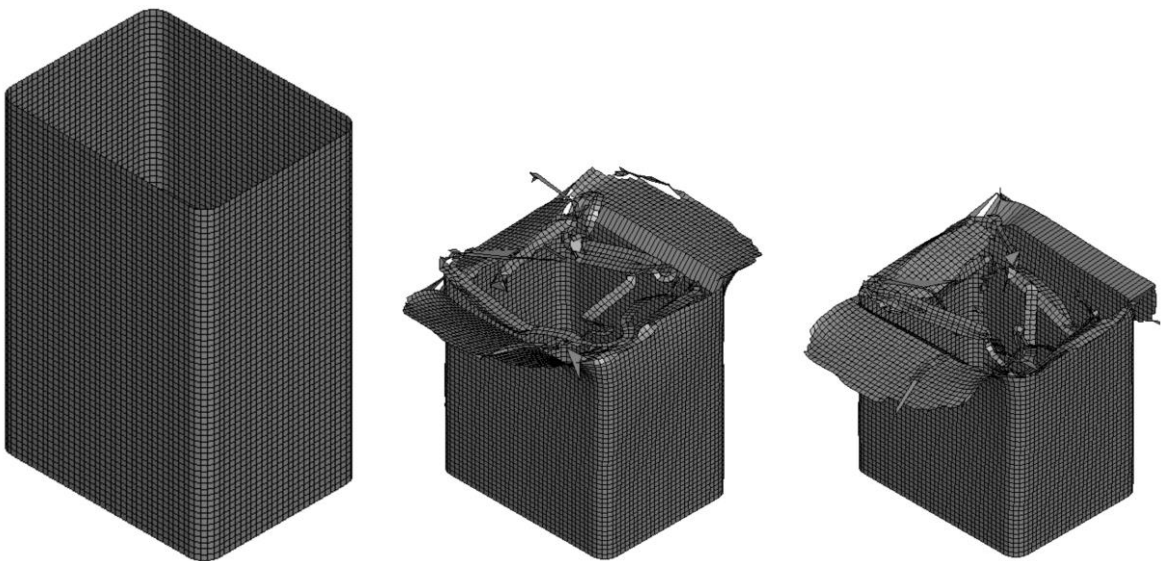
Como un proceso de optimización adicional, se plantean otras geometrías aplicando las configuraciones con mejores resultados, y así obtener un modelo final, con el cual por último se diseñan diversas configuraciones de *triggers* o iniciadores de deformación como último paso en el proceso de optimización del modelo.

Para propósitos de una verificación adicional, igualmente por simulación numérica, el modelo optimizado es implementado en un modelo de barra de impacto de automóvil para su comparación con el modelo original en acero.

5.1 Aplicación de material compuesto laminado en caja de impacto

A partir de la aplicación de las distintas configuraciones de material compuesto laminado a base de fibra de vidrio de tipo tejido plano grado *E* y resina epóxica en 40 y 60% respectivamente por simulación numérica, se obtuvieron los resultados mostrados a continuación:

5.1.1 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración A

| | | |
|--|--|---|
|  | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</p> <p>INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA</p> |  |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | |
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito | |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 | |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPU(s)) | |
| DATOS DE MODELO | | |
| Designación: | s | |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular | |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy | |
| Configuración del material: | 8 capas – $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$ | |
| Tiempo de procesamiento: | 34 minutos 18 segundos | |
| RESULTADOS | | |
| $t = 0.00000 \text{ s}$ | $t = 0.01005 \text{ s}$ | $t = 0.02000 \text{ s}$ |
|  | | |

| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 66.16 | F_{prom} (kN): | 26.95 |
| D_{max} (mm): | 38.01 | EA (J): | 1024.60 |
| SEA (J/kg): | 3845.50 | CFE: | 0.41 |
| M (kg): | 0.2664 | | |

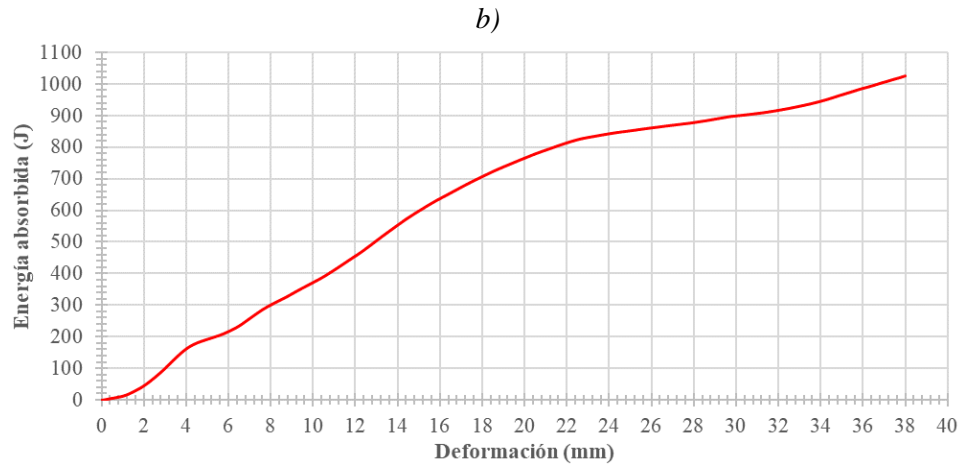
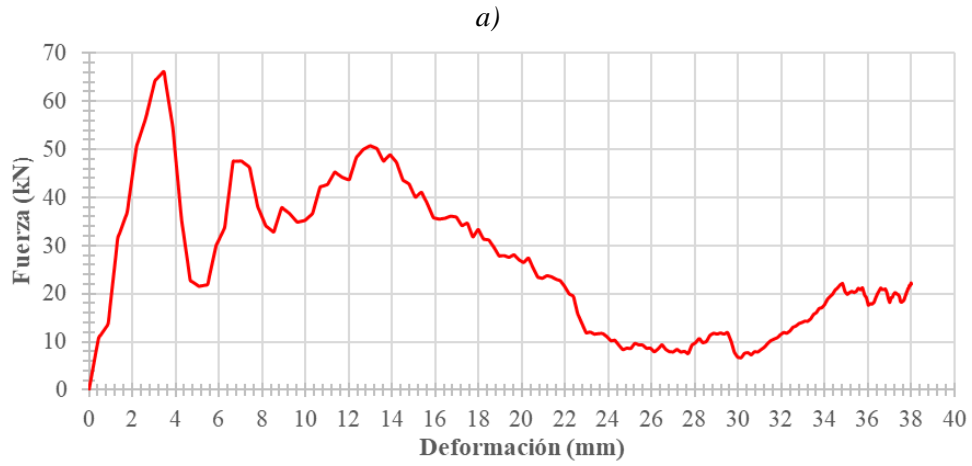


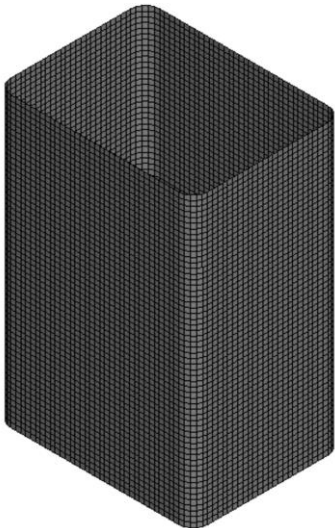

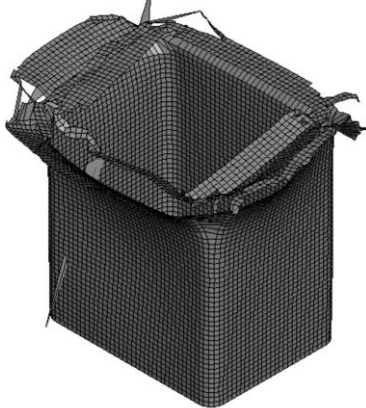


Figura 1-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_A

Realizado por: Loor, 2023

5.1.2 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración B

| | | |
|---|--|---|
|  | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</p> <p>INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA</p> |  |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | |
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito | |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 | |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPU(s)) | |
| DATOS DE MODELO | | |
| Designación: | CIB-CONF_B | |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular | |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy | |
| Configuración del material: | 8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (\pm 45^\circ)]_{2s}$ | |
| Tiempo de procesamiento: | 32 minutos 42 segundos | |
| RESULTADOS | | |
| t = 0.00000 s | t = 0.01005 s | t = 0.02000 s |
|  |  |  |

| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 70.45 | F_{prom} (kN): | 35.69 |
| D_{max} (mm): | 28.67 | EA (J): | 1022.95 |
| SEA (J/kg): | 3839.30 | CFE: | 0.51 |
| M (kg): | 0.2664 | | |

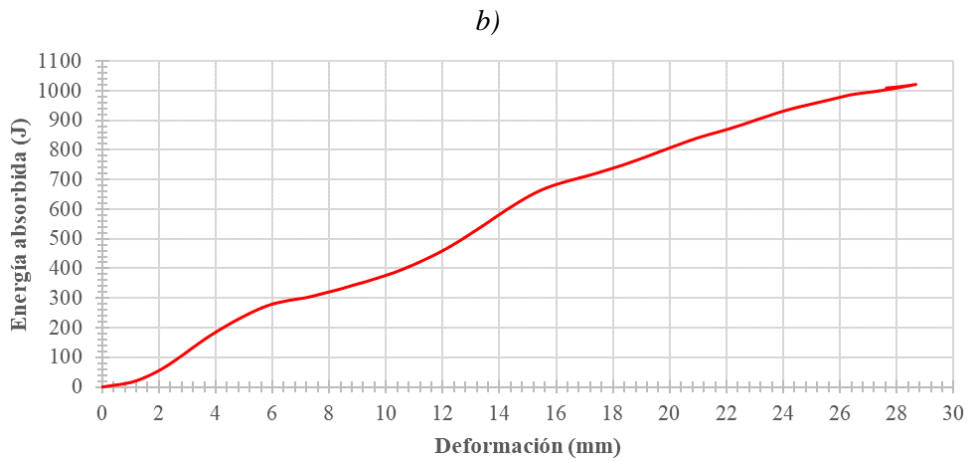
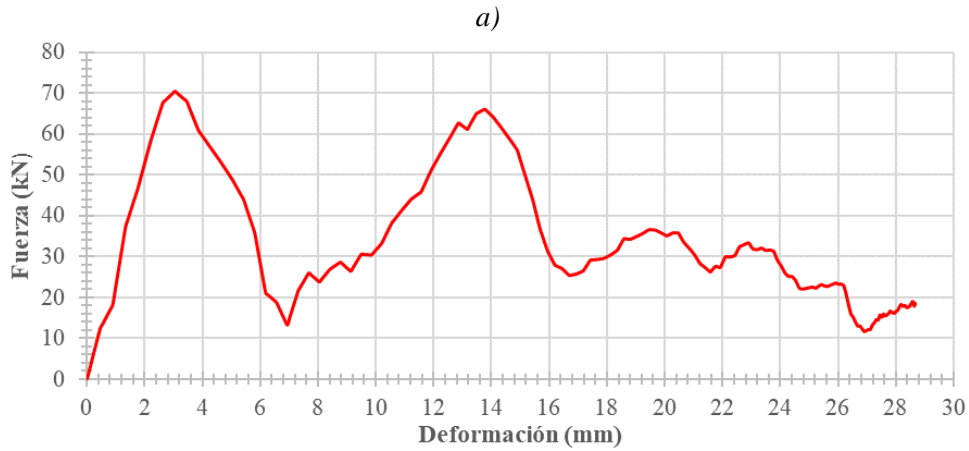


Figura 2-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_B

Realizado por: Loor, 2023

5.1.3 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración C



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
DE CHIMBORAZO

INSTITUTO DE POSTGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA



DATOS INFORMATIVOS GENERALES:

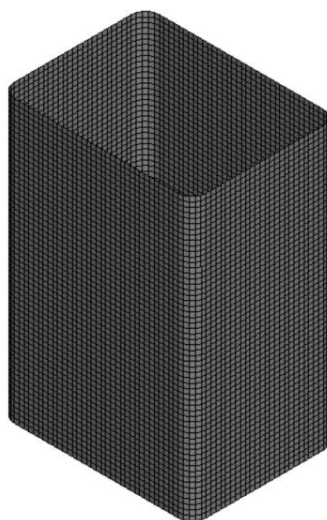
| | |
|-------------------------------|---|
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPU)s |

DATOS DE MODELO

| | |
|------------------------------------|---|
| Designación: | CIB-CONF_C |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy |
| Configuración del material: | 8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (30^\circ/-60^\circ) / (60^\circ/-30^\circ) / (0^\circ/90^\circ)]_s$ |
| Tiempo de procesamiento: | 32 minutos 22 segundos |

RESULTADOS

t = 0.00000 s



t = 0.01005 s



t = 0.02000 s



| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 70.08 | F_{prom} (kN): | 29.63 |
| D_{max} (mm): | 34.25 | EA (J): | 1014.94 |
| SEA (J/kg): | 3809.22 | CFE: | 0.42 |
| M (kg): | 0.2664 | | |

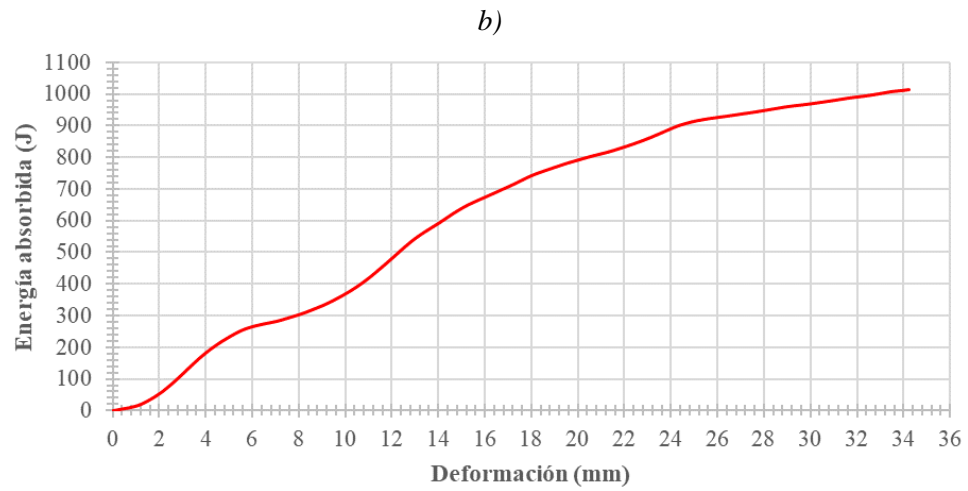
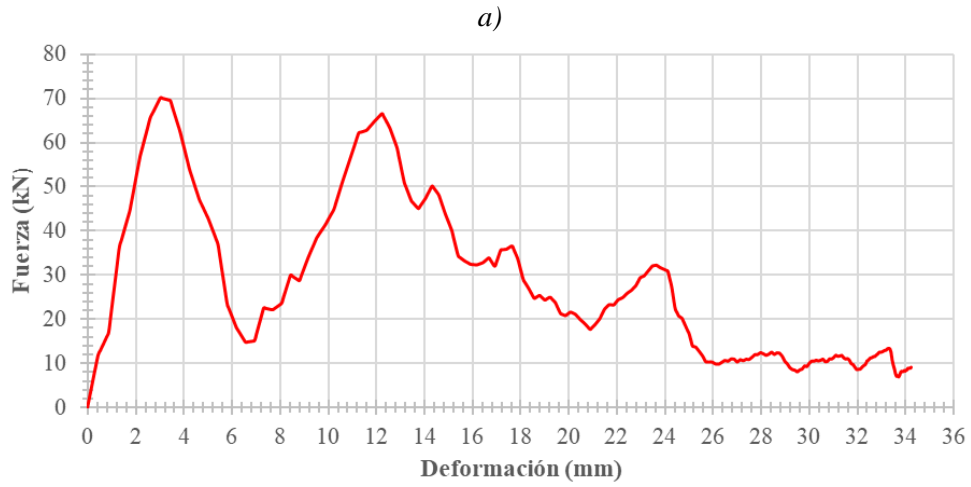


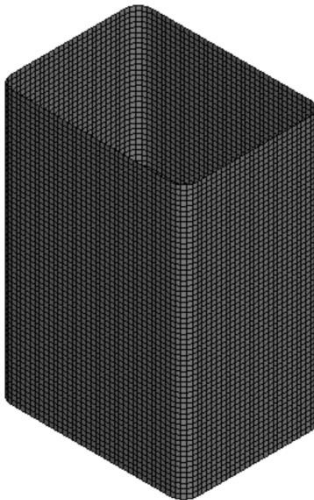

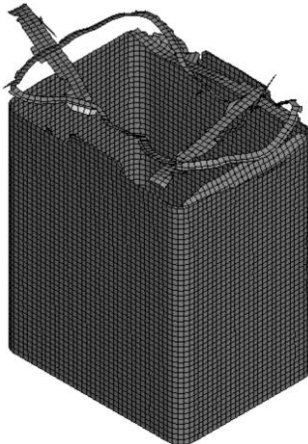


Figura 3-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_C

Realizado por: Loor, 2023

5.1.4 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración D

| | | |
|---|--|---|
|  | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</p> <p>INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA</p> |  |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | |
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito | |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 | |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPU(s)) | |
| DATOS DE MODELO | | |
| Designación: | CIB-CONF_D | |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular | |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy | |
| Configuración del material: | 12 capas – [(0°/90°)] _{6s} | |
| Tiempo de procesamiento: | 31 minutos 15 segundos | |
| RESULTADOS | | |
| t = 0.00000 s | t = 0.00000 s | t = 0.00000 s |
|  |  |  |

| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 131.46 | F_{prom} (kN): | 57.55 |
| D_{max} (mm): | 17.72 | EA (J): | 1019.96 |
| SEA (J/kg): | 2552.05 | CFE: | 0.44 |
| M (kg): | 0.3997 | | |

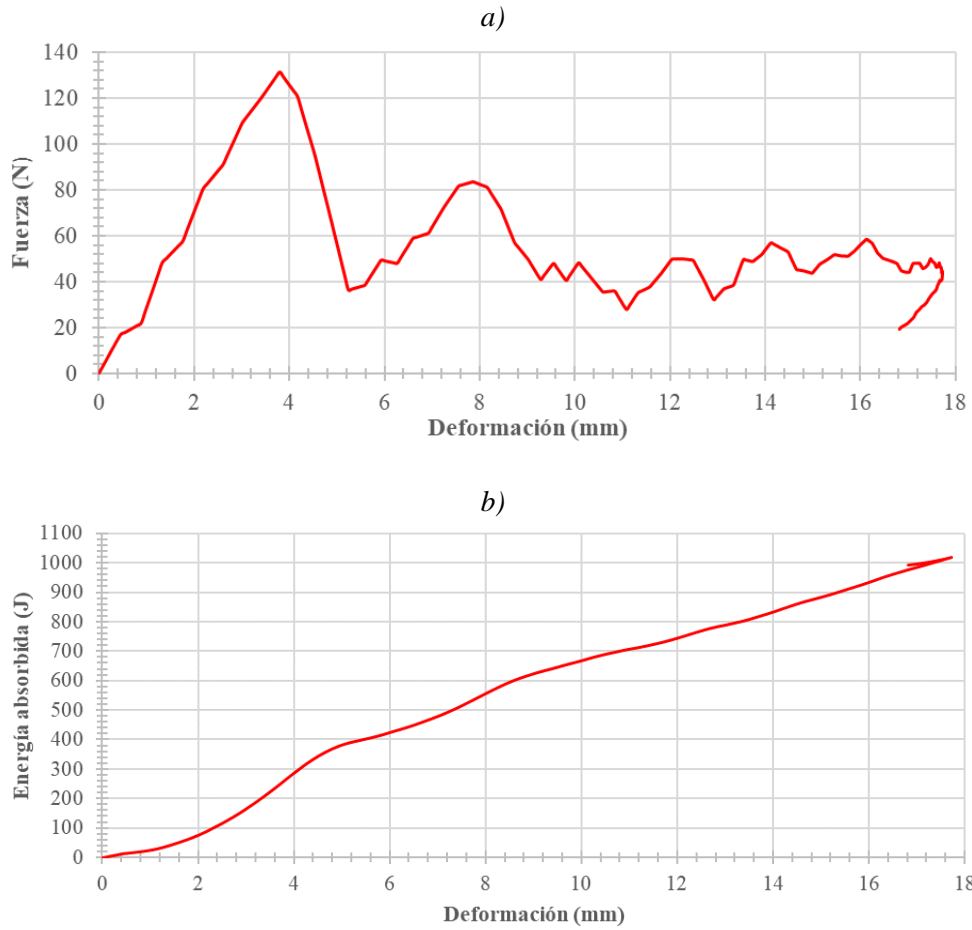
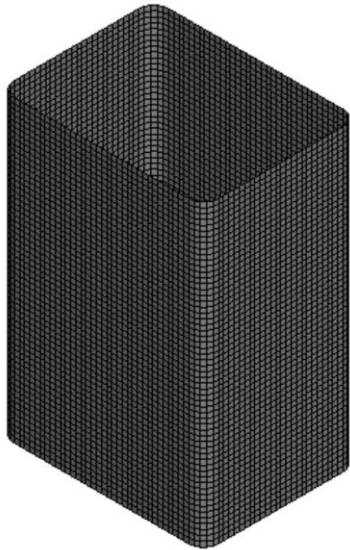




Figura 4-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_D

Realizado por: Loor, 2023

5.1.5 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración E

| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | |
|---|--|---|
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito | |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 | |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPUs) | |
| DATOS DE MODELO | | |
| Designación: | CIB-CONF_E | |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular | |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy | |
| Configuración del material: | 12 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (\pm 45^\circ)]_{3s}$ | |
| Tiempo de procesamiento: | 31 minutos 15 segundos | |
| RESULTADOS | | |
| $t = 0.00000 \text{ s}$ | $t = 0.01005 \text{ s}$ | $t = 0.02000 \text{ s}$ |
|  |  |  |

| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 139.46 | F_{prom} (kN): | 79.41 |
| D_{max} (mm): | 12.71 | EA (J): | 1009.00 |
| SEA (J/kg): | 2524.61 | CFE: | 0.57 |
| M (kg): | 0.3997 | | |

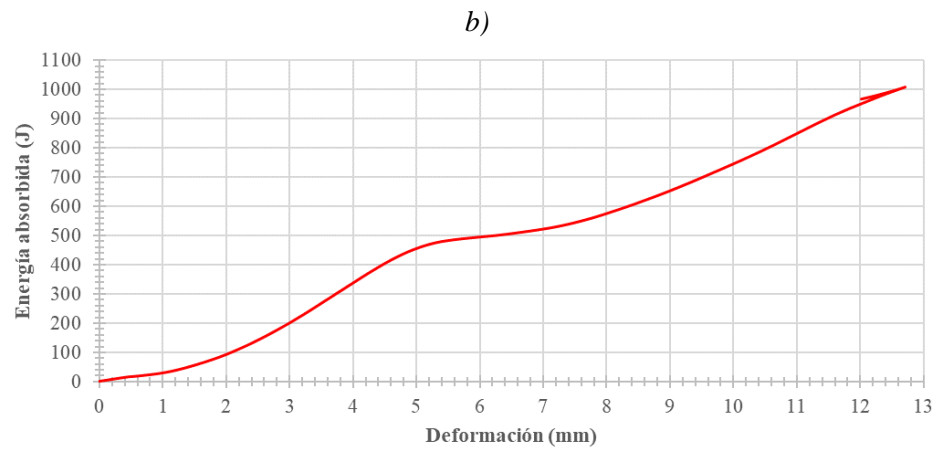
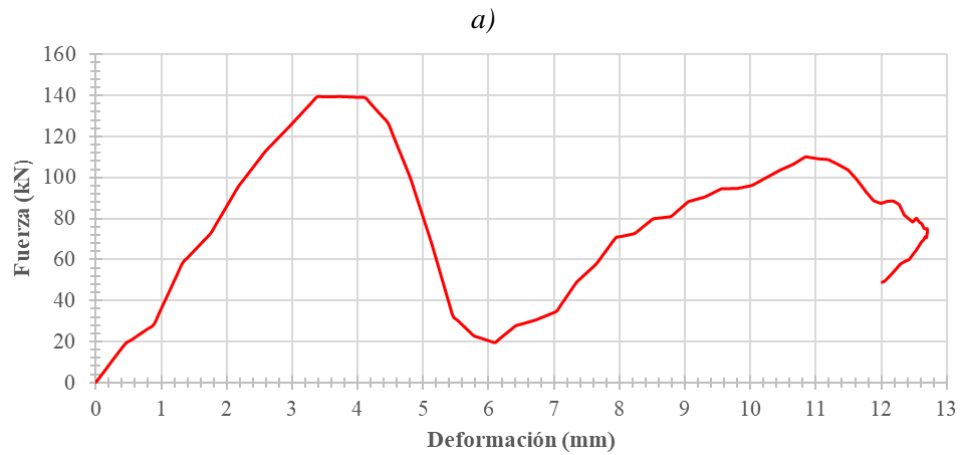


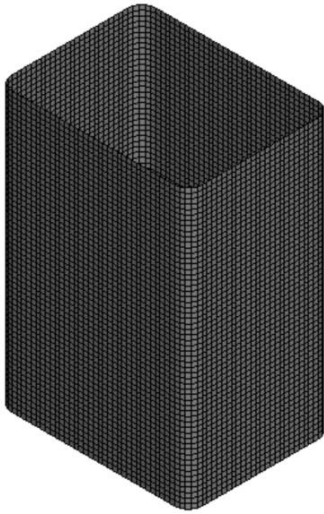
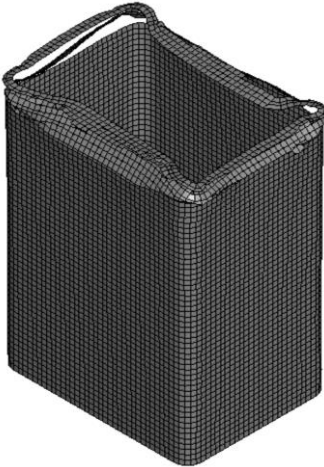



Figura 5-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_E

Realizado por: Loor, 2023

5.1.6 Resultados de modelo de caja de impacto con configuración F

| | | |
|---|--|---|
|  | <p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</p> <p>INSTITUTO DE POSTGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA</p> |  |
| DATOS INFORMATIVOS GENERALES: | | |
| Tipo de estudio: | Simulación por método del elemento finito | |
| Fecha de ejecución: | 04 de diciembre de 2022 | |
| Realizado por: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | |
| Equipo/modelo: | Dell Inspiron 15-7579 | |
| Procesador del equipo: | Intel® Core™ i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz (4 CPUs) | |
| DATOS DE MODELO | | |
| Designación: | CIB-CONF_F | |
| Características: | Caja de impacto de sección rectangular | |
| Material: | Material compuesto laminado de fibra de vidrio tejido/epoxy | |
| Configuración del material: | 12 capas – [(0/90) / (30/-60) / (60/-30)] _{2s} | |
| Tiempo de procesamiento: | 33 minutos 44 segundos | |
| RESULTADOS | | |
| t = 0.00000 s | t = 0.01005 s | t = 0.02000 s |
|  |  |  |

| | | | |
|------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| F_{max} (kN): | 144.01 | F_{prom} (kN): | 77.67 |
| D_{max} (mm): | 13.06 | EA (J): | 1014.26 |
| SEA (J/g): | 2537.78 | CFE: | 0.54 |
| M (g): | 0.3997 | | |

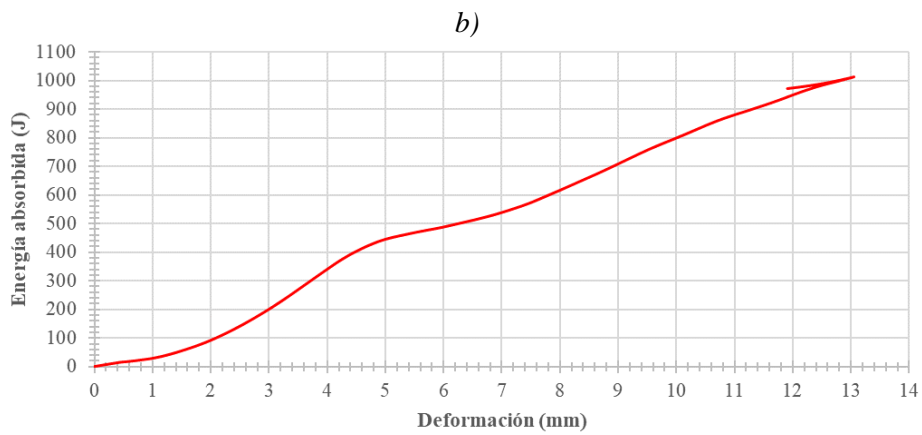
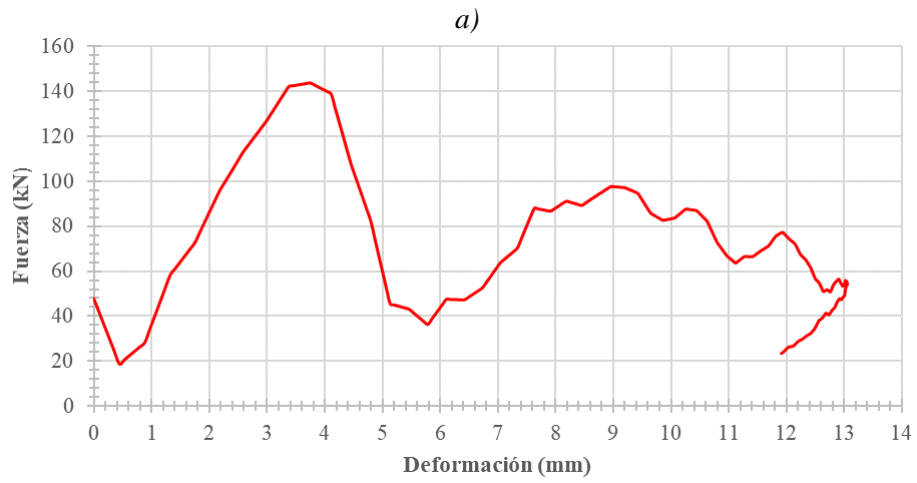


Figura 6-5: Graficas de a) fuerza-deformación, b) energía absorbida de CIB-CONF_F

Realizado por: Loor, 2023

5.1.7 Resultados de aplicación de material compuesto laminado

5.1.7.1 Mecanismos de falla

Basado en los modelos en las diversas configuraciones de material compuesto, se observan un proceso de deformación progresiva a partir de las zonas de impacto de las diferentes estructuras, con la presencia de diferentes mecanismos de falla.

Para los modelos con las configuraciones A (*CIB-CONF_A*), B (*CIB-CONF_B*) y C (*CIB-CONF_C*) se evidencia la formación y propagación de grietas axiales en las esquinas de las cajas de impacto. La acumulación del material roto posterior al impacto da origen a la formación de restos de las paredes de la caja de impacto con forma de pétalos.

Algo muy distinto ocurre con las configuraciones D (*CIB-CONF_D*), E (*CIB-CONF_E*) y F (*CIB-CONF_F*), donde se visualiza únicamente la acumulación de material al inicio de las zonas impactadas, esto se debe en gran medida a que estos modelos al estar constituidos con más capas o laminas, es decir un mayor espesor, da paso que se tenga mayor rigidez, y por ende tenderán a presentar una menor deformación en comparación con las configuraciones con menos capas. Esto se evidencia en los valores de deformación total alcanzada durante el impacto provistas en las fichas antes mostradas. La figura 7-5 muestra los distintos mecanismos de falla presentes en las distintas configuraciones del material laminado.

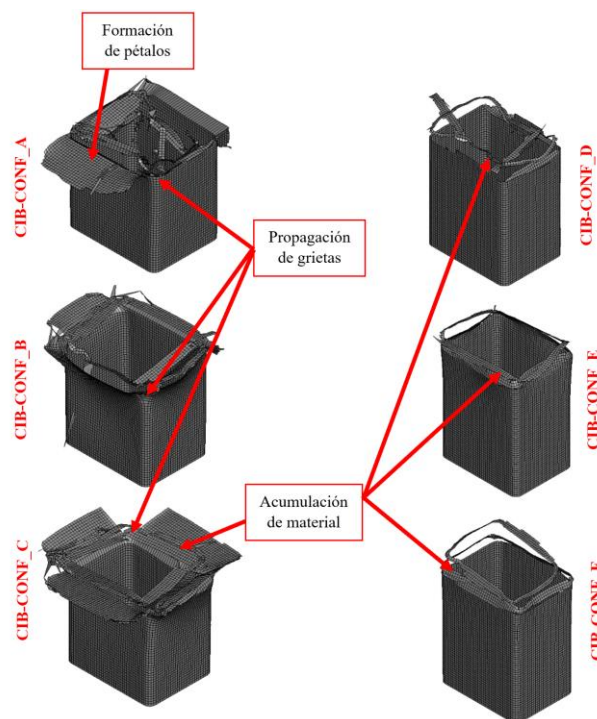


Figura 7-5: Mecanismos de falla en las distintas configuraciones

Realizado por: Loor, 2023

5.1.7.2 Influencia de la configuración del material

En relación la fuerza inicial máxima (F_{max}) generada al momento del impacto, el modelo de caja de impacto con la configuración de material *A* exhibió el valor más bajo entre las demás configuraciones, con un valor de 66.16 kN; en contraste con el modelo con la configuración *F* con el que se obtuvo el valor de 144.01 kN.

Los modelos *B* y *C* reflejaron valores muy cercanos con relación al modelo *A*, con 70.45 kN y 70.08 kN respectivamente. Por otra parte, los resultados obtenidos con los modelos *D* y *E* resultaron al igual que con el modelo *F*, con valores de 131.22 kN y 139.46 kN respectivamente, tal como se observa en la figura 8-5a.

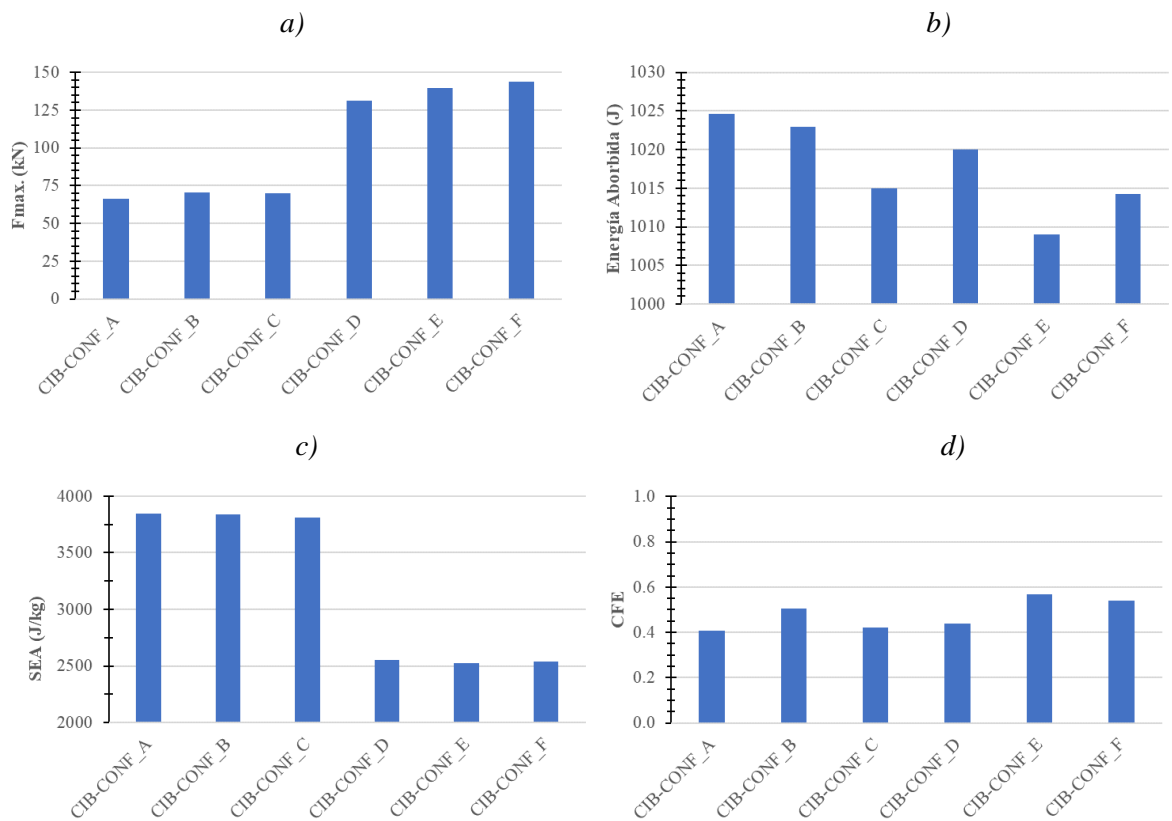


Figura 8-5: Comparación de a) Fuerza inicial máxima, b) energía absorbida, c) absorción de energía específica y d) factor de eficiencia de aplastamiento

Realizado por: Loor, 2023

En cuanto a los criterios de energía, aunque no existe un cambio significativo de una configuración a otra del material, aun así, por medio de la configuración *A* se logra obtener una maximización la energía adsorbida con un valor de 1024 J, mientras que con la configuración *E*, este valor se reduce

a 1009 J. Las demás configuraciones se mantienen dentro de este rango, como se observa en la figura 8-5b.

Para un mejor análisis del criterio de energía absorbida, es mejor considerar el criterio de absorción de energía específica, ya que, al considerar la masa de la caja de impacto, tiene más significancia.

En este criterio se nota una clara ventaja por parte de las configuraciones *A*, *B* y *C*, con valores casi similares de 3845.50 J/kg, 3839.30 J/kg y 3809.22 respectivamente; en relación con los valores de 2552.05 J/kg, 2524.61 J/kg y 2537.78 J/kg para las configuraciones *D*, *E* y *F* respectivamente, como se observa en la figura 8-5c.

Como ultimo criterio analizado, con la eficiencia de fuerza de aplastamiento (*CFE*) existe un cambio en la tendencia que se venía manteniendo en los demás criterios, teniendo a la configuración *F* con un mayor valor de índice, 0.57 (57%), en comparación con el valor más bajo de 0.41 (41%) de la configuración *A*. Las demás configuraciones igualmente reflejan valoren dentro de te rango

La tabla 1-5 muestra cada uno de los criterios de desempeño en la absorción de energía descritos para cada una de las configuraciones de material.

Tabla 1-5: Criterios de desempeño en la absorción de energía

| | F_{max} (kN) | F_{prom} (kN) | ΔL (mm) | CFE | EA (J) | SEA (J/kg) |
|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|------|---------|------------|
| CIB-CONF_A | 66.16 | 26.95 | 38.01 | 0.41 | 1024.60 | 3845.50 |
| CIB-CONF_B | 70.45 | 35.69 | 28.67 | 0.51 | 1022.95 | 3839.30 |
| CIB-CONF_C | 70.08 | 29.63 | 34.25 | 0.42 | 1014.94 | 3809.22 |
| CIB-CONF_D | 131.22 | 57.55 | 17.72 | 0.44 | 1019.96 | 2552.05 |
| CIB-CONF_E | 139.46 | 79.41 | 12.71 | 0.57 | 1009.00 | 2524.61 |
| CIB-CONF_F | 144.01 | 77.67 | 13.06 | 0.54 | 1014.26 | 2537.78 |

Realizado por: Loor, 2023

Al evaluar cada uno de estos criterios, es importante seguir ciertos lineamientos para establecer un diseño adecuado en una caja de impacto. En cuanto a la F_{max} se espera que esta sea lo más baja posible, ya que así se evita que las cargas se transmitan a las demás partes de vehículo, y por ende a los pasajeros, evitando lesiones en cabeza o cuello. En cuanto a los demás criterios, se espera que se absorba la mayor cantidad posible de energía durante el impacto, así mismo es preferible obtener valores altos para el criterio de absorción de energía específica (*SEA*), ya que así se está asegurando que se absorbe más energía con una estructura de menor masa. Adicionalmente, para obtener un proceso de deformación estable, es importante obtener valores cercanos o superiores a la unidad para la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (Davoudi y Kim, 2018, p. 4276).

En base a lo descrito, se puede notar que, por la similitud en sus resultados, las configuraciones *A*, *B* y *C* son las que exhiben mejores resultados bajo los criterios analizados.

5.2 Optimización de diseño de caja de impacto

5.2.1 Optimización por diseño de geometría

Con el fin de mejorar el desempeño en la absorción de energía al momento del impacto, aplicando material compuesto laminado, se estudió la aplicación de diversas geometrías en el diseño de las cajas de impacto.

Las diferentes geometrías planteadas se representan en 16 modelos diferentes, cuyas dimensiones están basadas en las del modelo original, se detallan en la figura 9-5.

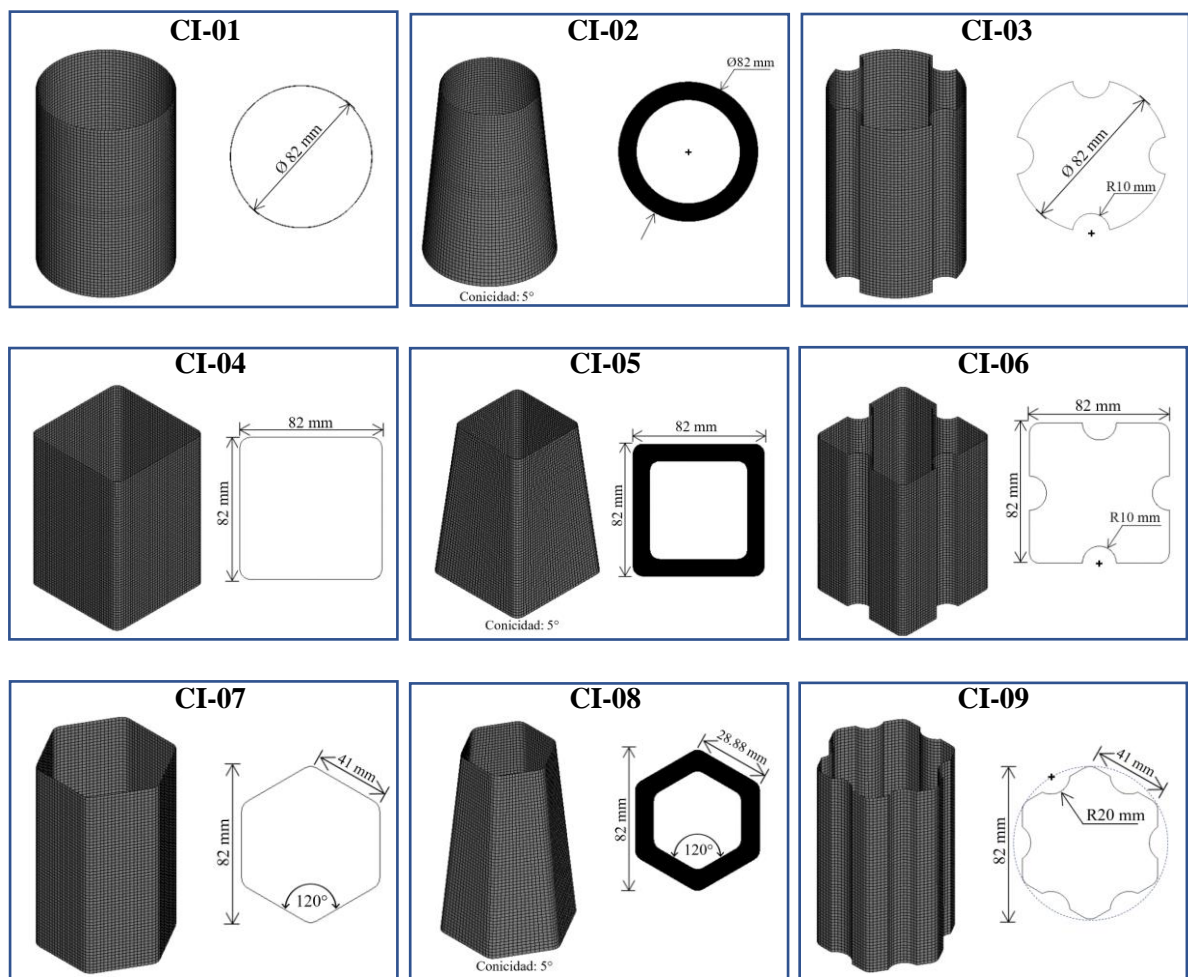


Figura 9-5: Diseños de diferentes geometrías de cajas de impacto

Realizado por: Loor, 2023

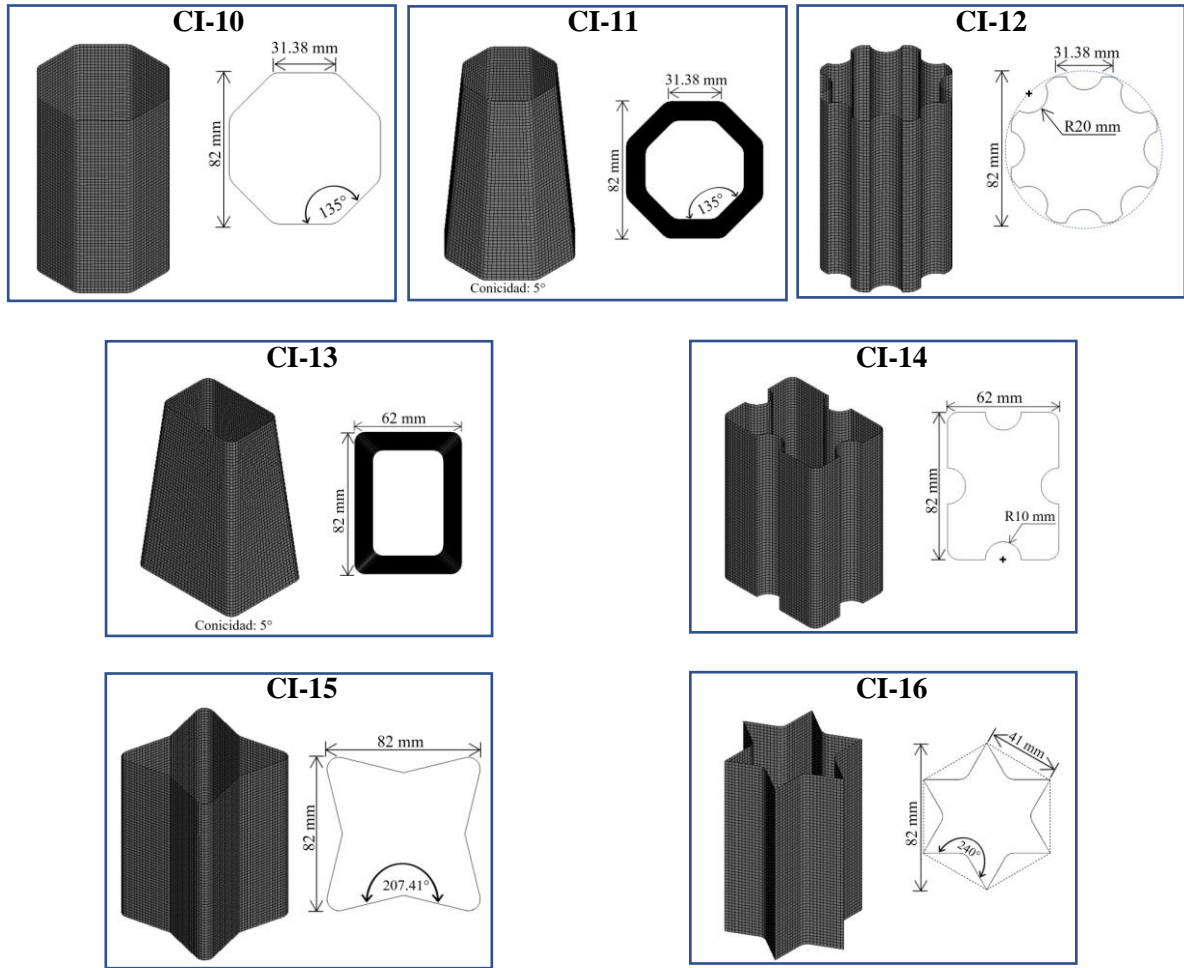


Figura 9-5: Diseños de diferentes geometrías de cajas de impacto (continuación)

Realizado por: Loor, 2023

5.2.1.1 Evaluación de desempeño de absorción de energía

Al haberse notado que el modelo base de caja de impacto utilizando las configuraciones de material compuesto con designación *CONF-A*, *CONF B* y *CONF-C* mostraron una respuesta similar con un mejor desempeño en los principales criterios valorados, estas se evaluaron en las distintas geometrías ya planteadas, obteniéndose un comportamiento variado para cada espécimen simulado, tal como se nota en las figuras 10-5 a 20-5.

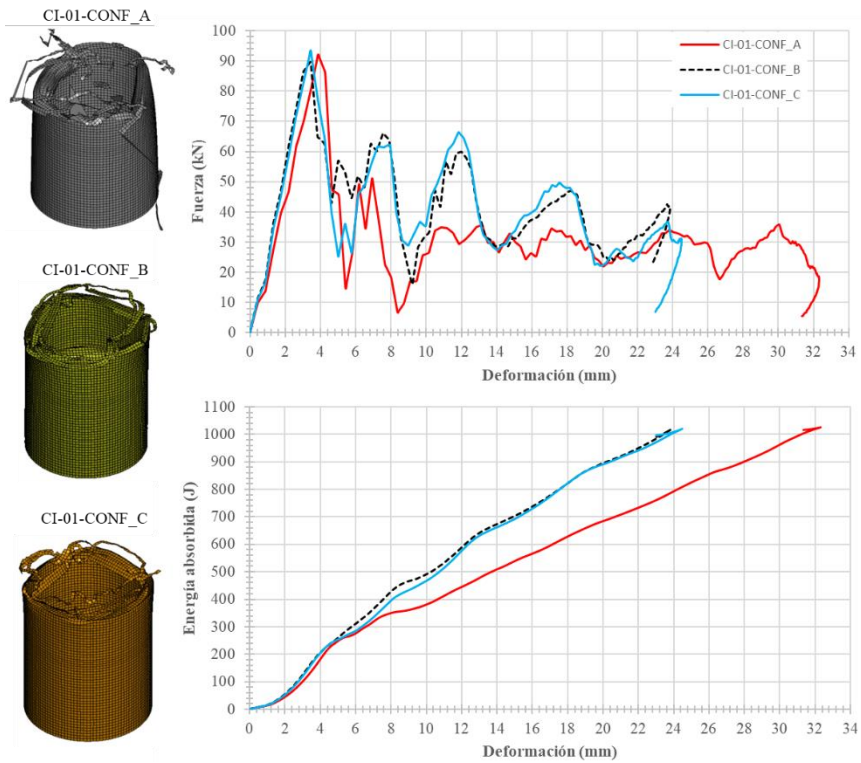


Figura 10-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-01

Realizado por: Loor, 2023

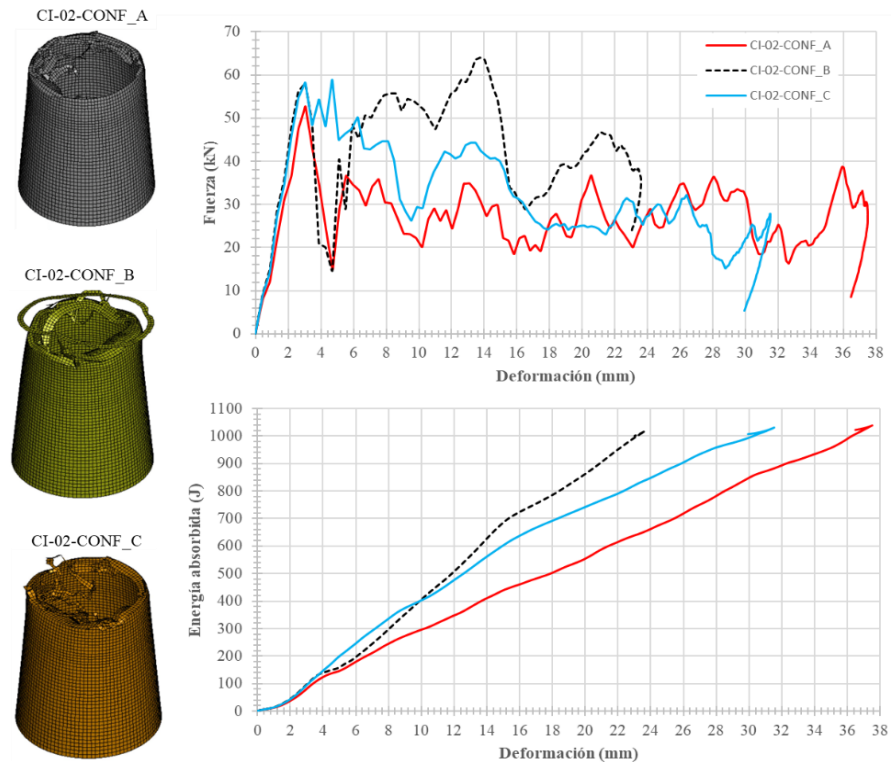


Figura 11-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-02

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

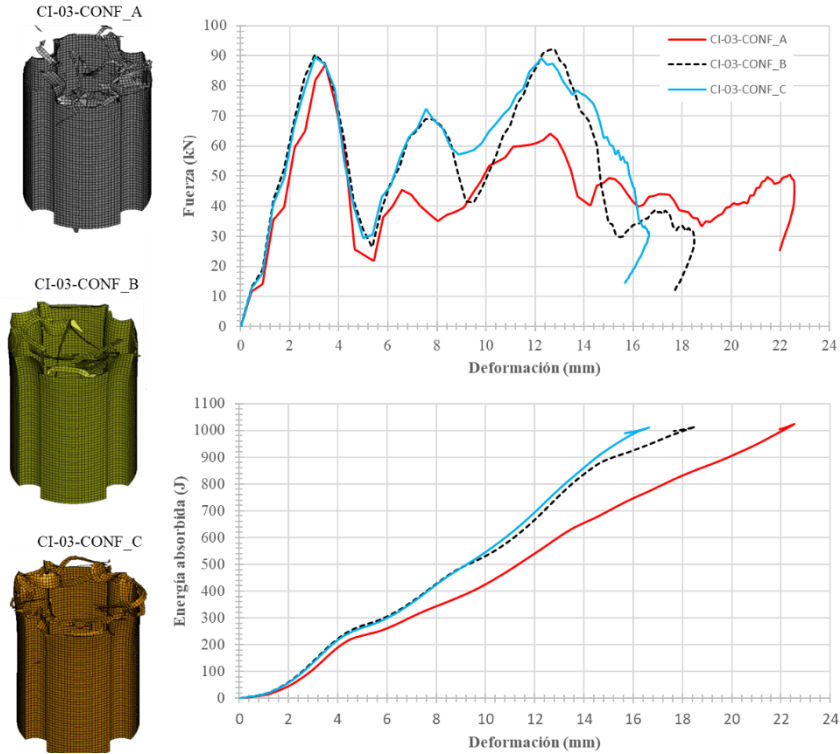


Figura 12-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-03

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

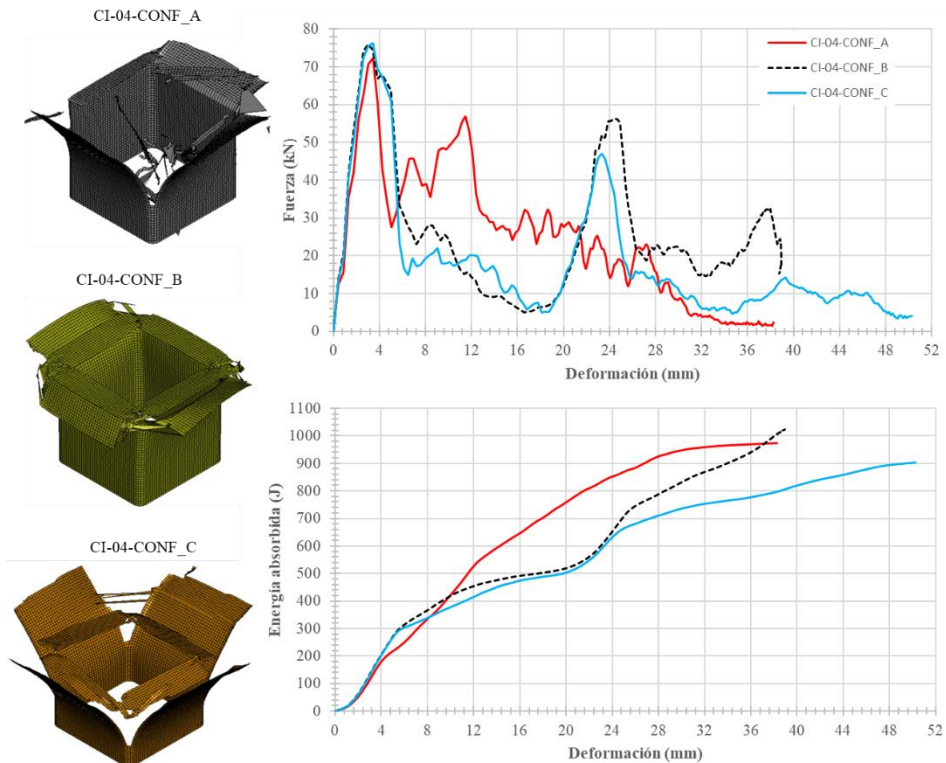


Figura 13-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-04

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

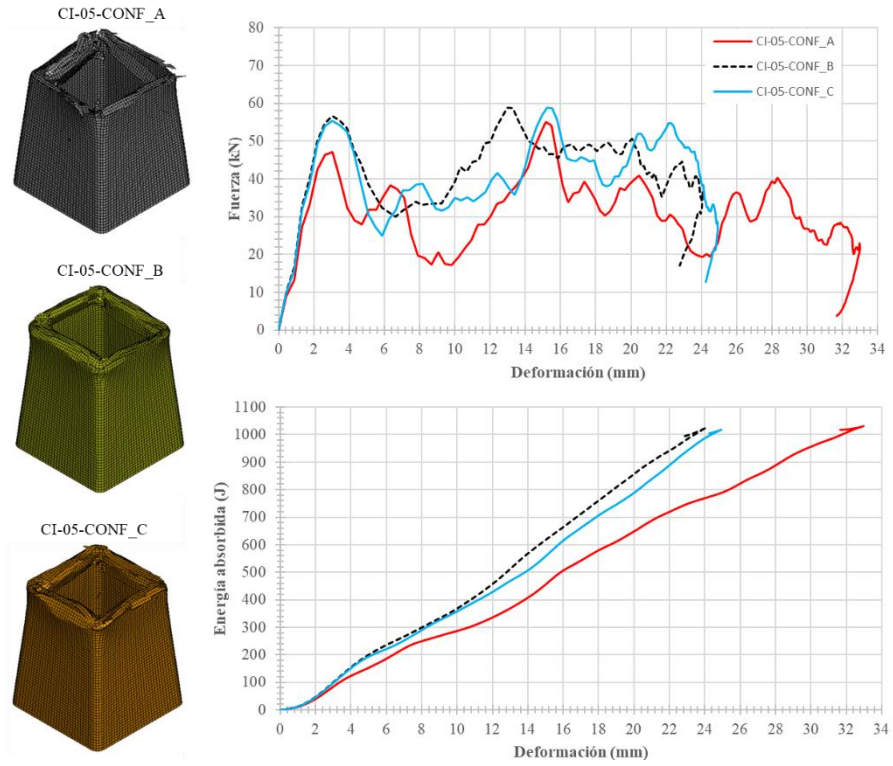


Figura 14-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-05

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

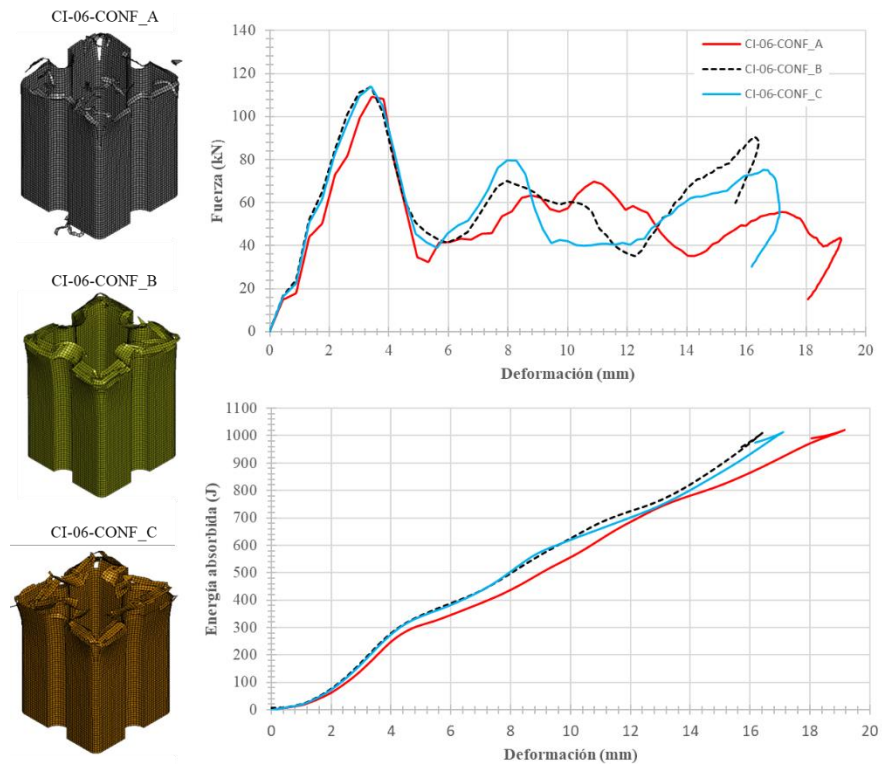


Figura 15-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-06

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

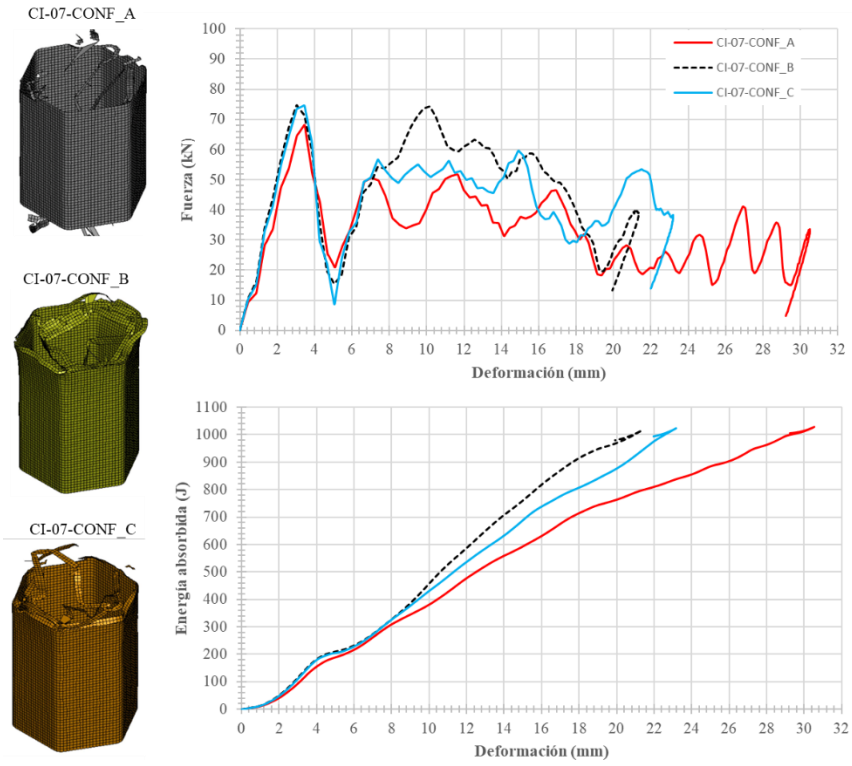


Figura 16-3: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-07

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

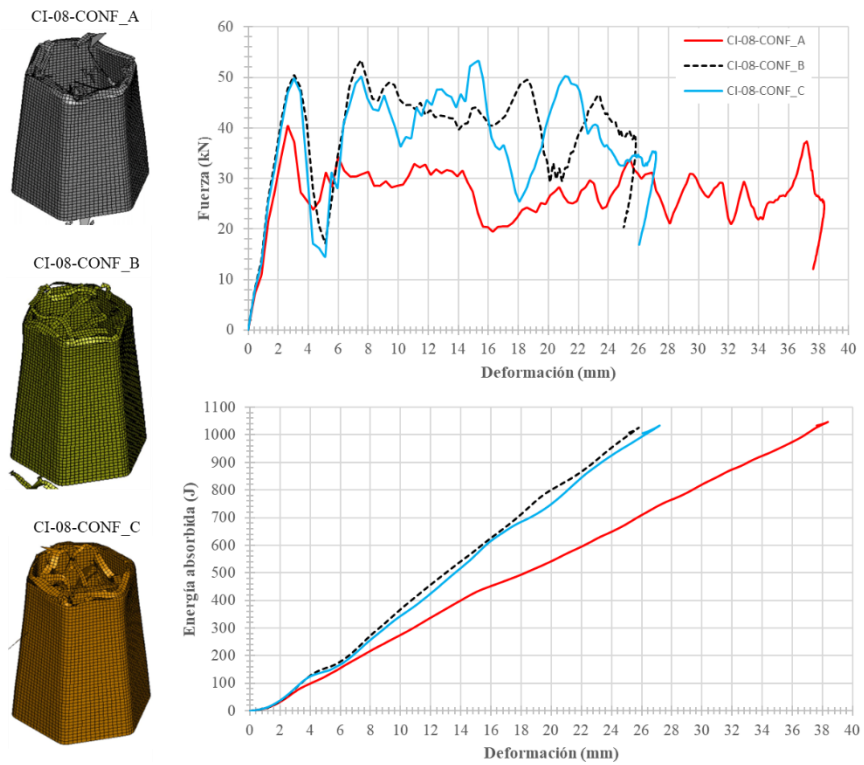


Figura 17-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-08

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

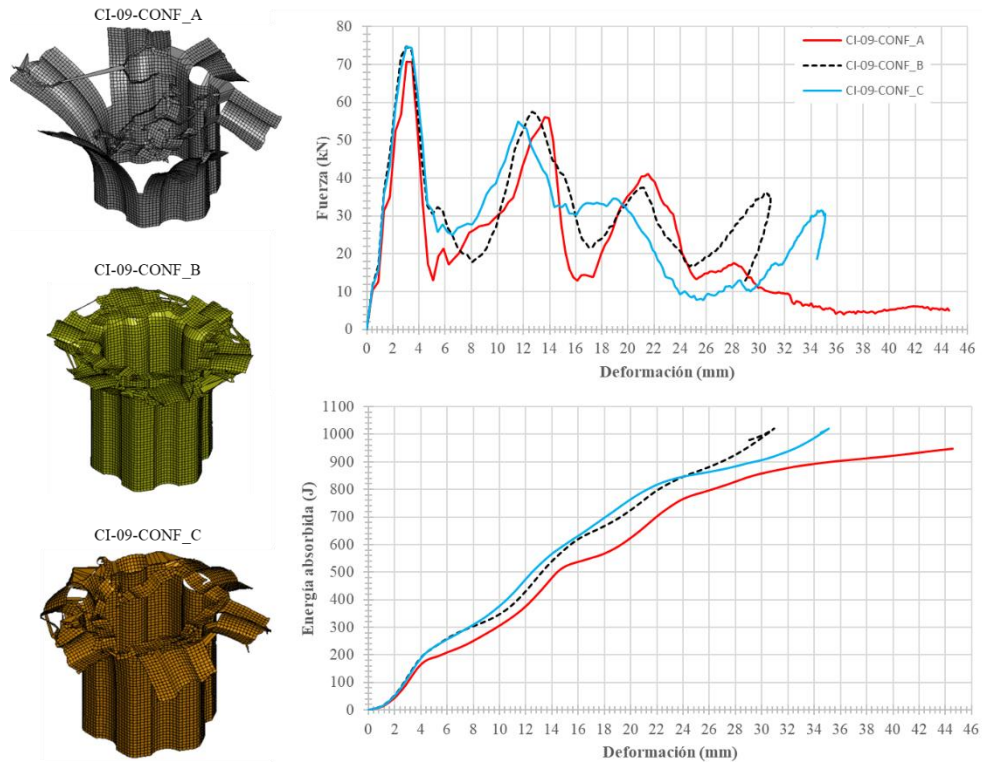


Figura 18-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-09

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

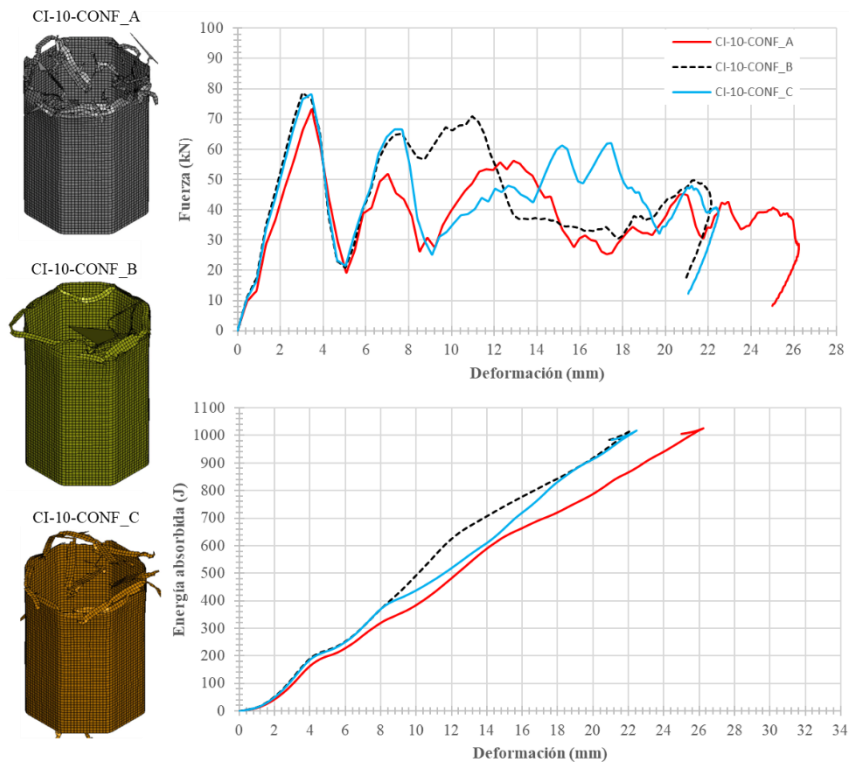


Figura 19-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-10

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

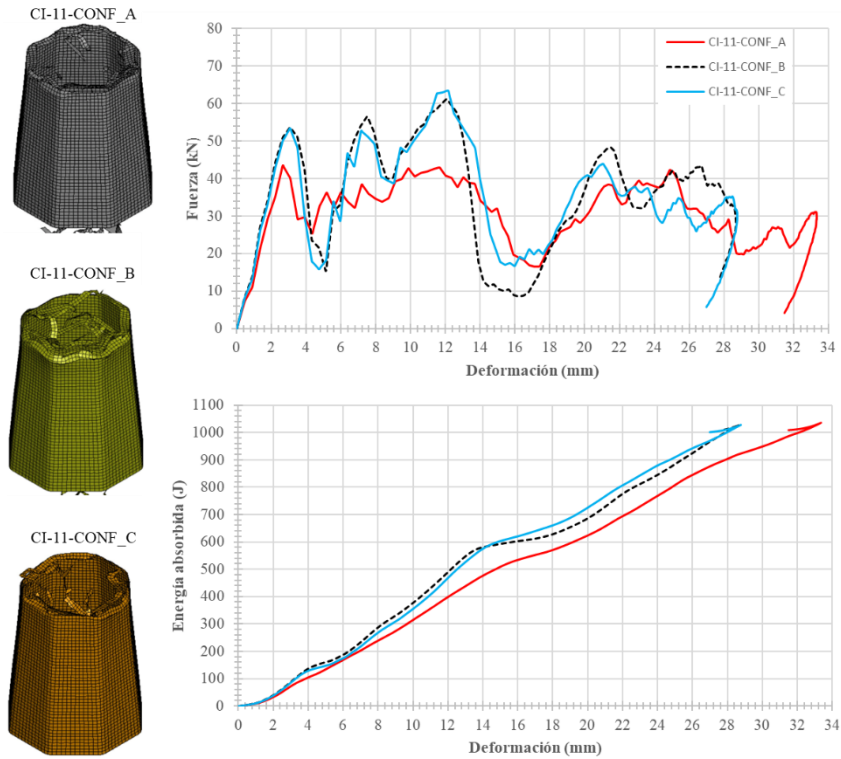


Figura 20-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-11

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

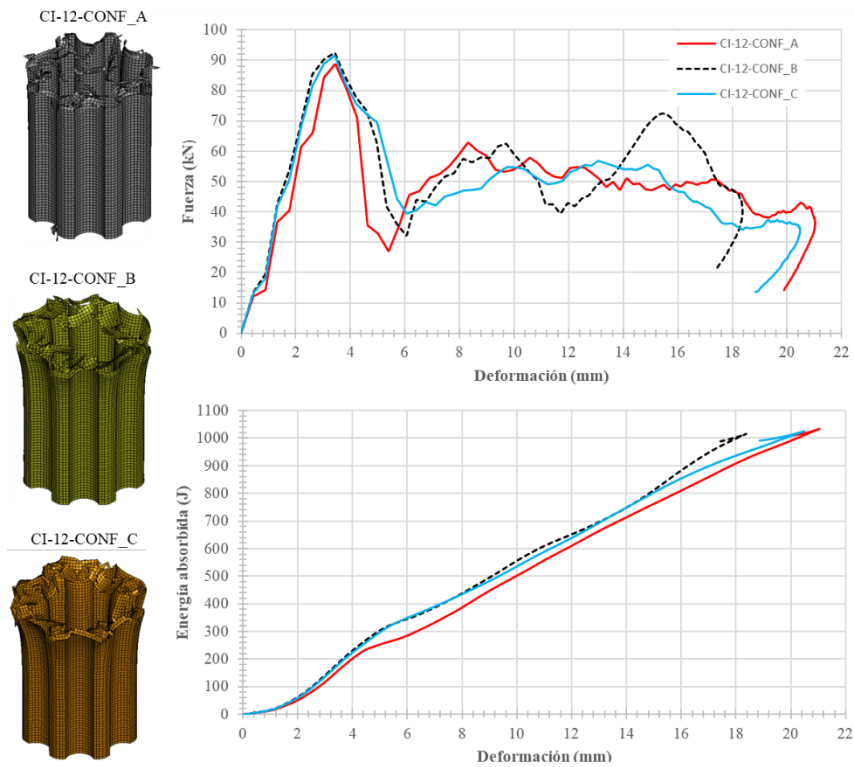


Figura 21-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-12

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

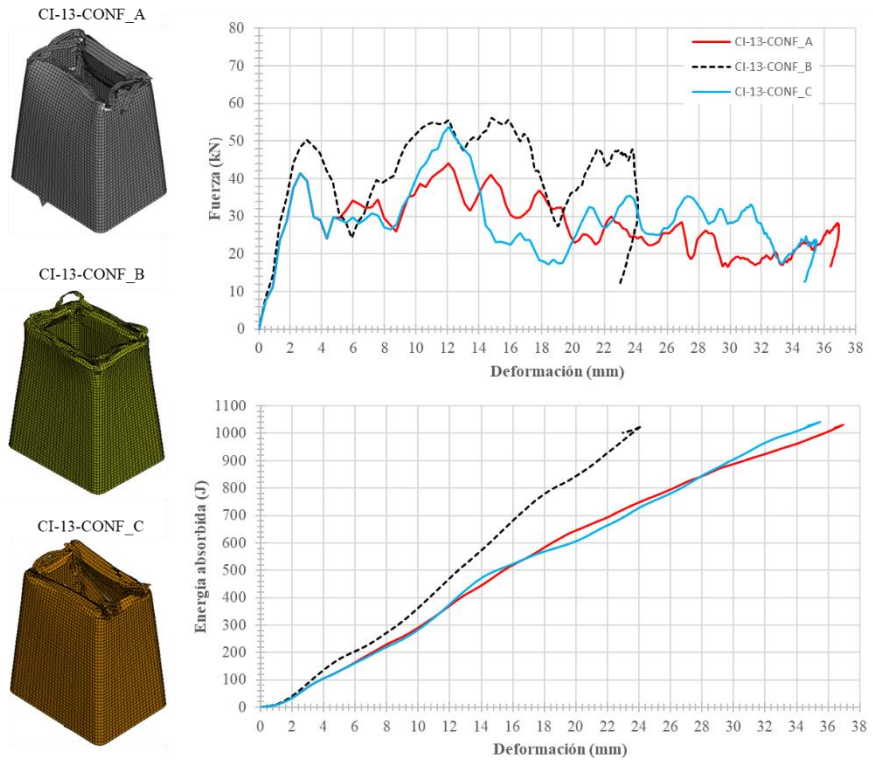


Figura 22-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-13

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

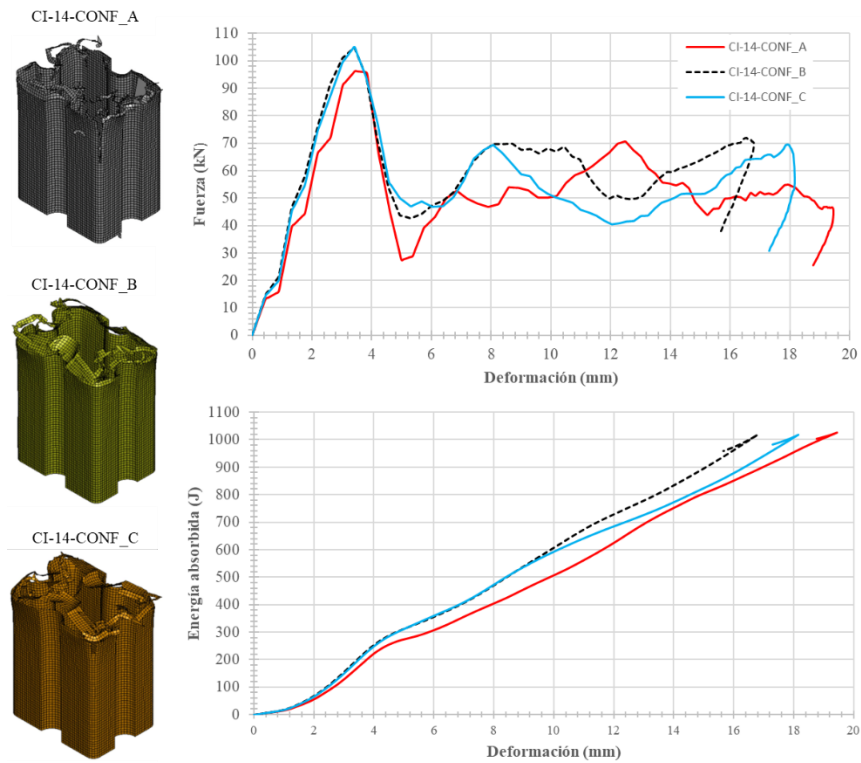


Figura 23-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-14

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

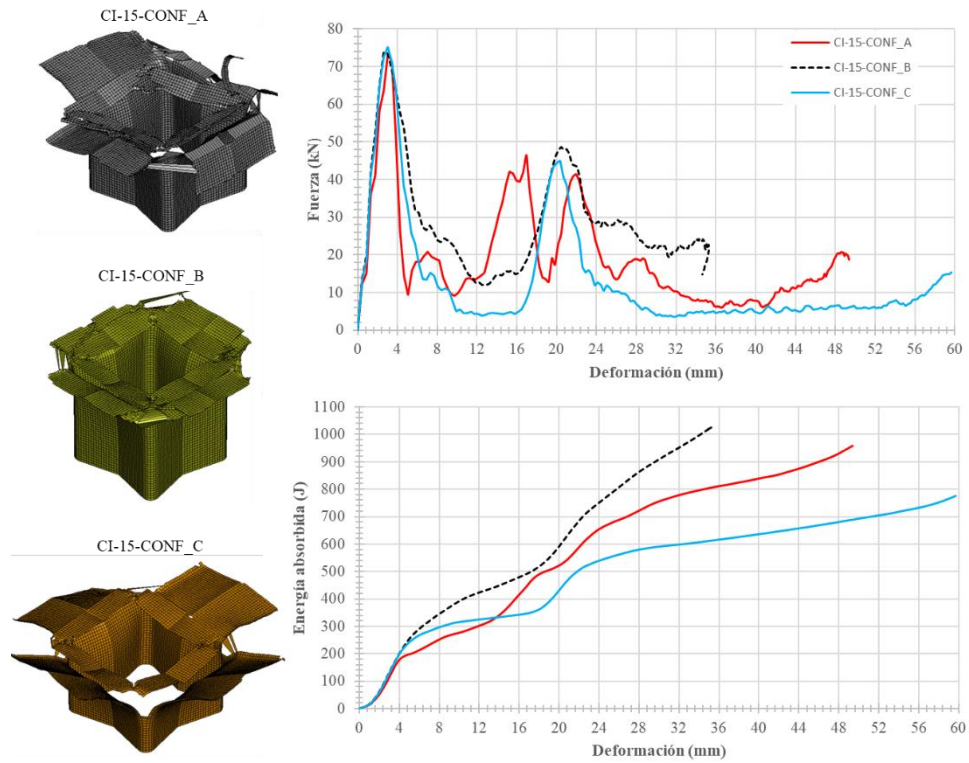


Figura 24-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-15

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

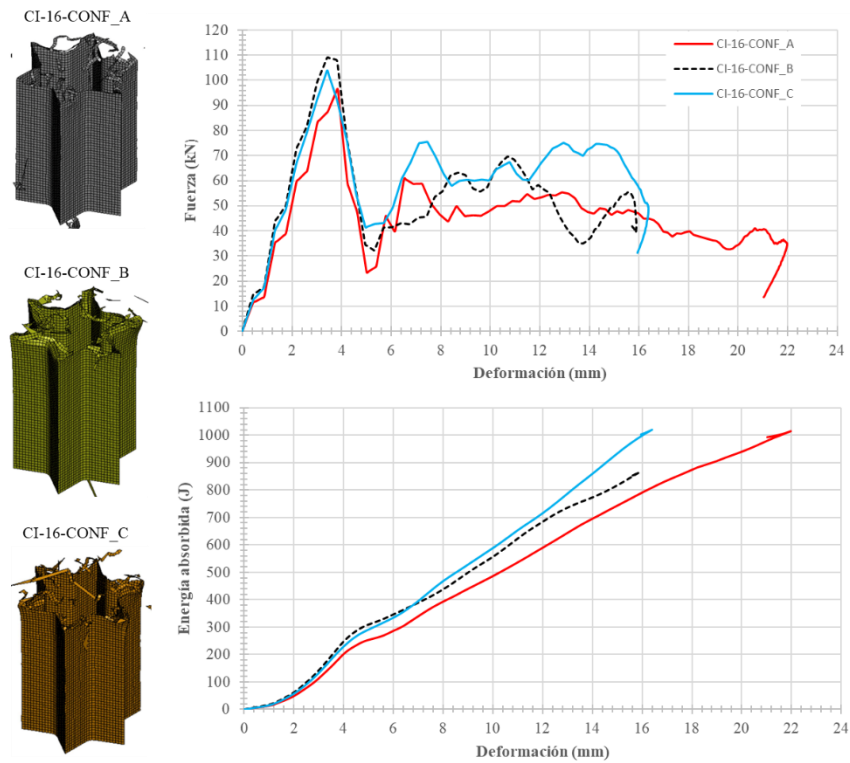


Figura 25-5: Comportamiento de caja de impacto espécimen CI-16

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

5.2.1.2 Influencia de la geometría

A partir de los resultados se puede notar una alta variación en la F_{max} en dependencia de la geometría. Se nota que aquellos diseños en donde los especímenes presentan conicidad, se obtienen valores bajos de la F_{max} en comparación con aquellos especímenes de geometría uniforme. Entre estos especímenes está el *CI-02*, *CI-05*, *CI-08*, *CI-11* y *CI-13*. *CI-01*. Por el contrario, los especímenes *CI-06*, *CI-014* y *CI-16*, son aquellos con los que la F_{max} aumenta drásticamente.

Ya que para cada espécimen se aplicaron 3 configuraciones de materiales diferentes, la variación de resultados en cada grupo no fue muy notoria, habiendo solo una leve variación entre configuraciones. Siendo así la configuración A, aquella con la que se tiene una minimización de la F_{max} ; mientras con la configuración B se obtiene valores más elevados.

En el espécimen *CI-08*, con la configuración de material A se observa el valor más bajo, 40.38 kN, y con la configuración *CI-08* el valor más alto, 113.87 kN. La figura 26-5 muestra la comparación de los distintos especímenes estudiados.

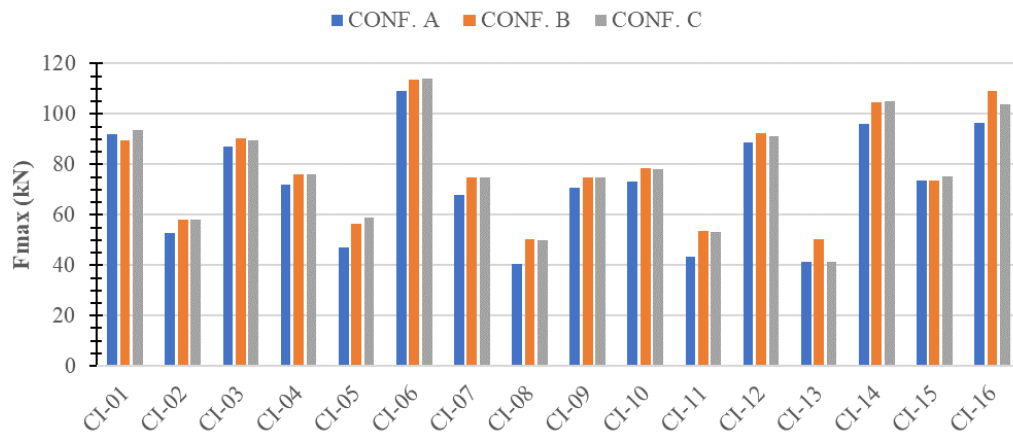


Figura 26-5: Comparación de fuerza inicial máxima por diseño de geometría

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Para el caso de la energía absorbida, se puede notar que no existe un cambio considerable en las diferentes geometrías en general, pero sin embargo se nota que la configuración de material causa cierta minimización en ciertos casos particulares.

Con el espécimen *CI-08* se logra una maximización de 1045.38 J, con la configuración A del material. Mientras que el peor resultado se observa en el espécimen *CI-15* con la configuración C del material, con un valor de 774.62 J, tal como se muestra en la figura 27-5.

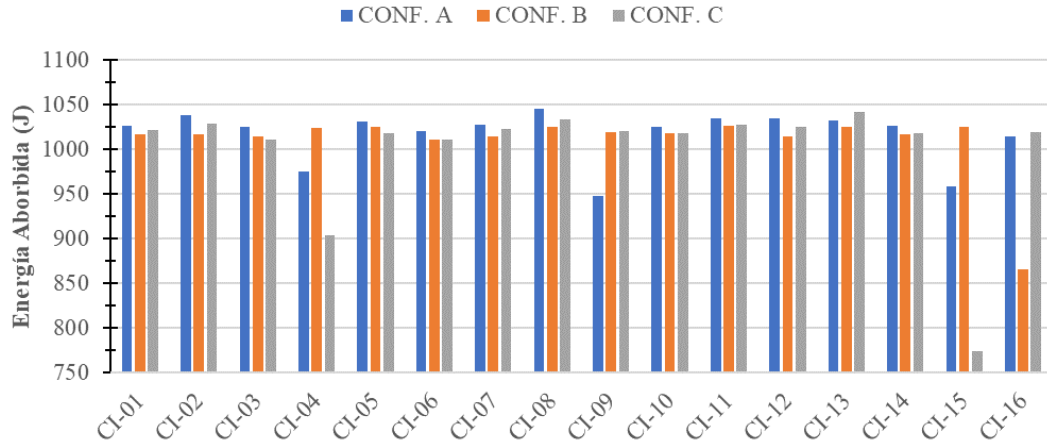


Figura 27-5: Comparación de energía absorbida por diseño de geometría

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Para el criterio *SEA* se observó la misma tendencia al criterio anterior, teniendo un valor alto para el espécimen *CI-08* en la configuración *A*, con 5274.36 J/kg, y un valor bajo para el espécimen *CI-15* en la configuración *C*, con 2623.15 J/kg, tal como se muestra en la figura 28-5.

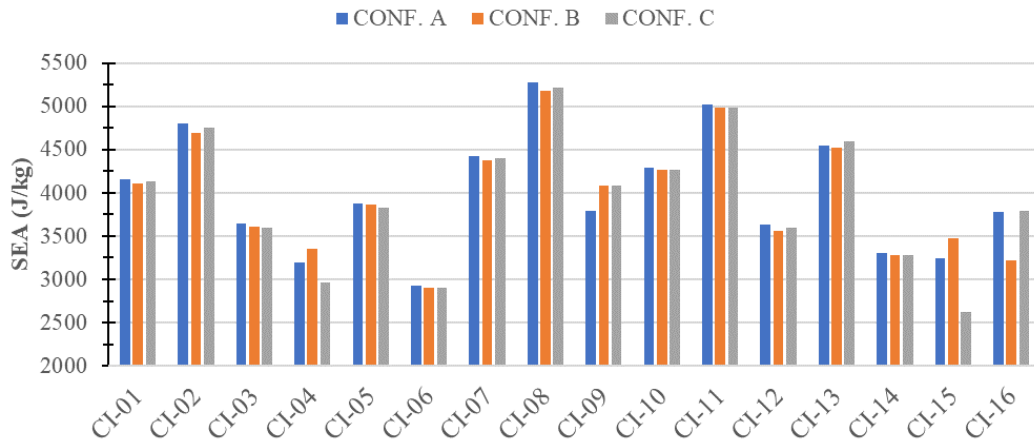


Figura 28-5: Comparación de absorción de energía específica por diseño de geometría

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Por último, para el criterio *CFE* se observa que en aquellos modelos con diseños cónicos se tiene una mejor respuesta, teniendo un valor de 0.85 (85%) para el espécimen *CI-13*, en la configuración *B* de material. Por el contrario, se observa para el espécimen *CI-15* un valor de 0.17 (17%) en la configuración *C*, tal como se muestra en la figura 29-5.

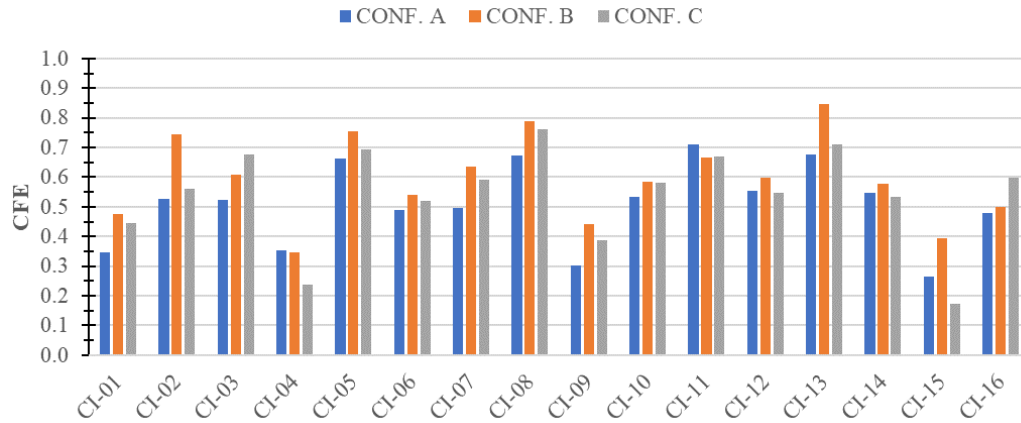


Figura 29-5: Comparación de eficiencia de aplastamiento por diseño de geometría

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

A partir de las tablas 2-5 a 4-5, se reúnen los resultados detallados de cada uno de los criterios analizados.

Tabla 2-5: Resultados de optimización por geometría con configuración A

| ID. | Masa (kg) | F_{max} (kN) | F_{prom} (kN) | ΔL (mm) | CFE | EA (J) | SEA (J/kg) |
|--------------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|------|---------|------------|
| CI-01-CONF_A | 0.2473 | 92.07 | 31.78 | 32.31 | 0.35 | 1026.78 | 4151.97 |
| CI-02-CONF_A | 0.2164 | 52.70 | 27.67 | 37.51 | 0.53 | 1038.12 | 4797.23 |
| CI-03-CONF_A | 0.2814 | 86.99 | 45.44 | 22.56 | 0.52 | 1025.00 | 3642.49 |
| CI-04-CONF_A | 0.3049 | 72.16 | 25.47 | 38.27 | 0.35 | 974.95 | 3197.60 |
| CI-05-CONF_A | 0.2657 | 47.06 | 31.26 | 32.99 | 0.66 | 1031.15 | 3880.87 |
| CI-06-CONF_A | 0.3485 | 109.04 | 53.28 | 19.16 | 0.49 | 1020.77 | 2929.05 |
| CI-07-CONF_A | 0.2323 | 68.02 | 33.68 | 30.53 | 0.50 | 1028.15 | 4425.95 |
| CI-08-CONF_A | 0.1982 | 40.38 | 27.25 | 38.37 | 0.67 | 1045.38 | 5274.36 |
| CI-09-CONF_A | 0.2498 | 70.63 | 21.27 | 44.58 | 0.30 | 948.34 | 3796.41 |
| CI-10-CONF_A | 0.2388 | 73.23 | 39.11 | 26.23 | 0.53 | 1025.77 | 4295.52 |
| CI-11-CONF_A | 0.2062 | 43.57 | 31.02 | 33.35 | 0.71 | 1034.54 | 5017.19 |
| CI-12-CONF_A | 0.285 | 88.64 | 49.19 | 21.04 | 0.55 | 1034.85 | 3631.06 |
| CI-13-CONF_A | 0.2271 | 41.39 | 27.95 | 36.93 | 0.68 | 1032.28 | 4545.50 |
| CI-14-CONF_A | 0.3105 | 96.17 | 52.76 | 19.45 | 0.55 | 1026.08 | 3304.61 |
| CI-15-CONF_A | 0.2953 | 73.44 | 19.42 | 49.36 | 0.26 | 958.62 | 3246.24 |
| CI-16-CONF_A | 0.2689 | 96.40 | 46.20 | 21.97 | 0.48 | 1015.22 | 3775.44 |

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Tabla 3-5: Resultados de optimización por geometría con configuración B

| ID. | Masa (kg) | F _{max} (kN) | F _{prom} (kN) | ΔL (mm) | CFE | EA (J) | SEA (J/kg) |
|--------------|-----------|-----------------------|------------------------|---------|------|---------|------------|
| CI-01-CONF_B | 0.2473 | 89.67 | 42.64 | 23.85 | 0.48 | 1016.96 | 4112.24 |
| CI-02-CONF_B | 0.2164 | 57.89 | 43.04 | 23.62 | 0.74 | 1016.55 | 4697.53 |
| CI-03-CONF_B | 0.2814 | 90.28 | 54.85 | 18.50 | 0.61 | 1014.69 | 3605.85 |
| CI-04-CONF_B | 0.3049 | 75.92 | 26.30 | 38.93 | 0.35 | 1023.90 | 3358.14 |
| CI-05-CONF_B | 0.2657 | 56.57 | 42.63 | 24.07 | 0.75 | 1025.91 | 3861.16 |
| CI-06-CONF_B | 0.3485 | 113.74 | 61.61 | 16.41 | 0.54 | 1011.34 | 2901.98 |
| CI-07-CONF_B | 0.2323 | 74.64 | 47.55 | 21.35 | 0.64 | 1015.25 | 4370.42 |
| CI-08-CONF_B | 0.1982 | 50.49 | 39.74 | 25.81 | 0.79 | 1025.43 | 5173.74 |
| CI-09-CONF_B | 0.2498 | 74.81 | 32.96 | 30.94 | 0.44 | 1019.78 | 4082.39 |
| CI-10-CONF_B | 0.2388 | 78.53 | 46.02 | 22.14 | 0.59 | 1018.60 | 4265.48 |
| CI-11-CONF_B | 0.2062 | 53.63 | 35.79 | 28.69 | 0.67 | 1026.79 | 4979.59 |
| CI-12-CONF_B | 0.285 | 92.36 | 55.20 | 18.37 | 0.60 | 1014.29 | 3558.91 |
| CI-13-CONF_B | 0.2271 | 50.27 | 42.49 | 24.14 | 0.85 | 1025.82 | 4517.06 |
| CI-14-CONF_B | 0.3105 | 104.64 | 60.60 | 16.79 | 0.58 | 1017.22 | 3276.06 |
| CI-15-CONF_B | 0.2953 | 73.79 | 29.08 | 35.27 | 0.39 | 1025.85 | 3473.93 |
| CI-16-CONF_B | 0.2689 | 109.04 | 54.47 | 15.89 | 0.50 | 865.56 | 3218.90 |

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Tabla 4-5: Resultados de optimización por geometría con configuración C

| ID. | Masa (kg) | F _{max} (kN) | F _{prom} (kN) | ΔL (mm) | CEF | EA (J) | SEA (J/kg) |
|--------------|-----------|-----------------------|------------------------|---------|------|---------|------------|
| CI-01-CONF_C | 0.2473 | 93.47 | 41.71 | 24.49 | 0.45 | 1021.49 | 4130.59 |
| CI-02-CONF_C | 0.2164 | 58.20 | 32.65 | 31.53 | 0.56 | 1029.41 | 4756.98 |
| CI-03-CONF_C | 0.2814 | 89.63 | 60.72 | 16.66 | 0.68 | 1011.39 | 3594.13 |
| CI-04-CONF_C | 0.3049 | 76.20 | 17.99 | 50.25 | 0.24 | 904.05 | 2965.06 |
| CI-05-CONF_C | 0.2657 | 58.79 | 40.83 | 24.93 | 0.69 | 1017.98 | 3831.32 |
| CI-06-CONF_C | 0.3485 | 113.87 | 59.11 | 17.11 | 0.52 | 1011.63 | 2902.81 |
| CI-07-CONF_C | 0.2323 | 74.62 | 44.16 | 23.18 | 0.59 | 1023.46 | 4405.78 |
| CI-08-CONF_C | 0.1982 | 49.82 | 38.01 | 27.19 | 0.76 | 1033.34 | 5213.65 |
| CI-09-CONF_C | 0.2498 | 74.78 | 29.06 | 35.12 | 0.39 | 1020.62 | 4085.74 |
| CI-10-CONF_C | 0.2388 | 78.13 | 45.34 | 22.46 | 0.58 | 1018.49 | 4265.03 |
| CI-11-CONF_C | 0.2062 | 53.32 | 35.74 | 28.77 | 0.67 | 1028.31 | 4986.96 |
| CI-12-CONF_C | 0.285 | 91.29 | 50.04 | 20.48 | 0.55 | 1024.98 | 3596.42 |
| CI-13-CONF_C | 0.2271 | 41.38 | 29.38 | 35.49 | 0.71 | 1042.57 | 4590.82 |
| CI-14-CONF_C | 0.3105 | 105.14 | 56.04 | 18.16 | 0.53 | 1017.95 | 3278.41 |
| CI-15-CONF_C | 0.2953 | 75.24 | 12.98 | 59.69 | 0.17 | 774.62 | 2623.15 |
| CI-16-CONF_C | 0.2689 | 103.77 | 62.18 | 16.39 | 0.60 | 1019.00 | 3789.51 |

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

Al hacer una comparación en cuanto al modo de falla de los distintos diseños, se percibe que la acumulación de material en las zonas de impacto, sobre todo para aquellos diseños con conicidad, lo que sugiere una deformación progresiva en la estructura. Algunos diseños mostraron la clara presencia de propagación de grietas a lo largo de las esquinas con la formación de pétalos, siendo notorio en los modelos *CI-04*, *CI-06*, *CI-09*, *CI-12*, y *CI-15*.

En general se observa que la característica de conicidad les proporciona a los diseños de la caja de impacto un mejor desempeño en los criterios evaluados, en relación con los modelos de sección constante, principalmente el modelo *CI-08*, con geometría hexagonal, que se destaca sobre el resto de modelos.

5.2.2 Optimización por aplicación de triggers

Como ya se había mencionad anteriormente, la presencia de *triggers* brinda una mejora en el desempeño de absorción de energía de una caja de impacto, ya que permite que el proceso de deformación inicie de un modo suave y estable, de forma que se reduce los picos de fuerza inicial durante el proceso de aplastamiento, evitando que se produzca una falla catastrófica de la estructura.

La forma y el posicionamiento de los triggers en la caja de impacto, puede influir de cierta manera en el comportamiento de la deformación. Para este trabajo, considerante estas dos particularidades, se establecieron tres grupos, posicionando los triggers al inicio, mitad y a lo largo de la caja de impacto. Teniendo así diferentes formas de triggers para cada grupo.

Para el primer grupo se estableció triggers de tipo tulipán (*CI-T01*), hueco circular (*CI-T02*) y ovalado (*CI-T03*); para el segundo, hueco con forma de diamante (*CI-T04*), circular (*CI-T05*) y ovalado (*CI-T06*); y para el tercero, triggers de tipo muesca de diamante (*CI-T07*), circular (*CI-T08*) y ovalado (*CI-T09*). Los diferentes diseños con sus dimensiones se muestran en las figuras 30-5 a 38-5.

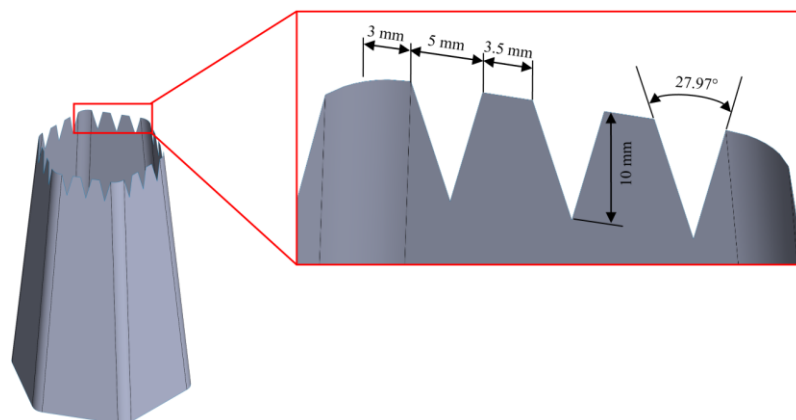


Figura 30-5: Modelo de trigger *CI-T01* (grupo 1)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

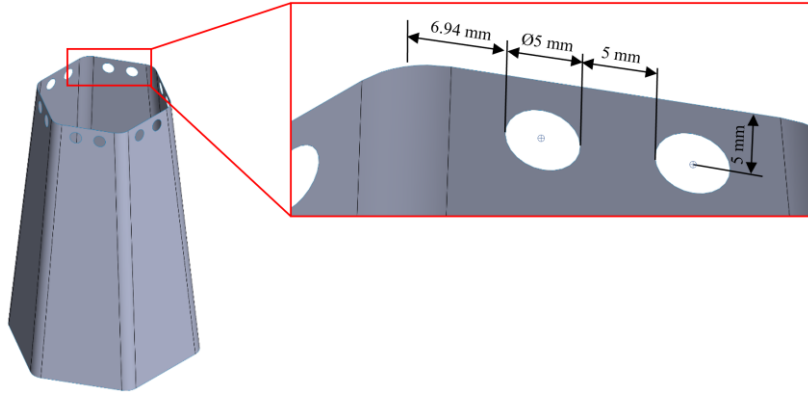


Figura 31-5: Modelo de trigger CI-T02 (grupo 1)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

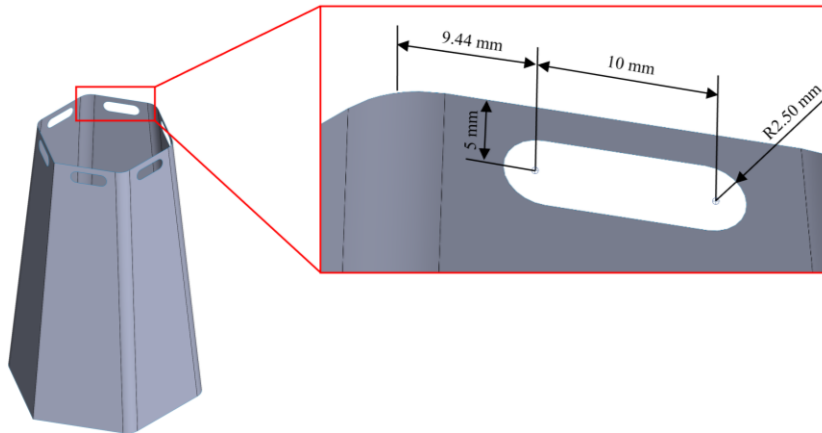


Figura 32-5: Modelo de *trigger* CI-T03 (grupo 1)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

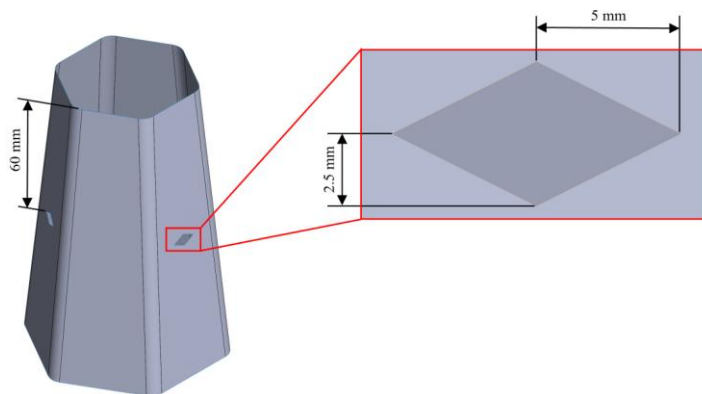


Figura 33-5: Modelo de *trigger* CI-T04 (grupo 2)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

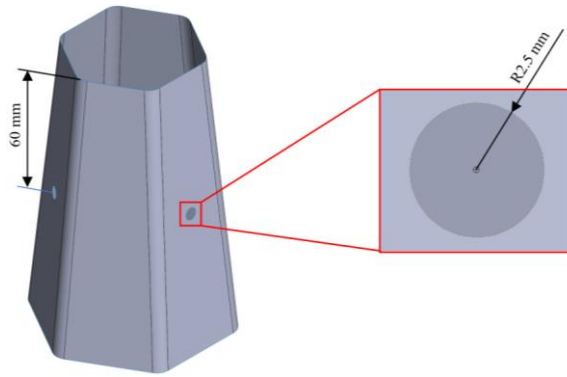


Figura 34-5: Modelo de *trigger* CI-T05 (grupo 2)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

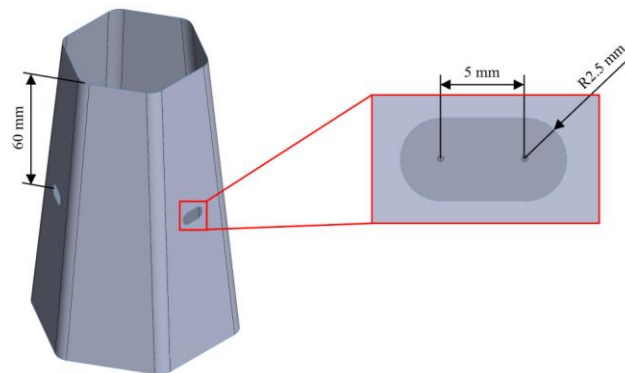


Figura 35-5: Modelo de *trigger* CI-T06 (grupo 2)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

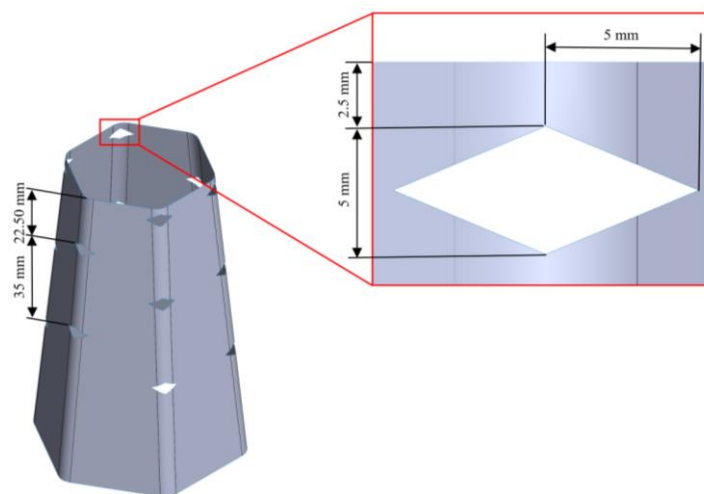


Figura 36-5: Modelo de *trigger* CI-T07 (grupo 3)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

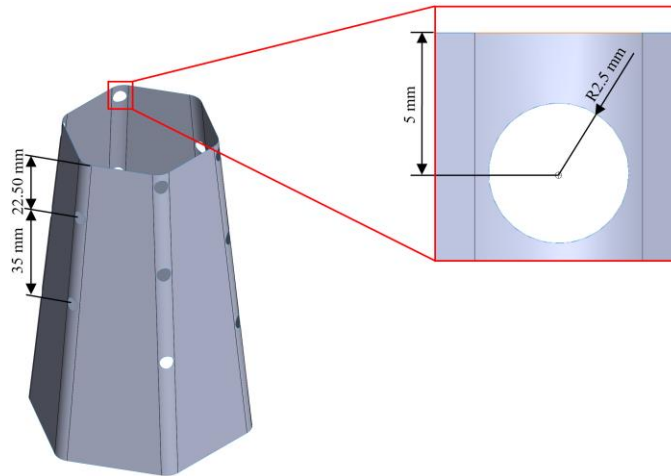


Figura 37-5: Modelo de trigger CI-T08 (grupo 3)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

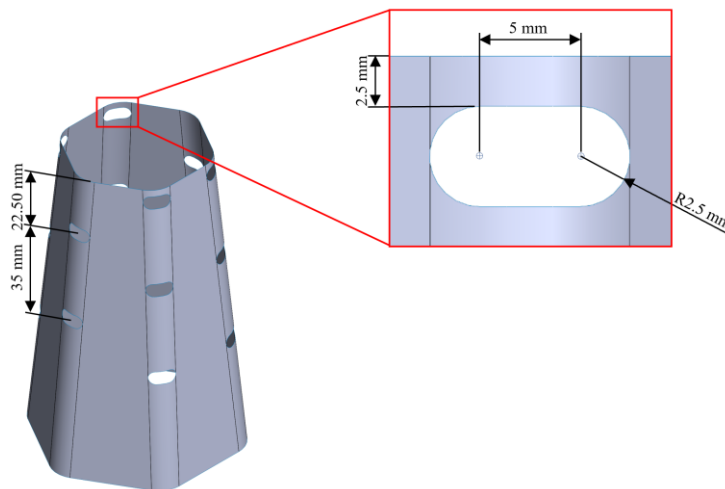


Figura 38-5: Modelo de trigger CI-T08 (grupo 3)

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

5.2.2.1 Evaluación de desempeño de absorción de energía

Los distintos modelos de *triggers* mencionados se implementaron en el modelo *CI-08*, de geometría hexagonal con conicidad, en base a la configuración A del material compuesto laminado, el cual exhibió mejores resultados en cuanto a la optimización por geometría. Los diferentes patrones de deformación observados tras la implementación de los *triggers* se observan en las figuras 39-5 a 41-5.

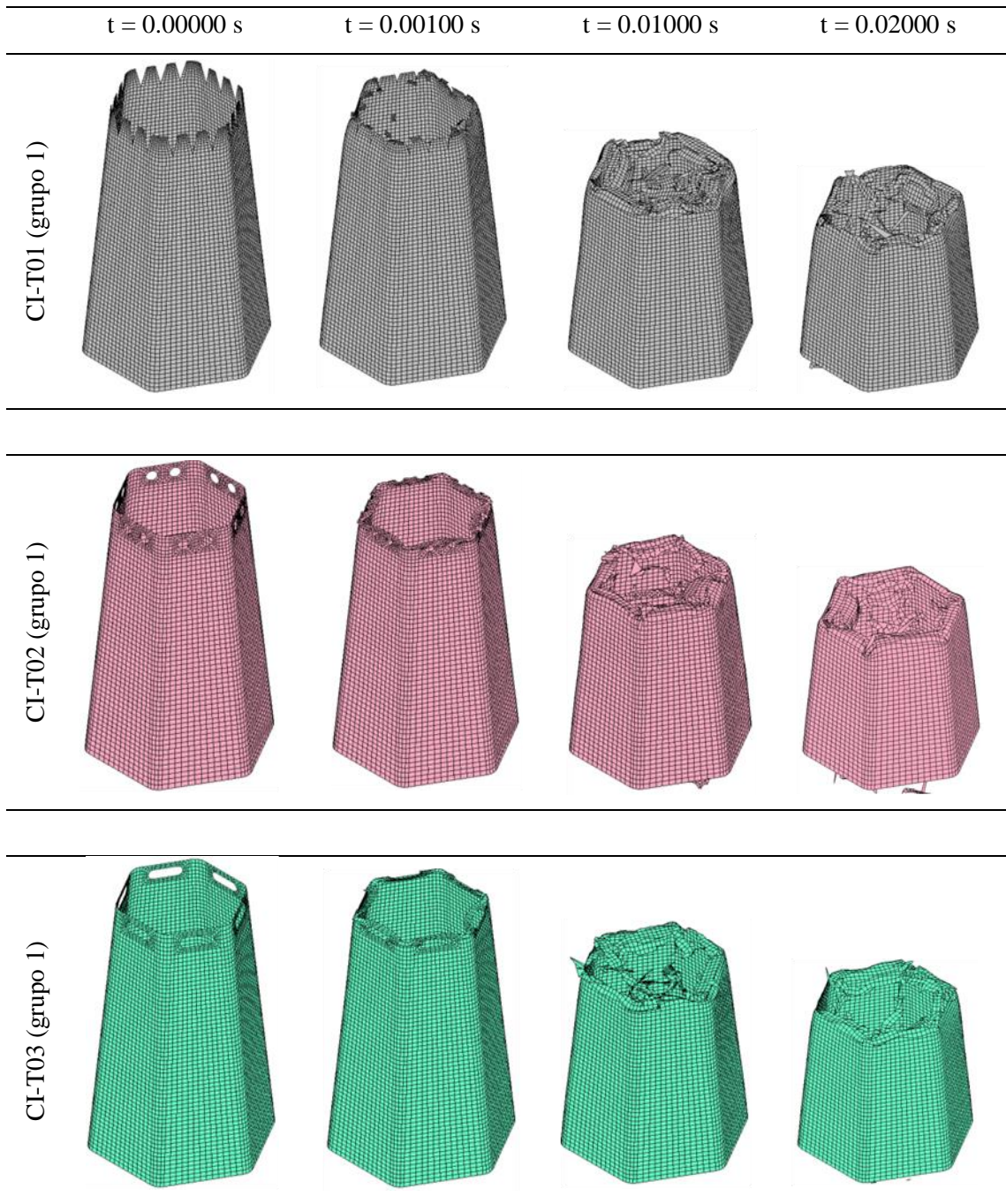


Figura 39-5: Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 1

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

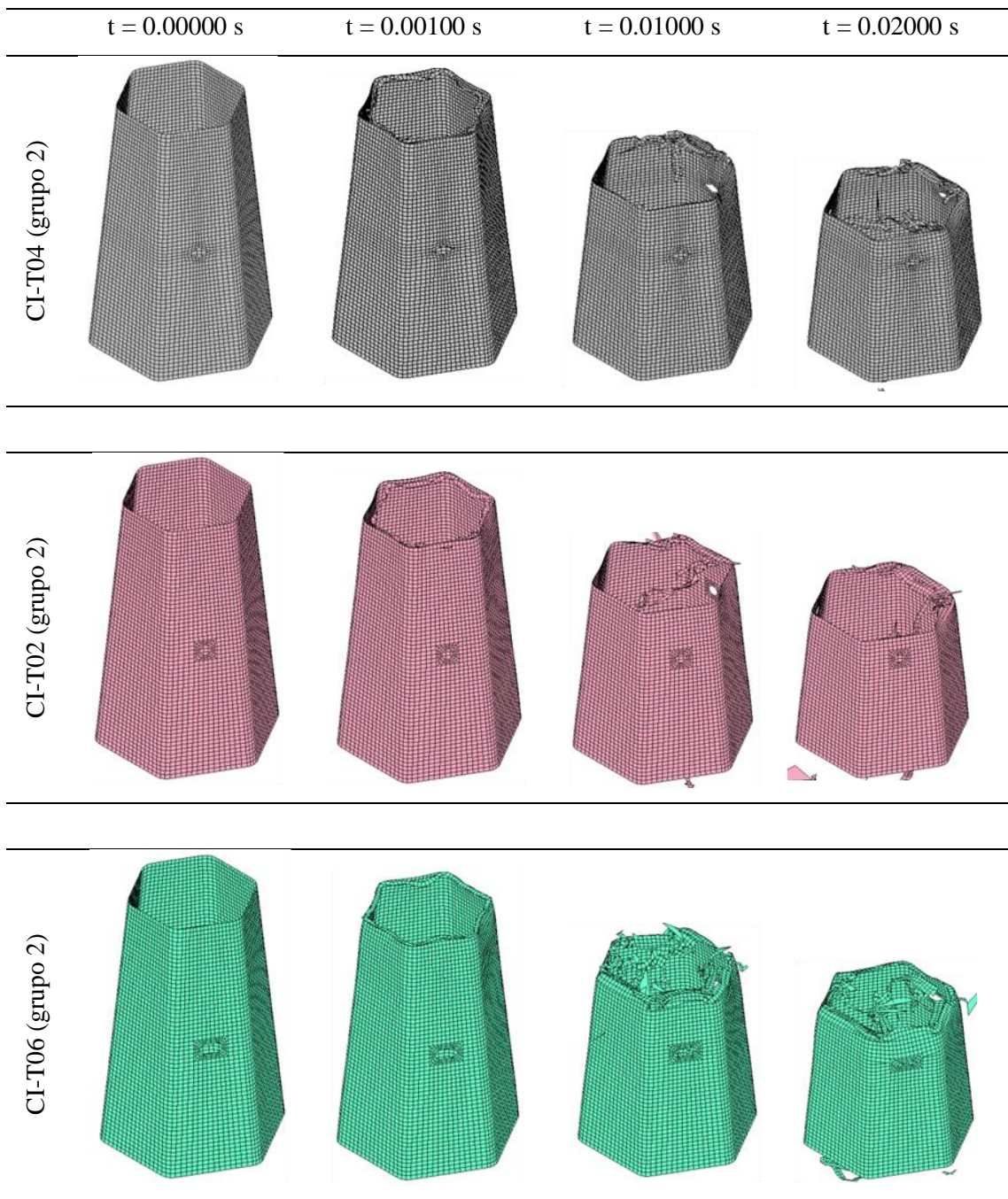


Figura 40-1: Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 2

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

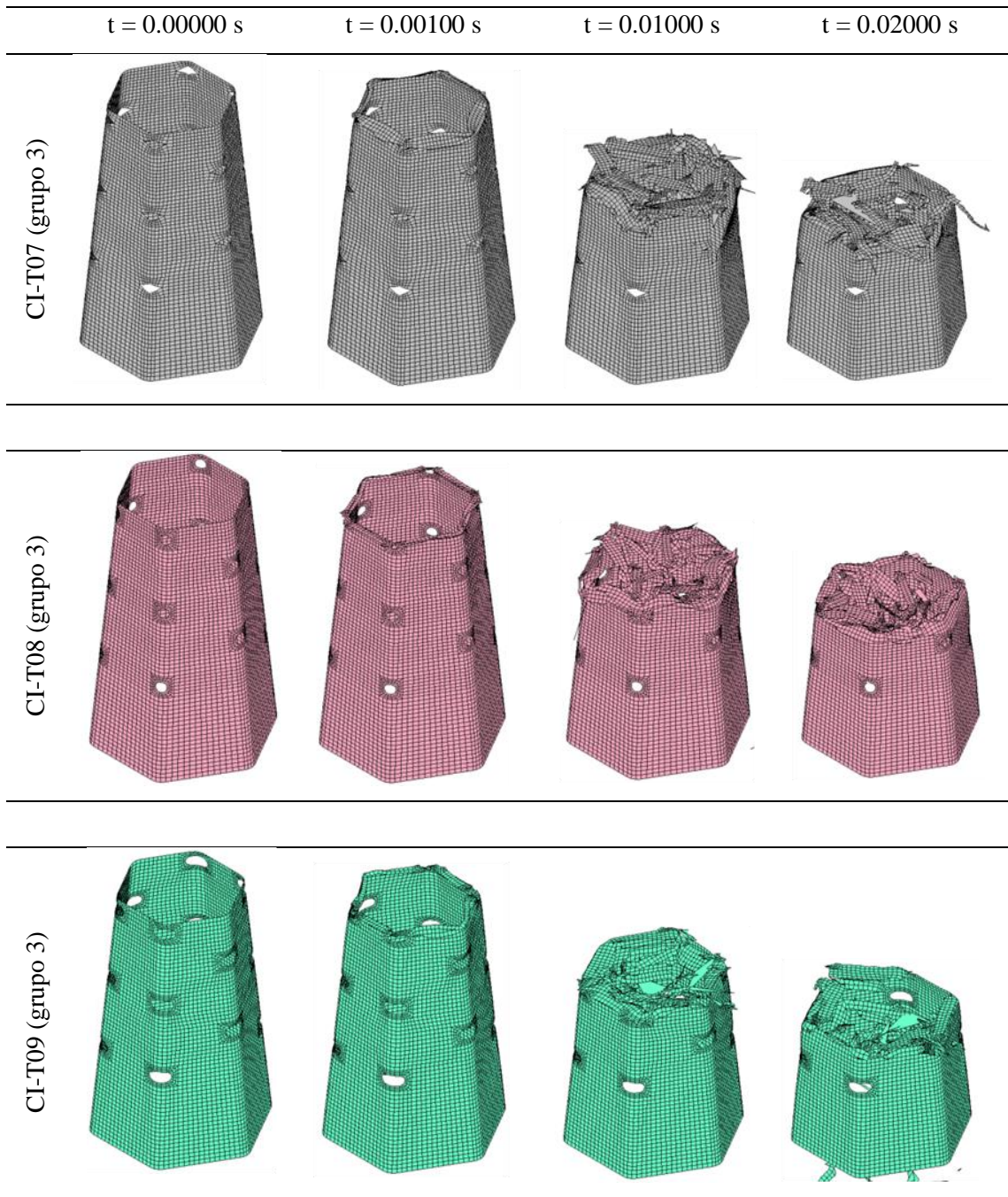


Figura 41-5: Deformación de cajas de impacto con trigger grupo 3

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

5.2.2.2 Influencia de la implementación de triggers

A partir de los resultados generados, se puede observar un variado comportamiento en las curvas de fuerza – deformación generada tras el impacto en cada uno de los distintos modelos de cajas de impacto en relación con los diferentes diseños de triggers.

El modelo *CI-T01*, con un diseño de trigger de tipo tulipán, presenta el valor más bajo de fuerza máxima inicial, con 17.85 kN, en comparación con el modelo *CI-T05*, con trigger de forma de hueco circular, que presenta el valor más alto con 42.20 kN, como se muestra en las figuras 42-5a y 42-5b. Además, con este primer modelo se da una deformación más estable, sin la presencia de cambios bruscos de fuerza a lo largo de la deformación de la estructura.

La implementación de triggers al largo de la carga de impacto de forma alterna (grupo 3), aunque se consigue minimizar la fuerza máxima inicial, no muestra un comportamiento de deformación completamente estable, produciendo picos de fuerza a lo largo de la deformación, como se observa en la figura 42-5c.

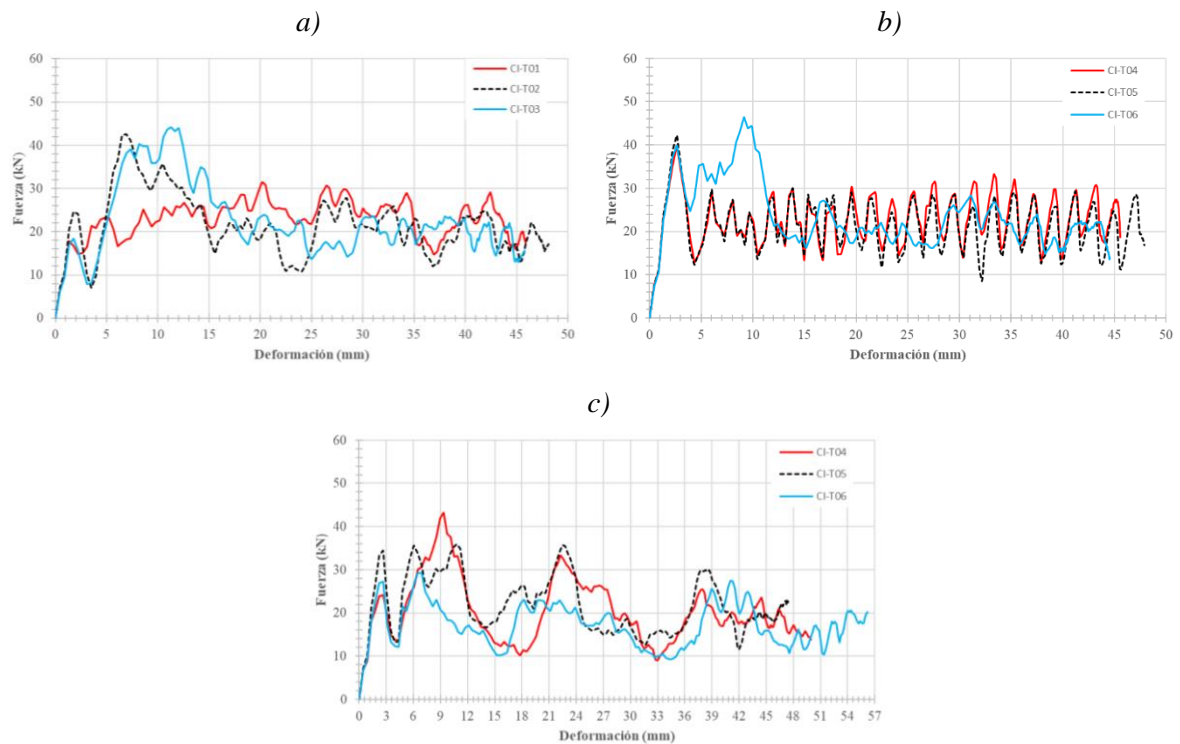


Figura 42-5: Graficas de fuerza-deformación de grupo a) 1, b) 2, y c) 3

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

En cuanto a la energía absorbida, se nota que no existe una variación significativa entre los distintos modelos, maximizando esta principalmente en los modelos *CI-T01* y *CI-T06*, con 1054.70 kN y 1056.15 kN respectivamente. Por otro lado, esta disminuye con el modelo *CI-T09*, a 980.29 kN.

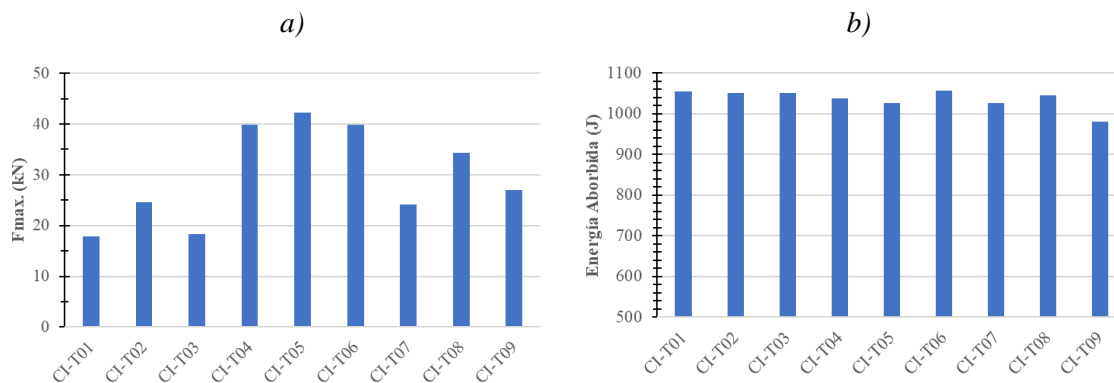
Pero como se indicó anteriormente, en cuanto a energía absorbida se refiere, es mejor basarse en el criterio de absorción de energía específica (*SEA*), donde esta se maximiza con el modelo *CI-T01*. Así mismo, para el criterio de eficiencia de fuerza de aplastamiento (*CFE*), para este modelo se obtiene la mayor eficiencia, con 1.29 (129%), tal como se observa en la tabla 5-5.

Tabla 5-5: Resumen de criterios en la implementación de triggers

| ID. | Masa (kg) | F _{max} (kN) | F _{prom} (kN) | ΔL (mm) | CFE | EA (J) | SEA (J/kg) |
|--------|-----------|-----------------------|------------------------|---------|------|---------|------------|
| CI-T01 | 0.1946 | 17.85 | 22.99 | 45.87 | 1.29 | 1054.70 | 5419.86 |
| CI-T02 | 0.1964 | 24.65 | 21.83 | 48.08 | 0.89 | 1049.63 | 5344.37 |
| CI-T03 | 0.1950 | 18.38 | 22.93 | 45.79 | 1.25 | 1049.79 | 5383.53 |
| CI-T04 | 0.1976 | 39.90 | 22.77 | 45.59 | 0.57 | 1037.85 | 5252.26 |
| CI-T05 | 0.1977 | 42.20 | 21.40 | 47.92 | 0.51 | 1025.39 | 5186.61 |
| CI-T06 | 0.1971 | 39.85 | 23.72 | 44.52 | 0.60 | 1056.15 | 5358.47 |
| CI-T07 | 0.1948 | 24.09 | 20.55 | 49.96 | 0.85 | 1026.45 | 5269.23 |
| CI-T08 | 0.1956 | 34.34 | 21.97 | 47.56 | 0.64 | 1045.03 | 5342.70 |
| CI-T09 | 0.1918 | 27.04 | 17.44 | 56.21 | 0.64 | 980.29 | 5111.00 |

Realizado por: Loor, Edgar, 2023

La figura 43-5 muestra una comparación entre los diferentes criterios desempeño de absorción de energía en las distintas configuraciones con la implementación de triggers.



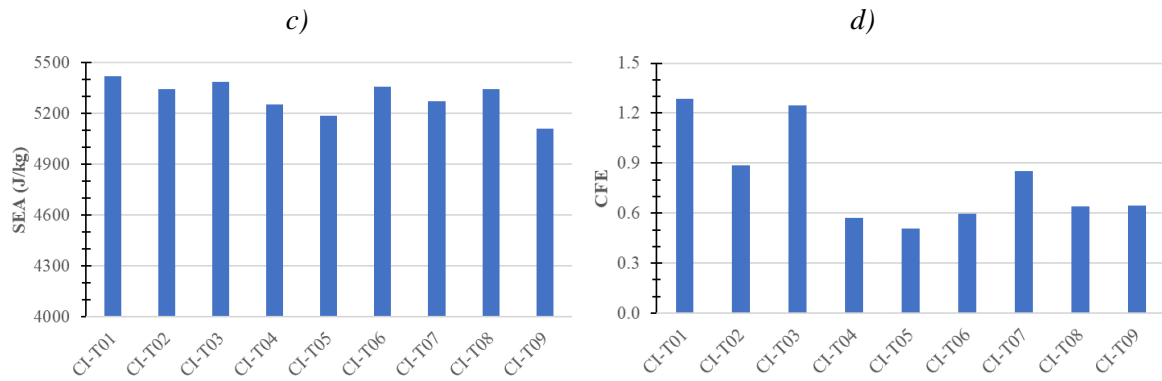


Figura 43-5: Comparación de a) Fuerza inicial máxima, b) energía absorbida, c) absorción de energía específica y d) factor de eficiencia de aplastamiento

Realizado por: Loor, 2023

Como un análisis general, se puede notar que la implementación de triggers cerca de la zona donde se produce el impacto ayuda tanto a minimizar la fuerza máxima inicial generada en proceso, así como a maximizar los criterios de absorción de energía, y que entre más cerca el trigger se encuentra a esta zona de impacto, mejor es la respuesta.

5.3 Análisis de modelo de caja de impacto con mejor desempeño

Basado en los resultados obtenidos del proceso de optimización en cada una de sus etapas, que incluyo la identificación de la configuración de material compuesto con mejor respuesta, y la influencia de la geometría e implementación de triggers en una caja de impacto, mediante la evaluación de los diversos criterios de desempeño en absorción de energía, se observaron importantes resultados que derivó en un modelo de caja de impacto optimizada.

En evaluación de las diferentes configuraciones propuestas de material compuesto laminado en un modelo base (modelo original), con geometría rectangular, las configuraciones de material A (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$), B (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (\pm 45^\circ)]_{2s}$) y C (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (30^\circ/-60^\circ) / (60^\circ/-30^\circ) / (0^\circ/90^\circ)]_s$) exhibieron una mejor respuesta, siendo la primera de estas la que sobresalió en entre ellas con mejores resultados en cada uno de los criterios.

En una segunda etapa se aplicaron las configuraciones mencionadas en una serie de 16 modelos de cajas de impacto, con cambios en sus geometrías de sección. Se observó que la característica de conicidad en algunos modelos mejoró en gran medida la respuesta en los diversos criterios evaluados. El modelo CI-08, con una geometría de sección hexagonal y conicidad a 5° , demostró tener un mejor desempeño en comparación con los demás modelos. De las tres configuraciones de material aplicadas, la configuración A (CONF_A) fue la que favoreció a la obtención de dicho desempeño.

Como etapa final, se evaluaron nueve diferentes configuraciones de *triggers*, evaluando así la importancia del posicionamiento y forma de estos. Agrupando estas configuraciones en tres grupos en cuanto al posicionamiento, *triggers* con formas de tipo tulipán, hueco circular, y ovalado se colocaron al inicio de la estructura; *triggers* de tipo hueco en diamante, circular y ovalado, en la mitad; y por último, de tipo muesca en diamante, circular y ovalado a lo largo de la caja de impacto de forma alternada se implementaron.

La implementación de aquellas configuraciones de *triggers* al inicio de la caja de impacto mostraron tener una mejor respuesta que aquellos posicionado en el centro o a lo largo de la estructura, ya que esto facilitó la transferencia de carga inicial de mejor manera, consiguiendo así una deformación más estable. De las tres configuraciones de *trigger* al inicio de la caja de impacto, el modelo *CI-T01*, de tipo tulipán, fue la que mostro un mejor desempeño.

La figura 44-5 muestra un esquema del modelo final optimizado posterior a las etapas mencionadas.

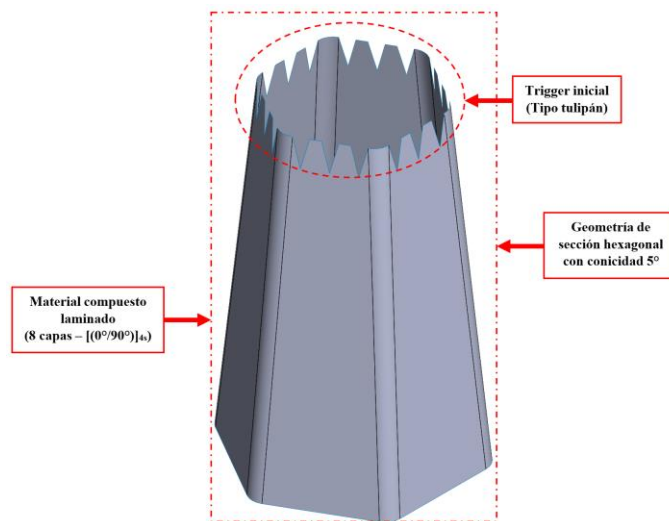


Figura 44-5: Esquema de modelo de caja de impacto optimizado

Realizado por: Loor, 2023

5.4 Implementación de caja de impacto optimizada en barra de parachoques

El modelo de la caja de impacto optimizada, en base a su geometría y la implementación de *trigger*, se incorpora en un sistema de barra de parachoques o impacto, y así se evaluar su comportamiento bajo condiciones de una colisión real por simulación numérica.

El modelo de barra de parachoques se basa en un diseño de un vehículo de pasajero liviano de marca comercial . Las características y dimensiones de la estructura en cuestión se detallan en la figura 45-5.

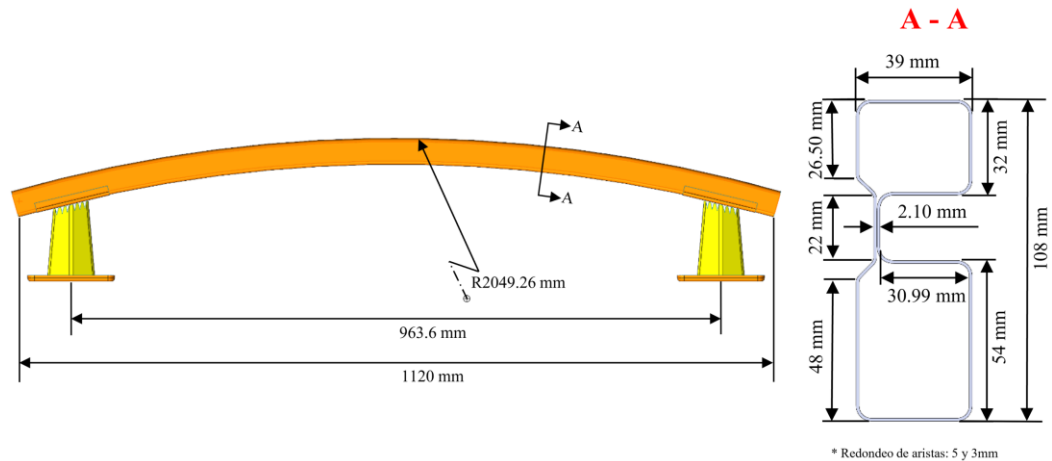


Figura 45-5: Sistema de barra de parachoques con caja de impacto optimizada

Realizado por: Loor, 2023

La simulación se realiza utilizando estándar internacional *UN ECE R42* como referencia, destinada a la evaluación de sistemas y componentes de seguridad pasiva, como el sistema de parachoques, de vehículos de pasajeros livianos ante impacto a bajas velocidades. Aunque dicho estándar no evalúa específicamente el comportamiento de las cajas de impacto, se lo utiliza con el único propósito de establecer las principales condiciones de prueba que se detallan en la misma.

Cabe mencionar que existen otros estándares, como en capítulos anteriores se mencionó, destinados a evaluar estos tipos de sistemas y componentes, que principalmente se diferencian unos de otros por las velocidades e impactadores utilizados en las pruebas.

Para efectos de comparación, se realiza la simulación del mismo modelo incorporando las cajas de impacto originales en acero, aplicando las mismas condiciones que las establecidas para el modelo optimizado

5.4.1 Condiciones para la simulación numérica

El sistema de parachoques es impactado longitudinalmente por un impactador (A) a una velocidad de 4 km/h. El impactador se encuentra posicionado con un traslape del 40% en relación con el punto central del modelo de la barra, con el fin de que impacte directamente en la zona donde se encuentra ubicada una de las cajas de impacto, y así estudiar el comportamiento de este, que es comúnmente como se producen las colisiones en eventos reales. El impactador tiene una masa añadida de 1000 kg, que simula la masa de un vehículo liviano de pasajeros. Las dimensiones del impactador están basados en según la normativa en cuestión (UNECE, 2021).

Como punto de simplificación en la simulación, los platos de apoyo inferior de las cajas de impacto se establecen como elementos no deformables, y se restringe su movimiento traslacional y rotacional

en todas las direcciones. La interacción y unión entre los diferentes componentes del sistema se representó por medio de contactos y relaciones de restricción.

Ya que la unión de dos tipos de materiales diferentes se debe realizar por un proceso específico, como la utilización de pegamento estructural por ejemplo, la unión entre las cajas de impacto ($E1/E2$), siendo esta de un material compuesto polimérico, y los otros componentes en acero, se utilizaron dos tipos de uniones.

El extremo inferior de las cajas de impacto está unidas a los plastos de apoyo inferiores ($D1/D2$) por la restricción de un conjunto de nodos (*Constraint_Extra_Node_Set*), lo que evita la dislocación de la base durante la simulación. Para el extremo superior se utilizó un contacto de tipo pegado (*Contact_Tied_Nodes_To_Surface_Offset*) para unirse con los platos de apoyo superior ($C1/C2$), lo que ayuda a la transmisión de cargas y deformaciones a las cajas de impacto. Del mismo modo, para la representación de la unión por soldadura de los platos de apoyo superior y la barra de parachoques (B), se utilizó el mismo tipo de contacto pegado. La figura 46-3 muestra un esquema de cada una de las condiciones establecidas para la simulación numérica.

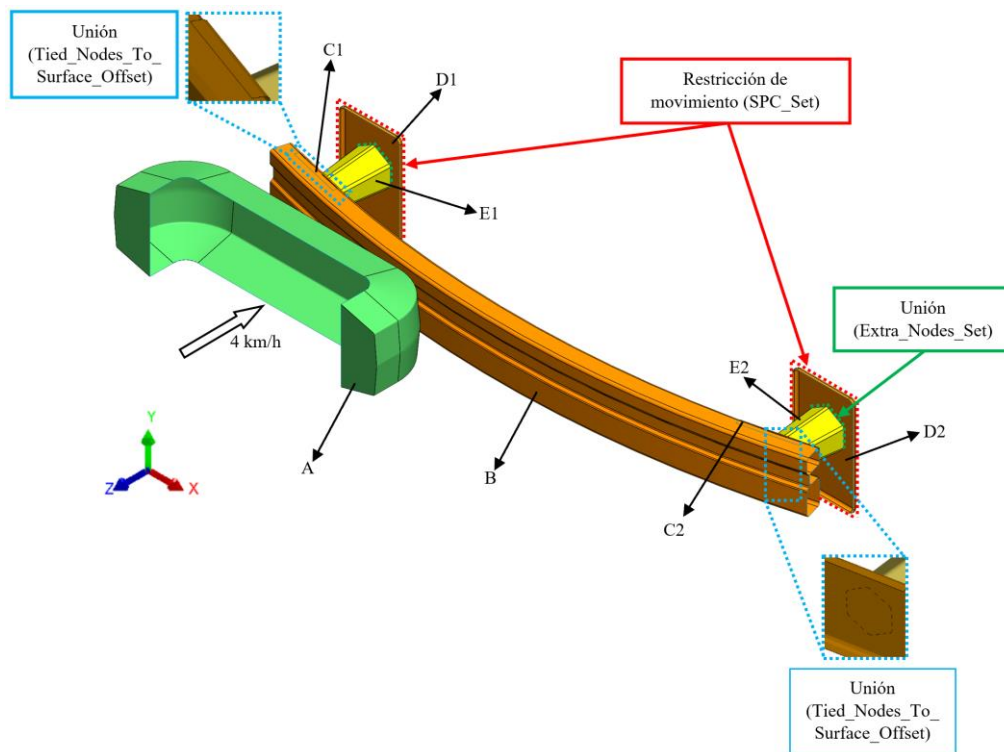


Figura 46-3: Condiciones para simulación numérica del sistema de parachoques

Realizado por: Loor, 2023

Todo el modelo está mallado con elementos de 4 nodos de tipo *shell* con *Belytschko-Tsay*, constando de 34672 elementos y 35774 nodos.

5.4.2 Materiales

Lo elementos que conforman un sistema de parachoques, como barra, platos de soporte y cajas de impacto, son fabricados comúnmente en aceros suaves (*Mild Steels*).

Para la barra del parachoques y platos de soporte superior se utilizó un acero con deformación elastoplástica (*Mat_24*). Mientras que para el impactador y platos de soporte inferior se aplicó un material con comportamiento rígido indeformable (*Mat_20*). Las curvas verdaderas de esfuerzo-deformación de los aceros se detallan en el anexo B de este trabajo (NSTSA, s.f.). Para las cajas de impacto optimizadas se aplicó el material compuesto laminado a base de fibra de vidrio y resina epóxica en la configuración material A ($8 \text{ capas} - [(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$) antes mencionada. La tabla 6-5 detalla los parámetros de los diferentes materiales utilizados en la simulación numérica

Tabla 6-5: Parámetros de materiales

| ID. | Elemento | Material (modelo) | Propiedades de material | | | |
|-------|--------------------------|-----------------------------|---|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| | | | Densidad (kg/mm ³) | Módulo de Young (GPa) | Esfuerzo de fluencia (MPa) | Coefficiente de Poisson |
| A | Impactador | Acero (MAT_20) | 7830 | 200 | - | 0.3 |
| B | Barra de parachoques | Acero (MAT_24) | 7830 | 200 | 800 | 0.3 |
| C1/C2 | Platos de apoyo superior | Acero (MAT_24) | 7830 | 200 | 800 | 0.3 |
| D1/D2 | Platos de apoyo inferior | Acero (MAT_20) | 7830 | 200 | - | 0.3 |
| E1/E2 | Cajas de impacto | Acero (MAT_24) | 7830 | 200 | 380 | 0.3 |
| | | Material compuesto (MAT_54) | * Ver características del material compuesto laminado <i>CONF_A</i> | | | |

Realizado por: Loor, 2023

Los espesores de material de la barra del parachoques y platos de soporte inferior son de 1 mm; y de 0.5 mm para los platos de soporte superior. Para el modelo base de las cajas de impacto en acero, sus espesores son de 1 mm, mientras que para el modelo optimizado en material compuesto laminado, de acuerdo con la configuración seleccionada, es de 4 mm.

5.4.3 Comparación de resultados

La aplicación de material compuesto laminado en los modelos de caja de impacto optimizados reduce la masa del sistema de barra de parachoques en 3.15% (4.003 kg), en comparación al sistema con cajas de impacto en acero (4.133 kg).

Analizando el comportamiento de una de las cajas de impacto que se encuentra posicionado cerca de la zona de colisión, se puede notar que existe una disminución del 52.73% de la fuerza máxima inicial (F_{max}) para el modelo optimizado, con un valor de 10.64 kN, en comparación con el sistema original, con la que se genera una fuerza de 22.51 kN, como se observa en la figura 47-5.

En cuanto a los criterios de energía, para el sistema con modelo optimizado se tiene valores de 148.91 J para la energía absorbida (*EA*) y 808.40 J/kg para la absorción de energía específica (*SEA*), representando una maximización del 7.23% y 31.32% respectivamente, en comparación a los valores de obtenidos para el modelo original, 138.14 J y 555.23 J/kg. La tabla 7-5 muestra los resultados comparativos mencionados.

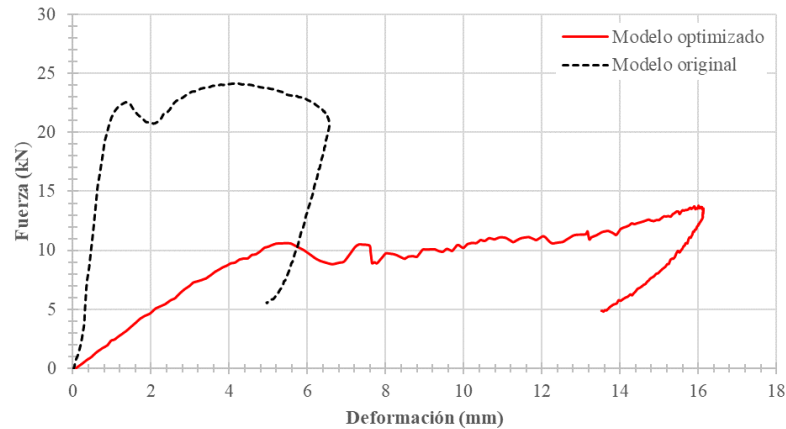


Figura 47-5: Comportamiento de modelo de optimizado y original

Realizado por: Loor, 2023

Tabla 7-5: Comparación de modelos de barra de parachoques

| Modelo | | Masa (kg) | F_{max} (kN) | EA (J) | SEA (J/kg) | ΔL (mm) | T_c (s) |
|------------|----------------------|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Original | Barra de parachoques | 3.044 | 4.133 | 22.51 | 138.14 | 6.57 | 0.0585 |
| | Platos de apoyo | 0.591 | | | | | |
| | Cajas de impacto | 0.498 | | | | | |
| Optimizado | Barra de parachoques | 3.044 | 4.003 (-3.15%) | 10.64 (-52.73%) | 148.91 (+7.23%) | 16.14 | 0.0779 |
| | Platos de apoyo | 0.591 | | | | | |
| | Cajas de impacto | 0.368 | | | | | |

Realizado por: Loor, 2023

Otro punto para notar es que en el sistema de parachoques con modelo optimizado, el periodo de tiempo de contacto (T_c) con el impactador es mayor en comparación con el del sistema original, con valores de 0.0779 s y 0.0585 s respectivamente. Esto se traduce en que al tener un tiempo mayor de contacto, existe la posibilidad de mejorar las características de amortiguación del impacto, lo que se ve reflejado en los valores de carga o fuerza inicial generadas, y por lo tanto la reducción del riesgo de transmisión de la carga al resto del vehículo y a los ocupantes del mismo. Esto también se ve reforzado con el hecho de que existe una mayor longitud deformada (ΔL) para el modelo optimizado (16.14 mm) en comparación del modelo original en acero (6.57 mm), lo que en cierta medida es gracias a la implementación del *trigger*, que es la zona donde se produce la fractura de la caja de

impacto en material compuesto. Para la caja de impacto original, en acero, se observa que en esta se produce un modo de falla por pandeo local cerca del plato de apoyo inferior, lo que deriva en el pico fuerza máxima generado al principio de la colisión para este modelo. La figura 48-5 muestra un esquema visual del proceso de deformación generada en la caja de impactos dentro de la zona de colisión a lo largo de la simulación.

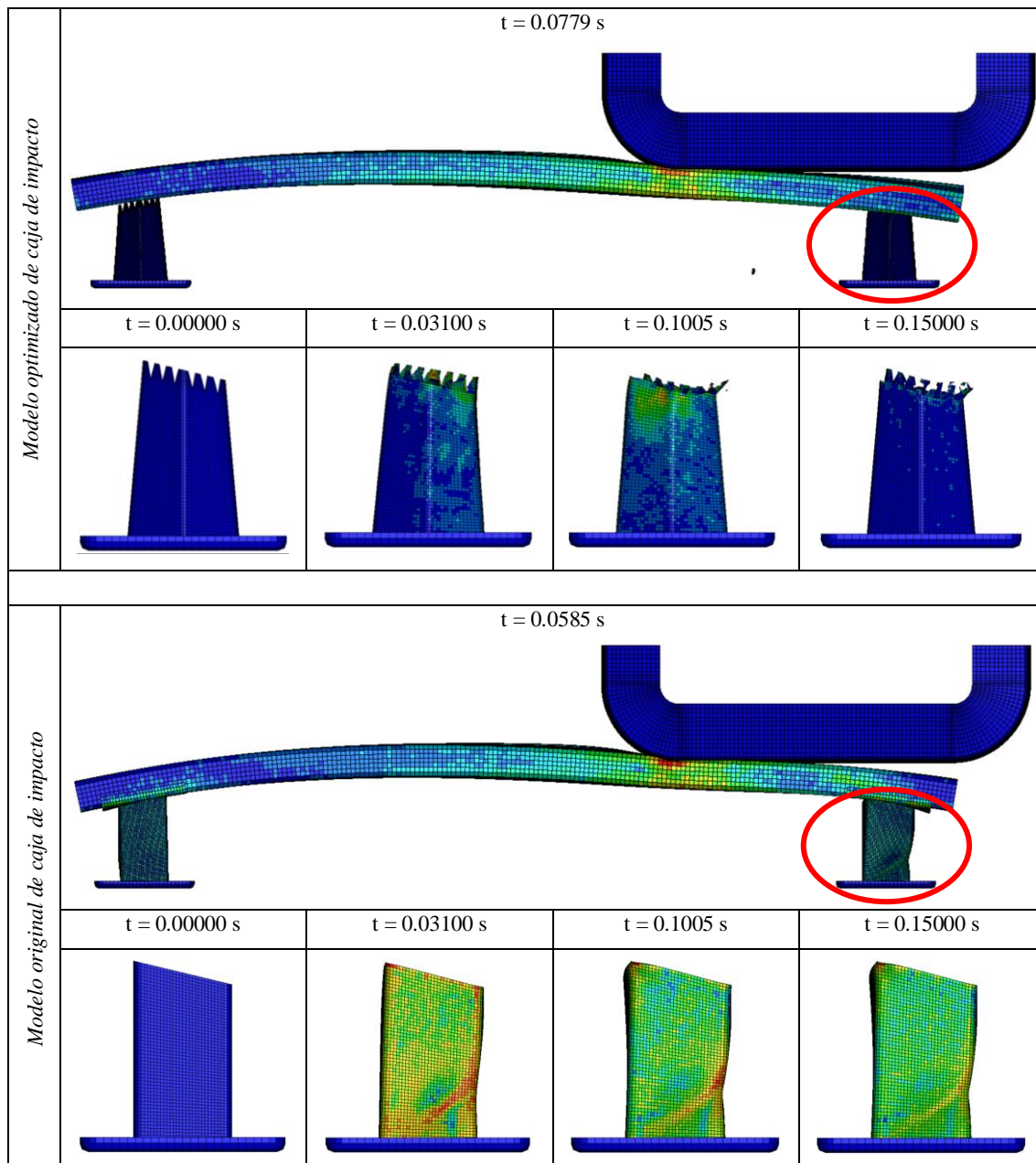


Figura 48-5: Deformación de cajas de impacto en sistemas de barra de parachoques

Realizado por: Loor, 2023

5.5 Verificación de resultados simulados

Con el fin de dar fiabilidad y precisión a los resultados a los resultados obtenidos durante la simulación numérica, se hace uso del método de análisis de energías, para así comprobar que cada una de las condiciones y parámetros establecidos en la simulación no afectan directamente los resultados.

Dentro del principio de conservación de energía la cinética generada durante el impacto debe disminuir producto de la reducción de la velocidad del impactador, y la energía interna aumentar producto del proceso de deformación a la que los elementos son sometidos. Es importante mantener siempre una relación de energía con un valor cercano a la unidad, lo que indicando una transferencia de energía casi perfecta (Amid et al., 2015, p. 713).

Debido a que se debe evitar las deformaciones no físicas con energía cero durante la simulación, también es de suma importancia confirmar que esta energía no física, o energía de Hourglass, como normalmente es conocida, sea lo más baja posible, y que no exceda el 10% de la energía interna como regla general (Wang et al., 2018;LS-DYNA Support, s.f.). La relación de la ecuación 56 muestra la relación entre energía *Hourglass* e interna.

$$HG = \frac{\text{Energía Hourglass}}{\text{Energía Interna}} * 100\% \quad [56]$$

En base a la figura 49-5 se puede notar un valor cercano a la unidad por parte de la relación de energía (1.00006), así mismo, aplicando la ecuación 56 se tiene un valor de la relación de energía *Hourglass* (*HG*) del 0.0015%, estando dentro del rango deseado para la validación de la simulación.

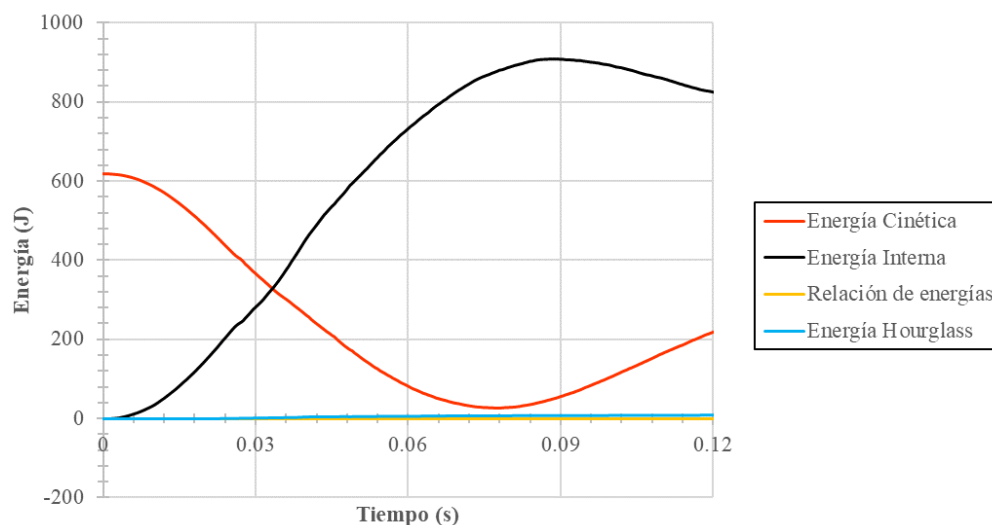


Figura 49-5: Relación de energía Hourglass y energía interna

Realizado por: Loor, 2023

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo y análisis de resultados del presente trabajo, se pudieron generar las siguientes conclusiones:

- Mediante la síntesis y posterior caracterización de un material laminado a base de fibra de vidrio de tejido plano bidireccional de grado *E* utilizado como refuerzo, y resina epóxica con matriz, se consiguió obtener las principales propiedades mecánicas del mismo, y se pudo aplicar en diseños de cajas de impactos de vehículos, mediante la utilización de herramientas de simulación numérica, modelando de una forma adecuada el material estudiado.
- Con la revisión de la literatura científica relacionado con el tema en cuestión, se determinó que existe una relación directa en la cantidad porcentual de refuerzo y matriz con el desempeño posterior del material compuesto. Considerando que un material compuesto representa un 100%, dada la unión entre el refuerzo y la matriz, es recomendable que el porcentaje de refuerzo, siempre que se utilice fibras como tal, debe mantenerse en un rango dentro del 20% al 70%, de acuerdo a la arquitectura de la fibra utilizada, ya que más allá de este punto puede significar que la cantidad de matriz a usar será insuficiente para para formar una correcta unión o interfaz entre ambos componentes, y provocar una falla temprana del material. Un valor porcentual bajo de refuerzo también provoca un declive en las propiedades del material. Si se utiliza fibra con una configuración de arquitectura bidireccional, es conveniente usar entre un 40% y 45% en volumen. Es así que para este trabajo se usó un 40% y 60% para la proporción volumétrica del refuerzo y matriz respectivamente.
- Para la obtención de un material compuesto laminado es necesario seguir un correcto proceso de síntesis, ya que con esto se evita obtener un material defectuoso. Mediante el conformado por estratificación manual se logró la obtención de un material con buenas características de acabado. Aunque el proceso conlleva un mayor tiempo en comparación con otros procesos, este es ideal cuando se maneja el conformado de material o elementos de bajo volumen y un minucioso acabado. La utilización de un agente desmoldante, como lo fue la cera, facilitó el proceso de desmoldado; así mismo, la utilización de herramientas de compactación ayudo a obtener una correcta uniformidad del material. Para un correcto conformado del material, este se dejó expuesto al aire libre por al menos cinco días, lo que aseguro un correcto curado del mismo. Para el corte de las probetas utilizada en la caracterización del material, se utilizó una sierra de arco de mano, esto debido al hecho que la utilización de otras herramientas eléctricas de corte provoca daños en la superficie del material, como quemaduras y delaminación.

- Las diferentes configuraciones de material compuesto fueron sometidas a ensayos de laboratorio por tracción para su respectiva caracterización, donde a partir de estos se observó que aquellos especímenes con pocas capas y una tendencia de orientación de fibra en la dirección longitudinal a la aplicación de cargas presentaron mejores propiedades. A partir de los ensayos se puede notar que de las ocho configuraciones propuestas, que comprendió configuraciones con laminados a 8 y 12 capas con diferentes ángulos de orientación (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$), aquella que constaba de 8 capas y orientación de fibra a $0^\circ/90^\circ$ presentó mejores resultados en relación con las demás configuraciones.

Mediante simulación numérica se logró modelar el material compuesto laminado tomando en cuenta los factores antes mencionados del material, y se obtuvo una similitud con los resultados experimentales con error por debajo del 10%, con que verifica que es factible modelar este tipo de material para su aplicación en otros estudios por simulación numérica.

- Con la aplicación de la metodología de diseño de experimentos (DOE) se pudo analizar el nivel de influencia de los diferentes factores intervinientes en la configuración del material compuesto en el comportamiento del mismo.

A partir del análisis de los valores de la distribución F_0 y el valor de probabilidad p , posterior a la construcción de la tabla de análisis de varianza (ANOVA), se observa que el factor A (orientación de fibra) tiene mayor influencia sobre la variable respuesta, en relación con el factor B (número de capas).

- Las diferentes configuraciones de material compuesto laminado fueron aplicadas como propuesta en un modelo de caja de impacto rectangular mediante simulación, en donde en base a la evaluación de los distintos criterios de desempeño en absorción de energía ante impacto, se encontró que las configuraciones de material A (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ)]_{4s}$), B (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (\pm 45^\circ)]_{2s}$) y C (8 capas – $[(0^\circ/90^\circ) / (30^\circ/-60^\circ) / (60^\circ/-30^\circ) / (0^\circ/90^\circ)]_s$) muestran mejores resultados, en particular la primera.

Estas configuraciones fueron aplicadas en 16 modelos diferentes de cajas de impacto con diferentes geometrías, en donde el modelo con sección hexagonal y forma cónica demostró ser más efectiva. A dicho modelo se le aplicaron diferentes configuraciones de triggers, y se observó que con una configuración con trigger al inicio se mejoró los resultados antes obtenidos, el cual incluso mostró un mejor desempeño que el modelo original en acero, luego de una comparativa realizada al ser estos modelos implementados en un sistema de barra de parachoques simulado.

RECOMENDACIONES

A partir de la realización de este trabajo, surgen una serie de recomendaciones que pueden ser considerados en trabajos futuros:

- Si se desea tener optimización en el proceso de síntesis o fabricación de materiales compuestos, o en su defecto, para fabricar componentes basados en este tipo de material, la aplicación del método por infusión de resina puede resultar en una alternativa interesante desde el punto de vista de relación de ahorro de fibra-resina, mayor volumen y menor tiempo de fabricación; siempre y cuando se considere sus costos de aplicación.
- El tipo de resina utilizada se puede sustituir por otro tipo, para fines comparativos. Así mismo, las proporciones en la relación fibra/matriz, puede ser investigadas.
- Basado en los resultados obtenidos se puede estudiar la respuesta en una situación de impacto real de un vehículo, utilizando cajas de impacto en base al modelo optimizado de este trabajo.
- Estudiar los posibles métodos para conseguir un excelente medio de unión entre componentes a base de material compuesto y componentes en acero.
- Optimización del diseño del conjunto del sistema de barra de parachoques implementado un diseño donde la barra de parachoques y caja de impacto para que funcionen como un solo componente, sin la necesidad de utilizar un medio para la unión entre ellos.

GLOSARIO

A

Agente de curado: Producto químico de composición pura o compuesta el cual se añade a un material o superficie para que esta se endurezca (INDUSTRIAPEDIA, s.f.).

Aglomerante: Material con el que es posible la unión de fragmentos o partes de una o varias sustancias, dando así una cohesión física al conjunto (Real Academia Española, s.f.).

ANOVA: Herramienta estadística de Análisis de Varianza, siendo una fórmula estadística que permite la comparación de la varianza del promedio de diferentes grupos en un estudio, para así rechazar la hipótesis nula o aceptar la hipótesis alternativa (Ortega, s.f.).

C

Caracterización: Es la acción de determinar de las propiedades o atributos distintivo de alguien o algo, para que así se diferencie de los demás (Real Academia Española, s.f.).

Curado: Proceso de endurecimiento, secado, fortalecimiento o curtido (Real Academia Española, s.f.).

E

Ésteres: Son compuestos orgánicos derivados del petróleo que resultan de la sustitución de un átomo de hidrogeno de un ácido por un radical alcohólico (Real Academia Española, s.f.).

Estratificación: Es la acción de disponer o situar diferentes partes de un algo en capas paralelas, es decir que se colocan una sobre otra (Gómez, 2022).

F

FEA: Se refiere al método de los elementos finitos por sus siglas en inglés, siendo este un método de aproximación en la solución de problemas continuos. La solución del problema se logra dividiendo este dividiendo en un número finito de partes o elementos (Tekkaya & Soyarslan, 2014).

Fenólicas: Son productos que se caracterizan por endurecerse por la elevación de la temperatura, exposición a radiación, o por la acción de alguna sustancia química (Real Academia Española, s.f.).

Fibras naturales: Son filamentos de origen biológico que provienen directamente de vegetales o animales, que al hilarse producen hilos o hebras (CONABIO, 2020).

Fibras sintéticas: Son un tipo de fibra que se obtienen de una variedad de productos derivado del petróleo, tales como fibras de carbono, vidrio, etc. (QUIMICA MEXIBRAS, s.f.).

FRPs: Se refiere a los polímeros con refuerzo de fibras, por sus siglas en ingles.

L

Lámina: Es un pieza delgada y plana de cualquier material (Real Academia Española, s.f.).

Laminado: Denota que está dotado o formado de láminas (Real Academia Española, s.f.).

M

Matriz polimérica: En el campo de materiales refiere a un material o sustancia con características plásticas que se caracteriza por baja densidad, resistencia a corrosión, bajo coste, baja resistencia mecánica y alta tenacidad, que se utiliza como medio de unión (PEREZCAMPS, s.f.).

P

Probeta: Se refiere a una muestra de cualquier material o sustancia que se utiliza para someterse a ensayos de diferente índole, como resistencia, elasticidad, etc. (Real Academia Española, s.f.).

R

Resina: Sustancia espesa que no se disuelve con el agua, proveniente de las plantas o de un laboratorio a partir de productos químicos. Son utilizada en la producción de plásticos, tintas, medicamentos, etc. (Real Academia Española, s.f.).

S

Seguridad pasiva: Se refiere a los sistemas que se adoptan en los vehículos con el propósito de proteger la integridad física de lo ocupantes del mismo, reduciendo así la consecuencia en e evento de un accidente (Fundación MAPFRE, s.f.).

Simulación numérica: Recreación matemática de un determinado proceso natural, físico, de ingeniería, económico o biológico (ITMATI, s.f.).

Síntesis: Proceso por el cual se obtiene un producto o compuesto a partir de otros materiales o sustancias (Real Academia Española, s.f.).

T

Trama: Representan los hilos que se entrecruzan y entrelazan de forma transversal a la urdimbre para formar una tela (Real Academia Española, s.f.).

U

Urdimbre: Representan los hilos que van dispuestos de forma paralela a lo largo del tejido de una tela (Real Academia Española, s.f.).

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, M. I., & Anjaneyulu, J. (2018). Effect of fiber-matrix volume fraction and fiber orientation on the design of composite suspension system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455(1). doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012104
- Altair University. (2019). *Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide* (5th ed.). Altair Engineering, Inc. Recuperado de https://www.advanced-eng.cz/wp-content/uploads/2019/11/eBook_Practical-Aspects-of-Finite-Element-Simulation.pdf
- Alvarez, C. A., & Orozco, Y. M. (2022). *Guía: Laboratorio de comportamiento mecánico de materiales*. 1ra ed. Editorial UAM - Universidad Autónoma de Manizales. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/217478>
- Amid, R., Fawaz, Z., & Ghaemi, H. (2015). Energy absorption rate of composite tube as a function of stacking sequence using finite element method. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(6), 709–718. doi: 10.1515/secm-2012-0171
- Ammar, S., Wonnie, I., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2019). Polymers-based nanocomposite coatings. En P. Nguyen, S. Rtimi, & C. Ouellet (Eds.), *Nanomaterials-Based Coatings: Fundamentals and Applications* (1ra ed., pp. 9–39). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-815884-5.00002-8
- ANSYS. (2013). *ANSYS Composite PrePost User's*. SAS IP, Inc. Recuperado de <https://www.pdfdrive.com/ansys-composite-prepost-users-guide-portal-de-e12370870.html>
- ANSYS. (2021). *Mesh Metric*. Recuperado de https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb_msh/msh_metrics.html
- Anto, A. das, Mia, S., & Hasib, M. A. (2019). The influence of number and orientation of ply on tensile properties of hybrid composites. *JPhys Materials*, 2(2). doi: 10.1088/2515-7639/aaff7a
- Aristizabal, A., & Manrique, M. (2017). *Ensayos de tensión*. 1ra ed. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/145914>

- Arumugaprabu, V., Ko, T. J., Uthayakumar, M., & Deepak, R. (2019). Failure analysis in hybrid composites prepared using industrial wastes. En M. Jawaid, M. Thariq, & S. Naheed (Eds.), *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (1ra ed., pp. 229–244). doi: 10.1016/B978-0-08-102293-1.00011-5
- ASM International. (2002). *Atlas of Stress-Strain Curves*. 2da ed. ASM International.
- Bajpai, P. (2018). Paper and Its Properties. En Biermann's *Handbook of Pulp and Paper: Paper and Board Making* (3ra ed., Vol. 2, pp. 35–63). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-814238-7.00002-7
- Bazli, M., Ashrafi, H., Jafari, A., Zhao, X. L., Singh Raman, R. K., & Bai, Y. (2019). Effect of fibers configuration and thickness on tensile behavior of GFRP laminates exposed to harsh environment. *Polymers*, 11(9). doi:10.3390/polym11091401
- Bender, D., Schuster, J., & Heider, D. (2006). Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing. *Composites Science and Technology*, 66(13), 2265–2271. doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2005.12.008
- Bru, T. (2018). *Material characterisation for crash modelling of composites* [Tesis de Doctorado, Chalmers University Of Technology]. Recuperado de https://research.chalmers.se/publication/505312/file/505312_Fulltext.pdf
- Bunsell, A. , & Renard, J. (2005). *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials* . B. Cantor, M. Goringe, & E. Ma, Eds. 1ra ed. IOP Publishing Ltd. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=yEymuYjWNEoC&pg=PA129&dq=Typical+fibres+volume+fractions+for+eglass+woven+reinforcement&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjNuythPX4AhV1ZTABHaC6BJ8Q6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=Typical%20fibre%20volume%20fractions%20for%20eglass%20woven%20reinforcement&f=false>
- Buragohain, M. K. (2017). *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. CRC Press.
- Campbell, F. (2010). Chapter 16: Structural Analysis. En *Structural Composite Materials* (1ra ed., pp. 429–430). ASM International. Recuperado de <https://www.asminternational.org/>

- Cherniaev, A., Montesano, J., & Butcher, C. (2018). Modeling the Axial Crush Response of CFRP Tubes using MAT054, MAT058 and MAT262 in LS-DYNA ®. Trabajo presentado en 15th International LS-DYNA® Users Conference: Composites. Recuperado de <https://www.dynalook.com/conferences/15th-international-ls-dyna-conference/composites/modeling-the-axial-crush-response-of-cfrp-tubes-using-mat054-mat058-and-mat262-in-ls-dyna-r>
- CINAE. (2022). Cifras de la Industria. Recuperado de <https://www.cinae.org.ec/>
- Clarke, J. (1996). Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Handbook. 1er ed. Taylor & Francis.
- CONABIO. (2020). Fibras naturales. Recuperado de <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/fibras-naturales>
- Davoudi, M., & Kim, C. (2018). Evaluation of the axial crashworthiness of thin-walled structures with various and combined cross sections. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(9), 4271–4281. doi: 10.1007/s12206-018-0825-1
- Derradji, M., Wang, J., & Liu, W. (2018). Fiber-Reinforced Phthalonitrile Composites. En *Phthalonitrile Resins and Composites: Properties and Applications*. 1ra ed. 241–294. William Andrew Publishing. doi: 10.1016/B978-0-12-812966-1.00005-6
- Djafari, S. (2017). Physical and mechanical properties of natural fibers. En M. Fan & F. Fu (Eds.), *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. 1ra ed. 59–83. Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0
- Ahmed Elkady. (3 de septiembre de 2021). #33 ABAQUS Tutorial: Metal Plasticity | Engineering to True Stress-Strain Conversion [Archivo de video]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=3Q1mhU72CRk&ab_channel=AhmedElkady
- Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. (s.f.). FÍSICA I. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/46852044/practica4pdf/>
- Eснаоla, A. (2016). Desarrollo de estructuras de impacto en materiales compuestos para vehículos ligeros. desarrollo de estructuras de impacto en materiales compuestos para vehículos ligeros (Tesis doctoral, Mondragon Unibertsitatea). Recuperado de .

https://www.researchgate.net/publication/316827632_DESARROLLO_DE_ESTRUCTURAS_DE_IMPACTO_EN_MATERIALES_COMPUESTOS_PARA_VEHICULOS_LIGEROS

- Faizal, M., Mohd, Y., & Dalimin, M. (2006). Tensile Property of Hand Lay-Up Plain-Weave Woven E-Glass/Polyester Composite: Curing Pressure and Ply Arrangement Effect. *Journal of Science and Technology*, 19, 27–34. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/TENSILE-PROPERTY-OF-HAND-LAY-UP-PLAIN-WEAVE-WOVEN-Faizal-Beng/be2d986120a8aec8397d87d1f73f382db86a1f24#citing-papers>
- FerrePro. (2020). El acero en el automóvil: Proporciones. Recuperado de <http://ferrepro.mx/el-acero-en-el-automovil-proporciones/>
- Figueroa, C., Ordoñez, U., & Carvajal de la Osa, J. (2019). Comportamiento mecánico de los materiales. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/348578293>
- Flanagan, M. T. (2011). BoxCox Class: Box-Cox transformation. Recuperado de <https://www.ee.ucl.ac.uk/~mflanaga/java/BoxCox.html>
- Fontaras, G., Zacharof, N. G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 97–131. doi: 10.1016/J.PECS.2016.12.004
- Fundación MAPFRE. (s.f.). ¿Qué son los elementos de Seguridad Pasiva? Recuperado de <https://www.fundacionmapfre.org/educacion-divulgacion/prevencion/prevencion-accidentes-mayores/elementos-seguridad-pasiva/>
- GlobeNewswire. (2020). Global Reinforced Plastics Industry. Recuperado de <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/07/15/2062811/0/en/Global-Reinforced-Plastics-Industry.html>
- Goodno, B. J., & Gere, J. M. (2016). *Mecánica de materiales*. J. Reyes, Ed. 8va ed. Cengage Learning. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/93273>
- Gómez, L. (2022). Definición de Estratificación. Definición ABC. Recuperado de <https://www.definicionabc.com/general/estratificacion.php>
- Greene, J. (2021). Thermoset Polymers. En *Automotive Plastics and Composites*. 1ra ed., 175–190). William Andrew Publishing. doi: 10.1016/B978-0-12-818008-2.00002-7

- Gurit. (s.f.). GUIDE TO COMPOSITES. Gurit. Recuperado de <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- Guthrie, W. (2022). NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. En NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology. Recuperado de <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2012). Análisis y Diseño de Experimentos. En M. Toledo, P. Roin, M. Rocha, A. Delgado, & Z. García, (Eds.), 3ra ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES. Recuperado de <https://www.facebook.com/pages/Interfase->
- Hasanbeigi, A., Bhadbhade, N., & Ghosh, A. (2022). Air Pollution from Global Steel Industry: An International Benchmarking of Criteria Air Pollutants Intensities. Recuperado de <https://www.globalefficiencyintel.com>
- Huang, J., Fu, S., & Gan, L. (2019). Lignin-Modified Thermosetting Materials. En Lignin Chemistry and Applications. (1ra ed. pp., 163–180). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-813941-7.00006-0
- INDUSTRIAPEDIA. (s.f.). Qué es agente de curado. Recuperado de <https://industriapedia.com/que-es-agente-de-curado/>
- ITMATI. (s.f.). Simulación numérica. Recuperado de http://www.itmati.com/Simulacion_numerica
- Jamir, M. R. M., Majid, M. S. A., & Khasri, A. (2018). Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications. En M. Jawaid & M. Thariq (Eds.), Sustainable Composites for Aerospace Applications (1ra ed., pp. 155–170). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-102131-6.00008-6
- Kar, K., Naqvi, S., & Ramkumar, J. (2022). Fly ash/glass fiber/carbon fiber-reinforced thermoset composites. En Handbook of Fly Ash (1ra ed., pp. 373–400). Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/B978-0-12-817686-3.00023-2
- Kar, K., Pal, T., Pramanik, S., Verma, K. D., Naqvi, S. Z., & Manna, P. (2022). Fly ash-reinforced polypropylene composites. En K. Kar (Ed.), Handbook of Fly Ash (1ra ed., pp. 243–270). Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/B978-0-12-817686-3.00021-9
- Kaw, A. K. (2006). Mechanics of composite materials (2nd ed.). Taylor & Francis Group. Recuperado de https://sarrami.iut.ac.ir/sites/sarrami.iut.ac.ir/files/files_course/01-mechanics_of_composite_materials_sbookfi.org_.pdf

- Komus, A., & Beley, N. (2018). Composite Applications for Ground Transportation. En C. Zweben & P. Beaumont (Eds.), *Comprehensive Composite Materials II* (2da ed., Vol. 3, pp. 420–438). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09950-1
- Kuppusamy, R., Rout, S., & Kumar, K. (2020). Advanced manufacturing techniques for composite structures used in aerospace industries. En K. Kumar & J. Davim (Eds.), *Modern Manufacturing Processes* (1ra ed., pp. 3–12). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/b978-0-12-819496-6.00001-4
- Kwak, H., Park, G., Seong, H., & Kim, C. (2019). Integrated Design of D.D.I., Filament Winding and Curing Processes for Manufacturing the High Pressure Vessel (Type II). *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32(83). doi: 10.1186/S10033-019-0396-9
- Levin, R., Rubin, D., Rastogi, S., & Husain, M. (2012). *Statistics for Management* (7ma ed.). Pearson Education India.
- Li, A. (2019). Optimization of Composite Structures for Crashworthiness [Tesis de maestría, Delft University of Technology]. Recuperado de <http://repository.tudelft.nl/>.
- Livermore Software Technology Corporation. (2016). LS-DYNA ® KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II (9na ed., Vol. 2). Recuperado de https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R9.0.pdf
- LS-DYNA Support. (s.f.). Hourglas. Recuperado de <https://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
- Manaia, J., Manaia, A., & Rodrigues, L. (2019). Industrial Hemp Fibers: An Overview. *MDPI*, 7(12), 160. doi: 10.3390/fib7120106
- Mastrogiannakis, I., & Vosniakos, G. C. (2020). Exploring structural design of the francis hydro-turbine blades using composite materials. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 18(1), 43–55. doi: 10.22190/FUME190609001M
- Maximize Market Research. (2020). Global Fiber reinforced Composites Market - Industry Analysis and forecast (2019-2026). Recuperado de <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-fiber-reinforced-composite-market/13377/>
- M'barek Badr, Hasanbeigi Ali, & Gray Matthew. (2022). Global Steel Production Costs. Recuperado de <https://www.globalefficiencyintel.com/global-steel-production-costs-report>

- Melo, O., López, L., & Melo, S. (2020). Diseño de Experimentos: Métodos y Aplicaciones . En J. Monroy & L. Fernández (Eds.), 2da ed. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias.
- Mohammad, O. (2011). The automotive body manufacturing systems and processes (1ra ed.). Wiley. Recuperado de <https://www.wiley.com/en-us/The+Automotive+Body+Manufacturing+Systems+and+Processes-p-9780470976333>
- Mordor Intelligence. (2022). Fiber reinforced composites market size & share analysis - growth trends & forecasts (2023 - 2028). Recuperado de <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-composites-market>
- NSTSA. (s.f.). Crash Simulation Vehicle Models. Recuperado de <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>
- Ogin, S., Brondsted, P., & Zangenberg, J. (2016). Composite materials: Constituents, architecture, and generic damage. En R. Talreja & J. Varna (Eds.), Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials (1ra ed., pp. 3–23). Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-1-78242-286-0.00001-7
- Oliveira, C. G. de, Margem, F. M., Monteiro, S. N., & Lopes, F. P. D. (2017). Comparison between tensile behavior of epoxy and polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4), 406–410. doi: 10.1016/J.JMRT.2017.08.002
- Ortega, C. (s.f.). Anova: Qué es y cómo hacer un análisis de la varianza. Recuperado de <https://www.questionpro.com/blog/es/anova/>
- Pandita, S. D., Yuan, X., Manan, M. A., Lau, C. H., Subramanian, A., & Wei, J. (2014). Evaluation of jute/glass hybrid composite sandwich: Water resistance, impact properties and life cycle assessment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(1), 14–25. doi: 10.1177/0731684413505349
- Park, S.-J., & Seo, M.-K. (2011). Types of Composites. *Interface Science and Technology*, 18, 501–629. doi: 10.1016/B978-0-12-375049-5.00007-4
- PEREZCAMPS. (s.f.). Materiales compuestos: tipos, ejemplos y usos. Recuperado de <https://perezcams.com/es/materiales-compuestos/>


- PINTULAC. (2022). KIT RESINA EPOXICA SUPERCAS11 CON CATALIZADOR 1:1 1000GR WESCO. Recuperado de <https://www.pintulac.com.ec/kit-resina-epoxica-supercast11-con-catalizador-1-1-1000gr-wesco.html>
- Poplavko, Y. (2019). Mechanical properties of solids. En *Electronic Materials* (1ra ed., pp. 71–93). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-815780-0.00002-5
- QUIMICA MEXIBRAS. (s.f.). Fibras sintéticas. Recuperado de <https://q-mexibras.com.mx/fibras-sinteticas/>
- QUINVENSA CIA. LTDA. (2022). Woven Roving. Recuperado de <https://quivenza.com/producto/woven-roving/>
- Rabiee, A., & Ghasemnejad, H. (2022). Finite Element Modelling Approach for Progressive Crushing of Composite Tubular Absorbers in LS-DYNA: Review and Findings. *Journal of Composites Science*, 6(1), 1–42. doi: 10.3390/jcs6010011
- Rahman, A. (2019). Effects of nanofibers on properties of geopolymer composites. En F. Pacheco, M. Diamanti, A. Nazari, C. Granqvist, A. Pruna, & S. Amirhanian (Eds.), *Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications* (2da ed., pp. 123–140). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-102641-0.00006-2
- R-CORDER. (2022). Transformación de Box-Cox en R. Recuperado de <https://r-coder.com/transformacion-box-cox-r/>
- Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la lengua española: RAE - ASALE. 23.^a Ed., Versión 23.6 [En Línea]. Recuperado de <https://dle.rae.es>
- Revista Autocrash. (2018). Crash box trasero, pieza infaltable en el vehículo. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://www.revistaautocrash.com/crash-box-trasero-pieza-infaltable-en-el-vehiculo/>
- Richardson, E., & Bahaadini, A. (2015). Design, analysis and verification of composite components subjected to crash load cases [Tesis de maestría, Blekinge Tekniska Högskola]. Recuperado de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:900512/FULLTEXT02.pdf>
- Rock West Composites. (2018). How Fiber Direction Influences Tube and Plate Properties. Recuperado de <https://www.rockwestcomposites.com/blog/how-fiber-direction-influences-tube-and-plate-properties/>

- Rogers, C. (2022). Basic Numbers and Calculations for Composites. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://explorecomposites.com/articles/design-for-composites/basic-numbers-and-calculations-for-composites/>
- Rohen, L. A., Neves, A. C. C., dos Santos, J. L., Nascimento, L. F. C., Monteiro, S. N., de Assis, F. S., Simonassi, N. T., & da Silva, L. C. (2018). Comparative analysis of the tensile properties of polyester and epoxy composites reinforced with hemp fibers. *Materials Science Forum*, 930, 201–206. doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.930.201
- Roy, A., Naskar, A., Ghosh, A., Adhikari, J., Saha, P., & Ghosh, M. (2021). Hybrid Plastics and Natural Materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. doi: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00075-4
- Saif, M. (2022). List of mechanical properties that every mechanical engg should know. [Entrada de blog]. Recuperado de <https://www.theengineerspost.com/mechanical-properties-of-materials/>
- Sawalha, S. H., Ma'ali, R., Mushatti, H., & Mohammad, M. (2022). Acidic whey as a novel coupling agent for composites based on E-Glass fibers and low-density polyethylene. *Journal Res. (N. Sc.)*, 36(1). Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/358246311>
- Srinivas, K., Lakshumu, A., & Raju, M. (2017). A Review on Chemical and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *International Journal of Performability Engineering*, 13(2), 189–200. doi: 10.23940/ijpe.17.02.p8.189200
- Statistics How To. (2022). Box Cox Transformation: Definition, Examples. Recuperado de <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/normal-distributions/box-cox-transformation/>
- Subheddar, K. et al., (2020). Effect of fibre orientation on mechanical properties of carbon fibre composites. En *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 27. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/350809879>
- Tabiei, A., Yi, W., & Goldberg, R. (2005). Non-linear strain rate dependent micro-mechanical composite material model for finite element impact and crashworthiness simulation. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40(7), 957–970. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2004.10.004

- Taiwo, E., Yahya, K., & Haron, Z. (2019). Potential of Using Natural Fiber for Building Acoustic Absorber: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1262(1). doi: 10.1088/1742-6596/1262/1/012017
- Tekkaya, E., & Soyarslan, C. (2014). Finite Element Method. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 508–514. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16699
- Tribology-abc. (s.f). Coefficient of friction, Rolling resistance, Air resistance, Aerodynamics. Recuperado de <https://www.tribology-abc.com/abc/cof.htm>
- UNECE. (2021). UN Regulation No. 42 - Amend.2. Recuperado de <https://unece.org/transport/documents/2021/02/standards/un-regulation-no-42-amend2>
- Vangi, D. (2020). Structural behavior of the vehicle during the impact. En *Vehicle Collision Dynamics*. 1–27. Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-812750-6.00001-9
- Vázquez, A. (2020). Características de la fibra de vidrio. – REAXSOL. Recuperado de <https://www.reaxsol.com/2020/02/04/caracteristicas-de-la-fibra-de-vidrio/>
- Velling, A. (2020). Ultimate Tensile Strength [Entrada de blog]. Recuperado de <https://fractory.com/ultimate-tensile-strength/>
- Wang, C., Li, Y., Zhao, W., Zou, S., Zhou, G., & Wang, Y. (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138–139, 489–501. doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2018.01.032
- Wang, H. W., Zhou, H. W., Gui, L. L., Ji, H. W., & Zhang, X. C. (2014). Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 733–739. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.09.020
- Zhang, J., Zhang, W.-H., & Zhu, J.-H. (2011). An extended stress-based method for orientation angle optimization of laminated composite structures. *Acta Mechanica Sinica*, 27(6), 977–985. doi: 10.1007/S10409-011-0506-0
- Zweben, C. (2015). Composite Materials. En M. Kutz (Ed.), *Mechanical Engineers' Handbook*. 4ta ed., Vol. 1, pp. 401–438. WILEY.

ANEXOS

ANEXO A: Informes de laboratorio




LenMav
LABORATORIO
ENSAYO DE MATERIALES

Ing. J. Anibal Viñán B. MsC.

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| N° 1 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: | MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | |
| MARCA: | JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 1 | 2 | 3 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - A - 01 | MCL - A - 02 | MCL - A - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 3.76 | 3.75 | 3.83 |
| ANCHURA [mm] | 25.11 | 25.09 | 25.38 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 94.41 | 94.09 | 97.21 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 5.340.E+00 | 4.790.E+00 | 3.360.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 11.38 | 14.12 | 15.90 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 121.00 | 150.00 | 164.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 22.72 | 28.22 | 31.78 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 241.00 | 300.00 | 327.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 1.00 | 0.50 | 0.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:



Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
GERENTE DEL LABORATORIO
ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de este documento.

Dir: Calle Roma N°7 y Padua, Cda Politécnica

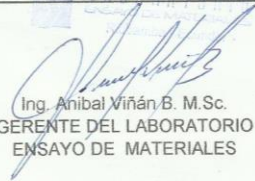
Tel: 032924420 - Cel: 0987260955

email: jvinan54@lenmav.com
Riobamba - Ecuador

1/1

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| N° 2 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | | |
| MARCA: JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 4 | 5 | 6 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - B - 01 | MCL - B - 02 | MCL - B - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 3.74 | 3.74 | 3.72 |
| ANCHURA [mm] | 25.18 | 24.93 | 24.73 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 94.17 | 93.24 | 92.00 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 2.160.E+00 | 2.640.E+00 | 3.100.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 10.28 | 9.68 | 10.46 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 109.00 | 104.00 | 114.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 20.56 | 19.32 | 20.90 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 218.00 | 207.00 | 227.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 6.00 | 0.50 | 1.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:



 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

1/1

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| | | N° 3 | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: | MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | |
| MARCA: | JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 7 | 8 | 9 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - C - 01 | MCL - C - 02 | MCL - C - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 4.19 | 4.14 | 4.18 |
| ANCHURA [mm] | 24.91 | 25.36 | 24.71 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 104.37 | 104.99 | 103.29 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 8.680.E+00 | 4.450.E+00 | 5.690.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 11.50 | 12.68 | 11.68 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 110.00 | 121.00 | 113.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 22.98 | 25.32 | 23.34 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 220.00 | 241.00 | 226.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 0.00 | 1.00 | 3.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:


 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de este documento.

1/1

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|---------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| N° 4 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | | |
| MARCA: JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | | CÓD IDENT: M2 |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 10 | 11 | 12 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - D - 01 | MCL - D - 02 | MCL - D - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPEJOR [mm] | 6.09 | 6.1 | 5.72 |
| ANCHURA [mm] | 25.17 | 25.53 | 26 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 153.29 | 155.73 | 148.72 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 1.890.E+01 | 2.273.E+01 | 2.018.E+01 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 20.04 | 21.20 | 19.30 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 131.00 | 136.00 | 130.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 40.06 | 42.40 | 38.56 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 261.00 | 272.00 | 259.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 2.00 | 1.50 | 1.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:


 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de este documento.

1/1

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| N° 5 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPOXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: | MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | |
| MARCA: | JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 13 | 14 | 15 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - E - 01 | MCL - E - 02 | MCL - E - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 5.95 | 5.91 | 5.91 |
| ANCHURA [mm] | 25.38 | 24.91 | 25.63 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 151.01 | 147.22 | 151.47 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 2.180.E+00 | 1.370.E+00 | 5.540.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 15.94 | 29.88 | 15.88 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 106.00 | 203.00 | 105.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 31.84 | 30.96 | 31.74 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 211.00 | 210.00 | 210.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 9.00 | 6.00 | 6.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

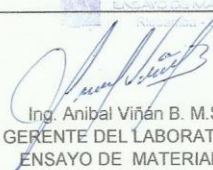
Aprobado por:


 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|--|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| Nº 6 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVIL.FS" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC.DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPOXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: | MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | |
| MARCA: | JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 16 | 17 | 18 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - F - 01 | MCL - F - 02 | MCL - F - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 6.03 | 5.92 | 5.74 |
| ANCHURA [mm] | 25.24 | 25.37 | 25.23 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 152.20 | 150.19 | 144.82 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 1.164.E+01 | 9.230.E+00 | 9.730.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 13.92 | 13.86 | 13.38 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 91.00 | 92.00 | 92.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 27.82 | 27.70 | 26.74 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 183.00 | 184.00 | 185.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 5.50 | 5.50 | 18.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:

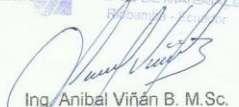

 Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
 GERENTE DEL LABORATORIO
 ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

1/1

| INFORME DE RESULTADOS | | | |
|--|---|-------------------------|--------------|
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | Denominación: RG 18 - 1 | |
| N° 7 | | | |
| SOLICITADO POR: | Ing. Edgar Javier Loor Solórzano | | |
| PROYECTO DE TESIS: | "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN MATERIAL COMPUESTO TIPO LAMINADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPÓXICA PARA CAJAS DE IMPACTO DE AUTOMÓVILES" | | |
| DIRECCION: | ESPOCH - FAC. DE MECÁNICA MAESTRÍA DISEÑO MECÁNICO | | |
| TIPO DE MATERIAL: | COMPUESTO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA EPÓXICA | | |
| MATERIAL: | LÁMINA DE FIBRA DE VIDRIO - RESINA EPÓXICA | | |
| FECHA DE FABRICACIÓN: | 2022 - 08 | | |
| NORMA UTILIZADA: | ASTM D3039/D3039M - 17 | | |
| FECHA DE ENSAYO: | 30-ago-22 | | |
| EQUIPO UTILIZADO: | MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS - WAW600B | | |
| MARCA: | JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD | | |
| SERIE: 7136 | CERTIFICADO: LNM-F-2016500064D | CÓD IDENT: M2 | |
| NÚMERO DE LA MUESTRA | 19 | 20 | 21 |
| DESIGNACIÓN DEL MATERIAL | MCL - F - 01 | MCL - F - 02 | MCL - F - 03 |
| CARACTERÍSTICA | PROBETA | PROBETA | PROBETA |
| ESPESOR [mm] | 0.58 | 0.62 | 0.49 |
| ANCHURA [mm] | 26.22 | 25.52 | 25.77 |
| LONGITUD INICIAL [mm] | 50 | 50 | 50 |
| SECCION TRANSVERSAL [mm ²] | 15.21 | 15.82 | 12.63 |
| MODULO DE ELASTICIDAD [GPa] | 2.690.E+00 | 2.450.E+00 | 4.370.E+00 |
| CARGA DE FLUENCIA [kN] | 1.86 | 1.88 | 1.86 |
| ESFUERZO DE FLUENCIA [MPa] | 122.00 | 119.00 | 147.00 |
| CARGA MAXIMA [kN] | 3.70 | 3.74 | 3.68 |
| ESFUERZO MAXIMO [MPa] | 243.00 | 236.00 | 291.00 |
| PORCENTAJE DE ELONGACION [%] | 0.50 | 9.50 | 9.00 |
| OBSERVACIONES: | | | |

Aprobado por:



Ing. Anibal Viñan B. MsC.
GERENTE DEL LABORATORIO
ENSAYO DE MATERIALES

Documento válido únicamente con el sello de la Empresa. El laboratorio no se responsabiliza por la reproducción parcial o total de éste documento.

1/1

ANEXO B: Curvas esfuerzo-deformación de acero

